

某大型商贸中心的人员疏散性能化分析

宋卫国, 于彦飞, 张和平

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 新型建筑不断涌现使得火灾安全性能化设计被广泛应用, 人员疏散是其中的关键环节。结合某大型商贸中心的火灾安全性能化设计方案, 利用 CAFE 模型分析了人员疏散性能。结果表明, 由于该模型量化了人员疏散过程中人与人、人与环境之间的作用力, 因此计算得到的人员疏散时间比同类软件更加保守, 分析结果具有更高的可靠性。

[关键词] 人员疏散; 性能化设计; 元胞自动机模型

[中图分类号] TU976 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)10-0078-06

1 引言

随着我国经济建设和城市化的快速发展, 大型复杂的现代建筑物越来越多地涌现出来。由于这些建筑与传统建筑在使用功能、建筑材料、结构形式、空间大小、配套设施等方面有很大的不同, 给防火安全带来很多新的问题, 现有的处方式建筑防火规范规定不一定能全部满足要求。国际上以火灾安全工程学为理论依据, 建立了性能化防火设计, 即以火灾性能为基础的防火设计(performance-based fire protection design)方法, 并逐步制定了相应的性能化防火规范^[1]。

人员疏散分析是性能化防火设计的一个关键技术环节。人员疏散模型是性能化防火设计中最常用的技术手段, 也是人员疏散研究的主要组成部分。目前国际上常见的人员疏散模型(行人流模型)可以分为连续型模型和离散型模型2种。前者如社会力模型^[2-5]等, 后者如格子气模型^[6-15]、元胞自动机模型^[16-18]等。

社会力模型属于多粒子自驱动模型, 是一种多主体模型。在该模型中, 引入“社会力”的概念表

示人与人、人与环境的社会心理和物理作用。由于该模型的连续性特征, 使得它可以精确描述各种层次的作用力, 因此模拟结果可靠, 比较接近真实情况。它的缺点是计算复杂度高、耗费计算资源多、计算时间长。

格子气、元胞自动机等离散型模型则具有计算简单、资源耗费小、耗时少等优点, 因此在大型工程的性能化设计中被广泛采用。在人员疏散过程中, 人与人之间、人与环境(如建筑物)之间的相互作用力包括吸引力、排斥力和摩擦力对人员疏散的行为、速度和效率起着关键作用。在以往的离散型模型中, 吸引力可以得到较好地描述, 但是对排斥力和摩擦力的定量描述还不够完善, 运算结果误差较大。

针对这种情况, 作者等人在经典元胞自动机模型的基础上, 量化确定了摩擦力和排斥力的运算规则, 提出了一种新的元胞自动机模型(CAFE, cell automata with forces essentials)。该模型在人员行为、疏散速度以及“快即是慢”效应等方面都可以得到与社会力模型相同的结果, 而运算速度则大为提高, 与普通的元胞自动机及格子气模型相当。

[收稿日期] 2004-09-13

[基金项目] 国家自然科学基金重点资助项目(50323005); 重大国际合作资助项目(50320120156)

[作者简介] 宋卫国(1973-), 男, 山东高唐县人, 中国科学技术大学副教授

2 人员疏散模型 CAFE

在经典的人员疏散元胞自动机 (CA) 模型中, 将建筑物或者其它场所划分为网格, 格点是网格的基本单位, 每个格点可以容纳一个行人或者空闲。每个行人可以以一定的概率向他的 4 个相邻格点行走, 或者静止不动, 如图 1 所示 (向下为前进方向)。当向 4 个方向行走的概率不相等时, 称为有偏行走, 其中的行人称为“有偏行走者”。格子气模型与元胞自动机模型在基本规则方面非常相似。

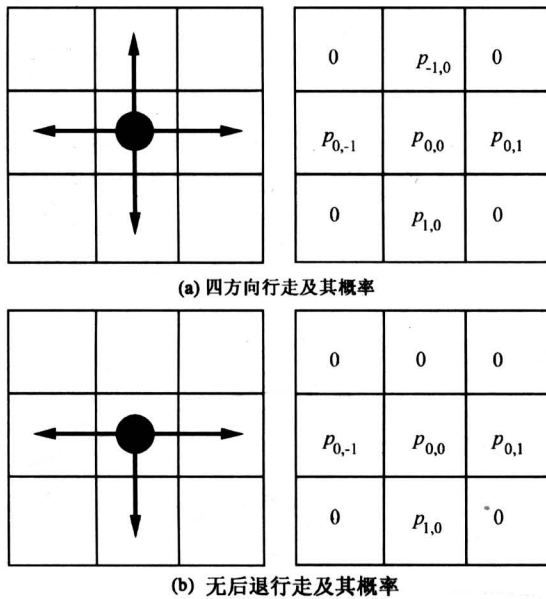


图 1 元胞自动机模型中行人的移动方式

Fig.1 Movement rules of pedestrian in CA model

CAFE 模型细致考虑了实际人员疏散过程中人与人、人与环境之间的相互作用, 将排斥力和摩擦力引入基本的 CA 模型, 进行参数量化, 从而能够反映人与人、人与环境的碰撞闪避、接触程度等情况。

当人与人或者人与墙有互相碰撞或者达到危险距离的趋向时, 出现排斥力。排斥力表现为人与人之间、人与墙之间躲闪、避让的行为。假设出现竞争行为的所有行人均选择静止不动的概率为 r 的话, 则每个行人选择运动的概率为

$$p = (1 - r) / m \quad (1)$$

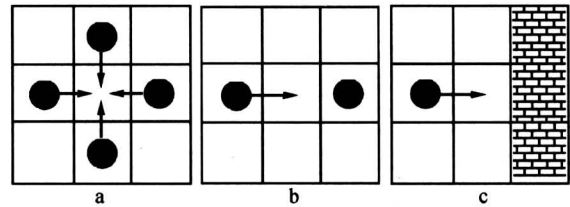
其中 m 为参与竞争行为的行人人数。而排斥概率 r 在不同的竞争情况下的取值不同, 见图 2。

在人员密集的情况下, 摩擦力往往对人员疏散起着比排斥力更大的作用。摩擦力表现为人与人、

人与墙接触时的减速行为。为了量化摩擦力的作用, 引入摩擦概率 f 来表示出现摩擦行为的行人均选择静止不动的概率, 那么当前考虑的行人选择运动的概率则为

$$p = (1 - f) / m \quad (2)$$

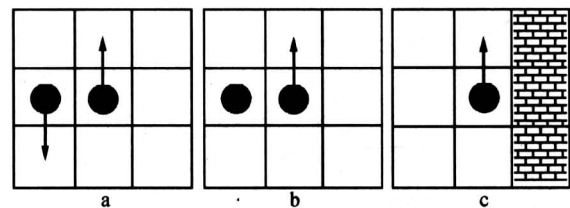
其中 m 为产生相互摩擦的行人人数, 摩擦概率 f 的取值在不同的摩擦情况下不同, 见图 3。



a. 2 到 4 个人同时运动; b. 一动一静; c. 行人与墙作用

图 2 两类排斥力的出现情况

Fig.2 Two different occurrences of repulsion force



a. 相向运动; b. 一动一静; c. 行人与墙作用

图 3 三种摩擦力的出现情况

Fig.3 Three different occurrences of friction force

根据排斥力和摩擦力的物理含义, 得到各自的取值形式, 也就确定了排斥概率和摩擦概率的值。

3 某商贸中心的概况

某商贸中心工程地上 5 层、地下 4 层, 建筑高度 31.3 m, 总建筑面积 $17 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。地下 1 层为商业; 地下 2 至 4 层为停车库和设备用房; 地上 1 至 5 层使用功能为商业、餐饮、娱乐; 地上 5 层设有电影院。

商贸中心从地面到楼顶的高度超过 24 m, 属高层建筑。依据《高层民用建筑设计防火规范》、《商店建筑设计规范》等国家规范规定, 商贸中心存在下面几个问题:

1) 中庭部分为从地下 1 层到地上 5 层的连通区域, 在各层楼板处有不对称的不规则开口, 形成上下连通的独特建筑设计, 这导致中庭面积远远超过规范中最大 4 000 m^2 的防火分区的规定要求。

2) 按照国内相关法规中的计算方法计算出的疏散通道的宽度过于保守, 使商业零售区域面积大幅度减少, 设计方采用国外相关规范进行疏散宽度的设计, 但国外规范在中国的适用性没有进行定量分析。

3) 商贸中心在商场的 5 层和 6 层设计了电影院, 超过了国内规范的规定。电影院的消防安全需要进行性能化的分析来确定是否能够满足人员安全疏散的要求。

4 性能化解决方法

为解决中庭面积超过规范规定的问题, 项目设计中提出了“中庭的烟气不侵”的独特设计概念(图 4, 中部的深色区域为中厅), 将商场的各零售单元划分为各自独立的防火单元, 其内部火灾产生的烟气将通过机械排烟系统及水喷淋自动灭火系统控制在本单元内, 不会溢出到中庭的公共区域。

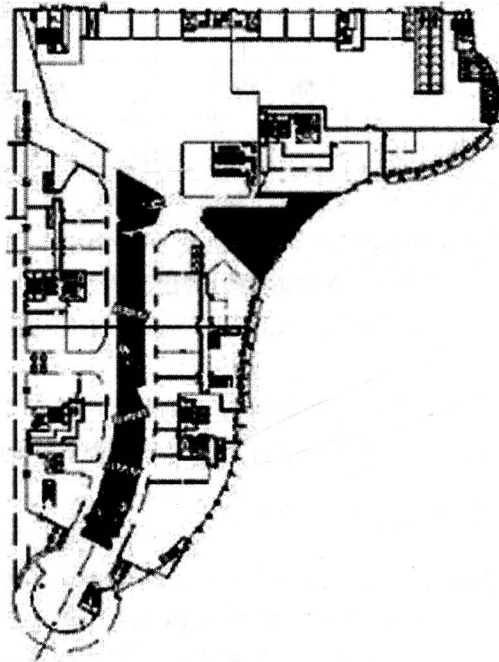


图 4 “中厅烟气不侵”设计方案示意图
Fig.4 Smoke-proof atrium

另一方面, 中庭内公共区域主要作为人员走道, 没有商业活动, 无火灾荷载, 中庭内本身火灾发生的概率极低, 并且在中庭回廊内设置了水喷淋自动灭火系统, 以及在顶部设置自然排烟窗。

通过以上这些措施, 使得中庭区域本身无火灾危险也不会受到其他区域火灾蔓延的影响, 成为一个相对安全的区域。

在此基础上, 将烟气运动及人员安全疏散的计算结果进行对比, 验证发生火灾时各防火单元内的烟气是否对中庭内的疏散人员构成威胁。如果能够保证人员安全, 则可以适当减小疏散楼梯的宽度。同样, 电影院部分也要比较烟气运动和人员疏散的结果, 验证人员疏散安全性, 对现有疏散设计进行评价。可见, 商贸中心存在的上述 3 个问题均与人员疏散密切相关, 问题的关键在于人员疏散时间的定量计算。

5 人员疏散计算与分析

火灾安全设计和评估中, 通常比较可用的安全疏散时间 (ASET) 和必需的安全疏散时间 (RSET), 以此来评价建筑物的安全性能 (图 5)。ASET 与建筑物的防火性能、火灾发展速度等因素有关; RSET 与人员心理、人员行为、人员密度等因素有关。当 ASET 大于 RSET 时, 则认为该建筑中的疏散是安全的。

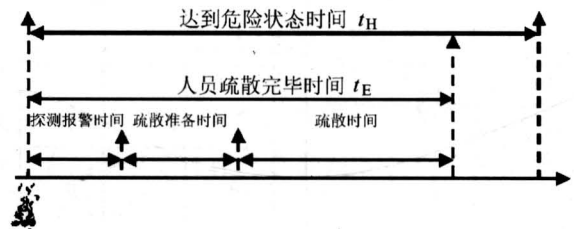


图 5 人员疏散时间线

Fig.5 Time sketch of pedestrian evacuation

紧急情况下的人员全部疏散完毕时间 (RSET) 包括火灾探测时间 (t_{alarm})、人员反应时间 (t_{resp}) 和人员疏散运动时间 (t_{move}):

$$t_E = t_{alarm} + t_{resp} + t_{move} \quad (3)$$

t_{move} 由基于 CAFE 模型的 SafeGo 软件计算得到。疏散出口的宽度按照 Pauls^[19] (1982) 提出的有效宽度模型计算, 即出口和楼梯的宽度在计算中需要扣除边界效应。当楼梯或出口的边界为墙体时, 边界效应宽度为 150 mm, 而当边界为扶手时, 边界效应宽度则为 90 mm。

t_{resp} 的计算参照国内外的统计数据^[20]: 当采用消防广播作为语音现场指挥时, t_{resp} 小于 1 min, 当采用非指示性 (录音) 作为疏散警告时, t_{resp} 应为 3 min, 而当采用一般的警铃等作为疏散警告时, t_{resp} 将大于 4 min。由于该商贸中心采用了现场语音报警, 因此分析中将 t_{resp} 设为 60 s。参照火

灾烟气计算的结果， t_{alarm} 取为 60 s。

关于建筑人员荷载的选取，由于我国针对该商贸中心这种类型建筑的特殊建筑形式和经营方式，缺少相关的统计数据。因此参照了日本规范《日本避难安全检证法（2001 年版）》选取人员荷载，结果如下：单个商业单元（商店及大型商场），按 0.5 人/m² 考虑；单个商业单元（食品和饮料），按 0.7 人/m² 考虑；电影院按座位数加工作人员；中庭空间区域，按商店辅助通道考虑，取 0.25 人/m²。

根据上述条件，我们用 CAFE 模型计算了人员疏散运动时间 t_{move} ，进而求得了总的疏散时间（RSET）。计算中人员的运动速度取为 1 m/s。

计算过程见图 6 至图 13，展示了地上 1 层和 5 层电影院在不同的疏散阶段的疏散情况，其他楼层的情况类似。图中灰色区域代表待分析区域，是人员疏散的主要场地，其中的黑点代表待疏散的行人。在图中可以观察到出口附近的人流拥挤现象以及由此产生的人群拱形分布。



图 6 1 层 0 s

Fig.6 1st floor 0 s

计算结果如表 1 所示。

不难看出，CAFE 模型的计算结果和 Simulex 基本相符，其疏散时间略大的原因是 CAFE 模型考虑了更细致的受力情况，人员疏散过程中的排斥力与摩擦力降低了疏散效率。

表 1 整层疏散时间

Table 1 Whole floor evacuation times

楼层	Simulex 软件计算的 疏散时间 [#] /min	CAFE 模型计算的 疏散时间/min
5 层电影院	13.01	13.49
4 层	20.44	23.56
3 层	22.24	23.62
2 层	21.15	22.62
1 层	/	8.52
地下 1 层	30.53	32.18

[#]由合作方中国建筑科学研究院计算得到

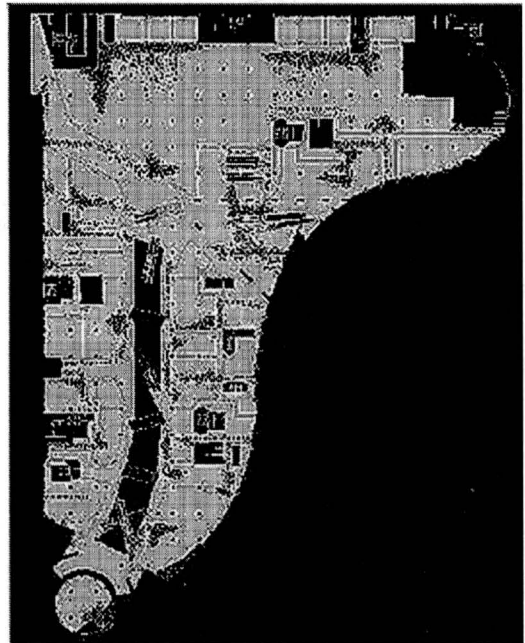


图 7 1 层 150 s

Fig.7 1st floor 150 s

6 结论和建议

人员疏散过程中人与人、人与建筑之间的相互作用非常复杂，涉及到人的心理和行为特征、选择和决策倾向、人群特征和环境特征等多种因素，很难详细地对其进行量化和描述。但是，这些作用力总是可以分为 3 类：摩擦力、排斥力和吸引力。CAFE 模型通过对 3 类基本力的性质的描述，量化人与人、人与建筑之间的摩擦力与排斥力，进而研究人员疏散的基本性质。通过计算表明，CAFE 模型不仅可以较好地描述人员疏散中的典型现象，如拥挤、堵塞、人群的拱形结构特征等，而且具有较高的运算效率，适合进行大型人员疏散计算。而在某大型商贸中心的人员疏散性能化分析中，CAFE

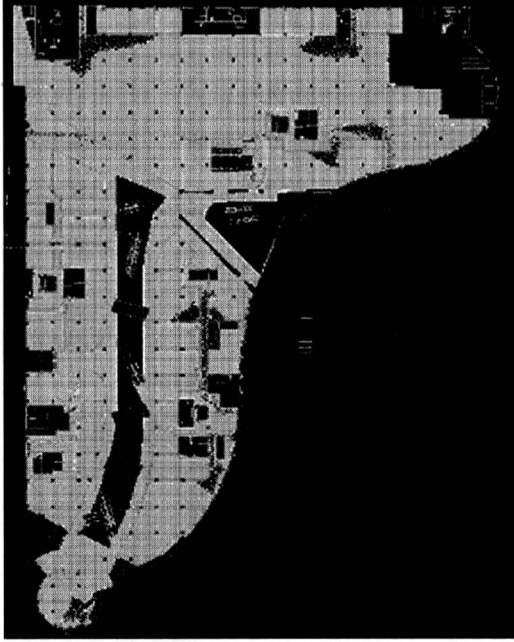


图 8 1层 300 s
Fig.8 1st floor 300 s

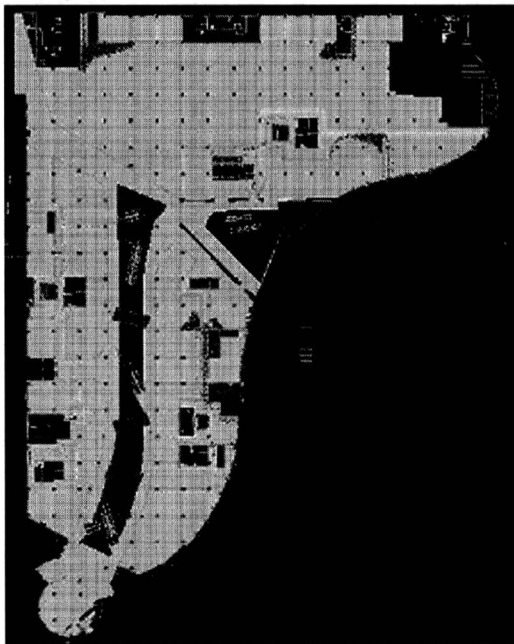


图 9 1层 420 s
Fig.9 1st floor 420 s

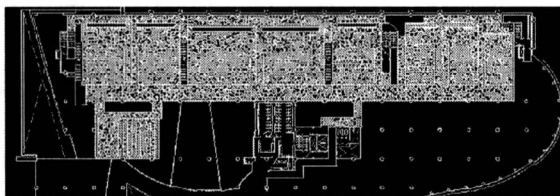


图 10 5层电影院 0 s
Fig.10 5th floor cinema section 0 s

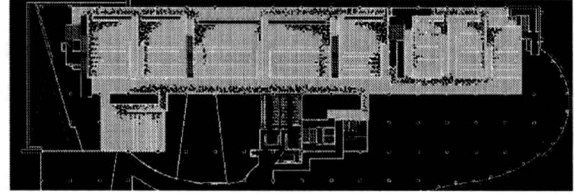


图 11 5层电影院 150 s
Fig.11 5th floor cinema section 150 s

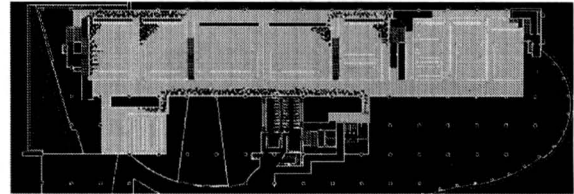


图 12 5层电影院 300 s
Fig.12 5th floor cinema section 300 s

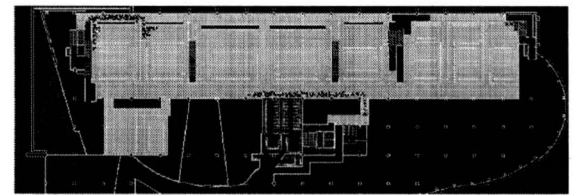


图 13 5层电影院 480 s
Fig.13 5th floor cinema section 480 s

模型得到了与著名商用软件 Simulex 相近的计算结果，表明 CAFE 的结果是合理的。同时，CAFE 模型计算的人员疏散时间比 Simulex 软件略大表明，它的结果更加保守和安全。CAFE 模型作为一个框架模型，通过对摩擦力、排斥力和吸引力规则的扩充和改进，可望进一步量化人与人、人与环境之间的相互作用，揭示人员疏散的基本行为和规律，适用于各种不同场景中人员疏散的性能化分析和模拟。

参考文献

[1] 范维澄, 孙金华, 陆守香. 火灾风险评估方法学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004

[2] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407: 487~490

[3] Helbing D, Keltsch J, Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems[J]. Nature, 1997, 388: 47~50

- [4] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. *Phys Rev E*, 1995, 51: 4282~4286
- [5] Helbing D, Schweitzer F, Keltsch J, Molnar P. Active walker model for the formation of human and animal trail systems[J]. *Phys Rev E*, 1997, 56: 2527~2539
- [6] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic [J]. *Physica A*, 2000, 275: 281~291
- [7] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition of pedestrian traffic at a crossing with open boundaries [J]. *Physica A*, 2000, 286: 377~390
- [8] Tajima Y, Nagatani T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall[J]. *Physica A*, 2001, 292: 545~554
- [9] Tajima Y, Takimoto K, Nagatani T. Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck[J]. *Physica A*, 2001, 294: 257~268
- [10] Tajima Y, Nagatani T. Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel[J]. *Physica A*, 2002, 303: 239~250
- [11] Nagatani T. Jamming transition in the traffic-flow model with 2-level crossings[J]. *Phys Rev E*, 1993, 48: 3290~3294
- [12] Nagatani T. Jamming transition in a two-dimensional traffic flow model[J]. *Phys Rev E*, 1999, 59: 4857~4864
- [13] Nagatani T. Dynamical transition and scaling in a mean-field model of pedestrian flow at a bottleneck[J]. *Physica A*, 2001, 300: 558~566
- [14] Chen Tao, Song Weiguo, Fan Weicheng, et al. Jamming transition of pedestrian evacuating flow in crossing exit[A]. In Huang P, Wang Y, Li S, Qian X, eds. *Progress in Safety Science and Technology [C]*. Beijing : Science Press, 2002, III:507~512
- [15] Helbing D, Isobe M, et al. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics [J]. *Physical Review E*, 2003, 67: 067101
- [16] Burstedde C, Klauck K, et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton[J]. *Physica A*, 2001, 295: 507~525
- [17] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of evacuation process using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics[J]. *Physica A*, 2002, 312: 260~276
- [18] Kirchner A, Nishinari K and Schadschneider A. Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics[J]. *Physical Review E*, 2003, 67: 056112
- [19] Pauls, J. Effective width model for crowd evacuation [A]. In: Templer, J, Ed. *The Staircase*, Massachusetts Institute of Technology [C]. Cambridge, MA, 1992
- [20] Proulx G. Evacuation time and movement in apartment building [J]. *Fire Safety Journal*, 1995, 24: 229~246

Evacuation Analysis of a Large Shopping Mall

Song Weiguo, Yu Yanfei, Zhang Heping

(*State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] Along with the development of the society, it flows out more and more high-rise, underground and large-space buildings, of which the fire protection designs are sometimes beyond the requirements of existing national fire protection codes of China. Therefore, the performance-based fire protection design of buildings has been getting more and more chances of application. Evacuation analysis is one of the key problems in the performance-based design. In this paper, the performance-based design of a large shopping mall is introduced, and a cellular automata (CA) based evacuation model, i. e. the CAFE model is used to analyze the efficiency of evacuation. Because the interactions among pedestrians and those between pedestrians and environment are quantified in CAFE model, the values of evacuation time obtained through the model are slightly larger than those of an evacuation software, Simulex, indicating that the CAFE model is to some extent more conservative and the analysis results are with higher reliability.

[**Key words**] evacuation; performance-based design; cellular automata