

武汉轨道交通香港路站换乘客流的流线优化设计

刘斌^{1,2,3,4} 乐北晨⁴ 字俊奇⁴ 张腾飞⁴

(1. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;
3. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;
4. 武汉地铁运营有限公司, 430030, 武汉 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 以武汉轨道交通香港路站为例, 开展换乘站客流流线优化研究。总结了运营后轨道交通换乘站的流线优化方法, 提出了具有适用性的流线优化流程和流线时间计算模型。针对客流流线中的冲突点, 应用流程再造法得出流线优化方案, 并通过流线走行时间计算模型对优化方案进行计算和验证。验证结果表明, 优化流程和计算模型具有可行性和参考性。

关键词 城市轨道交通; 换乘站; 客流流线优化

中图分类号 U231.4; U293.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.04.011

The Interchange Passenger Flow Optimization Design of Wuhan Rail Transit Xianggang Road Station

LIU Bin, YUE Beichen, ZI Junqi, ZHANG Tengfei

Abstract Taking Wuhan rail transit Xianggang Road Station as an example, the interchange station passenger flow optimization is studied. The optimization method of interchange station passenger flow after starting operation is summarized. Flow optimization process and flow travel time calculation model that are adaptable are proposed. Targeting the conflict points among the passenger flow lines, an optimization scheme is obtained by adopting the process reengineering method, calculated and verified by the passenger flow travel time calculation model. Verification results show that the optimization process and calculation model are feasible and referable.

Key words urban rail transit; interchange station; passenger flow optimization

First-author's address College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

流线的优化是客运枢纽设计中最核心的内容。目前, 国内对于流线优化的研究, 主要集中在设计阶段^[1-2]。对运营阶段的大型轨道交通换乘站的流线优化研究较少。近年来, 国内城市轨道交通行业

发展迅速, 大量换乘站投入运营。运营中的换乘站空间结构受限, 不便进行较大幅度改造。因此, 在给定的空间结构条件下, 充分挖掘客流时空分布特性, 进而调整设施设备布局、优化流线组织, 是目前运营企业关注的重点难点。

武汉轨道交通香港路站是 3、6 及 7 号线超大型换乘站。其由 1 个车控室统一控制, 采用“立体化、多层次”设计^[3], 有地下 4 层, 为侧式、叠岛式混合站台。该站站形复杂, 客流流线繁多, 车站管理难度大。本文提出了城市轨道交通换乘站流线优化的标准化流程, 并以香港路站为例进行验证。

1 流线优化方案设计

1.1 流线优化原则及流程

合理高效的客流流线, 应动线简单、清晰明确, 即使面对大客流, 也仍能保持较高的顺畅度。客流优化原则一般为^[4]: ①保证乘客走行安全; ②减少流线的交叉及对流, 以保证换乘流线顺畅; ③引导标志应清晰明确, 能快速分流减少拥堵; ④满足方便性及舒适性要求。

城市轨道交通换乘站为城市节点, 如何避免客流冲突是其流线优化需解决的核心问题^[5]。通过合理优化流线, 可提升设备利用率, 避免流线交叉, 从而提升乘客通行效率。

结合运营管理经验, 总结换乘站流线优化的标准化流程为: 首先, 开展理论分析, 结合现场调研, 总结出车站流线的问题; 然后, 针对问题进行优化, 应用流程再造法, 帮助运营单位扭转固化思维, 提出优化措施; 最后, 建立车站流线走行时间模型, 验证优化措施, 进而有序实施。

1.2 流线走行时间计算模型

运营中的换乘站客流流线主要从两个环节优化: ①因设施设备服务能力有限而导致乘客拥挤的

环节,如安检及自动扶梯(以下简为“扶梯”)等;②因区域乘客密度较大导致行走速度下降的环节,如楼梯及通道等。建立乘客走行时间模型,并将之作为检验优化方案的途径。

1.2.1 安检用时

假设车站高峰时段安检环节的排队模型为 $M/M/c/N/\infty$ 排队系统,其含义为:顾客到达间隔时间的概率分布和服务时间的概率分布服从泊松分布, c 为服务台数量,系统容量为 N ,顾客源无限,先到先服务。根据排队系统理论,存在如下关系^[6]:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (1)$$

$$P_0 = \left(\sum_{k=0}^{c-1} \frac{\delta^k}{k!} + \frac{\delta^c}{c! (1-\rho)} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中:

ρ ——设备的服务强度;

λ ——乘客平均到达率,人/min;

c ——服务台数量;

μ ——单个设备平均服务率,人/min;

P_0 ——设备空闲的概率;

k ——服务台计算参数,为正整数,取 0, 1, 2, ..., $c-1$;

δ ——设备服务效率参数, $\delta = \frac{\lambda}{\mu}$ 。

乘客安检环节所需时间 t_A 为:

$$t_A = \left[\frac{\delta^c \rho}{c! (1-\rho)^2} P_0 + \delta \right] / \lambda \quad (3)$$

1.2.2 通过扶梯的时间

正常情况下,扶梯能够满足乘客需求。当列车到站时,瞬间巨大客流涌入扶梯口造成的拥堵,将增加乘客的排队时间。故有:

$$t_B = t_{\text{扶梯}} + t_{\text{等待}} = \frac{L_e}{v_e} + \frac{A}{2c\mu} \quad (4)$$

式中:

t_B ——通过扶梯的时间;

$t_{\text{扶梯}}$ ——扶梯服务时间;

$t_{\text{等待}}$ ——下车客流进入设施等待服务时间;

L_e ——扶梯长度;

v_e ——扶梯运行速度;

A ——换乘人数。

1.2.3 通过通道、站台或楼梯的时间

乘客在地铁站内行走速度受该区域人员密度影响较显著,通过对香港路站乘客数据调查分析,

得出乘客平均走行速度与人员密度 D 关系如下^[7]:

$$v_{\text{通道/站台}} = -0.003D^3 + 0.063D^2 - 0.418D + 1.446 \quad (5)$$

$$v_{\text{楼梯}} = -0.002D^3 + 0.035D^2 - 0.216D + 0.685 \quad (6)$$

式中:

$v_{\text{通道/站台}}$ ——乘客在通道或站台的平均走行速度, m/s;

$v_{\text{楼梯}}$ ——乘客在楼梯上的平均走行速度, m/s;

D ——区域内的乘客密度, 人/ m^2 。

乘客通行时间 t_C 为:

$$t_C = L/v \quad (7)$$

式中:

L ——通道、站台或楼梯的长度;

v ——乘客的平均走行速度。

1.2.4 乘客流线走行时间计算模型

通过计算各环节走行时间,建立乘客流线走行时间计算模型。为方便计算,假设乘客在通道等区域走行服从均匀分布。

$$t_i = \sum_j \theta_{ij} t_A + \sum_j \theta_{ij} t_B + \sum_j t_C = \sum_j \theta_{ij} \left(\frac{\frac{\delta^c \rho}{c! (1-\rho)^2} P_0 + \delta}{\lambda} \times 60 \right) + \sum_j \theta_{ij} \left(\frac{L_e}{v_e} + \frac{A}{2c\mu} \times 60 \right) + \sum_j \frac{L_j}{v_j} \quad (8)$$

式中:

t_i ——流程 i 的乘客总走行时间;

θ_{ij} ——流程 i 与环节 j 的关联系数,是 0-1 变量;若流程 i 包括环节 j ,则 $\theta_{ij} = 1$,否则 $\theta_{ij} = 0$ 。

2 香港路站的客流流线分析

2.1 车站结构

香港路站为地下 4 层结构,采用侧式、叠岛式混合站台,设有 8 个出入口。负 1 层及负 2 层为设有安检点和进出站闸机的站厅;6 号线位于负 2 层按侧式站台布置;3、7 号线垂直于 6 号线在负 3、4 层分别按岛式站台布置,且 3 号线与 7 号线为同站台换乘^[8]。香港路站总面积约 5.35 万 m^2 ,共有 40 部扶梯,16 部楼梯。

2.2 客流流线

香港路站 2019 年日均集散量 7 万人次,换乘客流超 10 万人次。换乘站的扶梯和安检处为主

要的客流瓶颈区域^[9]。对立体化换乘站来说,楼梯和通道的利用率较小,扶梯是最主要的走行通道。故本文将扶梯和安检点作为流线优化的重点。

将 6 号线金银湖公园方向线路及站台所在的车站侧定义为车站 A 端,东风公司方向线路及站台所在的车站侧为 B 端。将车站付费区楼扶梯依次编号见图 1,其中色块区域是客流拥堵区域。

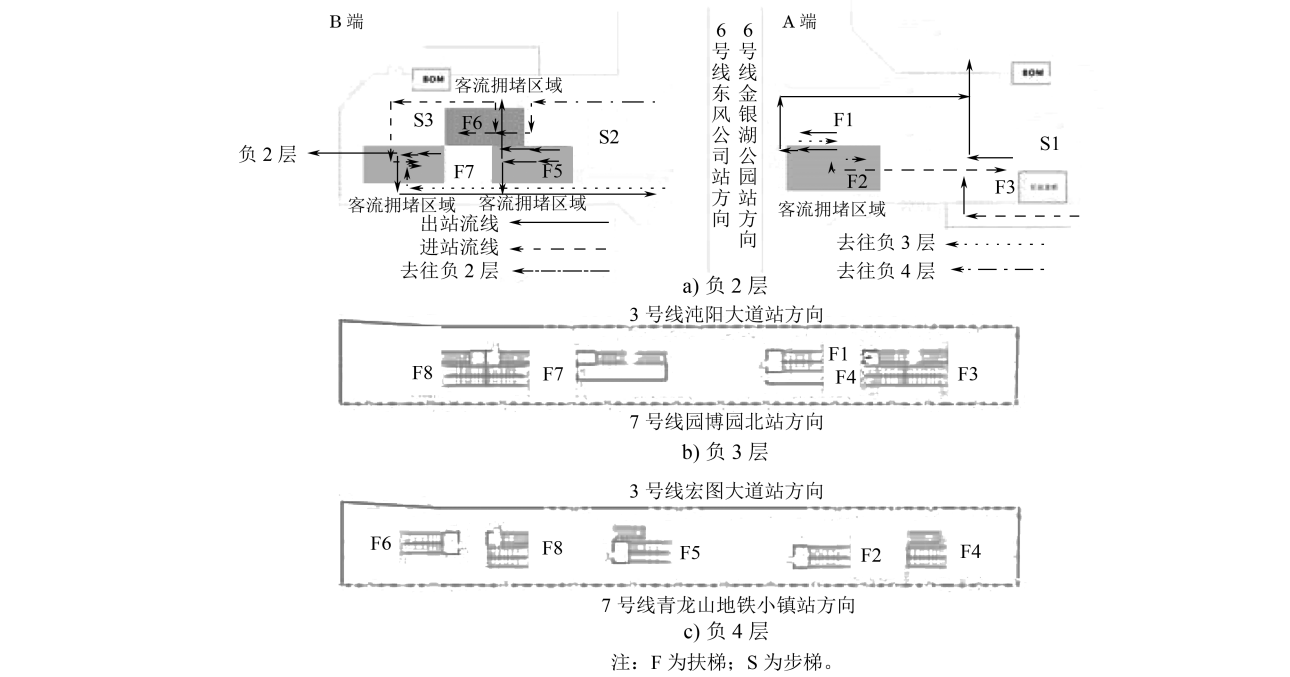


图 1 香港路站平面图

图 2 中,F2、F5 及 F6 扶梯同时承载换乘和进出站客流,客流压力较大;F7 扶梯距离 6 号线站台较远,乘客换乘需要穿行整侧付费区,故进出站客流和换乘客流存在流线交叉。经现场调研,高峰时段的安检排队队列较长。由此可见,香港路站客流流线存在以下问题:

3) 高峰时段安检点较为拥堵。车站两端站厅仅各有 1 处安检点,不能满足高峰时段的安检需求;A 端安检点与客服中心距离较远,不利于乘客处理票卡故障。

3 流线优化措施

3.1 逻辑层流线优化设计

应用流程再造法,以乘客需求为出发点,以高效现场管理为目标,使用 ECRS 法进行流程优化^[10]。所谓 ECRS,指“取消 (Eliminate) - 合并 (Combine) - 重排 (Rearrange) - 简化 (Simplify)”。流程再造法是对流程活动环节及活动连接关系的具体再造方法,是国际流行的管理理念和方法,可应用在运输领域的运营管理和运营组织中。

逻辑层流线优化设计过程为:

- 1) 换乘流线和进出站流线冲突。车站扶梯未能形成方向单一独立的路径;换乘流线和进出站流线共用扶梯,导致流线交叉、拥堵严重;车站标志引导难度较大,增加乘客走行时间。
- 2) 设备利用率不均衡。部分扶梯承载功能过多,高峰时段乘客排队时间较长;部分扶梯承载功能少,其设备利用率低。

1) 正确分析乘客需求。进站乘客和换乘乘客的最大需求是最便捷的方式、最短的时间到达站台,故应在有限的条件下尽可能降低流线冲突点,以减少乘客的走行时间。

2) 对乘客乘车流程进行分析。对于运营单位来说,主要需权衡运营成本、服务质量及客流控制

措施等 3 方面:提升服务质量是运营的总要求;一方面,要考虑到运营成本,尽可能减少不必要的人力支出和设备支出;另一方面,要兼顾到特殊情况的客流控制。对于乘客而言,最重要的是舒适、便捷的乘车体验,最短的出行时间。因此,应尽可能发挥有限的设备功能,提升利用率。

3) 使用 ECRS 方法进行逻辑层流线再造。再

造后的 A 端站厅乘客流线逻辑如图 3 所示。对于进站的乘客,进站前的瓶颈点是安检点及进站闸机位置。为尽可能让乘客方便快捷地通过安检,应采取以下措施:进站闸机应设置在靠近客服中心一侧,以便于乘客处理票卡故障;应精简乘客进站后的客流流线,以提升通行效率。

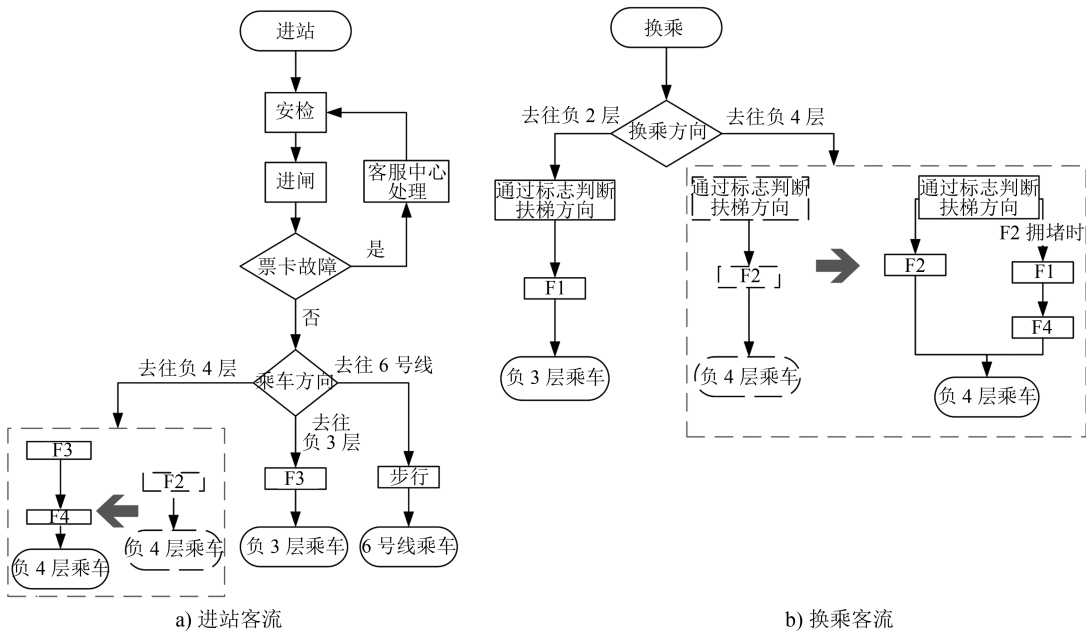


图 3 A 端站厅客流流线再造示意图

3.2 流线优化方案

香港路站的客流流线优化方案如图 4 所示。其中,香港路站 A 端的客流流线优化方案为:

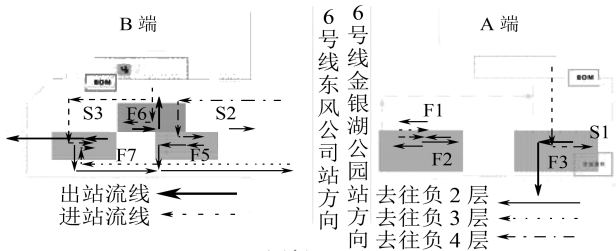


图 4 香港路站流线优化示意图

1) 在负 4 层,引导进出站乘客通过 F3 及 F4 扶梯行走,减少换乘客流和进出站客流的交叉,进而提高 F2 扶梯的双向换乘效率。

2) 将 F1 及 F2 扶梯作为换乘专用扶梯,将 F1 扶梯设置为负 3 层和负 4 层的通用扶梯。在 F2 扶梯拥堵严重时,去往负 4 层的部分乘客可先经由 F1 扶梯前往负 3 层,再由 F4 扶梯前往负 4 层,避免出现现在 F2 扶梯处排队拥堵、而 F1 扶梯空闲的

情况。

3) 将安检机由单通道改为双通道,提升安检点的乘客通行能力。

4) 将安检机位置移至客服中心一侧,便于乘客处理票卡故障。

香港路站 B 端的客流流线优化方案为:

1) 将 F6 扶梯作为负 4 层进出站乘客的专用扶梯;将 F5 扶梯由双上运行更改为一上一下运行,作为负 4 层与负 2 层之间换乘乘客的专用扶梯,从而实现进出站流线和换乘流线分离,减少客流拥堵,提升 F5 扶梯进出站效率及 F6 扶梯双向换乘的通行效率。

2) F7 扶梯功能不变;将 S2 楼梯限制为上行单方向通行,便于负 3 层乘客换乘至负 2 层,减少 F7 扶梯的客流压力,并减少负 3 层与负 2 层之间换乘客流在站厅的流线冲突,进而提升负 3 层 3、7 号线乘客换乘至 6 号线的通行效率。

3) 将安检机由单通道改为双通道,以提升安检点乘客通行能力。

4 流线优化方案的效果评价

结合现场设施及高峰期客流情况,设定各流程参数,运用构建模型对下面 4 条流线进行优化计算:L1 为 A 端进站去往负 4 层客流流线,其行走时间为 t_1 ;L2 为 A 端 6 号线换乘负 4 层客流流线,其行走时间为 t_2 ;L3 为 B 端 6 号线换乘负 4 层客流流线,其行走时间为 t_3 ;L4 为 B 端负 3 层换乘 6 号线客流流线,其行走时间为 t_4 。

首先收集需要的数据如表 1 所示。

表 1 流线计算参数表

流线	设备服务率/ (人/min)		通道 长度/m	人群 密度/ (人/m ²)	乘客平均到达率/ (人/min)	
	安检点	扶梯			安检点	扶梯
L 1 优化前	30	140	95	1.03	28	103
L1 优化后	30	140	65	1.12	28	82
L2 优化前	30	140	85	1.21		112
L2 优化后	30	140	70	1.19		89
L3 优化前	30	140	105	1.15		176
L3 优化后	30	140	72	1.23		156
L4 优化前	30	140	78	0.87		102
L4 优化后	30	140	55	1.05		60

计算流线优化前的行走时间,并与实测值对比,如表 2 所示。

表 2 流线优化前的行走时间

流线	行走时间/s		误差/%
	计算值	实测值	
L1	164	156	5.12
L2	131	124	5.64
L3	162	173	2.24
L4	122	135	9.62

从表 2 可以看出,实测值与计算值的误差均小于 10%。这证明乘客行走时间模型实用性较高,流线优化评价方法具有普遍适用性。

通过优化后的各项参数,可进一步得到优化前后的乘客行走时间对比如表 3 所示。

表 3 流线优化前后行走时间计算结果对比表

流线	行走时间/s		优化前后 时间差/s
	优化前	优化后	
L1	164	133	31
L2	131	109	22
L3	162	128	34
L4	122	89	33

由表 3 可知,经过优化,香港路站的客流流线交

叉冲突点得到疏解,设备利用率进一步均衡,乘客走行时间显著缩短,流线优化措施切实可行。经现场实施应用,效果良好。

5 结论

客流流线设计是城市轨道交通换乘站设计中最为重要的环节,其设计过程应开展充分论证,统筹设计。立体化换乘站在规划设计阶段,应采用运营前置的理念,以避免设计和运营的脱节。在换乘站投入运营后,设计单位应积极与运营单位开展沟通,进一步提高换乘站客流流线设计水平^[11]。对于运营单位而言,随着车站客流形态的变化,其客流流线组织应随之不断优化。

本文以武汉轨道交通香港路站为例,开展换乘站客流流线优化研究,总结了运营后轨道交通换乘站的流线优化方法,提出了具有适用性的流线优化流程和流线时间计算模型,并以香港路站为例进行计算和验证。验证结果表明,优化流程和计算模型具有可行性和参考性。流程再造法作为一种流线优化思考模式的新选择,在本案例中得到成功应用。

参考文献

[1] 王仲林,史海欧. 广州地铁天河公园站多线换乘方案研究[J]. 城市轨道交通研究,2018(7): 18.

[2] 郭艳东. 铁路客运站客流组织及优化方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.

[3] 杨建华,白雪梅. 交通枢纽布局立体化和流线管道化的设计实践[J]. 都市快轨交通,2012(4): 23.

[4] 毛保华. 城市轨道交通系统运营管理[M]. 北京:人民交通出版社,2017.

[5] 何军,陈文慧. 地铁枢纽站三线同厅换乘设计[J]. 都市快轨交通,2019(1): 61.

[6] 夏菁,高丽. 北京南站客流流线的分析与优化组织[J]. 交通科技与经济,2013(2): 73.

[7] 陈绍宽,李思悦,李雪,等. 地铁车站内乘客疏散时间计算方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2008(4): 59.

[8] 赵强. 武汉轨道交通香港路站三线换乘方案研究[J]. 铁道工程学报,2013(2): 99.

[9] 王琨,孙立山,罗薇,等. 基于网络瓶颈控制的轨道交通车站客流疏导研究[J]. 都市快轨交通,2019(3): 84.

[10] 夏胜利. 高铁客运枢纽交通流线设计理论与方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[11] 濮烨,许红. 城市轨道交通运营前置理念在设计中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2018(1): 7.

(收稿日期:2020-09-25)