



基于排队论的高铁车站安检设备 运用优化研究

姚加林, 潘学成

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 在高速铁路车站的进站流程中, 旅客的进站安检是确保旅客安全乘车的重要环节。国内高铁车站均配置了一定数量的安检设备, 而安检设备的运用开放数量则直接决定了单位时间内安检系统的平均队长。通过对实测数据拟合, 验证安检区域旅客到达和离开过程均服从泊松分布, 利用排队论建立车站安检设备运用开放数量与实时客流需求相匹配的优化模型, 并基于边际分析法, 运用 MATLAB 编程, 求出不同客流条件下所对应的安检设备最优开放数量。实例表明, 该方法可以有效地求出安检设备最优开放台数, 使得车站安检设备的运用管理费和旅客排队等待时间成本之和最小。本文研究内容对我国高铁车站安检设备的运用具有一定的参考意义。

关键词: 高铁车站; 排队论; 边际分析法; 安检开放数量

中图分类号: U293

文献标志码: A

文章编号: 1672-7029(2020)08-1919-07

Research on application by optimization of security inspection equipment in high-speed railway station based on queuing theory

YAO Jialin, PAN Xuecheng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In the process of entering a high-speed railway station, the security inspection is an important link to ensure the safety of passengers. Domestic high-speed railway stations are equipped with a certain number of security inspection equipment, and the number of open security inspection devices directly determines the average queue length of the security system per unit time. By fitting the measured data, this paper verified that the arrival and departure processes of passengers in the security inspection area obey poisson distribution. By using queuing theory, an optimization model is established to match the open quantity of security inspection equipment with the demand of real-time passenger flow. And based on the marginal analysis, MATLAB programming is used to find out the optimal number of security inspection equipment under different passenger flow conditions. The example shows that this method can effectively calculate the optimal number of security inspection devices, and minimize the sum of operating management fee and waiting time cost of the security inspection devices at the station. The results of this paper has certain significance for the application of security inspection equipment in China's high-speed railway stations.

Key words: high-speed railway station; queuing theory; marginal analysis; number of security inspection openings

收稿日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金重点资助项目(U1834209)

通信作者: 姚加林(1961-), 男, 湖南娄底人, 副教授, 从事交通运输规划与管理研究; E-mail: yaojialn@csu.edu.cn

近年来,随着人们选择高铁出行方式的比例急剧增加,高铁车站的运营管理显得尤为重要。车站的进站流程主要包括:旅客的取购票、实名制验票、进站安检、候车厅候车、检票上车等环节。其中旅客的进站安检环节是必不可少的。不同客流条件下合理开放安检设备的数量对旅客进站时长和安检运用管理费用具有重要意义。而现行车站在这方面的管理还不够完善,大都基于人为经验,依据现场观察客流的多少来随机决定设备的开放台数,具有一定的主观随意性。若某时段安检设备开放数量过多,虽能让旅客快速通过安检进站,但却会造成资源的浪费;而反之安检设备数量若开放过少,则会导致安检系统平均队长及旅客平均等待时间过长。因此研究如何在不同客流条件下合理开放安检设备的数量,在降低设备运用管理费以及避免安检系统平均队长过长的过程中,具有十分重要的意义。在设备的合理配置和运用开放方面,研究者大多采用 $X/Y/C$ 排队模型。其中 X 代表旅客相继到达的间隔时间分布, Y 代表设备服务时间分布, C 代表服务台数。刘忠铁等^[1]在 $M/M/1$ 和 $M/M/N2$ 类排队模型的基础上,构建 2 种反恐警力优化配置模型,并分别求解出最优警力配置方案。彭绪亚等^[2]提出一种以排队论为基础的转运站设备配置方法,构建了垃圾转运站排队服务系统费用模型,以系统总费用最小来进行转运站压缩设备的配置。曹豪荣等^[3]提出顾客在有限来源情况下的 $M/M/1/m/m$ 的排队系统求解方法,由此得到基于快速施工的最优机械配套方案。龙泓玥^[4]基于排队论对高峰期进站自动检票设施处产生的排队客流进行分析,提出了排队系统相关参数,并构建了综合效益目标函数,进而建立进站自动检票机配置优化模型。李波^[5]依据地铁站客流全过程流线构建了客流组织优化模型,基于通行时间费用和设施建设费用,建立了服务设施优化模型,并各自提出了求解算法。李三兵^[6]采用一般解析法,研究了地铁车站自动扶梯、安检设施、自动检票闸机的实际最大通过能力和这些设施在客流高峰时段的乘客排队情况。姜耀武^[7]基于高峰小时发送量,采用蒙特卡罗模拟方法建立 $M/E_k/C$ 安检排队模型,模拟出相关排队参数。肖金梅^[8]在安检环节,选择了 $M/M/C$ 排队模型,并假设在 $[0,t)$ 时间内到达的乘客数服从泊松分布。王瑶等^[9]采用

枚举法得出不同时段客流量下验证检票口的最佳开放数量。而在国外,很多铁路车站并没有设置安检设备,因此几乎没有这方面的研究。但在排队论方面,Haghighinejad 等^[10-14]将排队论运用到医疗、交通等领域,解决了设备的配置优化问题。WANG 等^[15]用 $M/M/c$ 模型对银行客户排队服务进行模拟,并得到银行柜台开放台数的最优解。以上研究,存在以下几点不足:1) 没有对实测数据进行拟合,更多是直接默认旅客到达过程及设备服务过程服从某种分布;2) 没有给出不同客流条件下所对应的设备最优开放数量,只选取了某一个时段或直接用高峰小时的客流数据计算,不具有普适性;3) 无论是国内还是国外,在车站安检设备的开放数量研究方面很少。考虑到以上这些问题,本文调研了不同日期分时段的客流数据,并通过对数据拟合检验得到旅客到达及离开安检系统的过程均服从泊松分布的规律,求出各时段旅客的平均到达率及每台安检设备的平均服务率。最后用 MATLAB 编程求解边际分析法,得到不同时段客流条件下所对应的安检设备最优开放数量,使得单位时间车站安检设备的运用管理费和旅客排队等待时间成本之和最小,提高了经济性。

1 高铁车站安检区域排队分析

在高铁安检系统中,待检旅客和安检服务设备组成一个多服务台等待制排队系统,其要素包括旅客到达过程、排队规则、安检服务设备 3 个基本组成部分。

1) 旅客到达过程。安检区域旅客到达是一个随机动态过程,在各个不相交的时间区间内到达安检区域的旅客是独立的。

2) 排队规则。安检区域旅客以先到先服务规则接受服务,且为等待制,旅客可根据安检区域的排队情况选择相对较短的队列接受服务。若旅客到达安检区域时,有开放空闲的安检设备,则可直接接受服务;反之则需要排队等待服务,旅客在接受服务完成之后离开安检区域。

3) 安检服务设备。安检设备单位时间的服务人数为确定型,因而安检设备的最优开放数量可以随客流量的变化实行动态控制。

2 安检设备运用开放模型

2.1 模型构建

在安检系统中,旅客单位时间的等待费用等于安检系统的平均队长乘以每个旅客在系统中逗留单位时间的费用;安检设备的运用管理费又直接取决于安检设备的开放数量。因此,结合安检排队理论,建立安检设备运用开放数量优化模型。

该模型的目标函数为单位时间车站安检设备的运用管理费和旅客排队等待费用之和,决策变量为安检设备的开放数量,建立如下安检设备运用开放数量优化模型:

$$\begin{aligned} \min f(m) &= b_1 m + b_2 L_s \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} m \leq N \\ \rho = \lambda / m\mu < 1 \\ b_1, b_2, m, L_s \geq 0 \text{ 且 } m \text{ 为整数} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: b_1 为每台安检设备单位时间的运用管理费; b_2 为每个旅客在系统逗留单位时间的费用; m 为安检设备的开放数量; L_q 为等待队伍的期望值; L_s 为安检系统的平均队长; N 为安检设备可以开放的最大数量; 模型中, 只有 m 和 L_s 为变量, 且 L_s 的值由 m 所决定, 因此目标函数中只有 m 为决策变量。利用排队论求出排队系统相关参数, 并依据模型的目标函数值取最小, 求出不同时段客流条件下所对应的安检设备最优开放台数。

2.2 模型中各参数的确定

1) 排队系统参数: 在安检系统中, 安检设备不止一台, 而每台安检设备排队的人数虽然是有容量限制的, 但是对于整个安检系统来说, 即便不同时段旅客的到达情况不同、旅客对安检仪的选择、旅客受自身因素或其他排队队伍队长及服务效率的影响而选择换队, 造成旅客在安检区域的移动, 以及安检区域的空间容量、设备的开放数量等相关参数均会影响安检排队系统, 使得安检区域相当拥挤混乱, 但也不存在旅客被拒绝进入的情况, 且顾客来源无限, 符合先到先服务的等待制规则, 且先假设单位时间旅客到达和离开安检过程均服从泊松分布, 后面会基于实测数据进行验证。因此可建立 M/M/n /∞/∞/ FCFS 多通道排队模型。

服务率为 μ , 安检设备开放台数为 m , 则系统的服务强度

$$\rho = \lambda / m\mu \quad (2)$$

安检系统内无旅客的概率

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{m-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^m}{m!} \left(\frac{m\mu}{m\mu - \lambda} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

安检系统内排队顾客的平均数

$$L_q = \frac{(\lambda/\mu)^m \lambda \mu}{(m-1)!(m\mu - \lambda)^2} P_0 \quad (4)$$

安检系统的平均队长

$$L_s = L_q + \lambda / \mu \quad (5)$$

2) 旅客时间价值: 采用收入法进行估算, 其公式为

$$VOT = INT / T \quad (6)$$

式中: VOT 为旅客单位小时内的平均时间价值, 可近似转化为模型中的 b_2 , INT 为人均年收入, T 为年工作小时数。

3) 每台安检设备单位时间的运用管理费: 主要包括员工工资, 安检设备折旧费, 损耗费用等, 即对 b_1 的确定。

2.3 模型求解

由于安检设备开放数量 m 只能取整数, 目标函数并不连续, 则无法用目标函数对 m 求导, 故采用边际分析法来求解最优开放数量 m^* , 且要求目标函数取最小值, 即

$$\begin{cases} f(m^*) \leq f(m^* - 1) \\ f(m^*) \leq f(m^* + 1) \end{cases} \quad (7)$$

将式(1)代入到式(7)中, 得到

$$\begin{cases} b_1 m^* + b_2 L_s(m^*) \leq b_1(m^* - 1) + b_2 L_s(m^* - 1) \\ b_1 m^* + b_2 L_s(m^*) \leq b_1(m^* + 1) + b_2 L_s(m^* + 1) \end{cases} \quad (8)$$

继续化简可得

$$L_s(m^*) - L_s(m^* + 1) \leq b_1 / b_2 \leq L_s(m^* - 1) - L_s(m^*) \quad (9)$$

3 应用实例

以长沙南站西进站口安检区域为验证实例, 该安检区域设有 10 台安检设备。在安检设备的运用

过程中,经常出现设备数量开放过多而导致资源浪费或过少导致该时段安检系统平均队长较长,造成安检区域旅客等待时间较久的情况。因此,对现场调查的相关客流数据拟合,并基于安检设备运用开放数量优化模型进行计算。

1) 调查时段每半小时内的平均到达率 λ 。分时段调查旅客到达安检区域的人数,并换算成该时段的平均到达率,且不同时段安检区域的旅客平均到达率不同。在调查过程中,分别调查了工作日、周末、以及节假日的客流数据,且按不同日期将全天分为低峰,平峰,高峰3个时段。以某工作日高峰时段半小时3:00~3:30的客流数据为例,现场记录数据过程中,以每6s钟为单位时间记录一次到达安检区域的旅客数量,共得到300份有效数据,对这些数据进行统计分析,结果如图1所示。

运用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验,对安检区域旅客到达过程是否服从泊松分布进行检验,结果如表1所示。

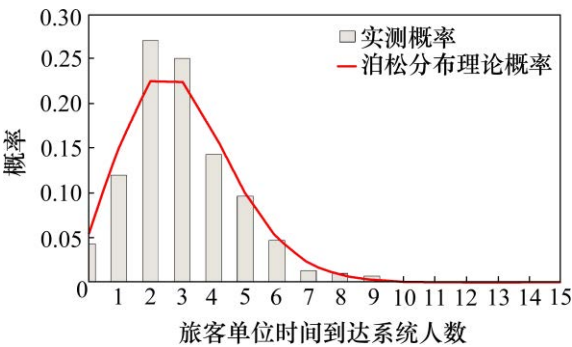


图1 旅客单位时间到达系统人数

Fig. 1 Number of passengers arriving in the system per unit time

表1 旅客到达过程各检验参数

Table 1 Passenger arrival process of each inspection parameters		
泊松分布各参数		参数取值
N		300
均值		2.98
绝对值		0.039
最极端差别	正	0.032
	负	-0.039
Kolmogorov-Smirnov Z		0.672
渐进显著性(双侧)		0.757

由表1可知,渐进显著性参数值为0.757,大于0.05,因此安检区域旅客到达过程服从泊松分布,且其均值为2.98人/(6s),即可得到该时段安检区域旅客平均到达率为29.8人/min,取整为 $\lambda=30$ 人/min。其他各时段的调查数据经拟合检验同样服从泊松分布,并可依次求得不同客流条件下的平均到达率 λ 。

2) 每台安检设备的平均服务率 μ 。同样调查了某时段5h内的安检服务人数,现场记录数据过程中,以每1min为单位时间记录1次每台安检设备前旅客离开安检区域的人数,共得到300份有效数据,对这些数据进行统计分析,结果如图2所示。

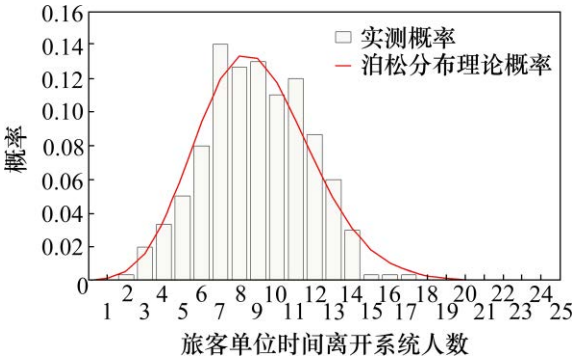


图2 每台安检设备前旅客单位时间离开系统人数

Fig. 2 Number of passengers leaving the system per unit time before each security device

同样运用K-S检验,对单位时间旅客被服务完成后离开安检区域人数是否服从泊松分布进行检验,结果如表2所示。

表2 旅客离开过程各检验参数

Table 2 Passenger departure process of each inspection parameters		
泊松分布各参数		参数取值
N		300
均值		8.91
绝对值		0.030
最极端差别	正	0.030
	负	-0.028
Kolmogorov-Smirnov Z		0.512
渐进显著性(双侧)		0.956

由表 2 可知, 渐进显著性参数值为 0.956, 大于 0.05, 因此旅客离开安检过程也服从泊松分布, 即相邻 2 个旅客的服务间隔时间服从指数分布, 得到每台安检设备平均服务率为 8.91 人/min, 取整为 $\mu=9$ 人/min。

3) 相关费用。对长沙南站旅客进行现场问卷调查, 并统计分析其工资收入, 采用收入法, 估算得到旅客的平均时间价值, 近似为每个旅客在系统逗留单位时间的费用 $b_2=34$ 元/h, 并根据对长沙南站工作人员的问询, 推算出每台安检设备运用管理费 $b_1=53.4$ 元/h, 因此得到边际分析法 $b_1/b_2=1.57$ 。

4) 计算结果。运用 MATLAB 进行编程, 基于目标函数取最小值。统计分析各时段每半小时内的客流数据, 并拟合成该时段安检区域单位时间到达

率 λ , 及每台安检设备平均服务率 μ , 得到相应的安检设备最优开放台数 m^* , 安检系统的平均队长如图 3 所示。

由于旅客的年龄、身体状况、携带行李包裹的数量和大小、是否携带违规物品以及安检员与安检仪器的服务协调性等参数均会影响到安检服务效率, 进而影响到安检设备的运用。考虑到这些参数的情况下, 在提高安检设备的服务效率后, 对每台安检设备单位时间的服务人数进行拟合检验, 得到旅客离开安检过程同样服从泊松分布, 每台安检设备平均服务率达到 $\mu=11$ 人/min, 此时在不同到达率下的安检最优开放数量以及系统平均队长计算结果如图 4 所示。

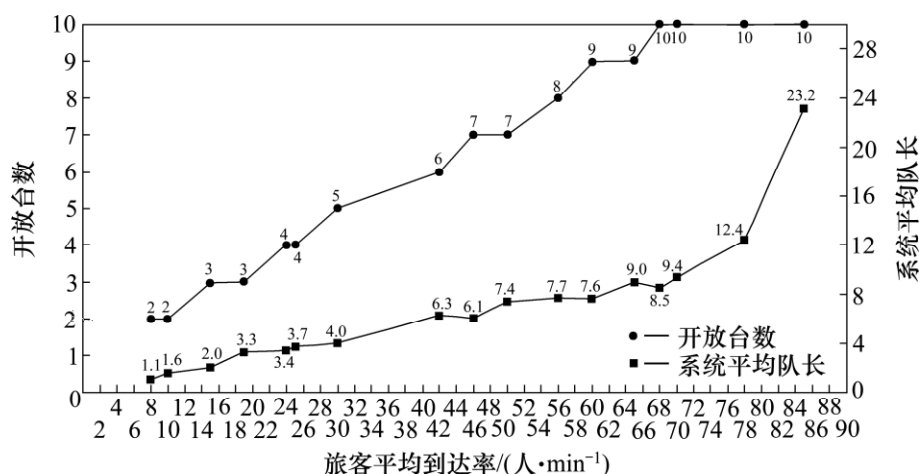


图 3 $\mu=9$ 人/min 时, 不同到达率下的安检最优开放数量和平均队长

Fig. 3 When $\mu=9$ persons/min, the optimal number and average length of security clearance at different arrival rates

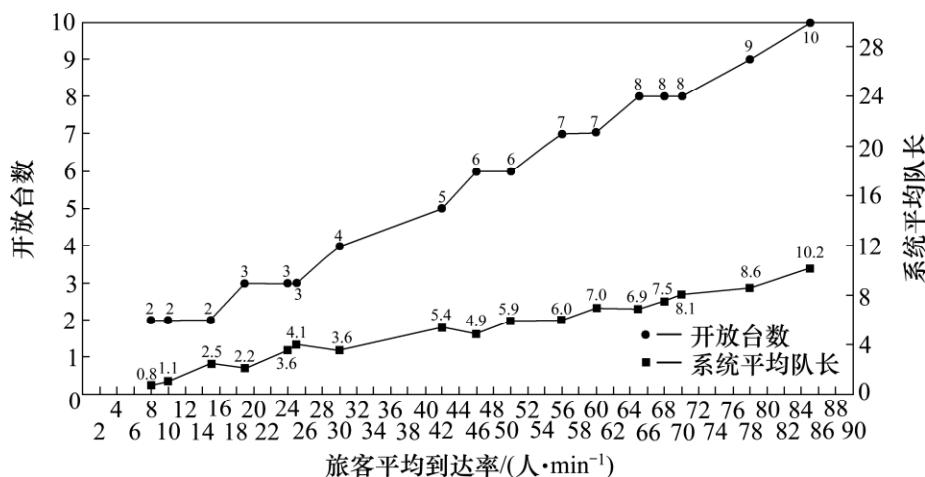


图 4 $\mu=11$ 人/min 时, 不同到达率下的安检最优开放数量和平均队长

Fig. 4 When $\mu=11$ persons/min, the optimal number and average length of security clearance at different arrival rates

由图3可以看出,当旅客平均到达率 λ 达到78人/min时,安检系统的平均队长有一个突变,且增长速度较快,说明在当前服务率下,若旅客单位时间到达人数继续增多,安检系统平均队长会快速增加。

由图4可以看出,在提高安检设备的服务水平之后,安检系统的平均队长变化比较稳定,不会出现某个时段平均队长快速增加的情况。

由图3和图4可以看出,当开放相同数量的安检设备,随着旅客到达率的增加,安检系统的平均队长也会呈一定增加,符合实际情况。

4 结论

1) 通过对现场分时段的调查数据进行拟合,验证了高铁车站安检区域旅客到达过程和服务过程均服从泊松分布。

2) 运用排队理论建立车站安检设备运用开放数量与实时客流需求相匹配的优化模型。其优化结果可得出,只要给出一定时段内安检区域的到达人数,就能合理匹配出该时段安检设备的最优开放数量,在一定程度上解决了现行车站对安检设备运用的主观随意性。通过实例计算,证明了该模型的有效性。

3) 基于排队论,运用边际分析法进行安检设备运用开放数量优化研究,使得单位时间车站安检设备的运用管理费和旅客排队等待时间成本之和最小,提高了经济性;且该模型对我国高铁车站安检设备的运用具有一定的参考意义,为旅客提供优质服务的同时,降低车站安检设备的运用管理费。

参考文献:

- [1] 刘忠轶, 胡晨望, 谭坤, 等. 基于排队论的反恐警力优化配置策略研究[J]. 数据分析与知识发现, 2018(10): 37-45.
LIU Zhongyi, HU Chenwang, TAN Kun, et al. Research on optimization configuration strategy of Anti-terrorist police based on queuing theory[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2018(10): 37-45.
- [2] 彭绪亚, 刘长玮, 刘国涛, 等. 排队论在垃圾转运站设备优化配置中的应用[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(3):

237-241.

- PENG Xuya, LIU Changwei, LIU Guotao, et al. Application of queuing theory in equipment optimization configuration of waste transfer station[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(3): 237-241.
- [3] 曹豪荣, 彭立敏, 杜昆, 等. 基于排队论的中硬围岩长大隧道施工机群优化配置方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 535-541.
CAO Haorong, PENG Limin, DU Kun, et al. Optimization configuration method of medium-hard surrounding rock long tunnel construction machine group based on queuing theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 535-541.
- [4] 龙泓玥. 城市轨道交通进站自动检票机配置优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 25-36.
LONG Hongyue. Research on configuration optimization of automatic ticket checker in urban rail transit station [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 25-36.
- [5] 李波. 基于排队论的地铁站服务效率优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 27-33.
LI Bo. Study on service efficiency optimization of subway station based on queuing theory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 27-33.
- [6] 李三兵. 城市轨道交通车站客流特征及服务设施关系的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 37-39.
LI Sanbing. Research on passenger flow characteristics and service facilities relationship of urban rail transit stations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 37-39.
- [7] 姜耀武. 高速铁路车站售票及安检设备数量配置研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 47-55.
JIANG Yaowu. Research on the quantity configuration of ticket and security check equipment in high-speed railway station[D]. Changsha: Central South University, 2013: 47-55.
- [8] 肖金梅. 城际铁路客运站旅客服务设施规模与布局研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 30-32.
XIAO Jinmei. Study on scale and layout of passenger service facilities in intercity railway passenger stations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 30-32.
- [9] 王瑶, 崔艳萍, 凌熙. 基于排队论的车站验证检票口数量优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2012, 34(8): 34-38.

- WANG Yao, CUI Yanping, LING Xi. Research on the optimization of the number of ticket verification ports in railway station based on queuing theory[J]. Railway Transport & Economy, 2012, 34 (8): 34–38.
- [10] Haghighinejad H A, Kharazmi E, Hatam N, et al. Using queuing theory and simulation modelling to reduce waiting times in an Iranian emergency department[J]. International Journal of Community Based Nursing and Midwifery, 2016, 4(1): 11–26.
- [11] Naima S, Odd I L. Application of queuing methodology to analyze congestion: a case study of the manila international container terminal, philippines[J]. Case Studies on Transport Policy, 2016, 4(2): 143–149.
- [12] Artur K, Tomasz K. A model of check-in system management to reduce the security check point variability[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 74: 80–98.
- [13] JIANG Y, LIN X, AN D, et al. Simulation optimization of ticket vending machines' configuration in metro station considering randomness and level of service[J]. Dongnan Daxue Xuebao, 2014, 44(2): 430–435.
- [14] Mckelvey F X. Use of an analytical queuing model for airport terminal design[J]. Transportation Research Record, 1989, 1199: 4–11.
- [15] WANG Y, CHENG Q, CAO J. Optimized M/M/c model and simulation for bank queuing system[C]// 2010 IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences (ICSESS), 2010: 474–477.
- (编辑 蒋学东)