基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型

杨立中 方伟峰 黄 锐 邓志华

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026. E-mail: zxd@ustc.edu.cn)

摘要 在已有的元胞自动机交通流模型和行人流模型的基础上, 提出了一个模拟火灾中人员逃生的基本模型, 并介绍了其扩展模型的应用. 主要特点是引入了“总危险度图”的概念, 使得模型在确定人员逃生路线方面更加合理、方便. 模型所有规则的确定都遵循一个总的原则: 逃生的人员总是尽可能以最快的速度往最安全的地方运动. 模型具有很强的扩展能力, 可以很好模拟人员的智能性以及火灾场景的作用. 用模型对大房间内人员的疏散过程进行了模拟, 表明本模型具有较强的实用性.

关键词 元胞自动机 行人流 火灾 人员逃生 模型

元胞自动机是由大量简单一致的个体通过局部联系组成的离散、分散及空间可扩展系统[1~5]. 它最早由 von Neumann 等人提出来[1], 起初主要用于模拟生命系统所具有的自复制功能. 近年来, 人们对元胞自动机模型的兴趣大增, 原因是这类简单的模型能十分方便地复制出复杂的现象或动态演化过程中的吸引子、自组织和混沌现象. 因此目前元胞自动机被广泛应用于模拟各种物理系统和自然现象[2], 如流体运动、星系形成、生物模式形成、雪崩、交通阻塞、并行计算机及地震等. 用元胞自动机来模拟一个物理过程的优点[3]在于省去了用微分方程作为过渡而直接通过制定规则来模拟非线性物理现象. 在这些实际应用中, 元胞自动机模型通过简单的微观局部规则揭示了自然发生的宏观行为.

元胞自动机在流体力学中最重要的应用之一是元胞自动机交通流模型[6~13], 其中最经典的要算 Wolfram 建立的第 184 号元胞自动机模型[2]. 其他模型一般都是在该模型的基础上进行改进以模拟更真实、复杂的情况, 比较典型的有 N-S 模型[6]和 F-I 模型[7]. N-S 模型是一个简化的模型, 其每一步都是模拟实际交通流各种特性所必需的, 它为更复杂的情况[8~12](如两车道交通[8]和双向交通流[9]等)或城市交通流[13]提供了基本规则. 这些模型揭示了车辆速度的非线性变化规律, 再现了真实交通流中的阻塞、时走时停等现象的发展过程, 成功解释了交通流中的激波自组织临界现象, 在指导城市交通建设方面起到了重要的作用. 这些交通流模型也为元胞自动机行人流模型规则的制定提供了基本依据.

行人运动作为道路交通中一个重要的组成部分, 对交通工具的站点设计和交通灯的设计有很重要的影响. 此外在设计办公大厅、市场及商业街等人流密集的场所时, 都需要考虑其使用效率以及应付各种突发事件的能力[14~25]. 美国的 Highway Capacity Manual (HCM)[14]便主要致力于对行人运动的模拟和道路容纳能力的宏观技术分析, Blue 和 Adler[15~18]建立了一系列元胞自动机行人流模型, 此外对这方面感兴趣的还有 Helbing 和 Molnar[19], 等等. 但是总的来说, 目前在实际中应用较多的仍然是基于对从“速度-流量-密度”关系中得出的统计数据的研究[14,20~22], 而对基于个体行为的研究还很少, 究其原因, 主要是行人运动比车辆运动更加复杂的缘故. 通常认为行人运动与车辆运动之间的不同之处主要有: (ⅰ) 行人运动更具随机性, 如会出现突然停止、拐弯及转身等现象. (ⅱ) 行人运动并没有像车辆运动那样有速度、通行规则以及车道的限制. (ⅲ) 行人运动的加速时间较短并且较少担心会发生碰撞, 在运动时一般不用考虑后面行人的运动情况. 此外行人运动还有一些自身的特点, 如 Helbing[19,23]在他们的模型里引入了“社会力”的概念. 目前在建立元胞自动机行人流模型方面有两种方法. 一是从行人运动与车辆运动的异同点出发, 在交通流模型的基础上根据行人运动的特点建立行人流模型, 如 Blue 和 Adler 提出的一系列[15~18]包括“单向”、“双向”和“四向”的元胞自动机行人流模型. 第 2 种方法则是直接从行人运动的特点入手, 如 Burstedde 等人建立的二维行人运动模型[25].

从交通流模型到行人流模型, 人们成功地将元胞自动机应用到和人们生活息息相关的各种实际需要中. 作为研究火灾现象的科研工作者, 我们更关注其在火灾人员逃生研究中的应用. 统计结果表明[26],

建筑火灾中85%以上的死亡者是由于没能及时逃出火灾现场而吸入了烟尘及有毒气体而致死的, 2000年“12·25”洛阳市东都特大火灾(309 人死亡), 1994年“12·8”新疆克拉玛依市友谊宫特大火灾(330 人死亡)都是血的惨痛的例子, 因此对火灾中人员逃生现象和规律的研究直接关系到人员的生命安全问题.

目前对火灾中人员逃生的研究主要集中在: (ⅰ) 对逃生时间的研究, 如通过比较建筑物达到危险的时间与人员有效逃生时间来评估建筑物的安全性, 对建筑物达到危险时间的判断依据主要有考虑烟气沉降到一定位置的时间, 如 ASET, WAYOUT, SIMULEX 和 EVACNET4 等应用程序[27], 和考虑烟气达到致命毒性的时间[28,29]这两种. (ⅱ) 对人员在火灾中逃生行为的研究, 如研究人员对火灾的早期反应[30], 时间压力对人员逃生的影响[31]等等. 这些研究从不同方面得到了很多理论结果并在实际应用中取得了一定的成效. 总的来说, 目前一个明显的趋势就是未来的模型将包含更多的行为细节. 而这方面的表现将很大程度上依赖于建立模型所使用的方法. 现有的一些连续方程模型, 一般是将逃生的人员作为无意识的粒子来看待, 因此缺乏对实际逃生过程的一些复杂现象的模拟能力, 而如果用元胞自动机模型就可以很好地考察人员的智能性和差异性的作用. 但是考虑到火灾人员逃生的特殊性以及复杂性, 目前已有的元胞自动机模型都不能很好地直接应用. 通过分析我们认为, 火灾人员逃生模型不同于一般行人流模型之处主要有: (ⅰ) 火灾中人员逃生的路线和方向是比较明确的. (ⅱ) 火灾中人员都尽可能以最大速度逃生. (ⅲ) 火灾中火灾场景会对人员造成心理和生理的双重影响, 这是其特有的现象, 也是最值得研究的部分. 根据以上分析, 在本文中我们建立了一个综合上述各方面因素的适用于火灾这种特殊场景中的人员逃生模型.

1 基本模型及扩展

理论研究表明, 简单但包含关键因素的元胞自动机模型完全可以抓住复杂系统的本质特征[32]. 为了研究火灾中人员逃生这种特殊现象, 基本模型规则的制定应尽量遵循基本、简单和必要性原则. 通过分析火灾对人员逃生的影响, 可以认为人员在火灾中的逃生过程主要受两个方面因素的影响: 一是主观因素, 包括人员对周围环境的认识(如各个出口位置分布、各处人员密度大小等)、人员对火灾发生位置和危险程度的认识等等. 二是客观因素, 包括人员逃生能达到的最大速度、人员的视力范围及障碍物的存在对人员逃生的影响等等. 此外, 主、客观因素之间是相互影响、相互作用的, 例如由于火灾产生的烟气浓度增大会导致人员对周围环境的认识受到限制, 而由于从众心理作用会使得各个出口处的人员分布极不均匀导致人员能达到的最大速度下降.

1.1 模型的基本假设

元胞自动机是在均匀一致的网格上由有限状态的变量(或称元胞)构成的离散的动力系统. 其运行规则主要有: 所有元胞的状态是同时发生变化的. 同时, 在时刻 $t+1$ 的第 i 个元胞的状态是由时刻 t 的第 i 个元胞以及相邻的距离不超过 r 的 $2r$ 个元胞的状态决定的.

本文建立模型的基本思路是: 将所研究的二维空间进行均匀的网格划分, 每个格点(元胞)为空或被一个人员占据. 每个人员另外附带一个与建筑物空间大小一致的网格, 该网格每个格点的值代表该人员对建筑物各处危险度的认识, 我们称之为“总危险度图”(包括“位置危险度”和“火灾危险度”). 需要指出的是每个人员的“总危险度图”仅代表该人员在当前时间步对周围环境的认识, 所以各个人员之间的“总危险度图”可以不同, 并且每个人员的“总危险度图”可以随时间而更改.

模型中每个元胞对应 0.40 m × 0.40 m 的空间, 这是在密集人流中典型的人员空间分配[25](另外一种常用的标准[24]是 0.457 m × 0.457 m). 另据观察发现, 人在松懈的情况下速度约为 0.85 m·s^{-1}, 正常情况下为 1.30 m·s^{-1} 左右, 而紧张情况下可达 1.80 m·s^{-1} 左右[16]. 因为模型中所有人员是并行变更位置的, 这样就引入了反应时间问题, 如果规定每个时间步每个人员只能移动一格, 则紧急情况下每个时间步为 0.40/1.80≈0.22 s.

火灾场景的引入主要是考虑: (ⅰ) 当人员发现某处发生火灾时, 则该处及周围格点的危险度随之增大. (ⅱ) 由于火灾的存在, 在其影响区域内的人员在运动速度和视力范围等方面会受到相应的影响. 人员运动方向的选择主要是根据“总危险度图”来进行的, 总的原则是: 逃生的人员总是尽可能以最快的速度往最安全的地方运动.

1.2 基本模型的规则

本文的模型分为基本模型和扩展模型两种, 基本模型主要有 3 个并行变更阶段. 第 1 个阶段是目标格点的选择, 每个人员在本身所在格点及相邻的 4 个格点中(即不包括对角线运动)根据自己的“总危险度图”选择一个空的、危险度最低的格点作为运动的目标格点. “总危险度”的确定方法如下: 首先确定“位置危险度”, 即将房间内所有格点按其到出口的距离划分等级. 对“火灾危险度”的确定则是以火源处为危险等级最高点, 距火源越远等级越低. 为简单起见, 基本模型中“总危险度”只包括“位置危险度”而不包括“火灾危险度”, “火灾危险度”则在扩展模型中考虑. 第 2 个阶段的目的是解决冲突, 所有人员按第 1 阶段变更之后, 如果进入某个格点的人数大于 0, 则按每人相同的概率选择一位留下, 其余回到原位, 这样做主要是为了模拟现实情况下的人员运动的不确定性. 用这种方法解决冲突还有一个作用就是较密集的地方由于竞争增大必然会有更多的人员不能移动, 这就模拟了人员之间推挤而导致前进困难的情况. 这两个阶段就完成了该时间步的人员位置变更. 最后一个阶段主要是对“总危险度图”进行变更, 根据各人员对周围环境的重新认识变更各自的“总危险度图”. 具体的程序运行流程如下: 对所在的房间进行均匀网格划分, 随机分布房间内人员, 确定每个人员各自的“总危险度图”. 在每一个离散的时间步, 所有人员由以下规则更新状态:

(ⅰ) 对每个被人员占据的元胞, 比较其与周围 4 个元胞(除去被其他人员占据的元胞)的总危险度大小, 选择危险度最小者作为要进入的目标元胞, 并将目标元胞的进入人数增加 1; 全部结束后转到(ⅱ).

(ⅱ) 判断每个元胞的进入人数 n, 若其值大于 0, 则按均等机会原则选择其中一位留下, 其余元胞在本时间步不做移动; 到这里实现了所有元胞状态(即是否被人员占据)的变更; 全部结束后转到(ⅲ).

(ⅲ) 分析每个新位置上人员的“总危险度图”, 若因为发现更优出口而需要改变路线, 则调整其“总危险度图”, 将新出口作为危险等级最低点, 在扩展模型中还要考虑根据火灾场景来调整其“总危险度图”; 全部结束之后重新转到(ⅰ), 进行下一时间步的变更.

1.3 模型的扩展

扩展模型是在基本模型的基础上根据需要进行改进的. 主要包括以下几个方面: (ⅰ) 为了模拟人员的智能加入“视野”的概念(见图 1, (a)和(b)中的阴影部分分别是视野为 1 和 2 时中间位置元胞所看到的范围), 随着人员视野的扩大, 其对当前时间步运动方向的确定就可以按照下一时间步的最优选择来进行. 此外, 视野还可以用来模拟人员在火灾中由于烟气存在而导致的视力范围缩小等问题. (ⅱ) 为了模拟人员绕过障碍物的运动, 可以将障碍物看作固定的“危险源”, 其周围的危险度相应增大. (ⅲ) 为了模拟火灾中不同类型人员的运动特点, 将运动速度分为两个(或以上)的等级. 此外, 速度等级变化还可以用来研究火灾场景对人员生理机能的伤害而引起的运动速度下降问题. (ⅳ) 另外, 可以通过数据收集和问卷调查的方式收集实际生活中人员在火灾中的各种反应数据并将其加入到模型当中. 例如在接收到火灾信息后的反应(因为人从接收信息到做出逃生决定之间有个反应时间, 不同的人反应时间也会不同). 在对出口不明的情况下是如何选择逃生路线的(如跟随多数人运动还是往人少的地方运动等), 以及人在有毒烟气中停留时间与其生理上受到的伤害之间的关系等等, 这些因素的考虑可以使模型更真实地模拟火灾人员逃生情况.

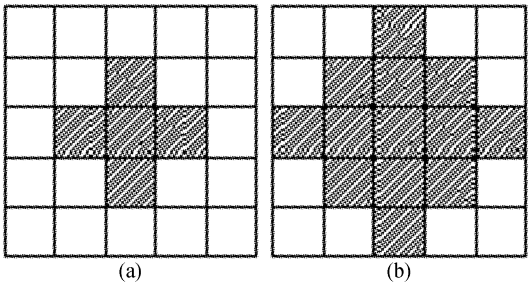


图 1 元胞视野示意图

2 模拟算例

下面给出用基本模型和扩展模型模拟的大房间内人员疏散的一些典型结果.

2.1 基本模型的算例

图 2 是用基本模型模拟一个大房间(只有一个出口)内人员疏散的情况, 为了和已有的模型进行比较, 这里暂时不考虑火灾场景的作用, 即“总危险度图”只与建筑物的位置有关, 并且认为各个人员对周围地理环境的认识都是正确的并且不随时间变化. 这样每个人员的“总危险度图”都是一样的, 即危险度

以门口为中心呈辐射状衰减, 门口处的元胞危险等级最低, 而离门口最远的两个角落上的元胞危险等级最高. 整个房间被划分成 30×30 的网格, 其中黑色格点代表该元胞位置上有人. 图中给出的分别是疏散过程中的3个典型阶段, (a)~(c)分别为初始时刻、第 15 个时间步和第 80 个时间步时的人员分步情况图. 通过与文献[24, 26]的比较, 可以看出本文模型可以很好地模拟这种简单的情况.

2.2 扩展模型的算例

为了验证扩展模型的应用能力, 模拟了扩展视野之后的大房间内人员疏散的情况. 图 3 是在算例 1 的基础上将视野范围改为图 1(b)所示情况后的人员疏散情况(初始条件和“总危险度图”的确定都相同). 图 3(a)~(c)分别为第 15, 50 和 80 个时间步时人员的分布情况, 比较图 2(c)与 3(c)可以看出, 由于扩展了视野, 人们能够看到更广的范围从而进行更合理的路线选择(因为从人们的常识以及与文献[24, 26]的比较来看, 图 3 中的人员分布情况更合理一些). 同样这种情况也可以用来解释人员在火灾中由于烟气存在而导致的视力下降现象, 即将算例 1 解释为烟气浓度更大时的人员疏散过程.

从本算例可以看出, 引入“视野”概念的确可以解决真实火灾场景中的一些特殊现象. 此外, 该扩展模型还可以用来模拟由于烟气对人们视力的影响或其他原因导致的不同出口处人员分布不均匀而导致逃生效率降低的情况. 另外, 其他的扩展模拟同样可以用来研究实际逃生过程的特殊现象, 例如考虑不同速度等级的人员分配可以研究长走廊中由于局部加宽而引起的逃生效率变化问题.

算例3是在算例2的基础上加入了火灾场景后的人员逃生情况, 这里简单地认为火源及其影响区域不随时间变化, 并只考虑火灾场景对人员心理的作用(对人员逃生路线的影响), 暂时不考虑有毒烟气对人员生理机能(包括期望速度和视力等)的影响. 对于火灾场景的危险度我们是这样考虑的: 在火灾影响区域内, *TD*(总危险度)等于 *PD*(位置危险度)与 *FD*(火灾危险度)的线性和, 通过对模型的演算, 发现当 *FD* 与 *PD* 的系数比为 10 左右时模拟效果比较好, 因此在该算例中选择系数比为 10. 真实火灾中对于不同的人(其对火灾危险度认识不一致)以及不同危险程度的火灾, 这个系数比是不同的, 需要通过相应的数

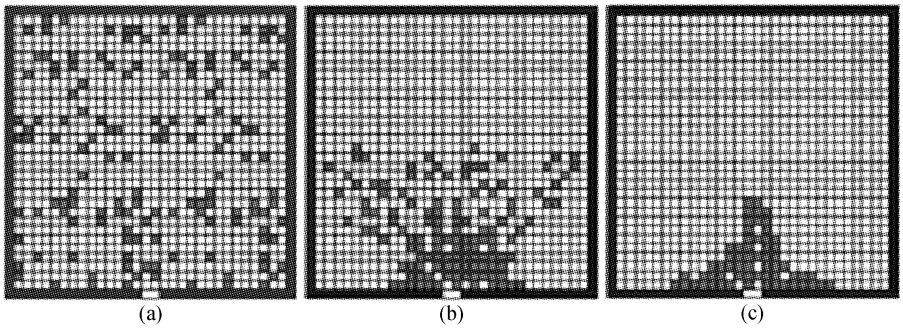


图 2 基本模型模拟的大房间人员疏散示意图

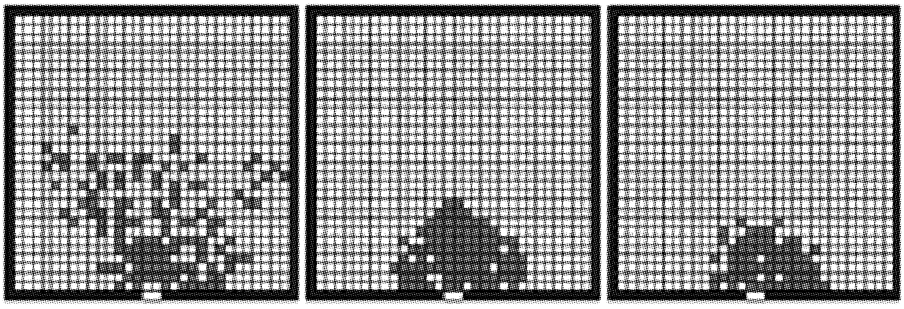
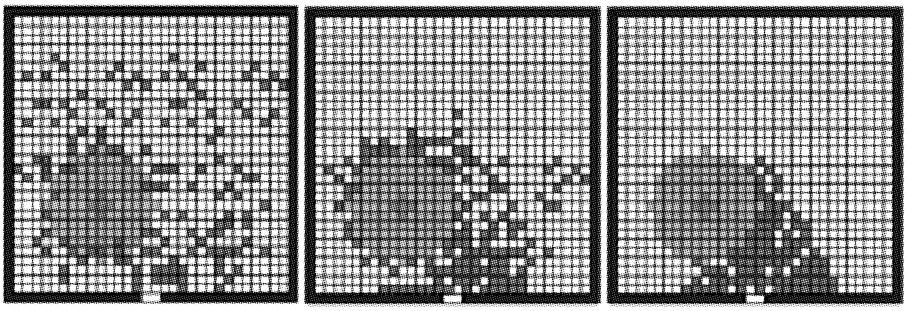


图 3 扩展模型(增大视野)模拟的大房间人员疏散示意图



(a) (b) (c)

图 4 扩展模型模拟的发生火灾大房间内人员逃生示意图

据调查获得. 这里为了简单起见, 认为所有人员对房间和火灾的认识都是完整的, 并且不随时间变化. 这样每个人员的“总危险度图”由“火灾危险度图”和“位置危险度图”叠加而成, “火灾危险度图”是以火源为危险等级最高点呈辐射状衰减, 并有一定的影响范围, “位置危险度图”同算例 1 和 2. 最终“总危险度图”中, 火源处危险等级最高. 图 4 同样给出了逃生过程的 3 个典型阶段. 图 4(a)~(c)分别是第 5, 15 和 50 个时间步时人员分布情况(圆形阴影部分为火源(十字形区域)及其影响区域), 可以看出由于火灾场景的加入使得该处的危险度急剧升高, 人们相应地改变了逃生路线, 绕过了火灾影响区域.

3 结束语

本文简单介绍了元胞自动机及其在交通流和行人流中的应用, 从中可以看出元胞自动机具有很强的模拟复杂物理现象的能力, 其在火灾人员逃生模型的应用前景也是很诱人的. 尽管如此, 据作者所知, 目前利用元胞自动机来专门研究火灾中人员逃生现象的模型鲜见报道, 其主要原因在于火灾这种现象本身的复杂性加上目前对元胞自动机行人流模型的研究还未成熟, 使得这方面的工作开展得较慢.

研究火灾中人员逃生现象, 建立一个合理、有效的模型是目前火灾研究工作的重点之一. 为了研究和揭示这种复杂现象的基本规律, 在本文中尝试将元胞自动机的研究方法与火灾中特有的现象结合起来, 提出了一个适用于火灾这种特殊场景下的人员逃生基本模型. 其特点在于: 引入“总危险度图”的概念, 使得模型在确定火灾中人员逃生路线方面更加合理、方便, 并且简单地反映了火灾场景对人员主观方面的影响. 基本模型力求包括一些基本的、必要的因素, 使模型尽量简单清晰. 在此基础上发展的扩展模型则考虑真实情况下的各种特殊现象, 通过增加一些特定的因素和规则来模拟人员的智能性以及火灾场景的作用等.

文中算例模拟了大房间内人员疏散的一些简单、基本现象以及火灾人员逃生中的一些特殊现象, 例如通过改变“视野”来模拟诸如由烟气引起的视力范围缩小、引入火灾场景的危险度来模拟火灾对人员心理的影响等问题. 从这些算例可以看出, 通过该模型对一些简单规则的制定, 可以较好地再现火灾人员逃生中的一些基本动态行为, 充分体现了本文所建模型在研究火灾人员逃生各种复杂现象方面较强的模拟能力. 但由于真实火灾会随时间而衰减(火源)和蔓延, 而且很多情况下人们在火灾中不可避免地会受到生理伤害(被火灼烧或吸入有毒烟气)从而影响其生理机能(运动速度和视力等), 这样, 火灾中人员的逃生情况就会不同于一般的人员疏散, 如果得出火灾衰减和蔓延规律以及烟气对人影响的规律, 并将其应用到该模型中就可以更精确地模拟真实火灾的人员疏散情形.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 50006012)和国家重点基础研究专项经费(批准号: 2001CB409600)资助项目及高水平大学建设项目.

参 考 文 献

1 von Neumann J, Burks A W. Theory of Self-Reproducing Automata. Urbana: University of Illinois Press, 1966

2 Wolfram S. Theory and Applications of Cellular Automata. Singapore: World Scientific, 1986
3 Wolfram S. Cellular Automata and Complexity. Baltimore: Addison-Wesley Publishing Company, 1994
4 谢惠民. 复杂性与动力系统. 上海: 上海科技教育出版社, 1994
5 张本祥, 孙博文. 社会科学非线性方法论. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 1997
6 Kai N, Michael S. A cellular automaton model for freeway traffic. J Phys I, 1992, 2(12): 2221~2229
7 Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed. J Phys Soc Jpn, 1996, 65(6): 1868~1870
8 Rickert M, Nagel K, Schreckenberg M, et al. Two-lane traffic simulations using cellular automata. Physica A, 1996, 231(4): 534~550
9 Simon P M, Gutowitz H A. Cellular automaton model for bi-directional traffic. Physical Review E, 1998, 57(2): 2441~2444
10 Wolfman D. Cellular automata for traffic simulations. Physica A, 1999, 263(1-4): 438~451
11 Sasvari M, Kertesz J. Cellular automata models of single lane traffic. Physical Review E, 1997, 56(4): 4104~4110
12 Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and dynamical transition in traffic-flow models. Physical Review A, 1992, 46(10): 6124~6127
13 Chowdhury A D, Schadschneider A. Self-organization of traffic jams in cities: effects of stochastic dynamics and signal periods. Physical Review E: Rapid Communications (AIP, USA), 1999, 59(2): 1311~1314
14 Special Report 209: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D C, 1985. Chapter 13
15 Blue V J, Adler J L. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation. Transportation Research Record, 1998, 1644: 29~36
16 Blue V J, Adler J L. Bi-directional emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation. In: Ceder A, ed. Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, 1999. 235~254
17 Blue V J, Adler J L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. Forthcoming in Transportation Research B-METH, 2001, 35(3): 293~312
18 Blue V J, Adler J L. Modeling four-directional pedestrian flows. In: Proceedings of the 79th Transportation Research Board. Washington D C, 2000
19 Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282~4286
20 Virkler M R, Elayadath S. Pedestrian speed-flow-density relationships. Transportation Research Record, 1994, 1438: 51~58
21 Lovas G G. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. Transportation Research B, 1994, 28(6): 429~443
22 AlGadhi S, Mahmassani H. Simulation of crowd behavior and movement: fundamental relations and application. Transportation Research Record, 1991, 1320: 260~268
23 Helbing D, Farkas L, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. Nature, 2000, 407(28): 487~490
24 Special Report 209: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D C, 1994
25 Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. Physica A, 2001, 295(3-4): 507~525
26 Levin B C, Braun E, Navarro M, et al. Further development of the n-gas mathematical model——an approach for predicting the toxic potency of complex combustion mixtures. American Chemical Society, 1995, 599: 293~311
27 Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A review of the methodologies used in evacuation modeling. Fire and Materials, 1999, 23(6): 383~388
28 Ashe B, Shields T J. Analysis and modelling of the unannounced evacuation of a large retail store. Fire and Materials, 1999, 23(6): 333~336
29 Hartzell G E. Engineering analysis of hazards to life safety in fires: the fire effluent toxicity component. Safety Science, 2001, 38(2): 147~155
30 Sekizawa A, Ebihara M, Notakeet H, et al. Occupants' behaviour in response to the high-rise apartments fire in Hiroshima city. Fire and Materials, 1999, 23(6): 297~303
31 Ozel F. Time press and stress as a factor during emergency egress. Safety Science, 2001, 38(2): 95~107
32 Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality. Nature, 1996, 383(6603): 772~773

(2002-01-31 收稿, 2002-04-16 收修改稿)