

十字出口宽度与人员阻塞的依赖关系及其模拟和分析*

陈 涛 宋卫国 范维澄 陆守香

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

摘要 在开放边界条件下, 采用无后退有偏随机走动者格子气模型对十字路口的人员疏散动力学进行了计算和模拟, 结果表明, 当经向和纬向边界人员密度同步增大时, 纬向和经向通道上的人员疏散流将有阻塞相变产生. 对不同的经向和纬向通道宽度进行人员疏散模拟, 可得到一系列反映阻塞相变的纬向和经向临界阻塞密度值. 尽管体现经向和纬向临界阻塞相变的曲线具有相近的特性, 但通道宽度对两个方向堵塞相变的影响程度并不相同. 通过相应的变量代换, 可以得到不同通道宽度情况下临界边界密度与比通道宽度之间的归一特性. 模拟结果对于疏散通道的设计具有指导意义.

关键词 人员疏散 格子气模型 阻塞 相变 火灾

近年来, 行人流动力学问题同时引起了安全领域和交通流领域研究人员的密切关注, 这是由于行人流问题与交通流问题是相互影响, 紧密相关的.

交通流是由于车辆之间相互影响和作用而形成的一种多主体系统, 交通堵塞是交通流复杂行为的一个典型特征^[1-4]. 虽然传统的交通流研究主要集中在较简单的一维问题, 但仍有部分学者对更为复杂的二维问题进行了探索. 二维交通流问题的研究主要通过格子气模型或元胞自动机模型^[1,4-8]来实现, 其中最为著名的是广泛应用于二维城市交通流问题的 BML (Biham-Middleton-Levine) 模型^[1].

行人流是相互影响和作用的人员形成的多主体系统, 其动力学特性与交通流密切相关. 近来, 行人流研究引起了越来越广泛的关注. 越来越多的研究者认为, 理解和掌握行人流所遵循的基本规则对于探索其所呈现出的复杂现象(如堵塞)至关重要. 在火灾等紧急情况下, 由于疏散人员的盲目性和急

切性而导致的人员堵塞及人员伤亡时有发生. 国际上性能化设计的推广也使防火安全设计中开展火灾场景下人员行为的分析和研究成为必然. 因此, 行人流基本规则的研究具有重要的实际意义.

交通流模型和模拟分析方法是行人流研究的支撑和基础, 但是行人疏散流具有诸如人员行为、心理等交通流问题无法描述的特征. 因此, 行人流模型要在交通流模型的基础上作进一步的改善和发展才能满足行人流的特征. Helbing 用主动行人模型^[9,10]描述了行人的追随现象, 用社会力模型^[11,12]展现了疏散过程中的人员堵塞现象, 他指出行人流动力学所表现出来的各种集群效应和自组织临界性是由于行人个体之间的非线性作用而引起的. Muramatsu 等提出一种离散化的有偏随机走动者格子气模型来模拟二维问题中的行人流^[13-15], Tajima^[16-18]和 Nagatani^[19]则把这种格子气模型应用到特定的建筑结构中, 研究建筑结构对人员疏散的影

2003-09-22 收稿, 2003-11-24 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409600)、国家自然科学基金重大项目(批准号: 50320120156)和科技奥运项目(2001BA904B10)
E-mail: surgech@mail.ustc.edu.cn

响, 如大厅, 瓶颈通道和 T 型通道等。

正如 Livesey 等分析的那样, 成功的安全疏散取决于许多因素^[20], 这些因素可归结为建筑结构和人员特征两种类型, 其中建筑结构也可称为建筑的几何复杂度, 包含诸如疏散标志、疏散通道宽度、楼梯间设计、楼地面装修和自动报警系统等方面, 而人员特征则主要包括人员年龄、运动灵活性、恐慌程度和人员密度等决定人员行为的基本属性。

在研究建筑结构对疏散动力学的影响时, 楼梯和疏散出口的特性尤其独特和重要, 因为人员疏散时的堵塞现象通常发生在这些地方。人员密集的公共场所, 如体育场、体育馆、影剧院、办公楼等, 广泛采用十字型出口通道, 针对该建筑特征的人员疏散问题在文献中鲜有相关的研究和分析。因此, 本文采用无后退有偏随机走动者格子气模型对十字路口的人员疏散动力学进行了开放边界条件下的计算和模拟。研究的重点是人员疏散过程中出现的堵塞相变, 通过对堵塞相变的分析, 期望得到特定通道宽度所能承载的最大人员密度。

1 模型

本文采用的模型是开放边界条件下十字型出口处的行人疏散模型, 它是由 BML 模型发展而来的有偏随机走动者格子气模型。通过模拟来自 3 个分支通道的 3 股行人流在单个疏散出口处汇集而成单股行人流的过程, 关注在 3 个分支通道宽度及其入口边界密度变化情况下的堵塞相变特征。模型中, 每个行人被视为一个无后退的有偏随机走动者, 均能以一定的概率向前、向左或向右移动, 但不能后退。为叙述方面的简化, 文中将垂直方向的分支通道和出口通道视为经向通道, 而将两个水平方向的分支通道表示为纬向通道。

图 1 是十字型出口处行人流示意图, 经向和纬向通道在虚线矩形框处相交。行人的动力学疏散模拟研究主要在 $L \times W$ 开放边界条件下的格子气中展开, 其中 L 是经向通道长度, W 是纬向通道的长度, W_{long} 和 W_{lati} 分别代表经向和纬向通道的宽度, 表示可容纳 W_{long} 或 W_{lati} 个行人在通道中并行行走。通道宽度和堵塞现象之间的关系是本文的主要研究目标, 也就是探讨通道宽度对堵塞临界边界密度的潜在影响, 而通道长度对堵塞现象的影响则未加考

虑。

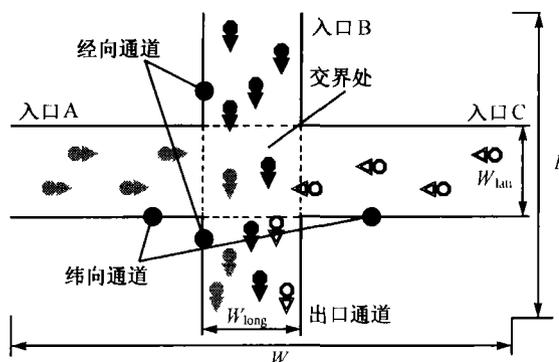


图 1 十字型出口处的行人疏散示意图

一般来说, 模型中格点大小主要是通过人员水平投影面积的统计值来确定的, 世界各国在这方面的统计值也不尽相同, 如前苏联为 0.113 m^2 , 奥地利为 $0.1458 \sim 0.1862 \text{ m}^2$, 而德国^[21]为 $0.12 \sim 0.19 \text{ m}^2$ 。模型中的格点大小设定为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$, 也就是每个格点的面积为 0.16 m^2 , 从而保证每个格点能且仅能容纳一个行人。

行人可从左边入口 A、顶部入口 B、和右边入口 C 进入交界处, 如图 1 所示, 分别用不同颜色的圆圈与箭头表示。正常情况下, 疏散人员的目标是一致的, 即疏散出口, 到达疏散口也就意味着脱离了危险。然而, 模型中来自不同入口的行人在进入交界处之前的疏散方向是不同的。显而易见, 来自经向通道的行人向下移动, 而来自纬向通道的行人从交叉口的左边或右边向右边或左边移动, 一旦纬向通道的行人进入交界处, 他们的疏散方向与经向通道内的行人一致, 也就成为经向行人。作为一个有偏随机步行者, 模型中行人的移动方式^[13]如图 2 所示(以经向行人为例)。图 2 中, 黑色圆圈代表待

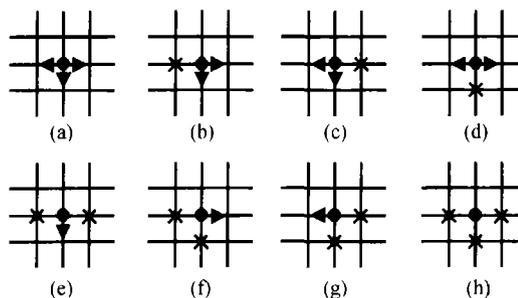


图 2 格子气模型中经向行人的移动方式

运动的经向行人, 每个行人只能向未被占据的位置移动, 叉号则表示该格点已被其他行人占据, 也就是说, 每个格点最多只能有一个行人, 因此行人之间的相互重叠是不允许的.

恐慌参数在本模型中具有重要的意义, 它是疏散人员、紧急环境和建筑结构相互影响而表现出来的人员的恐慌程度^[22], 决定了行人向相邻的前、左、右三个格点移动的概率, 关于恐慌参数的详细讨论可参见 Muramatsu 等的相关文章^[13]. 本文中, 恐慌参数的取值为 0, 即疏散人员在相邻格点都为空的情况下, 向 3 个方向的移动概率相等, 都为 1/3.

模拟分析中, 3 个入口的行人边界密度可分别设为不同的常量. 在单个时间步内, 行人的移动规则采用随机顺序更新规则, 并且每个行人每次只能被更新移动一次. 程序中用一个随机选择函数来形成行人的移动队列. 单位时间步长的设定决定了模型中人员疏散的速度, 因此, 可以通过参考国际文献中人员速度的统计值来指导单位时间步长的选取. 根据 Fahy^[23] 的统计, 前苏联的 Predtechenskii 等认为在一般情况下, 人员的步行速度取为 1.0 m/s 是合理的; 美国的 Fruin 首先提出了人员密度与速度之间的关系, 综合考虑各种人员密度下的速度, 他认为 1.2 m/s 是比较适宜的; Proulx 等针对两座高层公寓楼开展了人员疏散演习, 在给加拿大全国研究委员会的报告中指出, 公寓楼中人员水平速度分别为 1.05 和 0.95 m/s. 所以, 本文把单位时间步长设为 0.4 s, 也就意味着在十字疏散通道附近人员的疏散速度是 1 m/s.

在本模型中, 正如 Muramatsu 等所指出的那样, 行人流问题已相当简化, 但他们的一些最重要的特征被保留了下来. 例如来自三条通道的行人可同步移动, 但同时要保证每个格点不能容纳多于一个的行人. 可以预见, 正是由于这种行人之间相互的排斥作用, 将导致行人流的堵塞相变.

2 模拟结果及其分析

本文研究的重点为 W_{long} , W_{lati} 和临界边界密度 P_{cr} 之间的内在联系, 其中 P_{cr} 定义为当模型中行人的平均速度为 0.5 时, 也就是说有半数的行人在单个时间步内由于拥挤而不能运动时的边界密度,

该状态称为堵塞相变点. 行人的平均速度定义如下:

$$V = \frac{1}{t_{\text{end}} - t_{\text{sta}}} \sum_{i=t_{\text{sta}}}^{t_{\text{end}}} v_i = \frac{1}{t_{\text{end}} - t_{\text{sta}}} \sum_{i=t_{\text{sta}}}^{t_{\text{end}}} \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

其中 i 表示时间步的计数, N 指模型中某类型人员的总数, n 是在单位时间步内移动的该类型人员数, v_i 指第 i 个时间步内人员的平均速度, t_{sta} 和 t_{end} 分别指稳定状态开始时的时间步数和模拟结束的时间步数.

实际模拟过程中, 入口 A, B 和 C 的边界行人密度设为相同值并同步变化. 从模拟结果发现, 入口 A 和 C 进入行人在疏散时具有对称的动力学特性(统称为纬向疏散特性), 且该特性与入口 B 进入行人的疏散动力学特性(经向疏散特性)明显不同. 因此, 本文分别针对经向和纬向行人的模拟结果进行分析, 得到经向临界边界密度 $P_{\text{cr-long}}$ 和纬向临界边界密度 $P_{\text{cr-lati}}$.

模拟结果如图 3 和 4 所示. 图 3 是当 W_{lati} 分别为 10, 15, 20, 25 和 30 时 $P_{\text{cr-long}}$ 与 W_{long} 的关系曲线图, 其中带符号的曲线为模拟结果, 其余为拟合曲线, 可以看出, $P_{\text{cr-long}}$ 与 W_{long} 的关系满足指数增长函数(EGF). 当 W_{long} 较小时, 对应于不同 W_{lati} 的曲线相互重叠, 但随着 W_{long} 的增大, 则由于各自的增长速度不同而彼此分离, 也就是说, 当 W_{lati} 愈大时, $P_{\text{cr-long}}$ 随 W_{long} 增长的速度愈慢. 如图中所示, 当 $P_{\text{cr-long}} = 1$ 时, 在 $W_{\text{lati}} = 10$ 的情况下 W_{long} 约为 22, 而在 $W_{\text{lati}} = 30$ 的情况下 W_{long} 约为 42. 图 4 则显示了当 W_{lati} 分别为 10, 15, 20, 25 和 30 时 $P_{\text{cr-lati}}$ 与 W_{long} 的关系, 其关系符合异速生长规则(AGL), 其曲线表现出与图 3 相似的特性, 即对于较小的 W_{lati} , $P_{\text{cr-lati}}$ 随 W_{long} 增长较快, 而随着 W_{lati} 的增加, $P_{\text{cr-lati}}$ 随 W_{long} 增长较慢. 然而, $P_{\text{cr-lati}}$ 的增长显然较 $P_{\text{cr-long}}$ 平缓, 且所有的 $P_{\text{cr-lati}}$ 的值均小于 0.5, 这揭示出纬向通道上更容易发生堵塞.

图 3 和 4 说明 $P_{\text{cr-long}}$ 和 $P_{\text{cr-lati}}$ 都同时依赖于 W_{long} 和 W_{lati} 的取值, 但对于不同的 W_{lati} , 两者也都显示出对 W_{long} 不同的依赖程度. 为了使临界边界密度与通道宽度之间的关系更加清晰明了, 首先作以下两点简化假设:

(1) 第 i 时间步内从边界进入模型的人员仅受

到第 $i-1$ 时间步内进入模型的人员的影响;

(2) 当模拟达到临界堵塞点时, 在特定时间内从入口进入模型的人员数量等于从出口离开模型的人员数量;

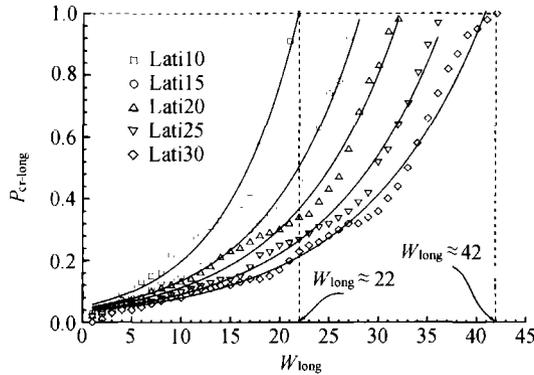


图3 $P_{cr-long}$ 和 W_{long} 关系的模拟结果及其指数增长拟合曲线

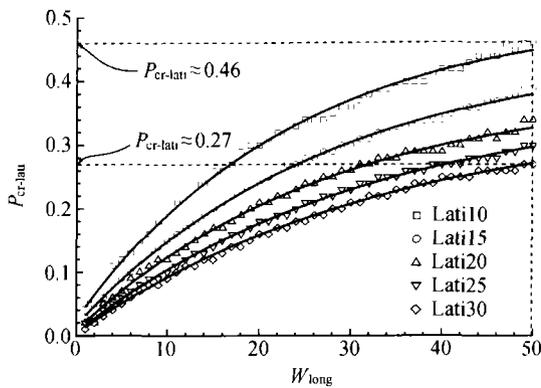


图4 $P_{cr-lati}$ 和 W_{long} 关系的模拟结果及其异速增长拟合曲线

基于这些假设, 可展开进一步的理论分析和推导. 当纬向和经向临界堵塞发生时, 单位时间步长内从入口进入模型的人员数量 N_{in} 可分别表示为

$$N_{in} = \frac{1}{3}(2W_{lati} + W_{long})P_{cr-lati} \quad (2a)$$

$$N_{in} = \frac{2}{3}W_{lati}P_{lati} + \frac{1}{3}W_{long}P_{cr-long} \quad (0 < P_{lati} < P_{cr-lati}), \quad (2b)$$

而堵塞发生时, 单位时间步长内从出口疏散的人员数量 N_{out} 可表示为

$$N_{out} = \frac{1}{3}W_{long}. \quad (3)$$

根据假设(2), 临界堵塞时 N_{in} 等于 N_{out} , 联立公式(2a)和(3), 则首先可以得到十字出口人员疏散的纬向临界边界密度公式

$$P_{cr-lati} = \frac{W_{long}}{2W_{lati} + W_{long}} = \frac{1}{2W^* + 1}, \quad (4a)$$

其中

$$W^* = \frac{W_{lati}}{W_{long}} > 0. \quad (5)$$

联立公式(2b)和(3), 可得经向临界边界密度公式

$$\frac{1}{2W^* + 1} < P_{cr-long} = 1 - 2W^*P_{lati} < 1. \quad (4b)$$

在假设的基础上, 公式(4a)和(4b)定性而不是定量地指出临界边界密度 P_{cr} 和比通道宽度 W^* 之间的有理倒数关系. 有理由相信, 模型的模拟结果同样具有这种标度不变性. 把图3和4中的横轴 W_{long} 改为比通道宽度 W^* , 也就是对模拟结果作公式(5)的变量代换, 分别得到了图5和6. 不难发现, 在作以上代换后, 模拟结果显示出与推导结果一致的特征, 即 P_{cr} 相对于比通道具有归一性.

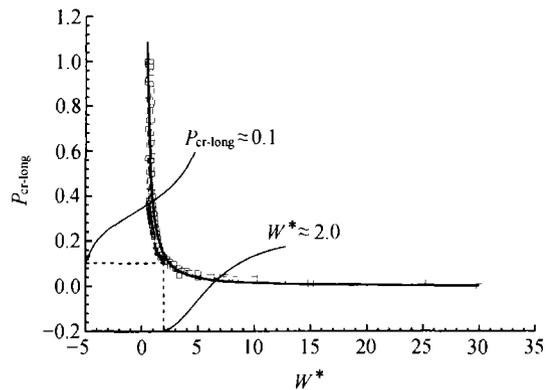


图5 $P_{cr-long}$ 与 W^* 关系的模拟结果与曲线拟合

从图5可得, 当 $W^* < 2.0$ 时, $P_{cr-long}$ 随着 W^* 的增大而迅速减小; 而当 $W^* > 2.0$ 时, $P_{cr-long}$ 则

基本保持不变, 显然, 这表明了 $P_{cr-long}$ 与 W^* 之间的有理倒数函数关系. 图6中, $P_{cr-lati}$ 与 W^* 之间同样呈现出类似的有理倒数关系. 因此, 可以用公式(6)和(7)来表示 $P_{cr-long}$ 和 $P_{cr-lati}$ 与 W^* 之间的函数关系:

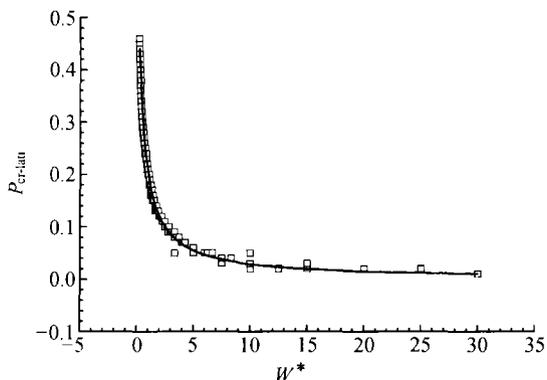


图6 $P_{cr-lati}$ 与 W^* 关系的模拟结果与曲线拟合

$$P_{cr-long} = \frac{1}{a_1 + b_1 W^*} \left(W^* > \frac{1 - a_1}{b_1} \right), \quad (6)$$

$$P_{cr-lati} = \frac{1}{a_2 + b_2 W^*} \left(W^* > \frac{1 - a_2}{b_2} \right), \quad (7)$$

其中 $a_1, b_1, a_2,$ 和 b_2 为拟合参数, 通过图5和6中的曲线拟合, 这些参数的拟合值, 拟合误差及其依赖性如表1所示.

表1 P_{cr} 与 W^* 有理倒数函数中的参数拟合

	系数	拟合值	拟合误差	依赖性
经向	a	-0.60674	0.15171	0.92749
	b	3.32505	0.23736	0.92749
纬向	a	1.59688	0.01131	0.76538
	b	3.34973	0.02305	0.76538

把参数 a 和 b 的拟合值代入公式(6)和(7), 则可得由比通道宽度表示的十字出口人员疏散的临界边界密度公式, 如公式(8)和(9)

$$P_{cr-long} = \frac{1}{-0.607 + 3.325 W^*} \quad (W^* > 0.483), \quad (8)$$

$$P_{cr-lati} = \frac{1}{1.597 + 3.350 W^*} \quad (W^* > 0). \quad (9)$$

由临界边界密度公式可知, 十字出口人员疏散时, 当且仅当 W^* 大于 0.483 时, 经向通道上才可能出现人员堵塞; 而与经向通道不同, 对于不同的比通道宽, 纬向通道上都可能出现人员的堵塞现象. 图5和6中的连续曲线分别代表公式(8)和(9), 不难发现, 模拟值与拟合曲线符合得很好. 同时, 也应该注意到公式(8)和(9)的拟合系数 a 和 b 的取值与公式(4)不同, 这是由于理论推导的假设而存在的.

值得注意的是, 公式(6)和(7)中的参数 a 和 b 不是单纯的拟合参数, 它们同样具有一定的物理意义. 参数 a 是堵塞产生的标志, 如果 $a \geq 1$, 则对应于极小的比通道宽 W^* 来说, 存在最大的临界边界密度为 $1/a$; 如果 $a < 1$, 那么只有当 $W^* > (1 - a)/b$ 时, 人员疏散时的堵塞现象才可能发生. 参数 b 则说明了临界边界密度 P_{cr} 对比通道宽 W^* 的依赖程度, b 的取值越大, P_{cr} 则越小, 也就是说通道上的堵塞相变越可能产生, 相对的, 较小的 b 表明堵塞现象可以通过 W_{long} 和 W_{lati} 的合理配置而加以避免.

公式(8)和(9)可以应用于建筑防火设计和火灾安全评估, 对于疏散通道的防火设计来说, 确定了建筑中的最大人员荷载, 也就知道了疏散时最大的人员密度, 通过公式(8)和(9)就可以反推得到最优化的十字疏散通道宽度 W_{long} 和 W_{lati} ; 而对于安全评估来说, 给定十字疏散通道的宽度 W_{long} 和 W_{lati} , 计算得到临界边界密度 $P_{cr-long}$ 和 $P_{cr-lati}$, 从而得到该疏散通道的最大疏散能力, 通过与实际的人员荷载情况比较, 评估疏散设施在火灾等紧急情况下是否能够确保人员安全顺畅地疏散.

3 结论

本文采用无后退有偏随机走动者格子气模型对十字路口的人员疏散过程进行了计算模拟和分析. 结果表明, 堵塞相变的发生非线性依赖于通道宽度, 这与瓶颈通道^[18,19]和T型通道^[17]发生的堵塞相变有着显著的区别. 尽管两个T型通道可以组成单个十字型通道, 但由于堵塞相变与通道宽度之间的非线性关系, 十字通道的临界边界密度并不是两个T型通道的简单叠加. 同时也应该注意到, 虽然

十字型通道中经向和纬向通道的 $P_{cr} - W^*$ 都是有理倒数函数关系, 但两者对于通道宽度的依赖性是不同的, 这表现为拟合参数 a 和 b 的不同数值.

文中得到的十字型疏散通道中临界边界密度公式可应用于实际的工程: 一旦给定十字型通道的建筑结构, 就可以计算其临界边界密度, 也就可以预测其最大人员顺畅通行能力, 有助于紧急情况下人员疏散的决策与指挥; 而一旦给定期望的人员荷载, 就可以设计安全的疏散通道, 保证人员的安全疏散, 从而尽可能避免在火灾、地震等紧急情况下由于堵塞造成的人员伤亡. 当然, 本模型仍然需要进一步发展和改进, 我们期望将来在模型中可以模拟不同的人员速度, 也可以引入火灾发展及其产物对人员心理和生理的影响等.

参 考 文 献

- 1 Biham O, et al. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Phys Rev A*, 1992, 46: 6124
- 2 Nagatani T. Jamming transition in the traffic-flow model with 2-level crossings. *Phys Rev E*, 1993, 48: 3290
- 3 Lee H Y, et al. Dynamic states of a continuum traffic equation with on-ramp. *Phys Rev E*, 1999, 59: 5101
- 4 Treiber M, et al. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Phys Rev E*, 2000, 62: 1805
- 5 Chung K H, et al. 2-dimensional traffic flow problems with faulty traffic lights. *Phys Rev E*, 1995, 51: 772
- 6 Cuesta J A, et al. Phase-transitions in 2-dimensional traffic-flow models. *Phys Rev E*, 1993, 48: 4175
- 7 Wang B H, et al. Improved mean-field theory of two-dimensional traffic flow models. *J Phys A-Math Gen*, 1996, 29: 31
- 8 Nagatani T. Jamming transition in a two-dimensional traffic flow model. *Phys Rev E*, 1999, 59: 4857
- 9 Helbing D, et al. Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*, 1997, 388: 47
- 10 Helbing D, et al. Active walker model for the formation of human and animal trail systems. *Phys Rev E*, 1997, 56: 2527
- 11 Helbing D, et al. Social force model for pedestrian dynamics. *Phys Rev E*, 1995, 51: 4282
- 12 Helbing D, et al. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, 407: 487
- 13 Muramatsu M, et al. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A*, 1999, 267: 487
- 14 Muramatsu M, et al. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic. *Physica A*, 2000, 275: 281
- 15 Muramatsu M, et al. Jamming transition of pedestrian traffic at a crossing with open boundaries. *Physica A*, 2000, 286: 377
- 16 Tajima Y, et al. Scaling behavior of crowd flow outside a hall. *Physica A*, 2001, 292: 545
- 17 Tajima Y, et al. Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel. *Physica A*, 2002, 303: 239
- 18 Tajima Y, et al. Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck. *Physica A*, 2001, 294: 257
- 19 Nagatani T. Dynamical transition and scaling in a mean-field model of pedestrian flow at a bottleneck. *Physica A*, 2001, 300: 558
- 20 Livesey G E, et al. A consideration of evacuation attributes and their functional sensitivities. In: *Proceeding of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Boston: (USA) MIT, 2001. 111
- 21 Schneider V. Application of the individual-based evacuation model ASERI in designing safety concepts. In: *Proceeding of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Boston: (USA) MIT, 2001. 41
- 22 Graham T L, et al. Qualitative overview of some important factors affecting the egress of people in hotel fires. *Hospitality Management*, 2000, 19: 79
- 23 Fahy R F, et al. Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling. In: *Proceeding of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Boston: (USA) MIT, 2001. 175