

基于乘客队列选择偏好的地铁车站自动检票闸机通行能力分析*

张宸瑜¹ 黄青霞² 强生杰¹

(1. 华东交通大学交通运输学院, 330013, 南昌; 2. 南昌市城市规划设计研究总院, 330038, 南昌//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为了更好地提升地铁站台乘客输送效率, 对城市轨道交通自动检票闸机通行能力进行分析是必要的。为此, 首先在甄别影响通行能力因素的基础上, 将乘客按照不同特征进行分类; 其次, 在考虑超高峰小时系数以及乘客进站过程中存在的队列选择偏好行为的基础上, 提出了自动检票闸机实际承载能力计算公式; 最后, 对南昌市地铁 1 号线的 3 种不同类型的车站进行实例分析, 利用 MATLAB 软件对上述车站自动检票闸机的每人服务时间进行拟合, 得到其分布规律及其实际的通行能力。

关键词 地铁车站; 乘客特性; 队列选择偏好; 自动检票闸机通行能力

中图分类号 U292.5⁺1; U293.2⁺2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.033

Metro Station AFC Gates Based on Passenger Preference on Queue Selection

ZHANG Chenyu, HUANG Qingxia, QIANG Shengjie

Abstract To better increase passenger transport efficiency on metro station platform, it is necessary to analyze the passing capacity of urban rail transit AFC gates. For this purpose, passengers are categorized in terms of different characteristics on the basis of distinguishing passing capacity influencing factors. Secondly, considering the peak hour coefficient and queue selection preference of passenger entry, the calculation formula of actual AFC gate passing capacity is proposed. Finally, practical case analysis of three different types of stations on Nanchang Metro Line 1 is carried out. Average service time per person of the above station AFC gate is fitted by using MATLAB and thus distribution pattern and actual passing capacity is obtained.

Key words metro station; passenger characteristics; queue selection preference; AFC gate passing capacity

First-author's address East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

在城市轨道交通乘客出行集中的早、晚高峰时段, 车站自动检票闸机附近容易形成严重的“瓶颈”现象。国内外学者对自动检票闸机的通行能力评估及优化方面做了大量的工作。文献[1]对地铁车站高峰时期的客流量进行了实地调查, 使用数据分组的方法进行分析, 得出单位时间内通过自动检票闸机的乘客数量, 从而得出自动检票闸机的通过能力; 文献[2]经实地调研, 将乘客按照不同特性进行划分, 提出了一种基于乘客特征的自动检票闸机通行能力计算公式; 文献[3]按照通过自动检票闸机前后的步行速度, 将接受自动检票闸机服务前后的步速分为 3 种, 得到不同区域内乘客步速概率密度分布图; 文献[4]对城市轨道交通车站进行实地调研, 得出门扉式自动检票闸机的极限通过能力为 2 200 人/h; 文献[5]通过调查分析, 得出使用 IC (集成电路) 卡的乘客通过自动检票闸机时的平均时间间隔, 从而得出自动检票闸机的实际通过能力; 文献[6]等利用遗传算法来对设施的布局配置进行研究, 定性和定量地分析了服务设备的最优配置数量及其排布方式。

本文在考虑乘客特征对地铁自动检票闸机通行能力影响^[7-9]的基础上, 引入了超高峰小时系数及乘客对队列的选择偏好行为, 提出了自动检票闸机实际通行能力计算公式。最后, 结合实际案例剖析通行能力, 并使用 MATLAB 软件对自动检票闸机效能进行函数拟合, 得到其分布规律。这为进一步探究南昌城市轨道交通自动检票闸机数量的配置及优化提供了参考。

1 自动检票闸机通行能力分析

1.1 服务时间影响因素分析

在不考虑自动检票闸机失效的情况下, 影响自

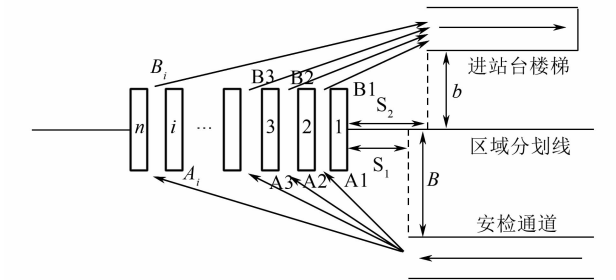
* 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ180358)

动检票闸机通行能力的主要因素是乘客个人属性,即乘客在年龄、性别、步速、携带行李大小、持卡种类和使用自动检票闸机熟练程度上的差异。影响乘客通行能力的特性界定标准,如表 1 所示。

表 1 影响乘客通行能力的特性界定标准
Tab. 1 Criteria of factors influencing passenger's passing ability

影响因素	界定标准
乘客年龄	中青年、老年
携带行李大小	无包:乘客未携带行李;携带贴身包、电脑包 小包:乘客携带单肩或双肩包;携带手提袋或包 大包:乘客携带 2 个或以上的单双肩包、行李箱等
熟练程度	熟练:乘客在通过自动检票闸机时无明显停顿 不熟练:有明显停顿,需要进行观察

乘客在进出站时存在选择决策行为,即队列选择。具体表现为:若自动检票闸机处有排队现象时,乘客要么选择距离自己最近的自动检票闸机进行排队,要么选择距离自己较远但没有人排队或者排队人数较少的自动检票闸机通行。后者虽然减少了排队等待的时间,却增加了绕行时间。乘客对自动检票闸机的动态选择行为会影响到自动检票闸机的实际通行能力,见图 1。



注: ←为旅客进站所选择的路径; A_i 为安检处距离第 i 个自动检票闸机的距离; B_i 第 i 个自动检票闸机距离进站台楼梯的距离; a 为安检处距离区域划分线的垂直距离; b 为进站台楼梯距离区域划分线的垂直距离; S_1 为安检处距离最近进站自动检票闸机的垂直距离; S_2 为进站台楼梯距离最近进站自动检票闸机的垂直距离。

图 1 乘客在选择偏好下通过不同自动检票闸机的路径
Fig. 1 Paths of passengers passing through different AFC gates with selection preference

乘客选择第 i 个自动检票闸机进站时所消耗的总时间为 T :

$$T_i = t_i + t_{i,1} = t_i + \frac{B_i + A_i}{v} \quad (1)$$

式中:
 t_i ——乘客在第 i 个自动检票闸机处排队消耗的时间;
 $t_{i,1}$ ——乘客从安检处到自动检票闸机和从自

动检票闸机到进站台楼梯的步行时间;
 v ——乘客步行速度;
 A_i, B_i 的计算公式分别如式(2)、式(3)所示。

$$A_i = \sqrt{a^2 + [s_1 + id]^2} \quad (2)$$

$$B_i = \sqrt{b^2 + [s_2 + id]^2} \quad (3)$$

式中:
 d ——自动检票闸机的宽度,一般取值 1 m。
定义进站自动检票闸机通行能力的消退系数为:
$$\psi = 1 - |\bar{T} - T_1| / \left[\sum_{i=1}^n T_i / i \right] \quad (4)$$

式中:
 T_1 ——乘客在选择距离安检处最近的一个自动检票闸机口进站的服务时间;
 T_i ——乘客在选择第 i 个进站自动检票闸机口进站时所用的服务时间;
 \bar{T} ——整个自动检票闸机系统所消耗的平均时间。

1.2 自动检票闸机实际通行能力计算

通过上述分析可知,乘客特性是影响自动检票闸机实际通行能力的主要原因。基于乘客自身特性的自动检票闸机通行能力为

$$C = \frac{3\,600}{\sum_{k=1}^m p_k t_k} \quad (5)$$

式中:
 C ——闸机通行能力,人次/h;
 p_k ——第 k 类乘客的比例;
 t_k ——第 k 类乘客每人每次通过自动检票闸机时的平均时间, s。

为了应对高峰客流带来的冲击以及短期内客流量增加对通行能力的需求,考虑高峰小时系数的影响。超高峰小时系数下的自动检票闸机实际通行能力 C_1 ,如式(6)所示:

$$C_1 = CF \quad (6)$$

式中:
 F ——超高峰小时系数。
考虑到乘客的选择偏好对通行能力造成的影响,自动检票闸机实际通行能力 C_2 如式(7)所示:
$$C_2 = C_1 \psi \quad (7)$$

2 案例分析

2.1 实际通行能力的计算

本文以南昌市地铁 1 号线中八一馆站(普通站

点,人流量大)、双港站(首末站点)、南昌西站站(铁路枢纽站点)3个不同类型的车站为对象进行实地调研。对该3个站点的进出站自动检票闸机数据进行统计,采集了1100组有效数据。进站乘客所持车票均为非接触式IC卡,出站乘客所持车票类型有非接触式IC卡和磁卡两种。3种车站乘客进出站检票的乘客类别构成比例见表2所示。

表2 3种不同类型车站进出站检票的乘客类别构成比例
Tab.2 Composition of passenger types at AFC entry-exit gates at three types of stations %

乘客类型		八一馆站		双港站		南昌西站站	
		进站	出站	进站	出站	进站	出站
无包	中青年熟练	28.7	30.9	48.7	10.8	4.3	24.0
	中青年不熟练	7.4	8.4	3.2	1.4	3.2	2.8
	老年熟练	2.2	3.3	0.6	0.6	0.3	0.7
	老年不熟练	0	3.3	0.6	0	0	0
	小计	38.3	45.9	53.1	12.8	7.8	27.5
小包	中青年熟练	39.7	32.5	39.0	73.6	63.2	54.8
	中青年不熟练	11.0	17.5	2.6	2.8	7.3	8.3
	老年熟练	2.2	0.8	0.6	2.0	1.9	2.1
	老年不熟练	5.9	3.3	0.6	1.3	0.7	0.7
	小计	58.8	54.1	42.8	79.7	73.1	65.9
大包	中青年熟练	1.5	0	3.2	6.1	7.2	3.5
	中青年不熟练	0.1	0	0.6	0.8	7.8	3.5
	老年熟练	0.1	0	0	0.5	4.0	0
	老年不熟练	0	0	0	0.2	0.1	0
	小计	1.7	0	3.8	7.6	19.1	7.0

根据乘客构成统计出多种类别乘客通过自动检票闸机时的平均服务时间,加权后计算出自动检票闸机的平均服务时间,如表3所示。

表3 3种不同类型车站进出站检票闸机每人每次平均服务时间
Tab.3 Average service time per person of AFC entry-exit gates at three types of stations s/人次

乘客类型		八一馆站		双港站		南昌西站站	
		进站	出站	进站	出站	进站	出站
无包	中青年熟练	5.40	4.98	2.98	2.43	2.31	4.39
	中青年不熟练	7.72	6.44	5.69	4.45	6.32	6.48
	老年熟练	6.12	5.43	3.63	9.65	5.40	5.37
	老年不熟练	0	6.29	5.33	0	0	5.37
小包	中青年熟练	5.70	5.20	3.04	3.37	3.57	4.37
	中青年不熟练	7.80	6.87	5.32	5.99	6.67	6.60
	老年熟练	5.40	5.57	4.50	6.43	6.43	4.47
	老年不熟练	7.83	7.79	7.43	10.22	11.02	4.13
大包	中青年熟练	6.00	0	3.85	7.27	7.71	4.84
	中青年不熟练	7.43	0	10.77	7.91	10.82	7.73
	老年熟练	5.63	0	0	9.12	10.78	0
	老年不熟练	0	0	0	12.32	11.82	0

注:进出站检票闸机对不同乘客类别的平均服务时间的加权计算结果,八一馆进站为6.061s/人次,八一馆出站为5.623s/人次,双港站进站为3.270s/人次,双港站出站为4.050s/人次,南昌西进站为5.102s/人次,南昌西出站为4.899s/人次。

由式(4)、式(5)以及对高峰小时系数的灵活选取可以得到3种不同类型车站自动检票闸机实际通行能力分别为:

$$C_{1,八一馆进}=CF=\frac{3\ 600}{6.061}\times1.4=832\text{ (人次/h)}$$

$$C_{1,双港进}=CF=\frac{3\ 600}{3.270}\times1.2=1\ 322\text{ (人次/h)}$$

$$C_{1,南昌西进}=CF=\frac{3\ 600}{5.102}\times1.4=989\text{ (人次/h)}$$

双港站进站安检处与自动检票闸机口方向垂直,考虑到乘客选择偏好行为,故其进站自动检票闸机通行能力为:

$$C_{2,双港进}=C_{1,双港进}\psi=1\ 322\times0.94=1\ 242\text{ (人次/h)}$$

同理可以得到3种不同类型车站出站检票时自动检票闸机实际通行能力分别为:

$$C_{1,八一馆出}=CF=\frac{3\ 600}{5.623}\times1.4=898\text{ (人次/h)}$$

$$C_{1,双港出}=CF=\frac{3\ 600}{4.050}\times1.4=1\ 245\text{ (人次/h)}$$

$$C_{1,南昌西出}=CF=\frac{3\ 600}{4.899}\times1.4=1\ 029\text{ (人次/h)}$$

出站检票时自动检票闸机不考虑乘客选择偏好问题,但根据现场调查发现,出站检票时自动检票闸机每进行20次检票操作就会有一次失灵。故引入折减系数为19/20。得到的自动检票闸机实际通行能力如表4所示。

表4 自动检票闸机实际通行能力
Tab.4 Actual throughput capacity of an AFC gate

站点类型	车站名称	闸机实际通行能力/(人次/h)	
		进站	出站
普通站点	八一馆站	832	854
首末站点	双港站	1 242	1 183
铁路枢纽站点	南昌西站站	989	978

2.2 自动检票闸机每人每次服务时间分布拟合

针对以上3个站点的进出站自动检票闸机的每人每次服务时间,运用MATLAB软件,选取了4种概率分布方式:正态分布、负指数分布、定长分布和威布尔分布,对所收集到的数据进行函数拟合,绘制了相应的拟合曲线,如图2~图4所示。相对应的误差平方和(SSE)及可决系数(R-square)如表5所示。

通过表5中的数据可以得出:双港站进站自动检票闸机每人每次服务时间服从威布尔分布;双港站出站、八一馆站进出站、南昌西站站进出站自动检

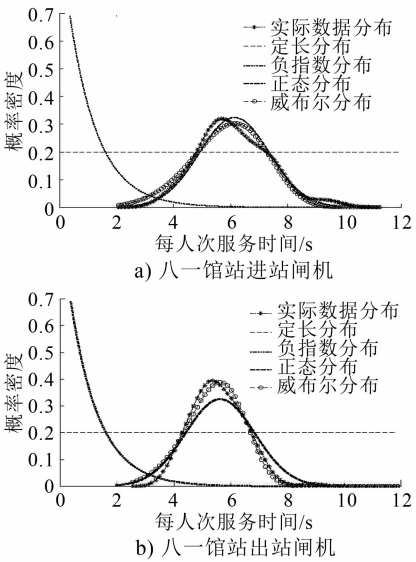


图 2 八一馆站进出站自动检票闸机服务时间分布
Fig. 2 Service time distribution of AFC entry-exit gates at Bayi Guan Station

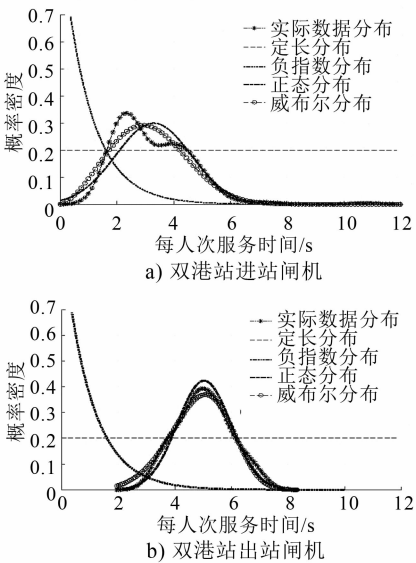


图 3 双港站进出站自动检票闸机服务时间分布
Fig. 3 Service time distribution of AFC entry-exit gates at Shuanggang Station

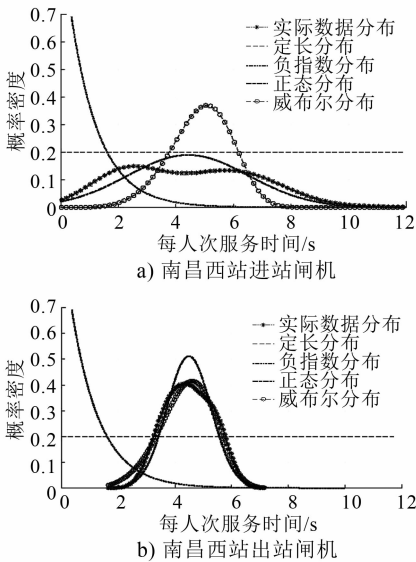


图 4 南昌西站进出站自动检票闸机每人每次服务时间分布
Fig. 4 Service time distribution of AFC entry-exit gates at Nanchang West Station

票闸机每人每次服务时间服从正态分布。因此,城市轨道交通各个类型车站自动检票闸机每人每次服务时间服从的分布函数不统一。

综上所述,乘客特性对自动检票闸机通行能力影响大,且不同功能定位的车站乘客构成也大不相同。在衔接铁路客运站的车站,携带大件行李的乘客占比大,外来乘客数量多,通过自动检票闸机的时间较长,通行能力下降;在首末站点和普通车站,携带大件行李的乘客占比小,中青年乘客占比高,通过自动检票闸机的时间相对较短,自动检票闸机通行能力相对较强。因此,在研究不同类型地铁车站自动检票闸机通行能力时,要综合考虑各种因素的影响及其影响程度,具体问题具体分析,不能一概而论。

3 结语

本文对南昌市地铁 1 号线是 3 种不同类型的地

表 5 各类型站点进出站自动检票闸机每人 次乘客服务时间拟合结果								
Tab.5 Fitting results of service time per passenger of AFC entry-exit gates at each type of station								
车站类型	车站名称	自动检票 闸机分类	SSE			R-square		
			负指数分布	正态分布	威布尔分布	负指数分布	正态分布	威布尔分布
首末站点	双港站	进站闸机	0.873 5	0.092 9	0.068 0	0.252 9	0.918 9	0.941 9
		出站闸机	0.460 8	0.004 6	0.013 5	0.668 5	0.996 7	0.990 3
普通站点	八一馆站	进站闸机	0.558 1	0.016 7	0.039 9	0.535 0	0.986 1	0.968 8
		出站闸机	1.188 0	0.006 3	0.025 8	0.234 0	0.995 9	0.983 2
铁路枢纽站点	南昌西站站	进站闸机	0.405 5	0.015 5		0.092 5	0.965 3	
		出站闸机	2.394 0	0.045 7	0.071 9	0.002 8	0.981 0	0.970 0

铁车站自动检票闸机的通行能力进行了系统的分析,并给出了相应的拟合曲线。可以得出,无论哪种类型的站点,其进出站检票闸机的通行能力远远小 GB 50157—2013《地铁设计规范》中所给的建议参考值 1 800 人/h,且进站闸机通常小于出站闸机的通行能力。本文研究乘客通过闸机的规律可为地铁车站优化运营、疏散等工作提供参考。

参考文献

- [1] 李三兵. 城市轨道交通车站客流特征与服务设施的关系研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
LI Sanbing. Study on the relationship of passenger flow and service facilities in urban rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
 - [2] 吴娇蓉,冯建栋,叶建红. 磁卡和 IC 卡并用检票闸机通行能力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010(1):85.
WU Jiaorong, FENG Jiandong, YE Jianhong. Capacity analysis of magnetic card and contactless IC card automatic fare gate in railway stations[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010(1):85.
 - [3] 常丹. 地铁行人微观行为参数量化研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
CHANG Dan. Quantified study of microscopic pedestrian behavior parameters in subway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
 - [4] 张毅. 城市轨道交通车站闸机运用优化研究[J]. 中国铁路, 2014(6):106.
 - ZHANG Yi. Study on optimizing usage of turnstiles in urban rail transit stations[J]. Chinese Railways, 2014(6):106.
 - [5] 王子甲,陈峰,罗诚. 轨道交通车站检票闸机布局的仿真优化[J]. 北京:北京交通大学学报,2011(6):28.
WANG Zijia, CHEN Feng, LUO Cheng. Optimization of fare gate layout in rail transit station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011(6):28.
 - [6] AIELLO G, ENEA M, GALANTE G. A multi-objective approach to facility layout problem by genetic search algorithm and Electre method[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2006(22):447.
 - [7] 翟向荣. 城市轨道交通车站设备通行能力匹配性研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
ZHAI Xiangrong. Research on matching of carrying capacity of facilities for urban rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
 - [8] 孙继东. 城市轨道交通车站乘客服务设施客流到达分布规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
SUN Jidong. Study on distribution law of passenger arrival of passenger service facilities in urban rail transit station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
 - [9] 周冠宇,莫逆,杨露. 北京地铁站厅闸机设置的调研与分析[J]. 城市轨道交通研究,2013(9):83.
ZHOU Guanyu, MO Ni, YANG Lu. On fare gate settings at station halls of Beijing metro[J]. Urban Mass Transit, 2013(9):83.
 - (收稿日期:2021-01-12)
-
- (上接第 161 页)
- [5] 柴沁虎,马国远,江亿,等. 带经济器的涡旋压缩机制冷循环热力学分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003(10):1401.
CHAI Qinhu, MA Guoyuan, JIANG Yi, et al. Thermodynamic analyses of scroll refrigeration system with economizer[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2003(10):1401.
 - [6] 马国远,彦启森. 涡旋压缩机经济器系统的试验研究[J]. 制冷学报,2002(1):27.
MA Guoyuan, YANG Qisen. Experimental research on scroll compressor with economizer for heat pump[J]. Journal of Refrigeration, 2002(1):27.
 - [7] 赵会霞,马国远. 涡旋压缩机闪发器系统性能的模拟分析[J]. 流体机械,2006(9):15.
ZHAO Huixia, MA Guoyuan. Performance simulation on economizer system coupled with scroll compressor[J]. Fluid Machinery, 2006(9):15.
 - [8] 赵会霞. 涡旋压缩机闪发器热泵系统的理论分析与试验研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.
ZHAO Huixia. Theoretical analysis and experimental study on heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
 - [9] 罗荣邦,张鹏,王飞,等. 闪发器热泵系统设计与试验研究[J]. 制冷与空调,2018(5):42.
LUO Rongbang, ZHANG Peng, WANG Fei, et al. Design and experimental study on flash tank heat pump system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018(5):42.
 - [10] 陈浩. 大型电动客车热泵空调系统设计与试验研究[D]. 郑州:中原工学院,2016.
CHEN Hao. Performance evaluation and design of heat pump air conditioning for electric bus[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2016.
 - (收稿日期:2019-11-13)