

基于大小交路的西安地铁3号线行车组织优化

张宇亭 张 佳 李昕晏 陈宽民

(1. 长安大学公路学院, 710064, 西安; 2. 西安市地下铁道有限责任公司, 710018, 西安//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 在大小交路一定的情况下,对西安地铁3号线行车组织进行了优化。以最小化乘客等待时间、最大化车辆平均满载率及最小化车辆运行总距离为目标,以发车频率及列车编组为决策变量,构建大小交路列车开行方案多目标优化模型。选用 Matlab 软件中 fminimax 函数求解该多目标非线性约束优化问题。优化后,早高峰小时内,乘客的总等待时间基本保持不变,车辆的平均满载率增加 17%,列车运行总距离减少 1 305 km,节约牵引能耗约 3 027 kWh。

关键词 城市轨道交通; 行车组织; 多目标优化; 大小交路
中图分类号 U292.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.034

Optimization of Train Operation Organization in Urban Rail Transit in Full-length and Short-turn Routing Condition

ZHANG Yuting, ZHANG Jia, LI Xinyan, CHEN Kuanmin

Abstract Based on the given full-length and short-turn routing condition, the traffic organization of Xi'an metro Line 3 is optimized. Aiming at the minimum passenger waiting time, the maximum average full-load rate of trains and the minimum vehicle total running distance, taking the departure frequency and train marshalling as the decision variables, a multi-objective optimization model of train plan is formed. The fminimax function in MATLAB software is used to solve the multi-objective nonlinear constrained optimization problems. The total passenger waiting time of during the morning rush hours remains unchanged, but the average full-load rate of trains is increased by 17%, and the total running distance of trains is reduced by 1 305 kilometers, resulting in the reduction of traction energy consumption by 3 027.6 kWh.

Key words urban rail transit; train operation plan; multi-objective optimization; full-length and short-turn routing

First-author's address School of Highway, Chang'an University, 710064, Xi'an, China

对城市轨道交通列车运行的优化研究,主要是依据现状或预测的客流特征^[1]、车辆运行情况及大

小交路折返站等因素建立优化模型,运用相关算法求解,并与现状或预测状况进行对比分析,得出优化结果是否为最优解。

文献[2]以投入运用的车组数最少为目标函数,建立了列车均衡开行方案优化模型,并得出了各行车组织参数的设置。文献[3]以乘客服务水平最高和运营成本最小为目标构建目标函数,并利用基于隶属度的算法得到了模糊最优解,求解出大小交路的列车编组数量及行车间隔,给出了高峰时段的行车方案。文献[4]以最小化乘客等待时间、车辆走行公里和列车运行时间为目标,构建大小交路列车开行方案多目标优化模型,采用线性加权法将原模型转化为单目标优化模型,并设计受控随机搜索算法求解。文献[5]建立乘客出行时间价值和平均载客率同时最优的双目标优化模型,运用基于全局搜索的粒子群算法进行求解,进行验证模型的有效性和合理性。文献[6]根据在高峰到平峰的过渡时期,乘客的交通需求和列车运行有显著不同的现象,提出了一种混合整数非线性规划模型,并运用基于粒子群算法和模拟退火算法的混合优化算法,计算得出了优化的列车时刻表,并最大限度提高了不同线路间的同步运输效率。

由现有研究可见,对已开通大小交路运营并能满足客流需求的城市轨道交通线路,在既有工程设施基础上优化运营方案以降低运营成本、缩短乘客等待时间、适应可持续发展等问题仍需深入研究。本文以西安地铁3号线(以下简为“3号线”)为例,在不改变既有线路设施的条件下,对其行车组织进行了优化研究:以最小化乘客等待时间^[7]、最大化车辆平均满载率及最小车辆运行总距离为目标,构建大小交路列车开行方案多目标优化模型;选用 Matlab 软件中的 fminimax 函数,求解该多目标非线性约束优化问题;优化列车发车频率、车辆编组等因素,合理制定运行方案,从而提高系统的运营效益。

1 3 号线基本运营状况概述

3 号线线路呈半环形走向, 东北方向连接西安国际港务区, 西南方向经高新区延伸至鱼化寨(如图 1 所示), 并经过大雁塔、陕西省历史博物馆、青龙寺、世博园等著名景区。3 号线全长 39.15 km, 设车站 26 座, 平均站间距为 1.52 km。在通化门站和小寨站分别与西安地铁 1、2 号线换乘。



图 1 西安地铁线路图

目前, 3 号线运营时间为 6:00—23:00, 共 17 h。列车为 6 节 B 型车编组, 平均运行速度为 35 km/h, 运营模式为大小交路交替运行。大交路运行区间为鱼化寨站—保税区站, 小交路运行区间为鱼化寨站—香湖湾站。大小交路开行比为 1:1。大交路行车间隔为 9 min, 小交路行车间隔为 4.5 min。

2 模型构建

根据 3 号线的大小交路线路情况, 构建大小交路如图 2 所示。由图 2 可见, 大交路共有 n 座车站, 第 s 站为小交路折返站。

模型提出如下假设: ① 所研究线路的大小交路折返点位置一定。② 列车运行速度相同, 单位距离能耗相同。③ 乘客到达时间随机, 乘客平均等待时间为发车间隔时间的一半^[8]。④ 大、小交路独立运行, 互不影响。⑤ 所有乘客都可等候一次列车即乘坐, 无二次候车的现象。

2.1 目标函数

本文以乘客等待时间最小、车辆平均满载率最大及车辆总运行距离最小为优化目标。

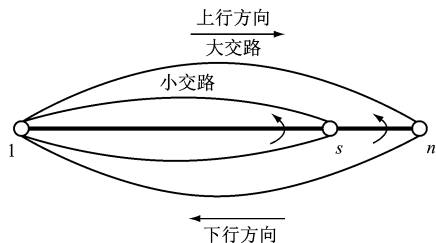


图 2 大小交路示意图

2.1.1 等待时间最小

乘客选择乘坐地铁进行一次出行所需时间包括到达地铁车站时间、等车时间、乘车时间和出站到达目的时间。其中, 乘客到达地铁车站时间和出站到达目的地时间不受列车发车频率、列车编组等因素的影响, 因此不作考虑。假设列车运行速度相同, 乘车时间随 OD(起讫)距离的变化而变化。因此, 本文对乘客的乘车时间不做研究。

在上行方向, 根据乘客乘车起终点位置不同, 等待时间可分为三种情况。

情况 1: 起终点都在大、小交路共同运行区段的乘客可以乘坐任意一列列车。此时, 乘客的等待时间 $t_{u,1}$ 与大小交路发车频率之和有关。

$$t_{u,1} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j=i+1}^s a_{i,j} / (f_1 + f_2) \right) \quad (1)$$

式中:

$a_{i,j}$ ——单位时间内, 由 i 站出发、到达 j 站的客流量, 需满足 $i < j$;

f_1 ——大交路的发车频率;

f_2 ——小交路的发车频率。

情况 2: 若乘客的起点在大小交路共同运行的区段内, 而终点在大交路运行区段内, 则需考虑有一定比例的乘客先乘坐了小交路列车, 到终点后换乘大交路。此情况下的乘客等待时间 $t_{u,2}$ 与大小交路发车频率均有关:

$$t_{u,2} = \left(\left(\frac{f_2}{f_1 + f_2} \right) \left(\frac{1}{2(f_2 + f_2)} + t_w \right) + \left(\frac{f_1}{f_1 + f_2} \right) \left(\frac{1}{2(f_1 + f_2)} \right) \right) \sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j=s+1}^n a_{i,j} \quad (2)$$

式中:

t_w ——乘客到达小交路终点后, 换乘大交路的等待时间。

式(2)中, $a_{i,j}$ 的 i 及 j 需满足 $i > j$ 。

情况 3: 若乘客的起点在大交路运行区段, 则乘客只能乘坐大交路列车。此时乘客的等待时间 $t_{u,3}$

仅与大交路列车发车频率有关:

$$t_{u,3} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=s}^{n-1} \sum_{j=s+1}^n a_{i,j} / f_1 \right) \quad (3)$$

因此,上行乘客等待总时间 t_u 需满足:

$$\min t_u = t_{u,1} + t_{u,2} + t_{u,3} \quad (4)$$

在下行方向,根据乘客乘车起终点不同,共分两种情况。

情况1:乘客在只有大交路的运行区段乘车时,只能乘坐大交路列车。此时的乘客等待时间 $t_{d,1}$ 仅与大交路列车发车频率有关:

$$t_{d,1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=n}^{s+1} \sum_{j=n-1}^t a_{i,j}}{f_1} \right) \quad (5)$$

情况2:在大、小交路共同运行区段的乘客可以乘坐任意一列列车。此时的乘客等待时间 $t_{d,2}$ 与大、小交路发车频率之和有关:

$$t_{d,2} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=2}^2 \sum_{j=i-1}^1 a_{i,j} / (f_1 + f_2) \right) \quad (6)$$

下行方向乘客等待总时间 t_d 为:

$$t_d = t_{d,1} + t_{d,2} \quad (7)$$

因此,乘客等待总时间 t 满足:

$$\min t = t_u + t_d \quad (8)$$

2.1.2 车辆平均满载率最大

在大小交路运行的条件下,在只有大交路运行的区段,通过能力只考虑大交路运行列车的输送能力;在大、小交路共同运行的区段,通过能力为大、小交路的列车输送能力之和。

车辆平均满载率最大,即实际载客率的平均值最大。

$$\max Z = \frac{\sum_{h=1}^{s-1} \frac{A_h}{m \times B \times (f_1 + f_2)} + \sum_{h=s}^{n-1} \frac{A_h}{m \times B \times f_1}}{H} \quad (9)$$

式中:

Z ——车辆平均满载率;

A_h ——第 h 断面单位时间最大客流量;

m ——大小交路的列车编组数;

B ——车辆平均定员;研究线路使用 B 型车,其平均载客量为 230 人次^[9];

H ——线路断面总数。

2.1.3 车辆总运行距离最小

在大小交路独立运行条件下,列车运行总距离即为大、小交路上列车运行总距离之和。故有:

$$\min L = m(f_1 \times l_1 + f_2 \times l_2) \quad (10)$$

式中:

l_1, l_2 ——分别为大、小交路的路线长度;

L ——单位时间内,车辆总运行距离;

2.2 约束条件

约束条件为:

(1) 最大断面客流量不超过标准载客量,满载率最大取 1.2。

(2) 大、小交路取 4~6 节编组。

(3) 一般情况下,城市轨道交通线路上列车的发车间隔最大不超过 8 min(0.13 h),最小发车间隔不小于 2 min(0.03 h)。

(4) 乘客到达小交路终点换乘大交路的等待时间,与大小交路的车发频率和开行比有关,应根据实际情况取值,一般为 2~6 min。

约束条件表达式为:

$$\text{s. t.} \begin{cases} \max_{1 \leq h \leq s-1} A_h \leq 1.2 \times m \times B \times (f_1 + f_2) \\ \max_{s \leq h \leq n-1} A_h \leq 1.2 \times m \times B \times f_1 \\ m \in \{4, 5, 6\} \\ 0.03 \leq \frac{t}{f_1 + f_2} \leq \frac{t}{f_1} \leq 0.13 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 模型求解

根据西安地铁 3 号线实际运营状况,鱼化寨站→保税区站为上行方向,保税区站→鱼化寨站为下行方向, $s=21, n=26, H=25, B=230$ 人/辆。假定客流随机到达,且每位乘客等待时间取发车间隔的一半。乘客到达小交路终点后,换乘大交路的等待时间取 4 min。选取 2017 年 9 月 14 日(工作日)早高峰 8:00—9:00 的运营 OD 数据作为原始数据。分析处理 OD 数据,得到单位时间内的各断面最大客流量,如表 1 所示。

2.4 最优解计算

将 OD 数据表及表 1 的数据代入式(8)~(11)进行计算。由于该模型为多目标非约束优化问题,故选用 Matlab 软件中 fminimax 函数进行运算分析。求得 $m=4$ 辆, $f_1=7.50$ 次/h, $f_2=12.25$ 次/h, $t=1706$ h, $Z=48\%$, $L=2600082$ m。

3 优化结果与建议

现状运行参数及优化后运行参数如表 2 所示。

根据表 2 数据,对 3 号线的大小交路列车运营方案提出优化建议如下:

表1 西安地铁3号线单位时间各断面最大客流量

断面位置序号	断面位置	断面客流量/(人次/h)
1	鱼化寨站——丈八北路站	3 452
2	丈八北路站——延平门站	9 876
3	延平门站——科技路站	11 604
4	科技路站——太白南路站	17 551
5	太白南路站——吉祥村站	20 584
6	吉祥村站——小寨站	21 716
7	小寨站——大雁塔站	17 773
8	大雁塔站——北池头站	17 704
9	北池头站——青龙寺站	16 374
10	青龙寺站——延兴门站	14 792
11	延兴门站——咸宁路站	14 027
12	咸宁路站——长乐公园站	13 414
13	长乐公园站——通化门站	13 005
14	通化门站——胡家庙站	11 962
15	胡家庙站——石家街站	8 830
16	石家街站——辛家庙站	8 903
17	辛家庙站——广泰门站	4 954
18	广泰门站——桃花潭站	2 330
19	桃花潭站——浐灞中心站	1 596
20	浐灞中心站——香湖湾站	1 020
21	香湖湾站——务庄站	721
22	务庄站——国际港务区站	603
23	国际港务区站——双寨站	471
24	双寨站——新筑站	453
25	新筑站——保税区分站	290

表2 西安地铁3号线运行参数现状与优化后对比表

项目		现状参数值	优化后参数值
大交路	发生频率/(次/h)	6.70	7.50
	列车编组/辆	6	4
	发车间隔/min	9.0	8.0
小交路	发生频率/(次/h)	13.30	12.25
	列车编组/辆	6	4
	发车间隔/min	4.5	4.9
乘客等待时间/h		1 701	1 706
满载率/%		31	48
总运行距离/m		3 905 171	2 600 082

(1) 建议大交路的发车频率由现行的6.7次/h提高至7.5次/h,以减少乘客的等待时间;建议列车编组由现行的6辆改为4辆,以节约车辆成本。

(2) 建议小交路的发车频率由13.3次/h降低为12.25次/h,列车编组由现行的6辆改为4辆。优化后,在大小交路共同运行的区段内,列车发车总频率由20次/h变为19.75次/h,乘客等待总时间基本保持不变。

(3) 相比3号线现状运营方案,本文提出的优化方案可使3号线高峰时段内的乘客总等待时间基本保持不变,车辆的平均满载率提高17%,车辆的总运行距离减少1 305 km。由文献[10],取平均每列列车牵引能耗为2.32 kWh /km,则在高峰小时内可节能约3 027 kWh。

本文中假定客流随机到达,且每位乘客等待时间取发车间隔的一半。这使计算结果存在一定的误差。为精确乘客等待时间,应对乘客到达车站时间特征进行深入研究,以减少模型误差,提高优化结果的科学性和实用性。

参考文献

[1] 马超群,王玉萍. 城市轨道交通客流特征与规律分析[J]. 铁道运输与经济,2015,37(6):85.

[2] 白广争,郭进,杨扬,等. 大小交路嵌套方式下城市轨道交通列车最优车组数开行方案[J]. 城市轨道交通研究,2015(3):45.

[3] 王永岗,张俊,武艳,等. 基于断面客流特征的城市轨道交通行车组织优化方法[J]. 城市轨道交通研究,2017(4):11.

[4] 许得杰,毛保华,雷莲桂. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(1):120.

[5] 田晟,马美娜,杨锦明. 基于大小交路优化的地铁行车组织方案[J]. 交通信息与安全,2017,35(1):112.

[6] GUO Xin, SUN Huijun, WU Jianjun, et al. Multiperiod - based timetable optimization for metro transit networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017(2):46.

[7] YIN Jiateng, YANG Lixing, TANG Tao, et al. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy - efficiency and waiting time minimization: Mixed - integer linear programming approaches [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017,97(3):182.

[8] 邓连波,曾强,高伟,等. 基于弹性需求的城市轨道交通列车开行方案研究[J]. 铁道学报,2012,34(12):16.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[10] 刘军良,张彦华,马喜成,等. 降低地铁车辆牵引能耗的措施与建议[J]. 电力机车与城轨车辆,2016,39(1):75.

(收稿日期:2017-10-20)