

基于 Pathfinder 的商场建筑防火疏散研究

汤煜¹,表秀峰¹,马福生²

(1. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学现代建筑产业
技术研究院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 了解商场人员安全疏散状况,并提出商场疏散的优化方案.方法 利用 Pathfinder 软件对沈阳市某大型商场建筑人员防火疏散进行仿真模拟研究,模拟商场人员安全疏散情况,确定商场建筑各层人员疏散所需时间以及疏散过程中主要拥堵位置.结果 当火灾发生时,所研究商场内部人员疏散所需时间大于安全疏散时间;疏散过程中,商场二至五层东北角处、南侧以及西侧的楼梯间附近出现拥堵现象;商场的防火疏散设计存在一定的隐患.结论 对商场安全疏散进行优化设计时,通过减少疏散距离和增加疏散宽度等措施,减少疏散时间,确保人员的生命安全,为商场建筑防火疏散设计提供参考意见.

关键词 商场建筑;Pathfinder;仿真模拟;防火疏散;优化设计

中图分类号 TU247

文献标志码 A

Research on Fire Evacuation of Shopping Malls Based on Pathfinder

TANG Yu¹, BIAO Xiufeng¹, MA Fusheng²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Construction Technology Research Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to understand the evacuation of shopping malls when a fire occurs and to optimize the design of shopping malls for safety evacuation. In this paper, a fire evacuation was simulated by Pathfinder in one shopping mall in Shenyang. The necessary evacuation time and the safe evacuation time were estimated, and the main congestions in the evacuation process on all the floors were located. The results showed that the necessary evacuation time was longer than the safe evacuation time when the fire occurs. There were many congestions beside the staircases of the northeast corner, south and west sides of the second to fifth floors during the evacuation process. Those made some risks of the fire evacuation in the shopping mall. The building's planes were optimized by reducing the evacuation distance and adding the evacuation width to shorten the time for people to escape. It provides some references for fire evacuation design of

收稿日期:2019-07-05

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51708364);辽宁省重点研发项目(2017Z31009);辽宁省教育厅基金项目(LJZ2017026)

作者简介:汤煜(1974—),女,副教授,主要从事建筑设计及其理论方面研究.

shopping malls.

Key words: shopping mall; Pathfinder; simulation; fire evacuation; optimal design.

我国商业经过一段时期的快速发展,商场建筑数量越来越多.由于商场建筑经营范围广泛、商品品类繁多,对燃料、水、电等需求量大,从而使得火灾的危险系数提高,同时商场建筑面积较大,消费人群复杂且数量较多,一旦发生火灾会导致较大的财产损失与人员伤亡.

国内外许多研究者针对商场建筑防火疏散设计开展研究.王继艳^[1]对大型商业综合体进行火灾风险评估,并针对出现的问题提出了火灾疏散的设计建议;伍爱友等^[2]应用模糊识别理论及系统安全方法对商场火灾危险性进行评价;韩国 C. AHN 等^[3]基于模型模拟,对大型综合购物中心分析了影响人和建筑物疏散的相关因素.为了能够有效地提高火灾时人员的安全疏散效率,国内外众多学者利用软件仿真模拟技术进行火灾安全疏散研究.仿真模拟分析的优势在于可以实时观察不同时刻的疏散情况,并能改变疏散条件,能有效的缓解疏散拥堵状况,降低疏散时间,为人员密集场所人员疏散的安全管理、更好地应对突发事件的发生以及快速有序的安全疏散提供参考,以减少在突发事件中造成的经济损失与人员伤亡.张学智等^[4]利用 FDS 和 STEPS 软件对大型商业综合体中的影厅部分进行安全疏散模拟研究.周波^[5]利用 Building EXODUS 疏散模拟软件对超市客流量、防火卷帘门设置等不同情况下人员的安全疏散展开研究;陈兵^[6]利用疏散模拟软件 STEPS 进行人员疏散模拟计算,并设计三种疏散方案. S. GWYNNE 等^[7]应用 Building EXODUS 进行仿真模拟分析建筑火灾过程中人的疏散行为.

国内外许多学者应用 Pathfinder 模拟软件进行防火疏散方面的研究. V. ALONSO-GUTIERREZ 等^[8]应用 STEPS 和 Pathfinder

软件对医院建筑的疏散进行模拟比较研究. DING Yuanchun 等^[9]利用 Pathfinder 软件对高层建筑疏散进行模拟,发现从低层向高层优先疏散能有效提高疏散速度;郭海林等^[10]利用 Pathfinder 软件模拟研究了楼梯间障碍物对学生公寓人员疏散时间、出口流量以及疏散路径选择的影响.丁元春^[11]利用 Pathfinder 软件模拟研究了两种典型的疏散楼梯,确定了相同情况下双分楼梯比双跑楼梯的疏散效率更高.王群等^[12]利用 Pathfinder 模拟出了 5 种楼梯间对于高层建筑人员疏散效率的影响.刘梦洁^[13]应用 Pathfinder 人员疏散仿真与 FDS 仿真模拟确定的对车站内三种工况下的可用安全疏散时间进行模拟分析.王莉^[14]使用 Pathfinder 疏散软件模拟植物园某场馆高峰期、低峰期以及场馆内设置复杂环境情况下人员的疏散过程,发现建筑物内墙的方向设置与疏散效率有关.林秋怡等^[15]使用 Pathfinder 疏散软件对宿舍楼安全疏散进行仿真模拟分析.党会森等^[16]利用 Pathfinder 软件,通过设置疏散人员及建筑物参数实现对突发事件下人群疏散行为的仿真,模拟了不同的出口条件等因素对疏散时间的影响.姜子港等^[17]运用 Pathfinder 软件分析了借用防火分区防火门进行疏散对疏散效率的影响;赵哲等^[18]对 FDS + Evac 和 Pathfinder 软件进行对比研究,认为 Pathfinder 中的 steering 模型更适合于公众聚集场所的应急诱导疏散.目前应用 Pathfinder 软件对内部空间复杂、人群高度密集、发生火灾时疏散较为困难的商场建筑的疏散模拟的研究数量较少.

现存的商场建筑尽管符合国家现行的建筑设计防火规范,但在实际的火灾疏散时仍存在许多问题.为了明确商场在火灾发生时的人员安全疏散状况,提出商场疏散的优化

方案,笔者利用 Pathfinder 软件对沈阳市某大型商场进行火灾疏散仿真模拟实验,分析商场建筑火灾安全性能现状,计算安全疏散时间;通过人员流动密度分析,找出商场建筑在火灾发生时可能发生拥堵的位置,以此提出疏散优化方案,为大型商场建筑防火疏散提供理论依据和设计方法。

1 商场建筑防火疏散模拟

1.1 研究对象

本研究以沈阳地区某大型商场为研究对象。该商场为一个高层商业综合体建筑的裙房部分,共五层,每层建筑面积均为 2.13 万 m²。建筑高度 23.85 m,设计等级为二级,设计的使用年限为 50 年,商场的耐火等级为二级。建筑的平面(见图 1)中设有 12 部防烟楼梯间、三部封闭楼梯间、两部室外楼梯、两部室外坡道。防烟楼梯间均设有独立的前室,前室的净面积均不小于 6 m²。封闭楼梯间、防烟楼梯间以及楼梯间前室的疏散门均为乙级防火门并且均向疏散方向开启。建筑每个楼层设有 7 个防火分区。

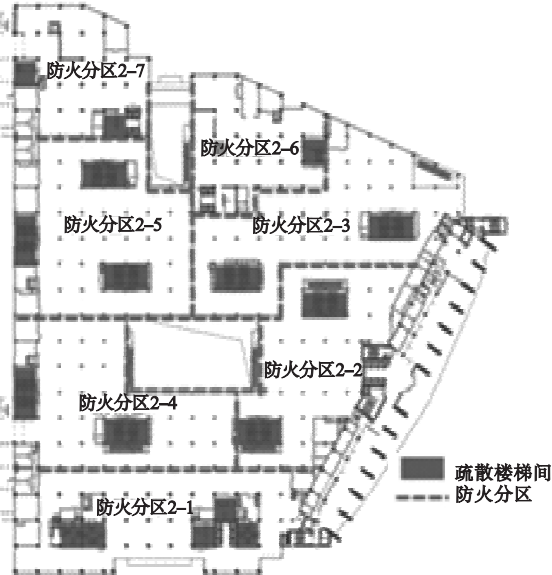


图 1 商场标准层平面示意图

Fig. 1 Standard floor plane of the shopping mall

1.2 建立 Pathfinder 人员疏散模型

Pathfinder 软件是美国 Thunderhead Engineering 公司研发的智能人员紧急疏散逃生评估系统,它包括 SFPE 和 Steering 两种模式。其中 Steering 模式能够对多个群体中的每个个体运动都进行图形化的虚拟演练,从而可以准确确定每个个体在灾难发生时最佳逃生路径和逃生时间。因此软件在疏散模拟领域应用广泛。

在 Pathfinder 中建立模型,首先根据建筑平面布局,将建筑中的功能房间、营业厅、防火分区以及楼层之间的楼梯等输入软件,建立商场模型。相邻防火分区之间以不同宽度的甲级防火门进行连接。图 2 为商场建筑在 Pathfinder 软件中的模型示意图。

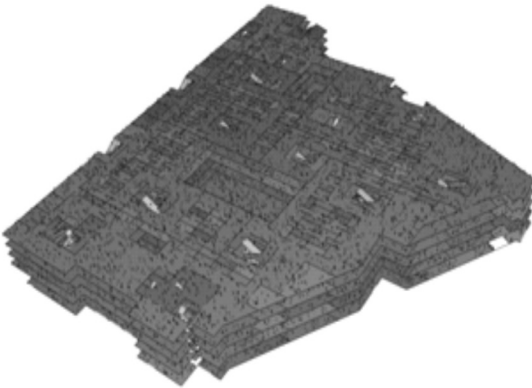


图 2 商场人员疏散模型示意图

Fig. 2 Schematic evacuation model for the shopping mall

本研究采用《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版)中的商店营业厅人员密度(见表 1),确定该商场内部疏散总人数为 25 765 人。

商场建筑的使用人群构成比较复杂。在进行模拟实验时,人员类型是按照国际通用的一般娱乐公共场所所推荐的人员比例构成来确定^[19],其中成年男女各占 40%,老人占 10%,儿童占 10%。再根据不同类型人群,进行疏散场景参数选择,如人员类型、行进速度、不同人群的肩宽等(见表 2)。

表1 商店营业厅内的人员密度

Table 1 Personnel density in store hall	
楼层位置	人员密度/(人·m ⁻²)
地下二层	0.56
地下一层	0.60
地上一、二层	0.43~0.60
地上三层	0.39~0.54
地上四层以上	0.30~0.42

表2 人员疏散行走相关参数^[19]

Table 2 Relevant parameters of evacuation			
人员类型	人员构成 比例/%	行走速度/ (m·s ⁻¹)	肩宽/cm
成年女士	40	1.02	45
成年男士	40	1.20	50
老人	10	0.82	50
儿童	10	0.92	32

在 Pathfinder 软件中,每一疏散人员都具有各自的最大速度 V_{\max} ,软件中运用每一疏散人员的最大疏散速度以及人员密度来计算疏散人员的疏散速度.在 Pathfinder 提供的 Steering 模式中,当人员之间的距离和最近路径点超过某一阈值时人员速度算法会生成新的路径,改变人员的运动路径,从而影响人的疏散行走速度.当人员密度小于 0.55 人/m²时,人员速度如下^[19]:

$$V(D) = V_{\max} \cdot$$

(1)

当人员密度大于等于 0.55 人/m² 时,人员速度如下^[19]:

$$V(D) = V_{\max} \times \frac{k - 0.266 \times k \times D}{1.19}.$$

(2)

式中: $V(D)$ 为疏散人员行走速度,m/s; V_{\max} 为疏散人员最大疏散速度,m/s; k 为速度换算系数,取值为 1.4; D 为人员密度,人/m².

1.3 安全疏散时间模拟软件及参数设置

安全疏散时间(T_{ASET})是指从火灾发生时起,到建筑内部烟气层高度、CO 体积浓度、气体的温度以及能见度等四项参数达到

临界值时止的这段时间.这也是建筑内部人员可用的安全疏散时间,在该时间内疏散出去的人员视为安全,否则视为人员有危险.文中的安全疏散时间是通过火灾模拟软件 PyroSim 对火灾烟气蔓延时间进行模拟计算得到的.其中,四项参数临界值分别为:烟气层高度为 2.0 m;该高度能见度为 10 m;气体温度为 60 ℃;CO 的体积浓度为 0.5 L/m³.

2 模拟结果与分析

2.1 安全疏散时间

与小空间环境相比,大空间环境下人员需要看得更远才能找准疏散方向,因此要求能见度更大.小空间能见度临界值为 5 m,大空间临界值为 10 m^[20].通过 PyroSim 火灾模拟软件模拟结果发现(见表 3、图 3):火灾发生到 663 s、1231 s、929 s、724 s 和 568 s 时,首层、二层、三层、四层及五层分别在中庭附近的能见度下降到 10 m 以下,这个时间即是相应楼层的安全疏散时间 T_{ASET} .在二~五层范围内,安全疏散时间随着层数的增加而减少,这是由于烟气是向上聚集,使得五层的中庭附近能见度降低得最快,而二层的能见度降低最慢.一层的安全疏散时间介于四层和五层之间,主要是由于在进行实验假设时,火源位置设在一层,相应的,安全疏散时间也较短.由图 3 也可以看出,中庭附近烟气聚集较其他地方严重,能见度降低速度最快.

表3 PyroSim 软件模拟实验的商场内各层安全疏散时间

Table 3 Safe evacuation time of each floor in the shopping mall simulated by PyroSim	
楼层	安全疏散时间/s
首层	663
二层	1 231
三层	929
四层	724
五层	568

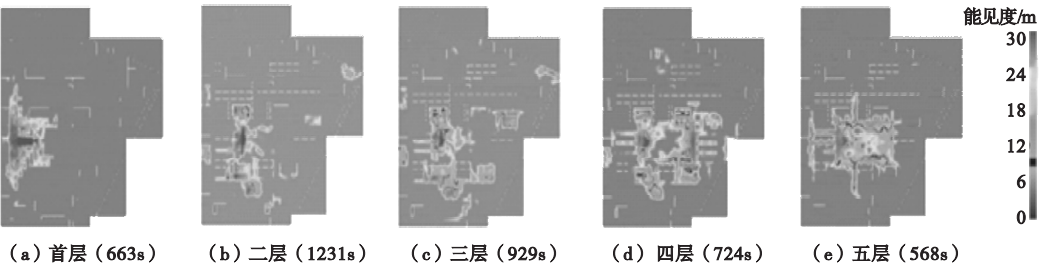


图 3 商场各层能见度分布示意图

Fig. 3 Standard floor plane of the shopping mall

2.2 基于 Pathfinder 模拟人员疏散时间分析

商场人员疏散模拟实验是假设火灾发生后,商场内所有人员立即进行疏散行为.但在真实火灾发生时,只有位于火源位置附近的人员会最先觉察并且进行疏散逃生,而其他区域的人员则需要经过听到报警和对报警信息的反应等行为之后才会开始进行疏散.因此在计算人员疏散时间时,需要考虑商场内部的报警时间以及人员的响应时间.商场人员所需疏散时间(T_{RSET})计算公式如下:

$$T_{RSET} = T_A + T_R + T_M. \tag{3}$$

其中, T_{RSET} 为商场人员所需疏散时间,s; T_A 为火灾报警时间,指当火灾发生瞬间直至火灾报警系统发出警报的这段时间,笔者所研究商场设有自动报警系统, T_A 取值为 60s; T_R 为人员响应时间,是指人员听到火灾报警到人员开始逃生疏散这段时间,建筑中设有广播系统, T_R 取值为 120 s; T_M 为人员的疏散行走时间,s.

在实际情况中,疏散时间是有较大的个体差异,这种差异表现在:①建筑内人员对建筑的熟悉程度存在差异.熟悉建筑物的人员能够做出最快的反应,找出对自己来说比较容易的逃生路径,反之不熟悉建筑的人员,在火灾发生时往往会发生折返现象,向着原来的路径进行逃生,因为这部分人群仅仅对原来前进的路线熟悉.②不同人群警惕性不同.警惕性会对早期疏散产生影响,警惕性越强,越能快速地进行人员疏散.但是不同性别、年龄、学历等等都会产生不同程度的警惕性.警

惕性越高的人往往会做出更理智的选择.③个体差异对活动能力存在影响.在性别方面,男性与女性相比活动能力更强,行走速度更快.在年龄方面老人活动能力是受限的,行走速度也会相应地降低,小孩子的活动能力较强,但是行走速度还是要比成人更慢.另外人员密度也会对速度产生影响,密度越大行走速度越慢,密度越小行走速度越快.笔者利用 Pathfinder 人员疏散模拟软件的模拟结果来计算建筑内人员的所需疏散时间,同样会对下列不同情况进行简化理想设置:当性别相同时所具有的设置参数是完全一致的,不存在性别相同之上的个体差异;人员会对最终疏散出口进行选择,而且会向不拥挤的疏散出口进行移动;每一个人都都会疏散到建筑外,并不存在被困以及伤亡的可能性,人员密度较大时仅仅会影响移动速度,并不会发生踩踏等危险事件.

再根据式(4)对人员疏散的安全性进行评判:

$$T_{ASET} \geq T_{RSET}. \tag{4}$$

其中, T_{ASET} 为相应楼层的安全疏散时间,s; T_{RSET} 为商场人员所需疏散时间,s.根据消防安全工程学原理,将两者时间值进行比较,从而能够得到人员在发生火灾时是否能够安全疏散到安全区域.如果能满足式(5),说明人员能够安全地疏散到安全区域,人员疏散设计方案是合理的.如果不满足,则说明需要对疏散方案进行优化,直至满足人员安全疏散的要求.

假设发生火灾时,建筑内人员进行整体式疏散,通过模拟得到的疏散行走时间,根据式(4)计算商场人员所需疏散时间,结果如表4所示。在整个模拟过程中:首层在安全疏散进行到30 s时,疏散人员选择距离自己最近的消防安全出口进行安全疏散,在安全出口处呈现出人员聚集现象,能够安全疏散3 266人;而二、三、四及五层在疏散到40 s的时候,才在楼梯间前室、安全通道的拐角处产生拥挤现象。当疏散进行到70 s时,首层的原有人员基本上疏散完毕逃离到建筑外部的安全区域;在100 s左右,二、三层人员大多数才能到达能够提供疏散的楼梯间前室附近;当疏散进行到300 s和160 s时,四层、五层人员大多数能够达到疏散楼梯间前室附近,在拥堵时,人员会向其他疏散楼梯间进行移动疏散,但是由于下面几层疏散造成的人员密集以及拥挤,导致对商场五层人员疏散

速度的降低。二层、三层、四层、五层疏散分别在216.5 s、287.4 s、463.4 s和243.3 s时,全部人员能够进入各层的各疏散楼梯前室部分;但由于全楼各层均处于疏散状态,楼梯部位人员行动速度缓慢,在三、四及五层产生了较为严重的拥挤现象。当二层、三层、四层和五层疏散分别进行到626.4 s、600.8 s、580.2 s和567.2 s时,楼层全部人员以及从其上其他楼层进入该楼层楼梯间的人员已经疏散至下一层或首层,完成该层全部人员的安全疏散。

根据模拟结果和安全性评判可知(见表4),二层和三层的人员所需疏散时间 T_{RSET} 小于安全疏散时间 T_{ASET} ,能够安全疏散。而首层、四层以及五层在此火灾场景下所需疏散时间 T_{RSET} 均超出人员安全疏散时间 T_{ASET} ,不满足评判标准,首层和五层疏散所需时间分别超出安全时间29.9%和31.5%,说明人员没有足够的逃生时间,生命安全受到威胁。

表4 商场人员疏散所需时间和安全性判断

Table 4 Time for evacuation of shopping mall personnel and safety judgment						
疏散位置	T_A/s	T_R/s	T_m/s	T_{RSET}/s	T_{ASET}/s	安全性判断
五层	60	120	567.2	747.2	568	不安全
四层	60	120	580.2	760.2	724	不安全
三层	60	120	600.8	780.8	929	安全
二层	60	120	626.6	806.4	1 231	安全
首层	60	120	681.5	861.5	663	不安全

2.3 疏散路径和拥堵状况分析

为了进一步分析和确定产生不安全性的原因,继续对商场人员疏散的过程和结果进行分析,确定拥堵位置。在进行人员疏散模拟实验时,商场内部人员是随机分散到各层不同商铺、不同位置,人员随机分布的情况不对排队等拥挤现象进行考虑。事实上,当火灾发生44s时,人们已经迅速进行疏散,并向不同的疏散楼梯、安全出口进行聚集,一层疏散出口和二至五层大部分疏散楼梯间已经出现了大量人员聚集情况。拥堵现象较为严重的部位,人流密度达到峰值(大于3人/m²),使得疏散进行非常缓慢(见图4、图5)。

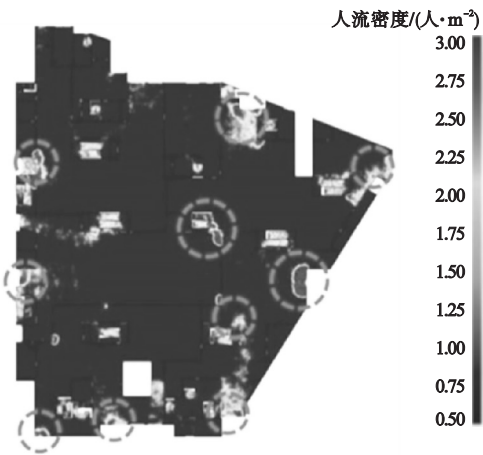


图4 商场首层疏散44s时人流密度热图

Fig. 4 Heat map of personnel flow density at 44s evacuation from the first floor

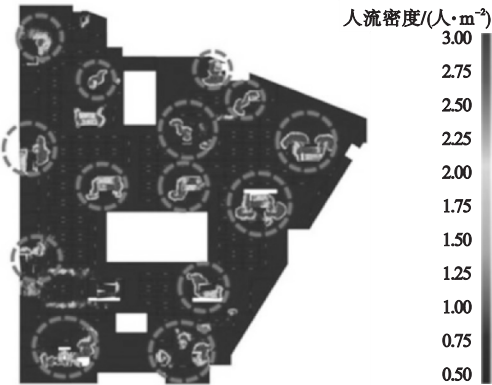


图 5 二、三、四和五层疏散 44s 时人流密度热图
Fig. 5 Heat map of personnel flow density at 44s evacuation from the other floors

当到达商场首层、四层和五层安全疏散时间时,未完成人员疏散的疏散口位置见图 3. 根据模拟过程人员疏散路径分析,首层共有 12 条主要疏散路线(见图 6),只有 5 条疏散路线满足安全疏散要求,疏散路线 2~6、路线 8~9 共 7 条路线的疏散时间超过安全时间,其中疏散路线 4、5、6、9 主要是由于对外安全出口拥堵的原因,疏散路线 2、3、8 主要是在楼梯间疏散时间过长,并且疏散路线 3、8 对外安全出口也有拥挤现象. 四层和五层不满足安全疏散时间的位置相同,分别是疏散路线 3 和 8 的楼梯间(见图 7),主要原因是在首层对外安全出口的拥堵,影响四层和五层的疏散时间.

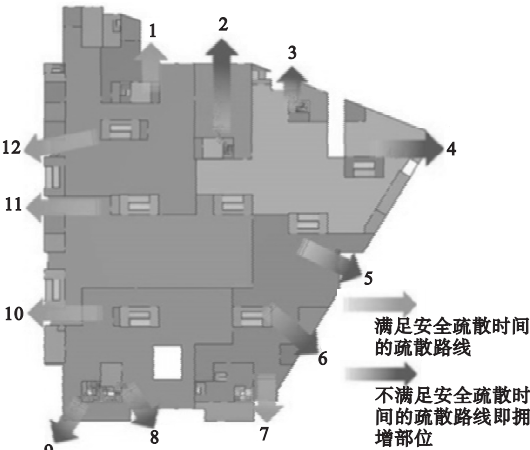


图 6 商场首层平面疏散路线示意图
Fig. 6 Sketch map of evacuation route on the first floor of shopping mall

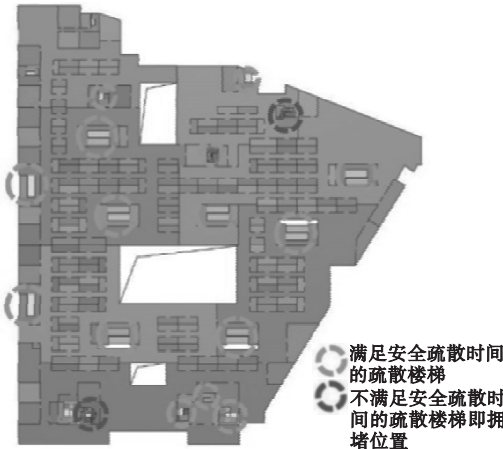


图 7 商场四、五层平面拥堵位置示意图
Fig. 7 Sketch map of congestion location on the fourth and fifth floor of shopping mall

3 商场建筑防火疏散优化设计

3.1 优化方法

在对商场建筑防火设计优化时,一般有以下思路:①优化防火分区及疏散通道等部位^[4];②增加亚安全区、避难走廊等避灾空间^[21];③提高建筑材料耐火极限^[17]. 本研究中根据研究结果,采用对疏散通道及疏散距离设计进行优化,提高商场建筑的防火疏散性能.

商场建筑的面积较大,防火分区数量多,每个防火分区人员安全疏散路线组织均较为复杂. 另外,每层安全出口的位置和宽度对疏散行为的影响很大. 从 Pathfinder 模拟软件的模拟过程中可以发现当两个或多个直接通往疏散楼梯间或室外安全出口的位置过于相近时,容易发生人员拥挤以及伤亡事件,同时也会降低安全疏散的效率. 并且当各个防火分区之间的防火门与相应分区内的外部安全出口相距太远的时候也会对人员疏散产生不利的影响. 只有合理布置疏散楼梯以及相应的安全出口,合理确定安全出口宽度才可能更好的解决商场内部安全疏散问题与隐患.

为了解决首层人员疏散速度缓慢和四、

五层两部分楼梯间疏散时间超出安全时间的问题,根据 Pathfinder 模拟软件对商场防火疏散进行优化设计. 根据 2.3 节分析结果,具体的优化设计措施如下:

(1)为加快商场首层、四层和五层人员疏散速度,增加商场首层不满足安全疏散时间的 7 条疏散路线上的对外安全出口数量和宽度. 图 6 中疏散路线 4、5、6、9 上对外出口宽度分别增加 2 m,疏散路线 3 和 8 上的对外出口宽度分别增加 1 m;

(2)在疏散路线 2、3、8 上的楼梯口和安全出口之间设置直通室外的安全通道,缩短楼梯口到安全出口的距离,从而改善疏散路线首层疏散距离过长、时间过多的问题.

3.2 方法验证

将软件中的模型按照优化后的方案进行修改,并重新进行模拟实验,结果见图 8 所示. 由图可知:优化后的商场各层平面的疏散时间均小于安全疏散时间. 优化后首层、四层和五层的模拟疏散时间分别比优化前减少了 68.9%、17.5% 和 26.5%. 由于二、三层平面模拟疏散时间满足安全疏散时间,所以,没有针对这两层的优化措施,但是,可以看出,优化后的二、三层疏散所需时间大幅减少,比优化前所需优化时间分别减少 46.8% 和 38.0%. 说明优化措施对整个商场的疏散均起到积极作用,有效地减少疏散时间.

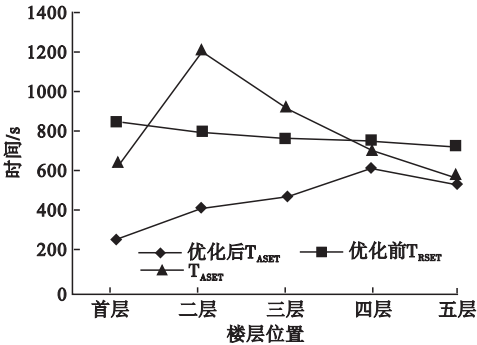


图 8 商场疏散优化前后疏散时间对比

Fig. 8 Comparison of evacuation time before and after optimization of evacuation in the shopping mall

4 结 论

(1)商场首层、四层和五层存在不同程度的拥堵和模拟疏散时间超出安全疏散时间的现象. 首层安全出口数量和宽度不足,部分楼梯疏散速度缓慢超出安全疏散时间.

(2)针对不满足疏散要求的楼层,通过模拟找到建筑疏散薄弱环节以及拥堵位置,并提出优化措施,合理增加首层安全出口的数量和宽度,对不满足疏散时间楼梯的一楼出口处增加直通室外的安全通道. 优化后,商场每个楼层的疏散时间均比优化前大幅减少,商场各层疏散时间均满足安全疏散时间.

参考文献

[1] 王继艳. 大型商业综合体火灾风险评估与消防安全疏散设计分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2017(2): 131-134.
(WANG Jiyan. Assessment of large commercial complex fire risk and analysis of fire safety evacuation design [J]. Journal of Shandong normal university (natural science edition), 2017(2): 131-134.)

[2] 伍爱友, 肖国清, 蔡康旭. 建筑物火灾危险性的模糊评价[J]. 火灾科学, 2004, 13(2): 99-105.
(WU Aiyu, XIAO Guoqing, CAI Kangxu. Fuzzy assessment of building fire risk [J]. Fire safety science, 2004, 13(2): 99-105.)

[3] AHN C, KIM J, LEE S. An analysis of evacuation under fire situation in complex shopping center using evacuation simulation modeling [J]. Procedia - social and behavioral sciences, 2016, 218: 24-34.

[4] 张学智, 常力, 姜雯, 等. 基于 FDS 和 STEPS 的大型商业综合体 IMAX 影厅火灾模拟与安全疏散研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2017, 50(4): 85-89.
(ZHANG Xuezhi, CHANG Li, JIANG Wen, et al. Study on fire design of an IMAX theatre based on FDS and STEPS software [J]. Journal of nankai university (natural science edition), 2017, 50(4): 85-89)

[5] 周波. 某地下超市火灾模式下的人员安全疏散研究[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2011, 11(4): 355-360.
(ZHOU Bo. Study on the safe evacuation of personnel under fire mode in an underground supermarket [J]. Journal of Shanghai institute of applied technology (natural science edition), 2011, 11(4): 355-360.)

[6] 陈兵. 某大型商业广场人员安全疏散模拟[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(5):

- 389-391.
(CHEN Bing. Simulation of safe evacuation of some shopping mall by STEPS [J]. Fire science and technology, 2011, 30 (5): 389-391.)
- [7] GWYNNE S, GALEA E R, LAWRENCE P J, et al. Modelling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model [J]. Fire safety journal, 2001, 36 (4): 327-357.
- [8] ALONSO - GUTIERREZ V, RONCHI E. The simulation of assisted evacuation in hospitals [C]. Fire and evacuation modelling technical conference, Malaga, Spain, 2016.
- [9] DING Yuanchun, YANG Lizhong, WENG Falu, et al. Investigation of combined stairs elevators evacuation strategies for high rise buildings based on simulation [J]. Simulation modelling practice and theory, 2015, 53: 60-73.
- [10] 郭海林, 刘宵, 王志宁, 等. 楼梯间障碍物对安全疏散的影响研究 [J]. 工业安全与环保, 2014, 40 (12): 28-31.
(GUO Hailin, LIU Xiao, WANG Zhining, et al. Research on the effects of obstacles in staircase on the safety evacuation [J]. Industrial safety and environmental protection, 2014, 40 (12): 28-31.)
- [11] 丁元春. 高层建筑人群垂直疏散特性与疏散策略计算机仿真研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
(DING Yuanchun. Research on computer simulation of characteristics and strategies for high-rising buildings occupants' evacuation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.)
- [12] 王群, 徐贺. 不同楼梯入口设置方式下人员疏散的模拟研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11 (9): 108-112.
(WANG Qun, XU He. Numerical simulation on evacuation under different settings ways of staircase entrance [J]. Journal of safety science and technology, 2015, 11 (9): 108-112.)
- [13] 刘梦洁. 基于 FDS 和 Pathfinder 的地铁车站火灾疏散研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
(LIU Mengjie. Study on fire evacuation of subway station based on FDS and Pathfinder [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.)
- [14] 王莉. 基于 PATHFINDER 的公共场所人员疏散行为规律及仿真模拟 [J]. 西安科技大学学报, 2017, 37 (3): 358-364.
(WANG Li. Evacuation behavior and simulation of large public places based on Pathfinder [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2017, 37 (3): 358-364.)
- [15] 林秋怡, 孟庆元. 基于 Pathfinder 的 H 型宿舍楼安全疏散仿真分析 [J]. 淮海工学院学报 (自然科学版), 2018, 27 (2): 71-74.
(LIN Qiuyi, MENG Qingyuan. Analysis of safe evacuation simulation of H-type dormitory building based on Pathfinder [J]. Journal of Huaihai institute of technology (natural science edition), 2018, 27 (2): 71-74.)
- [16] 党会森, 赵宇宁. 基于 Pathfinder 的人员疏散仿真 [J]. 中国公共安全 (学术版), 2012, 20 (4): 46-49.
(DANG Huisen, ZHAO Yuning. Simulation of crowd evacuation based on Pathfinder [J]. China public security (academic edition), 2012, 20 (4): 46-49.)
- [17] 姜子港, 刘晓栋, 霍非舟, 等. 基于 Pathfinder 的商场人员疏散仿真 [J]. 火灾科学, 2014, 23 (3): 175-181.
(JIANG Zigang, LIU Xiaodong, HUO Feizhou et al. Simulation of pedestrian evacuation in a market by Pathfinder [J]. Fire safety science, 2014, 23 (3): 175-181.)
- [18] 赵哲, 陈清光, 王海蓉, 等. 基于 Pathfinder 的公众聚集场所的应急诱导疏散 [J]. 消防科学与技术, 2013 (12): 1327-1330.
(ZHAO Zhe, CHEN Qingguang, WANG Hairong et al. Guidance evacuation based on Pathfinder model under the emergency state in public place [J]. Fire science and technology, 2013 (12): 1327-1330.)
- [19] MORGAN J, HURLEY. SFPE handbook of fire protection engineering [M]. 5th ed. New York: Springer, 2016.
- [20] ADRIAN H. Positive pressure ventilation: a study of overseas experiences [R]. London: Home office - fire research and development group, 1996.
- [21] 谢元一, 胡忠日, 张晓明, 等. 采用亚安全区概念解决大型商业消防安全设计 [J]. 消防科学与技术, 2012 (7): 699-701.
(XIE Yuanyi, HU Zhongri, ZHANG Xiaoming, et al. Using sub-safety zone to resolve fire safety design of large-scale emporium [J]. Fire science and technology, 2012 (7): 699-701.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)