

文章编号:1000-582X(2011)03-105-05

高架式轻轨车站人员疏散仿真分析

刘方¹, 翁庙成¹, 陈飞¹, 廖曙江²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市公安消防总队, 重庆 401147)

摘要:为研究轻轨车站内人员安全疏散过程, 制定车站人员疏散方案及优化建筑设计, 进一步完善以功能单元为基础的精细网格区域疏散模型与疏散仿真软件。把楼梯视为一个独立的空间单元, 将其划分成精细网格, 进行网格疏散; 加入人员移动余值的概念, 使人员运动的连续性与网格模型的个体化优势结合起来。针对重庆市高架式轻轨车站特点进行实地调研, 通过问卷调查及现场观测得到了轻轨乘客的一般特性参数及对火灾的反应特性, 测试不同类型人员正常行走速度与经验推荐值基本相同。采用改进的区域网格疏散仿真程序对轻轨车站进行了人员疏散仿真研究, 将疏散仿真结果与实地观测结果进行了对比, 仿真计算与实测的疏散时间基本一致, 验证了程序的正确性。

关键词:安全工程; 计算机仿真; 人员疏散; 轻轨车站

中图分类号: X951

文献标志码: A

Analysis of personnel evacuation simulation at an elevated light railway station

LIU Fang¹, WENG Miao-cheng¹, CHEN Fei¹, LIAO Shu-jiang²

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing General Fire Brigade, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: To study the process of personnel evacuation at light railway stations, make the personnel evacuation plan and optimize the architectural design, the simulation model and program of personnel evacuation are improved. The stair is treated as a separate space unit and a residual value is used to gather the advantages of grid model and the continuity of occupant's movement. Through questionnaire surveys and field observations at elevated light railway stations in Chongqing, the passengers' personal parameters and the response characteristics to fire are obtained. The tested movement speed of people agrees to the empirical data. The process of personnel evacuation and the location of each person at any time are demonstrated dynamically by using the computer-programming Zone Grid Evacuation Simulation Software (ZGESS) on the platform of MATLAB. Meanwhile, the total evacuation time is calculated by the program, and it is the same with the data of observation approximately.

Key words: safety engineering; computer simulation; personnel evacuation; light railway station

收稿日期: 2010-10-28

基金项目: 重庆市科委自然科学基金项目(CSTC, 2009BB6193)

作者简介: 刘方(1965-), 女, 重庆大学教授, 博士, 主要从事建筑节能, 建筑防火技术与室内热湿环境研究, (E-mail) drliufang@126.com。

随着社会经济的不断发展,轨道交通方式以其速度快、运量大、污染小、效率高等特点,成为城市交通结构中不可缺少的组成部分。轻轨作为城市轨道交通的一个主要方式,在世界各地得到了广泛的应用。但是,轻轨运营安全也必须引起足够的重视,国内外由于轻轨车站火灾事故造成的群死群伤时有发生^[1]。因此,如何在火灾危险时刻来临之前,将车站内的全部人员有效地疏散至安全区域,成为轻轨事故救援的难点。

对于人员疏散的研究,国内外学者围绕人员安全疏散行为和模型开展了一系列的研究工作^[2]。近十年来,计算机技术的飞速发展极大的推动了国内外学者对于人员紧急疏散的研究,并且取得了许多突破性成果^[3]。目前国内外对于车站人员疏散的研究,主要以计算机仿真为主。国际上开展车站人员疏散仿真研究较早,荷兰 Delft University of Technology 开发的 SimPed 软件,主要针对轨道交通站台上的乘客步行交通流进行仿真,采用微观仿真的方法模拟乘客在站台上的分布以及评价和优化站台的设计^[4]。国内对于车站人员疏散仿真的研究起步较晚,且主要针对地铁车站内的人员疏散研究^[5-6],如西南交通大学采用元胞自动机建模技术,建立了地铁车站疏散的计算机仿真模型,通过对地铁车站人员疏散过程的仿真模拟来评价及优化车站的布局及疏散预案^[7]。

人员疏散仿真模型主要分为两类,即只考虑人的运动的模型和综合考虑人的运动与行为相互关系的模型^[8]。目前已开发的比较成熟的疏散模型有 20 多种,如 EXODUS, SIMULEX, EGRESS, VEGAS, ESM 等^[9-12]。但是由于人员疏散仿真的复杂性,目前还没有足够精确并具有普遍适用性的人员疏散计算模型。

笔者进一步完善以功能单元为基础的精细网格区域疏散模型(简称区域网格疏散模型, Zone Grid Evacuation Model, ZGEM)及其仿真软件^[13]。把楼梯视为一个独立空间单元进行疏散,将其划分成精细网格,进行网格疏散;在人员设置方面,将人员分为中青年男性、中青年女性、老年男性、老年女性 4 种不同类型,并通过其速度的差异进行区分,在移动规则上,每个人的速度大小将随其所在空间一定范围内的人员密度变化而改变,而其方向则由该人员所选择的出口及在其方向上的网格的占用情况决定。通过加入人员移动余值的概念,使人员运动的连续性与网格模型的个体化优势结合起来。模型立足于个体的疏散行为,通过将大量的人员个体放在

虚拟的建筑物空间中,研究他们的总体行为,模拟出真实状况下疏散人员的行为。采用改进的疏散模型对重庆市一高架式轻轨车站进行了人员疏散仿真研究,并通过问卷调查及现场观测验证了该模型的正确性。模拟仿真程序可为轻轨车站人员疏散方案的制定及优化设计提供理论计算工具。

1 轻轨车站实地调研

在人群疏散问题的研究中,基础数据是疏散模型建立的基础和疏散模拟的输入数据,其准确程度将直接影响模拟结果^[14]。但目前,国内的研究工作大多集中在模型开发方面。对于一般人员特性的统计数据非常缺乏,尤其对于轻轨车站中的人员特性参数,到目前为止还是一个空白,这是人员安全疏散研究的瓶颈^[15]。为此,对高架式轻轨车站进行了实地调研,通过问卷调查及现场观测得出了轻轨乘客的一般特性参数和对火灾的行为反应规律。

1.1 高架式轻轨车站概况

该轻轨高架侧式车站位于重庆市某商业繁华地段中心,建筑面积为 2 600 m² 左右,分站台层和站厅层 2 层。其中站台层长 120 m,宽 4 m;站厅层长 40 m,宽 17 m,站厅层至站台层高 8.5 m,构造如图 1 所示。

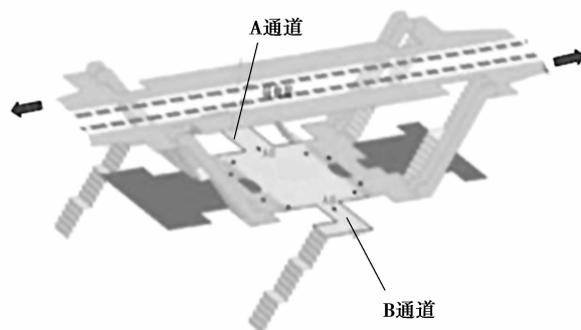


图 1 高架式轻轨车站构造图

1.2 轻轨乘客疏散行为的问卷调查研究

1.2.1 调查问卷的设计

针对不同的人群实行问卷调查是目前最常用、最有效的获得事故中人员心理和行为规律的方法。调查数据的准确性及有效性取决于调查问卷的科学性。为此,笔者在参考大量相关文献的基础上并根据轻轨疏散的特点,科学合理地设计了调查问卷,内容主要包括乘客个人基本信息(主要有性别,年龄,受教育程度等),对轻轨消防系统及相关设备的了解程度以及火灾时的安全疏散行为 3 个方面。

1.2.2 问卷调查结果与分析

在该高架式轻轨车站内以及列车上随机地向乘客发放问卷调查表,共发放300份问卷调查表,其中收回有效问卷286份。调查结果发现在乘客个人基本信息方面,49%为男性,51%为女性,且年龄在17~40岁之间的中青年最多,约占80%。在所调查的人群中,99%的人具有中学以上学历,其中60%具有大专及以上学历,且65%的人曾受过消防知识培训。

对于轻轨列车上的消防设备(如:灭火器,紧急开门装置等),16%的人根本不知道列车上有这些设备,55%的人知道有但不知道具体的位置,20%的人知道设备的具体位置但不会使用,仅有9%的人知道具体位置且能熟练使用。而对于车站内不同地方的安全疏散标识,只有27%的人经常注意到,59%的人只是偶尔注意到,14%的人完全没有注意到。从以上的统计数据可以看出,乘客对于轻轨消防系统及相关设备的了解程度还不够,在火灾发生时大多数人不能及时正确的应对,因此有必要加强轨道交通消防知识的宣传及教育。

在发生火灾时的安全疏散行为方面,34%的人第一反应是迅速撤离现场,29%的人会立即报警并通知他人,25%的人会确认火灾发生的真实性,有10%的人会去协助灭火。而在安全疏散时,51%的人会听从工作人员的指挥,选择自己熟悉的出口及选择视野范围内最近的出口的人各占22%,其余5%则是随着人群一起疏散。在检票口及车站出口等人群比较拥挤的地方,40%的人会一直耐心排队等待疏散,11%的人会选择向前插队,而49%的人会选择其他出口或途径进行疏散。

以上调查数据说明人员疏散受许多因素的影响,人员的个体特性以及在疏散过程中表现出的各种心理特点和行为特征都会影响到最终的疏散时间。了解这些特点对于提高疏散效率具有十分重要的意义。

1.3 轻轨乘客一般特性参数的观测分析

1.3.1 观测内容及方法

为了获取人员疏散基础数据并使仿真初始数据更加真实从而验证仿真模型的精确性,选择了靠近B通道的一侧进行观测。观测内容包括不同类型人员正常行走速度、疏散总人数及人员疏散时间。经观测工作日中上午8:30~9:30,下午6:00~7:00两个时间段为人流高峰期,因此选择工作日上午8:30~9:30作为观测时间段。

通过观测记录不同类型人员经过同样距离所用

的时间,得到该类人员的平均速度,再用其与经验值对比。由于有两个楼梯出口,所以对两个出口同时分别记录,记录每个楼梯的疏散人数,记录的时间共有5个时刻:车门打开时刻、第一个人进入楼梯的时刻、最后一个人进楼梯的时刻、最后一个人出楼梯的时刻及最后一个人出车站大门的时刻。由此可以得出疏散总人数、站台层的疏散时间、楼梯的疏散时间及总的疏散时间。

1.3.2 观测结果

通过统计、整理分析观测数据,得到不同类型人员正常行走速度见表1,疏散总人数及人员疏散时间见表2。表1的各类人员正常行走速度与经验推荐值基本一致。

表1 不同类型人员平均正常行走速度 m/s

人员类型	中青年	中青年	老年	老年
	男性	女性	男性	女性
平均速度	1.28	1.20	0.79	0.77

表2 各个时间的人员疏散状况统计表

北京时间	总人数	2层疏散时间/s	楼梯疏散时间/s	总的疏散时间/s
08:39	104	85.0	107.2	124.9
08:47	110	51.1	86.4	130.2
08:55	102	68.3	94.8	138.4
09:19	101	43.9	79.1	122.9
09:26	80	50.8	83.4	120.2

2 区域网格人员疏散仿真模型与软件改进

区域网格疏散仿真程序(Zone Grid Evacuation Simulation Software, ZGESS)是笔者以MATLAB为工具开发的具有自主知识产权的疏散仿真软件。

在已有模型的基础上进一步完善了楼梯的疏散模型,将每个楼梯视为一个独立空间单元进行精细网格疏散,使其可以模拟高层建筑的人员疏散;并将人员分为4种不同类型,用移动速度的差异加于区别;在人员的疏散规则上,加入了人员移动余值的概念。

人员移动余值是指在一个时间步长内人员实际移动距离与在网格中移动距离的差值。设一个时间步长为 Δt ,一个网格边长大小为 Δl 。在初始时刻 t_0

时,人员移动速度为 u_0 ,余值 $r_0=0$ 。在 $t_1=t_0+\Delta t$ 时刻时,人员累计移动距离 $s=u_0\Delta t+r_0$ 。若 $s\geq\Delta l$,则满足移动条件,人员可以进入周围空闲的网格;若 $s<\Delta l$,则选择等待。由于一个时间步长内人员在网格中移动的距离只有 Δl 、 $\sqrt{2}\Delta l$ 和 0 三种情况,因此余值 r_1 存在 3 种可能值。如图 2 所示,若人员进入网格 1、3、5、7 中时,余值 $r_1=u_0\Delta t+r_0-\Delta l$;若人员进入网格 2、4、6、8 中时,余值 $r_1=u_0\Delta t+r_0-\sqrt{2}\Delta l$;若周围没有空网格可以进入,则余值 $r_1=r_0$ 。

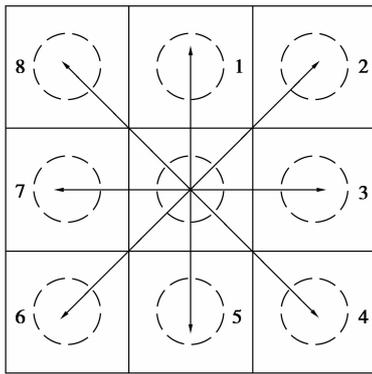


图 2 人员可能的移动方向

通过加入人员移动余值的概念,可以使人员运动的连续性与网格模型的个体化优势结合起来。改进后的软件可以同时动态显示两个楼层和分别显示各单元的人员疏散过程及人员变化曲线图、也可以显示整个建筑人员随疏散时间变化的曲线图。并可查询任意楼层任意时刻的人员疏散状态。此外,还可以查询各层功能单元人数随时间变化的曲线及建筑总人数随时间变化的曲线。

3 轻轨车站人员疏散仿真实例

由于该轻轨车站为双向通车,两边人流状况基本相似,且两列轻轨列车不会同一时刻到达车站,一次的人员疏散总数为一趟列车所下的乘客人数。因此,模拟选取靠近 B 通道的一侧站台层及站厅层作为整个模拟的建筑模型。

3.1 初始条件设置

进行人员疏散仿真,首先需要考虑模型的初始条件设置,包括站台层设置、站厅层设置、楼梯设置及人员设置等。

站台层是一个以车站中轴线为中心,两侧相互对称的区域,主要包括过道、楼梯前室及列车车厢 3 个区域,其中列车车厢共有 8 个出口,过道两侧共有 2 个出口。站台层至站厅层之间共有 2 个楼梯,

层高为 8.5 m,楼梯角度为 30° 。休息平台长度为 1.5 m,楼梯宽度为 2.5 m,楼梯出入口各为一个。站厅层共包括 3 个区域,其中两侧区域共有 2 个出口,中间区域有 2 个出口和 2 个入口。站台层及站厅层设置见图 3。

人数根据实际观测结果设置(以 110 人为例),初始位置在列车车厢内随机分布,人员类型也是随机设置,不同类型人员的初始速度采用表 1 的实际测试数据。

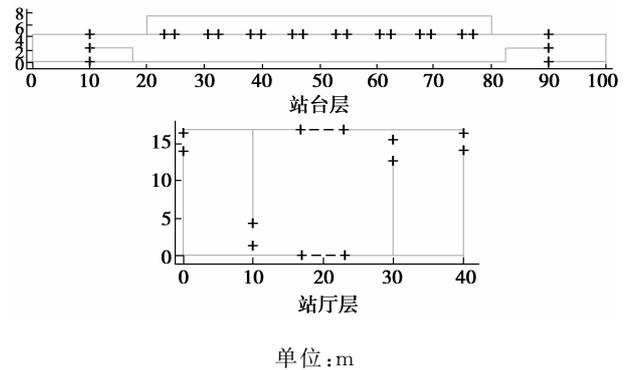


图 3 站台层及站厅层区域设置

3.2 疏散模拟结果

将程序运算的时间步长取为 0.25 s,初始时刻时,人员随机地分布在列车各节车厢内。从第一个时间步长起,人群开始疏散,在第 50 个时间步长即 12.5 s 时,站台层的人员开始进入楼梯;在第 160 个时间步长即 40 s 时,首位人员通过右边 2 号楼梯进入到站厅层;在第 315 个时间步长即 78.75 s 时,站台层人员已经全部进入站厅层,且部分人员已经从车站疏散至安全区域。由于车站分为站台层和站厅层两层,因此疏散开始相当长一段时间内,车站内总人数没有变化,但是人员陆续从站台层疏散至站厅层。随着时间的推移,站厅层的人员不断疏散至安全区域,车站内总人数逐渐减少,当最后一位人员到达安全区域时,整个疏散过程结束。图 4 显示了第 225 个时间步长时车站内的人员疏散情况,图 5 显示了车站内总人数随时间变化的曲线。

模拟过程中发现,在站台层坐标轴为 10~20 m 之间的区域,人群疏散比较缓慢,疏散等待时间较长,这主要是由于该处通道比较狭窄的缘故。因此,可适当增加该处通道的宽度,以减少疏散所用时间。从模拟仿真结果可以看出,完成整个车站人员疏散所需要的时间为 136.25 s,比实测疏散时间 130.2 s 略大。这主要是由于在模拟仿真中,人员属性的设置是随机设置,仿真时老年人所占比例可能会比实

际观测的大,由于老年人的正常步行速度较小,因此会使总的疏散时间增加,这也是模拟时间超过实测的主要因素。另外,由于仿真软件采用的是离散化网格模型,而实际上人员是连续移动的,网格划分的精细度也会影响到最终的模拟结果。

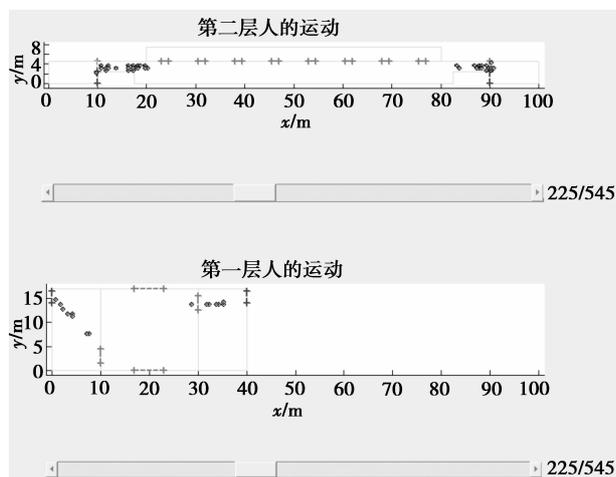


图4 第225个时间步长人员分布(56.25 s)

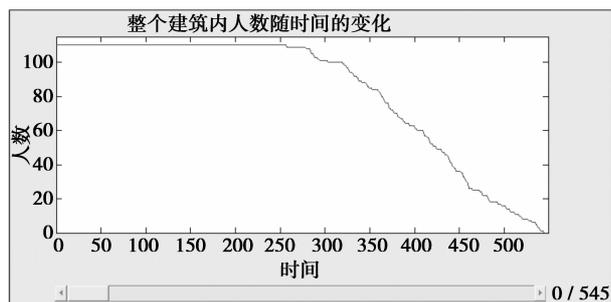


图5 车站总人数随时间变化曲线

从整体上看,仿真模拟中人员疏散动态演示过程及各区域的人员变化曲线所反映出来的疏散状况与真实状况相近,仿真结果所得人员疏散时间与实测结果也非常接近。可见,该仿真软件具有一定的可信性。

4 结 语

完善了以功能单元为基础的精细网格区域疏散模型。把楼梯视为一个独立空间单元,将其划分成精细网格,并进行精细网格模拟。在模型中加入了人员移动余值的概念。通过对重庆市高架轻轨车站的实地调研,获得了轻轨乘客的一般特性参数和对火灾的行为反应规律,测试了高峰期不同类型人员的行走速度,同时记录了高峰期的人流量及完成一次疏散所需要的时间。

采用改进的区域网格疏散仿真程序对该车站进行了人员疏散仿真研究,动态演示了各个楼层和每个功能单元人员的疏散过程。仿真模拟中,同时考虑了疏散通道宽度、车站的内部布局、人员的类型等诸多因素对疏散时间的影响,模拟所得疏散时间与实际观测结果基本一致,证明了该仿真软件具有一定的可信性。当然,模型还有待在多种场所进一步验证,以适应各种人员及环境条件,使其更真实地反映人员的疏散状况。

参考文献:

- [1] ZHONG M, SHI C, TU X, et al. Study of the human evacuation simulation of metro fire safety analysis in China[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(3):287-298.
- [2] 孟俊仙,周淑秋,饶敏. 大型建筑内人员疏散计算机仿真研究评述[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(3): 159-161.
MENG JUN-XIAN, ZHOU SHU-QIU, RAO MIN. Simulation of crowd evacuation from large public facilities[J]. Computer Applications and Software, 2008, 25(3): 159-161.
- [3] CHEN Y, XIAO D. Emergency evacuation model and algorithms[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(6): 96-100.
- [4] 刘文婷. 城市轨道交通车站乘客紧急疏散能力研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [5] 谢灼利,张建文,魏利军,等. 地铁车站站台火灾中人员的安全疏散[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 21-25.
XIE ZHUO-LI, ZHANG JIAN-WEN, WEI LI-JUN, et al. Safe evacuation from subway platform under fire[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 21-25.
- [6] 王驰. 某地铁站火灾情况下人员安全疏散研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007.
- [7] 徐高. 地铁站人员疏散的计算机仿真研究[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(2): 32-45.
XU GAO. Computer simulation study on personnel evacuating in metro station[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(2): 32-45.
- [8] GWYNNE S, GALEA E R, LAWRENCE J. The introduction of social adaptation within evacuation modelling[J]. Fire and Materials, 2006, 30(4): 285-309.

(下转第115页)

- [4] PEER T, JOYCE W S. Lake-source cooling [J]. ASHRAE Journal, 2002, 44(4): 37-39.
- [5] DENBRAVEN K R. Regulation for open-loop ground-source heat pumps in the United States[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1): 962-967.
- [6] 张银安, 李斌. 开式地表水地源热泵系统的应用分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(9): 99-103.
ZHANG YIN-AN, LI BIN. Application analysis on open-loop surface water-source heat pump systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007, 37(9): 99-103.
- [7] 张文字, 龙惟定. 地表水源热泵以黄浦江水作为冷热源的可行性分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(3): 15-20.
ZHANG WEN-YU, LONG WEI-DING. Feasibility analysis of surface-water heat pumps with Huangpu River water as cold and heat sources [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(3): 15-20.
- [8] 陈晓, 张国强, 刘婷婷, 等. 开式地表水源热泵在湖南某人工湖的应用研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(3): 10-13.
CHEN XIAO, ZHANG GUO-QIANG. Utilization of artificial lake as heat source-sink for open-loop surface water heat pump system in Hunan [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 10-13.
- [9] 王勇, 顾铭, 肖益民, 等. 长江水源热泵开式与闭式实验对比分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 126-130.
WANG YONG, GU MING, XIAO YI-MIN, et al. Comparative analysis on experiment about open-loop system and close-loop system of WSHP at Yangtze River [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 126-130.
- [10] 王子云. 长江水源热泵换热器研究[D]. 重庆大学, 2008.
- [11] BÜYÜKALACA O, EKINCI F, YILMAZ T. Experimental investigation of Seyhan River and dam lake as heat source-sink for a heat pump [J]. Energy, 2003, 28(2): 26-28.
- [12] TIM P, JOYCE W S. Lake-source cooling [J]. ASHRAE Journal, 2002, 44(4): 37-38.
- [13] ASHRAE. Systems and equipment handbook [M]. Atlanta: Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1992.
- [14] 龚明启. 中央空调系统动态运行节能优化策略研究[D]. 广州: 广州大学, 2006.
- [15] 李文. 长江流域湖水水源热泵系统能效分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [16] 陈晓. 地表水源热泵系统的运行特性与运行优化研究[D]. 湖南大学, 2006.

(编辑 郑 洁)

~~~~~

(上接第 109 页)

- [9] LO S M, FANG Z, LIN P, et al. An evacuation model: the SGEM package [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(3): 169-190.
- [10] SHEN T S. ESM: a building evacuation simulation model [J]. Building and Environment, 2005, 40(5): 671-680.
- [11] PURSALS S C, GARZON F G. Optimal building evacuation time considering evacuation routes [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(2): 692-699.
- [12] KAI KANG. Application of code approach for emergency evacuation in a rail station [J]. Fire Technology, 2007, 43(4): 331-346.
- [13] 刘方, 陈飞, 朱伟. 基于区域网格人员疏散模型的计算机仿真[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(3): 170-172.  
LIU FANG, CHEN FEI, ZHU WEI. A simulation software based on the zone grid evacuation model [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(3): 170-172.
- [14] SHI L, XIE Q, CHEN X, et al. Developing a database for emergency evacuation model [J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1724-1729.
- [15] 田娟荣, 周孝清, 郑志敏. 地铁人员疏散特征的调查分析[J]. 都市轨道交通, 2009, 22(1): 20-23.  
TIAN JUAN-RONG, ZHOU XIAO-QING, ZHENG ZHI-MIN. Surveys on personnel evacuation in subways [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2009, 22(1): 20-23.

(编辑 郑 洁)