

8-17-2020

Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation

Zhihong Miao

1. Department of Management, The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China;;

Zhihui Li

2. Department of Scientific Research, The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, Chna;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation

Abstract

Abstract: Computer simulation of evacuation can be very helpful in building design for fire protection and reducing casualty in compartment fire. *A coupling model for occupant evacuation building fires was proposed.* A continuous model was composed by treating pedestrians movement as fluid movement, and *by using Smoothed Particle Hydrodynamics method to discretize this continuous model,* the model was transformed into a particle system. *A method for coupling FDS into the occupant evacuation model was proposed,* and the amounts of smoke density and smoke charge of pedestrian were used to determine the move direction of a pedestrian and to estimate whether a pedestrian incapacitated or not. The proposed model can simulate the phenomenon of evacuation more real and reasonable.

Keywords

evacuation model, social force model, smoothed particle hydrodynamics (SPH), fire dynamics simulator (FDS)

Recommended Citation

Miao Zhihong, Li Zhihui. Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 292-300.

火灾环境下人员疏散耦合 SPH 模型及仿真

苗志宏¹, 李智慧²

(1. 中国人民武装警察部队学院管理系, 廊坊 065000; 2. 中国人民武装警察部队学院科研部, 廊坊 065000)

摘要: 火灾环境下人员安全疏散计算机模型研究对建筑防火设计、减少人员伤亡等具有重要的指导意义。建立了一种考虑火灾环境因素的室内人员疏散耦合模型。建立了一种模拟人员运动的连续型模型, 并利用光滑粒子流体力学方法(SPH)将模型离散化为粒子系统。给出了一种将火灾动力学模拟结果耦合到疏散模型中的方法, 其中由火灾烟气蔓延参数来决定人员运动状态和失能情况。提出的模型能够比较准确的反映人员疏散的实际情况。

关键词: 人员疏散模型; 社会力模型; 光滑粒子流体力学(SPH); 火灾动力学模拟(FDS)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 02-0292-09

Coupling SPH Model for Occupant Evacuation in Fires and Simulation

Miao Zhihong¹, Li Zhihui²

(1. Department of Management, The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China;

2. Department of Scientific Research, The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China)

Abstract: Computer simulation of evacuation can be very helpful in building design for fire protection and reducing casualty in compartment fire. A coupling model for occupant evacuation building fires was proposed. A continuous model was composed by treating pedestrians movement as fluid movement, and by using Smoothed Particle Hydrodynamics method to discretize this continuous model, the model was transformed into a particle system. A method for coupling FDS into the occupant evacuation model was proposed, and the amounts of smoke density and smoke charge of pedestrian were used to determine the move direction of a pedestrian and to estimate whether a pedestrian incapacitated or not. The proposed model can simulate the phenomenon of evacuation more real and reasonable.

Keywords: evacuation model; social force model; smoothed particle hydrodynamics (SPH); fire dynamics simulator (FDS)

引言

火灾环境下人员安全疏散的研究对建筑防火设计、人员安全疏散预案制定、火灾救援等具有重要的指导意义。根据实际观察的现象和人员运动的一般规律, 建立相应的人员疏散数学模型、进行计

算机仿真模拟的过程是一种比较经济而有效的研究手段。

常见的人员疏散数学模型有宏观模型和微观模型之分^[1]。宏观模型将人群视为连续的连流动介质, 主要采用成熟的流体力学理论来研究。Henderson 最早提出了宏观模型^[2], 他把行人与流体质点运动进行类比, 用流体动力学模型来模拟行人交通。接着 Helbing 在 Boltzman 方程的基础上, 提出了类流体的行人运动模型^[3]。R.L.Hughes 利用连续统理论进一步把行人拓展为多种类型^[4]。而



收稿日期: 2014-09-23 修回日期: 2015-01-15;
基金项目: 河北省科技计划项目(15275408D);
作者简介: 苗志宏(1964-), 男, 藏族, 云南迪庆, 博士, 教授, 研究方向为模糊控制、火灾预防与控制等; 李智慧(1981-), 女, 湖北黄石, 博士, 讲师, 研究方向为火灾数值模拟和灭火救援仿真。

<http://www.china-simulation.com>

Hoogendoorn 等人提出一个更为复杂的气体动力学行人运动模型^[5]。但 these 方法中难以考虑人员的个体差异, 如果要考虑个体差异就要对模型进行修正; 此外这些模型的计算量会随着人数的增大而急剧增大, 计算效率较低。

微观模型又分为离散型模型和连续型模型。离散模型中以元胞自动机模型为主流^[6-10], 元胞自动机的优点是规则简单, 计算速度快, 能快捷地模拟出各种复杂的一些现象。但由于受空间划分方式的局限, 无论是 Von Neumann 邻域模型还是 Moore 邻域模型对表现行人运动趋势的能力具有一定局限性。由于每个网格单元只能容纳一个成员, 因此也比较难以表现人员之间的拥挤等微观现象。此外, 对于不同的现象还要制定不同对应规则。

连续型模型中最典型的是 Helbing 提出的社会力模型^[11-12]。社会力模型将疏散人员与环境及人员之间的物理作用和心理作用量化为吸引力、排斥力及自驱动力, 并用牛顿第二定律等物理定律来表述。社会力模型能精确描述人员恐慌状态下的疏散行为, 如“欲速则不达”、“从众心理”等。但是这种模型也具有一些明显的缺陷, 主要是: 随着场景中人数的增加, 每步更新计算时行人与行人之间的相互作用的计算就是人数平方的规模, 即时间复杂度为 $O(N^2)$, 这样当场景和人群规模增大时, 每步更新计算的时间就会增加。

在文献 [13] 中利用光滑粒子流体动力学^[14-15](Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称 SPH)方法、结合宏观模型和社会力模型, 给出了一种新的人员疏散混合模型。SPH 方法是近年来发展起来的一种新型数值计算方法, 并得到了广泛的应用^[16-21], 这种方法是一种无网格的 Lagrange 方法, 它将连续介质用一系列粒子来表示, 对每个粒子通过搜索周围其他粒子, 并采用光滑核函数进行插值来更新该粒子下一步的属性值。由于光滑核函数的半径比较小, 计算每个粒子属性值时只需要考虑周围少数粒子即可, 因此可以大大减少计算量。

此外, 这种方法在计算微分时不需要将空间进行网格化, 不同于元胞自动机, 可以实现粒子按任意的方向运动, 粒子之间的距离可任意压缩。因此在模拟人员疏散时运动方向上不受局限且容易表现人员之间的拥挤等微观现象。

但在文献[13]中建立的 SPH 疏散混合模型没有考虑火灾环境因素对人员疏散的影响。在实际火灾环境下, 烟气的蔓延是影响人员安全疏散的主要因素。人员在烟气环境下, 由于能见度降低, 判断正确逃生路线的能力和运动速度也会随之降低, 因此会直接影响逃生效果。另一方面, 人员吸入大量烟尘、毒气或缺氧会导致死亡。据统计建筑火灾下, 约 75%~85% 的人员死亡是由烟气导致的^[22]。目前, 有关火灾环境下的疏散问题研究大多是基于烟气毒性评价模型(如 FED, FEC, TGAS 等)^[22-24]、针对建筑安全疏散的总体评估进行讨论的。而由芬兰 VTT 技术研究中心开发的软件 FDS+Evac 是基于火灾动力学模拟器 FDS(Fire Dynamics Simulator)^[25]之上的疏散模拟软件, 实现了火灾环境影响下的疏散模拟, 模拟过程考虑了微观个体的疏散状态。在 FDS+Evac 中也考虑了烟气毒性和烟气能见度对疏散的影响, 而其中采用的疏散模型是 Helbing 提出的社会力模型^[26]。

鉴于此, 本文在 SPH 疏散模型基础上来建立一种新的考虑火灾环境因素的人员疏散模型。模型建立过程中通过模拟室内烟气蔓延过程, 将人员烟气负载和烟气能见度耦合到人员运动模式中去, 从而来模拟出人员在火灾环境下的惊慌行为和失能情况。为达到相对真实的效果, 我们采用火灾动力学模拟器 FDS 来模拟火灾环境。

1 SPH 方法的人员疏散模型

1.1 模型建立

Helbing 提出的社会力模型^[11-12]将人员群体视为一个粒子系统, 每个行人用一个粒子来表示, 其运动模型如下:

$$m_a \frac{dv_a}{dt} = m_a \frac{v^0 e(t) - v_a(t)}{\tau_a} + \sum_{b(\neq a)} f_{ab} + \sum_{b(\neq a)} f_{aW} \quad (1)$$

其中： m_a 表示第 a 个粒子的质量； $v_a(t)$ 是粒子的速度； v^0 表示期望速度值；矢量 $e(t)$ 表示一个确定的运动方向。等式右端第 1 项是自适应项，表示粒子在经过时间 τ 后速度值将达到 v^0 ，运动方向改变到 e 方向。在社会力模型中人与人，人与障碍物之间的作用力主要由 3 部分组成：排斥力、挤压力和摩擦力，等式右端第 2 项是活动粒子之间的这 3 种力的合力，而第 3 项是活动粒子与固定粒子之间的这 3 种力的合力。

在文献[13]中，我们在社会力模型基础上，将人员疏散过程视为一种特殊的连续流体运动过程，流体中的每个质点表示一个体，提出了如下疏散模型：

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \frac{v^0 e(t) - v(t)}{\tau} + f_R + f_B + f_V \quad (2)$$

其中： ρ 为流体的密度； f_R ， f_B ， f_V 分别是质点之间的排斥力、挤压力和摩擦力。这里可用流体中的压强来计算排斥力、挤压力，用流体中的粘性力来表示摩擦力，即

$$f_R = -\nabla P_R, f_B = -\nabla P_B, f_V = \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

这里 P_R 是由于群体之间的受心理作用，为保持个体之间的一定距离而表现出的一种压强， P_B 是由于个体之间由于物理(身体)上接触而产生的压强，而 μ 表示粘性系数。这样，通过排斥力 f_R 来模拟人员之间的避让行为，以及人员对障碍物的绕行行为；通过挤压力 f_B 来模拟疏散过程中人员之间以及人员与障碍之间的拥挤行为；通过摩擦力 f_V 来模拟疏散过程中个体之间的相互接触而产生的切向摩擦力。

上面模型中的排斥力、挤压力是通过压强来计算的，由于 2 种力的物理特性不同，因此应该由 2 种不同的压强来计算。经过反复的模拟实验，我们选择了如下计算压强的经验公式：

$$P_R = \begin{cases} \frac{R_0}{1 + \exp(-\lambda \rho^2)} & \rho < \rho_0 \\ 0 & \rho \geq \rho_0 \end{cases},$$

$$P_B = \begin{cases} B_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) & \rho \geq \rho_0 \\ 0 & \rho < \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

这里 ρ_0 表示个体之间刚刚达到物理接触时的临界密度； λ ， R_0 与 B_0 是 >0 的常数(这里常数 R_0 与 B_0 的选择主要来决定粒子之间在一般密度下的排斥距离和活动粒子规避或穿透障碍物的能力)。

1.2 基于 SPH 方法的算法实现

本节我们将 SPH 方法应用到模型(2)上，给出模型的算法。首先将人员和障碍物用一个个的粒子来表示，一个活动粒子表示一个人员，多个相邻的固定粒子可以组成一个障碍物。用 SPH 方法可得到人员疏散的离散模型：

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{v^0 e_a(t) - v_a(t)}{\tau_a} + a_{Ra} + a_{Ba} + a_{Va}, (a=1,2,\dots,N) \quad (5)$$

$$\text{其中：} a_{Ra} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_{Ra}}{\rho_a^2} + \frac{P_{Rb}}{\rho_b^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_{ab}, h_R)$$

$$a_{Ba} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_{Ba}}{\rho_a^2} + \frac{P_{Bb}}{\rho_b^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_{ab}, h_B) \quad (6)$$

$$a_{Va} = -\sum_b m_b \Pi_{ab} \nabla W(\mathbf{r}_{ab}, h_V)$$

这里： W 是光滑核函数； ∇W 是光滑函数的梯度； $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ ；而 \mathbf{r}_a 和 \mathbf{r}_b 分别是粒子 a ， b 的位置矢量； h_R ， h_B ， h_V 为核光滑长度。

在摩擦力计算上，采用 Monaghan 提出的人工粘性项^[27]：

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} \bar{c}_{ab} \varphi_{ab} + \beta_{\Pi} \varphi_{ab}^2}{\bar{\rho}_{ab}} & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{r}_{ab} \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{其中：} \varphi_{ab} = \frac{\bar{h}_{ab} (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{r}_{ab}}{|\mathbf{r}_{ab}|^2 + 0.01 \bar{h}_{ab}^2}; \quad \bar{c}_{ab} = \frac{c_a + c_b}{2};$$

$$\bar{\rho}_{ab} = \frac{\rho_a + \rho_b}{2}; \quad \bar{h}_{ab} = \frac{h_a + h_b}{2}; \quad \alpha_{\Pi} \text{ 和 } \beta_{\Pi} \text{ 是取常数, } c \text{ 是声速。}$$

SPH 离散模型的计算步骤:

1) 计算粒子的密度:

$$\rho_a = \sum_b \rho_b \frac{m_b}{\rho_b} \nabla W(\mathbf{r}_{ab}, h_a), (a=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

这里用如下 poly6 函数作为光滑核函数:

$$W_{\text{poly6}} = \begin{cases} \frac{4}{\pi h^8} (h^2 - r^2)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{other} \end{cases}, (r = |\mathbf{r}|)$$

2) 通过式(4)计算压强 P_R , P_B 。

3) 通过式(6)计算粒子加速度。

由于排斥力和挤压力是通过两种不同的压强来计算的, 在模拟排斥力时可选择较大的核光滑长度, 这里我们取 $h_R = w$ (w 是 SPH 方法网格划分中正方形细胞的边长)。而计算粒子之间的挤压力和摩擦力时, 由于粒子之间有相互接触, 因此要选取较小的核光滑长度, 这里我们取 $h_B = h_V = r_a + r_b$ 。而式(5)中的光滑核函数可以选用 spiky 函数:

$$W_{\text{spiky}} = \begin{cases} \frac{10}{\pi h^5} (h - r)^3 & 0 \leq r \leq h \\ 0 & \text{other} \end{cases}, (r = |\mathbf{r}|)$$

4) 采用蛙跳积分方法(leap Frog)计算粒子的位移:

$$\begin{cases} \mathbf{v}(t+0.5\Delta t) = \mathbf{v}(t-0.5\Delta t) + \mathbf{a}(t)\Delta t \\ \mathbf{r}(t+\Delta t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{v}(t+0.5\Delta t)\Delta t \end{cases} \quad (8)$$

2 基于 FDS 的人员运动模式

上节中的 SPH 人员疏散模型中, 人员运动期望速度 v_a^0 和运动方向 \mathbf{e}_a 对人员疏散效果起着重要作用。其中的运动方向由逃生路线来确定, 一般是人员所在位置指向当前正确的出口。在人员熟悉逃生路线的情况下, 人员运动方向是确定的, 但在火灾环境下, 由于烟气蔓延使能见度降低, 人员正确判断逃生方向的能力随着降低, 因此既定的运动方向会受到干扰, 同时运动速度也比正常情况下要慢。另一方面, 在火灾环境下, 人员由于吸入过多的烟尘、有毒气体或缺氧而会使人员失能甚至死亡。这一节我们利用火灾动力学模拟软件 FDS 来模拟疏散过程中的火灾环境, 通过 FDS 预先模拟

出火灾环境的能见度和烟气毒性剂量, 以此来确定人员运动期望速度和运动方向。

FDS(Fire Dynamics Simulator)是美国国家标准局建筑火灾实验室开发的基于场模拟的火灾模拟软件, 是目前建筑性能化防火设计中主要使用的火灾模拟软件。FDS 软件还提供了数据可视化的软件 SmokeView, 以便于观察火灾模拟的结果。

2.1 FDS 模拟输出数据的预处理

为将 FDS 模拟的火灾环境和人员疏散模型耦合起来, 首先需要对 FDS 输入环境进行设定、对输出数据进行预处理。通过 FDS 软件的模拟, 在本文的研究中我们主要考察 FDS 模拟结果中的烟气毒性有效剂量的 FED 值和烟气环境的能见度。

由于烟气层高度低于人眼高度时, 会对人员造成直接伤害, 因此我们可以在高度为 1.5 m 的水平面处来测量烟气的浓度。为此在 FDS 输入文件中, 增加高度为 1.5 m 的水平切片如下:

```
&SLCF PBZ=1.50, QUANTITY='FED'/
```

```
&SLCF PBZ=1.50, QUANTITY='VISIBILITY' /
```

鉴于在 FDS 火灾环境模拟中已经对计算区域进行了网格化处理, 并且 FDS 的模拟结果数据可在网格交叉结点处测量到。因此, 我们沿用 FDS 在水平面(X, Y)上的网格划分方式, 例如 FDS 火灾模拟的水平计算区域为 $[x_1, x_N] \times [y_1, y_N]$, 而 x_1, x_2, \dots, x_N 和 y_1, y_2, \dots, y_N 分别是 X 轴和 Y 轴上的网格划分点。于是, 网格中的每个矩形区域就成为一个元胞, 如矩形区域 $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ 就是一个元胞, 我们记为 Cell(i, j)。元胞 Cell(i, j) 在某时刻的烟气状态值用该元胞 4 个顶点 (x_i, y_j) , (x_{i+1}, y_j) , (x_i, y_{j+1}) , (x_{i+1}, y_{j+1}) 处的烟气测量平均值来表示。本文中元胞 Cell(i, j) 中 t 时刻的烟气参数 FED 的状态值用 FED(i, j, t) 表示, 烟气能见度用 $S_v(i, j, t)$ 表示。当某一人员移动到元胞 Cell(i, j) 内时, 我们就用这些该元胞烟气状态值来表示该人员所接收的烟气参数。当人员(粒子)按一定路径运动时, 就会经过不同的元胞区域, 图 1 给出了某粒子的运动轨迹和所经过的元胞。

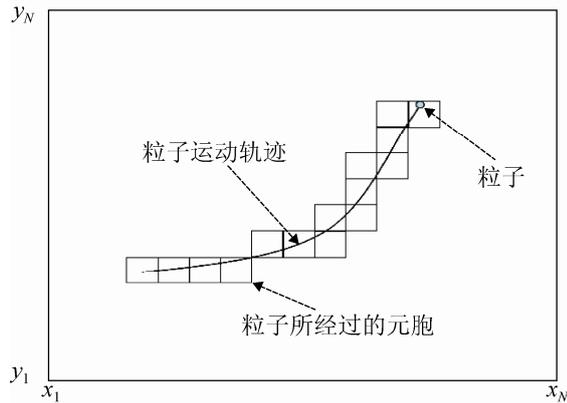


图 1 网格划分和粒子运动轨迹

2.2 火灾环境下人员运动方向和期望速度的选择

通常,在火灾环境下人员的运动方向会受所处环境中烟气浓度的影响,烟气浓度越大,能见度越差,人员的运动更加盲动,因而可以采用随机运动和确定性运动的加权平均来确定人员的运动方向:

$$e_a(t) = (1 - \gamma_a)e_a^0(t) + \gamma_a e_a^R(t) \quad (9)$$

其中: $e_a^0(t)$ 为当前正确的逃生方向; $e_a^R(t)$ 为随机运动方向; γ_a 为权重系数。权重系数 γ_a 的大小一般应由人员当前所处位置(元胞)的烟气能见距离来确定,能见度低时,人员盲动性增大,选择正确的逃生方向的可能性就越小,运动方向的随机性增大,因而 γ_a 应接近于 1,相反,能见度较高时,人员运动方向比较明确, γ_a 应接近于 0。鉴于此,我们如下形式的函数来拟合权重函数:

$$\gamma_a(i, j, t) = \frac{1 + \tanh(-\zeta(S_v(i, j, t) - S_0))}{2} \quad (10)$$

这里 ζ 是一个衰减系数, S_0 是能见度的一个阈值。关于能见度阈值 S_0 的设置,需要依据火灾场景来确定。英国国家标准 BSDD240 建议大空间内的能见度 < 10 m 为危险状态的判据,文献[28]中 Babrauskas 认为在小空间内,个体如果熟知逃生路线,则只需要 1.6 m 能见距离就可成果逃生。因此, S_0 我们可以视情况选择 10 m 或 1.6 m。

在烟气蔓延的环境下,能见度降低不仅影响逃生路线的正确选择,而且行走速度也会减慢。在

FDS+Evac 软件中给出了烟气环境下速度变化的计算公式^[26]:

$$v_i^0(K_s) = \text{Max}\{v_{i,\min}^0, v_i^0 \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} K_s\right)\} \quad (11)$$

这里 K_s 是消光系数, $v_{i,\min}^0 = 0.1 \cdot v_i^0$, Frantzych 和 Nilsson^[29] 通过实验确定了 $\alpha = 0.706$ m/s, $\beta = -0.057$ m²/s。

在本文中我们用能见距离来调节个体的期望速度 v_a^0 , 即当个体 a 运动到元胞 Cell(i, j) 内时,期望速度 v_a^0 随能见距离而减慢:

$$v_a^0(i, j, t) = v^0 \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} K \gamma_a(i, j, t)\right) \quad (12)$$

这里 K 是一个调节系数。

2.3 人员烟气负载量的计算

火灾环境下的人员伤亡主要是热量、烟气和缺氧 3 种因素的作用造成^[30]。而其中烟气所造成的伤害比例最大。大部分是因为吸入了烟尘和有毒气体。目前,对于烟气毒性危害的评价已有多种模型: CO 毒性随机模型、窒息性气体的 FED 模型、刺激性气体毒性的 FEC 模型和 N 气体模型^[23]。其中应用最广的是由 Hartzell 与 Emmons 提出的 FED(Fractional Effective Dose, 有效剂量分数)^[31]。FED 是通过分别测量主要毒性气体的暴露时间和浓度、并比较混合气体的 FED 总值来进行计算的,如果 FED 的累积值达到预测的 FED 阈值,便认为个体失能而不能安全逃生。根据所考虑的烟气毒性成分的不同, FED 有多种计算公式。在 FDS+Evac 软件中给出的是由 Purser 提出的采用气体中 O_2 , CO_2 , 和 CO 浓度进行计算的^[26], 其总剂量 FED 的计算公式如下:

$$FED_{\text{tot}} = FED_{CO} \times HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (13)$$

其中: FED_{CO} 是气体 CO 使个体失能剂量的分数值, FED_{O_2} 是缺氧剂量使个体失能的分数值。当环境中 CO_2 浓度 $> 2\%$ 时,会使个体过度换气而诱导过量地吸入窒息性气体,因此在 FED_{O_2} 上乘以一个放大因子 HV_{CO_2} 。当 FED 值超过一个阈值时,个体被认为是失能了。

由于个体的烟气负载量是一个烟气毒性积累的过程, 个体毒性烟气的吸入量是随行走路线上烟气浓度的变化而变化的, 因此在这里我们构建如下形式的烟气负载量迭代模型:

$$L_a(t + \Delta t) = L_a(t) + \sum_{i,j} \delta_a(i, j) \text{FED}_{\text{tot}}(i, j, t + \Delta t) \Delta t \quad (14)$$

这里用 $L_a(t)$ 来表示人员 a 在当前时刻 t 时的烟气负载量, 其中 $\text{FED}_{\text{tot}}(i, j, t)$ 是 t 时刻元胞 $\text{Cell}(i, j)$ 中的 FED 值, 而

$$\delta_a(i, j) = \begin{cases} 1 & a \in \text{Cell}(i, j) \\ 0 & a \notin \text{Cell}(i, j) \end{cases}$$

当个体 a 的烟气负载量 $L_a(t)$ 超过某个阈值时, 便认为该个体失能, 在模拟中设定此时的生命值为 $\text{Life}=0$, 期望速度变为 $v_a^0 = 0.0$ 。

3 仿真案例

对本文给出的火灾环境下的 SPH 人员疏散模型, 我们通过 Visual Studio C++ 6.0 平台和 OpenGL 库编写了疏散模拟软件。这一节我们在这个软件上通过一个典型火灾场景来验证模型的有效性。

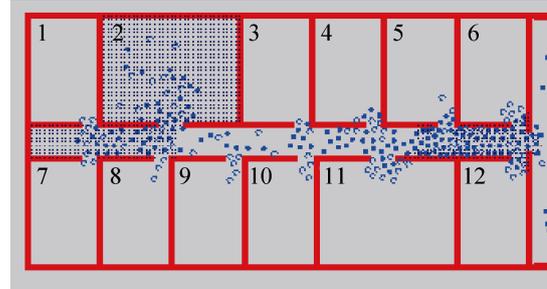
3.1 仿真实验基本条件

假设模拟场景为某建筑物的一层办公区域, 其平面结构和 FDS+SmokeView 中的显式效果如图 2(a), (b)所示。

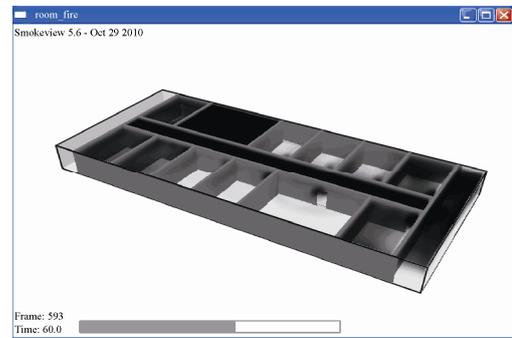
这一层中主要有 2 类大小不同的房间, 共 12 个房间, 尺寸分别是 $6.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 和 $6.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$, 房门宽度分别是 1.0 m 和 1.2 m , 走廊宽度为 2.0 m , 走廊上右侧仅有一个向外的出口, 门宽是 1.5 m , 假设模拟中所有房门是敞开的。图 2(a)中红色的线条表示墙面, 蓝色的点表示人员, 阴影区域表示烟气蔓延的区域。

模拟中, 设定该楼层中人员数量: 260 人, 人员均匀地分布在各个房间中。人员成分由老、中、青 3 类人员构成(青年人 87, 中年人 87, 老年人 86 人)。其中用空心小圆点表示表示老年人, 其期望速度为 0.5 m/s ; 用实心小圆点表示中年人, 其期

望速度为 1.0 m/s , 用实心小正方形颗粒表示青年人, 其期望速度为 2.0 m/s 。人员按房间面积是均匀随机分布的。各房间中的人员以指向当前房间门口的方向为当前正确的逃生方向, 当人员到达走廊后又以指向楼层出口的方向为正确的逃生方向。



(a) 模拟软件中的建筑结构平面图



(b) FDS 中构建的建筑结构图

图 2 办公区建筑结构图

模拟过程中设置火源位置在 2 号房间内(如图 2(a)(b)所示)。在 FDS 中设置热释放速率 HRRPUA 为 3000 KW/m^2 , 火灾是从房间中的沙发上引起的(如图 2(b)所示)。在 FDS 软件模拟火灾环境过程中, 其烟气蔓延效果、烟气毒性剂量 FED 和能见距离在水平切片 $\&\text{SLCF PBZ}=1.50$ 处进行测量。

模拟过程中取时间步长为 0.01 s , 代表人员的粒子, 其半径随机取 $[0.25, 0.35]$ 中的一个数。图 2(a)给出了火源位置在 A 处情况下, 疏散过程的一个瞬间。图中阴影部分是烟气能见度小于阈值 (1.6 m) 的区域。从图 2(a)中可以看出, 发生火灾的房间内此时已经烟雾弥漫了。

从 FDS 火灾模拟过程观察到, 在火灾发展过程中, 烟气从起火房间溢出后, 首先沿走廊顶棚向两端蔓延, 并且烟气层逐渐下移。在走廊两端烟气

下移速度比中部要快,这也可以从图 2(a)中走廊上阴影区域的扩展过程看出这一点。

当人员处于能见度较低的烟气环境下,行走速度会随之降低,当人员在阴影区域时出现了大量人员滞留现象(如图 2(a)),这是因前方人员运动速度降低,而后方不断有人跟进引起的。在走廊的出口端,由于出口宽度小,加之能见度比中部小,因而产生人员大量聚集,而不能及时疏散。

为检验本文方法的有效性,以下分几种情况进行模拟实验。

3.2 实验一(有和无烟火环境条件下的疏散对比)

以下就无烟火环境和有烟火环境下的人员疏散效果进行对比。实验中设定火灾发生到开始撤离的时间是固定的(50 s),其他模拟参数也一致。图 3 给出了无烟火环境下逃生人数统计图(假设走出走廊大门视为安全逃生)。而图 4 给出了有烟火环境下逃生人数统计图。

从图 3 和图 4 中可以看出,无烟火环境下人员疏散效率明显比有烟火环境下要高。蓝色实线代表的青年人在无烟火的环境中大概在 60~70 s 左右就撤离出 80 人。而在有烟火的环境中,大概在 130~140 s 才撤离出 80 人,耗时是无烟火状态的两倍。另外,在无烟火的环境中,120 s 后老、中、青安全逃离的人数相当,而在有烟火的环境下,150 s 时,中年人比青年人安全逃离人数少 13 人,而老年人则比中年人少将近 20 人。通过实验数据分析,其主要原因是火灾环境下由于能见度降低,人员行走速度要比正常情况下小。此外,青年人由于奔跑速度快,在 2 种情况下成功逃生的人数明显高于中年和老年人。这些与实际情况是相符的。从统计数据看火源房间(2 号房)内逃离的人数相对较少,远离出口房间(1, 7, 8 号)初期逃离人数也较少,而其余房间内人员逃离人数相对均衡。

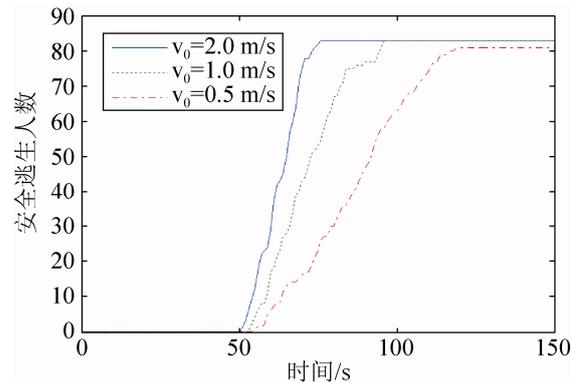


图 3 无烟火情况下安全逃生人数统计图

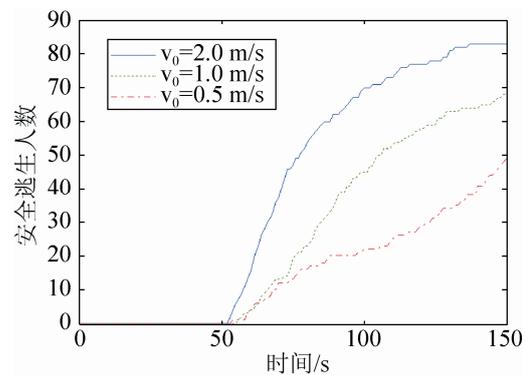


图 4 有烟火情况下安全逃生人数统计图

3.3 实验二(不同出口宽度条件下的疏散对比)

在实践的建筑消防安全设计中,影响人员安全疏散的主要因素之一是出口的宽度。以下实验就走廊上右侧出口设置不同宽度来考察相应的疏散效果。

图 5 给出了出口宽度分别取 0.75~2.0 m 之间的值时的人员安全逃生数量统计图(其中实验中疏散准备时间均是 50 s)。

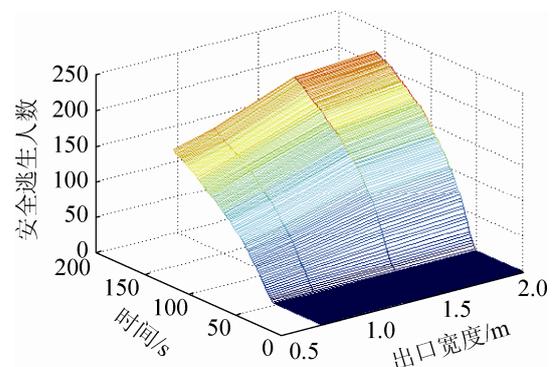


图 5 不同出口宽度条件下安全逃生人数统计图

从图 5 中可以看出, 随着出口宽度增大, 人员安全疏散的效率随之提高, 而当出口宽度大于 1.4 m 之后, 疏散效率趋于平缓。

3.4 实验三 (不同疏散准备时间条件下的疏散对比)

疏散准备时间也是影响人员安全疏散的主要因素。以下来观察在不同疏散准备时间下失能人数的变化情况。人员疏散准备时间是指自火灾发生时起至疏散人员开始行动的时间。在实际火灾情况下, 人员之间的疏散准备时间是有差异的, Purser 等^[32]通过大量的实验, 使用对数正态分布是比较合适。为简单起见, 在本次实验中我们假设所有人员的疏散准备时间是相同的。表 1 给出了实验统计数据。

表 1 不同疏散准备时间下失能人数统计表

疏散准备时间/s	20	30	40	50	60	70	80
青	0	0	0	0	1	0	2
中	0	0	0	0	2	2	3
老	0	0	1	4	5	6	3

从表 1 的数据看, 疏散准备时间越长, 失能人数随之增长, 并且失能者多出现在运动速度较慢的人员上。从模拟中也观察到这些失能者大多是来自火源房间的人员。

上面模拟过程表征的这些现象比较符合实际火灾环境下人员逃生的一些现象, 这说明了本文模型的合理性。在模拟中我们还对比了火源在不同位置时的疏散效果, 也基本符合实践疏散的情况。当火源位置在出口附近和远离出口时(如在 11 号房间和 2 号房间), 疏散效果相差不大, 这与实践的疏散问题有出入。当然, 模拟中我们也做了一些适当的假设, 在今后的模拟研究中我们将模拟的环境更加贴近实际情况。

4 结论

本文建立了一种考虑火灾环境因素的人员疏散模型, 主要给出了一种如何将火灾环境因素耦合

到疏散模型中的方法, 并开发出了一个相应的人员疏散软件。建立的疏散模型结合宏观模型和社会力模型各自的优势, 即可以克服宏观模型不能体现人员个性差异的缺陷, 又可避免离散模型复杂运动规则的制定。

模型算法实现过程中通过 SPH 方法将其离散化为粒子系统, 用固定粒子群来表示障碍物, 其中用粒子密度来诱导压强, 从而产生粒子之间的排斥力、挤压力, 用人工粘性项来产生粒子间的切向摩擦力, 由此实现了运动目标制导、规避障碍物等功能。理论上, 通过 SPH 方法粒子化的模型要比直接使用社会力模型计算效率要高。

模型耦合过程中用火灾动力学模拟软件 FDS 来模拟室内烟气蔓延过程, 将人员烟气负载量和烟气密度参数耦合到人员运动模型中去。由烟气能见度来决定人员运动在火灾环境下选择正确逃生路线的可能性, 从而模拟出人员在火灾环境下的惊慌行为。而人员烟气负载量(毒性剂量 FED)大小来决定人员是否失能, 从而模拟出人员在火灾环境下的伤亡情况。

在仿真案例中还呈现出了与实际情况相符的一些现象, 如: 在出口处人员拥堵成一弓形形状; 处在烟气中的人员其运动方向就很随意; 运动速度快的人员逃生几率就大; 人员的拥挤行为会降低逃生速度等。通过模拟实验, 验证了模型的合理性。

当然, 模型建立和模拟过程中我们做了一些适当的假设, 如: 在 FDS 的火灾环境模拟中没有考虑人员运动对烟气动力学的干扰、人员疏散准备时间的不一致性、火灾过程中所有出口都是敞开。这些问题将在今后的工作中逐步考虑。此外, 在今后的工作中我们还想将如下情况考虑到模型中: 拥挤踩踏致死的情况、增大个体差异性、场景中人员对路径的熟悉程度等等情况。

总之, 本文建立的模型和模拟软件可以为建筑防火设计、火灾逃生演练、逃生预案制定、火灾风险评估等提供一定的理论依据和辅助决策。

参考文献:

- [1] 翁文国, 袁宏永, 范维澄. 一种基于移动机器人行为的人员疏散的元胞自动机模型 [J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2818-2822.
- [2] Henderson L F. The Statistics of Crowd Fluids [J]. Nature (S0028-0836), 1971, 229(5284): 381-383.
- [3] Helbing D. A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians [J]. Complex Systems, 1992, 6(5): 391-415.
- [4] Hughes R L. A continuum theory for the flow of pedestrians [J]. Transportation Research, Part B (S0191-2615), 2002, 36(6): 507-535.
- [5] Hoogendoorn S P, Bovy P H L. Gas-Kinetic Modeling and Simulation of Pedestrian Flows [J]. Transportation Research Record (S0361-1981), 2000, 1710(4): 28-36.
- [6] Varas A, Cornejo M D, Mairnemer D, et al. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles [J]. Physica A(Statistical Mechanics and its Applications) (S0378-4371), 2007, 382(2): 631-642.
- [7] David Iclănzan, Anca Gog, Camelia Chira. Cell state change dynamics in cellular automata [J]. Memetic Computing (S1865-9284), 2013, 5(2): 131-139.
- [8] Helbing D, Isobe M, Nagatani T, Takimoto K. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics [J]. Physical Review E (S1539-3755), 2003, 67(6): 067101-0671041.
- [9] 宋卫国, 张俊, 胥旋, 等. 一种考虑人数分布特性的人员疏散格子气模型 [J]. 自然科学进展, 2008, 18(5): 552-558.
- [10] 饶平, 周晓冬, 朱孔金, 等. 复杂建筑结构人员疏散的元胞自动机模拟研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(12): 34-39.
- [11] Helbing D, Molnár, Péter. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E(S1539-3755), 1995, 51(5): 4282-4286.
- [12] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature(S0028-0836) 2000, 407(6803): 487-490.
- [13] 苗志宏, 李智慧. 一种基于 SPH 方法的人员疏散混合模型及模拟 [J]. 自动化学报, 2014, 40(5): 935-941.
- [14] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. Astronomical Journal, 1977, 82(10): 1013-1020.
- [15] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics (S0066-4146), 1992, 30(1): 543-574.
- [16] 王安文, 徐绯, 张岳青. SPH 方法在液固撞击数值模拟中的应用 [J]. 计算物理, 2012, 29(4): 525-533.
- [17] 贾建东, 李志强, 杨建林, 等. 用 SPH 和有限元方法研究鸟撞飞机风挡问题 [J]. 航空学报, 2010, 31(1): 136-142.
- [18] 吴建松, 鲍凯, 张辉, 等. 基于 SPH 方法的阶梯流数值模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(6): 802-808.
- [19] 张健, 陆利蓬, 刘恩洲. SPH 方法在溃坝流动模拟中的应用 [J]. 自然科学进展, 2006, 10(16): 1326-1330.
- [20] 董添文, 黄兴元, 江顺亮, 等. 修正的 SPH 方法模拟强制旋转边界问题研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(6): 295-300.
- [21] 周光正, 葛蔚, 李静海. 传统光滑粒子动力学方法的适用性分析 [J]. 科学通报, 2013, 58(15): 1414-1421.
- [22] 许镇, 唐方勤, 任爱珠. 建筑火灾烟气危害评价模型及应用 [J]. 消防科学与技术, 2010, 29(8): 651-655.
- [23] 方廷勇, 冯文兴, 李辉亮, 等. 火灾烟气毒性评价新的“RRC”动态模型及工程应用 [J]. 消防科学与技术, 2005, 24(2): 156-158.
- [24] 冉海潮, 焦凤龙, 孙丽华, 等. TGAS 模型及其在建筑火灾中人群安全疏散的应用 [J]. 消防科学与技术, 2013, 32(11): 1209-1211.
- [25] McGrattan KB, Klein B, Hostikka S, et al. Fire dynamics simulator (version 5) user's guide[M]// NIST Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg Maryland US A, NIST Special Publication 1019-5, July 2007.
- [26] Timo Korhonen, Simo Hostikka, Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide [M]. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2010.
- [27] Monaghan J J, Poinracic J. Artificial viscosity for particle methods [J]. Applied Numerical Mathematics (S0168-9274), 1985, 1(3): 187-194.
- [28] Babrauskas V, B C Levin Barbara C, R G Gann, et al. Toxic potency measurement for fire hazard analysis [J]. Fire Technology (S0015-2684), 1992, 28(2): 163-167.
- [29] Frantzich H, Nilsson D. Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning, 75 p., Report 3126 [M]. Sweden: Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2003.
- [30] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [31] Gordon E Hartzell, Howard W Emmons. The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires [J]. Journal of Fire Science (S1530-8049), 1988, 6(5): 356-362.
- [32] Purser D A, Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations [J]. Safety Science(S0925-7535), 2001, 38(2): 157-182.