

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.015

考虑汇流过程的楼梯疏散模型研究*

郑霞忠^{1,2}, 田丹¹, 陈述^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学安全生产标准化评审中心, 湖北宜昌 443002)

摘要: 为探究汇流过程对楼梯疏散的影响程度, 运用排队论原理, 计算楼层平台人流输出率; 引入楼梯汇流比率, 描述单位时间内楼梯人流通过率与楼层通道人流通过率; 以楼梯汇流过程为基础, 结合楼层平台人流输出率与汇流比率, 将整个楼梯疏散划分为三个阶段, 剖析各阶段内行人流相互作用关系, 构建楼梯疏散模型, 刻画楼梯疏散中客流量动态变化的过程。设置不同楼层通道宽度, 计算汇流比率, 模拟不同汇流比率下楼梯疏散过程, 结果表明: 楼梯疏散能力受楼层汇流过程的影响, 随汇流比率的增加, 楼层平台人流输出率与楼梯的疏散能力均呈现先增后减的趋势, 当汇流比率为 0.46 时, 即楼层通道宽度为 130 cm 时, 楼层平台人流输出率与楼梯疏散能力达到最大。

关键词: 系统工程; 疏散能力; 排队论; 汇流过程; 楼梯疏散; 汇流比率

中图分类号: X45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0796-07

Staircase Evacuation Model Considering Merging Flow Process

ZHENG Xiazhong^{1,2}, TIAN Dan¹, CHEN Shu^{1,2}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Center of Standardization Evaluation for Production Safety, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: For exploring the influence of merging flow process on staircase evacuation, the queuing theory is adopted to compute the pedestrian flow output rate in the platform floor; the stairs merging rate is introduced to describe the pedestrian passing rate of staircase and floor channel at the unit time. Based on the merging process of stairs, combining the pedestrian flow output rate in the platform floor and merging rate, the whole staircase evacuation process is divided into three parts, the interaction relationship between the number of pedestrian flow in each stage is analyzed, and the staircase evacuation capacity measurement model was constructed, describing the dynamic change process of pedestrian flow in staircase evacuation. The different widths of floor channel are set to calculate the merging ratio, and to simulate the pedestrian merging process of stairs by the different merging rates. The results of simulation show that the floor merging process affect the staircase evacuation capacity, the pedestrian output rate of floor platforms and the evacuation capacity of stairs showed a trend of first increase and then decrease as the increase of confluence ratio. When the flow rate is 0.46, and the floor channel width is 130 cm, the output rate of floor platform pedestrian flow and the capacity of evacuation reach the maximum values.

Keywords: systems engineering; evacuation capacity; queuing theory; merging process; staircase evacuation; merging ratio

* 收稿日期: 2018-09-01; 修回日期: 2018-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(51878385; 51609128)资助

作者简介: 郑霞忠(1963-), 男, 教授, 主要从事安全科学与工程方面的研究。Email: zhengxz@126.com

引言

楼梯作为建筑物的重要组成部分,影响建筑物的疏散效率^[1-2]。当汇流过程发生时,楼梯中人流增加,产生拥堵,致使楼梯中踩踏、挤压事故频繁发生^[3-5]。因此,研究汇流过程对楼梯疏散能力的影响,对减少楼梯疏散事故、缓解楼梯疏散压力具有重要意义。

近年来,越来越多学者开始探究楼梯疏散规律。陈绍宽等^[6]将排队理论运用于楼梯疏散中,计算了楼体疏散过程中行人的通过率,分析了楼梯疏散能力;Y. Qu等^[7]运用改进的社会力模型,模拟行人在楼梯上动态移动过程,描述行人个体的运动特征与运动轨迹;Y. Ding等^[8]根据高层建筑物疏散规律,模拟楼层行人运动过程,证明了楼梯疏散的高效性;E. Ronchi等^[9]考虑行人在楼梯上运动的疲劳程度,以格子气模型为基础,提出了疲劳疏散模型,剖析了疲劳程度对楼梯疏散的影响;Y. Zeng等^[10]分析行人在不同疏散环境下的行为状态,通过改变楼梯中照明度大小,以实验的方式验证了环境条件对行人行为的影响;T. Sano等^[11]结合楼梯行人汇流规律,利用汇流率表达楼梯汇流过程中行人流量,构建了楼梯汇流数学模型。

上述学者从多个角度分析了楼梯行人疏散规律,取得了丰富的研究成果^[12]。然而,以往的研究较少从动态的角度剖析行人汇流过程对楼梯疏散的影响。鉴于此,以行人汇流过程为基础,运用排队论计算楼层平台行人输出率,引入汇流比率,描述楼层人流输出率与楼梯人流输出率的大小,将楼梯疏散过程划分为三个阶段,构建楼梯疏散模型。设置不同汇流比率,推求楼梯疏散能力,生成最优楼梯汇流比率,为缓解楼梯疏散压力提供理论基础。

1 楼梯行人汇流分析

1.1 楼层平台行人输出率计算

楼层平台行人输出率是指汇流阶段单位时间内楼层平台行人输出量。将整个楼梯汇流过程看作排队系统,楼层平台为排队系统的服务器,当汇流过程发生时,楼梯行人与楼层行人具有相互独立的运动特性,并服从泊松分布,同时,行人密度

会影响汇流过程,且满足先到先服务的原则。因此,本文将采用M/G/c/c模型计算楼层平台行人输出率^[5,11]。假设单位时间楼层通道行人输出率为 q_i^{floor} 、单位时间楼梯行人输出率为 q_i^{stair} ,楼层平台中人流量为 n 的概率 P_n 可表示为:

$$P_n[N=n]=\left\{\frac{[(q_i^{\text{floor}}+q_i^{\text{stair}})E(T_1)]^n}{n!f(n)f(n-1)\cdots f(2)f(1)}\right\}P_0(1)$$

式中, N 为自由变量,表示楼层平台人流量; n 为楼层平台中实际的人流量; $E(T_1)$ 为单位行人在楼层平台的期望服务时间; $f(n)$ 为楼层平台人流量为 n 时的行人服务率:

$$f(n)=\frac{v_n}{v_1} \quad (2)$$

式中, v_1 表示楼体中1个行人的平均移动速度; v_n 表示楼体中 n 个行人的平均移动速度,根据行人密度与速度之间的关系,得到速度 $v_n=\vartheta v$,其中, v 为行人正常运动速度, ϑ 为速度的修正系数,取值为 $\vartheta=1.49-0.36D$, D 为楼层中人流密度。 P_0 是指楼层平台中没有行人的概率,其计算式为:

$$P_0^{-1}(n=0)=1+\sum_{j=1}^C\frac{[(q_i^{\text{floor}}+q_i^{\text{stair}})E(T_1)]^j}{j!f(j)f(j-1)\cdots f(2)f(1)} \quad (3)$$

式中, C 为楼层平台容量, C 的大小与楼层平台尺寸相关, $C=[DWL]$, D 为楼层平台行人密度, W 为楼层平台宽度, L 为楼层平台长度。综合概率 P_n ,得行人汇流效率可表示为:

$$E_i=(q_i^{\text{floor}}+q_i^{\text{stair}})(1-P_n[N=n]) \quad (4)$$

式中, E_i 为楼层平台行人输出率,当楼层平台人流量达到最大容量时,楼层平台行人输出率 $E_i(C)=(q_i^{\text{floor}}+q_i^{\text{stair}})(1-P_c[N=C])$, P_c 表示楼层平台人流量达到最大容量的概率。

1.2 行人汇流比率确定

行人汇流比率是指楼层通道行人通过率与楼梯行人通过率的比例,根据建筑物设计原则,楼梯宽度与楼层通道宽度决定人流通过率。结合楼梯疏散特征,在疏散过程趋于稳定时,楼层通道行人通过率与楼梯行人通过率会逐渐趋于稳定,为维持楼层平台中楼层通道行人流量与楼梯行人流量的平衡,汇流比率会按照楼层通道行人流量与楼梯行人流量的比例分配。参照楼梯设计原则,楼层通道行人流量与楼梯行人流量受楼梯宽度的影响^[13]。T. Sano等^[11]根据单位时间内楼梯行人流汇流量与

楼层通道行人汇流量,确定楼梯汇流过程中行人汇流比率。本文根据楼梯与楼层设计人流通过率,计算楼层汇流比率。由于楼层通道人流通过率与楼梯人流通过率与楼层和楼梯的宽度相关,则行人汇流比率可表达为:

$$\begin{cases} k = \frac{L^{\text{floor}}}{L^{\text{floor}} + L^{\text{stair}}} \\ 1 - k = \frac{L^{\text{stair}}}{L^{\text{floor}} + L^{\text{stair}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, k 为人流汇流比率; L^{floor} 为设计楼层通道宽度; L^{stair} 为设计楼梯通道宽度。

2 楼梯疏散模型构建

以楼梯汇流过程层为临界点,将楼梯疏散过程分为3个阶段:汇流发生前阶段、汇流发生阶段以及汇流发生后阶段,如图1所示。

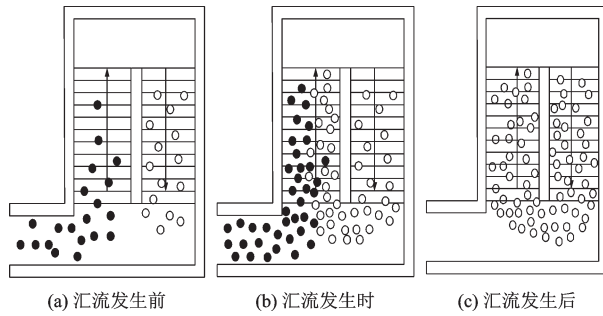


图1 楼梯疏散过程

Fig.1 Three stages of the staircase evacuation process

2.1 汇流发生前阶段疏散时间计算

在汇流发生前阶段,楼层人流会首先进入楼层平台,随之进入楼梯中,部分行人会在汇流发生前离开建筑物。整个汇流过程前阶段的临界时间点是在上一楼层的人流刚好到达下一楼层平台的时刻^[10]。因此,定义汇流前阶段的持续时间为 t' ,楼梯长度为 L ,汇流前阶段的持续时间可表示为:

$$t' = \frac{L}{\sigma} \quad (6)$$

式中, σ 为下楼时行人运动速度调整系数,在汇流前阶段,部分行人会率先离开建筑物,楼层中的部分行人也会离开本楼层,假设各楼层的行人移动速度以及人流量相同,且在汇流发生前,各楼层的行人输出量相同,行人输出量等于单位时间楼层人流量,可得到汇流前阶段楼层平台行人输出量:

$$S'_i = q_i^{\text{floor}} t' \quad (7)$$

式中, S'_i 为汇流发生前阶段楼层平台行人输出量,根据楼梯疏散特点,在汇流前阶段,建筑物中人流输出量等于建筑物一楼人流输出量。

2.2 汇流过程中疏散时间计算

假设每个楼层中的人流量为 G_i ,楼层数为 m ,在汇流开始时,楼梯人流输出率已达到楼梯设计要求。根据楼梯人流疏散特点,在汇流开始时,楼层平台人流量未达到楼层平台容量最大值,因此,楼层通道人流输出率与楼梯人流输出率等于设计的最大输出率;随着汇流过程的进行,楼层平台中人流达到楼层平台最大容量,汇流过程将趋于稳定,楼层平台人流输出率等于楼层通道人流输出率与楼梯人流输出率之和。计算得不同汇流时间点下楼层通道人流输出率:

$$q_i^{\text{floor}}(t) = \begin{cases} q_i^{\text{floor}} & U_i(t) - C < 0 \\ kE_i(c) & U_i(t) - C = 0 \end{cases} \quad (8)$$

同理可得楼梯人流输出率:

$$q_i^{\text{stair}}(t) = \begin{cases} q_i^{\text{stair}} & U_i(t) - C < 0 \\ (1 - k)E_i(c) & U_i(t) - C = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $q_i^{\text{floor}}(t)$ 、 $q_i^{\text{stair}}(t)$ 为楼层通道与楼梯人流输出率随时间变化函数; t 为汇流过程持续时间; C 为楼层平台最大容量; $U_i(t) - C$ 为楼层平台人流量判断公式,由于楼层平台人流量不会大于楼层平台最大容量,所以 $U_i(t) - C \leq 0$, $U_i(t)$ 为楼层平台人流量随时间变化函数:

$$U_i(t) = \begin{cases} q_i^{\text{floor}} t + q_i^{\text{stair}} t - \int_0^t Q_i(t) dt + r & U_i(t - \Delta t) - C < 0 \\ C & U_i(t - \Delta t) - C = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, Δt 为计算时间间隔; r 为在汇流发生前楼层平台中已有人流量; $Q_i(t)$ 为时间 t 时楼层平台人流输出率。根据式(10), $Q_i(t)$ 可表示为:

$$Q_i(t) = \begin{cases} E_i(U_i(t - \Delta t)) & U_i(t - \Delta t) - C < 0 \\ E_i(c) & U_i(t - \Delta t) - C = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $E_i(U_i(t - \Delta t))$ 表示楼层平台人流量为 $U_i(t - \Delta t)$ 时楼层平台行人输出率,可表示为:

$$E_i(U_i(t - \Delta t)) = (t - \Delta t)(q_i^{\text{floor}} + q_i^{\text{stair}}) \cdot (1 - P_{U_i(t - \Delta t)}[N = U_i(t - \Delta t)])$$

在楼梯疏散过程中,楼层出口与建筑物出口相

对位置关系以及楼梯结构设计之间的差异,导致楼层中疏散情况存在差别,产生不同的疏散规律。在汇流过程中,当楼层人流疏散结束时,即楼层通道人流输出率为0,该楼层汇流结束^[3,9]。综合各楼层疏散情况,以楼层通道人流输出率为衡量汇流过程的依据,生成3种疏散场景:

场景1:当 $i=1$ 时,根据楼层行人流汇流效率与汇流比率,结合楼层设计特点,得到汇流过程中楼层通道人流输出率 M_1 表达式如下:

$$M_1(t) = q_1^{\text{floor}}(t) \quad (12)$$

场景2:当 $1 < i < m$ 时,根据楼梯汇流特性,第 i 楼层中的楼层平台人流输出率会受到第 $i-1$ 楼层种楼梯人流输出率的影响,当第 $i-1$ 楼层楼梯人流输出率 q_{i-1}^{stair} 小于第 i 楼层的楼层平台行人流输出率理论值 Q_i ,则汇流过程中第 i 楼层的楼层平台行人流输出率实际值 Q_i' 等于第 $i-1$ 楼层楼梯人流量 q_{i-1}^{stair} ;反之,第 i 楼层的楼层平台行人流输出率实际值 Q_i' 等于 Q_i ,即:

$$Q_i'(t) = \begin{cases} q_{i-1}^{\text{stair}} & q_{i-1}^{\text{stair}}(t) < Q_i(t) \\ Q_i(t) & q_{i-1}^{\text{stair}}(t) \geq Q_i(t) \end{cases} \quad (13)$$

在实际汇流过程中,楼层的汇流情况取决于楼层中的人流量,楼层中的人流量疏散结束时,本楼层的汇流过程结束。比较楼层通道人流输出率与楼层平台人流输出率的大小,得出具体楼层 i 的楼层通道行人流输出率实际值 M_i 为:

$$M_i(t) = \min\{q_i^{\text{floor}}, kQ_i'(t)\} \quad (14)$$

场景3:当 $i=m$ 时,楼层平台人流输出量等于楼层人流输出量,随着楼梯汇流过程的进行,楼层通道人流输出量会受 $n-1$ 楼层楼梯人流输出量的影响,因此,得到第 n 楼层的楼层通道人流输出率实际值 $M_n(t)$ 为:

$$M_n(t) = \begin{cases} q_n^{\text{floor}}(t) & q_n^{\text{floor}}(t) \leq q_{n-1}^{\text{stair}}(t) \\ q_{n-1}^{\text{stair}}(t) & q_n^{\text{floor}}(t) > q_{n-1}^{\text{stair}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

在汇流发生前,各楼层中的部分行人已离开本楼层,根据汇流前人流输出量以及各楼层行人数量,得到汇流时各楼层行人数量为:

$$SQ_i^{\text{merging}} = G_i - S_i' \quad (16)$$

楼层人流与楼梯人流是楼梯汇流的主要因素,当汇流过程结束,楼层人流离开本楼层时,整个楼梯疏散中只存在楼梯人流。根据楼层人流输出率,结合汇流时楼层中行人数量,计算各楼层汇流过程所需时间 T_i^{merging} 为:

$$SQ_i^{\text{merging}} = \int_0^{T_i^{\text{merging}}} M_i(t) dt \quad (17)$$

整个汇流过程的持续时间是由汇流时间最长的楼层决定,综合汇流过程持续时间 T_i^{merging} ,生成楼梯汇流过程持续时间 t'' :

$$t'' = \max_{i=1}^m T_i^{\text{merging}} \quad (18)$$

2.3 汇流后阶段疏散时间计算

在本楼层行人流疏散结束时,汇流过程结束,建筑物中所有行人都位于楼梯中,并通过出口离开建筑物,楼梯疏散进入汇流后阶段。以建筑物出口的行人流为对象,当所有行人都离开建筑物时,建筑物出口将不存在行人流。假设汇流过程后剩余的行人量为 SQ^{hou} ,根据汇流过程持续时间与建筑物出口人流输出率,可得到建筑物中剩余人流为:

$$SQ^{\text{remain}} = \sum_{i=1}^m G_i - S_1' - \int_0^{t''} Q_1(t) dt \quad (19)$$

式中, $\sum_{i=1}^m G_i$ 表示建筑物中初始行人流数量; S_1' 为汇流前阶段建筑物行人流输出量; $\int_0^{t''} Q_1(t) dt$ 为汇流过程中建筑物行人流输出量。

楼梯中剩余行人会向建筑物出口移动,根据建筑物中剩余人流量与建筑物出口人流输出率,计算汇流后阶段持续时间 t''' :

$$SQ^{\text{remain}} = \int_0^{t'''} Q_1(t) dt \quad (20)$$

2.4 楼梯疏散能力确立

楼梯疏散能力是指楼梯疏散效率大小,表示单位时间平均疏散量大小,疏散能力较大,则疏散时间较短,反之亦然。因此,利用疏散时间表示楼梯疏散能力大小,统计楼梯疏散过程各阶段的持续时间,求和各阶段持续时间,得到楼梯疏散总时间:

$$T = t' + t'' + t''' \quad (21)$$

根据所求的总疏散时间,结合建筑物中总行人数量,计算楼梯疏散能力 S :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m G_i}{T} \quad (22)$$

为清晰表达楼梯疏散能力,仿真楼梯疏散过程,建立楼梯疏散仿真流程,计算楼梯疏散时间,描述楼梯汇流过程,如图2所示。

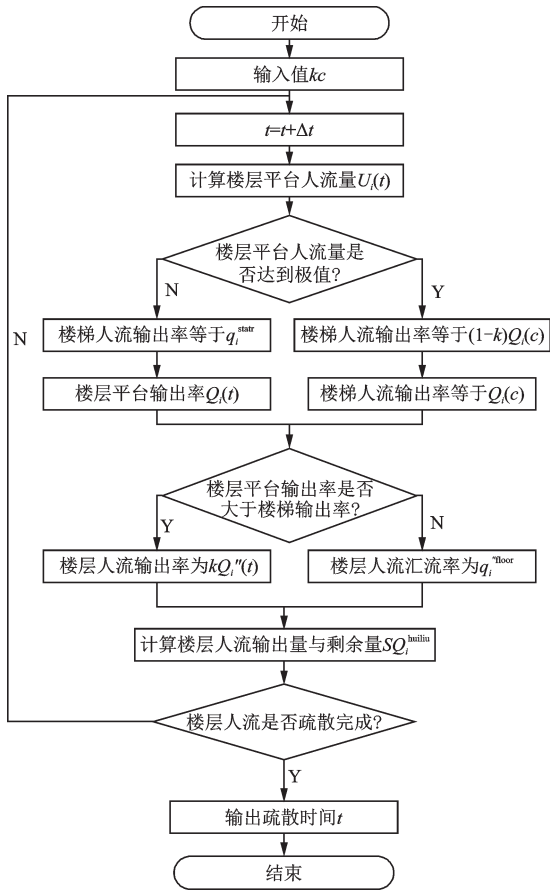


图2 楼梯疏散过程流程

Fig.2 Flow chart of the staircase evacuation process

3 模拟仿真

以某小学教学楼为例,模拟教学楼中人员疏散过程。该教学楼层数为6层,楼梯宽度为1.5 m,楼层平台宽度为1.8 m,楼层平台长度为3.3 m,楼梯长度为4 m。假设楼层人流量为100人/层,根据楼梯疏散模型,考虑楼梯行人汇流,模拟行人在楼梯疏散过程,得到疏散各阶段楼层平台人流输出率,如图3所示。

由图3可知,楼梯疏散汇流前阶段持续了19 s,汇流过程持续了275 s,汇流后阶段持续了174 s。在汇流前阶段,楼层平台行人疏散效率在疏散初期呈现增长趋势;受汇流过程的影响,楼层平台人流输出率在汇流阶段呈现递减趋势;在汇流后阶段,楼层行平台人流输出率呈现增加趋势,并达到稳定状态。因此,楼层平台的滞留人数是影响楼层平台人流输出率的主要原因,如图4所示。

对比图3与图4可知,在汇流发生前,楼层平台的滞留人数与楼层平台人流输出率具有相同增加

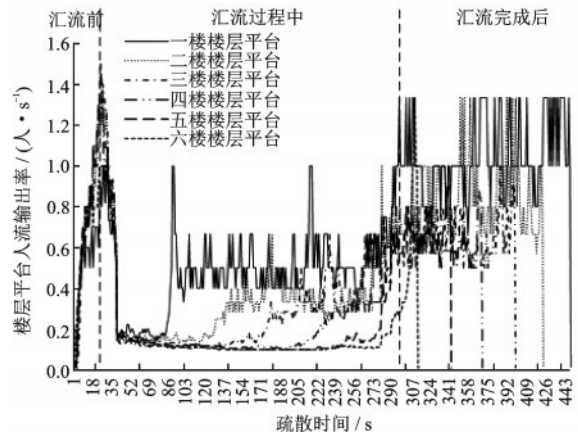


图3 楼层平台人流输出率

Fig.3 Flow output rate of floor platform

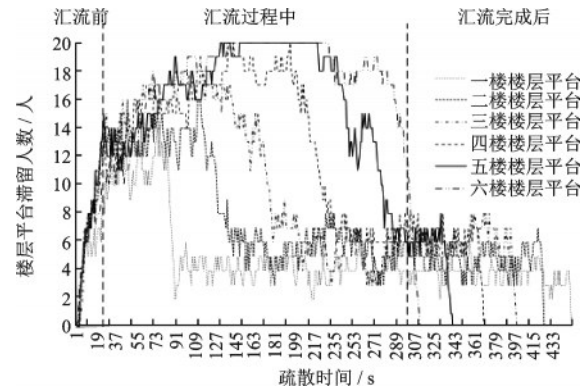


图4 楼层平台人流

Fig.4 Pedestrian flow of the floor platform

趋势,当汇流发生时,楼层平台的滞留人数逐渐增加,楼层平台人流输出率逐渐减小,当楼层平台滞留人数为楼层平台最大容量值时,楼层平台人流输出率达到极小值,当汇流过程结束时,楼层平台的滞留人数将会减小,楼层平台人流输出率增加,最终保持稳定状态。

在楼梯汇流过程中,除了楼层平台人流输出率,还应考虑楼梯汇流比率的影响。由于模拟过程受概率影响,需要增加模拟次数,提高模拟结果的稳定性,得到最稳定的疏散时间与最佳模拟次数,以汇流比率0.5,计算其模拟结果的稳定性与最佳次数,如图5所示。当汇流比率为0.5时,最佳模拟次数为16次,模拟结果的稳定性较好。

根据公式(5),参考建筑物设计要求,改变楼层通道宽度,得到不同楼梯汇流比率。设计楼层通道宽度为1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7 m,模拟不同通道宽度下楼梯汇流过程,增加模拟次数,使模拟结果趋于稳定,准确得到不同汇流比率下楼梯疏

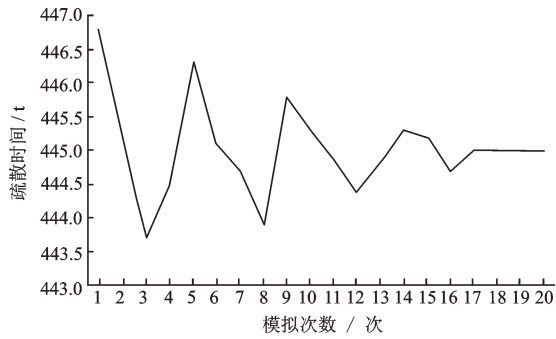


图5 模拟结果稳定性

Fig.5 Stability of the simulation results

散时间、汇流时间与汇流效率,见表1。

表1 不同汇流比率疏散结果

楼层通道宽度/m	汇流比率	疏散时间/s	汇流时间/s	楼层平台人流输出率/(人·s ⁻¹)
100	0.4	456.50	338.70	0.97
110	0.42	450.30	309.60	1.18
120	0.44	446.80	292.30	1.27
130	0.46	440.80	270.90	1.39
140	0.48	441.00	273.30	1.37
150	0.5	445.00	275.30	1.31
160	0.52	448.00	296.90	1.23
170	0.53	449.50	301.40	1.21

通过模拟结果可以得到:①在不同汇流比率下,楼梯疏散时间、汇流时间与楼层平台人流输出率也不同。随着楼梯汇流比率的增加,楼梯疏散时间与汇流时间呈现先减后增的趋势,楼层平台人流输出率呈现先增后减的趋势。楼梯疏散时间、汇流时间与楼层平台人流输出率在楼层通道宽度设计范围内存在最优值,当楼梯汇流比率为0.46时,楼梯疏散时间、汇流时间与楼层平台人流输出率都达到最优值,分别为440.8 s、270.9 s、1.39。②楼梯疏散时间、汇流时间与楼层平台人流输出率之间存在相互作用的关系。楼梯汇流时间与楼梯疏散时间成正相关关系,当汇流时间增加时,楼梯疏散时间增加;楼梯汇流时间与楼层平台人流输出率之间成负相关关系,当楼层平台人流输出率增加时,楼梯汇流时间降低,导致疏散时间减小,如图6所示。

综合上述所求疏散时间,根据式(22),得到不同汇流比率下的楼梯疏散能力,如图7所示。当楼

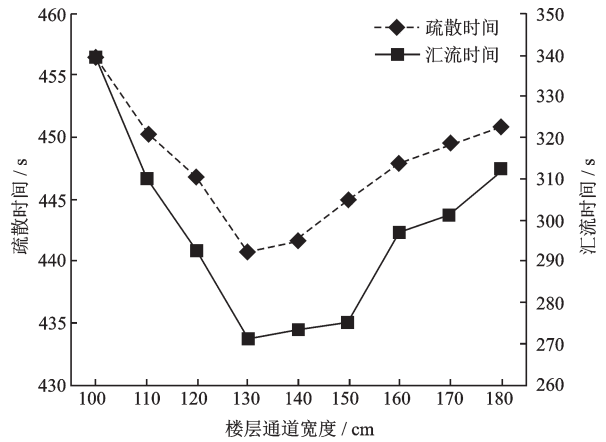


图6 不同楼层通道宽度下人流疏散与汇流时间

Fig.6 Evacuation time and merging time of pedestrian flow under different floor channel widths

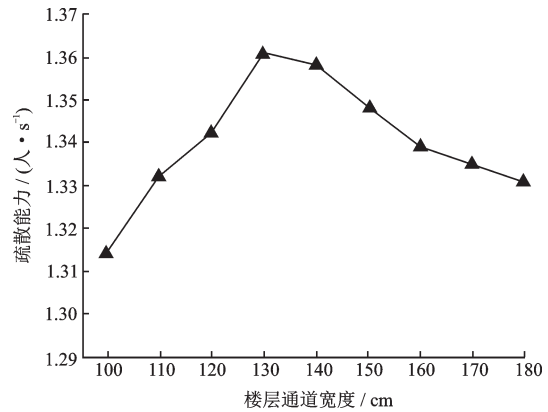


图7 不同楼层通道宽度下楼梯疏散能力

Fig.7 Stairs evacuation capacity under different floor channel widths

层疏散时间较长时,楼层人流通过率较低,楼层平台人流量饱和时间持续较长,因此,整个楼层的疏散能力较低。随着楼层通道宽度增加,楼梯疏散能力呈现先增后减的趋势,当楼层通道宽度较低时,即宽度为100 cm,楼梯疏散能力为1.31人/s,当楼层通道宽度为130 cm时,楼梯疏散能力为1.36人/s;当楼层通道宽度为170cm时,楼梯疏散能力为1.33人/s。在建筑物设计范围内,楼梯疏散能力受楼梯汇流比率影响,当楼梯汇流比率增加时,楼梯疏散能力先增后减,在汇流比率为0.46时达到最优,此时,楼层汇流时间、疏散时间与汇流效率也达到最优。因此,适当的汇流比率会增强楼梯的疏散能力,降低楼梯汇流时间,减轻楼梯拥挤程度,提高楼梯疏散时间。

4 结 论

(1)以楼梯疏散模型为基础,模拟楼梯行人疏散过程,改变楼梯汇流比率,生成楼梯疏散能力曲线。结果表明:当汇流过程发生时,楼层平台人流输出率降低,楼层平台人流量增多,楼梯汇流时间增长,楼梯疏散时间增加;当汇流比率为0.46时,即楼层通宽度为130 cm时,楼层平台人流输出率与楼梯疏散能力达到最大。通过分析楼梯疏散能力与楼层平台人流输出率与比率之间的关系,可为楼梯设计提供理论支持,提高楼梯疏散能力。

(2)在汇流过程中,行人的心理变化也会影响楼梯的疏散能力,如何从行人心理决策角度出发,改变楼梯设计,提高楼梯疏散能力,将是下一阶段的主要工作。

参考文献:

- [1] 朱孔金,杨立中.房间出口位置及内部布局对疏散效率的影响研究[J].物理学报,2010,59(11):7 701-7 707.
Zhu K J, Yang L Zh. The effects of exit position and internal layout of classroom on evacuation efficiency [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59 (11) : 7 701-7 707. (in Chinese)
- [2] 赵国敏,倪照鹏,张青松.地铁站人员疏散离散时间模型研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(2):152-157.
Zhao G M, Ni Zh P, Zhang Q S. The Study on evacuation discrete time computational model for subway station [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 30(2): 152-157. (in Chinese)
- [3] Li W, Li Y, Yu P, et al. Modeling, simulation and analysis of the evacuation process on stairs in a multi-floor classroom building of a primary school [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2016, 469:157-172.
- [4] 陈绍宽,狄月,史荣丹,等.地铁车站站台火灾影响分析与人员疏散研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):241-248.

- Chen Sh K, Di Y, Shi R D, et al. Simulation and analysis on impacts and evacuation during the process of fire on metro platforms [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1):241-248. (in Chinese)
- [5] Lian L, Mai X, Song W, et al. Pedestrian merging behavior analysis: an experimental study [J]. Fire Safety Journal, 2017, 91:918-925.
- [6] 陈绍宽,刘爽,肖雄,等.基于M/G/c/c模型的地铁车站楼梯通道疏散能力瓶颈分析[J].铁道学报,2012,34(1):7-12.
Chen Sh K, Liu Sh, Xiao X, et al. XM/G/c/c-based model of passenger evacuation capacity of stairs and corridors in metro station [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1):7-12. (in Chinese)
- [7] Qu Y, Gao Z, Xiao Y, et al. Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs [J]. Safety Science, 2014, 70:189-201.
- [8] Ding Y, Yang L, Weng F, et al. Investigation of combined stairs elevators evacuation strategies for high rise buildings based on simulation [J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2015, 53:60-73.
- [9] Ronchi E, Reneke P A, Peacock R D. A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(7-8):4 380-4 396.
- [10] Zeng Y, Song W, Jin S, et al. Experimental study on walking preference during high-rise stair evacuation under different ground illuminations [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2017, 479:26-37.
- [11] Sano T, Ronchi E, Minegishi Y, et al. A pedestrian merging flow model for stair evacuation [J]. Fire Safety Journal, 2017, 89:77-89.
- [12] Kuligowski E, Peacock R, Wiess E, et al. Stair evacuation of people with mobility impairments [J]. Fire & Materials, 2015, 39(4):371-384.
- [13] Ronchi E, Reneke P A, Kuligowski E D, et al. An analysis of evacuation travel paths on stair landings by means of conditional probabilities [J]. Fire Safety Journal, 2014, 65(1):30-40.

(本文责编:周小潭)