

# 基于 Pathfinder 的高校图书馆火灾疏散研究

阎卫东<sup>1</sup>, 张 瑞<sup>1</sup>, 刘家喜<sup>1</sup>, 张 野<sup>1</sup>, 孙 文<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 分析高校图书馆发生火灾时人员安全疏散状况, 提出最佳应急疏散优化方案。方法 通过 BIM 模型轻量化技术, 利用 Pathfinder 软件对沈阳建筑大学图书馆进行疏散仿真研究, 模拟人员疏散情况, 分析火灾时人员疏散行为特征、楼梯利用率及堵塞情况、疏散出口通过率以及人员安全疏散时间。结果 当发生火灾时, 图书馆楼梯 2 利用率最高, 出口 C 平均人员通过率最高, 但是在楼梯转角处出现堵塞现象。最不利情况下的人员疏散所需时间为 347.8 s, 符合《建筑设计防火规范》(GB50016—2014) 规定。结论 通过对图书馆火灾疏散的研究, 提出优化建议, 可通过增加广播指引以及适当出口引流等措施, 提高疏散效率, 为发生火灾时人员安全疏散管理提供决策支持。

**关键词** 图书馆; BIM 模型轻量化; Pathfinder; 疏散优化

中图分类号 TU242

文献标志码 A

## Study on Fire Evacuation of University Library Based on Pathfinder

YAN Weidong<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, LIU Jiaxi<sup>1</sup>, ZHANG Ye<sup>1</sup>, SUN Wen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To analyze the safe evacuation situation of people in a fire in a university library, meanwhile, propose the best emergency evacuation optimization plan. Lightweight technology through BIM model, using Pathfinder software to conduct evacuation simulation research on Shenyang Jianzhu University Library, simulate evacuation, analyze evacuation behavior characteristics during fire, stair utilization and blockage, evacuation exit pass rate, and safe evacuation of personnel time. When a fire broke out, the library Stair 2 had the highest utilization rate and Exit C had the highest average pass rate, but blockages occurred at the corners of the stairs. The most unfavorable evacuation time is 347.8 s, which complies with code for fire protection design of buildings (GB50016—2014). Through the research of the library fire

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974189); 辽宁省科技厅重点研发项目(1553842646217); 辽宁省科技厅项目(XLYC1908032); 辽宁省教育厅项目(lnqn202005)

作者简介: 阎卫东(1964—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事建筑工程安全管理等方面研究。

evacuation, optimization recommendations can be improved by increasing broadcast guidance and appropriate export draft, and provide decision-making support for the safety evacuation management of the fire.

**Key words:** library; BIM model lightweight; Pathfinder; evacuation optimization

图书馆作为服务大众学习工作的最佳场所,不但要为群众提供良好的学习环境,还要时刻保障人员的生命安全。现代高校图书馆特点为规模趋于扩大、功能趋于多元,人流量较大<sup>[1]</sup>。一旦发生火灾,极有可能因为疏散不及时、不快速而造成伤亡和图书资源的损失,因此对图书馆进行火灾疏散研究意义重大。

国内外专家学者针对人员安全疏散展开研究。S. L. HO 等<sup>[2]</sup>考虑人员聚集、地铁延误和拥堵等疏散影响因素,基于 Pathfinder 软件进行疏散模拟,并提出措施。M. FARID 等<sup>[3]</sup>提出疏散安全框架,可根据建筑和设施的疏散安全性进行局部优化。S. NUR 等<sup>[4]</sup>对基于 Agent 的行人疏散文献进行调查,评估目前技术水平,确定了改进方向。阎卫东<sup>[5]</sup>通过大量调查问卷和应急疏散演习,发现火灾时人员行为特征并提出性别、消防培训和消防演练对疏散时间影响最为显著。王建国等<sup>[6]</sup>通过调查问卷的方式收集信息,采用 Logistic 回归方法对各变量进行编码取值,对样本数据进行量化分析,探讨各因素对人员疏散影响。叶继红等<sup>[7]</sup>建立了一种基于 BIM 的新型元胞自动机路径规划智慧模型,可以实现高效精准救援以及智慧消防。晋良海等<sup>[8]</sup>通过构建极端负荷流线的拓扑解析模型,探讨了公共建筑人群疏散流线拥堵特征。李伟等<sup>[9]</sup>将社会力模型运行规则引入元胞自动机模型,建立了一种考虑个体行为的改进 CA 模型。

目前研究主要针对人员安全疏散中的疏散时间、疏散路径、疏散影响因素及疏散行为等方面,而关于火灾情况下图书馆建筑疏散研究较少。基于此,笔者以沈阳建筑大学图

书馆为例,通过 BIM 模型轻量化技术,利用 Pathfinder 软件对人员火灾疏散进行模拟,观察人员行为特征、疏散路径,计算了疏散时间,最终提出应急疏散优化方案,为图书馆安全管理及应急疏散提供理论基础和技术支撑。

# 1 建筑物疏散模型建立

## 1.1 研究对象建筑结构

笔者选取沈阳建筑大学图书馆为研究对象,图书馆共 7 层,地下 1 层,地上 6 层,层高 3.8 m,东西长 104.8 m,南北宽 48 m,占地面积约为 4 154 m<sup>2</sup>。地下 1 层主要为休闲区,第一层至第五层各设有自习室和阅览室,第六层为图书馆办公人员办公位置,共有 1 244 个阅览座位。考虑到人员主要分布情况与聚集程度,笔者主要研究图书馆第一层至第六层。图书馆一楼共设有六个出口,以便紧急情况使用。东西方向各设置两部步行楼梯和一部电梯,共四部楼梯和两部电梯供人员平常使用,本次模拟场景为火灾,因此不考虑电梯使用情况。通过视频监控识别方法,得到图书馆平均日流动量约为 1 030 人。利用 BIM 技术构建沈阳建筑大学图书馆建筑信息模型如图 1 所示。

## 1.2 Pathfinder 人员疏散模型

Pathfinder 是由美国 Thunderhead Engineering 公司开发的一个基于人员运动的模拟器,广泛应用于火灾人员疏散模拟。软件支持 SFPP 模式和 Steering 模式两种运动模拟方式<sup>[10]</sup>。SFPP 模式中行人不会相互影响,即互不避让并可互相穿透;Steering 模式使用路径规划、指导机制和碰撞处理相结合的手段来控制行人运动,在发生拥堵时会

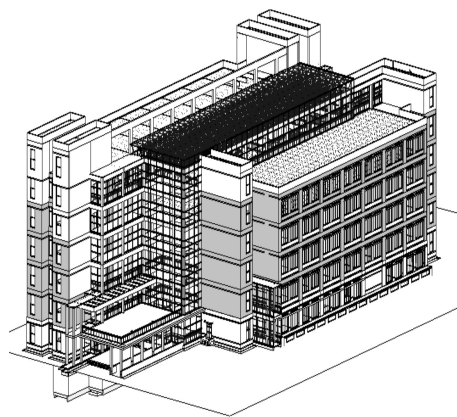


图1 图书馆实体建筑模型

Fig. 1 The physical building model of library

自动选择其他的路线。由于 Steering 模式更接近现实,因此其更适合于公众聚集场所的应急疏散的仿真。

目前,有部分专家学者<sup>[11-13]</sup>将 BIM 建筑信息模型与 Pathfinder 人员疏散仿真模型结合使用,不仅可以提高模拟效率,还可构建真实、准确的模拟场景。笔者将采用此方法构建图书馆模型。

### 1.3 BIM 模型的轻量化处理

目前,Pathfinder 软件不支持将 Revit 的 RVT 模型文件直接导入,需要将模型导出为 DXF 或 DWG 格式文件后,再导入至 Pathfinder 软件中。由于研究内容为疏散过程中人员的运动情况,因此对图书馆模型进行轻量化处理,仅提取楼板、楼梯以及墙体等建筑构件。同时通过三维激光扫描仪对图书馆进行扫描,得到点云数据,为构建桌椅和障碍物等提供数据支持。并根据软件中的提示信息,进行模型的修正与完善。

在完成基本的模型构建后,添加人员信息,设定人员参数,可得到不同房间人员疏散情况图和不同疏散出口的通过率过程线图,其中全尺寸图书馆疏散模型见图2。

## 2 人员行为特征及参数选择

### 2.1 人员行为特征

人员在发生火灾事故时的行为特征是影

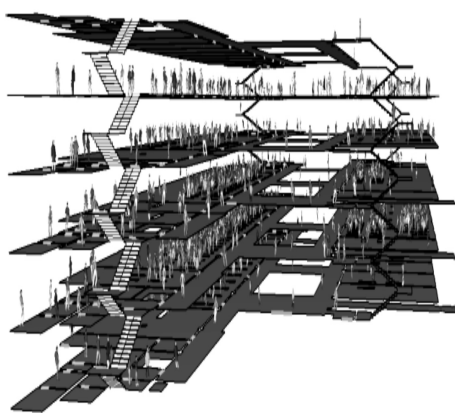


图2 Pathfinder 软件中全尺寸模型

Fig. 2 Same size model in Pathfinder software

响疏散的重要因素,直接决定了疏散时间与疏散效率。因此,基于人员行为特征的参数选择,决定了疏散模拟结果的准确性与真实性。

#### (1) 人群聚集,疏散困难

高校图书馆为大众提供大量的阅览座位以供学习,且各个阅览室布局面积较大,因此人员密度大,人群十分聚集,尤其是考试周时间,为快速且安全的疏散工作增加了困难性。

#### (2) 人员构成相对简单

出入高校图书馆人员多数为学生,因此笔者仅将人群类别分为成年男性和成年女性。研究表明,性别的差异体现在面对火灾时的行为不同,比如男性会更加理性的判断并主动帮助其他人员,而女性心理承受能力较弱,首先进行疏散路线的选择<sup>[2]</sup>。

#### (3) 行动能力强,逃生速度快

成年男性与成年女性的行动能力较强,且他们受教育程度较高,多数经历过疏散逃生演习与培训,一旦发生火灾,人员疏散迅速,疏散效率较高。

### 2.2 人员参数选择

#### 2.2.1 疏散人员数量的设定

为了保证模拟的可靠性和真实性,通过实际调研和视频监控识别方法,确定人员位置和分布密度情况。选取四种不同的时间段,对平常工作日、双休日以及考试周三种情

况进行调研,结果分别如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 工作日不同时间段各层人员数量

Table 1 Number of personnel at each level in different time periods of the working day				
楼层	人员数量/人			
	7:00—8:00	11:00—12:00	17:00—18:00	20:00—21:00
一层	101	93	83	96
二层	333	324	355	340
三层	165	183	200	209
四层	119	136	110	122
五层	142	123	131	140
六层	12	5	7	2
合计	872	864	886	909

表 2 双休日不同时间段各层人员数量

Table 2 Number of personnel at each level in different time periods on weekends				
楼层	人员数量/人			
	7:00—8:00	11:00—12:00	17:00—18:00	20:00—21:00
一层	108	90	97	91
二层	341	370	365	347
三层	159	174	211	191
四层	110	118	124	126
五层	137	138	142	113
六层	2	3	2	4
合计	857	893	941	872

表 3 考试周不同时间段各层人员数量

Table 3 Number of personnel at each level in different time periods of the exam week				
楼层	人员数量/人			
	7:00—8:00	11:00—12:00	17:00—18:00	20:00—21:00
一层	100	92	91	90
二层	440	396	420	444
三层	200	210	212	239
四层	135	127	128	137
五层	140	118	129	150
六层	6	5	3	3
合计	1 021	948	983	1 063

笔者仅考虑地上六层人员疏散情况,通过调研数据可以发现考试周的 20 时至 21 时人员数量较多,流动量较大,上座率达到了 85%。同时考虑图书占座的情况以及最不利的模拟情况,最终得到考试周的上座率为 84%,因此根据图书馆各层阅览室的座位数量,设定模拟人员数量共计 1 050 人,第一层至第六层人员数量分别为 101 人、417 人、231 人、144 人、151 人和 6 人。

笔者仅将人群类别分为成年男性和成年女性。由于图书馆第二层阅览座位最多,人员最为密集,因此选取第二层阅览室为调研场所,通过视频监控识别方法,统计考试周不同时间段的人员性别,结果见表 4。

表 4 二层阅览室人员性别统计

Table 4 Gender statistics of the reading room on the second floor				
时间段	成年男性 数量/人	成年女性 数量/人	总数/人	男女 比例
7:00—8:00	227	213	440	1.07
11:00—12:00	215	181	396	1.19
17:00—18:00	208	212	420	0.98
20:00—21:00	225	219	444	1.03

从表 4 可知,图书馆的男女比例大约是 0.98 ~ 1.19,基于沈阳建筑大学官方数据统计,2019 年沈阳建筑大学的男女比例为 2.44。同时由于女性疏散能力较弱,女性数量的增多导致疏散时间的增加,考虑最不利模拟情况,因此男女比例选取 0.98。

2.2.2 疏散人员运动参数

根据美国消防工程师协会 SFPE 的消防工程手册《SFPE Hand book of Fire Protection Engineering》<sup>[14]</sup>以及实际测算,可以得到紧急情况下的成年男性运动速度为 1.5m/s,成年女性运动速度为成年男性运动速度的

85% ,即 1.28 m/s<sup>[15]</sup>。

依据《中国成年人人体尺寸》(GB10000—1988)<sup>[16]</sup>规定,可以得到成年男性肩宽为 50 cm,成年女性肩宽为 45 cm。

3 火灾疏散结果分析

3.1 楼梯利用率和堵塞位置分析

疏散模拟可实时观测图书馆第一层至第六层全部人员的疏散过程以及分布情况。由于第二层阅览座位数量较多,相比其他楼层人员比较密集,在火灾疏散时难度最大,因此选取第二层为研究对象,观察其在不同时间下的人员分布情况,结果如图 3 ~ 图 6 所示。

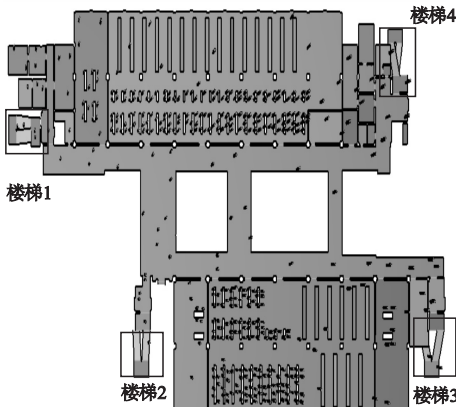


图 3 0 s 时第二层人员分布情况

Fig. 3 Distribution of the second floor personnel at 0 s

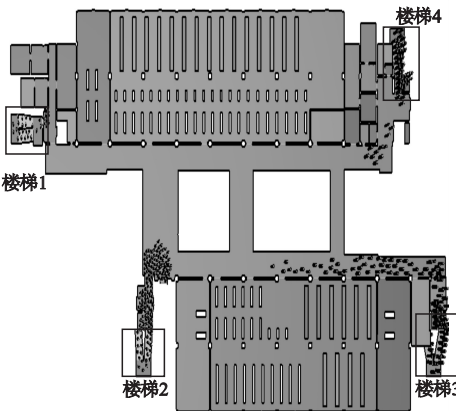


图 4 60 s 时第二层人员分布情况

Fig. 4 Distribution of the second floor personnel at 60 s

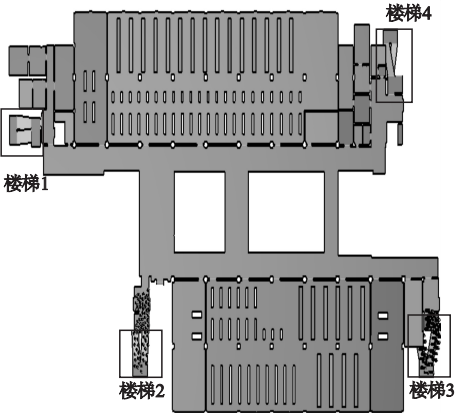


图 5 120 s 时第二层人员分布情况

Fig. 5 Distribution of the second floor personnel at 120 s

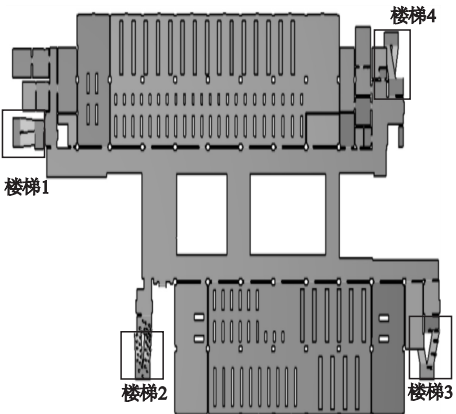


图 6 200 s 时第二层人员分布情况

Fig. 6 Distribution of the second floor personnel at 200 s

观察实时疏散情况,在第 60 s 时,人员集中于楼梯口,且楼梯 2 转角处的拥挤和堵塞现象最为严重,其余楼梯较为畅通。有 2.9% 人员发现楼梯出现堵塞情况后,及时重新选择疏散路径,提高了疏散效率。第 120 s 和 200 s 时,除楼梯 2 和楼梯 3,其余楼梯已经完成疏散。经过分析得到,楼梯 1 利用率最低,楼梯 2 利用率最高。

3.2 疏散出口通过率分析

图书馆共有 6 个疏散出口,分别为出口 A、B、C、D、E 和 F(见图 7)。不同疏散出口的通过率过程曲线如图 8 所示。



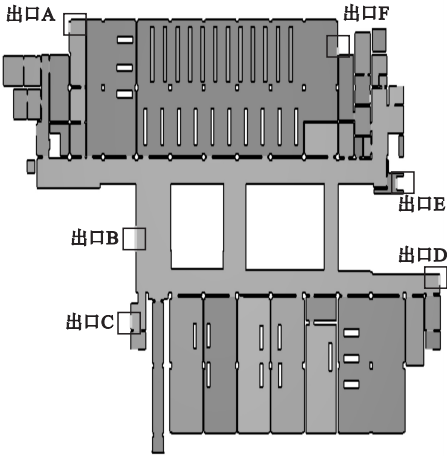


图7 一层出口平面图  
Fig. 7 First floor exit plan

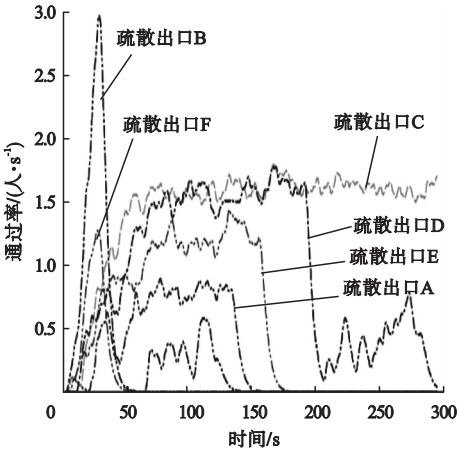


图8 不同疏散出口的通过率过程图  
Fig. 8 Process diagram of the passing rate of different evacuation exits

从图8可以看出,出口F利用率最低,在疏散前期,由于出口B作为日常主出入口且通道宽度较大,其通过率最高,达到了2.97人/s。疏散后期,由于楼梯2利用率较高,影响人员疏散出口的选择,出口C利用率及平均人员通过率最高。

疏散总时间为298 s,在第27 s时,出口F率先完成人员疏散,其次是出口B疏散时间为118 s,出口A疏散时间为130 s、出口E疏散时间为153 s、出口D疏散时间为278 s,直至第298 s时,出口C疏散完毕。

3.3 人员疏散时间分析

为保证人员可以安全疏散,疏散设计应

满足综合判定标准:人员可用疏散时间 $t_{ASET}$ 大于人员必要疏散时间 $t_{RSET}$ 。人员必要疏散时间包括火灾报警时间 $t_{det}$ 、人员响应时间 $t_{resp}$ 以及人员疏散运动时间 $t_{move}$ 。安全余量为人员可用时间与人员必要疏散时间的差,其值越大,人员疏散的安全性越高。人员疏散所需时间计算如下:

$$t_{RSET} = t_{det} + t_{resp} + t_{move} \times 1.1. \tag{1}$$

根据文献[17]得 $t_{det} = 10\text{ s}$ , $t_{resp} = 10\text{ s}$ 。Pathfinder软件得到疏散运动时间 $t_{move} = 298\text{ s}$ ,考虑到实际疏散与软件模拟存在部分差异,因此增加一个安全系数,基于美国消防工程师协会SFPE的消防工程手册《SFPE Handbook of Fire Protection Engineering》<sup>[14]</sup>,安全系数取1.1,因此人员疏散所需时间为 $t_{RSET} = 10 + 10 + 298 \times 1.1 = 347.8\text{ s}$ 。

同理可得在工作日和双休日时,人员疏散所需时间分别为336.8 s和311.5 s。图书馆为一级耐火等级公共建筑物,根据《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)<sup>[18]</sup>中规定,一、二耐火等级公共建筑物的允许疏散时间为6 min,可见文中的 $t_{RSET}$ 符合规定。

4 结 论

(1)基于软件模拟结果和实际调研,工作日、双休日和考试周时,人员疏散所需时间分别为347.8 s、336.8 s和311.5 s,符合《建筑设计防火规范》(GB50016—2014)规定。

(2)图书馆楼梯2利用率最高,楼梯1利用率最低;出口C利用率最高,出口F利用率最低。在楼梯2和楼梯3转角处出现堵塞情况,建议完善疏散引导因素并增加引流管理,比如增加明确的指示标志,添加实时的广播指引以及增加引导员管理等措施。

参考文献

[1] 周怡彤. 高校图书馆防火安全疏散设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
(ZHOU Yitong. Research on fire safety evacuation

- design of university library [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. )
- [2] HO S L, HYE L M, SU K L. Evacuation time at Jong-no 3ga subway station considering electric train delays and congestion[J]. Journal of transportation security, 2018, (11): 137 - 150.
- [3] FARID M, BRENDA M, ARASH S. IFC-centric performance-based evaluation of building evacuations using fire dynamics simulation and agent-based modeling [J]. Automation in construction, 2019 (101): 1 - 16.
- [4] NUR S, OMAR A, SHERIEF A. Research issues in agent-based simulation for pedestrians evacuation [J]. IEEE access, 2020, 8: 134435 - 134455.
- [5] 阎卫东. 建筑物火灾时人员行为规律及疏散时间研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.  
(YAN Weidong. Study on law of human behavior and evacuation time when buildings are on fire [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. )
- [6] 王建国, 刘颖, 苏俊凯, 等. 地铁火灾人员疏散行为影响因素研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 706 - 709.  
(WANG Jianguo, LIU Ying, SU Junkai, et al. Study on influencing factors of evacuation behavior of subway fire [J]. Fire science and technology, 2019, 38(5): 706 - 709. )
- [7] 叶继红, 潘俊山. 基于 BIM 和元胞自动机的建筑火灾救援路径动态规划研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 1 - 8.  
(YE Jihong, PAN Junshan. Real-time path planning for safe rescue in building fire based on BIM and cellular automata [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(8): 1 - 8. )
- [8] 晋良海, 易小钰, 殷双萍, 等. 公共建筑人群疏散流线负荷的拓扑解析模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 30 - 36.  
(JIN Lianghai, YI Xiaoyu, YIN Shuangping, et al. Study on topological analysis model of streamline load for crowd evacuation in public buildings [J]. Journal of safety science and technology, 2020, 16(9): 30 - 36. )
- [9] 李伟, 张鑫龙. 考虑个体行为的改进 CA 模型人员疏散研究[J/OL]. 计算机工程与应用, [2020 - 09 - 10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20200908.1138.004.html>.  
(LI Wei, ZHANG Xinlong. Research on pedestrian evacuation considering individual behavior based on improved CA model [J]. Computer engineering and applications, [2020 - 09 - 10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20200908.1138.004.html>. )
- [10] 汤煜, 表秀峰, 马福生. 基于 Pathfinder 的商场建筑防火疏散研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 858 - 866.  
(TANG Yu, BIAO Xiufeng, MA Fusheng. Research on fire evacuation of shopping malls based on pathfinder [J]. Journal of shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 858 - 866. )
- [11] 尚文天, 齐宏伟, 张润畦, 等. 基于 BIM 模型和 Pathfinder 的地铁站安全疏散模拟研究[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(6): 87 - 93.  
(SHANG Wentian, QI Hongwei, ZHANG Runqi, et al. Research on safety evacuation simulation of subway station based on BIM model and Pathfinder [J]. Journal of north China institute of science and technology, 2019, 16(6): 87 - 93. )
- [12] 喻敏, 兰志光. 基于 BIM 与 Pathfinder 的地铁站客流疏散相关研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊1): 179 - 186.  
(YU Min, LAN Zhiguang. Study on passenger evacuation in metro stations based on BIM and pathfinder [J]. Tunnel construction (Chinese and English), 2020, 40(S1): 179 - 186. )
- [13] 张蒙. 基于 BIM 的高层建筑消防应急疏散仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
(ZHANG Meng. Simulation study on fire emergency evacuation of high-rise building based on BIM [D]. Xi'an University of Technology, 2020. )
- [14] HURLEY M. SFPE Handbook of fire protection engineering [M]. New York: Springer Publishers, 2016.
- [15] 郭阿敏, 谷瑞玲. 综合性图书馆火灾烟气模拟与人员疏散研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 778 - 782.  
(GUO Amin, GU Ruiling. Study on smoke simulation and evacuation of fire in comprehensive library [J]. Fire science and technology, 2020, 39(6): 778 - 782. )
- [16] 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸: GB10000—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
(National Bureau of Technical Supervision. Chinese adult human body size: GB10000—1988 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014. )
- [17] 马哲, 孙华玲. 图书馆书库的火灾危险性和安全疏散[J]. 建筑防火设计, 2006, 25(4): 492 - 494.  
(MA Zhe, SUN Hualing. Fire risk and safe evacuation of the stack in a library [J]. Building fire protection design, 2006, 25(4): 492 - 494. )
- [18] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范: GB50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
(The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Code of fire protection design of buildings: GB50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. )  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)