

城市公共停车场选址双层规划模型

倪训友^{1,2,3}, 孙健^{2,3}

(1.浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018; 2.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 3.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 智能交通与无人机应用研究中心, 上海 200240)

摘要: 停车问题是中国大中型城市面临的主要交通问题之一。考虑到早期对停车问题认识不足和城市空间资源紧张的实际情况, 发展公共停车场十分必要。构建城市公共停车场选址双层规划模型: 下层优化目标为考虑停车场容量约束的用户均衡, 上层优化目标为行驶时间和步行时间广义成本最小。该模型克服了传统规划模型无法同时考虑行驶时间、等待时间、停车收费和步行时间的缺点, 并利用交通规划软件EMME3进行求解。最后, 基于经典Sioux Falls路网算例的结果表明, 停车场选址双层规划模型求解过程相对简单, 结果较为可靠。该研究方法可为城市公共停车场规划建设 and 相关政策制定提供理论支持。

关键词: 交通规划; 公共停车场; 选址优化; 双层规划; EMME

Bi-Level Model for Public Parking Facilities Site Selection

Ni Xunyou^{1,2,3}, Sun Jian^{2,3}

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China; 2.State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3.Center for Intelligent Transportation and Unmanned Aerial System Applications Research, School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Parking issue turns to be a critical problem in large- and medium-sized cities. Many cities have to face two typical difficulties: inadequate parking spaces planning at early periods and the limited spatial resources in urban areas. This paper develops a bi-level model for public parking facilities site selection, in which the objective in lower level is to implement the User Equilibrium (UE) with parking capacity constraints while the objective in upper level is to minimize the generalized cost including travel time and walking time. Comparing with the traditional models, this model features simultaneously considering travel time, waiting time, parking charge, and walking time. Moreover, the commercial transportation software EMME3 was adopted to solve the proposed model. Based on a case study on the typical Sioux Falls network, the proposed method produces a more reliable result with a simply solving procedure. The algorithm could provide a theoretical basis for a better planning of urban public parking facilities.

Keywords: transportation planning; public parking facilities; site optimization; bi-level programming; EMME

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 教育部人文社科基金“交通排放视角下城市建成环境及土地利用策略研究: 基于网约车大数据的实证分析”(18YJCZH011)、上海市自然科学基金“特大城市轨道交通网络脆弱性及客流加权动力学行为研究”(17ZR1445500)

作者简介: 倪训友(1985—), 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 停车诱导信息系统、智能交通系统开发与算法。E-mail: nixunyou2008@sina.com

通信作者: 孙健(1977—), 男, 安徽芜湖人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向: 城市交通规划与仿真、城市交通信号控制。E-mail: danielsun@sjtu.edu.cn

0 引言

停车问题是中国大中型城市面临的主要交通问题之一, 降低了停车服务满意程度和

路网运行效率。近年来, 小汽车保有量的持续增长不仅导致城市道路系统大范围拥堵, 也造成了停车问题。绝大多数城市停车位供需比远没有达到 1:1, 造成高峰时间内驾驶

人很难找到可用停车位。以上海市为例：2012年，中心城区停车位总计98.3万个，停车需求为147.9万个，供需比仅为0.66^[1]。然而，由于对停车问题的认识和估计不足，早期城市规划没有预留停车场发展建设用地或擅自把停车场挪作他用，这些历史欠账往往因为缺少空间资源等缘故无法进行补救^[2]。公共停车场指对公众开放，为从事各种公共活动的出行者提供停车服务的停车场所^[3]，是城市停车设施的关键组成部分。公共停车场具有容量大、服务对象广泛和周转率高等优点，因此发展公共停车场是停车问题较好的解决策略之一。目前，城市公共停车场建设相对滞后^[4]，亟须对公共停车位供需和公共停车场规划进行研究。

在公共停车场选址优化方面，已有研究多从纯数学角度优化并且利用遗传算法进行求解，是没有考虑交通网络的模型。文献[5]以步行距离最小为目标建立了公共停车场选址优化模型，并且采用遗传算法进行求解。文献[6]建立了多目标公共停车场选址优化模型，优化目标分别为步行距离最小、总投资最小和停车位供应总量最大。同样，文献[7]以步行距离、广义费用和行驶时间最小为目标，建立了公共停车场多目标选址优化模型。文献[8]是考虑交通网络的模型，建立了公共停车场选址优化的双层规划模型：上层优化目标为行驶时间最小的用户均衡，下层优化目标为步行时间最小。由于在下层规划模型中没有考虑行驶时间，因此可能导致车辆分布到可达性较差的停车场，造成与实际停车状况相违背的结果。总之，不考虑交通网络的纯数学优化方法无法较好地解决公共停车场选址优化问题，现有的双层规划模型无法将停车需求较好地分布于研究区域内的各停车场。

本文建立城市公共停车场选址双层规划模型，下层优化目标为考虑停车场容量约束的用户均衡，上层优化目标为行驶时间和步行时间广义成本最小，从而可以在有限的空间位置中对公共停车场的选址和规模两个关键问题进行优化决策，并提高停车服务水平和交通网络运行效率。

1 模型构建

多数驾驶人倾向于个体出行效用最大化^[9]，因此可采用用户均衡模型来描述交通网络流量。从交通分配的角度，停车成本主要由四

部分构成：行驶时间、等待时间、停车收费和步行时间。因此，下层规划模型

$$\min Z_1 = a_1 \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + a_2 \sum_k \int_0^{x_k} d_k(\omega) d\omega + a_3 \sum_k \frac{f_k T_v}{T} x_k + a_4 \sum_k \sum_s \omega_{ks} x_{ks} \quad (1)$$

式中： x_a 为高峰小时路段 a 上的交通量/pcu； $t_a(\cdot)$ 为路段 a 上的行驶时间/min； x_k 为高峰小时停车场 k 的停车流量/pcu； $d_k(\cdot)$ 为在停车场 k 获得可用停车位的等待时间/min； f_k 为停车场 k 的停车收费/(元·h⁻¹)； T_v 为平均停车时间/h； T 为时间价值系数/(元·min⁻¹)； ω_{ks} 为从停车场 k 至目的地 s 的步行时间/min； x_{ks} 为从停车场 k 至目的地 s 的交通量/pcu； a_1 ， a_2 ， a_3 和 a_4 分别为行驶时间、等待时间、停车收费等效时间和步行时间的权重系数。

为了求解上述考虑停车场容量约束的用户均衡问题，文献[10]提出一种BPR形式的等待时间模型：

$$d_k(x_k) = d_{k0} \left(1 + \alpha \left(\frac{x_k}{N_k} \right)^\beta \right) \quad (2)$$

式中： d_{k0} 为在停车场 k 为空置状态下获得可用停车位的等待时间/min； N_k 为停车场 k 的容量，即停车位总数/个； α 、 β 为系数。

用户均衡模型中考虑等待时间的作用是将交通需求均匀地分布于各停车场。由于相同区域范围内停车收费差别不大且在运营管理中较易调整^[11]，因此，本文选择行驶时间和步行时间为公共停车场选址优化的两个主要变量，建立上层规划模型

$$\min Z_2 = a_1 \sum_a x_a t_a(x_a) + a_4 \sum_k \sum_s \omega_{ks} x_{ks} \quad (3)$$

以此求解公共停车场选址广义成本。

2 求解算法

考虑到城市土地资源的稀缺性，停车场建设只能在有限的候选位置进行，因此停车场选址优化方案可采用枚举法进行筛选。在规划区域内拥有 H 个候选位置，现在拥有 K_1 个公共停车场，拟建 K_2 个公共停车场，建成后共拥有的公共停车场数量为 $K = K_1 + K_2$ ，其中 $K_2 \leq H$ 。为方便求解公共停车场选址优化问题，本文基于交通规划软件EMME3设计求解算法。在进行模型求解之前，首先，计算各交通小区的发生和吸引力，即OD交通需求；然后，调查各交通小区停车状况，现有公共停车场和候选地点的空间位置，并且了解其规模容量。具体步骤如下：

1) 根据交通需求, 计算拟建公共停车场数量以及初始选址方案数量。拟建公共停车场数量为:

$$K_2 = \frac{1}{N} \left(\sum_r \sum_s q_{rs} - \sum_{K_1} N_{K_1} \right), \quad (4)$$

式中: q_{rs} 为出发地 r 和目的地 s 之间的停车需求/个; N 为候选位置建成公共停车场的平均停车位数量/个。

$$N = \frac{\sum H N_h}{H}, \quad (5)$$

式中: N_h 为候选位置 h 的停车位数量/个。

因此, 初始选址方案数量

$$M = C_H^{K_2}. \quad (6)$$

2) 令迭代次数 $m=1$ 。

3) 利用EMME3求解考虑停车场容量约束的用户均衡。

① 路网编辑。利用路网编辑器编辑规划区域路网, 其中目的地不直接与路网中的其他节点相连, 而是采用停车场至目的地的单向路段。如果在方案 m 中拟在候选位置 h 建设公共停车场, 那么建成的公共停车场至所有目的地之间的步行阻抗为步行时间; 否则步行阻抗为无穷大。此外, 所有现有停车

场的步行阻抗均为步行时间。

② 输入OD交通需求。利用批处理命令将固定交通需求导入方案 m , 一般存储为完全矩阵 $mf01$ 。

③ 定义三种路阻函数。路网上的路阻函数采用BPR标准形式

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left(1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^4 \right), \quad (7)$$

式中: t_{a0} 为路段 a 上的自由流行驶时间/min; C_a 为路段 a 的通行能力。

停车等待时间采用公式(2), 文献[12]推荐参数取值为 $\alpha=49$ 和 $\beta=62$ 。

停车场至目的地之间的步行阻抗设置为不随流量变化的出行时间常数。

④ 采用用户均衡模型分配固定交通需求, 然后导出路段交通量 x_a 、路段行驶时间 t_a 和从停车场至目的地的交通量 x_b 。

4) 计算方案 m 的总行驶时间、总步行时间以及广义成本 Z_2 。

5) 如果迭代次数 $m=M$, 则停止迭代; 否则令 $m=m+1$, 重复步骤2)~4)。

6) 针对 $m \in [1, M]$ 所有待选方案, 按广义成本 Z_2 从小到大排序, 找出数值最小的待选方案作为最终选址方案。

3 算例分析

图1展示了从经典Sioux Falls路网修改得到的规划区域^[13]。规划区域外起讫点为1和2, 规划区域内目的地为3和4, 现有公共停车场为5和6, 候选位置编号为7~10, 其余节点为道路交叉口。上述起讫点和目的地构成了若干个OD对, 其交通需求(包含停车需求)如表1所示。

以规划区域外起讫点作为目的地的交通需求视为过境交通需求, 目的地在规划区域内的交通需求是规划区域的停车需求。假设建成后各停车场容量(最大停车位)和收费水平如表2所示。

根据公式(4)计算拟建公共停车场数量 $K_2 = \frac{1550}{962.5} \approx 2$, 初始方案数量 $M = C_4^2 = 6$ 。

利用代码0代表不设置公共停车场, 代码1代表设置公共停车场。例如, 代码1100代表选择候选位置7, 8建设公共停车场。由于方案1100和0101导致停车场布局不合理, 故未作为待选方案。在EMME3中利用用户均衡模型得到路段交通量, 然后计算总行驶时间、总步行时间以及广义成本 Z_2 , 得到4

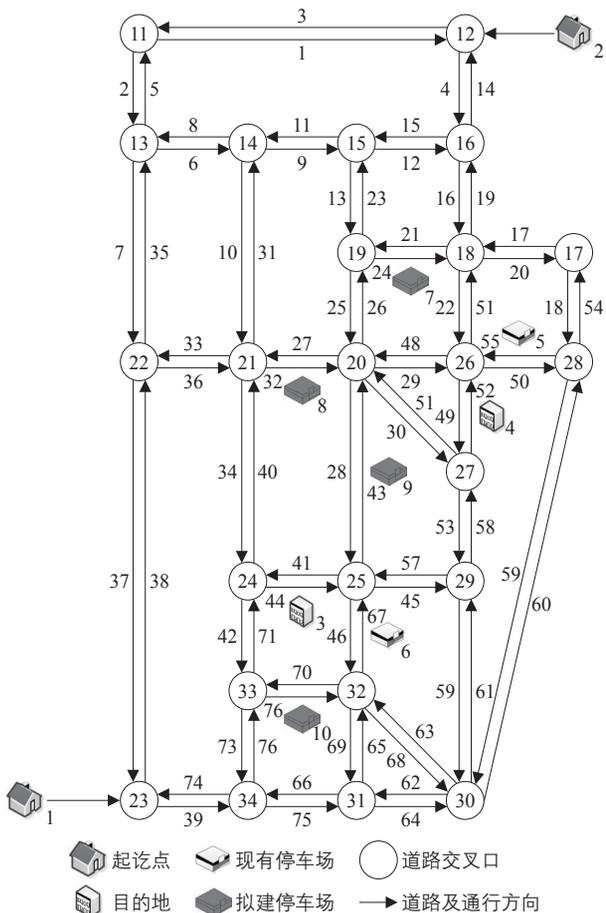


图1 规划区示意
Fig.1 Planning area

个待选方案(见表3)。

各待选方案广义成本的差别相差不大,造成该结果主要有两种原因:1)交通量和目的地数量不多,未充分模拟城市交通拥堵,导致总行驶时间差异不大;2)各停车场停车流量和各公共停车场至所有目的地平均步行时间大致相同,造成各待选方案广义成本无显著差别。但依然可得出方案1010的广义成本最小,为最优选址方案。

4 结语

公共停车场选址优化是停车规划中的关键问题^[14-15]。通过研究得到以下结论:

1) 考虑停车场容量约束的用户均衡可以将停车需求较为均匀地分布于各公共停车场,克服了传统规划模型无法同时考虑出行时间、等待时间、停车收费和步行时间的缺点。

2) 以行驶时间和步行时间为公共停车场选址优化的两个主要变量,符合城市交通运行环境需要。城市交通拥堵已经成为常态,传统规划模型中仅仅考虑步行距离最小不符合实际需求,可能导致车辆被分布到可达性较差的停车场。

本文提出的公共停车场选址双层规划模型贴合实际,具有一定适应性,但未考虑停车场的运营管理(例如停车共享政策、路内停车位的设置)对公共停车场选址优化的反馈作用等。另外,用户均衡模型中行驶时间、等待时间、停车收费和步行时间的权重系数与实际停车行为的拟合有待进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 施勇. 2020年前上海市中心城区机动车停车设施管理探讨[J]. 交通与港航, 2014, 1(2): 48-50+72.
Shi Yong. Probe into Vehicle Parking Facility Management in Shanghai Central City Before

2020[J]. Communication & Shipping, 2014, 1(2): 48-50+72.

[2] 吴素丽, 冷杰, 王亚, 等. 大城市社会公共停车场选址规划模型研究[J]. 交通科技, 2005(1): 80-82.

Wu Suli, Leng Jie, Wang Ya, et al. Model Based on Locating Plan of Urban Public Parking Lot[J]. Transportation Science & Technology, 2005(1): 80-82.

[3] 郑士源. 信息不完全时公共停车场停车费和规模优化[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 81-89.

Zheng Shiyuan. Parking Fee and Scale Optimization of Public Parking Lot with Incomplete Information[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 81-89.

[4] 魏文术. 经济平衡法在加快推进公共停车场建设中的应用研究[J]. 交通与运输, 2014(1): 72-74.

Wei Wenshu. The Study of How to Use the Method of Economic Balance to Speed Up Building Public Parking Lot[J]. Traffic & Transportation, 2014(1): 72-74.

[5] 陈峻, 刘东, 陈学武, 等. 城市停车设施选

表1 高峰小时交通需求

Tab.1 Transportation demands during

出发地	目的地			
	1	2	3	4
1	0	1 500	800	500
2	2 000	0	500	1 200

表2 停车场容量和收费水平

Tab.2 Capacities and charges of each parking lot

停车场	5	6	7	8	9	10
容量/个	600	850	800	950	900	1 200
收费/(元·h ⁻¹)	5	15	10	5	5	5

表3 待选方案

Tab.3 Alternative scenarios

方案编号	拟建停车场及停车位数量/个				总行驶时间/(pcu·min)	总步行时间/(pcu·min)	广义成本/(pcu·min)
	7	8	9	10			
1010	785	0	880	0	415 134	11 976	451 062
1001	789	0	0	814	423 887	11 279	457 724
0110	0	933	868	0	433 283	19 648	492 227
0011	0	0	882	738	479 125	10 887	511 786

- 址模型与遗传算法设计[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 85-88.
- Chen Jun, Liu Dong, Chen Xuewu, et al. Planning Method of Urban Parking Facilities' Locating Model with Its Genetic Algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 85-88.
- [6] 郭涛, 杨涛. 基于GA的公共停车场选址模型研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006(1): 95-98+115.
- Guo Tao, Yang Tao. Study on the Location Model for Urban Public Parking Area Based on GA[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006(1): 95-98+115.
- [7] 么卫良, 李杰, 李宏, 等. 利用遗传算法求解公共停车场多目标选址模型[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006(S1): 67-69.
- Yao Weiliang, Li Jie, Li Hong, et al. Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization in the Locating of Urban Public Parking Lots [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition), 2006(S1): 67-69.
- [8] 夏晓梅, 何继平, 范炳全. 停车设施选址的双层规划模型[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(7): 23-29.
- Xia Xiaomei, He Jiping, Fan Bingquan. Bi-Level Planning Model for Parking Facilities Location[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(7): 23-29.
- [9] 唐伯明, 曾超, 刘唐志, 等. 城市中心区路外公共停车场停车选择行为模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 116-122.
- Tang Boming, Zeng Chao, Liu Tangzhi, et al. A Choice Model of Parking Behavior in CBD Public Parking Lots[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(6): 116-122.
- [10] Lam W H K, Li Zhichun, Huang Haijun, et al. Modeling Time-Dependent Travel Choice Problems in Road Networks with Multiple User Classes and Multiple Parking Facilities [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(5): 368-395.
- [11] 林湛, 四兵锋, 胡卉, 等. 基于均衡流量的城市停车费用优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(5): 82-89.
- Lin Zhan, Si Bingfeng, Hu Hui, et al. Optimization Model of Urban Parking Fare Based on Equilibrium Flow[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(5): 82-89.
- [12] Gallo M, D'Acerno L, Montella B. A Multi-layer Model to Simulate Cruising for Parking in Urban Areas[J]. Transport Policy, 2011, 18(5): 735-744.
- [13] Ni Xunyou, Sun Jian, Peng Zhongren. An Improved Incremental Assignment Model for Parking Variable Message Sign Location Problem[J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(7): 817-828.
- [14] Sun Jian, Cheng Junmei, Zhang Yue. An AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Model of Parking Lots in Urban CBD Area[J]. Advances in Transportation Studies: An International Journal, 2015, 37: 141-150.
- [15] Sun Jian, Ni Xunyou, Zhang Lihui. A Discriminated Release Strategy for Parking Variable Message Sign Display Problem Using Agent-Based Simulation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 38-47.

(上接第33页)

- [20] 曾佳利. 共享理念下的街道空间形态分析: 以成都小通巷为例[J]. 建材与装饰, 2018(5): 94-95.
- [21] 黄秋实. 南京老城社区型共享街道空间建构与活力营造[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Huang Qiushi. The Construction of Space and Vitality for the Community Shared Street in Nanjing Old City[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [22] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司. 徐汇滨江地区黄石路道路改建工程[R]. 上海: 上海市规划局, 2017.
- [23] 付帅, 扈万泰, 章征涛. 城市街道空间尺度设计的城市主义思考[J]. 国际城市规划, 2014, 29(2): 111-117.
- Fu Shuai, Hu Wantai, Zhang Zhengtao. Thoughts of Dimension Design of City Street Space Based on Urbanism[J]. Urban Planning International, 2014, 29(2): 111-117.
- [24] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, PFS Studio. 宁波市中山路景观方案设计[R]. 宁波: 宁波市规划局, 2018.