DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201610021

行人步行设施空间疏散特征指标

岳 昊, 何栋梁, 张滨雅, 贾晓璐

(城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室(北京交通大学), 北京 100044)

摘 要: 为了向步行设施内的疏散行人流提供合理的物理空间布局,研究行人步行设施空间的疏散特征指标. 首先,根据步行设施内部空间是否能被行人占据移动,将其划分为行人移动空间与障碍物空间,并利用障碍物空间外缘轮廓线间的最短距离确定行人移动的瓶颈宽度;然后,基于移动瓶颈对行人移动空间的毗邻划分,提出了步行设施行人疏散的移动网络构建方法,将步行设施空间转化为行人疏散的移动网络;基于行人移动距离最短的疏散路径选择策略,将移动网络转化为疏散树;最后,基于疏散树的层和节点及其隶属关系,从空间面积、移动距离、瓶颈宽度、障碍物布局 4 个角度提出了步行设施空间的疏散特征指标. 进而得到评价步行设施空间布局及调整优化障碍物布局的方法,算例分析表明:根据指标对障碍物的布局进行调整,优化了障碍物布局,证明指标在步行设施空间疏散特征分析中的可应用性及有效性.

关键词: 交通工程; 步行设施; 空间特征; 移动网络; 指标体系

中图分类号: U491.1+2 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)09-0017-08

Spatial characteristics indexes of pedestrian walking facilities for evacuation

YUE Hao, HE Dongliang, ZHANG Binya, JIA Xiaolu

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: The method of analyzing the spatial characteristics of pedestrian walking facilities is presented in order to improve the internal spatial layout for pedestrian evacuation. First, the internal room of pedestrian walking facilities is classified into the movement room occupied by pedestrians and the no-walking room occupied by obstacles. The width of movement bottleneck is computed through the layout of movement room and obstacle in walking facilities. Second, the pedestrian movement network of walking facilities is constructed based on the partitioning of movement bottleneck to movement room. Pedestrian evacuation tree is transformed from movement network based on the selection strategy of the shortest path in pedestrian evacuation. Finally, the evaluation indicators of spatial characteristics for pedestrian evacuation are established based on the layers and nodes of evacuation tree from four aspects including room size, walking distance, bottleneck width and spatial layout. The method of evaluating the spatial layout of facilities and adjusting the layout of obstacles is obtained. The case shows thhat the layout of the obstacle adjusted and the layout index optimized. Applicability and validity of the index in spatial evacuation characteristics analysis of pedestrian facilities are proved.

Keywords: traffic engineering; pedestrian facilities; spatial characteristics; movement network; indicator system

为满足居民出行和群体活动的需求,城市交通枢纽、体育场馆等各类行人步行设施的建设规模不断增加. 步行设施物理空间是集散行人流路径选择和集散时间等各种群体宏观现象与特征的形成基础. 步行设施空间布局的合理性严重影响正常或紧急集散过程中行人的集散时间、拥挤程度、移动距离,以及设施的集散能力和安全性等. 为提高行人疏散效率、缩短疏散移动距离和时间、缓解行人流拥堵、避免踩踏事件发生等,需要从设施建设阶段,分析步行设施的空间疏散特征,形成合理的空间布局. 因此,行人步行设施空间疏散特征研究是建筑设施消防、交通枢纽设计等公共安全领域研究的热点.

在步行设施内行人组织管理研究领域,主要包括疏散诱导标志设置、行人疏散路径或安全出口选择、步行设施的疏散设计和评价、设施内行人疏散仿真、设施内行人流特征分析等相关研究;采用经验分析、疏散实验、模拟仿真、现场调查等方法,分析研究步行设施空间布局既定方案下疏散诱导标志的布局优化[1]、设置方法[2]、行人疏散路径选择[3],安全出口设置[4],行人安全出口的选择行为[5-6],紧急情况下行人疏散路径选择行为[7],步行疏散过程中的空间时间利用有效性[8],大型行人步行设施的疏散设计[9-10],行人疏散过程的模拟再现[11-13],步行设施

收稿日期: 2016-10-17
基金项目: 教育部基本科研业务费专项基金(2015JBM045);国家自然科学基金(51338008,71621001,11172035,51308038);北京城市交通协同创新中心基金(T16H100011)。
作者简介: 岳 昊(1975—),男,副教授,博士生导师
通信作者: 岳 昊,yuehao@bjtu.edu.cn

内行人流微观与宏观行为特征分析[14]等.

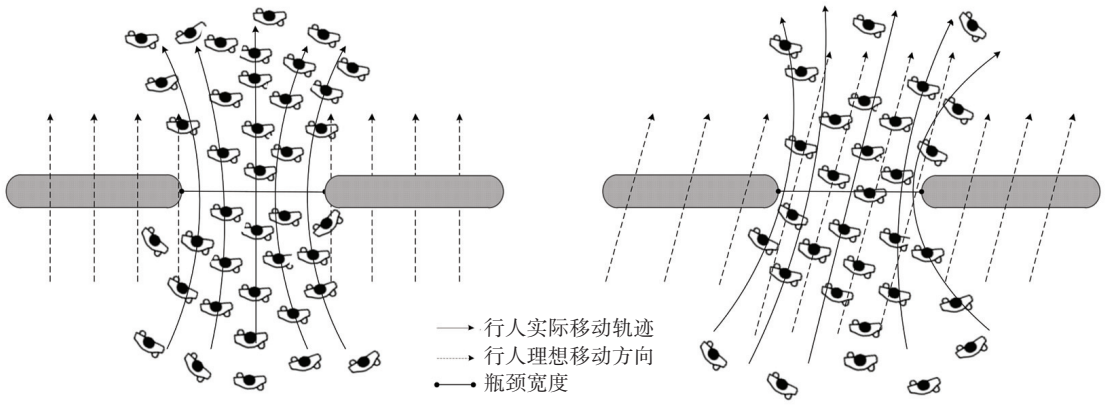
目前研究着重于步行设施既定设计方案下的疏散仿真与评价,而对行人步行设施疏散特性下的空间特征分析研究相对较少. 本文为实现步行设施内物理空间的合理布局,对步行设施内物理空间布局进行疏散特征指标分析. 将步行设施的物理空间抽象为移动网络,基于移动网络和移动距离最短的疏散路径选择策略,将移动网络转化为疏散树,并基于疏散树层与节点的隶属关系,以及行人疏散流的移动特征,分析步行设施的空间疏散特征指标.

1　步行设施空间网络化

步行设施内空间主要分两大类:一为可被行人占据供行人实现空间位移的移动空间,如步行通道、走廊、楼梯等行人移动区域;二为不能用于行人实现空间位移的障碍物空间,如行人禁行区、立柱、墙、隔栏等辅助设施占据的区域.

1.1　行人疏散瓶颈

行人移动的瓶颈是障碍物空间对移动空间的挤压,导致行人移动空间发生形变. 瓶颈宽度用毗邻障碍物边缘之间的最短直线距离表示,如图1(a)所示. 因此,可知步行设施的安全出口属于瓶颈. 瓶颈是空间布局的固有属性,不受步行空间内行人数量与移动方向的影响. 当行人理想移动方向与瓶颈断面不相垂直时,拥堵行人流的自组织行为将会最大限度地利用瓶颈宽度,如图1(b)所示. 瓶颈的行人通过能力与其宽度密切相关. 为便于计算瓶颈宽度,将障碍物空间外缘轮廓线简化为弧线和线段,相邻障碍物外缘轮廓线之间的最短距离为瓶颈的宽度,如图1所示.



(a)理想移动方向与瓶颈断面垂直　　(b)理想移动方向与瓶颈断面斜交

图1　行人步行设施移动瓶颈示意图

Fig.1　The illustration of movement bottleneck in pedestrian walking facilities

1.2　移动网络与疏散树

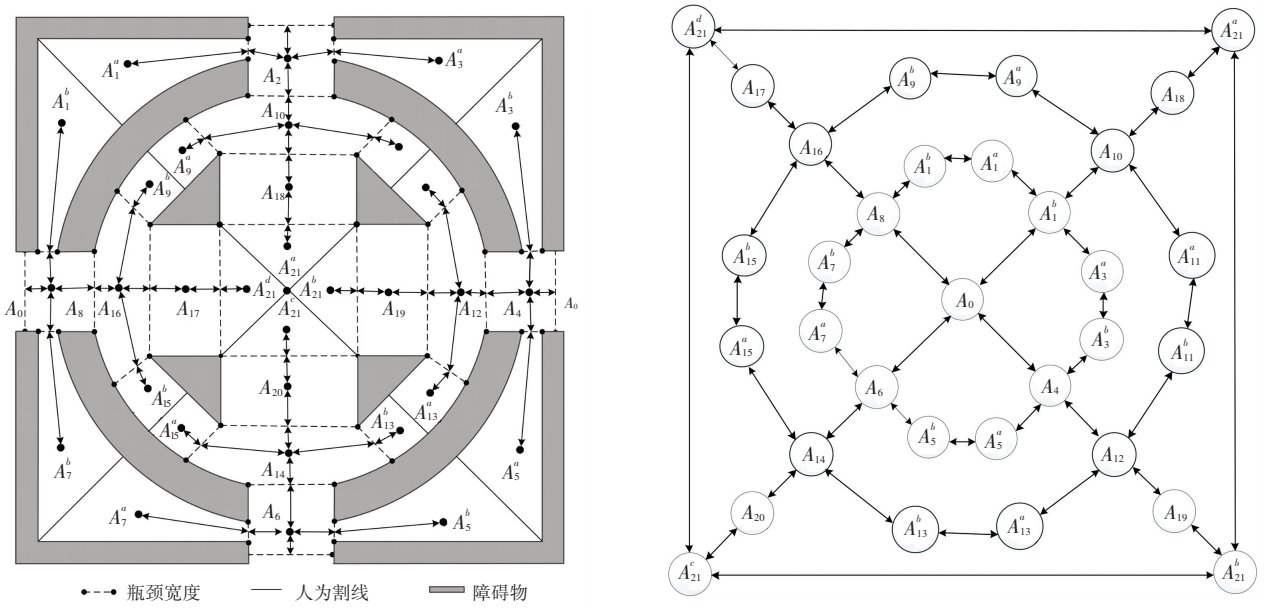
步行设施移动空间被瓶颈分割为不同的局部移动区域,各局部移动区域通过瓶颈拼接为步行设施的整体移动空间. 行人经瓶颈实现在不同局部移动区域之间的移动. 为了便于分析,步行设施内外区域均可被看作移动空间,设施围墙和设施内障碍物均被视为障碍物空间,如图2(a)所示. 为描述步行设施的空间布局以及局部移动区域的毗邻情况,将步行设施抽象为以局部移动区域为节点,瓶颈为弧的移动网络. 当某一局部移动区域内行人由于行人组织方案或移动距离的影响选择不同的移动方向或路线疏散时,可以人为地分割局部移动区域,使分割后的每个子节点内的行人具有相同的疏散路线,如图2所示.

移动网络由两部分组成:节点和双向弧. 节点包括行人流发生节点、中间节点、吸引节点;双向弧代表毗邻节点之间的瓶颈. 步行设施转换为多起点单讫点(MOSD)的移动网络如图2(b)所示. 图2中,A_0 ~A_{21} 为设施内局部移动区域或行人移动网络节点编号. 当两个局部移动区域是由人为分割形成时,采用上角标的形式加以区分,如区域节点 A_{15}^a 和 A_{15}^b;同时,A_0 为吸引节点,代表行人移动的目的地,即步行设施外的安全区域.

基于设施空间布局和最短路的疏散策略,可将MOSD移动网络转化为以讫点为根节点,起点为叶节点的疏散树. 由图2所示的移动网络转换为的疏散树如图3所示.

定义疏散树中根节点为第0层,与其毗邻的节点为第1层,依次类推分别为第2,3,……层,如图3所示;同时,定义所有拥有相同层次编号 j 的节点集合为疏散树的疏散层 L_j,疏散层编号即为节点层编号. 行人疏散是从大编号向小编号的疏散层逐步移动的过程,当某 A 节点或层内的行人必须途径另一个 B 节点或层才能离开步行设施空间时,称 A 节点或层隶属于 B 节点或层. 定义隶属于节点 i 的所有节点为节点 i 的隶属集合,记作 N_i;隶属于层 j 的所

有节点为层 j 的隶属集合，记作 M_j；在 N_i 内，与节点 i 直接毗邻的节点集合定义为 i 的直接隶属集合 N_i^{T}. 由节点与层的隶属集合关系可知，层 j 的隶属集合是该层内所有节点隶属集合的并集.



(a) 行人步行设施　　(b)行人移动网络

图 2　行人步行设施空间与移动网络示意图

Fig.2　The illustration of pedestrian facilities and movement network

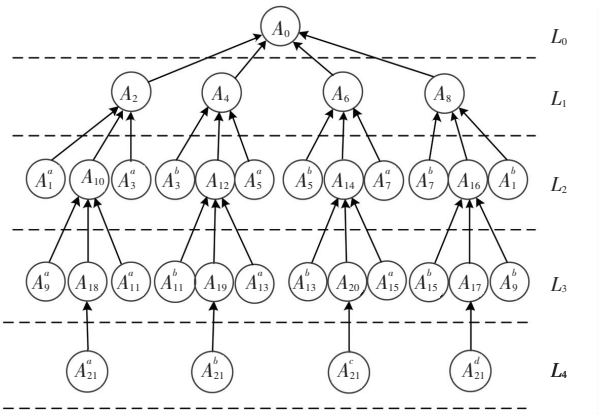


图 3　基于 MOSD 移动网络的疏散树示意图

Fig.3　The evacuation tree of pedestrian facilities based on MOSD network

2　步行设施空间疏散特征指标

在行人步行设施空间设计过程中，影响行人疏散的主要因素包括行人数量、移动距离、瓶颈宽度、障碍物布局不平衡系数等. 在实际的工程应用中，步行设施移动空间的总面积决定了可容纳的行人数量；移动距离决定了行人到达安全出口的步行距离；疏散瓶颈对群体行人疏散的阻滞作用，导致行人在瓶颈处形成拥挤排队，增加行人疏散时间. 障碍物布局不平衡系数[13]主要描述行人疏散空间面积与疏散瓶颈的匹配协调性，反映行人疏散过程中局部严重拥堵对疏散过程的影响. 因此，为确保行人的安全疏散，从空间面积、移动距离、瓶颈宽度、障碍物布局不平衡系数 4 个方面，分别从节点与疏散层的角度分析步行设施的空间疏散特征指标.

2.1　行人疏散空间面积

行人疏散空间面积包括节点与层的疏散空间面积，是其隶属集合内节点的面积之和，描述该节点或层在疏散过程中所承担的疏散面积. 节点 i 与层 j 的疏散空间面积 $S_{\mathrm{node}}(i)$ 与 $S_{\mathrm{layer}}(j)$ 分别为

$$S_{\mathrm{node}}(i)=\sum_{k\in N_i}S_k, \tag{1}$$

$$S_{\mathrm{layer}}(j)=\sum_{k\in M_i}S_k. \tag{2}$$

式中：S_k 为节点 k 的面积. 由疏散树及其节点隶属关系可知，$S_{\mathrm{node}}(0)=S_{\mathrm{layer}}(0)$；同时，可通过个体行人的空间需求面积大体推导出步行设施内各局部移动域区所能承担的最大行人数量.

2.2　行人疏散移动距离

从节点的角度，行人疏散移动距离包括 N_i 内所有节点到节点 i 的最大距离 $D_{\mathrm{node}}^{\max}(i)$、平均距离 $D_{\mathrm{node}}^{\mathrm{avg}}(i)$、加权距离 $D_{\mathrm{node}}^{\mathrm{wgh}}(i)$，分别描述隶属集合内的行人到节点 i 的最远距离、低密度情况下的平均移动距离、高密度情况下的加权移动距离. 分别表示为

$$D_{\mathrm{node}}^{\max}(i)=\max_{k\in N_i}(d_{ki}), \tag{3}$$

$$D_{\mathrm{node}}^{\mathrm{avg}}(i)=\frac{1}{n}\sum_{k\in N_i}d_{ki}, \tag{4}$$

$$D_{\mathrm{node}}^{\mathrm{wgh}}(i)=\sum_{k\in N_i}\frac{s_k}{S_{\mathrm{node}}(i)}d_{ki}. \tag{5}$$

式中：n 为 N_i 中节点数量；d_{ki} 为疏散树中节点 k 到 i 的距离.

从层的角度，行人疏散移动距离包括隶属集合 M_j 内所有节点到层 j 的最大距离 $D^{\max}_{\text{layer}}(j)$ 、平均距离 $D^{\text{avg}}_{\text{layer}}(j)$ 、加权距离 $D^{\text{wgh}}_{\text{layer}}(j)$. 分别表示为

$$D^{\max}_{\text{layer}}(j) = \max_{k \in M_j, r \in L_j} \{ d_{kr} \}, \tag{6}$$

$$D^{\text{avg}}_{\text{layer}}(j) = \frac{1}{m} \sum_{k \in M_j} \sum_{r \in L_j} d_{kr}, \tag{7}$$

$$D^{\text{wgh}}_{\text{layer}}(j) = \sum_{k \in M_j} \sum_{r \in L_j} \frac{s_k}{S_{\text{layer}}(j)} d_{kr}. \tag{8}$$

式中：m 为集合 M_j 中节点的个数，d_{kr} 为疏散树中节点 k 到 r 的距离.

2.3 行人疏散瓶颈宽度

从节点的角度，行人疏散瓶颈宽度包括直接隶属集合 N_i^{T} 内的节点到节点 i 的总宽度 $W^{\text{all}}_{\text{node}}(i)$ 、平均宽度 $W^{\text{avg}}_{\text{node}}(i)$ 、加权宽度 $W^{\text{wgh}}_{\text{node}}(i)$，分别描述进入节点的行人瓶颈总宽度、低密度情况下行人平均瓶颈宽度、高密度情况下行人加权瓶颈宽度. 分别表示为

$$W^{\text{all}}_{\text{node}}(i) = \sum_{k \in N_i^T} w_{ki}, \tag{9}$$

$$W^{\text{avg}}_{\text{node}}(i) = \frac{1}{n} \sum_{k \in N_i^T} w_{ki}, \tag{10}$$

$$W^{\text{wgh}}_{\text{node}}(i) = \sum_{k \in N_i^T} \frac{s_k + S_{\text{node}}(k)}{S_{\text{node}}(i)} w_{ki}. \tag{11}$$

式中：n 为集合 N_i^{T} 中节点的个数，w_{ki} 表示节点 k 到节点 i 瓶颈的宽度.

从层的角度，行人疏散瓶颈宽度包括层 j 内节点与毗邻的层 $j-1$ 内节点间的总宽度 $W^{\text{all}}_{\text{layer}}(j)$ 、平均宽度 $W^{\text{avg}}_{\text{layer}}(j)$ 、加权宽度 $W^{\text{wgh}}_{\text{layer}}(j)$ 分别为

$$W^{\text{all}}_{\text{layer}}(j) = \sum_{k \in L_{j+1}} \sum_{r \in L_j} w_{kr}, \tag{12}$$

$$W^{\text{avg}}_{\text{layer}}(j) = \frac{1}{m} \sum_{k \in L_{j+1}} \sum_{r \in L_j} w_{kr}, \tag{13}$$

$$W^{\text{wgh}}_{\text{layer}}(j) = \sum_{k \in L_{j+1}} \sum_{r \in L_j} \frac{s_k + S_{\text{node}}(k)}{S_{\text{layer}}(j)} w_{kr}. \tag{14}$$

式中：m 为层 j 与层 $j+1$ 间的瓶颈个数.

2.4 障碍物布局不平衡系数

从节点的角度，障碍物布局不平衡系数描述疏散树中节点 i 分担行人疏散数量的实际分担率与理想分担率的差异程度[13]. 理想分担率用 N_i 内节点的面积之比表示；实际分担率用 N_i^{T} 的移动瓶颈之比表示，节点 i 周边的障碍物布局不平衡系数 $\beta_{\text{node}}(i)$ 为

$$\beta_{\text{node}}(i) = \frac{\sum_{k \in N_i^T} |\varphi_k - \phi_k|}{2}, \tag{15}$$

$$\varphi_k = \frac{s_k + S_{\text{node}}(k)}{S_{\text{node}}(i)}, \tag{16}$$

$$\phi_k = \frac{w_{ki}}{W^{\text{all}}_{\text{node}}(i)}, \tag{17}$$

$$\sum_{k \in N_i^T} \varphi_k = \sum_{k \in N_i^T} \phi_k = 1. \tag{18}$$

式中：φ_k 为节点 k 的理想分担率、ϕ_k 为节点 k 的实际分担率，$\beta_{\text{node}}(i)$ 的取值在 0 ~1 之间，当 $\beta_{\text{node}}(i) = 0$ 时，节点 i 周边的障碍物布局是平衡的；当 $\beta_{\text{node}}(i) > 0$ 时，节点 i 周边的障碍物布局是不平衡的；随着 $\beta_{\text{node}}(i)$ 的增加，障碍物布局的不平衡性增强.

从层的角度，障碍物布局不平衡系数描述疏散树中层 j 分担疏散行人数量的实际分担率与理想分担率的差异程度. 层 j 周边的障碍物布局不平衡系数 $\beta_{\text{layer}}(j)$ 为

$$\beta_{\text{layer}}(j) = \frac{\sum_{k \in L_{j+1}} |\varphi_k - \phi_k|}{2}; \tag{19}$$

$$\varphi_k = \frac{s_k + S_{\text{node}}(k)}{S_{\text{layer}}(j)}; \tag{20}$$

$$\phi_k = \frac{w_{kr}}{W^{\text{all}}_{\text{layer}}(j)},\ r \in L_j; \tag{21}$$

$$\sum_{k \in L_{j+1}} \varphi_k = \sum_{k \in L_{j+1}} \phi_k = 1. \tag{22}$$

同理，$\min \beta_{\text{node}}(i)$ 的取值在 0 ~1 之间，当 $\beta_{\text{layer}}(j) = 0$ 时，层 j 周边的障碍物布局是平衡的；当 $\beta_{\text{layer}}(j) > 0$ 时，层 j 周边的障碍物布局是不平衡的；随着 $\beta_{\text{layer}}(j)$ 的增加，障碍物布局的不平衡性增强.

3 步行设施空间布局的调整

在步行设施空间布局调整过程中，首先，根据步行设施的类型、建筑物耐火等级、设计规范等，计算相关指标取值的合理范围；然后，根据步行设施的实际情况，分别计算 4 项指标；最后，筛选不合理指标，分析产生原因，并在符合工程需求的基础上，对其进行调整.

3.1 指标的合理取值

理论方面，一个布局合理的步行设施在宏观与微观层面其布局都应该是合理的. 首先，确保整个步行设施所容纳的行人数量在一个合理的范围内，即低密度与高密度情况下，须分别确保行人疏散瓶颈宽度保持在一定的合理范围内；其次，为避免局部移动区域发生严重拥堵或移动瓶颈过宽浪费的现象，每层或节点的障碍物不平衡系数要等于 0.

每项指标的合理取值为：1) 疏散空间面积. 疏散空间面积是反应步行设施容纳行人数量的指标. 参考英国对公共建筑设施人群密度安全极限的规

定，行进的人群密度为 4 人/m^2，站立的静止人群密度为 4.7 人/m^2[15]. 从而确定步行设施理想的行人疏散面积. 可作为评价公共建筑疏散面积是否合理的标准. 2）疏散移动距离. 参照建筑设计防火规范[16]（以下简称规范），公共建筑内，位于走廊尽头的房间，房间内任一点至疏散门的直线距离不大于 15 m. 规范中明确剧场、电影院、礼堂等公共建筑疏散时间，若建筑物耐火等级为一、二级，则疏散时间不大于 2 min；若耐火等级为三级，则疏散时间不大于 1.5 min. 取行人平均速度 1.34 m/s[17]，则一、二级耐火等级的建筑内最大疏散距离不得大于 160.8 m，三级耐火等级建筑最大疏散距离不得大于 120.6 m，该距离是指行人从所在位置到安全出口的路径值. 根据规范，由于体育馆内人数变化幅度较大，人员疏散时间依据不同容量按 3~4 min 控制，则最大疏散距离不得大于 321.6 m. 该距离可作为评价体育馆疏散移动距离指标合理与否的判断标准. 3）疏散瓶颈宽度. 参照规范，公共建筑内行人疏散过程中，移动瓶颈以 0.55 m 为一单位，对应的行人通过能力约 40 人/min. 结合公共建筑允许的最长疏散时间、公共建筑设施人群密度安全值，可以确定一单位的移动瓶颈对应的疏散面积大小. 以一、二等级耐火结构的剧场、电影院、礼堂、体育馆等公共建筑为例，安全疏散时间为 2 min，则移动瓶颈为 0.55 m 时对应的疏散面积为 40（人/min）☞2 min÷4（人/m^2）= 20 m^2. 同理三级耐火结构的公共建筑内，0.55 m 的移动瓶颈承担的疏散面积是 15 m^2. 结合上述表述，根据步行设施的耐火等级、步行设施类型等因素，可以确定一单位的移动瓶颈分担的合理疏散面积. 该值可作为评价步行设施移动瓶颈合理与否的标准. 4）障碍物布局不平衡系数. 障碍物布局不平衡系数描述了疏散树中节点分担行人疏散数量的实际分担率与理想分担率的差异程度，实质上是反映了局部移动区域面积与瓶颈宽度匹配的合理程度，其取值在 0 ~1 之间. 当布局不平衡系数等于 0 时，说明障碍物布局是平衡的，而且随着不平衡系数的增大，障碍物布局的不平衡性增强.

3.2　空间的布局调整

在步行设施空间布局调整过程中，主要采用逐步调整与循环校核的方法，首先，调整层与层之间的布局关系，从宏观上保证每层各个指标合理；然后，对节点与节点间的局部不合理进行微调. 具体调整流程如图 4 所示.

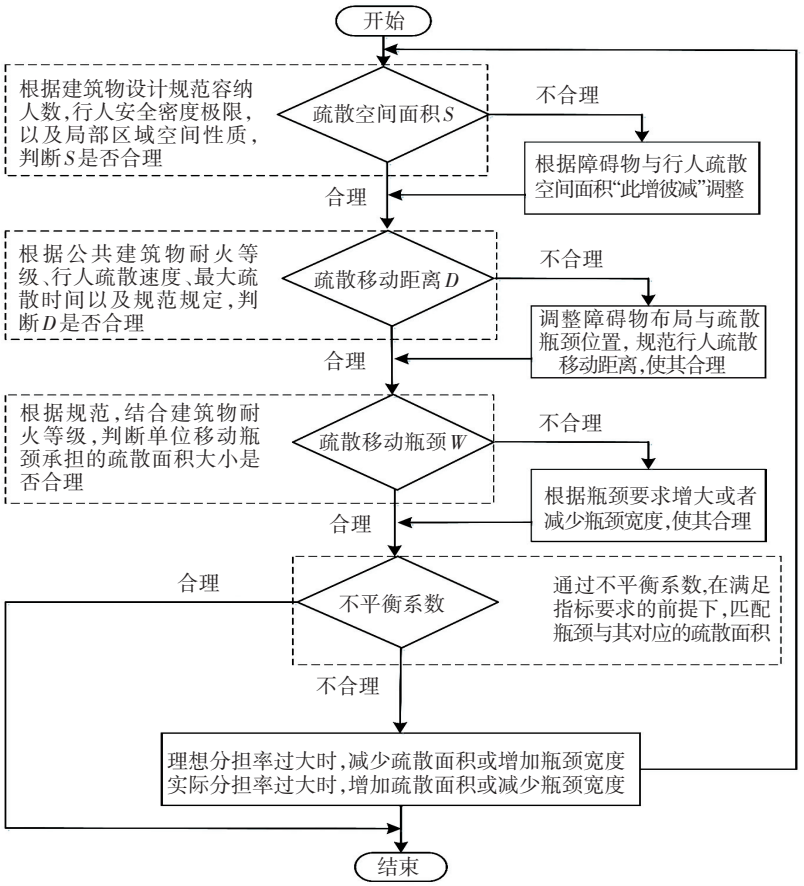


图 4　基于疏散指标对步行设施的调整流程图

Fig.4　Flow chart of the layout adjustment of pedestrian facilities based on evacuation indicators

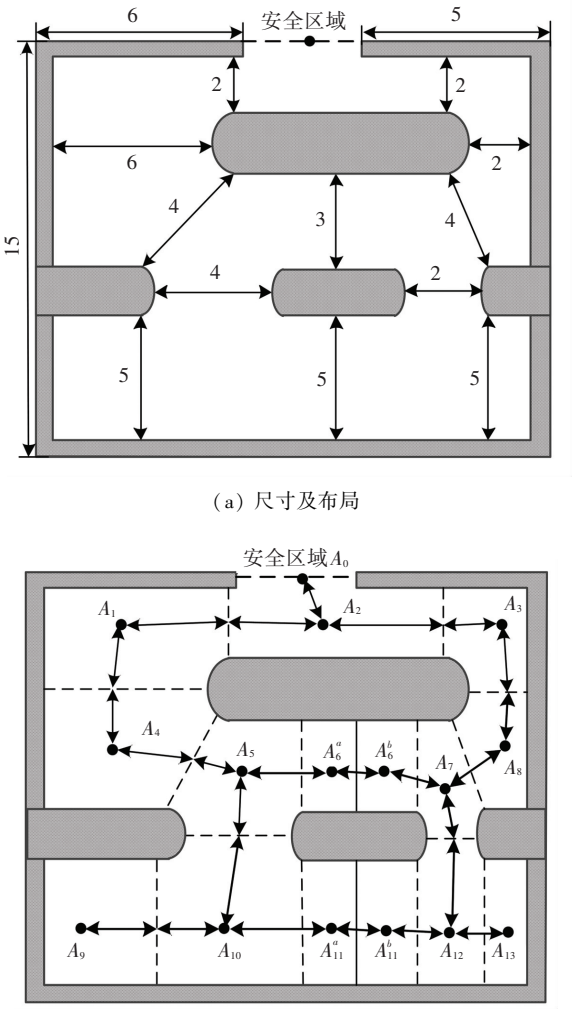
具体步骤:1)疏散空间面积调整. 步行设施内行人疏散空间与障碍物空间面积之和一定的情况下,行人疏散空间与障碍物空间的面积变化属于“此增彼减”的过程,因此可以通过减少障碍物空间的占据面积来增加行人疏散空间的面积. 2)疏散移动距离调整. 行人疏散移动距离反映了行人疏散过程中移动距离对疏散过程的影响. 可以通过调整障碍物布局或疏散瓶颈的位置,从而实现疏散移动距离的合理化. 3)疏散瓶颈宽度调整. 疏散瓶颈反映了行人疏散过程中拥挤排队对疏散过程的影响,而且瓶颈宽度是影响行人疏散时间的主要因素. 可根据疏散瓶颈所分担的疏散面积,对瓶颈宽度进行拓宽与缩窄的调整;同时,可将疏散瓶看作该区域的安全出口,详细的调整过程可参考文献[4]. 4)障碍物布局调整. 障碍物布局不平衡系数反映了每层或每个节点的局部移动区域面积与瓶颈宽度匹配的合理程度. 当理想分担率大于实际分担率时,应减少隶属集合内局部移动面积或者增大其瓶颈宽度;当理想分担率小于实际分担率时,应增加隶属集合内的移动面积或减小其瓶颈宽度. 通过调整相应的移动区域面积与瓶颈宽度实现障碍物布局的平衡性,具体调整计算详见文献[13]. 5)通过前 4 步调整直至所有节点和层的各项疏散指标均符合规范要求时,终止调整程序;否则,跳转到步骤 1,继续调整.

然而,步行设施空间布局设计与调整是一个系统的优化过程,文章仅仅通过单向指标的逐步调整阐述了步行设施空间布局的调整流程,因此,系统最优化的步行设施内空间布局设计与调整是未来的主要研究内容.

4 算 例

以某一级耐火建筑商场为例,对其进行步行设施疏散特征指标的计算与分析. 该商场设计容纳人数为 600 人,设施空间为 15 m×15 m 的正方形,拥有一个安全出口,空间内部设施主要有矩形截面柜台 4 个,尺寸及布局如图 5(a)所示,障碍物的面积为 75 m^2. 各个节点的面积为 $A_1 = 14\ m^2$、$A_2 = A_3 = 8\ m^2$, $A_4 = A_5 = 12\ m^2$, $A_6^a = A_6^b = 12\ m^2$, $A_7 = A_8 = 6\ m^2$, $A_9 = A_{10} = 20\ m^2$, $A_{11}^a = A_{11}^b = 7.5\ m^2$, $A_{12} = A_{13} = 10\ m^2$.

根据该购物中心局部移动区域(如图 5(b)所示)的划分以及网络化的方法将该购物中心网络化,基于移动距离最短的疏散路径选择策略,得到购物中心的行人疏散树,如图 6 所示.



(a) 尺寸及布局

(b) 节点划分

图 5 购物空间内障碍物布局尺寸和局部移动区划分示意图

Fig.5 The illustration of layout and size of obstacles and the division of movement area in shopping center

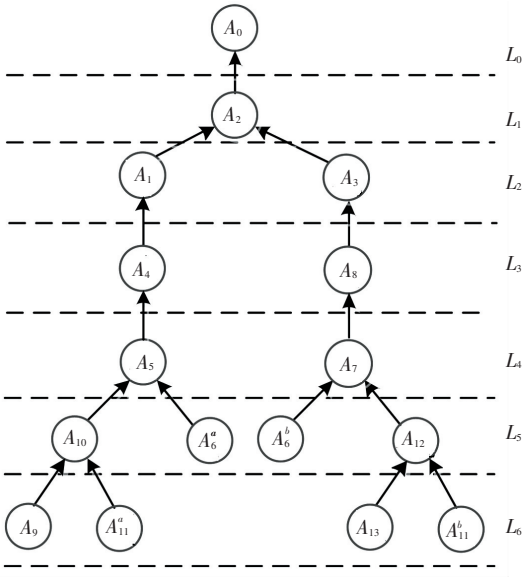


图 6 购物中心疏散树示意图

Fig.6 The illustration of evacuation tree in shopping center

由表 1、2 分析可知，疏散面积、移动距离各单向指标大致符合要求. 整体上看，行人疏散面积、行人疏散移动距离严格由第 5 到 0 层逐层递增，层 L_1、L_2、L_5 的障碍物布局不平衡系数相对过大；从节点的角度分析，每个节点的平均疏散移动距离和加权疏散移动距离相差不大，节点 A_5、A_7、A_{10} 的障碍物不平衡系数过大. 依据各个疏散特征指标的计算，在不改变疏散空间物理结构的基础上，满足工程要求的前提下，对障碍物的布局进行调整，优化障碍物布局指标，使购物中心布局更加合理. 得到调整后的购物中心障碍物布局如图 7 所示.

表 1　购物中心节点疏散特征指标

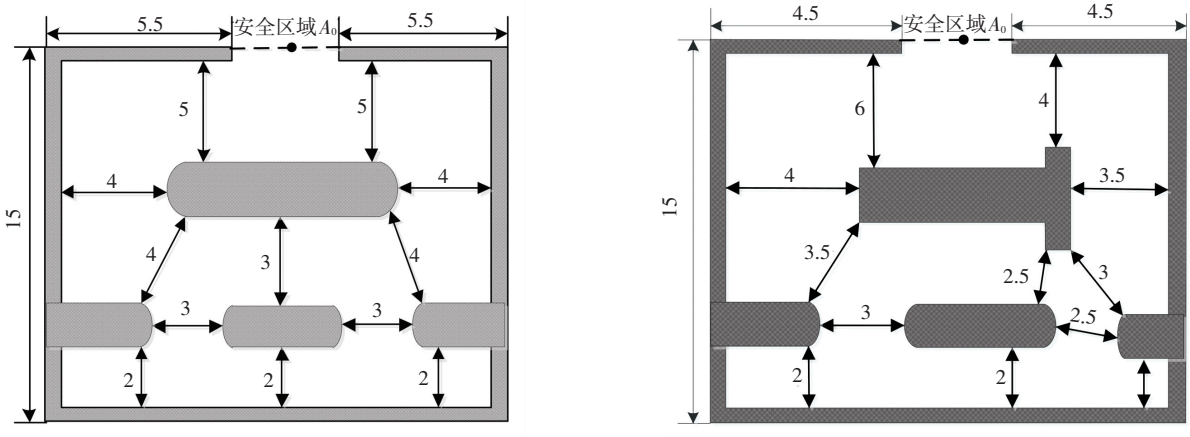
Tab.1　Spatial characteristics indexes in shopping center

节点	$S_{node}(i)$/ m^2	$D^{max}_{node}(i)$/ m	$D^{avg}_{node}(i)$ /m	$D^{wgh}_{node}(i)$ /m	$W^{all}_{node}(i)$ /m	$W^{avg}_{node}(i)$ /m	$W^{wgh}_{node}(i)$ /m	$\beta_{node}(i)$
A_1	76	16	11.5	11	6	1	6	0
A_2	142	21	18.25	18.4	4	0.29	2	0.13
A_3	44	12.5	8.3	8.11	2	0.33	2	0
A_4	64	12	8	7.33	3	0.75	3	0
A_5	52	8	5.12	4.9	7	1.75	3.91	0.34
A_7	32	7.5	5.33	5.55	5	1.25	2.14	0.46
A_8	38	8.5	5	5.12	3	0.6	3	0
A_{10}	27.5	3	2.73	2.86	10	5	5	0.23
A_{12}	17.5	2.5	1.73	1.64	10	5	5	0.07

表 2　购物中心层疏散特征指标

Tab.2　Spatial characteristics indexes in shopping center

层	$S_{layer}(j)$/ m^2	$D^{max}_{layer}(j)$ /m	$D^{avg}_{layer}(j)$ /m	$D^{wgh}_{layer}(j)$/ m	$W^{all}_{layer}(j)$ /m	$W^{avg}_{layer}(j)$/ m	$W^{wgh}_{layer}(j)$ /m	$\beta_{layer}(j)$
L_0	150	22	19.25	19.4	4	0.27	4	0
L_1	142	21	18.25	18.4	4	0.29	2	0.13
L_2	120	16	9.9	9.94	8	0.66	4.53	0.12
L_3	102	12	6.5	6.5	6	0.6	3	0.13
L_4	84	8	5.23	5.15	12	1.5	6.24	0.04
L_5	45	3	2.25	2.39	20	5	5	0.19
L_6	0	0	0	0	0	0	0	0



(a)对称布局　　(b)非对称布局

图 7　调整后购物中心移动空间布局示意图

Fig.7　The illustration of space layout in shopping center after adjustment

特别需要补充说明的情况是，算例分析中给出了一个“对称”的障碍物调整布局方案，用以说明行人步行设施空间疏散特征指标的计算与障碍物空间布局调整. 在疏散特征指标的计算过程中，文中存在一个基本的假设条件，即行人是均匀分布在疏散空间内的，因此“对称”的空间布局最容易满足疏散特征指标

的评价要求,如图7(a)所示. 然而,在实际的工程应用中,由于建筑空间分布与使用的多样性,行人在步行设施内的空间布局是很难满足在移动区域内的均匀分布,因此在计算行人疏散移动距离与障碍物布局指标时,需要采用局部移动区域内的行人数量进行计算,以便更贴切实际地满足工程需要. 当在特征指标计算评价过程中,不能获取各局部移动区域内的行人数量时,可以基于行人均匀分布于步行设施空间内的假设,采用局域移动区域的面积进行相关指标的计算评价. 同时,为增加步行设施内建筑空间的多样性,以及减少行人疏散过程中的认知障碍,建议在满足步行设施疏散特征指标的基础上,根据实际情况进行多样化设计,如图7(b)所示.

5 结 论

1)基于行人步行设施的空间布局,将步行设施内空间划分为行人移动空间与障碍物空间;基于行人移动的瓶颈对步行设施移动空间的划分特征,提出了步行设施 MOSD 行人移动网络构建方法,从而将物理设施转化为行人移动网络,实现了步行设施空间疏散特征分析对象由连续空间转换为网络空间.

2)基于移动距离最短的疏散路径选择策略,提出了步行设施行人疏散树的构建方法,从而将行人移动网络转化为疏散树;分析了疏散树中层与节点的隶属关系,再现了行人疏散移动过程中的层层递进关系,为步行设施空间疏散特征指标提供了计算依据.

3)从影响步行设施内行人疏散的角度,基于疏散树节点与层的隶属关系,构建了包含疏散的空间面积、移动距离、瓶颈宽度、障碍物布局不平系数等指标的步行设施空间疏散特征指标体系;基于各项指标的内涵,提出了基于疏散树的指标计算方法.

4)基于步行设施的类型、建筑物耐火等级、设计规范等,提出了各项指标的合理取值;提出了基于疏散的空间面积、移动距离、瓶颈宽度、障碍物布局不平系数等4项指标的逐步调整与循环校核的步行设施空间布局调整方法. 结合算例,分析了步行设施空间布局的调整过程;并强调在实际的工程应用中,可采用局部移动区域内的行人数量进行各项指标值得计算.

参考文献

[1] CHENC X, LI Q, KANEKO S. Location optimization algorithm for emergency signs in public facilities and its application to a single-floor supermarket[J]. Fire Safety Journal,2009, 44(1): 113-120.

[2] 岳昊,邵春福,关宏志,等. 大型行人步行设施紧急疏散标志设置[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6):120-125.
YUE Hao, SHAO Chunfu, GUAN Hongzhi, et al. Location method of emergency evacuation signs in large pedestrian facilities[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(6):120-125.

[3] CHEN P, FENG F. A fast flow control algorithm for real-time emergency evacuation in large indoor areas[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(5):732-740.

[4] 岳昊,王帅,张磊,等.行人步行设施紧紧疏散出口设置方法[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.

[5] LO S M, HUANG H C, WANG P, et al. A game theory based exit selection model for evacuation[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(5): 364-369.

[6] YUE Hao, GUAN Hongzhi, SHAO Chunfu, et al. Simulation of pedestrian evacuation with asymmetrical exits layout[J]. Physica A, 2011, 390(2):198-207.

[7] KOBES M, HELSLOOT I, VRIES B, et al. Way finding during fire evacuation; an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night[J].Building and Environment, 2010, 45(3):537-548.

[8] FANG Z, LI Q, Li Q, et al. A proposed pedestrian waiting-time model for improving space-time use efficiency in stadium evacuation scenarios[J].Building and Environment, 2011, 46(9):1774-1784.

[9] TAVARES R M, GALEAE. R. Evacuation modeling analysis within the operational research context; a combined approach for improving enclosure designs[J]. Building and Environment, 2009, 44(5): 1005-1016.

[10] 张军英,谭泽阳.国家体育场安全疏散设计[J].建筑学报, 2009(9): 84-87.
ZHANG Junying, TAN Zeyang. Design for safe evacuation of the National Stadium[J]. Architectural Journal, 2009(9):84-87.

[11] WU G Y, CHEN S W, HUANG Y T. Modeling the occupant evacuation of the mass rapid transit station using the control volume model[J]. Building and Environment, 2010, 45(10): 2280-2288.

[12] 宋卫国,于彦飞,陈涛. 出口条件对人员疏散的影响及其分析[J]. 火灾科学, 2003,12(2):100-104.
SONG Weiguo, YU Yanfei, CHEN Tao. Influences of exit conditions on pedestrian evacuation[J]. Fire Safety Science, 2003, 12(2):100-104.

[13] 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):84-94.
YUE Hao, ZHANG Xu, CHEN Gang, et al. Simulation of pedestrian evacuation with asymmetrical pedestrian layout[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13):84-94.

[14] 刘栋栋, 赵斌, 李磊,等. 北京南站行人特征参数的调查与分析[J].建筑科学, 2011, 27(5):61-66.
LIU Dongdong, ZHAO Bin, LI Lei. et al. Survey and analysis of pedestrian characteristic parameters in Beijing South Railway Station[J]. Building Science, 2011, 27(5):61-66.

[15] 史建港. 大型活动行人交通特性研究[D].北京:北京工业大学, 2007.
SHI Jiangang. Research on pedestrian traffic characteristics in special events[D].Beijing: Beijing University of Technology,2007.

[16] 天津消防研究所. 建筑防火设计规范:GB 50016—2014[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2015.
Tianjin Fire Research Institute. Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014[S].Beijing: Ministry of Housing and Urban Rural Development of People's Republic of China,2015.

[17] 李得伟,韩宝明.行人交通[M]. 北京:人民交通出版社,2011:42-43.
LI Dewei, HAN Baoming. Pedestrian traffic[M]. Beijing: China Communications Press, 2011:42-43.

(编辑 魏希柱)