

7-2-2020

## Queuing System Simulation Optimization of Subway Stair Width

Yangsheng Jiang

*1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;;2. Key Laboratory of Comprehensive Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610031, Sichuan, China;;3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

Juanxiu Zhu

*1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;;2. Key Laboratory of Comprehensive Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610031, Sichuan, China;;3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

Hu Lu

*1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;;2. Key Laboratory of Comprehensive Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610031, Sichuan, China;;3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

Shifan Han

*1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;;2. Key Laboratory of Comprehensive Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610031, Sichuan, China;;3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Queuing System Simulation Optimization of Subway Stair Width

### Abstract

**Abstract:** Subway stair and passenger flow are described as a  $G/G(n, \varphi)/C/C$  state-dependent queuing system with a general random arrival interval and the general random service time that depends on the passengers number  $n$  and stair gradient  $\varphi$ . Simulation model of the queuing system was designed and optimization algorithm was developed. Thus, a new optimization method based on queuing system simulation for subway stair width was proposed. The simulation optimization method, the  $M/G(n)/C/C$ , and the  $D/D/1/C$  queuing model (the existing design code) were compared. The results show that: the stair widths of the proposed method are larger than those of the other two methods and satisfy the desired level of service under various passenger flows, while widths of the other two methods fail to meet the requirement in most cases; the new method brings significant improvement in performance measures and has high elasticity coefficient of performance measures.

### Keywords

urban rail transit, width design, simulation optimization, stair, randomness, state-dependence

### Recommended Citation

Jiang Yangsheng, Zhu Juanxiu, Hu Lu, Han Shifan. Queuing System Simulation Optimization of Subway Stair Width[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 129-138.

## 地铁楼梯宽度的排队系统仿真优化

蒋阳升<sup>1,2,3</sup>, 朱娟秀<sup>1,2,3</sup>, 胡路<sup>1,2,3</sup>, 韩世凡<sup>1,2,3</sup>(1. 西南交通大学交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 综合运输四川省重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 将楼梯及客流抽象为到达和服务均具有一般随机性且服务时间与楼梯上的行人数  $n$  和楼梯角度  $\varphi$  相关的  $G/G(n, \varphi)/C/C$  状态相关排队系统, 建立离散事件仿真模型并设计宽度优化算法, 提出一种新的基于排队系统仿真模型的楼梯宽度优化方法。将该方法与现有  $M/G(n)/C/C$  解析优化方法和  $D/D/1/C$  解析优化方法(现有地铁设计规范)进行对比。结果显示: 仿真优化方法得到的宽度值更高且能满足各种客流条件下的设计服务水平要求; 2种解析优化方法得到的宽度不能满足绝大多数客流条件下的设计服务水平要求; 相比之下, 仿真优化方法带来了楼梯性能的明显改善且具有较高的指标-宽度弹性系数。

**关键词:** 城市轨道交通; 宽度设计; 仿真优化; 楼梯; 随机性; 状态相关性

中图分类号: U291.69 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0129-10

## Queuing System Simulation Optimization of Subway Stair Width

Jiang Yangsheng<sup>1,2,3</sup>, Zhu Juanxiu<sup>1,2,3</sup>, Hu Lu<sup>1,2,3</sup>, Han Shifan<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Comprehensive Transportation of Sichuan Province, Chengdu 610031, Sichuan, China;

3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Subway stair and passenger flow are described as a  $G/G(n, \varphi)/C/C$  state-dependent queuing system with a general random arrival interval and the general random service time that depends on the passengers number  $n$  and stair gradient  $\varphi$ . Simulation model of the queuing system was designed and optimization algorithm was developed. Thus, a new optimization method based on queuing system simulation for subway stair width was proposed. The simulation optimization method, the  $M/G(n)/C/C$ , and the  $D/D/1/C$  queuing model (the existing design code) were compared. The results show that: the stair widths of the proposed method are larger than those of the other two methods and satisfy the desired level of service under various passenger flows, while widths of the other two methods fail to meet the requirement in most cases; the new method brings significant improvement in performance measures and has high elasticity coefficient of performance measures.

**Keywords:** urban rail transit; width design; simulation optimization; stair; randomness; state-dependence

## 引言

楼梯是地铁车站中重要的垂直运输设施, 楼梯



收稿日期: 2014-09-13 修回日期: 2015-01-16;  
基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51108391);  
作者简介: 蒋阳升(1976-), 男, 湖南衡阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为城市轨道交通规划; 朱娟秀(1989-), 女, 四川南充, 博士生, 研究方向为城市轨道交通规划。

宽度直接影响楼梯的服务水平和疏散效率。美国《公共交通通行能力和服务质量手册》<sup>[1]</sup>和我国《地铁设计规范》<sup>[2]</sup>均利用到达率除以服务率得到楼梯宽度, 该方法操作简单, 但是完全忽略了客流到达和服务(即通过楼梯的过程)的随机性以及服务时间(行人通过楼梯的时间)的状态相关性(服务时间依赖于系统状态, 即楼梯内的人数), 同

时也没有考虑楼梯角度对服务时间的影响。因此,现实生活中,特别是在北京、上海和广州等大城市,地铁站楼梯即便在远期高峰客流量尚未达到时,也经常出现过度拥挤、服务水平低下等现象,严重时还会发生踩踏等不安全事故(第 3 节设计的大量实验也印证了这一现象)。由此说明,根据现有规范设计的楼梯宽度并不能满足实际需求。蒋阳升<sup>[3]</sup>在国家自然科学基金青年项目(编号:51108391)中也对此进行了论证,并指出建立考虑客流到达和服务的随机性以及服务的状态相关性等因素的车站规划设计方法具有重要的理论价值和实践意义。

观察行人到达楼梯、走行、离开楼梯的过程可以发现,其本质可视为排队系统。事实上,地铁设计规范<sup>[1-2]</sup>采用定长分布(D)描述客流的到达间隔和服务时间,等同于把楼梯及行人抽象为 D/D/1/C 确定型排队系统。但实际客流的到达间隔和服务时间都是随机的,并且服务时间会随着系统状态  $n$ (楼梯上的行人数量)的变化而变化,即服务时间还具有状态相关性。此外,现实中的楼梯角度  $\varphi$  并不统一,不同的楼梯角度不仅会影响行人的舒适度和安全性,还会影响行人的行走速度<sup>[1]</sup>,从而影响楼梯服务时间。以上原因导致 D/D/1/C 确定型排队系统无法准确描述楼梯系统的排队现象,以此为基础设计的楼梯宽度也不能满足实际需求。

为此,现有研究多将楼梯及客流抽象为随机排队系统,并建立相应的排队模型进行研究。这类研究主要有:蒋阳升等<sup>[4]</sup>、Lovas<sup>[5]</sup>建立了包括楼梯在内的地铁站设施的 M/G/1 排队模型;进一步,Yuhaski 等<sup>[6]</sup>建立了行人到达间隔服从指数分布(M)、服务时间服从一般分布(G)的 M/G(n)/C/C 状态相关排队解析模型并实现了楼梯宽度的优化;在此基础上,Cheah 等<sup>[7]</sup>、陈绍宽等<sup>[8]</sup>运用 M/G(n)/C/C 状态相关排队网络解析模型对包括楼梯在内的行人交通设施网络进行了优化和评价。这类研究显示排队系统在交通服务设施设计领域已得到广泛应用,同时表明状态相关的随

机排队系统在楼梯及客流系统的描述上具有明显的优越性,为本文的研究奠定了基础。但是,这类研究也存在不足:一方面,以上研究均假设客流到达间隔服从变异系数恒为 1 的指数分布 M,而实际中客流到达间隔的变异系数多变,指数分布的假设并不合理(具体参见作者在文献[9-10]中的研究);另一方面,上述研究只涉及服务时间均值的状态相关性,而忽略了其标准差的状态相关性;此外,与地铁设计规范<sup>[1-2]</sup>类似,上述研究也忽略了楼梯角度  $\varphi$  对服务时间的影响。

鉴于此,本文拟将楼梯及客流抽象为到达和服务均具有一般随机性且服务时间与系统状态  $n$  和楼梯角度  $\varphi$  相关的 G/G(n,  $\varphi$ )/C/C 排队系统进行处理。由于一般分布 G 缺乏马尔可夫性,因此从解析建模的角度去求解 G/G(n,  $\varphi$ )/C/C 排队系统的难度非常大。离散事件仿真技术的发展与应用使得排队系统仿真建模成为可能,为本文求解 G/G(n,  $\varphi$ )/C/C 排队系统以及进行参数优化奠定了基础。值得说明的是:本文的排队系统仿真建模研究不同于“基于设施的具体物理形态和行人个体参数进行微观层面的仿真建模研究(如元胞自动机模型、社会力模型和格子气模型等)”<sup>(郭谨一等<sup>[11]</sup>)</sup>;后者要求给出设施的具体物理形态和复杂的行人个体参数,只能实现有限配置方案的评选,难以在设计阶段实现设施配置方案的优化;而前者只依赖于设施的设计参数和行人群体的统计规律,为实现楼梯宽度的优化提供了可能。

综上所述,本文首先将楼梯及行人系统抽象为 G/G(n,  $\varphi$ )/C/C 排队系统,然后建立该排队系统的离散事件仿真模型,以此实现对楼梯及行人排队系统的准确模拟,最后在仿真模型的基础上设计宽度优化算法,实现楼梯宽度优化。

## 1 楼梯排队系统

### 1.1 楼梯排队系统描述

文中涉及的楼梯主要参数如下:楼梯长用  $L$  表示,宽用  $W$  表示, $L$  和  $W$  均以 m 为单位;倾角

用  $\varphi$  表示, 以 rad 为单位。如无特殊说明,  $L$  均指楼梯斜边长,  $W$  均指有效宽度(实际宽度为在有效宽度的基础上, 每侧增加 0.5 m 的缓冲区域<sup>[1]</sup>)。楼梯容量(最多能容纳的人数)记为  $C$ 。根据 Tregenza<sup>[12]</sup>, 楼梯容量可以表示为  $C=[k \cdot L \cdot W \cdot \cos\varphi]$ 。其中,  $k$  为楼梯最大行人密度, 通常取 5 人/m<sup>2</sup>。

楼梯内最多可以容纳  $C$  人, 因此, 可以把具有任意到达规律和服务规律的楼梯视为有  $C$  个服务台的 G/G/C/C 排队系统。但是  $C$  数量巨大, G/G/C/C 排队系统不仅不利于仿真模拟, 同时会带来优化效率低下等一系列问题。因此, 为了简化操作, 应将楼梯排队系统简化: 对于供单向客流通行的楼梯, 如图 1~2, 在楼梯出口处设置一虚拟检测线, 将行人到达虚拟检测线的时刻认为是行人离开楼梯的时刻, 假定前一个行人离开楼梯时下一个行人立即开始接受服务, 那么相邻行人离开楼梯的时间间隔可以视为排队系统服务台的服务时间, 如此即可将楼梯系统简化抽象为一个队列、一个服务台的 G/G/1/C 排队系统, 如图 3。文献[7]为这种简化思路的准确性提供了依据。对于供双向客流通行的楼梯, 如图 4, 应先将两股客流  $A_1, A_2$  等效转化为一股混合客流, 再按同样的方法处理, 具体转化方法参考 Yuhaski 等<sup>[6]</sup>。



图 3 楼梯排队系统

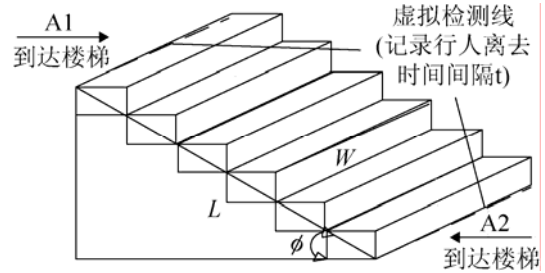


图 4 双向客流楼梯

### 1.2 楼梯客流到达规律和服务规律

根据作者所在课题组对北京及成都地铁出入口楼梯客流的调查分析, 10 种常用分布中伽马分布对楼梯到达规律的总体拟合效果最佳<sup>[10]</sup>。因此, 本文采用伽马分布描述客流到达规律。根据远期高峰小时客流量  $q$  和超高峰系数  $k$ , 可得到超高峰客流到达间隔均值  $EA$  和变异系数  $cv$ :

$$EA=3\ 600/(q \cdot k) \tag{1}$$

$$cv=(1/k-1)\sqrt{e^{6.819/k}/(4/k-1)} \tag{2}$$

根据均值  $EA$  和变异系数  $cv$ , 可以计算伽马分布的两个参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 其中,  $\alpha=EA/\beta, \beta=cv^2 \cdot EA$ 。

楼梯的流率  $Q$  为每秒内通过楼梯横断面的人数, 由于楼梯各横断面相同, 因而  $Q$  也是每秒内离开楼梯的行人人数,  $1/Q$  就是行人离开楼梯出口的时间间隔。根据 1.1 节, 行人离开楼梯的时间间隔即为 G/G/1/C 排队系统中服务台的服务时间。由交通流理论有  $Q=k \cdot v=n \cdot v/L$ , 其中,  $v$  为楼梯上的行人斜向速度,  $k$  为斜向密度,  $n$  为状态。因此, 有服务时间  $t_n=1/Q=L/(n \cdot v)$ 。为考虑服务时间的随机性, 引入随机变量  $T_n$ :

$$T_n=L/(n \cdot V_n) \tag{3}$$

其中,  $V_n$  为行人速度随机变量, 其它符号含义同上文。赵宇刚<sup>[13]</sup>通过北京地铁的大量数据验证了

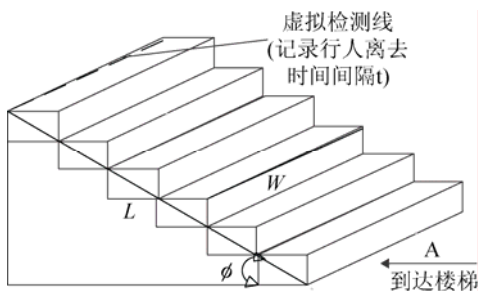


图 1 上行客流楼梯

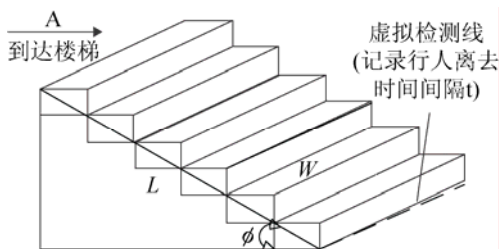


图 2 下行客流楼梯

对数正态分布能够比正态分布更好地拟合行人速度，即  $V_n$  可以描述为

$$V_n \sim \text{Log-N}(\mu'_n, \sigma'_n) \quad (4)$$

其中： $\mu'_n = \ln(v_n) - 0.5 \cdot \ln[1 + (\sigma_n/v_n)^2]$ ； $\sigma'_n = [\ln(1 + (\sigma_n/v_n)^2)]^{0.5}$ 。

$v_n$ ,  $\sigma_n$  分别是速度随机变量  $V_n$  的均值和标准差。根据对数正态分布的性质，可得

$$T_n \sim \text{Log-N}(-\mu'_n + \ln(L/n), \sigma'_n) \quad (5)$$

赵宇刚<sup>[13]</sup>、Fruin<sup>[14]</sup>、李得伟等<sup>[15]</sup>、柳伍生<sup>[16]</sup>、

贾洪飞等<sup>[17]</sup>和杨涵等<sup>[18]</sup>等开展了大量针对楼梯行人速度的研究，Yuhaski 等<sup>[6]</sup>、Cheah 等<sup>[7]</sup>等提出和应用了状态相关的线性和指数速度均值模型，但均未涉及速度标准差。鉴于此，本文利用 AnyLogic 仿真软件设计楼梯及行人系统的微观仿真实验以获得楼梯速度均值和标准差。首先探索速度与状态的相关关系，将楼梯角度固定为设计规范推荐取值  $0.46 \text{ rad}(26.57^\circ)$ ，仿真 30 次取平均值得到行人速度数据如图 5。

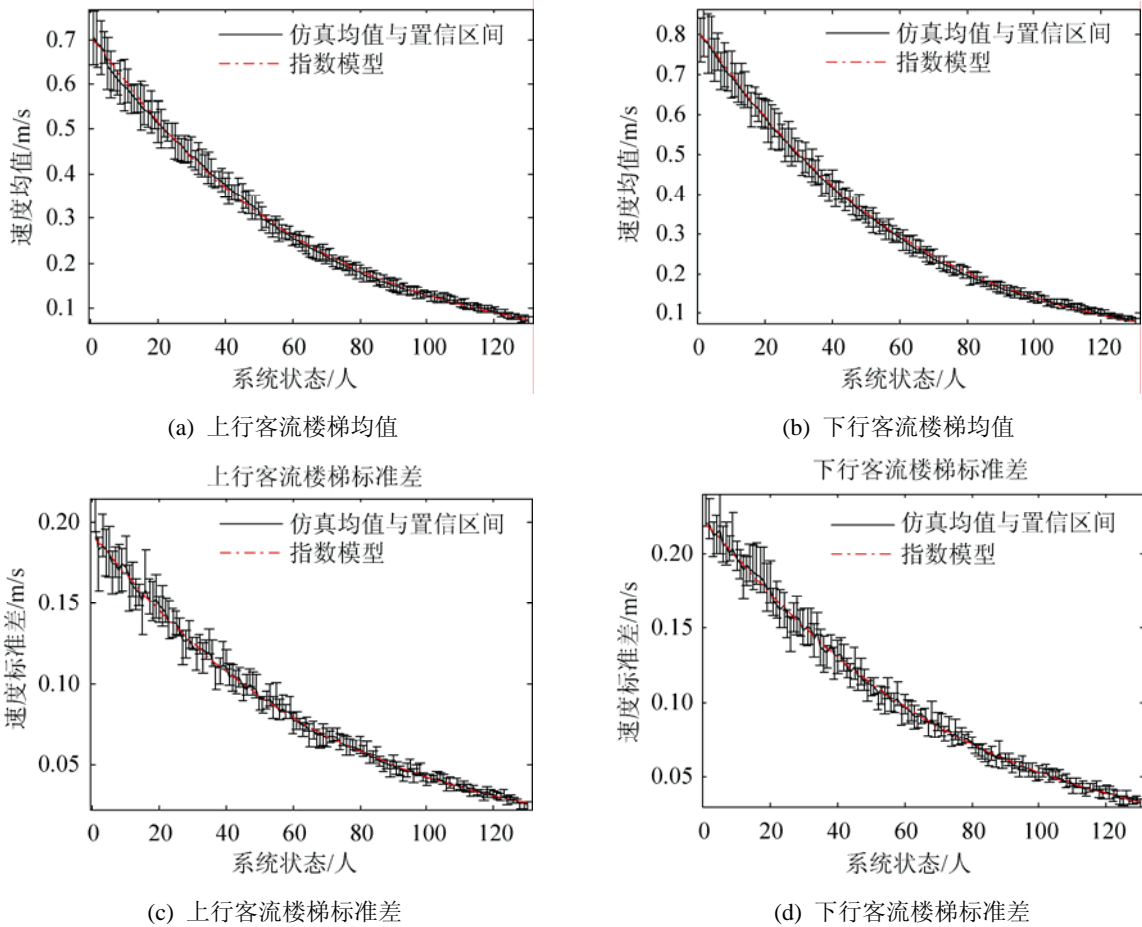


图 5 楼梯行人速度均值和标准差

图 5 中的曲线形状显示，指数模型可能能够很好地描述楼梯行人速度均值和标准差，由此假设楼梯行人速度均值和标准差可由以下指数模型描述：

$$v_n = v_1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{n-1}{\beta}\right)^\gamma\right], \quad n=1,2,3,\dots, C \quad (6)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{n-1}{\beta'}\right)^{\gamma'}\right], \quad n=1,2,3,\dots, C \quad (7)$$

$$\text{其中: } \gamma = \ln\left[\frac{\ln(v_a/v_1)}{\ln(v_b/v_1)}\right] / \ln\left(\frac{a-1}{b-1}\right);$$

$$\beta = (a-1) / [\ln(v_1/v_a)]^{1/\gamma} = (b-1) / [\ln(v_1/v_b)]^{1/\gamma};$$

$$\gamma' = \ln\left[\frac{\ln(\sigma_a/\sigma_1)}{\ln(\sigma_b/\sigma_1)}\right] / \ln\left(\frac{a-1}{b-1}\right);$$

$$\beta' = (a-1) / [\ln(\sigma_1/\sigma_a)]^{1/\gamma'} = (b-1) / [\ln(\sigma_1/\sigma_b)]^{1/\gamma'}.$$

上述表达式中,  $v_1$ ,  $v_a$  和  $v_b$  分别为当系统只有一个行人时、行人密度为 2 人/ $m^2$  时和行人密度为 4 人/ $m^2$  时(对应的系统状态分别为  $n=1$ ,  $n=a=2L \cdot W \cdot \cos\varphi$ ,  $n=b=4L \cdot W \cdot \cos\varphi$ )的速度均值,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_a$  和  $\sigma_b$  分别为相应的速度标准差。根据微观仿真的数据可以得到速度均值和标准差曲线的 6 个参考点(1,  $v_1$ ), ( $a$ ,  $v_a$ ), ( $b$ ,  $v_b$ )与(1,  $\sigma_1$ ), ( $a$ ,  $\sigma_a$ ), ( $b$ ,  $\sigma_b$ )的取值, 从而确定公式(6), (7)中的指数模型。以上行楼梯为例, 速度均值曲线满足(1, 0.70), ( $a$ , 0.30), ( $b$ , 0.12), 标准差曲线满足(1, 0.19), ( $a$ , 0.11), ( $b$ , 0.04)。为了验证指数模型(6), (7)描述楼梯行人速度均值和标准差的准确性, 用其去拟合图 5 中的楼梯行人速度均值与标准差曲线, 拟合曲线如图 5 中的黑线所示。速度均值拟合度分别为 0.989, 0.980, 标准差拟合度分别为 0.986, 0.986, 由此说明利用指数模型(6), (7)描述楼梯行人速度均值和标准差具有很高的准确性。

为考虑楼梯角度对服务时间的影响, 即在指数模型(6), (7)中引入楼梯角度  $\varphi$ , 为此只需要获得六个参考点关于角度  $\varphi$  的关系。再次利用上文设计的微观仿真实验, 模拟不同角度(0.28~0.70 rad 均分布的 25 个角度值)的楼梯上的行人走行过程, 每个角度重复 30 次获取参考点处速度均值和标准差数据, 并利用 SPSS 软件对得到的数据进行拟合, 结果显示指数模型的总体拟合效果最好。由此, 可以获得参考点处行人速度均值和标准差与角度  $\varphi$  的关系式: 对上行楼梯有,  $v_1=1.50\exp(-1.46\varphi)$ ,  $\sigma_1=0.33\exp(-1.05\varphi)$ ,  $v_a=0.64\exp(-1.45\varphi)$ ,  $\sigma_a=0.17\exp(-0.83\varphi)$ ,  $v_b=0.25\exp(-1.40\varphi)$ ,  $\sigma_b=0.07\exp(-1.07\varphi)$ ; 对下行楼梯有,  $v_1=1.50\exp(-1.18\varphi)$ ,  $\sigma_1=0.33\exp(-0.77\varphi)$ ,  $v_a=0.64\exp(-1.21\varphi)$ ,  $\sigma_a=0.17\exp(-0.51\varphi)$ ,  $v_b=0.25\exp(-1.25\varphi)$ ,  $\sigma_b=0.07\exp(-0.64\varphi)$ 。观察上述表达式可以发现,  $\varphi=0$  时的参考点取值正好是水平通道速度曲线参考点的取值<sup>[6]</sup>, 进一步验证了楼梯参考点取值的准确性。至此, 我们已经获得了楼梯排队系统的到达规律以及与系统状态  $n$  和楼梯角度  $\varphi$  相关的服务规律。

## 2 楼梯宽度仿真优化系统设计

### 2.1 楼梯排队系统仿真模型

本节基于  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统设计离散事件仿真模型, 并利用 MATLAB 编写程序, 实现对楼梯排队系统的模拟。 $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型的流程如图 6, 涉及符号说明如下,  $T$ : 系统当前模拟时刻;  $T_a$ : 模拟总时间;  $C$ : 楼梯容量;  $N$ : 系统总到达人数;  $n$ : 队长, 即系统状态;  $X$ : 服务台状态, 取 0 或 1, 0 表示服务台空闲, 1 表示服务台繁忙;  $A$ : 下一个行人到达时刻;  $\underline{A}$ : 用于存储行人到达时刻的向量;  $B$ : 下一个行人服务结束时刻;  $\underline{B}$ : 用于存储行人服务结束时刻的向量;  $a$ : 根据行人到达规律  $F(t)$  产生的到达间隔;  $b$ : 根据服务规律  $G(t)$  产生的服务时间;  $\theta$ : 输出率;  $\underline{N}$ : 储存系统状态的向量;  $\underline{S}$ : 储存系统人均占地面积的向量;  $\underline{D}$ : 储存每个行人在系统中逗留时间的向量;  $P$ : 不稳定流概率。

### 2.2 楼梯排队系统仿真模型的验证

为了验证 2.1 节中构建的  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型的准确性, 利用该仿真模型、微观仿真和  $M/G(n)/C/C$  排队解析模型 3 种方法获取相同条件下的楼梯性能指标(重复 10 次取平均值)。以微观仿真实验的结果为标准进行对比, 其它两种方法的平均人数、人均占地面积、人均逗留时间、输出率 4 个指标的平均相对误差分别为,  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型: 5.52%, 6.79%, 8.18%, 2.62%;  $M/G(n)/C/C$  排队解析模型: 17.75%, 20.1%, 19.94%, 5.27%。 $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型性能指标的相对误差更小, 说明其在描述楼梯排队系统上比  $M/G(n)/C/C$  排队解析模型更接近实际情况。

### 2.3 楼梯宽度优化算法设计

楼梯宽度优化, 即寻找满足设计服务水平要求

的最小宽度，也即满足  $fW = ES(W) - s = 0$  的楼梯宽度  $W$ 。其中， $s$  为设计服务水平等级要求的人均占地面积下限， $ES(W)$  为楼梯宽度为  $W$  时的人均占地面积，由  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型模拟宽度为  $W$  的楼梯获得。优化算法设计如图 7。算法每循环一次，原区间  $[c, d]$  被缩短为原来的一半，即对于长  $m$  的区间，经过  $j$  次循环后，被缩短为  $m/2^j$ 。根据优化算法和排队系统仿真模型可知，优化算法

迭代一次的复杂度为  $O(N)$ ，其中  $N$  为总到达人数，即具有线性复杂度。

楼梯宽度优化算法建立在  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统仿真模型的基础上，后者用于仿真模拟并获取楼梯性能指标，前者根据后者得到的性能指标进行宽度优化，两者结合形成一套新的基于排队系统仿真模型的楼梯宽度优化方法。

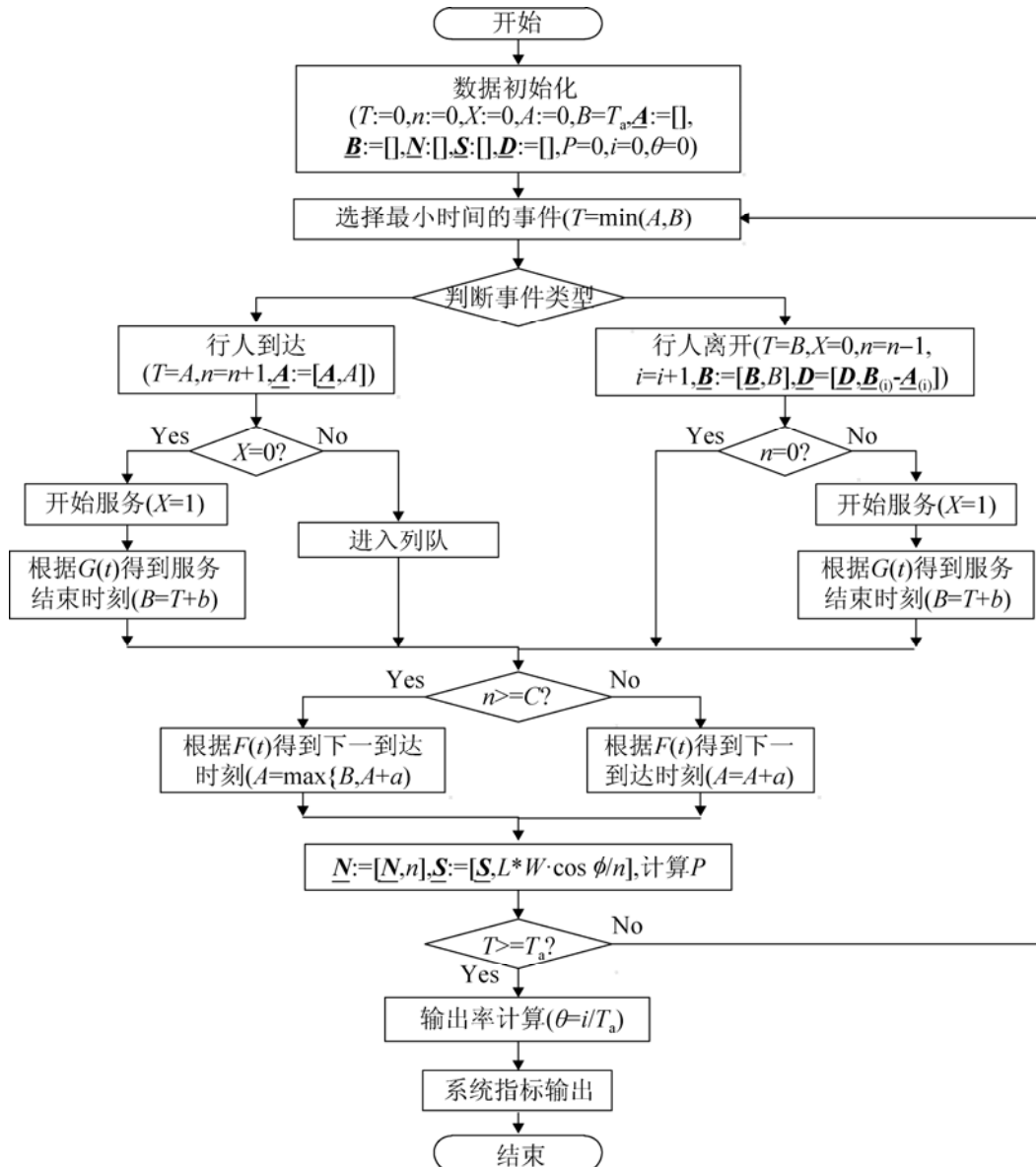


图 6 排队系统仿真模型



```

L:=L0;
q:=q0;
k:=k0;
s:=s0;
double c;
double d;
c:=Wmin;
d:=Wmax;
W:=(c+d)/2;
fW:=ES(W)-s;
while (abs(fW)>η)
  if (fW>0)
    d=(c+d)/2
  else c=(c+d)/2
  end
  W:=(c+d)/2;
  fW:=ES(W)-s;
end
    
```

图 7 宽度优化算法

### 3 算例分析

为了验证本文提出的仿真优化方法的准确性, 本节将利用仿真优化方法、M/G(n)/C/C 排队系统解析优化方法和 D/D/1/C 排队系统解析优化方法(即现有地铁设计规范)3种方法计算楼梯宽度。算例设计如下: 楼梯设计长度 15 m, 楼梯角度 0.46 rad, 给定远期高峰小时客流量  $q(5\ 000, 10\ 000, 15\ 000$  (人/h))和超高峰系数  $k(1.1, 1.3, 1.5)$ , 试设计不同服务水平等级(LOS)(B, C, D, E)下的楼梯宽度。

为统一比较, 3种方法均采用 1.2 节中的指数速度模型。3种方法得到的宽度如表 1, 从中可以看出:

(1) 在不同客流条件和服务水平等级下, 仿真优化得到的宽度值均大于其它 2 种方法的宽度值, 其中, 仿真优化宽度值比 M/G(n)/C/C 排队系统解析优化方法的宽度值平均大 22.97%; 比 D/D/1/C 排队系统解析优化方法的宽度值平均大 54.75%。这说明仿真优化方法充分考虑了客流到达和服务的随机性以及服务时间与状态  $n$  和角度  $\varphi$  的相关性, 因此得到的宽度值最大;

(2) 在相同的客流条件下, 随着服务水平等级上升, 3种方法的宽度值均呈上升趋势。其中, 仿真优化方法的宽度平均增大 2.70 m, M/G(n)/C/C 排队系统解析优化方法的宽度平均增大 1.72 m, D/D/1/C 排队系统解析优化方法的宽度平均增大 1.53 m。仿真优化方法的上升趋势最大, 再次印证了结论 1;

(3) 类似地, 在相同服务水平下, 随着客流量的增大, 3种方法得到的楼梯宽度值均呈上升趋势。其中, 仿真优化宽度平均增大 6.64 m, M/G(n)/C/C 排队系统解析优化方法的宽度平均增大 5.07 m, D/D/1/C 排队系统解析优化方法的宽度平均增大 4.35 m, 以仿真优化宽度的总体上升趋势最大。

表 1 楼梯宽度对比

$q$ (人/小时)		5 000			10 000			15 000		
LOS	$k$	1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.5
	$q \cdot k$ (人/小时)	5 500	6 500	7 500	11 000	13 000	15 000	16 500	19 500	22 500
	仿真优化	5.33	7.28	8.40	10.12	12.69	15.00	14.62	18.60	21.30
B	M/G(n)/C/C	4.78	5.48	6.19	8.76	10.26	11.77	12.90	15.17	17.45
	D/D/1/C	3.66	4.32	4.99	7.31	8.64	9.97	10.97	12.97	14.96
	仿真优化	4.45	5.83	6.73	8.40	10.58	12.31	12.69	15.32	17.84
C	M/G(n)/C/C	3.87	4.44	5.02	7.04	8.19	9.34	10.20	11.92	13.65
	D/D/1/C	2.81	3.32	3.83	5.62	6.64	7.67	8.43	9.97	11.50
	仿真优化	4.11	5.28	6.14	8.03	9.71	10.75	11.83	14.31	16.35
D	M/G(n)/C/C	3.55	4.11	4.67	6.60	7.68	8.76	9.60	11.19	12.84
	D/D/1/C	2.52	2.98	3.44	5.05	5.97	6.88	7.57	8.95	10.33
	仿真优化	3.36	4.12	4.78	6.94	8.13	9.34	10.74	12.17	14.09
E	M/G(n)/C/C	2.95	3.51	4.00	5.93	6.98	8.09	8.90	10.51	12.12
	D/D/1/C	2.35	2.78	3.20	4.70	5.56	6.41	7.05	8.33	9.61

为进一步说明仿真优化方法的准确性, 利用 AnyLogic 仿真软件根据表 1 中 3 种方法的宽度值设计楼梯微观仿真实验, 每个宽度值重复仿真 10 次得到人均占地面积、平均逗留时间、输出率和堵塞概率等性能指标, 以人均占地面积和平均逗留时间为例给出三种方法的性能指标对比图, 见图 8、图 9。由图中可以看出, D/D/1/C 排队系统解析优化方法(即现有地铁设计规范)得到的性能指标最差, 其人均占地面积远远低于各级服务水平要求的人均占地面积下限, 再次论证了现有地铁设计规范不能满足实际需求; 相比之下, 仿真优化方法得到的性能指标较其他两种方法的性能指标有明显改善。

为了进一步说明仿真优化方法设计的楼梯宽度增加是合理且经济的, 引入指标-宽度弹性系数

来进行分析。指标-宽度弹性系数为性能指标改善率(仿真优化方法的性能指标相对于其他两种解析优化方法的性能指标的改善率)与宽度增长率(仿真优化方法的宽度相对于其他两种解析优化方法的宽度的增长率)之比, 反映各项性能指标关于宽度的变化程度。计算结果显示除输出率外, 绝大部分指标-宽度弹性系数绝对值均 $>1$ , 其中, 97.22%的人均占地面积-宽度弹性系数 $>1$ , 平均值为 3.32; 79.18%的逗留时间-宽度弹性系数 $>1$ , 平均值为 1.43; 堵塞概率-宽度弹性系数全部 $>1$ , 平均值为 2.78。这些数据说明这 3 项性能指标关于楼梯宽度的弹性很大, 宽度 1% 的增加会带来指标 $>1\%$  的改善, 表明仿真优化方法相比其他两种解析优化方法增加的宽度是值得的。

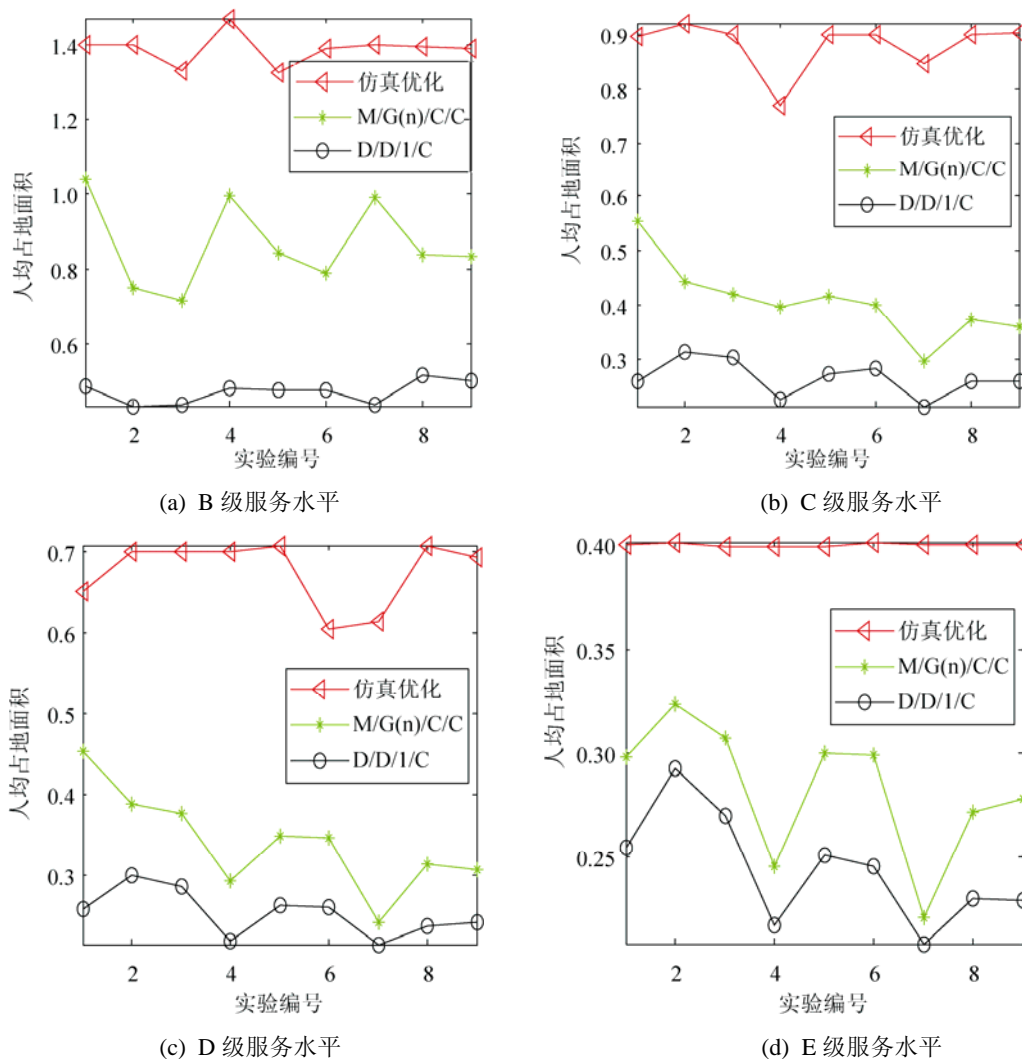


图 8 人均占地面积对比

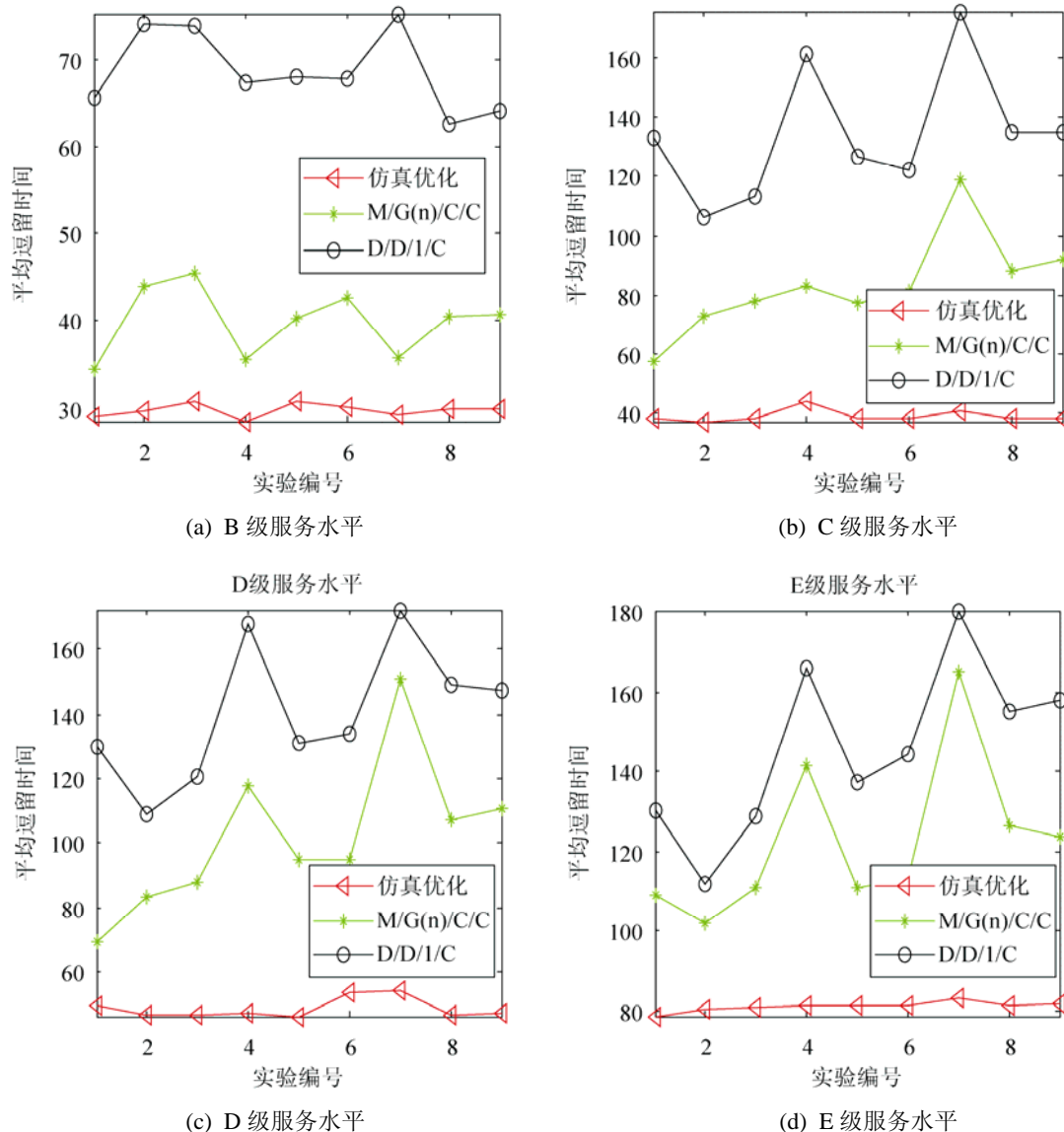


图 9 平均逗留时间对比

### 4 结论

为弥补现有地铁楼梯宽度设计方法存在的缺陷, 本文将楼梯及客流抽象为到达和服务均具有随机性且服务时间与状态和角度相关的  $G/G(n, \varphi)/C/C$  排队系统, 构建楼梯排队系统的仿真模型并验证了其高保真性, 最后基于该排队系统仿真模型设计宽度优化算法。本文提出的楼梯宽度仿真优化方法比  $M/G(n)/C/C$  排队系统解析优化方法和  $D/D/1/C$  排队系统解析优化方法(现有地铁设计规范)的计算思路更加科学全面, 设计的楼梯更宽,

同时带来了人均占地面积、逗留时间、输出率和堵塞概率等楼梯性能指标的明显改善, 且相对其他两种解析优化方法具有较高的指标-宽度弹性系数, 进一步说明仿真优化方法增加的宽度是合理且值得的。该仿真优化方法适用于一般到达规律、一般服务规律和不同角度的楼梯宽度设计。除用于地铁楼梯宽度优化设计外, 该方法还可推广到其它建筑物的楼梯设计, 使用中只需简单地修改相应参数即可, 具有广泛的适用性。此外, 本文设计的具有高保真性的排队系统仿真模型也可广泛用于行人服务设施评价。

本文将行人和楼体抽象为排队系统时,并未考虑乘客的自组织、不同速度行人间存在的避让和超越等行为,而这些行为在很多微观模型,如元胞自动机模型和社会力模型中得到了体现<sup>[11,19]</sup>。此外,排队系统还忽略了由不同性别、年龄和与目标的距离等因素引起的速度差异。下一步研究可考虑建立具有不同优先权的多类顾客排队系统,对不同乘客群体设置不同的服务过程,并在排队规则中引入优先级控制。此外,本文只针对单个楼梯进行了宽度设计,实际情况中很多楼梯以网络的形式存在,因此,如何将该方法应用到楼梯网络的宽度设计,有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Transportation Research Board of the National Academies. Transit Capacity and Quality of Service Manual 2nd Edition [M]// Publication TCRP REPORT 100. USA: Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation, 2003.
- [2] GB50157-2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [3] 蒋阳升. 考虑稳定性的城市轨道交通车站交通服务设施系统优化配置理论与方法——基于排队网络视角[J]. 学术动态, 2013, 1(1): 16-19.
- [4] 蒋阳升, 胡路, 卢果. 基于排队论的地铁人行通道宽度取值方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(3): 67-71.
- [5] Lovas G G. Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow [J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 1994, 28(6): 429-443.
- [6] Yuhaski S J, Smith J M G. Modeling Circulation Systems in Buildings Using State dependent Queueing Models [J]. Queueing Systems (S0257-0130), 1989, 4(4): 319-338.
- [7] Cheah J Y, Smith J M G. Generalized M/G/C/C State Dependent Queueing Models and Pedestrian Traffic Flows [J]. Queueing Systems (S0257-0130), 1994, 15(1/4): 365-386.
- [8] 陈绍宽, 刘爽, 肖雄, 等. 基于M/G/C/C模型的地铁站楼梯通道疏散能力瓶颈分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(1): 7-12.
- [9] Hu L, Jiang Y S, Zhu J X, et al. Hybrid of the Scatter Search, Improved Adaptive Genetic, and Expectation Maximization Algorithms for Phase-type Distribution Fitting [J]. Applied Mathematics and Computation (S0096-3003), 2013, 219(10): 5495-5515.
- [10] Jiang Y S, Hu L, Zhu J X. PH Fitting of the Arrival Interval Distribution of the Passenger Flow on Urban Rail Transit Stations. Applied Mathematics and Computation (S0096-3003), 2013, 225: 158-170.
- [11] 郭谨一, 刘爽, 陈绍宽, 等. 行人运动仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2237-2242.
- [12] Tregenza P. The Design of Interior Circulation [M]. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1976.
- [13] 赵宇刚. 考虑服务水平的城市轨道交通换乘问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 73-77.
- [14] Fruin J J. Pedestrian Planning and Design [R]. 1971.
- [15] 李得伟, 韩宝明. 行人交通[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [16] 柳伍生. 地铁站楼梯人流交通特征的数据拟合分析[J]. 计算机工程与应用, 2009, 44(3): 50-52.
- [17] 贾洪飞, 杨丽丽, 唐明. 综合交通枢纽内部行人流特性分析及仿真模型参数标定[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(5): 117-123.
- [18] 杨涵, 伍梦欢, 张含笑, 等. 地铁换乘站不同设施区域乘客走行速度分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(A01): 140-145.
- [19] 王爱丽, 董宝田, 王泽胜. 基于社会力的行人交通微观仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 662-669.