

十字型出口人员疏散的堵塞研究

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行人疏散动力学进行了计算和模拟。结果显示, 当纬向边界行人密度保持恒定时, 经向和纬向通道行人堵塞现象的出现取决于不同的经向边界行人密度; 当纬向通道宽度保持不变时, 发生堵塞的临界边界行人密度取决于不同的经向通道宽度, 纬向和经向的行人堵塞动力学演变具有不同的特征。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; 堵塞; 相变; 火灾

[中图分类号] X45, TK121 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)04-0056-05

1 引言

交通流系统是由车辆之间相互影响和作用而形成的一种多个体系统, 交通堵塞是交通流复杂行为的典型特征^[1-3]。部分学者对复杂得多的二维问题开展了研究和探索。二维交通流的研究主要基于元胞自动机和格子气模型^[1,4-7], 研究发现在二维情况下出现的堵塞现象与一维条件下具有某些相似性。

相当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显现的复杂现象(如堵塞)至关重要^[8-18]。火灾情况下, 由于疏散人员的盲目性而导致人员堵塞, 造成人员葬身火海的惨剧时有发生。因此, 针对火灾等紧急情况下发生的人员堵塞现象开展行人流基本规则研究具有实际意义。

交通流模型和模拟方法是行人流研究的基础。Helbing用主动行人模型^[8,9]描述了行人的追随现象, 用社会力模型^[10]研究了疏散过程中人员堵塞现象, 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行人个体之间非线性相互作用

引起的。Muramatsu^[12-14]等人提出了一种离散化的有偏随机走动者格子气模型来模拟二维行人流。Tajima和Nagatani^[15-18]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响, 例如大厅、瓶颈通道和T型通道等。

在人员密集的公共场所, 广泛采用十字型的疏散通道或出口。由于行人流存在非线性的特征, 十字型通道的人员疏散性质并不能由2个T型通道叠加得到, 因此, 有必要对十字型出口附近的人员疏散动力学特性进行细致的分析和研究。笔者采用开放边界条件, 通过有偏随机走动者格子气模型模拟和分析了由3个分支疏散通道和1个疏散出口组成的十字型出口处的行人流疏散问题。其中, 行人流疏散从顺畅到阻塞的动力学相变过程及其影响因素是关注的焦点。

2 模型的建立

笔者描述的模型是开放边界条件下十字型出口处的行人流疏散模型, 采用有偏随机走动者格子气模型来模拟来自3个分支通道的3股行人在单个疏散出口处汇集成单股行人流的过程。模型中, 每个

[收稿日期] 2003-08-04

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划(九七三)资助项目(2001CB409600); 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(50320120156)

[作者简介] 陈涛(1975-), 男, 江苏江阴市人, 中国科学技术大学火灾科学重点实验室博士研究生

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。为了便于描述，将垂直方向的分支通道和出口通道叙述为经向通道，而将 2 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，其中 L 是经向通道长度， W 是纬向通道长度， 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。

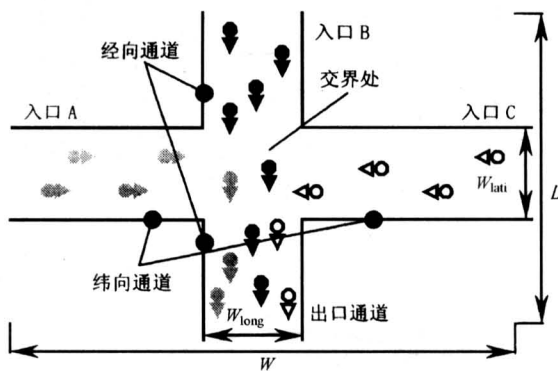


图 1 十字出口行人流示意图

Fig.1 Schematic illustration of the pedestrian evacuating flow in the crossing exit

如图 1 所示，行人可从左边的入口 A、顶部的入口 B、和右边的入口 C 进入交界处，并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移动方向是不同的：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分别向交界处移动。一旦纬向通道的行人进入交界处，他们的疏散方向就变为与经向通道内的行人一致，也就成为经向行人。一个无后退的有偏随机步行者在模型中的移动模式^[12]如图 2 所示（以经向行人为例），其中黑色圆圈代表经向行人，每个行人只能向未被占据的位置移动；叉号表示该位置已被其他行人占据，也就是说，每个格点最多只能有一个行人，行人不能相互重叠。笔者采用等概率人员移动模式，即行人向周围空格点的移动概率相等。图 2 (a) 中，行人周围都为空格点，则该行人向 3 个方向（下、左和右）移动的概率均为 33.3%，图 2 (b) 中，行人

左边的格点被其他人占据，则该行人向下和向右的移动概率同为 50%。

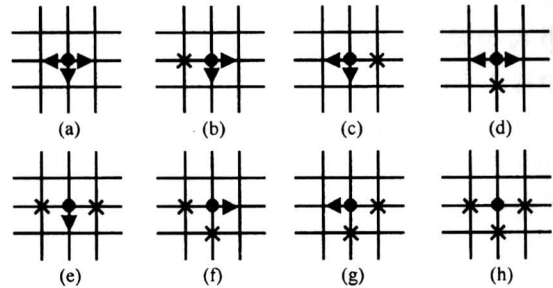


图 2 格子气模型中经向行人的移动模式

Fig.2 All possible configurations of a longitudinal pedestrian on the square lattice

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，行人的移动采用随机顺序更新规则，并且每个行人每次只能移动一次。程序中用一个随机选择函数来形成行人的移动队列。在模型中，正如 Muramatsu^[12]所指出的那样，行人流问题已被极为简化，但他们的一些最重要的特征被保留了下来。例如来自 3 条通道的行人可同步移动，同时保证每个格点不能容纳多于 1 个行人。显然，行人之间相互的排斥作用是导致行人流堵塞相变的根本原因。

3 人员疏散模拟分析

在火灾等紧急情况下，火灾环境、建筑结构和疏散人员之间的相互作用是疏散过程中产生恐慌的原因^[19]。Helbing^[10]把疏散过程中的典型恐慌行为归纳为 9 类，即相互推挤、疏散失调、阻塞发生、堵塞形成、人员受伤、疏散变慢、集群倾向和出口的不合理利用。作者采用开放边界条件，通过有偏随机走动者格子气模型模拟，分析由 3 个分支疏散通道和单个疏散出口通道组成的十字型出口处的行人流疏散问题。其中，随着密度的增加，行人疏散从顺畅到堵塞的动力学相变过程是关注的焦点之一，此相变点对应的边界人员密度称为临界堵塞密度 P_{cr} 。

随着行人密度的增加，必然导致越来越多的行人不能顺畅地行走，即单个时间步内越来越多的行人只能停在原地。当一个时间步内原地不动的行人超过 50% 时，就认为行人流中形成了堵塞，也即出现了堵塞动力学相变。换句话说，发生堵塞相变时，行人流的平均速度为 0.5。行人流的平均速度

v_i 定义为:

$$v_i = \frac{n}{N} \quad (1)$$

其中 N 是格子中人群的总数, 而 n 是在单位时间步中移动的行人数。从计算机模拟结果可发现, 从入口 A 和 C 进入的行人在疏散时具有对称的动力学特性, 因此, 在以下的模拟中将 A、C 处的边界行人密度设为相同数值。

作者所关注的另一个焦点是, 当纬向入口 A、C 处的边界行人密度 P_A 取定值并保持纬向通道宽度 W_{lati} 不变时, 入口 B 的边界行人密度 P_B 和经向通道宽度 W_{long} 之间的关系。

3.1 P_B 对疏散动力学的影响

首先固定 W_{lati} , W_{long} 和 P_A 的值为 20, 20 和 0.20, 研究行人疏散的动力学特性随 P_B 的变化, 如图 3 所示。

图 3 (a) 是纬向行人的平均速度 v_{lati} 随时间步的变化曲线, 其中 P_B 分别为 0.05, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.30。

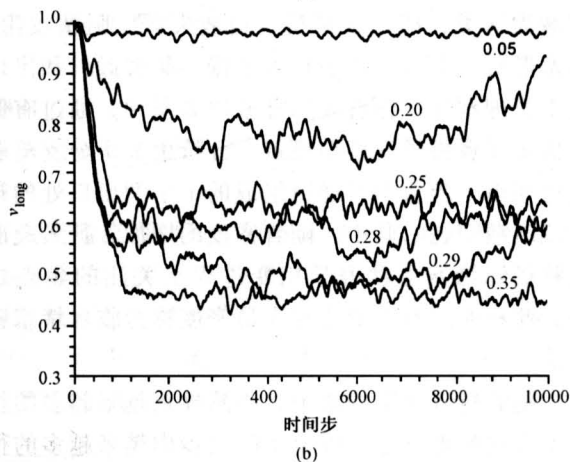
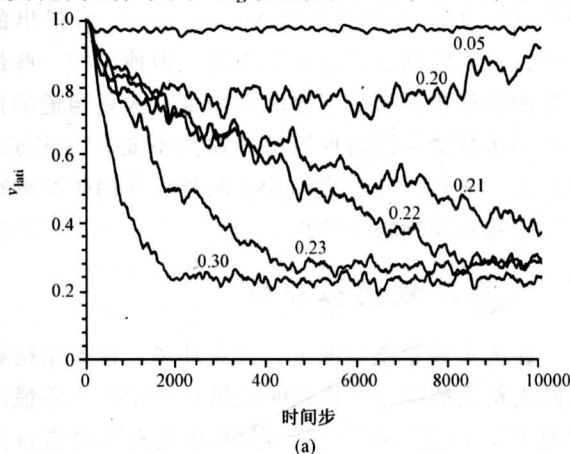
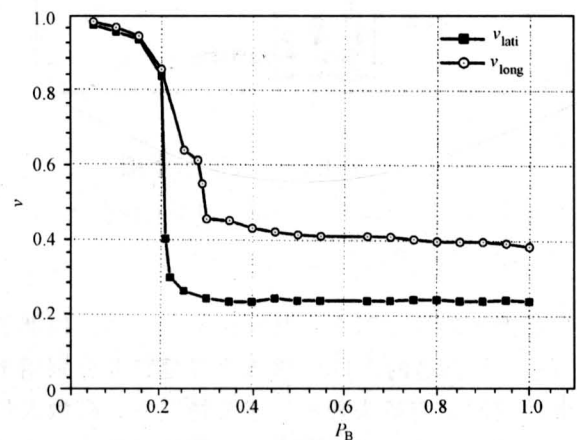


图 3 纬向和经向疏散通道上行人流堵塞的形成
Fig.3 Jamming transition of latitudinal and longitudinal channel

0.22, 0.23 和 0.30; 图 3 (b) 是经向行人平均速度 v_{long} 随时间步的变化曲线, 其中 P_B 分别为 0.05, 0.20, 0.25, 0.28, 0.29 和 0.35。从图 3 可见, v_{long} 和 v_{lati} 均随着 P_B 的增大而减小, 这是由于在疏散通道的宽度不变的情况下, 人员密度增大时, 必然会导致部分人员由于拥挤而停步不前。在 P_B 较小的情况下, 经向和纬向行人的动力学特性基本一致, 当 P_B 取值为 0.05~0.20 之间时, 图 3 (a) 和图 3 (b) 中曲线具有基本相同的变化趋势。值得注意的是, 当 $P_B > 0.20$ 时, v_{lati} 迅速减小到 0.20~0.30 之间, 而 v_{long} 则减小相对缓慢, 也就是说, 此种情况下, 纬向行人流容易发生阻塞。多个时间步的平均速度可以更加清晰地描述模型中行人流的堵塞相变, 在时间步 8 000~10 000 内, 疏散行人的速度基本处于上下振荡的稳定期。对该阶段的行人速度取平均值, 可以得到经向和纬向行人平均速度随 P_B 变化的曲线, 如图 4。



$$W_{lati} = 20, W_{long} = 20, P_A = 0.2$$

图 4 平均速度与 P_B 的关系

Fig.4 Mean velocities against P_B

显然, 当 $P_B < 0.20$ 时, 经向和纬向的行人疏散速度几乎相同。但随着 P_B 的增大, 2 条曲线趋向 2 个不同的速度值, 经向速度稳定在 0.40 左右, 而纬向速度趋向于 0.23。

这些模拟得到的现象是不难理解的。在火灾等紧急情况下, 如果人员数量较少, 他们能迅速而安全地疏散而不发生堵塞; 当人数增加时, 人与人之间的相互干扰和影响越来越严重, 最终将导致疏散通道上人流堵塞, 降低疏散的效率。模型中这种疏散效率的降低源自交叉口处的排队等候。

3.2 W_{lati} 为常值时的行人流堵塞相变

仅固定 W_{lati} 的值，而 W_{long} 和 P_B 的值是可调的，对于 $P_A = 0.10, 0.20, 0.30$ 和 0.40 的情况进行疏散动力学过程的模拟。图 5 是 $P_A = 0.20, W_{lati} = 20$ 时的疏散堵塞相图。显而易见，经向和纬向的临界边界行人密度曲线将堵塞相图划分为 3 个相区，分别为无堵塞区、纬向堵塞区和双向堵塞区。经向临界边界密度曲线存在 2 个拐点，分别对应于 $W_{long} = 14$ 和 26，两拐点间的曲线较平坦，表明当出口通道宽度设计为 14~26 之间时，疏散效率并没有随路径的加宽而显著提高。因此，综合考虑安全和经济效益，疏散出口通道宽度设计为小于 14 或大于 26 是比较合适的。

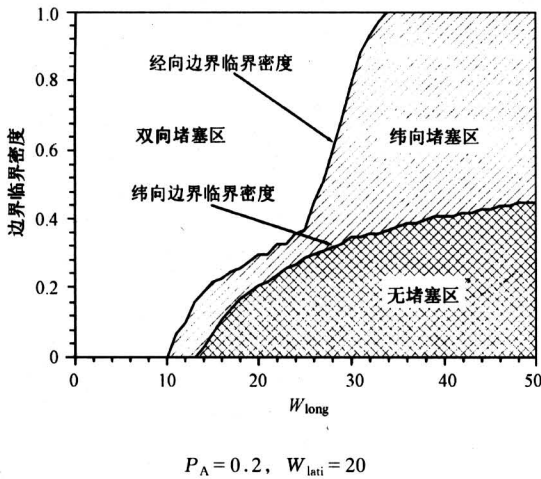


图 5 (P_{cr}, W_{long}) 坐标系内的堵塞相图

Fig.5 Phase diagram in the ($P_{cr}; W_{long}$) space

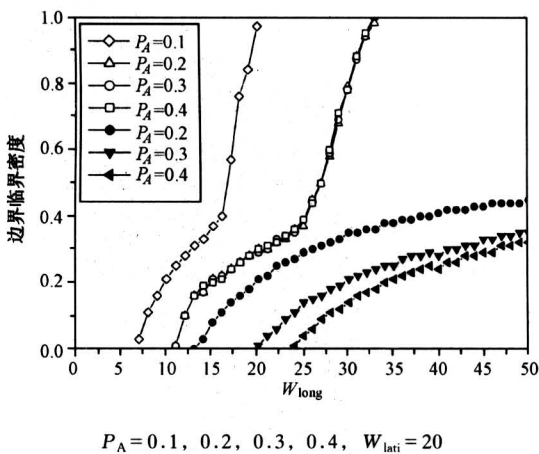


图 6 坐标系 (P_{cr}, W_{long}) 内的堵塞相图

Fig.6 Phase diagram in the ($P_{cr}; W_{long}$) space

行人流的堵塞和 W_{long} 之间的内在联系如图 6 所示。其中 $P_A = 0.10, 0.20, 0.30,$ 和 0.40 ，图中带空心符和实心符的曲线分别表示经向和纬向

P_{cr} 的曲线。从图 6 可得出十字形出口疏散的 3 个典型特征：1) 纬向堵塞区域一直随着 P_A 的增大而增大；2) 当 $P_A = 0.20, 0.30$ 和 0.40 时，经向堵塞密度的曲线互相重叠，这表明 P_A 的取值并不会影响经向通道的疏散效率，而它的增大却会降低纬向通道的疏散效率；3) 当 $P_A = 0.1$ 时只出现经向堵塞，也就是当 P_A 很小且 $W_{lati} = 20$ 的情况，不管 P_B 的取值大小，纬向通道均不会发生行人流的堵塞。

4 结论

通过有偏随机走动者格子气模型，对十字型出口的疏散行人流进行了模拟计算和分析。结果表明，当入口的边界行人密度大于临界边界密度时，经向或纬向通道将会出现行人流的堵塞现象。保持纬向宽度 W_{lati} 、经向宽度 W_{long} 和纬向入口边界行人密度 P_A 不变，在改变经向密度 P_B 的情况下，进行十字形出口的疏散模拟，成功地观察到了行人流的堵塞相变过程，并进行了相应的分析。这种堵塞现象在一些实际的紧急情况下，比如火灾，爆炸等的疏散过程中也曾被观测到。然后，仅维持纬向宽度 W_{lati} 恒定不变，在经向宽度 W_{long} 和经向密度 P_B 取值改变的条件下，对 $P_A = 0.10, 0.20, 0.30$ 和 0.40 时的动力学疏散过程进行模拟以研究边界临界堵塞密度 P_{cr} 、经向宽度 W_{long} 和 P_A 之间的关系。从模拟结果可以看出，经向通道的 P_{cr} 总比纬向通道的 P_{cr} 大，这说明除了 $P_A = 0.1$ 的情况外，纬向通道比经向通道更易发生行人疏散时的堵塞。所有的模拟结果均显示出低密度相区与堵塞相区之间发生了明显的动力学相变。

堵塞相变的分析对十字型出口的人员疏散的研究具有实际意义，模拟的结果可以指导出口路径的设计，并可确定十字形出口中分支通道宽度与出口通道宽度之比的合适值。但由于缺乏实验或者实际的数据来检验和修正模型，模拟结果与实际情况的偏差，尚待进一步研究。

参考文献

[1] Treiber M, Hennecke A, Helbing D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations [J]. Phys Rev E, 2000, 62 (2): 1805~1824
 [2] Lee H Y, Lee H W, Kim D. Dynamic states of a continuum traffic equation with on-ramp [J]. Phys Rev E, 1999, 59 (5): 5101~5111

- [3] Nagatani T. Jamming transition in a two-dimensional traffic flow model [J]. *Phys Rev E*, 1999, 59 (5): 4857~4864
- [4] Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and a dynamic transition in traffic-flow models [J]. *Phys Rev A*, 1992, 46 (10): 6124~6127
- [5] Nagatani T. Jamming transition in the traffic-flow model with 2-level crossings [J]. *Phys Rev E*, 1993, 48 (5): 3290~3294
- [6] Cuesta J A, Martinez F C, Molera J M, et al. Phase-transitions in 2-dimensional traffic-flow models [J]. *Phys Rev E*, 1993, 48 (6): 4175~4178
- [7] Chung K H, Hui P M, Gu G Q. 2-Dimensional traffic flow problems with faulty traffic lights [J]. *Phys Rev E*, 1995, 51 (1): 772~774
- [8] Helbing D, Schweitzer F, Keltsch J, et al. Active walker model for the formation of human and animal trail systems [J]. *Phys Rev E*, 1997, 56 (3): 2527~2539
- [9] Helbing D, Keltsch J, Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems [J]. *Nature*, 1997, 388 (6637): 47~50
- [10] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407 (6803): 487~490
- [11] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. *Phys Rev E*, 1995, 51 (5): 4282~4286
- [12] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming transition in pedestrian counter flow [J]. *Physica A*, 1999, 267: 487~498
- [13] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic [J]. *Physica A*, 2000, 275: 281~291
- [14] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming transition of pedestrian traffic at a crossing with open boundaries [J]. *Physica A*, 2000, 286: 377~390
- [15] Tajima Y, Nagatani T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall [J]. *Physica A*, 2001, 292: 545~554
- [16] Tajima Y, Takimoto K, Nagatani T. Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck [J]. *Physica A*, 2001, 294: 257~268
- [17] Tajima Y, Nagatani T. Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel [J]. *Physica A*, 2002, 303: 239~250
- [18] Nagatani T. Dynamical transition and scaling in a mean-field model of pedestrian flow at a bottleneck. *Physica A* [J], 2001, 300: 558~566
- [19] Graham T L, Roberts D J. Qualitative overview of some important factors affecting the egress of people in hotel fires [J]. *Hospitality Management*, 2000, 79~87

Study of Evacuation Jamming Transition in Crossing Exit

Chen Tao, Song Weiguo, Fan Weicheng, Lu Shouxiang

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] Under the condition of open boundary, pedestrian evacuation dynamics in crossing exit is simulated through the lattice-gas model of biased random walkers without back step. Attention is concentrated on the mean velocity of pedestrian flow while simulating and analyzing, for it is the key factor to study the fundamental rules between the boundary density and width of route and to estimate jam transition during evacuation. In the simulation, the jamming transitions are observed at the longitudinal route or latitudinal route or both routes when the longitudinal pedestrian boundary density increases under the constant values of latitudinal pedestrian boundary density. Fixing the width of latitudinal route, a series of critical boundary densities which indicate the jamming transition are gained under different values of width of longitudinal route. By plotting the relation in certain coordinate system, the phase diagram can be concluded, which can express the jamming transition clearly. It is found in the phase diagram that the longitudinal and latitudinal dynamical phase transitions present different patterns. In the end, it should be pointed that the simulation results in this paper will be helpful for the design of evacuation routes.

[Key words] evacuation; lattice-gas model; jamming; phase transition; fire