

# 差异化设施布局下的建筑物人流疏散效率研究

李之红<sup>1</sup>, 文琰杰<sup>1</sup>, 许旺土<sup>2</sup>, 齐悦<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 2. 厦门大学, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 建筑物内行人疏散受时间和空间限制, 各种出入口、通道和瓶颈错综复杂。依托既有建筑空间, 设计了正常疏散人群下 3 种不同设施布局方案, 估计了各方案不同瓶颈影响下的安全逃生最短时间, 并建立了考虑设施布局和动态信息的建筑物安全疏散模型, 并通过仿真, 对比分析了不同方案间的疏散时间、区域密度的变化和疏散效率。研究表明, 模型计算与仿真能够有效的估计不同设施布局下的行人疏散效率, 进而为不同的设施布局方案的选取提供建议。

**关键词:** 人流疏散; 设施布局; 疏散瓶颈; 建筑物

中图分类号: U4911 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 10-2146-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0350

## Analyzing the Pedestrian Evacuation Efficiency in Architecture based on Different Facilities Layout

Li Zhihong<sup>1</sup>, Wen Yanjie<sup>1</sup>, Xu Wangtu<sup>2</sup>, Qi yue<sup>1</sup>

(1. UDC Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Pedestrians escaping from the architecture are restricted by limited time and space. There are so many different exits, channels and bottleneck. Three kinds of facilities layout were designed to be initial schemes. The shortest escaping time was estimated by the different bottlenecks. Then, a safety escaping model based on the facilities layout and dynamic information was proposed, and the escaping time, area density and evacuation efficiency were analyzed by the simulation. The research indicates that by calculating and simulating the model can estimate the evacuation time for different schemes, and the result can provide some advices for facilities layout.

**Keywords:** crowd evacuation; facilities layout; bottleneck; architecture

## 引言

建筑内密集行人流是一个复杂的系统, 由于疏散时间、空间和障碍物限制, 以及行人间的交互作用和行人个体的自发性行为, 在逃生时呈现竞争安全出口空间、相互推挤等现象, 一旦人群状态发生突变, 极易导致拥挤踩踏等次生灾害。

建筑物内疏散人群具有“交通流、颗粒流、差异化行为”三重特征, 人群疏散过程的分析与疏散行为的研究是保障疏散安全、建筑物设施布局以及提高拥挤管理水平的关键环节。

目前, 建筑物内行人疏散研究取得了一些研究成果, 主要集中在效率分析、行人仿真和疏散行为 3 个方面。在设施布局与疏散效率分析方面, 朱孔金等<sup>[1]</sup>, Stephens 等<sup>[2]</sup>研究了内部布局对疏散的影响, Yue 等<sup>[3-4]</sup>, 吴文杰等<sup>[5]</sup>, 李世威等<sup>[6]</sup>研究了出口宽度、数量、位置, 以及建筑物内行人分布不平衡条件下的疏散, Tian 等<sup>[7]</sup>研究了不同出口设置条



收稿日期: 2017-07-21 修回日期: 2018-11-07;  
基金项目: 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助(X18030), 北京建筑大学教学科学研究项目(Y1806);  
作者简介: 李之红(1981-), 男, 满族, 河北, 博士, 副教授, 研究方向为交通枢纽设计与安全; 文琰杰(1996-), 男, 湖南, 硕士生, 研究方向为深度学习在交通中的应用。

件下疏散效率, 岳昊等<sup>[8]</sup>研究了行人视线受影响和亲属效应等不同因素下的疏散过程。在建筑物行人仿真方面, 主要采用粒子模型<sup>[9]</sup>、社会力模型<sup>[10]</sup>和元胞自动机模型<sup>[11]</sup>模拟仿真行人个体之间、行人与周边环境之间的相互作用力及其对行人个体行为和群体疏散安全的影响。在建筑物人群疏散行为方面, Guo 等<sup>[12]</sup>研究了多出口教室的行人路径选择行为和内部通道的通行能力<sup>[13]</sup>, 施家城等考虑建筑物内人员的空间知识差异, 对疏散效率进行了分析。综合相关的研究和既有规范, 对于设施的布局和设施的尺寸的研究仍然处于探索阶段, 具体的建筑设计需要结合条件进行设计布局, 不同布局和尺寸条件下行人的行为存在明显的差异性, 对疏散效率具有直接的影响, 而仿真中多采用粒子模型, 较少考虑疏散人群的群体和个体行为, 对建筑内的差异化的路径选择行为研究也不足。本文在考虑不同设施布局的条件下, 通过对各种瓶颈的通行能力测算分析建筑物内的疏散瓶颈, 并建立了考虑设施布局和信息建筑物安全疏散模型, 最后进行了实证分析, 对比分析不同布局条件下的疏散效率。研究有助于了解不同设施布局条件下的行人路径选择行为和拥挤形成扩散机理。

## 1 实验方案

### 1.1 实验环境与初始布局

对于行人来说, 疏散场地固有设施为不可移动

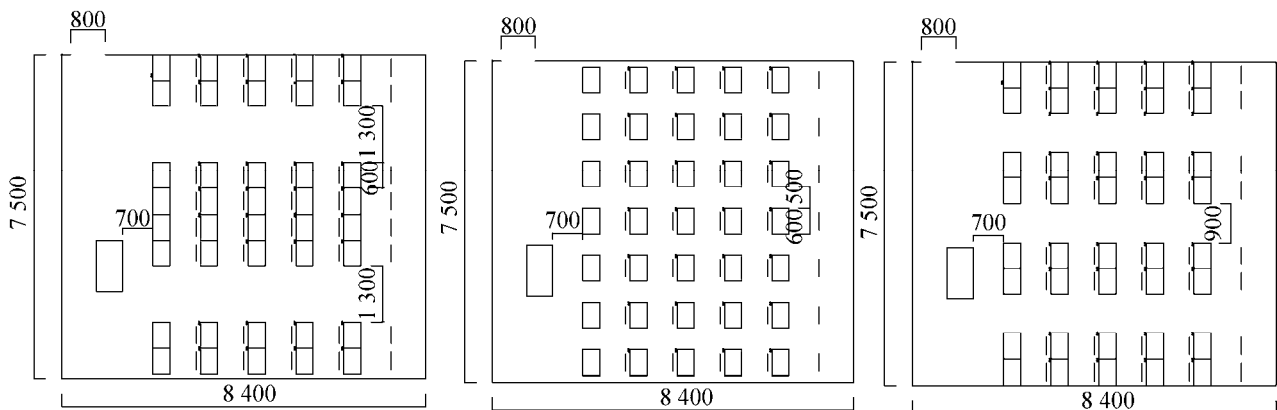


图 2 建筑内不同设施布局方案

Fig. 2 Initial layout of different facilities in the building

障碍物。根据现有房间尺寸 8.4 m\*7.5 m(见图 1), 共设置 41 位师生, 预设 3 种格局方案(见图 2): S1-双过道(过道宽度 1.3 m), S2-单排桌椅(过道宽度 0.5 m), S3-三过道(过道宽度 0.9 m), 桌椅的宽度按照 0.6 m 设置。图 3 描述了初始状态下行人的位置, 其中红色代表不同尺寸的行人。



图 1 建筑内不同设施布局现状

Fig. 1 Current situation of different facilities layout in the building

### 1.2 基于瓶颈分析的逃生时间估计

人员疏散包含探寻危险、确认危险、准备逃生、开始逃生等阶段。人员疏散是否成功取决于可用的逃生时间是否大于人员全部逃生所需要的时间, 其中  $t_{PE}$  为可用安全逃生的时间, 即从危险发生到危险接近对人员构成危险的时间,  $t_{DE}$  为危险发生后需要的逃生时间,  $t_{Des}$  为从危险发生至人员安全逃生时间即有  $t_{Des} = t_{DE} + t_{Safe}$   $t_{PE}$ 。而  $t_{move}$  为逃生行动时间,  $t_{safe}$  为安全裕度时间,  $t_{Safe}$  可取 0.5-0.7 倍的逃生行动时间, 系数表示为  $\alpha$ , 即  $t_{Safe} = \alpha \cdot t_{move}$ 。取  $\alpha$  为 0.65,  $t_{DE}$  可表示为:

$$t_{DE} = t_{dis} + t_{res} + t_{move} \quad (1)$$

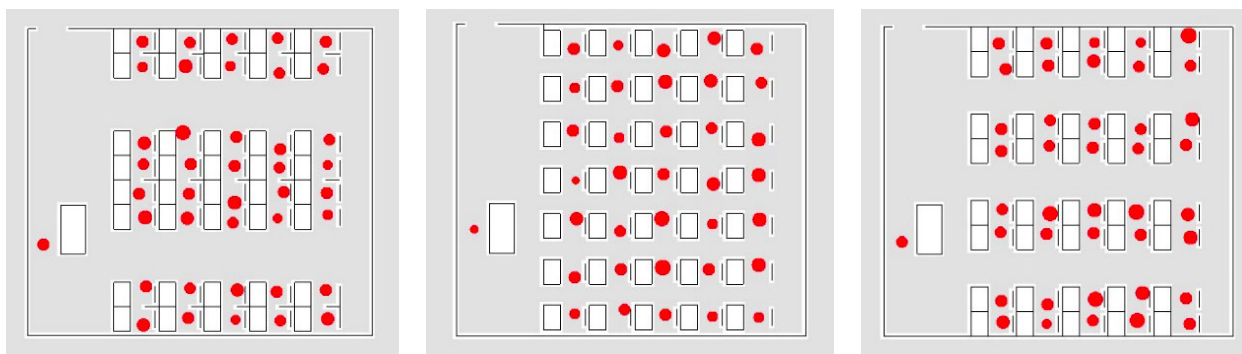


图 3 不同设施布局行人初始分布状态

Fig. 3 Pedestrian distribution under the condition of different facilities layout

式中： $t_{dis}$  为发现危险的时间； $t_{res}$  为人群反应与初始决策时间， $t_{move}$  为开始移动至全部逃生的时间。

人员逃生前的平均反应时间  $t_{res}$  可根据不同规模区域进行给定<sup>[14]</sup>，本文给为 5 s，教室中所有人通过过道、门和座椅排的最短时间表示为  $t_{aisle}$ 、 $t_{door}$  和  $t_{seat}$ ，令  $p$  为需要疏散的人数， $q$  需要通过某组座椅的人数， $C$  为通行能力，可以取 1.3 人/m·s， $n$  为门或通道的个数， $w$  为通道或门的有效宽度。则有：

$$t_{aisle} = \frac{p}{C_{aisle} n w_{aisle}} \quad (2)$$

$$t_{door} = \frac{p}{C_{door} n w_{door}} \quad (3)$$

$$t_{seat} = \frac{q}{C_{seat} w_{seat}} \quad (4)$$

离出口最远的人的逃生时间  $t_{pMaxD} = \frac{a+b}{v}$ ，其

中  $a$ 、 $b$  分别为建筑物的长和宽度。

$$t_{move} = t_{pMaxD} + \max\{t_{aisle}, t_{door}, t_{Seat}\} \quad (5)$$

则：

$$t_{DE} = t_{dis} + t_{res} + t_{pMaxD} + \max\{t_{aisle}, t_{door}, t_{Seat}\} \quad (6)$$

$$t_{Des} = t_{dis} + t_{res} + \alpha[t_{pMaxD} + \max\{t_{aisle}, t_{door}, t_{Seat}\}] + t_{PE} \quad (7)$$

在不同布局环境下，瓶颈的位置和瓶颈通行能力有差异，通过瓶颈点的分析，为行人在路径选择中提供决策，规避不符合实际的路径方案。

## 2 基于设施布局与动态信息的建筑物安全疏散模型

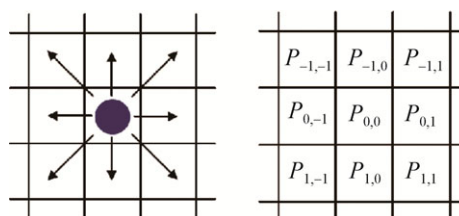
### 2.1 基本规则

模型场景采用平面二维  $(W+2) \times W+2$  元胞网格表示， $W+2$  表示为了保证元胞数  $W$  向周边移动的最小可行邻域空间，每个元胞尺码为 40 cm×40 cm，元胞有空置和占用两种状态。元胞可以被墙体、设施、行人占据。每个元胞只能容纳 1 人，行人只能从出口离开。采用 Moore 邻域进行仿真，该邻域每个人周边有 8 个可选方向(见图 4)。

$$Wall = \{(x, y) = 2, x = 1, W + 2; y = 1, W + 2\} \quad (8)$$

$$Exit = \{(x, y) = 0, x = 1, W + 2; y = 1, W + 2\} \quad (9)$$

每个时间步，疏散空间中的每个行人可以移动到未被占据的相邻元胞内。在每个时间步，行人会被放在一个随机队列中，按照队列中的顺序每个行人不但可以向周边邻域 8 个方向移动一个网格的距离，也可停留在原来的位置，如图 4 所示。



(a) 行人所在空间位置 (b) 行人周边邻域

图 4 移动规则设定及概率分布

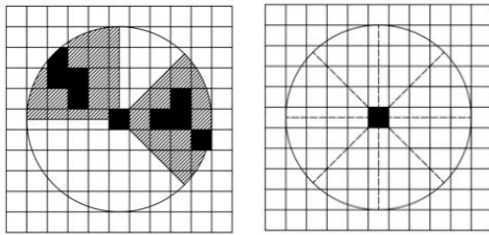
Fig. 4 Movement rules and probability distribution

$$F(x, y) = \{(m, n) \mid |m - x| = 1, |n - y| = 1, (m, n) \in Q^2\} \quad (10)$$

在  $F(x, y)$  每个元胞都有 2 种状态, 分别为方向参数和空置参数。

## 2.2 视觉区域及可行移动方向的设定

根据元胞的走行方向规则(如图 5 所示), 定义元胞视域分别为  $V_{i,i}^E$ 、 $V_{i,i}^S$ 、 $V_{i,i}^W$ 、 $V_{i,i}^N$ 、 $V_{i,i}^{NE}$ 、 $V_{i,i}^{SE}$ 、 $V_{i,i}^{NW}$ 、 $V_{i,i}^{SW}$ , 分别代表 8 个方向。例如  $V_{i,i}^E$  是元胞  $Cell(i, j)$  指向东方向视域内未被占据的元胞数量, 视域是指行人所处位置能过看到的区域, 例如东方向视域内区域主要包含的元胞数为 12 个, 其中被占据元胞为 4 个, 则  $V_{i,i}^E = 8$ , 同理西北方向共包含主要元胞 13 个, 被占据 4 个,  $V_{i,i}^{NW} = 9$ 。



(a) 行人步行方向视域 (b) 行人移动视域范围

图 5 可行移动方向及元胞视域计算示意

Fig. 5 Feasible movement direction and calibration of vision fields

在每个时间步长, 行人走行沿 8 个方向转移至未被占据的元胞的概率计算如式(11)和式(12)。

$$PV_{ij}^k = \exp[\omega_S S_{i-1} + \omega_D D_{i-1, j} + \omega_V V_{i-1}^k] \cdot j + \sum_{m \neq k} (\omega_C C_r^m + \frac{\omega_E}{E_{i-1, j}^m}) (1 - \mu_{i-1}) \xi_{i-1, j}^k \quad (11)$$

$$P_{ii}^k = PV_{ii}^k / \sum_{\forall k} PV_{ii}^k, k = \{E, S, W, N, NE, SE, NW, SW\} \quad (12)$$

式中:  $S_{i,j}$  为元胞  $Cell(i, j)$  的静态值域; 对应的权重系数为  $\omega_S$ ; 系数  $\omega_D$  为从众的比例趋势, 值越大蜂拥效应越强;  $\omega_V$  为对于元胞指向某方向未被占据的元胞数量指标  $V_{i-1}^k$  对应的权重。元胞的静态值域  $S_{i,j}$  不受时间和行人的影响, 可以按照如式(13)和式(14)计算。

$$S_{ij} = \min_{i_T, j_T} \{ \max_{i_h, j_h} \{ \sqrt{(i_T - i_h)^2 + (j_T - j_h)^2} - \sqrt{(i_T - i)^2 + (j_T - j)^2} \} \} \quad (13)$$

$$D(i, j) = \frac{L(x, y) - L(m, n)}{\sqrt{(m - x)^2 + (n - y)^2}} \quad (14)$$

这里  $(i_h, j_h)$  指到达元胞  $(i_T, j_T)$  的所有距离值域中的最大值。  $C_r^m$  为出口  $m$  的单位时间的通行能力, 定义为单位时间内  $r$  半径影响区域内可用的元胞数,  $\omega_c$  为其对应敏感性参数,  $E_{i,j}^m$  为欧式距离。  $\mu_{i,j}$  表示元胞是否被占用, 如果被占用  $\mu_{i,j} = 0$ 。  $L(x, y)$  为元胞  $Cell(i, j)$  与出口间估计的最优效用。  $L^k(x, y)$  定义为元胞  $Cell(i, j)$  到第  $k$  个出口估计的最优效用。

基于模型, 对 3 种不同的场景进行仿真分析, 由于行人间存在竞争出口和通道的行为, 当几个人同时要进入同一元胞时, 依据同向最优原则进行分配, 即前进的方向约接近该元胞, 占据的概率越大。 同时在面对通道、座椅排等瓶颈时, 依据对瓶颈的计算, 瓶颈的通行能力越低被选择的概率越小。

## 3 仿真结果与讨论

### 3.1 疏散时间与疏散速率

通过对 3 种不同布局条件下的建筑物进行仿真, 初始设置平均疏散反应时间为 5 s, 得到的疏散时间如表 1 所示。

表 1 基于瓶颈分析与仿真的不同设施布局条件下最短疏散时间

Tab. 1 Shortest escaping time of different facilities layout based on bottleneck analysis and simulation

类别	变量	S1	S2	S3	最小值
	$t_{door}$	39	39	39	39
	$t_{aisle}$	12.1	10.5	11.5	10.5
	$t_{seat}$	44.4	11.1	22.2	11.1
估计值/s	$t_{PMaxD}$	20.6	24.1	22.4	20.6
	$t_{move}$	65.0	63.1	61.4	61.4
	$t_{DE}$	70.0	68.1	66.4	66.4
	$t_{DeS}$	79.9	77.6	75.6	75.6
仿真值/s	--	78	75	76.8	75
误差值/%	--	-2.38	-3.35	1.59	-0.79

其中方案 S1 需要的疏散时间最长共 78 s，方案 S2 时间最短 75 s。而根据上面模型计算可知，在 3 种方案中，主要的瓶颈点为门和过道，计算后预定人数通过门和过道的最短时间如表所示，其中 S1 为 2 条 1.3 m 宽过道，S2 为 6 条 0.5 m 宽过道，S3 为 3 条 0.9 m 宽过道。

### 3.2 瓶颈区密度变化结果

基于仿真可得 3 种方案的累积最大密度和平均密度如图 6~7 所示，分析发现在门口区域、过道区域和座椅排均是疏散过程中的可能的瓶颈点。疏散过程中人群密度变化是管理者最为关心的问题之一，人群密度过高，人群状态极易发生突变，从图 6~7 可以看出，在 3 种方案中，最大密度分别出现在不同的位置，S1 方案中最大密度出现在座椅排，瞬时值超过了 2.52 人/m<sup>2</sup>。S2 方案在个别通道出瞬时最大密度也达到了 2.48 人/m<sup>2</sup>。而 S3 方案

整体区域瞬时密度相对较低，座椅排人群最大密度为 1.68 人/m<sup>2</sup>。3 个方案中 S1 方案的门口区域密度值最大，达到了 2.09 人/m<sup>2</sup>，S1 方案门口区域是影响其疏散的关键，S2 方案，过道区域和座椅排的干扰是影响疏散的关键，S3 方案中过道和门口宽度接近，其的影响程度也相近。

### 3.3 疏散效率结果与分析

根据模型与仿真分析，3 种方案中 S3 和 S2 方案疏散时间接近，而方案 S1 疏散时间最长。分析可知，3 种布局方案中，S1 布局通道和门都能够收到最好的疏散效率，但由于联排座椅的限制，部分人可能会穿越座椅排，4 联排座椅，最大可能穿越人数为 4 人，影响疏散效率。而 S2 方案为单独座椅，单座椅只能影响 1 人，同样 S3 方案为双排座椅，单排最大影响人数为 2 人。

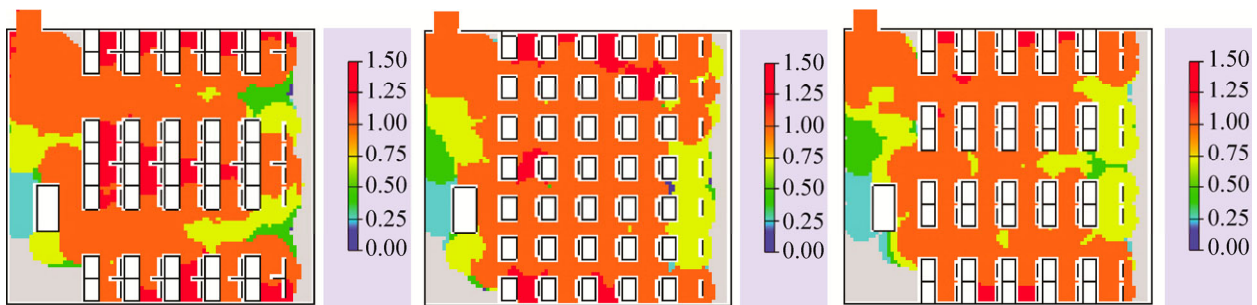


图 6 不同布局方案疏散过程中累积最大密度图

Fig. 6 Accumulative maximum density of different facilities layout

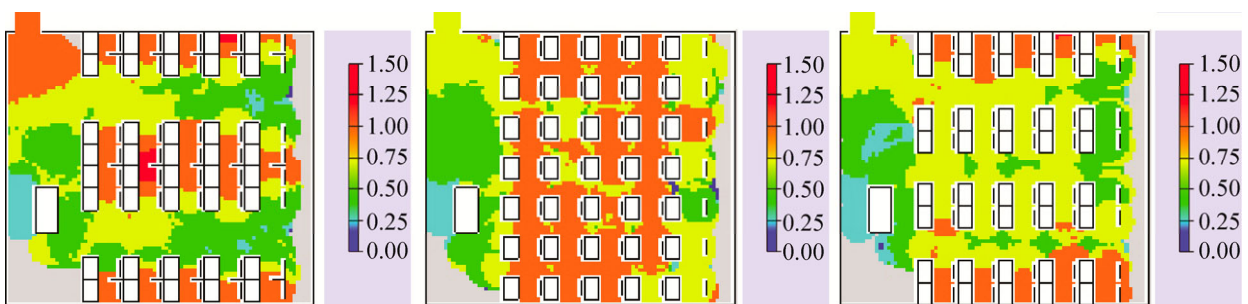


图 7 不同布局方案疏散过程中累积平均密度图

Fig. 7 Accumulative average density of different facilities layout

3 种方案中过道宽度差别明显, S1、S2 和 S3 过道宽度分别为 1.3 m、0.5 m 和 0.9 m, 根据 2016 年中国人口体测数据, 中国年轻人的平均肩宽为 0.6 m, 而胯部宽度在 0.25–0.28 m, S2 方案过道共 6 条, 其综合疏散能力最强, 最短时间需求为 10.5 s, 而相比较而言, S1 方案, 通道最宽为 1.3 m, 但共两条, 综合疏散能力最弱, 最短时间需求为 12 s。S3 方案介于 2 种方案之间, 模型计算得到该方案疏散时间最短, 为 75.6 s。同时该方案中通道宽度 0.9 m, 也便于人群通行, 双排座椅设置合理引导下, 能够有效的避免座椅的影响。

另外, 如图 8 所示, 在门口区域, 各个方案均出现了拥挤现象, 其中 S1 方案拥挤程度最明显,

最大密度达到了 2.09 人/m<sup>2</sup>, S3 和 S2 最大密度分别达到了 1.71 人/m<sup>2</sup> 和 1.54 人/m<sup>2</sup>。其中 S1 方案最大峰值时段持续了 13 s。从图 9 门口区域的疏散流率变化可知, 3 种方案最大流率出现在 S1 中, 达到了 105 人/min, 而方案 S3 和 S2 略小, 分别为 100 人/min 和 85 人/min。疏散人群中不同方案门口区域的速度分布如图 10 所示, 方案 1 中 0.72–1.35 m/s 的速度区间占比最高到达了 63.4%, 而方案 S2 和 S3 中, 比例最高的速度区间为 0.45–0.72 m/s, 达到样本量的 50% 左右。从疏散时间效率角度, 综合模型计算和仿真来看方案 S3 最优为, 推荐方案。

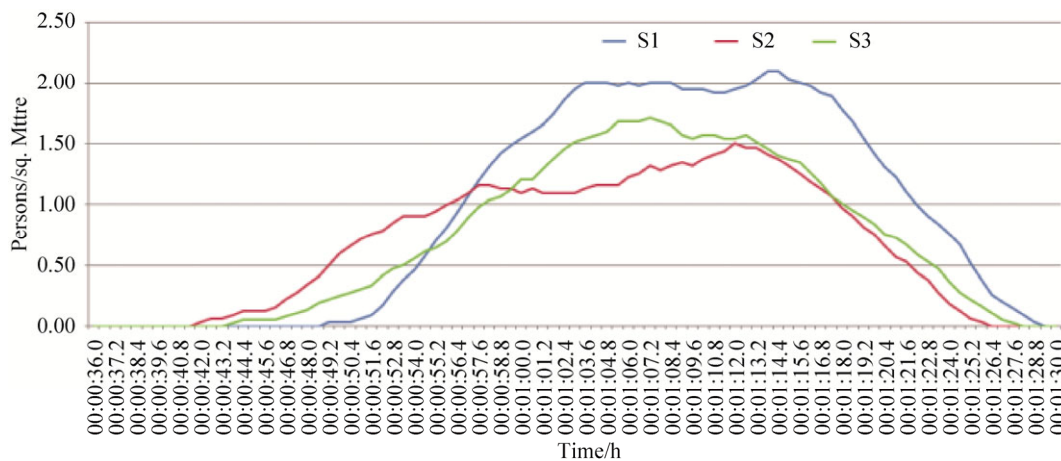


图 8 不同布局方案门口区域平均密度变化图

Fig. 8 Average density fluctuation in door area of different layouts

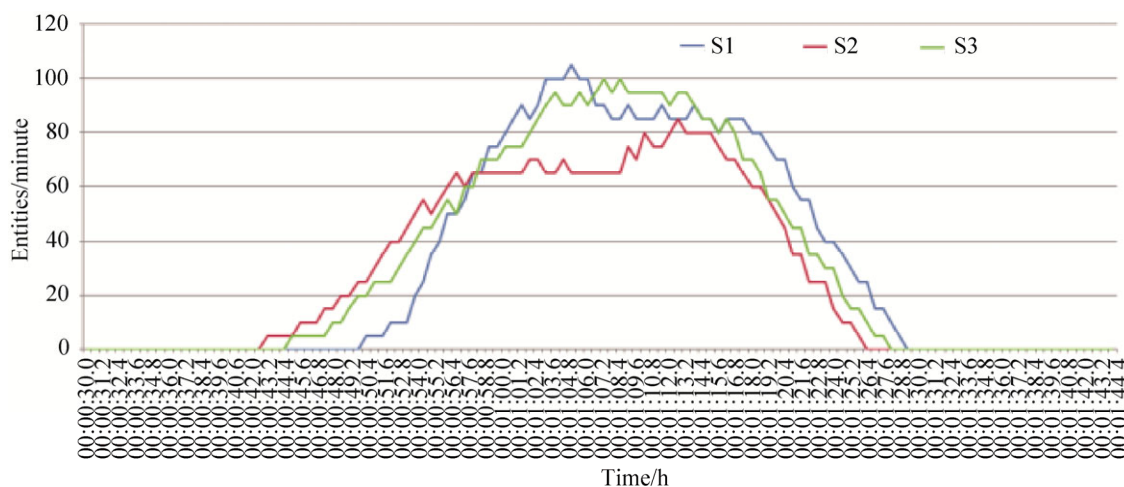


图 9 不同布局方案行人经过出口流率变化图

Fig. 9 Flow rate fluctuation passing the door of different layouts

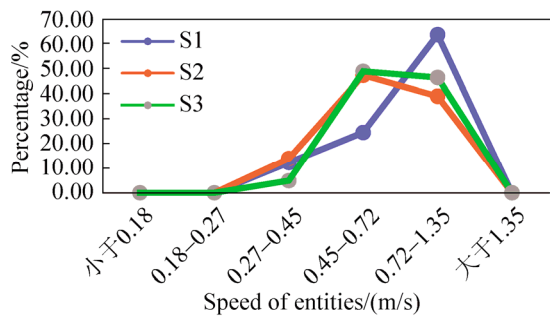


图 10 不同布局方案行人经过出口速度分布图  
Fig. 10 Distribution of speed passing the door of different layouts

另外，图 11 展示了 3 种不同方案行人疏散离开教室的变化曲线，不同的方案再不同的时间阶段效率不同，S1 方案由于座椅的抑制，初始阶段行人由座椅到达过道的的时间较长，导致第一个逃出教室的行人时间明显滞后。而 S2 方案，由于单桌椅的优势，使得行人能够快速摆脱座椅的抑制，最早有行人逃出教室。而 S3 方案初始逃生处于中等状态，但后期由于通道宽度适中，最早完成全部疏散。从疏散空间利用率上分析(如图 12)，主要考虑门和

通道周边区域可用空间，3 种方案空间利用率从高到低分别是 S2、S3、S1，其中 S2 方案合计可用通道宽度为 3.0 m，尽管单通道宽度仅为 0.5 m，对极少数体型的人有一定影响，但其为 6 条独立可用通道，能够较少干扰的快速疏散，其各通道空间利用率也较为均衡。S3 方案可用通道宽度为 2.7 m，为 3 条通道，由于人的平均肩宽为 0.6 m，所以该方案 0.9 m 的过道宽度基本无法实现并行 2 人通行，突发事件下行人更多的是占据通道中间位置，图 12(c)中能够明显看出每条通道中间区域利用率明显高于两侧，所以 S3 方案有效的行人道条数 4.5 条。S1 方案共有 2 条过道，按照平均肩宽，1.3m 的宽度能够同时满足 2 人并行，但同样，根据仿真可以看出，行人仍然倾向于占据过道的中间位置(见图 12(a))，考虑到过道空间的充裕，S1 方案有效的人行道为 4 条，同时，部分行人存在穿越座椅排的行为，影响了疏散效率。总之，从空间利用率来看方案 S2 空间利用率最高，S1 利用率最低。

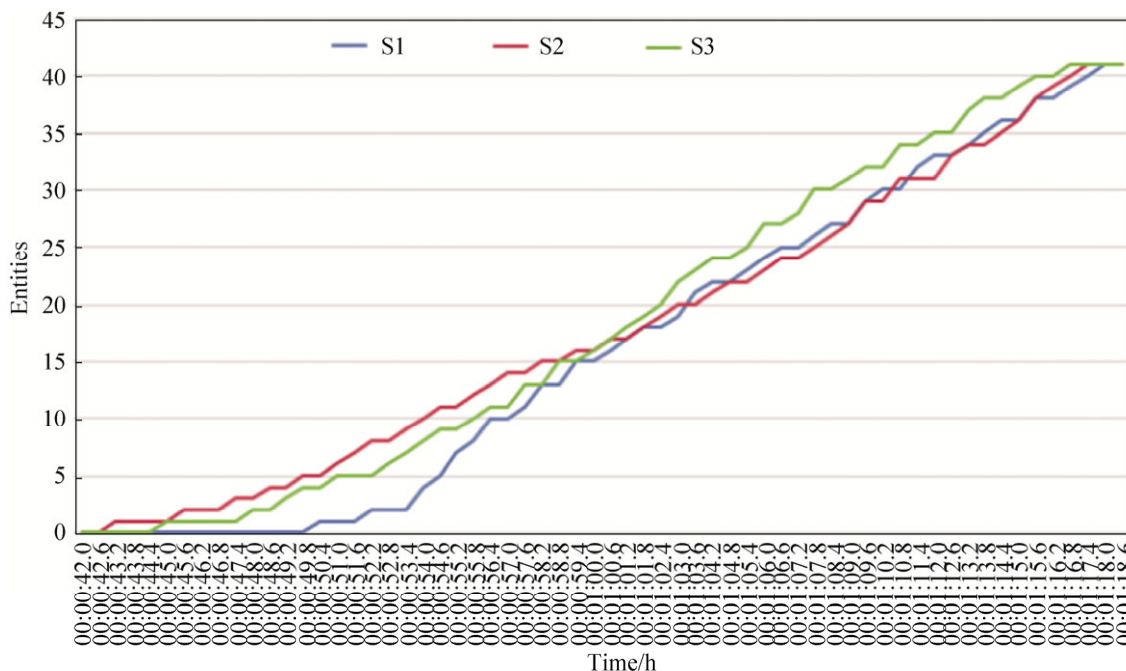


图 11 不同布局方案累积疏散人数变化图  
Fig. 11 Accumulative evacuation pedestrian count of different layouts

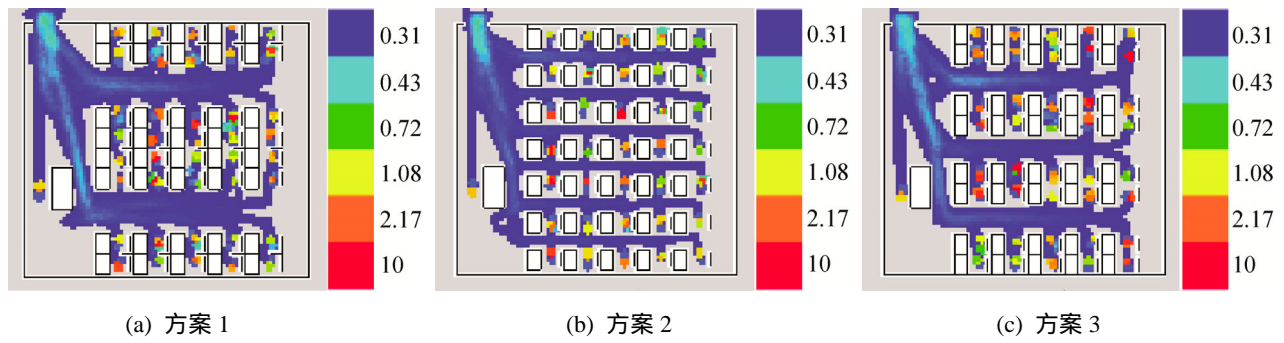


图 12 不同布局方案疏散过程中空间利用率变化图  
Fig. 12 Space utilization in evacuation of different layouts

## 4 结论

基于模型与仿真分析, 预设的 3 种布局方案中 S3 方案在疏散密度、疏散时间进度、疏散空间利用率等指标综合比较下, 能够快速高效的完成人群的疏散, 为最优布局方案。论文完成的具体结论如下:

1) 分析了建筑物内不同设施布局作为关键因素对行人疏散时间、疏散密度等的影响, 为建筑物出口设计、设施布局、通道宽度需求等提供理论依据, 对既有建筑物设计规范是良好的补充;

2) 将疏散时间分解为发现危险时间、反应与初始决策时间、开始移动至逃生结束时间 3 部分, 并对不同设施布局条件下的各种瓶颈点进行最短疏散时间需求进行估计;

3) 建立了基于设施布局与动态信息的建筑物安全疏散模型, 考虑疏散者个体行为因素及可视范围。为在可视范围及信息差异下的疏散仿真提供支持, 对不同布局方案进行优化评估。

模型在行人路径选择过程中未考虑行人心理活动对选择行为的影响, 未来还需继续考虑行人的个体行为因素。未来将在模型中融入行人心理因子。

## 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): 7701-7707.  
Zhu kongjin, Yang Lizhong. The effects of exit position and internal layout of classroom on evacuation efficiency[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(11): 7701-7707.

[2] Stephens K K, Jafari E, Boyles S, et al. Increasing

Evacuation Communication Through ICTs: An Agent-based Model Demonstrating Evacuation Practices and the Resulting Traffic Congestion in the Rush to the Road[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management (S1547-7355), 2015, 12(3): 497-528.

[3] 岳昊, 王帅, 张磊, 等. 行人步行设施紧急疏散出口设置方法[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(6): 1-6.  
Yue Hao, Wang Shuai, Zhang Lei, et al. Setting method of emergency exits in pedestrian walking facilities[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(6): 1-6.

[4] 岳昊, 张旭, 陈刚, 等. 初始位置布局不平衡的疏散行人流仿真研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 13050901-13050911.  
Yue Hao, Zhang Xu, Chen Gang, et al. Simulation of pedestrian evacuation with asymmetrical pedestrian layout[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 13050901-13050911.

[5] 吴文洁, 胡荣, 陈琳, 等. 突发事件中多障碍物房间疏散效率研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(3): 417-422.  
Wu Wenjie, Hu Rong, Chen lin, et al. Research on the evacuation efficiency of multi-obstacle room in emergency[J]. Computer Simulation, 2017, 34(3): 417-422.

[6] 李世威, 王建强, 刘应东. 初始分布非均匀的疏散行人流实验研究和数学建模[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(4): 423-436.  
Li Shiwei, Wang Jianqiang, Liu Yingdong. Experimental features and mathematical model of pedestrian evacuation with asymmetrical pedestrian distribution [J]. Scientia Sinica, 2017, 47(4): 423-436.

[7] Tian H H, Dong L Y, Xue Y. Influence of the exits' configuration on evacuation process in a room without obstacle[J]. Physica A (S0378-4371), 2015, 420: 164-178.

[8] 岳昊, 邵春福, 关宏志, 等. 基于元胞自动机的行人视线受影响的疏散流仿真研究[J]. 物理学报, 2010, 59(7):



- 4499-4507.
- Yue Hao, Shao Chunfu, Guan Hongzhi, et al. Simulation of pedestrian evacuation flow affected visual field using cellular automata[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4499-4507.
- [9] Henein C M, White T. Macroscopic effects of microscopic forces between agents in crowd models[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications (S0378-4371), 2007, 373(36): 694-712.
- [10] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature (S1476-4687), 2000, 407(6803): 487-490.
- [11] Song W G, Xu X, Wangn B H, et al. Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics[J]. Physica A (S0378-4371), 2006, 363(2): 492-500.
- [12] Guo R Y, Huang H J. Route choice in pedestrian evacuation: formulated using a potential field[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment (S1742-5468), 2011, 2011(4): 4-18.
- [13] 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]. 北京交通大学学报, 2011, 35(6): 28-32, 39. Wang Zijia, Chen Feng, Luo Cheng. Optimization of fare gate layout in rail transit station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(6): 28-32, 39.
- [14] 田玉敏. 火灾中人员反应时间的分布对疏散时间影响的研究[J]. 消防科学与技术, 2005, (5): 532-536. Tian Yumin. Study on the effect of pre-evacuation distribution on evacuation times[J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(5): 532-536.