

考虑乘客旅行时间价值的市域轨道交通列车开行方案

罗 晋¹ 朱海燕¹ 刘志钢¹ 戴卫杰²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海; 2. 上海申通地铁集团市域铁路运营筹备组, 200122, 上海)

摘 要 [目的] 鉴于市域铁路的功能定位, 以及当前经济社会发展下乘客对出行快捷性、舒适性和经济性需求不一致的特性, 需对考虑乘客旅行时间价值的市域铁路列车开行方案进行研究。[方法] 构建了考虑乘客旅行时间价值的列车开行方案模型。该模型以乘客出行成本和列车开行成本为目标函数, 以列车定员、站间客流及列车开行数量等为主要约束条件, 同时采用帕累托模型对不同乘客的时间价值和不同编组列车的开行成本进行标定。以上海市域轨道交通机场联络线为研究背景, 考虑了4节与8节两种列车编组形式, 对虹桥站至上海东站站单方向高峰小时的列车开行方案进行了计算分析及评价。[结果及结论] 考虑乘客旅行时间价值的列车开行方案能最大限度地减少乘客出行成本, 更好地满足不同乘客的出行时间需求; 增加乘客旅行时间价值较低的乘客旅行时间, 缩短乘客旅行时间价值较高的乘客旅行时间, 能更好地发挥列车开行方案的经济效益。

关键词 市域轨道交通; 列车开行方案; 乘客旅行时间价值

中图分类号 U292.3; U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.003

Operation Scheme for City Railway Train Considering Passenger Travel Time Value

LUO Jin¹, ZHU Haiyan¹, LIU Zhigang¹, Dai Weijie²

(1. College of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China; 2. Municipal Railway Operation Preparatory Group of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 200122, Shanghai, China)

Abstract [Objective] In view of the functional orientation of city railway and the inconsistency in passengers demand for travel convenience, ride comfort, and economy under the current economic and social development, it is necessary to study the train operation scheme for city railway which takes the passenger travel time value into account. [Method] A train operation scheme model considering passenger travel time value is built. In the model, passenger travel cost and train operation cost are taken as the objective function, and train capacity, in-

ter-station passenger flow and the operating train quantity are the main constraint conditions. Meanwhile, Pareto model is used to standardize the time value of various passengers and the operating cost of trains with different marshalling. Targeting the Shanghai urban rail transit airport link as the research background, two types of train marshalling for 4-car and 8-car trains are considered to calculate, analyze and evaluate the train operation scheme for the single trip during peak hours from Hongqiao Railway Station to Shanghai East Station. [Result & Conclusion] The train operation scheme which takes the passenger travel time value into account can minimize the passenger travel cost and better meet the time demands of various passengers. Extending the travel time for passengers with lower time value and shortening the travel time for passengers with higher time value can effectively achieve the economic efficiency of the train operation scheme.

Key words city railway; train operation scheme; passenger travel time value

列车开行方案反映了铁路乘客经营策略和服务质量水平^[1]。针对列车开行方案的理论与方法, 学者们进行了深入的分析与研究。文献[2]构建了以运输部门效益最大、乘客时间最小化为目标的列车开行方案优化模型; 文献[3]建立了运力浪费和乘客等待时间最小化的优化模型; 文献[4]基于铁路收益和乘客出行构建了多目标模型; 文献[5]以乘客旅行时间和城市轨道交通总成本最小为目标, 构建了双目标规划模型。

列车开行成本与乘客出行成本是影响列车开行方案编制的主要因素。现有研究在分析乘客出行成本时, 往往只考虑旅行时间而忽视时间价值。时间价值是时间的货币表现^[6], 时间价值差异体现在出行目的、收入等乘客属性上, 不同乘客的时间价值不同, 因此单位时间内的出行成本也不相同。市域铁路客流具有通勤化、潮汐性等特点, 包含了

通勤通学、商务公务、旅游休闲,以及日常购物、就医等不同种类的客流,既具有干线铁路速度快、越行运输的组织特点,又具有城市轨道交通运量大、开行密度大、公交化的特点。考虑乘客旅行时间价值的列车开行方案对满足市域铁路不同乘客的旅行时间需求,凸显市域铁路的功能及定位,增强与其他运输方式的竞争实力,以及提高社会效益具有重要意义。

1 考虑乘客旅行时间价值的列车开行方案模型构建

1.1 目标函数

1.1.1 出行成本

乘客出行成本由旅行时间和时间价值构成。旅行时间包括列车运行时间、停站时间及候车时间,其中:列车运行时间由路程以及设备设施条件来决定,而停站与候车时间与开行方案关系密切。由于运输设备、旅行距离等原因导致列车运行时间基本不变,因此乘客由于列车运行时间产生的出行成本不变。而停站和候车时间可以通过优化运营组织进行改变,因此应使这部分时间产生的出行成本目标函数 Z_p 最小。如式(1)所示:

$$Z_p = \sum_{i=1}^{M-2} \sum_{j=i+2}^M \left(\sum_{k=1}^K \left(\sum_{p=1}^P w_{k,ij,p} v_p \left(\sum_{m=j-1}^M a_{k,ij,m} t_m \right) \right) \right) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left(\sum_{k=1}^K \left(\sum_{p=1}^P w_{k,ij,p} v_p t_b \right) \right) \quad (1)$$

式中:

$w_{k,ij,p}$ ——车站 i (起点)至车站 j (讫点)且类型为 p 的乘客,选择停站方案为 k 的乘客人数;

$a_{k,ij,m}$ ——0-1 变量,当车站 m 是停站方案 k 在径路车站 i 至 j 的中间站停站时,其值为 1,否则为 0;

t_m ——列车在车站 m 的停留时间,包括停站与起停附加时间;

v_p ——类型为 p 的乘客的单位旅行时间价值;

t_b ——乘客平均候车时间。

1.1.2 开行成本

列车开行成本是指开行 1 列列车所必须支出的能耗、设备折旧,以及其他费用。不同编组列车的车辆数不同,而在固定线路上每辆车的单位运行成本基本不变,因此不同编组列车的开行成本不同。本文的列车开行成本由列车开行数量与列车编组构成,因此开行成本最小化的目标函数 Z_s 为:

$$Z_s = \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A C_a q_{ka} x_k \quad (2)$$

式中:

C_a ——列车开行编组方案 a 的运行成本;

q_{ka} ——0-1 变量,当停站方案 k 采用方案 a 时,其值为 1,否则为 0;

x_k ——停站方案为 k 的列车开行数量。

1.2 约束条件

1.2.1 列车定员约束

列车在停靠时存在乘降客流,在车的乘客数量会发生变化,但列车在站间运行时乘客数量保持不变,任一区间的在车人数都不能超过列车定员。延伸到任一停站方案,在有多个车辆编组选择的情况下,列车定员都可以表示为 1 个约束集合,即列车定员约束集合 S_k :

$$S_k = \begin{cases} q_{ka} (w_{k,12} + \sum_{l=1}^M \sum_{m=2}^M w_{k,lm}) \leq \eta Q_a \\ q_{ka} (w_{k,23} + \sum_{l=2}^M \sum_{m=3}^M w_{k,lm}) \leq \eta Q_a \\ \vdots \\ q_{ka} (w_{k,ij} + \sum_{l=i}^M \sum_{m=j}^M w_{k,lm}) \leq \eta Q_a \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$w_{k,lm}$ ——车站 l 至车站 m 且停站方案为 k 的乘客人数;

$w_{k,ij}$ ——车站 i (起点)至车站 j (讫点)且停站方案为 k 的乘客人数;

η ——列车上客率;

Q_a ——编组方案 a 的列车定员。

1.2.2 站间客流约束

列车流不仅要满足总的客流需求,也要保证站间的客流需求,即线路上所有列车从车站 i 到车站 j 所带走的客流不能低于需求量 $R_{OD,ij}$ 。所有站间客流约束集合 R_{OD} 为:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K x_k w_{k,12} \geq R_{OD,12} \\ \sum_{k=1}^K x_k w_{k,13} \geq R_{OD,13} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^K x_k w_{k,ij} \geq R_{OD,ij} \\ i, j \in M \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$R_{OD,ij}$ ——车站 i 至车站 j 的客流需求。

1.2.3 列车开行数量约束

停站方案是指开行各列车的停站序列。线路上列车的开行数量由各停站方案开行的列车数决定,即:

$$N = \sum_{k=1}^K x_k$$

(5)

式中:

N ——列车开行数量。

线路上的最大断面客流量决定了列车的最低列车开行数量。为了满足客流需求,列车开行数量最少应满足站间最大断面客流,即:

$$\frac{\max f_e}{\eta Q_a} \leq N$$

(6)

式中:

f_e ——区间断面 e 的客流量。

但列车最大开行数量不应超过线路的通过能力,即:

$$N = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_k d_i \leq \frac{t_o}{t_g}$$

(7)

式中:

d_i ——开行停站方案 i 的列车通过能力扣除系数;

t_o ——线路运营时间;

t_g ——最小发车间隔。

1.3 帕累托模型求解

本文所构建的是一个多目标规划模型,帕累托曲线是解决多目标问题的较好选择。该曲线完全

基于原始数据,未将问题转化成单目标问题分析,亦不需要设定或引入新的参数,不会丢失目标函数和解的信息,解的优劣可以较好保证。帕累托模型提供了客观的最优决策点,但需结合决策者的主观偏好,确定最终的最优决策点。该模型求解的关键是确定不同乘客的时间价值,以及不同编组列车的开行成本,即主要是对式(1)和式(2)中的 v_p 及 C_a 进行标定。目前研究中确定时间价值及开行成本的方法较多,采用不同方法得到的结果不同,为避免误差,本文采用比值的形式对上述两参数进行标定。

2 实例分析

上海轨道交通市域线机场联络线(以下简称“机场线”)是上海市在建的市域轨道交通线路之一,线路呈“Y”字型结构。机场线线路见图1。机场线单向远期高峰小时预测客流量见表1。考虑了4节编组及8节编组两种列车编组方案;组织了两个交路:①上海南站站→三林南站→上海东站站;②虹桥站→三林南站→上海东站。本文主要研究机场线虹桥站→上海东站站方向高峰小时的列车开行方案。

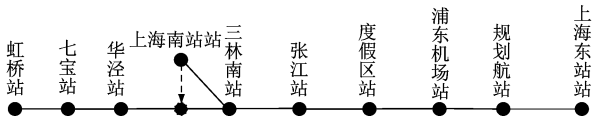


图1 机场线线路图

Fig.1 Route map of airport link

表1 机场线单向远期高峰小时预测客流量

Tab.1 Predicted long term passenger flow of the airport link during peak hours in single direction

车站名称	高峰小时预测客流量/(人次/h)								
	虹桥站	七宝站	华泾站	上海南站站	三林南站	张江站	度假区站	浦东机场站	上海东站站
虹桥站		794	910	0	927	542	1 054	188	370
七宝站			1 265	0	314	111	172	24	26
华泾站				0	80	486	866	39	55
上海南站站					1 457	1 038	240	0	116
三林南站						2 003	773	141	190
张江站							820	153	62
度假区站								78	58
浦东机场站									107
规划航站								48	59
上海东站站									

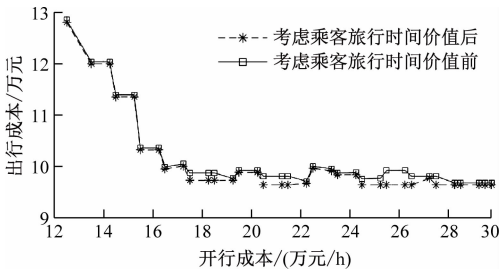
基于线路功能特征对乘客进行分类,机场线中目的地为火车站及机场的客流要求停站少、旅行速度快,时间价值较高,节省下来的时间可以创造更多的社会价值;而机场线沿线其他车站间的客流以通勤为主,对旅行速度的要求相对较低,时间价值较低。将乘客划分为两类:P1 为其他目的地的乘客;P2 为目的地为机场及车站的乘客。机场线的基本参数取值见表 2。

表 2 机场线的基本参数取值

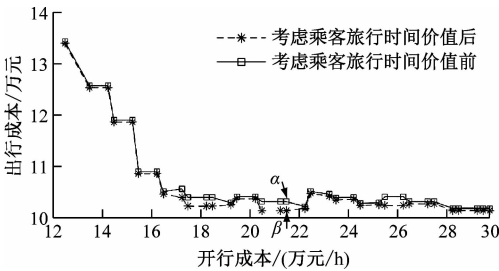
Tab.2 Values of fundamental parameters for the airport link

参数	取值
t_m/min	3
t_o/min	60
t_g/min	3
$\eta/\%$	85
$Q_a/\text{人}$	692($a=1$), 1 500($a=2$)

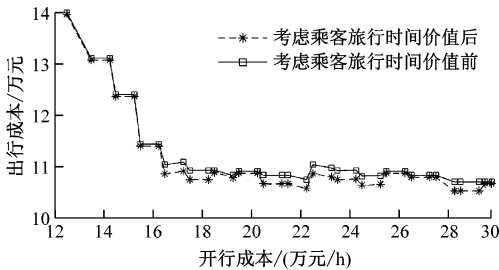
本文考虑 4 节编组及 8 节编组两种列车编组方



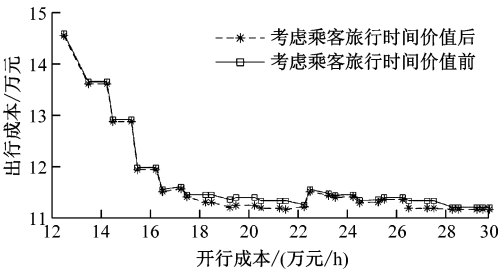
a) $v_2/v_1 = 1.25$



b) $v_2/v_1 = 1.50$



c) $v_2/v_1 = 1.75$



d) $v_2/v_1 = 2.00$

图 2 v_2/v_1 不同取值下的帕累托解

Fig.2 Pareto solutions under different value ratios

2.2 列车开行方案对比

选取开行成本与时间价值一定的情况下,考虑时间价值前后的开行方案进行分析。选取图 2 b) 中的 α 、 β 两点所代表的开行方案 A、B 进行对比分析,乘客旅行时间价值比 $v_1/v_2 = 1.5$, 开行成本为 21.5 万元/h,越行站设定在张江站及浦东机场站。

案,由此定义两种编组下的列车开行成本比 $C_1/C_2 = 1.00:1.75$ 。乘客旅行时间价值可分为 $v_2/v_1 = 1$ 及 $v_2/v_1 \neq 1$ 两种情况:当 $v_2/v_1 = 1$ 时,代表两类乘客的时间价值无差别,即未考虑时间价值的情况;当 $v_2/v_1 \neq 1$ 时, v_2/v_1 为不同取值下的结果不同。

2.1 不同乘客旅行时间价值下的模型结果

通过计算得到考虑乘客旅行时间价值前后 v_2/v_1 不同取值下的帕累托解(见图 2)。解集中的每个个体都对应 1 种列车开行方案。乘客旅行时间价值与不同编组列车的开行成本采用比值确定。

由图 2 可以看出:考虑乘客旅行时间价值后,制定的列车开行方案的出行成本均不低于考虑乘客旅行时间价值前制定的列车开行方案的出行成本;随着 v_2/v_1 取值增大,考虑乘客旅行时间价值后制定的列车开行方案的出行成本与考虑乘客旅行时间价值前的差距也逐渐增大。由此可以得出,考虑乘客旅行时间价值制定的列车开行方案能最大限度地减少乘客出行成本。

机场线的停站方案见图 3。机场线列车编组方案见表 3。机场线列车开行方案评价指标见表 4。

由表 4 可见:相较于方案 A,方案 B 在开行成本一定的情况下,减少了列车总停站次数,降低了乘客的停站等待时间;方案 B 减少了乘客的停站候车出行成本和总停站候车时间,乘客 P1 的平均停站

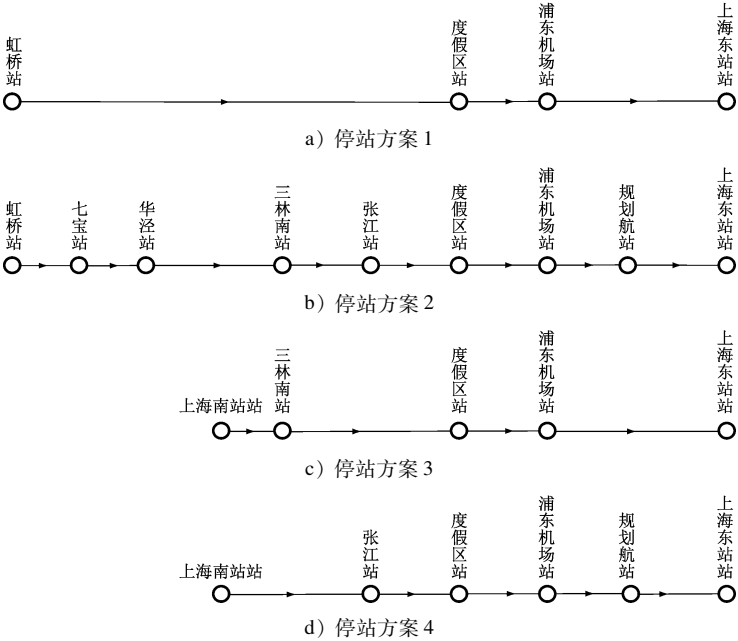


图 3 机场线的停站方案

Fig. 3 Station plan for the airport link

表 3 机场线列车编组方案

Tab. 3 Train marshalling scheme for the airport link						
方案	列车编组/节	定员/人	x_1 /列	x_2 /列	x_3 /列	x_4 /列
A	4	692	4		4	17
	8	1 500		7		2
B	4	692	1		1	11
	8	1 500		2		

表 4 机场线列车开行方案评价指标

Tab. 4 Evaluation index of the train operation scheme for the airport link						
方案	开行成本/ (万元/h)	停站候车成本/ (万元/h)	总停站次数/ 次	总停站候车时间/ min	不同类型乘客的平均停站候车时间/min	
					P1	P2
A	21.5	10.280 93	466	751 652.36	4.63	12.30
B	21.5	10.151 87	277	76 923.95	4.99	12.15

注:P1 人数为 1 666 人,P2 人数为 14 247 人。

候车时间增加了 0.36 min,乘客 P2 的平均停站候车时间减少了 0.15 min。由于乘客 P2 的乘客旅行时间价值要高于乘客 P1,虽然小幅度增加了 P1 的旅行时间,从而增加了这类型乘客的出行成本,但从经济角度上看,增加的成本能通过减少乘客 P2 的出行成本进行弥补,同时获得更大的经济效益。

3 结语

本文构建了考虑乘客旅行时间价值的列车开行方案模型,并以机场线为研究对象,对该模型进

行了分析。结果表明,考虑乘客旅行时间价值后制定的列车开行方案能最大限度地减少乘客出行成本;从宏观经济的角度上看,增加乘客旅行时间价值较低的乘客旅行时间,缩短乘客旅行时间价值较高的乘客旅行时间,能更好地发挥列车开行方案的经济效益。

参考文献

[1] 周晓琦. 对当前市域铁路发展的思考[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 11.
ZHOU Xiaoqi. Reflection on current development of suburban rail-

- ways[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 11.
- [2] 张强锋. 城际客运专线列车开行方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- ZHANG Qiangfeng. Research on the train running scheme of the dedicated passenger railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [3] 杨博, 武晋飞. 兰州轨道交通列车开行方案优化研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(4): 114.
- YANG Bo, WU Jinfei. Study on optimization of city railway train operation plan for metro of Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(4): 114.
- [4] CHEN D, NI S, XU C A, et al. High-speed train stop-schedule optimization based on passenger travel convenience[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1.
- [5] 冯榆涵, 吕红霞, 黄建辛, 等. 市域铁路与城市轨道交通过轨运输列车开行方案研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(2): 96.
- FENG Yuhuan, LYU Hongxia, HUANG Jianxin, et al. Train planning for through operation between subway and suburban railway[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(2): 96.
- [6] RICH J, VANDET C A. Is the value of travel time savings increasing? Analysis throughout a financial crisis[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 124: 145.
- [7] 侯云仙, 杨善奇. 交通方式选择与旅客时间价值研究: 以北京—太原客运通道为例[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2016, 15(2): 80.
- HOU Yunxian, YANG Shanqi. The value of travel time and transportation mode choice: a case study on Beijing-Taiyuan passenger transport[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2016, 15(2): 80.
- [8] 李博, 赵鹏, 宋文波. 基于旅客时间价值的高速铁路差别定价[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(4): 98.
- LI Bo, ZHAO Peng, SONG Wenbo. Differential pricing for high-speed railway based on the time value of passengers[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(4): 98.
- 收稿日期:2021-08-19 修回日期:2021-11-20 出版日期:2024-03-10
Received:2021-08-19 Revised:2021-11-20 Published:2024-03-10
- 第一作者: 罗晋, 硕士研究生, luojin1995@foxmail.com
通信作者: 朱海燕, 副教授, 709174250@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 12 页)

- DU Shimin, ZHAO Lumin. Clearing method and its application in Beijing urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(2): 106.
- [3] 徐瑞华, 朱炜. 基于乘客出行时间与列车运行的清分统计模型与演示系统研究[R]. 上海: 同济大学, 2014.
- XU Ruihua, ZHU Wei. Research on clearing statistical model and demonstration system based on passenger travel time and train operation[R]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [4] 徐瑞华, 朱炜. 北京城市轨道交通清分模型综合验证及优化评估技术研究[R]. 上海: 同济大学, 2018.
- XU Ruihua, ZHU Wei. Research on comprehensive verification and optimization evaluation technology of Beijing urban rail transit clearing model[R]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [5] 朱炜, 韦锦, 洪玲, 等. 基于旅行时间分析的城轨乘客路径集验证方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 56.
- ZHU Wei, WEI Jin, HONG Ling, et al. Validation method of passenger route choice set based on travel time analysis for urban rail transit[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1): 56.
- [6] ZHU W, WEI J, FAN W D. Data fusion approach for evaluating route choice models in large-scale complex urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Engineering Part A-Systems, 2020, 146(7): 56.
- [7] ZHU W, FAN W D, WEI J, et al. Complete estimation approach for characterizing passenger travel time distributions at rail transit stations[J]. Journal of Transportation Engineering Part A-Systems, 2020, 146(1): 31.
- 收稿日期:2022-01-30 修回日期:2022-05-07 出版日期:2024-03-10
Received:2022-01-30 Revised:2022-05-07 Published:2024-03-10
- 作者: 朱炜, 研究员, zhuweimail@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com