

武汉市公共交通信息系统建设与应用

王冠, 陈华, 李建忠, 孙贻璐
(武汉市交通发展战略研究院, 湖北 武汉 430017)

摘要: 全方位掌握公共交通运行现状和精确预测客流变化趋势是城市公共交通规划研究的重要前提, 其时效性和准确性不仅关系到信息发布, 还对预测模型的精度产生直接影响。为有效服务政府决策并科学指导公众智慧出行, 运用智能化手段建立公共交通信息系统, 其具有线网性能分析、客流监控预测、运行状态评估等功能。在整合武汉市公共交通信息资源的基础上, 公共交通信息系统建立时空匹配算法判断乘客上车位置, 通过车站吸引强度以及出行链模型模拟乘客下车站点, 建立基于动态信息的公交运行评价指标体系等。抽样调查结果表明系统性能达到预期要求。同时, 探索运用系统各项量化指标服务于城市公共交通线网优化调整、换乘优惠政策制定以及日常运营管理, 为创建公交都市示范城市, 落实公交优先发展战略提供技术支撑。

关键词: 公共交通; 智能交通系统; 客流模型; 评价指标; 线网优化调整; 武汉市

Development and Application of Wuhan Public Transit Information System

Wang Guan, Chen Hua, Li Jianzhong, Sun Yilu

(Wuhan Transportation Development Strategy Research Institute, Wuhan Hubei 430017, China)

Abstract: Comprehensively understanding current statuses and accurately forecast trends of public transit passenger volume are important prerequisite for urban transportation planning. The timeliness and precision not only affect information release, but also determine the accuracy of forecasting model. In order to better support government decision-making and develop a smart traveling system, the elements of public transit information system should include network performance analysis, passenger patronage monitoring and forecasting, operation status evaluation, and so on. This paper demonstrates Wuhan's efforts in developing public transit information system using Space-Time matching algorithm to infer boarding locations and using ABM philosophy to infer alighting locations. Survey results indicate that the proposed system can offer the qualified estimations. Additionally, the paper also explores to apply the quantitative indicators generated from this system to optimize the urban public transit network, study transfer policies and manage daily operation to some extent. Those attempts are further regarded as active efforts in building a public transit metropolis and implementing public transit priority development strategy.

Keywords: public transit; intelligent transportation system; passenger flow model; evaluation index; network optimization; Wuhan

收稿日期: 2016-04-28

作者简介: 王冠(1984—), 男, 湖北武汉人, 博士, 工程师, 主要研究方向: 智能交通、交通模型、交通控制与仿真。E-mail: ballackguan@126.com

通过信息化手段解决城市交通问题, 可促进节能减排, 推动交通决策水平和管理能力提升^[1]。相比于动态公共交通(以下简称“公交”)信息挖掘^[2-3], 大部分现有成果更多关注某项具体功能, 例如根据最短时间、最少换乘等目标结合线网结构提供起讫点间最优路径搜索方法^[4]; 根据刷卡记录统计分析全网及线路客流量特征, 作为研究参考^[5]; 使用概率模型计算公交出行OD分布^[6]; 研

究公交线网统计特征^[7-8]等。中国大部分城市均已安装公共汽车GPS车载定位系统用于实时调度, 并且采用IC卡刷卡付费用于清分结算, 具备公交信息资源整合的条件, 但却很少利用多源动态信息进行更深层次地挖掘与预测, 也很少根据公交运行现状建立评价指标体系。在此背景下, 对武汉市公共交通体系运行现状进行研究, 探索其智能化建设方法与实际应用。

1 基本情况与背景

武汉市2008年以来机动车保有量年均增长率超过15%，2014年机动车增长34万辆，增幅达22.2%；高峰小时流量超5000辆的道路交叉口成倍增长，由2010年的61个增长至2014年的123个；路网平均车速逐年下降，2014年为21.4 km·h⁻¹，较2010年下降9%，城市交通问题日益严重^[9]。

信息化和智能化是城市交通发展的必由之路，公交信息系统作为智能交通的重要组成部分，对提升公交服务质量、提高公交运行效率尤为重要。武汉市各公交行业管理部门分别建成服务自身业务的信息系统，例如市交通委员会的公共汽车运营调度系统、市地铁集团的轨道交通运行与信息发布系统等。这些系统的建成为全市信息化整合打下基础，但同时存在信息孤岛、数据挖掘力度不够、标准化制定工作滞后、应用服务单一有限等问题，服务城市规划建设总体效果不理想。在此背景下武汉市开展了行业资源整合工作，构建了公交信息系统，在城市公交规划与城市建设管理中发挥了一定作用。

2 研究内容与方法

武汉市公交主要包括公共汽车和轨道交通。公交信息系统对全市公交基础数据资源进行质量评估，针对公交运行现状建立道路网与公交线网的拓扑关系，重点研究公交客流模型以及运行水平评价指标体系，由需求引导系统的功能设计、开发以及应用。

2.1 一体化分析特大城市全口径、全覆盖的公交基础数据资源

公交信息系统整合了全市不同类型、来源、用途的数据资源，主要包括7000余辆公共汽车每15 s上传一次的GPS数据、日均近千万次规模的IC卡刷卡数据、全市5000余个公共汽车站、370条公共汽车线路、96个轨道交通车站和4条轨道交通线路的地理信息、公交运营企业月度营收报表，抽样的公共汽车车载监控视频，土地利用以及人口、就业岗位情况，手机信令数据等，日均数据处理量达5 GB。

公交信息系统采用多线程分布式运算和分块索引技术实现数据实时匹配并进行计算，负载均衡架构提升了海量数据的分析处

理效率，支持对各空间和时间粒度客流数据以及公交运行数据的频繁存储与读取，将数据流处理压力分散，最大化硬件运算能力，缓解因大批量数据读写而造成的系统性能瓶颈。对各类数据进行多级存储与并发访问的科学精密设计，以满足实时接入数据与运算结果稳定并存、快速读取历史统计结果等性能要求。

2.2 挖掘数据特征，建立公交客流仿真模型

2.2.1 建立公共汽车上、下车位置模拟匹配算法与校核机制

中国大多数城市均采用公共汽车上车刷卡一票制，缺乏下车信息的采集手段，给分析OD客流、平均出行时间和出行距离、换乘行为带来困难。在文献[5-6]的基础上，通过时间参数匹配乘客上车刷卡与公共汽车GPS信息判断上车站点位置，对于未成功匹配的情况按照刷卡时间间隔聚类并结合车辆到离站情况模拟上车位置(见图1)。再根据用地性质和公交通勤出行特征，以及车站发生吸引总量基本保持平衡的假设，设定上车人数较多的车站下车人数也相对较多，建立车站客流发生吸引强度模型

$$P_{mn} = W_{mn} / A_m, \quad (1)$$

式中： P_{mn} 为第 m 条单向线路中第 n 个车站的客流吸引强度； W_{mn} 为第 m 条单向线路中第 n 个车站的客流吸引量； A_m 为第 m 条单向线路的客流量。

同时，累积每位个体一段时间的公共汽车出行信息形成常发出行表和出行链模型。对于全天仅一次刷卡的情况，运用常发出行表和客流强度模型预测其下车位置；对于全天存在多次刷卡的情况，根据出行链规则预测每次乘车的下车位置(见图2)。该方法在一定程度上解决了一票制无法获知下车位置的难题。

为精确监控城市公共汽车客流量变化，结合车载视频抽样信息和常发出行表校核模型精度。校核后车站客流准确率达70%。由于存在大量投币客流，为获得全口径总客流量，结合公共汽车营收报表对线路客流量进行扩样：

$$M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} / \beta_{ij}, \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = \text{card}_{ij} / (\text{card}_{ij} + \text{cash}_{ij}), \quad (3)$$

式中： M 为公共汽车总客流/(人次·d⁻¹)； α_{ij}

为第 i 条线路中第 j 号车的刷卡客流量(由 IC 卡刷卡记录统计); β_{ij} 为第 i 条线路中第 j 号车的扩样系数, 该系数等于该车日刷卡收入 $card_{ij}$ 与总收入 $card_{ij} + cash_{ij}$ 的比例(根据营收报表获得)。校核后线路客流准确率达 80%, 较准确地模拟了客流走廊(见图 3)。

2.2.2 建立轨道交通网络客流最优策略分配模型

为真实模拟轨道交通客流选择行为, 公交信息系统对线网中每条路径设定广义费用, 即乘客选择该路径出行的综合成本。该费用由确定项和随机项组成, 其中确定项主要包括车辆站间运行时间、乘客步行换乘时间、乘客等待时间、票价和车厢拥挤度等, 而随机项主要体现突发事件、乘客心理等不确定因素对路径选择的影响。基于广义费用最小的动态平衡机制, 公交信息系统建立了轨道交通线网客流分配模型, 精确计算轨道交通线路客流、断面客流(见图 4)和换乘客流等, 准确率达 90%。

2.3 以需求为导向构建公交运行监控和动态评价指标体系

以往武汉市公交运行水平的评价内容仅限于对线路、车站服务范围的单一描述, 没有融合分析线网结构与客流演变规律, 更没有深入挖掘公交运行与服务水平之间的关系, 缺乏科学、准确、全面的模型支撑。

以文献[11]为基础, 建立了以乘客满意度感受为核心的公交运行评价指标体系(见图 5), 包括从空间和时间多角度反映公交时效性的发车间隔、服务时长、到站准点率、行驶速度, 反映乘车舒适性的满载率, 反映乘车安全性的事故率, 以及反映公交系统可达性的线路、车站覆盖范围等指标。

该评价指标体系以社会公众为主要服务对象, 准确掌握全天候、全网络、多层次的公交运行状态和客流演变规律, 解决了传统调查指标无法用于公交线网整体动态评价、无法解决客流数据盲区、无法了解公交运行实际情况的难题。

2.4 连接信息系统与规划预测模型, 服务于行业管理和居民出行

道路和公交系统的规划实施决定了规划年的交通供给, 而未来的交通运行情况则基于对现状模型的推演。通过拟合现状模型与

交通运行状况, 例如运用道路车流和公交客流分别校核现状模型中车流和客流模块, 使得预测模型能够更加精准地反映宏观变化趋势和交通运行特征。

鉴于规划与现状数据分离的传统状况, 通过公交信息系统提供的客流和运行数据对现状公共汽车客流和轨道交通客流模型进行校核, 调节模型参数, 提高现状模型的精确度, 并有针对性地研发数据接口和标准技术, 建立信息系统与传统预测模型之间的数据传输通道。公交信息系统对现状数据的掌控使客流预测模型得到良好的参数标定, 在掌握现状客流时空分布特征的基础上, 通过

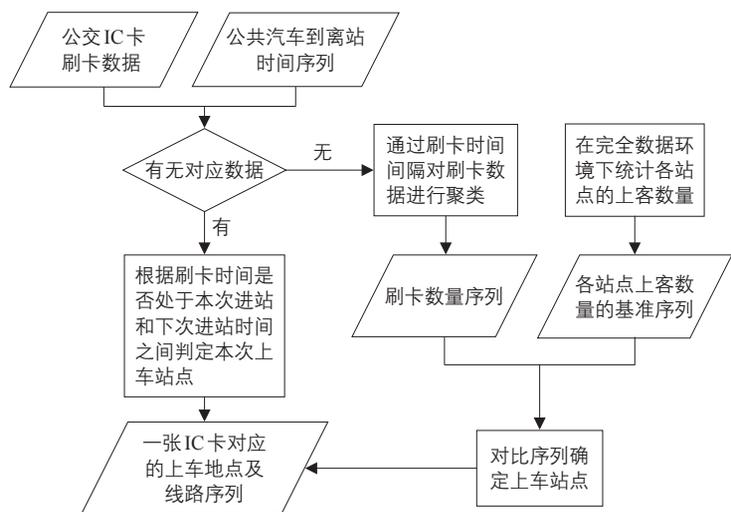


图1 公共汽车上车站点判断模型

Fig.1 Module of boarding locations inferring

资料来源: 文献[10]。

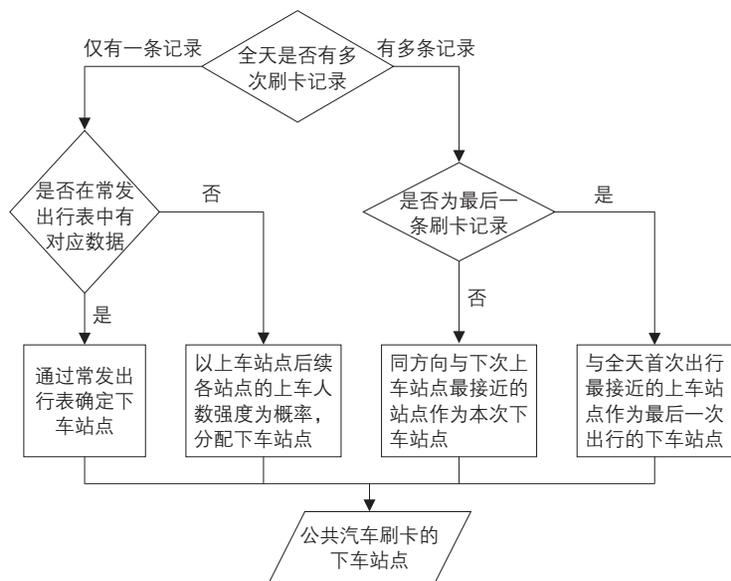


图2 公共汽车下车站点预测模型

Fig.2 Module of alighting locations inferring

资料来源: 文献[10]。

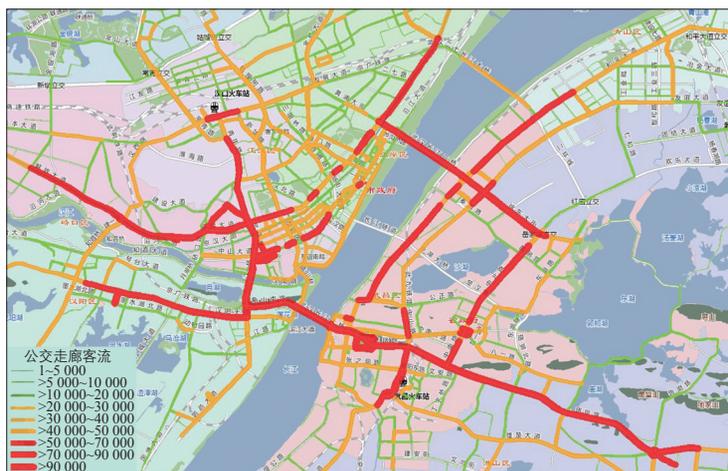


图3 公共汽车客流走廊分布

Fig.3 Distribution of bus passenger flow corridors

资料来源：文献[10]。

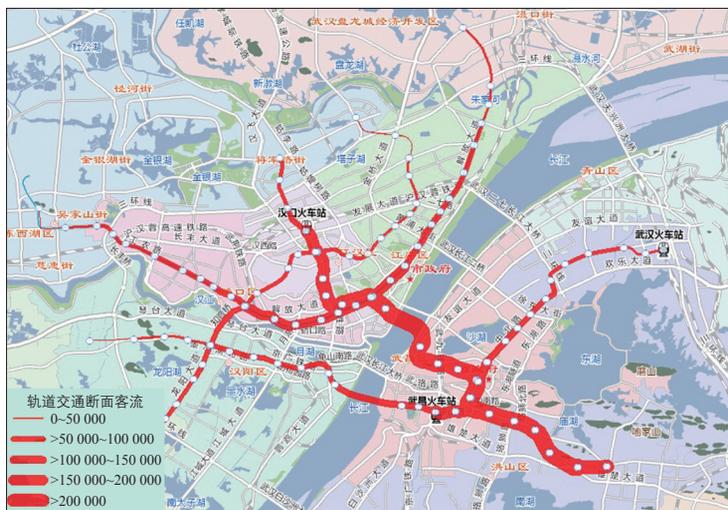


图4 轨道交通断面客流分布

Fig.4 Distribution of rail transit passenger flow

资料来源：文献[10]。

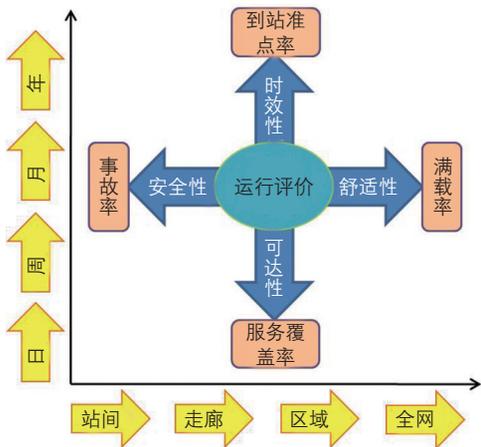


图5 公共交通运行评价指标结构

Fig.5 Criteria of public transit operational evaluation

资料来源：文献[10]。

将系统得到的现状数据与Emme宏观预测、Legion行人仿真等数据进行关联，根据城市总体规划、土地利用规划、公交线网规划等，较好地模拟出未来公交运行发展趋势^[12]。

2.5 融合分析城市交通大数据，探索规划研究工作的新途径

在全面掌握城市公交运行和客流OD分布特征的基础上，公交信息系统进一步融合车流运行状况、车流出行OD，并结合手机信令数据，分析全市常发大客流区域位置与演变规律，摸清车辆出行路径与停车需求，展示人口岗位分布与区域活跃度，全方位掌握城市交通运行的规律，更加准确地把握城市交通动向。

结合地铁刷卡数据和手机信令数据，以地铁2号线末站光谷广场站为分析对象(见图6)，分析出站客流分布。从客流来源分布来看，来自城市中心的通勤客流占有较大比例，尤其是与几个轨道交通换乘车站周边区域的联系最为紧密，并且该部分客流平均乘距普遍较长；从客流扩散范围来看，光谷广场站的服务范围过于广泛，轨道交通末端站点与公共汽车、步行及自行车交通的接驳效率对该区域市民的影响尤为重要。

3 应用与案例

公交信息系统将现状公交运行状况与规划预测方案相结合，为城市新建、改建项目的审批与评估工作提供必要的的数据支撑，成功应用于《武汉市轨道交通线网规划修编(2014—2049年)》、《武汉市城市轨道交通第三期建设规划(2015—2021年)》等数十项城市交通规划重大项目，效果良好。截至2015年，以周报、快报、年报等方式面向社会公众发布了公交运行状态和客流集散特征分析等专题报告数十期，引导居民选择合适的出行工具和线路错峰避堵出行。

3.1 应用于公共汽车线网优化调整

公交信息系统统计数据显示，实施线网优化与换乘优惠前，武汉市公共汽车线路平均长度18.9 km(见表1)，线路运营时间较长，绕行严重，且缺少直达快线、大站干线；线路重复系数高达4.6(见图7a)，主城区线路网密度仅为1.5 km·km⁻²，低于《城市道

路交通规划设计规范》(GB 50220—95)^[13](以下简称《规范》)要求的3~4 km²·km²；次干路和支路系统不完善，不适合公共汽车通行，导致公交系统可达性差；乘客平均换乘系数小于1.1，线路网络化程度低，不合理的线网布局不仅加剧了公交企业运营成本，还增加了道路交通压力；公交线网满载率偏高，高峰期车内普遍拥挤严重。

在此背景下，根据现状客流特征梳理公交线网，规划设计体系分明、功能完善的多级网络结构。结合公交信息系统提供的现状客流和公共汽车线网数据建立交通预测模型，并依据规划期内城市经济和社会发展、用地布局等指标，预测未来交通量。预测的每个阶段都分为现状数据收集、建立模型、交通预测三个部分，并在各个阶段对模型精度进行校核。

根据2020年城市人口、用地发展趋势，预测公共汽车客运日均需求量将由现状的450万人次增长至超过800万人次，按照客运交通需求匡算规模，届时武汉市公共汽车线网高峰小时运力需求将达到1.5万标台，线路合理规模需要达到640~700条。按照“快、干、支、微”各级线路客流特征，安排各等级线路的需求规模，其中快线和干线规模为100~120条，占全网线路规模的18%，日均承担客流为345~420万人次，占全网客流规模约40%，快线、干线网逐渐成为公交线网的骨干。规划方案实施后，预计全市公共汽车线网的重复系数将由4.6下降至3.6(见图7b)，车站500 m范围覆盖率达75%增加至91%，线网换乘系数从1.1提高至1.4，主要客流走廊上的线路数量降至10~20条。

3.2 应用于公交换乘优惠方案研究

公交信息系统对全市公共交通运行和客流情况的监控显示，武汉市公共汽车平均票价为1.45元，平均乘距为6.2 km，换乘系数仅为1.1，网络化程度不高；轨道交通平均票价为2.52元，平均乘距为11.6 km，换乘系数1.3，已经迈入网络化运营阶段。总体而言，武汉市公共交通收费标准缺乏整合，采用定额票价，路线倾向一车直达，长距离乘客收费相对低廉。

在建立“快、干、支、微”四级规划网络后，公共汽车线路的平均长度将会缩短，市民公交出行的换乘次数将有所提高。为了

不增加市民出行成本，保障线网调整方案顺利实施，在公交信息系统提供的现状客流基础之上，开展公共交通系统一体化换乘优惠方案研究。结合公交线网优化调整方案和城市发展趋势预测规划年的换乘规模，率先推出“公共汽车全天1.5 h内首次换乘免费，第二、三次换乘六折或七折收费，三次以上换乘正常收费”的优惠政策。该方案已于2016年1月1日正式实施，并取得初步成效(见图8和图9)。

优惠政策实施后，全市公共汽车换乘客流总量由30万人次迅速增长至超过70万人次，其中一次换乘客流占换乘总量的90%左

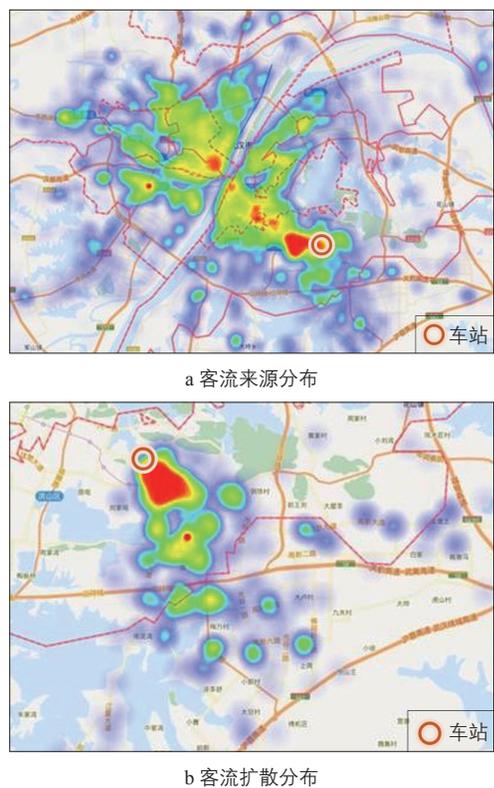


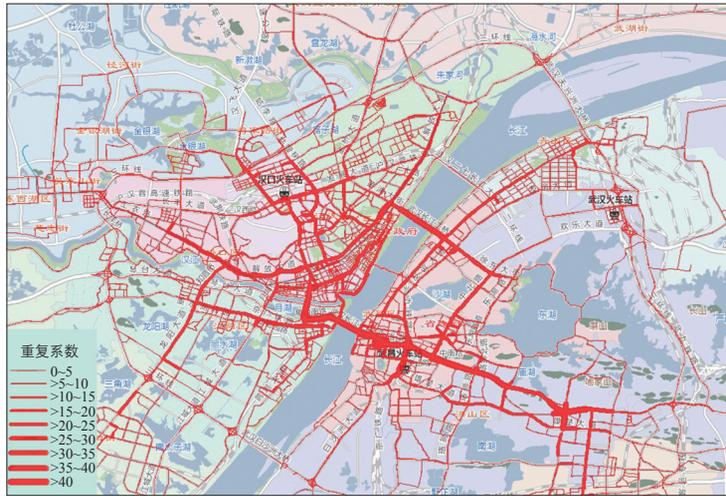
图6 光谷广场站出站客流分布
Fig.6 Distribution of departure passengers at Guanggu station
资料来源：文献[10]。

表1 2015年武汉市公共汽车线路分类型静态指标
Tab.1 Statistical indexes of categorizing Wuhan bus lines in 2015

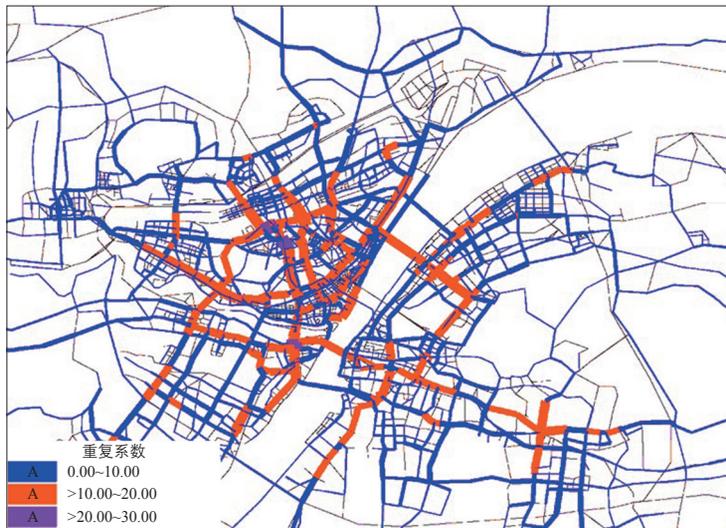
线路类型	数量/条	平均线路长度/km	平均站距/km	非直线系数
专线	233	19.76	0.82	1.66
普线	57	12.47	0.78	1.46
微循环	48	7.76	0.54	1.72
郊线	32	20.92	1.11	1.61

资料来源：文献[9]。

右，前后两次乘车的时间间隔由49 min降至38 min，换乘系数由1.1增至1.3，基本达到



a 现状



b 规划

图7 公共汽车线路重复系数分布

Fig.7 Distribution of the coverage of different bus service routes

资料来源：文献[10, 12]。

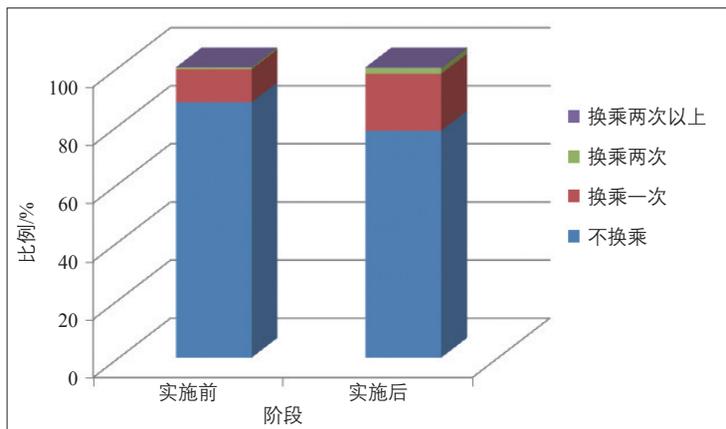


图8 方案实施前后公共汽车换乘比例变化

Fig.8 Transfer rate before and after implementation of the strategy

资料来源：文献[14]。

预测水平。随着线网不断完善，乘客可以自由选择公共汽车和轨道交通、多条公交线路组合出行，客流得到有效组织，原本乘坐一趟长距离线路直达目的地的单一出行模式，将逐渐演变成“公共汽车+地铁”的组合模式。

3.3 应用于公交日常运营管理

根据公交信息系统提供的公交运行指标可以实时掌握车辆日常运行状况，合理配置运力、部署车站场站，提供定制公交服务，提高运营管理部门快速响应和决策能力。

1) 精细管理，优化运力配置。

分析区域公交线路、主要车站客流，与区域居住人口和出行规律相对照，为优化配置区域线路提供支持。公交信息系统显示，进入金银湖区域的公共汽车线路主要沿金山大道、金银湖南路分布。以金山大道万科银桥公共汽车站为例，目前途经该车站的线路只有5条，而早高峰客流量超过4 000人次·h⁻¹，服务水平明显不足，有增线需求。

2) 科学调度，提高服务效率。

根据全市公共汽车客流满载率分布情况，观察10条日均客流量达到3万人次以上的线路，发现其高峰时段满载率均超过《规范》^[13]标准水平，并且早高峰满载率均高于晚高峰。其中208路公共汽车早晚高峰满载率差异较大，分别为1.4(中等拥挤)和0.9(基本舒适)，但发车间隔变化不大，分别为4.1和5.6 min，表明该线路在客流水平正常的晚高峰可以适当减少发车班次，节约运营成本。

4 结语

公交优先已经上升到城市发展的战略层面^[15]。在武汉市全面建设国家中心城市，创建公交都市示范城市，深入落实公交优先发展战略的背景下，综合运用新一代信息技术，公交信息系统整合挖掘全市现有的公交基础数据资源，构建了公交信息资源库。与武汉市交通云平台融合，向上支撑智慧城市建设，向下辅助交通行业管理。达到承担武汉市公交信息采集、公交体系运行监控和决策支持的目标，为武汉市智慧城市一体化建设做出示范性推广。通过有针对性地建设并结合交通预测模型，应用于公交线网规划和相关政策制定，在服务城市交通发展战略和各项规划研究中发挥积极作用。

参考文献:

References:

[1] 杨晓光. 智能化公共交通系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

[2] Tan Weekheng, Tan Yujie. Transformation of Smart- Card- Based Single- Purpose E- Micropayment Schemeto Multi-Purpose Scheme: A Case Study[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 2306-2313.

[3] Le Minh Kieu, Ashish Bhaskar, Edward Chung. Passenger Segmentation Using Smart Card Data[J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation System, 2015, 16(3): 1537-1548.

[4] 黄正锋, 任刚, 华璟怡, 陆丽丽. 分布式处理技术下公交信息感知挖掘系统设计[J]. 城市交通, 2014, 12(5): 60-64.
Huang Zhengfeng, Ren Gang, Hua Jingyi, Lu Lili. Design of a Bus Information Perception and Mining System Based on Distributed Processing Technology[J]. Urban Transport of China, 2014, 12(5): 60-64.

[5] 马晓磊, 刘从从, 刘剑锋, 陈锋, 于海洋. 基于公交 IC 卡数据的上车站点推算研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(4): 78-84.
Ma Xiaolei, Liu Congcong, Liu Jianfeng, Chen Feng, Yu Haiyang. Boarding Stop Inference Based on Transit IC Card Data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(4): 78-84.

[6] 杨万波, 王昊, 叶晓飞, 徐闯闯, 姜冬雪. 基于 GPS 和 IC 卡数据的公交出行 OD 推算方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 117-121.
Yang Wanbo, Wang Hao, Ye Xiaofei, Xu Chuangchuang, Jiang Dongxue. OD Matrix Inference for Urban Public Transportation Trip Based on GPS and IC Card Data[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2015, 34(3): 117-121.

[7] 黄正东, 刘学军. 大城市公共交通空间网络规划[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[8] 韩纪彬, 张苗, 郭进利. 城市轨道交通网络可靠性分析[J]. 城市交通, 2015, 13(5): 80-84.

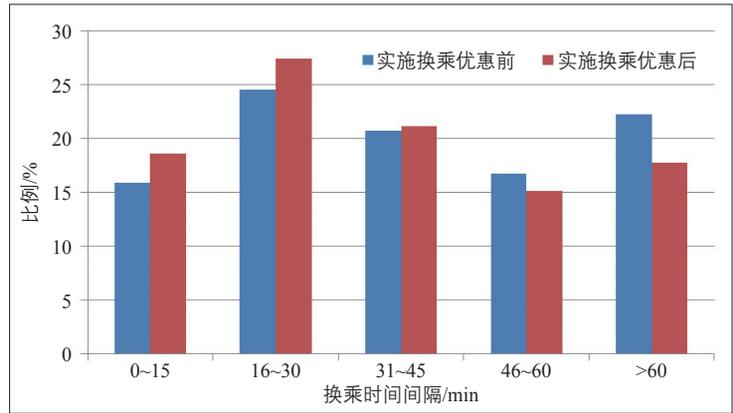


图9 方案实施前后客流换乘时间间隔变化

Fig.9 Transfer time before and after implementation of the strategy

资料来源: 文献[14]。

Han Jibin, Zhang Miao, Guo Jinli. Urban Rail Transit Network Reliability Analysis[J]. Urban Transport of China, 2015, 13(5): 80-84.

[9] 武汉市交通发展战略研究院. 2015年武汉市交通发展年度报告[R]. 武汉: 武汉市交通发展战略研究院, 2015.

[10] 武汉市交通发展战略研究院. 武汉市公共交通运行评价报告[R]. 武汉: 武汉市交通发展战略研究院, 2015.

[11] 杨佩昆. 公共交通通行能力和服务质量手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[12] 余世英, 李建忠, 郑猛. 建立在现有模型基础上的轨道交通客流预测模型及其校核[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(1): 49-53.
She Shiyang, Li Jianzhong, Zheng Meng. Calibration of Wuhan Rail Passenger Forecast Model Built on the Existing Model[J]. Urban Mass Transit, 2008, 11(1): 49-53.

[13] GB 50220—95 城市道路交通规划设计规范[S].

[14] 武汉市交通发展战略研究院. 武汉市公共交通线网优化调整实施评估报告[R]. 武汉: 武汉市交通发展战略研究院, 2016.

[15] 龙瀛, 孙立君, 陶遂. 基于公共交通智能卡数据的城市研究综述[J]. 城市规划学刊, 2015(3): 71-77.
Long Ying, Sun Lijun, Tao Sui. A Review of Urban Studies Based on Transit Smart Card Data[J]. Urban Planning Forum, 2015(3): 71-77.