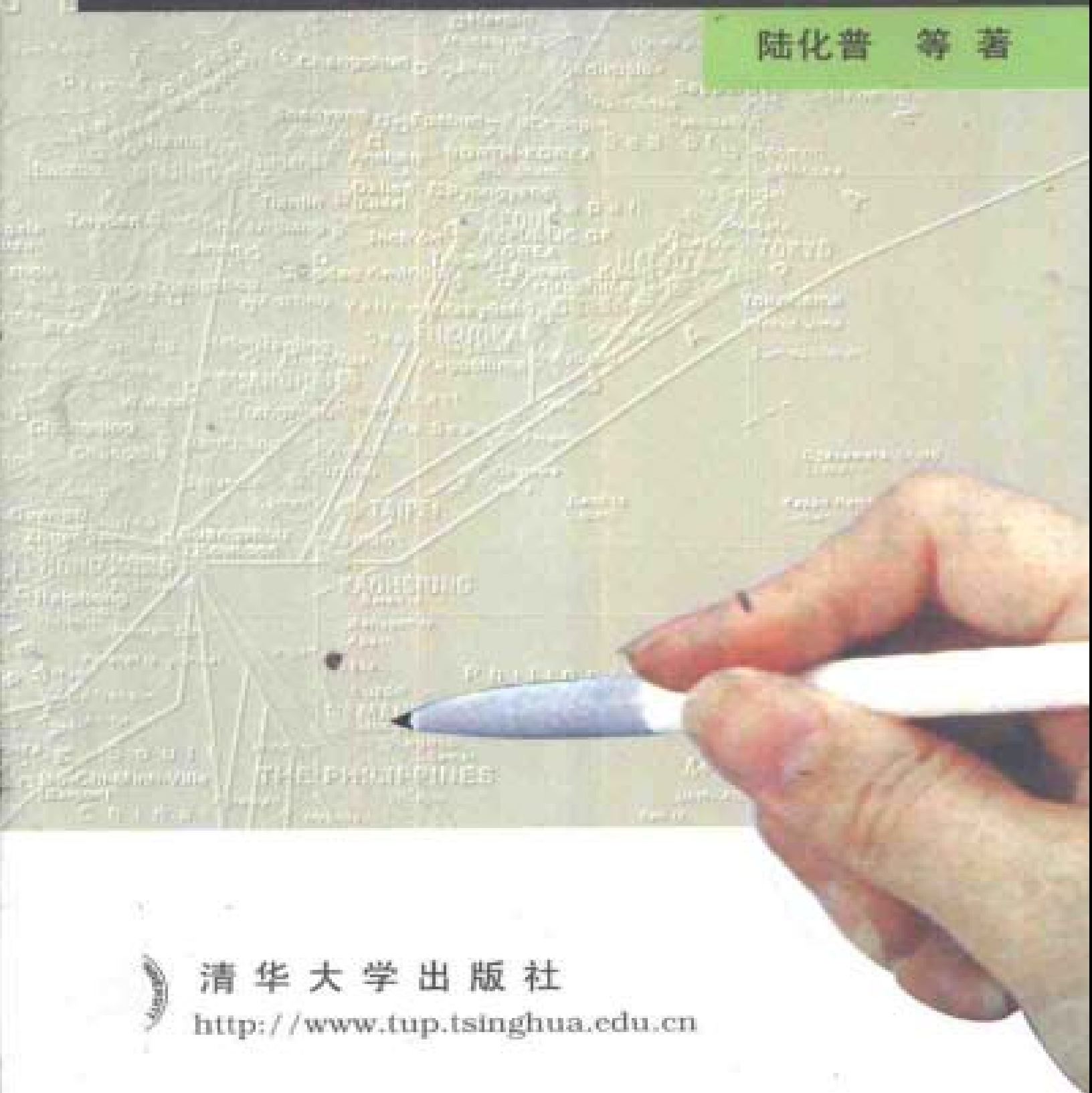


交通规划理论与方法

陆化普 等著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑 曹淑贞
封面设计 傅瑞学

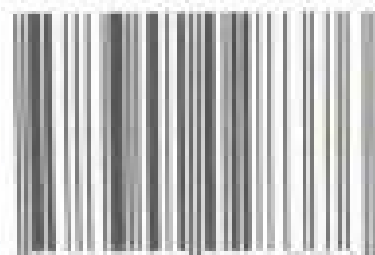
内 容 提 要

本书针对交通规划中亟需解决的诸多问题，系统阐述了交通规划的基本理论和方法；全面反映了国内外交通规划和交通工程领域的最新理论和研究成果；广泛探讨了交通规划建模理论、方法与应用。主要包括：交通调查、交通与土地利用、交通发生与吸引、交通分布、交通方式划分、非集计模型、交通分配及其扩展模型、组合模型、动态交通分析以及规划方案的评价等。

本书具有系统性强、全面反映最新理论和研究成果、实用性好等特点，并对发展方向作了探索性论述。

本书可作为高等院校交通运输专业本科生和研究生教材，亦是从事交通规划研究、制定交通规划人员的重要参考书。

ISBN 7-302-02837-0



9 787302 028376 >

定价：16.50 元

108

2.2
2.7

交通规划理论与方法

陆化普 等著



A0968427

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书针对交通规划中亟需解决的诸多问题,系统阐述了交通规划的基本理论和方法;全面反映了国内外交通规划和交通工程领域的最新理论 and 研究成果;广泛探讨了交通规划建模理论、方法与应用。主要包括:交通调查、交通与土地利用、交通发生与吸引、交通分布、交通方式划分、非集计模型、交通分配及其扩展模型、组合模型、动态交通分析以及规划方案的评价等。

本书具有系统性强、全面反映最新理论和研究成果、实用性好等特点,并对发展方向作了探索性论述。

本书可作为高等院校交通运输专业本科生和研究生教材,亦是从事交通规划研究、制定交通规划人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交通规划理论与方法/陆化普著. —北京:清华大学出版社, 1998. 2

ISBN 7-302-02837-0

I. 交… II. 陆… III. ①交通规划-理论②交通规划-方法
IV. U491.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 02021 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

因特网地址:www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:北京通县人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:850×1168 1/32 印张:11.75 字数:303 千字

版 次:1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02837-0/TU·130

印 数:0001~4000

定 价:16.50 元

前 言

随着国民经济的高速发展和城市化进程的加快,我国机动车拥有量及道路交通量急剧增加。尤其是在大城市,交通拥挤阻塞以及由此导致的交通事故的增加,环境污染的加剧,是我国城市面临的极其严重的“城市病”之一,已成为国民经济进一步发展的瓶颈问题。面对这种形势,如何确定我国交通运输发展战略,从而建立起可持续发展的交通环境,为 21 世纪我国国民经济的持续腾飞奠定基础,是亟待解决的课题。

城市交通系统是一个相当复杂的系统,解决城市交通问题必须采取综合对策。总体上看,应从如下“三个层次、两个方面”着手,同时采取措施。所谓三个层次是指:其一是从城市规划、土地利用的角度,避免城市人口、城市功能过度集中,造成交通总需求超过城市的交通容量极限,避免城市商务区土地利用强度过大而使城市交通问题无法解决;其二是从交通结构的角度,采取各种有效措施优先发展交通运输,形成以公共交通为骨干的大运量、快速度的交通运输系统,合理地利用城市有限的土地资源和交通设施;其三是通过提高路网容量,借助科学化、现代化交通管理手段充分有效地利用现有路网等综合措施,使现有交通基础设施发挥最大作用。所谓两个方面就是指从交通需求和交通供给两个方面同时采取措施。

上述从“三个层次、两个方面”解决城市交通问题的基本思想,其核心就是加强城市交通规划的制定和实施。所以,为使我国建立

起高速、安全、准时、舒适、可持续发展的交通环境和综合交通体系,必须做好不同层次的交通规划,尤其要加强区域交通规划、城市综合交通规划和交通管理规划的制定与实施。

经过二十几年的理论研究和工程实践,我国在交通规划理论和方法方面有了很大发展。但是完整的交通规划理论体系尚未完全建立起来。随着城市交通需求的不断增大和日趋多样化,对交通规划理论和技术水平的要求在不断提高。这种客观需要为城市交通规划的发展提供了极好的机遇和挑战。因此,在未来十几年中,中国城市交通规划在基础理论方法、技术手段和应用等方面都会有较大的发展和突破,并将逐步形成完整的科学体系。

为此,作者总结十几年来在国内外从事交通规划、交通工程研究工作的成果,结合教学工作经验,写了这本《交通规划理论与方法》。本书针对交通规划中亟需解决的诸多问题,系统阐述了交通规划的基本理论和方法;总结了国内外交通规划和交通工程领域的最新理论和研究成果;广泛探讨了交通规划建模理论、方法与应用;展望了交通规划理论的研究发展方向。

作者在编写本书时,考虑到加快完善我国的交通规划理论体系的客观需要,,着重对基本思路的剖析与国际最新研究成果的阐述,反映了作者在本研究领域的研究成果和见解,以供国内同行参考。作者力图使本书成为交通规划理论与方法方面本科生和研究生课程教学的一本好教材,也期望本书能成为从事交通规划理论研究的科研工作者以及从事交通规划、交通管理工作的专业技术人员和管理人员一本有价值的参考书。

全书共分 13 章,由陆化普统稿。分工如下:

第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 11 章、第 13 章(陆化普);

第 4 章、第 7 章(宿良);

第 6 章(石京);

第 8 章(刘正凯);

第9章、第12章(陆化普、殷亚峰);
第10章(陆化普、史其信)。

本书的完成也得益于多年来与国内外同行的广泛的学术交流与探讨,以及同清华大学交通研究所研究生们的热烈而深入的讨论。此外,清华大学交通研究所研究生魏锋同学承担了本书计算机输入、排版的主要工作,在此深表谢意。

由于写作时间仓促及作者理论水平有限,本书中难免有诸多不足之处,敬请各位读者批评指正,交流切磋。

陆化普

1997年1月于清华大学

目 录

前言	I
1 交通系统规划	1
1.1 交通规划的必要性	1
1.2 交通规划的系统工程分析方法	7
1.3 交通市场的供求平衡	13
1.4 交通系统规划的过程	22
1.5 城市交通规划的思路与观点	30
2 交通调查	39
2.1 概述	39
2.2 有关交通调查的基本概念和调查方法	42
2.3 国外的主要交通调查及其概要	51
2.4 我国居民出行调查的现状与课题	64
3 交通与土地利用	67
3.1 交通与土地利用的关系	67
3.2 土地利用模型	73
4 交通的发生与吸引	92

4.1	概述	92
4.2	影响交通量产生的因素	92
4.3	生成交通量的预测	95
4.4	发生、吸引交通量的预测	99
4.5	有关发生交通量分析的新动向	102
5	交通分布	109
5.1	概述	109
5.2	增长率法	111
5.3	重力模型法	116
5.4	机会模型法	121
5.5	各种方法的特性比较	123
5.6	从观测路段流量推求 OD 交通量	125
6	交通方式分担	136
6.1	交通方式分担的概念	136
6.2	影响选择交通方式的因素	137
6.3	交通方式选择阶段的分析方法	139
6.4	实用预测模型	143
7	非集计模型的理论与方法	146
7.1	概述	146
7.2	非集计模型的基本理论	148
7.3	常用的非集计行为模型	154
7.4	非集计模型的计算	159
7.5	有关预测的几个问题	175
7.6	非集计模型的研究进展和课题	181

8	交通量分配	192
8.1	交通分配问题的基本概念	192
8.2	交通量分配方法	196
8.3	平衡分配法	197
8.4	交通分配模型中存在的问题	211
9	平衡交通分配模型的扩展	215
9.1	弹性需求分配模型	215
9.2	随机分配模型	222
9.3	考虑路段交通量相互影响的平衡模型	230
9.4	基本数学规划模型的扩展方向	236
10	组合模型	240
10.1	多出行方式的选择	240
10.2	方式间独立的组合模型	242
10.3	考虑方式间相互影响的组合模型	248
10.4	多出行方式中公共交通路线的选择	254
10.5	模型应用中的几个主要问题讨论	258
10.6	组合模型的其它形式及研究前景	259
11	交通需求快速预测模型	269
11.1	通过路段交通量推算 OD 矩阵	269
11.2	简化的交通方式划分模型	283
11.3	概略规划方法	285
11.4	干道模型	286
11.5	边际需求模型	287
12	动态交通分析模型	289

12.1	动态交通分析模型的意义与特征·····	289
12.2	动态交通分配理论发展回顾·····	292
12.3	交通流模型·····	295
12.4	动态系统最优分配模型·····	300
12.5	动态用户最优分配模型·····	312
12.6	动态交通分析的研究展望·····	324
13	交通规划方案的评价·····	327
13.1	社会基础设施建设的效益·····	327
13.2	规划方案评价的基本思路·····	330
13.3	交通规划评价的步骤·····	333
13.4	交通规划的评价主体与评价指标·····	334
13.5	不同评价主体的评价方法·····	336
13.6	交通规划的综合评价法·····	339
13.7	几种主要的评价方法梗概·····	341
	参考文献·····	351

1 交通系统规划

1.1 交通规划的必要性

1.1.1 城市交通问题与交通规划

我国国民经济已经进入高速成长期。20 世纪 80 年代,国民经济发展的实际年平均增长率在 6% 以上。90 年代以来,持续地超过 10%。随着经济的高速发展,城市化速度加快。至 1995 年末,全国设市的城市超过 640 个,其中城市人口在 100 万以上的特大城市 32 个,建制镇多达 16000 个,居住在城镇地区的人口近 3.5 亿人,占全国总人口的 28.85%。自 80 年代以来,我国汽车拥有量年平均增长率为 13.7%,机动车拥有量年平均增长率为 26.4%。

国民经济的持续高速发展、城市化进程的加快、机动车保有量的迅猛增加,导致了交通运输需求的迅速增长,加之我国交通基础设施长期欠账过多和建设速度缓慢,使得交通运输供需不平衡的矛盾日趋尖锐。目前,铁路客运列车普遍超员,货运瓶颈问题无法解决。特别是在大中城市交通堵塞严重,事故率上升,车速普遍下降,公共交通萎缩。面对这种形势,如何确定我国交通运输发展战略,建立起可持续发展的交通环境,为 21 世纪我国国民经济的全面腾飞奠定基础,是亟待解决的课题。

城市交通系统涉及面广,解决城市交通问题必须采取综合措施。总体上看,应根据问题的范围和目的,从如下三个层次上,采取

系统的对策。其一是从城市规划、土地利用的角度,避免城市人口、城市功能过度集中,造成交通总需求超过城市的交通容量极限,避免城市商务区土地利用强度过大而使城市交通问题无法解决;其二是从交通结构的角度,采取各种有效措施优先发展公共交通,形成以公共交通为骨干的快速交通运输系统,合理地利用城市有限的土地资源和交通设施;其三是通过提高路网容量,通过实现城市交通的科学化、现代化管理等措施,充分有效地利用现有道路网,使现有的道路交通基础设施发挥最大作用。

上述从三个层次解决城市交通问题的基本思想、核心问题就是加强城市交通规划的制定和实施。所以,为使我国建立起高速、安全、快捷、舒适、可持续发展的交通环境和适应国民经济发展需要的综合交通体系,必须做好不同层次的交通规划,尤其是要加强区域交通规划、城市综合交通规划和交通管理规划的制定与实施。

1.1.2 交通规划的目的与分类

交通规划的主要目的可以归纳成如下几点:

① 交通规划是建立完善的综合运输系统的重要方式。因为交通规划协调各种运输方式之间的联系,明确各种交通方式的任务和要求,各种交通方式之间密切配合,相互补充,共同完成运输任务,这样就可以排除过去那种单一、孤立的道路规划和铁道规划中的某些偏见,如仅注重路网的形式,不重视各种运输方式间的内在联系等。

② 交通规划是解决目前道路交通问题的根本措施。因为交通问题是一个整体性、综合性的问题,单从增加道路建设投资或提高交通管理水平某一个方面是不能从根本上解决问题的,而必须与社会经济发展规划相适应,通过以人、车、路、环境诸方面综合考虑,促成工、农、商业、文化设施以及人口分布的合理布局,制定一个全面的有科学依据的交通规划才是根本的措施。

③ 交通规划是获得交通运输最佳效益的有效途径。因为道路建设投资的大小,汽车运输方式的路线选择,车辆运营成本的高低以及交通管理水平高低等都与交通规划密切相关,只有制定合理的交通规划,才能形成安全、畅通的交通运输网络,从而用最短的距离、最少的时间和费用,完成预定的运输任务和获得最优的交通运输效果。

④ 交通管理规划是实现城市交通科学化、现代化管理,充分利用现有道路交通设施的重要环节。交通供需矛盾的长期性和城市空间的有限性决定了我们不但要规划建设好交通基础设施,而且还要使现有设施发挥最大效益。因此,从供求两个方面采取措施,通过加强交通管理提高道路通行能力,是缓解我国城市交通拥挤的重要环节。

交通规划的分类方法很多。根据规划的性质,我们可以把交通规划分成战略交通规划、城市综合交通规划、专项交通规划(如城市道路网规划、公共交通规划和具体的交通设施规划)以及交通管理规划。根据规划对象的空间范围可以把交通规划分成区域交通规划、城市总体交通规划、分区交通规划。根据规划对象的时间范围可以把交通规划分成长期规划、中期规划和短期规划。根据规划对象设施可以把交通规划分成城市道路网规划、公共交通规划、轨道交通规划、停车场规划、站前广场规划和交通枢纽规划等。

1.1.3 城市综合交通规划发展经纬及其必要性

从世界范围来看,在 20 世纪 60 年代以前,城市规划中的交通规划,通常是对道路规划和轨道交通规划分别进行的。也就是说,通常是以城市的机动车 OD 调查(也称为起讫点调查)为基础,预测未来的机动车交通需求,进行道路规划;以定期月票利用者的站点间 OD 调查等为基础预测将来的利用者数,进行轨道交通规划。但是,到了 60 年代,在考虑未来的城市交通时,道路规划和轨道交

通规划之间的平衡,或者说个体运输工具与大运量的运输工具之间的平衡,成了人们关注的焦点。

人们逐渐认识到,解决大城市交通阻塞,仅仅通过对断面交通量采用某些局部数据进行交通分析、道路规划是远远不够的,必须以路线及道路网为对象进行全面的分析。当人们认识到要想解决大城市的交通拥挤就必须实现城市交通的整体化后,道路规划与轨道交通规划间的协调,进而在城市快速发展、城市空间急剧扩大的情况下,使之与城市规划相协调的问题受到了极大关注。以定量数据为基础进行城市综合交通规划起源于美国,并且在世界范围内得到了迅速发展。1953年,美国大都市圈底特律首先开始进行交通调查,1962年发表了高速公路规划报告书。名为“Traffic Study”的底特律都市圈交通规划,其核心是高速道路规划。而继此之后,称为“Chicago area transportation study”的芝加哥都市圈交通规划则对包括道路规划在内的大运量交通方式进行了综合考虑,开发了包括交通方式划分在内的四阶段交通需求预测法,开了城市综合交通规划之先河。1962年美国制定的补充联邦道路法,规定人口5万人以上的城市,为了得到与道路建设有关的联邦政府的补贴,必须制定以城市综合交通调查为基础的都市圈交通规划。因此,关于城市综合交通规划的理论研究和规划实施在全美广泛地开展起来。至此,“traffic planning”也由于范围不断扩大而改称为“transportation planning”。由于城市综合交通规划始于芝加哥,而且现在的城市交通规划方法是以芝加哥都市圈交通规划(CATS)为基础发展起来的,所以芝加哥都市圈交通规划在交通规划发展史上占有极其重要的地位。

在英国,1963年发表了著名的布凯南报告书。在此前后,已经开始了制定城市综合交通规划所必须的城市交通调查。1964年雷塞士特市进行的综合城市交通规划是英国定量进行城市综合交通规划的先驱。

在日本,运用科学分析规划手段制定城市交通规划始于 20 世纪 60 年代后期,以居民出行调查为基础进行城市综合交通规划。日本于 1952 年在东京进行了第一次关于城市机动车出行的 OD 调查。到 1958 年,在全国主要城市都开展了机动车 OD 调查,并决定此后定期进行此项调查,为定量的交通需求预测打下了基础,60 年代前半期,道路交通规划方面已开始运用交通发生、交通分布、交通分配的三阶段交通需求分析法。

此后,道路规划与轨道交通规划间的协调,以及在城市快速发展、城市空间急速扩大的情况下,使之与城市规划相协调的问题受到重视。因此,以城市内全部交通方式为对象的与城市规划、土地利用规划相协调的综合交通规划方法开始形成。

广岛都市圈首先进行了大规模的居民出行调查。居民出行调查捕捉能够体现“人流活动”的居民出行活动,即人们利用汽车、轨道交通及公共汽车的情况,将“不同交通方式分担”这一新的预测步骤加到三阶段需求预测法中去,开创了对城市内全部交通方式进行系统分析的先河。广岛调查进行后,以东京、京阪神、名古屋等大都市圈为首,日本在全国主要都市圈都开展了居民出行调查,由交通发生、交通分布、不同交通方式分担、交通分配所构成的四阶段交通需求预测法也固定下来。另外,对于城市交通的另一重要构成要素“物质流通”,则在居民出行调查外补充了物资流动调查(1971 年广岛首先开展,以大都市圈为中心)。二者共同推进了综合城市交通规划的发展(参见图 1.1)。

在我国,城市交通规划作为专门的应用学科已有近 20 年的时间,发展过程大致可以分为如下三个阶段。

① 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,城市经济复苏,自行车迅速增长,特大城市交通出现全面紧张的局面。这种情况使国内规划界的许多专家开始认识到,采用 50 年代从功能分区到道路干道的纯定性的规划方法已不能适应今天的城市发展,需要引进交通规

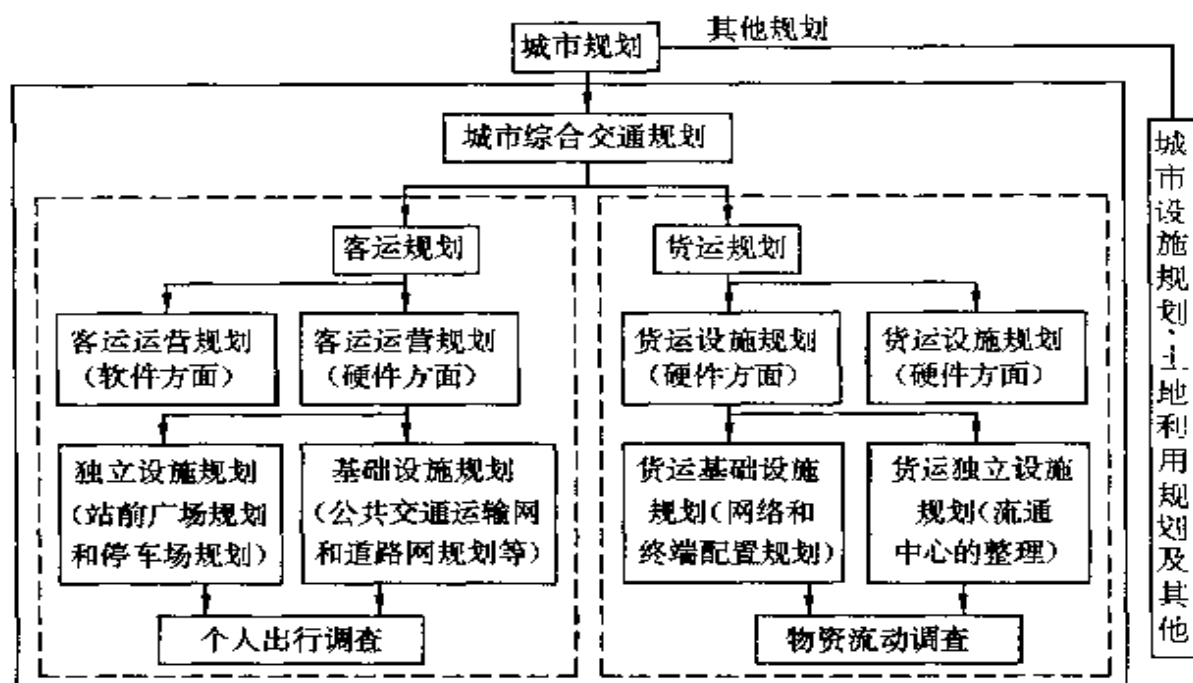


图 1.1 城市综合交通规划概念图

划的新理论和高新技术。在这一时期，交通规划在方法上引进了发达国家的交通规划理论、计算机技术，开始探讨我国综合交通规划的理论与方法。与此同时，国内几十个大城市开展了大规模的交通调查，利用计算机技术进行调查数据的统计和交通特征分析，交通规划迈开了定量化的第一步。

② 80 年代中到 90 年代初，城市改革开放的步伐加快，现有的交通矛盾尚未解决，又迎来了规划建设的高潮。结合这一时期的规划特点，交通规划在交通调查的基础上，对交通特征进行研究分析，将交通规划的“四阶段”理论与方法，交通预测技术应用到实际的道路运输规划中，交通规划开始了定量与定性相结合的一步。

③ 90 年代初到现在，随着经济的发展，城市交通的机动化发展速度加快，城市交通问题的复杂性和改善的难度加大，交通需求不断增加，各级政府对交通规划的认识加强。在这一时期，由于计算机技术的普及，交通规划人才素质的提高，市场需求加大，城市

交通规划的基本原理、定量化预测技术等在各种类型的规划实践中得到了广泛的应用。研究的重点侧重于运用定量的科学技术进行规划方案的分析、指导设计,城市交通的现代技术开始同规划紧密结合。与此同时,国内交通规划在调查方法、数据分析、模型精度、预测技术、战略研究、规划的层次划分、交通设计方面进行了广泛的探索研究,在与城市规划、市政工程设计、运输规划、交通管理的结合方面有了良好的开端。

1.2 交通规划的系统工程分析方法

许多工程分析中采用的传统分析方法是把系统的某一部分与系统分离,然后再单独对这部分进行分析。这种方法也可以用于分析城市交通系统发生微小变化所产生的影响。例如,路口的单点定周期交通信号的配时问题仅仅考虑了该路口的交通情况,而通常不考虑相邻路口交通变化的影响。同样在分析停车规则、交叉口设计以及运输系统中的其他变化时,也仅仅考虑了最直接的环境。

如果一个具体策略或设计的影响范围较小,那么这种传统的分析方法是采用的。然而如果所分析部分的变化较大时,那么这种变化不仅会影响到正在变化的部分,而且还会波及到系统的其他部分。为了说明和理解这种波及效果,首先让我们来考虑分析一下城市干道上的一段拥挤路段。为了减轻拥挤,可拓宽道路,因此建设部门要考虑拓宽这段道路所需的成本和可取得的效益。在现状交通流量条件下,假若拓宽后的路面能使交通流运行通畅,延误时间减小,我们就认为拓宽部分是满足要求的话,由于没有考虑到该路段的改善对相邻路段乃至整个路网带来的变化,按这种方式计算的工程效益就可能导致错误。比如,以前不走这条道路的车辆,在道路改建后就可能改走这条道路了。这样,由于交通流量的增加可能会引起更严重的交通堵塞,使得改建道路上的交通状况

并无多大的改善,甚至比改建前更加拥挤,因而也就达不到预期的目的。而且,由于车辆进入和离开拓宽路段数量的增加,与之相联结的一些路段也会引起堵塞。另一方面,在与拓宽路段平行的道路上,由于交通流量的减少,交通条件会随之得到改善。这样,在系统其他部分运行的车辆驾驶员由于意识到交通流量的这种变化而相应地调整其行驶路径,那么每条路径上交通条件的改变必然会引起交通状况的进一步变化,其结果会造成更多路径上交通条件的变化。经过一段时间,这种波动情况将逐渐减缓,最终系统又在新的平衡点上达到稳定状态。但是这种状态同以前相比或许并没有什么明显的改善。

上面的例子说明了道路网的改变会导致交通流的变化。交通控制策略的改变或者新的交通设施的建设也会产生同样的变化。但是,交通系统的变化仅间接地影响交通流模式。直接决定交通流模式的是城市区域内总的出行行为,这些出行行为产生了对交通的需求。例如,我们来考虑一个新开辟的商业区对交通流的影响。商业区所吸引的购物者部分是新出现的,部分是从其他地方转移过来的。这样,与新商业区相连的街道会产生交通堵塞现象,迫使那些仅仅打算通过该区域的出行者,改变其路径,变更其交通工具或者调整其出行时间。这些变化将改变整个系统的交通流模式和拥挤情况,从而进一步影响人们的出行决策。其他商业区的情况也将随之发生一些变化,比如其车流量可能会下降。但是,同样经过一段时间后,又会出现新的平衡点。当达到平衡点时,整个运输网中的出行频数、出行终点、交通方式以及路径的选择都将保持稳定。

从上述分析可以看出,与一定交通状态相对应的平衡交通流模式包含了城市交通网络各个部分的交通流量水平和交通堵塞状况,平衡状态下的交通流模式与受该交通状态影响的出行者之间有直接关系。换句话说,只有通过同时分析城市交通网络的所有要

素,我们才能求得每种交通状态所对应的平衡交通流模式。这就是说,我们对城市交通必须进行系统分析。

所谓系统分析,就是为了使系统的目的能最好地实现,而对系统应如何构成进行的分析。具体地说,系统分析是从系统长远和总体的最优出发,在选定系统目标和评价准则的基础上,分析组成系统的各个层次的分系统的功能和相互关系,以及系统与环境的影响;在调查研究、收集资料和系统思维推理的基础上,产生对系统的输入、输出及转换过程的种种假设;在确定和不确定的条件下利用定性和计量方法,探讨若干可能代替的方案,并建立模型或用模拟方法分析对比各个不同方案,同时研究探讨可能产生的效果,综合资源配备的最佳方案所需的信息和资料。如前所述,城市交通系统是极为复杂的系统,因此,城市交通问题必须用系统分析的方法来解决。图 1.2 是表明系统分析定义的框图。

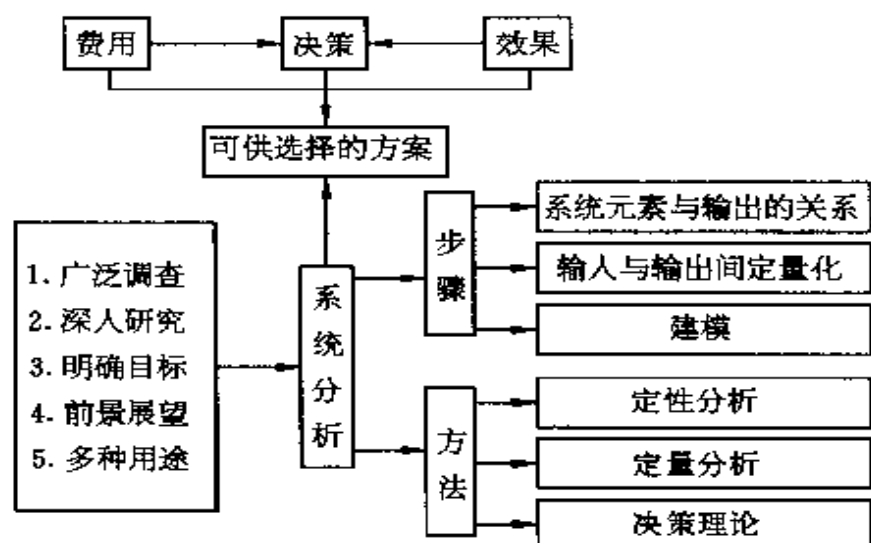


图 1.2 系统分析定义框图

由系统分析的定义,可以总结出它的四个特点:

① 以整体为目标

在一个系统中,处于各个层次的分系统,都分别具有其特定的

功能及目标,彼此分工合作,才能实现系统的总体目标。构成系统的所有要素都是有机整体的一部分,它们不能脱离整体而独立存在。系统总体所具有的性质,是其各个组成部分或要素所没有的。因此,如果只研究改善某些局部问题,而其它分系统被忽略或不健全,则系统的整体效益将受到不利的影响。所以从事任何系统分析,都必须考虑发挥系统总体的最高效益,不可以只局限于个别分系统,以免顾此失彼。

② 以特定问题为对象

系统分析是一种处理问题的方法,其目的在于寻求解决特定问题的最佳策略。许多问题都含有不确定的因素,而系统分析就是针对这种不确定的情况,研究解决问题的各种方案及其可能产生的结果。不同的系统分析所解决的问题当然不同,即使对相同的系统所要求解决的问题,也要进行不同的分析,拟订不同的求解方法。所以系统分析必须以能解决特定问题的最佳方案为重点。

③ 运用定量分析方法

科学研究方法,不能单凭想象、臆断、经验或者直觉,在许多复杂的情况下,必须要有准确可靠的数字和资料作为科学决策的依据。在有些情况下,利用数学方法描述有困难时,还要借助于结构模型解析法。

④ 凭借价值判断

从事系统分析时,对系统中的一些要素,必须从未来发展的观点,用某些方法进行科学预测,或者类比以往发生过的事实,来推断其将来可能产生的趋势或倾向。由于所提供的资料有许多是不确定的变量,而客观环境又会发生各种变化。因此,在进行系统分析时,还要凭借各种价值观念进行判断和优选。

揭示系统分析方法适合于交通系统分析与规划的人是美国交通专家麦恩黑姆(Manheim),下面将详细说明麦恩黑姆的分析框架,这里首先说明构造分析框架的两个基本前提。

(1) 全部交通方式;

(2) 交通系统的研究与对象地区的社会、经济、政治系统的研究之间不可分割。

首先,第(1)点中提出的总交通系统的概念,其分析对象系统的范围指以下几个方面。

① 全部交通方式;

② 交通系统的所有构成要素(作为运输对象的人与货物、车辆及交通网);

③ 全部移动(所有起终点间的人流和物流);

④ 出行活动全体(包含每一次移动从起点至终点所利用的全部交通方式和全部设施在内的总的出行的概念)。

其次,依据第②点的要求,为将交通系统和与之相联系的社会经济系统进行整体考虑,认为对象系统由交通系统 T ,社会经济活动系统 A 及交通流模式 F 三个变量构成。从交通经济学的观点来看,交通系统 T 是交通服务的供给方,社会经济活动系统 A 是交通服务的需求方,表示交通网上人与物移动的起点、终点、经过路径、移动量的交通流模式 F 则可视作交通市场上交通服务平衡效果的一种表现。

这三种变量之间存在以下基本关系:

① 交通流模式 F 为交通系统 T 和社会活动系统 A 两者所决定。

② 当前的交通流模式 F 又通过所提供的交通服务及为提供这些服务消耗的资源 R ,逐渐使活动系统 A 发生变化。

③ 当前的交通流模式 F 又由于各级政府及民间公司根据实际的交通流或预测的交通流所进行的投资 R 开发新的服务,以及改善原有服务,从而逐渐使交通系统 T 发生变化。

对于这种麦恩黑姆交通系统的基本结构可作如下解释:

① 表达了交通服务的需求和供给间短期的市场平衡。

② 表达了从交通角度观察的社会经济系统的长期平衡的过程,如交通的发达带来城市形态、土地利用方式、人口移动、产业结构和布局的变化即为其具体的实例。社会经济活动系统 A 除受到交通服务所消耗的资源 R 及交通流模式 F 的影响外,还因许多其他因素 E (包括区域规划、城市规划及各种政策等)的变化而变化, F 及 R 的影响仅为其中的一部分。

③ 表达了各级政府及交通管理部门的交通政策与交通规划的影响。在这种情况下,实际的交通政策及交通规划也要考虑 R 及 F 以外的因素 E ,但 E 的影响比在第②点中的作用小。

以上这些关系可用数学公式表达如图 1.3,其中 $f(x)$ 为 x 的函数, Δx 为 x 的增量。

- ① 交通市场平衡 $F = f_1(T, A)$
- ② 社会经济活动变化 $\Delta A = f_2(F, R, E)$
- ③ 交通政策、规划 $\Delta T = f_3(F, R, E)$

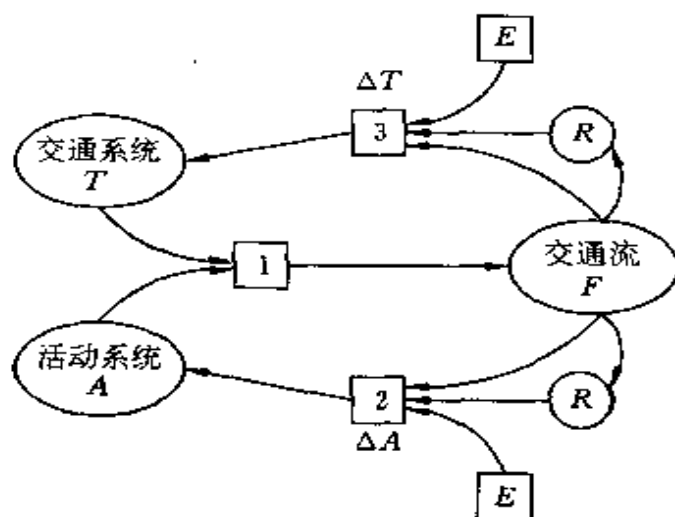


图 1.3 交通系统的基本构造

在实际的交通规划过程中,应将上述交通系统的基本结构中相应的内容具体化,明确作为干预对象交通系统及相关连的活动

系统手段的政策选择方案的内容,并针对政策选择方案的各种组合所构成的不同规划备选方案,预测交通系统将会产生的表现和影响,对方案作出评价。麦恩黑姆提出了图 1.4 所示的用于政策分析的预测模型体系。

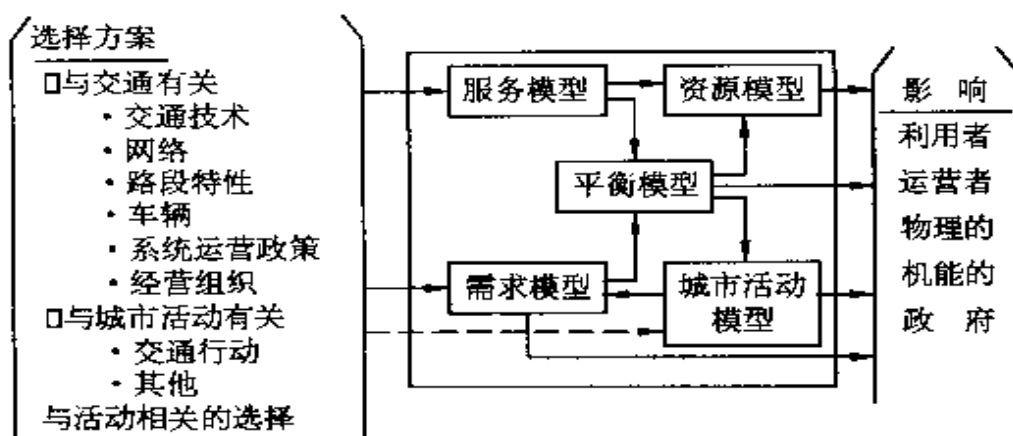


图 1.4 交通系统规划的基本预测模型

以政策选择方案为基础的推算不同主体影响的模型系统可认为由以下五个子系统构成,即①表示特定交通系统规划方案下交通量与交通服务水平之间关系的“服务模型”;②表示交通服务水平与交通需求量之间关系的“需求模型”;③交通服务的“平衡模型”;④用以推断提供特定交通服务所需资源的“资源模型”;⑤用以推断平衡交通流引起的社会经济活动变化的“城市活动模型”。

1.3 交通市场的供求平衡

本节在麦恩黑姆提出的社会经济活动系统 A 与交通系统 T 之间的相互作用这一分析框架的基础上,讨论交通系统分析所涉及的基本概念,论述交通服务的需求与供给以及两者之间平衡的概念及它们之间的关系。

1.3.1 基本性质与关系

交通需求是伴随着社会经济活动系统 A 所派生出来的,所以交通量 V 可以用该活动系统 A 和所供给的交通服务特性 S 的函数(需求函数)来表达。

$$V = D(A, S) \quad (1.3.1)$$

由于这里所要研究的对象交通系统的交通量 V ,可以按不同的起终点、不同的交通方式或不同的区间等各种方式来研究,所以,一般用向量表示。

从使用者的角度看,影响交通需求的服务特性 S 不仅仅包括价格,而且包括出行所需时间、方便性、安全性等多个特性构成的向量,这一点是不同于经济学上通常的财力概念的特征。另一方面,所提供的交通服务的特性 S ,不仅依赖于交通系统 T ,而且同交通拥挤现象所表现出来的特性一样,随交通量 V 而变化。如果将这个关系称为服务函数 J ,则 J 可以描述交通服务的供给

$$S = J(T, V) \quad (1.3.2)$$

在所给定的社会经济活动 A 系统和交通系统 T 之下,根据交通服务的需求与供给的短期的相互作用,可实现特定的交通流模式(平衡交通流模式) F^0 。这就是市场平衡。具体来说,就是使用者根据交通服务的特性,随时变更自己的出行次数、出发日时、目的地、所使用的交通方式、行驶路径等,或者交通经营者对于运行次数、发车时刻、到达时刻、途经路线等,分别在短时间的可能的范围内,对所提供的服务进行修正,通过这种方法达到平衡。

这里,交通流模式 F 是可以由交通量 V 和该时刻的交通服务特性 S 来表达的向量。

$$F = F(A, T) = [V, S] \quad (1.3.3)$$

因此,满足式(1.3.1)及式(1.3.2)两者的平衡交通流模式 F^0 可表示如下:

$$F^0 = F^0(A, T) = [V^0, S^0]$$

式中,

$$S^0 = J(T, V^0)$$

$$V^0 = D(A, S^0)$$

为了理解以上关系式,让我们考虑 V 和 S 均为一元函数,起点交通小区 i 和目的地交通小区 j 之间的交通量为 V_{ij} ,交通服务特性为 S_{ij} ,仅考虑用 ij 间出行所需时间 t_{ij} 来表示的情况。活动系统 A 以及交通系统 T ,分别以 A_1, T_1 给出时,如果所需时间 t_{ij} 增加,一般来说交通需求量 V_{ij} 减少,所以需求函数 D 如图 1.5 所示,是一条向右呈下降趋势的曲线。通常在给定 A, T 的条件下,需求量不受 t_{ij} 影响,或者有上限值,或者 t_{ij} 超出一定时间以上则需求变成零,所以 D 有一定的存在范围。并且即使 t_{ij} 减小,交通需求量增加,随着接近 D 的上限,其增加的速率也会逐渐减小。由此可知,需求函数 D 一般来说是非线性的。

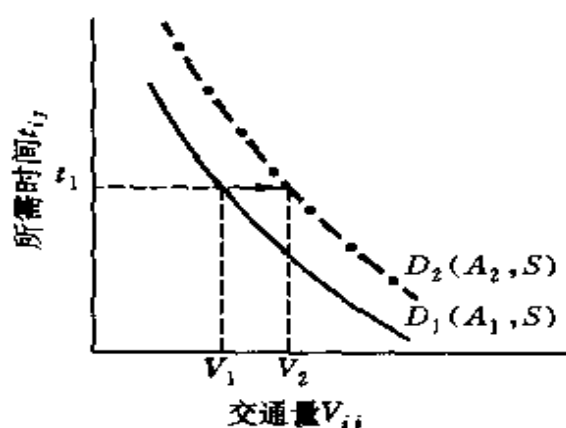


图 1.5 需求函数的性质

这里,作为理解交通需求的一个有用的概念,首先说明一下需求弹性。所谓需求弹性,是表示相对于需求函数中自变量的单位变化率而产生的需求量的变化率,在经济学领域内相对于价格的变化而产生的需求弹性经常被使用,而在交通系统分析领域内,包

括价格在内,相对于交通服务特性 S 的一个要素 s 而产生的弹性是非常有用的概念。

需求弹性(相对于服务特性 s)的定义为:

$$\epsilon_s = \frac{-(\Delta V/V)}{\Delta s/s} = \frac{-(\partial V/\partial s)}{V/s}$$

上式中加上一个负号,是由于服务特性 S 如同时间和价格(费用)那样, S 增加则需求减少,习惯上将弹性用正值表示,所以加了负号。通常 ϵ_s 不是常值,在交通服务特性 S 的各点, ϵ_s 的取值不同。

从和社会经济活动系统 A 的关系来看,例如人口和经济活动从 A_1 增到 A_2 时,即使是同一交通服务特性水平(即 $t_{ij1} = t_{ij2}$),交通需求量也要增加。所以,新的需求函数 D_2 如图所示将向右侧移动。

其次,讨论一下关于供给方的服务函数 J_1 。以道路为例来分析,交通系统 T_1 存在着这样的关系,即在以交通容量为上限的范围内,如果交通量 V_{ij} 增加,则所需的时间也增加,如图 1.6 所示,曲线向右呈上升趋势。并且,随着交通量接近交通容量 C_1 表现出拥堵现象,呈现出 t_{ij} 急剧地增大这种非线性的函数关系。

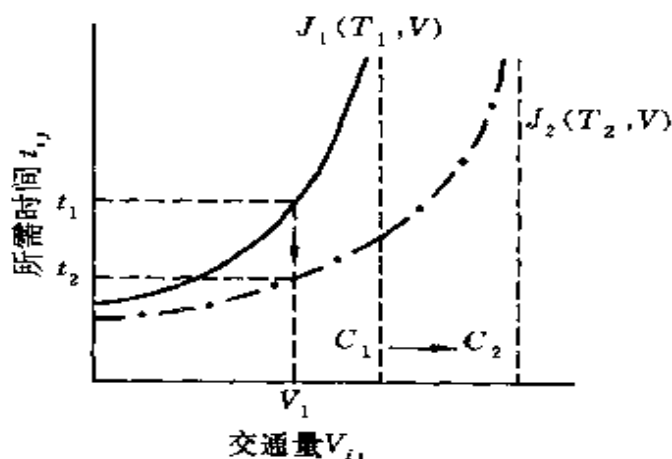


图 1.6 服务函数的性质

这里我们分析一下与交通系统 T 的关系,例如如果对道路进行扩幅、铺装、线形改造等改善措施,则道路的工作性能提高,交通容量从 C_1 增至 C_2 。并且,相对于某个确定的交通量 V_{ij} ,车速提高,所需时间从 t_{ij1} 减少到 t_{ij2} ,所以,新的服务函数 J_2 如图所示,往右下方向移动。

根据以上分析的需求函数与服务函数的相互作用,则平衡交通流

$$F_1^0(T_1, A_1) = [V_{ij1}^0, t_{ij1}^0]$$

如图 1.7 所示。

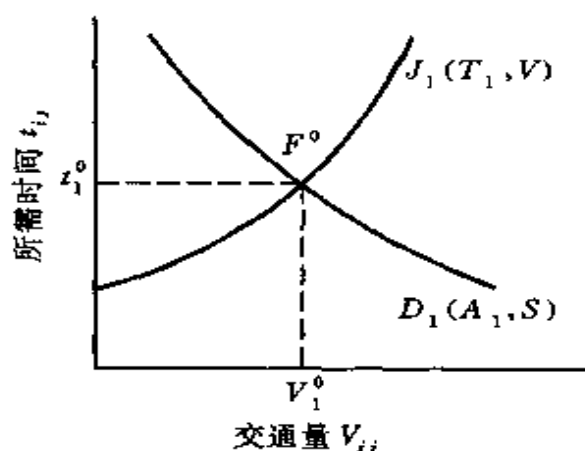


图 1.7 平衡交通流的性质

下面我们列举一些具体事例,来看一下需求函数、服务函数、平衡函数这些概念的性质和作用。

1.3.2 市场分额与交通需求函数

需求函数一般是将构成所研究的交通市场的个人、企业等各个决策主体的需求集计起来构成的函数,又称为集计需求函数。来自于各个主体 k 的需求,称为非集计函数 v^k ,可以用表示其主体的社会经济状况的属性 a^k 和从其主体角度所见到的(感知的)交通服务特性 S^k 的函数来表示。

$$v^k = d^k(a^k, S^k)$$

这里主体 k 所感知的交通服务特性 S^k , 如果是完整信息下的合理的主体, 则与对象市场中的客观的交通服务特性 S 相一致。但是一般来说, 由于不完整的信息、习惯等会有感知误差, 两者通常不一致。此外, 由于主体的收入的制约、可能利用时间的制约、其他制度的制约等, 其需求量有上限, 这些将决定集计需求函数的值域。

在交通需求预测研究领域, 近年来作为分析非集计需求的方法, 开发了非集计模型, 而以四阶段法为代表的传统预测方法, 是处理集计需求函数的方法。集计需求模型通常是在交通小区这个空间单位上将各个决策主体的有关数据求和, 然后进行模型化, 有时也尽量将同性质的交通行动分组来进行分析(称为市场分级), 据此提高分析的精度, 例如采用不同出行目的、不同私人用车的利用可能性这种分类方法就是这样的例子。

我们把这种分级做得越细, 每个主体就将越被细分化, 最终就是不同主体的非集计模型。另一方面, 非集计模型中也由于数据等的制约, 假定其同质性按各组进行模型化。在这种情况下, 集计、非集计是相对的。

交通需求函数因市场分级而异。作为一个例子, 我们就上面所论述的单纯情况来分析一下不同收入阶层的需求函数的性质。其他的条件一定时, 高收入阶层($k=1$)与低收入阶层($k=2$)相比, 社会经济活动活跃, 在所给出的交通服务特性 t_{ij} 下, 在假定无感知误差(假定 $t_{ij}^1 = t_{ij}^2 = t_{ij}$)的情况下, 可以认为交通需求量大(参照图 1.8)。并且, 由于高收入阶层的时间价值高, 与费用相比对时间更敏感, 相对于节约一个单位的时间, 交通需求量将有更大的反应。所以, 如图所示需求函数较平缓。如果我们使用前面定义的需求弹性的概念来对此加以说明的话, 则为: 对于高收入阶层来说, 相对于交通服务的所需时间的弹性 ϵ_t^1 要大于相对于价格 C_{ij} 的弹性 $\epsilon_{C_{ij}}^1$,

并且大于低收入阶层的同一量值 ϵ_i^2 。

另外,此图可以解释为随着地域经济发展带来的收入增大,所产生的集计需求函数的移动。

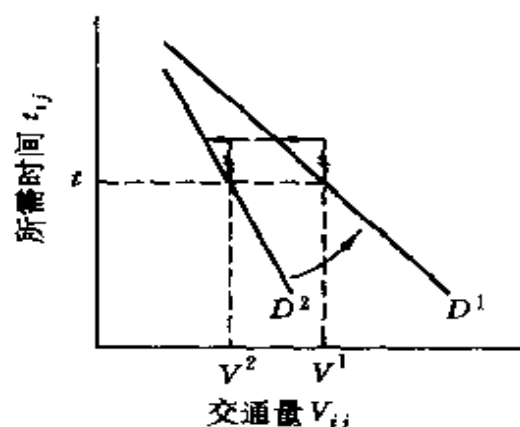


图 1.8 不同收入阶层需求函数的性质

1.3.3 道路的服务函数的性质

如前所述,道路有交通容量的制约,交通量少的情況下能够自由行走,所需时间是一定的,但是如果交通量增加会发生交通拥挤现象,所以服务函数将成为如图 1.9 所示的曲线。

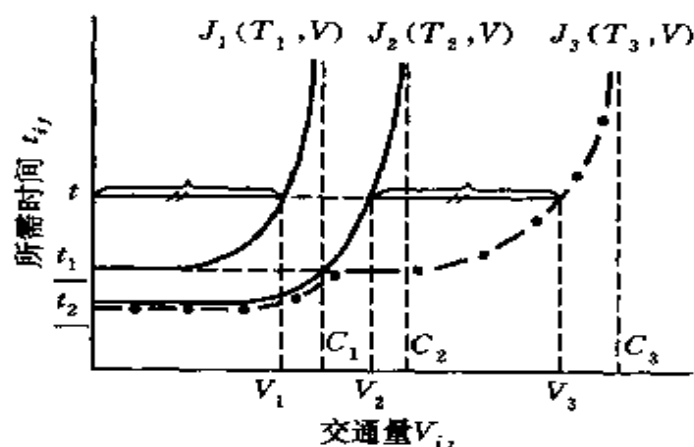


图 1.9 不同道路种类的服务函数

假定在 ij 之间,在原有道路 T_1 的基础上,作为绕行道路(过

境旁路)新建设了高速道路(为简单起见,假定为不收费道路)。这里我们假定一般道路 T_1 和高速道路 T_2 这两种性能不同道路的服务函数分别为 J_1 、 J_2 , 在高速道路上非拥挤时所需的行走时间少 ($t_2 < t_1$), 且交通容量大 ($C_2 > C_1$)。现在让我们分析一下由这两条道路组成的新交通体系 T_3 的服务函数 J_3 。由于出行者一般都将选择最短时间的经路, 所以将会集中在新建的过境旁路上。随着车辆的集中, 高速道路将会产生交通拥挤, 而原有道路上的车速则由于交通分流, 拥挤状况得到缓解而提高, 这样一部分交通又将转向原有道路。由此可知, 所利用经路的均衡, 就取决于过境旁路与原有道路所需时间相等, 于是得到 J_3 。如图 1.9 所示, 将 J_1 和 J_2 在水平方向相加, 即可得到曲线(即 $V_3 = V_1 + V_2, C_3 = C_1 + C_2$) J_3 。

1.3.4 道路建设的效果与社会经济活动的变化

这里作为交通规划中的一般状况, 我们用上述的需求供给平衡的概念分析一下道路建设的效果。作为一种单纯的情况, 社会经济活动系统 A 一定, 交通需求函数 D_1 没有变化时, 如果由于道路建设使服务函数由 J_1 变化到 J_2 , 则如图 1.10 所示, 平衡交通流将从 F_1 变化为 F_2 。

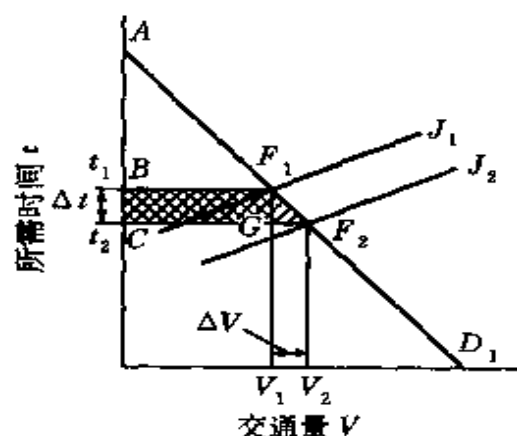


图 1.10 道路建设效果与消费者剩余

这里如果我们借用经济学中消费者剩余的概念,由于道路建设就可以使利用者获得效果或者说方便与利益。在经济学领域,需求曲线表示研究对象的财力,即对于服务进行的支付能力,而实际上消费者所支付的金额是市场平衡价格,需求曲线与平衡价格之间的面积表示对于消费者来说的剩余满足的总额,我们将其称为“消费者剩余”。由于交通服务状况、服务特性是由价格、时间及其他要素组成的向量,所以不能把经济学中的平衡、消费者剩余的概念原封不动地搬来使用,但是如果假定服务特性可以近似地用所需时间来代表,就可以借用消费者剩余的概念。

图 1.10 的例中,道路建设前的消费者剩余是三角形 ABF_1 ,后变为三角形 ACF_2 ,所以由于这种建设工程给使用者带来的效益可以用两者之差的梯形面积来表示。其中,四边形 F_1BCF_2 的面积对于建设前的使用者来说是由时间的节约 $\Delta t (=t_1 - t_2)$ 带来的效益。三角形 F_1GF_2 的面积表示伴随着道路建设对于新增加的交通 $\Delta V (=V_2 - V_1)$ 的时间效益。这种新增加的交通又叫做“诱发交通”。

一般来说,道路到完工为止需要一定时间,在这期间都市活动系统 A_1 ,随着与道路相对独立的诸因素而变化为 A_2 。与此同时,交通需求函数一般地向右移动变成 D_2 (这里假定在地域衰退性使交通需求减少这方面的动向是例外的),参照图 1.11。但是,如果进行道路建设,将会由于土地利用的新变化、原有活动的扩大等,使活动系统变为 A_3 。因此,规划目标年的需求函数不是向 D_2 ,而是向 D_3 移动。结果,由于这种道路建设改良导致的未来交通流将为 F_3 。这种由于现在的平衡交通流和资源影响,外在因素等使活动系统从 A_1 移至 A_3 的过程,即为前节所述的社会经济活动变化的过程,可以称为长期的活动系统平衡。

但是,在这种活动的移动中,如果我们分析一下道路建设效果,就会发现 F_3 比现状的 F_1 所需的时间要多,当然交通量也增多

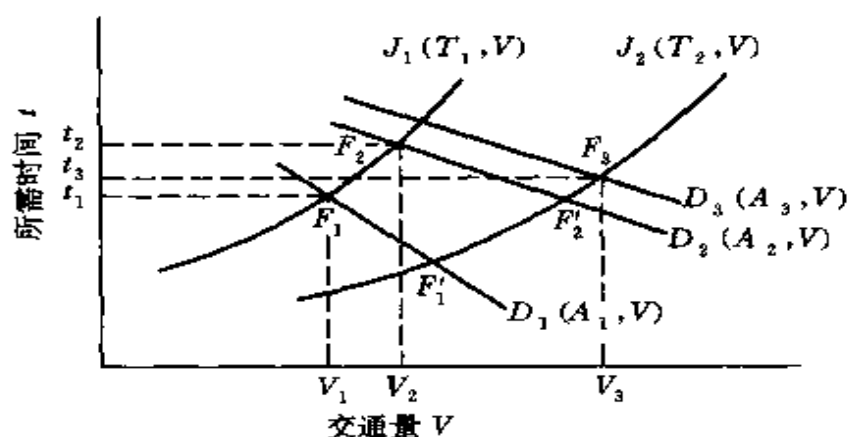


图 1.11 供求的长期平衡过程

了($t_3 > t_1, V_3 > V_1$)。但是应该进行比较的是规划目标年的平衡, 作为备选方案是没有建设时的平衡点 F_2 (有/无比较)。在该图的例子中, 建成后的平衡点 F_3 所需的时间短, 并且能够通行更多的交通量($t_2 > t_3, V_2 < V_3$)。因此, 这种建设改良在前面所叙述的意义上将产生消费者剩余, 对此剩余和为了改善交通状况而进行的投资成本及所需时间以外的其他效果等进行综合的比较, 据此可以对这种改善工程进行评价。

1.4 交通系统规划的过程

如前所述, 交通系统规划的对象是各种各样空间尺度、时间尺度背景下的形态各异的交通系统, 相应地其规划过程是由以系统分析方法为基础的一系列合理的解决问题的步骤构成的。本节主要围绕交通系统规划课题渐趋广泛及价值观趋于多样、欧美各国日趋重视市民参与到规划活动中来等等, 从规划所处环境的变化来回顾探讨与交通规划过程有关的思路与方法, 而不仅仅是讨论为制定某一个特定规划所应当进行的逐一解决课题提供决策依据这样的规划过程。对于具体的交通规划过程, 这里通过具体介绍日

本两个有代表性的都市圈综合交通规划的实例来说明。

1.4.1 决策过程与规划操作过程

在讨论交通系统规划过程的有关问题时,可以从两个侧面来考虑,它既是整个决策过程的一个组成部分,又是对决策过程提出的有待研究的规划草案(单—的建议方案或多个可供选择的新方案)进行方案确定的规划操作过程。当规划作为决策过程时,根据规划对象不同,在有些情况下其相关主体与基本手续通常由相应的法规作出了规定(如高速公路规划、城市道路网规划),也有些部分未被纳入法规之中;有些规划过程体现出按照惯例的具体作法一步步进行的特点(例如以居民出行调查为基础进行都市圈交通系统规划),也有些规划过程面临新的课题,由于权限、实施主体不明确或多个相关主体之间难以协调而采用具体问题具体分析的步骤(例如在站前地区进行自行车、摩托车的停车管理规划)。因此,从决策过程的角度来看,交通系统规划是在规划者具有的权限、与规划对象相关的法规及惯例等制度规定及资金、人力、信息、技术等资源条件共同制约下,在与相关部门相互竞争、相互协助的过程中,按着规划的目标而采取的与计划课题一一对应的系列步骤。

在决策过程的各个阶段,交通规划人员的任务是提供决策必需的各种信息。这些信息不仅仅包括制定可选方案,还包括交通系统及其服务现状与存在的问题,解决目前存在问题所采取的措施,实施状况及其评价,今后的研究课题及发展方向等等。应按照决策者的需要及时准确地提供上述信息,以支持决策工作的进行。但是,尽管总体规划不仅仅局限于某一建议方案,而针对特定课题发掘各种有效的可选方案,并向决策者指明利弊以供参考,这种传统的交通规划所应具有的作用仍然非常重要。作为这种规划草案制定并评价的规划操作过程,如前所述基于交通系统分析的基本思路形成的合理的规划方法极为有效。

图 1.12 分别从决策过程角度和规划操作过程角度对交通系统规划的全过程进行了概括。其中决策过程随时从进行规划操作的交通技术人员处获取必要的帮助,按左侧各步骤进行下去。决策过程的相关主体包括中央政府、地方政府及其他有关的公共、民间团体、专家学者、一般市民等,其组织形式可能为论证会、征询意见会、专业委员会等等。各步骤的参与者也不尽相同。另一方面,进行规划操作的技术集团也不仅仅包括负责单位的技术人员,一般来说,在不同阶段还要请有关专家、学会、协会等协助共同完成。

规划操作过程如图 1.12 右半部分所示,基本上按照系统分析的思路进行。图中对于交通系统、社会经济活动系统及其它相关要素的研究是以长期进行信息收集整理的信息管理体制为前提的。在这些系统的长期观测结果的基础上,再加上从监测系统获得的关于现行政策、规划进展情况效果、规划产生的影响等最新信息,就能够把握交通系统的状态,检查是否存在问题以及问题出现后及时摸清情况,并通知决策者以引起注意。另外,还可依据决策者的要求对照检查交通系统的状态,汇报问题状况。

一旦决策者针对问题的关键制定了方针,采取了对策,规划操作的总体框架就可与决策者协商确定下来。按这一总体框架设定规划课题和规划对象,并决定在时间、资金、人力等资源条件限制下采用何种步骤和内容来制定规划。此后进入具体分析的部分,首先使对象问题结构化,明确相互要素及其相互关系。还应设定规划目标,决定具体应达到的水平。这一阶段对问题的认识及设定的规划目标对规划方案的研讨方针有重大影响,因而应当与决策者共同协商确定。然后,收集调查分析所需要的追加信息和数据,制定一系列在制度、资源条件制约下可实施的规划草案。这时,一般是参考决策者的意向,加以技术方面的论证,边协调边制定规划草案。同时,以现状数据为基础,构造社会经济活动模型、交通需求预测模型、方案效果预测模型来预测设定方案的效果及影响,为方案

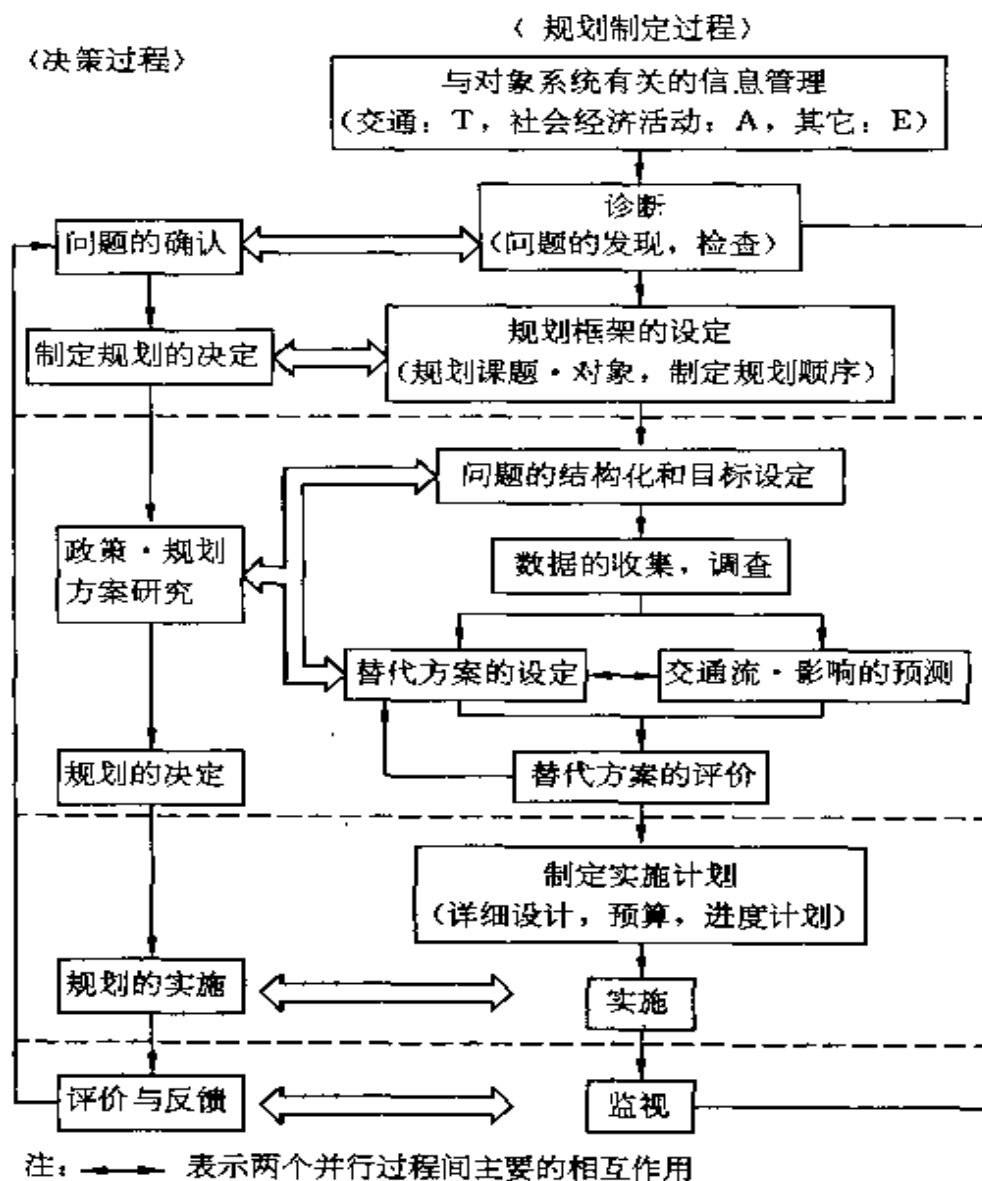


图 1.12 交通系统规划的过程

评价准备基础信息。在这一阶段还要将现状方案作为待研究方案之一, 预测其相关的效果与影响(现状方案是指不施行新的规划措施的 do-nothing 方案, 或为维持现状而施行最小限度的维护、修整措施的 do-minimum 方案)。

在规划方案的评价步骤中, 应以现状方案为首的各种规划

草案的效果、影响与最初设定的目标相对比,从交通使用者、经营者、政府、社会等(称为相关主体)各个角度整理结果,加以比较,并向决策者阐明结果以支持决策。若评价的结论是不满足需要,则需要重新选择方案或重新评价存在的问题及重新设定目标等等,从新的角度修订规划。当经过适当过程得到最终决定,选定规划方案后,就着手于实施细则的设计,决定预算与进度计划,并实施具体内容。用监控设备判断规划实施过程的成果是否符合预期目标,必要时返回最初阶段重新规划。

1.4.2 交通系统规划过程的实例

根据上述交通系统规划过程的基本概念,以下对规划过程通过实例进行介绍。

如前所述,系统分析方法广泛适用于都市圈综合交通规划。在日本首先开始采用以居民出行调查为基础进行城市综合规划体系的城市是广岛市,其规划方案制定的主要流程如图 1.13 所示。广岛城市综合交通规划的特征表现在:一是采用了以数据为基础的定量的整体性的规划研究方式;二是规划的基本出发点具有双重意义的协调综合性,即在由道路、公共汽车、铁道等不同交通方式构成的用于人和物的移动的综合交通系统中寻求各个对象间的协调统一,并使交通规划与城市活动系统(具体指土地利用规划)间协调一致。从具体的规划制定过程可以看出,规划操作的重点是需求预测。与现在的交通规划过程相比,广岛规划中使问题结构化及设定目标的阶段不够明显,这是由于当时的规划课题明确,重点是交通设施的整体,因此无需特别地对目标加以确定。另外,因备选规划方案限定于某几个固定的方案,故在评价方面的主要项目是各种交通方式的效果与费用,而未对不同主体的费用、影响及效益分布进行明确的分析。尽管存在上述不足之处,可以认为广岛交通规划所开创的综合规划过程是都市圈交通规划的基本形式。

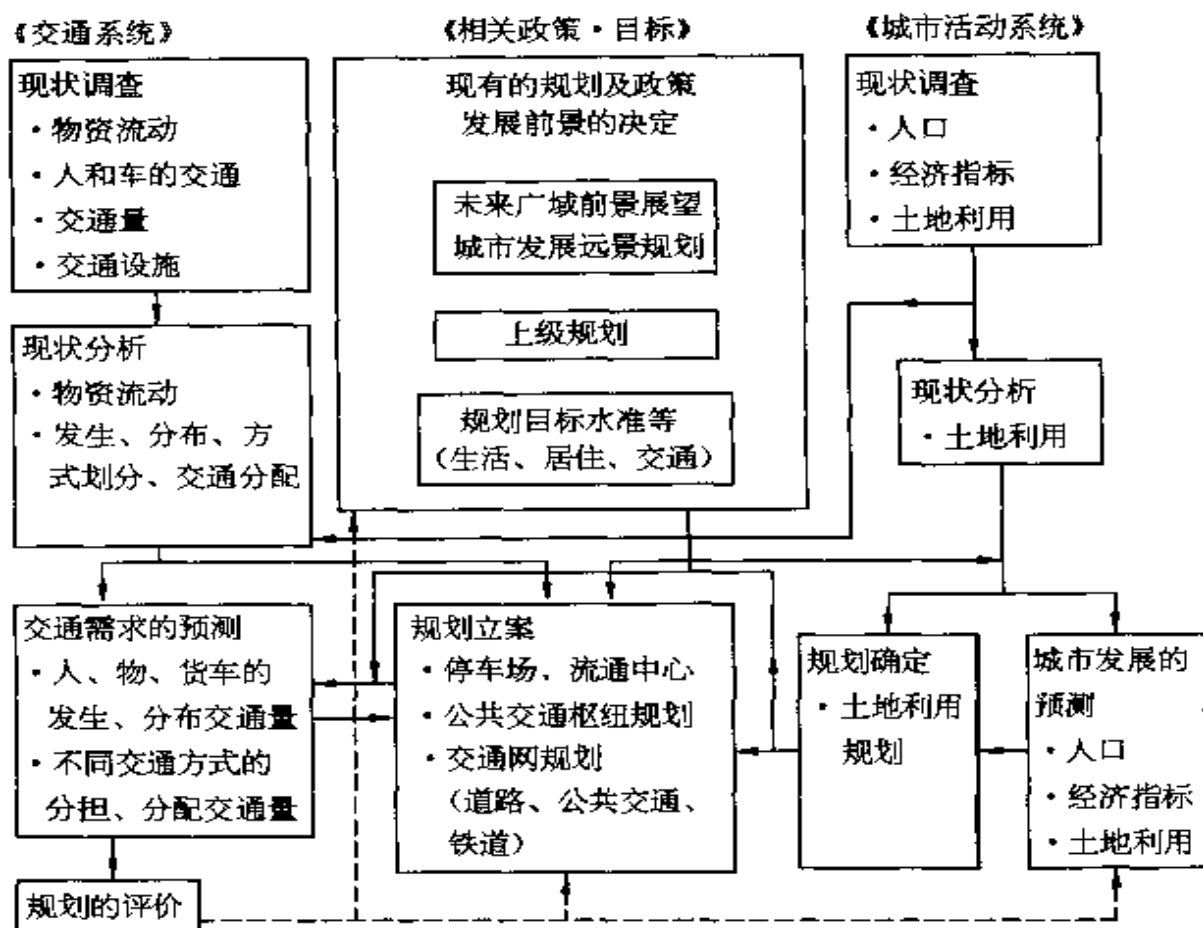
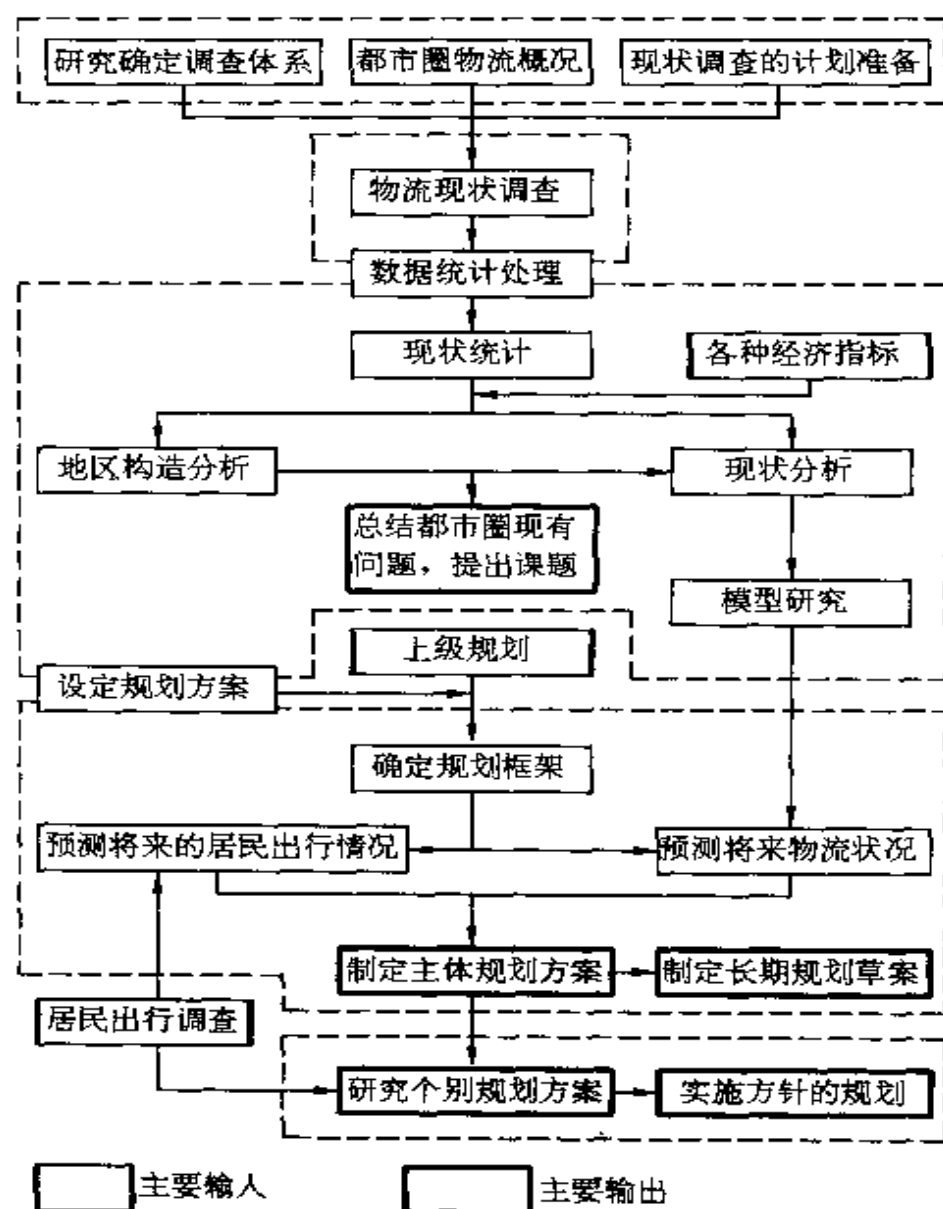


图 1.13 日本广岛都市圈综合交通规划制定过程

日本近来城市交通规划的典型实例可参考仙台都市圈所做的规划。仙台第一次居民出行调查始于 1972 年,五年后的 1977 年该市又进行了物资流动调查,1982 年进行了第二次居民出行调查。这是日本在较大都市圈内将以“人的活动”为对象的居民出行调查和以“物的移动”为对象的物质流动调查交替进行的一个典型实例,并且形成了 10 年一个循环的形式。这种周期性地对城市交通系统的全貌进行分析和调整的作法,是日本区别于欧美的独到特征。仙台市基于各种调查制定了综合的“城市交通体系的优化方案”。图 1.14 表示出以物质流动调查为基础的工作流程,图 1.15

则是与第二次居民出行调查相关的工作流程。根据物质流动调查的结果不仅制定了交通网、物流节点、地域建设等规划总体方案，也制定了物流节点、干线道路、城市交通设施相关的单项规划。



仙台都市圈综合交通规划的基本出发点有如下三条：

① 将土地利用与城市交通设施进行一体化开发建设；

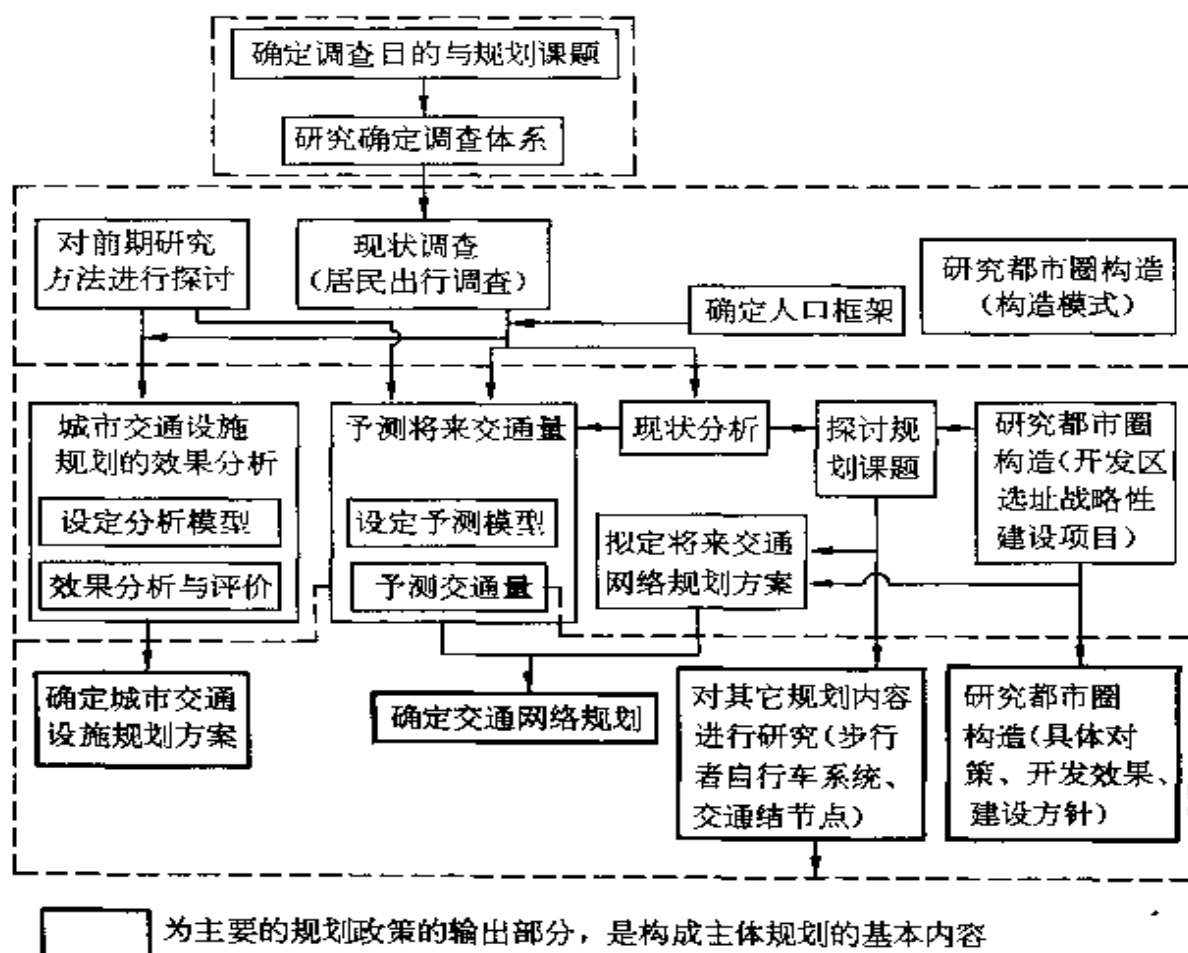


图 1.15 仙台都市圈城市综合交通体系调查流程

② 建立各交通方式的适当的比例关系；

③ 使交通设施建设与运营相协调，以第一次居民出行调查为基础，从人和物的流动两方面的考虑，建立起整个都市圈的综合交通体系。

在基于第二次居民出行调查而制定的最新总体规划中，将城市结构政策、交通设施建设政策、交通管理政策作为三个基本骨架政策，从以下四个观点出发进行了规划的编制工作，①解决现有问题，实现理想的交通体系；②与作为规划基础的社会的变化相适

应;③考虑投资效率性;④在考虑政策措施的同时注意各种约束条件。与广岛规划相比,仙台规划中更重视都市圈的空间结构及对综合交通体系的总体方针的研究,研究对象不仅包括交通设施,还充分重视交通运营方面的柔性措施(具体的有停车换乘、交通小区系统、住宅小区间公共汽车等 11 个涉及面广的交通系统的规划方案),因此备选方案内容广泛。此外,在规划操作过程中,将明确规划课题作为一个独立的环节,交通需求预测所占比重相对降低,趋向于从更广阔的视角探讨规划方案的制定,因此比广岛市的规划更进了一步。

上述两例都市圈综合交通规划的内容与步骤基本相同,大都市圈的规划内容则已在前面介绍过(图 1.1)。

从这些例子可知,交通设施规划的决策过程一般按战略规划、总体规划(如五年计划等在特定期间内施行的按照不同类型划分的表明个别项目内容与优先顺序的规划)、实施规划(有关个别项目实施的详细设计工程计划)的顺序进行,规划期间规划内容逐步细化。在不同规划阶段中所需的信息的内容及精度不尽相同,规划操作的过程则与之相应进行。在实际规划过程中还可能遇到与征地、环境相关的取得居民同意的过程、环境保护对策、建设阶段的历史遗迹及地下文物保持等等各种各样常规的、非常规的问题,其解决过程不一定完全依照图中的步骤进行,应进行相应的灵活调整。

1.5 城市交通规划的思路与观点

在这一节里,我们总结城市现代化阶段城市交通规划的基本思路与观点,作为我们进行城市交通规划的参考。

由于汽车的大量普及,现代城市交通面临着交通拥挤、事故频繁、环境恶化、公共交通企业不景气等一系列问题。为解决这些问

题,创造更好的城市环境,交通专家们对城市交通规划提出了各种各样的观点和看法。随着时代的发展,以下所述的一些观点逐渐成为城市交通规划的基本出发点。

1. 构成具有层次序列的道路网

过去,城市道路通常以格子形、放射环形等形式构成四通八达的路网。但是由于机动车交通的增加,城市中心地带逐渐产生了交通集中、住宅区内规划道路的过境交通过多等问题。为促进道路与城市环境协调发展,使构成道路网的各条道路分工明确,并使路网与地区土地利用规划相统一将非常重要。美国在1950年提出了“市区道路网规划中根据高速道路、干线道路、集散道路、局部道路的不同功能赋之以明确的特性分工,并按图1.16所示的一定层次构成”的路网构成思路。这一思路中因明确提出了道路划分层次序列的概念,并将排除地区内通过交通作为基本原则而引人注目,但

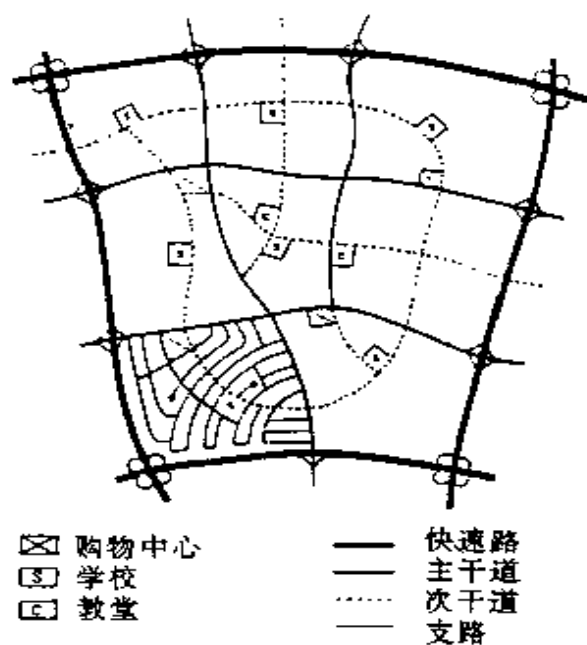


图 1.16 构成道路网的层次序列

由于集散道路的连续性高,而且从局部道路与干线道路的衔接情况来看,实际上还会有相当的通过交通进入集散道路、局部道路,因而也还存在不够完善之处。

在 1963 年英国发表的布凯南报告中,为协调机动车交通与居住环境的关系提出了以下原则:

- ① 道路按一定层次序列构成;
- ② 设定居住环境区;
- ③ 车辆与行人交通分离。

在第①点中提出了“将道路划分为干线道路、地区道路、局部道路、衔接道路四个层次等级,交通必须由衔接道路经局部道路、地区道路再进入干线道路,然后依次经由地区道路、局部道路、衔接道路到达目的地,从而建立起有秩序的机动车交通流,构成具有一定层次序列的道路网体系,为确保这一层次体系的实现,仅在相邻等级的道路间连通,而跨等级道路间一律不连通。”这样明确的观点。这一观点成为后来英国城市道路设计标准的一个基础,对世界各国也产生了较大影响。

2. 交通规划关于人车分离或人车共存的思考

20 世纪 50 年代成为世界共识的观点是“人车分离”,即“步行者与机动车在交通上分离”,认为在制定道路规划时,为确保交通的安全与舒适,应设法使步行者使用的道路与机动车通道完全分离。这一观点 20 世纪初被提出,50 年代后逐渐发展定形,由于布凯南报告中大力提倡“人车分离”而推广至世界各国。采取物理措施彻底进行“人车分离”方法能够保证从日趋活跃的机动车交通中分离出安全舒适的步行空间,也避免了非机动车和行人对机动车的干扰,因而成为新城市或新住宅区开发规划的一条基本方针。此外,为增加城市中心地带的活动,它也被应用于中心商务区的再开发规划。

但是步行者与机动车间的交通分离需要大量的资金和空间,

通常受到经济及物理条件的限制而影响分离的程度,尤其是在建成市街地区难以实行。针对这一问题,70年代提出的本艾尔夫的观点主张在以步行为主的地方,要求机动车车速减慢至步行速度,以这种方式实行“人车共存”。这一柔性措施被广泛应用于建成市街地区,尤其是住宅区内。为限制机动车车速,除依靠交通法规进行管理外,有时也采用缩减车道宽度、设置曲折车道等物理措施。

3. 考虑不同交通方式分担比例的交通规划

“交通方式分担比例”的概念于60年代逐渐发展成熟。随着私人汽车的迅速普及,人们逐渐认识到,仅依靠私人小汽车来承担城市交通需求的主体,显然是城市的道路条件所不允许的。城市交通不仅要依靠作为个体运输工具的私人汽车,更需要依靠公共汽车、铁道等大运量运输方式。为确保城市交通顺畅,就应当依据不同的场合、目的、时间,使各种交通方式的利用达到适当的平衡。如何确定何种状态达到平衡成为“交通方式分担比例”观点的核心问题。

交通方式分担比例的观点在50年代后期被实际应用到美国芝加哥都市圈交通规划(CATS)中,此后,这种方法不但应用于整个美国,而且也影响到欧洲各国及日本,成为目前广泛采用的基本方法。因此可以说现在一般的交通规划方法都从CATS发展而来,芝加哥都市圈城市规划具有极高的价值。与以往的考虑各种交通方式在全体中所占比例的思路相对,近来又逐步发展出非集计模型的思考方法,它着眼于考虑在不同的时间、目的、场合条件下,每一个交通参与者会如何选择交通方式的问题,是很有发展前途的理论体系和模型构造方法。

4. 公共交通系统的改善

从物理的、环境的角度考虑城市交通的发展前景时,基于交通方式分担比例这一思考方法,应当看到从硬件及软件两个方面努力改善目前公共交通企业不景气的状况非常重要。为此必须建立起由轨道交通系统及辅助的公共汽车系统共同构成的高服务水准

的公共交通系统,使之能够与小汽车交通既相互竞争又相互促进。对于公共汽车等路面交通方式应在政策上给以优先通行权,使之成为快速、准时、舒适的交通方式,同时应设法使各公共交通工具间换乘方便,并增加公共交通与私人小汽车、自行车间的换乘途径。利用上述措施可以提高公共交通系统被选择使用的可能性,对不使用私人小汽车的人面言则提高了交通权利的公平性。

从长远角度考虑,对于大都市圈及地方中心都市圈来说,在与城市开发相协调的前提下,在交通需要量大的地区建设轨道交通系统是一个重要课题。与此同时还应充分重视通过规划引导多中心分散形式的土地利用形态的形成。

从现代化程度较高的国家的例子来看,面对公共交通衰退的状况,50年代以来许多国家都开始大力扶持公共交通的政策。例如,在英国“为使公共交通系统机制健全实行了企业化,但在现代化进程中由于未引入财务核算制度造成了赤字。为保证城市社会化的发展,对于公共交通系统不能因赤字而废除,而是要投入税金使之建设、维护、运营下去”。在日本对公共交通系统的发展非常重视,很多城市设置了公共汽车专用车道。在我国,科学规划公交线路和提高公共汽车经营管理水平是我们面临的极为重要的课题。

5. 新交通系统的开发

从70年代开始,新交通系统的研制与开发一直是引人注目的课题,人们设法通过技术革新使原有的公共输送系统更节省能源、降低成本。近来对于新交通系统进行研究开发的重点又进一步转向使之成为有助于缓和环境恶化、并具有高度可靠性、安全性、能提供优质服务的现代化交通工具上。此外,新交通系统还被视为在飞机、铁道、公共汽车、步行等原有的交通方式间具有调和补充作用的部分,日本对新交通系统的开发主要就是把它作为介于轨道交通与公共汽车之间的一种中量轨道系统来进行的。我国对轻轨交通的发展极为重视,“七五”将其列为国家重点科技攻关项目,并

出版了城市轻轨交通工程设计指南。可以预见,各种新交通系统必将活跃在城市交通的舞台上。

6. 城市环境与交通的协调一致

道路交通与城市环境相互协调在布凯南报告中作为城市规划的一个基本观点被提出。它指出对于即将到来的汽车时代,必须设法使交通可达性与居住环境充分协调统一。应当注意的是,二者之间的关系并非对等可逆,如果居住环境被严重破坏,交通条件就肯定不会改善;但如果牺牲一部分交通方便性,却可以使居住环境大幅度提高。因此可参考1项中提到的观点,在将道路划分层次等级使用的同时,为保护居住地区的环境,把由一类干线道路和二类地区道路围成的区域指定为居住环境区,禁止与该地区无关的通过交通从这里经过,仅允许与该地区相关交通经由曲折形式的局部道路及衔接道路低速行驶至目的地,并且该地区的交通规划作为地区交通规划加以制定。

但是在上述措施还未充分实行时,机动车交通的迅猛发展已不可阻挡,它在给全社会带来广泛经济效益的同时,也给城市环境带来了噪音、振动、大气污染,进而导致动植物生态破坏等一系列严重危害。尽管道路、铁道等交通方面的发展给沿途及周围的居民带来许多切实的利益,但考虑到环境方面的恶劣影响,要充分重视城市环境与交通的协调一致。为防止环境污染,应制定关于大气污染、噪音、振动的相关标准,并应严格执行。相应地交通方面也要推行改进汽车引擎、促进路边绿化、加强交通法规等一系列措施。为协调城市环境与交通的关系,不但要从道路角度出发采取措施,还要与沿道建筑物、城市结构等建设规划密切配合,以取得更好的效果。

7. 交通管理规划的制定与推行

交通管理规划是针对机动车交通带来的环境恶化问题提出的,采用一定的管理措施有助于抑制导致环境恶化的机动车交通;

另一方面则是为了更加有效地发挥公共交通方式的作用以缓解交通拥挤。交通管理规划也是缓解交通拥挤、有效利用现有交通设施的有效对策。最初交通管理规划来源于 traffic management 这一概念,其主旨在于合理运用软件措施,从保护居民生活、居住环境的角度出发,对机动车交通以及公共交通进行有效的管理。例如从总体上控制机动车交通的总量规制法、对交通拥挤地区过往车辆进行收费管理的道路收费(road pricing)法、为提高乘车密度而制定共乘制度的多人共乘(car pool)法等。近年来,由于交通管理规划的内容扩展到大量运输方式包括路面电车、轨道交通,交通管理规划也相应地改称为运输管理规划(transportation management)。

8. 重视生活质量

进入 80 年代,人们对环境质量即提高生活质量的要求进一步提高。生活质量是舒适、吸引人、顺畅、心情愉快等概念的统称,根据英国城市规划专家威廉·福尔福德所作的定义,“生活质量不指某一种性质,它是多种价值的综合体现”。在艺术家看来,它包括建筑的美、有亲切感的历史文化风光,以及某种情况下有效用的东西,即希望得到的东西(如住所、温暖、光明、新鲜的空气、家庭服务等)出现在预期的地点,它是一种总体的舒适感受。不是因其可以换算为货币价值即可以数量化而受到重视,更主要的是它反映了居民生活中最根本的价值。

过去,道路规划设计中主要考虑交通移动的顺畅性和交通移动的安全性。用生活质量的概念进行分析,又产生了新的三种要素,即与人的生理情况相关的环境性、与人的视觉相关的景观性以及与人的知识(历史、地理等)相关的场所性。为提高生活质量的水平,在道路空间上应充分考虑如何达到图 1.17 所示的五种要素之间的平衡。

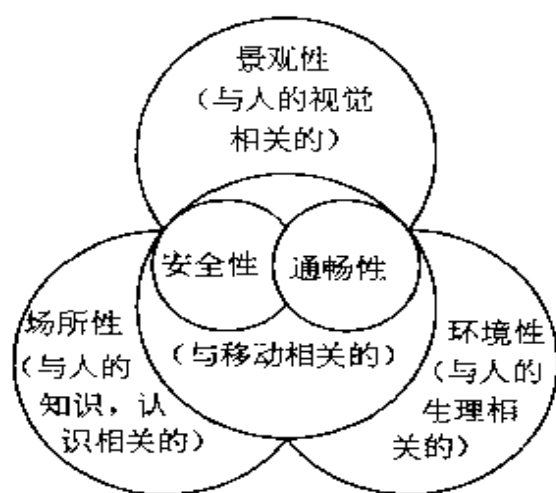


图 1.17 道路舒适性的构成要素

9. 干线交通规划与地区交通规划的平衡

以往,进行量化计算的交通规划主要是干线交通规划,机动车交通的种种危害也主要发生在干线道路上,但随着机动车数量的急速增加,地区内道路上也涌入了大量的机动车,如上述第 6 项中所述的许多地区交通问题也逐渐扩大。尤其是地区内过境交通过多,引起人与车之间的冲突,严重影响地区居住环境。

怎样才能既处理好机动车交通又保证步行者的安全、舒适,并且确保居住环境的质量呢?必须从不同于干线交通规划的角度针对地区交通的特点进行规划设计并付诸实行。地区交通规划的最初形式包括近邻住区论、布凯南的居住环境区域、步行者天国、分区交通等等。日本 70 年代曾试用过交通管制形式,80 年代开始对干线道路所围区域及铁道站周围地区实行地区交通规划,今后有广泛应用的趋势。

10. 土地利用规划与交通规划的綜合化

在考虑交通规划问题时,不但要处理目前的交通问题,还要寻求根本的改善措施,为此,应把强化土地利用规划管理作为重要课题。交通与人们的居住、工作、休息等活动密切相关,人们的居住空

间、工作空间、休息空间的配置及人口密度等这些土地利用规划的内容也与交通规划有着直接关系,应当依据土地利用的理想状态相应地确定交通需要量。例如,建筑物容积率的理想值就与交通发生、交通吸引量密切相关。可以通过土地利用规划的实施严格控制土地的使用方法,进而控制交通发生与交通吸引,在控制管理交通需求方面,这一课题今后必须更加重视。因此,在制定交通规划时,与土地利用规划相结合,进行一体化的综合处理非常重要。

2 交通调查

2.1 概 述

对交通系统及其关连设施进行调查,为交通规划提供可靠的依据,是制定合理的交通规划的基本前提和重要环节。在进行交通系统规划过程中的每个阶段,都需要有和该阶段相对应的各种各样的基础数据。在制定交通规划时,为预测交通需求,建立交通需求预测模型,分析交通的供求平衡,通常要进行大规模的交通调查,这一部分工作在制定规划的过程中占有相当大的比重。因此,进行合理而有效的交通调查,是交通规划中的重要课题之一。

本章首先说明进行交通系统规划时必须具备的数据,然后简述一下这些数据的调查方法和与此相关的若干基本概念。其次,介绍一下国内外的主要交通调查及其特点,以作为我们今后进行交通调查时的参考。最后,讨论一下我国居民出行调查的现状和课题。

交通规划所需的主要数据为:

- 关于交通设施提供者的社会经济活动系统的有关数据;
- 关于交通利用者的社会经济活动系统的有关数据;
- 关于作为交通市场供求平衡结果的交通流的有关数据;
- 伴随交通规划、交通设施建设和交通政策的环境影响、资源等有关的数据;

- 社会经济动向等影响交通产生的其它有关要素的数据。

以上五种数据,有的属于为进行交通规划需要直接进行调查、收集的数据,我们称其为第一类数据,有的属于非直接调查,可利用其他各种调查间接获得的数据,我们称其为第二类数据。

① 关于交通系统方面

主要是调查交通技术,交通设施和车辆,交通服务,有关交通的制度和政策等的现状及将来的动向,把握交通服务的供给方面的情况。

② 关于社会经济活动系统方面

主要是调查规划对象地域的人口,各种主要经济指标及与交通需求相关连的各种活动的空间分布和活动量的现状及将来的动向。这一方面的调查和数据的收集整理主要是把握交通服务的需求方面。

③ 关于交通流方面

主要是调查现在的交通系统的交通发生、吸引量,交通需求的起终点分布,道路断面交通量等现状数据及相应的交通服务状况(旅行时间,速度,交通密度,拥挤度,利用成本,安全,舒适性及方便性等)。

④ 对环境社会的影响及资源状况

- 对环境的影响(包括噪音,振动,空气污染,日照障碍,地域隔断,自然生态平衡,水环境,地基沉降等)。
- 对社会经济的影响(包括文化遗产,古迹,景观,地域社会,动迁设施,建筑物,可达性,生活圈,市场圈,群众性活动,交流,产业,设施所处环境的变化及再开发等)。
- 资源(包括土地,空间,能源消耗,所需人员,建设费用,运营,维修管理费用及费用负担等)。

⑤ 其它关连要素

- 社会经济动向(包括人口,社会结构,生活方式,价值观,产

业构造,技术革新,国际环境和其他)。

- 地域条件(气候,地形,地势,地理,风俗,历史,文化,政治等)。

与上述的①交通系统,③交通流,④对环境、社会的影响相关的数据,应该作为基本数据,即第一类数据进行调查收集。与②社会经济系统相关的数据可通过相关调查和资料等间接获得。如为进行土地利用规划、城市规划而进行的调查等。关于⑤其他相关要素的数据,是可以通过各种现有统计和地图、社会经济规划,国家总体规划及其他现有调查结果为基础来进行整理的第二类数据,一般说来,可根据需要进行一些补充调查。交通系统的主要数据如表 2.1 所示。

表 2.1 交通系统规划所需要的主要数据

1. 交通系统
• 交通技术(包括动力,车辆,运行控制,轨道,通行带,交通系统,性能等)。
• 交通设施,车辆(包括道路,铁路,交叉点,出入口,停车场,车站,终点站,车辆等)。
• 交通服务设施(包括公共交通路线,运行状况,收费额,经营,企事业单位,维持,管理,交通法规,运营等)。
2. 社会经济活动系统
• 人口,雇用,产业,经济(人口,经济结构,空间分布,选址,开发政策,规划等)。
• 土地利用(种别分布,土地利用功能划分,建筑物用途,开发,再开发政策,规划等)。
• 主要设施(主要公共设施,民间文化,余暇,体育设施等的配置和利用,大型活动等)。
3. 交通流
• 交通流(不同设施利用交通量,断面交通量,发生、吸引交通量,起终点交通量等)。

续表

-
- 交通服务(旅行时间,速度,交通密度,拥挤度,利用者所需成本,安全性,舒适性,方便性等)。
-

4. 影响、资源

- 对环境的影响(噪音,振动,大气污染,日照,自然生态系统,水环境,地基下沉等)。
 - 对社会经济的影响(文化遗产,古迹,景观,公共环境,移动设施,建筑物,可接近性,生活圈,市场圈,大型活动,交流,产业,设施选址变化,再布局等)。
 - 资源(土地,空间,能量消耗,必要人员,建设费用,运营,维持,管理费用,费用的负担等)。
-

5. 其它关连要因

- 社会经济动向(人口动态,社会结构,生活方式,价值观,产业结构,技术革新,国际环境,其它等)。
 - 地域条件(气象,地形,地势,地理,习惯,民俗,历史,文化,政治等)。
-

2.2 有关交通调查的基本概念和调查方法

2.2.1 交通的量测单位和基本概念

交通是人和物的空间(场所)的移动。但是如何量测交通,定义交通的基本量测单位并不容易。对于人的交通,已有“居民出行”这个概念。但使用此概念开始正式地进行交通调查还是最近几十年的事。20世纪50年代美国的芝加哥大都市圈最初开始进行这种调查,在此之前通常是使用特定的交通设施的利用人数、乘车次数或特定地点的通过人数这些量测单位,来表现各种交通方式组合进行的空间移动的全体,但这种表现方法不充分。出行(trip)这一概念,定义为“人有目的进行的由特定的出发地点(起点,origin)到目的地(终点,destination)的单方向的移动”。出行目的可分为上

班、上学、下班、放学、生活、文化娱乐、公务、回程等几种。此外,对应于出行的两个端点即起点和终点,称做“出行端点”(trip end)。因此,对应于一个出行有两个出行端点。通常,出行是指以人为对象的居民出行。但对于汽车来说也可以拓广此概念,使用“汽车出行”这一术语,只不过汽车本身并不带任何目的。

在交通规划中,如果对用于移动的交通方式感兴趣的话,可以从另一个角度给出行下定义。在通常的出行中,出行者从出发地到目的地,利用一种以上的交通方式以到达终点。因此,如果我们按照换乘的不同交通方式来区别移动的话,可将每一个利用不同的交通方式所进行的移动,称为“方式出行”(或 unlinked 出行)。与此相对应,不考虑所利用的交通方式,只考虑由出发点到目的地的全体的移动,称为“目的出行”(或 linked 出行)。例如,从自宅步行走到附近的汽车站,乘汽车到火车站,换乘火车到市中心的火车站下车,然后步行到工作单位,这样一个以通勤为目的的移动过程,是以通勤为目的的 1 个单位的目的出行(1 个出行);同时也是由 2 个单位的步行出行、1 个单位的汽车出行和 1 个单位的铁道出行这样 4 个单位的方式出行(4 方式出行)构成的移动过程。与此相应,由自家到工作单位利用小汽车通勤的情况下,是以通勤为目的的 1 个单位(目的)的出行,同时也是 1 个单位的小汽车方式的出行。由此可见,出行者为到达目的地,一般来说都利用多种交通方式,所以方式出行数要多于目的出行数。

关于用目的出行来表现的居民出行,为了反映利用交通方式的特性,有“代表交通方式”这个概念。利用此概念,可以使 1 个交通方式与 1 个居民出行相对应。所谓代表交通方式,是指在预先决定交通方式的顺序时,在所用的多个交通方式中最主要的交通方式或在一个目的出行中所用的最长距离的交通方式。前者的顺序

在日本的居民出行调查中一般是指铁道、公共汽车、汽车、摩托车、步行这样的顺序。一般来说,居民出行是在目的出行的概念下来使用的。此外,在欧美所进行的居民出行调查中,对利用步行和自行车的出行有两种处理方法。一个是只包括一定时间、距离以上的出行,还有一种是不包括这些出行。

在考虑物的移动时,也和人移动时的出行概念相同,有货运(freight)这一概念。即把特定种类的一种物品,由起点到终点的移动定义为1件货运(freight件数)。但是,物的移动不像人的移动那样具有人这一共同的基本移动单位,而且因为货物种类的不同,相应的量测单位有的是重量,有的是体积,还有的是金额等多种多样。而且,根据所利用的交通工具(在发展中国家用人力、畜力来进行货物的搬运也占有重要的比例,而在发达国家一般来说用人、自行车等进行货物移动时不作为调查的对象),货物的外形及装载尺寸不同,运输量的量测单位也有个数、箱数、货车数等各种各样的单位。这样在考虑物的移动的时候,共同的量测单位的设定就很困难。在一般的交通规划中,对各类货物通常以其重量作为统一的尺度来进行量测,但为了与交通工具、交通设施的量相对应,需要按货物的品种进行适当的换算,确定适当的换算系数,因此与人的流动相比,对货物需求进行预测更加困难。

在物的移动中也有利用多种方式的情况,按照各种不同交通工具为基础考虑的移动叫做“总流动”,把到达终点的全体货物的移动作为基础来考虑的移动称作“纯移动”。例如,从某个炼钢厂将1t钢材按卡车——铁道——卡车这样的顺序换乘运载到加工厂,这时总流动是在3个起、终点间各有一个1t(合计3t,其中卡车2t,铁道1t)的流动,而纯流动则是在起终点之间有一个1t的流动(铁道1t,而代表交通工具通常定义为移动距离最长的交通工

具)。

2.2.2 交通调查方法

将人、物的移动作为调查对象的方法,可大致分为通过观测进行的调查和通过询问进行的调查两种。通过观测进行的调查,是指在交通工具上或交通的始终点处进行实际观测,这种调查具有代表性的实例为断面交通量调查、车站上下车人数调查等。在这种观测调查中,有直接观测出行和货运的调查,也有用观测通过的汽车台数等方法来掌握移动量的调查。例如,要进行地区交通及停车调查,可通过汽车的车辆牌号来进行经路和滞留时间等的调查。此外,最近有很多研究者在研究开发根据道路断面交通量来推算OD交通量的方法,在英国一些地方这种方法已开始应用。即使交通需求的结构及特性不十分清楚,如果采取一定的对策,根据观测调查取得一定的数据,也可以制定出较好的交通规划来。

但是,为了调查移动的详细内容,有必要以某种形式进行询问调查。在调查人的移动时,可以在出行现场直接询问出行中的人,也可以到住处或工作单位采访,调查个人的出行状况。前者作为现场询问的例子,如有关机动车交通,可进行路侧询问调查;有关铁道、飞机等交通工具可以在车内或车站、机场等进行询问调查,或将调查表发给所有乘客,然后由乘客填好邮寄交回等。另一方面,对于后者作为家庭访问的例子,有为进行居民出行调查的家庭访问调查和物质流动调查时所进行的工厂、机关访问调查等。

表2.2列出了美国主要的交通调查方法及其特征。其中用电话进行采访及利用车牌号记录进行的邮送调查,在美国应用较多。在电话的普及率相当高的今天,作为被调查者居住较为分散的大范围的调查,或者作为家庭访问及邮送调查的补充方法,以及作为以上各方法的组合调查方法,可以利用电话进行调查。另外,利用车辆牌号记录的邮送调查,可以在免费的高速道路,为了使车辆不

停车就能进行调查而开发的方法。而在收费高速公路,在收费站进行询问调查是可能的,而且很方便。

表 2.2 各种交通调查方法的特征

调查方法	回答率 (%)	有效单价 (\$)	优点	缺点
1. 家庭访问方法	85	15~50	柔软性高,可以进行很长很复杂的询问;回答率高,母集团明确	费用高;会剩下难以调查的地区,调查结果受调查员的素质影响较大
• 当面询问(20~30分)				
• 分发调查表再进行回收	75	2~5	母集团明确,调查员能说明调查内容	会剩下难以调查的地区
• 配布调查表用邮递进行回收	50	2~5	母集团明确,调查员能说明调查内容	会剩下难以调查的地区
2. 电话采访调查	50 (仅1次) 97~100 (多次)	3~16	柔软性高,回答率高;费用低;容易除去不合适的回答者层	由于电话簿有未登记者,调查对象会出现偏差;图表等不能直接通过公共电话进行视觉的传递,只在短时间内可能
3. 邮递调查(调查表的分发及回收均用邮送方法)	20~40	2~5	费用低,短时间内可能进行大量的样本调查;可以向更广范围分发;母集团明确	由于有不回答者,所以结果会有偏差;如果事前不剔除不合适的调查对象,则可能造成浪费。

续表

调查方法	回答率 (%)	有效单价 (\$)	优点	缺点
4. 公共汽车内调查 • 车内询问(1~2分) • 车内配布回收 • 车内配布邮递回收	85~95 55~97 20~40	2~4 2~4 2~4	能明确地把握母集团(公共交通利用者),费用低	只能调查利用者,结果偏于利用回数多的利用者阶层;询问只限于少数
5. 路侧调查 • 路侧直接询问(1~2分) • 路侧配布邮递回收	20~40	2~5 2~4	能明确地把握母集团(汽车利用者),费用低	由于要使汽车停下来,对车辆有妨碍;询问只限于短时间。
6. 利用车辆牌号记录进行邮送调查	20~40	2~4	能明确地把握母集团(汽车利用者),费用低	由于是根据通过车辆的记录进行邮送,司机未必能记住有关事项
7. 在某一地点直接进行询问调查(20~30分)		10~50	柔软性高,对公共交通利用者和非利用者能在一个地点进行调查。	费用高,抽出的样本结构不明确;结果与调查员的素质有关。

关于物的移动,要把握其属性比把握人的移动的属性更困难。即使看见了移动的货车,也知道其外观的属性,而且,即使询问货车的司机和运输公司,也只是知道他们各自所担当的运输部分,所以有必要询问发货人。此外,人移动的据点是自家,为了分析周期为一天的活动状况,可进行家庭访问。但物的移动没有以某一地点为据点的移动周期,它是一个按照生产—保管—消费—废弃这样一个过程逐步地被加工、组合、细分,变形同时在各种设施间移动,而不能掌握其全部。因此有必要调查所有的与这些移动有关的发货人。所以要进行企、事业单位访问调查。此外,还要对用于物的移动的货车车主等交通运输企业(专业运输公司用车)和一般用户(个体运输户用车)进行询问调查。

2.2.3 调查时间

在交通调查中,调查时间的确定是一个重要的问题。在考虑人的移动时,由于人的移动一般是发生在以自家为据点、以1天为周期所进行的日常生活中,所以进行平日的一日活动调查大致上能够把握住交通状况。但是,在进行度假区的开发、观光地和一部分都市间道路等规划时,有必要进行休息日、假日的交通调查。这些休息日、假日交通通常次数少,季节性变动大,距离较长,往往一天不能完成,需要数日间才能完成。所以与平日交通的调查相比,需要慎重确定调查日和调查时期。

另一方面,关于物的移动,不像人的移动那样有固定的周期,根据其货物品种,有像农作物那样随季节变化的货物,也有毫无变化规律的货物。所以希望调查期间长,并且调查时间的确定也要慎重考虑。

2.2.4 调查对象地域的确定和区域划分

调查对象地域可根据目的自行决定,但有必要考虑以下几点。

① 从将来的社会经济活动地域分布的角度出发,要将与规划对象相关连的地域都包含进去,范围要足够大。

② 为了使所要调查的对象地域的出入交通量调查(自然封闭曲线上的要道调查)容易进行,要使得出入交通路径的数量尽量少,所以要利用河川、山脉、铁道等天然屏障来设定封闭曲线。

③ 为利用已有的相关统计,要尽量与调查对象的行政区划相一致。而且,当进行封闭曲线上的路口调查较困难时,将调查对象地域扩大到比规划对象区域再大一圈的外围将更为有效。为了将调查对象地域内各交通小区的交通量的起终点特定化,要根据区域进行小区划分。为了详细把握交通的空间特性,必须详细进行小区划分,但是如果小区数增加 1 倍的话,起终点的小区对数将是原来的 4 倍。不但影响调查、分析作业量,而且费用也会大大增加。因此,按照规划的目的,有必要根据要求的数据精度,调查分析作业量的平衡,来考虑适当的小区划分。为了确保数据的精度,有时也要缩小调查区域,使之比规划时所必须的空间单位还小。在日本进行机动车 OD 调查和居民出行调查时,通常将调查对象区域划分为大区域、中区域和小区域。调查、分析在小区域内进行,规划以中区域为基础,大区域用于宏观性、大范围性的考察。以便根据不同目的,分别使用不同阶段的调查数据。

在具体进行交通小区划分时,要在考虑调查目的、规划对象设施所要求的小区划分的适当大小的同时,从交通特性的角度出发,要尽量使各小区的性质均匀,区域的面积要尽量均等,以接近圆形为好。要充分利用地形、河川、地物等障碍物为界线,尽量在行政区界线上划分区域。

图 2.1 是关于都市圈的区域划分的概念图。将都市圈划分成市中心、市区和郊外这样三个环,越靠近市中心一侧交通小区设定得越小。主要划分线通常设在由市中心向外的方向上,作为大区域的边界。核查线通常是利用将都市圈分成 2 个部分的河川、铁路等

障碍物。此种核查线既是区域(大,中,小)的边界线,同时也是核对调查、分析数据精度的有效方式。即由调查结果得到的 OD 表,通过此 OD 表推算被核查线分割的两个地区间的往返出行数,然后将此计算值与横断核查线上的观测交通量进行比较,据此检查 OD 表的精度。

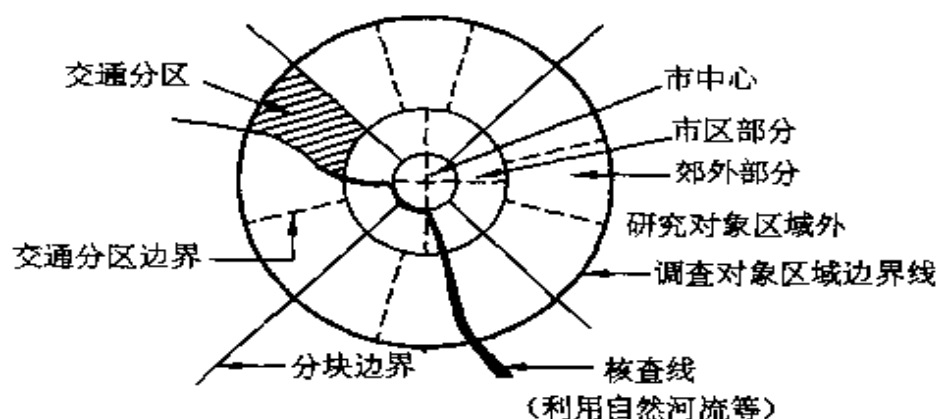


图 2.1 城市交通小区划分的概念图

图 2.1 表示到中区域。此中区域由都市中心部 4 个、市区 8 个、市郊 12 个构成,即对象区域内 24 个区域,以及对象区域外 8 个区域构成。此外,大区域由都市中心部 1 个、市区 4 个、市郊 4 个共 9 个区域构成。

从调查的对象地域和起终点的位置来看,作为调查对象的出行,如图 2.2 所示共有四种。其中内内出行是指起点、终点都在研究对象地域内的出行。外内出行及内外出行是指起、终点之一在对象地域内,另一方在对象地域外的出行。外外(通过)出行是指起点、终点均在对象地域外,穿越研究

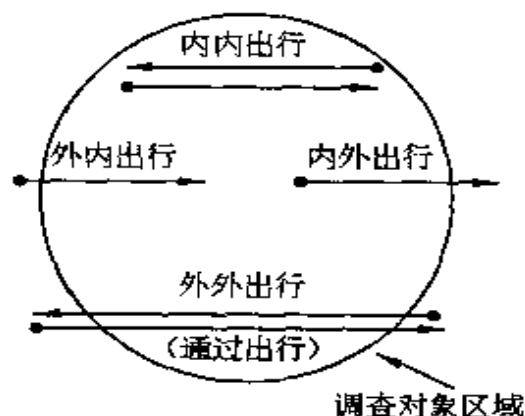


图 2.2 出行的种类

对象地域的出行。

2.2.5 抽样方法

不论是观测调查还是询问调查,一般说来对被调查对象母集团进行全数调查是很困难甚至是不可能的。所以,有必要进行抽样调查。在抽样调查中,为了能在所定的精度下推算出关于母集团的统计值,必须选取一定数量的能正确代表母体的样本。为保证调查具有代表性,通常采用随机抽样法。在出行和运货(freight)调查中,以城市居民户口、企事业单位登记簿、汽车登记簿为基础,用系统抽样法选出个人、企业或机动车样本。并且,在居民出行调查中,先抽出家庭,再抽出该家庭的全体人员(日本规定为5岁以上,北京1986年居民出行调查规定为6岁以上),由此构成严密的多阶段抽样法。此外,在进行诸如全国旅行动态调查之类的大规模调查中,首先要抽出调查对象的市、镇、村,然后从中抽出调查区,最后再抽出其中的某些住户,即采取所谓的多阶段抽样法。

关于样本的抽出方法,还有按照不同交通方式、不同车种、不同业种等的层别抽样法,还有有意识地选出具有代表性的样本进行调查的有意抽样法等。关于这些方法的特征,由样本能够得到的统计值的母体推算方法,精度或样本数的决定方法等,由于本书没有更多篇幅叙述,请参照一般数理统计教材。关于抽样方法和样本数的决定,在各种交通调查中,均须考虑调查目的所希望的精度、费用及时间等各种因素的平衡。

2.3 国外的主要交通调查及其概要

因为我国的交通调查还处于起步阶段,无论从调查的种类、范围还是广度,都未形成制度。所以,本节围绕在交通系统规划中作为第一类数据应独自调查收集的资料中,规模较大的有关交通流

调查及交通设施调查,介绍一下日本方面的情况,以作为我们建立交通调查制度的参考。

2.3.1 关于交通流的主要调查

图 2.3 概括了与起终点交通量(OD 交通量)有关的调查,按照调查的对象地域和运输的内容,将交通调查作了系统的分类。

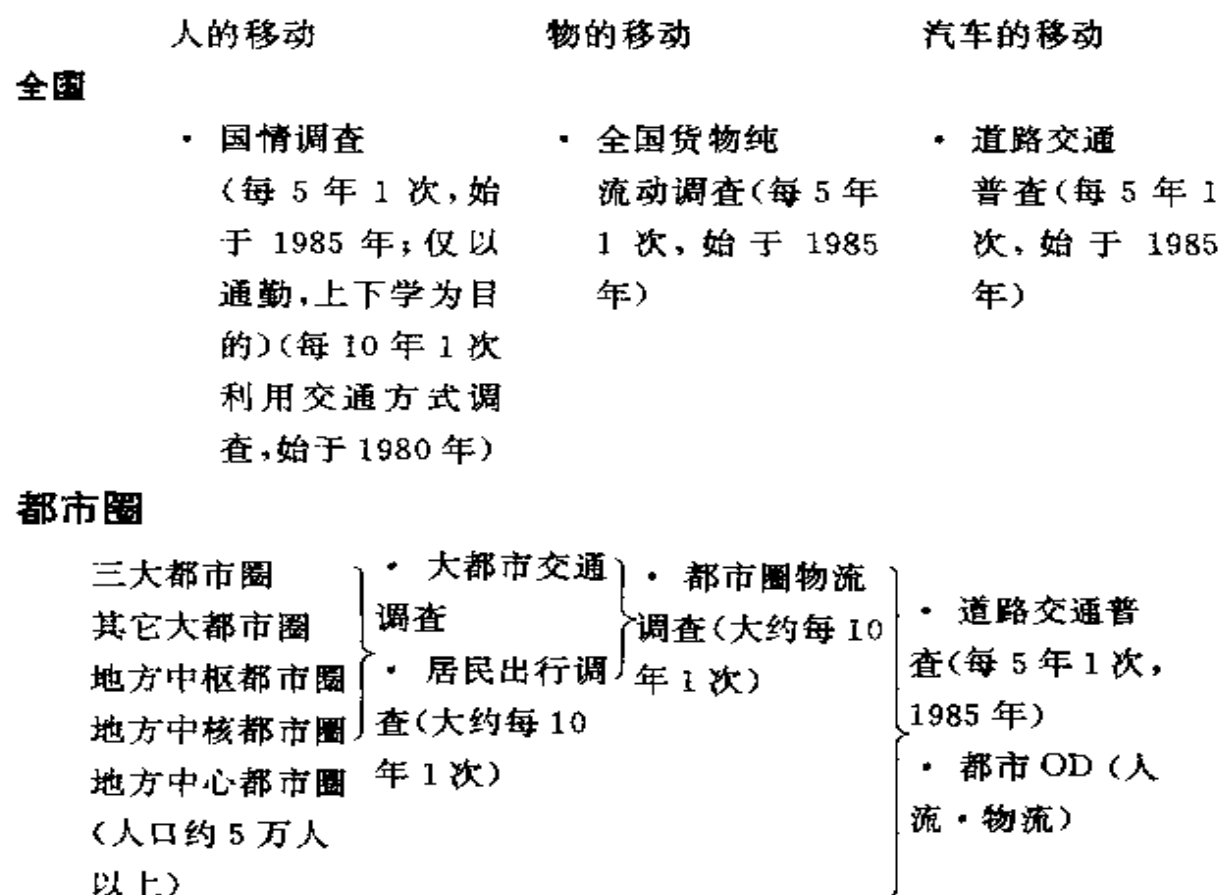


图 2.3 日本主要的交通调查

这些调查的主要对象是不同交通设施的利用交通量、交通小区吸引、发生交通量、起终点(OD)间的分布交通量等。关于交通设施,通常只是对旅行速度、所需时间、拥挤度等进行调查,关于服务质量的数据很少。并且,这些周期性的调查将成为个别的具体交通

规划的数据库,同时在同一调查方法和定义下,对各地的数据进行横向调查,也可以起到与其它地域进行比较的作用。另外,由于能够把握随时间的变化,作为监控用的数据库也起着重要作用。关于全国水平的人的流动,日本每年进行国情调查。此外,通勤、上下学交通的市区、镇、村间的 OD 交通量每五年调查一次,并且 1970 年和 1980 年对其利用的交通方式也进行了调查,以全数调查作为能够覆盖全国的贵重的周期性数据被利用。在欧美,国势调查还包括家庭不同车种的汽车保有状况、利用的可能性、通勤所需时间等数据,这些作为交通的原始数据是很重要的。同时在信息管理方面,欧美在有效利用国情调查数据的交通规划方法的开发方面发展也很快。由于通勤、上学交通占平日高峰时间带交通量的绝大部分,特别是中小城市的交通规划,用通勤、上学交通的数据在某种程度上要能够覆盖全体。

近年来世界各国越来越重视全国水平的居民出行调查。特别是关于长距离的都市间交通和休闲、休假交通等的综合性数据的欠缺,对高速交通体系定量的考察有很大的制约。并且,作为了解一个国家各地居民交通生活活动向的资料,在生活时间调查和家庭收支状况调查中,只不过片面地以交通消费时间和交通支出金额的形式来把握情况,在进行综合性的交通政策的制定方面经常由于缺少数据而遇到障碍。这种国家水平的居民出行调查,已经在美国(到目前为止 1969 年,1977 年,1983 年/1984 年共 3 次)、英国(1965 年/1966 年,1972 年/1973 年,1975 年/1976 年,1978 年/1979 年,1985 年/1986 年共 5 次)、西德(1976 年,1982 年共 2 次)和澳大利亚等国实施。在日本也已经开始进行实施的准备工作。

图 2.3 所示为主要的交通调查的调查项目概要,其内容整理为表 2.3。其中的道路交通调查(机动车起终点调查是其一部分),居民出行调查和都市圈物资流动调查,将在以下分别进行说明。这里将全国货物纯流动调查(物流调查)和大都市交通调查的调查体

系示于表 2.4 和表 2.5。

表 2.3 日本主要交通调查的调查项目概要

调查名	调查项目	
	样本属性	出行属性
货物纯流动调查 (运输部)	企业属性: 业种, 所在地, 就业者数, 占地面积等	出库件数, 种类和数量, 收货人业种, 主要运输方式, 集装箱、船、高速公路的利用状况, 利用货物, 港口, 机场, 装货状况, 所要时间
汽车 OD 调查 (建设部)	汽车属性: 车种, 所有形态(自家用, 营业用), 使用地, 使用燃料等	出发地, 目的地, 出发时刻, 出车目的, 乘车人员, 停车场所, 积载品目、重量, 是否利用高速道路, 目的地设施种类, 高速道路进出口名等
大城市交通调查 (运输部)	月票购买者属性: 住所, 工作地点、上学地点, 月票的种类, 通用时期, 付款者	乘车前、下车后的交通方式, 铁道利用区间, 换车, 上下车时间, 出发、到达时间, 到家时刻等
居民出行调查 (建设部)	个人属性: 现住所, 工作地点	出发地, 目的地, 目的地设施种类, 出发、到达时刻和目的, 利用交通方式及所需时间, 是否换车, 是否开车, 乘车人员, 停车的种类等
都市圈物资流动调查 (建设部)	企业性质: 企业种类、所在地, 职工数, 占地面积, 建筑面积, 汽车拥有数等	出发地、目的地, 目的地设施种类, 出发、到达时间, 品目, 重量, 货物形状, 所需时间, 运输方式, 中途装卸等
	货车属性: 车种, 承重量, 使用地, 总走行距离等	出发地、目的地, 目的地设施种类, 出发、到达时间, 品目, 重量, 货物形状, 所需时间, 运输距离等

表 2.4 货物纯流动调查体系

货物流动调查(3 日间调查)	对企业 3 日间的产品出厂状态进行访问调查或邮送调查。
年间运输倾向调查	对企业 1 年中不同种类产品的出入库量、运输方式分担率、入(年间调查)出库对象地域比率、每月的流动率等进行访问调查或邮送调查。

表 2.5 大城市交通调查体系

铁道利用者调查	铁道定期票调查:在售票处对月票购买者进行询问。 (10 月末平日 5 日间抽样调查) 铁道普通票调查:在下车车站按不同乘车地点、不同时间段进行回收。 (平日 1 天全数调查)
公共汽车、电车利用者调查	公共汽车、电车定期票调查:同铁道 公共汽车、电车 OD 调查:回收能判明上下车地点的车票。 (平日 1 天抽样调查)

2.3.2 道路交通调查梗概

所谓“道路交通调查(“日本全国道路、市内道路交通状况调查”,建设部)”,是对道路设施及道路交通现状在全国范围内所进行的周期性调查,它是道路相关规划的基础数据的来源。在日本,这种道路交通调查始于 1928 年,最初以把握断面交通量和道路状况为目的。自 1958 年起又追加了机动车起终点调查。1962 年以后每 3 年进行一次,从 1980 年起改成每 5 年一次。为随时掌握变化

状况,5年中间(第3年)进行一次简略调查,即只进行一般交通量调查。我国交通部也在进行国家干线公路交通量调查。

图 2.4 所示为日本道路交通调查的调查体系。1985 年道路交通调查由“一般交通量调查”和“机动车起终点调查”这二种调查构成。一般交通量调查的内容,是关于主要道路状况的“道路状况调查”,关于不同车种不同时间段断面交通量的“交通量调查”和关于主要道路区间的高峰时间段的“旅行速度调查”三方面内容。

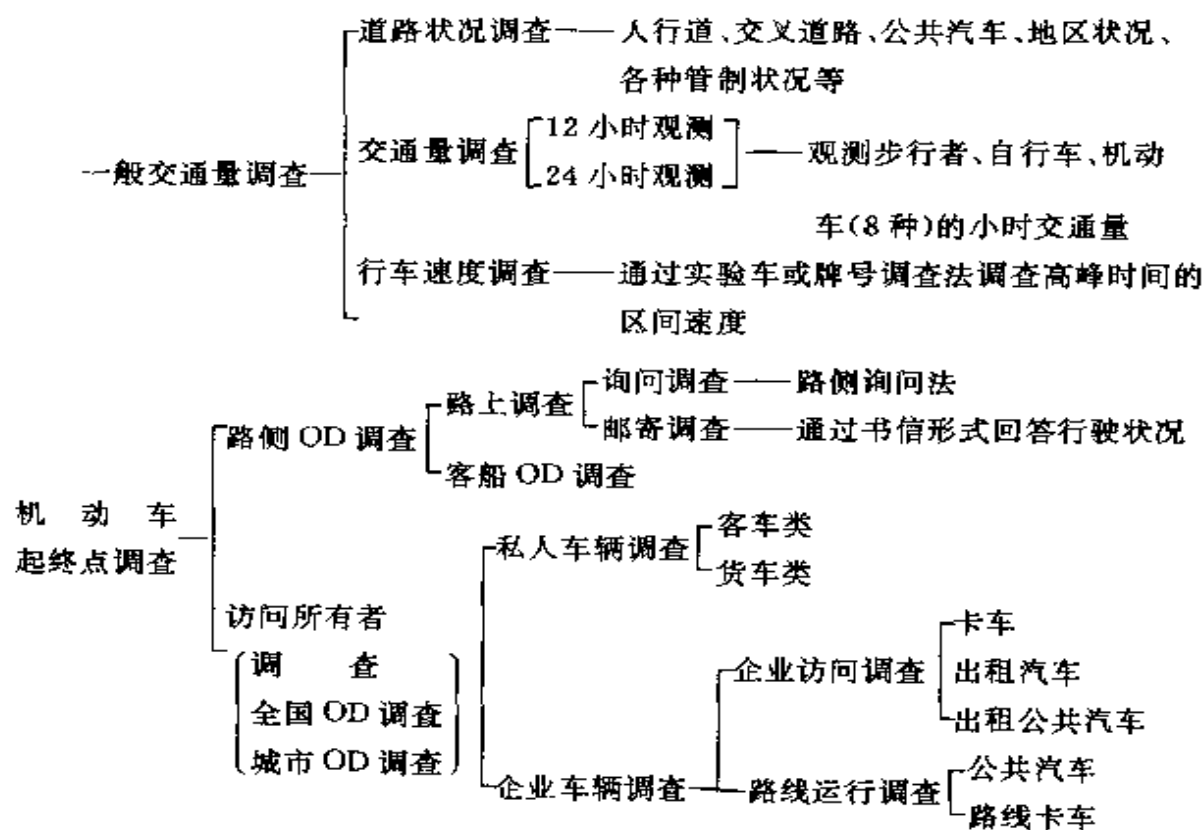


图 2.4 道路交通调查体系

机动车起终点调查,由“路侧 OD 调查”和“机动车所有者询问 OD 调查”构成。是以机动车为抽样单位,为把握平日一日的不同车种起终点交通量和出行目的、乘车人员、积载品种、重量等属性所进行的调查。路侧 OD 调查,是为了补充采访机动车所有者 OD

调查,提高 OD 表精度而进行的调查,在行政区界限和一部分省界处设定封闭曲线使通过的车辆停车进行询问性的调查。询问机动车所有者的 OD 调查,由机动车登记簿随机抽取某机动车,通过访问机动车所有者或使用者来达到调查的目的(抽样台数,1985 年为 3.2%,139.2 万台)。

访问机动车所有者的 OD 调查,有道路局担当的“全国 OD 调查”和都市局担当的“都市 OD 调查”。都市 OD 调查大体上以人口 5 万人以上的地方中心都市圈为主体,大约选出 30~40 个都市圈实施,对没有进行居民出行调查的中小都市圈来说,都市 OD 调查是重要的数据源。都市 OD 调查的询问内容与全国 OD 调查相同,但对象都市圈的区域划分更详细,抽样率提高。而且,为了检验调查的精度,在都市圈内设定核查线,观测横断核查线的交通。此外,在 1985 年的都市 OD 调查时,对抽出样本新增加了“关于机动车的拥有·利用的调查”,对拥有机动车的家庭及事业所调查其机动车的拥有·利用状况和今后的购买计划。

机动车起终点调查中的区域的大小,在全国 OD 调查中大约以市、镇、村的大小相当的地域(B 区域,全日本约 4 700 区域)为基本单位,在都市 OD 调查中将其划分为更细的区域(C 区域),作为单位来统计。

2.3.3 居民出行调查概要

居民出行调查,是为了把握一日间人的行动整体的综合性调查,是城市综合交通规划的最基础的数据。如前所述,日本于 1967 年在广岛都市圈正式导入此调查后,至今为止,以人口约 30 万人以上的都市圈为对象,在大约 40 个都市圈实施了此项调查。大致以 10 年为周期进行重复性调查,至今已有 12 个都市圈进行了第二次调查。

调查的实施状况如表 2.6 所示。居民出行调查一般包括出行

表 2.6 日本居民出行调查的实施状况

城市圈	调查年	对象区域面积 (km ²)	总人口 (万人)	抽样率 (%)	居民出行特征			汽车拥有 (台/1000人)
					总数 (万出行/日)	每人平均 出行数	外出率 (%)	
第二次 道央	1983	3,183	198	6.7	521	2.85	83.8	352
旭川	1982	1,503	40	8	104	2.83	82.5	365
函馆	1986	962	38	8	83	2.32	81.6	352
盛岗	1984	1,983	38	12.5	87	2.45	83.3	377
第二次 仙台	1982	2,076	128	9	286	2.42	85.1	334
秋田	1979	2,039	43	9	106	2.66	84.0	318
郡山	1986	1,362	46	10	104	2.44	82.3	365
日立	1986	380	29	11	64	2.38	83.8	322
宇都宫	1975	1,469	69	5	155	2.44	82.5	280
前桥	1977	1,308	101	8	230	2.50	81.2	331
第二次 东京	1978	15,141	2,807	2	6,652	2.53	85.9	201
新泻	1978	887	81	6	187	2.53	84.3	318
第二次 富士	1984	2,546	88	7.5	226	2.68	84.3	418
第二次 金泽	1984	701	57	9	154	2.89	87.8	409
富井	1977	1,768	55	9	146	2.87	83.8	309
静岗 清水	1971	500	63	10	168	2.93	—	238

续表

城市圈	调查年	对象区域面积 (km ²)	总人口 (万人)	抽样率 (%)	居民出行特征			汽车拥有 (台/1000人)
					总数 (万出行/日)	每人平均 出行数	外出率 (%)	
第二次西远	1985	971	91	8	224	2.63	85.1	435
第二次中京	1981	5,656	779	4	1,837	2.52	83.7	394
第二次京阪神	1980	10,740	1,767	3	4,360	2.66	83.5	257
播磨	1978	1,940	111	7	247	2.50	88.1	278
第二次岗山	1982	1,248	120	2	287	2.58	86.4	385
备后	1979	1,014	69	7	161	2.54	84.6	308
广岛	1967	413	75	5	283	2.72	—	138
周南	1977	400	14	12	35	2.69	87.9	326
德岛	1983	585	52	8	117	2.43	82.0	414
高松· 阪出	1974	677	59	7	142	2.62	85.5	288
松山	1979	799	54	8	165	3.06	86.3	310
高知	1980	525	41	8	112	2.67	86.5	355
第二次北部九州	1983	5,048	460	3,4,5	1,082	2.53	87.3	318
第二次长崎	1985	742	72	7	163	2.41	83.2	290

者的个人属性和关于一日间每个出行从出发地到目的地所用的交通方式、目的及其他特性。出行调查体系如表 2.7 所示,主要是以调查对象地域内的居住者(5 岁以上)为对象进行“家庭访问调查”。为了补充流动人口的出入地域和过境交通量,进行了大量的“大运量运输工具调查”和“封闭曲线调查”。在来自于地域外的公务、观光等来访者很多的情况下,有时也进行“住宿者调查”。为了弥补家庭访问调查不能充分把握的营业用机动车的出行,也要进行“营业用车调查”。大运量运输工具调查和封闭曲线调查还担负着补充居住者有关长距离出行的数据的作用。这种长距离出行发生的概率少,家庭访问调查不容易把握。再有,大运量运输工具调查对整个地区的抽样率相同且很低,为了充分掌握那些通过大运量运输工具调查不能很好掌握的地区、方向(例如环状方向)的利用公共交通的出行状况,有时也进行这种大量运输工具调查。

表 2.7 日本居民出行调查的调查体系

家庭访问调查	抽户、对其家庭成员进行平日 1 日的移动状况的询问调查
大运量交通工具调查	对利用铁道、公共汽车、船舶等出入都市圈的人员进行居住地、移动状况等的询问调查
营业用车调查	对出租汽车、公共汽车、卡车等营业用车的运行状况,访问运营单位进行询问调查
封闭曲线调查	设定包围对象都市圈的封闭曲线,对出入该封闭曲线的汽车的运行状况进行路侧询问调查
核查线调查	设定将对象都市圈内分割开的核查线,对出入该曲线的断面汽车交通量进行调查

核查线调查,是以校核以上各调查结果所推算的 OD 表为目的,利用铁路、河川等障碍物设定将调查对象地域分成二部分的分

割线(称之为核查线),观测通过核查线的交通量所进行的调查。通过将观测值与由 OD 表推算的通过核查线的交通量相比较,来检查 OD 表的精度,根据需要对 OD 表加以修正。从现有实例看,通过家庭访问调查等方法,仅能把握 80%~90%的自家用小汽车的出行,而对自家用货车则更难把握,有时需要进行补充调查。造成这种现象的原因可以认为是交通量本身存在着日变动特性,短距离出行有漏记现象,特别是运送次数多的货车这种现象很多。

家庭访问调查,一般地是将居民户口作为样本抽出的基础,用随机抽样法选出调查对象(最初随机选出样本,然后按照抽样率按一定间隔选取样本)。

样本抽出率应该按能确保 OD 表的精度来确定,一般来说按都市圈的规模确定抽样率,表 2.8 所示的抽样率可作为参考。另外,具体地决定抽样率的时候,要考虑有效回收率(到目前为止日本交通调查的回收率多为 80%)。

表 2.8 家庭访问调查中不同城市规模的抽样率

人口规模(万人)	抽样率最小值	抽样率标准值
5	10	20
5~15	5	12.5
15~30	3	10
30~50	2	6.5
50~100	1.5	5
100	1	4

家庭访问调查的调查对象是秋季平日一天间人的移动,但按各都市圈的交通课题,还要进行补充性调查。例如,有冬季间积雪时的交通及休息日的交通调查。并且,为了详细考察利用非集计模型的通行费、服务对通勤、上学、购物交通的实际状况和利用者的意向,还要同时进行更详细的补充调查。由此可见,对应于各都市

圈所具有的现在或今后可预想的交通课题,要很好研究确定调查的内容是很重要的。

在居民出行调查中,除了家庭访问调查等出行调查外,还要进行土地利用调查、交通设施调查、行走速度调查、停车调查等的第一类调查。同时还要进行人口、产业、经济等基础数据的收集、整理,以及进行交通系统规划所必须的其它调查。

2.3.4 都市圈物资流动调查梗概

作为都市圈综合交通规划的一个重要环节,为了把握平日一日间的货物移动而进行的都市圈物资流动调查,最初是在广岛(1971年)进行的,在东京、京阪神(京都,大阪,神户)和中京这三大都市圈以10年为周期,已经进行了二次调查。此外在仙台、北部九州道央也正在实施该调查(参照表2.9)。

表 2.9 大都市物质流动调查概要

企业系统调查	对事业所的概要、进出货物进行样本询问调查(平日1天)
货车系统调查	对营业用・自家用货物车辆的运行状况进行样本询问调查(平日1天)
物流据点系统调查	对处于物流据点的企业进行关于企业概况、物流、货物车辆的运行状况等询问调查(平日1天)

调查一般包括企业系统调查、货车系统调查和货物流通据点系统调查这三种调查。企业系统调查的具体做法是,首先抽出作为货物流动设施的企业,进行业种、占地面积、职工人数、机动车拥有台数等的企业梗概和以车牌号为基础进行搬出、搬入的货物调查。

货车系统调查是以出行为基础把握货物流通的调查,包括对由机动车登记簿直接抽出的货车的调查和对按企业系统调查抽出

的企业拥有货车的调查。货物流通据点调查是对流通中心、工业区、批发零售区、港湾地区、铁道货车站、机场等地以高抽样率抽出企业,将企业系统调查和货车系统调查组合起来的调查。此外,为了补充物资流动调查精度,与居民出行调查时相同,关于货车的封闭曲线调查和核查线调查等也同样进行。

2.3.5 与交通设施相关的调查

交通系统的供给方面的状况,可以从交通技术、交通设施、车辆、交通服务、交通制度、政策等侧面把握,但在公共交通运输规划中关于作为社会基础设施的交通设施的调查是很重要的。交通设施调查的主要对象是道路、公共交通(公共汽车,铁路等)、飞机场、港口的各种设施和站前广场,货物流通中转站、停车场等交通连接点乃至至于中转站设施等。对于建设和管理都是在单一的部门下的设施,由于业务上的需要,有些基础数据被常时观测。但对于像停车场那样的与许多公共的、民间的主体相关连的设施,进行交通规划时,必须重新收集基础数据。即使有现成的数据,从多个部门拿到这些数据,再进行定义的统一,数据的更新,加工成其它交通规划所必要的信息,这些作业也不容易。所以要想获得某项具体规划所必须的数据,通常要重新进行独自的调查。

日本每年都在进行“道路设施现状调查(建设部)”,从高速公路到市、镇、村道路,对全部道路进行调查,掌握道路的 km 数、路宽、人行步道的设置状况、与铁路的交叉点位置及道路的改良状况等。并且,如上所述每隔五年进行一次的道路交通调查中,就包括“道路状况调查”,对主要道路进行包括车道数、信号交叉点状况、公共汽车路线、沿途状况、旅行速度等的道路状况调查。在进行个别的交通规划时,关于对象地域的道路网,其交通容量、各种交通管制状况、已制定的改良规划等数据及图面是必要的。

公共交通设施调查是对公共汽车、铁路等公共交通工具的路

线、起终点、车站、终转站的设施和配置、车库、调头设施、车辆数和运送能力、运行间隔时间、运行时间带、运费、经营主体、已制定的改良规划等(包括交通服务和经营等),对所有的供给状况进行调查。

在交通枢纽,对不同的交通方式即铁路和步行者、自行车、自家用小汽车、出租汽车、公共汽车等,连接道路交通的站前广场和公共、民间经营的路外停车场、路上停车设施、车库及多个主体经营管理的停车场,由于已有的统计不充分,有必要按照交通规划的需要进行独自的现状调查。在站前广场调查中,要调查广场的面积,上、下车的人员、公共汽车、出租汽车,自家用小轿车的停车台数,等待停车位置数及其配置,自行车停车场,步行者设施等。

2.4 我国居民出行调查的现状与课题

2.4.1 我国居民出行调查的现状

自 1981 年以来,我国天津、上海、徐州、沈阳、北京、广州、杭州、常州、长沙、长春、大连、深圳等大中城市先后进行了人、车 OD 调查,从点到面,联系实际,完成了一批研究成果,为城市综合治理提供了宝贵的分析依据。

北京市于 1986 年进行了第一次居民出行调查。全市共分 65 个交通分区,151 个交通小区。调查区域内总户数 150 万,人口约 582 万人。调查抽样以户为单位,抽样率为 5%。共抽得样本 7.5 万户,26 万人。调查期间为 1986 年 6 月 3 日~6 月 9 日,采用家访调查,由调查员在约定时间内到居民家中当面了解户中 6 岁以上成员全天的出行情况。

出行的定义为:

- ① 为了某一个目的并有明确去向;
- ② 经由有路名的市区或市郊区街、巷或道路;

③ 移动单程距离超过 500m 或步行时间 8 分钟以上的即构成一次出行。

调查内容为有关出行的家庭信息、个人特征信息和居民出行行为信息。

① 家庭信息：家庭住址、家庭人口、拥有自行车数、摩托车数、家庭月人均收入和户总出行次数共 6 项。

② 个人特征信息：性别、年龄、职业、文化程度、有无月票、公休日、班制和工作单位名称共 8 项。

③ 出行行为信息包括出行目的、出行方式、出发时间、到达时间、出发地点、到达地点和经过的主要路口共 7 项。

其中出行目的包括：上班、上学、下班、放学、生活、文化娱乐、公务、回程等 10 项；出行方式包括：步行、自行车、公共交通、单位自备车、摩托车、出租车等 10 项。

全市抽样总人数为 257110 人，其中无出行总人数为 96911 人，占抽样总人数的 37.69%，本市居民平均出行次数为 1.61 次/人·日，有出行行为者的平均出行次数为 2.64 次/人·日。我国居民出行调查部分城市的平均出行次数如表 2.10 所示。

表 2.10 不同城市人平均日出行次数统计

城市名称	出行次数/人·日	城市名称	出行次数/人·日
北京	2.64	青岛	2.54
上海	2.62	南京	2.75
天津	2.47	成都	2.93
广州	3.06	汕头	3.07
大连	2.06	镇江	2.85
苏州	2.78	济南	2.70
武汉	2.84		

2.4.2 我国居民出行调查的课题

纵观我国居民出行调查的现状,存在以下需要研究解决的问题。

① 尚未形成一套完整的调查制度,几乎每次调查均是针对某个研究课题、项目进行的,规范化的调查制度应该具有定期性。

交通调查作为城市交通规划的一项基本工作应该定期实施,以便及时发现研究对象城市的主要交通症结,交通需求特性及发展趋势,为近期、远期综合交通规划及交通管理规划的制定提供依据。

② 调查标准尚未统一。统一调查标准,才能进行横向、纵向的比较分析,利用统一标准后的数据建立的预测模型,才具有时间、地点的转移可能性,从而为最充分有效地利用调查数据奠定基础。

③ 资源共享问题。进行大规模的居民出行调查,需要大量的人力、物力和时间,而居民出行调查数据又是进行不同层次交通规划的基础数据。在建立调查制度、统一调查标准的基础上,应有专门的管理部门,从事调查的管理工作。调查结果应整理出版,以供规划部门、研究部门和管理部門等综合利用,从而获得最大的资源效益。

3 交通与土地利用



3.1 交通与土地利用的关系

3.1.1 交通与土地利用的关系

交通与土地利用相互联系、相互影响,交通发展与土地利用相互促进。从交通规划的角度来说,不同的土地利用形态,决定了交通发生量和交通吸引力,决定了交通分布形态,在一定程度上决定了交通结构。土地利用形态不合理或者土地开发强度过高,将会导致交通容量无法满足的交通需求。从土地利用的角度来说,交通的发达改变了城市结构和土地利用形态,使得城市中心区的过密人口向城市周围疏散,城市商业中心更加集中,规模加大,土地利用的功能划分更加明确。同时,交通的规划和建设对土地利用和城市发展具有导向作用,交通设施沿线的土地开发利用异常活跃,各种社会基础设施大都集中在地铁和干道周围。

所以,各项经济指标、人口和土地利用是交通需求预测的始点。也就是说,上述指标是最基本的输入数据,城市综合交通规划是以这些数据为基础构造模型,进行交通需求预测,制定综合规划方案的。

鉴于交通与土地利用的上述关系,交通规划领域的专家们越来越重视在交通规划过程中导入交通与土地利用的相互反馈作用,注意协调交通与土地利用的关系,注重土地利用规划和交通规

划的综合化。为此,本章将围绕上述问题进行讨论。本节将介绍交通条件对不同类型用地的影响,第2节介绍一些主要的土地利用模型。

3.1.2 交通和区位理论

1. 区位理论的产生和发展

区位理论是关于人类活动,特别是经济活动空间组织优化的理论。它是从空间或地域方面定量地研究自然现象和社会现象,尤其是社会现象中的经济现象的理论。

区位论作为一种学说,产生于19世纪20年代至30年代,其标志是1826年屠能发表的《孤立国同农业和农民经济的关系》。屠能在这部著作里,提出了农业区位论。本世纪初,韦伯(A. Weber, 1868~1958)发表了《论工业的区位》,这标志着工业区位论的问世。后来,德国地理学家克里斯塔勒(W. Ohristaller, 1893~1969)提出了中心地理论,即城市区位论。几年后,德国经济学家廖什(August Losch)从市场区位的角度分析和研究城市问题,提出了与克里斯塔勒的城市区位论相似的理论。为与前者相区别,后人将其概括为市场区位论。

2. 区位的组成及交通因素在其中的体现

区位不仅包括地球上某一事物在空间方位和距离上的关系,还强调自然界的各种地理要素与人类社会经济活动之间的相互联系和相互作用在空间位置上的反映。

区位就是自然地理位置、经济地理位置和交通地理位置在空间地域上有机结合的具体表现。自然地理位置是指地球上某一事物与其周围陆地、山脉、江河、海洋等自然地理事物之间的空间关系。经济地理位置是指地球上某一事物在人类历史过程中经过人们的经济活动所创造出的地理关系。自然地理位置发生作用往往通过经济地理位置得以实现。交通设施是城市与其周围地区以及

城市内部各功能区之间相互联系的桥梁和纽带,是城市赖以形成和发展的先决条件。交通地理位置一般又是自然地理位置与经济位置的综合反映和集中体现。三种地理位置有机联系,相辅相成,共同作用于地域空间,形成一定的土地区位。由于城市是人类的生产和生活活动所创造的,因此城市中的土地区位更受经济地理位置和交通地理位置的影响。

城市基础设施是形成城市土地区位的一般物质基础,其结构、密度和布局状况在某种程度上决定着土地区位的优劣。土地区位的优劣,具体体现在土地的生产力方面,直接影响级差地租,从而影响土地的价格。

3.1.3 交通与商业区位理论

1. 商业区位的特征

商业是满足人们物质文化生活需要,直接将工业和其它各业产品输送给消费者的服务行业。在商业活动中,商业设施及其服务对象是两个最基本的要素。商业设施聚集而形成商业中心,其服务对象则散布在周围的一定范围内,两者通过交通设施联系起来。从方便和效率两方面考虑,商业区位的主要特征之一就是通达性高,即具有良好的交通条件以保证购物者能顺利、通畅地到达商业中心。因此,商业与交通不可避免地交织在一起。

2. 交通对商业区位的影响

在不同的商业区位之间,交通条件越好,意味着服务对象在数量上越多,在空间上分布越广,该商业区位的规模也就可能越大。对同一个商业区来说,交通条件的改善意味着通达性的提高,其作为商业中心的外部环境也就得以改善,商业活动随之扩张,土地区位更加优越。同时,商业设施吸引的购物人流,也会对交通设施提出更高的要求。

商业区与周围交通设施的相互促进关系,是许多商业中心迅

速崛起的主要原因之一。例如,北京西单商业区的迅速发展就得益于该地区交通条件的改善。西单商业街的繁华程度,在解放前是不如前门和王府井大街的。北京解放后,由于首都城市建设的需要,扩展西长安街,开辟了通向复兴门的大街,这样,一条横贯北京东西的交通干线经过西单,再加上西单原来就位于西部城区的南北干线上,其商业区位条件显著改善,现已发展成为与王府井、前门并列的三大商业中心之一。近期,复兴门到八王坟地铁的开通又将进一步优化西单的区位条件,促进了该地区的商业繁荣和发展。

在一定的交通条件下,商业区的发展规模是有上限的,存在均衡的商业规模。这是因为随着商业功能的加强,商业中心吸引的人流规模不断增加,人流对交通设施的压力也不断增大,到一定程度后,交通变得拥挤不堪,开始抑制人流的增加,人流规模达到一定限度,从而也就限制了商业规模的进一步扩大,商业规模也达到一定限度,二者处于均衡状态。均衡商业规模如图 3.1 所示。

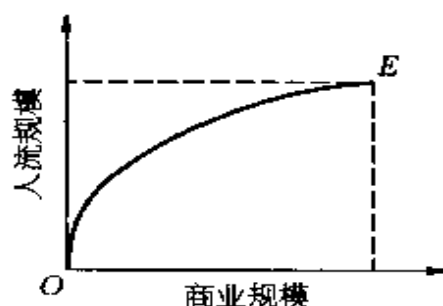


图 3.1 一定交通条件下的均衡商业规模

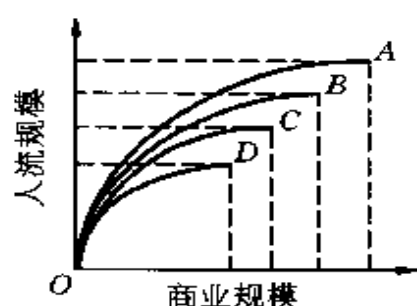


图 3.2 不同交通条件下的均衡商业规模

不同的交通条件所能承受的人流规模不同,相应地,商业规模也不同。图 3.2 中,曲线 OA 、 OB 、 OC 和 OD 分别表示在四种交通条件下人流规模与商业规模的关系。曲线 OA 反映最优交通条件下的对应关系,其均衡商业规模最大;曲线 OD 反映最差交通条件下的对应关系,其均衡商业规模也最小。

通达性越好的区域,均衡点越靠近右上方。一般地,当交通条件限制了人流的增加,阻碍了商业的进一步繁荣时,人们就会进行交通工程建设,改善交通条件,使之能容纳更多的人流和物流,从而使商业规模继续扩大,这样,均衡商业规模不断提高,如图 3.3 所示。

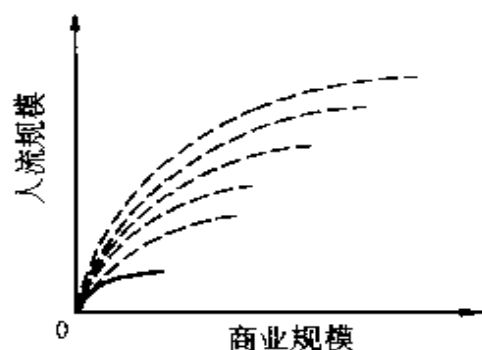


图 3.3 均衡商业规模随交通条件的改善而提高

从图 3.3 可看出,交通建设显然优化了商业的区位条件,促进了商业区的发展。交通条件的不断改善为商业的不断繁荣提供了物质基础。当然,如前所述,交通条件的改善是有上限的。

3.1.4 交通和工业区位理论

1. 工业用地的区位特点

① 寻求交通方便的地区

交通方便的地区便于设备安装、原材料的运进和制成品的运出,生产成本低,利润高。

② 自动集结成团的倾向

工业企业之间一般都有一定的技术经济联系,相互之间为了取得集聚经济效益,技术经济联系较密切的企业自然集结成团。而且,同类企业也有自觉集结成团的倾向,这不仅有利于建立统一的服务体系,更有助于相互之间的学习和竞争,从而推动技术创新和进步。

③ 不断向市区边缘迁移

随着经济发展,各类用地逐渐分化。一般地,工业企业往往有某种程度的环境污染,因而工业用地与其它行业用地有一定的互斥性。所以,随着城市的发展,交通条件不断改善,基础设施日益完

备,工业企业逐渐游离到城市郊区。

2. 交通运输对工业区位选择的影响

每个企业都希望能降低生产成本,提高生产利润,而其所在区位的好坏直接影响企业的生产成本。企业常常通过比较不同地点交通运输费用的大小来确定工业区位。韦伯概括出工业区位选择的一般原则是:任何一个生产部门都应该在原料地和消费地之间寻找一个均衡点,使得工厂位于该点时,生产和销售全过程中的交通运输成本最低。决定交通运输费用大小的因素很多,如交通运输的距离、运载货物的性质、交通工具、交通的种类(水运、陆运、空运等)等等。

(1) 原料分类

不同性质原料的运输成本是不同的,对工厂区位选择的影响也是不一样的。生产过程中所需运输的物质可分为三类:生产原料;产生动力的燃料;制造的正副产品。前两类统称为原料,后一类简称为产品。原料可根据生产过程中耗用原料的重量与制成品重量之比分为两种:

① 无重量损失的纯原料

无重量损失的纯原料是指那些在生产过程中全部重量几乎都能转移到产品中的原料。从运费角度考虑,若生产单位主要使用不失重的纯原料生产产品,而且原料与产品的单位重量运输成本大致相同时,则该生产单位既可设在原料产地,也可设在产品消费地。

② 有重量损失的原料

有重量损失原料是指那些在生产过程中只有部分重量转移到产品中的原料。若生产单位主要使用有重量损失原料,而原料与产品的单位重量运输成本大致相同时,生产地点的选择应偏向于原料产地。

(2) 按交通运输成本最低的原则选择工业区位

一个工厂往往有多个原料产地和多个销售市场,在这种情况下可通过优化下式确定工厂的最佳区位:

$$\min T = \min \sum W_i \cdot Q_i \cdot D_i \quad (3.1.1)$$

式中, T : 总的运输成本;

i : 原料及产品的种类, $i=1,2,3,\dots$;

W_i : 第 i 种原料或产品的重量;

Q_i : 单位重量的第 i 种原料或产品的单位距离运输成本;

D : 原料产地或产品销售地到工厂的距离。

可采用数学方法或几何方法求解式(3.1.1)来确定工厂的最佳区位。

3.1.5 交通和住宅用地区位

住宅用地区位要求交通便利,通达性好,使居民能够便捷地进行工作、娱乐等出行。而且,随着人们生活水平的提高,日益对住宅区的自然环境提出更高的要求。因此,在城市的形成和发展过程中,居住区首先从工商混合区中独立出来,在交通方便、环境条件相对较为优越的城市外围地带建立独立的居住区。

3.2 土地利用模型

所谓土地利用模型是指描述地域内部经济活动的选址行动以及表现作为其结果的实际土地利用的空间分布模型。

土地利用模型有很多种类,根据构造模型的目的和出发点的不同,可将它们分成两大类:

① 预测模型;

② 优化模型。

所谓预测模型,是指在一定的制约条件下(利用可能的土地面

积等),分析处于该地域内部的各种经济主体的选址行动的结果将产生什么样的土地利用形态的跟踪模型。另一方面,优化模型是指在一定的约束条件下,寻求关于地域全体的社会福利的目标函数最大化所对应的土地利用状况。大多数优化模型都是使用运筹学方法直接表现地域最优化的模型,是规划方案制定的直接手段。

3.2.1 汉森模型

此模型的目的是预测城市地域内各交通小区的住宅选址户数。即此模型是用该分区至其它分区城市设施的可达性和该分区所具有的能够作为住宅用地进行开发的土地面积作为自变量,将城市地域内由新增人口产生的新需住宅向该地域的各交通小区分配的模型。

“可达性”定义为某交通小区所具有的与其它交通小区发生某种联系的可能性的。即:

$$A_{ij} = S_j / T_{ij}^\gamma \quad (3.2.1)$$

其中, A_{ij} : 交通小区 i 对于位于分区 j 中某一类活动主体的相对可达性值;

S_j : 交通小区 j 中活动主体的规模,如职工人数等;

T_{ij} : 交通小区 ij 间的时间距离;

γ : 参数。

分区 i 的总可达性值为:

$$A_i = \sum_{j, j \neq i} A_{ij} = \sum_{j, j \neq i} S_j / T_{ij}^\gamma \quad (3.2.2)$$

城市地域内某个小区作为住宅地进行开发时,其可达性对将要进行住宅选址的户数有何影响? 以下就这一问题进行探讨。首先我们定义任意时点小区间住宅开发可能比为各小区所具有的可以作为住宅地开发利用的土地面积之比。此外,从这一时刻经过一定期间至下一时刻的时间段内,城市地域全体中由于人口增加产

生的新需住宅户数按这一比例分配给各个小区。而实际各小区间的住宅开发现状值的比与这一比值的差值,恰恰反映了各小区的可达性的差别。

例如关于雇用的可达性与 D_i 的关系为:

$$D_i = K \cdot A_i^{2.7} \quad (3.2.3)$$

其中 D_i 为住宅开发率,其定义为:

$$\text{住宅开发率 } D_i = \text{住宅开发现状比} / \text{住宅开发可能比} \quad (3.2.4)$$

这种情况下,若每户居住面积设为定值,则可通过式(3.2.5)预测出住宅开发现状比。

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{D_i O_i}{\sum_j D_j O_j} = \frac{A_i^{2.7} O_i}{\sum_j A_j^{2.7} O_j} \quad (3.2.5)$$

其中, P_i : 小区 i 新增户数;

P_t : 城市地域全体在时间段 t 过程中由于人口增加而产生的新增户数;

O_i : 小区的住宅开发可能比。

此模型的特征如下:

- ① 小区的可达性不考虑该区自身;
- ② 时间距离不明确;
- ③ 适用于短期预测。

3.2.2 劳瑞模型

1. 概述

该模型是在假定研究对象地域为与外界不存在人员流动的封闭的城市地域的前提下,采用对各土地利用间的相互作用进行定量表达的关系式,对决定各交通小区土地利用模式所需的住户及就业者的分布加以确定的模型。

在作为模型对象的城市地域内,将具有一定目的的土地利用者称为土地利用的活动主体,大致分为三种:

- 基础产业部门(basic sector);
- 非基础产业部门(retail sector);
- 住户(employment 或 population)。

① 基础产业部门包括工业、大型贸易公司、中央政府机关各部委、大学等,他们不是由对象城市地域的社会、经济规模决定,而是作为已知条件给出。

② 非基础产业部门包括商业、服务业、地方政府、中小学等与居民生活密切相关的部分。这些部门吸引顾客到市内,其规模即就业人数等依赖于城市地域的人口、经济状况,其布局选址亦应考虑居民的来去方便,这些由模型内部计算确定。

③ 住户是指就业于基础及非基础产业部门的住户、人口。

上述活动主体在城市地域内需要获得用地进行活动,作为前提,这里采用“单方向作用”的假定。也就是说基础产业部门的就业人数及配置对非基础产业部门和住户的就业人数及配置产生影响,而非基础产业部门和住户对基础产业部门则不产生任何影响。另外,因为城市地域内的交通系统、土地利用制度作为已知条件给出,所以用此模型对未来进行预测时,还必须假定没有大的政策变动及技术革新。

模型的流程简图见图 3.4。一个城市地域可视为地域及国家社会经济体系的子系统。由总体系所确定的规模基础产业部门的就业者及面积,将根据经验事先分配给城市地域划分的多个交通小区内。基础产业配置在各交通小区后,其就业者的家庭就会相应地分布在工作单位周围,以向该产业提供劳动力。住户配置之后就需要设置日常用品商店、百货店、中小学等维持基础产业就业人员生活的设施,非基础产业部门的就业者相应于住户配置在地域内,随之非基础产业部门就业者的家庭又要与其工作单位相对应在地

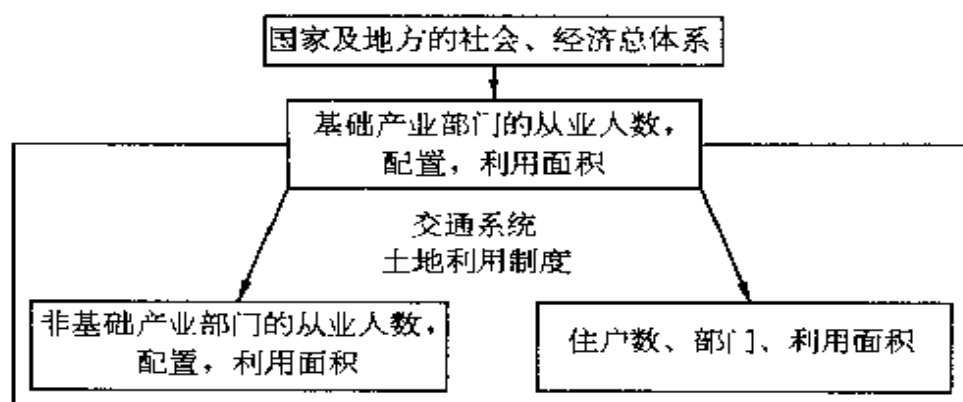


图 3.4 劳瑞模型框图

域内进行配置。由于这一部分附加的居民的分布，住户的总量及分布形态发生变化，据此重新把必要的非基础产业部门的就业人员再行分配。

按着这样的顺序重复推算下去，直到非基础产业部门就业者数及分布状态、住户的数量及分布状态趋于稳定为止。

2. 模型结构

$$\text{面积} \quad A_j = A_j^U + A_j^B + A_j^R + A_j^H \quad (3.2.6)$$

$$\text{非基础产业部门} \quad E^k = a^k N \quad (3.2.7)$$

$$\varphi_j^k = b^k \left[\sum_{i=1}^n \left(x^k \frac{N_i}{D_{ij}^{ak}} \right) + y^k E_j \right] \quad (3.2.8)$$

$$\sum_{j=1}^n \varphi_j^k = 1 \quad (3.2.9)$$

$$E_j^k = \varphi_j^k E^k \quad (3.2.10)$$

$$E_j = E_j^B + \sum_{k=1}^m E_j^k \quad (3.2.11)$$

$$A_j^R = \sum_{k=1}^m e^k E_j^k \quad (3.2.12)$$

$$\text{住户} \quad N = f \sum_{j=1}^n E_j \quad (3.2.13)$$

$$\phi_j = g \sum_{i=1}^n E_i / D_{ij}^{\beta} \quad (3.2.14)$$

$$\sum_{j=1}^n \phi_j = 1 \quad (3.2.15)$$

$$N_j = \phi_j N \quad (3.2.16)$$

$$\text{约束条件} \quad E_j^k \geq Z_j^k \text{ or } E_j^k = 0 \quad (3.2.17)$$

$$N_j \leq Z_j^H A_j^H \quad (3.2.18)$$

$$A_j^R \leq A_j - A_j^U - A_j^B \quad (3.2.19)$$

其中, A : 面积;

F : 就业者数;

N : 住户数;

D : 时间距离;

Z : 约束条件;

φ : 潜在市场;

ϕ : 潜在住户;

U : 土地利用对象外;

B : 基础产业部门;

R : 非基础产业部门;

H : 住户;

m : 非基础产业分组数 ($k=1, \dots, m$);

n : 交通小区数 ($i, j=1, \dots, n$)。

式 3.2.6 表示交通小区 j 的面积 A_j 由不可使用面积 A_j^U 、基础产业部门利用面积 A_j^B 、非基础产业部门利用面积 A_j^R 、住户利用面积 A_j^H 组成。

式 3.2.7 表示, 非基础产业部门第 k 组的就业者数 E^k 可以表达为维持一个家庭的必须人数 a^k (人/户) 与总户数 N 的乘积。

式 3.2.8 表示分区 j 的非基础产业部门中 k 的潜在市场, 这是表示“作为市场的可能性的强弱”的指标。式 3.2.8 中的 b^k 是为

使潜力满足式 3.2.9 而引入的修正系数。分区 i 对分区 j 的潜在市场的影响由分区 i 的住户数 N_i 、在分区 i 工作的就业者数 E_i 、分区 (i, j) 间的时间距离 D_{ij} 决定。 x^k, y^k 分别为住户数与总就业人数的权重, 对所有分区为一定值。

式 3.2.10 表示第 j 分区的非基础产业部门中 k 的就业者数 E_j^k 按此潜在市场的比例进行分配。

式 3.2.11 表示分区 j 的总就业者数可以表示为基础产业部门与非基础产业部门的和。

式 3.2.12 表示, 若非基础产业部门中 k 的就业者人均土地面积记为 e^k , 分区 j 中非基础产业部门的面积 A_j^k 为各组面积的总和。

式 3.2.13 表示总户数 N 可表达为总就业者数的 f 倍。

式 3.2.14, 3.2.15 表示将总户数 N 向各分区分配时所用的潜在户数。分区 j 的潜在家庭随分区 j 中可供住宅开发用面积的增多而提高, 分区 i 对分区 j 的潜在家庭的影响取决于分区 i 的总就业人数 E_i , 以及 ij 间的时间距离。式 3.2.14 中的 g 是为使潜能满足式 3.2.15 而引入的修正系数。式 3.2.14 成立的前提是住宅选址是由户主的工作地点所决定。

式 3.2.16 表示住户依据此潜力大小向各分区分配。

根据上述式 3.2.6~3.2.16 可将非基础产业部门的就业者及住户向各小区分配, 分配时设定如下的制约条件。

首先, 当分配给某小区 j 的非基础产业部门 k 的就业人员比事先确定的人数 Z_j^k 还少时, 则不必向该交通小区分配 k 组的就业人员。

式 3.2.17 表达出这一约束, 其中 Z_j^k 表示最小可能经营规模等土地利用制度。

对于住户的设置, 为防止在企事业单位较多的分区, 如 CBD 及其周围, 即到达工作地点很方便的分区内发生住宅过密的问题,

将容许住户密度 Z_j'' 作为住户密度的上限,式 3.2.18 表示这一约束。

式 3.2.19 为分区 j 中面积约束条件表达式,控制计算值使其不超过实际面积。该约束式中不存在住宅地面积 A_j'' 意味着其不能取负值及非基础产业部门布局选址优先于家庭的布局选址。这是因为非基础产业部门与家庭部门在用地获得能力方面的差异。另外,由于非基础产业部门就业者的约束条件式 3.2.17 中不存在最多就业者数的限制,对于受面积条件约束的分区来说,就业者数仍采用与潜在市场相应的人数值,这种情况下在此小区中就业者人均用地面积 e^k 变小,这种现象可解释为该分区内建有高层建筑。

采用以上构成模型框架的联立方程式、不等式体系来迭代求解的过程,如图 3.5 所示。

3.2.3 劳瑞模型的拓广

1. 劳瑞模型的矩阵公式

为使劳瑞模型迭代计算更方便,R. A. Garin 提出了劳瑞模型的矩阵形式。

基础产业就业者向量:

$$E^b = (E_1^b E_2^b \cdots E_j^b \cdots E_n^b) \quad (3.2.20)$$

基础产业人口向量:

$$P^b = (P_1^b P_2^b \cdots P_j^b \cdots P_n^b) \quad (3.2.21)$$

式中, E_j^b : 分区 j 的基础产业部门就业者数;

P_j^b : 居住于分区 j 的基础产业部门的人口,可采用 3.2.22 式来表达。

$$P^b = E^b A = E^b A' [\alpha] \quad (3.2.22)$$

其中,

$$A = [a_{ij}] = [a'_{ij} a_j] \quad (3.2.23)$$

$$A' = [a'_{ij}] \quad (3.2.24)$$

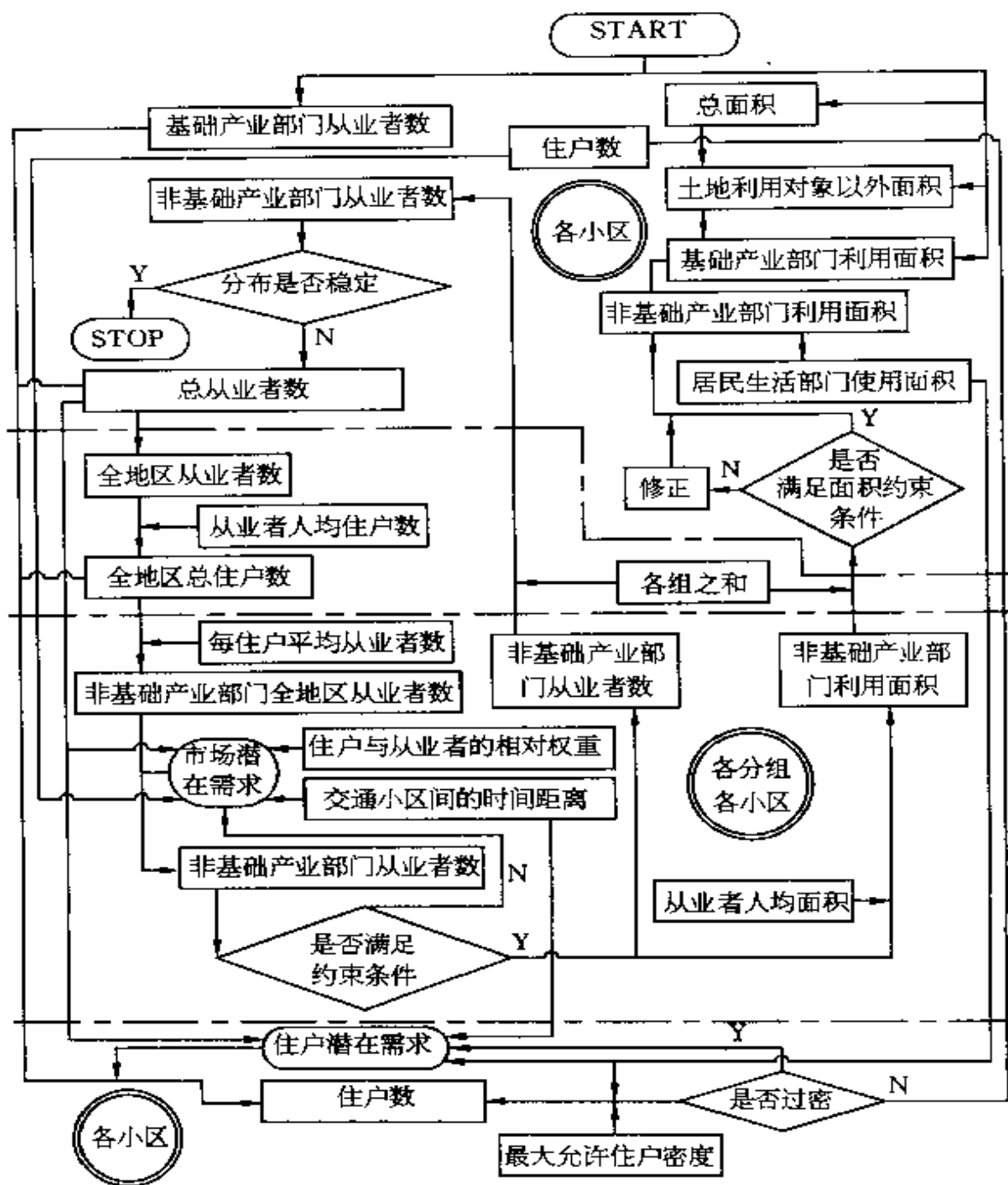


图 3.5 劳瑞模型的计算顺序框图

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & & \\ & \alpha_2 & & & 0 \\ & & \ddots & & \\ & & & \alpha_j & \\ 0 & & & & \ddots \\ & & & & & \alpha_n \end{bmatrix} \quad (3.2.25)$$

式中: α'_{ij} : 在分区 i 工作的人配置于分区 j 的函数;

α_j : 居住于分区 j 的从事基础产业部门工作的家庭的人数
(基础产业部门劳动供给率)。

其次, 非基础产业部门的就业者数向量可表达为:

$$E^{(1)} = P^b [\beta] B' \quad (3.2.26)$$

$$\text{其中,} \quad B' = [B_{ij}] \quad (3.2.27)$$

非基础产业部门的出行分布形态,

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \beta_1 & & & & \\ & \beta_2 & & & 0 \\ & & \ddots & & \\ & & & \beta_j & \\ 0 & & & & \ddots \\ & & & & & \beta_n \end{bmatrix}; \quad (3.2.28)$$

β_i : 分区 i 的人均就业者数。

依据式 3.2.22 和式 3.2.26

$$P^b = E^b A \quad (3.2.29)$$

$$E^{(1)} = P^b B = E^b (AB) \quad (3.2.30)$$

因此,

$$P^{(1)} = E^{(1)} A = E^b (AB) A$$

$$E^{(2)} = P^{(1)} B = E^{(1)} (AB) = E^b (AB) (AB) = E^b (AB)^2$$

最终的就业人数和人口用下式求出。

$$\begin{aligned} E &= E^b + E^{(1)} + E^{(2)} + \dots \\ &= E^b(I + AB + (AB)^2 + \dots) \end{aligned} \quad (3.2.31)$$

$$\begin{aligned} P &= P^b + P^{(1)} + P^{(2)} + \dots \\ &= E^b(I + AB + (AB)^2 + \dots)A \end{aligned} \quad (3.2.32)$$

证明从略。上述公式可用逆矩阵简记如下：

$$E = E^b(I - AB)^{-1} \quad (3.2.33)$$

$$P = E^b(I - AB)^{-1}A = EA \quad (3.2.34)$$

劳瑞模型中与潜力相对应的分布函数设定为：

$$a'_{ij} = b'_{ij} = \frac{e^{-0.1t_{ij}}}{\sum e^{-0.1t_{ij}}} \quad (t_{ij}; \text{所需时间}) \quad (3.2.35)$$

对于从工作地点到非基础产业部门的出行，同样可导入矩阵 C 表达为：

$$C = [\gamma]C' = \begin{bmatrix} \gamma_1 & & & 0 \\ & \gamma_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \gamma_n \end{bmatrix} [c'_{ij}] \quad (3.2.36)$$

式 3.2.33, 3.2.34 可改写为如下形式：

$$E = E^b[I - (AB + C)]^{-1} \quad (3.2.37)$$

$$P = E^b[I - (AB + C)]^{-1}A = EA \quad (3.2.38)$$

2. 动态劳瑞模型

Andrei Rogers 尝试将 Garin-Lowry 模型动态化。以下对此作简要说明。

劳瑞模型的特点在于通过迭代计算求得平衡解，它是一种进行某一时点分析的静态模型。Rogers 通过在 Garin-Lowry 模型中引入下标 t ，并将基础产业部门的就业者数乘以增长矩阵 G 而将模型动态化。

$$E_t^b = (E_{t_1}^b E_{t_2}^b \cdots E_{t_n}^b), \quad (3.2.39)$$

$$P_t = (P_{t_1} P_{t_2} \cdots P_{t_n}), \quad (3.2.40)$$

$$P_t = E_t^b (I - AB)^{-1} A \quad (3.2.41)$$

则 $E_{t+1}^b = E_t^b G$, G : 增长矩阵 $(3.2.42)$

$$P_{t+1} = E_{t+1}^b (I - AB)^{-1} A = E_t^b G (I - AB)^{-1} A \quad (3.2.43)$$

另外, 考虑用增长矩阵 S 表示人口向量,

$$P_{t+1} = P_t S,$$

$$P_{t+1} = E_t^b G (I - AB)^{-1} A = P_t S \quad (3.2.44)$$

依据式 3.2.41 $P_t = E_t^b (I - AB)^{-1} A$

因此, $P_{t+1} = E_t^b G (I - AB)^{-1} A$
 $= E_t^b (I - AB)^{-1} A S \quad (3.2.45)$

另外, $M = (I - AB)^{-1} A$

$$E_t^b G M = E_t^b M S \quad (3.2.46)$$

因此, $GM = MS \quad (3.2.47)$

则, $G = M S M^{-1}$ 或 $S = M^{-1} G M \quad (3.2.48)$

当给定 G 或 S 中的一个时, 则可用上述方法求得另外一个。用这一关系即可对两个增长过程(雇用和人口)间的矛盾进行校核。

3.2.4 住宅选址的凯因模型

该模型着眼于交通费用对家庭进行住宅选址的影响。与其它模型一样, 它采用“在住宅选址中仅考虑上班因素”的假定。

1. 模型结构

某个单身生活者的每月交通费用 T , 可用下式表达

$$T = t_r + t(w_1) + t(w_2) + \cdots + t(w_n) + t(o_1) + t(o_2) + \cdots + t(o_n) \quad (3.2.49)$$

其中, t_r : 对在居住处获得的服务的支出;

$t(w_i)$:对从就业地点 i 起算的居住距离的支出;

$t(o_j)$:对从居住地外到居住地的居住距离的支出。

$\sum_j t(w_j)$ 为通勤出行总费用, $\sum_j t(o_j)$ 为其它目的出行的总费用。 t_r 的水平相应于家庭所选住宅地址的种类不同而变化。但由于城市地域的 t_r 基本上为定值,且 $\sum_j t(o_j)$ 在家庭收支中所占比例相对较小,这里仅把 $\sum_j t(w_j)$ 作为考察对象。根据现有调查,通勤出行约占半数(参考表 3.1)。所以可以认为其它社交活动、购物等

表 3.1 不同交通目的的交通出行数

交通目的	%	出行数 / 每户
通勤	43.9	1.010
业务	6.8	0.155
社交	21.4	0.490
购物	11.9	0.275
上学	4.8	0.110
其他	11.2	0.260
合计	100.0	2.300

出行的目的地均在工作地点的附近。并且家庭经济中一般都是根据用最小支出获得最大收益的原则来决定住宅地址及消费模式的。因此,模型的主要因素为以下两点:

- 选址地租(location rents)“因使用土地在一定期间内所需费用”;
- 通勤费用。

主要假定如下:

- ① 运输成本函数随工作地点的远离而增加。
- ② 存在这样的市场,即随着与工作单位的距离加大,其单位

价格减少的住宅空间市场。

③ 工作单位固定。

④ 使家庭支出的一部分实现效用最大化。

⑤ 居住地不是劣等资产。

根据以上各假定,可得出图 3.6 的地价费用等值曲线群与图 3.7 的边际费用图。

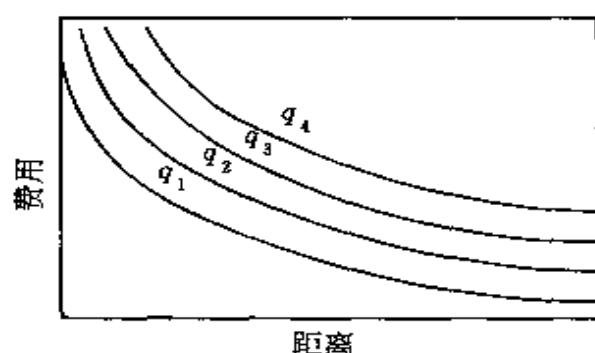


图 3.6 地价费用等值曲线

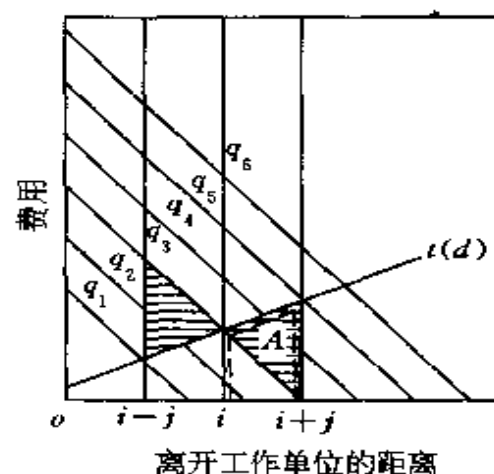


图 3.7 边际费用

图 3.7 中的曲线 $t(d)$ 表示每英里通勤费用,以曲线 q_3 (效用 q_3) 为例,其最小费用选址在 i 处。如果想获得更大的居住空间,必须进一步远离工作地点 o 而移动到另一地点 $i+j$,也就是说,图 3.7 中的面积 A 要计入家庭增加了的交通费支出中。另一方面,因远离工作地点而使选址地租减少。结果,为使家庭总选址地租的效用保持在 q_3 ,仅增加了阴影部分的三角形面积。

同理,若希望住所距工作地点更近,即从 i 向 $i-j$ 移动,则节约一部分通勤费用而增加同额的选址地租。

2. 底特律市的分析

前述模型的合理性可通过对美国底特律市的分析来验证。这一地域由构成同心圆的 6 个环组成。

(1) 表 3.2 表示每一工作地点的不同居住地点的男女比例。可见,女性与男性相比,多住于工作圈或距工作单位较近的圈内。

表 3.2 居住圈与工作圈的关系

工作单位 所在环	性别	居住环(%)						合计%
		1	2	3	4	5	6	
1	男	4.8	9.9	25.0	26.8	23.2	10.2	100
	女	2.6	15.6	38.0	25.8	12.9	5.0	100
2	男	1.0	19.1	31.2	22.9	17.1	8.6	100
	女	0.8	23.2	39.2	20.9	11.0	4.6	100
3	男	0.8	11.3	36.9	24.0	16.9	10.1	100
	女	0.4	9.7	46.9	25.3	12.5	5.1	100
4	男	0.5	6.4	21.0	32.2	24.2	15.7	100
	女	0.0	4.0	23.0	44.0	19.8	9.2	100
5	男	0.4	2.1	10.2	16.6	50.8	20.0	100
	女	0.0	1.9	8.7	16.6	53.8	18.9	100
6	男	0.5	2.0	6.9	10.1	22.4	58.0	100
	女	0.2	1.6	3.8	6.1	16.6	71.8	100

(2) 图 3.8 表示不同居住圈在 CBD 工作的人的收入阶层构成。从图中可知:

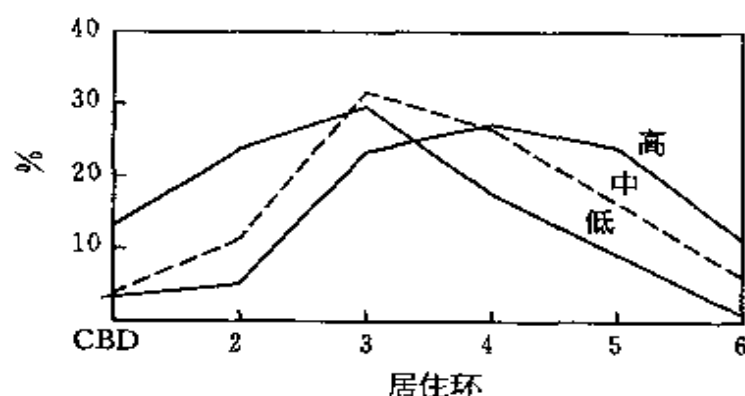


图 3.8 不同收入阶层在 CBD 工作职工的居住分布

① 高收入层中在内环工作的人选择外环居住。

② 低收入层的居住模式明显,特征是强烈倾向于居住在距商务区(CBD)较近的圈内。

(3) 职业构成形态

工作于 1、2、3 环的人,不同职业的人在各居住环的居住分布模式相似。表 3.3 为工作于 2 环的人的情况。但工作于 4、5、6 环的人其职业构成与居住地的相关倾向则减弱。这种现象可解释为,对于 4、5、6 环内的工作者来说,因为选址地租的差别不大,住宅面积大小对家庭支出的影响不大,对通勤的合理性减弱。

表 3.3 在 2 环内工作的职工的居住地分布

职业	平均收入 (\$)	居 住 环									
		2		3		4		5		6	
		%	排序	%	排序	%	排序	%	排序	%	排序
经营管理	4 516	10.6	8	28.8	7	28.8	2	27.4	1	8.5	4
个体	4 099	12.0	7	27.0	8	29.5	1	22.0	2	8.6	2.5
熟练劳动者	3 715	19.1	4	29.6	6	24.2	3	16.0	4	10.6	1
技术工人	3 002	24.9	3	37.9	1	16.8	7	13.1	6	6.4	6
商业	2 792	15.4	6	33.5	4	24.1	4	18.4	3	8.6	2.5
事务	2 706	18.0	5	36.3	3	23.2	5	15.3	5	6.5	5
工人	2 690	34.3	2	30.5	5	18.1	6	6.8	7	6.2	7
服务业	2 262	35.0	1	36.5	2	15.4	8	6.1	8	2.6	8

(4) 家庭规模

家庭规模与家居间的关系不像性别、职业方面所看到的那么简单。这里,认为家庭规模是选择家居空间(居住面积)的一个指标。表 3.4 中统计了工作于 1 环的人在各环居住的累积频度。容易发现,单身家庭与其他规模的家庭比,更倾向于住在内侧的环内。并且,这种倾向在 2、3、4 环大体相同。另一特点是,随着家庭人数增加(1 人,2 人,3 人),其累积频度降低。这是因为,家庭人口多则需要大的居住空间,从而居住地只能距工作地点 CBD(中央

环)更远些,故通勤距离必然增加。人口较多(6人以上)家庭多住于中央环内是因为低收入层的家庭通常规模较大。独身家庭或两人家庭多工作于5、6环,但其住房大多选址在中央环。这是因为2人家庭一般另一个人也上班,并且工作地点在中央环的家庭较多。但从总体上看,工作于5、6环而住在1、2、3环的人较少。

表 3.4 工作于1环而居住在从1环到6环的人的累积分布

家庭规模 人数	居 住 环(%)					
	1	2	3	4	5	6
1	26.1	55.6	86.0	97.8	98.5	100
2	2.5	14.8	50.3	76.2	93.4	100
3		9.7	39.8	69.3	90.5	100
4	0.4	10.2	38.8	68.8	90.8	100
5		9.8	35.7	67.3	89.5	100
6		11.2	52.0	77.0	93.4	100
6以上		15.9	46.8	70.7	92.1	100
全体	3.7	16.1	46.8	72.9	91.4	100

表 3.5 不同居住环在环2工作人数的累积分布

家庭规模 人数	居 住 环(%)					
	1	2	3	4	5	6
1	9.7	59.7	87.1	94.6	98.9	100
2	0.8	22.6	56.4	79.8	93.0	100
3		16.7	51.1	74.7	93.3	100
4	0.1	15.8	48.9	73.5	91.2	100
5	0.1	17.3	48.3	70.7	89.4	100
6		19.2	53.6	75.0	89.7	100
6以上	1.4	21.6	58.6	79.2	90.8	100
全体	1.0	21.1	54.2	76.6	92.2	100

3. 有关经济学方法的若干研究

凯因模型是在住宅选址方面运用所谓微观经济学方法的传统

手法的模型。

凯因模型的基本前提①～⑤也是这类方法所通用的。其中,关于前提②的选址地租,也有模型内部计算产生的。作为向微观经济学领域扩展的背景,在城市空间结构上采用了一点中心式的同心圆结构。对两个以上中心点构造的城市而言,这种扩展就非常复杂、困难,我们希望这种扩展能面向大都市圈、存在多点中心的城市、及多个城市一体化的现实情况。尽管此类方法存在这种空间上的不足,该模型在住宅选址方面描述、解释家庭经济的运动形态的作用仍值得重视。

3.2.5 加强土地利用规划

土地问题作为城市中的重要问题之一面受到重视是近年才开始的。例如在日本,它曾经是日本经济高度成长时被遗忘的角落。高度经济成长导致产业、人口向太平洋地带集中,尤其是向大城市集中(当然,集中有促进发展的一面)。同时,在收入增加、家庭小型化、通货膨胀和地价急涨、城市的无计划蔓延等这样的持续恶性循环中,在有限的城市及城市周边土地上出现了贫民窟、住宅远离CBD、城市内住宅环境恶化、公害、交通事故等等各种不良现象。现在,土地利用问题已不仅仅是单纯的资源分配问题,而是作为其它社会问题的原因或结果,以极复杂的状态表现出来。空间资源作为多种城市问题的共同要素,其处理方法非常重要,在交通问题、住宅问题、环境问题等方面尤为突出。如果说城市空间构造最终体现于土地利用形态上,或者说各种城市问题在其各自的子系统内无法解决的话,那么改变城市空间构造,也就是在土地利用形态上采取诱导,则是唯一的根本对策。过去并不是全然没有土地利用规划,至少为使绿地、风景区、文化财产等依法保存,公共用地的使用有一定保障。

发达国家在土地开发方面存在很多问题。如在旅游城市,历史

文物保护单位与住宅开发相矛盾；在工业城市则是工厂与居民的对立；在机场周围，为满足后迁入居民的住宅需要，与先迁入居民发生冲突，结果就造成了无秩序的住宅开发。上述问题在发达国家表现得较为明显，在我国，土地开发的计划性差和某些城市中心区开发强度过大，以及土地开发和交通规划的协调不够等是主要问题。要想解决这些问题，首先要强化规划法规的完善与实施，同时要灵活运用社会主义市场经济理论制定政策，运用价格机制实现按城市规划来利用土地，促进城市土地的合理利用。应当将土地利用与交通在同一规划体系中得以体现，并把住宅用地问题作为二者结合的基本要素。

按劳瑞模型的观点，应当将城市适当规模的基础产业部门和非基础产业部门设置在适当位置。为判断什么是“适当”，必须有政府的判断（随每个都市居民愿望而不同），以及开发并应用能够计算出适当规模和适当位置的城市模型。最近在日本提出了企业税（迫使企业迁出）即为调整土地利用的方法之一。土地利用模型将会成为含城市财政在内的城市模型的基石。

例如，对于各活动主体，引入经济活动要素扩展模型，就能够研究税制等经济法规的有效性，又能够计量在土地布局分区内加强土地利用管理所产生的影响。此外，还可观察改良交通体系的影响，地方自治体作为属于非基础产业部门的公共服务的提供者，其规模自然伴随着收入源等预算限制，也存在最适当规模问题。

以上各项的共同背景是城市空间构造，空间有其上限，而目前世界各国城市的发展正在接近空间上限。

最后，对于劳瑞模型的研究发展考虑以下方面：

- ① 由封闭城市向开放城市、城市群扩展；
- ② 推进动态模型研究；
- ③ 导入经济活动要素；
- ④ 导入交通网。

4 交通的发生与吸引



4.1 概 述

发生交通量与吸引交通量的预测是四阶段交通需求预测法的第一阶段,也是交通需求分析工作中最基本的组成部分。在这一阶段,我们必须求出研究对象地区内发生的总出行量,即生成交通量。根据所研究对象地区的特性直接求得生成交通量的步骤被称为交通量的生成(trip production)。此生成交通量通常作为总控制量,在交通规划中用来预测和校核各个交通小区的发生及吸引交通量。所谓发生(或吸引)交通量是指研究对象地区内由各交通小区发生(或吸引)的交通量。人们通常把研究对象区域全体的交通总量叫做交通生成量,把研究对象区域各个交通小区的交通发生量(trip generation)和交通吸引量(trip attraction)称为交通的发生和吸引。有时也称上述过程为交通发生,这就是四阶段法的第一阶段。

4.2 影响交通量产生的因素

4.2.1 土地利用

在第3章中,我们讨论了交通与土地利用的关系。可以说,影响交通产生的主要因素之一是土地利用。

住宅区是重要的交通发生源。大部分出行的起点或终点都是出行者的家。衡量住宅对交通产生的影响,可以用住宅区面积、住户数、居住区总人口、单位面积的住户数、单位面积的居民数等指标来表示。与住宅相关的出行可以分为如下几类:

- ① 从家去上班或上学;
- ② 从家去买东西;
- ③ 从家出发的其它出行;
- ④ 下班或放学后回家;
- ⑤ 购物后回家;
- ⑥ 从其它地方回家。

其次,工厂、机关、商业中心等也是重要的交通发生源。作为吸引源,它们吸引了人们去工作或购物。作为发生源,人们完成工作或购物后回家。衡量其对交通产生的影响的最一般的指标有单位面积的工作人员人数、占用的土地面积等。

与交通发生相关的其它的土地利用用途还有很多,在此不能一一列举,读者可根据具体的规划的要求进行分析。比如,作为教育设施的评价基准,最一般的指标可以认为是学生人数等等。

4.2.2 家庭

与家庭相关的影响交通产生的因素有很多。我们现就其中的一部分进行说明。

1. 家庭规模、人口构成

交通是人的活动的函数。出行数必然与家庭规模有着对应关系。

2. 性别、年龄

可以想象,由于性别、年龄的不同,出行次数和内容会有所不同。所以,在分析交通产生时,性别、年龄是不可忽视的因素。

图 4.1 是根据 1986 年 6 月在北京进行的居民出行调查做的统计。可以看出,几乎在所有年龄层,男性的出行次数都要比女性

多(尽管在 16 岁~20 岁的年龄层,女性比男性的出行次数多)。而比较各年龄层的出行特征,我们则可发现不论男女,出行次数随年龄层变化而变化的规律几乎是一致的。

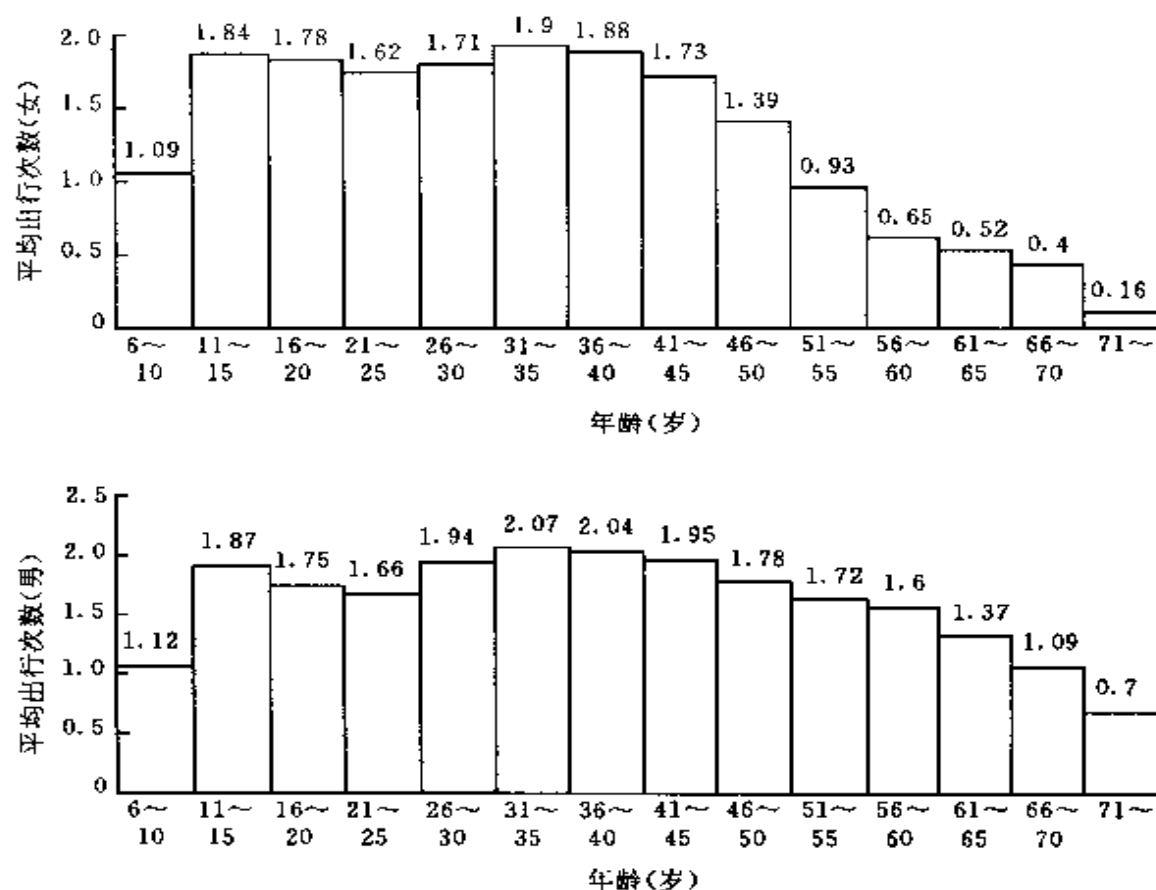


图 4.1 不同年龄不同性别日人均出行次数

3. 汽车(自行车)拥有率

国外研究分析证明,汽车拥有率高的区域其交通量偏大。作为评价标准,通常为总台数/区域、台数/人或台数/户。

在中国,由于经济发展水平及国家交通政策的限制,私人汽车的拥有量短期内不会成为影响交通的主要因素。但区域内所拥有的汽车台数及各个家庭拥有的自行车的数量却是影响交通产生的重要因素。有 2 辆以上自行车的家庭通常会比只有 1 辆或者没有

自行车的家庭产生更多的出行次数。

4. 职业、职务

如图 4.2 所示,北京市 1986 年的居民出行调查也反映了与许多国外调查研究相同的结果,即职业的不同是造成出行量不同的重要因素。

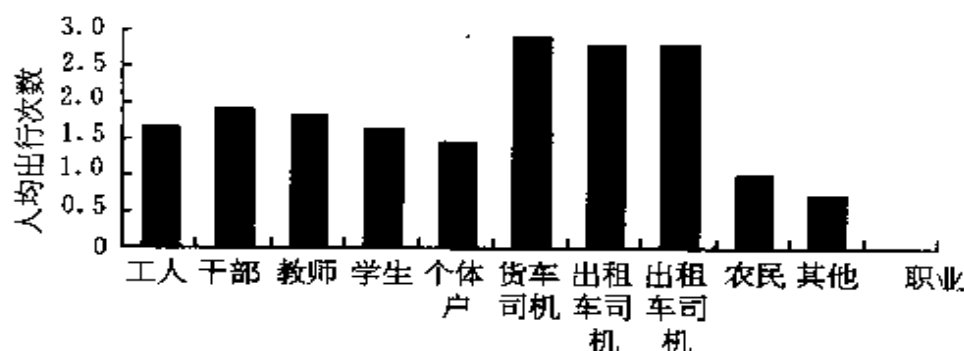


图 4.2 不同职业人员日平均出行次数

同时,国外的研究表明,职务或工作性质的不同也会造成出行量的明显不同,如采购员及推销员必然比收发人员的出行要多。

5. 单位公房

这一因素在中国尤其明显。与工作单位同在一处或相距很近的单位宿舍或住宅,其居住者的出行次数会有明显减少。即使出行,也主要是以自行车或步行为交通方式的短距离出行。这一现象尤其在设施完备的高等院校的环境中更为突出。

6. 其它

在国外,家庭收入、劳动时间、商店贩卖额、工厂总产量、城市的特点等许多因素也被考虑作为影响交通产生的因素。

4.3 生成交通量的预测

生成交通量的预测方法有增长率法、原单位法和函数法。除此之外,还有利用研究地区的过去的交通量或经济指标等的趋势法

及函数法等。根据预测精度、预测方法的合理性等,很多研究文献均建议采用原单位法。

生成交通量的原单位法,是将每人或每户平均产生的交通量作为原单位,整个研究对象地区的总生成交通量即是此原单位与总人口数或总户数相乘而得到的结果。如图 4.3 中所示的是根据 1986 年北京市调查得到的不同交通目的的生成原单位。

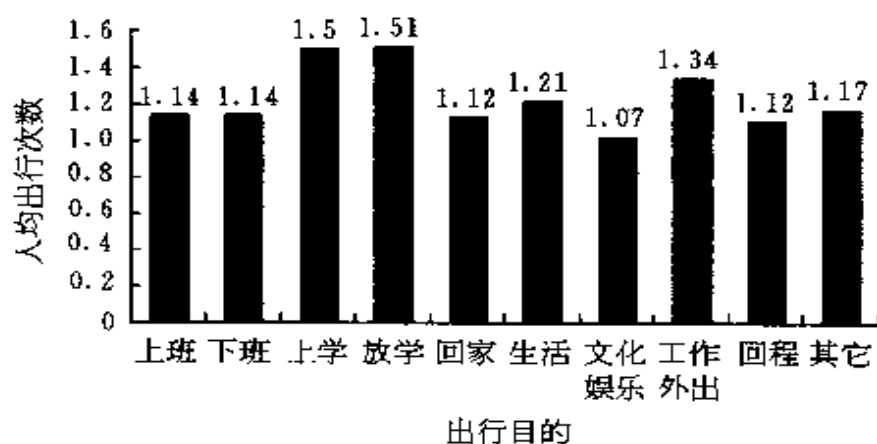


图 4.3 不同出行目的的人均出行原单位

这时,到底是采用每人还是每户作为原单位呢?在日本,尽管有些人认为以户为单位可以更合理地考虑不工作的家庭主妇的购物出行等,但绝大多数情况下,用以个人为单位的原单位法更好。尤其是在将来的原单位的预测上有更大的优点。而在美国,则多采用以户为单位。

对于是否考虑分区域的影响,美、日的作法也不尽相同。日本多是不考虑其影响;而美国的大部分研究,则是分别按考虑与不考虑进行分析,而后综合其结果。

根据中国的社会结构形式,作者认为,个人的交通行动不像美国那样受家庭约束,多是按个人的意志决定进行的,故采用以个人平均出行数为生成原单位为宜。为反映所在区域的差别,以考虑所在区域特性为宜。也就是说

$$X = \sum_m \left(\sum_s a_s^m N_s \right) \quad (4.3.1)$$

其中, X : 研究对象地区的生成交通量;

a_s^m : 属性 s (例: 区域 s 的居民) 目的为 m 的生成原单位;

N_s : 属性为 s 的人口数。

对于预测生成交通量来说, 怎样决定生成原单位的将来值是一个重要的课题。根据国外的研究, 通常有以下几种做法:

① 直接使用现状调查中得到的原单位数据。

② 将现状调查得到的原单位乘以其它指标的增长率来推算, 即增长率法。

③ 最常用的也是最主要的为函数法。通常按不同的交通目的来预测不同出行目的的原单位 (参见图 4.3)。函数的影响因素 (或称自变量) 多采用性别、年龄等在第 2 节中讨论过的指标。

在一些著作中, 原单位法又被称为交差分类法或类型分析法。在此, 对其作一简要介绍。

这三种不同说法所指的基本上是同一方法, 但又略有不同。交差分类法是在 Puget Sound 地区交通研究中开发出的方法。其基本思想是, 把家庭按类型分类, 从而求得不同类型家庭的平均出行率。该研究认为, 交通发生的 3 个主要决定因素是家庭规模、汽车台数和家庭的平均收入。因此, 用能够表示人口密度的加权平均值和这三个特性将人口分类, 求得不同目的各类型家庭的平均出行率。举例而言, 没有汽车的两人之家, 日出行 1.05 次; 有 1 台汽车的 3 人之家, 每天用汽车出行 8.2 次。进行预测时, 以将来同类型家庭的预测值乘以相应的出行率。

类型分析法则是在 20 世纪 60 年代伦敦进行交通规划的第二阶段时, 在交差分类法的基础上发展起来的。这一方法是建立在各类型的家庭的出行率在将来某一时刻也保持不变这一假定的基础之上的。所以, 只要知道各类型家庭的出行率和将来时刻的相应的

家庭数,就可以简单地求得预测值。在伦敦规划中,按照地理条件及家庭的属性,分了108个类型。根据调查求得了各类型的平均出行率。用这些平均出行率和各类型家庭数的将来预测值,分别按三种不同交通方式(开车者、坐车者、利用公共交通系统者)和6个不同交通目的(上班、业务、上下学、购物、社交活动、非以家为出发地的出行)进行了预测。该研究的基本假定为:

① 一个独立的家庭是交通发生的基本单位;

② 每个家庭的生成交通量是由其地理位置(如工作地点)及其家庭属性决定的;

③ 具有某些同样特点的家庭可以作为基准求出各种类型家庭的平均出行率;

④ 只要各家庭的外部因素与最初调查时点是相同的,就可以认为其出行率不变。

根据以上假定,按照年收入、汽车拥有台数、家庭规模等3个特性对所有家庭进行了分类。分类指标为

年收入(英镑):

不足500;
500~1000;
1000~1500;
1500~2000;
2000~2500;
2500以上。

汽车拥有(台数/户):

0;
1;
1以上。

家庭构成:

无就业者,无业成人1人;

无就业者,无业成人 1 人以上;
就业者 1 人,无业成人 1 人及以下;
就业者 1 人,无业成人 2 人及以上;
就业者 2 人,无业成人 1 人及以下;
就业者 2 人,无业成人 2 人及以上。

对类型分析法来说,说明变量在统计学意义上的检定方法的欠缺是一个主要问题。当然,如何正确地预测 108 个类型的户数的将来值也是一个不可忽视的问题。

4.4 发生、吸引交通量的预测

对交通小区域的发生、吸引交通量的预测,要考虑到交通发生源的空间布局关系,从而按区域进行发生、吸引交通量的预测。其预测方法与生成交通量的预测方法一样,大致可分为三类:(1)增长率法,(2)原单位法,(3)函数法。

4.4.1 增长率法(growth-factor modelling)

这种方法就是把现在的不同分区的发生、吸引交通量 T_i 与到预测时点的增长率 F_i 相乘,从而求得各分区的发生、吸引交通量 T'_i ,即

$$T'_i = F_i \cdot T_i \quad (4.4.1)$$

这种方法的关键问题是如何确定 F_i 。通常可以用表示各交通小区活动的指标的增长率作为发生、吸引交通量的增长率。例如:

$$F_i = \alpha_i \cdot \beta_i \quad (4.4.2)$$

α_i 、 β_i 分别是人口增加率,每人平均拥有自行车数的增长率;即

$$\alpha_i = \frac{\text{目标年度区域 } i \text{ 的推定人口}}{\text{基准年度区域 } i \text{ 的人口}},$$

$$\beta_i = \frac{\text{目标年度区域 } i \text{ 的每人平均拥有自行车推定台数}}{\text{基准年度区域 } i \text{ 的每人平均拥有自行车台数}}$$

增长率法的最大优点是可以处理用原单位法和函数法都很难解决的问题。这就是,当我们进行区域的发生、吸引交通量预测时,研究对象地区外的预测也是必要的。这种时候,对于对象地区,毫无疑问,可以知道各个区域的总交通量。而对于对象地区外的区域,通常只需要处理此区域与对象地区之间的交通。这样的问题,用原单位法或函数法是很困难的,所以,通常都用增长率法。比如说,设定

$$F_j = R_j \cdot R \quad (4.4.3)$$

F_j :对象地区外交通小区 j 的发生、吸引交通量的增长率;

R_j :对象地区外交通小区 j 的常住人口的增长率;

R :对象地区内全体的常住人口的增长率。

4.4.2 原单位法

其方法与在第3节中介绍的生成原单位法完全一样。原单位的求得原则通常有,用居住人口或就业人口每人平均的交通发生量来进行推算的个人原单位法和以不同用途的土地面积或工作面积单位面积平均发生的交通量来预测的面积原单位法。

4.4.3 函数模型法

这种方法是交通小区的发生、吸引交通量预测上最常用的方法。由于绝大部分研究是采用多元回归分析模型,故也有时直接被称为多元回归分析法(regression analysis)。

作为模型公式,多采用以下三个模型:

$$\textcircled{1} \quad T_i = a_0 + \sum_k a_k x_{ik} \quad (4.4.4)$$

$$\textcircled{2} \quad T_i = a_0 \prod_k a_k x_{ik} \quad (4.4.5)$$

$$\textcircled{3} \quad T_i = a_0 \exp \sum_k a_k x_{ik} \quad (4.4.6)$$

这里的 x_{ik} 大多是表示交通小区的活动的指标,如常住人口、各行业的就业人口等。

国外的研究表明,综合预测精度、简单、方便等多方面因素,类型①,即多元一次函数 4.4.4 式是较为理想的模型。

众所周知,回归分析是为了求得对象区域的因变量(如个人的出行次数)与相关的说明变量 x_{ik} 之间的关系。表示这一关系的关系式中的回归系数 $a_0, a_1, \dots, a_k$ 通常用最小二乘法算出。这里我们不占用篇幅去解释回归分析法,读者可参考数理统计教材。现在假设我们已得到关系式为

$$T_i = -0.59X_{i1} + 0.74X_{i2} + 0.88X_{i3} - 39.6X_{i4} + 112 \quad (4.4.7)$$

其中, T_i : 交通小区 i 的上下班的出行次数;

X_{i1} : 交通小区 i 的家庭数;

X_{i2} : 交通小区 i 的就业人口数;

X_{i3} : 交通小区 i 的汽车保有量;

X_{i4} : 交通小区 i 与市中心的距离。

我们则可以根据 $X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{i4}$ 的目标年度的预测值来求得目标年度的 T_i 。

对于该模型统计学上的意义和分析,我们这里不再重复。但为了做到心中有数,在此对这种方法的特点进行一下分析和讨论。作为回归分析法的弱点,可以列举出:

① 不能保证使用了真正有效的说明变量;

② 即便得到了公式,也不能保证它一定是合理地描述了交通现象。

为此,我们就要对得到的公式进行交通意义上的分析。比如

说,要对说明变量的系数尤其是其符号进行分析,直到得到合理的解释,才可以认为这一变量的选择是正确的。有时在以家庭为单位的分析中如果难以得到令人满意的结果,改为以个人为单位则可能非常容易地获得良好的模型。

在函数模型法中,各交通小区的发生交通量是分别推算的,但其总和应当与研究区域的生成交通量一致。而在实际计算中,各交通小区的推算量的误差也是不可避免的,从而造成其总和的误差量也是不可避免的。为此,我们应当对根据各交通小区推算出的发生交通量,用生成交通量来进行误差的校正。

假设生成交通量 P 是由全人口 Q 与生成原单位而得到的,则

$$P = pQ \quad (4.4.8)$$

如果 P 与总发生交通量 $T = \sum_i T_i$ 有明显的误差的话,我们则可以将 T_i 修正为

$$T'_i = \frac{P}{T} \cdot T_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.4.9)$$

这种方法叫总量控制。

4.5 有关发生交通量分析的新动向

在前四节,我们讨论了传统的分析交通量产生的方法和模型。这一节介绍一些最近几年有关分析交通量产生的新方法和新模型。这些模型和方法大多是基于出行链(trip chain)而进行分析的。所谓出行链是以某个基点(base,如自己的家)作为出发点,一直到回到该基点或另一基点(如工作单位)时所形成的出行的链。对此概念,有时也称为环(cycle)或旅行(tour)。

出行链研究的第一代,绝大多数是利用马尔科夫链。

不采用马尔科夫链而开辟新领域的研究是美国麻省理工学院(MIT)的 Adler 和 Ben-Akiva 于 1979 年提出的模型方法。其基本

思路是对出行链进行分类,确定可选择集合。然后根据出行费用、活动效用、时间效益等计算各家庭的选择分枝的概率效用,通过对此效用最大化,找出具有最大化效用的分枝。

(1) 在该模型中,时间效益的指标是

$$-\frac{\alpha S}{T}$$

T 是出行链数, S 是出行链中含有的在非基点处的停留次数(参看图 4.4), α 是换算系数。其含义是停留次数越少,时间效益越好; $S = T$ 时,时间效益最大。

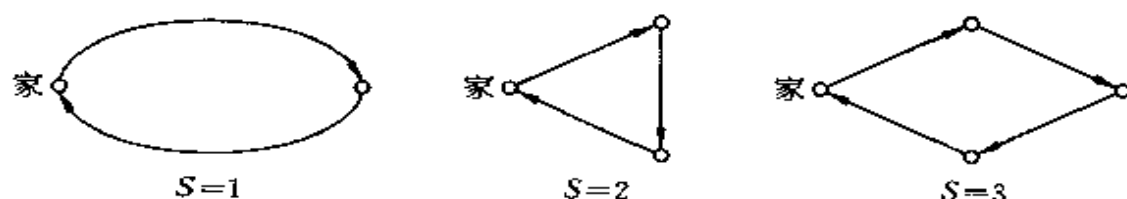


图 4.4 出行链的构成

(2) 出行的一般化费用是

$$-2Tc - (S - T)d$$

其中 c 、 d 分别是以家为基点的出行和不是以家为基点的出行时一次出行的平均一般化费用。所以,第一项便是 $2T$ 回的以家为基点的出行的一般化费用;第二项则是 $(S - T)$ 回的非以家为基点出行的一般化费用。

(3) 活动效用

$$\rho S$$

由于每停留一次表明有一项活动,故活动次数用 S 来表示。 ρ 是单位活动的效用。

根据以上定义,得到效用函数为

$$U = -\frac{\alpha S}{T} - 2Tc - (S - T)d + \rho S \quad (4.5.1)$$

$$\text{约束条件为} \quad T \leq S \quad (4.5.2)$$

$$1 \leq T \quad (4.5.3)$$

$$2Tc + (S - T)d \leq Y \text{ (预算约束)} \quad (4.5.4)$$

为将式 4.5.1 最大化根据拉格朗日未定常数法得到

$$T = \left\{ \frac{\alpha Y}{\rho(2c - d)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.5)$$

$$S = \frac{1}{d} \left\{ Y - \left[\frac{\alpha Y(2c - d)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.5.6)$$

尽管这个模型仅仅停留在理论分析上,但表明了可以用效用理论来分析出行链(交通的产生)问题,这一点是十分有意义的。

在借鉴这一模型时,我们同时也要认识到它的问题和局限性。由于该模型仅仅决定了出行链数和在非基点处的停留次数,而对其发生的顺序、时间和其它有关交通的选择(如目的地、交通方式等)未加考虑。通常被认为只适用于旅游交通、购物交通和业务出行等随机性较强的出行,而很难用于上下班、上下学等日常交通。

在传统方法中一直被忽视的时间因素,在 1971 年 Deserpa 和 1979 年 Bruzelius 的研究中得到了妥善的处理。其模型为

$$\max U(X_1, \dots, X_n; l; t_1, \dots, t_n, t_w) \quad (4.5.7)$$

约束条件

$$\sum_i P_i X_i \leq W \cdot t_w + Y \text{ (收入约束)} \quad (4.5.8)$$

$$l + \sum_i t_i + t_w = T \text{ (时间预算约束)} \quad (4.5.9)$$

$$q_i X_i \leq t_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_1) \quad (4.5.10)$$

$$q_i X_i = t_i \quad (i = n_1 + 1, \dots, n) \quad (4.5.11)$$

式中, U : 效用函数;

X_i : 活动 i 次数 ($i = 1, 2, \dots, n$);

P_i : 活动 i 的单位价格;

Y : 非劳动所得;

W : 单位时间的工资;

t_w : 工作时间;

l : 业余时间;

t_i : 活动 i 的所耗时间;

T : 可能利用的时间;

q_i : 活动 i 的必要的最小所需时间;

n_1 : 必要的最小所需时间被外在决定类型的活动数;

$n - n_1$: 行动时间被约束类型的活动的数。

在最近的研究中,又有许多模型被开发出来。如首先对出行链分类,而后利用树状分对数模型(nested logit model)进行选择的模型和综合分析交通发生、交通分布及交通手段分担的非集计模型,此内容将在第7章中予以介绍。在此仅介绍一下最近由美国加州大学戴维斯分校北村(Kitamura)教授等人提出的模型。

该模型假定任意出行是受限于强制性出行的,所以可以写出北村模型系统(见图4.5)。

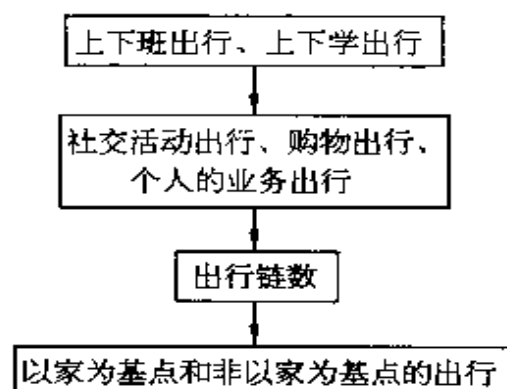


图 4.5 北村模型系统框图

对强制性的,如上下班出行,可以写出

$$Y_i^m = \alpha_0^m + \alpha_1^m x_{i1} + \alpha_2^m x_{i2} + \cdots + \alpha_k^m x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4.5.12)$$

式中, Y_i^m : i 家的目的为 m 的强制性出行数;

x_{ij} : i 家的第 j 个外生变量;

α_j^m : 相应的系数;

ε_i : 随机误差项。

将强制性出行次数作为外生变量,对任意出行,我们可以写出

$$Y_i^d = \beta_0^d + \beta_1^d x_{i1} + \cdots + \beta_j^d x_{ij} + \sum_m \theta_m^d Y_i^m + \varepsilon_i \quad (4.5.13)$$

式中, Y_i^d : i 家的目的为 d 的任意出行;

$\beta_0^d, \cdots, \beta_j^d$: 系数;

θ_m^d : 与外生变量 Y_i^m 对应的系数;

ε_i : 随机误差项。

因此,出行链数可以写成

$$Z_i = \delta_1 Y_i^1 + \delta_2 Y_i^2 + \cdots + \delta_n Y_i^n + v_i \quad (4.5.14)$$

这里, Z_i : i 家产生的出行链数;

Y_i^n : i 家的目的为 n (包括强制性和任意的出行) 的出行次数;

v_i : 随机误差项。

理论上,系数 δ_j 应当在 0 与 1 之间,它表明了该家庭在出行上的嗜好。一个高值系数意味着为了某个特殊目的的有多次停留的出行链的出现的可能性较小。

出行链数的估计值为

$$Z_i = \delta_1 Y_i^1 + \delta_2 Y_i^2 + \cdots + \delta_n Y_i^n = \delta' Y_i \quad (4.5.15)$$

式中, δ' : 推算值的向量;

Y_i^j : 目的为 j 的出行次数的推算值;

Y_i : Y_i^j 的向量。

对强制性出行 Y_i^j 可以表示为

$$Y_i^m = \alpha_0^m + \alpha_1^m x_{i1} + \alpha_2^m x_{i2} + \cdots + \alpha_k^m x_{ik} \quad (4.5.16)$$

而对任意性出行,则为

$$Y_i^d = \beta_0^d + \beta_1^d x_{i1} + \beta_2^d x_{i2} + \cdots + \beta_j^d x_{ij} + \sum_m \theta_m^d Y_i^m \quad (4.5.17)$$

因此,以家为基点的出行(又称 HB(Home-based)出行)次数的期望值是

$$(\text{HB 出行})_i = 2 Z_i \quad (4.5.18)$$

而非以家为基点的出行(又称 NHB(Non home-based)出行)次数的期望值则是

$$(\text{NHB 出行})_i = \sum_n Y_i^n - (\text{HB 出行})_i \quad (4.5.19)$$

此处的 n 可能是强制性也可能是任意性出行。

如果我们令 Z_i 的样本平均值为

$$\bar{Z} = \frac{\sum_i Z_i}{N} \quad (4.5.20)$$

此处的 N 是样本数;同时也令 n 目的的出行次数的期待均值为

$$\bar{Y}(n) = \frac{\sum_i Y_i^n}{N} \quad (4.5.21)$$

那么,每个家庭产生的以家为基点(HB)的出行的平均次数则成为

$$\text{HB 出行平均次数} = 2\bar{Z} \quad (4.5.22)$$

而每个家庭产生的 NHB 出行次数的平均值则为

$$\begin{aligned} \text{NHB 出行平均次数} &= [\bar{Y}(1) + \bar{Y}(2) + \cdots + \bar{Y}(n)] \\ &\quad - \text{HB 出行平均次数} \end{aligned} \quad (4.5.23)$$

说明变量 x_{ij} 的选定从下面的 6 个角度来加以考虑。

- ① 家庭构成:人口数,各年龄层的人数,男女人数等;
- ② 家庭生活方式:有无孩子,有无儿童等;
- ③ 家长的特性:家长的性别、年龄等;
- ④ 家庭收入:按收入多少分组;
- ⑤ 居住状况:居住地点,住房大小等;
- ⑥ 私有车状况:有驾驶执照的人数,私有车台数等。

对不同的出行目的,从上述的 6 个角度选定合适的说明变量进行模型的标定,从而得到相应的出行链数、HB 出行次数、NHB 出行次数等。综上所述可知,该模型的优点是它可以反映各个家庭产生出行时的层次构造。它的缺点是不能得到按目的分类的 HB 出行和 NHB 出行的次数。

5 交通分布

5.1 概 述

如前所述,在交通发生分析阶段,主要是预测各交通小区的发生和吸引交通量。而在交通分布分析阶段,则要预测这些吸引、发生交通从哪来,到哪去。即推求出各小区间的交通分布量。

交通分布中最常用的一个基本概念是 OD 表。O 表示出发地(origin),D 表示目的地(destination)。交通分布通常用一个 2 维矩阵表示。一个小区数为 n 的区域的 OD 表可表示如下:

O\D	1	2	...	j	...	n	合计
1	t_{11}	t_{12}	...	t_{1j}	...	t_{1n}	G_1
2	t_{21}	t_{22}	...	t_{2j}	...	t_{2n}	G_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
i	t_{i1}	t_{i2}	...	t_{ij}	...	t_{in}	G_i
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
n	t_{n1}	t_{n2}	...	t_{nj}	...	t_{nn}	G_n
合计	A_1	A_2	...	A_j	...	A_n	T

其中, t_{ij} : 以小区 i 为起点, 小区 j 为终点的交通量;

G_i : 小区 i 的发生交通量;

A_j : 小区 j 的吸引交通量;

T : 研究对象区域的交通总量。

对此 OD 表, 下述各式成立。

$$G_i = \sum_j t_{ij}, \quad A_j = \sum_i t_{ij}, \quad T = \sum_i \sum_j t_{ij} = \sum_i G_i = \sum_j A_j$$

所谓分布交通量的预测是指给定发生交通量 G_i 和吸引交通量 A_j (i, j 为分区号码), 对全部 OD 求 i, j 之间的分布交通量 t_{ij} 。即, 首先按照前章所述求发生、吸引交通量的方法, 将作为已知条件的发生、吸引交通量求出, 然后再推定这些发生、吸引交通量的分布。分布交通量的预测是四阶段预测法的重要步骤之一。分布交通量是交通规划和交通控制系统设计的基本数据。

分布交通量的预测方法, 可分为两大类。

① 增长率法

此法假定要预测的 OD 交通量的分布形式和现在已有的 OD 表的分布形式相同, 在此假定的基础上预测研究对象区域目标年的 OD 表。

② 构造模型法

从分布交通量的实态分析中, 剖析 OD 交通量的分布规律, 并将此规律用数学模型来表现, 然后用实测数据标定模型中的各系数, 最后根据所标定的模型预测分布交通量。

由上可知, 增长率法的应用前提是要求被预测地区有完整的现状 OD 表。但对于构造模型法来说, 如果模型已经标定好了的话, 就不需要现状的 OD 表了。当然一般来说模型参数的标定要用研究对象区域的实际数据, 也就是说 OD 表还是需要的。但是在这种情况下, 即使没有完整的 OD 表也可以进行模型系数的标定。因此, 同增长率法相比, 构造模型法的应用范围更广些。

作为构造模型法,最主要的有重力模型法(gravity model)和机会模型(intervening opportunity model)法。两者都众所周知且被广泛使用。特别是重力模型法,有各种各样的修正模型和发展模型,目前对此模型的研究仍非常活跃。除上述模型外,还有熵最大化模型、概率模型等其它模型。

5.2 增长率法

5.2.1 预测步骤和模型

增长率法分为平均增长率法、Detroit 法和 Frator 法等。但是,如果剖析一下它们的基本分析方法和分析步骤,可以抽象概括出下述一般的分析方法和计算步骤:

① 用 t_{ij} 表示现状 OD 表中交通小区 ij 间的交通量。 $G_i^{(0)}, A_j^{(0)}$ 分别表示现状发生交通量和吸引交通量;

② 用 G_i, A_j 表示各交通小区将来的发生交通量和吸引交通量;

③ 用下式计算各小区的发生、吸引交通量的增长系数 F_{gi}, F_{aj} 。

$$F_{gi}^{(0)} = \frac{G_i}{G_i^{(0)}}, \quad F_{aj}^{(0)} = \frac{A_j}{A_j^{(0)}} \quad (5.2.1)$$

④ 作为要推算的交通量的第一次近似值 $t_{ij}^{(1)}$, 可由 $F_{gi}^{(0)}, F_{aj}^{(0)}$ 的函数用下式算出:

$$t_{ij}^{(1)} = t_{ij} f(F_{gi}^{(0)}, F_{aj}^{(0)}) \quad (5.2.2)$$

⑤ 一般来说,由对分布交通量求和得到的发生交通量和吸引交通量

$$G_i^{(1)} = \sum_j t_{ij}^{(1)}, \quad A_j^{(1)} = \sum_i t_{ij}^{(1)}$$

与 G_i, A_j 并不一致,这时用 $G_i^{(1)}, A_j^{(1)}$ 代替式 5.2.1 中的 $G_i^{(0)},$

$A_j^{(0)}$, 算出增长系数, 求解第 2 次迭代的近似值

$$t_{ij}^{(2)} = t_{ij}^{(1)} f(F_{gi}^{(1)}, F_{aj}^{(1)}) \quad (5.2.3)$$

⑥ 重复上述作业, 直至

$$F_{gi}^{(k)} = \frac{G_i}{G_i^{(k)}}, \quad F_{aj}^{(k)} = \frac{A_j}{A_j^{(k)}}$$

都接近于 1 时, 相应的 $t_{ij}^{(k)}$ 即为所求的 OD 交通量。

前述的增长率法各方法的不同取决于式 5.2.2 中的函数形式 $f(F_{gi}, F_{aj})$ 的定义。各法对此函数的定义如下:

① 平均增长系数法

$$f = \frac{1}{2} \left(\frac{G_i}{G_i^{(0)}} + \frac{A_j}{A_j^{(0)}} \right) \quad (5.2.4)$$

② Detroit 法(以下简称 D 法)

$$f = \frac{G_i}{G_i^{(0)}} \left[\frac{A_j}{A_j^{(0)}} \middle/ \frac{\sum_j A_j}{\sum_j A_j^{(0)}} \right] \quad (5.2.5)$$

③ Frator 法(以下简称 F 法)

$$f = \frac{G_i}{G_i^{(0)}} \cdot \frac{A_j}{A_j^{(0)}} \cdot \frac{L_i + L_j}{2} \quad (5.2.6)$$

其中, L_i 称为小区 i 的位置系数或 L 系数(location faction)

$$L_i = G_i^{(0)} / \sum_j \left(t_{ij}^{(0)} \cdot \frac{A_j}{A_j^{(0)}} \right)$$

$$L_j = A_j^{(0)} / \sum_i \left(t_{ij}^{(0)} \cdot \frac{G_i}{G_i^{(0)}} \right)$$

平均增长率法是极为单纯的分析方法, 计算也很简单。因此, 此法虽然要进行多次迭代, 仍然被广泛地使用。但是随着计算机的发展, 此法在逐渐被 D 法和 F 法所取代。

D 法是 J. D. Carol 于 1956 年提出的。此法认为, 从 i 到 j 的交通量与小区 i 的发生量的增长率及小区 j 的交通吸引占全域的相对增长率成比例地增加。这个以经验为基础开发出来的方法后来

被证明,其结果等价于使用现状 OD 表的同时概率最大化方法理论求得的结果。

Frator 法是 T. J. Frator 提出的。式 5.2.6 的推导过程如下:

1. 首先注意小区的发生交通量。

现在小区 i 发生的交通量中,以小区 j 为目的地的交通量的比率可用下式求出

$$\frac{t_{ij}^{(0)}}{\sum_j t_{ij}^{(0)}}$$

2. 吸引交通量各自都将增长(增长率为 $F_{aj}^{(0)}$),此比率可用下式求出

$$\frac{t_{ij}^{(0)} \cdot F_{aj}^{(0)}}{\sum_j t_{ij}^{(0)} \cdot F_{aj}^{(0)}}$$

3. 另一方面,小区的发生交通量也在增长。增长为

$$G_i^{(0)} \cdot F_{gi}^{(0)}$$

因此, t_{ij} 可由下式求出

$$t_{ij} = G_i^{(0)} \cdot F_{gi}^{(0)} \frac{t_{ij}^{(0)} \cdot F_{aj}^{(0)}}{\sum_j t_{ij}^{(0)} \cdot F_{aj}^{(0)}}$$

4. 和上述对小区的发生量的分析相同,对小区 j 的吸引交通量也可进行同样的分析,从而得到 t_{ij} 。

$$t_{ij} = A_j^{(0)} \cdot F_{aj}^{(0)} \frac{t_{ij}^{(0)} \cdot F_{gi}^{(0)}}{\sum_i t_{ij}^{(0)} \cdot F_{gi}^{(0)}}$$

5. 结果,上述两式表达同一内容。如果把两者平均值取为 t_{ij} ,并将式 5.2.1 代入此式,即可得到式 5.2.6。因为 Frator 法收敛速度快,所以现在应用最广。

5.2.2 计算实例

表 5.1 为现状 OD 表,将来的发生交通量和吸引交通量由表 5.2 给定,试用平均增长率法求将来的 OD 表。

表 5.1 现状 OD 表

O	D			
	1	2	3	计
1	4	2	2	8
2	3	5	4	12
3	2	3	3	8
计	9	10	9	28

表 5.2 将来的发生交通量和吸引交通量

O	D			
	1	2	3	计
1				20
2				20
3				25
计	25	18	22	65

首先,根据平均增长率法,使用式 5.2.1 算出最初的增长系数 F_{ij} 分别为 2.500, 1.667, 3.125, F_{di} 分别为 2.778, 1.800, 2.444。使用这些数据,由式 5.2.4 和式 5.2.2 求得第 1 次近似值,如表 5.3 中的(1)所示。从同表的合计栏可以看出,所求的结果和将来的发生、吸引交通量表 5.2 并不一致,所以使用两组数据,求出调整系数,进行迭代计算。如表 5.3 的(2)所示,此例题经过 6 次迭代,合

计栏的值和表 5.2 的值基本一致。所以此表即为所求的 OD 表。

表 5.3 用平均增长系数法求得的结果

(1)第 1 次近似值					(2)最终结果(收敛标准 0.01)				
O\D	1	2	3	计	O\D	1	2	3	计
1	10.5	4.3	5.0	19.8	1	11.3	3.8	5.0	20.1
2	6.7	8.7	8.2	23.6	2	6.2	6.6	7.2	20.0
3	5.9	7.4	8.3	21.6	3	7.4	7.7	9.8	24.9
计	23.1	20.4	21.5	65.0	计	24.9	18.1	22.0	65.0

Frator 法在计算上稍微麻烦一些。除了上述的增长率法的计算步骤之外,首先要将 L 系数算出如表 5.4 所示。在此基础上,由式 5.2.6 和式 5.2.2 算出第 1 次近似值,和表 5.3(1)相比较可知,此时已经取得了相当好的近似值。实际上,在这种情况下,只用两次迭代,就可以求得表 5.5(2)的预测 OD 表。可见收敛速度是极快的。

表 5.4 L 系数的计算结果

O\D	L_i	L_j
1	0.408	0.424
2	0.443	0.440
3	0.437	0.428

表 5.5 Frator 法的计算结果

(1)					(2)				
O\D	1	2	3	计	O\D	1	2	3	计
1	11.6	3.8	5.1	20.5	1	11.3	3.8	5.0	20.1
2	6.0	6.6	7.1	19.7	2	6.1	6.8	7.1	20.0
3	7.5	7.4	9.9	24.8	3	7.5	7.5	9.9	24.9
计	25.1	17.8	22.1	65.0	计	24.9	18.1	22.0	65.0

5.3 重力模型法

5.3.1 基本形式

重力模型是模拟物理学中万有引力定律而开发出来的交通分布模型。此模型假定 i, j 间的分布交通量 t_{ij} 与小区 i 的发生交通量和小区 j 的吸引交通量成正比, 与两小区间的距离成反比。即

$$t_{ij} = k \frac{G_i^\alpha \cdot A_j^\beta}{R_{ij}^\gamma} \quad (5.3.1)$$

式中, G_i : 小区 i 的发生交通量;

A_j : 小区 j 的吸引交通量;

R_{ij} : i, j 之间的距离或一般化费用。

上式中, α, β, γ, k 为模型系数, 在已知 t_{ij}, G_i, A_j, R_{ij} 的情况下, (如已知现状的 OD 表), 可用最小二乘法等求得。具体地说, 对上式两边求对数, 则

$$\log t_{ij} = \log k + \alpha \log G_i + \beta \log A_j - \gamma \log R_{ij}$$

上式为线性函数, 可用线性回归分析求各系数。如果假定求得的系数不随时间和地点变化的话, 则通过回归分析求得的重力模型, 在给定发生交通量、吸引交通量及小区间距离的条件下, 可以在任何时候和任何地域应用, 用来预测该地域的 OD 分布交通量。

但是, 这里算出的 OD 交通量 t_{ij} 如果分别对发生、吸引交通量求和的话, 并不能保证所得结果和给定的发生交通量 G_i 、吸引交通量 A_j 一致。因此, 可以认为求得的 t_{ij} 是第 1 次近似值, 然后有必要用增长率法的迭代计算使得两者一致。

此模型的构造可以认为是由分子 $G_i^\alpha \cdot A_j^\beta$ 和分母 R_{ij}^γ 两部分构成。前者表示产生分布交通量的能力, 所以也叫潜能项。因此, α, β 也被称为潜能系数。根据众多经验, 系数 α, β 一般在 0.5~1.0 间取值。

一般,我们可以事先取下列经验值之一:

- 1 $\alpha = \beta$;
- 2 $\alpha = \beta = 1.0$;
- 3 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

这样就可使得他们或其中 1 个成为已知的系数。这样做之后,①的情况下重回归分析的变量只有 2 个,②和③的情况下变成了一元回归分析,从而使得回归分析变得容易多了。

分母项 R_{ij} 叫做分布阻抗项, γ 叫做分布阻抗系数。作为分布阻抗,不一定总是取距离项最为合适。当然作为反映影响分布交通发生的因素,小区间所需时间或小区间的距离较为常用,因为其能够有效地反映将来的交通基础设施建设水平的变化。所以,取此要素能够开发出较为有效的模型。这里,介绍一下作为分布阻抗经常考虑的要因:

- ① 小区中心间直线距离;
- ② 沿线距离;
- ③ 所需时间(时间距离);
- ④ 所需费用、票价、收费道路时的通行费和燃料费等;
- ⑤ 设定距离函数。

其中②、③、④因使用的交通方式不同而变化。所以,有必要求出小汽车和公共交通两种情况,然后取其平均值。另外,⑤的距离函数可以考虑时间和费用等多种要因,将他们统一换算成金额或时间。

5.3.2 算例和内内距离

使用前例中的现状 OD 表,用重力模型法求解目标年次的 OD 交通量。另外,此时的小区间分布阻抗以时间距离衡量并给出其值如表 5.6 所示。现在,取最简单的模型,即令 $\alpha = \beta = 1.0$

在此情况下,回归式变成如下形式

$$\log t_{ij} - \log G_i A_j = \log k - \gamma \log R_{ij}$$

因此,对全部的 OD 要素($3 \times 3 = 9$)算出 $(\log t_{ij} - \log G_i A_j)$ 和 $\log R_{ij}$ 的值,然后采用 $Y=a+bX$ 来进行回归分析。分析的结果为 $a=0.741, b=0.524$,相关系数为 -0.89 。

表 5.6 小区间的时间距离表(单位:分)

O\D	1	2	3
1	14	32	40
2	32	16	22
3	40	22	12

这里,因为 $a=\log k, b=-\gamma$,进行逆变换后,可求得下面所示的重力模型:

$$t_{ij} = 0.182 \frac{G_i A_j}{R_{ij}^{0.52}} \quad (5.3.2)$$

将前述的表 5.2 的将来发生、吸引交通量和表 5.6 的时间距离代入模型,然后对每组 OD 求出 t_{ij} ,则得表 5.7(1)。此处假定时间距离现在和将来都不变。现在,假定如果由于开通了新线使得小区 1 和小区 2 之间缩短了 10 分钟的话, t_{12} 的值将和此表所示的值不同而变成 13.1 次出行,相应 t_{21} 值也将发生改变。

表 5.7 使用重力模型算出的 t_{ij} 结果

(1)模型计算的第 1 次近似值

O\D	1	2	3	计
1	23.1	10.8	11.8	45.7
2	15.0	15.5	16.0	46.5
3	16.7	16.4	27.5	60.6
计	54.8	42.7	55.3	152.8

(2)用平均增长率法计算的第一次迭代值

O\D	1	2	3	计
1	10.4	4.6	5.0	20.0
2	6.7	6.6	6.6	19.9
3	7.3	6.8	11.1	25.2
计	24.4	18.0	22.7	65.1

此外,重力模型也需要进行迭代计算,如果用平均增长率法进行此计算的话,第1次迭代之后,可以求得同表(2)。

顺便说一下,如果我们观察时间距离表就会发现,分布阻抗 R_{ij} 和 R_{ji} 相等的情形很多(对角线对称)。因此,回归分析可以不对全OD要素进行,而只对对角线一侧的三角形部分的全部要素进行,这样做也不会产生过大的误差。

这里的问题是,在OD表的对角线上的要素(内内交通量)的分布阻抗,一般来说极难确定。通常的作法是对于内内交通量,不用重力模型计算,而用其它方法进行预测,然后将其作为第1次近似值。例如,相对于 G_i 、 A_i 的内内交通量, t_{ii} 的比率可通过对小区规模和交通服务条件作为自变量进行回归分析求得模型,进行预测。

5.3.3 修正重力模型

重力模型的原理相当简单明确,而且具有很大的通用性。正因为如此,为修正其缺点使其成为更有效更好的模型,众多的研究者以重力模型为基础进行了各种开发研究。这类模型通称为修正重力模型。

一般来说,重力模型需要改进之处有下述各点:

① 分布阻抗不仅仅是 R_{ij} 这样的简单因素和表现形式,要考虑关于阻抗因素的更复杂、更一般的函数关系 $f(R_{ij})$ 。

② 仅仅由发生交通量、吸引交通量和分布阻抗还不能很好地说明交通分布的特性。特别是不能忽视某些特定小区相互间所固有的诸如社会的或历史的联系等因素的影响。

③ 不能在模型构造上保证由重力模型预测的 t_{ij} 在求和之后所得的值和发生交通量、吸引交通量相一致。

A. M. Voorhees 提出的修正重力模型中对上述①和③点进行了改良,他提出的模型如下:

$$t_{ij} = G_i \frac{A_j f(R_{ij})}{\sum_{j=1}^n A_j f(R_{ij})} \quad (5.3.3)$$

这里, $f(R_{ij})$ 叫做分布阻抗函数, 对于阻抗要素 R_{ij} , 可考虑的函数如下:

- 1 $f(R_{ij}) = R_{ij}^{-\gamma}$
- 2 $f(R_{ij}) = \exp(-bR_{ij})$
- 3 $f(R_{ij}) = a \cdot \exp(-bR_{ij}) \cdot R_{ij}^{-\gamma}$

1 是重力模型的基本形式。另外, 如前所述本身也是可以考虑距离、时间等的合成指标。还有, 上述函数的系数也可以随不同的交通目的而变化。

用上述阻抗函数代替基本模型 5.3.1 式的阻抗项, 并假定 $\alpha = \beta = 1.0$, 则该式变成如下形式

$$t_{ij} = KG_i A_j f(R_{ij}) \quad (5.3.4)$$

考虑条件 $\sum_{j=1}^n t_{ij} = G_i$, 则 $K = 1 / \sum_{j=1}^n A_j \cdot f(R_{ij})$, 用 $1 / \sum_{j=1}^n A_j \cdot f(R_{ij})$ 代替 5.3.4 式的一般系数 K , 则得 5.3.3 式。

其次, 美国公路局模型(BPR)是在上述模型的基础上导入反映小区 i 和小区 j 之间固有关系的调整系数 K_{ij} (也叫地域间结合度) 而得到的。

$$t_{ij} = G_i \frac{A_j f(R_{ij}) K_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j f(R_{ij}) K_{ij}} \quad (5.3.5)$$

K_{ij} 的求法如下:

① 首先令 $K_{ij} = 1$ (即式 5.3.3), 根据现状 OD 表标定模型, 决定 $f(R_{ij})$ 的系数。

② 将现状 OD 表的 G_i, A_j, R_{ij} 代入模型, 求 OD 交通量的计算值 T_{ij} 。

③ 由现状 OD 表的 OD 交通量 t_{ij} 和 T_{ij} 的比值求 K_{ij} 。

④ 假定 K_{ij} 的值在将来也不变化, 预测时不做任何修改而直接使用。

上述这些修正重力模型虽然加上了 $\sum_{j=1}^n t_{ij} = G_i$ 的条件, 但未加上 $\sum_{i=1}^n t_{ij} = A_j$ 的条件。即不能保证 t_{ij} 对 i 求和的结果与已知的吸引交通量 A_j 相一致。因此, 由此模型算出的 t_{ij} , 有必要再根据吸引交通量进行迭代计算, 对所有的结果进行修正。

5.4 机会模型法

该模型是由 Schneider 提出的。基本思想是把从某一个小区发生的出行选择某一小区做为目的地的概率进行模型化, 所以属于概率模型。除此之外, 也有人把 Tomazinis 提出的机会模型和佐佐木及 Wilson 提出的熵最大化模型分类为概率模型。

此模型以如下三个基本假定为前提:

① 人们总是希望自己的出行时间较短。

② 人们从某一小区出发, 根据上述想法选择目的地小区时, 按照合理的标准确定目的地小区的优先顺序。

③ 人们选择某一小区作为目的地的概率与该小区的活动规模(潜能)成正比。

现在, 对某个起点小区 i , 按照与其距离的远近(所需时间的长短)把可能成为目的地的小区 $j(j=1 \sim n)$ 排成一系列。把起点小区 i 到第 $j-1$ 个目的地小区为止所吸引的出行量之和用 V 表示, 第 j 个目的地小区的吸引交通量用 dV 表示, 在小区 i 发生的出行到第 $j-1$ 个目的地小区为止被吸引的概率用 $P(V)$ 表示。此外, 各个小区吸收出行的概率为 L 。那么, 如果在小区 i 发生的出行被第

j 个小区吸引的概率为 dP 的话,则有以下式成立:

$$dP = [1 - P(V)]LdV \quad (5.4.1)$$

将式 5.4.1 变形,可得下式:

$$\frac{dP}{1 - P(V)} = LdV \quad (5.4.2)$$

解式 5.4.2,得

$$P(V) = 1 - e^{-LV} \quad (5.4.3)$$

因此,顺序为 k 的小区(即小区 j)被选为目的地的概率可表示为:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P(V_{k+1}) - P(V_k) \\ &= e^{-LV_k} - e^{-LV_{k+1}} \end{aligned} \quad (5.4.4)$$

现在,如果将存在于小区 j 和到小区 j 为止以前的选择顺序中的小区的累积机会(累积的吸引出行量)用 V_j 表示的话,从小区 i 到小区 j 的分布交通量 t_{ij} 可用下式表示:

$$t_{ij} = G_i(e^{-LV_{j-1}} - e^{-LV_j}) \quad (5.4.5)$$

另外,为使 $\sum_{j=1}^n t_{ij} = G_i$ 成立,将上式两边对 j 求和并令其等于 G_i ,同时注意到 $T = V_n$ (n 为全小区数),则得下式

$$t_{ij} = G_i \left\{ \frac{e^{-LV_{j-1}} - e^{-LV_j}}{1 - e^{-LT}} \right\} \quad (5.4.6)$$

其中 G_i 为小区 i 的出行发生的总数。

关于决定各小区顺序的方法,一般按照如下两个指标进行。

1. 小区间距离:大多数使用所需时间。选择构成此项目的影响要素时可同重力模型。

2. 可达性:即使距离近,如果在该小区能使其成为目的地的潜能(活动规模)小的话,也不一定成为目的地。此潜能和易接近性的乘积称为可达性。

现在用 Q_j 表示小区的潜能(用目的地设施量等来描述),用

R_{ij} 表示 ij 间的距离,立足于小区 i 看小区 j 的可达性, A_{ij} 可表示为

$$A_{ij} = \frac{Q_j}{R_{ij}^\gamma} \quad (5.4.7)$$

这里 γ 是常数,绝大多数取值 $2.0 \sim 3.0$ 。 Q_j 和 R_{ij} 因具体考虑何种因素而异。一般来说取各小区的吸引交通量 A_j 为机会 V_i (所吸引的出行数)。此外,所谓的活动规模指标可取小区的社会经济指标。

最后还有一个问题,就是如何决定常数 L 。此 L 即是访问机会模型的参数,可以使用现状 OD 表,通过最小二乘法求解。即,将式 5.4.3 变形,可得

$$-LV = \ln[1 - P(V)] \quad (5.4.8)$$

使用现状 OD 表的数据得到上式中的 V 和 $1 - P(V)$,对于各交通小区求解,标定未知参数 L 。 L 值也可用图解法求得。取 $\ln[1 - P(V)]$ 为纵轴, V 为横轴画图,则斜率即为 L 值。

此外,根据上述理论, L 值随出行目的不同而变化。因此,也可以按不同交通目的求解 t_{ij} ,然后加起来求出全目的的 OD 表。这种情形下,机会 V 和可达性也要对不同交通目的分别进行计算。

上述模型在构造上也不能保证 $\sum_{i=1}^n t_{ij} = A_j$ 成立,可用迭代计算或通过调整 L 值来进行修正。

5.5 各种方法的特性比较

关于以上介绍的三种分布交通量预测方法,即增长率法、重力模型法和机会模型法,将他们的优缺点进行归纳整理,可得表 5.8。实际应用时,可综合权衡各模型的优缺点,同时相应于所要预测的环境条件来选择预测模型。

表 5.8 三个预测方法优缺点比较

优 点	缺 点
增长率法 (1) 构造简单易懂。 (2) 不需要小区间出行所需时间。 (3) 小时交通量,日交通量的预测都可以适用。 (4) 对全部交通目的 OD 预测都适用。 (5) 当 OD 表的周边分布变化较小时特别有效。 (6) 计算铁道旅客的站间 OD 分布很有效。	(1) 要求有基准年完整的 OD 表。 (2) 当预测对象地域有下述较大变化时不能使用: ① 未来小区划分变化时; ② 小区间所需时间及小区间的紧密程度变化时(交通设施新建或改良); ③ 土地利用方式发生很大变化时(大规模住宅建设时)。 (3) 现状 OD 交通量如果是 0,将来的 OD 交通量也是 0。 (4) 现状 OD 交通量值很小时,可信性较低的交通量将被扩大。
重力模型法 (1) 可以将土地利用对交通的发生、吸引的影响考虑进去。 (2) 对由于交通设施建设等带来的小区间所需时间的变化反映敏感。 (3) 模型构造简单,对任何地区都适用。 (4) 即使没有完全的 OD 表,也能对将来 OD 交通量进行预测。	(1) 是物理定律对社会现象的应用,有类似性,但不一定完全立足于人的行动来分析,这是该模型存在的问题。 (2) 对研究对象地域,使用单一的平均交通分布形式是个问题。 (3) 出行距离分布在研究对象全域不是一个定值,关于出行距离的系数不一定是常数,但却认为重力模型是常数。 (4) 小区间所需时间随交通方式和时间变化而变动,但重力模型仅采用了所需时间一个因素。 (5) 随着小区间的距离趋向于 0,交通量趋于无限大。这一点和实际不符。距离小时,有预测值过高的危险。 (6) 为求解小区内内交通量,要给定小区内的出行所需时间,这很困难。

续表

优 点	缺 点
	(7) 为使预测结果同将来的发生、吸引交通量一致,要用增长率法进行迭代计算。
机会模型法 (1) 模型的使用与小区及地域的边界无关。 (2) 比较来说计算相对简单。 (3) 是以距离的使用为标准决定优先顺序,所以距离的精度高低不像重力模型那样对出行影响那么大。 (4) 机会的定义和小区顺序的决定都由使用者完成,所以具有很大的弹性。	(1) 对未使用过的人来说用起来困难。 (2) L 值的决定非常难。 (3) L 值作为一个常数来决定比较主观武断,另外也未充分考虑地域各部分的特性。 (4) 很难使预测的吸引交通量一致。 (5) 很难获得表示机会的合理标准。

5.6 从观测路段流量推求 OD 交通量

如前所述,无论是进行交通网的规划,还是进行合理的交通管理及交通控制以使道路网能得到更合理的利用,都需要尽可能正确地预测 OD 交通量。但是,四阶段预测法是宏观性的预测方法,最后在分配阶段推求的道路交通量和实际交通量不一定一致。其理由是,OD 交通量的小区划分和道路网的表示水平不相协调,从计算经费着眼而进行的交通网的简化,以及分配时走行时间函数的作成很困难等。因此,在制定交通网规划时,如果使用四阶段预测法的话,从预测精度这一点来看存在一定的问题。

此外,四阶段预测法各阶段模型的标定是以大规模的居民出行调查为基础的。进行这种调查需要大量的人力、物力和时间。而进行路段交通量的调查则既省钱又省时间。从这一点出发,现在正在开发一类预测 OD 交通量的新模型。即首先对现行的道路路段

交通量进行观测,然后,从观察得到的路段交通量出发,反过来推求 OD 交通量。这种方法的基本思想是通过使计算的路段交通量及其观测值一致而推求 OD 交通量。和四阶段预测法相比,不但具有省钱省时间的特点,并且能得到很高精度的预测值。OD 交通量和路段交通量的基本关系式如下:

$$V_a = \sum_i \sum_j P_{ij}^a T_{ij}$$

其中, V_a : 路段 a 的交通量;

P_{ij}^a : ij 间的 OD 交通是利用路段 a 的比例(也称路段选择率);

T_{ij} : ij 间的 OD 交通量。

此问题的难点在于,作为条件式的被观测路段交通量数一般来说比 OD 未知量少,此外,各 OD 对的路径选择也是变量。因此,仅从观测路段交通量不能求得一组唯一的 OD 交通量。

所以要想从观测路段交通量推算 OD 交通量,必须追加某些假定或其它信息。例如,OD 分布类型(各 OD 交通量的相对比例),假定为重力模型或假定现状 OD 分布形式不变等。此外,对于选择路径来说,有作为已知量给定的方法,也有把交通量分配阶段结合进模型进行计算的方法。此外作为衡量观测值和预测值接近程度的方法,有似然函数法、熵函数法和最小平方和法等。

从观测的路段流量推定 OD 交通量的方法,和四阶段推定法相比作业量小、经济,计算结果与现状的交通网相一致,会对高效率的交通管理提供有效的数据。此外,即使没有现状 OD 表,也可进行预测。这对像我国这样的发展中国家更有特殊的意义。

5.6.1 路段交通量最优推定法

在无现状 OD 交通量数据、OD 交通量的构造不清楚时,可假定 OD 交通分布模式为重力模型。

OD 交通量用 5.6.1 式所示的重力模型表示

$$T_{ij} = \alpha G_i A_j R_{ij}^\gamma \quad (5.6.1)$$

式中, T_{ij} : 从小区 i 到小区 j 的交通量;

G_i : 小区 i 的发生指标(人口等指标);

A_j : 小区 j 的吸引指标;

R_{ij} : OD 对 i, j 间的交通出行所需时间;

α : 系数。

此法对路段选择率(小区 i, j 间某一路径被使用的频度)和 OD 交通量同时推算。推算路段选择率是按照求分配交通量的等时间分配原则进行的。计算步骤如下:

① 给定路段行走时间的初值,求各路段交通量为 0 时的各 OD 对之间的最短路径,然后将各 OD 交通量分配到最短路上。

② 根据行走时间函数更新各路段行走时间。

③ 根据更新后的路段行走时间求 OD 间的最短路,然后将 OD 交通量分配到最短路上。

④ 使用下式修正路段交通量

$$V_a^n = \left(1 - \frac{1}{n}\right) V_a^{n-1} + \frac{1}{n} V_a \quad (5.6.2)$$

式中, V_a : 第 n 次最短路分配得到的路段 a 的交通量;

V_a^n : 到第 n 回为止的迭代计算后求得的路段 a 的交通量。

⑤ 如果计算得到的前回路段交通量和本次路段修正交通量的差在给定的容许误差值以内,结束计算。否则,回到计算步骤②。

如果用重力模型表示 OD 交通量的话,路段交通量可以表示如下:

$$V_a = \sum_i \sum_j T_{ij} P_{ij}^a = \alpha \sum_i \sum_j G_i A_j R_{ij}^\gamma P_{ij}^a = \alpha X_a \quad (5.6.3)$$

式中, P_{ij}^a : OD 交通量 ij 使用路段 a 的比率(不同 OD 的路段利用率)。

将式 5.6.3 代入式 5.6.2, 可得下式

$$X_a^* = \left(1 - \frac{1}{n}\right) X_a^{*1} + \frac{1}{n} X_a \quad (5.6.4)$$

$$V_a^* = \alpha X_a^* \quad (5.6.5)$$

现在, 假定路段 a 的观测交通量 V_a^* 和计算交通量 $V_a^{(n)}$ 的误差 ϵ 服从均值为 0, 方差为 $(V_a^{(n)})^\omega \sigma^2$ 的正态分布, 并假定各路段之间的 σ^2 相互独立。这里 $(V_a^{(n)})^\omega$ 是表示方差大小的系数。

$\omega=1$ 时, 路段交通量的平均值和分散成比例关系。 $\omega=2$ 时, 表明变动系数 $\sigma_a/V_a^{(n)}$ 为常数。

此模型首先用调查数据标定重力模型的系数 α, γ, ω , 然后使用模型推求 OD 交通量。此时, 如果首先假定系数 γ 和 ω 为已知量的话, 系数 α 和偏差 σ^2 可以通过将式 (5.6.6) 的似然函数最大化来估计。其中, n 是交通量被观测的路段总数。

$$\begin{aligned} L &= \prod_{a=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi(V_a^{(n)})^\omega \sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(V_a^* - V_a^{(n)})^2}{(V_a^{(n)})^\omega \sigma^2} \right\} \\ &= \prod_{a=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi(\alpha X_a^{(n)})^\omega \sigma^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(V_a^* - V_a^{(n)})^2}{(\alpha X_a^{(n)})^\omega \sigma^2} \right\} \quad (5.6.6) \end{aligned}$$

从此式可以看出, 似然函数最大化相当于路段交通量的观测值 V_a^* 和计算值 $V_a^{(n)}$ 的误差最小化。偏差 σ^2 和系数 α 的最优估计值可由 $\partial \ln L / \partial \alpha = 0$ 和 $\partial \ln L / \partial \sigma = 0$ 求出如下:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{a=1}^l V_a^* (X_a^{(n)})^{1-\omega}}{\sum_{a=1}^l (X_a^{(n)})^{2-\omega}} \quad (5.6.7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \frac{\sum_{a=1}^l (V_a^* - V_a^{(n)})^2}{(V_a^{(n)})^\omega} \quad (5.6.8)$$

其中, l : 被观测的路段数。

以上是将系数 γ 和 ω 作为已知量来处理的。如果这些值变化, 系数 α 的值当然也要变化。这里, 将分配计算的 Wein 法结合到模型中进行下述的迭代计算。

① 给定系数 γ 和 ω 的初始值, 初始状态 ($n=1$) 时的路段交通量置 0。

② 利用前回迭代计算求得的路段交通量, 求各 OD 对之间的最短路径和其所需行走时间 $t_{ij}^{(n)}$ 。

③ 将重力模型中的系数 α 取值为 1, 然后计算 OD 交通量, 将此 OD 交通量分配到最短路径求出 X_a 。然后由式 5.6.6 进行分配交通量的调整, 求出 $X_a^{(n)}$ 。

④ 使用式 5.6.6 求系数 α 。

⑤ 由此 α 和 $X_a^{(n)}$ 求各路段的推算交通量 $V_a^{(n)} = \alpha X_a^{(n)}$ 。

⑥ 使用求得的 $V_a^{(n)}$, 重新计算路段走行时间。

⑦ 如果 α 满足收敛标准, 执行步骤⑧, 否则令 $n=n+1$, 然后返回到步骤②。

⑧ 如果偏差 σ^2 达到最小值则计算结束, 否则调整系数 γ 和 ω 之后, 返回到步骤①重新进行计算。

此外, 系数 ω 也可参考其它地域的数据决定。

5.6.2 OD 交通量最优推算法模型

此模型假设 OD 交通量真值的平均值可用重力模型表示, 随机误差用 ϵ_{ij} 表示, 则

$$T_{ij} = \alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma + \epsilon_{ij} \quad (5.6.9)$$

此时, 假定 ϵ_{ij} 对 OD 交通量相互独立且服从均值为 0, 方差为 σ_{ij}^2 的正态分布。偏差为 OD 交通量的平均值的函数。即

$$\sigma_{ij}^2 = \beta (\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega \quad (5.6.10)$$

可以认为实际的 OD 交通量是各种 OD 交通量分布中最容易出现的一组 OD 交通分布, 即似然函数最大化所对应的 OD 分布。

所以,可以通过对式 5.6.11 的似然函数求最大值来标定 $\alpha, \beta, \gamma, \omega$, 进而推算 OD 交通量。但是,此模型把路段利用率 P_{ij}^a 作为已知条件事先给定。

$$L = \prod_i \prod_j \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta(\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{(t_{ij} - \alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^2}{\beta(\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega} \right\} \quad (5.6.11)$$

$$V_a^* = \sum_i \sum_j T_{ij} P_{ij}^a \quad (5.6.12)$$

这里,取似然函数的对数,略去常数项,构造拉格朗日函数,可得到式 5.6.13。

$$\phi = \sum_i \sum_j \ln \beta(\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega + \lambda_a \sum_i \sum_j \frac{(T_{ij} - \alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^2}{\beta(\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega} \quad (5.6.13)$$

其中, λ_a 为拉格朗日待定系数。令其对 T_{ij} 和 λ_a 的偏导数为 0, 可分别得到式 5.6.14 和 5.6.15。

$$T_{ij} = \alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma + \beta(\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega \sum_a \lambda_a P_{ij}^a \quad (5.6.14)$$

$$\sum_a \lambda_a \left\{ \sum_i \sum_j (\alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma)^\omega P_{ij}^a P_{ij}^{a'} \right\} = V_a^* - \sum_i \sum_j \alpha A_i B_j R_{ij}^\gamma P_{ij}^a \quad (5.6.15)$$

这样计算之后,未知系数 $\alpha, \gamma, \beta, \omega$ 和 OD 交通量 T_{ij} 可用以下所示的迭代计算求得:

- ① 给定 $\alpha, \gamma, \beta, \omega$ 的初值。
- ② 通过求解式 5.6.15 的联立方程式求系数 λ_a 。
- ③ 通过式 5.6.14 求 T_{ij} 。
- ④ 对式 5.6.11 取对数后的函数最大化,用 Newton-Raphson 法求解,求得 α, β, γ 及 ω 的值。
- ⑤ 如果各系数的值收敛,则计算结束,否则返回步骤②。

5.6.3 利用现状 OD 交通量的方法

如果有现状 OD 交通量数据的话,充分利用这些数据,会推算出具有更高精度的交通量。例如,可将现有 OD 交通量作为推算 OD 交通量的目标值,或使用他们求出目的地选择率及路径选择率等。

下面介绍三种模型

1. 熵最大化模型

现有 OD 交通量的 OD 交通量出现概率用 q_{ij} 表示,则最可能出现的 OD 交通量的状态可用下式表示:

$$\max F = \frac{T!}{\prod_i \prod_j T_{ij}!} \prod_i \prod_j (q_{ij})^{T_{ij}} \quad (5.6.16)$$

约束条件为路段交通量的推算值和观测值的一致条件及 OD 交通量的合计和实际的交通总量项一致的条件:

$$V_a^* = \sum_i \sum_j T_{ij} P_{ij}^a, \quad T = \sum_i \sum_j T_{ij} \quad (5.6.17)$$

对于目标函数式 5.6.16 取对数,然后用 Stirling 公式加以近似,并略去常数项。在此之后构造拉格朗日函数并分别对 $T_{ij}, T, \lambda_a, \gamma$ 进行偏微分并令它们为 0,便可获得关于 T 和 λ_a 的一组非线性联立方程式 5.6.18~5.6.20。

$$\begin{cases} T_{ij} = T q_{ij} \exp(\sum_a \lambda_a P_{ij}^a) & (5.6.18) \end{cases}$$

$$\begin{cases} T \sum_i \sum_j q_{ij} P_{ij}^a \exp(\sum_a \lambda_a P_{ij}^a) = V_a^* & (5.6.19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_i \sum_j q_{ij} \exp(\sum_a \lambda_a P_{ij}^a) = 1 & (5.6.20) \end{cases}$$

解此方程组便可求得分布交通量。

计算步骤为:首先将线性联立方程式 5.6.19 和式 5.6.20 对 T 和 λ_a 求解,然后将求得的结果代入式 5.6.18,可求出 OD 交通

量 T_{ij} 。上述的非线性方程式可用 Brent 法进行数值计算。从式 5.6.18 可以看出,凡是经过观测路段的 OD 交通量都将被修正,未利用被观测路段的 OD 交通量将保持现状的 OD 分布形状不变。此模型的原形主要是 Willumson 等人提出的。约束条件 5.6.17 式未被考虑,之后由饭田等追加了 5.6.17 条件而对此模型进行了修正。

2. 剩余误差平方和最小法

(1) 路段交通量模型

如果我们将小区 i 的发生交通量占研究对象地域的总交通量的比率用 f_i 表示(发生交通量比率)。从发生交通量小区 i 到目的地小区 j 的选择概率(目的地选择概率)用 f_{ij} 表示的话,发生交通量 T_i 及 OD 交通量 T_{ij} 可用下述两式表示:

$$G_i = T f_i \quad (5.6.21)$$

$$T_{ij} = G_i f_{ij} \quad (5.6.22)$$

这里 $\sum_i f_i = 1$, $\sum_j f_{ij} = 1$ 。

路段 a 的推算交通量可由式 5.6.22 和式 5.6.3 算出。

$$V_a = \sum_i \sum_j G_i f_{ij} P_{ij}^a \quad (5.6.23)$$

此时,目的地选择概率 f_{ij} 可从已有的 OD 数据的 t_{ij}^* 和 t_i^* 求得。

此外,每对 OD 的路径选择率即路段利用率 P_{ij}^a 作为已知条件给定。据此,使路段交通量的推算值 V_a 和观测值 V_a^* 的误差尽可能小,即误差平方和最小化,进而推算 OD 交通量。

$$\begin{aligned} \min L &= \sum_a (V_a - V_a^*)^2 \\ &= \sum_a \left(\sum_i \sum_j G_i f_{ij} P_{ij}^a - V_a^* \right)^2 \end{aligned} \quad (5.6.24)$$

这里,令 $Q_{ai} = \sum_j f_{ij} P_{ij}^a$, 则有最小化条件:

$$\frac{\partial L}{\partial G_j} = 2 \left\{ \sum_i (G_i \sum_a Q_{ai} Q_{aj}) - \sum_a V_a^* Q_{aj} \right\} = 0 \quad (5.6.25)$$

解此方程组可求得发生交通量。将此发生交通量代入式 5.6.22 即可求得 T_{ij} 。

由于路段交通量的观测值存在观测误差,交通网的抽象和简化也包含有误差。路段交通量模型随着观测地点数的增加推算精度提高,但观测交通量的误差大时,推算值可能出现负值。

(2) 发生交通量模型

此模型是在路段交通量的一致条件(推算路段交通量和观测路段交通量的一致条件)和总出行数条件(发生交通量对交通小区求和应等于总交通量)下,尽可能求得与现在的小区发生交通量分布状态相近的 OD 交通量。

拉格朗日函数可构造如下。

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_i (Tf_i - G_i)^2 + \sum_a \lambda_a \left(\sum_i \sum_j G_i f_{ij} P_{ij}^a - V_a^* \right) \\ & + \nu \left(\sum_i G_i - T \right) \end{aligned} \quad (5.6.26)$$

其中, λ_a 和 ν 为拉格朗日待定系数。

使用最优化条件,并令 $Q_{ai} = \sum_j f_{ij} P_{ij}^a$, $C_{ji} = \sum_a Q_{aj} Q_{ai}$, $E_j = \sum_a V_a^* Q_{aj}$, 由上述目标函数可得下述联立一次方程组。

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (5.6.27)$$

通过求解该联立一次方程组即可求得 OD 交通量。但是当小区数为 n 时,观测路段交通量的路段数必须在 $n-1$ 以下。因为此模型的约束条件之一是推算的路段交通量必须同观测路段交通量

一致,所以如果观测地点数多于小区数或观测值的误差过大时,OD 交通量会变成负值。为解决上述问题,利用路段交通量模型和发生交通量模型的特点,可构造下述结合模型。

(3) 结合模型

此模型是将关于路段交通量和发生交通量的残差平方和之和最小化而构造的模型。因为是将路段交通量模型和发生交通量模型结合在一起而构造的,所以称为结合模型。

$$\min I = \sum_a \left(\sum_i \sum_j G_i f_{ij} P_{ij}^* - V_a^* \right)^2 + \sum_i (Tf_i - G_i)^2 \quad (5.6.28)$$

此时的制约条件只有总出行数这一条件。此模型也和其它模型一样,先构造拉格朗日函数,然后由一次微分条件得到联立方程式,通过求解联立方程式推算 OD 交通量。此模型的特征为,即使观测路段交通量含有一定的观测误差,OD 交通量也不会出现负值,可以得到稳定的推算值。此外,观测路段数极少时也能推算全部 OD 交通量,OD 分布类型发生变化时,本模型也能使用。

除上述特征外,还可以对路段交通量和发生交通量的偏差平方和进行加权处理。目的地选择率即使变化,如果此选择率能用修正重力模型(单约束型)表示的话,可以求与已知发生、吸引量一致的估计值。

5.6.4 模型的特点和问题

在进行由观测路段分布交通量预测时,如果没有现状 OD 交通量时,必须以某种方式判定 OD 交通量的分布形式。这里,对表现分布型式时最常用的重力模型进行了介绍。

从到目前为止的使用经验看,用重力模型推算的 OD 交通量和实际 OD 交通量比较吻合。但是,在现实的道路网上行走的交通不仅仅局限于研究对象域内的 OD 交通量,也包括内外和通过交

流量。因此,和这些交通重合在一起的研究对象道路网内的 OD 交通流量分布形式,不一定都能很确切地用重力模型表现。所以如何描述包括内外交通量和通过交通量在内的小区 OD 交通分布型式成了重要的研究课题。

对封闭性地域或城市间交通,由于通过交通和域外交通不是很多,所以用重力模型表现对象道路网内的 OD 交通流量没有很大的障碍。但是如果研究都市内交通的话,由于内外交通量占的比重很大,简单地使用重力模型会带来一定的问题。如果有现状 OD 交通流量可以利用的话,可以避开这类问题。这种情况下,在对象道路网的周围,可为通过交通和内外交通设置节点,依据现有 OD 交通流量数据求得节点间的 OD 分布型式或目的地选择率。

关于各 OD 交通的路径选择率,有作为已知条件给定的方法和模型内部求解两种方法。前者的情况下,或者使用路径选择理论,或者通过实际路径调查决定路径选择率;后者的情况下,在模型中进行分配迭代计算直至取得收敛解。但是,对于上述介绍的模型,研究结果表明,不管用哪种方法求路径选择率,对推算精度的影响都不太大。原因是即使路径选择率有误差,同一路径上的路段多数被 OD 交通出行者利用,大部分误差相互抵消所致。

要想获得精度高的推算结果,就要尽可能地保证已知数据的精度。这与观测的路段数和其交通量的大小有关。模拟计算分析结果表明,交通量大的路段应尽可能地观测,因其可使推算精度提高。

对于路段交通量,有将其放在目的函数中来构造模型的,也有将其作为约束条件构造模型的。这些不同的处理方法也影响推算精度。如果观测路段交通量的误差极小时,作为制约条件使用问题也不大。此制约条件是极为严格的条件,如果误差变大的话,若将路段推算交通量强制性地和观测量一致的话,就会产生出不切实际的预测值。交通网的简化和交通量观测的人为错误等会导致观测路段交通量含有误差,所以构造模型时,放在目标函数中较为妥当。

6 交通方式分担

6.1 交通方式分担的概念

我们让一个出行(trip)与一种交通方式(mode)相对应,一个地区(zone)的全部出行数中利用该种交通方式的人所占的比例叫做交通方式的分担,或简称为方式分担(modal split)。其中每个交通方式所分担的量叫做该交通方式的分担交通量。

交通方式的分担交通量还可以从交通主体的立场来定义。利用者在考虑交通目的、交通方式的服务特性(包括容量)、地区特性的基础上,选择交通方式,集计起来的选择结果叫交通方式分担交通量,而其在全交通量里所占的比例叫做分担率(或称选择率)。

交通方式的选择模型可以说是交通规划中最重要的经典模型之一,公共交通方式的分担如果合理,城市有限的交通空间就能得到合理利用,交通拥挤就会得到缓解。毫无疑问,公共交通方式比私人小汽车能更有效地利用道路空间。进一步,地铁和其他利用轨道的公共交通方式尽管也需要专用地,但都不需要多余的道路空间,更不会造成交通堵塞。因此,如果能引导一部分私人小汽车(private car,以下简称小汽车)使用者去利用公共交通的话,那么其余的小汽车利用者将会从交通服务水平的改善中受益。

综上所述,交通方式选择问题,是交通规划和政策制定中的重要部分。它影响着我们在城市中出行的效率,影响到城市交通用地的数量,影响到是否能向出行者提供更多的选择可能性。这个问题

在分析城市间交通,如城市间有着有效的铁路交通,而利用道路交通的呼声高涨时也同样重要。我们做方式分担分析的目的也就在于通过对现状和未来进行分析,从而建立起一个合理的分担关系。

在做方式分担分析时,如果一个目的出行只使用一种方式的话,则没有问题,如果两种以上的方式被使用的话,则可按铁道—公共汽车—小汽车—摩托车—自行车—步行的优先顺序来决定这个出行的代表交通方式。据此,两个地区间的交通,由所说的徒步、公共汽车、小汽车等交通方式来分担,其比例则根据各个交通服务水平(即所需时间、费用、舒适性、安全性、可信赖性等)和交通的利用者对于他们所持的价值标准(最小费用、最大效益等)来变化。

6.2 影响选择交通方式的因素

影响方式选择的因素,大致可以划分为以下三组:

6.2.1 出行主体(者)的特性

在出行者特性方面,一般考虑如下几点:

① 是否拥有或是否可以利用小汽车。这一点与社会经济发展有着密不可分的关系。在日本、美国等发达国家,汽车是人们生活中必不可少的交通工具,几乎每个家庭都拥有小汽车。而我国这样的发展中国家,私人汽车的拥有量还很少。

② 是否有驾驶执照。在日本等汽车大国,取得驾驶执照很容易,18岁以上身体健康的人通过在驾驶学校学习都可以获得执照,执照的拥有率在适龄人口中高达90%以上。在日本1.2亿人口中,有6721万人拥有驾驶执照,占人口的65.5%。但仍有一些人不具有执照,如未满18岁的人没有资格取得执照。这些人如果单人出行的话,则无法利用小汽车。

③ 家庭结构(年轻夫妇,夫妇加小孩,退休人员,单身等)。在

国外,年轻夫妇似乎更喜欢使用私人小汽车,而大多数老年人则更倾向于使用公共交通工具。又如在北京因为有骑自行车不准带人的限制,年轻夫妇带小孩上街的话,只能选择公共汽车,或地铁而不能骑自行车。

④ 收入。收入也在很大程度上影响人们对交通方式的选择。使用私人小汽车,除了购买汽车的费用,还需要付税金、保险金,此外还有汽油、润滑油等。收入少的人则更倾向于利用公共交通工具。

⑤ 其他方面的因素,例如工作中需用车,送小孩上幼儿园,上学等。

6.2.2 出行特性

交通方式选择在很大程度上受此影响。

① 出行目的。例如人们上下班通常比其他出行更易于选择公共交通方式,这是因为它具有规律性,且没有停车场的问题。而家庭的短途旅行,则大多利用私人用车。

② 一天之中出行的时间。如深夜出行难于使用公共交通方式。

6.2.3 交通设施的特点

这可分为两个方面:

1. 可量测的因素

① 相关的出行时间:各种方式的车内时间、等车时间、步行时间等,是人们进行方式选择的最重要的因素。首先外出时出行时间的长短决定人们对方式的选择。几百米之内的话人们通常会步行,稍远一些则利用自行车,再远则会选择小汽车或是公共交通方式。再如私人小汽车的利用者无须等车,步行时间较短,但如发生交通堵塞,则车内时间会大大延长。如利用地铁等高速铁路的话,

步行时间较长,但速度快。通常,在高速铁道较发达的城市里,人们去市中心时,由于道路交通堵塞,且缺少停车场,人们更愿意选择高速铁路。而去郊外,人们则主要选择私人用车。而公共汽车,由于车次少,且受交通堵塞的影响,使用的人则越来越少。

② 相关的货币费用(票价,燃料及直接费用)。

③ 是否有停车场及停车费用。在日本的大城市里,市中心停车场少,且收费甚高,所以去市中心时选择公共交通的人最多。在郊外的大商场里大都有免费停车场,人们大多利用私人用车。

2. 难于量测的因素

① 舒适度和便利性。在国外公共交通方式和私人汽车间的竞争十分激烈,所以公共交通方式的运营者则在舒适度和便利性上下功夫,如在车内设置空调设备,售票剪票实行自动化等等。人们的选择在一定程度上受此因素的影响。

② 可靠性和定时性。地铁等因为不受交通堵塞的影响,可以完全按照时刻表来运行,可靠性和定时性都较好,人们更爱利用。公共汽车由于受交通堵塞的影响,不太准时,在很大程度上影响了人们对它的选择。

③ 防护物及安全性。有不少人对交通工具的安全性很注意,骑小型摩托车尽管很快,很方便,但因没有防护物,受气候影响大,且安全性相对较差,很多人不愿或不敢使用。

6.3 交通方式选择阶段的分析方法

6.3.1 预测体系的分类

为了预测交通方式分担交通量,通常使用以下方法。即先根据分担率模型预测分担率,然后再乘以发生、吸引交通量或是分布交通量,从而得到各个交通方式的分担交通量。

交通方式分担率模型,根据在交通需要预测过程中考虑交通

方式分担的阶段不同,可以划分为出行末端模型(trip end model)和地区间模型(trip interchange model)两大类。前者是将各个交通小区的发生交通量在集中交通量计算之前分配到各个交通方式的方法,后者则先计算各交通小区间的分布交通量,然后推算方式分担交通量。交通方式分担率或选择率模型还可按下述方法进行分类:

1. 根据交通方式选择特性对分担率预测体系的分类

(1) 一阶段分担率模型 不将交通方式利用者分为固定阶层和选择阶层,而是一齐来考虑分担率的模型。

(2) 二阶段分担率模型 把交通方式利用者分为固定地使用某种交通方式的阶层和可能对交通方式进行选择的阶层,用图 6.1 所示的步骤来预测不同交通方式交通量的方法。这种方法在决定固定阶层的利用方式时,与出行末端模型一样,完全不考虑地区间的交通服务水平。

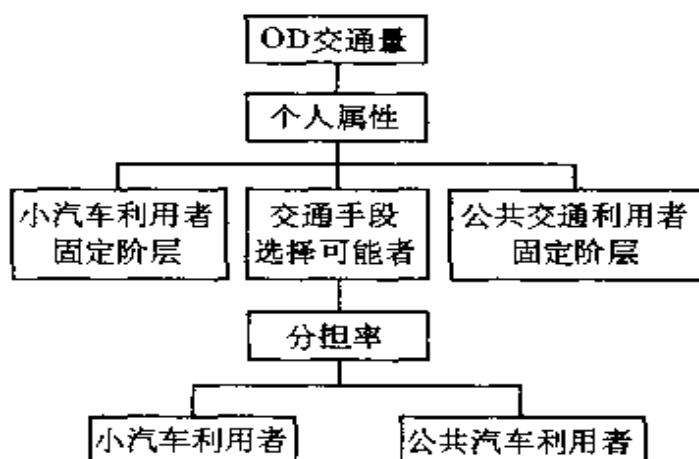


图 6.1 二阶段分担交通量预测框架

2. 根据方式选择的基本单位进行分类

(1) 集计模型 以交通小区为单位将利用者的方式选择集计起来进行说明的模型。

(2) 非集计模型 以个人为单位构造模型来确定各交通方式选择概率,然后再将每个人的方式选择结果集计起来,预测分担交通量的模型。对于这种模型,我们将在第 7 章中讨论。

3. 根据方式选择步骤来分类

(1) 二者择一法 如图 6.2 所示的样子把交通方式的选择分为两步的方法。

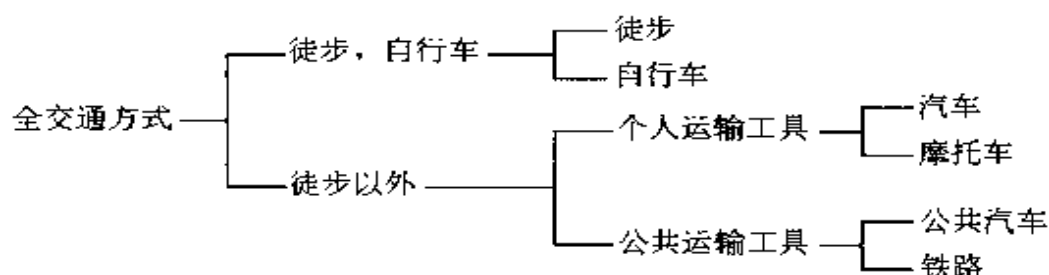


图 6.2 交通方式分担求解步骤

(2) 多项选择法 用包含各种方式的选择率公式一次求出选择率的方法。这种方法计算简单,但正确地提取说明方式选择的要素十分困难,这是它的一个缺点。

6.3.2 方式分担的预测模型

1. 出行末端模型(trip end model)

出行末端模型可以分为适用于对象地区全体的全域模型和考虑各个地区特性的交通方式选择率模型两类,经常使用的是后者。

出行末端模型根据居民的特性(即私人小汽车的保有率、收入、家庭成员的多少等),从一开始就把交通量分配给各个交通方式来进行预测的模型。这个模型除了考虑各个地区居民的特性之外,还考虑到城市中心的距离、土地利用状况、人口密度、出行目的等,把交通小区的发生、吸引交通量分配给各个交通方式的模型。从而在这些模型中,只能间接考虑各个交通方式的服务水平、地区

间的时间、距离等。因此,虽然这个方法很简单,但是将来地区间的交通方式的服务水平改善时,无法在方式分担分析中考虑服务水平变化的影响。1956年在美国的芝加哥等地区,根据这个模型进行了分担率的预测。由于这个模型无法考虑地区间交通服务水平和交通方式间竞争关系等的影响,所以目前较多使用的是出行互换模型或称地区间模型。

2. 地区间模型(trip interchange model)

上节我们从不同角度对模型进行了分类,现在进行城市全域范围内的各方式交通量预测时,通常采用的是一阶段的集计型模型,方式分担则为二者择一方式。

在地区间模型中,各个交通方式所具有服务水平的差别是决定交通方式分担的最主要的因素,而地区的特性则是次要的因素。它是求出分布交通量之后,再求出分担交通量的模型。因而,这个方法在由于交通设施建设而引起服务水平变化时最适用,所以在进行包括铁路、公共汽车等大运量交通方式在内的大城市交通规划时,此模型经常被采用。

根据地区间模型进行方式分担分析预测时通常按照下列步骤进行(见图 6.3)。

(1) 交通网的设定

为了求出各个交通方式的交通量,首先要设定各种交通方式的交通路线网。虽然不一定是所有的交通路径都包括在内,但各个地区间交通所利用的有代表性的路径一定要考虑,特别是有新的大量性的公共交通方式路线的计划时,更应加以考虑。

(2) 交通服务水平的设定

接着要设定交通网的服务水平。服务水平的项目也就是利用

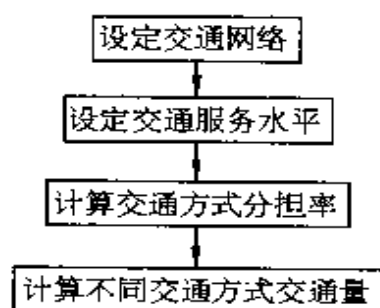


图 6.3 各个交通方式交通量的计算步骤

者选择交通方式时作为选择标准的时间(速度)、票价、运营次数、直接费用、步行时间、换车时间、等车时间等等。除此之外还有拥挤程度、舒适性等可以作为服务水平考虑,但很难在进行定量分析时考虑。

(3) 各个交通方式分担率的计算

在上个步骤所确定的服务水平的基础上,进行利用者选择何种交通方式,即进行各个交通方式的分担率的计算,最后求出不同交通方式的分担交通量。

在计算交通方式分担率时,根据对象区域的土地利用状况及OD间的交通服务水平等对OD进行分类(例如都市中心相互之间,都市中心郊外之间,郊外相互之间等),再考虑每个组(OD pair)的分担率。这样的方法现在被广泛使用。根据分担率的计算方法可以把模型分为分担(选择)率曲线法和函数法两大类。

6.4 实用预测模型

6.4.1 分担率曲线法

这是一个从个人出行调查(person trip survey)结果出发,并依据可以认为是影响交通方式的主要因素的地区间距离、地区间交通方式所需行走时间比或是所需时间差等,画成使用者交通方式选择曲线,从而依据该曲线求出该地区间交通方式分担率的方法。

图 6.4 所示的是 1971 年日本以名古屋市为中心的中京都市圈公共交通方式的分担率曲线。公共交通方式的利用率可以用下式表示:

$$\text{公共交通利用率} = \frac{\text{利用公共交通出行数}}{\text{利用公共交通出行数} + \text{小汽车出行数}} \times 100\%$$

在实际应用中,经常使用这个方法。

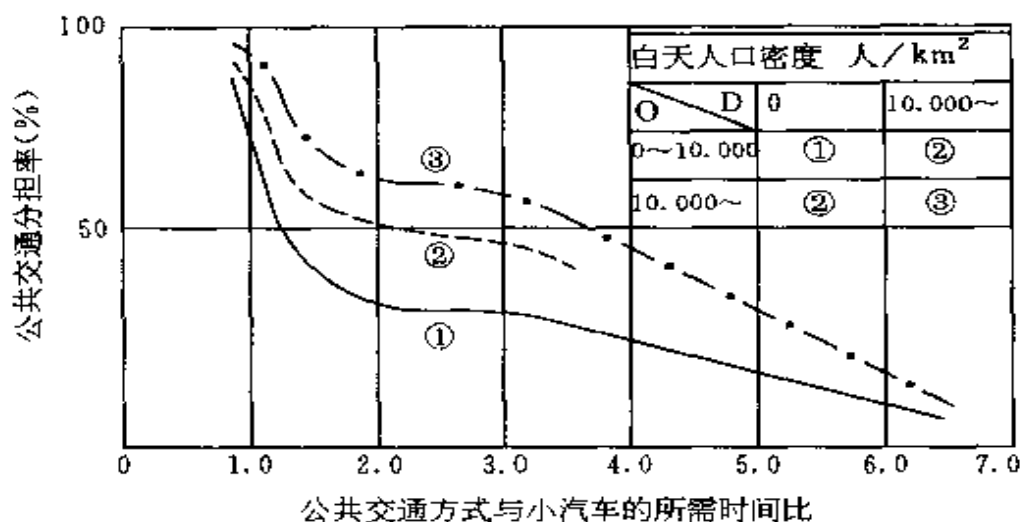


图 6.4 出勤为目的的公共交通方式分担率
(1971 年日本中京都市圈)

6.4.2 函数模型

所谓函数模型就是把交通方式的分担率用函数式的形式表示,再以此来计算各个交通方式分担交通量的方法。这一方法可以分为线性模型、Logit 模型和 Probit 模型等。

1. 线性模型

这是函数模型中最早开发出来的模型。它把影响交通方式分担的各种要素用线性函数的形式表现,从而推求交通方式分担率。但用这种方法求出的分担率 P_i 无法保证分担率必须满足的 $0 \leq P_i \leq 1$ 这一条件,为了解决这个问题开发了 Logit 模型和 Probit 模型。

2. Logit 模型

为了克服线性模型的缺点,交通研究者开发了此集计模型。某个 OD 组间某种交通方式的分担率可以用下式来表示。

$$P_i = \frac{\exp(U_i)}{\sum_{j=1}^J \exp(U_j)}, \quad U_i = \sum_k a_k X_{ik}$$

式中, X_{ik} : 交通方式 i 的第 k 个说明要素(所需时间、费用等);

a_k : 待定参数;

j : 交通方式的个数;

U_i : 交通方式 i 的效用函数;

P_i : 分担率。

在这个模型中, 存在 $0 \leq P_i \leq 1$ 和 $\sum_i P_i = 1$ 的关系, 具有用计算机很容易算出分担率的优点。

这个模型中的参数 a_k 是通过个人出行调查的结果来标定的。标定方法在以后的有关章节中详述。

3. Probit 模型

此模型是为了克服线性模型的缺点而开发的适用于只有两种交通方式时采用的模型。交通方式被选择的概率 P_i 可以用下式计算出来。

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y_i} \exp(-t^2/2) dt$$

式中, Y_i : 表示两种方式特性的线性函数值的差。

这种方法对两种方式之间的选择是适用的, 而应用于多方式的选择则非常难。其优点是两种方式特性即使不独立也可使用。

在地区间模型中, 从预测精度、计算作业及模型构思的合理性来看, Logit 模型是较好的。

除了以上我们介绍的模型外, 还有许多其它模型, 如牺牲量模型及直接需求模型等。牺牲量模型和我们前面介绍的方法完全不同, 它把人们选择交通方式的特性作为基础, 即假定人们是选择利用时损失(牺牲量)最小的交通方式。但无论是从选择意义, 还是从分布形式来说都需要很强的假定条件。此外, 该模型无论是理论上还是实证上的研究都还很不充分。其特点是无须使用地域特征及交通调查的结果等, 预测作业完全是机械地进行的。

7 非集计模型的理论与方法

7.1 概 述

所谓非集计模型(disaggregate model)是强调其与“集计模型(aggregate model)”的不同而命名的,通常也叫“非集计行为模型(disaggregate behavioural model)”或“个人选择模型(individual choice model)”、“分散(选择)模型(discrete(choice)model)”等。

如前所述,集计模型是将每个人的交通活动按交通小区进行统计处理、分析,从而得到以交通小区为分析单位的模型。与此不同,非集计模型则以实际产生交通活动的个人为单位,对调查得到的数据不进行按交通小区统计等处理而直接用于建立模型。

非集计模型的开发、研究始于 60 年代初期。当初是以交通方式选择为中心,与其说是为了交通需求预测,不如说是为了通过分析交通需求的构造从而求得时间价值。进入 70 年代以后,美国麻省理工学院(MIT)的 McFadden 等人在理论上取得了很大的研究进展,从而带动了美国的 Manheim, Ben-Akiva, Lerman 等人的研究小组将非集计模型研究推向了实用化阶段。

非集计模型之所以如此盛行,其原因可列举如下:

(1) 非集计模型能够解决用集计模型不能解决的问题。

集计模型有如下缺点:

① 模型的建立缺少明确的行为假说,没有说服力。

② 交通活动的每一次出行被分解成发生、分布、方式选择和分配四个阶段,各阶段之间的一致性不好;而且也不能考虑一天中的多次出行的相互关系和各种约束条件。

③ 用于预测时无法考虑反馈效果。

④ 模型的建立多取决于建立者的主观决定,缺少严密的统计方法。

⑤ 难以用来估测个人特性和选择肢特性的局部变化和各種交通政策变化的影响。

⑥ 模型具有很强的地区及时间上的局限性,在某时某地建立的模型难以推广到其它时间和地点去应用。

⑦ 为了得到较好的模型需要大量的调查数据,这导致了经济上和时间上的问题。

(2) 非集计模型能够满足交通规划的多样化要求。

(3) 是有效地分析和理解交通活动的重要手段。

根据最近 20 年来的研究,我们可以较为清楚地归纳总结出非集计模型的优缺点。其优点是:

- 非集计模型以明确的行为假说为基础,逻辑性强。
- 可以用较少的样本标定出模型的系数,并可对所求得参数采用统计学方法进行检验。
- 可以选用许多与个人决策相关的因素作为自变量,从而可以对多种交通规划、交通政策进行效果评价。
- 模型具有较好的时间转移性和地区转移性。
- 便于对利用者效益进行项目评价。

反之,与集计模型相比,非集计模型的缺点是:

- 实际的交通规划要求的是以地域为单位的集计结果,由于在非集计模型中的说明变量的未来值不可能全都知道,因此以其近似值得到的集计结果肯定会有误差。当然,集计模型也面临着同样问题,只是在表面上被掩盖了而已。

- 一般来说,影响交通行为的决定性因素是交通服务水平,而交通服务水平又随交通需求量的变动而变动。所以,在进行预测时,通常要求得到交通服务水平与交通需求量的平衡点。可是,用非集计模型,在现阶段还只能依靠反馈解法进行反复计算。要想求得较严密的平衡点则计算量过大。
- 要想得到好的模型,在自变量的选择上花费的时间要比集计模型多。
- 标定模型的参数时要用极大似然估计法(maximum likelihood)。而这种方法及与之相对应的评价方法对许多人、尤其是交通规划决策人员来说较难理解。

7.2 非集计模型的基本理论

作为行为的决策单位的个人(或家庭或某组织)在一个可以选择的、选择分枝是相互独立的集合中,会选择他认为对自己来说效用最大的选择分枝。这一假定被称为效用最大化行为假说。也就是说,如果令 U_{in} 为个人 n 选择分枝 i 时的效用, C_n 是与个人 n 对应的选择肢集合,那么当

$$U_{in} > U_{jn}, \quad \forall j \neq i \in C_n \quad (7.2.1)$$

时,个人 n 将选择 i 。

这里的效用 U_{in} 通常被认为是随机的,这种效用的随机性在理论上有两种解释。第一种是,个人的效用在同一条件下本质上也是随机的。第二种是,尽管在同一条件下个人的效用是确定的,但由于观测者(分析者)不可能观测出影响效用的全部因素,效用被认为是随机的。

第一种解释主要来自心理学上的离散模型,而第二种解释则是来自计量经济学上的离散选择模型。但在实际应用中,这两种解

释没有什么区别,都是用概率模型来分析研究离散性选择问题。在这里,我们用第二种解释的以随机效用理论为基础的离散性选择模型来描述非集计模型的一般表达式。

7.2.1 非集计模型的数学表述

一般来说,个人 n 对选择肢 i 的效用 U_{in} 是随着选择肢特性和个人的社会经济特性的不同而变动的,可以用下式来表示

$$U_{in} = U_{in}(SE_n, A_{in}) \quad (7.2.2)$$

式中, SE_n : 个人 n 的社会经济特性向量;

A_{in} : 对个人 n 来说选择肢 i 的特性值向量;

U_{in} : 反映个人 n 的喜好的函数,也就是个人 n 的效用函数。

根据以随机效用理论为基础的离散选择模型,上式中的 U_{in} 可以表示为

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \quad (7.2.3)$$

$$V_{in} = V_i(X_{in}) \quad (7.2.4)$$

$$\epsilon_{in} = U_{in}(\bar{X}_{in}) + \Delta U_{in}(X_{in}) \quad (7.2.5)$$

此处的 V_{in} 是与可以观测的要素向量 X_{in} (在这里,可以观测的 SE_n 及 A_{in} 被统称为要素)相对应的效用的确定项; ϵ_{in} 是由不能观测的要素向量 $\bar{X}_{in}$ 以及个人特有的不可观测的喜好造成的效用的概率变动项。因此可知, V_i 是反映平均的个人喜好的函数,也就是通常所指的效用函数。 ΔU_{in} 是反映个人 n 特有的喜好与平均的个人喜好的差的函数。

通常为了计算上的方便,7.2.4 式可按线性关系设定为

$$V_{in} = \sum_k \beta_{ki} \cdot X_{kin} \quad (7.2.6)$$

这里, $X_{kin} = g_{ki}(SE_n, A_{in}) \quad (7.2.7)$

g_{ki} 是可观测的社会经济特性与选择肢特性要素的函数。

另外,7.2.5 式也可以被改写为

$$\epsilon_{in} = \mu_{in} + \sum_k \Delta\beta_{kin} \cdot X_{kin} \quad (7.2.8)$$

此处的 μ_{in} 是由不可观测的要素产生的效用的概率变动项, 被假定服从某种概率分布。而 $\Delta\beta_{kin}$ 是有关个人 n 的特有的喜好与平均的个人喜好之间的差的参数, 也被假定服从某种概率分布。因此, ϵ_{in} 的方差是随 X_{kin} 值不同而不同的。但是, 通常为了处理上的方便, ϵ_{in} 多被假定为与 X_{kin} 相互独立地服从某种概率分布。

当各选择肢的效用按 7.2.3 式表达时, 选择肢集合 C_n 中的任意个人 n 选择分肢 i 的概率是

$$\begin{aligned} P_{in} &= \text{Prob}[U_{in} > U_{jn}, \quad \text{对所有 } j \neq i \in C_n] \\ &= \text{Prob}[V_{in} + \epsilon_{in} > V_{jn} + \epsilon_{jn}, \quad \forall j \neq i \in C_n] \quad (7.2.9) \\ &= \text{Prob}[\epsilon_{jn} < V_{in} + \epsilon_{in} - V_{jn}, \quad \forall j \neq i \in C_n] \end{aligned}$$

所以, 如果假设效用的概率变动项向量 $\epsilon_n = (\epsilon_{1n}, \epsilon_{2n}, \dots, \epsilon_{cn})$ 服从某种概率分布, 那么选择概率 P_{in} 则可以用 ϵ_n 的分布参数及效用的确定项向量 $V_n = (V_{1n}, V_{2n}, \dots, V_{cn})$ 来表示。

现在, 令向量 ϵ_n 服从由 7.2.10 式的联合分布函数 $F(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c)$ 来表示的多元概率分布

$$\begin{aligned} F(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c) &= \text{Prob}[\epsilon_{1n} \leq \epsilon_1, \epsilon_{2n} \leq \epsilon_2, \dots, \epsilon_{cn} \leq \epsilon_c] \\ &= \int_{-\infty}^{\epsilon_1} \int_{-\infty}^{\epsilon_2} \dots \int_{-\infty}^{\epsilon_c} f(x_1, x_2, \dots, x_c) dx_1 \dots dx_c \end{aligned} \quad (7.2.10)$$

式中的 $f(x_1, x_2, \dots, x_c)$ 是 ϵ_n 的联合概率密度函数。

这时, 个人 n 对选择肢 i 的选择概率可以求得如下。首先, 取选择肢 i 的概率变动项 ϵ_{in} 为 ϵ 和 $\epsilon + d\epsilon$ 之间的值, 那么效用 $U_{in} = V_{in} + \epsilon$ 在所有选择肢中最大的条件概率则是

$$\begin{aligned} &\text{Prob}[U_{in} = \max_j (U_{jn}) | \epsilon < \epsilon_{in} \leq \epsilon + d\epsilon] \\ &= \text{Prob}[V_{1n} + \epsilon_{1n} \leq V_{in} + \epsilon, \dots, \epsilon < \epsilon_{in} \\ &\quad \leq \epsilon + d\epsilon, \dots, V_{cn} + \epsilon_{cn} \leq V_{in} + \epsilon_{in}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \text{Prob}[\epsilon_{1n} \leq V_{in} + \epsilon - V_{1n}, \dots, \epsilon < \epsilon_{in} \\
&\quad \leq \epsilon + d\epsilon, \dots, \epsilon_{cn} \leq V_{in} + \epsilon_{in} - V_{cn}] \\
&= \left[\int_{-\infty}^{V_{in} + \epsilon - V_{1n}} \dots \int_{-\infty}^{V_{in} + \epsilon - V_{cn}} f(x_1, \dots, \epsilon, \dots, x_c) dx_1 \right. \\
&\quad \left. \dots dx_{i-1} dx_{i+1} \dots dx_c \right] d\epsilon \quad (7.2.11)
\end{aligned}$$

进一步,对 ϵ_{in} 值的整个范围来说,选择肢 i 的效用为最大的概率,也就是,选择肢 i 的选择概率为

$$\begin{aligned}
P_{in} = \int_{-\infty}^{+\infty} &\left[\int_{-\infty}^{V_{in} + \epsilon - V_{1n}} \dots \int_{-\infty}^{V_{in} + \epsilon - V_{cn}} f(x_1, \right. \\
&\quad \left. \dots, \epsilon, \dots, x_c) dx_1 \dots dx_{i-1} dx_{i+1} \dots dx_c \right] d\epsilon \quad (7.2.12)
\end{aligned}$$

另一方面,如果将对 $F(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c)$ 的第 i 项进行偏微分的结果写成 $F_i(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c)$, 则

$$\begin{aligned}
F_i(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c) = &\int_{-\infty}^{\epsilon_1} \dots \int_{-\infty}^{\epsilon_i} f(x_1, \dots, x_c) dx_1 \\
&\dots dx_{i-1} dx_{i+1} \dots dx_c \quad (7.2.13)
\end{aligned}$$

如果用 7.2.13 式来表达选择概率的话,则可得到下式。

$$P_{in} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_i(V_{in} + \epsilon - V_{1n}, \dots, \epsilon, \dots, V_{in} + \epsilon - V_{cn}) d\epsilon \quad (7.2.14)$$

如上所述,对效用的概率变动项向量 ϵ_n , 在假定其服从某种概率分布的前提下,用 7.2.12 式或 7.2.14 式进行积分,则可将 P_{in} 表达为 $V_n = (V_{1n}, \dots, V_{cn})$ 的函数。

由此可知,假定 ϵ_n 服从不同的概率,则得到不同的预测模型。具体地说,如果假定 ϵ_n 的各分量服从相互独立的 Gumbel 分布,则为 logit(分对数)模型;如果假定 ϵ_n 服从多元正态分布,则为 probit(概率型)模型。有关 logit 和 probit 模型,请参看本章其它各节。

7.2.2 效用最大值的数学期望值

这里,我们首先要推导个人在进行效用最大化过程中可能会选择的选择肢的效用值的概率分布,并用其数学期望值导出选择概率。这一效用最大值的期望值,在基于随机效用理论的非集计模型中,尤其是在下面将要介绍的 nested logit(树状分对数)模型那样的有必要按阶段表达选择机制的模型中起着重要的作用。同时,对于推算与随机效用理论一致的利用者效益也是必不可少的。

现在,令对于所有的选择肢的效用最大值为 y_n ,即

$$y_n = \max_i U_{in} = \max_i (V_{in} + \epsilon_{in}) \quad (7.2.15)$$

同时,令 y_n 的概率密度函数为 $g(y)$, $F(\cdot, \dots, \cdot)$ 是随机变动项向量 ϵ_n 的分布函数, $f(\cdot, \dots, \cdot)$ 是其概率密度函数,那么, y_n 的分布函数 $G(y)$ 则可写为

$$\begin{aligned} G(y) &= \int_{-\infty}^y g(y) dy \\ &= \text{Prob}[y_n \leq y] \\ &= \text{Prob}[V_{1n} + \epsilon_{1n} \leq y, V_{2n} + \epsilon_{2n} \leq y, \dots, V_{cn} + \epsilon_{cn} \leq y] \\ &= \text{Prob}[\epsilon_{1n} \leq y - V_{1n}, \epsilon_{2n} \leq y - V_{2n}, \dots, \epsilon_{cn} \leq y - V_{cn}] \\ &= F(y - V_{1n}, y - V_{2n}, \dots, y - V_{cn}) \\ &= \int_{-\infty}^{y-V_{1n}} \dots \int_{-\infty}^{y-V_{cn}} f(x_1, \dots, x_c) dx_1 \dots dx_c \\ &= \int_{-\infty}^y \dots \int_{-\infty}^y f(z_1 - V_{1n}, \dots, z_c - V_{cn}) dz_1 \dots dz_c \end{aligned} \quad (7.2.16)$$

如上所述,考虑到全部选择肢的效用最大值的概率分布,可以由效用的随机变动项向量 ϵ_n 的概率分布及确定项向量 V_n 来求得。

所以, y_n 的数学期望值将为

$$E[y_n] = \int_{-\infty}^{+\infty} y_n g(y) dy$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} \max_i (V_{in} + x_i) f(z_1 - V_{1n}, \cdots, z_c - V_{cn}) dz_1 \cdots dz_c \\
&= \sum_{i=1}^c \int_{-\infty}^{+\infty} (V_{in} + x_i) \int_{-\infty}^{V_{in}+x_1} \cdots \int_{-\infty}^{V_{in}+x_i} f(z_1 - V_{1n}, \cdots, z_c - V_{cn}) dz_1 \\
&\quad \cdots dz_{i-1} dz_{i+1} \cdots dz_c dx_i \\
&= \sum_{i=1}^c \int_{-\infty}^{+\infty} (V_{in} + x_i) F_i(V_{in} + x_i - V_{1n}, \\
&\quad \cdots, V_{in} + x_i - V_{cn}) dx_i
\end{aligned} \tag{7.2.17}$$

上式中的第三式意味着对每个选择肢的具有最大效用的区间进行最大效用期望值计算。

如果对 $E[y_n]$ 进行偏微分, 则可得到

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E[y_n]}{\partial V_{in}} &= \int_{-\infty}^{+\infty} F_i(V_{in} + x_i - V_{1n}, \cdots, V_{in} + x_i - V_{in}) dx_i \\
&\quad + \int_{-\infty}^{+\infty} (V_{in} + x_i) \frac{\partial}{\partial V_{in}} F_i(V_{in} + x_i - V_{1n}, \\
&\quad \cdots, V_{in} + x_i - V_{cn}) dx_i
\end{aligned} \tag{7.2.18}$$

此时, 如果 $F(\cdot, \cdots, \cdot)$ 是可移转不变 (translational invariant) 函数的话, 上式中的第二项将为 0。那么, 根据 7.2.14 式, 可以将 7.2.18 式改写成

$$\frac{\partial E[y_n]}{\partial V_{in}} = P_{in} \tag{7.2.19}$$

也就是说, 最大效用期望值对选择效用的确定项 V_{in} 求偏导, 其结果即是该选择肢的选择概率。另外, 7.2.19 式也意味着 $E[y_n]$ 等于 P_{in} 对 V_{in} 的积分。考虑到 P_{in} 是需求函数, 我们也可以将最大效用的期待值 $E(y_n)$ 解释为消费者剩余。

7.2.3 效用函数

效用函数可以用各种函数形式来表达, 但通常考虑结果分析的容易性及系数标定上的方便, 目前广泛采用 7.2.6 式所示的线

性函数形式。即

$$V_{in} = \sum_k^K \beta_k \cdot x_{kin} \quad (7.2.20)$$

此处的 x_{kin} 是个人 n 的选择肢 i 的第 k 个变量值, β_k 是待定系数, 其标定将根据调查统计数据进行。

x_{kin} ($k = 1, 2, \dots, K$) 由个人的社会经济特性和各选择肢的特性构成。通常直接选取这些特性作为说明变量。但是, 某些特性有时也以某种变换形式(如所需时间的对数)或其合成变量(如所需时间/收入)作为说明变量。如果令 $x_{kin} = 1$, 那么就成为常数项。

应当提醒读者注意的是, 在式 7.2.20 中, 参数 β_k 对各选择肢取同样的数值, 但这并不是不可改变的。如 7.2.6 式所示的对不同选择肢取不同值的参数也是可以的。前者被称为选择肢共通变量参数, 后者被称为选择肢固有变量参数。

大家知道, 在非集计行为模型中, 选择概率 P_{in} 是由选择肢间的相对效用差来决定的。因此, 个人的社会经济特性变量如果用作共通变量就会正负抵消。所以, 社会经济特性变量一定要以固有变量的形式出现, 至少要在诸个选择肢中的某一个选择肢的效用函数中, 不能包含社会经济特性变量。当然, 这一原则也适用于常数项变量。

以上我们对线性效用函数进行了说明, 除此之外, 也有采用对数线性函数等函数形式的。

7.3 常用的非集计行为模型

正如在第 2 节中介绍的那样, 根据 7.2.8 式中 ϵ_{in} 的不同分布可以得到不同的模型构造。这里, 我们选择一些有代表性的模型, 对模型的数学表达式及其特征进行介绍。

7.3.1 多项 Logit(分对数)模型

多项 Logit 模型(Multinomial Logit Model)的选择概率为

$$P_{in} = \frac{\exp(\lambda V_{in})}{\sum_j \exp(\lambda V_{jn})} \quad (7.3.1)$$

此模型数学形式简洁,计算简单,物理意义容易理解。再加上具有选择概率是在 0 与 1 之间的数值,各选择肢的选择概率总和为 1 等合理性,很早以前就被作为概率模型使用。这一模型虽可以由判别分析(discriminational analysis)、刺激-反映过程模型或熵值模型等模型导出,但以随机效用理论为基础推导出来却是美国的 McFadden 的功绩。

以随机效用理论为基础的多项 Logit 模型是在假定 ϵ_{in} 与 V_{in} 独立(即 7.2.8 式中的第 2 项为 0)的,而且选择肢之间服从 Gumbel 分布(也叫 Weibull 分布)的前提下推导出来的。也就是说,假定各 ϵ_{in} 的密度函数的分布函数如下式所示:

$$F(\epsilon_i) = \exp(-e^{-\lambda(\epsilon_i - \eta)}) \quad (7.3.2)$$

此处, λ 是与 ϵ_{in} 的方差 σ^2 相对应的参数, λ 与 σ^2 有 $\lambda^2 = \pi^2/6\sigma^2$ 的关系。 ϵ_{in} 的期望值是 $\eta + \gamma/\lambda$, 其中的 $\gamma \approx 0.577$ 。另外, η 是表示 ϵ_{in} 的常见值的参数,通常令 $\eta = 0$ 。

根据上面的假定, ϵ_{in} 的联合分布函数成为 $F(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c) = \prod_i F(\epsilon_i)$ 。因此,式 7.2.13 可写成

$$F_i(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_c) = \lambda e^{-\lambda \epsilon_i} \cdot \prod_j \exp(-e^{-\lambda \epsilon_j}) \quad (7.3.3)$$

将此式代入 7.2.14 式,求其积分,即可得到式 7.3.1。但是,通常在标定 Logit 模型时,不能独立地得到 λ 的值。所以,可以认为 λ 是被包含在 V_{in} 的说明变量中而对各参数进行标定。

多项 Logit 模型具有 IIA (Independence from Irrelevant Al-

ternation)特性。所谓 IIA 特性,是指任意 2 个选择肢的选择概率的比与其它选择肢的状态无关。IIA 特性源于各 ϵ_{in} 在选择肢间相互独立的假定。

这一 IIA 特性是非常方便的性质。比如说,当用模型进行预测时(参见后面各节),如要增加或减少选择肢的数量,只需对其相对应的项进行修正即可。

但是,当 ϵ_{in} 不是相互独立,选择肢间有类似性时,就会出现类似于著名的“红巴士-蓝巴士问题”那样的 IIA 问题。所谓“红-蓝巴士问题”是:如果某个人可利用的交通方式是私人小汽车和红色的巴士,那么可以认为其效用的随机项是相等的,也就是说,小汽车和红巴士的选择概率均为 0.5。这时,我们假定新增了一条蓝色的巴士路线。通常,人们在进行选择时与巴士的颜色是无关的,小汽车、巴士的选择概率应为 0.5,所以红巴士、蓝巴士的选择概率则应分别为 0.25。但是,如果我们根据 IIA 特性,对原模型中加一蓝巴士的选择肢,小汽车、红巴士、蓝巴士的选择概率就都变成 1/3 了。很明显,这是一个不合理的结果。

因此,当选择肢之间存在相似性而仍然直接使用 Logit 模型的话,就会过高评价具有相似性的选择肢群,而造成错误地标定模型参数,导致预测偏差的问题。

应当提醒大家注意的是,IIA 特性对所研究对象是否成立不能以主观的想法决定,而应通过实际的试验来确定。另外,多项 Logit 模型的参数应满足下式(参见 7.4.2 式):

$$\sum_n \sum_i \delta_{in} \cdot X_{kin} = \sum_n \sum_i P_{in} \cdot X_{kin} \quad (k = 1, \dots, K) \quad (7.3.4)$$

此式的物理意义是,实际上被选择的各选择肢特性的样本平均值与由模型得到的是一致的。

7.3.2 NL 模型

为了解决由于 IIA 特性造成的多项 Logit 模型的问题,交通专家们开发了许多改进模型。其中,以随机效用理论为基础的有两类:一是以 Logit 模型为基础的改良模型;二是 Probit 模型等非 Logit 型模型。限于篇幅的关系,我们在这里仅介绍第一类模型中操作性能最好、最简洁的 Nested-Logit (NL, 树状分对数) 模型。

所谓 NL 模型是针对不能直接使用多项 Logit 模型的选择问题,将选择肢按树状结构分层表示(参见 7.4.2 节),在每一层中应用 Logit 模型的问题。

NL 模型在理论上的进展,是由 Daly 和 Zachary、Williams、Ben-Akiva 和 Lerman、McFadden 等人几乎在同一时期取得的。

下面,我们以两层的 NL 模型为例,对 NL 模型加以介绍。

设 i 是上层的选择肢, j 是下层的选择肢, P_{ijn} 是 i 和 j 的同时选择概率, $P_{j/in}$ 是在上层选择 i 的条件下,在下层选择 j 的条件概率, P_{in} 是在上层选择 i 的概率; $V_{j/in}$ 是在上层选择 i 的条件下,在下层选择 j 的确定项效用; V_{in} 是在上层选择 i 的效用的确定项。 λ_1 和 λ_2 分别是与只同下层有关的效用的概率项的方差相对应的参数,以及与同时考虑上、下层的效用的概率项的方差相对应的参数。为了保证模型满足效用最大化理论, λ_1 和 λ_2 应满足关系 $1 \geq \frac{\lambda_2}{\lambda_1} > 0$ ($\lambda_1 = \lambda_2$ 时,模型即为通常的多项 Logit 模型)。那么,我们就可以写出

$$P_{ijn} = P_{j/in} \cdot P_{in} = \frac{\exp(\lambda_1 V_{j/in})}{\sum_j \exp(\lambda_1 V_{j/in})} \cdot \frac{\exp\{\lambda_2 (V_{in} + V_{in}^*)\}}{\sum_{i'} \exp\{\lambda_2 (V_{i'n} + V_{in}^*)\}} \quad (7.3.5)$$

其中
$$V_{in}^* = \frac{1}{\lambda_1} \ln \sum_j \exp(\lambda_1 V_{j/in}) \quad (7.3.6)$$

此处的 V_{ij} 是 NL 模型的核心概念, 一般称为合成效用项。

NL 模型的推导, 我们采用 Williams 的方法, 介绍如下:

令 U_i 是选择肢 i 的效用 (n 省略不写), $U_{j|i}$ 是选择 i 的前提下选择肢 j 的效用, $U(i, j)$ 是两层选择问题的效用, 那么

$$U(i, j) = U_i + U_{j|i} \quad (7.3.7)$$

如果令 U_i 和 $U_{j|i}$ 是服从平均值为 V_i 和 $V_{j|i}$, 方差为 σ_i^2 和 $\sigma_{j|i}^2$ 的相互独立的概率分布; 而且 U_i 与 $U_{j|i}$ 是相互独立的, 那么, 7.3.7 式即可改写为

$$U(i, j) = V_i + V_{j|i} + \epsilon_i + \epsilon_{j|i} \quad (7.3.8)$$

此处的 ϵ_i 是选择肢 i 的效用的随机项, $\epsilon_{j|i}$ 是在选择 i 的前提下选择肢 j 的随机项。而且, ϵ_i 与 $\epsilon_{j|i}$ 是相互独立的, 并分别在其选择肢间服从 Gumbel 分布。

根据随机效用理论, 组合的选择肢 ij 的选择概率为

$$P_{ij} = \text{Prob}[U(i, j) > U(i', j'), \forall i' \neq i \text{ 或 } j' \neq j] \quad (7.3.9)$$

由 7.3.7 式可知,

$$P_{ij} = \text{Prob}[U_i + \max_j(U_{j|i}) > U_{i'} + \max_j(U_{j|i'})] \\ \text{且 } U_{j|i} > U_{j'|i}, \forall j' \neq j] \quad (7.3.10)$$

又由于 U_i 被假定为与 $U_{j|i}$ 是相对独立的, 所以

$$P_{ij} = \text{Prob}[U_i + \max_j(U_{j|i}) > U_{i'} + \max_j(U_{j|i'})], \forall i' \neq i] \\ \times \text{Prob}[U_{j|i} > U_{j'|i}, \forall j' \neq j] \\ = P_i \cdot P_{j|i} \quad (7.3.11)$$

现在用 Logit 模型写出当在上层选择 i 时下层选择 j 的条件概率为

$$P_{j|i} = \text{Prob}[V_{j|i} + \epsilon_{j|i} > V_{j'|i} + \epsilon_{j'|i}, \forall j' \neq j] \\ = \frac{\exp(\lambda_1 V_{j|i})}{\sum_j \exp(\lambda_1 V_{j|i})} \quad (7.3.12)$$

这里的 λ_1 是与 $\varepsilon_{j/i}$ 的方差 σ_1^2 相对应的参数 ($\lambda_1^2 = \pi^2/6\sigma_1^2$)。

上层 i 的选择概率可写为

$$P_i = \text{Prob}[V_i + \varepsilon_i + \max_j (U_{j/i}) > V_r + \varepsilon_r + \max_j (U_{j/r}), \forall i \neq j] \\ = \text{Prob}[V_i + \varepsilon_i + U_i^* > V_r + \varepsilon_r + U_r^*, \forall i \neq j] \quad (7.3.13)$$

其中, $U_i^* = \max_j (V_{j/i} + \varepsilon_{j/i})$ 。根据 Gumbel 分布的性质, U_i^* 服从于均值为 $V_i^* = \ln \sum_j \exp(\lambda_1 V_{j/i})$ 、方差为 σ_1^2 的 Gumbel 分布。也就是, U_i 等于 V_i^* 与 $\varepsilon_{j/i}$ 的和。所以, 如果 $\varepsilon_i^* = \varepsilon_i + \varepsilon_{j/i}$, 此处的 ε_i^* 仍近似服从 Gumbel 分布, 7.3.13 式便可写为

$$P_i = \frac{\exp[\lambda_2 (V_i + V_i^*)]}{\sum_r \exp[\lambda_2 (V_r + V_r^*)]} \quad (7.3.14)$$

这里的 λ_2 是与 ε_i^* 的方差 ($\sigma_1^2 + \sigma_2^2$) 相对应的参数

$$\lambda_2^2 = \frac{\pi^2}{6(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} = \frac{\lambda_1^2}{1 + 6(\sigma_2^2/\pi^2)\lambda_1^2} \quad (7.3.15)$$

此式也再次说明, $0 < \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq 1$ 满足效用最大化理论的必要条件。

7.4 非集计模型的计算

在本节中, 我们将主要讲述多项 Logit 模型和 NL 模型的参数标定方法及统计检验方法等。有关模型应用方面的转移性、集计等问题, 将在下一节里介绍。

7.4.1 多项 Logit 模型的计算

在进入实际计算之前, 我们先给出计算的流程如图 7.1 所示。下面我们就按照此流程图进行说明。

1. 效用函数的定义

个人 n 的选择肢集合为 A_n 时选择 i 的概率为

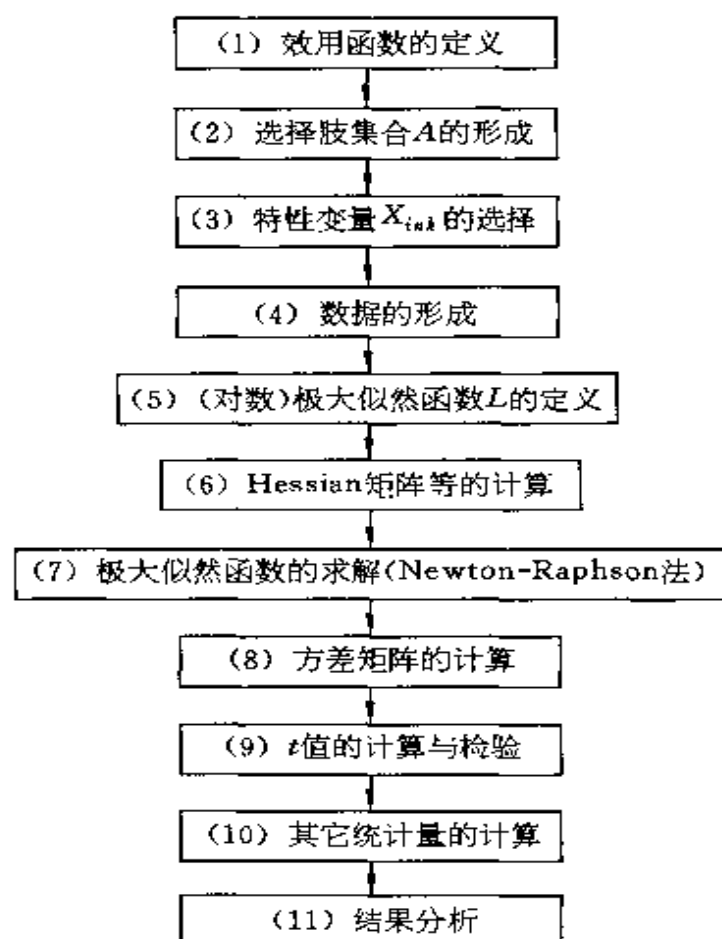


图 7.1 多项 Logit 模型的计算流程

$$P_{in} = \frac{e^{\lambda V_{in}}}{\sum_{j \in A_n} e^{\lambda V_{jn}}} = \frac{1}{\sum_{j \in A_n} e^{\lambda(V_{jn} - V_{in})}} \quad i \in A_n \quad (7.4.1)$$

这里 V_{in} 是效用的确定项, λ 是参数。

如第 3 节所述, 效用函数可以用不同形式表示。这里, 我们采用最常用的线性形式表示如下:

$$V_{in} = \theta' X_{in} = \sum_{k=1}^K \theta_k x_{ink} \quad i \in A_n \quad (7.4.2)$$

其中, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]^T$ 是未知参数向量, $X_{in} = [x_{in1}, \dots, x_{ink}, \dots,$

x_{ink} 是个人 n 的选择肢 i 的特性向量。因此, 7.4.1 式可改写成为

$$P_{in} = \frac{e^{\lambda \theta^T X_{in}}}{\sum_{j \in A_n} \exp[\lambda \theta^T X_{jn}]} = \frac{e^{\lambda \sum_{k=1}^K \theta_k x_{ink}}}{\sum_{j \in A_n} \exp[\lambda \sum_{k=1}^K \theta_k x_{jnk}]} \\ = \frac{1}{\sum_{j \in A_n} \exp[\lambda \sum_{k=1}^K \theta_k (x_{jnk} - x_{ink})]} \quad i \in A_n \quad (7.4.3)$$

2. 选择肢集合 A 的形成

每个人选择肢集合 A_n 可以是不同的, 但对整个研究对象的母集团要定义一个对每个人都适用的选择肢集合 A 。这个集合 A 应为

$$A = \bigcup_{n \in \text{母集团}} A_n \quad (7.4.4)$$

即, A 是个人 n 的选择肢集合 A_n 的和。

3. 特性变量 X_{ink} 的选择

特性 X_{ink} 可以分为选择肢特性和个人特性两大类; 前者又可以进一步分为选择肢固有常数项(0-1)变量、选择肢固有变量和共通变量。

设想对一交通方式选择问题进行分析。考虑其选择肢集合为 $A = \{i = 1(\text{自行车}), i = 2(\text{地铁}), i = 3(\text{公共汽车})\}$ 。

那么, 可以考虑其特性变量的选择如表 7.1 所示。其相应的效用差为

$$V_{1n} - V_{2n} = (\theta_1 - \theta_2) - \theta_3 \times (\text{地铁的票价}) + \theta_4 \times (\text{自行车所需时间} \\ - \text{地铁所需时间}) + \theta_5 \times (\text{有否自行车}) + \theta_6 \times (\text{年龄}) \\ - \theta_7 \times (\text{年龄}) + \theta_8 \times (\text{性别}) - \theta_9 \times (\text{性别})$$

$$V_{1n} - V_{3n} = \theta_1 - \theta_3 X_{3n3} + \theta_4 (X_{1n4} - X_{3n4}) + \theta_5 X_{1n5} + \theta_6 X_{1n6} \\ + \theta_8 X_{1n8}$$

$$V_{2n} - V_{3n} = \theta_2 + \theta_3 (X_{2n3} - X_{3n3}) + \theta_4 (X_{2n4} - X_{3n4})$$

$$+\theta_7 X_{2n7}+\theta_9 X_{2n9}$$

在这里,应当注意的是:

① 选择肢固有常数项变量的总数为 A 集合中选择肢的数 J 减去 1,即 $(J-1)$ 。

② 个人特性变量,也应遵从①的原则,如年龄变量的总数 $= J-1 = 3-1 = 2$,故分别列为 X_{1n6} 和 X_{2n7} 。

表 7.1 特性变量的选择

选择肢	区 分								
	选择肢特性				个人特性				
	选择肢固有常数项变量		部分共通变量 车费(元)	完全共通变量 所需时间 (分)	有否 自行 车	年龄	年龄	性别	性别
	X_{in1}	X_{in2}	X_{in3}	X_{in4}	X_{1n5}	X_{1n6}	X_{1n7}	X_{1n8}	X_{1n9}
自行车 V_{1n}	1	0	0	自行车 所需时间 X_{1n4}	有自行 车 1, 否 0 X_{1n5}	个人 n 的年龄 X_{1n6}	0	男=1, 女=0 X_{1n8}	0
地铁 V_{2n}	0	1	地铁票价 X_{2n3}	地铁所需 时间 X_{2n4}	0	0	个人 n 的年龄 X_{2n7}	0	男=1, 女=0 X_{2n9}
汽车 V_{3n}	0	0	地铁票价 X_{3n3}	汽车所需 时间 X_{3n4}	0	0	0	0	0
未知参数	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9

③ 像“有否自行车”(以及小汽车汽油费等)这样的与其它选择肢明显无关的个人特性变量或选择肢固有变量,可只用于其相应的选择肢。

4. 数据的整理

数据的整理应针对具体问题采用相应的形式。如对 3 中的交通方式选择问题,应以出行为单位进行整理。也就是说,某个人有

2 次出行的话,在母集团中就如同 2 个不同的人一样进行考虑。整理格式如表 7.2 所示。

由表可知,①每个人的选择集合不一定相同,其计入方法按照实际情况计入;②根据以出行为单位的原则,表中个人号不同也可能是同一人的出行纪录。

5. 对数似然函数的定义

参看表 7.2,个人 n 的选择结果 $\delta_{1n}, \dots, \delta_{in}, \dots, \delta_{J_n n}$ 的联合概率可用下式表示。

$$P_{1n}^{\delta_{1n}} P_{2n}^{\delta_{2n}} \cdots P_{in}^{\delta_{in}} \cdots P_{J_n n}^{\delta_{J_n n}} = \prod_{i \in A_n} P_{in}^{\delta_{in}} \quad (7.4.5)$$

表 7.2 多项 Logit 模型的数据整理

个人号	选择肢	选择结果	选择肢特性				个人特性				
			X_{in1}	X_{in2}	X_{in3}	X_{in4}	X_{in5}	X_{in6}	X_{in7}	X_{in8}	X_{in9}
1	1	1	与表 7.1 形式相同								
	2	0									
	3	0									
2	1	0									
	2	1									
⋮	⋮	⋮	⋮								
n	1	δ_{1n}									
	2	δ_{2n}									
	⋮	⋮									
	J_n	$\delta_{J_n n}$									
⋮	⋮	⋮	⋮								
N	1	δ_{1N}									
	2	δ_{2N}									
	⋮	⋮									
	J_N	$\delta_{J_N N}$									
参 数			$\theta_1, \dots, \theta_k (\theta_9)$								

因此,个人 $1, \dots, n, \dots, N$ 做出如表 7.2 所示时选择结果的同时概率(即似然函数)应为

$$L^* = \prod_{n=1}^N \prod_{i \in A_n} P_{in}^{\delta_{in}} \quad (7.4.6)$$

L^* 是似然函数, 取其对数即可得到对数似然函数

$$\begin{aligned} L = \ln L^* &= \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} \delta_{in} \ln(P_{in}) \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} \delta_{in} \left(\theta^T X_{in} - \ln \sum_{j \in A_n} e^{\theta^T X_{jn}} \right) \end{aligned} \quad (7.4.7)$$

可以证明, L 对未知参数向量 θ 一般是凹函数。所以, 使 L 达到最大值的极大似然估计向量 $\hat{\theta}$ 应为由式 7.4.7 对 θ_k 的偏导为 0 得到的联立方程式的解。 L 对 θ_k 的偏导数方程组可写为

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_k} = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} \delta_{in} \left[x_{ink} - \frac{\sum_{j \in A_n} x_{jnk} e^{\theta_k^T X_{jn}}}{\sum_{j \in A_n} e^{\theta_k^T X_{jn}}} \right] = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (7.4.8)$$

根据 7.4.3 式, 又因为 $\sum_{i=1}^I \delta_{in} = 1$, 化简 7.4.8 式并令其为零, 则有

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} (\delta_{in} - P_{in}) x_{ink} = 0 \quad (7.4.9)$$

其中,

$$P_{in} = \frac{e^{\theta^T X_{in}}}{\sum_{j \in A_n} e^{\theta^T X_{jn}}}, \quad i \in A_n.$$

式 7.4.9 也是 θ 的 k 元非线性方程组。尽管它的解不一定存在, 但当有解时, 可以证明, 解将是唯一的。

6. 梯度及 Hessian 矩阵的推导

由 7.4.9 式可知, 梯度及 Hessian 矩阵应分别为

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_k} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial \theta_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} (\delta_{in} - P_{in}) x_{in1} \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} (\delta_{in} - P_{in}) x_{ink} \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} (\delta_{in} - P_{in}) x_{inK} \end{bmatrix} \quad (7.4.10)$$

$$\nabla^2 L = \begin{bmatrix} \partial^2 L / \partial \theta_1^2 & \cdots & \cdots & \cdots & \partial^2 L / \partial \theta_K \partial \theta_1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \cdots & \partial^2 L / \partial \theta_k \partial \theta_l & \cdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \partial^2 L / \partial \theta_1 \partial \theta_K & \cdots & \cdots & \cdots & \partial^2 L / \partial \theta_K^2 \end{bmatrix} \quad (7.4.11)$$

7. θ 的计算——NR(Newton-Raphson)法

求解 7.4.9 式所示的非线性 K 元方程组,常用的有 NR 法和 DFP (davidon-fetcher-powell) 法。这里,我们采用 NR 法进行求解。

有关 NR 法的一般介绍,我们不再重复,有兴趣者请参阅数值分析(计算方法)方面的教科书。

用 NR 法求解 7.4.9 式步骤为(参看图 7.2):

① 设定初始值: $\theta^{(0)} = 0$, 反复计算累计次数 $m = 0$ 。

② 求得 $\theta^{(0)} = 0$ 时 ∇L 的值 $\nabla L(\theta^{(0)})$ 后,令点 $(\theta^{(0)}, \nabla L(\theta^{(0)}))$ 为 $A^{(0)}$ 点。

③ 求点 $A^{(0)}$ 的切线方程:

$$\nabla L - \nabla L(\theta^{(0)}) = \nabla^2 L(\theta^{(0)})(\theta - \theta^{(0)})$$

④ 求得上式与 θ 轴的交点 $\theta^{(1)}$,也就是说,令 $\nabla L = 0$,代入上

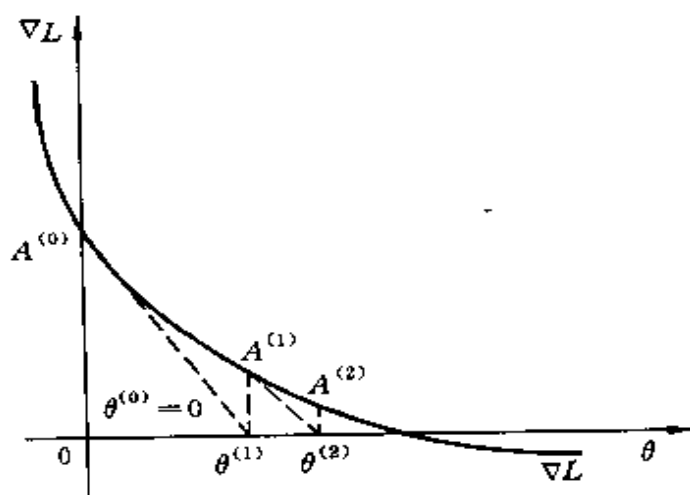


图 7.2 NR 法的图示

式:

$$\nabla L(\theta^{(0)}) + \nabla^2 L(\theta^{(0)})(\theta - \theta^{(0)}) = 0$$

因此, $\theta^{(1)} = \theta^{(0)} - \{\nabla^2 L(\theta^{(0)})\}^{-1} \nabla L(\theta^{(0)})$

此时, 令 $m=1$, 然后对步骤②至④进行反复迭代运算, 即

⑤ 求 $\theta = \theta^{(m)}$ 对应的 ∇L 的值 $\nabla L(\theta^{(m)})$, 令 $(\theta^{(m)}, \nabla L(\theta^{(m)}))$ 为 $A^{(m)}$ 。

⑥ 求点 $A^{(m)}$ 的切线方程:

$$\nabla L - \nabla L(\theta^{(m)}) = \nabla^2 L(\theta^{(m)})(\theta - \theta^{(m)})$$

⑦ 由上式得到的与 θ 轴的交点的 θ 值 $\theta^{(m+1)}$:

$$\theta^{(m+1)} = \theta^{(m)} - \{\nabla^2 L(\theta^{(m)})\}^{-1} \nabla L(\theta^{(m)}) \quad (7.4.12)$$

⑧ 如果

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{K} \left\{ \sum_{k=1}^K (\theta_k^{(m+1)} - \theta_k^{(m)})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} &< \mu_1 \\ \left| \frac{\theta_k^{(m+1)} - \theta_k^{(m)}}{\theta_k^{(m)}} \right| &< \mu_2 \quad (k=1, \dots, K) \end{aligned} \right\} \quad (7.4.13)$$

那么, 停止计算; 否则, 令 $m=m+1$, 反复⑤至⑦的步骤。其中 μ_1

和 μ_2 是足够小的正值,即事先给定的误差值,通常令 $\mu_1 = 10^{-4}$, $\mu_2 = 10^{-2}$ 。

8. 方差矩阵的计算

至此,我们得到了未知参数的值。可是,这些参数是否值得信赖,还需进一步研究。

参数向量解 $\hat{\theta}$ 是随机变量 δ_{in} 的函数,所以参数向量 $\hat{\theta}$ 也可以被看成随机变量,故可称之为统计量(statistics)。另一方面, $\hat{\theta}$ 作为解又是 δ_{in} 的实现值,故又可称之为估计量(Estimator)。作为统计量,其概率密度函数如何? 作为估计量,其值是否为真值? 这两个问题,正是下面要回答的问题。

可以证明

① 当样本数 N 足够大时, $\hat{\theta}$ 服从正态分布,其期望值 $E(\hat{\theta})$ 是参数的真值,方差矩阵 $V(\hat{\theta}) = [-\nabla^2 L(\theta)]^{-1}$ 。

② 对于统计量 $\hat{\theta}$ 来说, N 越大就越接近真值。即 $\hat{\theta}$ 是 θ 的一致估计量。

③ 当 N 足够大时, $\hat{\theta}$ 对应的 $V(\hat{\theta})$ 将是 θ 的一致估计量中的最小方差矩阵。即,任何其它方差矩阵减去 $V(\hat{\theta})$ 均为正值。上述性质中,在实际计算中要用到的是 $V(\hat{\theta})$ 的估计值

$$\hat{V} = [-\nabla^2 L(\hat{\theta})]^{-1} \quad (7.4.14)$$

9. t 值的计算与 t 检定

所谓 t 值,是 $\hat{\theta}_k$ 除以其标准偏差得到的值。即

$$t_k = \frac{\hat{\theta}_k}{\sqrt{v_k}} \quad (7.4.15)$$

其中的 v_k 是 7.4.14 式中的第 k 个对角元素。

当 $|t_k| > 1.96(2.576)$ 时,可以有 95%(99%)的把握说对应的特性 X_{ink} 是影响选择概率的主要因素之一。也就是说,当 $|t_k| < 1.96(2.576)$ 时,可以有 95%(99%)的把握说 x_{ink} 对选择概率没有影响;这时,最好是去掉该因素,再次标定参数向量。

10. 其它统计量的计算

① 样本数: N 。

② 可能情况: $C = \sum_{n=1}^N (J_n - 1)$, 其中 J_n 是个人 n 的选择肢数。

③ 对数极大似然函数中的 θ_k 值全部为 0 时的 L 值, 由式 7.4.7 得:

$$L(0) = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} \delta_{in} \ln \left(\frac{1}{J_n} \right) = - \sum_{n=1}^N J_n$$

④ 选择肢固有常数项变量以外的 $\hat{\theta}_k$ 全都为 0 时的 L 值 = $L(c)$ 。

⑤ $L(\hat{\theta}) = L$ 的最大值。

⑥ $-2(L(0) - L(\hat{\theta})) = \chi^2_0$

这是对参数为 0 假定(归无假说)的 χ^2 检验(自由度为 K)。 $\chi^2_0 > \chi^2_\alpha$ 的话, θ_k 不一定全为 0; $\chi^2_0 < \chi^2_\alpha$ 的话, θ_k 值全为 0 的可能性很大。

⑦ $-2(L(c) - L(\hat{\theta})) = \chi^2_c$

选择肢固有常数项变量的系数以外的变量系数是否全为 0 的 χ^2 估计量(自由度为 $K-1$), 其结果判断同⑥。

⑧ 命中率(%right 或 hit ratio)的计算

步骤 1: 将 $\hat{\theta}$ 与 x_{ink} 的实际值代入 7.4.3 式, 求得 $\hat{P}_{in}$ 。

步骤 2: 令 $\hat{\delta}_{in} = \begin{cases} 1 & \hat{P}_{in} \text{ 在 } i \text{ 中为最大值时,} \\ 0 & \text{其它情况。} \end{cases}$

步骤 3: 令 $S_{in} = \begin{cases} 1 & \text{当 } \delta_{in} = \hat{\delta}_{in} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } \delta_{in} \neq \hat{\delta}_{in} \text{ 时} \end{cases}$

那么

$$\text{HitR} = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in A_n} S_{in} / \sum_{n=1}^N J_n,$$

$$\text{Hit}R_i = \sum_{n=1}^N S_{in}/N_i,$$

其中 N_i 是选择肢 i 对应的 A_n 的人数。通常命中率能达到 80% 以上的话, 就可以认为是非常好的结果。

⑨ 极大似然比(或 McFadden 的决定系数)

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\theta})}{L(0)}$$

尽管 ρ^2 是越接近 1 越好, 但通常在 0.2~0.4 之间就可以认为是非常好的结果。这是因为, logit 模型的内生变量 δ_m 是 0-1 变量, 很难适用通常的相关系数的解释方法。

$$\textcircled{10} \bar{\rho}^2 = 1 - \frac{L(\hat{\theta})/(c-K)}{L(0)/c}$$

这个指标也是越接近 1 越好, 可以看成是相当于用自由度修正后的回归分析的相关系数。

7.4.2 NL 模型的计算

NL 模型参数标定过程如图 7.3 所示。下面我们就依照此流程图加以说明。

(1) 选择肢树状图的形成

请参看 7.3.2 节中对 NL 模型的介绍。对 7.3.2 节中的 2 阶段 NL 模型而言, 其选择肢树状图如图 7.4 所示。

现考虑一个人的出行、目的地和交通方式的三阶段选择, 其可能的选择肢树状图如图 7.5 和图 7.6 所示。

(2) 各阶段效用函数的定义及特性变量的选择

在实际计算中, 通常令 $\lambda_1=1$ 后求解 β, λ_2, θ (参看图 7.3)。对图 7.6 的 3 阶段选择问题, 取

$$V_{gmd} = \beta_1^{(1)} \times \text{白天人口数的自然对数} + \beta_2^{(1)} \times \text{交通所需时间}$$

$$V_{gm} = \beta_1^{(2)} \times \text{私人小汽车常数项变量} + \beta_2^{(2)} \times \text{有汽车执照的 0-1 变量}$$

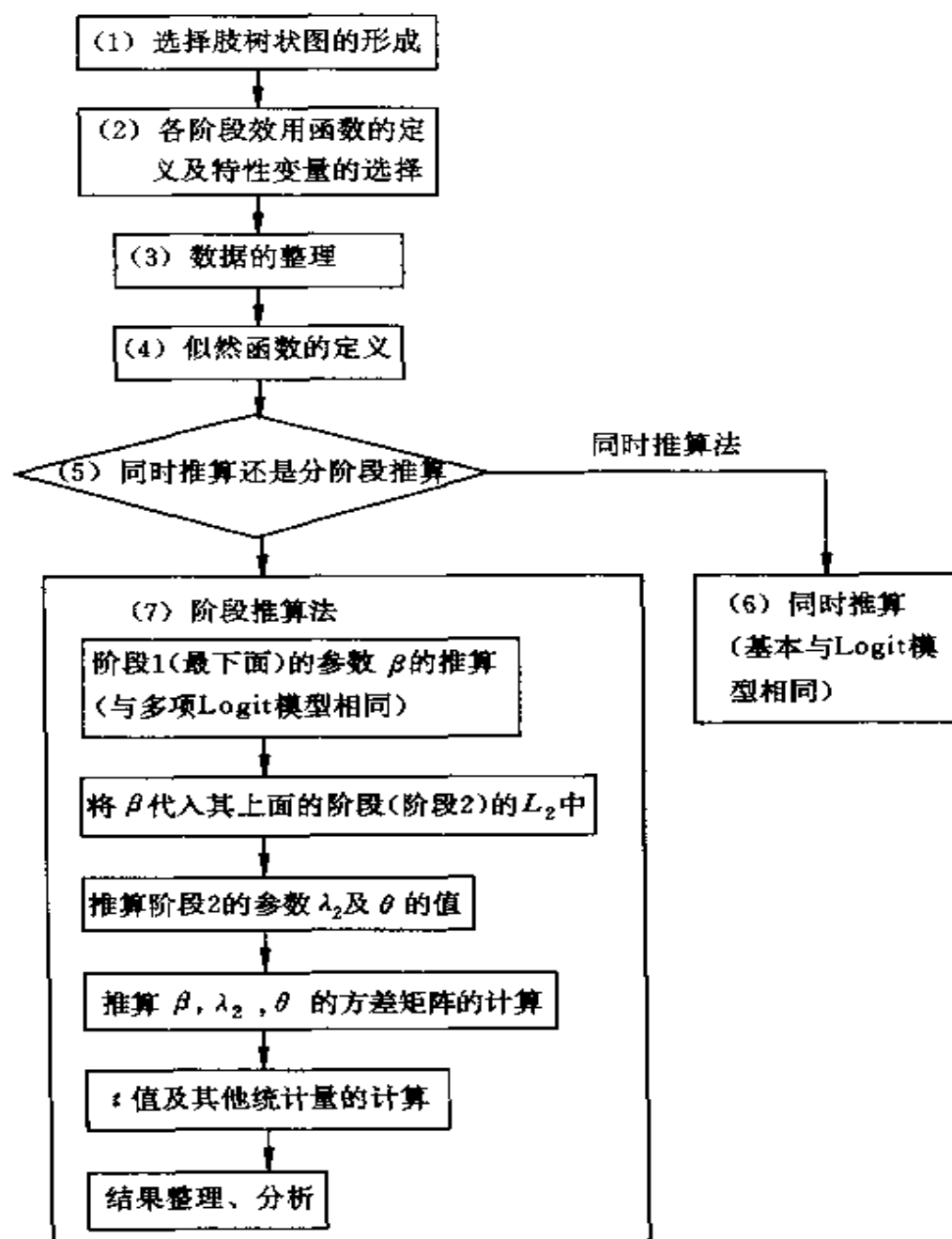


图 7.3 2 阶段 NL 模型的参数估计流程图



图 7.4 NL 模型的选择肢树状图

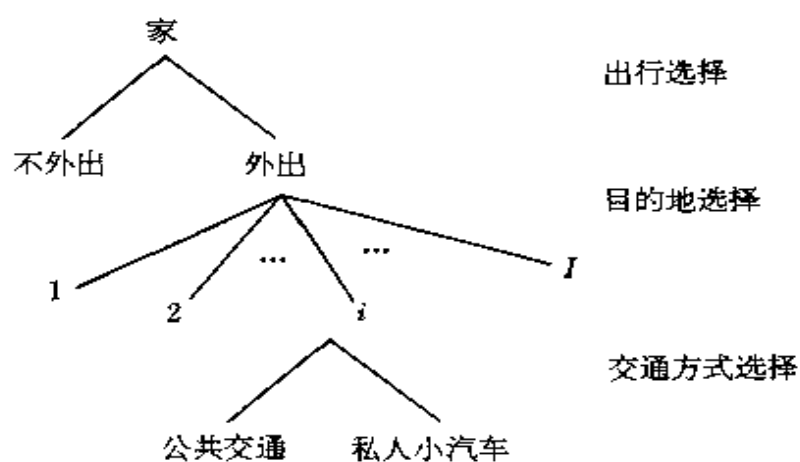


图 7.5 出行——目的地——方式选择肢树状图

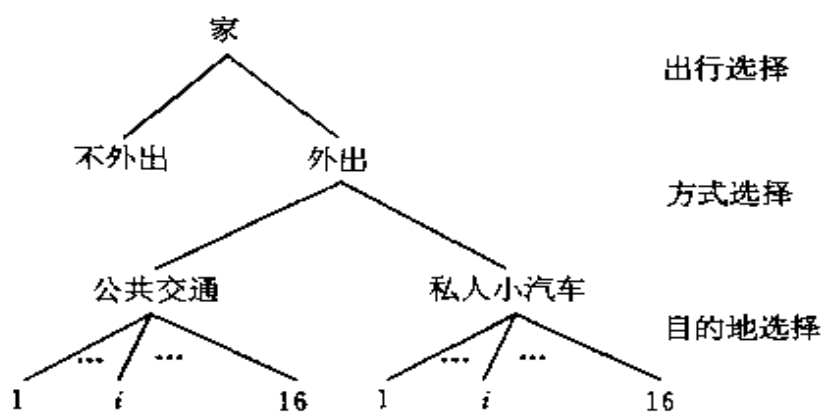


图 7.6 出行——方式——目的地选择肢树状图

$V_g = \beta_1^{(3)} \times \text{不外出的常数项} + \beta_2^{(3)} \times \text{年龄小于 34 的 0-1 变量} + \beta_3^{(3)} \times \text{年龄在 34 至 49 之间的 0-1 变量} + \beta_4^{(3)} \times \text{家庭主妇的 0-1 变量}$

(3) 数据的整理

其基本原则与多项 Logit 模型一样,整理格式与特性变量选择的格式相似,表 7.3 所示的是例题的阶段 1~3 的 NL 模型采用阶段估计时的格式。

表 7.3 特性变量选择及数据整理表

个人号 n	选择肢			阶段 1		阶段 2			阶段 3				
	阶段 3	阶段 2	阶段 1	白天人口数的自然对数	交通所需时间	常数项变量	汽车执照的 0-1 变量	合成效用变量	常数项变量	年龄小于 34 的 0-1 变量	年龄在 34 到 49 之间的 0-1 变量	家庭主妇的 0-1 变量	合成效用变量
n	外出	公交	某地	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	0	0	u_g^*	0	0	0	0	u_{gm}^*
		私人汽车	某地	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	1	有执照=1; 无执照=0	u_g^*	0	0	0	0	u_{gm}^*
	不外出								1	年龄 ≤ 34 时为 1, 否则为 0	年龄在 34~49 之间时, $\delta=1$ 否则为 0	n 为主妇时 $\delta=1$ 否则为 0	0
未知参数				$\beta_1^{(1)}$	$\beta_2^{(1)}$	$\beta_1^{(2)}$	$\beta_2^{(2)}$	$\frac{\beta_m}{\beta_d}$	$\beta_1^{(3)}$	$\beta_2^{(3)}$	$\beta_3^{(3)}$	$\beta_4^{(3)}$	$\frac{\beta_g}{\beta_m}$

(4) 似然函数的定义

其基本原则与多项 logit 模型相同,故在此省略。

(5) 同时估计还是阶段估计的决定

NL 模型的参数标定方法有同时估计和阶段估计两种。两种算法各有所长。

同时估计法基本上与多项 logit 模型相同,以将 L 最大化为目标。其不同点是,式 7.3.14 中的效用函数对参数来说是非线性的。

这种方法得到的估计量具有一致性、渐近性和有效性。但是也有其短处。第一,对数似然函数对参数不一定是凸的,所以,满足 $\nabla L=0$ 的解有许多,不得不从这些解中找出使 L 最大的解;第二,参数的个数增加, ∇L 和 ∇L^2 行、列数增多,计算时间增加。

阶段估计法的优点是,每一阶段的 L 的凸性得到保证,计算时间和计算容量节省。其缺点是,得到的解的有效性不如由同时估计法得到的好。

根据以上分析,我们建议,对两阶段 NL 模型采用同时估计法,而对 3 阶段以上的 NL 模型采用阶段估计法。

(6) 同时估计法

L 的定义等与多项 logit 模型基本相同,在此省略。与多项 logit 模型不同的是 λ_1 和 λ_2 应满足 $0 < \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \leq 1$ 。当此关系不成立时,可以认为其对应的选择肢树状图是不合理的。

(7) 阶段估计法

计算方法是对每一阶段采用多项 logit 模型的估计。其中,最下层(第一阶段)与多项 logit 模型完全相同。以后的每一阶段要将其下层的相应的总效用的自然对数作为一个变量,即多一个参数 $\lambda_i (i \geq 2)$ 。

现将图 7.6 所示的模型的推算结果示于表 7.4~7.6。表 7.6 中没有“常数项”变量,是因为有 16 个选择肢,如用“常数项”则要有 15 个变量,变量过多,不便于预测,故没有放入“常数项”变量。所用的两个变量 t 值都很大, ρ^2 值也较理想。正确率虽然不高,但考虑到是针对有 16 个选择肢的问题,应当说是不差的结果。

在表 7.5 中, ρ^2 值和正确率都很令人满意。logsum 和“小汽车”常数项对应的 t 值不大,可以理解为是由于驾驶执照的作用过强 ($t=20.8$)。考虑到对模型结构来说,logsum 和“小汽车”常数项是不可缺少的,故仍保留了它。表 7.6 给出了一个很好的结果。

表 7.4 非就业者的目的地选择模型

变 量	公共交通		私人小汽车	
	系数	t 值	系数	t 值
白天人口数的自然对数	2.05	22.1	0.872	6.4
交通所需时间(分)	-0.108	-30.4	-0.153	-21.6
ρ^2	0.320		0.294	
命中率(%)	35.5		42.1	
样本数	1204		411	
选择肢数	16		16	

表 7.5 非就业者的交通方式选择模型

变 量	系数	t 值
Logsum(下层总效用的自然对数)	0.166	1.1
“小汽车”常数项 0-1 变量	0.120	0.1
驾驶执照 0-1 变量(仅对“小汽车”选择肢)	3.06	20.8
ρ^2	0.417	
命中率(%)	85.1	
样本数	1615	

表 7.6 非就业者的交通出行选择模型

变 量	系数	t 值
Logsum(仅对“外出”的选择肢)	0.828	4.1
不外出常数项 0-1 变量(仅对“不外出”)	3.19	4.0
年龄为 34 岁以下 0-1 变量(“不外出”)	-1.03	-6.5
年龄为 34 岁至 49 岁之间 0-1 变量(“不外出”)	-0.944	-5.1
家庭主妇 0-1 变量(“不外出”)	-1.32	-9.6
ρ^2	0.354	
命中率(%)	78.6	
样本数	1974	

7.5 有关预测的几个问题

在前几节里,我们介绍了非集计行为模型,最终目的是为了使用该模型系统进行交通需求预测,下面我们就进行预测时的几个主要问题加以讨论。

7.5.1 集计问题和集计方法

用非集计行为模型进行预测的过程可以用图 7.7 表示。其中很重要的一步是以交通小区为单位进行分区集计。所谓“集计问题(aggregate problem)”就是对用非集计行为模型得到的预测结果进行求和预测。

如果 N 是集计对象人数, i 是选择肢,那么对该集计对象选择 i 的平均概率可有

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{in} \quad (7.5.1)$$

$$\text{或者 } P_i = \int_{-\infty}^{\infty} P_i(X) g(X) dX \quad (7.5.2)$$

其中 P_{in} 、 $P_i(X)$ 是个人的选择概率, $g(X)$ 是与说明变量向量 X 的分布相对应的概率密度函数。

但是,将来某一时点的个人说明变量值及其分布通常很难知道,因此在实际计算中,通常采用某一集计单位的 X 的平均值及其方差来进行估计。当然,这样的近似方法不可避免地产生所谓“集计误差”。

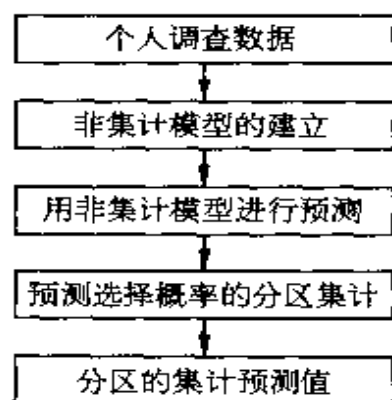


图 7.7 非集计模型的应用流程

集计的方法有多种,下面分别加以介绍。

1. 计点法(enumeration method)

这种方法是假设将来时点的个人说明变量是可以知道的。其计算式为 7.5.1 式或 7.5.2 式。但一般难以应用。

2. 力矩法(moment method 或 statistical differential method)

这种方法是将选择概率 $P_i(X)$ 在集计单位的说明变量的平均值 $\bar{X}$ 处进行台劳展开,从而以其近似多项式进行计算。即,由式 7.5.2 得到

$$P_i = p_i(\bar{X}) + \frac{1}{2} \sum_k \sum_l \left. \frac{\partial^2 p_i(X)}{\partial x_k \partial x_l} \right|_{x=\bar{X}} \text{Cov}(x_k, x_l) + \dots \quad (7.5.3)$$

此处的 $\text{Cov}(\cdot, \cdot)$ 是说明变量的方差矩阵。

这种方法的优点是仅需要知道集计单位的说明变量的平均值及其方差、偏方差即可,故计算简单;问题是当方差等较大时,误差会偏大。

3. 积分法(integration summation method 或 density function method)

这种方法是通过假定 7.5.2 式中的 $g(X)$ 服从某种容易进行计算的理论分布而求得集计量。因其适用范围通常仅限于两项(即选择肢数=2)logit 模型或两项 probit 模型,此处不进行深入讨论。

4. 平均值法(Naive Method)

这种方法就是将说明变量的平均值直接代入非集计模型求得集计选择概率,这是最简便的方法。但是,由于在非集计模型中,选择概率与效用的确定项的关系是非线性的,一般来说会产生误差。只有当集计单位的效用确定项的方差为零时,或者当选择肢仅有 2 个且概率分别为 0.5 的对称分布情况下,这种方法才不会产生

误差。

5. 分类法(classification method)

这种方法是将集计单位中的个人进行分组,通过将比较均质的个人分在同一组内,而后对各组采用平均值法,最后再将各组的结果按其人数进行加权平均从而求得集计概率的方法。由于通过分组使个人间的效用值的方差变小,只要各组的构成比例及说明变量能够正确地代入计算,不失为一种非常有效的方法。

6. 启发式方法(heuristic approach)

这种方法是将平均值法的误差根据经验进行修正。例如, Landau 将说明变量的平均值代入非集计模型求得的选择概率与实际的选择概率进行比较,通过修正非集计模型的参数值使二者尽可能达到一致。这种方法在集计单位内的效用方差基本不变,而且在模型标定时点及预测时点之间也没有较大变化时是有效的。但是,一般来说,其有效性是值得怀疑的。

7. 抽样法(sample method 或 sample enumeration method)

这种方法是从预测对象的母集团中抽出一部分样本,根据这些样本的期望值得到母集团的期望值。也就是说,对一部分样本的个人应用非集计模型计算,选择概率的集计结果,再用此结果推算母集团的选择率。

样本的抽出法有从实际母集团中随机抽样的方法和做一个假想的与母集团只有同样分布的合成样本两种方法。

7.5.2 可转移性评价及转移方法

所谓的可转移性(transferability)包含有两个意思,一是时间可转移性,即依照某一时点的数据得到的模型及其参数可以直接用于另一时点;二是地域可转移性,即依据某一地区的数据得到的模型可以直接用于另一地区。其中时间可转移性是基础,因为如果没有时间可转移性就不能用于预测,当然也就谈不上用到别的地

区了。

非集计模型比集计模型有更高的可转移性,但并不能保证其自身的绝对的可转移性。促成模型具有可转移性的条件是

- ① 两种状况下的个人的价值观及制约条件基本相同;
- ② 模型构造确切地反映了行为准则;
- ③ 对行为产生影响的因素被确切地选择、推算出来;
- ④ 所用数据是真正代表母集团的样本。

评价结果表明时间可转移性较大的意义是:

- 模型可以用于将来某一时点,即预测能力较高;
- 因为大规模调查多年才进行一次,具有时间可转性意味着可以用中间时点的少数样本对模型进行修正;
- 可以比较几个不同时点的模型,从而进行决策机制的时间序列分析。

另一方面,地域可转移性较高的意义是:

- 对没有数据的类似地区也可以进行预测;
- 在对象地区导入新的交通方式进行事先需求预测时可以用已有此交通方式的地区的模型进行预测;
- 对某地区通过调查建立模型时也可以用较少的样本数标定模型;
- 通常,具有地域可转移性的模型有时间可转移性的可能也很大。

1. 可转移性的评价指标

(1) 对同一变量组再标定得到的参数值 β_i 与原参数值 β_j 之间的差进行 t 检验,且令 $V(\beta_{ik})$ 为使用原数据 i 得到的第 k 个变量的参数值的方差,其它类推,那么

$$t_k = \frac{\beta_{ik} - \beta_{jk}}{\sqrt{V(\beta_{ik}) + V(\beta_{jk})}} \quad (7.5.4)$$

(2) 根据似然函数值进行评价的指标。令 A 表示原数据, B 是

要转移时点(地区)的数据, $L_i(\theta_j)$ 是以 j 数据得到的参数用 i 数据计算出的对数似然函数值, $L_{A+B}(\theta_{A+B})$ 是根据 A 与 B 的和集数据得到的模型的对数似然函数值, $L_B(C_B)$ 是只保留常数项变量时模型的对数似然函数值。那么, 我们有

① 两地区间参数群的差别指标(METS):

$$-2[L_{A+B}(\theta_{A+B}) - L_A(\theta_A) - L_B(\theta_B)] \quad (7.5.5)$$

这一指标服从自由度为参数个数的 χ^2 分布。

② 原模型可转移性能力的指标(TTS):

$$-2[L_A(\theta_A) - L_B(\theta_B)] \quad (7.5.6)$$

这一指标也服从自由度为参数个数的 χ^2 分布。与 NETS 不同的是, TTS 具体表明了是从哪儿到哪儿的转移。比如说, 7.5.6 式所示为从 A 到 B 的可转移性 $TTS_B(\theta_A)$ 。因为从 A 到 B 与从 B 到 A 的意思是不同的, 所以 TTS 具有 METS 所不能表示的特殊意思。

③ 对数似然函数的改善指标(TI=transfer index):

$$TI_B(\theta_A) = [L_B(\theta_A) - L_B(C_B)] / [L_B(\theta_B) - L_B(C_B)] \quad (7.5.7)$$

这个值的上限是 1, 其含义是两个模型相等。

④ 似然函数比(transfer rho-square):

$$\rho_B^2(\theta_A) = 1 - \frac{L_B(\theta_A)}{L_B(C_B)} \quad (7.5.8)$$

与多项 logit 模型及 NL 模型中的 ρ^2 相似, 在此不再重复。

(3) 有关应用模型计算集计单位的量的指标。令 $\bar{N}_{mg} = g$ 组人中选择 m 的人数的预测值, $N_{mg} = g$ 组人中选择 m 的人数的观测值, 那么可以定义 $REM_{mg} = (\bar{N}_{mg} - N_{mg}) / \bar{N}_{mg}$, 从而得到加权平均误差(root mean square error)为

$$RMSE = \left(\sum_{m,g} \bar{N}_{mg} REM_{mg}^2 / \sum_{m,g} \bar{N}_{mg} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.5.9)$$

和相对集计误差(relative aggregate transfer error)为

$$\text{RATE} = \text{RMSE}_B(\theta_A) / \text{RMSE}_B(\theta_B) \quad (7.5.10)$$

以及集计预测统计值(aggregate prediction statistic):

$$\text{APS} = \sum_{m,g} \text{REM}_{mg}^2 = \sum_{m,g} (\bar{N}_{mg} - N_{mg})^2 / \bar{N}_{mg} \quad (7.5.11)$$

这个统计值服从 χ^2 分布,其自由度为

(选择肢数 - 1) × (组数)

2. 转移方法

模型的转移方法可以分为三大类:

- ① 不加修正直接使用;
- ② 根据应用地区(时点)的数据对原模型的参数值进行修正;
- ③ 保留原模型的变量组,根据新数据对所有参数值再标定。

上述的①和③的转移方法不用再加解释。下面仅对②进行进一步说明。②中又可分为三种情况:

(a) 仅对常数项变量的参数进行修正。即通过使各选择概率的平均值与应用地区(时点)的观测值达到一致来重新推算常数项变量的参数。

(b) 对常数项参数修正的同时对其它参数乘以一相同的比例系数。即将原模型的效用函数 $V_{in} = \sum_k \beta_k \cdot x_{ikn} + C_i$ (x_{ikn} 是个人 n 选择肢 i 的第 k 个变量, β_k 是参数, C_i 是常数项参数)修正为 $V'_{in} = \alpha \cdot (\sum_k \beta_k \cdot x_{ikn}) + \gamma_i$ 。其中的比例系数 α 和新的常数项参数 γ_i 根据新的数据进行重新标定。

(c) 对所有参数进行修正。这种方法是根据概率统计论中的贝叶斯理论,将原参数作为事先情报与依据新数据的少数样本得到的新参数一起求出参数的事后估计值。令原参数向量为 b_0 , 其协方差矩阵为 Σb_0 , 由少数新样本得到的参数向量为 b_1 , 矩阵为

$\sum b_i$, 并且假定它们都服从正态分布。那么, 修正参数向量 b' 和其偏差矩阵 $\sum b'$, 则应为

$$b' = \left(\sum_{b_0}^{-1} b_0 + \sum_{b_1}^{-1} b_1 \right) \cdot \left(\sum_{b_0}^{-1} + \sum_{b_1}^{-1} \right)^{-1} \quad (7.5.12)$$

$$\sum_{b'} = \left(\sum_{b_0}^{-1} + \sum_{b_1}^{-1} \right)^{-1} \quad (7.5.13)$$

以上介绍了评价可转移性的指标和转移方法。根据到目前为止的研究, 可以知道:

① 对是否具有可转移性, 各研究的结论很不相同, 大约各占一半。

② 欧美的研究多是以统计的检验结果为依据做结论, 而日本的研究则多是以模型的估计误差为根据。我们建议, 结合二者的判断去做结论。

③ 当选择肢数较少时, 转移可能性较大; 而当选择肢数增多时, 转移可能性下降。

④ 与集计模型相比, 非集计模型有较好的可转移性。

⑤ 不言而喻, 当各种特性、地理条件、数据抽样法相似时, 地域可转移性较大。

在本章, 我们介绍了非集计模型的一些基本知识。有意进行较为深入研究的读者, 请参考 Ben-Akiva 等人的著作《Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand》。

7.6 非集计模型的研究进展和课题

7.6.1 非集计模型理论与方法小结

1. 个人效用最大化理论

交通现象的各种宏观表征是大量个人出行行为的综合结果,

非集计模型从分析具体的个人出行行为入手研究交通现象。

出行者的出行行为可以认为由一系列的决策组成,是否出行,何时出行,去何处,采用何种交通工具,选择哪条路等等。目前,为大部分研究者所接受的决策理论是由 Manski 于 1977 年首先提出的随机效用理论(random utility theory),即在出行个人和选择肢群既定的情况下,以效用来描述各选择肢的吸引程度。效用被假定是服从一定分布的随机变量,它与选择肢的特性和选择者个人的社会经济属性有关。每个出行者个人都会选择效用最高的选择肢。即在 A_n 个可选方案中第 i 个选择肢被选中的概率可表示为:

$$P(i/A_n) = P_r(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in A_n) \quad (7.6.1)$$

其中, A_n : 可供选择的选择肢群;

U_{in} : 个人 n 选择第 i 个选择肢的效用;

U_{jn} : 个人 n 选择第 j 个选择肢的效用。

即出行者个人将在 A_n 个选择肢中,选择效用最大的选择肢。

2. 基本的模型形式

假定效用由确定项和随机项两部分构成,即

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in} \quad (7.6.2)$$

其中, V_{in} : 建模者可以精确测量和描述的部分,为确定项,行驶时间、等车时间、汽车拥有量等将以适当的形式进入效用函数;

ϵ_{in} : 建模者无法预知的部分,为随机项。

$$\begin{aligned} P(i/A_n) &= P_r(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in A_n) \\ &= P_r(V_{in} + \epsilon_{in} \geq V_{jn} + \epsilon_{jn}, \forall j \in A_n) \\ &= P_r(\epsilon_{jn} \leq \epsilon_{in} + (V_{in} - V_{jn}), \forall j \in A_n) \end{aligned} \quad (7.6.3)$$

假设 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$ 满足某种联合分布函数

$$f(\epsilon) = f(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n) \quad \text{则} \quad (7.6.4)$$

$$P_{in} = \int_{R_n} f(\epsilon) d\epsilon \quad (7.6.5)$$

$$\text{其中 } R_n = \begin{cases} \varepsilon_{jq} \leq \varepsilon_{iq} + (V_{iq} - V_{jq}), \forall A_j \in A(q) \\ V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq 0 \end{cases}$$

这便是随机效用理论所确定的在选择肢群中某一选择肢被选中的概率,可以看出随机效用理论并不指明哪一肢会被选中,而只是说明每一肢被选中的可能性有多大。根据 $f(\varepsilon)$ 的形式不同,便可得出不同的模型系统。

3. MNL 模型(The Multinomial Logit Model)

如果假设每一个随机项 ε_i 服从彼此独立且分布相同(Independent and Identically Distributed),则

$$f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) = \prod_n g(\varepsilon_n) \quad (7.6.6)$$

$g(\varepsilon_n)$ 是与第 n 个选择肢相对应的分布函数。

$$\begin{aligned} P_i &= \int_{R_n} f(\varepsilon) d\varepsilon \\ &= \int_{R_n} \prod_n g(\varepsilon_n) d\varepsilon_n \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} g(\varepsilon_i) d\varepsilon_i \times \prod_{j \neq i} \int_{-\infty}^{V_i - V_j + \varepsilon_j} g(\varepsilon_j) d\varepsilon_j \end{aligned} \quad (7.6.7)$$

如果我们假设 $g(\varepsilon)$ 服从二重指数分布,则在 A_n 中第 i 个选择肢被选中的概率为:

$$P_{in} = \frac{\exp(\beta V_{in})}{\sum_{A_j \in A_n} \exp(\beta V_{jn})} \quad (7.6.8)$$

其中 $\beta^2 = \pi^2 / 6\sigma^2$; σ^2 是 $g(\varepsilon)$ 的标准方差。

这就是 MNL 模型最基本的表达式。

4. HL 模型(The Hierarchical Logit Model)

可以看出,在 MNL 模型中,存在一个局限性,即当各选择肢中的随机项间存在一定的关联时,IID 假设便不再成立。MNL 模型会产生一定的偏差。著名的红蓝巴士问题便是最好的佐证。HL 模型通过对选择肢群划分群组,很好地克服了 MNL 模型的弱点。

在建模过程中,首先根据相关性将各选择肢分级归类。例如,相对小汽车来说,公交车和地铁都属于公共交通,有一定的关联,可归为一类,再与小汽车形成相互对等的选择关系。

在同一级(Nest)中,只考虑在这一级内对各选择肢都不同的因素,应用 MNL 模型确定这一级中各选择肢被选中的概率,然后将这一选择肢群(Nest)升级。当一个选择肢(群)升级时,它的效用函数要表达成:

$$V = \phi EMU + \alpha Z$$

其中 $EMU = \log \sum_j \exp(\omega_j)$, 代表上一级中各选项的效用之和,这其中没有考虑对这些选项都相同的因素,也正因为如此,才使得 MNL 模型得以应用。 Z 代表对上一级各选择肢共同的因素,但在这一级选择肢群来说不同的因素。 α, Z 是待标定的系数。

逐级应用 MNL 模型,即可得到每一个选择肢被选中的概率。HL 模型实质上是 MNL 模型的扩展。

5. MNP 模型(The Multinomial Probit Model)

在 HL 模型中,每一种分类结构都只能反映一种相关性,无法解决不同级(Nest)内的选择肢的交叉相关关系,MNP 模型弥补了这一缺陷,进一步拓宽了应用范围。MNP 模型取消 IID 假设,认为 $f(\epsilon_n)$ 服从多变量联合正态分布,存在 n 阶的协方差矩阵,所以

$$P_{in} = \int_{R_n} f(\epsilon) d\epsilon$$

实际上,MNP 模型概括了最一般的情况,适用于任何情况,但这也是以很大的代价换来的。

7.6.2 非集计模型的构造、标定和集计分析

1. 非集计模型的构造(estimation)

模型的构造包括选择适合的模型结构(MNL,HL,MNP 等),选择需要考虑的自变量、效用函数的形式以及确定选择肢群。总的

说来,构造模型要考虑到可操作性、理论的可靠性以及政策的敏感性等,即我们总试图找到一种模型,它能很好反映实际情况,不需要大量的数据和计算机资源,不会产生病态结果,而且具有良好的时间和空间转移性。为此,需要在构造模型的每一个环节进行努力。

除非向每一个出行者亲自征询,不然正确地确定每个人具体的可能的选择肢群是很难的,目前采取的办法有:

- 只考虑数据样本中事实上被选中的方案的子集合。
- 先假定每个人的可选择集均为全集,再采取强制的方法,在模型构造过程中规定不现实或不可能的选择肢被选中的概率为 0。

这两种方法各有利弊,可根据具体的情况选择采用。

2. 非集计模型的标定和集计

模型的标定要与模型的结构相匹配,目前极大似然方法(maximum likelihood method)应用得很广。

设效用函数的表达式为

$$V_m = \sum_k \theta_k f(x_{km})$$

引入变量

$$g_{jn} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } A_j \text{ 被个人 } n \text{ 所选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

构造极大似然函数

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{n=1}^N \prod_{A_j \in A_n} (P_{jn})^{g_{jn}} \quad (7.6.9)$$

其中, N : 样本数据观测个人的总数;

A_j : 第 j 个选择肢;

A_n : 第 n 个个人的可能的选择肢群;

P_{jn} : 出行个人 n 在 A_n 中选中 A_j 的概率。

$$\log L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \sum_{n=1}^N \sum_{A_j \in A_n} g_{jn} \log P_m \quad (7.6.10)$$

对 7.6.10 式两边求偏导, 可得出 $L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ 取得最大值时的 $\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_k^*$, 同时借助于 t 检验、 χ^2 检验、似然率检验等方法来分析模型的标定精度和合理性。

非集计分析方法只是一种手段, 最终目的是要获得宏观和整体的数据。因此, 模型的集计过程是至关重要的。目前采用的集计方法有原始集成法(Naive Aggregation)、样本列举法(Sample Enumeration)和人工样本法(Artificial Sample), 分别适用于不同的模型结构和样本结构, 可根据实际情况分别采用。

原始集成法最为简单, 但只适用于线性模型, 把变量的平均值代入模型即可取得满意的结果。

样本列举法认为用来估计模型的样本代表了整个母体, 即

$$P_m = \frac{1}{N} \sum_n f_i(x_n) \quad (7.6.11)$$

因此要想获得集计量, 需要整个研究区域内的每个出行个人的数据, 所以存在一定的局限性。样本列举法比较适合于中等规模的选择集, 尤其适合于短期预测的方式选择模型, 但对长期预测是无能为力的, 因为 x_n 的未来值是难以确定的。

人工样本法认为已知家庭的成员的个人属性在整个研究地区具有代表性, 并同一些地域的地域属性相匹配, 而这些地域特征也被认为是整个地区的典型情况, 因此可以通过构造人工样本来解决集计问题。Daly & Gunn 的论文详细地介绍了构造人工样本的方法和技术。

7.6.3 Logit 模型的一般化

Logit 模型是最简单、也是应用最广的概率选择模型。然而, IID 假设限制了 MNL 模型的应用范围。Probit 模型(MNP)不存

在这个问题,但积分工作的繁琐使得选择肢的个数不能太多。J. Gerken研究了一般化的 Logit 模型,使得 Logit 模型适应性得以扩展,同时不会带来 Probit 模型数学上的困难。

$$U_{in} = V_{in} + \epsilon_{in}$$

假设

$$V_{in} = c + \alpha Z_{in} + \beta \omega_n$$

Z_{in} 代表选择肢特性变量, ω_n 反映第 n 个人的社会、经济属性变量。

设 $V_{in} = bT_{in} + C_{in}$, 其中 $C_{in} = c + \beta\omega_n + (\alpha Z_{in} - bT_{in})$, 令 $t_{in} = T_{in} + \frac{C_{in}}{b}$, 于是 $V_{in} = bt_{in}$, 则 t_{in} 可以看作是第 t 个选择肢对第 n 个人的广义旅行时间。这时效用函数得到大大简化。问题的焦点便集中在 b 与 t_{in} 的确定上。

仍然像 Logit 模型一样, 假设随机项 ϵ_{in} 服从 IID 假设, 分布函数为

$$F(x) = \exp(-\exp(-x))$$

于是, 第 i 个选择肢被选中的概率为

$$P_i = \frac{\exp(bt_i)}{\sum_k \exp(bt_k)}$$

这是 MNL 模型的标准形式。

设有 n 个选择肢, 当 $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ 时, Logit 模型的 Jacobian 矩阵为

$$J = \frac{b}{n^2} \begin{bmatrix} n-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & n-1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & -1 & n-1 \end{bmatrix}$$

可以看出, 矩阵的非对角线元素相同, 意味着任一个 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的变化, 对其余各选择肢的影响是相同的, 这也是红蓝巴士问题的根源。如果通过选择不同的系数 $b_i (i=1, 2, \dots, n)$, 使矩阵上三角(下三角)元素彼此间各不相同, 便可以使 Logit 模型的

适合范围得以扩展,称之为 Logit 模型的一般化。一般化的 Logit 模型具体的构造标定和操作过程由 J. Gerken 1991 年的论文给出了更为详细的介绍。

7.6.4 Probit 模型的发展现状

Probit 模型来源于效用函数随机项的联合正态分布假设,比 Logit 模型或 Nested Logit 模型理论上更趋严密,但也带来了操作上的诸多困难,以至于有些研究学者开始怀疑 MNP 模型真正的实用价值。

首先的障碍在于计算工作,MNP 模型中选择概率是多变量联合正态分布概率密度函数的积分形式,因此选择肢在 4 个以上的选择问题便非常棘手,许多学者致力于寻找好的算法和克服这一困难。Mcfadden 创立了一种新的 Monte Carlo 技术 MSM (method of simulated moments),收到了很好的效果,目前已有了成熟的软件。

虽然好的算法解决了数学上的困难,但这些算法大多数非常复杂,衡量模型对某些变量的敏感程度时无法利用人工或计算器的简单计算迅速得出结果。复杂的算法还阻碍了人的许多直觉思维,但目前,工程师的许多经验性的直觉在交通规划中仍然起着非常重要的作用。

另一个问题便是模型的构造与检验。MNP 模型的复杂性导致了构造与检验过程也难于处理。在对模型进行似然率检验或 t 检验时很可能由于样本数据中的微小误差而拒绝掉很好的模型构造。或者,在构造模型或选取变量时发生了本质性的错误,但在检验过程中却丝毫不会察觉。

MNP 模型也极不利于进行时间或空间上的转移。在某时、某地一个出行者群体上确定的不同选择肢随机项间的彼此关联关系,在另一个时间点、另一个地方不一定依然成立,重新确定一个

联合分布函数和协方差矩阵也就意味着重新建立一个 MNP 模型了。

当模型中引入一个新的选择肢时, MNP 模型效用函数随机项的复杂性, 使得我们难以精确推测出这一新的选择肢会对原选择肢群带来什么影响。一方面现存的样本数据不可能有新选择肢的信息; 另一方面, 新的选择肢进入协方差矩阵又会带来大量的分析计算。在红蓝巴士问题中, 普通的 Logit 模型得出小汽车、红巴士、蓝巴士的分担率分别是 $1/3$; 在 Nested Logit 模型中, 小汽车的分担率是 $1/2$, 红蓝巴士各为 $1/4$ 。两种模型结果不同是由于在它们各自将红蓝巴士的效用函数随机项的相关关系赋予了不同的值 (Logit 模型中为 0, Nested Logit 模型中为 1), 可见协方差系数对预测的结果具有相当的敏感性, 但 MNP 模型确定这些系数要比普通的 Logit 模型复杂得多。

鉴于以上这些困难, Joel. L. Horowitz 在其 1991 年的论文中指出只有当其它模型结构都被拒绝时, 再尝试使用 MNP 模型, 但 MNP 模型理论上的严密性仍吸引着众多的研究者致力于它的推广应用。

7.6.5 研究发展展望

非集计模型是新兴的研究领域, 各个分支都有新的成果不断涌现。但总的来说, 研究者都集中在模型理论的深入和推广上。

因为非集计模型是从个人出行行为入手来研究问题, 所以研究者在探讨模型结构和寻找数学工具的过程中, 目的均在于如何精确、全面地模拟出入的决策过程, 这并不是一件轻松的事。

Reggiani & Stefani 在 MNL 模型中引入了经济学的 SD (stochastic dominance) 规则来确定选择肢群, 吸引了众多学者的注意力。随机效用理论下的 MNL 模型要求有确定的选择肢群做基础, 但出行个人在不同的出行状态下, 真正有效的可供选择的选

择肢群是不同的。以一个固定的选择肢群去适应不同的状态,显然不尽合理。SD 规则基于期望效用值(expected utility)最大化理论,要求各选择肢的概率分布形式已知,每个出行个人都可以根据 SD 规则取得理性的效用阈值对选择肢群进行筛选,以获得最有效的子集。

Joffre Swait & Moshe Ben-Akiva 提出了引入随机约束来构造选择肢群的方法。人的决策行为有一定的随意性和随机性。因为收入或舒适度、时间等因素对不同的出行者具有不同的影响力,信息的完备程度、习惯、心理偏好以及社会和文化背景等更是因人而异,而从前采用的一些选择肢群的构造方法,如上文所示,大多采用强制手段进行取舍,也就意味着使用了确定性的约束条件。这不能如实反映实际情况。引入随机约束也就是让约束条件变得因人而异,更恰当地模拟出不同出行者的出行行为,使模型精确度提高。Joffre Swait & Moshe Ben-Akiva 曾经详细地介绍了随机约束的背景、理论基础和实际操作情况。

研究者在模型构造的理论方面作着各种各样的努力,总的出发点都是尽可能使模型贴近于真实的出行行为。这其中随机理论、决策理论被广泛深入地研究,与经济学、社会学、心理学也有很大的交叉。

理论探讨方面具备一定影响力的成果有:Morchio et. al 提出的 Lexicographic 模型、Morisugi et. al 提出的引入潜在概率的 Logit 模型、Miyamoto & Miyachi 提出的 DCS(distributed choice set)模型、Kawakami et. al 提出的转移需求模型等。

在推广应用非集计模型的过程中,问题主要集中在模型的集计过程上,交通行为从微观到宏观需要一定的技术和手段辅助进行。

Miyamoto 利用联合概率最大化方法(joint probability maximization),Hayashi & Tomita 利用微观模拟技术(microsimula-

tion)分别得出了精度很高的集计方法。

在 1980 年召开的非集计交通需求模型世界会议上,研究者一致认为目的地选择模型的标定是集计分析中重要的一个环节,它决定着非集计模型是否能真正被使用。Morichi et. al 得到了从非集计模型中推出 OD 矩阵的技术,在这种方法中,为避免集计误差,与目的地有关的常数均在集计水平上得出。Morichi et. al 改进了这种方法。

非集计模型是发展中的研究领域,有许多尚待开发的部分,“如何利用意向调查数据构造模型”、“MNP 模型和 MNL 模型的检验、标定”、“MNP 模型选择肢群的随机约束问题”、“效用函数的最优形式”以及“选择肢群的分级、集计”等仍是备受关注的焦点,有待于更进一步的探索和研究。

8 交通量分配



8.1 交通分配问题的基本概念

8.1.1 交通分配与平衡

在前面各章中已介绍了四阶段法的概念,并分别介绍了其中前三阶段的分析方法。这一章我们将介绍四阶段法的最后一个阶段,即交通量分配。

交通量分配即是将已经预测出的 OD 交通量按照一定的规则符合实际地分配到道路网中的各条道路上,并求出各条道路的交通流量。OD 交通量是两点之间的交通量,即从出发地到目的地之间的交通量。一般的道路网中,两点之间(即 O 与 D 之间)有很多条道路,如何将 OD 交通量正确合理地分配到 O 与 D 之间的各条道路上即是交通分配模型要解决的问题。

如果两点之间有很多条道路而这两点之间的交通量又很少的话,这些交通量显然会沿着最短的道路行走。随着交通量的增加,最短路径上的交通流量也会随之增加。增加到一定程度之后,这条最短路径的走行时间会因为拥挤或堵塞而变长,这一部分道路利用者会选择次短的道路。随着两点之间的交通量继续增加。两点之间的所有道路都有可能被利用。

如果所有的道路利用者(即驾驶员)都准确知道各条道路所需的行走时间并选择走行时间最短的道路,最终两点之间被利用的

各条道路的走行时间会相等。没有被利用的道路的走行时间更长。这种状态被称之为道路网的平衡状态,对于平衡状态的准确定义将在后面介绍。

实际道路网中一般有很多组 OD,每组 OD 之间的各条路径都是由很多独立的路段组成,由这些独立的路段又可以排列组合成无数条不同的路径。因此实际道路网的每组 OD 之间都有很多的路径。另外,各组 OD 之间的路径也互相重叠。由于这些原因,实际道路网的平衡远远比上述的现象要复杂。由于这种复杂性,从 1952 年 Wardrop 提出道路网平衡的概念和定义之后,如何求解 Wardrop 平衡成了研究者的重要课题,1956 年,Beckmann 等提出了求平衡交通分配解的一种数学规划模型。经过 20 年之后即 1975 年才由 LeBlanc 等学者将 Frank-Wolfe 算法用于求解 Beckmann 模型获得成功,从而形成了现在的实用解法。这三点突破是交通分配问题研究的重大进步,也是交通分配问题的基础。

Wardrop 对交通网平衡定义为:

在道路网的利用者都知道网络的状态并试图选择最短路径时,网络会达到平衡状态。在考虑拥挤对行走时间影响的网络中,当网络达到平衡状态时,每组 OD 的各条被利用的路径具有相等而且最小的走行时间;没有被利用的路径的走行时间大于或等于最小走行时间。

这条定义通常称为 Wardrop 的第一原理或 Wardrop 平衡 (Wardrop equilibrium)。

下面我们用一个简单的例子来说明交通量分配与平衡的概念。

例 1. 设两点 O 与 D 之间有两条道路 a 与 b ,道路 a 短但容量小,道路 b 长但容量大。因此,我们可假设各自的走行时间与通过的交通流量的关系式为

$$t_a = 15 + 0.01q_a$$

$$t_b = 20 + 0.005q_b$$

从 O 到 D 的 OD 交通量为 2000 时,求道路 a, b 上的交通流量。

解:当 OD 交通量小于 500 时,所有的 OD 交通量都沿道路 a 走行,当 OD 交通量大于 500 时,两条道路上都有一定的交通量通过。平衡时两条道路的走行时间应该相等,因此

$$\begin{cases} 15 + 0.01q_a = 20 + 0.005q_b \\ q_a + q_b = 2000 \end{cases}$$

求得 $q_a = 1000$ $q_b = 1000$ $t_a = t_b = 25$

即平衡时两条道路各通过 1000 的交通流量。

8.1.2 走行时间——交通流量函数

交通分配与平衡都是以考虑拥挤对走行时间的影响为基础和前提的,而考虑的方法则是借助走行时间——交通流量函数。即路段的走行时间与路段上通过的交通流量之间的关系函数。

一般来说,道路的所需走行时间并不是常数,而是随着该路段上交通流量的增加而增加,而且往往还受相邻的其它道路上的交通流量的影响。但在普通的交通分配模型中,为了使问题简化,只考虑自身的交通流量对其所需时间的影响而忽略其它道路的影响。因此,普通的道路走行时间——交通流量函数可表达为:

$$t_a = f(q_a) \quad (8.1.1)$$

其中, t_a : 路段 a 的所需时间;

q_a : 路段 a 上通过的交通流量。

对于道路走行时间函数的研究,既有通过实测数据进行回归分析的,也有进行理论研究的。其中被广泛应用的是由美国道路局 (Bureau of Public Road, BPR) 开发的函数,被称为 BPR 函数,其形式为:

$$t_a(q_a) = t_a(0) \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{q_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (8.1.2)$$

其中, C_a : 道路 a 的交通容量, 即单位时间里道路 a 可通过的最大车辆数;

α, β : 参数;

$t_a(0)$: 道路 a 的自由走行时间。

对于走行时间函数, 当 q_a 小于 C_a 时, 由许多实测数据可供回归分析用, 而且式 8.1.2 的 $q_a < C_a$ 的函数部分也正是通过实测数据回归分析得到的, 当 q_a 大于 C_a 时, 实测数据极少, 不可能对函数的这部分进行回归分析。因此走行时间函数 $q_a > C_a$ 的部分在很大程度上是根据交通分配的需要设定的。一方面, 走行时间函数应使分配交通流量大于其容量的路段尽可能少, 另一方面应该使各路段上的分配交通量符合实际。

最早的 BPR 函数中, $\alpha = 0.15, \beta = 4$, 这时的 C_a 是指实用交通容量, 即实际道路单位时间中可通过的车辆数。后来经过改进的 BPR 函数为 $\alpha = 2.62, \beta = 5$ 。这种情况下的 C_a 是指稳定交通容量 (steady state capacity)。道路的实用交通容量小于稳定交通容量。

在理论研究和实际道路网的交通分配中, 普遍采用 BPR 函数作为走行时间函数 (如图 8.1)。

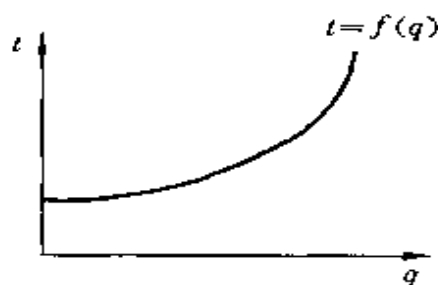


图 8.1 BPR 函数

8.1.3 交通网络的抽象与简化

交通分配中所使用的网络是图论中抽象的网络图, 由节点和连线组成。节点一般代表道路网中道路的交叉点以及交通小区的重心, 连线则代表在两点之间存在一条道路。但这种连线既不代表道路的形状也不代表道路的长度。

实际道路网中无论是路段的数目还是交叉点的数目都是成千上万, 如果将这种实际道路一一对应地转化成计算网络, 一方面收

集整理相应的数据十分困难；另一方面，计算时间将成倍地增加。因此，在实际分析中，一般根据精度的不同要求而对实际道路网进行适当简化。简化时主要考虑以下几点：

- ① 窄而容量小的道路可不予考虑；
- ② 小的道路交叉点不作节点考虑，而在与之相关的道路的走行时间函数中恰当地考虑其影响；
- ③ 根据需要可将几条平行道路合并成一条道路，并修改这条道路的容量；
- ④ 分级构成网络。比如可以先以市内主要干线道路构成全市交通网络，进行全市的交通分配，在以一个区或几个区所有道路构成细部子网络进行局部的交通分配。

总之，交通网的抽象与简化是由分析费用与分析精度的平衡决定的。

8.2 交通量分配方法

进行交通量分配的前提条件是已知 OD 交通量、网络图和网络图中各路段的走行时间函数。这些内容已在前面各章节中分别介绍了。下面将要介绍交通量分配的方法。

常用的交通量分配法有 0-1 分配法、增量分配法、二次加权平均法和平衡分配法。其中最简单的 0-1 分配法甚至手算即可进行，而以严格的数学规划模型为基础的平衡分配法借助计算机几乎可以求出任意精度的平衡解。本节将介绍前三种方法，下一节介绍平衡分配法。

8.2.1 0-1 分配法

这种交通量分配法在有些教科书中也叫全有全无分配法以及或有或无分配法。由于这种分配法与数学中的 0-1 变量的概念十

分相似,在这里我们称之为 0-1 分配法(all-or-nothing assignment method)。

0-1 分配法是一种最简单最基本的交通量分配法。它有两个特点,第一个特点是不考虑拥挤对走行时间的影响,即认为所有路段的走行时间都是不随路段上交通流量的大小而变化的常数;第二个特点是认为同一组 OD 的所有驾驶员都选择完全相同的路线。因此,这种分配法的主要计算是寻找最短路径。最短路径的计算方法将在本章第 3 节中介绍。这种方法的计算步骤可归纳如下:

- ① 计算网络中每个出发地 O 到每个目的地 D 的最短路径;
- ② 将 O、D 间的 OD 交通量全部分配到相应的最短路径上。

0-1 分配法十分简单但却很近似。在道路稀少的偏远地区的交通量分配中可以采用这种方法,一般城市道路网的交通量分配中不宜采用这种分配法。

8.2.2 增量分配法

增量分配法(incremental assignment method)是一种近似的平衡分配法。

这种方法的基本思想是将 OD 交通量平分成若干等分,循环地分配每一等分的 OD 交通量到网络中。每一次循环分配一等分的 OD 交通量到相应的最短路径上,每循环分配一次重新计算并更新各路段的走行时间,然后按更新后的走行时间重新计算网络各 OD 间的最短路径。下一循环中按更新后的最短路径分配下一等分的 OD 交通量。其计算步骤如下:

Step 0: 初始化。将每组 OD 交通量平分成 N 等分,即使 $q_n^* = q_n/N$ 。同时,令 $n = 1, x_a^0 = 0, \forall a$ 。

Step 1: 更新, $t_a^* = t_a(x_a^{n-1}), \forall a$ 。

Step 2: 增量分配。按 Step 1 计算所得 t_a^* , 用 0-1 分配法将 $1/N$ 的 OD 交通量 q_n^* 分配到网络中去。这样得到一组附加交通流

量 $\{W_r^n\}$ 。

Step 3: 交通流量累加。即令 $x_a^n = x_a^{n-1} + w_a^n, \forall a$ 。

Step 4: 判定。如果 $n = N$, 停止计算。当前的路段交通流量即是最终解; 如果 $n < N$, 令 $n = n + 1$, 返回 Step 1。

增量分配法的复杂程度和解的精确性都介于 0-1 分配法和平衡分配法之间。 $N = 1$ 时便与 0-1 分配法的结果一致; $N \rightarrow \infty$ 时, 其解与平衡分配法的解一致。

由于该方法具有简单可行, 精确度可以根据 N 的大小来调整等特点, 在实际的道路网交通量分配中经常被采用, 而且也有比较成熟的商用软件可供使用。其缺点是该分配法仍然是一种近似方法, 有时会将过多的交通流量分配到某些容量很小的路段上。一般情况下, 该法得不到平衡解。

8.2.3 二次加权平均法

二次加权平均法(method of successive averages)是一种介于增量分配法和平衡分配法之间的一种循环分配方法。其基本思路是不断调整已分配到各路段上的交通流量而逐渐到达或接近平衡分配。在每步循环中, 根据已分配到各路段上的交通流量进行一次 0-1 分配, 得到一组各路段的附加交通量。然后用该循环中各路段的分配交通流量和该循环中得到的附加交通量进行加权平均, 得到下一循环中的分配交通流量。当相邻两个循环中的分配交通流量十分接近时, 即可停止计算。最后一循环中得到的分配交通量即是最终的交通量。其计算步骤如下:

Step 0: 初始化。按照各路段的自由走行时间进行一次 0-1 分配, 得到各路段的分配交通流量 x_a^0 。令 $n = 0$ 。

Step 1: 令 $n = n + 1$, 按照当前各路段的交通量 x_a^{n-1} 计算各路段的走行时间。

Step 2: 按照 Step 1 计算的路段走行时间和 OD 交通量进行

一次 0-1 分配,得到各路段的附加交通流量 F_a 。

Step 3: 用加权平均的方法计算各路段的当前交通量 x_a^n :

$$x_a^n = (1 - \phi)x_a^{n-1} + \phi F_a \quad 0 \leq \phi \leq 1$$

Step 4: 如果 x_a^n 与 x_a^{n-1} 的差值不太大,停止计算。 x_a^n 即为分配交通流量。否则返回 Step 1。

在 Step 4 中,判别 x_a^n 与 x_a^{n-1} 差值大小时可控制它们的相对误差在百分之几以内。但用得更多的准则是循环多少次以后令其停止(尽管这种准则并不严格)。

在 Step3 中,权重系数 ϕ 需由计算者自己定。 ϕ 既可定为常数,也可定为变数。定为常数时,最普遍的情况是令 $\phi = 0.5$ 。定为变数时,最普遍的情况是令 $\phi = 1/n$ (n 为循环次数)。有研究表明 $\phi = 1/n$ 时,会使分配尽快接近平衡解。

二次加权平均法是一种简单实用却又最接近于平衡分配法的一种分配方法。如果每步循环中权重系数 ϕ 严格按照数学规划模型取值时,即可得到平衡分配的解。

8.3 平衡分配法

8.3.1 平衡分配模型的建立

在第 1 节中,我们曾介绍过交通网的 Wardrop 平衡原理。即在网络达到平衡时,所有被利用的路线具有相等而且最短的行走时间,未被利用的路线与其具有相等或更长的行走时间。平衡分配模型即是求满足这种平衡准则的路段交通流量。

Wardrop 提出他的平衡准则之后,曾经在很长一段时期内没有一种严格的方法可求出满足这种平衡准则的交通量分配法。后来由 Beckmann 提出了一种满足 Wardrop 准则的数学规划模型。而正是这组数学规划模型奠定了研究交通分配问题的基础。后来的许多分配模型,诸如变需求交通分配模型、分布-分配组合模型

等都是 Beckmann 模型的基础上扩充得到的。下面我们介绍 Beckmann 的交通量分配模型。

首先,我们介绍模型中使用的变量。

X_a : 路段 a 上的交通流量;

t_a : 路段 a 的走行时间;

$t_a(\cdot)$: 路段 a 的走行时间函数,因而 $t_a = t_a(X_a)$;

f_k^r : 出发地为 r ,目的地为 s 的 OD 间的第 k 条路径上的交通流量;

C_k^r : 出发地为 r ,目的地为 s 的 OD 间的第 k 条路径的总走行时间;

$\delta_{a,k}^r$: 0-1 变量,如果路段 a 在出发地为 r 目的地为 s 的 OD 间的第 k 条路径上,则 $\delta_{a,k}^r = 1$,否则 $\delta_{a,k}^r = 0$;

N : 网络中节点的集合;

L : 网络中路段的集合;

R : 网络中出发地的集合;

S : 网络中目的地的集合;

ϕ_{rs} : r 与 s 之间的所有路径的集合;

q_{rs} : r 与 s 间的 OD 交通量。

其次,我们分析模型应满足的基本约束条件。

对于分配问题本身应满足的条件只有交通流守恒条件。即各 OD 间的交通量应该全部分配到网络中去,或者说 OD 间各条路径上的交通总量应等于 OD 交通量。用公式则表示为:

$$\sum_{k \in \phi_{rs}} f_k^r = q_{rs} \forall r, s \quad (8.3.1)$$

同时 $f_k^r \geq 0, \forall k, r, s$ 。

其它的约束条件则是变量之间的关系式。路径交通量 f_k^r 与路段交通量 X_a 之间的关系式为:

$$X_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \in I. \quad (8.3.2)$$

其次,路径的总走行时间与路段走行时间的关系式为:

$$C_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall k \in \psi_{rs}, \forall r \in R, \forall s \in D \quad (8.3.3)$$

式 8.3.1 的意义易于理解。下面,我们用一个简单的例子说明式 8.3.2 和式 8.3.3。

图中有两组 OD 即 1-4 和 2-4, 从节点 1 到节点 4 共有两条路径, 第一条路径为路段 1 和路段 3。第二条路径为路段 1 和路段 4, 从节点 2 到节点 4 的两条路径为: 第一条路径由路段 2 和路段 3 组成。第

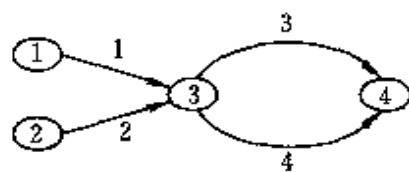


图 8.2 网络图例

二条路径由路段 2 和路段 4 组成。首先,我们计算 C_1^{14} , 由式 8.3.3 得:

$$C_1^{14} = t_1 \delta_{1,1}^{14} + t_2 \delta_{2,1}^{14} + t_3 \delta_{3,1}^{14} + t_4 \delta_{4,1}^{14} = t_1 + t_3$$

同样,我们可用式 8.3.2 计算 X_3 :

$$X_3 = f_1^{14} \delta_{3,1}^{14} + f_2^{14} \delta_{3,2}^{14} + f_1^{24} \delta_{3,1}^{24} + f_2^{24} \delta_{3,2}^{24} = f_1^{14} + f_2^{14}$$

两式都得到了正确的结果。

8.3.1 式, 8.3.2 式和 8.3.3 式只是几组基本的限制条件, 并未涉及到平衡的概念, 而且约束方程的个数比未知数的个数少, 只凭这几组约束条件通常求不出路段交通流量。Beckmann 把上述条件作为基本约束条件, 用取目标函数极小值的办法来求平衡分配的解。提出的平衡分配模型如下:

$$\min Z(X) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (8.3.4a)$$

Subject to:

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (8.3.4b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (8.3.4c)$$

$$X_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (8.3.4d)$$

以上模型的目标函数是对各路段的走行时间函数积分求和之后取最小值。很难对它作出直观的或经济上的解释，一般认为它只是一种数学手段，借助于它来求解平衡分配问题。

下面我们证明该模型的解满足平衡分配的解。

上述的模型是在一组等式约束条件下的极小值问题。我们由 8.3.4a 式和 8.3.4b 式构成拉格朗日函数：

$$L = Z(X) + \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \quad (8.3.5)$$

其中， u_{rs} 是二维的拉格朗日乘子。根据库恩-塔克条件，上述拉格朗日函数在极值点上必须满足下述条件：

$$f_k^{rs} \frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (8.3.6a)$$

另外，对拉格朗日乘子 u_{rs} 求偏导数，我们有

$$\frac{\partial L}{\partial u_{rs}} = 0 \quad \forall r, s \quad (8.3.6b)$$

以上各项的具体结果可通过对目标函数求偏导数得到：

$$\frac{\partial L}{\partial f_l^{mn}} = \frac{\partial Z}{\partial f_l^{mn}} + \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \quad (8.3.7)$$

$$\text{其中} \quad \frac{\partial Z}{\partial f_l^{mn}} = \sum_{b \in L} \frac{\partial Z}{\partial X_b} \frac{\partial X_b}{\partial f_l^{mn}} \quad (8.3.8)$$

$$\text{又因为} \quad \frac{\partial Z}{\partial X_b} = \frac{\partial}{\partial X_b} \sum_a \int_0^{X_a} t_a(w) dw = t_b \quad (8.3.9a)$$

$$\text{以及} \quad \frac{\partial X_b}{\partial f_l^{mn}} = \delta_{b,l}^{mn} \quad (8.3.9b)$$

$$\text{所以} \quad \frac{\partial Z}{\partial f_l^{mn}} = \sum_b t_b \delta_{b,l}^{mn} = C_l^{mn} \quad (8.3.10)$$

另外,在式 8.3.7 的第二项中,

$$\frac{\partial f_k^{rs}}{\partial f_l^{mn}} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } m=r, n=s, l=k \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (8.3.11)$$

因此,第二项可化简为

$$\frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) = -u_{mn} \quad (8.3.12)$$

将 8.3.12 式和 8.3.10 式代回得

$$\frac{\partial L}{\partial f_l^{mn}} = C_l^{mn} - u_{mn} \quad (8.3.13)$$

因此,8.3.6a 式的库恩-塔克条件可化简为

$$f_k^{rs} (C_k^{rs} - u_{rs}) = 0 \quad (8.3.14a)$$

$$C_k^{rs} - u_{rs} \geq 0 \quad (8.3.14b)$$

下面我们分析 8.3.14 式的意义。上式对任意 OD 都成立。对于某个特定的连接 r 和 s 的路径,某路径交通流量 f_k^{rs} 有两种可能:

① 如果 $f_k^{rs} > 0$,由 8.3.14a 式得 $C_k^{rs} = u_{rs}$;

② 如果 $f_k^{rs} = 0$,由 8.3.14b 式得 $C_k^{rs} \geq u_{rs}$ 。

因此,不论在什么情况下,路径 k 的总走行时间总是不小于拉格朗日乘子 u_{rs} 。由此我们可以推断,拉格朗日乘子 u_{rs} 即是 r 与 s 间最短路径的总走行时间。再由上面的分析可知,当路径 k 上有从 r 到 s 的交通流量时,路径 k 的走行时间等于最短路径的走行时间;当路径 k 上没有从 r 到 s 的交通流量时,路径 k 的走行时间大于或等于最短路径的走行时间,而这正是 Wardrop 平衡准则所要求的。因此,Beckmann 模型的解满足 Wardrop 的平衡准则。

8.3.2 平衡分配模型的解法

Beckmann 提出的关于交通分配的数学规划模型沉睡了 20 年之后才由 LeBlanc 等学者将 Frank-Wolfe 算法用于求解 Beck-

mann 模型,最终形成了目前的广泛应用的一种既严格又实用的解法,该解法通常称为 F-W 法。

模型 8.3.4 式是一组非线性规划模型。而对非线性规划模型即使现在也没有普遍通用的解法。只是对某些特殊的非线性规划模型才有可靠的解法。而模型 8.3.4 式正是一种特殊的非线性模型。

F-W 法是用线性规划逐步逼近非线性规划的方法(convex combination method)来求解 8.3.4 式的。该方法是一种迭代法。在每步迭代中,先找到一个最速下降方向,然后再找到一个最优步长,在最速下降方向上截取最优步长得到下一步迭代的起点。重复迭代直至找到最优解为止。此法的前提条件是模型的约束条件必须都是线性的。下面我们先对此解法作一简单介绍,然后再将其用于求解分配模型 8.3.4 式。

对于非线性规划模型

$$\begin{cases} \min Z = f(X) \\ AX = B \quad X \geq 0 \end{cases} \quad (8.3.15)$$

X 和 B 是向量, A 是矩阵。

对 $f(X)$ 在 X_0 处的一阶泰勒展开得

$$f(X) = f(X^{(0)}) + \nabla f(X^{(0)})^T (X - X^{(0)}) \quad (8.3.16)$$

将 $f(X)$ 近似表达成 8.3.16 式所示的线性函数,则 8.3.15 式可近似化为下列线性规划模型:

$$\min Z = \min [f(X^{(0)}) + \nabla f(X^{(0)})^T (X - X^{(0)})] \quad (8.3.17a)$$

$$AX = B \quad (8.3.17b)$$

等价于线性规划

$$\min Z = \nabla f(X^{(0)})^T X \quad (8.3.18a)$$

$$AX = B \quad (8.3.18b)$$

由 8.3.18 式可求得一组最优解 $\bar{X}$,该方法认为 $X^{(0)}$ 与 $\bar{X}$ 的连线

为最速下降方向,然后根据下列一维极值问题

$$\min f[\mathbf{X}^{(0)} + \lambda(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}^{(0)})]$$

求得的 λ_0 为最优步长。

$$\text{令 } \mathbf{X}^{(1)} = \mathbf{X}^{(0)} + \lambda_0(\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}^{(0)})$$

而得到下一步迭代的起点。如此循环,直到 $\mathbf{X}^{(n+1)}$ 与 $\mathbf{X}^{(n)}$ 十分接近为止。因此,该方法的基本思路是根据一组线性规划的最优解而确定下一步的迭代方向,然后根据目标函数的一维极值问题求最优迭代步长。由于该方法在每一步迭代中都必须求解一组线性规划问题的解,在一般的线性规划模型中,该方法由于计算量过大而不适用。只是在近似的线性规划模型易于求解时,该方法才有应用价值。而交通分配模型正好具有这一特点。

在许多文献中,模型 8.3.4 式被称为 UE 模型(user equilibrium)。下面我们分析模型的解法。

首先,我们考虑已知迭代起点 $\mathbf{X}^*$ 而求决定下一步迭代方向的线性规划问题。该线性规划的目标函数为:

$$\min Z^n(\mathbf{y}) = \nabla Z(\mathbf{x}^n) \cdot \mathbf{y}^T = \sum_a \frac{\partial Z(\mathbf{x}^n)}{\partial x_a} y_a \quad (8.3.19)$$

由 8.3.9a 式可知 $\frac{\partial Z(\mathbf{x}^n)}{\partial x_a} = t_a^n$, 因此 8.3.19 式可变换为

$$\min Z^n(\mathbf{y}) = \sum_a t_a^n \cdot y_a \quad (8.3.20)$$

因此,在第 n 次迭代中的线性规划问题为:

$$\min Z^n(\mathbf{y}) = \sum_a t_a^n \cdot y_a \quad (8.3.21a)$$

约束条件:

$$\sum_k g_k^{rs} = q_r \quad \forall r, s \quad (8.3.21b)$$

$$g_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (8.3.21c)$$

其中, $y_a = \sum_r \sum_s \sum_k g_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a$

y_a : 第 n 次迭代的附加路段交通量;

g_k^{rs} : 第 n 次迭代的附加路径交通量。

以上各式中, t_a^n 是已知数, 即由迭代起点 X_a^n 决定的路段走行时间。 y_a 是要求解的未知数。因此, 该模型实际上是在各路段的走行时间一定的情况下使网络的总走行时间最小的交通量分配问题。在这种情况下, 将 OD 交通量全部沿 OD 间的最短路径上分配即可使目标函数最小化。而这正是前面介绍的 0-1 分配法。而 0-1 分配的主要步骤和计算量即是寻找最短路径, 寻找最短路径的方法将在本节的下一小节中介绍。因此, 模型 8.3.21 式可以通过一次 0-1 分配而简单地解出。求解出的 y^n 决定了第 n 次迭代的方向, 即下一步迭代的方向为 x^n 与 y^n 的连线。

迭代步长由下面的一维极值问题决定

$$\min Z(\alpha) = \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(\omega) d\omega \quad (8.3.22)$$

令 $\frac{\partial Z}{\partial \alpha} = 0$ 得

$$\sum_a (y_a^n - x_a^n) t_a[x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)] = 0 \quad (8.3.23)$$

方程 8.3.23 中只含一个变量 α , 许多方法都可以求出 α 的值。其中最有效的也许是二分法, 此法在一般的高等数学或运筹学书中都可以查到。至此, 用 0-1 分配法可求得决定下一步迭代方向的值 y^n 。由 8.3.23 式可求得迭代步长 α , 因此, 下一步的迭代点 x^{n+1} 即由下式计算得到。

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n) \quad (8.3.24)$$

对于停止迭代的准则, 可以根据两次相邻迭代中交通流量的变化来判定。如果变化很小, 即认为已达到平衡而停止迭代。例如, 可以由下式决定:

$$\frac{\sqrt{\sum_a (x_a^{n+1} - x_a^n)^2}}{\sum_a x_a^n} \leq K' \quad (8.3.25)$$

其中 K' 为预先给定的误差限值。

当然,也有许多其它准则可供选择。

平衡分配法求解 UE 问题的步骤可归纳如下:

Step 0: 初始化。按照 $t_a^0 = t_a(0) \forall a$, 实行一次 0-1 分配。得到各路段的交通流量 $\{x_a^1\}$, 令 $n=1$;

Step 1: 更新。令 $t_a^n = t_a(x_a^n) \forall a$

Step 2: 寻找下一步的迭代方向。按照 $\{t_a^n\}$ 实行一次 0-1 分配, 并得到一组附加交通流量 $\{y_a^n\}$;

Step 3: 确定步长。求满足下式的 α_n

$$\sum_a (y_a^n - x_a^n) t_a [x_a^n + \alpha_n (y_a^n - x_a^n)] = 0 \quad 0 \leq \alpha_n \leq 1$$

Step 4: 确定新迭代点。

令 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n (y_a^n - x_a^n) \quad \forall a$

Step 5: 收敛性检验。如果 $\{x_a^{n+1}\}$ 已满足规定的收敛准则, 停止计算。 $\{x_a^{n+1}\}$ 即是要要求的平衡解; 否则令 $n=n+1$, 返回 Step1。

从上述步骤可以看出, 平衡分配法与二次加数平均法十分相似, 唯一的差别是在确定移动步长时平衡分配法是以严格的数学模型为基础的, 因此总可求出平衡解。

按照上述步骤, 很容易编制出相应的计算机程序。一般规模的实际城市道路网的交通量分配计算, 普通微机上即可进行。

8.3.3 最短路径的计算方法

下面两个原因决定了最短路径的计算是交通量分配中最基本也是最重要的计算。一方面任何一种交通量分配法都是建立在最短路径的基础上; 另一方面, 在包括平衡分配法在内的任何一个分

配法中,最短路径的计算占据了全部计算时间的主要部分。至少有90%的计算时间花在最短路径的寻找上。因此,好的交通量分配法必须有一种好的最短路径计算方法。

下面我们将介绍一种在一般文献中称为标号校正法(label-correcting method)的最短路径算法。该法可同时计算出网络中所有节点到某一个节点的全部最短路径或最短路径数(minimum-path tree)。

标号校正法的基本特点是从网络中的某一个目的地节点开始。同时寻找网络中所有节点到该目的地节点的最短路径树,算法以一种循环的方式检查网络中所有的节点。在每一步循环中,总试图找到一条从被检查节点到目的地节点的更短路线。直到没有更短的路线可能被发现为止。有研究表明,这种算法在计算时间上最节省。

8.3.4 系统最优化的交通分配

前面介绍的交通量分配模型和解法都是建立在利用者平衡的基础上。即利用者都试图选择最短路径而达到网络平衡,则被利用的各条路线的走行时间相等并最小。因此,可称之为利用者平衡(UE),或用户最优,也称为 Wardrop 第一原理。另外, Wardrop 还提出了另一原理,即系统最优原理。该原理为:

在考虑拥挤对走行时间影响的网络中,网络中的交通量应该按某种方式分配以使网络中交通量的总走行时间最小。

该原理一般称为 Wardrop 第二原理。

第一原理反映了道路网利用者选择路线的一种准则。按照第一原理分配出来的结果应该是道路网上交通利用者实际路径选择的结果。而第二原理则反映了一种目标,即按什么样的方式分配是最好的。在实际网络中不可能出现第二原理所描述的状态,除非所有的驾驶员互相协作为系统最优化而努力。这在实际中是不可能

的。但第二原理为规划管理人员提供了一种决策方法。

系统最优化比较容易用数学规划来表达。其目标函数是对系统的总走行时间取最小值。约束条件则与 UE 模型完全一样。因此,该问题可归纳为下述模型。

$$\min \tilde{Z}(x) = \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (8.3.26a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^r = q_r \quad \forall r, s \quad (8.3.26b)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (8.3.26c)$$

该模型称为系统最优模型 SO(system optimization)。

下面我们分析系统最优模型 SO 与用户最优模型 UE 之间的关系。

令

$$\tilde{t}_a(x_a) = t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a} \quad (8.3.27)$$

则

$$\begin{aligned} \int_0^{x_a} \tilde{t}_a(\omega) d\omega &= \int_0^{x_a} \left[t_a(\omega) + \omega \frac{dt_a(\omega)}{d\omega} \right] d\omega \\ &= \int_0^{x_a} [t_a(\omega) d\omega + \omega dt_a(\omega)] \\ &= \int_0^{x_a} d[t_a(\omega) \omega] \\ &= x_a t_a \end{aligned}$$

因此,如果以 $\tilde{t}_a(x_a)$ 作走行时间函数进行利用者平衡分配,得到的解即是系统最优模型 SO 的解。即模型

$$\min \tilde{Z}(x) = \sum_a \int_0^{x_a} \tilde{t}_a(\omega) d\omega \quad (8.3.28a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^r = q_r \quad \forall r, s \quad (8.3.28b)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (8.3.28c)$$

的解即是系统最优模型的解。而模型 8.3.28 式实质上是利用者平衡分配模型。因此,在求系统最优模型的解时,只需按式 8.3.27 式对走行时间函数进行变换后,完全按利用者平衡分配模型的解法求解即可。

另一方面,如果令

$$\hat{t}_a(x_a) = \frac{1}{x_a} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (8.3.29)$$

则系统最优模型的目标函数

$$\min Z = \sum_a \hat{t}_a \cdot x_a = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

即按 8.3.29 式对走行时间函数进行修改后,系统最优模型即可转化为用户最优模型。因此,对走行时间函数进行不同的修改,UE 模型与 SO 模型可以互相转换。

下面我们通过一个假定的例子来说明 UE 模型和 SO 模型的意义。

图 8.3 中有一组 OD, 四条路段组成二条路径。各路段的走行时间函数为

$$\begin{aligned} t_1(x_1) &= 50 + x_1, & t_2(x_2) &= 50 + x_2, \\ t_3(x_3) &= 10x_3, & t_4(x_4) &= 10x_4. \end{aligned}$$

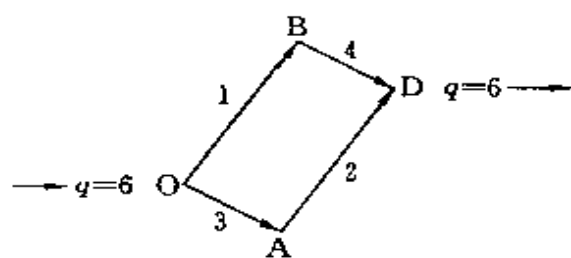


图 8.3 网络图

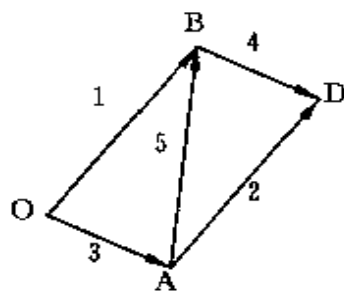


图 8.4 改建后的网络图

显然,平衡时两条路径上的交通流量相等,都是3。因此,各路段上的交通流量均为3,即 $x_1=3, x_2=3, x_3=3, x_4=3$ 。相应地各路段的走行时间为 $t_1=53, t_2=53, t_3=30, t_4=30$ 。路线总走行时间为 $C_1=83, C_2=83$ 。满足 UE 准则。这时系统的总走行时间为 $83 \times 6 = 498$ 。

我们假设为了缓解交通拥挤,决定在 A 与 B 点之间再建一条道路。设这条道路的走行时间函数为 $t_5=10+x_5$ 。这时网络图变成图 8.4。

在这种情况下,原来求出的交通流量不满足平衡要求。必然会有一部分交通流量沿着 AB 走行。这时共有三条路线,即 OAD、OBD 和 OABD,达到平衡时,这三条路线的走行时间相等。这时各路段的交通流量为 $x_1=2, x_2=2, x_3=4, x_4=4, x_5=2$ 。三条路径上的交通流量为 $f_1=f_2=f_3=2$ 。各条路径的走行时间为 $C_1=C_2=C_3=92$ 。系统的总走行时间为 $92 \times 6 = 552$ 。

从计算结果可以看出,增加一条路段不但没有降低走行时间,反而使走行时间增加了,不管是系统的总走行时间还是每个驾驶员个人走行时间都增加了。这当然不是模型的问题,而是事实上的确如此,在实际的道路网中已观察到过这种现象。其原因留给读者自己思考。

8.4 交通分配模型中存在的问题

一代研究者把交通分配问题用数学模型加以描述,并借助于计算机可以求出任意精度下的平衡解。但它并不是完美无缺的,仍然存在着一些问题。这里所说的问题并不是解法的问题,而是模型的前提条件问题。即建立模型所要求的前提条件与实际的道路交通并不一定完全相符合。下面我们列举其中几点。

8.4.1 对交通流量的近似假定

在本章介绍的各种模型中,都是以这样的假定为前提条件的,即 OD 间的 OD 交通流量都是稳定不变的。每组 OD 间的交通流量都是常数。只有在这样的前提条件下,才会有道路网的“平衡”,前述的各种交通分配方法才成立。如果 OD 交通流量是随时间变动的,网络便达不到模型所假定的那种平衡,前述的各种分配方法都将无法进行。而现实的道路网中,OD 交通流量每天都变化着,同一天的不同时间也变化着。因此,实际的交通量都是动态的。在动态交通流量下,前述的各种以静态为前提条件的分配方法都变得无能为力。在实际道路网的交通量分配中,为了处理这种现象,一般以一天为单位,对一天的平均交通流量进行分配,而得到每条道路一天的平均流量。这种方法虽然在一定程度上是可行的,但会产生两个问题。一个问题是:交通分配问题是一种非线性问题(从模型 8.3.4 式也可以看出),用一天的平均 OD 交通流量进行分配得到的结果与用实际的动态 OD 交通量进行分配得到的结果肯定会有差别。因此,平均的方法是近似的。另一个问题是:在实际的道路网规划中,有时不只是需要一天的平均情况,而且需要知道某个特定时间段的道路交通状况,例如早晚上下班时间段的道路拥挤状况,而静态交通量分配模型无法推定某个特定时间段的道路网状况。基于诸如此类的原因,有必要建立能处理动态 OD 交通量的模型,即动态交通量分配模型。但是,从动态交通量分配模型概念的提出到现在已 20 多年了,动态交通量分配的研究却仍然处在发展阶段。其主要原因是考虑时间变动因素之后,建立模型变得十分困难。这部分内容,我们将在第 12 章中进行讨论。

8.4.2 利用者路径选择方法的假定

在交通量分配模型中,假定道路网的利用者都知道道路网中

各条路线的拥挤状况和所需走行时间,并且所有的利用者都选择从起点到终点的最短路径,即具有相同的选择标准。但在实际的道路交通中,一方面并不是每一个道路利用者都完全知道网络上交通流状态,只有那些经常利用道路网的人才有可能知道,那些不常利用的人则不知道,他们不得不靠地图和路标来选择路线;另一方面,人们选择道路的原则并不一定是走行时间最短,也可能还有许多其它影响因素。因此,在交通量分配模型中也有必要进一步考虑路径选择的问题。尽管目前已有不少研究者在研究路径选择的问题,并取得一定成果从而形成一个新的研究分支,但是,路径选择与交通量分配的研究一直各自独立互不相干地进行着,没有很好地结合在一起。

8.4.3 交通网络的局限性

分配中使用的网络的局限性有以下几个方面:

使用的网络是经简化后的网络。道路网中的有些狭窄道路被省略掉了。在道路变得十分拥挤的情况下,有些道路网利用者可能会离开干线道路,走那些狭窄的小道,即狭小道路也可分担一部分交通量。因此,在网络中简化掉狭小道路有可能使干线道路的分配交通量大于实际交通流量。但在实际的交通量分配中,不可能把所有的道路都考虑进去。

在分配中,总是将道路网划分成若干个区域,每个区域作为交通量发生和吸引的出发地和目的地。一般情况下,每个区域都是由若干条道路和节点组成。在实际道路网中,交通量一般是在区域内均匀地发生和吸引。因此,在交通分配模型中,OD交通量应该从区域内的所有节点上均匀发生。但在目前的交通量分配模型中,都是将OD交通量集中在区域的某一点——中心节点(centroid)上发生和吸引。即假定OD交通量是从一个区域的某一点到另一个区域的某一点的交通量。这样造成的误差是靠近该点的路线上将

可能被分配到多于实际流量的交通流量,而离该点较远的路线上分配的交通流量则较少。如果被划分的区域较小,这种误差会相对小些,但若区域划分过小则计算时间会成倍增加。

最后一个误差是对走行时间函数的简化。交通量分配模型中的走行时间函数一般涉及到两个量,即路段交通量和交通容量。但实际道路中影响走行时间的远不止这两种因素。道路的几何形状、坡度、信号控制状况、禁止左右转等都对走行时间有影响。但交通量分配模型中不可能将这些因素都考虑进去。

综上所述,交通分配的研究与应用都已取得了相当成熟的成果。在理论研究中,它是一个重要的分支。在实际道路交通的分析中,它也是一个主要的必不可少的阶段。但它也仍然存在一定的问题,有待进一步改进。

9 平衡交通分配模型的扩展

第8章介绍了交通分配的基本模型,并讨论了交通分配模型中存在的问题。针对这些问题,交通规划领域的学者进行了广泛的研究,从不同角度大大发展了平衡分配基本模型,这些研究成果具有重要的理论意义和应用价值。本章将就其中的几个主要扩展方向进行讨论。

9.1 弹性需求分配模型

第8章介绍的UE模型是在OD交通量已知并且为常量的前提下建立的模型。但实际上OD交通需求往往由于各种原因发生变化。本节将介绍弹性需求(变需求)下的平衡分配模型,来满足这种情况下交通需求预测的需要。

9.1.1 弹性需求下的平衡分配模型

在现实中,OD交通量的大小可能会受网络运行情况的影响。例如,在交通堵塞严重时有些道路网利用者可能会放弃自己开车而乘坐地铁,有的甚至取消原计划的出行。为了反映这种现象,OD交通量 q_{rs} 可假定成 r 与 s 之间走行时间的函数,即

$$q_{rs} = D_{rs}(u_{rs}) \quad \forall r, s \quad (9.1.1)$$

上式中, u_{rs} : r 与 s 之间的最短走行时间;

$D_{rs}(\cdot)$: r 与 s 间的需求函数。

显然 D_{rs} 应该是随 rs 间行走时间变化的单调递减函数, 并且有上限。

这种问题便是弹性需求(variable demand)下的平衡分配问题。即, 求一组满足 Wardrop 平衡的路段交通量和 OD 交通量。同时, OD 交通量也满足需求函数。

该问题可表达为下列的数学规划模型

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega \quad (9.1.2a)$$

约束条件

$$\sum_a f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (9.1.2b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.1.2c)$$

$$q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (9.1.2d)$$

模型中 D_{rs}^{-1} 是需求函数的反函数。模型的约束条件和所采用的变量基本上与 UE 模型一致, 主要的差别是目标函数。

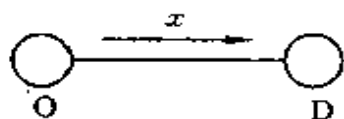


图 9.1

我们先用一个简单的例子来说明模型 9.1.2 式的解即是弹性需求下交通分配问题的解。

图 9.1 的网络中只有一条道路。设该道路的走行时间函数为 $t=1+x$ (x 是道路上的交通流量)。需求函数为 $x=5-t$ (即随走行时间的增加交通需求量减少)。显然这两条线的交点即是平衡点。因此, 可求得平衡解为 $x=2, t=3$ 。通过模型求平衡点时, 需求函数的反函数为 $t=5-x$ 。因此, 目标函数为

$$\min Z(x) = \int_0^x (1 + \omega) d\omega - \int_0^x (5 - \omega) d\omega$$

令
$$\frac{dZ}{dx} = 0,$$

得
$$2x - 4 = 0, \therefore x = 2。$$

相应地 $t=3$ 。由此可见,根据模型求得的平衡点与实际的平衡点一致。

下面我们来证明模型 9.1.2 式的解是弹性需求下平衡问题的解。

根据 9.1.2 式构造拉格朗日函数如下

$$\begin{aligned} L(q, u, f) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega \\ & + \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \end{aligned}$$

由库恩-塔克条件:

$$f_k^{rs} \frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial f_k^{rs}} \geq 0$$

$$q_{rs} \frac{\partial L}{\partial q_{rs}} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_{rs}} \geq 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial u_{rs}} = 0$$

得

$$f_k^{rs} (C_k^{rs} - u_{rs}) = 0 \quad (9.1.3a)$$

$$(C_k^{rs} - u_{rs}) \geq 0 \quad (9.1.3b)$$

$$q_{rs} [u_{rs} - D_{rs}^{-1}(q_{rs})] = 0 \quad (9.1.3c)$$

$$u_{rs} - D_{rs}^{-1}(q_{rs}) \geq 0 \quad (9.1.3d)$$

$$q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} = 0 \quad (9.1.3e)$$

上面各式中, 9.1.3a 式和 9.1.3b 式的意义已在前几章中介绍过。这两个式子说明, 模型 9.1.3 式的解是满足平衡条件的。9.1.3c 式和 9.1.3d 式的意义与之也十分相似。从这两式可以看出, 如果 $q_{rs} \geq 0$, 则 $u_{rs} = D_{rs}^{-1}(q_{rs})$, 即 $q_{rs} = D(u_{rs})$, 满足需求函数。反之, 若 $q_{rs} = 0$, 则由 9.1.3d 式知 $u_{rs} \geq D_{rs}^{-1}(q_{rs})$, 说明 OD 走行时间太长而不会诱发任何交通量。因此, 模型 9.1.3 式满足平衡条件和需求函数。

9.1.2 模型解法

下面我们考虑模型 9.1.2 式的解法。该模型解法的步骤与固定需求下的模型基本相同, 即采用迭代法。在每步迭代中, 采用一次全有全无分配而决定下一步迭代的方向。然后再根据目标函数的极小化决定最优迭代步长。但在该方法中, 由于 OD 交通量也是变量, 也应在迭代中根据 OD 间的走行时间作相应的调整。

即使在弹性需求的条件下, 任意两地间的交通量总需求是有上限的。例如不会超过两地间的总人口数量。因此对任意一组 OD, 需求函数总是有上限函数, 我们设此上限为 $\bar{q}_{rs}$ 。另外, 我们设在第 n 步迭代中得到的附加 OD 交通量为 w_n^{rs} , 模型 9.1.2 式的解法和步骤可归纳如下:

Step 0: 初始化。找到一组初始可行的路段交通量 $\{x_a^1\}$, OD 交通量 $\{q_n^1\}$, 令 $n=1$, 例如, 可以根据 OD 交通量的上限 $\bar{q}_{rs}$, 确定一组 q_n^1 , 然后根据 q_n^1 进行 0-1 分配的结果而得到一组 x_a^1 。

Step 1: 更新。令 $t_a^n = t_a(x_a^n) \forall a$, 计算 $D_{rs}^{-1}(q_n^n)$ 。

Step 2: 根据 t_a^n 计算 OD 组 r, s 间的最短路线, 确定迭代方向。计算得 OD 对 r, s 间最短路线的所需时间为 C_n^{rs} , 按下式进行计算而确定附加交通流量。

如果 $C_{rs}^n \leq D_{rs}^{-1}(q_{rs}^n)$, 则令 $u_{rs}^n = \bar{q}_{rs}$, 沿最短路线上将 u_{rs}^n 进行 0-1 分配, 即将 u_{rs}^n 全部分配到计算所得的最短路线上, 并增加相应的附加路段交通量 y_a^n ; 如果 $C_{rs}^n > D_{rs}^{-1}(q_{rs}^n)$, 则令 $u_{rs}^n = 0$ 。相应最短路线上各路段的附加路段交通流量不变。各组均计算完毕后, 得到附加交通流量 $\{y_a^n\}$, OD 交通流量 $\{u_{rs}^n\}$ 。

Step 3: 根据下面的一维极小问题求最优步长 α_n :

$$\min_{0 \leq \alpha_n \leq 1} Z(\alpha) = \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha_n (y_a^n - x_a^n)} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}^n + \alpha_n (u_{rs}^n - q_{rs}^n)} D^{-1}(\omega) d\omega$$

Step 4: 更新流量。令

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha_n (y_a^n - x_a^n)$$

$$q_{rs}^{n+1} = q_{rs}^n + \alpha_n (u_{rs}^n - q_{rs}^n)$$

Step 5: 收敛性检验。如果下式成立

$$\sum_{rs} \frac{|D_{rs}^{-1}(q_{rs}^n) - u_{rs}^n|}{u_{rs}^n} + \sum_{rs} \frac{|u_{rs}^n - u_{rs}^{n-1}|}{u_{rs}^n} \leq k$$

则停止计算; 否则, 令 $n = n + 1$, 返回 Step 1。

9.1.3 通过网络变换方式的求解方法

1. 零阻抗附加流量法

上述步骤是求解模型 9.1.2 式的算法, 根据这些步骤可以求出弹性需求下的平衡解。事实上, 我们还有更简单的方法求解模型 9.1.2 式。即只对网络结构进行某些修改, 之后用固定需求模型的解法求解。

设原有的网络如图 9.2(a) 所示, 我们称之为基本网络。在此基础上, 我们增加两条路段和一个虚节点 r' 。两条路线分别是 r 到 r' 以及从 s 到 r' 。两条附加路段的走行时间函数分别为 $t_{rr'} = 0$, $t_{sr'} = -D_{rs}^{-1}(\cdot)$ 。修改后的网络图如图 9.2(b) 所示。

设从 r 到 r' 的交通流量是固定的, 等于 $\bar{q}_{rs}$ 。这样便成为固定需求的平衡分配模型, 可表达为:

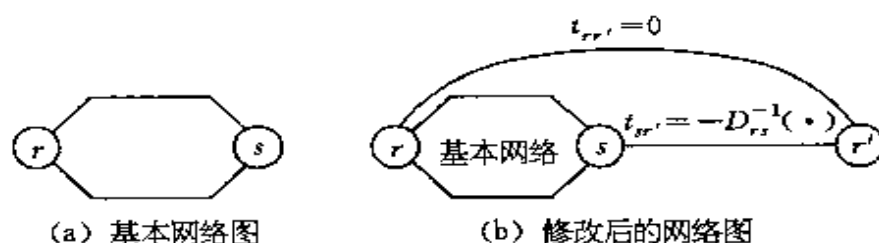


图 9.2

$$\begin{aligned} \min Z(x) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{rs} \int_0^{x_{rs}} t_{rs}(\omega) d\omega \\ & + \sum_{rr'} \int_0^{x_{rr'}} t_{rr'}(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (9.1.4a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^{rs} + x_{rr'} = \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (9.1.4b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.1.4c)$$

$$x_{rr'} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (9.1.4d)$$

由前面对附加路段的定义, $t_{rs}(\cdot) = -D_{rs}^{-1}(\cdot)$, $x_{rs} = \bar{q}_{rs}$, 以及 $t_{rr'}(\cdot) = 0$, 可知 9.1.4a 式的目标函数与 9.1.2a 式的目标函数完全一致。另外, 网络的结构决定了从基本网络流过的交通流量与路段 rs' 上的交通流量完全相同, 即 $q_{rs} = \sum_k f_k^{rs}$, 多余的流量则由 rr' 上流过。因此, 9.1.2 式中的各项约束条件也可以在此处完全满足。因此, 图 9.2(b) 的改进后的网络在固定需求 $\bar{q}_{rs}$ 下的解与原模型的解完全一样。也就是说, 对基本网络的每组 OD 附加两条虚路段之后, 完全可以用固定需求下平衡模型的解法求解弹性需求下的平衡问题。

2. 超量需求法

考察等价的变需求规划问题的目标函数

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega \quad (9.1.5)$$

上式中第二项可分解成：

$$\sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega = \sum_{rs} \int_0^{\bar{q}_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_{q_{rs}}^{\bar{q}_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega$$

由于左边第一项为常数，可以从目标函数中去掉。第二项可以对超量需求 $e_{rs} = \bar{q}_{rs} - q_{rs}$ 进行积分变换如下：

$$\begin{aligned} - \sum_{rs} \int_{q_{rs}}^{\bar{q}_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega &= - \sum_{rs} \int_{\bar{q}_{rs}-q_{rs}}^0 D_{rs}^{-1}(\bar{q}_{rs} - \omega) d(-\omega) \\ &= - \sum_{rs} \int_0^{e_{rs}} W_{rs}(\omega) d\omega \end{aligned}$$

$W_{rs}(e_{rs})$ 表示逆需求的超量变量函数，即 $W_{rs}(e_{rs}) = D_{rs}^{-1}(q_{rs})$ ，在需求函数严格递减的假设下，该超量变量函数为严格递增函数。由此，变需求问题的等价规划可写成：

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{e_{rs}} W_{rs}(\omega) d\omega \quad (9.1.6a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^{rs} + e_{rs} = \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (9.1.6b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.1.6c)$$

$$e_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (9.1.6d)$$

观察该规划，可以发现我们只要定义一条载流 e_{rs} 的附加路段，并由流量守恒约束确定其位置，构成超量需求路段网络，同样可以用固定需求下平衡模型的解法求解弹性需求下的平衡问题（见图 9.3）。

由于此种网络变换方式所增加的虚拟路段比零阻抗附加流量法变换方式少一半，减少了计算工作量，因此可以认为超量需求法优于零阻抗附加流量法。

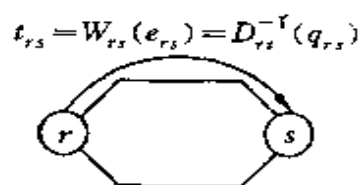


图 9.3 OD 对 r, s 间的超量需求网络表示

9.2 随机分配模型

如果有一组出行者从起点 r 到终点 s , $r-s$ 间有多条路径, 由于出行者对路网状况、交通现状并不完全了解, 且存在着一些难以量化的因素作用, 如道路沿线风景等, 我们有理由将出行者对路径阻抗的估计视为分布于出行者群上的随机变量。我们仍然沿用 Wardrop 第一原理所定义的出行者路径选择原则, 即选择最短路径出行, 但与确定性分配模型不同的是, 这里的最短路径为估计最短路径, 也即是在 OD 对 $r-s$ 间存在着多条路径, 同一出行者对这些路径存在着不同的阻抗估计, 不同出行者对同一条路径也存在着不同的阻抗估计。对于某一个特定的出行者来说, 他总是选择具有最小估计阻抗的路径出行。由于每条路径的估计阻抗是随机变量, 有相应的概率密度函数, 对于某一特定出行者, 每条路径均具有一个被选择的概率。随机分配模型就是在研究路径估计阻抗分布函数的基础上, 计算有多少出行者选择每一条路径。本节我们将要介绍两类模型, 第一类模型中对应于全有全无分配, 假设路径实际阻抗与流量无关, 即不考虑拥挤效应的非均衡随机分配方法; 第二类模型则是在基本数学规划模型基础上, 考虑路径阻抗估计随机因素的随机平衡分配模型 SUE(stochastic user equilibrium)。

9.2.1 非均衡随机分配方法

非均衡随机分配方法有许多, 但仅有两类方法得到了相对广泛的应用: 模拟随机分配(simulation-based)和概率随机分配(proportion-based)。前者应用 Monte Carlo 等随机模拟方法产生路段阻抗的估计值, 然后进行全有全无分配; 后者则应用 Logit 等模型计算不同路径上承担的出行量比例, 并由此进行分配。

1. 模拟随机分配

此类分配方法一般建立在下述假设基础之上:

① 路网上的任意路段均存在着其实际路段阻抗,而出行者对其路段阻抗的估计构成了一个以实际路段阻抗为数学期望的概率密度分布。如果所假设的估计路段阻抗分布不同,则构成了不同的模型。Burrell(1968)提出的模型曾被广泛应用多年,他所给出的分布假设是均一分布,而许多模型假设的大多为正态分布。

② 不同路段的估计阻抗分布是相互独立的。

③ 出行者均选择最小估计阻抗路径出行。

下面我们给出模拟随机分配算法的具体步骤:

Step 0: 初始化,选择路段估计阻抗分布以及分配次数 N , $n=0$ 。

Step 1: $n = n+1$, 对于任一 OD 对,采用随机数方法从相应的路段阻抗分布函数中取样,确定路段估计阻抗采用全有全无分配方法,将 T_{ij}/N 分配于路网上。

Step 2: 如果 $n=N$, 结束,否则转向 Step 1。

Burrell 算法的优点是产生较短的路径的几率比较长的路径几率大。采用均一分布能够节省计算时间,但不太符合实际。采用正态分布结果会好一些,但需要更多的计算时间。如果计算能力允许,我们可以提高 N 值以及路段阻抗分布的方差,这样就可以提高 Burrell 算法的精度。然而这类方法存在着一些不可避免的缺陷:

① 估计路段阻抗分布相互独立的假设在某些情况下会导致不合理的结果。

② 没有很好地考虑拥挤因素。

2. 概率随机分配

令 C_k^r 为起点 r 与终点 s 之间路径 k 上的估计阻抗, $k \in \psi_{rs}$, C_k^r 则为随机变量;令 c_k^r 为实际的路径阻抗值,且设

$$C_k^{rs} = c_k^{rs} + \epsilon_k^{rs}, \quad \forall k, r, s \quad (9.2.1)$$

式中 ϵ_k^{rs} 是随机误差项, 有 $E[\epsilon_k^{rs}] = 0$, 即 $E[C_k^{rs}] = c_k^{rs}$ 。

由 Wardrop 路径选择原则, 第 k 条路径被选择的概率为:

$$P_k^{rs} = \Pr(C_k^{rs} \leq C_l^{rs}, \quad \forall l \in \phi_{rs} - k), \quad \forall k, r, s \quad (9.2.2)$$

由弱大数定理可知, 路径 k 上的交通量为

$$f_k^{rs} = q_{rs} P_k^{rs}, \quad \forall k, r, s \quad (9.2.3)$$

路段交通量与路径交通量的关系仍为:

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \quad \forall a \quad (9.2.4)$$

应用第 7 章的效用理论来理解式 9.2.1, 我们可以定义效用函数为

$$U_k^{rs} = -C_k^{rs} = -c_k^{rs} - \epsilon_k^{rs}, \quad \forall k, r, s \quad (9.2.5)$$

假设 ϵ_k^{rs} 相互独立, 且服从相同的 Gumbel 分布, 由随机效用理论, 我们很容易得到路径 k 被选择的概率是:

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_k^{rs})}{\sum_l \exp(-\theta c_l^{rs})}, \quad \forall k, r, s \quad (9.2.6)$$

θ 是一个与 ϵ_k^{rs} 的方差所对应的参数, 两者有 $\text{Var}(\epsilon_k^{rs}) = \pi^2/(6\theta^2)$ 的关系。该参数有着实际的物理意义, 如 OD 对 $r-s$ 间第 k 条路径实际阻抗最小, 则路径 k 被选择的概率可改写为:

$$P_k^{rs} = \frac{1}{1 + \sum_{l \neq k} \exp\left(-\theta \frac{c_l^{rs}}{c_k^{rs}}\right)} \quad (9.2.7)$$

显然, 由于 $c_l^{rs} > c_k^{rs}$, 在 $\theta \rightarrow +\infty$ 时, P_k^{rs} 趋于 1, 即所有出行者均选择这条路径。如果取值较小, 就说明相对误差较大, 出行者可能选择其它路径。当 $\theta \rightarrow 0$ 时, $P_k^{rs} \rightarrow 1/|\phi_{rs}|$, 即出行者将会均匀分布于所有可选路径上。因此可以认为 θ 是量度出行者总体对路网熟悉程度的指标。

为了体现上述随机分配思想,我们需要研究一种非均衡分配算法,很容易得到的方法是在任一 OD 对之间寻找所有可能的路径,应用 Logit 模型计算并分配相应交通量即可。然而,由于同一 OD 对间的可能路径有很多,计算工作量相当大,必须寻求更有效的算法分配。Dial 算法便能够在网络上有效地实现 Logit 模型,但它并不求解连接 OD 对的所有可能路径的选择概率和流量,因为它认为在实际网络问题中,有些路径是明显不会被司机考虑的。因此,Dial 算法有一个重要的初始化阶段,具体算法如下:

Step 0: 初始化

- 计算每一节点至起始节点 r 的最小阻抗,可得 $r(i), \forall i$;
- 计算每一节点至终止节点 s 的最小阻抗,可得 $s(i), \forall i$;
- 定义 O_i 为路段起点为 i 的路段终点集合;
- 定义 D_i 为路段终点为 i 的路段起点集合;
- 对于每一条路段 (ij) ,计算路段似然值(Link Likelihood),

即

$$L(i, j) = \begin{cases} \exp[\theta(r(j) - r(i) - t(i, j))] & \text{若 } r(i) < r(j) \text{ 和 } s(i) > s(j) \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases}$$

其中可知,凡是 $L(i, j) = 0$ 的路段都是不合理路段,不应该考虑包含它们的路径;凡是 $L(i, j) > 0$ 的路段都可以考虑在有效路径中;而所包含的所有路段的 $L(i, j) = 1$ 的路径,必然为最小阻抗路径。Dial 算法中的初始化过程实际上是确保出行量分配在使其有效地远离其起始节点的路径上,那些“走回头路”的路径将被剔除掉。

Step 1: 向前计算路段权重

从起点 r 开始,按照 $r(i)$ 的上升顺序依次考虑节点,对每一个节点,计算离开它的所有路段的权重值,即:对于节点 i ,计算 $W(i, j), j \in O_i$,所用公式为:

$$W(i, j) = \begin{cases} L(i, j) & \text{若 } i = r \text{ (即, 如果节点 } i \text{ 是起点)} \\ L(i, j) \cdot \sum_{m \in D_i} W(m, i) & \text{其它} \end{cases}$$

当达到终止节点 s 时停止计算。

Step 2: 向后计算路段流量

从终点 s 开始, 按照 $s(j)$ 的上升顺序依次考虑节点, 对于每一个节点, 计算进入它的所有路段上的流量, 即: 对于节点 j , 计算 $x(i, j), i \in D_j$, 所用公式为:

$$x(i, j) = \begin{cases} q_{rs} \frac{W(i, j)}{\sum_{m \in D_j} W(m, j)} & \text{若 } j = s \text{ (即, 如果节点 } j \text{ 是目的地)} \\ \left(\sum_{m \in O_i} x(j, m) \right) \frac{W(i, j)}{\sum_{m \in D_j} W(m, j)} & \text{其它} \end{cases}$$

当达到起始节点 r 时停止计算。

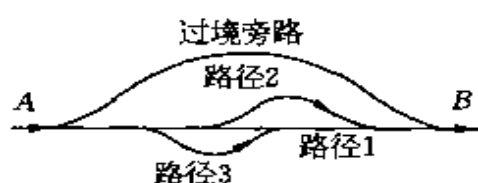


图 9.4 Dial 算法缺陷说明图例

Dial 算法在实际中应用较广, 但其同样存在着一些缺陷。例如如图 9.4 所示, 一个城市中存在着一一条过境道路以及三条穿越市中心的路径。假设从 A 到 B 有 4000 出行量且上述

四条路径具有相同的阻抗。

在这种情形下, 应用 Dial 算法计算的结果必然是每条路径上均承担 1000 出行量。然而, 实际中大多数出行者将认为上述情形中仅存在着两种路径选择: 过境道路和穿越市中心, 从而与 Dial 算法的计算结果相差许多。这种问题的出现实际上同第 7 章中“红蓝巴士”问题相类似, 归根于 IIA 假设。因此, Dial 算法的分配结果势必会使得路网上路段密集、短路段较多的部分分配的交通量较多, 而路段稀疏、路段较长部分分配的交通量较少。同时, 路网的编

码方案也影响着最终分配结果。

9.2.2 随机均衡分配模型

Dial 模型虽然能够进行随机分配,但其路段实际阻抗是与交通量无关的,并没有考虑拥挤因素。这里我们假设估计路段阻抗的期望值是路段流量的函数,即 $t_a = t_a(x_a)$, $E[T_a] = t_a$, T_a 是路段 a 的估计阻抗,并引入随机用户均衡的概念。

所谓随机用户均衡 SUE(stochastic user equilibrium)就是指这样一种交通流分布形态,在这个状态下,任何一个出行者均不可能通过单方面改变出行路径来减少自己的估计行驶阻抗。

随机用户均衡分配中出行者的路径选择行为仍遵循 Wardrop 第一原理,只不过用户选择的是自己估计阻抗最小的路径而已。由此可知,连接 OD 对 $r-s$ 的路径 k 被选择的概率 P_k^r ,就是其估计阻抗在该 OD 对间所有可能路径的估计阻抗中为最小的概率,即

$$P_k^r = P_k^r(t) = \Pr(C_k^r \leq C_l^r, \forall l \neq k \in \varphi_r | t) \quad (9.2.8)$$

其中, C_k^r 是表示估计阻抗的随机变量, $C_k^r = \sum_a T_a \delta_{a,k}^r, \forall r, s, k$ 。

应该注意到,上述选择概率是一个条件概率,即它是在平衡态的路段阻抗期望值的条件上确定的概率。如果路段阻抗是常数,问题就简化为本节第一部分所述的模型。

研究随机用户均衡定义可知,在该均衡状态下,某个 OD 对之间所有已被选用的路径上,并不一定有相同的实际阻抗值,而只满足下述条件:

$$f_k^r = q_{rs} \cdot P_k^r, \quad \forall k, r, s \quad (9.2.9)$$

在此式中,路径流量 f_k^r 与 P_k^r 有关,而 P_k^r 与估计路径阻抗大小有关,估计路径阻抗大小与估计路段阻抗有关且是随机变量,实际路段阻抗又是流量的函数,如此循环相依,达成 SUE 的条件。

SUE 更具有普遍性,UE 仅是 SUE 的一种特殊情况,当估计阻抗的方差为零,SUE 就变成 UE 了。

我们仍然沿用已经讨论过的交通分配基本规划模型的建模思路,先构造出一个数学规划模型,然后证明其与 SUE 条件之间存在等价性,并进一步说明该极小值问题存在唯一极小解。

该模型如下:

$$\begin{aligned} \min Z(x) = & - \sum_{rs} q_{rs} \cdot E[\min_{k \in \phi_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)] + \sum_a x_a t_a(x_a) \\ & - \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (9.2.10)$$

同样,上述模型没有任何直观的行为或经济上的解释,仅是一个无约束的极小化问题,可证明其解满足 SUE 条件,且在解点上满足网络的所有守恒约束。

证明:

① 等价性

对于无约束极值问题,其极值点上的一阶条件为:

$$\nabla Z(x) = 0$$

对于第一项有:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_b} \left\{ - \sum_{rs} q_{rs} \cdot E[\min_{k \in \phi_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)] \right\} \\ & = - \sum_{rs} q_{rs} \sum_k \frac{\partial E[\min_{k \in Y_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)]}{\partial c_k^{rs}} \frac{\partial c_k^{rs}(x)}{\partial x_b} \end{aligned} \quad (9.2.11)$$

由于, $\frac{\partial E[\min_{k \in Y_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)]}{\partial c_k^{rs}} = P_k^{rs}$, 故上式可得:

$$\frac{\partial}{\partial x_b} \left\{ - \sum_{rs} q_{rs} \cdot E[\min_{k \in Y_{rs}} \{C_k^{rs}\} | c^{rs}(x)] \right\} = - \sum_{rs} q_{rs} \sum_k P_k^{rs} \frac{dt_b}{dx_b} \delta_{b,k}^{rs}$$

对于第二项有,

$$\frac{\partial}{\partial x_b} \left[\sum_a x_a t_a(x_a) \right] = t_b + x_b \frac{dt_b}{dx_b}$$

对于第三项有,

$$\frac{\partial}{\partial x_b} \left[- \sum_a \int_0^{x_b} t_a(\omega) d\omega \right] = - t_b$$

因此,极值点的一阶条件为:

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial x_b} = \left[- \sum_{rs} \sum_k q_{rs} P_k^{rs} \delta_{b,k}^{rs} + x_b \right] \frac{dt_b}{dx_b}, \quad \forall b \quad (9.2.12)$$

若路段走行时间函数是严格单调递增函数,即 $dt_b/dx_b > 0$, 则 $\nabla Z(x) = 0$ 当且仅当

$$x_b = \sum_{rs} \sum_k q_{rs} P_k^{rs} \delta_{b,k}^{rs}, \quad \forall b \quad (9.2.13)$$

而此式正是 SUE 的条件,因此可知无约束最小化问题 9.2.10 式的解与 SUE 条件等价。

② 唯一性

可以证明,目标函数 $Z(x)$ 的 Hessian 阵虽然是不确定阵,但其在均衡点上是正定的,即均衡点是该无约束极小化问题的一个局部极小点,而且 $Z(x)$ 在极小点附近是严格凸的,该局部极小点仍然是全局极小点。

我们可以采取求解无约束极小化问题的最速下降法等方法来求解模型 9.2.10 式,这类算法基本的运算步骤是寻找下降方向和迭代步长,即

$$x^{n+1} = x^n + a_n \cdot d^n$$

其中, x^n 是第 n 次迭代时的路段流量向量, a_n 是需要确定的迭代步长,而 d_n 是目标函数在 x^n 点的下降方向。

对于 SUE 问题,采用常规的确定下降方向并沿此方向搜索目标函数极小值的迭代方法并不容易实现。因此我们采用第 8 章第 2 节介绍的二次加权平均法,可求解模型 9.2.10 式。这时,每次随机分配的附加交通量 y^n 与前一次计算得到的交通量 x^n 之差 $y^n - x^n$ 为下降方向,而迭代步长预先给定。具体步骤为:

Step 0: 初始化。按照各路段的初始走行时间 $\{t_a^0\}$ 进行一次随机分配, 得到各路段的分配交通流量 x_a^1 。令 $n = 0$ 。

Step 1: 按照当前各路段的分配交通流量 x_a^n 计算各路段的走行时间。

Step 2: 按照 Step 1 计算的路段走行时间 $\{t_a^n\}$ 和 OD 交通量进行一次随机分配, 得到各路段的附加交通流量 y_a^n 。

Step 3: 用加权平均的方法计算各路段的当前交通流量 x_a^n :

$$x_a^{n+1} = x_a^n + \frac{1}{n} (y_a^n - x_a^n), \quad \forall a$$

Step 4: 如果 x_a^n 与 x_a^{n-1} 的差值不太大, 停止计算。 x_a^n 即为分配交通流量。否则令 $n = n + 1$, 返回 Step 1。

上述算法中迭代时进行的随机分配可应用 Dial 算法等进行分配, SUE 模型还有许多成熟的研究成果。在此, 限于篇幅, 我们不作详细介绍。有兴趣的读者可参考 Sheffi (1984) 所著的“Urban Transportation Networks”。该书系统全面地阐述了交通分配的基本理论及最新研究成果, 是一本值得推荐的参考书。

9.3 考虑路段交通量相互影响的平衡模型

在实际的交通网络中, 路段旅行时间只与该路段流量有关的假设一般不成立, 因为某路段的行走时间不仅仅受该路段交通量的影响, 至少相邻路段交通流量的相互影响在有些情况下是很严重的, 例如在无信号灯路口的车流交织点或者双向车道上拥挤时对向车流间的相互影响等。

本节中首先考虑受其它路段交通量影响的一般路段旅行时间函数。然后, 分析路段交通量存在相互影响的情况下, 数学模型的建立和求解问题。

9.3.1 一般路段旅行时间函数

考虑路段交通量相互影响时,路段旅行时间函数可表示为:

$$t_a = t_a(\cdots, x_a, \cdots) \quad (9.3.1)$$

当假设路段之间的相互影响对称时,有:

$$\frac{\partial_a(x)}{\partial x_b} = \frac{\partial_b(x)}{\partial x_a} \quad \forall a \neq b \quad (9.3.2)$$

反之,影响不对称时,有:

$$\frac{\partial_a(x)}{\partial x_b} \neq \frac{\partial_b(x)}{\partial x_a} \quad \forall a \neq b \quad (9.3.3)$$

9.3.2 路段间相互影响对称情况下的均衡问题及解法

1. 数学模型

对固定需求问题,相应的数学规划问题形式为:

$$\begin{aligned} \min Z(x) = & \frac{1}{A} \sum_a \left[\int_0^{x_a} t_a(x_1, \cdots, x_{a-1}, \omega, x_{a+1}, \cdots, x_A) d\omega \right. \\ & \left. + \int_0^{x_a} t_a(0, \cdots, \omega, \cdots, 0) d\omega \right] \end{aligned} \quad (9.3.4a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^r = q_r \quad \forall r, s \quad (9.3.4b)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.3.4c)$$

$$x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^r \delta_{a,k}^r \quad \forall a \quad (9.3.4d)$$

由于本章讨论只涉及小汽车和公共交通出行两种方式间的均衡,为简便起见,此处只考虑两个路段间有相互影响的情况,则式9.3.4可改写为:

$$\min Z(x) = \frac{1}{2} \sum_a \left[\int_0^{x_a} t_a(\omega, x_a) d\omega + \int_0^{x_a} t_a(\omega, 0) d\omega \right] \quad (9.3.5a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (9.3.5b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.3.5c)$$

$$x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (9.3.5d)$$

式 9.3.5 解的唯一性及与均衡问题解的等价性证明如下:

证明: ① 等价性

式 9.3.5a 中, 求和项中的第一项对 x_b 求导为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_b} \left[\sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega, x_a) d\omega \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_b} t_b(\omega, x_b) d\omega + \frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_{b'}} t_{b'}(\omega, x_b) d\omega \end{aligned} \quad (9.3.6a)$$

式 9.3.6a 中第一项可简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_b} t_b(\omega, x_b) d\omega = t_b(x_b, x_b) \quad (9.3.6b)$$

第二项简化步骤如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_{b'}} t_{b'}(\omega, x_b) d\omega \\ &= \int_0^{x_{b'}} \frac{\partial t_{b'}(\omega, x_b)}{\partial x_b} d\omega \end{aligned}$$

将对称条件代入, 得:

$$\begin{aligned} & \int_0^{x_{b'}} \frac{\partial t_{b'}(\omega, x_b)}{\partial x_b} d\omega \\ &= \int_0^{x_{b'}} \frac{\partial t_b(x_b, \omega)}{\partial x_b} d\omega = t_b(x_b, x_{b'}) - t_b(x_b, 0) \end{aligned} \quad (9.3.6c)$$

式 9.3.5a 中第二项对 x_b 求导为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_b} \left[\sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega, 0) d\omega \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x_b} \int_0^{x_b} t_b(\omega, 0) d\omega = t_b(x_b, 0) \end{aligned}$$

所以,目标函数对 x_b 求导结果为:

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial x_b} = \frac{1}{2} [2t_b(x_b, x_{b'}) - t_b(x_b, 0) + t_b(x_b, 0)] = t_b(x_b, x_{b'})$$

可见,目标函数对路段交通量的导数仍等于路段的旅行时间,第8章对基本均衡模型的论证结论与解法均适用于路段间有相互影响的情况。

值得注意的是,由证明过程可以看出,为使此数学规划问题与原均衡问题等价,必须有对称条件的成立。也就是说,问题中的路段旅行函数必须具有对称的雅可比(Jacob)矩阵。

② 唯一性

路段旅行函数的 Jacob 矩阵为:

$$\nabla t(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial t_2(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial t_A(x)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial t_1(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial t_2(x)}{\partial x_2} & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \frac{\partial t_1(x)}{\partial x_A} & & & \frac{\partial t_A(x)}{\partial x_A} \end{bmatrix}$$

当此矩阵正定,即目标函数的海赛矩阵正定时,问题具有唯一的均衡解。但当此矩阵非正定时,就需要重新构造模型形式或者对路段间的相互影响作出进一步的简化和假设。

由唯一性的证明可知,为保证解的唯一,必须有:

- 路段旅行时间为该路段上流量的严格增函数,即:

$$\frac{\partial t_a(x)}{\partial x_a} > 0 \quad \forall a \quad (9.3.7a)$$

- 路段旅行时间主要受该路段本身流量的影响,也就是说,其它路段上交通量对该路段旅行时间的影响要比其本身流量的影响小得多,即:

$$\frac{\partial_a(x)}{\partial x_a} \gg \frac{\partial_a(x)}{\partial x_b} \quad \forall a \neq b \quad (9.3.7b)$$

具体地说,就是要保证:

$$\frac{\partial_a(x)}{\partial x_a} > \sum_{b \neq a} \frac{\partial_a(x)}{\partial x_b} \quad (9.3.7c)$$

2. 模型的解法

用凸组合法解此规划问题的步骤如下。

(1) 方向搜索

此阶段需求解的线性规划问题为:

$$\begin{aligned} \min Z^*(y) &= \sum_a \frac{\partial Z(x^n)}{\partial x_a} y_a \\ &= \sum_a t_a^* y_a \end{aligned} \quad (9.3.8a)$$

约束条件

$$\sum_k g_k^{rs} = q_r \quad \forall r, s \quad (9.3.8b)$$

$$g_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.3.8c)$$

$$y_a = \sum_k \sum_r \sum_s g_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (9.3.8d)$$

即在第 n 步迭代的路网结果基础上进行一次全有全无分配。

(2) 步长的确定

辅助流量确定后,通过求解下列一维优化问题得到步长:

$$\begin{aligned} \min Z(\alpha) &= \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(\cdots, \omega, \cdots) d\omega \\ &+ \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(0, \cdots, \omega, \cdots, 0) d\omega \end{aligned} \quad (9.3.9a)$$

约束条件

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (9.3.9b)$$

其它步骤与前面所述的凸组合法完全相同,不再赘述。

9.3.3 路段间相互影响不对称情况下的平衡问题及解法

由前述证明过程可知,当路段的旅行时间函数的 Jacob 矩阵不对称时,路网上的均衡问题没有相应的能直接求解出均衡流量的数学规划问题,但可以通过多重的迭代来渐近求解,其中每一次迭代都解一个用户均衡的规划问题,其解法步骤为:

① 找到一个初始可行解 $\{x^0\}$, 令 $n=0$;

② 解式 9.3.10 所示的规划问题(用户均衡问题), 得到 $\{x^{n+1}\}$;

③ 检验, 当 $\frac{1}{A} \sum_a \frac{|x_a^{n+1} - x_a^n|}{x_a^{n+1}} \leq \epsilon$ 时, 结束迭代; 否则, 转向 ②。

在第 n 次迭代时, 路网上已有的流量为 $(x_1^n, \dots, x_A^n)$, 则此次迭代要解的用户均衡问题为:

$$\min \tilde{Z}^n(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x_1^n, \dots, x_{a-1}^n, \omega, x_{a+1}^n, \dots, x_A^n) d\omega \quad (9.3.10a)$$

约束条件

$$\sum_k f_k^r = q_r \quad \forall r, s \quad (9.3.10b)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (9.3.10c)$$

$$x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^r \delta_{a,k}^r \quad \forall a \quad (9.3.10d)$$

应当注意的是, 这种迭代解法与前面着重讨论过的 Jacob 矩阵对称时的直接数学规划解法的区别在于:

① 在求解子问题中的步长时, 除被积分的 x_a 外, 其它各路段的流量均固定于开始此次迭代时的流量值上;

② 子问题的目标函数在该步迭代中是不改变的, 固定于开始这轮迭代时的表达式上。

由于路段交通相互影响的问题与方式间相互影响的问题模型的构造相同,对此算法的讨论见后。

9.4 基本数学规划模型的扩展方向

1956年,Beckmann提出了上文介绍的弹性需求交通分配模型,定需求模型仅是其一个特例。我们称 Beckmann 模型为基本的数学规划模型。该基本数学规划模型简单易行,在实际工作中应用很广泛。但由于该模型是基于对交通网络特性以及出行者行为特性的理想化假设上的,在某些情况下会造成很大的误差,需要改进,许多研究者为此作出了不懈的努力。

路段走行时间函数和需求函数的独立性假设限制了基本数学规划模型的应用,因为这些假设在实际城市交通网络中是不现实的。Prager 就在建模中考虑了双向道路中对向交通流的相互影响。Charness & Cooper、Almonro 也讨论了该问题。城市交通网络中某一条路段上的走行时间同与之相连的交叉点、路段的交通特性有很大关系。Dafermos 由此提出研究基于不分离的走行时间函数的交通分配模型,这种模型也适用于多用户分配问题。Roth 第一个研究了多用户分配问题。Sender & Netter、Jeevanasstham 等均涉及了该问题。这类考虑相互影响的问题,如果假定影响是对称的,即其路段走行时间函数的 Jacob 矩阵对称,则可以转化为一个数学规划模型。如果该矩阵正定,则该模型存在着唯一解。而在大多数情况下,这种相互影响是不对称的,其路段走行时间函数的 Jacob 矩阵不对称,则不存在着等价的极小值数学规划模型。Smith 证明了当 Jacobian 矩阵正定时平衡解一定存在且唯一。Dafermos、Aashtiani & Magnati 也做了类似证明,还提供了算法。Fisk & Nguyen 在研究了这类问题的各种算法时,认为对角化算法最有效。该算法的收敛性证明见 Dafermos 和 Florian 的论述。

交通需求具有随时间变化的性质,这使得交通网络上的交通流具有动态的本质特性,这也决定了动态的交通模型能够更好地描述网络上的交通现象。在交通分配模型中,给定的任何一个 OD 对 (i, j) 中存在着一个交通需求函数 $R_{ij}(t)$, $0 \leq t \leq T$ (T 是建模研究的时段), $R_{ij}(t)$ 表示 t 时刻离开 i 前往 j 的出行率。当 $R_{ij}(t)$ 在 T 内被视为常数时,这种分配问题属于静态交通分配问题。静态交通分配模型在交通规划中对规划项目进行评价时具有良好的效果,但其在描述城市交通网络的拥挤特性以及对城市交通管理措施的评价上则无能为力。为了分析交通拥挤特性以及对交通流进行最优控制,必须对动态的交通流建模进行研究。动态交通分配模型考虑了交通需求随时间变化的特性,其 $R_{ij}(t)$ 函数随时间 t 而变,动态交通分配能够给出瞬时的交通流分布状态。动态交通分配模型可以用于评价缓解交通拥挤的各种对策的有效性,如弹性出行制度以及对交通事故等紧急情况发生后交通流状态的预测。因此,动态交通分配模型的研究也是基本数学规划模型的一个扩展方向。

用户均衡(UE)假设出行者拥有完备的交通信息,而且能够由此作出正确的决策。而在现实生活中,出行者在不拥有完备的交通情报下对路段出行费用有着不同的估计,该费用可被视为随机变量。随机用户均衡模型就是为了模拟这种情况而提出来的。当每个出行者不可能单方面地通过改变路径来减少自己的期望路径费用时,即达到随机用户均衡状态(stochastic user equilibrium)。SUE 首先由 Daganzo & Sheffi 提出,等价的 SUE 则由 Sheffi & Powell 以及 Daganzo 发展起来的。研究随机分配模型的另一个角度由 Michanadani & Soroush 提出,认为交通网络本身具有随机性,即网络中的某些弧或全部弧为随机变量,这时的随机分配模型就为在该随机网络上寻找均衡交通状态。Soroush & Michanadani (1984)提出在应用传统的均衡算法(如 Frank-Wolfe 算法)求解该问题时,主要难点在于最短路径的确定,并提出应用 Michandani

& Soroush(1982)的最短路算法以及列生成技术来求解该问题。

交通分配是传统交通规划“四阶段”法的一个步骤,该方法 60 年代美国交通工程师在进行底特律市交通规划时提出来的。在多年的实践中,人们逐渐意识到传统的“四阶段”法中存在着内部不一致性,相互割裂的四阶段之间的密切联系需要更加集成化的建模方法。因此,组合模型便应运而生了。实际上,Beckmann 的弹性需求模型,就是一个简单的交通分布与分配的组合模型。Florian et al、Florian & Nguyen、Evans、Safwat & Magnanti、LeBlanc & Abdulaal(1982)、Erlander et al、Lam & Huang 等均研究了组合模型及其算法。

在过去的 10 余年中,有限维的变分不等式 VI(finite-dimensional variational inequality)和非线性余子式 NC(nonlinear complementarity)理论取得了迅猛发展,交通网络均衡模型作为其应用的对象,为这些理论的发展起着了很大的推动作用,同时交通网络均衡模型也得到了多方位的发展。Smith 第一个将交通分配问题写成一个有限维的变分不等式形式,但实际上 Smith 本人并没有意识到他写出的公式为变分不等式,而 Dafermos 意识到了这一点,将其扩展至了变需求的分配问题。这样,许多关于 VI 的理论均可被应用来探讨交通均衡问题。Aashtiani & Magnani 提出用户均衡定义式可以改写为一个 NCP,并将其转化为不动点问题 FP(fixed-point problem),应用 Brouwer 不动点原理证明了用户均衡状态的存在性、唯一性条件。我们知道,NCP 只是 VI 的一个特殊情形,任何一个 NCP 均可转化为一个 VI 问题。Fisk & Boyce 以及 Pang 就研究了网络均衡的 NCP 形式转化为 VI 形式。目前,利用 VI、NCP 理论研究网络均衡分析模型已经成为与静态、动态最优化理论并行、交叉的有效途径之一,在非对称的交通分配模型、组合模型、动态交通分配模型等研究中有广泛应用的前景。

综上所述,交通分配基本的数学规划模型可以向随机模型、动

态交通分配模型等方向扩展,可由图 9.5 表示。

图 9.5 所示的扩展方向中,随机分配模型我们在上节已经介绍,其它方向诸如组合模型、动态交通分配模型等将在以后章节中讨论。

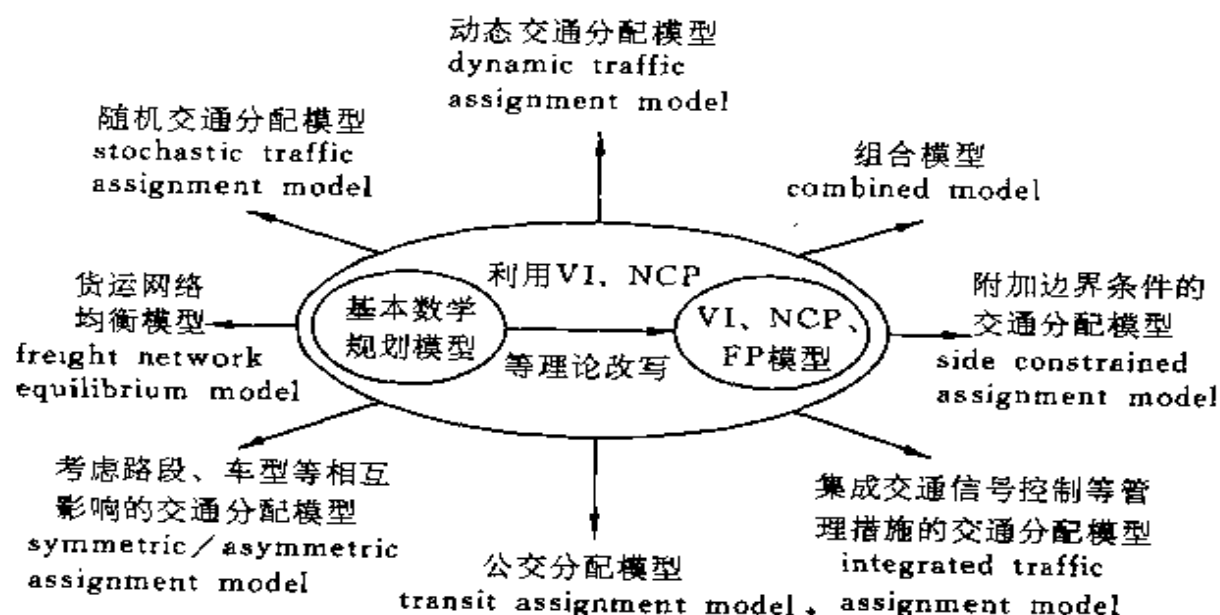


图 9.5 基本数学规划模型的扩展方向

10 组合模型

本章主要讨论将方式分担与路网分配结合在一起的互有反馈的组合模型。在这种组合模型的构造过程中,要分别确定在几种出行方式中决定用户选择行为的因素,以及各出行方式间的均衡方式。

10.1 多出行方式的选择

出行方式间的选择有多种不同的考虑方法,那么在这些不同的方法之中,使用哪一个来进行研究和分析是比较合适的呢?这就需要各种出行方式选择的考虑方法进行比较分析。

10.1.1 出行方式间的用户均衡状态

出行方式间的用户均衡状态是指在具有两种(或多种)出行方式的路网上定义的用户均衡状态。这种均衡状态可以表述为:当公共交通线路和小汽车出行同时被使用时,在给定的 OD 对之间,利用两种交通方式的旅行时间应该是相同的;而当只有一种方式被使用时,利用该方式的旅行时间必然小于或等于未被使用的交通方式的旅行时间。

采用这种定义时,就是将几种出行方式的路网合并在一起,然

后在全路网上进行均衡分析,它的等效规划问题为:

$$\min Z(x, \hat{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{rs} \hat{q}_{rs} \hat{u}_{rs} \quad (10.1.1a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} + \hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.1.1b)$$

$$f_k^{rs}, q_{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.1.1c)$$

其中, $\hat{u}_{rs}$: rs 间公共交通出行的旅行时间;

$\bar{q}_{rs}$: r 与 s 间公共交通方式的 OD 交通需求;

q : r 与 s 间的总 OD 交通需求。

当然,进行这样的组合分析的缺点是显而易见的,因为在实际中,尽管使用公共交通线路出行的时间有时要比使用小汽车甚至自行车的时间长,但公共交通这种出行方式总是有人使用的。即使是在各方式中出行时间相近的条件下,这种用户均衡状态也不一定能确切地描述实际的方式分担状态。这种不合理的结果是源于进行这种分析的假设,即:对所有的出行者来说,选择出行方式的原则均相同——出行时间最短。在这样的假设条件之下,出行者对于出行方式的选择和对于出行路径的选择行为就没有任何区别。但是,实际情况及出行方式选择方面的研究证明,情况并非如此。

10.1.2 实用交通方式分担模型

这方面的研究工作很多,而且发现影响出行者选择行为的因素也是不胜枚举,其中还有一部分因素是难以量化和衡量的。为了比较全面地考虑这些因素的影响,实际研究中引入了许多形式各异的“方式分担”函数。这些函数既考虑到不同出行方式的出行阻抗,同时在均衡状态时,又不笼统地完全实行全路网的用户均衡条件,而允许在均衡状态时出现不同出行方式旅行时间不等的情况。由于 Logit 模型便于应用和适用性强,因此在用户出行方式选择中得到了最为广泛的应用。

$$q_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + e^{\theta(u_{rs} - \hat{u}_{rs})}} \quad (10.1.2a)$$

其中, q_{rs} : OD 对 r, s 间使用小汽车的出行量;

$\bar{q}_{rs}$: OD 对 r, s 间总出行量;

$u_{rs}, \hat{u}_{rs}$: 小汽车和公交车的最短出行时间;

θ : 常数。

考虑到更多影响因素的 Logit 模型形式为:

$$q_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + e^{\theta(u_{rs} - \hat{u}_{rs} - \phi_{rs})}} \quad (10.1.2b)$$

其中, $q_{rs}, \bar{q}_{rs}, u_{rs}, \hat{u}_{rs}, \theta$ 意义同 10.1.2a 式;

ϕ_{rs} 表示除了出行时间差异外的其它因素(比如, 偏好小汽车出行的因素)对方式分担的影响。

10.2 方式间独立的组合模型

10.2.1 概述

在城市交通分析和研究中, 研究对象多为早、晚高峰, 这两个时段的车流量较大, 而且由于此时的出行多与工作有关, 因此, 出行量不会因路网的拥挤等情况而发生大的变动。也就是说, 此时起、终点间的出行数量是基本固定不变的, 可视作固定需求问题。

在本节中, 我们假设公共交通与小汽车交通之间没有相互影响, 而且公共交通的容量很大, 能保证乘客的流量不影响公共交通出行的时间, 这种分析可应用于地铁、轻轨交通等与小汽车路网没有相互干扰的情况。

在组合模型的分析中, 还要注意统一流量的单位, 这里我们将两种出行方式的流量都以单位时间的人流量来表达。在小汽车路网中, 分析是针对小汽车的流量进行的, 因此, 须用车辆载运系数将客流(居民出行)转化为车流量。载运系数可通过 OD 调查获得。

由国外文献资料知,这个数值多在 1~1.4 之间。

10.2.2 理论与模型

在不考虑方式间相互影响时,公交车辆的出行时间是一定值。因此,由上节式 10.1.2a 及式 10.1.2b,将使用某种出行方式的出行量表示为关于 u_{rs} 的函数,而且是关于 u_{rs} 的减函数,有上界 $\bar{q}_{rs}$,这就符合了需求函数的条件。所以,Logit 模型可被视作需求函数,此时路网上的均衡问题可转化为变需求问题来求解。

我们可以从较为简单的情况入手,即在各个 OD 对间只增加一条公交线路。那么,这个公交线路就相当于在超需求法路网中的超需求路段。对需求函数(即式 10.1.2a)求其反函数可得:

$$u_{rs}(q_{rs}) = \frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{\bar{q}_{rs}}{q_{rs}} - 1 \right) + \hat{u}_{rs} \quad (10.2.1)$$

则该公交线路上的等价旅行时间函数为:

$$W_{rs}(\hat{q}_{rs}) = W(\bar{q}_{rs} - q_{rs}) = D^{-1}(q_{rs}) = u_{rs}(\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs})$$

$$\text{即} \quad W_{rs}(\hat{q}_{rs}) = \frac{1}{\theta} \ln \frac{\bar{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}} + \hat{u}_{rs} \quad (10.2.2)$$

其中 D^{-1} 表示需求函数的反函数。

此路段旅行时间的示意图如图 10.1 所示。

在此路段旅行时间函数的控制下,路段上车流量与旅行时间之间有如图 10.2 所示的反馈关系。

在路网上的方式分担与交通分配组合模型的等效规划问题为:

$$\min Z(x, \hat{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\bar{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \hat{u}_{rs} \right) d\omega \quad (10.2.3a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} + \hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.2.3b)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.3c)$$

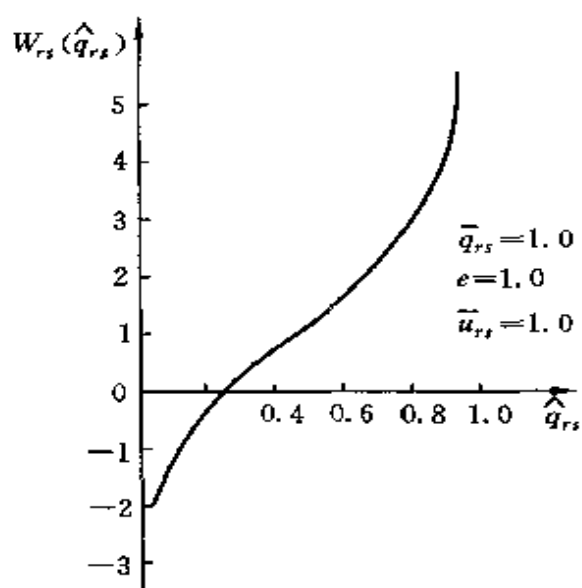


图 10.1 等价路段旅行时间

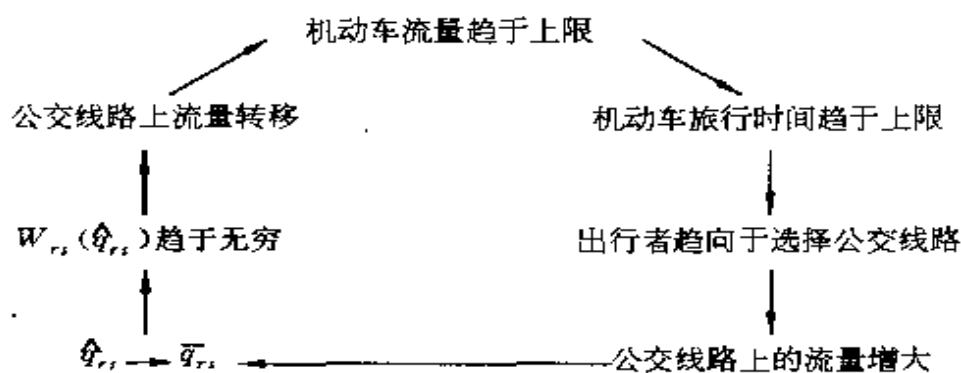


图 10.2 组合模型中机动车流量与旅行时间的关系图

$$0 < \hat{q}_{rs} < \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.2.3d)$$

此规划问题的解即为均衡状态的流量,并且在相应的 OD 对之间,公交线路上等价的旅行时间 $W_{rs}(\hat{q}_{rs})$ 应等于小汽车路网上最短的旅行时间,即

$$\frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}} + \hat{u}_{rs} = u_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.2.4)$$

上式亦可写成:

$$\hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + e^{\theta(\hat{u}_{rs} - u_{rs})}}$$

上式即为 Logit 模型的公式。因此,解式 10.2.3 所示的规划问题,所得的路网流量的方式分担满足 Logit 模型,而在基本路网上满足用户均衡条件,证明如下。

证明:① 等价性

数学规划式 10.2.3 的目标函数可分解为:

$$\min Z(x, q) = \min [Z_1(x) + Z_2(q)] \quad (10.2.5)$$

其中,
$$Z_1(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

$$Z_2(q) = \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} d\omega = \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} W(\omega) d\omega$$

此处,可以用 $x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}$ 的条件将 Z_1 表达为路径流量的函数,则规划式 10.2.3 的拉格朗日函数为:

$$L(f, q, u) = Z_1[x(f)] + Z_2(q) + \sum_{rs} u_{rs} (q_{rs} - \sum_k f_k^{rs}) \quad (10.2.6)$$

由于 $f_k^{rs} \geq 0, q_{rs} > 0$

可求拉格朗日函数对流量的极小值,式 10.2.6 的一阶条件为:

$$f_k^{rs} \frac{\partial L(f, q, u)}{\partial f_k^{rs}} = 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.7a)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.7b)$$

$$\frac{\partial L(f, q, u)}{\partial f_k^{rs}} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.7c)$$

$$q_{rs} \frac{\partial L(f, q, u)}{\partial q_{rs}} = 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.7d)$$

$$q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.7e)$$

$$q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.7f)$$

$$\frac{\partial L(f, q, u)}{\partial q_{rs}} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.7g)$$

式 10.2.7a 及 10.2.7c 中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(f, q, u)}{\partial f_l^{mn}} &= \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \left\{ Z_1[x(f)] + Z_2(q) + \sum_{rs} u_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \left\{ Z_1[x(f)] + \sum_{rs} u_{rs} \left(- \sum_k f_k^{rs} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10.2.8)$$

其中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \{ Z_1[x(f)] \} &= \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_a \int_0^{\sum_k \sum_r \sum_s f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}} t_a(\omega) d\omega \\ &= \sum_b \frac{\partial Z_1(x)}{\partial x_b} \cdot \frac{\partial x_b}{\partial f_l^{mn}} \\ &= \sum_b t_b \delta_{b,l}^{mn} = C_l^{mn} \end{aligned} \quad (10.2.9a)$$

C_l^{mn} 为连接 OD 对 m, n 间第 l 条路径上的旅行时间。

$$\therefore \frac{\partial f_k^{rs}}{\partial f_l^{mn}} = \begin{cases} 1, & \text{当 } r = m, s = n, k = l \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\therefore \frac{\partial}{\partial f_l^{mn}} \sum_{rs} u_{rs} \left(- \sum_k f_k^{rs} \right) = - u_{mn} \quad (10.2.9b)$$

$$\therefore \frac{\partial L(x, q, u)}{\partial f_l^{mn}} = C_l^{mn} - u_{mn} \quad (10.2.10)$$

式 10.2.7d 及 10.2.7f 中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(q, x, u)}{\partial q_{mn}} &= \frac{\partial L(q, u)}{\partial q_{mn}} \\ &= \frac{\partial}{\partial q_{mn}} \left[\sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} W(\omega) d\omega + \sum_{rs} u_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) \right] \\ &= -W(\hat{q}_{mn}) + u_{mn} \end{aligned} \quad (10.2.11)$$

式 10.2.7g 中,

$$\frac{\partial L(q, x, u)}{\partial u_{mn}} = \frac{\partial}{\partial u_{mn}} \sum_{rs} u_{rs} \left(q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) = q_{rs} - \sum_k f_k^{rs} \quad (10.2.12)$$

由 10.2.10~10.2.12 式, 式 10.2.7 可改写为:

$$f_k^r(C_k^r - u_{rs}) = 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.13a)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.13b)$$

$$C_k^r - u_{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.2.13c)$$

$$q_{rs}[-W(\hat{q}_{rs}) + u_{rs}] = 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.13d)$$

$$q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.13e)$$

$$-W(\hat{q}_{rs}) + u_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.13f)$$

$$q_{rs} - \sum_k f_k^r = 0 \quad \forall r, s \quad (10.2.13g)$$

由式 10.2.13a, 10.2.13b 及 10.2.13c 可知, 当连接 OD 对 r, s 的路径 k 上的流量 $f_k^r \geq 0$ 时, 有 $C_k^r - u_{rs} = 0$, 即 $C_k^r = u_{rs}$, 该路径上的旅行时间等于 OD 对 r, s 间的最短旅行时间; 反之, 若 $C_k^r - u_{rs} > 0$, 则路径上的流量 $f_k^r = 0$;

由式 10.2.13d, 10.2.13e 及 10.2.13f, 可知, 当 OD 对 r, s 间的出行量 $q_{rs} > 0$ 时, 有 $W(\hat{q}_{rs}) = u_{rs}$, 即公交线路上的等效旅行时间与小汽车最短出行时间相等;

式 10.2.13 即原规划问题中的流量约束式。

由上述证明和分析, 规划式 10.2.3 的解为在小汽车路网中满足用户均衡条件, 在小汽车出行与公共交通出行之间的方式分担满足 Logit 模型的均衡流量。

② 唯一性

目标函数中 $Z_1(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$ 的海赛矩阵为:

$$\nabla^2 Z_1(x) = \begin{bmatrix} \frac{dt_1(x_1)}{dx_1} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{dt_2(x_2)}{dx_2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \ddots & \\ \vdots & \vdots & & \frac{dt_A(x_A)}{dx_A} \end{bmatrix}$$

由于已规定各路段上旅行时间函数为增函数,此矩阵正定,所以 $Z_1(x)$ 为严格的凸函数;

在 $Z_2(q) = \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} W(\omega) d\omega$ 中, $W(\cdot)$ 为一单调的增函数,其积分为严格的凸函数,所以 $Z_2(q)$ 亦为严格凸函数;

可见,规划 10.2.3 式的目标函数为严格的凸函数,而其约束条件构成凸集。所以,此规划的解是唯一的。

本节所讨论的情况,其应用范围是比较有限的,因为大多数的公共交通使用的还是与小汽车相同的路网。因此,不同出行方式的车流间的相互影响是应该加以考虑的。

10.3 考虑方式间相互影响的组合模型

10.2 节中讨论了独立方式间方式分担与交通分配的组合模型,但这种模型的假设条件只有在公共交通使用的是与小汽车出行路网完全分离的路线(例如,地铁、轻轨或高架线等)时才能满足。在一般的公共交通线路网中,大部分的公共交通出行使用的路网与小汽车是相同的。这样,在两种出行的车流之间就必然存在着相互影响,因此考虑这种相互影响的模型及其解法具有更普遍的意义。

首先让我们考虑一个含有公共交通网络的、公共交通与小汽车间有相互影响的均衡问题。并且,对于公共交通网络的出行路径选择问题有如下几种考虑方法。

10.3.1 公交路网上的旅行费用

公共交通网络是由上下车站、行驶线路、换乘时的步行路段等组成的,如图 10.3 所示。相应地,在公共交通网络上的旅行时间也是与这几部分相联系的。

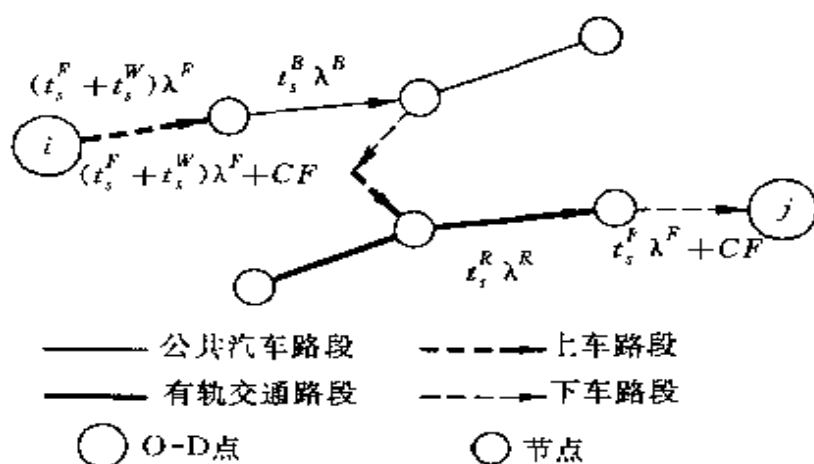


图 10.3 公共交通网络的组成

计算公共交通线路 s 的“广义旅行时间”可表达为:

$$U_s^M = \lambda^R t_s^R + \lambda^B t_s^B(x_u) + \lambda^F (t_s^{FB} + t_s^W(f_{l(s)})) + \lambda^F t_s^{FA} + CF \quad (10.3.1)$$

其中, $\lambda^R t_s^R$ 为轨道路段、 $\lambda^B t_s^B$ 为公共汽车路段、 $\lambda^F (t_s^{FB} + t_s^W(f_{l(s)}))$ 为上车路段、 $\lambda^F t_s^{FA}$ 为下车路段的旅行费用, λ 为对应于各种时间的的时间价值。

OD 对 $i-j$ 间公共交通的“广义旅行费用”为:

$$U_{ij}^M(T, C) = \sum_s \delta_{s,ij} U_s^M \quad (10.3.2)$$

其中, $\delta_{s,ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 OD 对 } i-j \text{ 之间的出行使用了公交线路 } s \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

10.3.2 路网上不同方式出行车流间无相互影响的情况

1. 思路及模型

首先,设在公交出行的路网上也遵循用户均衡的分配原则,即用户在选择公交线路出行时也是选用出行时间(广义旅行时间)最短的路线。

记 $\hat{x}_b, \hat{t}_b$ 为公交线路 b 上的流量和旅行时间,在分析混合交通

中,值得指出的是,此处的流量是人流量。

由于已假设出行方式间无相互影响,可将公共交通线路的旅行时间函数记为:

$$\hat{t}_b = \hat{t}_b(\hat{x}_b) \quad (10.3.3)$$

在式 10.1.2b 中,已给出了较适合于研究方式分担问题的 Logit 模型 $q_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + e^{\theta(u_{rs} - \hat{u}_{rs} - \phi_{rs})}}$ 。用 10.2 节中的方法,可将这一均衡问题的求解归结为一个数学规划问题,由式 10.1.2b 导出的 $W(\cdot)$ 公式为:

$$W_{rs}(\hat{q}_{rs}) = u_{rs}(q_{rs}) = \frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}} + \hat{u}_{rs} + \phi_{rs} \quad (10.3.4)$$

则此规划问题可表达为:

$$\begin{aligned} \min Z(x, \hat{x}, \hat{q}) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \phi_{rs} \right) d\omega \\ & + \sum_b \int_0^{\hat{x}_b} t_b(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (10.3.5a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.3.5b)$$

$$\sum_l \hat{f}_l^{rs} = \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.3.5c)$$

$$f_k^{rs}, \hat{f}_l^{rs} \geq 0 \quad \forall k, l, r, s \quad (10.3.5d)$$

$$x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (10.3.5e)$$

$$\hat{x}_b = \sum_l \sum_r \sum_s \hat{f}_l^{rs} \delta_{b,l}^{rs} \quad \forall b \quad (10.3.5f)$$

可证明此规划问题的一阶条件说明了在公共交通网络和小汽车出行网络上分别满足用户均衡状态。同时,也保证了两种出行方式出行量分布满足式 10.1.2b,即两种方式间接 Logit 模型分配交通量。

2. 解法及步骤

此问题可使用凸组合法求解,其主要步骤如下:

① 方向搜索

在第 n 步迭代时, 求解线性规划问题 10.3.6 式得到辅助流量。

$$\min Z^n(g, \hat{g}, \hat{v}) = \sum_{rs} \left[\sum_k C_k^{rs} g_k^{rs} + \sum_l \hat{C}_l^{rs} \hat{g}_l^{rs} + \sum_l \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}^n}{q_{rs} - \hat{q}_{rs}^n} + \psi_{rs} \right) \hat{g}_l^{rs} \right] \quad (10.3.6a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k g_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \sum_l \hat{g}_l^{rs} \quad \forall r, s \quad (10.3.6b)$$

$$g_k^{rs}, \hat{g}_l^{rs} \geq 0 \quad \forall k, l, r, s \quad (10.3.6c)$$

这个规划问题可通过将目标函数按 OD 对分解后, 对每一个 OD 对进行全有全无分配来解, 每个 OD 对间的最短路径按下式确定:

记小汽车最短出行时间为 u_{rs} , 公共交通网络上的出行时间为 $\hat{u}_{rs}$,

当 $u_{rs} < \hat{u}_{rs} + \frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}^n}{q_{rs} - \hat{q}_{rs}^n} + \psi_{rs}$ 时, OD 对 r, s 间的出行量 $\bar{q}_{rs}$ 分配到小汽车出行的最短路上;

反之, 若 $u_{rs} > \hat{u}_{rs} + \frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}^n}{q_{rs} - \hat{q}_{rs}^n} + \psi_{rs}$ 时, OD 对 r, s 间的出行量 $\bar{q}_{rs}$ 分配到公共交通线路出行的最短路上;

对所有 OD 对完成上述步骤后, 得到辅助流量 $\{y_a^n\}$ 。

② 步长的确定

同样的, 步长可解规划 10.3.7 式确定:

$$\begin{aligned} \min Z(\alpha) = & \sum_a \int_{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)}^{x_a^n} t_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}^n + \alpha(\hat{v}_{rs}^n - \hat{q}_{rs}^n)} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{q_{rs} - \omega} + \psi_{rs} \right) d\omega \\ & + \sum_b \int_0^{\hat{x}_b^n + \alpha(\hat{y}_b^n - \hat{x}_b^n)} \hat{t}_b(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (10.3.7a)$$

$$\text{约束条件} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (10.3.7b)$$

其它步骤同一般凸组合解法。

10.3.3 出行方式间有相互影响时

这种在路网上出行的公共交通工具与小汽车间有相互影响的状态是比较符合实际情况的状态。在考虑出行方式间的相互影响时,将小汽车流与公交车流视为在两个有相互影响的路段上行驶的车流,两种车流的旅行时间可以记为:

$$\text{小汽车出行: } t_a = t_a(x_a, \hat{x}_a) \quad \forall a, \hat{a} \quad (10.3.8a)$$

$$\text{公交车出行: } \hat{t}_a = \hat{t}_a(\hat{x}_a, x_a) \quad \forall \hat{a}, a \quad (10.3.8b)$$

研究表明,路网上小汽车的流量是影响旅行时间的主要原因,而在公交车辆方面,由于已假设乘客的人流量对公交车流量没有影响,公交车出行的数目是由已确定的出车频率决定的。因此,公交车流、小汽车流两者对出行时间的影响是不对称的。路段间具有不对称的相互影响的问题不存在直接的数学规划解法,所以本节讨论的问题应用对角化算法来求解,其中第 n 步迭代要解的子问题为:

$$\begin{aligned} \min \bar{Z}^n(x, \hat{x}, \hat{q}) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega, \hat{x}_a^n) d\omega \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \phi_{rs} \right) d\omega \\ & + \sum_a \int_0^{\hat{x}_a} \hat{t}_a(\omega, x_a^n) d\omega \end{aligned} \quad (10.3.9a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.3.9b)$$

$$\sum_l \hat{f}_l^{rs} = \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.3.9c)$$

$$f_k^{rs}, \hat{f}_l^{rs} \geq 0 \quad \forall k, l, r, s \quad (10.3.9d)$$

$$x_a = \sum_k \sum_r \sum_s f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (10.3.9e)$$

$$\hat{x}_a = \sum_i \sum_r \sum_s \hat{f}_i^{rs} \delta_{a,i}^{rs} \quad \forall a \quad (10.3.9f)$$

此问题的解法同路段间有相互影响时问题的解法相同。

此算法收敛准则随迭代次数的变化是单调递减且具有渐近性的。这种形式的收敛与凸组合法解用户均衡问题时收敛的形式相类似。在此算法中,每一步迭代都是解一个相应的用户均衡问题,由于在大规模路网中,解此用户均衡问题所需的计算量很大,而且是否迭代中的每一个用户均衡问题都能得到精确解也是整个算法得到最终均衡流量的前提条件呢?通过分析此算法的解题步骤,可以得出一些结论:

① 由于在每一次迭代中的用户均衡问题的约束条件都相同,因此在上一步迭代的均衡流必然是此次迭代的可行解。所以说,在两次迭代之间传递 $\{x^*\}$ 可行。

② 如前所述,这个算法收敛的形式与其中每个子问题中用户均衡问题的收敛形式相类似,因此可以说,随着迭代次数的增加,每两次迭代结果之间的差别是逐渐缩小的,也就是说,每个子问题中解决用户均衡问题的迭代次数也逐渐减少。相反地,如果确定每一次迭代中,凸组合法的迭代次数相同,那么,每一次凸组合法所给出的解的精确程度必然也逐渐提高。因此,此算法可以认为能够得到最终的均衡解。

考虑到采用此算法计算量大,加之前述收敛形式的特点,可将此算法加以简化和改进,主要目的是为了减少计算量。

改进算法的主要特点是,对每次迭代中的用户均衡问题都只进行一次迭代,即只进行一次全有全无分配。通过上面的分析,每次问题的解会逐渐接近,最终收敛到均衡状态的流量。简化方法的具体步骤如下:

- ① 初始化,令 $n=0$,确定一个初始的流量 $\{x^0\}$;
- ② 计算各路段的旅行时间 $t_a^n = t_a(x_a^n)$;

③ 确定搜索方向,在 $\{t_a^n\}$ 的路网上,进行全有全无分配,得到辅助流量 $\{y_a^n\}$;

④ 解一维优化问题确定步长 α ;

⑤ 更新流量 $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)$;

⑥ 收敛检验:满足收敛条件时,迭代结束;否则,返回②。

10.4 多出行方式中公共交通路线的选择

在 10.3 节中,公共交通路网上的路线选择原则是用户均衡,即满足 Wardrop 的第一定律,它规定了用户将选择出行时间最短的公交线路。但从实际工程的经验可知,公共交通路网上选择路线中有许多其它的决定因素,而这些因素又是难以用等价的数学规划方法来表达的。因此,在本节中首先讨论另外两种公共交通线路选择的方法,然后,讨论在模型构造中如何考虑这些路线选择的方式。

10.4.1 公交线路选择方法

采用某些手段可以考虑一些不易在优化模型中加以考虑的因素。比如,用时间价值概念,对换乘的步行路段给予较大的时间价值,就可以部分地将换乘问题合成到模型中。但是,仍然有一些选择路线的决定因素是难以全面地进行描述。如何比较符合实际情况地对公交线路的选择进行分析呢?下面主要介绍两种方法。

1. 考虑出行者信息掌握程度的路线选择

由于出行者对于路网信息不可能有非常全面的掌握,因此会出现这种情况:在出行前,用户会确定一系列的可能路线,然后,在车站视第一辆来车面定最终采取何种出行路线。

将用户的每一种可能的出行路线都称做一个“出行策略”,一个出行策略的执行的执行的结果就是使用户到达他的目的地。而某个特

定的用户所能从中选择的出行策略的数目,是由该用户对路网情况掌握的多少决定的。因此,为了使选择路径的方法更具有普遍性的意义,假设用户所得到的路网信息只是他在等车时所获得的那么多,换句话说,决定其出行策略的因素只有在出行过程中得到的信息。举例来说,对于图 10.4 所示的简单公交线路,一个出行者欲从 A 点到达 B 点,他所能采取的出行策略是:“在 1 和 2 之间乘坐先来的那路车;如果乘 1 线,则在 B 下车;如果乘 2 线,在 Y 点换乘 3 或 4 到 B ”。在这样的出行策略中,可以在每一个节点给出一个线路集以及与每条线路所对应的出行者的下车节点。

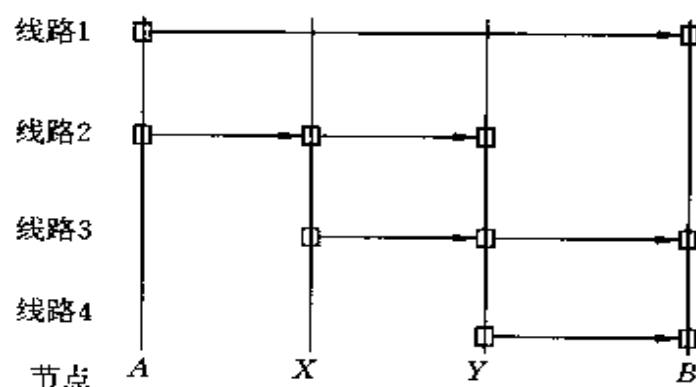


图 10.4 公共交通出行路线选择示意图

以上的考虑方法可总结描述为:

- ① 将 N 置于出行的起点;
- ② 在 N 点的路线集中乘坐最先到达的那一条线路;
- ③ 在预先已由路线确定的节点下车;
- ④ 若还未到达终点,则将 N 置于现在所在的节点并返回第 ②步;

反之,出行过程结束。

2. Volvo 公共交通规划模型

Volvo 模型中假设换乘次数为出行者选择的首要决定因素,

即当有多条供选择的出行路线时,首先要选用那些不需要换乘就可以直接到达目的地的线路,在没有直接连接该对线路的情况下,才考虑有一次换乘的路线,等等。当多条线路的换乘次数相等时,则根据各条线路出车的频率来确定各线路间出行量的分布。

10.4.2 在组合模型中非用户均衡公共交通线路选择

如本节所讨论的对公交线路的选择方法是难以在相应的等价数学规划中进行计算和分析,由于公共交通出行时间要受到公交车流和小汽车流的双重影响,可以通过把公共交通的网络作为外部的一个网络来解决问题。

如图 10.5 所示,在基本网络上各 OD 对之间以直接相连的等价公共交通线路来表示实际的公共交通网络对小汽车网络的流量的影响。

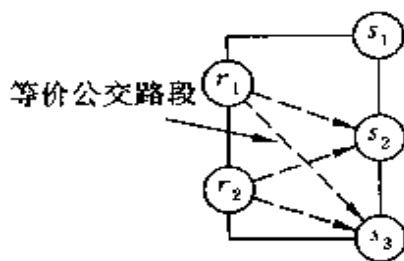


图 10.5 公共交通出行采用非用户均衡原则计算用超级网络示意图

设等价公共交通线路上的流量为 $\hat{q}_{rs}$, 其上的旅行时间为:

$$\hat{t}_{rs}(\hat{q}_{rs}, x, \hat{x}) = \frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}} + \phi_{rs} + \hat{u}_{rs}(x, \hat{x}) \quad (10.4.1)$$

同样地,由于小汽车流与公交车流之间相互影响不对称,此问题没有直接的等价数学规划解法,而应用对角化解法来求解,在第 n 步迭代时的子规划问题为:

$$\begin{aligned} \min Z(x, \hat{q}) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left[\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \phi_{rs} + \hat{u}_{rs}(x^n, \hat{x}^n) \right] d\omega \end{aligned} \quad (10.4.2a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} + \hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.4.2b)$$

$$f_k^n \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.4.2c)$$

$$0 < \hat{q}_{rs} < \bar{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.4.2d)$$

应当注意的是,式 10.4.2 中的 $\hat{u}_{rs}(x^n, \hat{x}^n)$ 为常量。

此算法的计算步骤为:

Step0: 给出一组超级网络上各路段的初始可行解,其中包括路段上的小汽车流量 $\{x_a^0\}$, 虚拟公共交通流量 $\{\hat{x}_b^0\}$ 以及公共交通流量 $\{\hat{q}_{rs}^0\}$, 并令 $n=0$;

Step1: 计算路网现有流量情况下的旅行时间:

$$\begin{aligned} t_a^n &= t_a(x^n) \\ \hat{t}_b^n &= \hat{t}_b(\hat{x}^n, x^n) \end{aligned}$$

由此计算: $\hat{u}_{rs}^n = \hat{u}_{rs}(x^n, \hat{x}^n)$;

Step2: 交通分配,在超级网络上进行全有全无分配,得到辅助流量;

Step3: 解式 10.4.3 的一维优化问题,得到步长 α :

$$\begin{aligned} \min Z(\alpha) &= \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} t_a(\omega) d\omega \\ &+ \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}^n + \alpha(\hat{v}_{rs}^n - \hat{q}_{rs}^n)} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \phi_{rs} + \hat{u}_{rs}^n \right) d\omega \end{aligned} \quad (10.4.3a)$$

$$\text{约束条件} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (10.4.3b)$$

Step4: 更新流量

$$\begin{aligned} x_a^{n+1} &= x_a^n + \alpha_n(y_a^n - x_a^n) \\ \hat{q}_{rs}^{n+1} &= \hat{q}_{rs}^n + \alpha_n(\hat{v}_{rs}^n - \hat{q}_{rs}^n) \end{aligned}$$

Step5: 如果 $(x^{n+1}, \hat{q}^{n+1}) \cong (x^n, \hat{q}^n)$, 迭代结束; 否则转向 Step 1。

此算法在均衡解处,小汽车网络的旅行时间和流量满足用户均衡原则,小汽车和公共交通出行之间的流量划分符合 Logit 模型,非用户均衡的公共交通分配模型用于公交网络上的流量分配。

10.5 模型应用中的几个主要问题讨论

10.5.1 方式间独立的组合模型

在这个模型中,各出行方式的旅行时间不受其它方式的车流量的影响,当我们研究的对象是轻轨、地铁或高架线等与路面上车流之间的方式分担时,可以应用此类模型。

1. 初始值的确定

在计算的过程中应注意,通常我们都是以一个各路段上流量为零的路网作为计算的初值,而在考虑方式分担的组合模型中,由于公共交通线路上的等价旅行时间由式 10.2.2 给出,因此,当 $\hat{q}_{rs}$ 为 0 时,无法继续计算,必须给出一个非零的初值;只要有一个非零的初值,在计算过程中就不会再出现零值,可以保证计算的顺利进行。

初值可以用下述方法确定:对公交线路,按 $\bar{q}_{rs} \frac{1}{1+e^{\theta(\bar{u}_{rs}-u_{rs})}}$ 计算初始公共交通线路上的 OD 间流量,并分配至公共交通路网的最短路上;然后,将 $(\bar{q}_{rs}-\hat{q}_{rs})$ 分配至小汽车路网的最短路上。

2. 迭代计算的方向搜寻步骤

可按两步骤法计算,求得辅助流量,其过程为:

- 找出小汽车和公共交通网络上当前的最短路径 $u_{rs}^n, \hat{u}_{rs}^n$;
- 根据当前的最短出行时间确定辅助流量:

$$\hat{v}_{rs}^n = \bar{q}_{rs} \frac{1}{1 + e^{\theta(\hat{u}_{rs}^n - u_{rs}^n + \phi_{rs})}} \quad (10.5.1a)$$

$$v_{rs}^n = \bar{q}_{rs} - \hat{v}_{rs}^n \quad (10.5.1b)$$

- 将式 10.5.1 计算出的 $v_{rs}^n, \hat{v}_{rs}^n$ 分配到最短路径上,得到辅助交通流模式 $\{y_a^n\}, \{\hat{y}_a^n\}$ 。

采用两步骤法的收敛速度要比用凸组合法求解快。

10.5.2 考虑方式间相互影响的组合模型

当我们考虑方式间的相互作用时,由于公共交通的出车频率和路线是基本固定的,因此,公共交通对小汽车的影响可以视为定值。所以,方式间的相互影响通常来说是不对称的,模型需使用对角化迭代算法求解。

在进行对角化迭代的过程中,要分清外层迭代和每一次外层迭代中的内层迭代。要注意在同一次外层迭代的各次内层迭代中,目标函数是不变的,也就是说,在同一次外层迭代中,在最短路径求解中计算 $t_a = t(x_a, \hat{x}_a)$ 时,只有 x_a 变化,而 $\hat{x}_a$ 则保持进入该次外层迭代时的数值,同样的,在计算步长时也是如此,这正是“对角化算法”这个名称的来源。

10.5.3 路段走行函数的确定

国外在求解此类模型时,通常使用 BPR 模型及该模型的扩展形式,其中的参数系根据国外的道路交通数据标定的。但是,对于我国的实际交通状况,这样的取值未必合理,需要进行实际调查和模型开发。例如,在区域规划中,可能取分段表达的走行时间计算式更为合适。

10.6 组合模型的其它形式及研究前景

到目前为止,针对不同研究项目的不同需要,已经开发了各种不同形式的组合模型。这些模型包括四阶段法中交通产生、交通分布、方式分担及交通分配中任意两个或多个阶段的组合。除了交通方式分担和交通分配组合模型外,还有交通分布与交通分配组合模型、交通产生与交通分布组合模型以及四阶段组合模型等。这些组合模型的提出和应用为交通规划的研究提供了新的思路和方

法。本节中将对这些模型作简单介绍。

在第9章及本章的分析和研究中可知,合理地在原路网上增设虚设路段并给予虚设路段以合适的走行时间函数后,即可在扩展后的路网上将原来较复杂的问题转化为简单的定需求问题或相应的对角化迭代进行求解。它在解决交通规划中一些问题上的优越之处是显而易见的。但由于在扩展路网时要增加一些路段,相应增加的计算工作量,尤其是在最短路计算中所增加的计算量是相当可观的。因此,采取什么方法进行计算也是由研究人员进行综合考虑的一项内容。

10.6.1 交通分布与交通分配组合模型

在这类问题中,各OD对间的出行量为变量,但各区产生的交通量总和是一定,且为已知的,即

$$\sum_r q_{rs} = O_s \quad \forall s \quad (10.6.1)$$

某些情况下,各区的出行吸引量也是一个已知的确定的常数,即:

$$\sum_r q_{rs} = D_s \quad \forall s \quad (10.6.2)$$

用户对于出行终点的选择确定了各OD对间的出行量,而这种选择的决定因素一般来说有两个,一为最短的出行时间,二为到达具有最大吸引力的终点。在这里,引入“吸引度” A_s 这个概念,以表示每一个OD分区 s 被选择为出行终点的可能性。为了实现上述的选择原则,所建立的数学规划模型以 $u_{rs} - A_s$ 作为目标函数,求其最小值。在平衡时应满足的条件有:路网上的流量符合用户最优的原则。根据定需求模型,可以得到此问题的数学规划表达方法:

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{rs} A_s q_{rs} \quad (10.6.3a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.6.3b)$$

$$\sum_s q_{rs} = O_r \quad \forall r \quad (10.6.3c)$$

$$f_k^{rs}, q_{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (10.6.3d)$$

可以证明,上述规划问题的一阶条件既包含了在路网上以通常意义的出行时间为基础的用户均衡,也包含了以 $u_{rs} - A_r$ 为基础的用户均衡。也就是说,它是一个出行分布与交通分配的均衡模型。

这个模型同前面叙述的其它模型一样,可以使用凸组合法求解,也可以用改变网络的表示方法,然后在增加了虚设路段的路网上进行较为简单的求解运算的方法来求解。

使用凸组合法时,只需注意此时的全有全无分配中最短路计算中的原则是使 $u_{rs} - A_r$ 最小,其它的步骤都与第8章中的方法相同。

使用改变网络表示法时,则需对每一出行起点 r 虚设一个对应的终点 r' ,增加网络上的每一个出行终点与每一虚设的终点间的虚设路段 sr' ,在此路段上的出行函数为 $-A_r$,如图 10.6 所示。

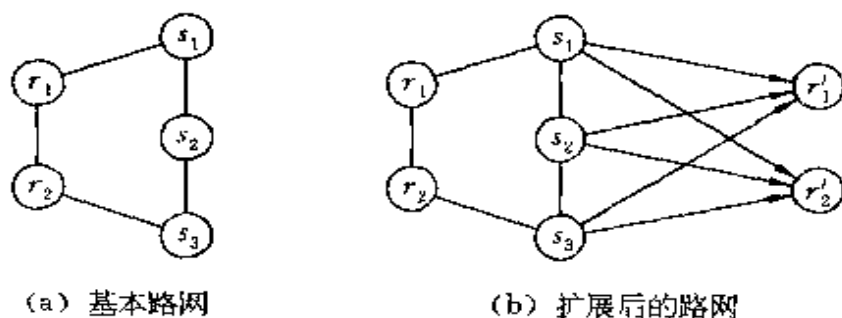


图 10.6 交通分布与交通分配扩展路网示意图

可见,增加的虚设路段的数目为实际出行起点数与实际出行终点数的乘积。在实际的较大规模的路网中,这个数目是相当可

观的。

某一分区 s 对于不同目的的出行者的吸引度是不同的,因此,吸引度这个概念应该表达为一个函数,而由此产生的各 OD 间的出行量 q_{rs} 也必然是一个变量,这个变量满足式 10.6.1 提出的条件。为使对每一个起点来说,方程式与变量的数目相等,只需使需求函数的形式能自动满足式 10.6.1 的约束即可。因此,常用的需求函数的形式为:

$$q_{rs} = O_r P_{rs}(u_r) \quad (10.6.4)$$

其中, $\sum_s P_{rs}(u_r) = 1$

与第 7 章所介绍的 Logit 模型相结合,需求函数可表示为:

$$q_{rs} = O_r \frac{e^{-\gamma(u_{rs} - A_s)}}{\sum_i e^{-\gamma(u_{ri} - A_i)}} \quad \forall r, s \quad (10.6.5)$$

其中, γ, A_i 可通过实际观测的数值得到。

考虑了变需求的数学规划表达式为:

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\gamma} \sum_{rs} (q_{rs} \ln q_{rs} - q_{rs}) - \sum_{rs} A_s q_{rs} \quad (10.6.6a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^r = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.6.6b)$$

$$\sum_s q_{rs} = O_r \quad \forall r \quad (10.6.6c)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad (10.6.6d)$$

同样,此优化式也可通过凸组合法和扩展原路网两种方法求解。在凸组合法中,最短路中时间的表达式为 $u_{rs} + \frac{1}{\gamma} \ln(q_{rs}) - A_s$,而在扩展路网(同图 10.6)中,只需将虚设的路段上的行为函数改为 $\frac{1}{\gamma} \ln(q_{rs}) - A_s$ 即可。

在讨论上述模型时,我们假定各小区的发生交通量为已知,剩

下的问题是确定这些发生交通量是如何在各小区间分布的。我们可以用重力模型描述这种分布。设需求函数表达式为：

$$q_{rs} = K O_r D_s f(u_{rs}) \quad (10.6.7)$$

为使上述重力模型满足约束条件式 9.5.1 和式 9.5.2, 可引入系数 A_r, B_s , 则将式(10.6.7)改写为：

$$q_{rs} = A_r B_s O_r D_s f(u_{rs}) \quad \forall r, s \quad (10.6.8a)$$

$$A_r = \frac{1}{\sum_s B_s D_s f(u_{rs})} \quad \forall r \quad (10.6.8b)$$

$$B_s = \frac{1}{\sum_r A_r O_r f(u_{rs})} \quad \forall s \quad (10.6.8c)$$

如果在出行分布中使用熵最大的概念, 则可得到交通分布与交通分配组合模型的规划问题为：

$$\min Z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\xi} \sum_{rs} (q_{rs} \ln q_{rs} - q_{rs}) \quad (10.6.9a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^r = q_r \quad \forall r, s \quad (10.6.9b)$$

$$\sum_s q_{rs} = O_r \quad \forall r \quad (10.6.9c)$$

$$\sum_r q_{rs} = D_s \quad \forall s \quad (10.6.9d)$$

$$f_k^r \geq 0 \quad (10.6.9e)$$

在 10.6.9a 式中, 第二项表示了符合熵最大原则的分布函数, ξ 为一个根据实际观测数据标定的参数。

利用 10.6.9 式所示的数学规划得到的均衡流在路网上满足用户均衡条件, 而 OD 对间的流量满足各约束条件及分布模型的要求。

熵模型的提出是建立在参照某些物理现象和公式的基础上, 而交通系统的用户对于出行的选择(包括起、终点, 出行方式、路线

等的选择)完全是一种社会经济现象,那么,这种在社会现象与物理现象之间进行模仿的模型是否合理?经过分析,对于工作出行来说,其起点和终点是基本固定的,因此对发生总量和吸引总量进行双约束,不会导致太大的偏差;另一方面,对于非工作出行,一般出行者是在经过比较和选择后决定出行行为,而且同时也确定了出行的终点。所以,其出行的起、终点处的发生量、吸引量也是受到约束的,并且,在组合分布与交通分配模型中,正是同时考虑了出行者在出行前对于出行终点及出行路线的综合选择。

10.6.2 方式分担、交通分布、交通分配组合模型

在这类组合模型中,所有出行方式的总 OD 量也不是常数,可按下述计算方法计算:

$$\bar{q}_{rs} = O_r \frac{e^{-\gamma(u_{rs} - A'_s)}}{\sum_i e^{-\gamma(u_{ri} - A'_i)}} \quad (10.6.10)$$

其中, A'_s 为某一 OD 对中终点 s 对起点 r 的吸引度。

当假设公共交通路网上各 OD 对 r, s 间的出行时间固定时,可将 r, s 间的吸引度扩展到包含 r, s 间公共交通出行的时间,表示为 A_{rs} ,则式 10.6.10 变为:

$$\bar{q}_{rs} = O_r \frac{e^{-\gamma(u_{rs} + \hat{u}_{rs} - A'_s)}}{\sum_i e^{-\gamma(u_{ri} + \hat{u}_{ri} - A'_i)}} \quad (10.6.11)$$

起点 r 处的出行量 O_r 也可以是一个变量,以函数形式表达:

$$O_r = D_r(\lambda_r) \quad (10.6.12)$$

其中, λ_r 为出行起点 r 与其相对应的虚设终点 r' 之间的最短交通时间。

由于在模型中假设了公共交通时间是一定的,而小汽车出行时间却与两种车流量有关而导致了规划问题 Jacob 矩阵的不对称(当然,即使不假设公共交通出行时间一定,公共交通工具与小汽

车之间的相互影响也肯定是不对称的), 因此, 这个模型没有等价的直接的数学规划式, 而必须通过对角化的多次迭代求解。对于交通分布、交通方式分担、交通分配组合模型, 在第 n 次迭代时要求解的规划问题为:

$$\begin{aligned} \min Z(x, \hat{q}, \bar{q}) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \phi_{rs} + \hat{u}_{rs} \right) d\omega \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\bar{q}_{rs}} \left(\frac{1}{\gamma} \ln \omega - A_{rs} \right) d\omega - \sum_{rs} \int_0^{\bar{O}_r} D_r^{-1}(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (10.6.13a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_k f_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs} \quad \forall r, s \quad (10.6.13b)$$

$$\sum_s \bar{q}_{rs} = O_r \quad \forall r \quad (10.6.13c)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad (10.6.13d)$$

$$0 < \hat{q}_{rs} < \bar{q}_{rs} \quad (10.6.13e)$$

$$O_r \leq \bar{O}_r \quad (10.6.13f)$$

其中 $\bar{O}_r$ 为发生交通量的上限值。

与此问题相应的扩展后的路网见图 10.7, 由前面的分析可知, 包括三类的虚设路段: 一类代表各 OD 对间等效的公共交通线路, 一类是连接各出行终点与各虚设终点的路段, 一类是连接出行起点与其相应的虚设终点的路段。在这三类虚设路段上的等价走行时间分别为:

$$\frac{1}{\theta} \ln \frac{\hat{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}} + \phi_{rs} + \hat{u}_{rs},$$

$$\frac{1}{\gamma} \ln \bar{q}_{rs} - A_{rs},$$

$$D_r^{-1}(\bar{O}_r - e_r)。$$

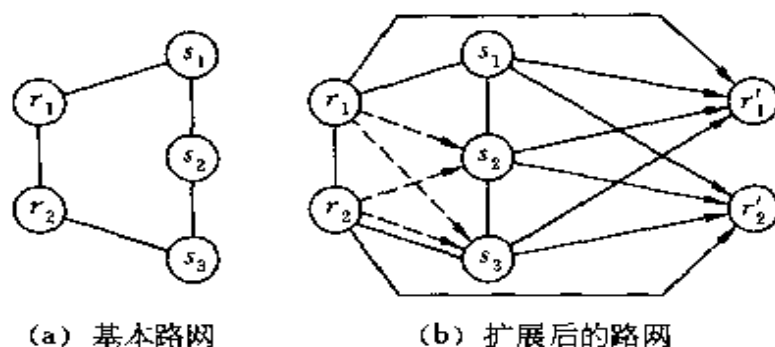


图 10.7 交通分布、方式分担、交通分配组合模型扩展路网示意图

10.6.3 交通发生、交通分布、方式分担与交通分配组合模型

在这个将四个规划阶段综合考虑的模型中,也采用等效数学规划的方式对模型进行计算,其中各阶段的分模型如下:

1. 交通发生

记 i 区所发生的交通量是 G_i , 则

$$\begin{aligned} G_i &= \alpha S_i + \sum_l \alpha_l f_l(E_{il}) \\ &= \alpha S_i + E_i \end{aligned} \quad (10.6.14)$$

其中, E_{il} : 影响 i 区出行量的第 l 个社会经济因素;

$f_l(E_{il})$: 确定 l 因素对 G_i 影响的函数;

E_i : L 个影响因素对 G_i 的综合作用;

S_i : i 区的可达性,它是对交通系统的服务水平及社会经济系统吸引力的一个综合评判指标,可由下式计算:

$$S_i = \ln \sum_j e^{V_{ij}} \quad (10.6.15)$$

其中, j : 由 i 可达的终点;

V_{ij} 可由 i, j 点间的用户觉察费用 u_{ij} 表达(例如,旅行时间):

$$V_{ij} = -\theta u_{ij} + A_j \quad (10.6.16)$$

其中, θ : 常数;

A_j : 某些社会经济因素对终点 j 吸引力的影响。

则式 10.6.15 可表示为:

$$S_i = \max \left(0, \ln \sum_j e^{-\theta u_{ij} + A_j} \right) \quad (10.6.17)$$

2. 交通分布、方式分担与交通分配

分布量由 Logit 模型给出:

$$q_{ij} = O_i \frac{e^{-\theta(u_{ij} + A_j)}}{\sum_k e^{-\theta(u_{ik} + A_k)}} \quad (10.6.18)$$

方式分担和交通分配阶段,均假设出行者选择费用最低的方式和路线出行。即,最终的路段交通量及相应的旅行时间符合 Wardrop 原则。

3. 组合模型的等价规划问题

在此处,引入几个表示符号:

D_i : 由 i 可达的终点 j 的集合;

P_{ij} : i - j 间简单路(无重复路段)的集合。

由上述讨论,最后得到:

$$\min Z(S, X) = J(S) + \Psi(Q) + \Phi(X) \quad (10.6.19a)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_j q_{ij} = aS_i + E_i \quad \forall i \quad (10.6.19b)$$

$$\sum_k f_k^j = q_{ij} \quad \forall i, j \quad (10.6.19c)$$

$$S_i \geq 0 \quad (10.6.19d)$$

$$q_{ij} \geq 0 \quad (10.6.19e)$$

$$x_a = \sum_k \sum_i \sum_j f_k^j \delta_{a,k}^j \quad (10.6.19f)$$

其中,

$$J(S) = \frac{1}{\theta} \sum_i \left[\frac{a}{2} S_i^2 + aS_i - (aS_i + E_i) \ln(aS_i + E_i) \right]$$

$$\Psi(Q) = \frac{1}{\theta} \sum_i \sum_{j \in D_i} [q_{ij} \ln q_{ij} - A_j q_{ij} - q_{ij}]$$

$$\Phi(X) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega$$

解此规划问题也包括方向搜索、更新流量等步骤。其中主要的工作量也还是最短路搜索,具体为:

- ① 初始流量 x_a^0 , 设 $i=1$;
- ② 寻找路网中由 i 至各 $j \in D_i$ 间的最短路 u_{ij} ;
- ③ 计算 $w_{ij} = \frac{1}{\theta} (\ln q_{ij} - A_j) + u_{ij}$, 并确定 m 使 $w_{im} = \min_{j \in D_i} (w_{ij})$;
- ④ 计算 $C_i = \frac{1}{\theta} [S_i^n - \ln(\alpha S_i + E_i)]$;
- ⑤ 当 $i < I$ 时, 令 $i = i + 1$, 返回 2;
- ⑥ 当 $i = I$ 时, 解式 10.6.19 的规划问题, 找到可行方向, 并按前面各章中所说明的程序进行迭代。

上述四阶段组合模型可简称为 STEM (simultaneous transportation equilibrium model), 这个模型已有应用于实际路网的实例。在该例中, STEM 用于分析 Austin, Texas 的交通系统, 并获得了良好的收敛性能, 而且其计算时间与计算定需求问题相近似, 显示了该模型在实践中的可行性。

组合模型是交通规划中颇具生命力的一种模型形式, 它的形式是多种多样的, 而且在每种形式之中都包含着一些对路网行为的假设。因而可以说, 对于组合模型形式的选择, 就要由交通系统的分析者, 根据实际路网的情况, 挑选合适的模型或是对现有的模型及其解法作出相应的修正。总之, 实际工作中主要的任务应该是一方面保证计算的可行性, 考虑工作量的可接受, 另一方面则是要尽量地把实际工程的情况反应在模型之中。

11 交通需求快速预测模型

传统的交通需求模型虽然精度比较高,但需要的数据量大,建模和标定的过程也很复杂。当我们手中拥有的信息量不足或时间有限时,就有必要寻求一些新的模型,尽可能地利用较少的数据,简便快捷地处理问题,以满足不同层次交通规划的需要。下面我们将概括地介绍一些交通需求快速预测模型,总的出发点是尽可能充分利用现有数据,尽可能迅速地得出分析结果。

11.1 通过路段交通量推算 OD 矩阵

此方法我们在本书的第 5 章中做过介绍,这里从对交通需求进行快速预测的角度做简要概括。传统的预测 OD 矩阵的方法需要大量的基础数据,人、财、物消耗很大。在发展中国家,交通设施和土地利用状况日新月异,花费很大代价得来的数据生命周期却很短,投入产出比不尽合理。

另一方面,路段交通量在很大程度上反映了 OD 间的出行情况。目前,路段交通量的自动采集技术使得数据采集成本大大降低,时效性大大提高,通过路段交通量反推 OD 矩阵,相对于传统的方法有着方便、快捷、低廉的优点,实用价值很高。

11.1.1 理论基础

设 V_a 为路段 a 的流量, T_{ij} 为 i, j 小区间的出行量, P_{ij}^a 为 i, j 间通过路段 a 的出行比例, 则路段交通量与路径交通量之间的基本关系式为:

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \quad (0 \leq P_{ij}^a \leq 1) \quad (11.1.1)$$

理论上讲, 只要我们拥有足够多的路段交通量, 总可以通过解联立线性方程组来获得 T_{ij} 。但对于一个实际的路网, 路段交通量的数目常常远远小于待求的 T_{ij} 数量, 这也就意味着由于信息不足, 这个线性方程组将会有多组可行解, 这时问题就转化为如何在众多的可行解中, 选择一个最能反映实际情况的 OD 分布矩阵。

目前有两种解决的办法。

① 结构化方法(structured method)

在这种方法中, 预先赋予 T_{ij} 以某种结构, 通常以重力模型或机会模型的形式表达出来, 在这种结构控制下的一组 T_{ij} 中, 可以满足流量关系 11.1.1 式的, 即为最终的满意解, 其实质就是根据已往的经验, 弥补现在信息的不足。

② 非结构化方法(unstructured method)

这种方法的出发点在于: 假定 OD 矩阵的分布是满足熵最大化原理, 或极大似然原理的, 以此追加所需的信息。这时流量关系 $V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$ 成为目标函数的约束条件, 所求得的最优解即是所需的 OD 分布矩阵 T_{ij} 。

11.1.2 路线选择和矩阵估计

在进一步介绍上述两种方法的细节之前, 有必要对路径选择率(P_{ij}^a 的确定)和矩阵估计(T_{ij} 的确定)的相互关系作一说明。

P_{ij}^a 的确定过程,实质上是路网分配的过程。根据现有理论,可以把 P_{ij}^a 的计算方法分为两类:

① 比例分配法(proportional assignment)

这种方法认为 P_{ij}^a 与流量 V_a 无关,即可以用全有全无法(all or nothing)或概率分配法(stochastic assignment)来确定 P_{ij}^a 。也就是说,在这种情况下,矩阵估计与路线选择是两个相互独立的过程,在 $V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$ 中, P_{ij}^a 可以作为与 T_{ij} 无关的已知量出现,这使问题得到了相当的简化。

② 非比例分配法(non-proportional assignment)

在路网分配中,忽略拥挤对行走时间的影响是不合理的。因此,非比例分配法用平衡分配(user equilibrium assignment)和概率用户平衡分配(stochastic user equilibrium assignment)来确定 P_{ij}^a ,这时 P_{ij}^a 的确定过程和 T_{ij} 的确定过程相互联系起来,反映了交通拥挤对行走时间的影响,比较接近实际情况。

在下面论述的几种方法里,一般按比例分配法来求解 P_{ij}^a ,这使问题得到了简化。

11.1.3 通过路段交通量进行模型估计

(transport model estimation from traffic counts)

这部分内容与上述的结构化方法是相对应的,选定 T_{ij} 的结构如何将直接关系到标定的复杂程度和最终模型的精确度。

(1) 基本的重力模型结构

设 P_i 、 P_j 为小区 i 、 j 的人口总数, d_{ij} 为 i 、 j 小区间的距离,可以简单地认为:

$$T_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{d_{ij}^2} \quad \alpha: \text{待定参数} \quad (11.1.2)$$

$$\therefore V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$$

$$\therefore V_a = \sum_{ij} \frac{\alpha P_i P_j P_{ij}^a}{d_{ij}^2} = \frac{\alpha \sum_{ij} P_i P_j P_{ij}^a}{d_{ij}^2} \quad (11.1.3)$$

在上式中, α 是唯一的未知量, 通过简单的标定技术, 即可定出合理的 α 值, 从而得到在这种模型结构下, 满足流量关系的 T_{ij} 。

这是一个非常粗糙的模型, 但计算过程反映了通过路段交通量进行模型估计的基本思路。更进一步的工作只是在于如何构造更精确的模型, 如何进行更合理的标定工作。

(2) 修正重力模型结构

为了使模型更能反映实际情况, 除人口之外, 还应考虑就业水平、工业区分布、商业区大小等对交通的发生、吸引有显著影响的因素, 以 O_i, D_j 来表示综合考虑各因素后 i 小区总的交通发生量和 j 小区总的交通吸引量, 于是有

$$T_{ij} = \frac{\alpha O_i D_j}{d_{ij}^2} \quad (11.1.4)$$

如果把交通出行按出行目的划分成 k 类:

$$T_{ij} = \sum_k T_{ij}^k = \sum_k \frac{\alpha_k O_i^k D_j^k}{d_{ij}^2} \quad (11.1.5)$$

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a = \sum_k \sum_{ij} P_{ij}^a \frac{\alpha_k O_i^k D_j^k}{d_{ij}^2} \quad (11.1.6)$$

$$\text{令 } G_{ij}^k = \frac{O_i^k D_j^k}{d_{ij}^2} \quad (11.1.7)$$

$$V_a = \sum_k \alpha_k \sum_{ij} P_{ij}^a G_{ij}^k \quad (11.1.8)$$

$$\text{令 } x_k = \sum_{ij} P_{ij}^a G_{ij}^k$$

$$\text{于是有 } V_a = \sum_k \alpha_k x_k \quad (11.1.9)$$

设 V_a' 是一组观测值, ϵ_a 是误差项 (用 α_0 表示 ϵ_a), 则

$$V_a' = V_a + \epsilon_a = \sum_k \alpha_k x_k + \epsilon_a = \alpha_0 + \sum_k \alpha_k x_k \quad (11.1.10)$$

显然,我们可以方便地利用最小二乘法标定 α_k ,以最终确定 T_{ij} 。

仔细观察上面的模型,可以发现当 O_i 、 D_j 扩大一倍时, T_{ij} 的增大不止一倍。为了弥补这一缺陷,对该模型可做进一步的修正。

$$T_{ij} = \sum_k \alpha_k O_i^k D_j^k A_i^k B_j^k f_{ij}^k$$

其中, A_i^k 、 B_j^k 为平衡因子, $f_{ij}^k = -\beta_k C_{ij}^k$ 为交通阻抗函数, α_k 、 O_i 、 D_j 含义同上。这时

$$\begin{aligned} V_a &= \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \\ &= \sum_k \sum_{ij} P_{ij}^a (\alpha_k O_i^k D_j^k A_i^k B_j^k f_{ij}^k) \end{aligned} \quad (11.1.11)$$

在这种情况下,需要标定的量很多,对标定技术提出了更高的要求。

(3) 重力-机会模型结构(gravity-opportunity model)

与重力模型(gravity model)对等的有介入机会模型(intervening opportunities model),它们各有优缺点,把这两种模型综合在一起,就可以形成一种新的结构:重力-机会模型结构,以期互补不足,更精确地描述实际问题,这时重力模型和机会模型均为这种新模型的特殊情况。

引入

$$\delta_{dj} = \begin{cases} 1 & \text{各目的地按到 } i \text{ 的距离由近到远排序,} \\ & \text{如果目的地 } j \text{ 恰好排在第 } d \text{ 个位置} \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases}$$

δ_{dj} 形成一个与 T_{ij} 同行同列的 0-1 矩阵,设其逆矩阵为 $(\delta_{dj})^{-1}$ 。

对 T_{ij} 进行矩阵变换, $Z_{id} = \sum_j [\delta_{dj} T_{ij}]$ 得到机会出行矩阵(ordered opportunities trip matrix) Z_{id} , 显然 $T_{ij} = \sum_d [(\delta_{dj})^{-1} Z_{id}]$ 。

值得注意的是,这种变量可以对任意以 OD 矩阵 T_{ij} 为基础的

变量进行,例如费用矩阵(cost matrix)等。

引入 Box-Cox 变换,对变量 y 有

$$y^{\tau} = \begin{cases} (y^{\tau} - 1)/\tau & \tau \neq 0 \\ \log y & \tau = 0 \end{cases},$$

Box Cox 逆变换 $y^{1/2} = \begin{cases} (y^{\tau} - 1)^{1/2} & \tau \neq 0 \\ \exp y & \tau = 0 \end{cases}.$

引入凸组合

$$y^{(\tau, \mu)} = \mu y^{\tau} + (1 - \mu) y^{\frac{1}{\tau}} \quad 0 \leq \mu \leq 1$$

于是 GO 模型可表达为:

$$T_{ij} = \sum_k [\alpha_k O_i^k D_j^k A_i^k B_j^k f_{ij}^k] \quad (11.1.12)$$

其中 $f_{ij}^k = \sum_d [\delta_{dj}^{-1} F_{id}^k] \quad (11.1.13)$

$$F_{id}^k = \left(\sum_p U_{ip}^k \right)^{\tau, \mu} - \left(\sum_p U_{ip}^k \right)^{\tau, \mu} \quad (11.1.14)$$

$$U_{ij}^k = \exp[(1 - \tau)\gamma_m \log D_{pk} - \beta_m C_{ip}] \quad (11.1.15)$$

$$D_{dk} = \sum_j [\delta_{dj} D_j^k] \quad (11.1.16)$$

当我们将其中的参数 τ, μ 赋予不同的值时,GO 模型便可以转化为重力模型(gravity)、纯对数机会模型 LO(pure logarithmic-opportunity)和纯指数机会模型 EO(pure exponential-opportunity),这是一个囊括了各种可能情况的最一般的表达式。

在 GO 模型下,参数的标定工作要求比较高,常用的方法有:非线性最小二乘法 NLLS(non-Linear least squares)、加权非线性最小二乘法 WNLLS(weighted non-linear least squares)和极大似然估计法 ML(maximum likelihood)。

(4) 直接需求模型结构(direct-demand model)

以直接需求模型为基础,利用已知流量对其中的参数进行标定,也可以获得满意的结果。这种方法的优点在于:标定后的直接

需求模型,也可以用来做预测。

11.1.4 通过路段交通量直接推求 OD 矩阵

这部分内容是与非结构化方法相对应的。

1. 基本的熵最大化矩阵估计模型(maximum entropy matrix estimation, 简称 ME2)

这种模型的理论基础为:根据熵最大化原理, T_{ij} 的分布应使熵函数取最大值,所以在满足流量约束关系的可行矩阵中,熵值最大的即为最满意解。即

$$\begin{aligned} \max S(T_{ij}) = & - \sum_{ij} (T_{ij} \log T_{ij} - T_{ij}) \quad (11.1.17) \\ & \begin{cases} V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a = 0 \\ T_{ij} \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

求得的最优解: $T_{ij} = \exp(-\tau_a \sum_a P_{ij}^a) \tau_a$ 为拉格朗日乘子

$$\text{令} \quad X_a = \exp(-\tau_a) \quad (11.1.18)$$

$$\text{则} \quad T_{ij} = \prod_a X_a^{P_{ij}^a} \quad (11.1.19)$$

如果幸运地,我们拥有一个样本矩阵 t_{ij} ,则可进一步改进模型为

$$\begin{aligned} \max S_1(T_{ij}/t_{ij}) = & - \sum_{ij} (T_{ij} \log T_{ij}/t_{ij} - T_{ij} + t_{ij}) \\ & (11.1.20) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a = 0 \\ T_{ij} \geq 0 \end{cases}$$

求得的最优解

$$T_{ij} = t_{ij} \prod_a X_a^{P_{ij}^a} \quad (11.1.21)$$

当样本矩阵 t_{ij} 为单位矩阵时,式 11.1.21 退化为式 11.1.19。

理论上讲,只要按熵函数分别计算出满足流量约束关系的可行矩阵的熵值,选取最大,即可获得最优解。但进行实际的工作时,可行解的数目非常多,这样的解决办法是行不通的。通常,利用多比例法(multiproportional approach)进行操作,经过一系列连续的迭代过程,不断地对样本矩阵进行修正,直至矩阵产生的路段交通量与观测到的交通量充分接近为止。在多比例法中, X_a 有了它的实际意义,即实际观测到路段 a 的交通量与模型矩阵产生的路段 a 的交通量的比值。而一系列的迭代过程也可以认为是使各路段对应的 X_a 不断向 1 逼近的过程。

2. ME2 的几个特点

第一:将熵函数进行泰勒展开,可知 $\max S_1$ 等价于

$$\min S_2(T_{ij}/t_{ij}) = \frac{0.5(T_{ij} - t_{ij})^2}{T_{ij}} \quad (11.1.22)$$

即熵最大化意味着满足约束条件的 T_{ij} 与 t_{ij} 差别最小化。当没有样本矩阵或认为样本矩阵为单位阵时,熵最大化也可以理解为满足约束条件的 T_{ij} 尽可能地均匀分布,这实质上是 ME2 局限性之一。

第二:ME2 的特殊形式带来了一个便利条件,正如路段交通量信息 $V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$ 以约束条件的形式出现一样,如果我们手中拥有的其它信息也可以用线性约束的形式表达出来,则也可类似地引入模型中,这无疑会有助于提高矩阵推求的精度。例如,利用公交车的收费系统可以得到乘客的数目和乘客出行费用分布 TLD(trip length distribution),如果把 TLD 按出行费用划分为若干区段(cost bins),则落在每个区段内的出行数,以及这些出行数占总出行数的比例可以很方便地获得,而且这些信息对我们得到精确的 T_{ij} 具有很高的价值。

例如,引入 $\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{当 } i, j \text{ 之间的出行费用落在第 } k \text{ 个 TLD 区段内} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$

$$\text{于是有} \quad \frac{1}{T} \sum_{ij} T_{ij} \delta_{ij}^* = P_k \quad (11.1.23)$$

其中, T : 总出行费用;

P_k : TLD 中第 k 个区段内出行数占总出行数的比例。

这样就把有价值的信息转化为可以应用的约束条件。类似地, 还可以引入更多的信息, 以使最终的 T_{ij} 更能反映实际的情况。这是 ME2 的特殊形式带来的便利条件。

ME2 的形式也允许引入不等式约束, 以便考虑更多的信息, 例如, 当我们不知某条路段的确切流量, 却知道它的最大通行能力 Q_a 时, 可表达为:

$$\sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \leq Q_a \quad (11.1.24)$$

如果只知道 j 小区的最大吸引量 D_j' 而不清楚它确切的吸引量, 也可类似地写作:

$$\sum_i T_{ij} \leq D_j' \quad (11.1.25)$$

虽然引入不等式约束, 对模型算法提出了更高的要求, 但毕竟为我们提供了一种解决问题的途径。

第三: 从 ME2 的最优解的形式 $T_{ij} = t_{ij} \prod_a X_a^{\alpha_{ij}}$ 可以看出, 当样本矩阵 t_{ij} 中有一项为 0 时, 由于其连乘积的形式, 在 T_{ij} 中的相应项也会是 0, 这无疑是 ME2 的一个缺陷, 但只要在 t_{ij} 的“零”项中植入一个很小的数, 经过若干次的迭代, 就可获得满意的结果, 这样使得这个缺陷看起来微不足道了。

3. 路段交通量和矩阵估计 (traffic counts and matrix estimation)

$V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$ 作为最基本的关系式有着举足轻重的地位。值得疑问的是: 是否任意一组采集来的流量值都有实际的意义, 都可以用来推求矩阵。下面从相关性和相容性两个角度对流量中可能

存在的问题以及解决的方法作一简要介绍。

第一,相关性(Independence)。

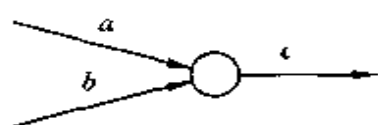


图 11.1 路段交通量之间的相关性

采集到的一组路段交通量,总有一些并不是彼此独立的,正如图 11.1 所示, a 、 b 、 c 中只有两个是真正线性独立的一样。

所以要把采集到的数据进行整理,去掉线性相关项,使每一项都真正具有实际的意义,以节约机时。这项工作并不复杂。

第二,相容性(Inconsistency)。

对路网中任意一个节点,其流入量应等于流出量,但在路段交通量的采集过程中,常常会由于采集时点不一致,存在计算误差等原因,使得一些节点的流入 $\neq$ 流出,称作流量水平上的不相容。

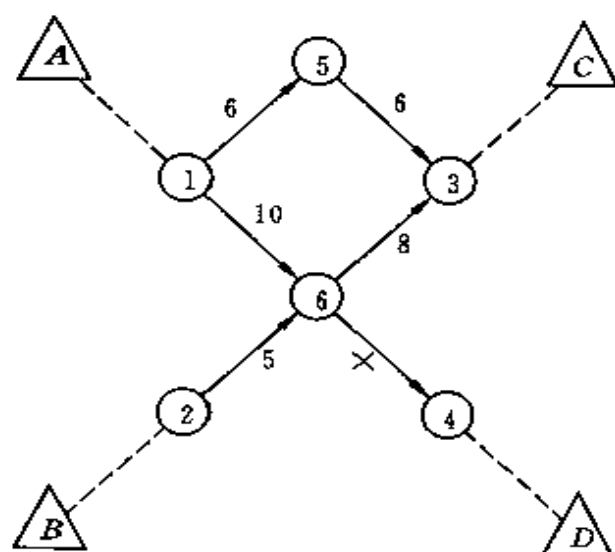
例如图 11.2(a)中,若 $x = 8$,则对节点 6 来说,流入量为 $10 + 5 = 15$,流出量为 $8 + 8 = 16$,显然是无法协调的。

解决的办法,可以有

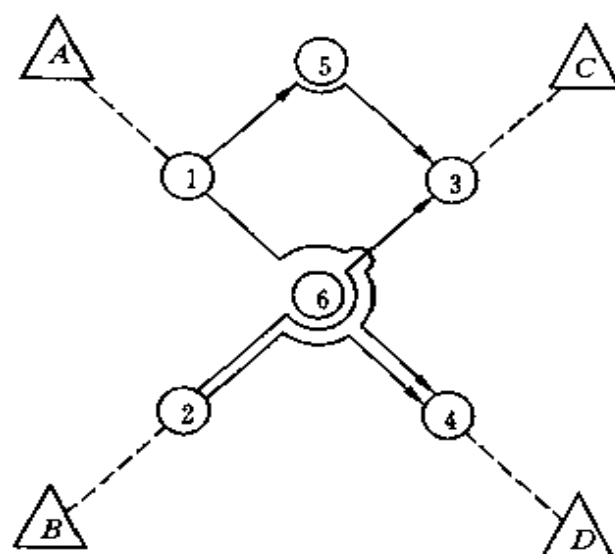
- $1 \rightarrow 6$ 或 $2 \rightarrow 6$ 的路段交通量加 1;
- $6 \rightarrow 3$ 或 $6 \rightarrow 4$ 的路段交通量减 1;
- $1 \rightarrow 6$ 和 $2 \rightarrow 6$ 的路段交通量分别加 0.25, $6 \rightarrow 3$ 和 $6 \rightarrow 4$ 的路段交通量分别减 0.25;
- 如果认为流量是符合泊松分布的随机流量,那么观测到的数据只不过是一组样本数据,不必强求其必须相容。依据此样本,通过极大似然估计,即可求出改进的、相容的一组流量。相对以上三种方法,这种方法更具优越性。

总之,流量水平上的相容性只与交通量本身有关,可以通过人为的修正,方便地消除。

除流量水平上的相容性以外,还存在路线流量水平上的相容性的问题。



(a)



(b)

图 11.2 相容性说明

由 $V_a = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a$ 可以看出,不但要求 V_a 之间彼此协调, V_a 与 P_{ij}^a 之间也必须保持一致,才能得出合理的 T_{ij} 。

在比例分配下, P_{ij}^a 是按一定的路网分配原理忽略拥挤的影响先于 T_{ij} 确定的, 这也意味着并不是任意一组本身彼此协调的流量都可以在既定的路线选择方式下得出合理的 T_{ij} 。

例如在图 11.2(a) 中, 设 $x=7$, 这时流量水平上的错误已经消除, 但在图 11.2(b) 的路网分配方式下, 仍无法得出可行解: $B \rightarrow C$ 只有唯一路径, 按段的流量要求, $T_{23}=8$, 但路段流量最大值只有 5, 这称作是路线流量水平上的不相容性。

显然, 如果改变路网分配方式, 使 $A \rightarrow C$ 不只经过节点 5, 也经过节点 6, 则问题便得以解决了。

所以, 消除路线流量水平上的不相容性, 不仅仅是修正流量本身的问题, 合理的路线选择模式也是至关重要的。消除这种不相容性, 要同时兼顾流量和路线选择模式。

11.1.5 ME2 的局限性和改进的 ME2

在以上介绍的 ME2 中, 目标是熵值最大, 流量以约束条件的形式出现, 也就是说, 我们给予观测到的流量值以充分的信赖。但实际上, 各路段的流量是一个随季节、时间不断变化的随机量, 把一次观测得到的样本值作为随机量的代表值而给予完全的信赖显得不尽合理, 所以我们对 ME2 做如下的修正:

$$\begin{aligned} \min S_3 = & \sum_{ij} \mu_{ij} \left(T_{ij} \log \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - T_{ij} + t_{ij} \right) \\ & + \sum_a \phi_a \left(V_a \log \frac{V_a}{V_a^*} - V_a + V_a^* \right) \\ & \begin{cases} V_a^* = \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a \\ T_{ij} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11.1.26)$$

其中, V_a : 路段 a 的精确交通量, 精确的含义在于最能反映实际情况;

V_a^* : 路段 a 的观测交通量;

ϕ_{ij} : 由对 V_{ij} 的信赖程度决定的权重值;

μ_{ij} : 由对样本矩阵 t_{ij} 信赖程度决定的权重值。

因为 $x \log(x/y) - x + y$ 可以作为 x, y 差别的量度, 在现有的模型下, 目标函数的第一项使得 T_{ij} 尽可能地接近 t_{ij} , 第二项使得 V_{ij} 尽可能地接近于 V_{ij}^* 。综合起来, 使得 T_{ij} 经分配后得到的路段交通量尽可能接近于 V_{ij}^* , 所以新的 ME2 克服了上述的弱点, 收到了很好的效果。

11.1.6 极大似然模型(maximum likelihood model)

如果在利用路段交通量推求 OD 矩阵的过程中, 引入的不是熵最大化原理, 而是极大似然原理, 则得到的模型就是极大似然模型。

OD 矩阵内每一个 $O_i D_j$ 对内的出行量 X_{ij} 可以看作是一个随机变量, 假设它服从均值为 $\Omega_{ij} T_{ij}$ 的泊松分布, 即 $X_{ij} \sim \text{Poisson}(\Omega_{ij} T_{ij})$

其中, Ω_{ij} : 抽样率;

T_{ij} : 目标矩阵值。

设 $\{t_{ij}\}$ 是样本矩阵, 则对任意一个 $O_i D_j$, 对 X_{ij} 取值为 t_{ij} 的概率为

$$\text{Prob}[\text{Poisson}(\Omega_{ij} T_{ij}) = t_{ij}] = (\Omega_{ij} T_{ij})^{t_{ij}} \exp(-\Omega_{ij} T_{ij}) / t_{ij}! \quad (11.1.27)$$

这时恰好取到一个样本矩阵为 $\{t_{ij}\}$ 的概率为

$$\begin{aligned} \text{Prob}[\{t_{ij}\}] &= \prod_{i,j} \text{Prob}[t_{ij}] \\ &= \prod_{i,j} (\Omega_{ij} T_{ij})^{t_{ij}} \exp(-\Omega_{ij} T_{ij}) / t_{ij}! \end{aligned} \quad (11.1.28)$$

这就是构造出的极大似然函数。

对 11.1.28 式取对数

$$\log \text{Prob}[\{t_{ij}\}] = \sum_{ij} t_{ij} \log(\Omega_{ij} T_{ij}) - \Omega_{ij} T_{ij} - \log t_{ij}! \quad (11.1.29)$$

将 11.1.29 式最大化并引入流量约束条件就得到极大似然模型:

$$\begin{aligned} \max \sum_{ij} (t_{ij} \log(\Omega_{ij} T_{ij}) - \Omega_{ij} T_{ij} - \log t_{ij}!) \quad (11.1.30) \\ \begin{cases} V_a - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^a = 0 \\ T_{ij} \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

略去目标函数中的常数项,式 11.1.30 可化简为

$$\max \sum_{ij} (t_{ij} \log(\Omega_{ij} T_{ij}) - \Omega_{ij} T_{ij}) \quad (11.1.31)$$

这是一个凸函数,在合理的约束条件下,可以得到最优解。

11.1.7 非比例分配法下的矩阵估计

如果考虑拥挤的影响, P_{ij}^a 和 T_{ij} 的确定过程变得相互关联起来,这时需要把平衡分配理论(equilibrium assignment)引入 ME2 中,在完成连续的迭代后,可以得到非比例分配法下的矩阵 T_{ij} ,大致的步骤如图 11.3 所示。

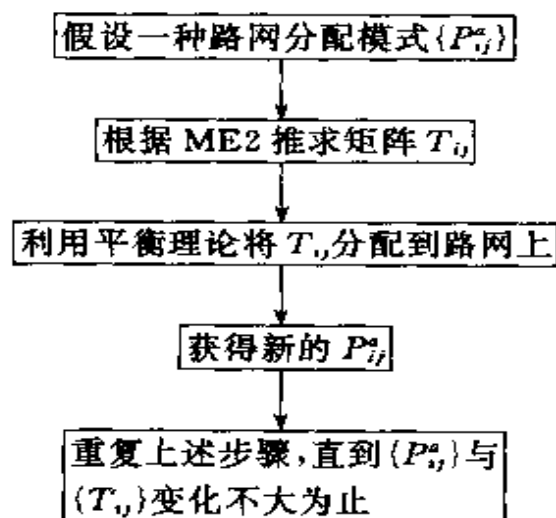


图 11.3 非比例分配法下反推 OD 矩阵 T_{ij} 的基本步骤

另外,还可以通过设立三维矩阵(起点,终点,路径)来进行非比例分配法下的矩阵推求工作,即

$$\begin{aligned} \max S_4 = & - \sum_{i,j,r} T_{i,j,r} (\log T_{i,j,r} / t_{i,j,r} - 1) \quad (11.1.32) \\ & \begin{cases} \sum_{i,j,r} T_{i,j,r} \delta_{i,j,r}^a - V_a = 0 \\ T_{i,j,r} \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $\delta_{i,j,r}^a = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 之间出行选择的路径 } r \text{ 经过 } a \text{ 时} \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases}$

$T_{i,j}$: i, j 间选择路径 r 的出行数;

$t_{i,j} = \frac{t_{ij}}{R_{ij}}$ R_{ij} : i, j 之间的路径总数;

$t_{i,j}$ 的意义只是作为迭代的初值,所以可以简单地取为平均值。

实现该模型的算法为:

- 用平衡分配方法把 $\{t_{ij}\}$ 分配到路网上,获得相应的路线选择方式, $n \rightarrow 1$;
- 在第 n 次迭代中,利用 $\{\delta_{i,j}^a\}$ 和 $\{V_a\}$,求解 $\{T_{i,j}\}^n$,套用上述模型;
- 把 $\{T_{i,j}\}^n$ 按平衡分配理论在路网中进行分配;
- 返回第二步,直到 $\{\delta_{i,j}^a\}$ 和 $\{T_{i,j}\}^n$ 变化都很小为止。

11.2 简化的交通方式划分模型

当影响交通方式划分的一些相关因素发生变化后,可以通过下述简化的方式划分模型(simplified modal split models),方便地求出变化后的方式分担情况。

1. 弹性增量分析法(incremental elasticity analysis)

根据定义,某种交通工具在一定的需求水平 T_0 和服务水平

S_0 (level of service, 简称 LOS) 下, 其需求弹性为:

$$E_s = \frac{\partial T / T_0}{\partial S / S_0}$$

$$\therefore E_s = \frac{S_0}{T_0} \frac{\partial T}{\partial S} = \frac{S_0}{T_0} \frac{T - T_0}{S - S_0}$$

T, S 分别为这种交通方式发生变化后的需求水平和服务水平,

$$\therefore T - T_0 = \frac{E_s T_0}{S_0} (S - S_0) \quad (11.2.1)$$

这就是借助于需求弹性得出的服务水平的相对变化与需求改变的关系。这种方法可以方便地应用于公交车的费用以及出行频率发生变化时的计算。

显然, 我们有两个假设条件: E_s 是已知量; E_s 在研究时段内为常数。

2. 根据效用值的变化推求交通方式分担率的方法 (pivot-point modal split)

如果已知现有各交通方式的分担率 P_k 及其效用表达式 V_k , 当其中一种或几种交通方式的 LOS 发生变化时, 它们的效用值会发生相应的变化, 各自的分担率也有相应的改变, 于是有:

$$P'_k = \frac{P_k^0 \exp(V_k - V_{k0})}{\sum_k P_k^0 \exp(V_k - V_{k0})} \quad (11.2.2)$$

其中, P'_k : 第 k 种交通方式变化后的分担率;

P_k^0 : 第 k 种交通方式变化前的分担率;

V_k : 第 k 种交通方式变化后的效用值;

V_{k0} : 第 k 种交通方式变化前的效用值。

借此, 可以得到变化后的各交通方式的分担率。

因为效用函数一般是相关因素的线性函数, 即 $V_k = \sum_p \theta_p X_p$,

我们需要的只是某些相关因素发生变化前后效用值的差值,所以在表达式确定的情况下,欲计算效用值的差值,只需关心那些发生了变化的相关因素 X_p 和相应的 θ_p 即可,这就使问题得以简化。

11.3 概略规划方法

宏观决策需要相应层次的方法和模型作为辅助手段,概略规划方法(sketch planning methods)就是在这种背景下产生的。

它比理想网络法能涉及更多的细节,比传统的四阶段法又简单得多,不需要大量的基础数据和严格的假设条件,这为进行城市交通和土地利用情况的战略规划提供了便利条件,也可作为背景模型为更进一步的细节工作做铺垫。

概略规划方法通常只从宏观的角度分析问题,例如:考虑城市总人口数(population)、总家庭人数的平均收入水平(income level)、城市总体网络特性(network characteristics)等综合数据,这使问题大大简化,但同时也使研究的精度降低很多,因此在这种方法下建立起来的模型大多带有明显的时间性和地域性,以牺牲通用性来换取精度的提高。

UMOT 模型(unified mechanism of travel)是概略规划方法指导下的一种典型的模型,由 Zahavi 于 1979 年提出。模型假设以下一些因素和函数关系不随时间和地域的改变而改变:

- 每个出行者日平均出行时间;
- 日平均出行费用是收入和汽车拥有量的函数;
- 每个家庭的平均出行者数目是家庭规模和汽车拥有量的函数;
- 保养一辆车和开车的花费是固定的;
- 路段的流量和速度是由路段本身的种类所决定的;
- 一辆车的日出行距离的阈值是一定的。

在这一系列假设条件下,UMOT 模型需要的输入量为:

- 研究对象区域内家庭的数目和规模;
- 家庭的收入分布;
- 不同交通工具的单位出行费用;
- 研究区域内的网络路段长度。

输出量为:

- 根据收入划分各家庭群的平均汽车拥有量;
- 整个城市在集计水平上的交通方式选择;
- 平均的出行时间和速度;
- 其它类似总出行费用和总出行时间的指数。

UMOT 模型为制定一些宏观政策,例如,国库税收政策、公共交通的价格政策、基础设施的投资政策等提供了方便,但更进一步的研究表明这种模型太粗糙,应用范围极为有限。

总之,概略规划方法处在尚待进一步研究、开发、检验和修正的阶段。

11.4 干道模型

在一些城市中,路网主要由纵横交错的大的干道组成。这些主要的线路大多呈直线状态,通行能力很强,能够反映城市路网的大部分特性。在干道模型中,只考虑这些大的干道,忽略小线路的影响,按这些干道的主要出入口划分小区,以此来简化问题,为一些高层次的规划问题服务。

干道模型(corridor models)使分配问题变得微不足道,主要的精力用于交通方式选择和目的地选择上,需要的数据只是这些主要干道的流量、不同交通工具的服务水平和出行者的相对特性等,简单,快捷。在干道模型中,瓶颈效应需要引起特别的注意。

11.5 边际需求模型

当实施一些基础设施的项目或新的交通政策时,交通需求会因此而发生一定的变化。边际需求模型(marginal demand models)就是利用所研究问题的特性,对这种影响进行估计,并提供对项目和政策的评价。它比一般四阶段分析方法要求更少的数据和时间。

边际需求模型的流程如下:

- 确定所要研究的问题。
- 找出对项目实施或政策变动最敏感的人群(相关人口),估计出可能出现的最直接的、最显著的影响后果。
- 目前可以利用的技术手段和信息,例如现存的数据、真正相关的研究和已有的模型等,特别是当地有经验专家的咨询意见,这些对迅速、准确地解决问题很有意义。
- 选择合适的背景模型和边际需求模型,背景模型用来估计出大致的交通需求水平,在此基础上,利用精确的边际需求模型最终确定项目对总需求的影响。
- 要根据问题的实质特点和现有技术水平选择需要的模型,要求选好的边际需求模型能够明确地反映项目或政策对相关人口的影响力。
- 对数据进行加工,代入模型。
- 把背景模型和边际需求模型应用到基准年中,并且对模型的参数进行检验。
- 把背景模型和边际需求模型应用到需要预测的远景年中。首先预测在远景年中,模型中相关变量的值,再找出项目实施和未实施两种情况下的差别,以反映出影响力。
- 利用模型本身提供的指标对模型进行评价,这些指标对决

策者应该具备实际的意义,有时,可以根据决策者的特殊要求而设立专门的指标。

- 建模和具体运算的过程中会引入许多的假设条件,这些假设条件在未来或许不再成立,所以要对模型进行敏感性分析,探讨当输入的数据或模型中的一些参数发生变化时,结果会发生什么样的变化。

边际需求模型曾用于圣地亚哥地铁网络扩大的可行性研究中,收到了很好的效果。

以上介绍的一系列模型,都是基于简单、快捷的原则而创立的,它们和四阶段分析方法一起构筑起较为完善的模型体系,为不同层次的交通需求研究提供了便利条件。

12 动态交通分析模型



12.1 动态交通分析模型的意义与特征

交通需求具有随时间变化的性质,这使得交通网络上的交通流具有动态特性。正因为如此,动态的交通需求分析模型能够更广泛、更确切地描述交通网络上的各种交通现象。动态交通分配是动态交通网络分析、动态交通需求分析的一个重要组成部分。

动态交通分配(dynamic traffic assignment)是指以时时刻刻变动的交通需求为对象的交通量分配。到目前为止研究开发出来的大多数模型均为静态分配模型,通常以日交通量为研究对象,推求一天的平均交通量分布模式,从而进行道路网的规化和设计。但是,对于特定时间段道路网上的交通流,特别是包括随时间变化交通流的模拟等,则到现在为止以交通定常性为前提开发的静态交通量分配模型是无法解决的。为表现这种比较短时间内的非定常交通,从问题的性质上来看理所当然需要进行动态分析。

和静态交通分配相比,动态交通分配模型在构造上有如下特征:

① 对动态交通量分配来说,首先有必要从时间、空间上对非定常交通流作出描述。因此,有必要将道路网分成更小区间(小段)。另外,时间间隔要取得很短。时间和空间的划分方法取决于所研究问题精度的要求。但不管怎么说和静态交通分配相比,计算

容量和计算时间都将变得非常大。

② 路径或路段(section)上的交通状态量的时间变动将用交通量守恒准则或连续方程式这种表现方式的交通流模型来记述。作为此交通流模型的状态变量,一般来说可用交通密度、存在台数、排队台数等来表示。因此,相应于静态交通分配中的状态变量——交通量,动态交通量分配取交通密度(存在台数、排队台数)作为状态变量。

③ 传统的静态交通量分配除有个别例外,基本上是处理自由流(交通密度从0到临界密度之间的交通流)。例如交通量分配用的路段走行时间函数的代表例子BPR函数,也没有针对路段交通量超过路段的交通容量的情况。另外,在日本广泛使用的Q-V式,在路段交通量达到交通容量时,平均速度则取0或接近0的微小值的不连续函数,其实这也就是在设法使计算路段交通量不超过路段的交通容量了。与此相反,动态交通分配将适用于自由流、拥挤流(交通密度超过临界密度时的交通流)这两个方面,因而可以再现包括交通拥挤在内的广泛的交通现象。

在交通分配模型中,给定的任何一个OD对 (i, j) 中存在着一个交通需求函数 $R_{ij}(t)$, $0 \leq t \leq T$ (T 是建模研究的时段), $R_{ij}(t)$ 表示 t 时刻离开 i 前往 j 的出行率。当 $R_{ij}(t)$ 在 T 内被视为常数时,这种分配问题属于静态交通分配问题。可见,静态交通分配模型假定了在建模时间段内交通需求是常值,也即交通流分布形态是固定的。动态交通分配模型考虑了交通需求随时间变化的特性,其交通需求函数随时间 t 而变。动态交通分配就是在给定交通网络、路段特性函数以及随时间变化的OD交通发生率的基础上,获取路网上随时间变化的交通流形态以及走行时间、费用的过程。

如上所述,在动态交通分配中,因为取交通密度或排队台数作为状态变量,所以能够表现包括拥挤场所和排队在内的非定常交通流。因而能从时间上、空间上很出色地表现短时间中的交通流变

动。但在用于大规模道路网的情况下,除了计算量将变得十分庞大以外,如何给出需要作为已知量输入的 OD 交通量是尚未解决的课题。

动态交通分配的研究历史还很短,没有解决的部分也很多。作为其应用范围,期待能够在以下方面得到发展:

- ① 道路网上的拥挤长度、拥挤时间的预测;
- ② 拥挤时的旅行时间的预测;
- ③ 速度管制、工事管制等各种交通管制的影响评价;
- ④ 并行路径间的路径诱导的评价;
- ⑤ 城市高速道路的入口流入控制的评价;
- ⑥ 一般道路网的信号控制的评价;
- ⑦ 时差出勤、弹性工作制的影响评价。

从上述 7 点可以看出,如果对静态交通分配和动态交通分配作一个总的概括的话,可以说,静态交通分配是以交通网规划为目标开发出来的需求预测法,而动态交通量分配模型则是以道路网交通流为对象,以交通控制管理为目标开发出来的需求预测法。

动态交通分配模型可分为动态系统最优模型 DSO(dynamic system optimum traffic assignment model)和动态用户最优模型 DUO(dynamic user optimum traffic assignment model)。同静态交通分配类似,动态交通分配也可同动态交通需求分析的其它组成部分结合,形成动态交通出发时刻与路径选择模型、动态交通出行方式、出行时间与路径选择联合模型等模型。动态交通需求分析模型的层次结构如图 12.1 所示。图中所示的第三层次,均属于动态交通分配范畴。

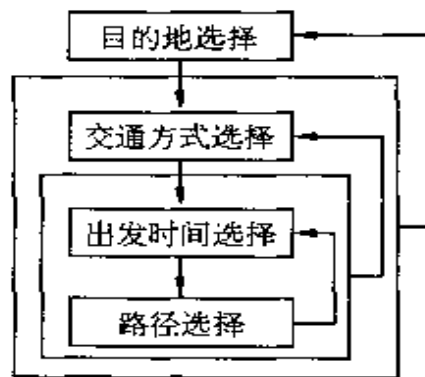


图 12.1 动态交通需求分析模型层次结构示意图

12.2 动态交通分配理论发展回顾

动态交通分配理论历经 20 余年的发展,许多研究者进行了多方面的研究。到目前为止的研究从研究方法上看,可以分为(1)计算机模拟方法,(2)数学规划建模方法,(3)最优控制理论建模方法,(4)变分不等式理论建模方法。从研究问题的角度可以分为 3 类,(1)出行选择研究,即每时段的出行率研究。(2)研究如何将随时间变化的交通需求分配到路网上去,这时出行率往往是预先给定的随时间变化的 OD 交通量。(3)同时决定交通流的瞬时分布形态以及出行率。从对出行者路径选择行为的假定看,可分为(1)动态用户最优模型,(2)动态系统最优模型。

Hendrickson & Plank、Ben-Akiva & De Palma、Mahmassani & Cheng 等研究了如何确定出行者的出行率分布形态的问题,这类问题虽然近年来也有人发表研究成果,但这些模型大多数只限于简单网络,而且大多均假设路段行驶时间与交通量无关,因此只具有启发性而实用性欠佳。本章将重点介绍第二、三类问题,即如何确定交通流的瞬时分布形态。

Yagar 提出了第一个基于计算机模拟的交通分配模型。该模型满足 Wardrop 用户最优原则,考虑了随时间变化的需求以及排队形成。Yagar 也提出了一个具有启发性的动态系统最优模型的算法,该算法被 Van Aerde & Yagar 进行了改进。Brastow 提出了另一个动态用户最优问题的计算机模拟模型。在他的模型中,随时间段为常值的需求函数通过流量/密度关系转换为随距离分段为常值的函数。此外,Mahmassani & Peeta、Mahmassani et al.、Jayakrishnan 的模型也是基于计算机模拟的模型。

基于计算机模拟的交通分配模型在每一次迭代分配中对出行者的路径选择行为进行模拟。这类模型的优点在于相对容易地将

交通控制等措施集成进来,可用来评价 ITS 项目中交通信息服务、路径诱导效果等。其缺点是模型的分析能力差,无法从模型本身分析其解的收敛性以及分析精度等。可以说,此类模型从学术的观点上看并没有数学规划模型以及最优控制理论模型对研究者有吸引力。

第一个数学规划方法的模型是 Merchant & Nemhauser 提出来的。他们的模型是离散时间的、非凸的非线性规划模型。Kuhn-Tucker 条件表明该模型符合动态的 Wardrop 系统最优原则。在静态假定下,模型可以转换为静态的系统最优分配模型。Ho 提出了该模型的连续线性优化解法,随后又提出了应用嵌套式分解算法在超立方并行计算机上求解的方法。在 Merchant & Nemhauser 的文章中,M-N 模型的分析是基于模型在最优解点上 Kuhn-Tucker 条件成立的假设。Carey 解决了该问题,证明了 M-N 模型满足线性无关的约束规格,即最优解点为正则点,Kuhn-Tucker 条件在最优解上成立,并在 1987 年将 M-N 模型改进成为非线性的凸规划模型。以上模型的最大缺点就是局限于多个起点、一个终点的简单网络。Papageorgiou 论述了动态交通分配的一些框架性问题,提出了一些新观点,但在他的文章中并没有提出具体模型。Janson 在静态交通分配的基础上提出了改进的动态交通模型,但其分配过程是近似的,而不是均衡分配。Carey 首次提出了动态交通分配的 FIFO(first-in-first-out)规则,文章指出当网络扩展为多个终点时,FIFO 规则必将导致模型解的可行域成为非凸集合。如果不满足该规则,则模型解不合理。FIFO 规则的这个性质使得动态交通分配的数学规划方法遇到了极大困难。Janson 提出了一个多目标规划模型,但是该模型的某些假设违反了 FIFO 规则。Jayakrishan & Tsai et al. 改进了 Janson 的多目标规划模型,使其满足了 FIFO 规则。该模型利用了改进的 Greenshields 速度-密度关系,建立了单调递增的凸的路段费用函数。Liu 分析了路段走行

函数、路段流出函数与 FIFO 规则的关系,提出了满足 FIFO 规则的路段流出函数形式,并建立了动态系统最优和用户最优模型。但他的模型没有经过证明,仅是一种假想形式。与上述数学规划方法不同的, Luque & Friesz 提出了一个应用最优化控制理论解决动态系统最优模型的新思想。他们将 M-N 模型改进成为了一个连续时间的最优控制问题,最优值条件由 Pontryagin 最小值定理获得。Ran & Boyce et al.、Friesz & Luque et al.、Wie & Friesz et al.、Lam & Huang 和陆化普等文章中建立的模型均采用了此种方法建模。这些模型之间的区别主要在于控制变量、状态变量的选择以及如何满足 FIFO 规则上。最优控制理论方法建立的模型具有易于分析的优点,这类模型通常在求解时被转化为离散时间形式的非线性规划、线性规划问题求解。Boyce & Ran et al. 就是将一个连续形式的用户最优模型转化为一个离散时间的非线性规划问题求解,解法采用 F-W 凸组合法,在求解线性规划子问题时通过扩展时间-空间网络技术将其转化为一个简单的全有全无分配。Wie & Tobin et al. 提出了一个求解离散时间形式动态交通分配模型的增广 Lagrange 算法,但其仅能应用于多个起点一个终点的网络。利用最优控制理论建模的方法也存在着许多缺点,如对于一般网络缺乏一种有效的解法。

应用变分不等式进行动态交通分配理论建模是近几年内发展起来的, Drissi-Kaitouni 提出了一个动态交通分配的变分不等式模型。该模型是在静态交通分配基础上通过时间-空间扩展网络技术直接推广而得的。Friesz & Bernstein et al. 推广了动态用户最优,提出了出发时刻/出行路径选择的动态用户均衡的概念,并应用变分不等式进行了建模。Wie & Tobin et al.、Ran & Hall et al. 分别提出了基于路径、基于路段的变分不等式模型。应用变分不等式建模将成为动态交通分配研究的一条有力途径。因此,动态交通分配问题的分类可由图 12.2 表示。

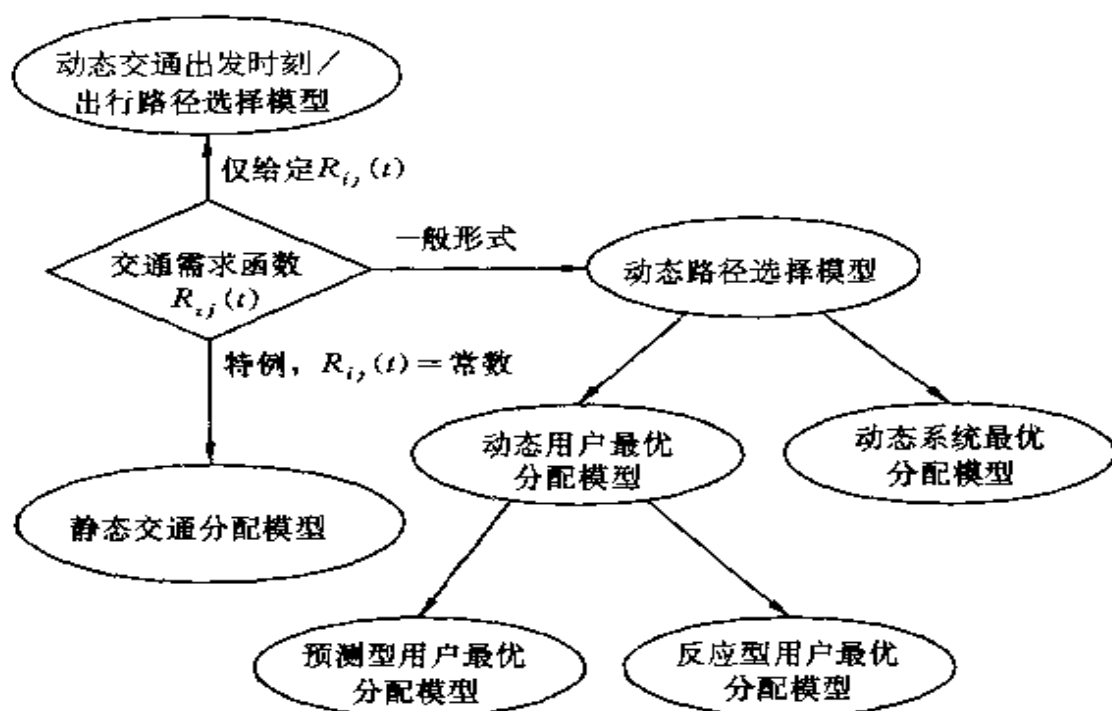


图 12.2 动态交通分配模型分类

在上述各类模型中,目前以最优控制理论建模最为成熟,实用的可能性较高,故在本章的后一部分将着重介绍此法。

12.3 交通流模型

作为动态交通分配模型建模的关键问题和前提条件,首先就是要出色地表现随着时间变化的各路径上的交通流。交通流模型系指描述道路网上交通流的数学模型,一般可分为宏观模型(macroscopic model)和微观模型(microscopic model)。前者是将交通流作为压缩性流体或车群,后者是对一台一台的离散车辆进行模型化的模型。但是,作为动态交通分配使用的交通流模型,一般仅限于前者。宏观交通流的基础是流体的守恒定律或连续方程式。状态变量一般取各路段的交通密度或存在台数、或排队的机动

车台数。对动态交通分配来说,如何构造交通流模型,使其能高精度地描述现实的交通流,是保证动态交通分配模型精度的关键。

宏观交通流模型有三类。

12.3.1 I/O 模型

I/O 模型(input-output model)是用路段流入交通量和流出交通量的差来推定该道路段内机动车存在台数的模型。如果用 $q_{in}(t)$ 表示流入交通量,用 $q_{out}(t)$ 表示流出交通量,则路段内的存在台数 $x(t)$ 变化可根据流体守恒定律得到

$$\frac{dx(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out}(t) \quad (12.3.1)$$

将两边积分,可得

$$x(t) = \int_0^t q_{in}(t)dt - \int_0^t q_{out}(t)dt + x(0) \quad (12.3.2)$$

如果已知 $x(0)$ 、累积流入交通量和累积流出交通量,则可推算出道路内的存在台数,上述关系可用图 12.3 表示。

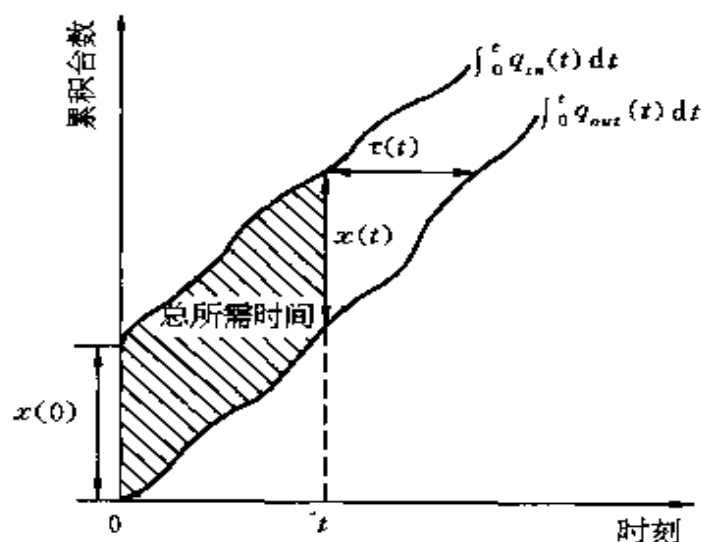


图 12.3 累积流入交通量、累积流出交通量与道路内的机动车存在台数之间的关系

即,两条累积曲线所夹垂直部分表示该时刻在道路段内的存在台数,水平方向长度表示该时刻流入车辆到流出为止的所需时间(滞后)。另外,两曲线所夹部分面积表示总所需时间。

I/O 模型仅能反映所研究路段内机动车的存在台数,但不能掌握该段内的交通状况。因此,此模型可用于推断信号交叉口进口道上的排队台数和拥挤台数。例如:对某个信号交叉口进口道的 I/O 模型如下:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{cases} q_{in}(t) & \text{红信号时} \\ q_{in}(t) - S & \text{绿信号且 } x(t) > 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{绿信号且 } x(t) = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (12.3.3)$$

此处 $x(t)$ 为等信号行列的机动车台数, $q_{in}(t)$ 为来自上游的交通量, S 为饱和交通量率。

12.3.2 单纯连续模型

单纯连续模型(simple continuum model)由下述三部分构成。

- 由机动车存在台数的守恒条件推导出的连续方程式

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (12.3.4)$$

- 交通流的基本关系式

$$q = kv \quad (12.3.5)$$

- 表述平均速度和交通密度关系的运动方程式

$$v = v(k) \quad (12.3.6)$$

式中, k : 交通密度;

q : 交通量;

v : 平均速度;

$v(k)$: 一般称为 k - v 曲线。

另外, t 为时刻, x 为沿道的距离坐标。

现在,考虑由图 12.4 所示路段 j ,由式 12.3.4 给出的连续方

程式可改写如下

$$\frac{dk_j}{dt} = \frac{1}{\Delta L_j} \{q_{j-1}(t) - q_j(t)\} \quad (12.3.7)$$

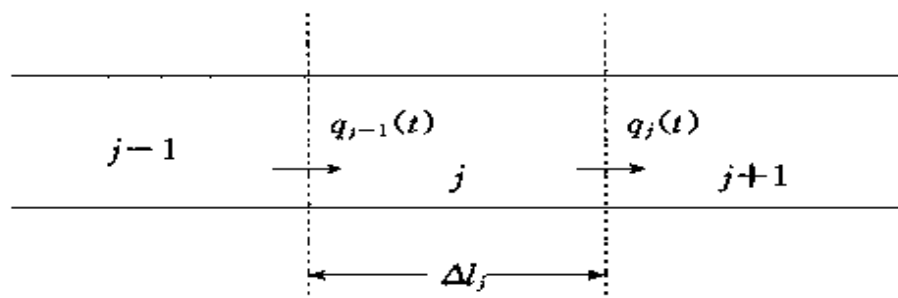


图 12.4 路段上的交通流守恒条件

这里, k_j 、 ΔL_j 分别表示路段的交通密度、区间长。上式与 I/O 模型中的式 12.3.1 基本相同。

为求解上式, 必须将 $q_j(t)$ 用数学式子来表述。一般来说是将其表达为上游路段和下游路段的交通密度的函数。

$$\frac{dk_j}{dt} = \frac{1}{\Delta L_j} \{q_{j-1}(k_{j-1}, k_j) - q_j(k_j, k_{j+1})\} \quad (12.3.8)$$

M. Papaglorhton 取 q_j 式如下:

$$q_j(k_j, k_{j+1}) = \alpha k_j v_j(k_j) + (1 - \alpha) k_{j+1} v_{j+1}(k_{j+1}) \quad (12.3.9)$$

此处 α 为权重系数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

另外, 松井取 q_j 如下

$$q_j(k_j, k_{j+1}) = C_{j,j+1} k_j v_j(k_j) \quad (12.3.10)$$

式中 $C_{j,j+1}$ 称为流出系数, 用下式计算:

$$C_{j,j+1} = \begin{cases} 1.0 & 0 \leq k_{j+1} \leq k_c \\ \exp\{-\alpha[(k_{j+1}/k_c) - 1]^2\} & k_c < k_{j+1} \leq k_{jam} \end{cases} \quad (12.3.11)$$

此处 α 为参数, k_c 为临界密度, k_{jam} 为饱和密度。该系数反映当下游路段的交通密度超过临界密度出现拥挤状态时, 从上游路段的流

出受到抑制。通过导入此系数,可以表现现实交通流中能够观察到的交通拥挤由下游向上游传递的现象。

总之,不管取何种 q_i ,式 12.3.8 仅仅是关于交通密度的非线性微分方程式,通过解此方程式,可以表述各路段的交通状况。

12.3.3 高次连续模型

使用考虑了加减速的运动方程式的交通流模型称为高次连续模型(high order continuum model)。属于此类模型的诸如根据跟车理论导出的 Payne 模型和根据关于气体的 Boltzmann 方程式导出的 Phillips 模型。

用高次连续模型表现的运动方程式一般有下列形式:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \partial(v, k) \frac{\partial v}{\partial x} + \beta(v, k) \frac{\partial k}{\partial x} = \phi(v, k) \quad (12.3.12)$$

对于 Payne 模型,上式中

$$\partial(v, k) = v \quad (12.3.13)$$

$$\beta(v, k) = \gamma/Tk \quad (12.3.14)$$

$$\phi(v, k) = -\{v - v(k)\}/T \quad (12.3.15)$$

进一步改写成

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{T} \{v - v(k)\} - \frac{\gamma}{T} \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (12.3.16)$$

这里, $\gamma = -\{dv(k)/dk\}/2$, T 表示反应时间。式(12.3.16)中第 1 项表示来自上游的机动车趋于维持其速度的倾向。第 2 项表示汽车司机趋于将自己的车速向接近平均 k - v 曲线的方向调整。最后的第 3 项表示下游交通密度大时将降低速度等,即根据下游的交通状况调整速度。另一方面,Philips 模型中,令

$$\partial(v, k) = v + (1/k)(\partial P/\partial v) \quad (12.3.17a)$$

$$\beta(v, k) = (1/k)(\partial P/\partial x) \quad (12.3.17b)$$

$$\phi(v, k) = \lambda\{v(k) - v\} \quad (12.3.17c)$$

即得该模型。其中 P 称为交通压, 定义为速度的方差和交通密度的积。

Philips 提案的 P 式如下

$$P = \frac{kv^2(\sigma_d^2 + 0.15v_d^2Z^3)}{v_d^2(1 + 1.8Z^3)} \quad (12.3.18)$$

其中 $Z = k/(k_{jam} - k)$, v_d 为自由速度的均值, σ_d 为自由速度的标准差, λ 则由下式给出:

$$\lambda = \lambda(k) = \frac{v_1(k_{jam} - k)}{L_0\{C_0k - C_r(k_{jam} - k)\}} \quad (12.3.19)$$

其中 $L_0 = 1/k_{jam}$, v_1 、 C_0 、 C_r 为参数。

高次连续模型同单纯连续模型相比, 从理论上来说, 可以期待得到高精度, 但标定参数很难。

12.4 动态系统最优分配模型

随着城市化进程的加快和交通量的急骤增加, 交通拥挤、堵塞和事故等城市交通问题日趋严重。从供求两个方面采取措施来解决城市交通问题, 不仅要进一步加强交通基础设施的建设, 而且要最大限度地提高现有路网的利用效率, 同时对交通需求进行管理, 才能有效地解决城市交通问题。提高现有路网的利用效率的方法很多, 其中之一是导入路径诱导系统(route guidance system), 以使驾驶员在合适的时间, 选择最佳路径最快地到达目的地。交通控制中心通过可变信息板、车载路导器等设施向驾驶员提供路径诱导信息, 从而达到控制整个交通系统的目的, 使交通系统高效率地运转。动态系统最优分配模型是路径诱导系统的基础, 也是动态用户最优分配模型的基础。动态系统最优分配模型是对拥挤网络分析的有效工具, 它能够显示在路径诱导系统下, 网络的最佳运行状态, 从系统、总体的角度揭示出在用户最优现实之下的交通流形态

的缺陷,为交通管理指出方向。另外,动态系统最优分配模型还能够计算道路通行费,确定拥挤收费策略等。

本节应用最优控制理论建立一个能够用于多个 OD 对交通网络,并能考虑交通拥挤影响的动态系统最优交通分配模型;模型的最优解利用 Pontryagin 最小值原理获得,并证明该最优解与 Wardrop 的系统最优原理的动态表述相一致;最后讨论该模型离散时间形式的具体算法。

12.4.1 动态路径选择原则

在静态交通分配中,Wardrop 提出的关于用户路径选择第一、第二原理是均衡交通分配的基础(见第 8 章)。

满足 Wardrop 第一原理的交通流状态为用户均衡 UE (user equilibrium),满足 Wardrop 第二原理的状态是系统最优 SO (system optimum)。当然并不是只有这两种可能的均衡定义。虽然在某一个特定网络中均衡状态只有一种,但研究者对问题进行抽象简化时前提假设不同,就会有不同的均衡定义。一般来说,系统最优是系统规划者所期望得到的一种网络交通流的最优化分布状态,其前提是要求出行者间必须互相协作。这种状态不可能靠自身维持,因此 SO 交通模式不可能作为描述实际交通行为的均衡状态模型。动态的系统最优仍具有静态最优的概念,是从交通管理者意愿出发,根据其不同的交通控制目的,有着不同的含义。一般说来,交通管理者的控制目的可以是:①使总旅行时间最小化;②使总旅行费用最小化;③使平均拥挤度最小化;④使总延误时间最小化。

如果交通管理者希望系统在研究时段 T 中所花费的总费用最小,则动态系统最优的定义如下:

在 $[0, T]$ 时段中,出行者各瞬时通过选择出行路径,相互配合,使得系统的总出行费用最小。

12.4.2 数学模型

为了讨论方便,我们先给出一些符号的定义,本章的以后部分均与此统一。

用有向图 $G(N, A)$ 表示一个交通网络,其中 N 是网络节点集, A 为有向弧集,即路段集,路段 $a \in A$ 。假设 N 包括 3 个子集:起点集、终点集 E 和中间节点集,但这 3 个子集是相交的。因为有些节点可能同时是起点、终点或中间点。本章一般用 k 表示起点或中间点, n 表示终点。而 $A(k)$ 表示有向路段起点是 k 的路段集合, $B(k)$ 则表示有向路段终点是 k 的路段集合。

对于连续时间的动态交通分配模型中,我们用 $S_k(t)$ 表示 t 时刻节点 k 产生的流向终点 n 的出行率,本书的建模均假设其是已知的、确定的。 $u_a^n(t)$ 表示路段 a 上 t 时刻流向终点 n 的路段流入率,而 $v_a^n(t)$ 是流出率。在一个固定时段 $[0, T]$ 中,以 $x_a(t)$ 表示 t 时刻路段 a 上存在的车辆数,即交通负荷。而 $x_a^n(t)$ 则表示 t 时刻路段 a 上流向终点 n 的交通负荷,有:

$$x_a(t) = \sum_{n \in N} x_a^n(t) \quad \forall a \in A \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.1)$$

对于离散时间的动态交通分配模型中,将固定时段 $[0, T]$ 等分为 T 份, $i=1, 2, \dots, T$ 。我们用 $S_k(i)$ 表示 i 时段节点 k 产生的流向终点 n 的出行量。 $u_a^n(i)$ 表示路段 a 上 i 时段流向终点 n 的路段流入量,而 $v_a^n(i)$ 是流出量。以 $x_a(i)$ 表示 i 时段路段 a 上存在的车辆数,即交通负荷。而 $x_a^n(i)$ 则表示 i 时段路段 a 上流向终点 n 的交通负荷,有:

$$x_a(i) = \sum_{n \in N} x_a^n(i) \quad \forall a \in A \quad i = 1, 2, \dots, T \quad (12.4.2)$$

1. 控制目的与目标函数

相应于交通管理者不同的控制目的,存在着多种目标函数。由

于优化目标不同,建模参数有可能不同,这样模型的约束条件也会有所不同,从而形成不同的模型。

对于控制目的①,目标函数可写为:

$$J1 = \min \sum_{a \in A} \int_0^T c_a(t) \cdot u_a(t) dt \quad (12.4.3)$$

或

$$J2 = \min \sum_{a \in A} \int_0^T x_a(t) dt \quad (12.4.4)$$

以上两个目标函数有细微差别。 $J2$ 表示在时段 $[0, T]$ 内出行者花费的总出行时间; $J1$ 则表示在时段 $[0, T]$ 内出行者所花费的总时间以及出行者 T 时刻后走完该路段的剩余部分所花费的额外时间。一般来说, $J2$ 小于 $J1$ 。但如果 T 时刻所有的出行者都到达了交叉点,则 $J1$ 等于 $J2$ 。当建模的时段越长, $J1$ 和 $J2$ 的差别越小。在实际工程中,两者均可作为系统最优的目标函数。

如果将上述路段走行时间函数 $c_a(t)$ 换为广义费用函数 $\bar{c}_a(t)$, 可得控制目的②的目标函数:

$$J = \min \sum_{a \in A} \int_0^T \bar{c}_a(t) u_a(t) dt \quad (12.4.5)$$

公式 12.4.3 与公式 12.4.5 是不同的,因为 $\bar{c}_a(t)$ 是路段走行费用函数,包括了运行费用、道路通行费和汽油费等。当利用动态系统最优分配模型确定道路通行费时,目标函数可采用式 12.4.5。

为了写出控制目的③的目标函数表达式,我们可以定义一个路网平均拥挤度 $D(t)$,例如,定义路段 a 的拥挤度为:

$$D_a(t) = \frac{x_a(t)}{k_{a_j}} \quad (12.4.6)$$

其中, l_a : 路段 a 的长度;

k_{a_j} : 路段 a 的阻塞密度。

由此,路网的平均拥挤度可以定义为:

$$D(t) = \frac{\sum_a u_a(t) \cdot D_a(t)}{\sum_a u_a(t)} \quad (12.4.7)$$

则控制目的③的目标函数可取为:

$$J = \min \sum_{a \in A} \int_0^T D(t) dt \quad (12.4.8)$$

控制目的④是使路网总延误最小化,建模时一般要将交通模拟集成进入交通分配中来。这时最优化问题的模型就不容易给出,而是在具体的算法中实现控制目的④。本章给出的模型的目标函数采用式 12.4.4,即实现控制目的①。

2. 约束条件

模型的约束条件如下:

(1) 路段状态方程

$$\frac{dx_a^n(t)}{dt} = u_a^n(t) - v_a^n(t) \quad (12.4.9)$$

其中, $\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$

(2) 节点流量平衡方程

$$\sum_{a \in A(k)} u_a^n(t) = S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) \quad (12.4.10)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(t) = 0 \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.11)$$

(3) 路段流出率函数

$$x_a^n(t) = \int_t^{t+c_a^n(t)} v_a^n(\omega) d\omega \quad (12.4.12)$$

为了分析与求解方便,可以采用其简化形式。当路段流出率随时间变化不大时,有:

$$v_a^n(t) \cdot (t + c_a^n(t) - t) = x_a^n(t)$$

$$\text{则有} \quad v_a^n(t) = \frac{x_a^n(t)}{c_a^n(t)} \quad (12.4.13)$$

本文的模型 $v_a^n(t)$ 的定义式采用式(12.4.13)。

(4) 非负约束

$$\begin{aligned} x_a^n(t) &\geq 0, u_a^n(t) \geq 0 \\ \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \end{aligned} \quad (12.4.14)$$

综上所述,本节给出的动态系统最优分配模型为:

$$J = \min \sum_{a \in A} \int_0^T x_a(t) dt \quad (12.4.15a)$$

$$\text{约束条件} \quad \frac{dx_a^n(t)}{dt} = u_a^n(t) - v_a^n(t) \quad (12.4.15b)$$

$$\begin{aligned} \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \\ \sum_{a \in A(k)} u_a^n(t) = S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) \end{aligned} \quad (12.4.15c)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(t) = 0 \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.15d)$$

$$x_a^n(0) = 0 \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad (12.4.15e)$$

$$\begin{aligned} u_a^n(t) \geq 0 \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \\ (12.4.15f) \end{aligned}$$

Definition Constraint:

$$\begin{aligned} v_a^n(t) = \frac{x_a^n(t)}{c_a(t)} \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \\ (12.4.15g) \end{aligned}$$

12.4.3 模型的最优解条件

上述动态系统最优分配模型中, $x_a^n(t)$ 是状态变量, 而 $u_a^n(t)$ 是控制变量。其最优解的必要条件可以利用 Pontryagin 最小值定理获得。

记向量 $x(t)$ 、 $u(t)$ 为:

$$x(t) = (\cdots, x_a^1(t), \cdots, x_a^q(t), \cdots)$$

$$u(t) = (\cdots, u_a^1(t), \cdots, u_a^q(t), \cdots) \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.16)$$

其中, q 是终点集的度, 即终点个数。

建立 Hamilton 函数:

$$H[x(t), u(t), \lambda(t)] = \sum_{a \in A} x_a(t) + \sum_{a \in A} \sum_{n \in N} \lambda_a^n(t) [u_a^n(t) - v_a^n(t)] \quad (12.4.17)$$

其中 $\lambda_a^n(t)$ 是协态变量, $\lambda(t) = (\cdots, \lambda_a^1(t), \cdots, \lambda_a^q(t), \cdots)$ 。

建立 Lagrangian 函数为:

$$\begin{aligned} L[x(t), u(t), \lambda(t), \mu(t)] \\ = H[x(t), u(t), \lambda(t)] + \sum_{\substack{k \in N \\ k \neq n}} \sum_{n \in N} \mu_k^n(t) \\ \times \left[S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) - \sum_{a \in A(k)} u_a^n(t) \right] \\ + \sum_{n \in N} \mu_n^n(t) \cdot \sum_{a \in A(n)} [-u_a^n(t)] \end{aligned} \quad (12.4.18)$$

其中, $\mu_k^n(t)$ 是 Lagrangian 乘子;

$$\mu(t) = (\cdots, \mu_k^1(t), \cdots, \mu_k^q(t), \cdots)$$

由 Pontryagin 最小值定理可得:

(1) 规范方程

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a^n(t) &= - \frac{\partial L}{\partial x_a^n(t)} \\ &= - \left[1 - (\lambda_a^n(t) - \mu_k^n(t)) \cdot \frac{1 - v_a^n(t) \cdot \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}}{c_a(t)} \right] \end{aligned} \quad (12.4.19)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n \quad a \in B(k)$$

$$\dot{x}_a^n(t) = \frac{\partial L}{\partial \lambda_a^n(t)} = u_a^n(t) - v_a^n(t)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.20)$$

(2) 边界条件

$$x_a^*(0) = 0 \quad \lambda_a^*(T) = 0 \quad (12.4.21)$$

(3) Pontryagin 最小值定理同时也要求在最优状态轨迹线的每一点上选择控制变量,使得 Lagrangian 函数最小。即:

$$\min L[\dot{x}(t), u(t), \lambda(t), \mu(t)] \quad (12.4.22a)$$

约束条件

$$u_a^*(t) \geq 0 \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.22b)$$

Kuhn-Tucker 条件有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial u_a^*(t)} = \lambda_a^*(t) - \mu_k^*(t) &\geq 0 \\ \forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad \forall a \in A(k) \end{aligned} \quad (12.4.23)$$

$$u_a^*(t) \cdot \left[\frac{\partial L}{\partial u_a^*(t)} \right] = u_a^*(t) \cdot (\lambda_a^*(t) - \mu_k^*(t)) = 0 \quad (12.4.24)$$

$$\begin{aligned} \forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad \forall a \in A(k) \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_k^*(t)} = S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^*(t) - \sum_{a \in A(k)} u_a^*(t) = 0 \end{aligned} \quad (12.4.25)$$

$$\begin{aligned} \forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_k^*(t)} = \sum_{a \in A(n)} u_a^*(t) = 0 \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \end{aligned} \quad (12.4.26)$$

$$u_a^*(t) \geq 0 \quad (12.4.27)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$$

由 12.4.23~12.4.24 式,我们可知:

$$u_a^*(t) = 0 \quad \text{如果} \quad \lambda_a^*(t) > \mu_k^*(t) \quad (12.4.28)$$

$$u_a^n(t) \geq 0 \quad \text{如果} \quad \lambda_a^n(t) = \mu_k^n(t) \quad (12.4.29)$$

$$\lambda_a^n(t) = \mu_k^n(t) \quad \text{如果} \quad u_a^n(t) > 0 \quad (12.4.30)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad \forall a \in A(k)$$

显然,最优控制 $\dot{u}(t)$ 受 $\lambda_a^n(t) - \mu_k^n(t)$ 符号的影响。当 $\lambda_a^n(t) = \mu_k^n(t)$ 时,模型 12.4.15 式的最小值定理不能唯一确定最优控制变量 $\dot{u}(t)$ 的值,即出现奇异情况。这种情况既不意味着最优控制不存在,也不意味着最优控制无法定义,只说明极值条件还不能确定奇异区间 $[t_1, t_2] \subseteq [0, T]$ 中 $\dot{u}(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 、 $\lambda(t)$ 的关系。这时可根据广义 Legendre-Clebsch 条件,且奇异最优控制满足 $\partial L / \partial u(t)$ 对时间各阶导数为零的附加条件,求解两点边值问题,即可求出奇异最优控制,这里不再赘述。

Pontryagin 最小值定理所给出的式 12.4.19~12.4.23 是最优控制的必要条件,而非充要条件。在实际问题中,最优控制的存在往往是无疑的,同时根据最小值原理求出的最优控制常常只有一个。这样,所求出的最优控制也就具有充分性了。实际上,模型 12.4.15 式属于线性定常系统的积分型最优控制问题,这时候 Pontryagin 最小值定理是使泛函数 J 达到最小值的充要条件。对于城市交通网络的最优控制问题,从物理意义上我们可以确定最优控制的存在性和唯一性,则该最优控制必满足上述条件。

12.4.4 最优解条件的经济学解释

假设路径 p 连接一个起点 $k \in N$ 及终点 $n \in N$, 则 p 可用下述一般形式表述:

$$p \equiv [k = k_0, a_1, k_1, \dots, k_{m-1}, a_m, n = k_m] \quad (12.4.31)$$

由式 12.4.19 可知:

$$\lambda_a^n(t) - \mu_k^n(t) = \frac{1 + \dot{\lambda}_a^n(t)}{1 - [v_a^n(t) \cdot dc_a(t)/dx_a(t)]^2}$$

$$\times \left[c_a(t) + x_a^n(t) \cdot \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)} \right] \quad (12.4.32)$$

记

$$\eta(t) = \frac{1 + \lambda_a^n(t)}{1 - [v_a^n(t) \cdot dc_a(t)/dx_a(t)]^2} \quad (12.4.33)$$

定义

$$\hat{c}_a(t) = \eta(t) \cdot \left[c_a(t) + x_a^n(t) \cdot \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)} \right] \quad (12.4.34)$$

上式为路段 a 流向 n 的动态边际总交通时间。其中 $\eta(t)$ 反映动态因素, 而 $c_a(t) + x_a^n(t) \cdot dc_a(t)/dx_a(t)$ 则与静态系统最优中的边际交通时间类似, 它可以被解释为路段 a 上每增加一个出行者对该路段总交通时间的边际影响。前一项为新增的出行者所需花费的时间为 $c_a(t)$, 而后一项则表示新增的出行者使路段 a 上流向终点 n 的原有的每一出行者 $x_a^n(t)$ 所增加的交通时间。

定义

$$\varphi_p = \sum_{a \in A(p)} \hat{c}_a(t) \quad \forall p \in P_{kn} \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.4.35)$$

由式 12.4.32~12.4.34, 可将 12.4.35 式改写为:

$$\varphi_p(t) = \sum_{i=1}^m (\lambda_{a_i}^n(t) - \mu_{a_i}^n(t)) \quad (12.4.36)$$

由 12.4.29 式可知,

$$\text{如果 } \mu_a^n(t) > 0 \quad \forall a \in A(p), \text{ 则 } \lambda_{a_i}^n(t) = \mu_{k_{i-1}}^n(t) \quad (12.4.37)$$

可得

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) &= [\mu_{k_0}^n(t) - \mu_{k_1}^n(t)] + [\mu_{k_1}^n(t) - \mu_{k_2}^n(t)] \\ &\quad + \cdots + [\mu_{k_{m-1}}^n(t) - \mu_{k_m}^n(t)] \\ &= \mu_{k_0}^n(t) - \mu_{k_m}^n(t) \end{aligned} \quad (12.4.38)$$

由推导过程可知,如果 $u_a^n(t) > 0$, 则

$$\varphi_p(t) = \inf\{\varphi_b(t), \forall b \in P_{kn}\} \quad (12.4.39)$$

其中, P_{kn} : 连接 $k-n$ 的路径集合。

即对于 OD 对 $k-n$ 间的任一路径 $p \in P_{kn}$, 如果其流入率 $u_a^n(t) > 0$ $\forall a \in A(p)$, 则其路径 p 上的边际总交通时间等于最小的边际总交通时间, 且有:

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t) = \cdots = \varphi_j(t) \leq \varphi_{j+1}(t) \leq \cdots \leq \varphi_l(t) \quad (12.4.40)$$

$$u_a^n(t) > 0 \quad \text{对于所有 } a \in \{A(p) | p = 1, 2, \cdots, j\}$$

$$u_a^n(t) = 0 \quad \text{对于某些 } a \in \{A(p) | p = j+1, j+2, \cdots, l\}$$

其中 l 为 P_{kn} 的度, 即连接 $k-n$ 的路径数。

由以上分析可知, 最优控制问题(式 12.4.15)的最优解所对应的交通流形态与 Wardrop 系统最优原则的动态表达相符合。

12.4.5 动态系统最优分配模型的求解

虽然存在许多求解连续性最优控制问题的算法, 但应用它们来求解模型 12.4.15 式很困难。由于调查获得的 OD 数据均是离散形式的, 因此一般求解模型的离散形式。模型 12.4.15 式的离散形式可以被视为离散时间系统的最优控制模型, 也可以被视为一个数学规划模型。从不同的视点出发, 将会形成不同的模型算法。模型 12.4.15 式的离散形式为:

$$\min J = \sum_{i=1}^T \sum_n \sum_{a \in A} x_a^n(i) \quad (12.4.41a)$$

约束条件对于 $i=0, 1, \cdots, T-1$

$$x_a^n(i+1) = x_a^n(i) + u_a^n(i) - v_a^n(i) \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.4.41b)$$

$$\sum_{a \in A(k)} u_a^n(i) = S_k^n(i) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(i) \quad \forall n \quad \forall i \quad k \neq n \quad (12.4.41c)$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(i) = 0 \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.4.41d)$$

$$x_a^n(0) = 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad (12.4.41e)$$

$$u_a^n(i) \geq 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.4.41f)$$

Definition Constraint:

$$v_a^n(i) = \frac{x_a^n(i) \cdot \Delta t}{c_a(x_a(i))} \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.4.41g)$$

其中, Δt : 时段间隔。

上述模型视为数学规划模型。容易看出, 如果路段走行时间事先确定, 则规划模型可以转化为线性规划(LP)模型。观察该模型, 我们可以发现模型具有可分解性, 不同时间段之间的变量有相对独立性, 仅靠路段负荷 $x_a^n(i)$ 联系。因此, 模型的约束系数矩阵具有阶梯形(staircase)的特殊结构, 如图 12.5 表示。

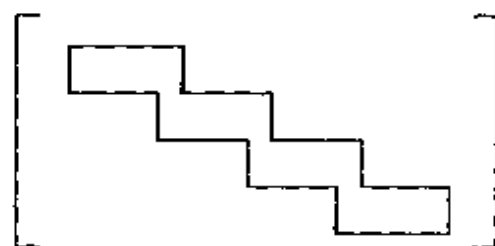


图 12.5 阶梯形结构示意图

Dantzig & Wolfe 最先提出了分解算法(decomposition algorithm), 利用凸组合定理将原问题变换成为等价的主导规划问题。主导规划的约束条件个数比原问题的要少, 但往往具有很多列。可用列生成法来解这种多列的主导规划。

Dantzig-Wolfe 分解算法在求解对角块问题时很有效, 但不好应用于阶梯形结构, 因为这种结构的主问题和子问题的恰当选择不如对角形问题。为了求解阶梯形结构线性规划, 我们可以应用套分解算法(nested decomposition algorithm)。套分解法的基本思想是以递归的形式应用 Dantzig-Wolfe 分解原理。例如, 求解一个 N 个阶段问题。首先将最后一个阶段 N 阶段视为主问题, 余下部分为子问题。为了求解这个庞大的子问题, 再次利用分解原理。因

此, t 阶段问题可以被视为是 $t+1$ 到 N 阶段的子问题, 也是 1 到 $t-1$ 阶段的主问题。套分解法的种类很多, 我们选择 Lan-Fulle 套分解法来求解模型。

观察模型, 该模型不仅阶段可分解, 对于不同的终点也有可分解性。不同终点子问题解之间的协调通过路段走行时间 $c_a(x_a)$ 确定。流向终点 n 的车辆在路段 a 的走行时间不仅取决于流向同一终点的车流, 同时也取决于流向其它终点的车流。这种情况类似于静态均衡交通分配中不同车种之间或不同路段之间不对称或对称的相互影响的情况。具体算法如下:

Step 0: 路段走行时间初始化, 一般可以用自由流走行时间, 迭代次数 $l=1, i=1$ 。

Step 1: 求解基于目前路段走行时间的 LP 模型。

substep 1: 对于终点 i , 按当前路段走行时间应用 Lan-Fuller 套分解法求解线性规划问题。

substep 2: 如果 $i=n$, 转向步骤 2; 否则, 更新路段走行时间, $i=i+1$, 转向于步骤 1。

Step 2: 判断是否收敛, 判敛标准可用:

$$k^{(l)} = \frac{\sqrt{\sum_i \sum_a (x_{a,i}^{(l)} - x_{a,i}^{(l-1)})^2}}{\sum_i \sum_a x_{a,i}^{(l-1)}} \leq k \quad (12.4.42)$$

满足精度要求, 则停止; 否则, $l=l+1$, 转向步骤 1。

分解算法中如果子问题能够同时计算, 则求解效率大大提高。随着并行计算机的普及, 上述算法将能用于求解大规模的实际网络。

12.5 动态用户最优分配模型

随着动态交通分配理论研究的深入, 动态用户最优分配模型

的研究得到了加强。在数学规划和最优控制理论建模的范畴中,初期的研究如 Merchant & Nemhauser (1978a, 1978b)、Ho (1980, 1990)、Carey (1986, 1987, 1992)、Luque & Friesz (1980)等将注意力集中在动态系统最优分配模型中,其中部分原因是动态系统最优分配模型不必对出行者的路径选择行为进行假设,因而动态系统最优模型的建模显得相对容易。动态用户最优分配模型的建模是基于对出行者路径选择行为的正确假定基础之上的,力图再现交通流的实际瞬时分布形态,因而更为重要。

12.5.1 动态路径选择原则

静态用户均衡是一种真正的均衡状态,同时也达到了用户最优。在静态情形下,用户最优与用户均衡是统一的,但在动态情形下两者并不能统一。而且,均衡本身就是一种静态的概念,系统总是在动态运行中趋于均衡,但却总达不到均衡。正是由于趋于均衡的内因,系统才呈现出动态的现象。因此,在动态交通分配中,运用路径选择达到均衡状态的概念是不准确的,而应该采用最优化的概念,即动态用户最优。动态用户最优同动态系统最优一样,是一种分配准则而不是一种真正的均衡状态,但其比动态系统最优更接近现实,能够评价交通管理对策效果。动态用户最优的建模比动态系统建模复杂,因为其必须对出行者的出行行为更好地描述。

从静态用户均衡的定义出发,可以直接扩展得动态用户最优的定义,Wie et al. (1990)给出了如下定义:

交通网络中的每一时刻,每一 OD 对之间被使用的路径中瞬时单位期望旅行费用相等,且等于最小瞬时单位期望费用,这时相应的随时间变化的交通流形态称为动态用户最优。

Ran et al. (1993)给出以下定义:

交通网络中的每一时刻,每一 OD 对之间每一个决策点(路段交叉点)上,被使用路径上的瞬时旅行时间相等且等于最小瞬时路

径旅行时间,这一动态的交通流形态称为动态用户最优。

可以看出,上述定义的实质是交通网络在每一时刻均为静态用户均衡状态。两者之间的差别在于后者要求在每一时刻有交通流流向终点的每一个决策点上达到路径均衡状态,而前者的定义仅需要在 OD 对间,即在每一个终点达到路径均衡状态。值得一提的是,在前者文章中建立的模型的最优解所反映的交通流形态实质是符合后者定义所要求的。

Papageorgious(1990)给出了动态用户最优的定义:

在交通网络中,当且仅当每一 OD 对间以及任一时刻 $t \in [0, T]$,沿着被使用的路径的个人费用相等且最小时达到动态用户最优。

个人费用当然与所使用的路径的交通条件有关。根据个人费用的定义的不同,有两类用户最优模型。

① 预测型用户最优(Predictive user optimum)

$$c_a(t) = \tau_a(t) \quad (12.5.1)$$

其中, $\tau_a(t)$ 是当驾驶员在时刻 t 到达将进入路段 a 的交叉点时,将会在 a 上花费的实际走行时间。

② 反应型用户最优(Reactive user optimum)

$$c_a(t) = \tau_a^*(t) = \frac{\Delta_a}{v_a(t)} \quad (12.5.2)$$

其中, Δ_a : 路段 a 的长度;

$v_a(t)$: t 时刻路段 a 的平均速度;

$\tau_a^*(t)$: 在路段 a 目前状态下,通过路段 a 所花费的理想时间。

上述两类规则实质上是对出行者路径选择行为的不同假定。两种用户最优模型均有其适用的交通环境。预测型用户最优适用范围为: ① 交通网络中交通条件每日变化不大,交通条件可预测;② 出行者了解这些交通条件。这时,用户可以根据未来的交通

条件来估计出行费用,选择出行路径。反应型用户最优适用范围为:①交通网络中交通条件是不可预测的(例如由于事故、变需求等随机因素造成的);②出行者拥有完善的实时交通信息服务。这时,用户只能依据当前的交通条件来选择出行路径。尽管两类动态用户最优的定义很不相同,但在静态条件下均将会转化为相同的静态最优,而且在一定条件下两者的结果也会达到一致。

Daganzo & Lin (1994)对反应型用户最优模型提出疑问,他们认为如果假设使用者没有预测未来交通流的变化,只是一味地根据当前的瞬时旅行时间选择出行路径,这样会导致低劣的解或不现实的交通流分布形态。

根据上述用户最优定义,同一OD对、同一时间出发的出行者可能有不同的实际旅行时间。如果我们假定用户能够根据路网上的交通状态正确地选择出发时刻和出行路径,则可以定义出发时刻和出行路径意义上的均衡状态。而非静态用户路径选择均衡状态的范畴,当在任一OD对中,用户出行选择(出发时刻、出行路径)均有相同的负效用时,则达到动态用户均衡。这时由于交通拥挤的外在性,用户仍会选择不同的出行时间、出行路径,从而形成随时间变化的交通流以及随时间变化的拥挤程度。

Friesz & Bernstein et al. (1993)给出了以下动态用户出发时刻/出行路径选择、均衡状态定义:

如果对于每一个OD对,从出发时刻至到达时刻,被利用路径上的单位费用,包括早到、迟到的时间等效费用,均相同且等于最小单位路径费用,即达到了动态用户均衡。

这一定义的均衡状态很难用数学规划式表达,一般应用变分不等式建模。

12.5.2 模型的建立

1. 动态用户最优的定义

本节所建立的模型采用以下动态用户最优的定义:

交通网络中的每一时刻、每一 OD 对之间被使用的路径中,瞬时单位期望旅行费用相等且等于最小瞬时单位期望费用,这时相应的随时间变化的交通流形态称为动态用户最优。

2. 模型的建立

本节建模同样应用最优控制理论,与系统最优分配模型不同的是,将路段流入率 $u_a^n(t)$ 、路段流出率 $v_a^n(t)$ 均作为控制变量,状态变量为 $x_a^n(t)$ 。

模型的约束条件如下:

(1) 路段状态方程

$$\frac{dx_a^n(t)}{dt} = u_a^n(t) - v_a^n(t) \quad (12.5.3)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$$

(2) 节点流量平衡方程

$$\sum_{a \in A(k)} u_a^n(t) = S_k(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) \quad (12.5.4)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(t) = 0 \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.5.5)$$

(3) 路段流出率约束

在将要建立的动态用户最优分配模型中,我们将路段流出率作为内源变量,由模型解获得。当然,我们仍需加入保证模型内在协调性的约束,采用第 3 章所建立的路段流出函数作为路段流出率约束。

$$x_a^n(t) = \int_t^{t+\tau_a^n(t)} v_a^n(\omega) d\omega \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.5.6)$$

由于在我们的最优控制模型中实际路段走行时间 $\tau_a(t)$ 未知,我们应用估计路段实际走行时间 $\bar{\tau}_a(t)$ 改写路段流出率约束如下:

$$x_a^n(t) = \int_t^{t+\bar{\tau}_a^n(t)} v_a^n(\omega) d\omega \quad (12.5.7)$$

我们首先估计路段走行时间 $\bar{\tau}_a(t)$, 然后这些函数被固定, 求解模型。根据获得的 $u_a^n(t)$ 、 $v_a^n(t)$ 、 $x_a^n(t)$, 应用实际路段走行时间函数得到新的实际走行时间。由于路段实际走行时间函数形式复杂, 为简便起见, 我们采用瞬时路段走行时间函数, 即 $\tau_a(t) = c_a(t)$ 。如果新的实际路段走行时间与 $\bar{\tau}_a(t)$ 相比差别很大, 则该过程重复进行。该过程类似于对角化技术 (Abdulal & Leblanc, 1979; Dafermos, 1982b; Florian & Spiess, 1982; Sheffi, 1985) 的迭代过程。由于对角化技术具有很好的收敛性, 我们有理由相信模型解会趋向 DUO 解。Ran et al. (1993, 1995) 建立的动态用户最优分配模型中, 路段传播约束的构造也采用了该处理方法。

(4) 非负约束:

$$x_a^n(t) \geq 0, u_a^n(t) \geq 0, v_a^n(t) \geq 0 \quad (12.5.8)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$$

综上所述, 本文给出的动态用户最优分配模型为:

$$J = \min \sum_{a \in A} \int_0^T \int_0^{v_a^n(t)} c_a(x_a(t), \omega) d\omega dt \quad (12.5.9a)$$

约束条件

$$\frac{dx_a^n(t)}{dt} = u_a^n(t) - v_a^n(t) \quad (12.5.9b)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$$

$$\sum_{a \in A(k)} u_a^n(t) = S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) \quad (12.5.9c)$$

$$\forall k \in N \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad k \neq n$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(t) = 0 \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.5.9d)$$

$$x_a^n(t) = \int_t^{t+\bar{\tau}_a(t)} v_a^n(\omega) d\omega \quad (12.5.9e)$$

$$\forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T]$$

$$x_a^n(0) = 0 \quad \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad (12.5.9f)$$

$$\begin{aligned} u_a^n(t) \geq 0, v_a^n(t) \geq 0, x_a^n(t) \geq 0 \quad (12.5.9g) \\ \forall a \in A \quad \forall n \in N \quad \forall t \in [0, T] \end{aligned}$$

12.5.3 模型的最优解条件

本模型属于连续系统的最优控制模型。其中,路段流入率 $u_a^n(t)$ 、路段流出率 $v_a^n(t)$ 为控制变量,状态变量为 $x_a^n(t)$ 。

上述动态用户最优分配模型最优解的必要条件可以利用 Pontryagin 最小值定理获得。

记向量 $x(t)$ 、 $u(t)$ 为:

$$\begin{aligned} x(t) &= (\cdots, x_a^l(t), \cdots, x_a^q(t), \cdots) \\ u(t) &= (\cdots, u_a^l(t), \cdots, u_a^q(t), \cdots) \quad (12.5.10) \\ v(t) &= (\cdots, v_a^l(t), \cdots, v_a^q(t), \cdots) \quad \forall t \in [0, T] \end{aligned}$$

其中 q 是终点集的度,即终点个数。

建立 Hamilton 函数:

$$\begin{aligned} H[x(t), u(t), v(t), \lambda(t)] \\ = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a^l(t)} c_a(x_a(t), \omega) d\omega + \sum_{a \in A} \sum_{n \in N} \lambda_a^n(t) [u_a^n(t) - v_a^n(t)] \end{aligned} \quad (12.5.11)$$

其中 $\lambda_a^n(t)$ 是协态变量, $\lambda(t) = (\cdots, \lambda_a^l(t), \cdots, \lambda_a^q(t), \cdots)$ 。

建立 Lagrangian 函数为:

$$\begin{aligned} L[x(t), u(t), v(t), \lambda(t), \mu(t), \sigma(t)] \\ = H[x(t), u(t), v(t), \lambda(t)] + \sum_{\substack{k \in N \\ k \neq n}} \sum_{n \in N} \mu_k^n(t) \\ \times [S_{kn}(t) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(t) - \sum_{a \in A(k)} u_a^n(t)] \\ + \sum_{n \in N} \mu_n^n(t) \cdot \sum_{a \in A(n)} [-u_a^n(t)] \\ + \sum_{a \in A} \sum_{n \in N} \sigma_a^n \left[\int_t^{t+\bar{\tau}_a^n(t)} v_a^n(\omega) d\omega - x_a^n(t) \right] \end{aligned} \quad (12.5.12)$$

其中, $\mu_a^n(t)$ 、 $\sigma_a^n(t)$ 是 Lagrangian 乘子, $\mu(t) = (\dots, \mu_k^n(t), \dots, \mu_l^n(t), \dots)$, $\sigma(t) = (\dots, \sigma_k^n(t), \dots, \sigma_l^n(t), \dots)$ 。

由 Pontryagin 最小值定理可得:

$$\frac{\partial L}{\partial u_a^n(t)} \geq 0 \quad (12.5.13)$$

$$u_a^n(t) \cdot \left[\frac{\partial L}{\partial u_a^n(t)} \right] = 0 \quad (12.5.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial v_a^n(t)} \geq 0 \quad (12.5.15)$$

$$v_a^n(t) \cdot \left[\frac{\partial L}{\partial v_a^n(t)} \right] = 0 \quad (12.5.16)$$

$$\lambda_a^n(t) = - \frac{\partial L}{\partial x_a^n(t)} \quad (12.5.17)$$

$$\dot{x}_a^n(t) = \frac{\partial L}{\partial \lambda_a^n(t)} \quad (12.5.18)$$

$$x_a^n(0) = 0 \quad (12.5.19)$$

$$\lambda_a^n(T) = 0 \quad (12.5.20)$$

$$u_a^n(t) \geq 0, v_a^n(t) \geq 0, x_a^n(t) \geq 0 \quad (12.5.21)$$

12.5.4 模型最优解的经济学解释

模型 12.5.9 式的目标函数对于控制变量具有凸性, 因此最优解唯一。我们可以证明该模型最优解路段负荷、流入率、流出率符合上述定义的动态用户最优条件。

假设路径 p 连接一个起点 $k \in N$ 及终点 $n \in N$, 则 p 可用下述一般形式表述:

$$p \equiv [k = k_0, a_1, k_1, \dots, k_{m-1}, a_m, n = k_m] \quad (12.5.22)$$

由式 12.5.13~12.5.16, 可得:

$$\frac{\partial L}{\partial u_{a_i}^n(t)} = \lambda_{a_i}^n(t) - \mu_{a_{i-1}}^n(t) \geq 0 \quad (12.5.23)$$

$$u_{a_i}^n(t) \cdot \frac{\partial L}{\partial u_{a_i}^n(t)} = u_{a_i}^n(t) (\lambda_{a_i}^n(t) - \mu_{k_{i-1}}^n(t)) = 0 \quad (12.5.24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial v_{a_i}^n(t)} = c_{a_i}(t) - \lambda_{a_i}^n(t) + \mu_{k_i}^n(t) \geq 0 \quad (12.5.25)$$

$$v_{a_i}^n(t) \cdot \frac{\partial L}{\partial v_{a_i}^n(t)} = v_{a_i}^n(t) (c_{a_i}(t) - \lambda_{a_i}^n(t) + \mu_{k_i}^n(t)) = 0 \quad (12.5.26)$$

将 12.5.23、12.5.25 式相加,有:

$$\frac{\partial L}{\partial u_{a_i}^n(t)} + \frac{\partial L}{\partial v_{a_i}^n(t)} = c_{a_i}(t) - \mu_{k_{i-1}}^n(t) + \mu_{k_i}^n(t) \geq 0 \quad (12.5.27)$$

如果 $u_{a_i}^n(t) > 0, v_{a_i}^n(t) > 0 \forall a \in A(p)$, 则有:

$$c_{a_i}(t) = \mu_{k_{i-1}}^n(t) - \mu_{k_i}^n(t) \quad (12.5.28)$$

定义:

$$\varphi_p = \sum_{a \in A(p)} c_a(t) \quad \forall p \in P_{kn} \quad \forall t \in [0, T] \quad (12.5.29)$$

上式 φ_p 为构成路径 p 所有路段的瞬时路段走行时间之和, 与 Wie et al. (1990)、Lam & Huang (1995) 所不同的是, 他们建立的 φ_p 有着一项无法解释其意义的附加项。

由式 12.5.28, 可将 12.5.29 式改写为:

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) &= [\mu_{k_0}^n(t) - \mu_{k_1}^n(t)] + [\mu_{k_1}^n(t) - \mu_{k_2}^n(t)] \\ &\quad + \cdots + [\mu_{k_{m-1}}^n(t) - \mu_{k_m}^n(t)] \\ &= \mu_{k_0}^n(t) - \mu_{k_m}^n(t) \end{aligned} \quad (12.5.30)$$

由推导过程可知, 如果 $u_{a_i}^n(t) > 0, v_{a_i}^n(t) > 0$, 则

$$\varphi_p(t) = \inf\{\varphi_b(t), \forall b \in P_{kn}\} \quad (12.5.31)$$

其中, P_{kn} : 连接 $k-n$ 的路径集合。

即对于 OD 对 $k-n$ 间的任一路径 $p \in P_{kn}$, 如果其流入率

$u_a^n(t) > 0$, 流出率 $v_a^n(t) > 0, \forall a \in A(p)$, 则其路径 p 上的交通时间等于最小的交通时间, 且有:

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t) = \cdots = \varphi_j(t) \leq \varphi_{j+1}(t) \leq \cdots \leq \varphi_l(t) \quad (12.5.32)$$

$u_a^n(t) > 0, v_a^n(t) > 0$, 对于所有 $a \in \{A(p) | p = 1, 2, \cdots, j\}$

其它情况 对于某些 $a \in \{A(p) | p = j+1, j+2, \cdots, l\}$

其中 l 为 P_k 的度, 即连接 $k-n$ 的路径数。

由以上分析可知, 最优控制问题 12.5.9 式的最优解所对应的交通流形态与动态用户最优相符合。

12.5.5 模型的求解

我们将求解模型 12.5.9 式的离散时间形式。该离散时间形式可视为一个非线性规划问题, 拟用 Frank-Wolfe 法求解。模型的具体形式如下:

$$\min J = \sum_{i=1}^T \sum_{a \in A} \int_0^{v_a^n(i)} c_a(x_a(i), \omega) d\omega \quad (12.5.33a)$$

约束条件对于 $i=0, 1, \cdots, T-1$

$$x_a^n(i+1) = x_a^n(i) + u_a^n(i) - v_a^n(i) \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.33b)$$

$$\sum_{a \in A(k)} u_a^n(i) = S_k^n(i) + \sum_{a \in B(k)} v_a^n(i) \quad \forall n \quad \forall i \quad k \neq n \quad (12.5.33c)$$

$$\sum_{a \in A(n)} u_a^n(i) = 0 \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.33d)$$

$$\sum_{j=i}^{i+\bar{r}_a^n(i)} v_a^n(j) = x_a^n(i) \quad \forall a \quad \forall n \quad (12.5.33e)$$

$$x_a^n(0) = 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad (12.5.33f)$$

$$x_a^n(i) \geq 0, u_a^n(i) \geq 0, v_a^n(i) \geq 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.33g)$$

其中 $\bar{\tau}_a(i)$ 定义如下:

如果 $(k - 0.5) \cdot \Delta t < \bar{\tau}_a(i) < (k + 0.5) \cdot \Delta t$, 则 $\bar{\tau}_a(i) = k$ 。

Frank-Wolfe 算法属于求解线性约束的可行下降方法, 是建立在目标函数的线性逼近基础上的。因此, 该方法在每次迭代时必须求解一次线性规划以确定下降方向, 并通过在下降方向上对目标函数极小化求出最佳步长。对于上述模型 12.5.33 式, 其求解的线性规划为:

$$\min \bar{J}(p, q, y) = \nabla_x J \cdot p^T + \nabla_v J \cdot q^T + \nabla_x J \cdot y^T \quad (12.5.34a)$$

约束条件对于 $i=0, 1, \dots, T-1$

$$y_a^*(i+1) = y_a^*(i) + p_a^*(i) - q_a^*(i) \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.34b)$$

$$\sum_{a \in A(k)} p_a^*(i) = S_k^*(i) + \sum_{a \in B(k)} q_a^*(i) \quad \forall n \quad \forall i \quad k \neq n \quad (12.5.34c)$$

$$\sum_{a \in A(n)} p_a^*(i) = 0 \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.34d)$$

$$\sum_{j=i}^{i+\bar{\tau}_a(i)} q_a^*(j) = y_a^*(i) \quad \forall a \quad \forall n \quad (12.5.34e)$$

$$y_a^*(0) = 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad (12.5.34f)$$

$$y_a^*(i) \geq 0, p_a^*(i) \geq 0, q_a^*(i) \geq 0 \quad \forall a \quad \forall n \quad \forall i \quad (12.5.34g)$$

目标函数等价于:

$$\begin{aligned} \min \bar{J}(p, q, y) = & \sum_{i=1}^T \sum_n \sum_a \left[\frac{\partial J}{\partial u_a^*(i)} \cdot p_a^*(i) + \frac{\partial J}{\partial v_a^*(i)} \cdot q_a^*(i) \right. \\ & \left. + \frac{\partial J}{\partial x_a^*(i+1)} \cdot y_a^*(i+1) \right] \end{aligned} \quad (12.5.35)$$

分项计算, 有:

$$\frac{\partial J}{\partial u_a^n(i)} = 0 \quad (12.5.36)$$

$$t_{1a}(i) = \frac{\partial J}{\partial v_a^n(i)} = \frac{\partial J}{\partial v_a(i)} \cdot \frac{\partial v_a(i)}{\partial v_a^n(i)} = c_a(x_a(i), v_a(i)) \geq 0 \quad (12.5.37)$$

$$\begin{aligned} t_{2a}(i) &= \frac{\partial J}{\partial x_a^n(i)} = \frac{\partial J}{\partial x_a(i)} \cdot \frac{\partial x_a(i)}{\partial x_a^n(i)} \\ &= \int_0^{v_a(i)} \frac{\partial c_a(x_a(i), \omega)}{\partial x_a(i)} d\omega \geq 0 \end{aligned} \quad (12.5.38)$$

$$t_{2a}(T+1) = 0 \quad (12.5.39)$$

因此,目标函数可写成:

$$\begin{aligned} \min \bar{J}(p, q, y) \\ = \sum_{i=1}^T \sum_{\pi} \sum_a [t_{1a}(i) \cdot q_a^n(i) + t_{2a}(i+1) \cdot y_a^n(i+1)] \end{aligned} \quad (12.5.40)$$

在具体算法中,我们将更新估计路段实际走行时间的类似对角化技术的过程作为外部循环,内部循环为 Frank-Wolfe 迭代过程。步骤如下:

Step 0: 初始化。确定初始可行解 $\{x_a^{(0)}(i)\}$ 、 $\{u_a^{(0)}(i)\}$ 、 $\{v_a^{(0)}(i)\}$ 以及初始估计走行时间 $\{\tau_a^{(m)}(i)\}$, 设外部循环次数 $m=1$ 。

Step 1: Frank-Wolfe 迭代过程。设内部循环次数 $n=1$ 。

Substep 1: 应用最新的最优解更新路段走行时间 $\{c_a^{(n)}(i)\}$, 根据公式计算 $\{t_{1a}(i)\}$ 、 $\{t_{2a}(i)\}$ 。

Substep 2: 根据目前 $\{t_{1a}(i)\}$ 、 $\{t_{2a}(i)\}$, 调用 LP 求解器求解, 得到可行解 $\{p_a(i)\}$ 、 $\{q_a(i)\}$ 、 $\{y_a(i)\}$ 。

Substep 3: 一维寻优, 寻找最优步长。

Substep 4: 沿最优步长移动, 获得新的最优解 $\{x_a^{(n)}(i)\}, \{u_a^{(n)}(i)\}, \{v_a^{(n)}(i)\}$ 。

Substep 5: 判断。如果 n 等于事先给定的次数, 则转向 Step 2; 否则, 令 $n = n + 1$, 转向 Substep 1。

Step 2: 判断是否收敛, 如果 $\tau_a^{(m)}(i) \approx \tau_a^{(m-1)}(i)$, 满足精度要求, 则停止, 得到近似最优解 $\{x_a(i)\}, \{u_a(i)\}, \{v_a(i)\}$; 否则, $m = m + 1$, 转向 Step 1。

外层循环次数 m 与内层循环次数 n 是相关的。如果 m 较大, n 可以较小。即内层的 Frank-Wolfe 过程不必收敛。根据 Mahmassani & Mouskos (1988) 就对角化过程的计算研究, 一般内层循环取 2~3 次时, 收敛情况较优。

12.6 动态交通分析的研究展望

Pas 于 1990 年发表文章, 动态分析的时代 (the dynamic analysis era) 到来了。那么, 到底是什么原因吸引众多学者致力于动态交通分析的研究之中呢? 我们可以归纳出以下几点:

① 将来的交通需求预测不仅仅为制定交通规划服务, 而且要为制定交通管理规划服务。城市交通拥挤、堵塞问题是严重的“城市病”之一, 解决城市交通问题必须从供求两方面着眼, 提高交通容量和加强交通管理并举。作为交通拥挤对策和各种交通管理政策, 诸如动态路径诱导、弹性工作制、时差出勤等逐渐得到实施。那么, 针对研究对象不同的交通特性, 究竟应该采取何种对策, 该对策实施之后可能产生何种效果? 其导入效果分析与评价, 成了当务之急。但是, 拥挤、堵塞情况下的交通需要和交通流从本质上来说是非定常流。表现拥挤的形成、成长、消失的机理则动态分析方法

必不可少。

② 近年,随着电子计算机、信息通信网的发展和车辆检测器技术的进步,使得实时处理交通成为可能。所以应用最新电子技术的先进的交通管理系统得到了开发。例如通过路车间通信实现的路径诱导系统、提供旅行时间和拥挤状况的信息系统以及现代化信号控制管理系统等,伴随着高度信息化社会的到来逐渐进入实用阶段。因此,作为这些新系统的基础情报,把握时时刻刻变动着的交通需要就是极为必要的了。

③ 从详细分析人的行动的立场出发,将包括交通在内的行动放在人的活动的大范围内,从时间空间上进行把握的活动分析(activity-based analysis)、以多个时点的行动分析为基础的系列数据分析(panel analysis)等新的分析手法的研究逐渐开展了起来。另外,通过这些分析,从人的行动可以看到的学習过程、习惯、对交通环境变化反应的滞后和阈值的存在等,这些只有通过动态分析才能搞清楚。因此动态交通分析引起了研究者的更大关心。

④ 用 1 天的平均指标说明时时刻刻变化情况下的交通行动非常有局限性。另外也是导致偏差的原因。所以过去用静态分析处理的问题,重新用动态分析加以处理,可以改善预测精度。

从以上分析可以看出,动态交通分析的研究内容很广泛。从时间角度,动态交通分析可分为日变动特性分析(day-to-day dynamics)、1 天中的时间变动特性分析(time-of-day dynamics)及实时动态特性分析(real-time dynamics)3 类。

最近十几年,关于动态交通需求、交通行动分析的研究花费了较大力气。但无论是从理论、还是从实践上都还残存着许多尚未解决的问题。

① 关于出发时刻决定问题,将模型向多 OD 交通网的扩大和实用解法的开发是当务之急。Vythoulkas 以概率均衡为基础的出

发时刻,径路同时选择问题在现在是唯一成功的例子。应该注意的是,他的模型采用的旅行费用为现在旅行费用。但是,从其它观点来构造此问题也有可能。所以仍然有很多研究余地。另外,人的选择行动对他人的选择行动造成影响。在回避交通拥挤的点上人们的选择行动互相具有竞争性。如果注意到这些问题,Nash 均衡(利用者均衡的特殊解)和避免最坏事态的观点出发,Minmax 均衡为基础的出发时刻决定问题有新的研究价值。不管哪个模型,出发时刻决定问题在一定的時候总是要同动态交通分配问题综合起来,建立起理论体系。

② 关于动态交通分配问题,近年来的研究在理论上的成果很显著。尚未解决的理论问题以及实际应用时面临的问题有必要进一步开展研究。另外,为将动态交通分配用于实际交通网,开发更为有效的算法也很重要。

③ 关于学习调整过程的模拟模型。如何构造所谓的学习调整模型,以实测的数据为基础进行实证性研究很有必要。另外,从理论方面如果考虑日常通勤者需要量自身和处在交通环境没有变化的话,以学习为基础的试行反复进行,最终将收敛到用户均衡状态。此外,有必要研究 Smith 证明的保证向均衡解收敛的学习调整模型的构造。一般来说,也有必要弄清学习调整模型的收敛性条件。

④ 动态交通行动分析还处于研究阶段,将来会是很有发展前途的研究方向。今后,很值得从理论和应用等多方面进行研究。

⑤ 分时间带的交通需求预测可以在城市圈水平上应用,同时我们习惯的四阶段预测方法也可用此法,因而最具有实用性。作为今后课题,可以开发分时间带的四阶段预测法。

⑥ 在进行理论研究的同时,应用研究也应广泛开展起来。探讨应用的可能性及模型与方法的适用范围也非常必要。

13 交通规划方案的评价

规划方案评价是指通过对备选方案进行交通流预测、效益分析,阐明其达成预期规划目标的可能性,为决策者选择最佳方案提供依据。同时,通过方案评价还能够发现方案中存在的问题,从而有助于及时解决问题或重新选择方案。此外,有些情况下通过对规划课题的深入探讨研究还可以从不同角度对规划目标本身产生新的认识。可见,方案评价是合理的交通系统规划过程中不可缺少的一步,是进行科学决策的极为重要的环节。

本章首先介绍社会基础设施建设的效益及其分类,规划方案评价的基本思路和一般方法,归纳交通规划评价的一般步骤。然后介绍在交通规划评价中占重要地位的评价主体的分类及各自的评价项目。最后介绍从各评价主体的角度进行评价的主要方法,说明将不同主体的评价进行综合化的方法。

13.1 社会基础设施建设的效益

准确分析评价社会基础设施的效益,不仅为判定对社会基础设施进行资源分配即投资的有效性及确定社会基础设施的建设水平和优先顺序所必须,而且还能够依据它所达到的效益积极地促进社会政策、经济政策充分发挥作用。

社会基础设施建设的效益因受其影响的主体的不同而异,这里对主体的分类及对其产生的效益的内容进行分析。

13.1.1 受效益影响的主体

受社会基础设施建设影响的主体包括设施的提供者、设施的经营者(服务提供者)、使用者、周围居民、地方政府和国家等。对设施提供者而言,效益是指设施供给量的增加、设施供给目标的完成;对服务提供者而言,效益是指服务供给量增加而成本降低所带来的利益;对使用者而言,效益是指享受到更加完善的服务;对周围居民而言效益是指设施带来的生活服务水平提高,各种环境影响以及土地所有者的资产价值的变动。设施使用者与周围居民之间,依据他们各自的社会经济特性,对设施利用的方式、程度及受到影响不同,准确把握二者的差别非常重要。地方政府及国家得到的效益包括与设施利用相关的各种活动的活跃程度的提高以及税收的增加。另外,由于设施建设的实施实质上是对设施所在地区的投资,因此这种投资及建设工程本身对周围居民、地方政府和国家等主体来说也会产生就业增加、经济活动繁荣等影响。

13.1.2 社会资本积累效益的分类

社会基础设施建设的效益可从时间、空间、内容及功能等不同角度进行分类。这里主要着眼于效益的功能及受效益影响的不同主体对其进行分类。

从效益的功能来看,可分为公共投资项目本身所带来的项目效益和公共投资建成的设施的功能所带来的设施效益两类(见图13.1)。

项目效益是社会资本积累项目建设过程中产生的效益,它随着建设过程的开始而发生,包括设施建设中对各种原材料、建筑行业、相关产业的需求所产生的需要效益和产业活动中雇用劳动者

伴随交通设施建设的效果体系

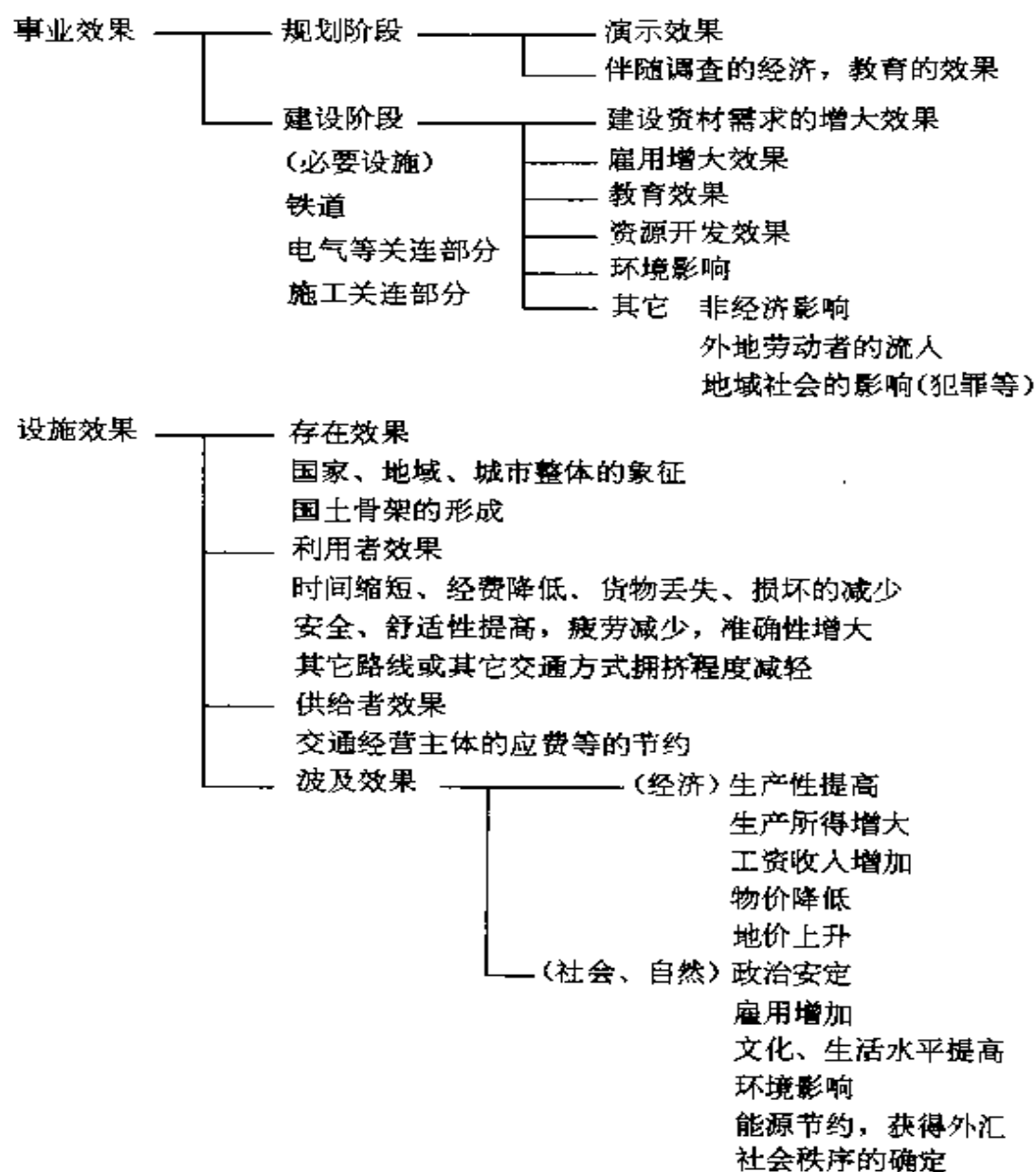


图 13.1 交通项目的效益

而产生的雇用效益。公共投资具有这类效益, 因此经常被用作解决经济萧条与失业的措施。

设施效益是指已建成的社会基础设施给周围及所在地区带来

的影响,包括对设施使用者、供给者、周围居民、自治体的直接影响和对地区经济、土地利用产生的间接影响。前者又可细分为设施使用者通过使用设施获得的使用者效益和供给者通过供给设施而获得利润的供给者效益等等。此外,由于设施的存在还具有使周围居民感受到利用可能性、安心感及城市轴线逐步形成等这样的存在效益。同时,设施对周围环境的影响也是周围居民所受到的重要影响之一。

设施建设的间接效益包括各种企业生产的扩大、地区所得的增加、就业机会的增加等对生产者而言的经济效益、对消费者的消费活动和生活观念的影响效益、对自治体的人口变化、土地利用变化的影响及对土地所有者资产价值变化产生影响的土地利用效益。

13.2 规划方案评价的基本思路

交通系统规划是多主体多目标规划,它所影响的范围极其广泛。与这一特点相对应,方案评价必须采用综合的评价方法。为进行有效的评价,应注意以下几点。

① 将决策者面临的主要课题及决策项目作为评价的关键点。选择适合被决策对象性质的评价标准、评价的时间范围、考虑因素、分析范围及分析规模。

② 对照规划的目标要求评价判断方案的效益及影响。

③ 从受到交通规划、政策影响的不同主体的角度分别进行评价。由于交通规划影响范围广,在明确效益和费用的主体归属问题上达成一致意见非常重要。

④ 规划的影响在不同时间影响程度不同。因此,它对发生作用的时间轴很敏感。交通设施整体产生影响的时间较长。因此,在规划中注意各种影响产生的时间分布,考虑到用于将来维护、运营

的费用和它对地域开发产生的影响非常重要。

⑤ 对于大范围的地域交通规划,方案评价不仅要在地域整体进行分析,而且要做到能够对不同地区分别进行分析并提供必要的信息。

⑥ 评价中应对各备选方案的实施可能性进行分析。明确规划实施过程中必须的资金、人员、土地、技术关键、时间及其它资源,对备选方案实施的可能性作充分研究。

⑦ 评价结果应便于决策者理解采用,并及时地提供有关方案价值的信息。

规划方案评价的基本信息为有关方案产生的影响方面的信息和评价主体的评价函数方面的信息。方案产生影响的信息包含规划设施建成后交通系统的交通流状况(交通量、交通服务)、达到规划目标的程度、规划实施所必需的资源以及对其它相关主体产生的影响。当评价主体单一时,评价函数明确,能够完全把握规划方案产生影响的情况,这种情况下的方案评价比较简单。但对于多主体多目标规划,由于不存在单一的评价函数,而且其影响多种多样,又存在无法定量测量和具有很大大不确定性的部分,所以很难事先准确地分析把握。因此,以下所介绍的各种评价方法都是侧重于特定方面的局部评价,决策者必须将这些评价结果与其它信息结合起来进行分析决策。

首先讨论关于多目的性问题。从目的个数是一维的还是多维的来看,一般的经济评价方法是把货币尺度作为唯一尺度评价结果;而表现分析等技术评价方法、环境评价方法则是参考多项评价指标分析其结果水平(目的达成水平)的多维评价方法。此外,费用效益分析也是一种多维评价方法,它从多种效益以及达成这些效益所必须的费用角度进行评价。

关于多主体性,可分为单一主体和多数主体两种评价。一般的经济评价方法是单一主体评价,它可将多个单一评价结果综合在

一起形成最终评价结果。民营企业经营中所采用的一些评价方法都属于单一主体评价法,比如在能够达到一定效益的若干方案中取费用最低者的费用分析;寻求总收入减去总支出后所得纯收入最大化的财务分析;以及收益性分析等方法。但对于交通投资这样的公共投资、公共规划,其成果未必反映在市场上,所以基于市场价格的费用分析、财务分析不适用,而以费用效益分析为核心的经济分析逐步发展起来。但由于它是从公共部门或它所代表的社会这样一个单一主体出发进行的评价,所以不考虑主体之间费用效益的归属问题。

多数主体评价是指针对多种价值(目标群)进行评价,其评价项目或其影响项目多元化。作为多主体多目标评价方法发展起来的主要有对费用效益分析进行拓展,包含环境、社会在内的能够明确表示出影响的归属主体的规划平衡表法(planning balance sheet)、对多目标多主体引入明确的权重系数来确定备选方案顺序的目标达成度矩阵法(goals—achivement matrix)、协调性分析

表 13.1 评价方法的分类

评价主体	多 目 的 性	
	单一目的	多个目的
单一主体	费用分析 财务分析(收益性分析) 经济分析(费用效益分析)	技术评价(表现分析等) 环境评价 费用效益分析
复数主体 有最终评价(单一主体) 无最终评价	— —	目标达成度矩阵法 多标准分析 综合评价方法(计划平衡表法,框架工作法等)

(concordance analysis) 等多基准分析方法(multi-criteria Analysis)。这些多主体评价在应用中有两种方式,一种方式是在考虑相关主体的影响归属的基础上,由某一主体(规划者或决策者)进行最终评价,排列出备选方案的优先顺序;另一种方式则把最终评价委托给议会、公听会及其他决策机构,由他们根据不同相关主体所受到的影响进行评价。目标达成度矩阵法、多基准分析属前者,规划平衡表法以及后面介绍的英国的框架工作法(framework approach)属后者。上述分类归纳为表 13.1。

这些评价方法中的主要部分的内容将在后面作概要介绍。

13.3 交通规划评价的步骤

交通是人们社会生活必不可少的部分,各种城市设施是保证交通功能得到充分发挥的手段。交通设施的规划、建设与经营必须以为使用者提供高效、广泛的服务,引导周围的土地利用及城市构造向所期望的方向发展且不给周围环境带来不良影响为目标。

交通规划评价是从相关人员的立场出发评价交通规划在多大程度达到了目标要求。交通规划评价的过程如图 13.2 所示。

首先将规划目标分解为若干独立的评价项目,对各个评价项目应能够从不同角度进行客观评价,即可以设定具体的评价指标(尺度),求出各自的评价值。为使评价指标能够以交通规划目标为基准对规划草案作出适当评价,在选择指标时应使其能够描述规划目标的所有侧面,并且使评价项目之间不重叠。为了能对交通规划进行综合评价,还必须将不同评价指标的评价值转换为用一种共同的尺度来表示。然后应当采用适当的方法从经营者、使用者、沿线居民、地域社会、国家等与交通设施相关的各个主体的角度出发对交通规划进行评价,并综合各种评价结果进行最终判断。

图 13.2 所示的交通规划评价的步骤亦适用于交通规划以外

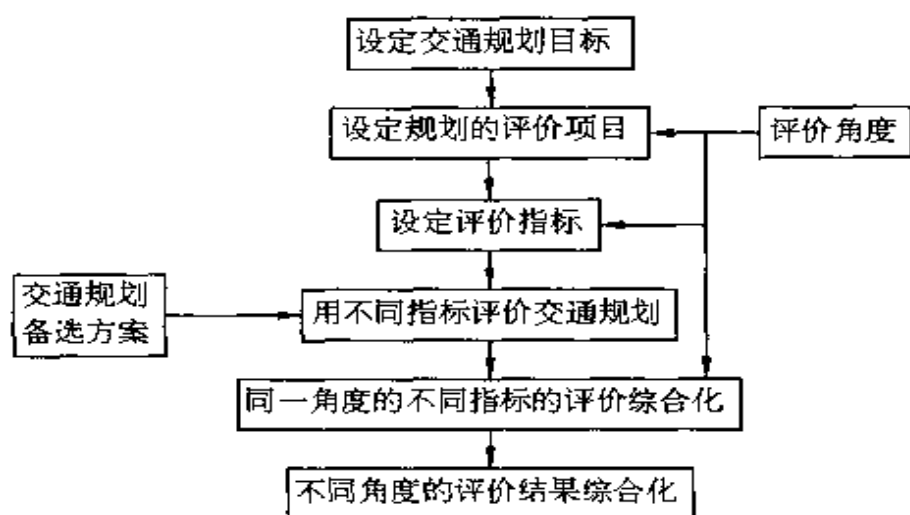


图 13.2 交通规划评价步骤

的其它土木规划。

13.4 交通规划的评价主体与评价指标

交通规划的评价主体可分为使用者、经营者、交通设施周边居民、地方政府和国家。以下分别介绍它们各自的评价观点。

1. 使用者

交通设施的服务对象主要是各种交通工具的乘客、汽车及自行车的使用者、货主等。从使用者的观点出发,评价项目包括交通的迅速性、低廉性、方便性、可靠性、安全性、舒适性、自由性等等。以往评价重点放在迅速与低廉性方面,近来逐渐趋向于重视可靠性、舒适性、自由性等质量方面的评价项目。

2. 经营者

交通设施的建设与经营可由公共机关或民间企业来完成。从经营者的观点出发,评价项目包括收益性(建设、维护管理费用,补偿费,车票收入,运营经费)、项目的施工难易程度、运营的柔软性(设施扩展或缩减的自由度)。

3. 周围居民

周围居民是指居住于交通设施的附近,由于交通设施建设及交通服务的变化而直接受到环境等方面影响的人。从周围居民的观点出发,评价项目包括环境方面的噪音、振动、空气污染、交通事故潜在危险、日照、景观、电波妨害、影响个人生活等,此外对交通方便性及地价也有影响。

4. 地域社会

地域社会是指由于交通设施建设带来的土地布局条件的变化而受到一定程度时间滞后的间接影响的个人和企业,但不含上述的周围居民。从地域社会的观点出发,评价项目包括企业选址布局条件的变化、生产效益的变化、市场范围扩大、旅游开发情况、地价变化、需求效益等。

5. 国家

国家的评价观点是(1)~(4)内容的综合,它从经济发展、地区发展差异、税收等角度评价交通规划。将上述交通规划的评价主体及其评价项目整理为表格形式,如表 13.2 所示。

表 13.2 交通规划评价主体、评价项目及其指标

评价主体	评价项目	评价指标
设施利用者	迅速性,经济性,便利性,确定性,安全性	所需时间,票价,所需时间变动量,事故率
设施经营者	收益性,施工难易度,经营的柔软性	建设经营费,票价收入
周边住民	环境影响项目,资产价值	噪音,振动,大气污染,景观,地价
地域社会	企业选择条件的变化,生产收益,市场圈扩大	雇用者数增加,收入立地可能企业数
国家	经济发展,缩小地区差,税收	国民收入,收入差,税收

13.5 不同评价主体的评价方法

13.5.1 使用者角度的评价方法

从使用者角度出发进行评价时,可考虑按如下步骤进行:先确定低廉性、迅速性等评价项目相应的评价指标,然后求算各指标的评价值,再进行综合化的方法(如后面所述的评价函数法等)。这里介绍的是利用经济学中消费者剩余的概念来把握从交通服务利用者角度出发的综合评价的方法。

一般认为,两地点之间的交通只有在由交通引起的效用、收益超出交通所消耗的费用、时间及其它代价(统称为一般化费用)的情况下发生。对于两个交通小区之间的交通可以设定一个如图13.3所示的交通需要函数,当一般化费用为 C_0 时,使用者的效益

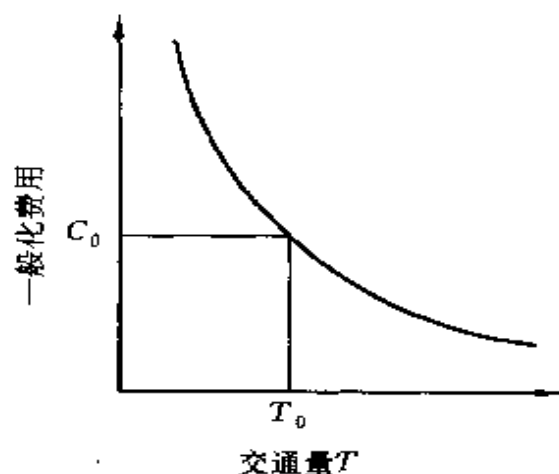


图 13.3 交通需求系数

可用消费者剩余的形式表达出来,即

$$CS(C_0) = \int_0^{T_0} G(T) dT - C_0 T_0 \quad (13.5.1)$$

其中 $G(\cdot)$ 为需求函数 $D(\cdot)$ 的反函数, T_0 为交通量。

这里的消费者剩余是指交通总收益与交通所需一般化费用总和之间的差值,它代表了交通使用者实际得到的利益。因此,在进行交通规划评价时可根据消费者剩余值来评判优劣。但是在使用这种方法时必须将费用、所需时间、安全性、方便性、可靠性综合起来求得一般化费用,并且要求建立能够综合反应两地点间交通服务情况的需求函数,而确定需求函数是极其困难的。

此外,作为描述使用者对各种交通方式需要程度的需求函数的一种,有时还要建立起交通方式选择模型,这类模型中应反映出人们的个人特性及利用交通的习惯,这就要求弄清楚这些个性特征对交通方式评价会产生多大程度的影响。

13.5.2 经营者角度的评价方法

从经营者角度出发,可以用最被重视的收入与支出金额所确定的收益性进行定量评价,但其它项目只能作定性评价,为将二者综合可采用后面提到的意见调查法。这里对收益性评价方法予以介绍。

由交通规划产生的收入与支出一般存在于一定的时间段内,因此应当选择合适的贴现率。在进行收益性评价时,可以将设施使用期间内的全部收入与支出的价值折算为现值或每年的平均值。用于交通规划实施的费用支出主要指用地费、建设费、维护运营费等,收入则主要指车票收入及其它营业收入,有时也将缩短时间的货币额、地价上升及税收等部分考虑在内。

经营者主要从投资效率的观点评价交通规划,依据收入与支出金额计算出内部收益率、收入支出比、收支差、投资回收期等指标,以评定规划的优劣。

项目费用一般用项目实施必需的原材料、劳动力等的折核金额来表示。因为将某项目所需的费用金额作为投资用于该项目,就不能将这些投资再用于其它项目,从而放弃了从其它项目获得收

益的机会,因此将为实施某项目而放弃的可能收益中的最大值称为该项目的机会费用。判定投资效率应重视机会费用。

13.5.3 周围居民角度的评价方法

从周围居民的观点出发评价交通设施规划时,应综合评价环境方面的负效应和交通方便性提高、地价上升等正效应,以往主要的评价方法是用于事先判断环境影响的环境评价法。这种环境评价法可分为对不同项目分别进行评价、预测的方法和对各项目进行综合评价的方法两类。前者尽可能广泛地考虑规划实施带来的影响,评价结果中含影响内容及归属主体等多方面信息,如财务报表法、清单法、矩阵法等,后者主要指使用效用函数的社会费用法、评价函数法等。这里主要介绍评价函数法。

在评价函数法中,居民对交通规划的综合评价值是用各评价项目的评价值的加权线性组合值来表达的,如式 13.5.2 所示。

$$U = \sum_i^n w_i \cdot u_i(s_i) \quad (13.5.2)$$

其中, U 为综合评价值; $u_i(s_i)$ 为评价项目 i 与水准 s_i 相应的评价函数; w_i 为评价项目 i 在综合评价中所占的相对权重。

评价项目的评价函数及相对权重的确定方法有很多种。

① 评价函数的确定方法

评价函数 $u_i(\cdot)$ 的确定方法包括向专家询问物理量与评价点相互关系的直接询问法、基于期待效用概念的询问法以及调查多数居民的满意程度再进行回归分析的方法等。

② 评价项目的相对权重的确定方法

评价项目相对权重 w_i 的确定方法包括收集人们实际的依个人爱好进行选择的结果数据,然后应用多变量解析法进行分析的方法和直接征集个人与集团的价值观点的社会调查方法两类,其中后者比较常用。直接征询价值观点的这类方法中,也逐渐发展出与基于期待效用概念的专家询问法相结合的方法以及利用直接评

点法、顺序法、均衡法向人们征询意见来确定的方法。其中顺序法与均衡法可看作是逐对比较法的变形,其基本思路相同。

13.5.4 地区社会、自治体角度的评价方法

如前所述,地区社会、自治体角度的评价项目主要着眼于交通设施建设运营给所在地区的生产活动及社会活动带来的影响。与这类评价项目相应的评价方法主要有综合计量各评价指标的各个单独影响效益的影响分析法、依据以计量土地利用效益为中心的土地利用模型、综合把握与地区经济活动相关影响的产业相关模型和计量经济模型发展而成的系列方法。

影响分析法按照不同项目分别计量交通设施建设、运营所产生的经济、社会、环境等各种影响,并阐明各种影响具体的作用程度。这种方法的特点是各种影响的归属关系明确,但难于测定规划波及的间接效益,因此主要用于评价即时的直接效益,或者在整理不同项目的各自效益阶段完成重复计算。

综合把握地区经济影响的方法是一种综合计量交通规划实施所产生的项目效益、利用效益及间接影响效益的方法。这种方法可以定量地把握一种服务的生产与消费给另一种服务的生产消费带来的间接影响效益,从而能对由于交通设施规划的实施而产生的交通条件的变化给地区经济指标带来的影响进行评价,因此能够反应出地区经济特性进而掌握地区间及产业间资金与货物的流动形态。

利用上述方法,将交通规划实施前后的各项目评价值及综合评价价值加以比较就可以得出评价结果。

13.6 交通规划的综合评价法

交通规划评价是判断规划方案能在多大程度上达到预期目标的过程。为对交通规划进行综合性评价,必须将各种角度的评价意

见加以综合。目前,将不同角度的评价进行综合的方法的发展还不够完善,下面介绍一些常用的方法。

1. 费用效益分析

费用效益分析是将交通设施的使用者、经营者、周围居民、地区社会、自治体、国家等不同评价主体的费用与效益分别求和,依据两者的差或比进行交通规划综合评价的方法。这种方法主要用于评价比较容易以货币尺度来度量的项目。

2. 费用效益分析与社会、环境评价相结合的方法

这种方法是将与交通规划相关的社会、环境方面的评价项目换算为货币指标加入到费用效益分析的相应指标中,即以确保社会、环境方面的水准要求为约束条件进行费用效益分析,与后面的方法 3 相近。

3. 费用效益分析与环境评价并用的方法

这种方法是指对容易换算成货币单位的评价项目进行费用效益分析,同时对社会、环境方面进行评价,评价过程中含有市民参加评议的政治决策过程的一种评价方法,是目前最广泛采用的方法。同时为向决策者提供清晰易懂的多方面评价信息,这种方法在使用时逐渐发展成矩阵形式及图表形式等。

4. 费用效益分析与依据社会、环境评价排序的方法

这种方法是综合费用效益分析的结果与社会、环境评价结果,按照不同评价主体的观点对交通规划备选方案进行排序,再由决策者进行综合评价的方法,这种方法在确定最后结果时也要采用与 3 方法相同的市民投票等政治决策过程。

5. 不同主体评价综合化的理想方法

在国外,现在的不同主体评价综合化的方法多是以不同主体各自的评价信息为基础,进行某种归纳整理后,采用市民投票等政治决议方式来完成最终评价。这里应当更加充分考虑对于某一规划目标实现后,各主体对交通规划的满意程度的总和最大化及不

同主体间满意程度差别最小化之间的协调统一,将能够带来满意程度和最大的交通规划方案确定为最佳方案。此外,还应当把全部主体的各阶层的满意程度均达到一定水平之上作为评价标准之一。

13.7 几种主要的评价方法梗概

1. 费用效益分析

费用效益分析作为公共投资项目的评价方法被广泛使用,在交通系统规划方面也是一种最基本的经济评价方法。

费用效益分析是针对各备选方案分别计算其消耗资源的价值(费用)和产生服务的价值(效益),对这两方面以纯效益最大化为标准进行比较,它是一种有关经济投资效率的评价方法,其分析流程如图 13.4 所示。这种方法的不足之处较多,例如对费用、效益的总体难以用货币单位进行定量计量,由于市场不完善产生的价格偏差问题,如何确定资金贴现率的问题,大规模项目的价格变动问题,风险的不确定性问题等方面都很难处理。

费用效益分析用于交通规划时,在效益的影响范围、多样性方面都受到限制,主要用于对时间节约效益和降低行驶费用这类直接效益进行评价。在日本,对于主要交通项目个别地有些采用费用效益法进行评价,而欧美国家已将该方法的使用标准化。在日本,以道路整体规划为对象的费用效益分析手册的制定也正在进行。这也是我国对公路建设效益进行评价的常规方法。

2. 费用有效度分析

费用有效度分析最初是针对新武器开发问题而在美国发展起来的系统分析方法中一种主要的评价方法,此后作为 PPBS 的一部分被广泛用于公共部门的分析。费用有效度分析与费用效益分析中把效益仅仅限定于货币单位所表现的效益的作法不同,它是

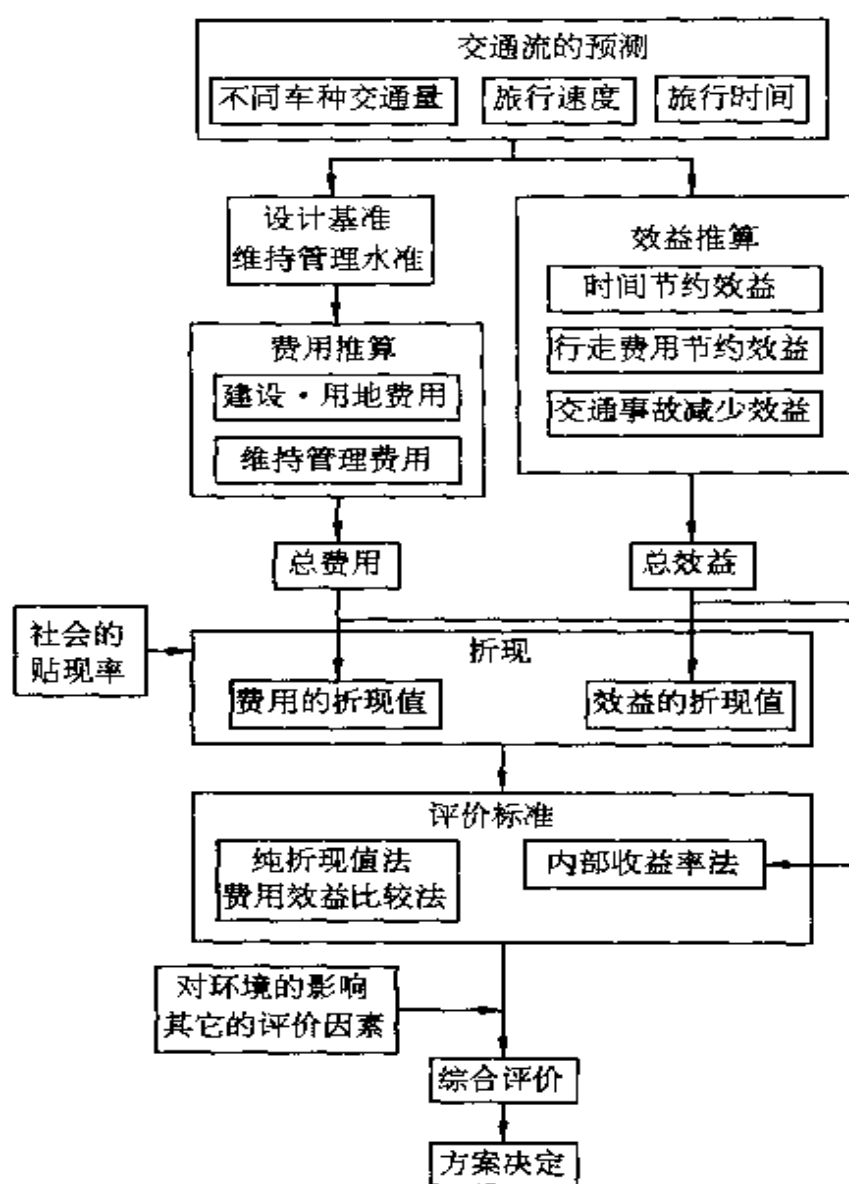


图 13.4 道路建设规划的费用效益分析流程

把各种目标综合在一起,用可计量的目标计算目标达成程度(效益),以单位费用所产生的效益或达成单位效益所消耗费用为基准对方案进行评价。这样,将效益转变的结果,就避免了货币换算带来的问题,由于用目标和与之直接相关的指标来计量,就能够对由多数目标或多个项目组成的系统进行评价,但为给出综合评价值,

必须确定他们的效益指标的权重。其它不足之处与上述费用效益分析相同。

3. 规划平衡表法

规划平衡表法是由英国学者提出的面向城市规划的费用效益分析法发展而成。这一方法的特点是将城市规划中相关的行动主体分为生产者、经营者、消费者,再将每一类划分成若干个称为分组的同性质小组,然后分别计算各分组的费用与效益。当归属于分组的费用与效益性质不同时,则将其按操作目的分别表示。

费用与效益尽量用货币单位表达。当不便于表达时,也可改用其它适当的单位。难于量化的部分也要明确表示出该影响要素的存在。这样可以收集各个有关行动主体对于各备选方案的费用与效益以及二者的收支平衡的指标,运用会计学上借贷对照表的概念制成一览表。因此,在规划平衡表中可以明确地表示出各分组之间费用及效益的转移关系,各分组的效益费用差即为收支。对于不能定量或即使能够定量但预测起来困难的操作目的,可照样列出,如能判断出符号,则将其记入。

最后将各操作目的排出名次,从各分组或生产者、经营者、消费者角度确定备选方案的优先顺序。

这种规划平衡表法在处理货币表示问题、费用与效益难于量化问题以及明确不同行动集团的费用效益归属方面优于原来的费用效益分析。但对这一方法也还存在一些有争议之处,如其中的费用效益仅在与规划目标对比过程中有相对意义,这种罗列的方法容易导致混乱等。后来以这一方法的思路为基础,又发展出英国道路规划评价所采用的框架法。

4. 目标达成度矩阵法

目标达成度矩阵(goals-achievement matrix)法是比尔于1968年提出的,该方法的最大特点,是针对城市规划所具有的多目标多业主的特点,在评价过程中明确地引入设定权重系数的

方法。

也就是说,相对于规划目标将社会全体的权重和构成社会的各集团的权重这两种权重作为已知条件,分别计算各组相对于各目标的达成度,然后把它们用上述两种权重进行统计从而得出综合评价指标。这里所说的目标含有被评价中的各个组视为重要因素的所有项目,达成度尽量采用可计量的形式来表达。相对于某一个目标的达成度,是按照接近目标的部分记为效益、远离目标的部分记为费用的方法来计量的。每一个目标均存在与之相应的最小费用,各个组别所负担的货币费用即代表了达成度。

这样推算出来的目标达成度可以整理为如表 13.3 所示的不同组别形式的矩阵。其中关于目标 α 、 β 等的相对权重系数 2、3 等为社会全体角度的权重系数,此外,从第 α 组角度来看相对的权重系数为 1、5 等。 A 、 H 等是按前面所述意义,用费用和效益来表示目标的达成度,“—”表示无变化。由于所有的费用与效益均用同一单位定量,可进行求和 ($\sum$)。

当特定的组对某一目标既支出费用又产生效益时,就不得不目标及组别的划分进行一定程度的合并。例如,在城市交通规划中减少噪音为目标之一,将某一块作为一个组时,对于通过交通方式转换这一现象来说,原有的汽车噪音减少的同时,新方案中采用的铁道交通又造成另一种噪音(与汽车噪音性质不同,人所感到的干扰程度不同)。

在社会分组中,应依据在评价基准或目标的权重方面性质相同的标准来划分。除划分不同经济、社会阶层所构成的组外,由于不同选址地点、不同土地利用方式的费用与效益也不同,据此分组对城市规划问题也很必要。

以目标达成度矩阵为基础,可以从社会整体的角度对备选方案进行评价。首先,将各目标达成度按不同组别的权重系数加权求和,然后再将它们按社会权重系数加权求和作为评价指标。通过改

表 13.3 目标达成度矩阵

目标	α			β			γ			δ		
相对权重 (社会)	2			3			5			4		
归属小组	相对 权重	费用	效益	相对 权重	费用	效益	相对 权重	费用	效益	相对 权重	费用	效益
a	1	A	D	5	E	—	1	} M	N	1	Q	R
b	3	H	} J	4	—	R	2		—	2	S	T
c	1	L		3	—	S	3		—	1	V	W
d	2	—		2	} T	—	4		—	2	—	—
e	1	—	K	1		U	5		P	1	—	—
计		Σ	Σ					Σ	Σ			

变权重系数,可以对规划方案从不同角度进行评价,从而分析出它对于评价角度变化的稳定程度。

上述的比尔方法将经济效率性与其它指标并列在一起,对各目标各组别的重要性用权重系数来度量,是与政治决策过程中的社会的评价、选择方法一脉相承的。这种方法的关键所在是两种权重系数的确定以及由此而决定的目标达成度的加权求和,而这个过程带有相当程度的随意性,这是该方法没有解决的一个根本问题。但是,该方法的意义在于,能够明确地提出目标的权重,从而趋向于进行更合理的社会选择。

5. 协调性分析

协调性分析是以法国的 Electre' 法为基础,由内伊坎普提出的一种用于方案评价的多标准评价方法。评价过程的第一步是将规划方案产生的各种影响形成矩阵以及给定各评价项目的权重系数,在此基础上求出表示备选方案优劣的两种指标,即用评价项目的权重系数判断得到的、表示备选方案相对优势的协调指标,和以方案所产生的影响的差异为基础表示其劣势的不协调指标。对全部的备选方案求出上述两种指标值后,整理成协调性矩阵和不协调性矩阵,依据这些矩阵用一定的方法判断,从而确定备选方案的优先顺序。判断方法有两种,① 对协调性指标和不协调性指标设一定的基准值进行判断,② 求算表示各备选方案优势的协调性指标及表示劣势的不协调指标进行判断。

对于上述的这种协调性分析方法加以改进,使之能够从不同评价主体的角度进行评价,并采用更合适的权重系数设定方法及采取其它改进措施,从而使之不断发展形成一些新的方法,其中有一种 MODICA 模型法被应用于绕行路的道路规划,取得了较好效益。

6. 框架法

框架法是英国交通部为进行道路整体规划评价,对规划平衡

表法加以改进而发展形成的一种综合评价方法。英国将原有的费用效益分析(COBA)和环境评价(MEA)两种方法综合起来运用到这种框架法中去。

综合评价框架法是绕行路规划等干线道路(国道)规划的主要规划阶段中所用的一种评价方法,它力求实现框架形式与主要评价项目之间的统一。事前评价框架法(appraisal framework)是一种“用表格形式表达道路规划方案带给人们的直接影响、间接影响的数据指标”的方法,它的目标是“将每一个技术上可能的、允许的、可以单独采用的解决对策都作为一种备选方案,在框架法中原则上把每一种方案都单独列入一栏进行处理”。

英国干线道路规划中,首先将各备选方案的资料向社会公开,以广泛征求意见即展开“公众评议(public consultation)”活动,以公众评议的结果为参考由部长确定初选方案,然后针对初选方案制定出详细规划,最后进行经济评价。规划过程中若出现异议则召开公听会(public inquiry),公听会时公开展示评价框架并收集、整理反馈信息,以促进多主体综合评价的合理开展。这样,随着规划工作各阶段的推进,评价框架得到反复修订,规划方案的内容、范围及相关预测项目也一步步趋于深入细致,从而形成精度高、结构合理的评价框架。评价框架中所设的栏目除含有交通部的待研究方案外,至少还要增设三栏分别设置道路现状(do-nothing)方案、最小限度道路建设的最小化(do-minimum)方案以及公众意见备注栏。在公开征集意见阶段除现状方案外一般还设定另外几种参考方案。而公听会阶段除现状方案、大臣选定方案外,还包括地方政府提出的备选方案。

在评价框架的各行中列出不同评价组别的效益项目,用以定量或定性地记录各备选方案所产生的影响。这种评价组统一划分为①沿道设施使用者;②道路使用者;③沿道土地、建筑物所有者;④地区保护、改善措施;⑤开发与交通政策;⑥财政效益六组。

①~③各组的影响的详细内容分项见表 13.4~13.6,可根据评价对象的不同制定不同的分项。而④⑤两组应在相关团体的合作下,由交通部门划分项目,推算方案的效益。⑥组属于经济评价部分,以 COBA 的分析结果作为基础。可以看出,在进行组别划分时,根据影响的不同方式,同一个人可能被数个分组计算,因此应避免效益的重复计算。

表 13.4 对沿道设施使用者的影响

二次分组 (设施用户分类)	汽车和步行 者的冲突	噪音	景观效果	区域划分
商 业 街	×	×		×
公 共 建 筑 (教会,图书馆,社区中心等)		×		×
娱乐区域、设施	×	×	×	×

注:① ×记号表示比较重要的影响要素;

② 细部分组中所用的三个项目仅为一般分组的例子之一,对于不同的规划项目,应根据实际情况确定受影响的设施,判断影响要素;

③ 第 2 组(沿道土地、建筑物所有者)与本组间的区别没有明确定义。在难于判断的情况下,应当将这种效益归入与其最为相关影响的分组中,避免重复计算。

综合评价框架对多主体多目标的多元性评价对象的所有影响进行归纳、整理,最后选择由有市民参加的规划委员会决定。这一方法因避免了多基准分析中预先假定权重系数的缺点而引人注目。

表 13.5 某项交通基础设施建设对道路使用者的影响

二次 分组	因时间没节约 而迟到	车辆行驶费用 的变化	交通事故 减少	驾驶员的 疲劳	道路景观	舒适性和 区域划分
汽车使用者,乘客	×	×	×	×	×	
自行车使用者			×			×
步行者			×			×

注:① ×印表示比较重要的影响要素;

② 自行车使用者的再分组一项仅限于预计自行车交通量相当大的情况下作为一个对象包含在分析内;

③ 一般来说,作为金额表示,按一定基准年进行贴现计算;

④ 预测的死伤减少人数也应附加记录于此。

表 13.6 对沿道土地、建筑物所有者的影响

二次分组 (土地、建筑物所有者分类)	拆除建筑物 的数量	噪音变化 dB(A)	景观效果	区域划分	施工干扰	土地占用 面积
住宅(含农舍)	X	X	X	X	X	
产业,商业设施	X	X	X	X	X	
学校,医院	X	X	X	X	X	
公共建筑等	X					
娱乐设施用地						X
田 地				X	X	X

注: ① X记号表示比较重要的影响要素;

② * 噪音情况依据 L_{10} (18 小时)值 dB(A);

③ 用于公开征询意见的框架中,用受到指定的 dB(A)范围的噪音影响的住房数来表示这一影响;

④ 另一种表示方法是统计从新建道路的中心线至两侧 300m 范围内不同距离处受到影响的住房数。对已有道路,用预计通车后 15 年间现有交通量增加 2 倍以上或减少到 1/2 以下道路的住房数来表示。

参考文献

- 陆化普, 史其信, 殷亚峰. 1996. 动态交通分配理论的回顾与展望. 公路交通科技, (2)
- 陆化普, 殷亚峰. 1995. 大城市交通拥挤对策技术展望. 城市规划, (4)
- 陆化普, 殷亚峰. 1996. 交通网络均衡分析的变分不等式方法. 公路交通科技
- 陆化普, 殷亚峰. 1996. 动态系统最优分配模型的研究. 公路交通科技, (3)
- 陆化普, 殷亚峰. 1996. 非集计分析方法及其应用公路交通科技, 13 (1)
- 殷亚峰, 陆化普. 1996. 动态网络交通信号最优配时模型研究. 公路交通科技
- 李悦. 1996. 交通规划中联合模型的理论分析和应用研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学
- 马鹤龄. 1995. 道路交通系统工程基础. 北京: 人民交通出版社
- 汪光焘. 1994. 城市土地利用与城市交通规划. 城市规划
- 王永县. 1992. 运筹学. 北京: 清华大学出版社
- 杨东援. 1992. 交通均衡模型理论的发展与展望. 中国公路学报, (5)
- 杨东援. 1992. 交通均衡模型理论的发展与展望. 中国公路学报, (5)
- 殷亚峰. 1996. 动态交通分配模型建模研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学
- 蔚星. 1995. 交通建设对土地价格影响理论及其应用的研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学
- 周于峙. 1995. 中国城市交通的问题和对策. 城市规划
- 畿部友彦. 1989. 人の交通・活动关连分析に基づく交通需要推计法に関する研究: [博士论文]. 名古屋: 名古屋大学
- 近藤胜直. 1987. 交通行动分析. 晃洋书房

- 河上省吾,宿良. 1991. 就业者の交通需要予測のための非集計に関する一研究. *Proceedings of Infrastructure planning*, 14(1)
- 河上省吾,松井寛. 1987. 交通工学. 東京:森北出版株式会社
- 日本土木計画学委員会. 1984. 非集計行動分析の理論と実際. 日本土木学会
- 日本土木学会. 1981. 交通需要予測ハンドブック. 東京:技報堂出版株式会社
- 日本土木学会. 1986. 海外交通プロジェクトの評価. 東京:鹿島出版社
- 新谷洋二. 1993. 都市交通計画. 東京:技報堂
- 左左木綱監修,飯田恭敬編著. 1992. 交通工学. 株式会社国民科学出版社
- 太田勝敏. 1988. 交通システム計画. 東京:技術书院
- Adib Kanafani. 1983. *Transportation Demand Analysis*. McGraw-Hill Book Company
- Arnott R, de Palma A. 1991. Lindsey, R. Does providing information to drivers reduce traffic congestion? *Trans. Res.*, 25A
- Arezki Y. 1990. A Full Analytical Implementation of the PARTAN/Frank-Wolfe Algorithm for Equilibrium Assignment. *Transpn. Sci.*, 24
- Beckmann M, McGuire C B and Winster C B. 1956. *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven, CT
- Benjamin J, Obeng K. 1990. The effect of policy and background variables on total factor productivity for public transit. *Trans. Res.*, 24B: 1~14
- Ben-Akiva M. 1985. Dynamic Network Equilibrium Research. *Transpn. Res.*, 19A, (5/6)
- Ben-Akiva M, DePalma A and Kanaroglou P. 1986. Dynamic Model of Peak Period Traffic Congestion with Elastic Arrival Rates. *Transpn. Sci.*, 20(2)
- Ben-Akiva M, DePalma A and I. 1991. kaysa Dynamic Network Models and Driver Infor-mation Systems. *Transpn. Res.*, 25A (5)
- Boyce D E. 1984. Urban Transportation Network-Equilibrium and Design Models: Recent Achieve-ments and Future Prospects. *Environment and Planning*, 16

- Boyce D E, Ran B and LeBlanc L J. 1995. Solving an Instantaneous Dynamic User-Optimal Choice Model. *Transpn. Sci.* , 29(2): 128~142
- Boyce, D E. 1988. Route guidance systems for improving urban travel and location choice. *Trans. Res.* , 22A
- Bertsekas D P. 1993. A simple and fast label correcting algorithm for shortest paths. *Networks* , 23
- Bunch D S. 1991. Estimability in the multinomial probit model. *Trans. Res.* , 25B: 1~12
- Cantarella G E, Improta G and Sforza A. 1991. Iterative Procedure for Equilibrium Network Traffic Signal Setting. *Transpn. Res.* , 24A: 241~249
- Carey M. 1986. A Constraint Qualification for Dynamic Traffic Assignment Model, *Transpn. Sci.* , 20(1): 55~58
- Carey M. 1987. Optimal Time-Varying Flows on Congestion Networks. *Operations Research* , 35(1):58~69
- Carey M. 1992. Nonconvexity of the Dynamic Traffic Assignment Problem, *Transpn. Res.* , 26B (2):127~133
- Chang S K, Schonfeld P M. 1991. Multiple period optimization of bus transit systems. *Trans. Res.* , 25B: 453~478
- Chujoh U. 1989. Learning from medium-and small-sized bus services in developing countries: is regulation necessary? *Trans. Res.* , 23A: 19~28
- Corea G A, Kulkarni V G. 1993. Shortest paths in stochastic networks with arc lengths having discrete distributions. *Networks*, 23
- Dafermos S C. 1980. Traffic Equilibrium & Variational Inequalities, *Transpn. Sci.* , 14:42~54
- Dafermos S C. 1982. The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand. *Networks* , 12: 57~72
- Dafermos S C. 1982. Relaxation Algorithm for the General Asymmetric Traffic Equilibrium Problem. *Transpn. Sci.* , 16: 231~240
- Daganzo. 1979. Multinomial Probit; the Theory and its Application to Demand Forecasting. Academic Press, New York

- Daganzo C F. 1995. Properties of Link Travel Time Functions under Dynamic Loads. *Transpn. Res.* ,29B(2): 95~98
- Dickson T J. 1981. A Note on Traffic Assignment and Signal Timings in Signal Controlled Road Network. *Transpn. Res.* ,15B: 267~271
- Drissi-Kaitouni O and Hamede-Benchekroun A. 1992. A Dynamic Traffic Assignment Model and a Solution Algorithm. *Transpn. Sci.* , 26(2)
- Doti J, Adibi E. 1991. A model for forecasting public transit. *Trans. Res.* , 25A: 443~450
- Drissi-Kaitouni O. 1993. A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Traffic Assignment Problem. *European J. of Operational Research* , 71: 188~204
- Daly. 1982. Estimating Choice Models Containing Attraction Variables. *Transpn. Res.* , 16B(1):5~15
- Easa S M. 1991. Traffic assignment in practice: overview and guidelines for users. *Journal of Trans. Engr* , 117
- Fan H S L. 1990. Passenger car equivalents for vehicles on Singapore expressways. *Trans. Res.* , 24A
- Fischette M, Toth P, Vigo D. 1995. A branch-and-bound algorithm for the capacitated vehicle routing problem on directed graphs. *Opns. Res.* , 42
- Fisk C and Nguyen S. 1981. Existence and Uniqueness Properties of an Asymmetric Two-Mode Equilibrium Model. *Transpn. Sci.* , 15 318~328
- Fisk C S and Boyce D E. 1983. Alternative Variational Inequality Formulations of the Network Equilibrium-Travel Choice Problem. *Transpn. Sci.* , 17: 454~463
- Florian M, Nguyen S and Ferland J. 1975. On the Combined Distribution-Assignment of Traffic. *Transpn. Sci.* , 9:43~53
- Florian M and Nguyen S. 1978. A Combined Trip Distribution Model Split and Trip Assignment Model. *Transpn. Sci.* , 12:241~246
- Florian M. 1981. The Convergence of Diagonalization Algorithms for Fixed Demand Asymmetric Network Equilibrium Problems, Publication
- 354 •

- 198, Center of Transpn. Res. , Universiy of Montreal, Montreal
- Florian M and Los M. 1982. A New Look at Static Spatial Price Equilibrium Models. *Reg. Sci. Urban Econ*, 12: 579~597
- Florian M. 1989. Nonlinear cost network flow models in transportation analysis. *Math. Prog. Study*, 26: 167~196
- Friesz T L and Harker P T. 1983. Multicriteria Spatial Price Equilibrium Network Design: Theory and Compuation Results. *Transpn. Res.* , 17B: 411~426
- Friesz T L. 1985. Transportation Network Equilibrium, Design and Aggregation: Key Developments and Research Opportunities. *Transpn. Res.* , 19A(5/6): 413~427
- Friesz T L, Luque J, Tobin R L and Wie B W. 1989. Dynamic Network Traffic Assignment Considered as a Continuous Time Optimal Control Problem. *Operations Research*, 37(6): 893~901
- Friesz T L, Bernstein D, Smith T E, Tobin R L and Wie B W. 1993. A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Network User Equilibrium Problem. *Operations Research*, 41: 179~191
- Friesz, T L, Bernstein D, Smith T E, Tobin R L, Wie B W. 1993. A variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem. *Opns. Res*, 41:179~191
- Fukushima M. 1984. A Modified Frank-Wolfe Algorithm for Solving the Traffic Assignment Problem. *Transpn. Res.* ,18B: 169~177
- Gartner N H, Gershwin S B, Little J D C and Ross P. 1980. Pilot Study of Computer-Based Urban Traffic Management. *Transpn. Res.* , 14B: 203~217
- Gartner N H. 1980. Optimal Traffic Assignment with Elastic Demands: A Reiview. Par 1 and Part 2, *Transpn. Sci.* , 14: 174~191, 192~208
- Gerren J. 1991. Generalized Logit Model. *Transpn. Res.* , 25B:75~88
- Ellerman D R, Morlok E R. 1989. Modeling local responses to alternative federal transit subsidy policies and regulations. *Trans. Res.* , 23B:287~308

- Gerken J. 1991. Generalized logit model. *Trans. Res.* , 25B: 75~88
- Ghali M O and Smith M J. 1995. A Model for the Dynamic System Optimum Traffic Assignment Problem. *Transpn. Res.* , 29B(3): 155~170
- Golob T F. 1989. A joint household travel distance generation and car ownership model. *Trans. Res.* , 23B
- Golob T F. 1990. The dynamics of household travel time expenditures and car ownership decisions. *Trans. Res.* , 24A
- Goulias K G, R M Pendyaly R Kitamura. 1991. Practical Method for the Estimation of Trip Generation and Trip Chaining. *Transportation Research Record* 1285
- Hall R H, Du Y, Lin J. 1994. Use of continuous approximations within discrete algorithms for routing vehicles; experimental results and interpretation. *Networks*
- Harker P T and Pang J S. 1990. Finite-Dimensional Variational Inequality and Nonlinear Complementarity Problems: A Survey of Theory. Algorithms and Applications, *Mathematical Programming* , 48: 161~220
- Hayashi Y and Tomita Y. 1988. A Model for Zonal Forecast of Residential Location and Population Attributers Using Random Utility Models and a Micro-Simulation. *Technique. Proc.* , JSCE 395: 85~94
- Hendrickson C and Plank E. 1984. The Flexibility of Departure Times for Work Trips, *Transpn. Res.* , 18A(1): 25~36
- Heydecker B G. 1986. On the Definition of Traffic Equilibrium, *Transpn. Res.* , 20B: 435~440
- Hirobata Yasuhiro and Shogo Kawakami. 1990. Modeling Disaggregate Behavioral Modal Switching Models Based On Intention Data. *Transpn. Res.* , 24B(1): 15~25
- Ho J K. 1980. A Successive Linear Optimization Approach to the Dynamic Traffic Assignment Problem. *Transpn. Sci.* , 14: 295~305
- Ho J K. 1990. Solving the Dynamic Traffic Assignment Problem on a Hypercube Multi-computer. *Transpn. Res.* , 24B(6): 443~451
- Janson B N and C. 1987. Zozaya-Gorostiza The Problem of Cyclic Flows in
- 356 •

- Traffic Assign-ment. Transpn. Res. , 21B: 299~310
- Janson B N. 1991. Dynamic Traffic Assignment for Urban Road Network. Transpn. Res. , 25B: 143~161
- Jara-Diaz S, Videla J. 1989. Detecting of income affect in mode choice; theory & practice. Trans. Res. , 23B
- Jara-Diaz S. 1991. Income and taste in mode choice models; are they surrogates? Trans. Res. , 25B
- Jayakrishnan R. 1992. In-Vehicle Information Systems for Network Traffic Control; A Simulation framework to Study Alternative Guidance Strategies. Ph D. dissertation, Austin, University of Texas
- Jayakrishnan R, Tski K W and Chen A. 1995. A Dynamic Traffic Assignment Model with Traffic-Flow Relationships. Transpn. Res. , 3C(1): 51~72
- Joel L Horowitz. 1991. Reconsidering The Multinomial Probit Model. Transpn. Res. , 25B: 433~438
- Joffre Swait and Ben-Akiva M. 1987. Incorporating Random Constraints In Discrete Choice Models, Transpn. Res. , 28B(1):11~22
- Joyce P, Yagar S. 1990. An application of TRANSYT for mixed car/street-car operation. Trans. Res. , 24A
- Joyce P, Yagar S. 1990. Representing stochastic transit dwell times in traffic signal optimization. Trans. Res. , 24A
- Juan de Dios Ortuzar, Luis G Willumsen. 1990. Modelling Transport. John Wiley & Sons
- Kanafani A. 1983. Transportation Demand Analysis. McGraw-Hill, Inc
- Kawakami S, Lu H. 1992. Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts considering the interaction of traffic modes. The Journal of the RSAI, 71
- Lam W H K and Huang H J. 1992. A Combined Trip Distribution and Assignment Model for Multiple User Classes. Transpn. Res. , 26B: 275~287
- Lam W H K and Huang H J. 1995. Dynamic User Optimal Traffic Assign-

- ment Model for Many to One Travel Demand. *Transpn. Res.* , 29B (4): 243~259
- LeBlanc L J. 1988. Transit system network design. *Trans. Res.* , 22B
- List G F. 1990. Toward optimal sketch-level transit service plans. *Trans. Res.* , 24B, , 325~344
- Liem T C and Gaudry M J I. 1987. A Program For The Box-Cox Logit Model With Disaggregate Work-Trip Mode Choice Models. *Transpn. Res.* , 12(5): 349~353
- Larsson T and Patriksson M. 1994. A Class of Gap Function for Variational Inequities. *Mathematical Programming* , 64: 53~79
- Lasdon L S and Luo S J. 1994. Computational Experiment with a System Optimal Dynamic Traffic Assignment Model. *Transpn. Res.* , 2C(2): 109~127
- LeBlanc L J, Morlok E K and Pierskalla W. 1975. An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem. *Transpn. Res.* , 9: 309~318
- LeBlanc L J, Helgason R V and Boyce D E. 1985. Improved Efficiency of the Frank-Wolfe Algorithm for Convex Network Programs. *Transpn. Sci.* , 19: 445~462
- Liu Z K. 1993. Modeling Dynamic Traffic Assignment, Doctoral Dissertation. Nagoya University, Nagoya, Japan
- Lu H P. 1992. AN Estimation Model of Multi-Mode O-D Matrices Based on Link Counts. Doctoral Dissertation, Nagoya University, Nagoya, Japan
- Lu H P and Yin Y F. 1996. A Study on Dynamic System Optimum Traffic Assignment. Paper for the Third Annual World Congress on ITS, Orlando, USA
- Mahmassani H S. Mouskous K C. 1988. Some numerical results on the diagonalization algorithm for network assignment with asymmetric interactions between cars and trucks. *Trans. Res.* , 22B
- Mahmassani H S and Chang G L. 1986. Experiments with Departure Time
- 358 •

- Choice Dynamics of Urban Commuters. *Transpn. Res.* , 20B(4): 297~320
- Mahamassani H S and Mouskos K. 1988. Some Numerical Results on the Diagonalization Network Assignment Algorithm with Asymmetric Interactions Between Cars and Trucks. *Transpn. Res.* , 22B: 275~290
- Mahnassani H S, Jayakarishnan R. 1991. System performance and user response under realtime information in congested traffic corridor. *Trans. Res.* , 25A
- Mahamassani H S and Jayakrishnan R. 1991. System Performance and User Response under Real Time Information in a Congestion Traffic Corridor. *Transpn. Res.* , 25A(5): 293~307
- Mahmassani H S, Peeta S, Hu T Y and Ziliaskopoulos A. 1992. Dynamic Traffic Assignment with multiple user classes for real-time ATIS/ATMS Applications. Large Urban System, 91~114. U. S. Federal Highway Administration, Washington D. C
- Mahmassani H S and Peeta S. 1993. Network Performance under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignment: Implications for ATIS. *Transpn. Res. Rec.* , 1408: 83~93
- Marcotte P, Zubieta L, Drissi-Kaitouni O. 1990. Iterative methods for solving an equilibrium problem arising in transit deregulation. *Trans. Res.* , 24B:45~55
- Marisa Yadlin-Weintraub. 1991. Some Procedures For The Statistical And Experimental Analysis of Probabilistic Discrete Decisions Models. *Transpn. Res.* , 25B(4):215~236
- Matsokis E C. 1986. Road traffic assignment—A review Part I —Non-equilibrium methods. *Transportation Planning and Technology* 11
- Matsokes E C, Michalopoulos P. C. 1986. Road traffic assignment —A review Part II —equilibrium methods. *Transportation Planning and Technology* 11
- Mcfaden. 1989. A Method of Simulated Moments for Estimation of Discrete Response Models Without Numerical Integration. *Econometria* , 57:995

- Miyamoto K and Miyachi A. 1982. A Disaggregate Model of Housing Choice. *City Plan Rev.* ,17:361~365
- Miyamoto K, Ando J and Shimizu E. 1983. Residential Location Choice Models in Urban Areas. *Proc. Infrastructure Plan.* 5: 540 ~ 546 (in Japanese)
- Morichi S, Yai T and Tamura T. 1985. Spatial Transferability of Disaggregate Mode Choice Models. *Proc. JSCE* 359:107~115 (in Japanese)
- Morichi S, Yai T and Hirai S. 1987. Estimation Of Disaggregate Model Using Additional Aggregate Data. *Infrastructure Plan. Rev.* , 5:51~58 (In Japanese)
- Murat Gene. 1994. Aggregation and Heterogenaty of Choice Set Generation. *Transpn. Res.* , 28B(1): 11~22
- Miller K. 1991. High-occupancy vehicle modeling technique *Journal of Trans. Engr*
- Moshe Ben-Akiva, Steuen R Lerman. 1985. *Discrete Choice Analysis; Theory and Application to Travel Demand.* The MIT Press
- Oppenheim N. 1993. Equilibrium trip distribution/assignment with variable destination costs. *Trans. Res.* , 27B
- Pang J S. 1984. Solution of the General Multicommodity Spatial Equilibrium Problem by Variational and Complementarity Method. *J. of Regional Sci.* , 24: 403~414
- Papageorgiou M. 1990. Dynamic Modeling, Assignment, and Route Guidance in Traffic Network. *Transpn. Res.* , 24B(6): 471~495
- Patriksson M. 1994. *The Traffic Assignment Problem; Models and Methods.* Utrecht, The Netherlands
- Petta S and Mahamassani H S. 1995. Multiple User Classes Real-Time Traffic Assignment for Online Operations: A Rolling Horizon Solution Framework. *Transpn. Res.* , 3C(2): 83~98
- Powell W B and Sheffi Y. 1982. The Convergence of Equilibrium Algorithms with Predetermined Step Sizes. *Transpn. Sci.* , 16: 45~55

- Polak G G. 1992. On a parametric shortest path problem from primal-dual multicommodity network optimization. *Networks*, 22
- Ran B and Fuller J D. 1993. A Primal-Dual Decomposition Method for Two-Stage Linear Programms. Working Paper, Department of Management Sciences. University of Waterloo, Waterloo
- Ran B and Fuller J D. 1993. A Primal-Dual Nested Decomposition Method for Multi-Stage Linear Programms. Working Paper, Department of Management Sciences, University of Waterloo, Waterloo
- Ran B, Boyce D E, Leblanc L J. 1993. A New Class Of Instantaneous Dynamic User Optimal Traffic Assignment Models. *Operations Research*, 41, 192~202
- Ran B, Boye D E. 1993. LeBlanc, L. J. New class of instantaneous dynamic user-optimal traffic assignment model. *Opns. Res.*, 41
- Ran B and Boyce D E. 1994. Dynamic Urban Transportation Network Models: Theory and Implications for Intelligent Vehicle-Highway System. *Lecture Notes in Economics and Mathematics System*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Ran B, Hall W R and Boyce D E. 1996. A Link-Based Variational Inequality Model for Dynamic Departure Time/Route Choice. *Transpn. Res.*, 30B(1);31~46
- Reggrant A and Stefani S. 1989. A New Approach To Modal Split Analysis: Some Empirical. *Transpn. Res.*, 23B; 75~82
- Reiss R A, Gartner N H, Cohen S L. 1991. Dynamic control and traffic performance in a freeway corridor: A simulation study. *Trans. Res.*, 25A
- Ritchie S G. 1990. A knowledge-based decision support architecture for advanced traffic assignment. *Trans. Res.*, 24A
- Said G M, Young D H. 1990. A general linear model framework for estimating work trip rates for households in Kuwait. *Trans. Res.*, 24A
- Safwat K, Ali N, Magnanti T L. 1988. A combined trip generation, distribution, modal split and assignment model. *Trans. Sci.*, 18
- Safwat A, Nabil K, Walton C M. 1988. Computational experience with an

- application of a simultaneous transportation equilibrium model to urban travel in Austin, Texas. *Trans. Res.* ,22B
- Seril Mun. 1994. Traffic jams and the congestion toll. *Transpn. Res.* , 25B (5);365~375
- Sheffi Y, Daganzo C F. 1980. Computation of equilibrium over transportation networks: the case of disaggregate demand models. *Trans. Sci.* , 14;155~173
- Shi Jing. 1994. A Methodological Study on Public Transportation Network Planning, Operation and Management Using Combined Equilibrium Models. ,Doctoral Dissertation, Nagoya University, Nagoya, Japan
- Smith M J. 1979. Existence, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria. *Transpn. Res.* ,13B;295~304
- Smith M J and Ghali M. 1990. The Dynamics of Traffic Assignment and Traffic Control: A Theoretical Study. *Transpn. Res.* ,24B;409~422
- Smith M J. 1993. A New Dynamic Traffic Assignment Model and the Existence and the Calculation of Dynamic User Equilibria on Congested Capacity-Constrained Road Networks. *Transpn. Res.* ,27B(1); 49~63
- Smith M J and Van Vuren T. 1993. Traffic Equilibrium with Responsive Traffic Control. *Transpn. Sci.* , 27;118~132
- Shi J. 1994. A methodological study on public transportation network planning. operation and management using combined equilibrium models
- Su Liang, Shogo Kawakami and Yasuhiro Hirohata. 1990. A Study on the Disaggregate Model System for Non-Worker's Travel Demand Forecasting. *Proceedings of Urban Planning*, (25);91~96
- Sumi T, Matsumoto Y. 1990. Departure time and route choice of commuters on mass transit systems. *Trans. Res.* , 24B; 247~262
- Taillard E. 1993. Parallel iterative search methods for vehicle routing. *problems Networks*, 23
- Tomlin J A. 1971. A Mathematical Programming Model for the Combined Distribution-Assignment of Traffic. *Transpn. Sci.* , 5;122~140
- Tzeng G, Shiau T. 1988. Multiple objective programming for bus operation;
• 362 •

- A case study for Taipei city. *Trans. Res.* , 22B
- Van Leusden G C and Coemet M. 1993. Dynamic Traffic Management in the Netherlands. *ITE Journal*, July
- Van Vliet D and Dow P D C. 1979. Capacity-Restrained Road Assignment. *Traffic Engineering & Control*, 20:296~305
- Wardrop J G. 1952. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers. Part I* ; 325~378
- Weintraub A, Ortiz C and Gonzalez J. 1980. Accelerating Convergence of the Frank-Wolfe Algorithm. *Transpn. Res.* ,19B:113~122
- Wie B W, Friesz T L and Tobin R L. 1990. Dynamic User Optimal Traffic Assignment on Congested Multi-Destination Networks. *Transpn. Res.* , 24B(6):431~442
- Wie B W, Tobin R and Friesz T L. 1994. The Augmented Lagrangian Method for Solving Dynamic Network Traffic Assignment Models in Discrete Time. *Transpn. Sci.* ,28(3):205~220
- Wie B W, Tobin R L, Friesz T L and Bernstein D. 1995. A Discrete Time, Nested Cost Operator Approach to the Dynamic Network User Equilibrium Problem. *Transpn. Sci.* ,29(1): 79~92
- Wie B W. 1993. A differential game model of nash equilibrium on a congested traffic network. *Networks*, 23
- Williams H C W L, Lam W M. 1991. Transport policy appraisal with equilibrium models II Model dependence of highway investment benefits. *Trans. Res.* , 25B
- Williams H C W L, Lam W M. 1991. Transport policy appraisal with equilibrium models III Investment benefits in multi-modal systems. *Trans. Res.* , 25B
- Yai Tetsuo. 1989. Diaggregate Behavioural Models and Their Applications. *Transpn. Res.* ,23A(1):45~51
- Yang H and Yagar S. 1994. Traffic Assignment and Traffic Control in General Freeway-Arterial Corridor Systems. *Transpn. Res.* ,28B:463~486
- Yang H and Yagar S. 1995. Traffic Assignment and Signal Control Saturated

Road Networks. Transpn. Res. ,29B:125~139

Yin Y F and Lu H P. 1996. A Dynamic Network Optimum Traffic Signal Settings Model. Paper for the Third Annual World Congress on ITS, Orlando, USA

Yosef Sheffi. 1984. Urban Transportation Networks: quilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Printice-Hall. ,INC