

基于线路层次的城市轨道交通网络末班车衔接优化研究

吴家文¹ 史丰收² 叶红霞² 周 峰¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 广州地铁集团有限公司运营事业总部线网管控中心, 511430, 广州//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 在城市轨道交通网络化运营和“一票制换乘”的背景下, 制定合理的网络末班车衔接方案, 满足末班车时段乘客出行需求, 是当前城市轨道交通运营管理面临的重要问题。以在网络换乘站成功搭乘末班车的乘客数量最大化为目标, 建立了网络末班车衔接优化模型, 并设计了线路分层递进衔接优化算法求解该模型。以广州城市轨道交通网络为例, 采用所提出的模型和算法进行了末班车衔接优化方案的计算。

关键词 城市轨道交通; 网络化运营; 末班车衔接

中图分类号 U292.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.019

Optimization of Last Train Connection in Urban Rail Transit Network Operation Based on Passenger Flow Volume

WU Jiawen, SHI Fengshou, YE Hongxia, ZHOU Feng

Abstract Under the background of urban rail transit network operation with “one-ticket transfer”, it is necessary to make a rational last train connection plan in order to meet the needs of passengers in the period. This is also an important problem in the operational management of urban rail transit. To maximize the total number of passengers who can transfer successfully during the last train period, an optimal connection model for the last network train is established, and the algorithm of hierarchical and progressive line connection is designed to solve the model. Finally, with Guangzhou metro network system as the background, the proposed model and algorithm are used to calculate the optimal connection scheme for the last train.

Key words urban rail transit; network operation; last train connection

First-author's address State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

城市轨道交通路网中, 由于各线路结束运营的时间不同, 常常会出现乘客在进站后经过一次或多次换乘后无法赶上需换乘线路末班车的现象。随着路网规模变大, 换乘路径错综复杂, 换乘不成功的情况将愈发明显。为了尽可能满足末班车时段乘客的出行需求, 需要制定合理的末班车衔接方案。

可达性 (accessibility) 最早定义为交通网络中各节点相互作用的机会的潜力^[1]; 应用于轨道交通网络, 可定义为列车时刻表下的网络节点连通程度^[2]。文献[3]认为影响地铁网络可达性的关键因素是站间换乘次数。近年来, 对路网列车常规时段衔接方案的研究较为成熟。但末班车时段的列车衔接特点不同于常规时段, 其主要表现为: 末班车时段的衔接不当将导致两车站间不可达, 而常规时段不存在这样的约束; 末班车客流一般较少, 其满载率不需特殊考虑。

在对末班车衔接方案的研究中, 文献[4]提出考虑特定衔接关系的末班车时刻表编制模型, 但衔接关系需由工作人员根据现场客流量与实际经验给出; 文献[5]提出了基于客流需求的末班车衔接模型, 但是其客流需求是通过预测所得的; 文献[6-7]以总乘客换乘等待时间最小为目标构建换乘衔接模型, 以此来提高整体网络的换乘衔接程度。

在末班车时段, 乘客考虑更多的是能否到达目的站点, 因此末班车时段的行车计划编制最基本的目标应是满足尽量多乘客的出行需求。另外, 现有的模型对运营成本考虑较少。本文提出了城市轨道交通网络末班车衔接方案优化模型, 能在最大化满足末班车时段客流需求的同时控制运营成本, 并设计了基于线路层次的递进衔接优化算法。

1 网络末班车衔接优化模型

网络末班车衔接需要保证乘客能够到达目的

地,即衔接方案优化的目标是最大化网络换乘客流总量。因此,可得到网络末班车衔接方案优化模型的目标函数表达式为:

$$\max y = \sum_{s \in S_T} \sum_{d \in D_s} x_{s,d} Q_{s,d} \quad (1)$$

式中:

S_T ——网络换乘站集合;

D_s ——换乘站 s 的衔接方向集合;

x ——决策变量; $x_{s,d}$ 表示换乘站 s 的 d 衔接方向的决策变量, $s \in S_T, d \in D_s$;换乘站 s 的 d 衔接方向衔接成功则 $x_{s,d}$ 取 1,否则取 0;

$Q_{s,d}$ ——换乘站 s 的 d 衔接方向上能成功换乘末班车的客流量;

y ——网络换乘客流总量。

设换乘站 s 的 d 衔接方向上的换乘等待时间为 $t_{w1,s,d}$ 。当 $t_{w1,s,d} \geq 0$ 时,该衔接方向能够衔接成功,反之,衔接失败,即:

$$x_{s,d} = \begin{cases} 1, & t_{w1,s,d} \geq 0 \\ 0, & t_{w1,s,d} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$t_{w1,s,d} = t_{d,d_e,s} - t_{a,d_o,s} - t_{w2,s,d}, s \in S_T, d \in D_s \quad (3)$$

式中:

d_o —— d 中的起始线路方向(如 1 号线下行);

d_e —— d 中的被衔接线路方向(如 2 号线下行);

$t_{d,d_e,s}$ —— d_e 的末班车从换乘站 s 出发的时刻;

$t_{a,d_o,s}$ —— d_o 的末班车到达换乘站 s 的时刻;

$t_{w2,s,d}$ ——换乘站 s 的 d 衔接方向换乘走行时间。

d_o 和 d_e 各站的末班车到发时刻是分别通过 $t_{d,d_e,s}$ 和 $t_{a,d_o,s}$ 结合列车行车时刻表来计算的。

考虑到运营成本和维修天窗,各线路末班车始发和终到时刻必须限制在一定的时间范围内,故添加以下约束条件:

$$t_{l,k} \leq t_l \quad (4)$$

式中:

t_l —— l 线路末班车最晚终到时刻;

$t_{l,k}$ —— l 线路 k 方向上终点站的到达时刻。

2 末班车衔接优化模型求解方法

确定衔接方案最重要的是确定换乘站主动衔接关系,即要确定优先满足衔接关系的线路与方向。本文通过划分线路层次,递进式地求解出可行

且较优的衔接方案。

2.1 线路分层递进衔接计算步骤

第一步:确定基准层线路。对路网各线路末班车时段换乘客流量、可直接换乘线路数量和换乘站数量等因子评分,并根据评分值确定基准层线路。各评分因子权重可根据城市轨道交通乘客需求和运营水平等因素而定。

第二步:根据线路与基准线路的换乘关系划分协调层次。与基准线路有交点,即有直接换乘关系的线路划为直接衔接层;与基准线路无直接换乘关系,但与直接衔接层线路有换乘的线路划为间接衔接层;其他所有与基准线路、直接衔接层均无换乘,但与间接衔接层有换乘关系的线路划为远端衔接层。

第三步:根据网络客流特点确定协调主方向。首先,计算基准线路在各换乘站末班车时段各方向的换乘客流量,并以此来确定基准线路层与直接衔接层的协调主方向;然后,根据直接衔接层与间接衔接层换乘站的地理位置、换乘客流量等因素来选定主协调换乘站;之后,根据末班车时段各方向客流量来确定直接衔接层与间接衔接层的协调主方向。由于远端衔接层线路同基准线路、直接衔接层线路均无直接换乘,如其衔接关系由间接衔接层推算,易导致远端衔接层线路末班车时刻过晚,因此远端衔接层线路需根据其客流需求及运营时间要求综合考虑确定。

第四步:根据客流服务水平和运营要求来制定路网基准线路的上、下行末班车发车时间。按照协调层次自基准层推算至直接衔接层,再至间接衔接层,最后确定远端衔接层。

2.2 线路衔接推算算法

从基准层开始,若基准线路 l_b 在 k 方向上 s 换乘站的末班车发车时刻为 $t_{d,l_b,k,s}$,则结合列车行车时刻表,可推算出 l_b 各站的末班车到发时刻。而后,根据基准线路换乘站的到发时刻和协调主方向,推算直接衔接层各车站末班车到发时刻。

对于与已确定的线路有换乘点的间接衔接层和远端衔接层线路,也可按该思路推导出该线路优化的末班车时刻。

经过多次迭代计算,可逐层推算出全路网各车站的末班车的较优到发时刻,获得优化的路网末班车时刻表。此时,对路网末班车进行运营时间域判断:如有线路末班车运营时间超出运营时间域,则

对该线路末班车时刻表进行调整,使末班车的始发、终到时刻处于运营时间域内,再重新推算各站的末班车到发时刻。

3 实例分析

广州地铁 2018 年城市轨道交通网络线路如图 1 所示。该路网中有 14 条轨道交通线路,28 座换乘

站,232 座车站。
采用线路层次分析法推算末班车时刻表,首先,确定基准层线路。根据 2018 年数据,对广州轨道交通路网上各线路换乘客流量、可直接换乘线路数量和换乘站数量进行评分后排序(排名前六的线路如表 1 所示)。由表 1 可确定 3 号线为基准线路。

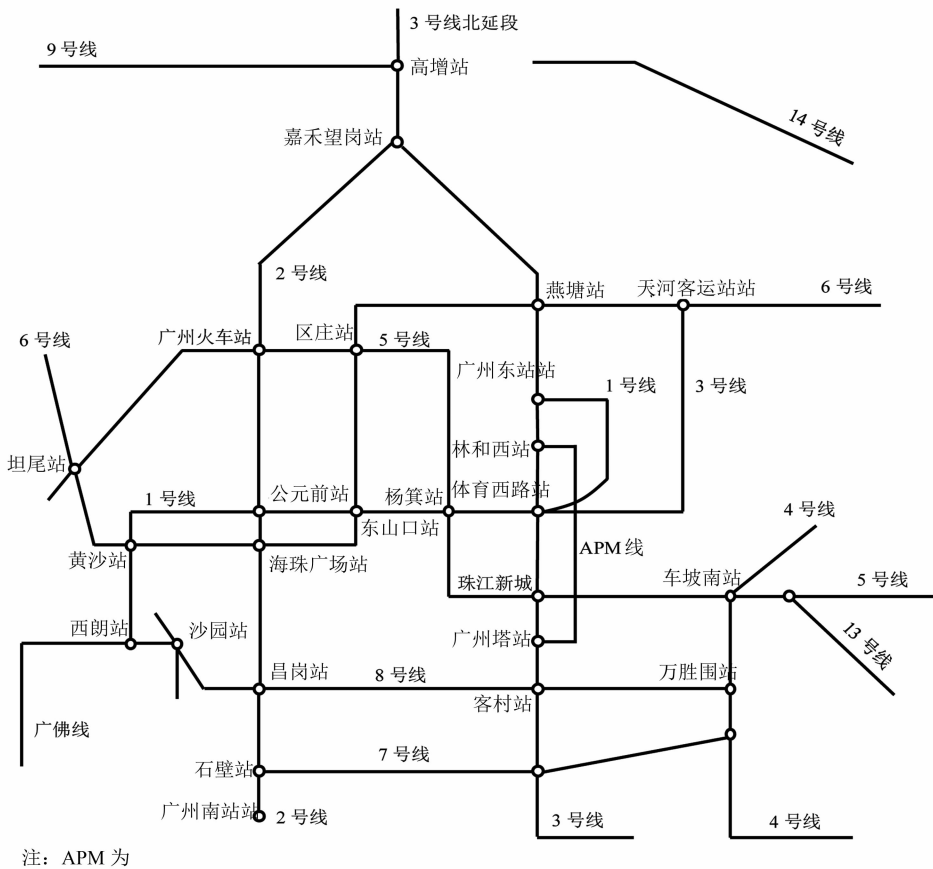


图 1 2018 年广州城市轨道交通网络简图

表 1 广州轨道交通的衔接线路指标分数

线路	总换乘量/人次	换乘量因子 得分(权重为 0.5)	衔接线路/条	衔接线路因子 得分(权重 0.3)	换乘站数/座	换乘站数因子 得分(权重 0.2)	总分
3 号线	1 032 449	100.00	7	100.00	6	85.17	95.06
1 号线	1 025 757	99.35	6	85.17	7	100.00	94.84
2 号线	987 433	95.64	6	85.17	7	100.00	93.60
5 号线	871 005	84.36	6	85.17	7	100.00	89.84
3 号线北延段	713 135	69.27	6	85.17	6	85.17	79.87
8 号线	683 700	66.22	4	57.14	4	57.14	60.17

相应可划分出直接衔接层(包括 1 号线、3 号线北延段、5 号线、6 号线、7 号线、8 号线、APM 线)、间接衔接层(包括 2 号线、4 号线、9 号线、13 号线、广佛线)和远端衔接层线路(14 号线)。

根据基准线路各换乘站的末班车时段分方向

换乘客流量,可确定基准线路层与直接衔接层的协调主方向为由 3 号线下行方向推定直接衔接线路的上行方向和下行方向。而后继续确定直接衔接层与间接衔接层的协调主方向。

最后根据第四步推算并调整各层线路上、下行末

班车发车时刻。对于远端衔接层的 14 号线,由于其为独立线路,应依据运营要求单独确定末班车时刻。

部分换乘车站末班车发车时刻的推算过程和调整结果如表 2 所示。

表 2 2018 年广州轨道交通部分换乘车站末班车发车时刻的推算(部分)

换乘车站	线路方向	基准	基准发车时刻	换乘时刻	推定发车时刻	原发车时刻	调整后发车时刻
体育西站	3 号线北延段下行	3 号线下行	23:20:00	+0:00:11	23:20:11	23:00:02	23:10:02
	1 号线上行	3 号线下行	23:20:00	-0:05:00	23:15:00	23:22:10	23:15:00
	3 号线上行	1 号线上行	23:15:00	+0:02:48	23:17:48	23:40:00	23:30:00
	3 号线北延段上行	3 号线上行	23:17:48	-0:00:11	23:17:37	23:52:46	23:42:46
珠江新城站	5 号线下行	3 号线下行	23:20:00	-0:01:25	23:18:35	23:19:22	23:18:35
	5 号线上行	3 号线上行	23:17:48	+0:05:00	23:22:48	23:41:26	23:31:26

4 结语

本文建立了以最大化满足末班车乘客出行需求为目标的网络末班车衔接优化模型,设计了线路层次递进衔接推算求解算法,并以 2018 年广州城市轨道交通的路网信息和时间参数为基础对该模型进行了应用。

研究成果可用于各操作终端为乘客提供末班车时段出行信息诱导,也可用于控制自动售票机在末班车时段的票卡发售。

参考文献

[1] WALTER G.HANSEN.How accessibility ahapes land use[J]. Journal of the American Institute of Planners,1959,25(2): 73.

[2] 罗钦,徐瑞华,江志彬,等.基于运行图的轨道交通网络动态可达性研究[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(1): 72.

[3] 程昌秀,张文尝,陈洁,等.基于空间句法的地铁可达性评价分析——以 2008 年北京地铁规划图为例[J].地球信息科学,2007(6): 31.

[4] LI X,SHI Y.Optimization for the last train timetable of urban rail transit networks based on transfer coordination[C] //ICTE. Proceedings of the Fourth International Conference on Transportation Engineering. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers,2013: 190.

[5] 徐瑞华,李璇.城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(10): 1510.

[6] KANG L,WU J,SUN H,et al.A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network[J].Transportation Research Part B,2015,72(72): 112.

[7] 宁丽巧,赵鹏,徐文恺,等.城市轨道交通末班车时段时刻表协同优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(6): 108.

(收稿日期:2018-06-08)

(上接第 81 页)

控系统项目,基本上都是把传统物理机上运行的应用软件移植到云平台虚拟机中^[5-6],并没有通过云平台的特性简化综合监控系统结构,增强综合监控系统的功能,从架构层面上对综合监控系统进行优化性设计。本文从数据库部署及同步、简化综合监控系统网络设计、扩展系统冗余机制三方面对综合监控系统进行架构设计,并充分应用云平台本身优势,提升综合监控系统的可用性和健壮性。

参考文献

[1] 何霖,姚世峰.城市轨道交通云建设探讨[J].都市快轨交通,

2016,29(2): 37.

[2] 丁建隆.关于搭建城市轨道交通行业云的思考与探索[J].都市快轨交通,2016,29(3): 1.

[3] 单莘,祝智岗,张龙,等.基于流处理技术的云计算平台监控方案的设计与实现[J].计算机应用与软件,2016(4): 88.

[4] 陈慧.基于云架构的地铁综合监控系统设计[D].昆明:昆明理工大学计算机系,2015.

[5] 胡波,路红娟,李冰,等.基于云平台的综合监控系统建设方案[J].城市轨道交通研究,2018(7): 158.

[6] 汪杰,李钰,汪敏.一种基于云的城市轨道交通综合自动化系统方案研究[J].现代城市轨道交通,2015(3): 21.

(收稿日期:2019-07-08)