

基于VR的隧道火灾疏散指挥训练系统^{*}

胡珉^{1,2} 副教授 刘婍雯^{1,2}

(1 上海大学 悉尼工商学院, 上海 201800)

(2 上海大学-上海城建(集团)建筑产业化研究中心, 上海 200072)

学科分类与代码: 6208035(应急决策指挥)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

资助项目: 上海市科委重点项目(18DZ1201204)。

【摘要】 为减少隧道火灾造成的人员伤亡,基于虚拟现实(VR)技术,开发火灾疏散指挥人员的训练系统。该系统通过VR设备采集指挥者的动作、声音等指令,动态模拟疏散人群对指令的响应情况;将人群的响应行为和其自疏散行为相结合,再置于火场环境中,综合模拟疏散指挥过程;对指挥效果进行数值化评估。应用该系统在上海市大连路隧道模型进行模拟试验。试验结果显示:挽救人数随训练次数呈递增趋势,且在典型情境下,受训人员的指挥结果均能达到应急预案的要求,证明该系统能够通过模拟训练来优化疏散指挥人员的指挥行为。

【关键词】 隧道; 火灾事故; 疏散指挥; 训练系统; 虚拟现实(VR)

VR-based tunnel fire evacuation commander training system

HU Min^{1,2} LIU Biwen^{1,2}

(1 Sydney Institute of Language and Commerce, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

(2 Joint Research Center for Construction Industrialization of SHU and SUCG, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to reduce the casualties caused by tunnel fires, a VR technology based training system for fire evacuation commanders was developed. The system collects commands and voices of commanders through VR devices to dynamically simulate the response of evacuees. By combining the response behavior with self-evacuation behavior of evacuees, and placing it in the fire environment, the evacuation command process was simulated comprehensively, and the command effect was evaluated numerically. The system was simulated in the Dalian Road tunnel model in Shanghai. The results show that the number of rescuers is increasing along with training times, and simulation results of trainees under typical situations can meet the requirements of emergency plans, and that the system can optimize the behavior of commanders through training.

Keywords: tunnel; fire accident; evacuation commander; training system; virtual reality(VR)

0 引言

随着我国公路隧道的迅速发展,隧道事故尤其是火灾事故也越来越受到关注。各类统计研究表明^[1-2],隧道火灾是经济损失最严重、死伤人数最

多、发生频率最高的建筑灾害之一,它释放的烟气和热量不仅会损害隧道本身,还会对人群疏散造成阻碍、威胁人的生命安全。火灾造成人员伤亡的主要人为原因是人员缺乏消防常识造成疏散效率低下,虽然应急疏散演习能够有效减少火灾发生后的人员

* 文章编号: 1003-3033(2018)05-0185-06; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.05.031
收稿日期: 2018-02-05; 修稿日期: 2018-04-16

伤亡,但公共演习耗费人力物力、且难以还原实际的火灾场景。因此,开展基于计算机和虚拟现实(Virtual Reality,VR)技术的人员疏散模拟能有效控制应急疏散演习的成本。

在疏散模拟领域已经有很多成熟的软件,例如:EVACNET、FDS + Evac、Simulx、building EXODUS等。这些软件在真实性和实时性上表现优异,但缺乏交互性,通常用于疏散过程的模拟研究,而难以起到训练的作用。因此,研究者们基于VR技术提出了多种交互式疏散模拟的方法:RÜPPEL^[3]、REN Aizhu^[4]、D'ORAZIO^[5]等的通过穿戴式的游戏设备实现了场景中物体的搬运;张敬宗^[6]在研究交互时主要侧重消防器材的使用;朱红青等^[7]不仅实现了设备操作的模拟交互,还对用户的操作进行了测评。以上的交互式研究,除了朱红青等^[7]的研究对象是消防人员,其他都是针对疏散人员而非指挥者。吕军等^[8]在其研究中考虑了救灾指挥的决策,但在实施手段上还是通过观察模拟来了解事故的发生以及发展趋势从而辅助决策,并没有在模拟中实现指挥人员对疏散人群的影响。总体来说,目前的疏散训练研究主要集中于训练疏散人员,缺乏对指挥人员可互动的模拟训练研究。然而,不同于办公楼等公共建筑,公路隧道流动人员比例极高,对隧道内流动人员进行消防培训的可实施性和效率都很低。

针对隧道这类流动性高的公共场所,探索对火灾疏散指挥人员进行训练的方法将有利于提高疏散培训的效率。因此,笔者将开发基于VR的隧道火灾疏散指挥训练系统,拟采用Kinect摄像头作为输入设备,基于UC-win/Road模拟软件进行场景展示,

在疏散模拟环境中根据VR输入设备采集的指令改变自疏散人群的行为,来实现指挥人员对疏散人群的影响模拟,以期为隧道火灾疏散的指挥工作人员提供应急模拟的环境,从而通过加强培训来减少真实火灾可能造成的伤亡。

1 系统框架

在实际火灾中,指挥人员通常有动作和语言2种方式来影响疏散人员,相应的,实际火灾场景和疏散人员的状态也会对指挥者的决策造成影响。因此,针对疏散指挥人员设计的训练系统不仅需要捕捉指挥人员的动作和语音指令,还需要将火灾场景和疏散人群的状态实时反馈给指挥者。

基于以上需求和现有的技术手段,笔者设计了一款基于VR的隧道火灾疏散指挥训练系统。系统的信息处理流程如图1所示,该系统包括人员自疏散模拟、疏散指令响应和指挥反馈处理3个功能模块。其工作机制如下:首先由人员自疏散模拟模块生成自由疏散的人群,由指挥反馈处理模块置于火场环境中呈现给用户;用户接收到信息后,根据当前的疏散情况决定采取的措施,以声音或动作的形式发出指令,指令由Kinect摄像头识别处理后,传入疏散指令响应模块以决定对疏散人群产生的影响,再基于当前自疏散人群的状态,生成受指挥人员影响的疏散人群,进而通过指挥反馈处理模块实时反馈给用户;在整个模拟过程中,3个模块持续更新,直到指挥反馈处理模块检测到模拟结束、并将指挥结果呈现给用户后,模拟完成。

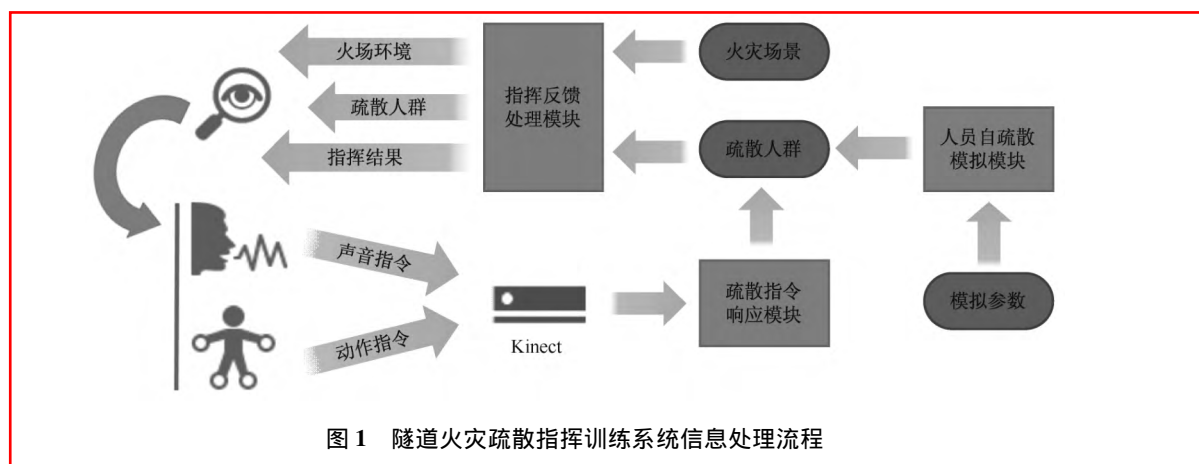


Fig.1 Information processing flow of tunnel fire VR-based evacuation commander training system

2 人员自疏散模拟模块

人员自疏散模拟模块负责在模拟环境中生成没

有指挥干预的疏散人流,控制他们在模拟中的行为模式、并切换其疏散状态。它首先接收用户对于模拟参数的设置,并将其转化为对疏散人群行为模式

的影响,然后生成初始的疏散人群、并在模拟的全过程中实时改变人的状态以形成自疏散人群。

模拟参数是人员自疏散模块的主要输入。由于不同隧道的结构以及通风设施的情况有差异,同一隧道在不同时间段内的车辆密度差距也非常大,因此,需要设置输入参数来最大程度上模拟火灾发生

时的火场和人群情况。模拟参数包括描述疏散人员构成的人员参数和描述火场环境的火场参数(表1)。其中总人数用于模拟过程中疏散人员模型的初始化,性别比例、老弱率和疏散标志设置情况影响人员的疏散行为,平均温度和有害气体体积分数用于疏散人群的伤亡计算。

表 1 模拟参数列表

Tab.1 List of simulation parameters

参数类型	参数名	说明
人员参数	总人数 N	疏散人群的总人数
	性别比例 $F/\%$	女性占有所有疏散人群的比例
	老弱率 $W/\%$	老弱病残占有所有疏散人群的比例
火场参数	平均温度 $M/^\circ\text{C}$	火场内的平均空气温度
	有害气体体积分数 $\rho/\%$	火场内威胁人生存状态的有害气体的体积分数
	疏散标志设置情况 L_s	建筑物内疏散标志是否充足且指向明确

模拟中的疏散人群模型是根据人员参数在 UC-win/Road 模拟软件中以随机初始位置生成,并在模拟过程中实时更新其状态。疏散路径则是根据隧道本身制定的应急预案,在模拟软件中以飞行路径的形式预设。在本系统中,疏散人员有 4 种状态,分别是等待疏散、疏散中、疏散成功和死亡。

1) 等待疏散: 模拟开始时所有疏散人员的初始状态,经过一定的反应时间后,人员从等待疏散状态转化为疏散中状态。

2) 疏散中: 人员开始以自疏散速度沿着预设的疏散路径向安全出口撤离。

3) 疏散成功: 一旦疏散人员到达疏散路径的终点,即安全出口,则由疏散中状态转化为疏散成功状态。

4) 死亡: 疏散中的人员在到达安全出口前,疏散用时超过了生存时间,即从疏散中状态转化为死亡状态。

2.1 反应时间

反应时间 t_w 是人员在火灾发生到开始撤离行为所用的时间。一般情况下,实际疏散用时远远大于理论计算的疏散时间,这是由于人从收到火灾警报到开始疏散会有较长的时间差,因此理论疏散时间被作为疏散路径的优化设计参数,但并不适用于疏散模拟。根据对火灾幸存者的调研,人们在收到火灾警报后会采取的行动分布以及用时如图 2 所示^[9-10]。本系统就基于该项调研,采用以下行为分布以及行动用时来计算人的反应时间。

2.2 自疏散速度

自疏散速度 V 是人群在没有疏散指挥干预下

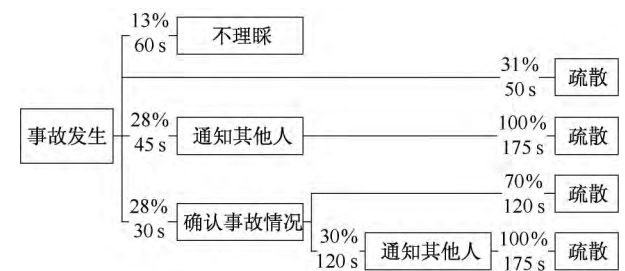


图 2 人群行为分布比例及行动用时决策树

Fig.2 Decision tree of evacuee behavior distribution and action time

的疏散速度。由于隧道空间狭长,障碍物排列也较为整齐,疏散形式基本可视为列队行走,因此,整体的疏散速度受人群组成的影响较大;此外,疏散标志的设置情况也会对疏散的整体速度造成影响。因此,本系统考虑了以上 2 个影响因素,通过性别比例、老弱率和疏散标志设定情况等 3 项参数对预设的疏散速度进行调整,从而计算人群的自疏散速度 V ,如下式所示:

$$V = V_0 + (W_0 - W) \cdot V_w + (F_0 - F) \cdot V_F + V_s \quad (1)$$

式中: V_0 为预设的疏散速度 m/s ; W_0 为预设人群的老弱率,%; V_w 为单位老弱率对整体速度的影响, m/s ; F_0 为预设人群的女性比例,%; V_F 为单位女性比例对整体速度的影响, m/s ; V_s 为疏散标志设置密度对速度的影响, m/s 。系统将疏散标志的设置密度分为高、中、低等 3 档,并定义了评估标准,由用户自行评估输入。当密度为高时, V_s 取 0.5; 当密度为中时, V_s 取 0; 当密度为低时, V_s 取 -0.5。

2.3 生存时间

火场恶劣的环境会威胁人的生命安全,如果疏

散人员不能及时撤离到安全地带就有可能造成死亡,生存时间 t_s 是衡量人在火灾环境中存活时间的变量。本文基于谢旭阳^[11]等人的研究来计算疏散人员的生存时间,该研究将火灾可能造成人员死亡的原因分成2个因素:高温环境和有害气体,分别计算人在这2种环境下的忍耐时间,最终取两者的最小值作为生存时间,如以下3式所示:

$$t_s = \min(t_1, t_2) \quad (2)$$

其中

$$t_1 = \frac{4.1 \cdot A \cdot 10^8}{\left(\frac{M - B_2}{B_1}\right)^{3.61}} \quad (3)$$

$$t_2 = 160.06 \cdot \exp(-3.96 \cdot \rho) - 11.14 \quad (4)$$

式中: t_1 为高温环境下的忍耐时间 s ; t_2 为有害气体

下的忍耐时间 s ; A 为安全系数,代表不同人对高温环境的忍耐度; B_1 为和 B_2 为常数,通常 B_1 取1, B_2 取0。

3 疏散指令响应模块

疏散指令响应模块的主要功能是通过 Kinect 设备接收用户发出的疏散指令,然后转化为对自疏散人群的影响,并在模拟环境中更新。系统为用户提供了动作指令和声音指令各4种(表2),除“移动”指令作用于疏散指挥外,其他指令都作用于疏散人群。“移动”指令模拟指挥人员在火场中的位置变化,通过该动作用户可以实现疏散指令作用范围的移动和用户界面视野范围的更新。

表2 指挥者指令定义

Tab.2 Definition of commands

动作指令				
名称	移动	举手	口哨	平举
动作	右手举过头顶并握拳拖拽	左手举过头顶	左手定格于嘴前	双手平举于身侧
效果	改变指挥者的位置	加速处于疏散中的人员	减少疏散前的反应时间	少量加速疏散者
声音指令				
名称	火警	加速	引路	爬行
发音	Fire/Fire Alarm	Hurry up/Speed up	Come this way/Go this way	Crawl/Crawl forward
效果	减少疏散前的反应时间	加速处于疏散中的人员	少量加速疏散者	减速处于疏散中的人员 延长疏散者的生存时间

疏散指令响应模块在对 Kinect 采集到的关节和声音信息进行识别后,处理成与指令名称对应的字符串,并传递给控制动态模拟的 UC-win/Road 插件,插件接收到指令后,再将其产生的效果更新在疏散人员状态和用户界面上,从而完成用户指令对疏散人群的影响过程。以声音指令“火警”为例,其响应流程如图3所示。系统中的疏散人员

以 Person 类的实例形式存在,其可访问的公共方法用于获取和改变人员的属性信息。在收到火警指令后,系统从模拟场景中获取人员的状态以及位置信息并进行判断,若该人员处于等待疏散状态、且在用户当前的影响范围内,则减少其反应时间并更新到模拟场景中。Kinect 每获得一帧数据,则根据接收到的指令对每个人员依次进行判断和

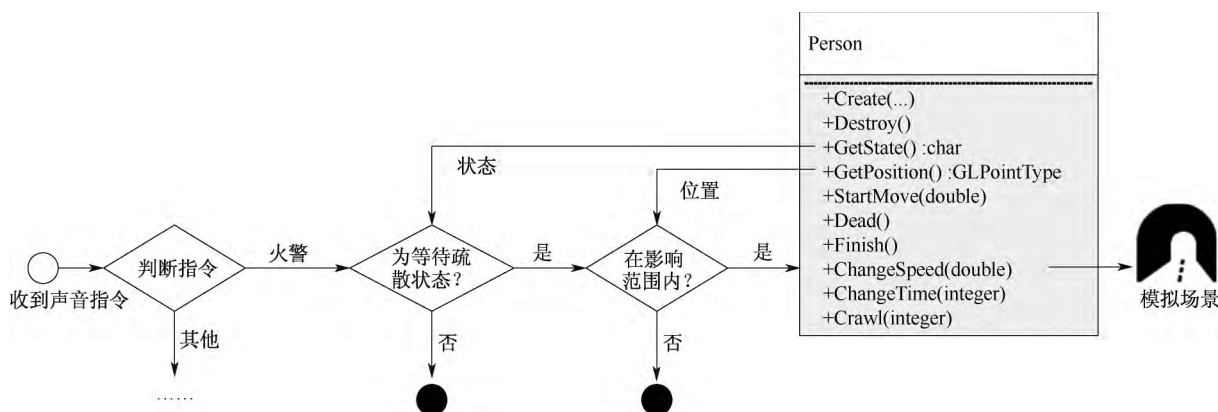


图3 火警指令响应流程

Fig.3 Process of response to "fire" voice command

更新,从而实现场景中所有疏散人员对疏散指令的实时响应。

4 指挥反馈处理模块

指挥反馈处理模块控制系统对用户的所有输出。在模拟过程中,它以可交互的界面为用户呈现指挥视野,并提供辅助决策所需的场景和人员信息;模拟结束后,它负责模拟结果的统计和展示。系统为用户提供第一视角和人群分布双视图,如图4所示。第一视角随着指挥者的位置移动实时呈现指挥者当前位置下的可视范围,用户在该视图下可以观察周边人员的状态以作出相应的指令反应,用户发出的声音和动作指令也同时显示在视图内以确认指令识别的准确性。人群分布视图是隧道整体的俯视图,指挥反馈处理模块实时收集所有疏散人员的地理位置和生存状态,并以红绿点的方式覆盖在隧道俯视图上方,同时更新指挥者当前的指挥范围,帮助用户根据人群分布作出合适的移动决策。



图4 系统指挥界面

Fig.4 User interface of system

当全体疏散人员的状态都为死亡或疏散成功时,则模拟结束,此时系统对用户此次模拟的结果作

出效果评估,评估指标包括疏散用时和死亡人数等2项,最终的评估结果表现为有用户干预和没有用户干预2种情况下的评估指标差值。有用户干预下的疏散用时通过对比模拟开始和结束的时间计算、死亡人数通过检查人员的状态统计,而没有用户干预下的疏散用时和死亡人数计算方法如以下3式:

$$t = \max_{1 \leq n \leq N} [t_w^n + \min(t_s^n, t_e^n)] \quad (5)$$

$$d = \sum_{n=1}^N D_n \quad (6)$$

其中

$$t_e^n = \frac{s_n}{V}, D_n = \begin{cases} 0 & t_e^n \leq t_s^n \\ 1 & t_e^n > t_s^n \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 为总疏散用时; t_w^n 、 t_s^n 、 t_e^n 分别为第 n 个人的反应时间、生存时间和疏散时间; d 为死亡人数; D_n 为第 n 个人的生存状态: 存活取 0, 死亡取 1; s_n 为第 n 个人的疏散路程 m 。

5 模拟试验

系统模拟试验所使用的场景是上海市大连路隧道模型,在模拟试验中,同一用户在相同参数下接受了10次训练,其训练结果见表3。从模拟结果的趋势来看,随着训练次数的增加,死亡人数减少、挽救人数增加,这2项指标的结果都在逐渐改善,但疏散用时呈现无规律变化、节约时间甚至呈现出减少的趋势,证明此次训练对减少火灾伤亡有效,但无法节约疏散时间。这是由于疏散指挥的一些行为会延长人员的生存时间,所以在有人死亡的情况下,有效的指挥反而会由于疏散人员生存时间的增加而导致整体疏散时间的延长。

表3 10次训练结果比较

Tab.3 Results of 10 training tests

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
死亡人数	43	46	43	42	40	34	37	33	36	33
疏散用时/s	572	622	707	711	626	578	721	649	677	663
挽救人数	7	6	9	9	11	12	14	13	15	14
节约时间/s	84	29	72	-37	-23	53	-2	-52	-31	-58

此外,模拟试验中还存在一些异常。整体看来,模拟中死亡人数过高,其原因可能有2个方面:一是由于隧道形状狭长、空气流通困难,有害气体浓度过高导致疏散人员生存时间缩短;二是起火点设置在隧道一端入口,人群的疏散出口只有一个,疏散路径过长延长了疏散时间。在操作方面,此次试验的动作指令基本没有识别失误,但声音指令约有10%的

失误率,其中包含将无关语言识别为指令和指定的声音指令未识别2种情况,这与Kinect本身的声音识别以及开发时设置的置信度有关。

排除以上异常后,针对若干典型情境进行部署,经测试,参训用户在接受训练后,在典型情境下均能安全疏散所有人员,达到了应急预案的要求。总体来说,试验结果验证了系统对于指挥人员的训练能

起到减少火灾伤亡的作用。

6 结 论

1) 研究隧道火灾中疏散指挥的训练方法,开发了基于VR的隧道火灾疏散指挥训练系统,并在大连路隧道模型中进行模拟试验,结果表明:多次训练能使指挥人员采取更有效的决策来延长疏散人员的

生存时间,并减少火灾伤亡。

2) 该系统还有优化的空间,如改进声音指令的识别准确度,并考虑加入通风设备等更多环境影响因素等。此外,目前系统是基于所有疏散者对指令反应一致的假设下模拟的,未来还可以模拟疏散者对指令作出差异化的响应行为。

参 考 文 献

- [1] GUARASCIO M, LOMBARDI M, ROSSI G, et al. Risk analysis and reliability based design in tunnel fire safety [J]. WIT Transactions on the Built Environment, 2009, 108: 575-584.
- [2] 陈明仙, 沈斐敏. 海底隧道火灾救援搜索优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 56-61.
CHEN Mingxian, SHEN Feimin. Research on optimization of fire rescue search in subsea tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(2): 56-61.
- [3] RÜPPEL U, SCHATZ K. Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations [J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(4): 600-611.
- [4] REN Aizhu, CHEN Chi, LUO Yuan. Simulation of emergency evacuation in virtual reality [J]. Tsinghua Science & Technology, 2008, 13(5): 674-680.
- [5] D'ORAZIO M, LONGHI S, OLIVETTI P, et al. Design and experimental evaluation of an interactive system for pre-movement time reduction in case of fire [J]. Automation in Construction, 2015, 52: 16-28.
- [6] 张敬宗. 基于虚拟现实技术的高层建筑火灾应急系统的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(1): 88-90.
ZHANG Jingzong. Research on multi-story building fire emergency system based on virtual reality [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2009, 32(1): 88-90.
- [7] 朱红青, 秦晓峰, 杨成轶, 等. 基于Virtools的矿井火灾救援VR培训系统开发[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 95-98.
ZHU Hongqing, QIN Xiaofeng, YANG Chengyi, et al. Development of mine fire rescue VR training system based on Virtools [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(4): 95-98.
- [8] 吕军, 周丽红, 常心坦. VR技术在煤矿安全中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2003, 23(1): 6-9.
LYU Jun, ZHOU Lihong, CHANG Xintan. Application of virtual reality technologies in coal mine safety engineering [J]. Xi'an University of Science & Technology Journal, 2003, 23(1): 6-9.
- [9] 肖国清, 温丽敏, 陈宝智. 建筑物火灾疏散中人的行为研究的回顾与发展[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(3): 50-54.
XIAO Guoqing, WEN Limin, CHEN Baozhi. Review and perspective in the study of human behavior during evacuation from building fire [J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(3): 50-54.
- [10] LO S M. People in fires—a study of the behavioural reactions of people in a fire incident in Hong Kong [J]. Fire Engineers Journal, 1996, 6(6): 21-25.
- [11] 谢旭阳, 周心权, 谢续程, 等. 高层建筑火灾人员疏散和人员伤亡的模拟[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(3): 15-18.
XIE Xuyang, ZHOU Xinquan, XIE Xucheng, et al. Simulation of personnel evacuation and casualty in high-rise building fire [J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(3): 15-18.



作者简介: 胡珉 (1970—), 女, 浙江上虞人, 博士, 副教授, 主要从事智能信息处理和建筑信息化等方面的研究。E-mail: minahu@163.com。