

基于客流与运能高精度匹配的市郊线快慢车 开行比例优化*

王 靖 丁小兵 刘志钢

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 城市轨道交通中的市郊线路, 主要服务通勤客流。根据历史客流量数据将工作日全天运营时间划分为几个时段, 分时段建立以运能与客流量最匹配为目标的非线性整数规划模型, 并且通过 LINGO 软件工具对模型求解。以上海轨道交通 16 号线为例, 对快慢车开行比例进行优化。

关键词 城市轨道交通; 行车组织; 快慢车; 开行比例

中图分类号 F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.031

Optimization of Fast/Slow Train Operation Proportion on Suburban Lines Based on High-precision Matching between Passenger Flow and Transport Capacity

WANG Jing, DING Xiaobing, LIU Zhigang

Abstract The suburban rail transit lines mainly serve the urban commuters. According to the historical passenger flow data, the whole day operation time of suburban rail transit is divided into several periods, a nonlinear integer programming model is built targeted at the matching of transportation capacity with passenger flow, and the LINGO program is used to solve the model. In the end, Shanghai rail transit Line 16 is taken as an example to optimize the fast/slow train proportion in operation.

Key words urban rail transit; organization of train operation; fast/slow train; proportion of train operation

Author's address Institute of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

城市轨道交通中的市郊线路采用快慢车运行模式, 既可以满足长距离乘客快速出行的需要, 又可以满足短距离乘客方便快捷的出行的需求。由于通勤客流具有明显的时间分布不均衡的特征, 故市郊铁路的快慢车开行比例最好根据不同时段的

客流量来确定。

国内外学者对快慢车运营组织方法作出了许多研究。文献[1]通过实例分析表明, 快慢车方案会大幅度降低线路通过能力, 在高峰时段不宜采用。文献[2]发现, 在以慢车为主的运行图中, 随着快车开行对数的增加, 将使系统能力损失越大。文献[3]指出, 在具有特殊客流特征的线路, 多交路快慢车相结合的开行方案对于乘客和企业而言均是有利的。文献[4]以线路条件为基础, 确定快车停站方案后, 依据各组团间的客流交互比例来近似估算快慢车比例范围。文献[5]发现, 在慢车与快车之比大于等于 2 时, 并且在特定的停站方案下, 快慢车方案才能够节约时间。文献[6]通过计算不同开行比例的线路通过能力, 考虑慢车越行和终端站接发车, 比较确定了最终开行方案。

市郊线路的快慢车运行方案首先必须满足乘客的出行要求。本研究根据市郊线路客流时空分布不均衡的特征, 从运能与客流匹配的角度出发, 分时段对快慢车开行比例进行优化, 并以上海轨道交通 16 号线为实例进行分析, 确定其最优开行比例, 以达到兼顾节约运能和提高服务水平的目的。

1 分时段提供差异化运能

上海轨道交通 16 号线(以下简为“16 号线”)是 1 条典型的市郊线路, 北起龙阳路站, 南至滴水湖站, 全长 58.96 km, 共设车站 13 座。列车采用 3 节编组或 6 节编组, A 型车。16 号线采用快慢车的运营组织方式, 即慢车站站停, 快车仅停靠龙阳路、罗山路、新场、惠南及滴水湖 5 座车站^[7]。图 1 是某工作日 16 号线龙阳路站的客流量分布图。

* “十三五”国家重点研发计划子课题(2017YFC0804900)

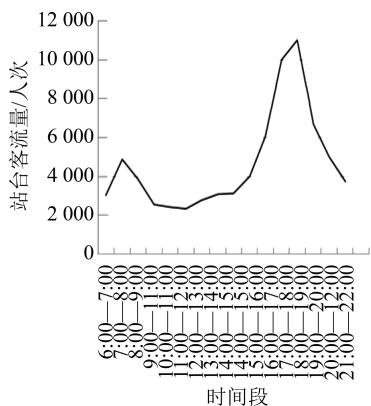


图 1 某工作日 16 号线龙阳路站的客流量分布

由图 1 可见,16 号线的客流时间分布不均衡:客流量分布有较明显的晚高峰,在 7:00—9:00 时段存在一个较小的早高峰;非高峰时段的客流量变化比较平缓。因此,需要分时段讨论,在提供差异化运能的基础上确定开行比例。将运行时间划分为早高峰时段(7:00—9:00),晚高峰时段(17:00—19:00)和非高峰时段(6:00—7:00,9:00—17:00,19:00—22:30)。为方便计算,选取 12:00—14:00 客流量作为非高峰时段平均客流量。

2 快慢车开行比例优化模型

2.1 模型假设

为了简化问题,需对模型作出以下假设:①上下行方向分开讨论;②不考虑快、慢车之间的乘客换乘;③不考虑车底数量的约束;④在各时段的开始时刻,第一辆车是慢车,且各时段内开行的快、慢车数量均不为零;⑤在各时段内,快车和慢车的车型和编组数量相同,均采用 6 节编组。

2.2 模型建立

本研究的目标是使不同时段下的运能与客流量相匹配,既满足客流需求,又不造成运能浪费。若要运能与客流量最匹配,则二者之差的绝对值应最小。本文设运能与客流量匹配指标为

$$Z = |Q - N|$$

式中:

- Q ——不同时段运能;
- N ——不同时段客流量值。

故本文目标函数为 Z_{\min} 。模型的约束条件有:①满载率约束:运能计算通常以满载率不超过 100% 为原则。②发车间隔约束:列车在各时段下的发车间隔应不小于最小发车间隔(2.5 min),并

应不大于相应时段乘客能接受的最长候车时间。本研究中,早晚高峰时段发车间隔取 8 min,非高峰时段发车间隔取 10 min。③整数约束:单位小时内快慢车开行列数为正整数。④为方便调度,单位时间内慢车开行数量是快车开行数量的整数倍。

由此,建立非线性规划如下:

$$Z_{\min} = |2x_1pw_1 + (2x_2 - 1)pw_2 - N|$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{N_{\max}}{x_1p + x_2p} \leq 1 \\ t_1 \leq \frac{60}{x_1 + x_2} \leq t_2 \\ x_2 = k \cdot x_1 \\ k \geq 1, k \in N^+ \\ x_1 \geq 1, x_1 \in N^+ \\ x_2 \geq 1, x_2 \in N^+ \end{cases} \tag{1}$$

式中:

- x_1 ——单位小时内开行快车列数;
- x_2 ——单位小时内开行慢车列数;
- w_1 ——始发站快车拥挤程度;
- w_2 ——始发站慢车拥挤程度;
- t_1 ——各时段最小发车间隔,取 2.5 min;
- t_2 ——各时段乘客能接受的最长候车时间,高峰时段取 8.0 min,非高峰时段取 10.0 min;
- p ——列车定员数;
- N ——各时段客流值;
- N_{\max} ——各时段中单位小时内最大客流量。

2.3 模型求解

MATLAB 软件不能直接求解整数规划,而 LINGO 软件不仅具有较强的优化计算能力,而且编程简洁明了,十分直观。故本文选用 LINGO 软件作为整数非线性规划模型的工具。

3 实例分析

16 号线龙阳路站的工作日快车开行时刻表如表 1 所示。

以 15 min 为 1 个统计周期,通过现场调查统计,得到 16 号线龙阳路站某工作日(7:00—22:00)的客流数据,整理后的各时段客流量如表 2 所示。

晚高峰(17:00—19:00)时段的 $N = 21\,037$ 人次,其中客流最密集 1 小时(17:45—18:45)的 $N_{\max} = 11\,017$ 人次。

表 1 16 号线龙阳路站工作日快车开行时刻表

下行(龙阳路站→滴水湖站)方向		上行(滴水湖站→龙阳路站)方向	
车次	始发时间	车次	终到时间
1	6:57	1	09:42
2	7:28	2	11:29
3	9:50	3	13:02
4	11:31	4	14:52
5	13:19	5	16:39
6	15:01	6	18:22
7	16:47		
8	18:30		

表 2 16 号线工作日龙阳路站客流量

时段	N/人次	时段	N/人次
7:00—7:15	962	14:30—14:45	758
7:15—7:30	1 069	14:45—15:00	774
7:30—7:45	983	15:00—15:15	852
7:45—8:00	917	15:30—15:45	991
8:00—8:15	832	15:45—16:00	1 046
8:15—8:30	824	16:00—16:15	1 113
8:30—8:45	797	16:15—16:30	1 435
8:45—9:00	714	16:30—16:45	1 527
9:00—9:15	651	16:45—17:00	1 692
9:15—9:30	637	17:00—17:15	2 428
9:30—9:45	643	17:15—17:30	2 392
9:45—10:00	632	17:30—17:45	2 485
10:00—10:15	600	17:45—18:00	2 720
10:15—10:30	607	18:00—18:15	2 861
10:30—10:45	630	18:15—18:30	2 702
10:45—11:00	619	18:30—18:45	2 824
11:00—11:15	593	18:45—19:00	2 625
11:15—11:30	561	19:00—19:15	1 812
11:30—11:45	587	19:15—19:30	1 782
11:45—12:00	620	19:30—19:45	1 576
12:00—12:15	627	19:45—20:00	1 520
12:15—12:30	714	20:00—20:15	1 312
12:30—12:45	774	20:15—20:30	1 466
12:45—13:00	673	20:30—20:45	1 185
13:00—13:15	749	20:45—21:00	1 057
13:15—13:30	758	21:00—21:15	1 015
13:30—13:45	798	21:15—21:30	984
13:45—14:00	784	21:30—21:45	818
14:00—14:15	773	21:45—22:00	929
14:15—14:30	811		

根据现场统计调查结果,在客流均匀到达的前提下,平均每 min 有 30 人选择慢车站台,有 50 人选择快车站台,即快车停靠站上下车的人数更多。因此,当列车从龙阳路地铁站始发时,在优化模型中设定 $w_1=1.0$ (快车 100%拥挤), $w_2=0.6$ 。

使用 LINGO 软件对规划进行求解,得到 $x_1=1$, $x_2=11$ 。即工作日晚高峰时段,单位小时内从龙阳

路站发出的快车为 1 列,慢车为 11 列,快慢车最优开行比例为 1:11。同理可得:工作日早高峰时段, $N=7\,098$ 人次, $N_{\max}=3\,931$ 人次,快慢车最优开行比例为 1:7;非高峰时段, $N=5\,877$ 人次, $N_{\max}=3\,089$ 人次,快慢车最优开行比例为 1:5。

由表 2 可知,优化方案的晚高峰时段(17:00—19:00)单位小时的快慢车开行比例为 1:11。因每个时段是 2 个小时,且始发车为慢车,为避免整点发车时重复计算,确定晚高峰时段内共开行 2 列快车,21 列慢车。

根据现场调查统计,当前晚高峰时段开行 1 列快车,16 列慢车。根据式(1)计算两种方案下运能与客流的匹配结果如表 4。

表 3 两种方案晚高峰时段的运能与客流匹配的结果比较

比较项目	原方案	优化方案
快慢车数量	1 列快车(3 节编组) 16 列慢车(6 节编组)	2 列快车(6 节编组) 21 列慢车(6 节编组)
Z	6 008.2	800.2

由表 4 可见,优化方案 Z 远小于原方案的 Z,故优化后的开行比例更符合客流需求。

研究表明:城市轨道交通的市郊线路快慢车最优开行比例与客流量变化有直接关系,可根据客流量的变化动态调整优化。优化后的开行方案可在满足客流需求的前提下提高城市轨道交通的服务水平。

参考文献

[1] 屈明月,黄树明.城市轨道交通快慢车方案研究[J].铁道运输与经济,2012(4): 79.

[2] 陈福贵,汤珏.地铁快慢车模式系统能力损失原则研究[J].铁道工程学报,2014(12): 96.

[3] 汤莲花,徐行方.基于双层规划的市郊轨道交通多交路快慢车开行方案优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2018(3): 152.

[4] 孙元广,冉昕晨,杨帆航,等.城市轨道交通快慢车开行方案设计与评价研究[J].铁道科学与工程学报,2018(1): 233.

[5] 张鹏,金龙,张天伟.以节省乘客旅行时间为目标的城市轨道交通快慢车停站方案[J].铁道运输与经济,2016(10): 90.

[6] 陈晓峰.上海轨道交通 16 号线快慢车运行方案研究[J].城市轨道交通研究,2014(5): 68.

[7] 高磊.上海市轨道交通 16 号线工程[J].城乡建设,2017(19): 68.

(收稿日期:2018-10-09)