

拥堵疏散的行人拥挤力仿真研究

张磊 岳昊 李梅 王帅 米雪玉

Simulation of pedestrian push-force in evacuation with congestion

Zhang Lei Yue Hao Li Mei Wang Shuai Mi Xue-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 060505 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.060505

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060505>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维空间行人疏散的元胞自动机模型

[A cellular automata model of pedestrian evacuation in three-dimensional space](#)

物理学报.2014, 63(8): 080507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.080507>

交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究

[Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection](#)

物理学报.2014, 63(1): 010508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.010508>

基于动态地场和元胞自动机的自行车流建模

[Modeling of bicycle flow based on dynamic floor field and cellular automata](#)

物理学报.2013, 62(24): 240511 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.240511>

机动车协商模型与分岔特性研究

[Vehicle negotiation model and bifurcation dynamic characteristics research](#)

物理学报.2013, 62(21): 210507 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210507>

有应急车辆影响的多车道交通流元胞自动机模型

[Cellular automaton simulation of multi-lane traffic flow including emergency vehicle](#)

物理学报.2013, 62(6): 060501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060501>

拥堵疏散的行人拥挤力仿真研究*

张磊¹⁾ 岳昊^{1)†} 李梅¹⁾ 王帅¹⁾ 米雪玉¹⁾²⁾

1) (北京交通大学, 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

2) (河北联合大学建筑工程学院, 唐山 063009)

(2014年7月17日收到; 2014年10月22日收到修改稿)

基于元胞自动机仿真研究拥堵疏散条件下行人拥挤力的产生、传递、吸收、抵消、累积等过程, 以安全出口前拱形的拥挤疏散人流为研究对象, 研究拥挤致伤的生成机理. 基于行人位置距安全出口的距离, 生成趋于安全出口方向的拥挤力; 引入拥挤力效果与合力参数, 分别描述外界拥挤力对个体行人的作用效果与作用合力; 引入吸收系数与抗死伤系数, 分别描述拥挤力传递过程中行人对外界拥挤力的吸收与抵抗能力. 研究表明, 随吸收系数或抗死伤系数的增加, 能有效预防疏散人流的拥挤致伤; 存在临界吸收系数与抗死伤系数, 将系统区分为弱保护相位、强保护相位和完全保护相位; 拥挤的死伤数量随疏散行人数量的增加而增加; 而且, 拥挤致伤的危险区域在安全出口前以安全出口中心线为对称轴呈“倒钟”形分布.

关键词: 疏散人流, 拥挤力, 吸收系数, 抗死伤系数

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.64.060505

1 引言

密集行人疏散过程中由于拥挤诱发的致伤事件, 严重威胁行人的生命安全. 疏散人流的拥挤致伤, 具有行人竞争安全出口空间、个体之间相互推挤、受伤倒地踩踏等特征, 是交通流和颗粒流领域研究的热点. 因此, 拥挤致伤的形成机理是行人拥挤踩踏预防、步行设施设计以及疏散组织管理的基础理论之一. 基于行人微观行为特征的仿真技术, 已成为探索研究疏散人流拥挤状态下宏观行为特征的主要手段.

对疏散人流的仿真研究主要包括正常行人疏散和恐慌拥挤疏散. 正常行人疏散研究的内容包括: 安全出口数量、位置^[1,2]及系统内部布局^[3]对疏散效率的影响; 行人初始布局不平衡^[4]、行人视线受影响^[5]和亲属效应等^[6]不同因素下的疏散过程. 恐慌拥挤疏散研究的主要内容为行人因恐慌

拥挤导致移动受影响和发生伤害的情况^[7-16]. 在拥挤疏散的行人作用力仿真方面, 主要采用社会力模型^[7,8]和元胞自动机模型^[9-16]模拟仿真行人个体之间、行人与周边环境之间的相互作用力及其对行人个体行为和群体疏散安全的影响. 社会力模型^[7,8]属于空间连续模型, 通过引入行人之间身体接触时产生的摩擦力和挤压力, 刻画了拥挤人流的“瓶颈拱形拥堵”, “快即是慢”等现象. 而元胞自动机模型基于离散空间, 仿真行人移动过程中的相互作用力. 文献^[9, 10]将行人占据的单格元胞扩展为可重叠的多格元胞, 并量化了行人与行人之间、行人与建筑物之间摩擦力、排斥力的大小和方向; 文献^[11]基于社会力模型的排斥力, 建立了作用力驱动的元胞自动机模型, 通过对排斥力的比较, 判断确定疏散行人的运动方向; 文献^[12]描述了疏散过程中相互作用力的可叠加性, 根据疏散行人运动方向上被占据的格子数量和位置计算拥挤力; 文献^[13, 14]引入了行人之间的排斥力, 并利用静态

* 教育部基本科研业务费专项基金(批准号: 2013JBM046)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB725400)、国家自然科学基金(批准号: 11172035, 51338008)和北京城市交通协同创新中心资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuehao@bjtu.edu.cn

领域和动态领域实时地调整行人的移动概率,实现对同一个目标位置的竞争;文献[15]引入动态粒子场描述疏散过程中的作用力,并通过含运动方向的矢量粒子描述对疏散行人施加作用力的大小与方向;文献[16]引入环境势场、移动势场和等待势场描述疏散行人之间的相互作用力,刻画了疏散行人双向移动和瓶颈处的“震荡”现象。

在拥挤行人流的仿真研究中,模型着重分析行人之间的相互摩擦力和排斥力及其对拥挤行人流宏观特征和现象的影响,而对拥挤行人流之间拥挤力传递的吸收现象和累积效应,特别是由此导致的拥挤致伤生成机理的研究相对较少。

根据行人的密集程度,恐慌状态下的行人紧急疏散可分为三个状态:低密度的行人自由疏散状态,高密度的行人密集拥挤状态,行人拥挤踩踏状态。在低密度的行人自由疏散中,由于行人密度较低,形不成密集的拥堵区域,行人之间没有生成相互接触的拥挤力;在高密度的行人密集拥挤中,由于行人处于停滞的拥堵状态,行人之间相互接触且推搡严重,从而产生拥挤力,拥挤力的传递和累积容易导致拥挤死伤事件;当密集拥挤状态中发生行人倒地致伤等事件后,疏散行人进入拥挤踩踏状态,诱发更大的行人死伤。在行人自由疏散状态中,由于行人可以自由移动,研究重点为行人的移动规则与冲突规则;在行人密集拥堵状态中,由于行人处于密实的拥堵状态,移动速度为零,研究重点为行人间的相互拥挤力以及导致拥挤死伤的临界点;在行人拥挤踩踏状态中,由于拥挤致伤诱发行人踩踏,研究重点为发生倒地致伤事件后行人的移动规则和拥挤力惯性等。

为探索密集拥挤状态下行人拥挤力的作用机理,选取某一时刻安全出口前拱形的拥挤人群作为研究对象,着重分析研究行人拥挤力的产生、传递、吸收、抵消、累积等过程,以及导致拥挤致伤的临界点。拥挤行人在疏散过程中,会产生趋于安全出口方向的拥挤力,从而形成疏散行人之间的相互作用力。在拥挤力的传递过程中,个体行人由于自身形变以及与地面的静摩擦会产生对外界拥挤力的吸收现象;同时,传递的拥挤力会在疏散空间的特定区域形成累积效应,当行人受到的外界拥挤力超过自身承受的阈值后,行人将会倒地或被挤伤发生拥挤致伤事件,从而诱发拥挤踩踏事件。因此,为提高拥挤行人流的疏散安全,探索疏散行人流的拥挤

致伤生成机理,是疏散行人流仿真研究的热点和重点。实际的行人疏散由于步行设施空间特征、行人分布等原因,会存在局部空间内行人拥挤疏散的情况,存在导致拥挤致伤和诱发拥挤踩踏的隐患,因此,拥堵疏散的行人拥挤力仿真研究,有助于指导疏散行人流的管理、控制和诱导。

利用元胞自动机仿真模型,研究疏散行人流的拥挤致伤生成机理。基于行人位置距安全出口的距离,生成趋于安全出口方向的行人初始拥挤力;针对行人拥挤力传递过程中的吸收和抵消,以及拥挤力累积导致死伤的现象,引入拥挤力效果与合力参数,分别描述外界拥挤力对个体行人的作用效果与作用合力;引入吸收系数与抗死伤系数,分别描述拥挤力传递过程中行人对外界拥挤力的吸收与抵抗能力;以某一时刻安全出口前拥挤的拱形疏散行人流为研究对象,仿真研究拥挤致伤的生成机理。

2 模型

行人拥挤力仿真模型建立在二维元胞网格系统内,系统内每个元胞仅容纳一个行人,系统边界为疏散空间围墙与安全出口。当疏散空间内行人密度较低时,行人可通过换道或超越自由到达安全出口,此时行人之间不存在接触挤压的作用力,从而不会导致拥挤致伤现象。随着行人密度的增加,疏散瓶颈处会发生行人滞留和拥挤现象。由于拥挤行人周围没有可移动空间,以及趋于接近安全出口的心理,导致个体行人产生原地等待、推搡周围行人、排斥周围行人推挤等微观现象,从而导致拥挤行人之间产生相互作用的拥挤力,导致拥挤致伤现象。

2.1 拥挤力的产生

在拥挤行人疏散过程中,由于行人个体之间的差异,假设行人产生的初始拥挤力为 F_0 ,其取值范围为 $0-F_{\max}$, F_{\max} 是行人拥挤力的最大值;并假设墙壁不产生拥挤力,即墙壁的拥挤力 $F_0 = 0$ 。基于行人趋于接近安全出口和保持疏散方向的心理,假设行人 F_0 指向与其相邻的8个元胞中距安全出口距离最小的元胞位置,如图1所示。当行人周边存在多个相同的最小距离位置时,以相同的概率随机选取一个作为 F_0 的方向。基于行人流动态参数仿真模型[2],计算系统内元胞位置距安全出口的

距离:

$$S_{xy} = \begin{cases} \min_j(\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2}), \\ (x,y) \text{ 为行人移动位置,} \\ M, (x,y) \text{ 为疏散空间墙壁,} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_{xy} 为元胞位置 (x, y) 距安全出口的距离; (x_j, y_j) 为安全出口内第 j 个元胞; M 是一个很大的正数, 说明行人产生的 F_0 不会指向墙壁.

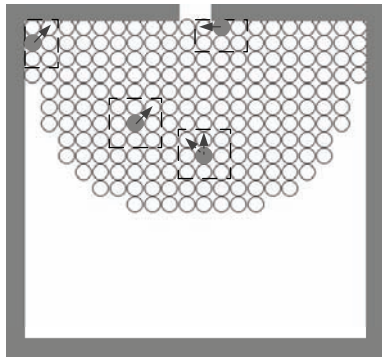


图1 行人产生初始拥挤力 F_0 的方向示意图 双箭头表示当行人周边存在两个相同的最小距离位置时, 以相同的概率随机选取一个作为 F_0 的方向

2.2 拥挤力传递

拥挤力 F_0 主要通过拥挤行人之间的相互接触进行传递. 由于地面对行人的静态摩擦、行人自身的弹性吸收以及拥挤力间的相互作用, 拥挤力在传递过程中产生吸收和抵消的现象. 拥挤力吸收现象是指拥挤力在传递过程中由于行人或墙壁的吸收, 作用力被中断传递的过程; 拥挤力抵消现象是指由于行人拥挤力存在方向性, 多个不同方向的拥挤力形成合力传递时, 会被彼此抵消并改变拥挤力的传递方向.

为描述拥挤力的传递过程, 引入吸收系数 α 、拥挤力效果 $\sum |F_i|$ 、拥挤力合力 $\sum F_i$ 三个参数. 吸收系数 α 描述行人对外界拥挤力的吸收能力, 即行人所能吸收的最大拥挤力. α 越大, 行人的吸收能力越强, 抵御拥挤失控的能力越强. α 的取值与行人的年龄、体重, 以及行人与地面的摩擦系数等因素相关. 例如, 同一个行人在相同的地面条件下, 穿高跟鞋的吸收系数要小于穿平底鞋的吸收系数. 拥挤力效果 $\sum |F_i|$ 属于标量值, 描述行人所受的外界拥挤力对行人产生的作用效果, 计算时采用外界拥挤力的标量之和; $\sum |F_i|$ 越大, 行人越容易失控或被挤伤. 拥挤力合力 $\sum F_i$ 属于矢量值, 描述

行人所受外界拥挤力彼此抵消后的合力, 计算时采用外界拥挤力的矢量之和. 行人拥挤力的传递规则为

$$F_{\text{out}} = \begin{cases} F_0, & \sum |F_i| \leq \alpha, \\ \sum_i F_i + F_0, & \sum |F_i| > \alpha, \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_i 为行人所受的外界拥挤力, F_0 为行人自身产生的初始拥挤力, F_{out} 为行人作为介质向外传递的拥挤力.

如果拥挤力传递的方向上为行人, 当外界拥挤力的 $\sum |F_i|$ 较小时, 行人将完全吸收外界拥挤力, 仅传递自身产生的对外拥挤力 F_0 ; 当外界拥挤力的 $\sum |F_i|$ 较大时, 行人失去对外界拥挤力的吸收能力, 充当拥挤力的传递介质, 自身产生的拥挤力 F_0 和所受的外界拥挤力 $\sum F_i$ 将被一起传递. 拥挤力传递的方向上为墙壁时, 由于墙壁对拥挤力传递的隔断效果, 假设墙壁对拥挤力能完全吸收, 即墙壁的 $\alpha = +\infty$. 拥挤力的传递过程如图 2 所示.

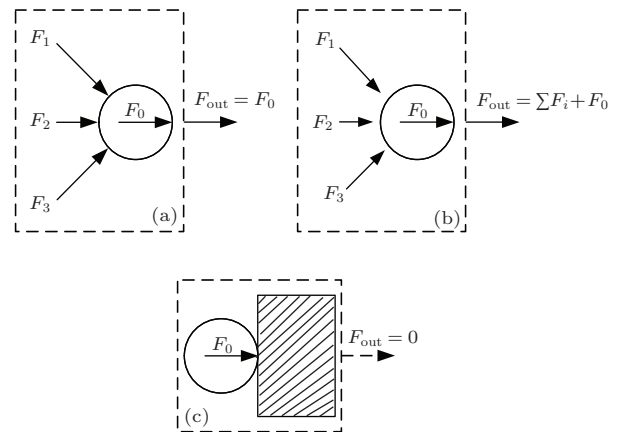


图2 行人拥挤力传递过程示意图 (a) 外界拥挤力被完全吸收; (b) 外界拥挤力未被吸收; (c) 外界拥挤力被墙壁完全吸收

在以行人作为传递介质向外传递 F_{out} 的过程中, 如 F_{out} 的作用力方向没有正对行人, 即作用力没有指向行人临近元胞的方向上时, 为描述拥挤力对行人的作用效果, 需将 F_{out} 作用于与其方向最临近的行人, 如图 3 所示. 即将 F_{out} 分解到偏离其方向最近的两个元胞位置上, 形成两个分解力 F_1 和 F_2 , 分解力的大小为

$$F_m = F_{\text{out}} (\cos \theta_m - \sin \theta_m) \quad m = 1, 2, \quad (3)$$

式中, F_m 是拥挤力 F_{out} 在 θ_m 方向上的分解力, θ_m 是 F_{out} 与临近元胞方向的夹角.

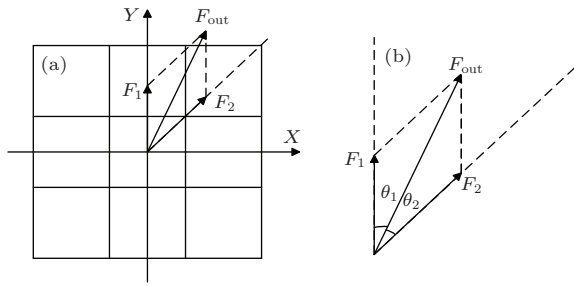


图3 拥挤力传递的分解过程示意图 (a) 行人受力坐标系; (b) 拥挤力分解

2.3 拥挤致伤

为再现疏散行人的拥挤致伤现象, 引入抗死伤系数 β , 描述行人对外界拥挤力的抵抗能力, 即行人在外界拥挤力的作用下是否倒地与挤伤的临界值. β 与行人的体质、健康程度、年龄等密切相关, 代表了行人抗挤压的最大限度和承受拥挤力的最大极限. β 越大, 行人倒地或受伤之前所能承受的拥挤力越大. 当行人所受外界拥挤力的 $\sum |F_i| \geq \beta$ 时, 拥挤力效果超过行人承受极限, 如果作用力方向为空格, 行人将会倒地; 如果作用力方向没有空格, 行人将会被挤伤, 从而导致拥挤致伤现象.

拥挤力传递过程中, 行人吸收和传递拥挤力以及拥挤死伤的规则为: $0 < \sum |F_i| \leq \alpha$ 时, 外界拥挤力被行人完全吸收; $\alpha < \sum |F_i| \leq \beta$ 时, 行人作为介质传递拥挤力; $\beta < \sum |F_i|$ 时, 行人死伤, 导致拥挤致伤.

2.4 仿真规则

在计算某一时刻的拥挤力效果 $\sum |F_i|$ 时, 由于行人产生的拥挤力方向趋于安全出口, 因此基于行人距安全出口的距离, 从距安全出口最远的行人开始, 逐步依次计算. 在行人拥挤力吸收过程中, 引入吸收反作用力 F^{-1} ; 在拥挤力 F_{out} 传递过程中, 引入 F_{out} 的拥挤反作用力 F_{out}^{-1} . 在拥挤力吸收或传递过程中, 通过反作用力 F^{-1} 和 F_{out}^{-1} 使行人所受合力等于零, 此时行人处于平衡状态, 速度等于零; 当所有行人处于平衡状态后, 统计计算行人的 $\sum |F_i|$. 模型仿真规则如下.

1) 行人编号. 基于 S_{xy} 的大小降序排序, 并给行人依次编号. 即

$$\{1, 2, 3, \dots, n, n+1, \dots, \text{sum}\} \\ = \text{order}(S_{xy}, \text{DESC}), \quad (4)$$

式中, n 为行人编号, sum 为行人数量; 距安全出口最远的行人编号为 1, 最近的行人编号为 sum ; DESC 说明为降序排序.

2) 初始化. 确定每个行人的 F_0 . F_0 服从 $[0, F_m]$ 的均匀分布, 即

$$F_0 \sim U[0, F_{\max}]. \quad (5)$$

3) 拥挤力传递. 从 $n = 1, n \rightarrow n + 1$, 依次传递外界拥挤力.

① 拥挤力的累积. 统计行人所受的外界拥挤力, 并计算 $\sum |F_i|$ 和 $\sum F_i$.

② 拥挤力的传递. 基于 (2) 式计算向外传递的拥挤力 F_{out} , 并引入和计算拥挤反作用力 F_{out}^{-1} 和吸收反作用力 F^{-1} , 即

$$\begin{cases} F_{out}^{-1} = -F_0, & F^{-1} = -\sum_i F_i, \\ \sum |F_i| \leq \alpha, \\ F_{out}^{-1} = -\left(\sum_i F_i + F_0\right), & F^{-1} = 0, \\ \sum |F_i| > \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

行人向外传递拥挤力时, 产生共生的 F_{out}^{-1} 和 F^{-1} , 使行人合力等于零, 实现行人拥挤力的传递或吸收. 即,

$$F_{out}^{-1} + F^{-1} + \sum_i F_i + F_0 = 0. \quad (7)$$

③ 拥挤力的分解. 基于 (3) 式计算临近元胞所受的拥挤力 F_1 和 F_2 .

④ 拥挤力的传递终止. 当所有行人的合力等于零时, 行人处于拥挤力与反作用力 F_{out}^{-1} 和 F^{-1} 相互抵消的平衡状态, 行人产生的初始拥挤力 F_0 被传递或吸收. 拥挤力传递终止.

4) 行人致伤统计. 当所有行人处于平衡状态时, 基于自身的 α, β 和 $\sum |F_i|$, 统计计算行人致伤情况. 即

$$S(x, y) = \begin{cases} A \text{ 吸收拥挤力,} & 0 < \sum |F_i| \leq \alpha, \\ T \text{ 传递拥挤力,} & \alpha < \sum |F_i| \leq \beta, \\ D \text{ 拥挤致伤,} & \beta < \sum |F_i|, \end{cases} \quad (8)$$

式中, $S(x, y)$ 为行人 (x, y) 的状态.

模型仿真的流程如图 4 所示.

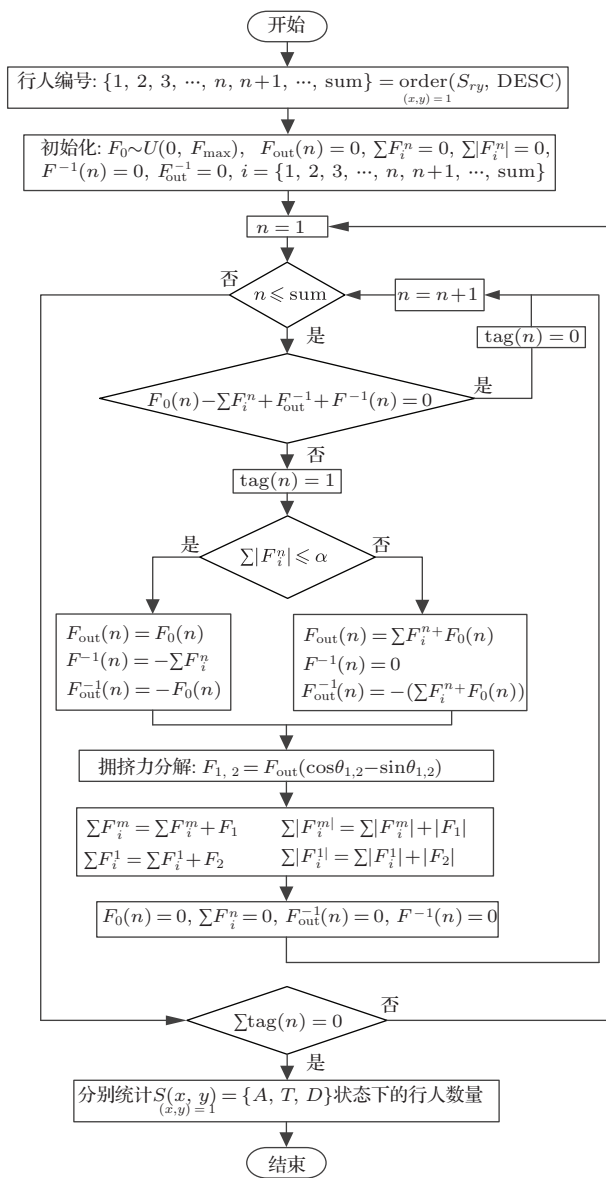


图4 模型仿真流程图

3 仿真分析

在紧急恐慌状态下的拥挤疏散行人流，往往会在安全出口前产生人群成拱现象^[7]。在仿真研究中，疏散空间的大小为 20×20 元胞，安全出口布置在墙壁中间，行人以安全出口为中心形成拱形，如图5所示。行人初始拥挤力 F_0 的大小，在 $0 - F_{max}$ 之间随机取值。为便于描述拥挤力的作用过程和机理，假定 $F_{max} = 100$ 单位， α 取值 $0 - 300$ 单位， β 取值 $0 - 2000$ 单位，且 $\beta > \alpha$ 。 F_{max} , α , β 取值单位的标定根据实际情况确定。 N 为安全出口前组成拱形的行人数量， L 为安全出口的宽度。 N_a , N_t , N_d ，分别为某一时刻系统内吸收拥挤力、传递拥挤力、

拥挤致伤的行人数量。 P_d 为某一时刻系统内拥挤致伤人数与系统内行人数量 N 的比值。为减少仿真初始状态对各项统计指标的影响，每项统计指标分别取 10 次运行指标的平均值。

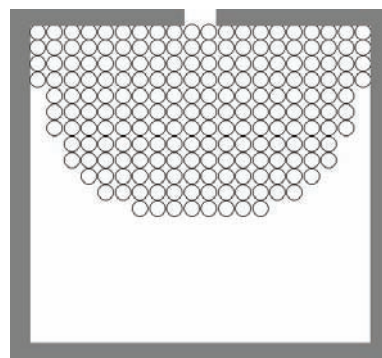


图5 安全出口前拥挤疏散行人流的人群成拱现象

图6显示了 $N = 200$, $L = 2$ 时吸收拥挤力行人数量 N_a 、传递拥挤力与拥挤致伤的行人数量之和 $N_t + N_d$ 随吸收系数 α 的变化曲线。图7显示了 $N = 200$, $L = 2$ 时拥挤致伤的行人数量 N_d 、传递拥挤力与拥挤致伤的行人数量之和 $N_t + N_d$ 随抗死伤系数 β 的变化曲线。

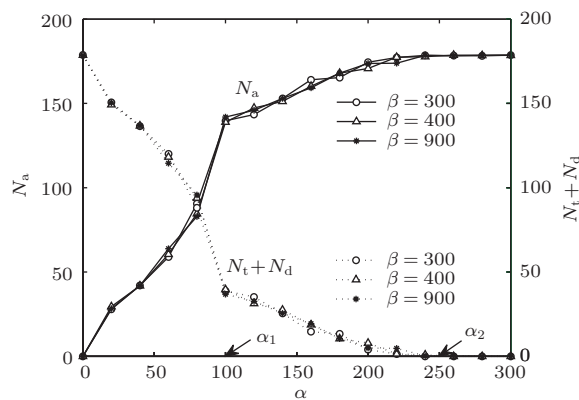


图6 $N = 200$, $L = 2$ 时吸收拥挤力行人数量 N_a 、传递拥挤力与拥挤致伤行人数量 $N_t + N_d$ 随吸收系数 α 的变化

由图6可知，随着吸收系数 α 的增加，行人对拥挤力吸收能力增加，因此吸收拥挤力的行人数量 N_a 将增加，传递拥挤力与拥挤致伤行人数量之和 $N_t + N_d$ 将减少。 N_a 与 $N_t + N_d$ 随着 α 的增加，呈现一增一减的变化趋势，且不随抗死伤系数 β 的变化而变化。当 α 相对较小的情况下， $\alpha < \alpha_1$ 时，由于行人对传递力的吸收能力相对较弱，拥挤力传递累积效果明显，所以 N_a 和 $N_t + N_d$ 随 α 的变化趋势明显；当 α 相对较大的情况下， $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 时，

由于行人对传递力的吸收能力相对较强, 拥挤力传递累积效果减弱, 所以 N_a 和 $N_t + N_d$ 随 α 的变化趋势缓慢; 当 $\alpha > \alpha_2$ 时, 行人将会完全吸收拥挤力, 所以 N_a 趋于一个稳定值, 不随 α 的变化而变化, 如图 6 所示.

在吸收系数 α 固定的情况下, $N_t + N_d$ 将保持水平不变的状态, 这主要是由于吸收系数 α 决定了行人对拥挤力的吸收能力, 从而决定 N_a 和 $N_t + N_d$. 在 $N_t + N_d$ 确定的情况下, N_d 将由抗死伤系数 β 决定; 随着 β 的增加, 行人在固定的外界拥挤力作用下, 抗死伤的能力增强, 因此拥挤致伤人数随着 β 的增加而逐渐减少, 并逐渐趋于零, 如图 7 所示.

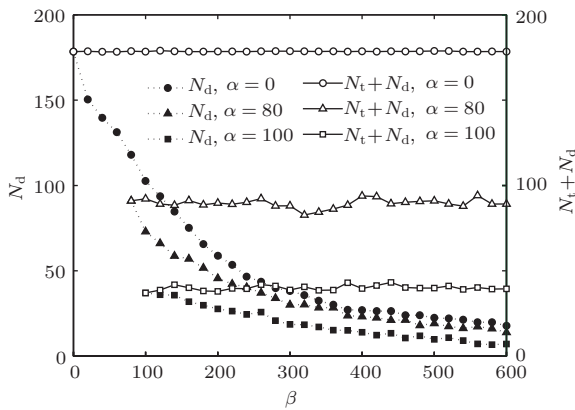


图 7 $N = 200, L = 2$ 时拥挤致伤行人数量 N_d 、传递拥挤力与拥挤致伤行人数量 $N_t + N_d$ 随抗死伤系数 β 的变化

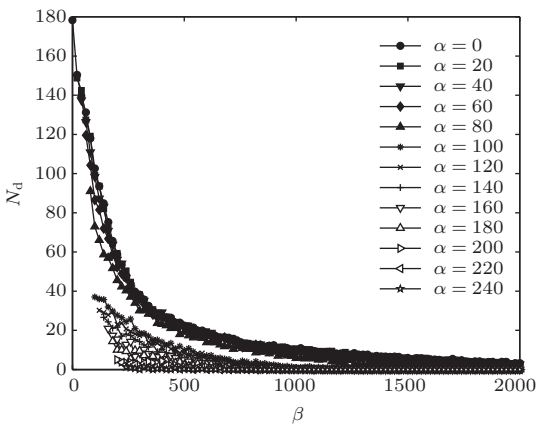


图 8 $N = 200, L = 2$ 时不同吸收系数 α 的拥挤致伤人数 N_d 随抗死伤系数 β 的变化

图 8 显示了 $N = 200, L = 2$ 时不同吸收系数 α 的拥挤致伤人数 N_d 随抗死伤系数 β 的变化曲线; 图 9 显示了 $N = 200, L = 2$ 时不同抗死伤系数 β 的拥挤致伤人数 N_d 随吸收系数 α 的变化曲线.

由图 8 可知, N_d 随着 β 的变化曲线分为两簇,

密集曲线簇和分散曲线簇, 即存在临界吸收系数 α_1 . 当 $\alpha < \alpha_1$ 时, N_d 变化曲线相对集中, 随 β 增加的递减幅度相对较小; 当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 时, N_d 曲线相对分散, 随 β 增加的递减幅度相对较大. 由于 α 值相对较小时, 行人对拥挤力的吸收能力相对较弱, 拥挤力传递累积效果明显, α 的增长不能有效阻止拥挤力的传递, 因此 N_d 变化曲线随 β 的变化相对集中. 随着 α 值的增加, 行人对拥挤力的吸收能力增强, 拥挤力传递累积效果明显减弱, α 的增长能有效阻止拥挤力的传递, 因此 N_d 变化曲线随 β 的变化相对分散.

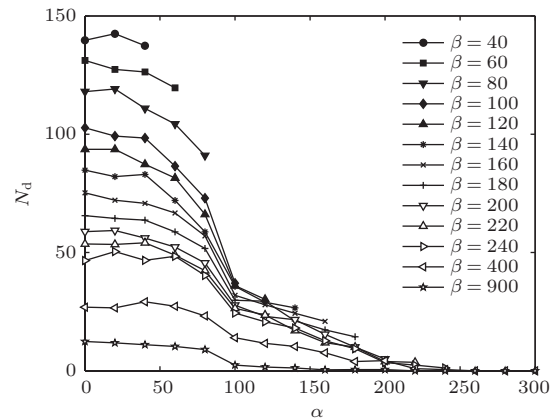


图 9 $N = 200, L = 2$ 时不同抗死伤系数 β 的拥挤致伤人数 N_d 随吸收系数 α 的变化

由图 6 和图 9 可知, 系统存在临界吸收系数 α_2 , 当 $\alpha < \alpha_2$ 时, N_d 随着 α 或 β 的增加而减少; 当 $\alpha > \alpha_2$ 时, 拥挤力完全被吸收, 系统没有形成拥挤力的传递累积伤害, 所以拥挤致伤人数为 0, N_d 不随 α 或 β 的变化而变化. 由于在 α 固定的条件下, β 的增加提高了行人的抗死伤能力, 因此 β 的增加减少了 N_d ; 同时, 随着 α 的增加, 提高了行人对拥挤力吸收能力, 拥挤力的传递累积伤害被减少, 从而增加了 N_a , 因此 α 的增加减少了 N_d , 并趋于零.

综合图 6—图 9 可知, 系统存在两个临界吸收系数 α_1 和 α_2 , 以及一个临界抗死伤系数 β_c . 基于拥挤致伤人数 N_d 随吸收系数 α 和抗死伤系数 β 的变化, 以及 α 和 β 对拥挤疏散行人的保护作用, 系统可划分为三个相位: 弱保护相位、强保护相位、完全保护相位, 如图 10 所示. 当 $\alpha < \alpha_1$ 且 $\beta < \beta_c$ 时, 系统处于弱保护相位, α 对预防疏散行人流的拥挤致伤效果较弱; 当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 且 $\beta < \beta_c$ 时, 系统处于强保护相位, α 对预防疏散行人流的拥挤致伤效果较强; 当 $\alpha > \alpha_2$ 或 $\beta > \beta_c$ 时, 系统处于完全保

护相位: $\alpha > \alpha_2$ 时, 传递拥挤力被完全吸收, 不会对拥挤疏散行人造成伤害; $\beta > \beta_c$ 时, 拥挤力对行人的伤害被完全抵抗, 同样不会对拥挤疏散行人造成伤害; α 或 β 能完全有效地保护拥挤行人流的疏散安全, 不会发生拥挤致伤. 可见, 为预防疏散行人流的拥挤致伤, 在提高行人抗死伤系数的同时, 需增加行人的吸收系数, 增加行人对拥挤力的吸收能力.

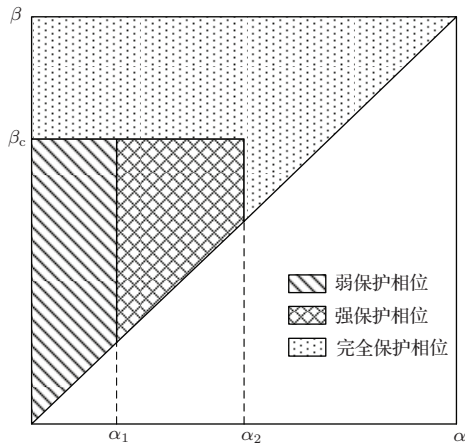


图 10 系统基于 α 和 β 的弱保护相位、强保护相位、完全保护相位示意图

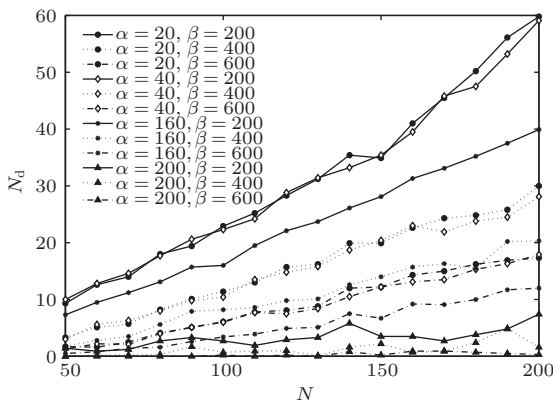


图 11 $L = 2$ 时拥挤致伤行人数量 N_d 随行人数量 N 的变化

图 11 和图 12 分别显示了 $L = 2$ 时拥挤致伤行人数量 N_d 和拥挤致伤行人比例 P_d 随行人数量 N 的变化曲线. 如图 11 和图 12 所示, 拥挤致伤行人数量 N_d 和拥挤致伤行人比例 P_d 随行人数量 N 的增加呈增长趋势. 由于随着行人数量的增加, 拥挤力的传递累积效果增加, 所以 N_d 和 P_d 增加. 因此为了预防疏散行人流的拥挤致伤, 需要控制系统内疏散行人的数量.

图 13 分别显示了 $N = 100, \alpha = 80, \beta = 300$ 和 $N = 200, \alpha = 120, \beta = 400$ 时疏散行人流拥挤

致伤的行人死伤分布情况. 拱形的疏散行人流发生拥挤致伤时, 死伤行人主要分布在安全出口的前方区域, 区域以安全出口中心线为对称轴呈倒钟形分布, 如图 14 所示. 由图 13 和图 14 可知, 靠近安全出口的前方区域是疏散行人流拥挤致伤的危​​险区域, 这主要是由于疏散行人流产生趋于安全出口方向的拥挤力, 并通过吸收、分解、传递等过程在该区域产生累积效果, 造成该区域内行人承受到较大的外界拥挤力, 所以死伤行人多集中在该区域.

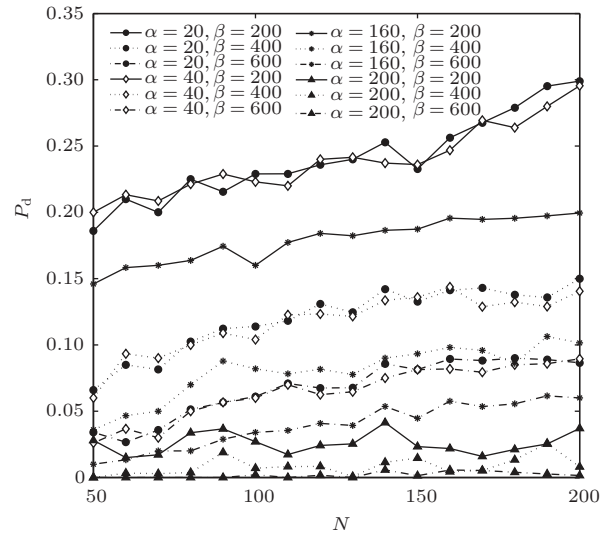


图 12 $L = 2$ 时拥挤致伤行人比例 P_d 随行人数量 N 的变化

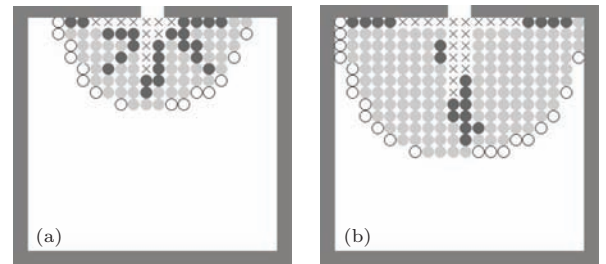


图 13 疏散行人流拥挤致伤的死伤行人分布示意图 (a) $N = 100, \alpha = 80, \beta = 300$; (b) $N = 200, \alpha = 120, \beta = 400$; 空心圆圈表示未受外界拥挤力行人, 浅色圆圈表示吸收拥挤力行人, 深色圆圈表示传递拥挤力行人, 叉号表示拥挤致伤行人

仿真模型主要包括三类参数: 属性参数、控制参数和状态参数. 属性参数主要描述个体行人的属性值, 包括最大拥挤力 F_{max} , 吸收系数 α 和抗死伤系数 β ; 控制参数主要描述预防拥挤致伤的控制变量和区分各相位的临界值, 包括行人数量 N , 吸收临界系数 α_1 和 α_2 , 抗死伤临界系数 β_c ; 状态参数主要描述模型仿真过程中的状态变量, 随着外界状

态的变化而变化, 包括拥挤力效果 $\sum |F_i|$, 拥挤力合力 $\sum F_i$, 传递拥挤力行人数量 N_t , 拥挤踩踏死伤的行人数量 N_d 等.



图 14 拱形疏散人流拥挤致伤时行人死伤危险区域的分布示意图

行人最大拥挤力 F_{\max} 描述了个体行人在拥堵恐慌疏散中产生的最大拥挤推力. 行人吸收系数 α 和抗死伤系数 β 分别描述了行人对外界拥挤力的吸收和抵抗能力, 在拥挤疏散中分别起到吸收削弱拥挤力和抵抗拥挤致伤的能力. 参数 F_{\max} , α 和 β 的取值不仅与行人的年龄、性别、种族、体重、健康程度等自身属性相关, 而且与行人与地面的摩擦力、楼梯上行、楼梯下行等疏散设施环境相关. 同时, 同一行人的 F_{\max} , α 和 β 取值之间存在一定的关联性. 在疏散空间内的隔离物、防护栏等设施也能起到吸收削弱拥挤力和抵抗拥挤致伤的作用, 因此也有其相应的 α 和 β , 但不会产生拥挤力, 即 $F_{\max} = 0$.

基于仿真分析和参数属性, 在恐慌的情况下, 预防行人拥挤致伤主要从疏散个体行人和空间环境两个方面提高行人的吸收系数 α 和抗死伤系数 β , 控制行人的疏散数量, 并设置相应的软硬防护设施. 因此, 为预防行人拥挤致伤, 首先增加行人或防护设施的吸收系数 α , 从而增加其对拥挤力的吸收能力, 降低拥挤力在传递过程中的累积效应; 其次, 增加行人或防护设施的抗死伤系数 β , 从而增加其在拥挤力传递累积过程中抵抗致伤倒地的能力, 有效减少诱发拥挤踩踏的机会. 可见, 通过增加行人的 α 或 β , 将拥挤的行人疏散从容易导致拥挤致伤的弱保护状态增强到不发生拥挤致伤的完全保护状态. 降低和控制拥堵疏散行人的数量, 能有效减少和控制行人拥挤力的累积作用, 从而起到减少拥挤致伤的效果. 在疏散空间设置软硬防护设施时, 可以根据拥挤致伤危险多发区域的分布情

况, 在不影响疏散效率的基础上进行设置, 起到切断拥挤力传递或降低拥挤力的传递累积效果的作用, 从而减少拥挤致伤.

4 模型对比

社会力模型^[7]是经典的行人疏散仿真模型, 属于空间连续和时间离散的微观仿真模型. 行人被看作拥有自驱动力 f_0 的微观个体, 拥有一定的愿望速度向目标移动, 移动过程中受4种力的影响, 包括: 自身愿望力 f_1 、避免与外界行人或墙壁碰撞接触的非接触心理排斥力 f_2 、与外界行人或墙壁接触挤压时的接触受压力 f_3 和相对移动的摩擦力 f_4 , 并通过力学方程的形式将其定量化, 即 $f_0 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$. 在疏散过程中, 模型采用愿望速度的大小描述行人的恐慌程度, 并将愿望速度与实际速度的差异转换为 f_1 , 行人与行人或墙壁之间的距离转换为非接触的 f_2 , 行人与行人或墙壁之间的挤压形变转换为接触之间的 f_3 和 f_4 . 模型4种受力大小的计算及其相关参数的物理意义详见参考文献^[7].

在低密度行人非接触的情况下, 主要由 f_1 和 f_2 实现行人的移动和避让碰撞, 即, $f_0 = f_1 + f_2$. 在高密度拥挤行人接触的情况下, 可通过提高自身愿望速度, 增加 f_1 ; 随着 f_1 的增加, f_2 相比 f_1 可省略不计, 从而导致行人之间的接触形变产生 f_3 , 并生成相应的反作用力; 同时, 行人因缺乏有效的移动空间而处于拥挤的静止状态, 产生相对移动的 $f_4 \approx 0$; 此时, 行人的受力情况为 $f_0 = f_1 + f_2 + f_3$. 在拥挤疏散行人接触的挤压过程中, 自身愿望力导致的行人拥挤力由受压力 f_3 的反作用力通过接触行人传递, 实现力的传递和累积过程, 并导致行人的拥挤致伤. 可见, 在行人拥挤疏散仿真过程中, 社会力模型更注重行人之间的相互作用, 而对行人个体或地面对拥挤力吸收情况分析相对不足; 而且各作用力的计算依赖众多行人属性参数和位置状态参数.

与社会力模型相比, 在平衡状态下仿真模型的初始拥挤力 F_0 类似于社会力模型的 $f_1 + f_2$; 行人作为介质向外传递的拥挤力 F_{out} 类似于社会力模型的 f_3 的反作用力. 在拥挤力的传递过程中, 仿真模型引入了拥挤力的吸收机理, 以描述行人自身或与地面静摩擦对拥挤力的吸收现象, 从而可以分析

研究拥堵疏散中微小拥挤力的消失和减弱现象、软硬防护设施的设置及其防护作用评价以及行人自身身体因素或疏散设施对拥堵致伤的影响等.

5 结 论

利用元胞自动机模型对疏散行人流的拥挤致伤进行了仿真研究. 基于行人流拥挤力的产生、传递、抵消、吸收、累积等过程, 仿真研究疏散行人流的拥挤致伤生成机理, 并引入吸收系数与抗死伤系数分别描述行人对拥挤力的吸收和抗挤压能力. 研究表明, 吸收系数或抗死伤系数的增加能有效预防疏散行人流的拥挤致伤; 吸收系数存在临界值 α_1 和 α_2 , 抗死伤系数存在临界值 β_c , 区分系统的弱保护相位 ($\alpha < \alpha_1$ 且 $\beta < \beta_c$)、强保护相位 ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ 且 $\beta < \beta_c$) 和完全保护相位 ($\alpha > \alpha_2$ 或 $\beta > \beta_c$); 而且, 在固定吸收系数或抗死伤系数条件下, 拥挤致伤行人数量随系统内行人数量的增加而增加. 通过拥挤致伤仿真的死伤行人分布, 发现拥挤致伤的危险区域在安全出口前以安全出口中心线为对称轴呈倒钟形分布.

参考文献

- [1] Yue H, Zhang B Y, Shao C F, Xing Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050512
- [2] Yue H, Guan H Z, Shao C F, Zhang X 2011 *Physica A* **390** 198
- [3] Zhu K J, Yang L Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7701 (in Chinese) [朱孔金, 杨立中 2010 物理学报 **59** 7701]
- [4] Yue H, Zhang X, Chen G, Shao C F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 130509 (in Chinese) [岳昊, 张旭, 陈刚, 邵春福 2012 物理学报 **61** 130509]
- [5] Yue H, Shao C F, Guan H Z, Duan L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4499 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 关宏志, 段龙梅 2010 物理学报 **59** 4499]
- [6] Henein C M, White T 2010 *Physica A* **389** 4653
- [7] Helbing D, Farkas I, Vicsek T 2000 *Nature* **407** 487
- [8] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [9] Song W, Xu X, Wang B H, Ni S 2006 *Physica A* **363** 492
- [10] Song W G, Yu Y F, Wang B H, Fan W C 2006 *Physica A* **371** 658
- [11] Chen C K, Li J, Zhang D 2012 *Physica A* **391** 2408
- [12] Guo R Y, Huang H J 2008 *Physica A: Math. Theor.* **41** 1
- [13] Kirchner A, Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260
- [14] Kirchner A, Nishinari K, Schadschneider A 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056122
- [15] Henein C M, White T 2007 *Physica A* **373** 694
- [16] Zhang Q, Han B M 2001 *Physica A* **390** 636

Simulation of pedestrian push-force in evacuation with congestion*

Zhang Lei¹⁾ Yue Hao^{1)†} Li Mei¹⁾ Wang Shuai¹⁾ Mi Xue-Yu¹⁾²⁾

1) (MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (School of Civil and Architectural Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

(Received 17 July 2014; revised manuscript received 22 October 2014)

Abstract

The simulation of pedestrian push-force in evacuation with arched congestion before exit is presented based on cell automata. The generation, absorption, transfer and gather of pedestrian push-force are analyzed. Initial push-force facing to exit is generated based on the distance between pedestrian and exit. The scalar and vector sum of push-force are introduced to respectively describe the push effect and resultant force of outside jam push-force in crowded evacuation. Absorption coefficient and anti-crush coefficient are introduced to respectively describe the ability for pedestrian to absorb and resist the outside jam push-force. Simulation results show that the increase of absorption coefficient or anti-crush coefficient can effectively prevent pedestrian from being injured. It is found that three phases: weak protection, strong protection and complete protection are distinguished based on two critical absorption coefficients and an anti-crush coefficient. Pedestrian casualties will increase with the number of evacuation pedestrian rising. It is also shown that pedestrian casualties in jam occur in a reverse bell-shape symmetry zone before exit.

Keywords: pedestrian evacuation, pedestrian push-force, absorption coefficient, anti-crush coefficient

PACS: 05.50.+q, 05.20.Jj, 07.05.Tp

DOI: [10.7498/aps.64.060505](https://doi.org/10.7498/aps.64.060505)

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Education Ministry of China (Grant No. 2013JBM046), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB725400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 1172035, 51338008) and Center of Cooperative Innovation for Beijing Metropolitan Transportation.

† Corresponding author. E-mail: yuehao@bjtu.edu.cn