

相对速度影响下社会力模型的疏散模拟与分析*

陈涛¹ 应振根¹ 申世飞¹ 袁宏永¹ 范维澄^{1,2}

1. 清华大学公共安全研究中心, 工程物理系, 北京 100084; 2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027

摘要 人是具有自主思维能力的行为个体, 紧急情况下疏散过程中的行为表现是其内在心理的具体体现. 文中引入相对速度对疏散人员社会心理作用力的影响, 对社会力模型进行修正, 通过模拟分析认为, 修正模型增强了人员的主观能动性, 解决了原模型中人与人或者人与物接触时速度的振荡问题, 使修正后的疏散模型与实际情况更贴切. 通过对典型场景下人员疏散时间的模拟计算, 分析和讨论了两种人员体形特征情况下相对速度对疏散效率的影响. 结果显示, 相对速度影响系数对于人员疏散效率的影响具有双重性, 虽能减少模型中人员的碰撞和振荡现象而有利于疏散, 但也加剧了疏散出口附近人员之间的拥挤程度. 因此, 当相对速度影响系数为特定临界值时, 人员之间最和谐, 所需要的疏散时间最少.

关键词 疏散模型 人员行为 相对速度 社会力

当前, 随着经济的发展, 我国各类危险源与人口同步增加, 突发公共安全事件时有发生. 2004年4月16日重庆天原化工厂氯气泄漏事故共疏散15万人, 其中江北区有8万人被疏散, 嘉陵江对岸的渝中区、化龙桥片区等地区共有6.8万人被疏散. 1991年以来, 我国发生一次性死亡50人以上的特大火灾达12起, 死亡人数达1552人¹⁾. 国际上, 突发公共事件造成的大量人员疏散和死亡的案例也比比皆是, 如1996年, 韩国汉城商场火灾由于安全出口太少, 致使502人不能及时疏散而死亡; 1997年, 沙特阿拉伯麦加圣城大火, 死亡1000多人; WTC/9·11事件造成约2800人死亡.

突发公共事件中的人员安全疏散与人员的生命安全密切相关. 发生突发公共事件(比如危险化学品泄漏、地震、城市火灾等)后如何快速有效地组

织事故现场以及受威胁区域人员的疏散, 从而有效预防和减少突发公共事件造成的人员伤亡, 尤其是防止群死群伤事件的发生, 已成为当前国内外公共安全领域的研究热点和重点.

国际上, 人员安全疏散的研究和分析主要包含两个方面, 其一是人员疏散的模型研究; 其二是灾害环境下的人员行为. 1998年8月第四届“火灾中人员行为”国际学术会议在北爱尔兰召开, 来自23个国家和地区的200多位学者参加了本次会议, 会上交流了人员疏散、性能化设计和危险性评估等方面的科技成果; 9·11事件后, 先后在英国和马来西亚两次召开了世界性的高层建筑安全峰会; 2005年9月“第八届国际火灾科学大会”在北京召开, 十多位国内外学者在会上作了有关人员行为和疏散模型的报告. 在这些国际性会议中, 关注的焦点之

2006-01-12 收稿, 2006-04-26 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB409600)、国家自然科学基金(批准号: 70503017)和中国博士后基金(批准号: 2004036238)资助

E-mail: chentao.a@tsinghua.edu.cn

1) 陈涛. 火灾情况下人员疏散模型及应用研究. 博士学位论文, 中国科学技术大学, 合肥, 2004

一就是火灾等突发公共事件中的人员安全疏散问题。

在人员安全疏散的模型研究方面, 据 Gwynne 等的统计, 1999 年之前国际上已经建立和正在开发的人员疏散模型约有 22 种^[1]; 据卢兆明等的统计, 截至 2005 年初, 已有超过 50 种人员疏散模型^[2] 在各类文献中被介绍。基于物理空间的模化方法, 人员疏散模型大致可以分为粗糙网络模型^[3-5]、精细网络模型^[6-11]和连续性模型^[12-14]。

社会力模型属于连续性模型, 是基于多粒子自驱动系统的框架, 假定组成人群的个体具有思考和对周围环境做出反应的能力, 把人的主观愿望、人与人之间的相互关系以及人与环境之间的相互影响用社会力的概念来描述, 运用一般的力学模型模拟步行者恐慌时的拥挤动力学, 可精细地模拟人员密集场所人员之间相互冲撞、挤压的拥挤动力学, 其代价是模型复杂度高, 模拟计算时间较长。

德国交通流专家 Helbing^[12] 最早提出了社会力模型, 他把人员的心理反应量化为作用力, 即社会力, 引入到人员疏散模型中, 研究了人员的期望速度、期望速度方向对疏散时间的影响, 成功地再现了拱形阻塞、群体效应、“欲速则不达”等典型的人员疏散行为。

1 模型修正

突发公共事件的疏散过程中, 根据社会力的概念, 疏散人员将受到社会心理和物理环境的双重作用。根据文献^[13], 处于非安全区的人员在疏散过程中受到的作用力为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0 e_i^0 - v_i}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_w f_{iw}, \quad (1)$$

其中, 人与人之间的相互作用力 f_{ij} 可表述为

$$\begin{cases} f_{ij} = f_{ijn} n_{ij} + f_{ijt} t_{ij} \\ f_{ijn} = A_i \exp[(R_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(R_{ij} - d_{ij}), \\ f_{ijt} = \kappa g(R_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \end{cases} \quad (2)$$

f_{ijn} 和 f_{ijt} 分别表示 f_{ij} 的法向和切向分量的大小。人员与障碍物之间的作用力 f_{iw} 可表示为

$$\begin{cases} f_{iw} = f_{iwn} n_{iw} + f_{iwt} t_{iw} \\ f_{iwn} = A_i \exp[(R_i - d_{iw})/B_i] + kg(R_i - d_{iw}), \\ f_{iwt} = \kappa g(R_i - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw}) \end{cases} \quad (3)$$

f_{iwn} 和 f_{iwt} 分别表示 f_{iw} 的法向和切向分量的大小; $n_{ij} = (r_i - r_j)/d_{ij}$ 为从 j 到 i 的法向标准化矢量; $g(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & x \geq 0 \end{cases}$ 函数把负数设为 0。上述公式中参数的物理意义详见文献^[13]。

在上述 Helbing 提出的模型中, 虽然考虑了部分社会因素, 但人与人之间都是绝对平等的, 人员之间的法向受力与运动速度没有任何关系。在接触的情况下, 人与人或者人与障碍物之间的相对速度才会通过改变切向摩擦力来影响人员的疏散速度, 在法向上, 则仅通过相对距离的大小决定疏散人员的社会心理作用力。

通过大量观察可以发现, 一个人在他前方有事物(另一个人或物体)时会减小速度避免相撞, 以保护自己的安全, 当两个人相向运动时这种现象就更明显。也就是说, 即使在不发生接触的情况下, 前方人员运动情况的不同, 也将导致疏散人员社会心理作用力的不同, 这种不同可以通过相对速度来描述。

图 1 可以直观地表示相对速度对于人员法向社会心理作用力的影响情况。图中人员 j 与人员 i 和 k 的距离相同且相互不接触, 根据公式(2)可得 $f_{ijn} = f_{kin}$, 即人员 i 和 k 受人员 j 影响的法向社会心理作用力相同。显然, 实际情况是 $f_{ijn} > f_{kin}$, 由公式(2)得到的结果与现实情况不符。

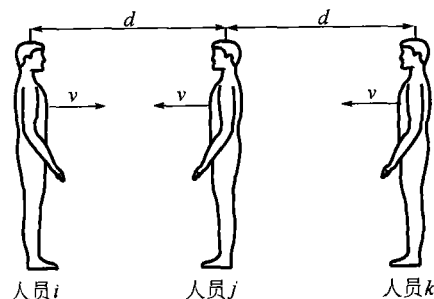


图 1 相对速度对于法向社会心理作用力影响示意

基于以上分析, 本文以 Helbing 的社会力模型为基础, 引入相对速度对于疏散人员法向社会心理

作用力的影响,构建社会力修正模型,主要研究相对速度对疏散效率的影响.

引入相对速度影响系数 c , 则考虑相对速度影响后, 疏散人员 i 受到 j 的法向社会心理作用力 f_{ijnv} 可表示为

$$\begin{cases} f_{ijnv} = cg(\Delta v_{ji}^n) f_{ijn} \\ \Delta v_{ji}^n = (v_j - v_i) \cdot n_{ij} \end{cases}, \quad (4)$$

其中 Δv_{ji}^n 表示疏散人员 i 和疏散人员 j 的法向速率差.

类似的, 疏散人员 i 受到第 w 个障碍物的法向社会心理作用力 f_{iwnv} 可表示为

$$f_{iwnv} = cg(-v_i \cdot n_{iw}) f_{iwn}. \quad (5)$$

在此, 我们把 f_{ijn} 和 f_{iwn} 称为法向社会心理距离作用力, 简称距离力; f_{ijnv} 和 f_{iwnv} 称为法向社会心理速度作用力, 简称速度力.

同时考虑距离力和速度力的影响, 原模型中人与人及人与障碍物之间的相互作用力 f_{ij} 和 f_{iw} 分别可修正为

$$f_{ij} = [1 + cg(\Delta v_{ji}^n)] f_{ijn} n_{ij} + f_{ijt} t_{ij}, \quad (6)$$

$$f_{iw} = [1 + cg(-v_i \cdot n_{iw})] f_{iwn} n_{iw} + f_{iwt} t_{iw}, \quad (7)$$

其中, $c = \frac{1}{g(\Delta v_{ji}^n)} \frac{f_{ijnv}}{f_{ijn}}$ 表征速度力与距离力的比例关系, 当 $c=0$ 时, 表示模型中不考虑相对速度的影响, 速度力为 0; 当 c 为法向相对速度差的倒数, 即 $c=1/g(\Delta v_{ji}^n)$ 时, 疏散人员受到的速度力与距离力相等; c 的数值越大, 则表示法向社会心理作用力中速度力所占份额越大.

2 模型讨论

显然, 公式(6)和(7)中在原模型的基础上, 进一步考虑了人员相对运动情况(通过相对速度进行描述)对人员法向社会心理作用力的影响. 为明确相对速度对于人员社会心理作用力的影响, 下面将通过两个简单的模拟实验验证这种影响.

2.1 人与墙的相互作用

本模拟中, 设半径为 0.3 m, 质量为 80 kg 的人

静止站立在距墙壁 10 m 处, 在 $t=0$ 时刻开始以 $v_0=3$ m/s 的期望速度正对墙壁运动.

模拟过程中相关参数的取值与文献[14]的取值一致, 即: $\tau_i=0.5$ s; $A_i=2 \times 10^3$ N; $B_i=0.08$ m; $k=1.2 \times 10^5$ kg \cdot s $^{-2}$; $\kappa=2.4 \times 10^5$ kg \cdot m $^{-1}$ \cdot s $^{-1}$. 当相对速度影响系数 c 取不同值时, 人员的速度-时间曲线如图 2 所示.

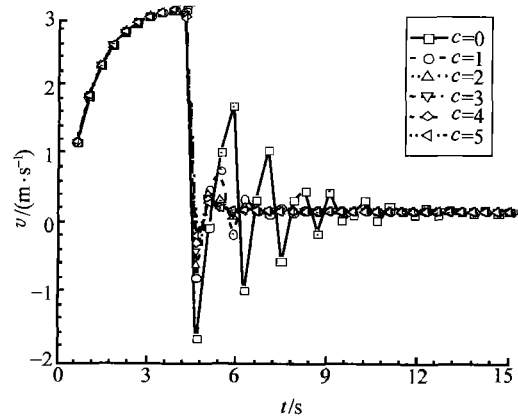


图 2 人员面向墙壁行走时的速度-时间曲线

由图 2 可知, $c=0$ 时, 即不考虑速度力影响时, 模拟人员将以大约 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度与墙体相撞. 在人体与墙壁接触瞬间, 形成较大的人体与墙壁的距离力 f_{iwn} , 迫使人体以类似球体碰撞的形式反弹, 而后又在期望速度的影响下继续撞向墙壁, 最后经过一系列较长时间的振荡后紧贴墙壁静止.

显然, 实际情况下人员在接近墙壁时一般会迅速停下来, 并不会产生明显的较长时间的速度振荡. 相对速度影响系数 c 的引入则较好地修正了这一问题, 由图 2 可知, 当 $c>2$ 时, 人员的振荡基本消除, 基本体现了实际情况.

2.2 人与人的相互作用

该模拟中, 假设编号为 1 和 2 的两个人在无限长的宽 1 m 的走廊上运动, 两人的外形尺寸相同, 人体半径为 0.3 m, 质量为 80 kg. 初始状态下, 两人相距 10 m 静止站立, 在 $t=0$ 时刻开始两人同时同方向运动, 人员 2 在前, 期望速度 $v_{20}=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 人员 1 在后, 期望速度 $v_{10}=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 模拟过程中其他相关参数的取值与模拟实验(1)相同.

在这种情况下, $\Delta v_{ji}^n = (v_j - v_i) \cdot n_{ij} = 3$, 则速度

力 $f_{ijnv} = cg(\Delta v_{ji}^n) f_{ijn} = 3cf_{ijn}$, 可知, 当 $c > 0$ 时, 由于人员 1 有接近人员 2 的趋势, 则修正模型下人员 1 受到的法向作用力为速度力和距离力之和, 比原模型中法向作用力大. 相对速度影响系数 c 取不同值时, 人员 1 和人员 2 的速度-时间曲线分别如图 3(a)和(b)所示.

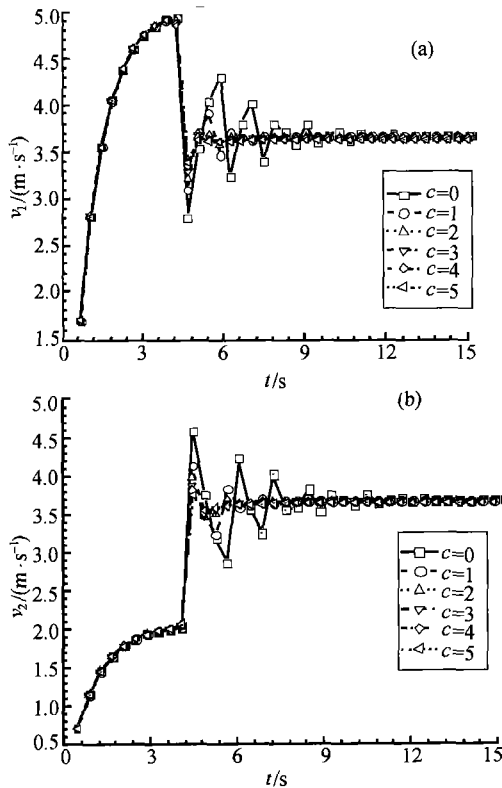


图3 人与人相互作用模拟中两人的速度-时间曲线
($v_{20} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_{10} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同向运动)
(a) 人员 1; (b) 人员 2

由图 3 可知, $c=0$ 时, 即不考虑相对速度影响时, 当人员 1 赶上人员 2 并发生身体接触的瞬间发生了明显的相撞, 两人之间形成较大的距离力 f_{ijn} , 造成第 1 个人受阻瞬间减速而第 2 个人突然加速前冲, 其后两人由于存在期望速度的差异而再一次发生冲撞, 结果是两人的速度都发生大幅度长时间的振荡, 这种现象显然与实际情况并不一致.

相对速度影响系数 c 的引入同样弥补了原模型中的这个问题, 当 $c > 2$ 时, 前后两人的速度振荡基本消除. 在前后两人接近的短时间内, 两人的速度分别作相应调整, 迅速以几乎相同的速度一起向前

运动, c 越大速度振荡越小, 调整时间也越短.

以上的模拟讨论说明, 本文引入相对速度影响系数 c 对原模型进行修正, 较好地解决了原模型中人与人或者人与物接触时存在的速度大幅度长时间的振荡问题, 使修正后的模型进一步增强了模型中人员的主观能动作用, 即可以同时根据相对距离和相对速度调整自身运动情况而避免剧烈冲撞, 从而与实际情况更加贴切.

3 疏散模拟分析

本文的疏散模拟分析中, 采用的建筑结构如图 4 所示, 人员所在的场所是一个 15 m 见方, 面积为 225 m^2 的正方形房间. 人员的疏散出口位于右侧墙体的正中, 宽度为 1 m.

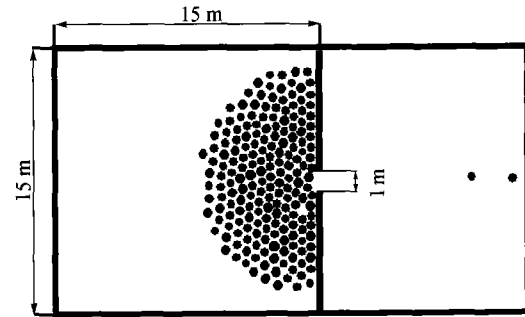


图4 疏散模拟分析场景

参考文献[14]中的模型取值, 设模拟计算的房间内共有 200 人, 人员半径和人体质量分别为均值 0.3 m 、方差 0.03 m 和均值 80 kg 、方差 1 kg 的 Gauss 分布; $\tau_i = 0.5 \text{ s}$; $A_i = 2 \times 10^3 \text{ N}$; $B_i = 0.08 \text{ m}$; $k = 1.2 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$; $\kappa = 2.4 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

设 200 人在模拟开始时在房间内的位置是随机分布的, 在所有人员期望速度 $v_i^0 = 1.5 \text{ m/s}$ 的情况下, 对于每一个确定的相对速度影响因子 c , 由模拟计算可得所有人员由图 4 所示房间疏散完毕的时间 T_{esp} . 改变相对速度影响系数 c 的大小, 进行多次模拟计算, 得到一系列不同的疏散时间 T_{esp} , 由此, 可得到疏散时间 T_{esp} 与相对速度影响因子 c 之间的关系, 如图 5 所示.

由图 5 可知, 在 $c=0$, 即没有考虑速度力对人员运动影响时, 模型中人员在社会心理作用力上仅受距离力的影响, 人与人、人与墙之间会出现大量

的碰撞和振荡现象. 这种碰撞和振荡必然导致疏散人员的混乱无序, 降低疏散效率, 使疏散时间增长. 而且, 频繁的碰撞和振荡增加了人员相互接触的机会, 人员之间的挤压情况严重, 增加了相互之间的切向摩擦力, 从另一方面降低了疏散效率.

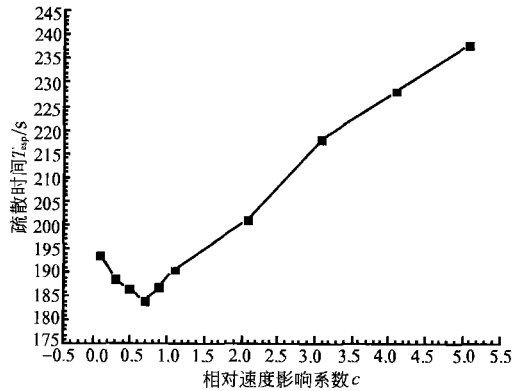


图5 $v_0^0 = 1.5 \text{ m/s}$ 时疏散时间 T_{esp} 与 c 的关系

疏散人员在出口附近形成阻塞, 速度降低时, 就必然与后面的人员形成了一定的速度差. 修正后的模型中由于考虑了人与人或墙之间的相对速度对人员运动的影响, 从而减少了人员之间相互碰撞的几率, 降低了振荡和混乱无序情况的发生, 也就在一定程度上缓解了人员相互挤压的情况. 这种情况相当于在人与人或人与墙相向运动时增加了一个附加社会心理作用力, 即速度力.

当 $c < 0.6$ 时, 随着 c 数值的增大, 速度力在法向社会心理作用力中所占的比重逐渐增大, 使人员之间, 人与墙之间碰撞和振荡情况减弱, 疏散有序性增强.

当 $c \approx 0.6$ 时, 由图5可知, 此时疏散人员之间的相互影响达到最佳, 整个疏散过程紧张而有序, 所有人员的疏散时间为182s左右, 为临界最小值.

当 $c > 0.6$ 时, 随着 c 的进一步增大, 修正后的模型中的法向社会心理作用力也同样增大, 人与人或人与墙之间由于速度差异而形成的速度力在法向社会心理作用力中所占的比重增强, 距离力所占的比重逐渐减弱. 虽然速度力的引入对于减少碰撞和振荡有重要作用, 但当 c 过大时, 却造成了模型中法向社会心理作用力过大. 疏散人员在出口附近形成阻塞时, 阻塞人员由于速度相对较小(几乎为0),

阻塞人员之间的速度力很小. 外围人员在向出口运动的过程中与阻塞人员之间存在明显的速度差, 在 c 增大减少碰撞和振荡的同时, 从另一方面也增大了阻塞人员的受力, 使阻塞人员的拥挤程度进一步加剧, 从而影响疏散效率.

从上面分析可知, 相对速度影响系数 c 对于疏散效率存在正负两方面的影响:

- (i) 减少碰撞和振荡, 有利疏散, 正面影响;
- (ii) 加剧拥挤程度, 不利疏散, 负面影响.

当 $c < 0.6$ 时, 有利于疏散的影响占主导地位, 人员疏散效率增大; 而当 $c > 0.6$ 时, 不利于疏散的影响成为主要因素, 人员疏散效率降低. 由图5可知, 当 $c \approx 1.5$ 时, 模拟计算场景下的人员疏散时间与 $c = 0$ 时基本一致, 也就是说, 此时正负两方面的影响基本相抵.

其他参数不变, 改变疏散人员期望速度 v_0^0 的值, 进行相同场景下的疏散模拟, 模拟结果如图6所示.

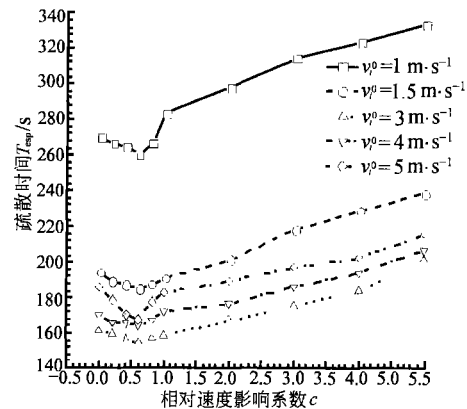


图6 不同期望速度时的 T_{esp} 与 c 的关系

由图6可见, 该场景下人员总疏散时间 T_{esp} 随参数 c 的变化规律在各个期望速度下基本一致. 从图中还可以看到, 单纯的增大人员期望速度, 并不会简单地减少总疏散时间 T_{esp} , 也就是说, 本文的模拟结果中同样出现了“欲速则不达”的典型疏散现象.

中国人员的形体特征与国外人员不尽相同, 图7为调研得到的我国成年男性和女性的按年龄段的体重分布图^[15], 其中, 男性的体重基本在62—68kg之内, 女性的体重相对较轻, 维持在52—60kg之内, 相应的男女平均体重为58—64kg, 人员体重的最大值均出现在45岁左右.

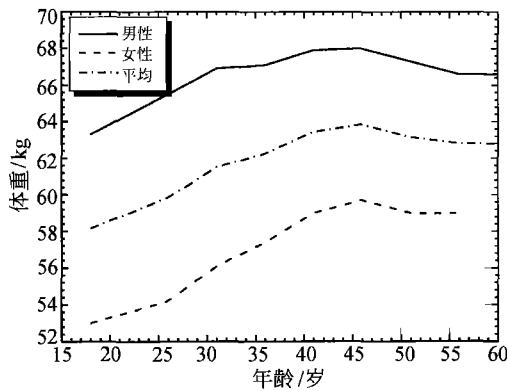


图7 我国成年男性和女性的体重统计值

本文执笔人体重 65 kg, 双肩宽为 47 cm, 体重与统计得到的我国人员的体重平均值比较接近, 形体特征参数基本能代表我国人员的身体特征. 因此, 模型中粒子的直径(人体双肩宽)将按照本人的体形特征设定.

下面将针对我国人体特征作进一步的模拟分析. 模拟计算中, 人员体重按均值 60 kg, 方差 1 kg 的 Gauss 分布取值, 人员的粒子半径同样按照 Gauss 分布设计, 均值为 0.24 m, 方差为 0.03 m, 其他模型参数和假设条件不变, 得到的模拟结果如图 8 所示.

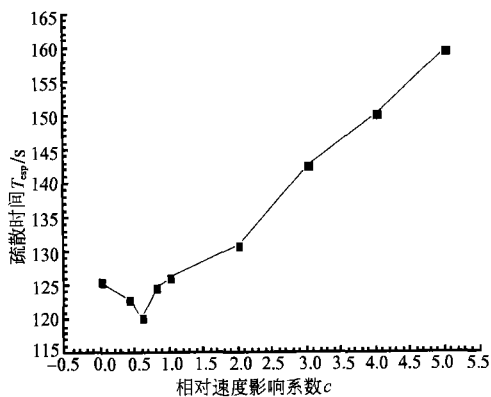


图8 形体特征参数符合我国情况时 $v_i^0 = 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时疏散时间 T_{esp} 与 c 的关系

由图 8 可知, 当模型中人员形体特征符合我国情况时, 疏散时间 T_{esp} 与相对速度影响系数 c 之间的关系表现出与图 5 相同的趋势特征, 进一步验证了系数 c 对于社会力模型的影响作用. 同时可以看到, 本模拟计算情况下的人员疏散时间 T_{esp} 较图 5

小, 这主要是由于该情况下人员外形尺寸较小, 较容易通过出口, 从而加快了人员疏散的速度.

4 结论

当前方有其他人或墙等障碍物存在的情况下, 为避免相撞, 人员的减速现象将更加明显. 基于上述事实, 本文在 Helbing 提出的社会力模型的基础上, 进一步分析人的主观能动性, 引入相对速度影响系数 c 的概念, 对原模型进行修正.

通过对运动的人与静止墙之间、运动的人与人之间相互作用的简单模拟讨论, 本文中相对速度影响系数 c 的引入较好地解决了原模型中人与人或者人与静止物体接触时速度大幅度长时间的振荡的问题. 也就是说, 修正后的模型进一步增强了模型中人员的主观能动作用, 模拟人员可以根据相对距离和相对速度调整自身的运动情况而减小冲撞程度, 从而使疏散模拟情况与实际情况更加贴切.

本文通过典型场景下的人员疏散模拟计算和分析得到, 相对速度影响系数 c 虽然减少了模型中人员的碰撞和振荡现象, 但也加剧了人员之间的拥挤程度, 这两种不同的作用对于疏散效率存在正负两方面的影响.

在本文的计算场景下, 通过模拟计算得到如下典型结果:

(1) 当 $c \approx 0.6$ 时, 模型中疏散人员之间的相互影响达到最佳, 整个疏散过程紧张而有序, 所有人员的疏散时间达到最小值;

(2) 当 $c \approx 1.5$ 时, 人员疏散时间与 $c=0$ 时基本一致, 相对速度影响系数 c 对于疏散时间正负两方面的影响基本相抵;

(3) 不同的人员期望速度下, 相对速度影响系数 c 对于人员总疏散时间 T_{esp} 的影响规律基本一致, 拱形阻塞、“欲速则不达”等典型的人员疏散行为在修正后的模型中同样存在.

参 考 文 献

- Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A review of the methodologies used in evacuation modelling. *Fire and Materials*, 1999, 23(6): 383-388
- Lo S M, Lin P, Huang H C, et al. A review on evacuation modeling. In: Lo S M, Yuen K K, Li W M, eds. *Fire Science*

- and Engineering, The 2nd Conference in the Development of Performance-based Fire Code. Hong Kong, 2005. Hong Kong: City University of Hong Kong Press, 2005, 273—290
- 3 Fahy R F. New development in EXIT89. In: Sheilda L Bryner, eds. Fifteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Gaithberg, 2000, Maryland: NIST, 153—159
 - 4 Fraser-Mitchell J N. Modelling human behaviour within the fire risk assessment tool crisp. *Fire and Materials*, 1999, 23(6): 349—355
 - 5 Fraser-Mitchell J N. Simulated evacuation of an airport terminal building, using the CRISP model. In: Second International Symposium on Human Behaviour in Fire. Cambridge, 2001, Boston: Interscience Communications, 89—100
 - 6 Thompson P A, Wu J, Marchant E W. Modelling evacuation in multi-storey buildings with simulex. *Fire Engineers Journal*, 1996, 56(185): 6—11
 - 7 Galea E R. General approach to validating evacuation models with an application to Exodus. *Journal of Fire Sciences*, 1998, 16(6): 414—436
 - 8 Yang L Z, Fang W F, Li J, et al. Cellular automata pedestrian movement model considering human behavior. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(16): 1695—1699
 - 9 Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A*, 1999, 267(3—4): 487—498
 - 10 Nagatani T. Dynamical transition and scaling in a mean-field model of pedestrian flow at a bottleneck. *Physica A*, 2001, 300(3—4): 558—566
 - 11 陈涛, 宋卫国, 范维澄, 等. 十字出口宽度与人员阻塞的依赖关系及其模拟和分析. *自然科学进展*, 2004, 14(5): 567—572
 - 12 Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282—4286
 - 13 Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, 407(6803): 487—490
 - 14 Korhonen T, Hostikka S, Keski-Rahkonen O. A proposal for the goals and new techniques of modelling pedestrian evacuation in fires. In: The 8th IAFSS Symposium, Beijing, 2005, 557—567
 - 15 于道中. 中国职工体质调研报告. *福建体育科技*, 1997, 16(4): 6—13