

广州市域快速轨道交通 18 号线和 22 号线快慢车及共线运营下的线路通过能力分析

蔡涵哲¹ 马 鹏^{2,3} 江志彬^{2,3} 邹晓磊^{2,3}

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 3. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 基于计算机试铺运行图的仿真模拟方法,以广州市域快速轨道交通 18 号线和 22 号线为例,以快慢车呈组合周期化开行、快车优先且尽量保证慢车的旅行速度最大、慢车被越行的次数尽量少为原则,研究了限定越行站条件下不同越行地点、不同快慢车开行比例及不同共线交路开行比例对线路通过能力的影响规律,得到了 16 个不同运营方案下的线路最大通过能力。仿真结果可为线路的开行方案优化及增能措施提供支撑。

关键词 市域快速轨道交通; 线路通过能力; 快慢车运营; 共线运营

中图分类号 U292.5:U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.019

Line Passing Capacity Analysis of Express/Local Train and Collinear Operation of Guangzhou Urban Rapid Rail Transit Line 18 and Line 22

CAI Hanzhe, MA Peng, JIANG Zhibin, ZOU Xiaolei

Abstract Based on the simulation method of computer test operation diagram, taking Guangzhou urban rapid rail transit Line 18 and Line 22 as examples, according to the principle that the express/local trains are operated in a combined periodic manner; the express train is given priority, the travel speed and the overtaken times of local train is guaranteed to be the maximum and the minimum respectively. Under the condition of limited overtaking station, the influence of different overtaking places, different ratio of express/local trains and different proportion of collinear operation trains on the line passing capacity is studied. The maximum line passing capacity of 16 different operation schemes is obtained. The simulation results can provide support for the optimization of line operation scheme and capacity enhancement measures.

Key words urban rapid rail transit; line passing capacity; express/local train operation; collinear operation

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

市域快速轨道交通(以下简称“市域快轨”)是一种主要服务于城市郊区和周边新城、城镇与中心城区联系,并具有通勤客运服务功能的中、长距离的大运量城市轨道交通系统。市域快轨服务以城市客流为主,满足通勤、通商、通学、旅游休闲等客流需求。通勤客流作为市域快轨的主要客流,期望提高郊区到市中心之间的旅行速度,因而市域快轨通常具备开行快慢车的线路条件和客流需求^[1]。

快慢车运营组织是根据线路的长、短途客流特点和通过能力利用状况,在开行站站停慢车的基础上,同时开行跨站快车,从而使运输组织适应客流特征的一种网络化运营组织技术^[2]。针对市域快轨线路的客流特征和服务需求,最常用的运营组织方式有快慢车运营和多交路运营两种^[3]。但市域快轨线路配线复杂,尤其是在多线互联互通的条件下,开行交路与停站方案较多,且存在多个限定条件的越行站。多线路、多交路快慢车组合开行方案下的线路通过能力受不同共线交路的开行比例、快慢车开行比例、越行地点等因素的综合影响^[4-5]。传统的解析法能力评估在精确性上有一定的局限性,计算机仿真方法可以有效精确评估不同开行方案条件下的能力。本文以广州市域快轨 18 号线和 22 号线为例,以同济大学研发的城市轨道交通列车运行图计算机编制系统(TPM)为工具^[6],研究限定越行站条件下不同越行地点、不同快慢车开行比例及不同共线交路开行比例对线路通过能力的影响规律和不同运营方案条件下的线路最大通过能力。

1 广州市域快轨 18 号线和 22 号线开行方案

1.1 线路概况

广州市域快轨 18 号线(以下简称“18 号线”)与 22 号线(见图 1)串联南沙副中心、花都、白云及广州中心区,实现广州中心区与南沙副中心、白云城市中心、花都城区及白云机场的快速轨道交通联系。两线打通广州南北走廊,快速连接万顷沙站、广州南站、广州东站、白鹅潭站、白云站、白云机场站等主要交通枢纽,实现南沙新区至广州东站及广州南站 30 min,以及南沙新区至白云机场 45 min 通达的时空目标。



图 1 18 号线和 22 号线示意图

Fig. 1 Diagram of Line 18 and Line 22

两线设计速度均为 160 km/h,车辆选型为 8 辆编组市域 D 型车,采用快慢车运营模式。此外,两线为互联互通设计,在线路南段有 3 个共线车站:万顷沙站、横沥站、番禺广场站。白云区段的白云城市中心和空港经济区站亦具备跨线运营条件。

1.2 开行方案概况

基于线路的功能定位和客流交互需求,18 号线和 22 号线考虑两种运营模式:独立运营和共线运营。本文重点研究不同运营模式下不同列车开行数量以及快慢车开行比例对通过能力的影响。

独立运营模式为:18 号线开行万顷沙站—广州东站—天贵站的独立交路,22 号线开行番禺广场站—广州南站—白云机场站的独立交路(见图 2)。共线运营模式为:开行万顷沙站—广州东站—天贵

站和万顷沙站—广州南站—白云机场站两个交路(Y 型交路),在万顷沙站—番禺广场站区段共线运营(见图 2)。

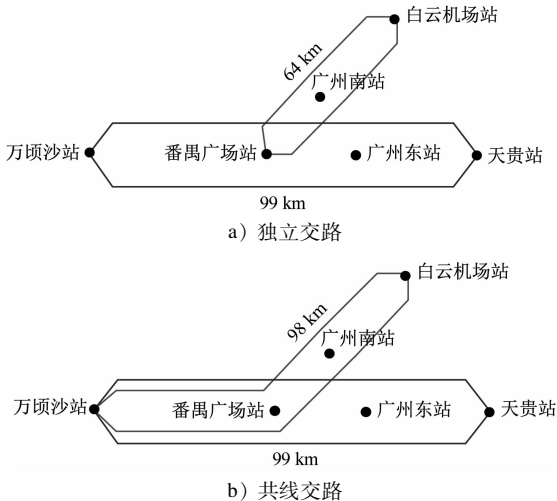


图 2 18 号线和 22 号线的开行方案

Fig. 2 Operation scheme of Line 18 and Line 22

2 线路通过能力计算仿真方案

2.1 线路通过能力的分析方法

根据列车的运行方式,将列车运行图分为平行运行图和非平行运行图。对于站站停列车的平行运行图,其通过能力的计算公式为:

$$n = 3\,600 / T_{\text{周}} \quad (1)$$

式中:

n ——线路小时通过能力,列/h;

$T_{\text{周}}$ ——运行图周期,s。

对于非平行运行图,由于列车的停站方式不同导致区间的运行时分不同,它的通过能力需要根据列车的越行方案和快慢车开行比例单独确定。相应地,其运行图周期需要单独确定,见图 3。

非平行运行图线路通过能力的计算方法:先确定单位时间内可以铺画运行周期的数量,然后乘以该类型运行周期内所包含的列车数。其计算公式如下:

$$n = \frac{3\,600}{T_{\text{周}}} n_{\text{周}} \quad (2)$$

式中:

$n_{\text{周}}$ ——1 个运行周期内所包含的列车数,列。

非平行运行图线路通过能力的分析方法有扣除系数法、试验绘图法及计算机仿真方法等。计算机仿真方法是通过模拟铺画给定开行方案条件下

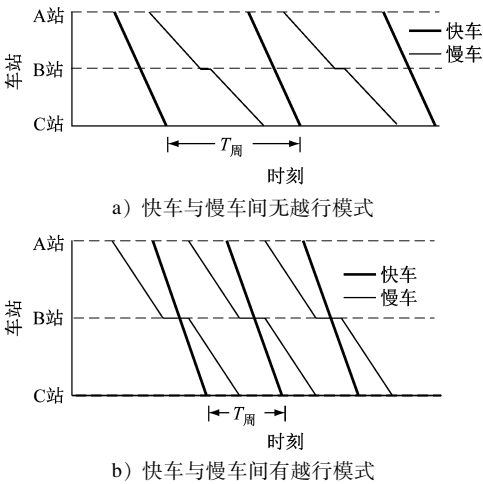


图 3 列车非平行运行图运行周期示意图

Fig. 3 Operation cycle diagram of train non-parallel operation diagram

线路的最大通过能力运行图,可得到线路的最大通过能力。该方法具有精度高、运算快等优点。本方案采用 TPM 系统进行仿真分析。

2.2 仿真方案的设计原则

结合 18 号线和 22 号线的开行方案和配线条件,通过计算以及考虑一定冗余,同向发车间隔时间 $I_{发发}$ 不小于 140 s,同向到站与通过间隔时间 $I_{到通}$

不小于 90 s,同向通过与发车间隔时间 $I_{通发}$ 不小于 35 s。快车仅在限定的车站越行慢车,18 号线的限定车站为南村万博站、沙溪站、石榴岗站、琶洲西区站和白云城市中心站,22 号线的限定车站为祈福站、陈头岗站和白云城市中心站。

仿真分析的目的为:①分析不同越行地点对线路通过能力的影响;②分析不同越行次数对线路通过能力的影响;③分析不同快慢车开行比例和共线交路开行比例对线路通过能力的影响。

仿真方案的设计原则如下:①快慢车呈组合周期化开行;②快车优先且尽量保证慢车的旅行速度最大;③慢车被越行的次数尽量少(单程不超过 2 次)。

2.3 仿真方案设计

本次研究主要仿真 3 种运营模式,共 16 个方案,见表 1。

3 线路通过能力仿真结果分析

基于 TPM 系统,对上述方案中的最大线路通过能力进行计算,得到的结果见表 2。方案 3-2 的线路通过能力仿真运行图见图 4。

表 1 18 号线与 22 号线运营方案表
Tab. 1 Operation schemes of Line 18 and Line 22

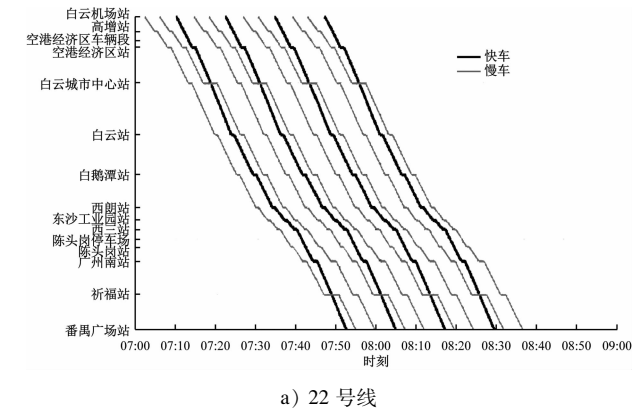
运营方案	方案编号	方案说明
18 号线 独立运营	1-1	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在琶洲西区站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-2	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在石榴岗站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-3	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在沙溪站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-4	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在南村万博站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-5	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在白云城市中心站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-6	18 号线快车与慢车开行比例为 1:2;慢车在白云城市中心站、石榴岗站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-7	18 号线快车与慢车开行比例为 1:2;慢车在沙溪站、琶洲西区站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	1-8	18 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在白云城市中心站、南村万博站被越行,且单列慢车被越行 2 次
22 号线 独立运营	2-1	22 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在白云城市中心站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	2-2	22 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在祈福站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	2-3	22 号线快车与慢车开行比例为 1:1;慢车在陈头岗站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	2-4	22 号线快车与慢车开行比例为 1:2;慢车在白云城市中心站、祈福站被越行,且单列慢车被越行 1 次
	2-5	22 号线快车与慢车开行比例为 2:1;慢车在白云城市中心站、陈头岗站被越行,且单列慢车被越行 2 次
18 号线与 22 号线 共线运营	3-1	18 号、22 号线快慢车开行比例分别为 1:1、1:1;18 号线的越行站为石榴岗站,22 号线的越行站为白云城市中心站
	3-2	18 号、22 号线快慢车开行比例分别为 1:1、1:2;18 号线的越行站为琶洲西区站,22 号线的越行站为白云城市中心站和祈福站
	3-3	18 号、22 号线快慢车开行比例分别为 1:2、1:1;18 号线的越行站为沙溪站和琶洲西区站,22 号线的越行站为陈头岗站

表 2 18 号线与 22 号线运营方案线路通过能力汇总

Tab.2 Summary of line passing capacity of Line 18 and Line 22 operation schemes			
运营方案	方案编号	线路通过能力/(列/h)	平均发车间隔
18 号线 独立运营	1-1	11.43	5 min 15 s
	1-2	10.07	5 min 57 s
	1-3	8.78	6 min 50 s
	1-4	7.83	7 min 40 s
	1-5	10.07	5 min 57 s
	1-6	15.10	3 min 58 s
	1-7	13.17	4 min 33 s
	1-8	12.41	4 min 50 s
22 号线 独立运营	2-1	15.00	4 min
	2-2	11.90	5 min 2 s
	2-3	14.40	4 min 10 s
	2-4	17.85	3 min 22 s
	2-5	15.88	3 min 47 s
18 号线与 22 号线 共线运营	3-1	20.00	3 min
	3-2	24.83	2 min 25 s
	3-3	18.46	3 min 15 s

3.1 18 号线独立运营时的线路通过能力分析

在单列慢车被越行 1 次的情况下,快慢车开行比例为 1:1、1:2 对应的线路最大通过能力分别为



11.43 列/h、15.10 列/h;单列慢车被越行 2 次的情况下,快慢车开行比例为 1:1 时的线路通过能力为 12.41 列/h。不难发现,在单列慢车被越行 1 次时,快慢车开行比例越大,线路通过能力越大。而在快慢车开行比例均为 1:1 时,单列慢车被越行 2 次的通过能力(12.41 列/h)大于被越行 1 次的通过能力(11.43 列/h)。

3.2 22 号线独立运营时的线路通过能力分析

在单列慢车被越行 1 次时,快慢车开行比例为 1:1、1:2 对应的线路最大通过能力分别为 15.00 列/h、17.85 列/h;单列慢车被越行 2 次时,快慢车开行比例为 2:1 时的线路通过能力为 15.88 列/h。不难发现,在单列慢车被越行 1 次时,快慢车开行比例越大,线路通过能力越大。

3.3 两线共线运营时的线路通过能力分析

列车在共线区段时,快慢车停站方式均相同,18 号线和 22 号线的列车到达番禺广场站的间隔越均匀,相应的线路通过能力越大。两交路开行比例不同时,越行的地点会有所变化,且非共线段的均衡性亦有较大差异。当 18 号线快慢车开行比例为 1:1(琶洲西区站为越行站)、22 号线快慢车开行比例为 1:2(白云城市中心站、祈福站为越行站)时,共线段线路通过能力最大,为 24.83 列/h。

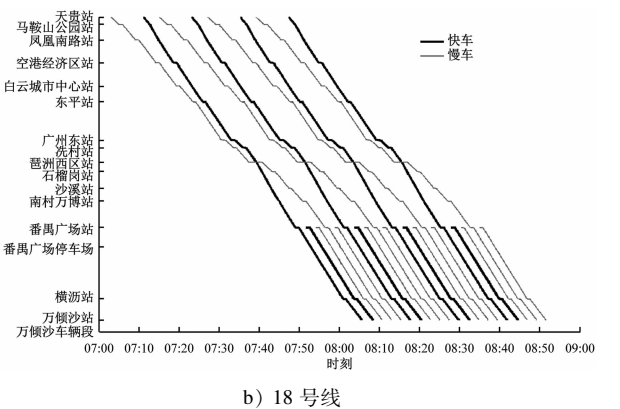


图 4 方案 3-2 线路通过能力仿真运行图

Fig.4 Simulation operation diagram of the line passing capacity of scheme 3-2

3.4 综合分析

基于上述不同方案,可以得出以下结论:

1) 单列慢车被快车越行相同次数(本案例中为 1 次)时,同一周期内快车与慢车之间的开行数量相差越大,线路通过能力越大。由于快慢车混合开行,线路通过能力会有所下降;但同等级列车追踪铺画得越多,线路上列车运行速度差有所降低,线

路通过能力损失得亦越少。

2) 快慢车开行比例相同时,随着单列慢车被越行次数增加,线路通过能力亦随之增加。例如,方案 1-8 与 1-4、1-5 相比,同样是快慢车 1:1 开行,但方案 1-8 中单列慢车被越行 2 次,且越行地点与方案 1-4、1-5 相同,但线路通过能力明显增加。因此,可以考虑在快慢车运行的线路上通过增加慢车被

越行次数来增加线路通过能力。但慢车被越行的次数不能过多,否则慢车旅行速度会明显降低,从而降低了乘客服务水平,同时其线路通过能力的增长亦较为有限。

3) 独立运营时,受快慢车运行速度差的影响,18 号线列车进入共线段(番禺广场站—万顷沙站)的间隔时间被延长,导致共线段能力利用率较低。共线运营时,由于共线段的列车由 18 号线和 22 号线两条线汇入(出),可以充分利用独立运营时的富裕能力,使得共线段的能力利用率得到提高(见图 4)。

4) 两线共线运营时,非共线段的能力利用率较低,平均服务间隔较大。可根据实际客流需求和非共线段的能力利用情况,考虑在非共线段增加小交路,以提升非共线段的服务水平。但小交路开行需要重点考虑快慢车的越行地点选择和折返站能力的适应性问题。

上述计算结果为不考虑列车延误情况下所得到的线路通过能力理论值。为了提高运营的安全性,应对客流需求动态变化,同时考虑到列车延误等特殊情况,实际运营需要留有一定的能力冗余。

4 结语

市域快轨是我国未来交通发展的重点。针对多线共线运营、快慢车组合开行方案的理论仍有待进一步完善。本文探讨了越行地点和越行次数、快慢车开行比例、共线交路的开行比例等因素对于线路通过能力的影响。并基于计算机仿真方法,以广州市域快轨 18 号线和 22 号线为例,得到了不同运营方案条件下的线路最大通过能力。相对于传统站站停模式,快慢车开行对于线路最大通过能力有一定的损失。因此,如何基于客流需求特征,在满足线路通过能力要求的条件下,选择合理的开行方

案是运营实践中需要考虑的关键问题。列车开行方案的组合众多,本文主要提出了一种分析的方法与思路,可为轨道交通线路的开行方案优化与能力评估提供参考。

参考文献

- [1] 赵欣苗. 城市轨道交通市域线快慢车开行方案优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
ZHAO Xinmiao. Optimization of the operational schemes with express/local trains on regional rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [2] 毛保华,刘明君,黄荣,等. 轨道交通网络化运营组织理论与关键技术[M]. 北京:科学出版社,2011.
MAO Baohua, LIU Mingjun, HUANG Rong, et al. Operational theories and key technologies of rail transit networks[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 段凌林,查伟雄,李剑,等. 城市轨道交通大小交路结合快慢车开行方案优化[J]. 铁路运输与经济,2020(5):103.
DUAN Linglin, ZHA Weixiong, LI Jian, et al. Optimization of operation scheme for urban rail transit combining full-length and short-turn routing with express and slow train[J]. Railway Transport and Economy, 2020(5): 103.
- [4] 张乾睿,江志彬. 上海轨道交通 16 号线快慢车通过能力技术分析[J]. 地下工程与隧道,2016(2):30.
ZHANG Qianrui, JIANG Zhibin. Technical analysis of carrying capacity of express and local train of Shanghai Rail Transit Line 16 [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(2):30.
- [5] 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.
CHEN Xiaofeng. On express/slow train operation program on Shanghai Rail Transit Line 16 [J]. Urban Mass Transit, 2014(5): 68.
- [6] 江志彬,徐瑞华,吴强,等. 多交路共线运行的城市轨道交通车辆运用优化[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014(9):1333.
JIANG Zhibin, XU Ruihua, WU Qiang, et al. Optimal model for using of transit unit based on shared-path rail transit route[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014(9):1333.

(收稿日期:2022-08-15)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com