

基于市域轨道交通线路客流分布的 快慢车开行比例方案*

黄秋瑜¹ 赵源^{2,3} 丁小兵¹ 刘志钢¹ 万浩纯¹ 王靖¹

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

3. 上海申通地铁集团有限公司运营管理中心, 200070, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 根据上海轨道交通16号线客流分布特征,构建了随时间变化的拟合函数模型;根据不同时段的客流,构建列车开行比例模型,将开行比例问题置于不确定性多阶段整数规划问题中;使用割平面法获得开行比例最优解;根据最优开行比例,绘制了晚高峰时段的列车运行图。该开行比例确定方案充分考虑了线路客流分布的不均衡性,使列车运能较好地匹配了客流需求,提高了服务水平,可为城市轨道交通运营单位提供决策参考依据。

关键词 城市轨道交通; 开行比例; 快慢车模式; 时段客流; 优化算法; 市域轨道交通线路

中图分类号 U292.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.024

Proportion of Fast and Slow Trains Based on Passenger Flow Distribution on Urban Rail Transit Lines

HUANG Qiuyu, ZHAO Yuan, DING Xiaobing, LIU Zhigang, WAN Haochun, WANG Jing

Abstract A fitting function model corresponding to time changes is constructed based on the passenger flow distribution characteristics of Shanghai metro Line 16. Then, a proportion of train operation model is built based on passenger flows at different time slots, and the model is put into the multi-stage uncertain integer-programming problem. A cut plane method is adopted to attain the optimal solution of train operation proportion, according to which, the train operation diagram at evening peak time is drawn. The optimization scheme of train operation proportion has taken the passenger flow imbalance among lines into full consideration, aiming to make the train capacity match better with the passenger flow necessity, enhance the service level and provide references for urban rail transit operation company in decision making.

Key words urban rail transit; train proportion; fast and slow train mode; period passenger flow; optimization algorithm; regional railway line

First-author's address School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

市域轨道交通线路连接市区和郊区,其长途乘客比例大,客流不均衡性大,潮汐特征非常明显,适合采用大小交路混合运行模式,即快慢车模式。

快慢车模式的技术难点在于如何确定快慢车的开行比例。在快慢车模式下,列车停站方案和快慢车开行比例要基于客流确定,以实现运输能力与客流之间的高精度匹配。

文献[1-9]的研究主要集中在客流预测方法的探索和客流分布特性模型的建立方面,研究快慢车开行比例的较少。

本文以上海轨道交通16号线(以下简称“16号线”)为例,探讨了一套适用于求解快慢车开行比例的方法,可以解决市域轨道交通线路因客流不均衡而造成的乘客运输问题。通过优化模型设计,可根据线路的特点、客流和OD(起讫点)分布,确定合理的停站方案,满足乘客出行OD的需求,实现高可达性。

1 客流分析

列车开行方案的制定不仅要根据客流的特征,还要最大程度地满足客流出行需求,进而提高企业运营效益。

1.1 客流数据的提取与处理

本文以2 h为划分单位,将列车运行时间分为7

* “十三五”国家重点研发计划子课题(2017YFC0804900)

个时段:7:00—9:00,9:00—11:00,11:00—13:00,13:00—15:00,15:00—17:00,17:00—19:00,19:00—21:00。其中 7:00—9:00 是早高峰时段,17:00—19:00 是晚高峰时段,其余为非高峰时段。通过抽样调查,对 16 号线客流进行调查。调查分析步骤如下:

步骤 1:统计各时段各站每个自动扶梯和楼梯的前 10 min 客流量。16 号线部分车站的前 10 min 客流量如表 1 所示。

表 1 16 号线部分车站各时段的前 10 min 客流量		
时段	龙阳路站的 10 min 客流量/人次	滴水湖站的 10 min 客流量/人次
7:00—8:00	669	671
8:00—9:00	2 186	998
9:00—11:00	812	294
11:00—13:00	499	199
13:00—15:00	547	219
15:00—17:00	499	198
17:00—18:00	719	403
18:00—19:00	1 601	614
19:00—21:00	1 010	337

步骤 2:通过 AFC(自动售检票系统)获取乘客的出行频次、等待时间、旅途起终点、乘坐城市轨道交通的时间段等,为计算 OD 对的支持度和置信度提供数据支持。

步骤 3:对低频数据进行去冗余处理,结果如表 2 所示。

表 2 去冗余处理后的部分客流数据			
起点站	终点站	出行频率(次/d)	在途时间段
周浦东站	龙阳路车站	≥4	7:00—9:00、17:00—19:00
惠南站	罗山路站	2~3	7:00—9:00、17:00—19:00

注:在途时间段指乘客刷票卡进站到刷票卡离站的时间段

对上述获得的数据进行数据筛选和整理,可以为早晚高峰客流回归分析拟合提供准确的数据支持。

1.2 早晚高峰客流的回归分析

早晚高峰时段客流的波动很大,因此不能直接将表 1 和表 2 的样本数据乘以 12 转换成按 2 h 为间隔时间段的客流。由 16 号线早高峰时段的前 10 min 客流量分布特点可知,各站的客流量-时间曲线呈驼峰形。因此,可建立一元二次回归方程模型来

预测早晚高峰期的客流情况。通过代入对应的时间及客流数据,对回归方程的系数进行标定,并计算出 2 h 内的客流量预测值。参数标定过程如图 1 所示。

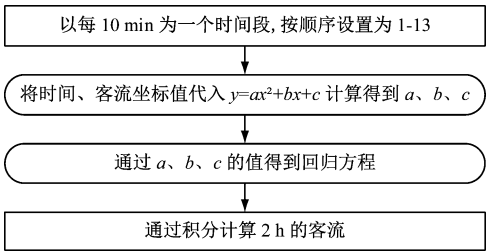


图 1 一元二次回归分析流程图

从 7:00 开始,以每 10 min 为 1 个统计周期,可知 7:00—7:10 是第 1 个统计周期,8:00—8:10 是第 7 个统计周期;9:00—9:10 是第 13 个统计周期。以统计周期为横坐标 x ,以客流量为纵坐标 y ,则表 1 中,龙阳路站的早高峰时段客流量坐标 (x,y) 为 $(1,669)$, $(7,2\ 186)$ 和 $(13,812)$;将客流量坐标代入一元二次回归方程 $y = ax^2 + bx + c$ 可得, $a = -40.153$, $b = 574.06$, $c = 135.1$,所以回归方程为 $y = -40.153x^2 + 574.06x + 135.1$ 。对于 8:50—9:00 统计周期, $x = 12$,进而由定积分可得早高峰时段(7:00—9:00)龙阳路站客流量为 19 417 人次。同样可得其他车站的早晚高峰时段客流量。部分车站的客流量计算如表 3 及表 4 所示。

表 3 16 号线早高峰时段部分车站客流量计算			
车站	拟合函数	客流量/人次	
		8:50—9:00	7:00—9:00
龙阳路站	$y = -40.153x^2 + 574.06x + 135.1$	1 241	19 417
滴水湖站	$y = -14.319x^2 + 169.06x + 516.26$	483	9 524

因为非高峰时段的客流量比较稳定,将表 1 和表 2 中每个非高峰时段的前 10 min 客流量直接乘以 12,即可转换为每个非高峰时段的 2 h 客流量。16 号线部分车站非高峰时段换算后的 2 h 客流量见表 5。非高峰时段 2 h 客流量可为开行比例的确定提供数据支持,使列车运行能力与客流量相匹配,

表 4 16 号线晚高峰时段部分车站客流量计算			
车站	拟合函数	18:50—19:00	17:00—19:00
龙阳路	$y = -20.458x^2 + 310.67x + 428.79$	1 211	15 153
滴水湖	$y = -6.7778x^2 + 89.389x + 320.39$	417	6 014

从而节省能源消耗和乘客出行时间。

表 5 16 号线非高峰时段部分车站客流量

车站	客流量/人次				
	9:00— 11:00	11:00— 13:00	13:00— 15:00	15:00— 17:00	19:00— 21:00
龙阳路站	9 744	5 988	6 564	5 988	12 120
滴水湖站	3 528	2 388	2 628	2 376	4 044

2 基于时段客流的开行方案研究

2.1 基于关联规则挖掘确定快车停站方案

基于关联规则的数据挖掘,得到大概率 OD 对车站,为准确确定快车停站方案提供参考。

OD 对车站($A \rightarrow B$)的支持度 $S(A \rightarrow B)$ 和置信度 $C(A \rightarrow B)$ 计算式为:

$$S(A \rightarrow B) = P(A \cup B) \tag{1}$$

$$C(A \rightarrow B) = P(B \mid A) = P(A \cup B) / P(A) \tag{2}$$

例如, $S(\text{鹤沙航城站} \rightarrow \text{龙阳路站}) = P(\text{鹤沙航城站} \cup \text{龙阳路站})$, $C(\text{鹤沙航城站} \rightarrow \text{龙阳路站}) = P(\text{龙阳路站} \mid \text{鹤沙航城站}) = P(\text{鹤沙航城站} \cup \text{龙阳路站}) / P(\text{鹤沙航城站})$ 。由相关数据可得, $S(\text{鹤沙航城站} \rightarrow \text{龙阳路站}) = 4.92\%$, $C(\text{鹤沙航城站} \rightarrow \text{龙阳路站}) = 61.54\%$ 。这表明,4.92%的乘客在鹤沙航城站上车,在龙阳路站下车;在鹤沙航城站上车的乘客有 61.54% 在龙阳路站下车。

由同样计算,可得到所有 OD 对车站的支持度和置信度,如表 6 所示。

表 6 16 号线部分 OD 对车站的支持度和置信度

OD 对车站	支持度(S)/%	置信度(C)/%
华夏中路站→龙阳路站	1.08	87.50
罗山路站→龙阳路站	6.61	19.20
滴水湖站→惠南站	2.00	46.43
滴水湖站→罗山路站	0.15	3.58

取所有支持度和置信度的中位数,分别作为最小支持度 S_s 和最小置信度 C_s 。由表 6 可得, $S_s = 1.39\%$, $C_s = 38.56\%$ 。将所有车站的 $S(A \rightarrow B)$ 和 $C(A \rightarrow B)$,分别同 S_s 和 C_s 进行比较。

根据比较结果,将 $S(A \rightarrow B) > S_s$,且 $C(A \rightarrow B) > C_s$ 的 OD 对车站确定为大概率 OD 对车站,其他 OD 对车站确定为小概率 OD 对车站。则可选择大概率 OD 对车站为快车停站的车站;而小概率 OD

对车站一般为被清洗车站,即快车不停站的车站。这样确定的快车停站方案能保证大多数乘客尽快到达目的地。

采用上述方法可确定,16 号线车站中的大概率 OD 对车站为:龙阳路站、罗山路站、周浦东站、鹤沙航城站、新场站、惠南站、惠南东站、书院站、临港大道站及滴水湖站。综合考虑车站的规模、基础设施和换乘其他交通方式的便利性,最终可确定龙阳路站、罗山路站、新场站、惠南站及滴水湖站为快车停靠站。

大概率 OD 对车站的乘客 OD 对共有 609 对,统计其对应的乘客出行时间段,结果如表 7 所示。

表 7 16 号线大概率 OD 对车站的乘客 OD 对出行时间段统计

乘客出行时间段	乘客 OD 对数/对
7:00—9:00 及 17:00—19:00	541
9:00—11:00、11:00—13:00 及 19:00—21:00	59
13:00—15:00	4
15:00—17:00	5

从表 7 可见,在大概率 OD 对车站的乘客 OD 对中,88.83% 的乘客 OD 对出行时间段是高峰时段,只有 9.68% 为高峰延续时段。其他乘客 OD 对的出行时间段略有不同,但样本很小。所以,应针对全日不同时段编制不同的停站方案,即在高峰时段执行快慢车方案,在非高峰时段执行站站停方案。

2.2 基于整数规划法确定开行比例

以龙阳路站的部分晚高峰时段(18:00—19:00)为例,建立快慢车开行比例模型。

以每小时运送乘客的最大值为最优目标,建立了以下约束条件:

- 1) 根据回归方程 $y = -20.458x^2 + 310.67x + 428.79$,在 18:00—19:00 期间,预测车站的乘客发送量将达 11 868 人次,故列车输送能力应尽可能接近 11 868 人次。
- 2) 在 18:00—19:00 时段,客流到达均衡。
- 3) 高峰时段,列车发车间隔为 8 min。
- 4) 慢车采用 6 节编组,快车采用 3 节编组。由每节车厢可容纳 248 人可得,快车的运输能力为 744 人/列,慢车的运输能力为 1 488 人/列。
- 5) 在该模型中,不考虑超载的情况,即满载率为 100%。

设定每小时的最大运送乘客量 F_{\max} 是目标函数。 x_1 为每小时开行的快车数, x_2 为每小时开行的

慢车数;则整数线性规划(LP)方程为:

$$F_{\max} = 744 x_1 + 1\,488 x_2$$
$$\text{subject. to. } \begin{cases} 8 x_1 + 8(x_2 - 1) \leq 60 \\ 744 x_1 + 1\,488 x_2 \leq 11\,868 \\ x_j \geq 0, j = 1, 2, \cdots \end{cases} \quad (3)$$

采用割平面法求解式(3)。割平面法求解步骤如下:

步骤 1:如果初始 LP 的最优解 X^* 是整数解,则 X^* 是式(3)的最优解;

步骤 2:如果 X^* 不是整数解,则添加 1 个线性约束(即切割平面)到原来的线性规划(LP)中,从原可行域中切掉无整数解的部分(包括 X^*);

步骤 3:添加约束条件后,求解新的线性规划(LP₁)最优解 X^{**} ;

步骤 4:如果 X^{**} 是一个整数解,则 X^{**} 是 LP₁ 的最优解;

步骤 5:如果 X^{**} 不是整数解,再次添加线性约束重复过程。

整数规划法求解过程如图 2 所示。在 x_1Ox_2 平面直角坐标系中,LP 的最优解 $X_1 = (x_1, x_2)^T = (557 / 186, 512 / 93)$,不是一个整数解。考虑到乘客列车运行时间间隔分配数量,对 LP 添加约束($x_2 \leq 6$),则新的线性规划(LP₁)的最优解是 $X_2 = (373 / 186, 6)^T$,仍不是整数解。考虑到 1 h 内列车车底数的限制,加上新的约束($x_1 + x_2 \leq 8$)到 LP₁,得到线性规划 LP₂,可解得 $X_3 = (2, 6)^T$,是整数解。所以 $X_3 = (2, 6)^T$ 是整数规划的最优解。

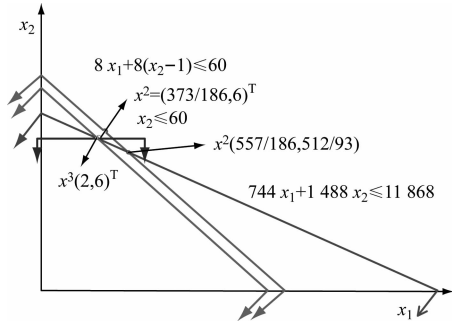


图2 龙阳路站开行比例整数规划法求解过程

整数规划的最优解是 $X^3 = (2, 6)^T$,即在 18:00—19:00 期间, $x_1 = 2$ 列, $x_2 = 6$ 列, $F_{\max} = 10\,416$ 人次。所以,最优快慢车比例是 1: 3。

由客流时段特征分析可推测,早高峰时段的快慢车的开行比例与晚高峰时段相同。通过上述方法可得,16 号线高峰时段的快慢车开行比例,如表 8

所示。

表 8 16 号线高峰时段快慢车的开行比例

时段	开行比例(快车:慢车)	
	龙阳路站—滴水湖站	滴水湖站—龙阳路站
7:00—8:00	1:3	1:3
8:00—9:00	1:3	1:3
17:00—18:00	1:3	1:3
18:00—19:00	1:3	1:3

2.3 16 号线列车运行方案

由 2.1 节可知,16 号线快车站有龙阳路站、罗山路站、新场站、惠南站和滴水湖站,快慢车开行比例为 1: 3,列车之间的发车间隔为 8 min,停站时间为 1min(除超车站外)。16 号线的快车和慢车运行时间表分别如表 9 和表 10 所示。

表 9 16 号线快车运行时间表

区间	运行时间/min
龙阳路站→罗山路站	5.0
罗山路站→新场站	11.0
新场站→惠南站	8.0
惠南站→滴水湖站	18.0

表 10 16 号线慢车运行时间表

区间	运行时间/min
龙阳路站→华夏中站路	4.0
华夏中路站→罗山路站	3.0
罗山路站→周浦东站	4.0
周浦东站→鹤沙航城站	3.0
鹤沙航城站→航头东站	2.5
航头东站→新场站	3.0
新场站→野生动物园站	4.0
野生动物园站→惠南站	5.0
惠南站→惠南东站	4.0
惠南东站→书院站	8.0
书院站→临港大道站	6.0
临港大道站→滴水湖站	2.5

根据表 9 及表 10,绘制 18:00—19:00 时间段 16 号线下行方向运行图,如图 3 所示。其中,双划线路车站为快车停靠站,单划线路车站是具备越行能力的车站,其他是普通站;实线是慢车的运行线,虚线是快车的运行线。

由图 3 可见:2 列快车各超过慢车 2 次;且超车都分别发生在航头东站和惠南东站。第 1 次快车超车时,慢车在航头东站停车 4.5 min;第 2 次快车超

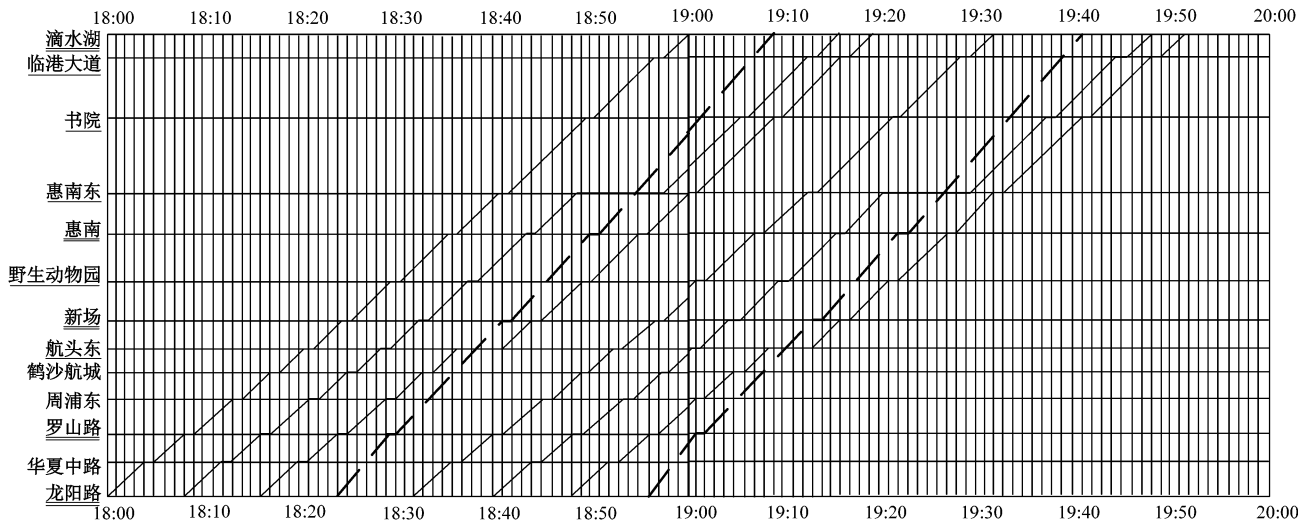


图3 18:00—19:00 16号线下行方向列车运行图截图

车时,慢车在惠南东站停站9 min。

3 结语

市域轨道交通线路采用快慢车模式可解决市郊载客量与客流不匹配的问题。本文以16号线为例,对客流分布特征进行拟合预测,并基于关联规则法确定了列车停站方案,提出了列车开行优化方案,使市域轨道交通线路的载客量和各时段客流能够较好地匹配。

参考文献

- [1] ANTHONY R N. Planning and controls system: a framework for analysis [D]. Boston: Harvard University. 1965.
- [2] MIGNONE A, ACCADIA G. Operations research models for programming support of cadenced timetables[J]. Ingegneria Fer-

roviriav, 2010(1): 9.

- [3] BOWMAN J L, BEN AKIVA M E. Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules [J]. Transportation Research Part A, 2001, 35(1): 1.
- [4] 谢军, 吴伟, 杨晓光. 用于短时交通流预测的多项式分布滞后模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1297.
- [5] 豆飞, 贾利民, 秦勇, 等. 铁路客运专线模糊k近邻客流预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4422.
- [6] 姚向明, 赵鹏, 禹丹丹. 城市轨道交通网络短时客流OD估计模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 149.
- [7] 周玮腾, 韩宝明, 李得伟. 城市轨道交通客流分布短时预测模型研究及应用[J]. 城市轨道交通研究, 2015(2): 24.
- [8] 丁小兵, 徐行方. 基于时段分布的市郊轨道交通车站滞留客流分布算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 116.
- [9] 许得杰. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

(收稿日期: 2018-03-22)

(上接第54页)

网监察方案和以往线网实时监察的实现技术做对比,从技术角度来说可行性并不是问题,当然有系统实现的技术门槛高,以及后期维护的难度和成本等问题需要妥善考虑。

为进一步利用和管理好数据,还需要引入数据治理机制,将数据作为地铁企业的商业资产进行应用管理。数据治理涉及的范围广泛,涵盖数据结构设计、数据管理、数据安全管理、数据质量管理、数据仓库和BI管理、文档记录和内容管理、元数据管理、主数据和参考数据管理等多个方面,需要成立数据治理委员会并配备专门的数据专员来推行和实施。

参考文献

- [1] 元进辉. 北京市轨道交通路网指挥中心指挥系统(TCC)的设

计和实施[J]. 智能建筑电气技术, 2010, 4(5): 27.

- [2] 杨承东, 徐余明. 基于综合监控系统的线网指挥中心构建方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013(10): 25.
- [3] RAJDEEP C, BIKRAMJIT P. Proposed hybrid data warehouse architecture based on data model [J]. International Journal of Computer Science & Communication, 2010, 12(12): 211.
- [4] DAVID S, KEVIN S. Selecting a data warehouse architecture [C]// SCSUG. Proceedings 2000 South Central SAS Users Group (SCSUG) Conference. Austin, USA: SCSUG, 2000.
- [5] 朱东升, 徐石明, 李天阳. 基于Hadoop平台的地铁NCC数据中心方案研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(12): 224.
- [6] ARTIKIS A, WEIDLICH M, SCHNITZLER F. Heterogeneous Stream Processing and Crowdsourcing for Urban Traffic Management [C]// ACM. Proceedings of the 17th ACM International Conference on Extended Database Technology (EDBT). Athens: Association for Computing Machinery (ACM), 2014.

(收稿日期: 2018-05-11)