

社会力模型在行人运动建模中的应用综述

A Review of Application of Social Force Model for Pedestrian Dynamics

单庆超, 张秀媛, 张朝峰

(北京交通大学交通运输学院系统科学研究所, 北京 100044)

SHAN Qing-chao, ZHANG Xiu-yuan, ZHANG Chao-feng

(Institute of System Science, School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要: 为研究社会力模型在行人运动建模中的应用状况与存在的问题,系统分析了相关文献,跟踪研究了模型的基本原理、表达式的改进、参数的取值、可行性和模拟结果的真实性。研究显示,社会力行人交通流模型能较好地反映行人流在正常和逃生情况下的状态,模拟结果与实测的行人现象符合,具有很好的适应性和真实性,可为交通设施设计和行人流管理提供参考。最后,总结了该模型的不足与改进方法。

Abstract: In order to study the development status and existing problems of applying social force model for pedestrian travel, this paper systematically analyzes the relevant literatures, and the model's fundamentals, expression improvement, parameter values, feasibility and the reliability of simulated results. The research shows that the model can better reflect the phenomenon of pedestrian traffic in normal and evacuation situations, the simulated results are consistent with the observed pedestrian flow, and has the better adaptability and authenticity, which can provide reference for the traffic facility design and pedestrian flow management. Finally, the paper summarizes the shortcomings and improved method of the model.

关键词: 行人流; 社会力模型; 自组织

Keywords: pedestrian flow; social force model; self-organization

中图分类号: U491.2²⁶

文献标识码: A

收稿日期: 2010-01-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB705500); 北京市科委“地铁新线接运公交线路网的优化研究与示范工程”(M08H0050)

作者简介: 单庆超(1983—), 男, 河北保定人, 硕士, 主要研究方向: 交通安全系统分析。

E-mail: shanqingchao@126.com

0 引言

随着公共场所大规模人群活动越来越多, 人群安全问题凸显。据不完全统计, 全世界平均每年都有上千人在集聚活动突发事件中丧生, 受伤的更多。因此, 人群安全问题备受关注, 围绕群体运动行为的描述、规律和引导等展开了大量研究。

人群不安全状态是由多种因素共同构成的, 涉及场所类型、空间结构、组织管理、安全措施、突发事件等外部因素以及人群类型、人群行为特征等内部因素。其中, 人群在场所中的行为特征是影响人群安全的重要因素。由于受到社会、道德、法律、环境、习惯、身体状况、心理、教育、文化、性格等各种因素的影响, 人在公共场所中的行为既具有某种规律性, 又带有很大的不确定性。在很多情况下, 行人受伤甚至死亡并不是由爆炸、火灾、毒气或其他外界危险因素造成的, 而是由人群自身造成的。因此, 有必要研究行人动力学, 从而了解正常和紧急情况下公共场所中行人行为特征, 为公共设施设计、步行设施优化, 空间使用效率和突发事件中人群疏散效率提高, 以及计算机行人仿真软件开发提供依据, 同时为大型人群聚集活动中的人群管理和人群疏散提供理论指导。

许多学者在研究人群行为及特征时, 提出了一系列行人流模型, 包括元胞自动机模型、磁场力模型、排队模型、社会力模型和气体动力学模型等。其中, 社会力模型受到了越来越多的关

注,在微观行人流领域特别是逃生方面得到了广泛应用^[1-5]。在行人流研究中,有些文献把社会力模型作为其中一些力的主要计算依据^[6-7],Vissim软件就应用了社会力模型来模拟行人流。

1 社会力模型的基本原理

社会力(又称社会场或社会影响力)概念于

$$m_a \frac{d\vec{\omega}_a}{dt} = \vec{F}_a(t) + \zeta, \quad (1)$$

$$\vec{F}_a(t) = \vec{F}_a^0(\vec{v}_a, \vec{v}_a^0 \vec{e}_a) + \sum_{\beta} \vec{F}_{a\beta}(\vec{e}_a, \vec{r}_a - \vec{r}_\beta) + \sum_B \vec{F}_{aB}(\vec{e}_a, \vec{r}_a - \vec{r}_B) + \sum_i \vec{F}_{ai}(\vec{e}_a, \vec{r}_a - \vec{r}_i, t), \quad (2)$$

式中: m_a 为行人 α 的质量; $\vec{\omega}_a$ 为当前环境下的喜爱速度; $\vec{F}_a(t)$ 为行人所受到的合力,其表达式右侧第一项为驱动力,第二项为行人与其他行人作用力的合力,第三项为行人与边界或障碍物作用力的合力,第四项为吸引力的合力; ζ 为随机变量,在模型中代表不确定的行人行为。模型中的驱动力、行人之间的作用力、行人与物体之间的作用力和其他参数下文将做详细说明。

2 对模型各项的说明及演化

社会力行人交通流模型自1995年提出后,在模型基本原理基础上,根据行人流特点及模拟需要,一些学者对模型表达式的形式和参数进行了研究和优化。下面将对模型中各种力的表达式含义及参数设置进行详细说明。

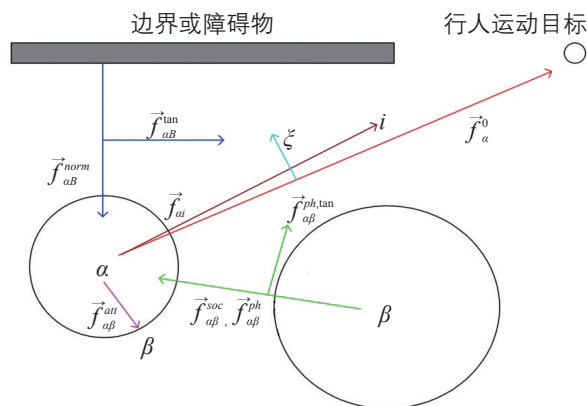


图1 社会力模型的各种作用力

Fig.1 Forces of the social force model

1951年提出。1995年,在流体动力学方程基础上文献[8]构建了社会力行人交通流模型,主要包括行人向着目标运动项,行人之间作用项,行人与边界、障碍物、墙等之间的相互影响项,并将其量化为具体的各种力。此外,还包括吸引力、聚集行为产生的力和扰动行为产生的力(随机的、非系统的变量)。模型中各种作用力如图1所示。社会力模型的动力学方程为

2.1 驱动力

驱动力是模型中最显著的力,决定着行人是否以期望速度向目的地运动。如果没有干扰,行人将以速度 $\vec{v}_a^0$ 向期望的方向 $\vec{e}_a(t)$ 行进。由于必要的减速或躲避行为,实际速度 $\vec{v}_a(t)$ 与期望速度 $\vec{v}_a^0(t) = \vec{v}_a^0 \vec{e}_a(t)$ 的差通过一定的“松弛时间” τ_a 来修正,以接近速度 $\vec{v}_a^0(t)$,可通过加速度形式描述:

$$\vec{F}_a^0(\vec{v}_a, \vec{v}_a^0 \vec{e}_a) = m_a \frac{1}{\tau_a} (\vec{v}_a^0 \vec{e}_a - \vec{v}_a). \quad (3)$$

行人要尽可能舒适地到达目的地 $\vec{r}_a^0$,通常采取尽可能走最短路、不走弯路的方式,一般可形成以 $\vec{r}_a^1, \dots, \vec{r}_a^n = \vec{r}_a^0$ 为边的多边形。如果 $\vec{r}_a^L$ 是下一个要到达的多边形边,行人期望的运动方向 $\vec{e}_a(t)$ 为

$$\vec{e}_a(t) = [\vec{r}_a^L - \vec{r}_a(t)] / \|\vec{r}_a^L - \vec{r}_a(t)\|, \quad (4)$$

式中: $\vec{r}_a(t)$ 是指行人在时间 t 的实际位置,行人的目标通常是门或区域而不是边 $\vec{r}_a^L$,在这种情况下,行人将在每一个时间 t 转向相应门或区域的最近边 $\vec{r}_a^k(t)$ 。本文给出的驱动力和方向向量的表达式是社会力模型中的基本形式。然而行人运动并不是时时完全自主运动的,有时受他人影响,主动或被动地跟随他人运动,这种行为称为从众行为(mass behavior)。为了描述个体行为的从众程度,引入一个方向的权重函数^[1,9]:

$$e_a(t) = \text{Norm}[(1 - n_a) \vec{e}_a^* + n_a \langle \vec{e}_\beta(t) \rangle_a], \quad (5)$$

式中: n_a 为从众系数,取值范围是 $[0, 1]$,值越大,表示行人越从众,为0时表示行人自由行进; $\vec{e}_a^*$ 为个体方向向量; $\langle \vec{e}_\beta(t) \rangle_a$ 为周围一定距离内行人的平均方向,可根据实际情况设定; $\text{Norm}(z) = z / \|z\|$ 。

2.2 排斥力

排斥力来自行人之间的相互作用和行人与建筑物、障碍物或墙等的相互作用。

1) 行人之间的相互作用力。

行人运动方向受他人的影响，特别是行人之间保持的距离取决于行人密度和期望速度 v_a^0 。对于每一行人的个人空间，“地域效力”(territorial effect)发挥了至关重要的作用。行人接近一个陌生的行人时，通常会感觉越来越不舒适。这导致其他行人 β 对该行人产生斥力效应，这种效应可用一个随距离递减的指数函数来表示，包括社会心理作用力(即社会力)和物理力(接触力)两部分，表达式为

$$\vec{f}_{a\beta}(\vec{r}_{a\beta}) = \vec{f}_{a\beta}^{soc}(t) + \vec{f}_{a\beta}^{ph}(t). \quad (6)$$

① 社会力 $\vec{f}_{a\beta}^{soc}(t)$ 。

$$\vec{f}_{a\beta}^{soc}(t) = -\nabla_{\vec{r}_{a\beta}} V_{a\beta}(b). \quad (7)$$

模型假定潜在斥力 $V_{a\beta}(b)$ 是关于 b 的单调递减函数，此函数有一个椭圆形等势线指向运动方向，这与实际也是相符的，因为行人下一步的运动需要一定的空间， b 指椭圆形的短半轴，可由式(8)计算。

$$2b = \sqrt{(\|\vec{r}_{a\beta}\| + \|\vec{r}_{a\beta} - v_{\beta}\Delta t\vec{e}_{\beta}\|)^2 - (v_{\beta}\Delta t)^2}, \quad (8)$$

式中： $\vec{r}_{a\beta} = \vec{r}_a - \vec{r}_{\beta}$ 是行人的位置矢量差； $v_{\beta}\Delta t$ 是行人 β 要求的脚步宽度。1995年构建的模型中，由于没有考虑接触力，因此行人间的斥力效应可以不考虑行人的质量，而采用加速度的形式，表达式为

$$\vec{f}_{a\beta}(\vec{r}_{a\beta}) = -2.1e^{-b/0.3}. \quad (9)$$

这种形式虽然简单，但它描述行人运动时避免与别人碰撞还是相当实际的。由于参数 b 计算的复杂性，可采用定值或分布来表达。此时，社会力模型中社会力的表达式为

$$\vec{f}_{a\beta}^{soc}(t) = A_a \exp\left(\frac{r_{a\beta} - d_{a\beta}}{B_a}\right) \vec{n}_{a\beta}, \quad (10)$$

式中： A_a 和 B_a 是常数，分别表示行人 a 与其他行人的相互作用强度和作用范围； $r_{a\beta}$ 是相互作用的两个行人 a 和 β 的半径和； $d_{a\beta}$ 是行人 a 和 β 之间的距离； $\vec{n}_{a\beta} = (n_{a\beta}^1, n_{a\beta}^2) = \vec{r}_{a\beta}/d_{a\beta}$ 是由行人 β 指向行人 a 的单位向量， $\vec{n}_{a\beta}$ 和 $d_{a\beta}$ 随时间变化。

模型规定每个行人的半径由行人占有的空间决定。社会力项是社会力模型的核心项，很多有关社会力模型的文章都采用式(10)的形式，只是

常数取值有所不同。

② 物理力 $\vec{f}_{a\beta}^{ph}(t)$ 。

$$\vec{f}_{a\beta}^{ph}(t) = k\ominus(r_{a\beta} - d_{a\beta})\vec{n}_{a\beta} + K\ominus(r_{a\beta} - d_{a\beta})\Delta v_{a\beta}^t \vec{t}_{a\beta}. \quad (11)$$

物理力是行人身体相互接触而产生的作用力，当相互作用行人的半径和大于彼此之间的距离时发生，也就是 $r_{a\beta} > d_{a\beta}$ 。这种身体接触一般只在惊恐和逃生时考虑(因为在瓶颈或门处存在高密度的行人)。物理力由身体力和滑动摩擦力两部分构成。身体力是反抗其他行人的压缩力，避免身体被破坏，如(11)式右侧第一项所示。滑动摩擦力来自一种趋向，是一种切向力，避免行人在很小的距离内以较大的速度通过他人，如(11)式右侧第二项所示。式(11)中 k 和 K 分别表示人体弹性系数和滑动摩擦力系数，均为常数， $t_{a\beta} = (-n_{a\beta}^2, n_{a\beta}^1)$ 表示切向，切向相对速度为 $\Delta v_{a\beta}^t = (\vec{v}_{\beta} - \vec{v}_a) \cdot \vec{t}_{a\beta}$ 。身体力的核心函数 $\ominus(x)$ 是一个分段函数，表达式为

$$\ominus(x) = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (12)$$

式中： $x > 0$ 表示相互作用的行人间的距离小于其半径和，此时 $\ominus(x)$ 取 x ；其他情况下取0，表示行人之间没有接触。

2) 与其他物体的作用力。

行人要与建筑物、墙壁、街道、障碍等的边界保持一定距离，这种距离也用力的形式来表示。当行人活动时，越接近边界会觉得越不舒适，因为行人会把注意力更多地放在避免受伤害方面。边界 B 引起的斥力效应为

$$\vec{F}_{aB}(\vec{r}_{aB}) = -\nabla_{\vec{r}_{aB}} U_{aB}(\|\vec{r}_{aB}\|), \quad (13)$$

其值为负且随 $U_{aB}(\|\vec{r}_{aB}\|)$ 单调递减。引入向量 $\vec{r}_{aB} = \vec{r}_a - \vec{r}_B$ ， $\vec{r}_B$ 表示边界 B 距行人 a 最近的点，此时可采用与行人间斥力相似的表达式：

$$\vec{f}_{aB}(t) = \left\{ A_a \exp\left(\frac{r_a - d_{aB}}{B_a}\right) + k\ominus(r_a - d_{aB}) \right\} \vec{n}_{aB} + K\ominus(r_a - d_{aB}) < v_{aB}, \vec{t}_{aB} > \vec{t}_{aB} \quad (14)$$

2.3 吸引作用

行人有时会被其他人(朋友、街头艺术表演者等)或物体(如视窗、显示屏等)吸引，在地点 $\vec{r}_i$ 的吸引效应 $\vec{f}_{ai}^{att}$ 可用与斥力效应相似的单调递增势函数 $W_{ai}(\|\vec{r}_{ai}\|, t)$ 表示为

$$\vec{f}_{ai}^{att}(\|\vec{r}_{ai}\|, t) = -\nabla W_{ai}(\|\vec{r}_{ai}\|, t), \quad (15)$$

式中： $\vec{r}_{ai} = \vec{r}_a - \vec{r}_i$ 为行人与吸引点的位置矢量差。

吸引力 $\vec{f}_{ai}^{att}$ 与行人之间相互作用力的不同之处是：前者的作用范围大于后者，且前者随时间、兴趣的减少而减少，直到0。吸引力有助于形成行人群体(与分子间作用力相似)。虽然实际情况中存在吸引力，但吸引力在模型中不是必须的，大多数模拟中即使忽略吸引力，仍能模拟出较为真实的行人现象。行人与物体的吸引力一般用式(10)的形式表示，而人与人之间的吸引力用常数 $C_{a\beta}$ 与向量 $n_{a\beta}$ 的积表示，表达式^[9-10]为

$$\vec{f}_{a\beta}^{att} = -C_{a\beta}n_{a\beta}(t). \quad (16)$$

2.4 不同方向的行人影响

行人运动时的密度和方向通常是不均匀的，而其他行人对当前行人的影响也是不均匀的，通常前面的行人对当前行人的影响比后面的大，也就是说人行走时很少注意后面。同时，人一般具有预见其他人运动趋势的能力，因而对其他人的运动会做出反应。对这种情况，社会力模型做了如下规定：视域内的行人应该比视域外的行人对当前行人的影响大。而式(5)至(16)中吸引力和斥力的影响只适用于期望方向 $\vec{e}_a(t)$ ，因此，为考虑上述影响，即考虑后面行人对当前行人的影响较前面的行人对当前行人的影响微弱，引入方向权重(假定人的有效视角为 2φ)：

$$\omega(\vec{e}, \vec{f}_{a\beta}^{soc}) = \begin{cases} 1, & \vec{e} \cdot \vec{f}_{a\beta}^{soc} \geq \|\vec{f}_{a\beta}^{soc}\| \cos \varphi, \\ c, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中： c 是取值范围为 $[0, 1]$ 的常数。

文献[9—11]在2004年改进了方向权重的表达式，为反应后面行人对当前行人的影响小于前面的行人，引入一个大于0且小于1的常数 λ_a ，从而将期望运动方向和行人间斥力的角度 $\varphi_{a\beta}$ 包含进来。表达式为

$$\omega(\vec{e}, \vec{f}) = \lambda_a + (1 - \lambda_a) \frac{1 + \cos(\varphi_{a\beta})}{2}. \quad (18)$$

综上，某个行人 β 对当前行人的排斥力和地点 i 对当前行人的吸引力分别为

$$\begin{aligned} \vec{F}_{a\beta}(\vec{e}_a, \vec{r}_a - \vec{r}_\beta) &= \omega(\vec{e}_a, -\vec{f}_{a\beta})\vec{f}_{a\beta}(\vec{r}_a - \vec{r}_\beta), \\ \vec{F}_{ai}(\vec{e}_a, \vec{r}_a - \vec{r}_i, t) &= \omega(\vec{e}_a, \vec{f}_{ai}^{att})\vec{f}_{ai}^{att}(\vec{r}_a - \vec{r}_i, t). \end{aligned} \quad (19)$$

由于模型规定所有确定的影响都以力学表达式的形式给出，上述提到的驱动力、行人之间的作用力、行人与物体之间的斥力及吸引力等各种

确定的影响同时对行人产生作用，最终得到这些力的合力 $\vec{F}_a(t)$ 的表达式，如式(2)所示。社会力模型目前的总公式如式(1)所示。

行人的行为具有随机性并受到随机影响，故在模型中引入变动项。这些变动项来自两种或两种以上可选择的不同状况，例如，从左边或右边绕过障碍物的状况是一样的。变动项还来自于事故或与运动常规的背离，这种作用既可以额外添加一种力或表达式，也可以作用在期望速度上，以不同的期望速度来实现。

为了使模型更符合实际，引入实际速度 $\vec{v}_a(t)$ 与偏好速度 $\vec{\omega}_a(t)$ 的关系表达式。实际速度受限于行人个人可接受的最大速度 $v_a^{\max}$ ，假定实际速度可由式(20)给出：

$$\frac{d\vec{r}_a}{dt} = \vec{v}_a(t) = \vec{\omega}_a(t)g\left(\frac{v_a^{\max}}{\|\vec{\omega}_a\|}\right), \quad (20)$$

$$g\left(\frac{v_a^{\max}}{\|\vec{\omega}_a\|}\right) = \begin{cases} 1, & \|\vec{\omega}_a\| \leq v_a^{\max}, \\ v_a^{\max} / \|\vec{\omega}_a\|, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式(20)的含义可适当引申，把最大速度理解为环境允许速度，当环境允许速度大于或等于偏好速度时，行人将以偏好速度前进；当环境允许速度小于偏好速度时，行人只能以当前环境允许的最大速度前进。根据情况，实际模拟中此项的表达式^[9, 12]为

$$v_a^0(t) = [1 - n_a(t)]v_a^0(0) + n_a(t)v_a^{\max}, \quad (22)$$

式中： v_a^0 为初始期望速度； $n_a(t)$ 表示行人的紧张程度， $n_a(t) = 1 - \bar{v}_a(t)/v_a^0$ ， $\bar{v}_a(t)$ 为期望方向上的平均速度。

3 系数选取

1) 社会力系数。

对于心理作用项，如式(23)所示，常数 A_a 通常有两种表达方式，一种是把行人质量视为单位质量，此时 A_a 的表达方式为加速度，单位为 $m \cdot s^{-2}$ ，取值有 $2.1 m \cdot s^{-2[8]}$ ， $5 m \cdot s^{-2[12]}$ ；另一种是考虑行人的质量，此时 A_a 的表达方式为力，单位为N，取值有 $2000 N^{[1]}$ ， $160 N^{[2]}$ ， $300 \sim 900 N^{[13]}$ ；行人的半径取肩宽 $[0.5, 0.7]$ 的均匀分布；常数 B_a 的取值有 $0.3 m^{[8]}$ ， $0.08 m^{[1]}$ ， $0.1 m^{[12]}$ ， $0.5 m^{[13]}$ 。

$$\vec{f}_{a\beta}^{soc}(t) = A_a \exp\left(\frac{r_{a\beta} - d_{a\beta}}{B_a}\right) \vec{n}_{a\beta} \omega(\vec{e}, \vec{f}). \quad (23)$$

国外成年人的体重均值一般取 80 kg，中国成年人的体重均值为 65 kg 左右，显然两者并不相同，其标准差为 10 kg 的正态分布^[14]。正常人的瞬时加速度一般不超过 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，因此，正常情况下 A_a 取值为 200 N 或 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ，已有模拟结果也显示，一般情况下这一取值足够产生理想的模拟结果。对于 B_a ，当 $r_{a\beta} - d_{a\beta} > 0$ 时，社会力 $\vec{f}_{a\beta}^{soc}$ 随 B_a 的增大而减小；当 $r_{a\beta} - d_{a\beta} < 0$ 时，社会力随 B_a 增大而增大。因此，须区分行人之间有接触力和无接触力两种情况，无接触力时， B_a 的取值须保证在一定范围内社会力对行人的影响可忽略。

2) 物理力系数。

由于原社会力模型没有限定人体的可压缩范围，故原模型假定物理力是线性的。假定当人的承受能力达到极限时，人体所承受的最大力除以压缩量即为人体的弹性系数。限定人体的最大压缩量为人体尺寸(按肩宽的两倍计算)的 20%，取最小值即 0.1 m，此时达到的最大压力为 $4\,450 \text{ N}^{[1]}$ ，式(11)第一项的人体弹性系数 k 可取 $4.4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ，模拟时可不再取已有的人体弹性系数 $k = 1.2 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1[1]}$ ，相应的滑动摩擦系数 K 不超过 $6 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

4 社会力模型对行人流的模拟

社会力模型能够模拟行人的自组织现象，还能模拟行人在惊恐时的逃生行为，可以说较为真实地模拟了行人流。因此，可据此提出一些有意义的结论，并就建筑物通道和出入口设计提出改进措施。

1) 自动渠化(Lane Formation)：指相反方向的行人自动分离，而同向的行人自动排列的自组织现象，如图2所示。自动渠化可有效减少行人与对向行人之间的冲突，提高通道的效率。

2) 流动条纹(Stripe Formation)：指不同方向的行人交汇时发生的自组织现象，是一种动态的分离现象，发生时不同方向的行人相互渗透。这种现象与自动渠化有相似之处，不同的是渠化现象

发生的情形是行人流方向正好相反，而条纹现象发生则是行人以小于 180° 交汇，如图3所示。

3) 瓶颈摆动(Bottleneck Oscillation)：指两组行人都要通过瓶颈(如门或窄通道)到另一方向时发生的自组织现象。两边的行人轮流通过瓶颈，而不是一方走完另一方再走，如图4所示。

通过对行人流的模拟，文献[8—9, 12]给出了出入口和通道的一些改进措施，包括加宽出口、在出口处加柱子或栏杆、大的房间或大厅内的通道应越靠近出口越宽，如图5所示，这样不仅能减少行人间的作用力，还能提高通行效率。长通道最好有一定的弯度，可以减少行人之间的压力。

5 结论

社会力模型用数学解析式表达了行人在复杂环境下的运动过程，明确了行人交通行为的产生源于自身的主观行动力。模型把行人视为椭圆体，与基于网格的模型相比，这种方法较精确；再者，由于社会力模型具有连续性特征，所以能够精确描述各种层次的作用力，并能解释行人交通行为的本质，同时，模型中的行人在人流密度大及惊恐逃生时能够相互接触，这是元胞自动机模型、排队模型等所不具备的；模型还模拟出了行人的自组织行为，比如自动渠化、流动条纹、瓶颈摆动、从众行为、快即是慢效应(faster is slower effect)等自组织现象。故社会力模型的模拟结果比较接近真实情况，在行人建模研究上是一次较大的突破。许多学者在此模型基础上做了修正，如文献[13]对模型参数的改进；有些学者将社会力模型与其他一些行人交通模型相结合，对不同场景的行人仿真进行研究。

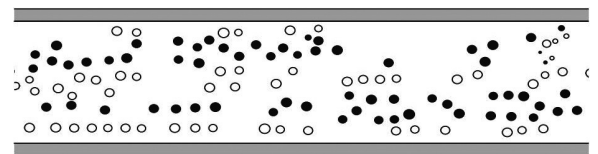


图2 自动渠化现象

Fig.2 Canalization phenomenon

社会力模型的不足与改进方法：1)模型缺少明确有效的机制来保证行人不过度接触(又称重叠)，需要引入防重叠机制。2)模型采用很大的人体弹性系数来避免行人“重叠”，如 $k = 1.2 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ，使行人成为非常刚性的结构，以人体压缩量5 cm为例，接触力会达到6 000 N，几倍于行人的体重(以80 kg为例)，因此，模型参数选取须考虑实际情况。3)模型中的行人排斥行为与实际行人

排斥行为与实际行人排斥行为。3)模型中的行人排斥行为与实际行人排斥行为。

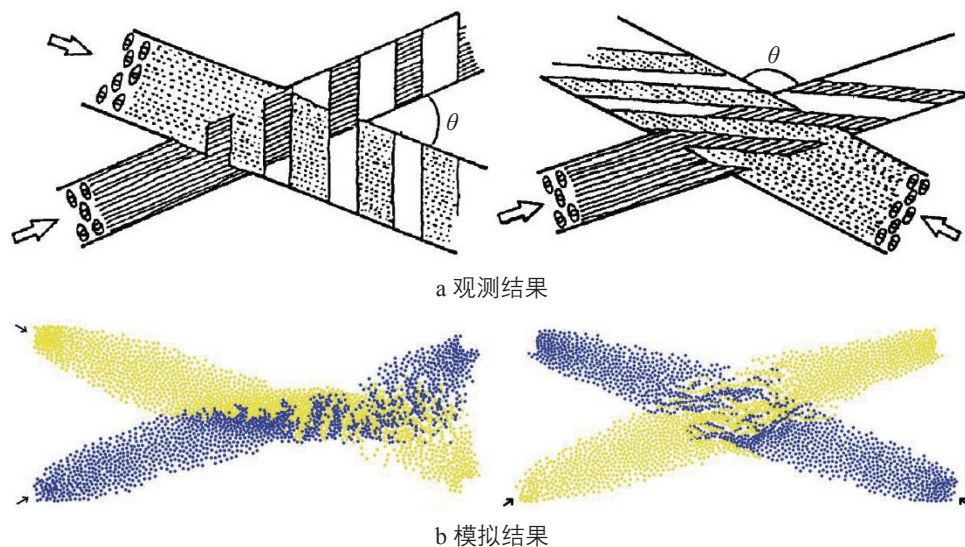


图3 流动条纹

Fig.3 Stripe formation

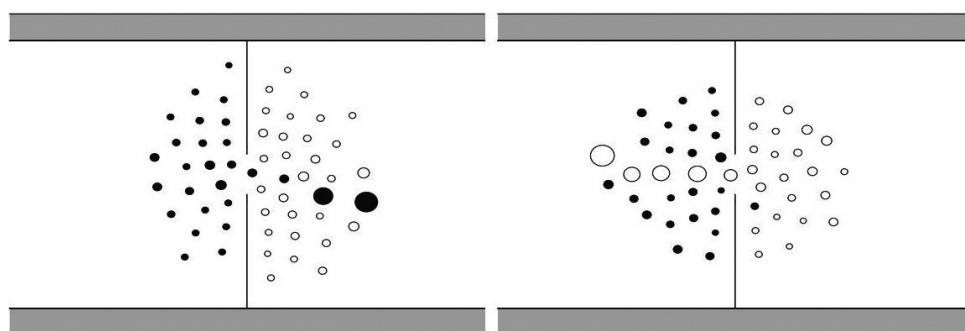
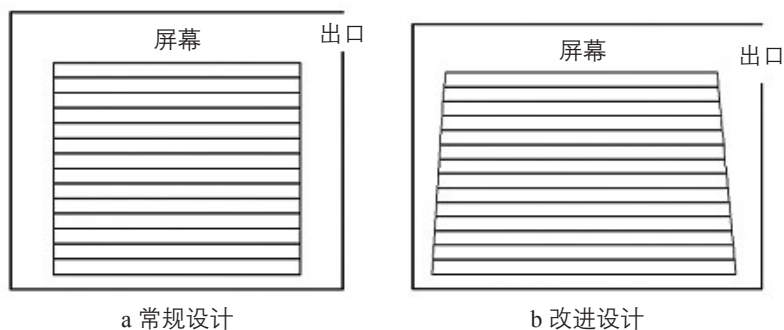


图4 瓶颈摆动

Fig.4 Bottleneck oscillation



a 常规设计

b 改进设计

图5 通道与出口的常规设计与改进设计

Fig.5 Regular and improved design for passage and exit

运动不完全符合。当行人距离很近时, 模拟的行人表现出与实际不符的振动行为和排斥行为, 因此, 需引入平滑机制。很多模拟中用小的时间步距来实现行人运动的连续性, 但实际情形并不是这样, 因为行人每秒钟不可能走太多步, 故可考虑实际的步行、跟随等行为。4)模型中的行人完全受“力”的支配, 很少考虑人的智能行为, 一些假设过分简化了行人的路径发现过程, 因而, 模型还不能有效模拟行人更复杂的行为, 可引入人工智能的相关理论。5)算法的复杂性。由于社会力体现了行人之间的相互影响, 随着行人数量的增加, 运算速度会呈几何级数下降。虽然已经提出了一些改进算法, 但仍需完善, 如需引入更有效的行人作用范围和数值计算方法, 快速找到行人周围与之作用的其他行人, 建议参考高效的动态空间位置查询算法。6)模型中障碍物对行人的反作用力采用了与行人之间的作用相似的表达方式, 计算方法尚不成熟。实际上行人对障碍物的反应与对其他行人的反应是不同的, 对静止障碍物与动态障碍物的反应也不同。因而, 社会力模型对复杂环境下的建模尚不完善, 需分别考虑复杂环境下的不同物体。

参考文献:

References:

- [1] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic[J]. *Nature*, 2000, 407 (6803): 487–490.
- [2] Yu W, Johansson A. Modeling Crowd Turbulence by Many-particle Simulations[J]. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2007, 76(4): 1–5.
- [3] Helbing D, Johansson A, Al-Abideen H Z. Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study[J]. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2007, 75(4): 1–7.
- [4] Helbing D, Farkas P M I J, Vicsek T. Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations Normal and Evacuation Situations[J]. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2002(2): 21–58.
- [5] Lin P. A Granular Dynamic Method for Modelling the Egress Pattern at an Exit[J]. *Fire Safety Journal*, 2007(42): 377–383.
- [6] Pelechano N, Allbeck J M, Badler N I. Controlling Individual Agents in High-density Crowd Simulation[C] // Popovic D M J. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2007: 99–108.
- [7] Sud A. Real-time Navigation of Independent Agents Using Adaptive Roadmaps[C] // Stephen N Spencer. *Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Irvine CA: The ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2007: 99–106.
- [8] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 1995, 51 (5): 4282–4286.
- [9] Helbing D. Traffic and Related Self-driven Many-particles Systems[J]. *Reviews of Modern Physics*(Rev. Mod. Phys), 2001, 73(4): 1067–1128.
- [10] Apel M. Simulation of Pedestrian Flows Based on the Social Force Model Using the Verlet Link Cell Algorithm[D]. Poznan: Poznan University of Technology, 2004.
- [11] Johansson A. Pedestrian Simulations with the Social Force Model[D]. Dresden: Dresden University of Technology, 2004: 64.
- [12] Helbing D. Self-organized Pedestriancrowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 1–24.
- [13] Lakoba T I, Kaup D J, Finkelstein N M. Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution[J]. *Simulation*, 2005, 81(5): 339–352.
- [14] 中国肥胖问题工作组数据汇总分析协作组. 我国成人体重指数和腰围对相关疾病危险因素异常的预测价值: 适宜体重指数和腰围切点的研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2002, 23(1): 5–10.