

# 复杂建筑火灾中的人员疏散路径多目标规划

张丽杰<sup>1,2</sup>, 刘建昌<sup>1</sup>, 谭树彬<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宁夏理工学院 继续教育学院, 宁夏 石嘴山 753000)

**摘 要:** 针对复杂建筑火灾中的人员疏散动态路径优化策略问题,以火灾情境下的动态疏散网络数据模型为基础,结合网络流优化和群智能方法,构建以最短时间、最小风险水平和最大疏散容量为目标的路径优化模型.通过改进的自适应果蝇算法,实现了节点和路径容量受限的动态疏散路径规划.通过对所建模型的性能测试和疏散过程实验,验证了多目标路径优化模型的有效性.实验结果也反映了多目标路径规划策略更加贴近复杂建筑火灾中的人员疏散实际情况,对于规划不确定因素影响下的复杂空间疏散路径具有可行性.

**关 键 词:** 复杂建筑;疏散路径;多目标规划;果蝇优化算法

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)06-0761-06

## Multi-objective Planning of Personnel Evacuation Route in Complex Building Fire

ZHANG Li-jie<sup>1,2</sup>, LIU Jian-chang<sup>1</sup>, TAN Shu-bin<sup>1</sup>

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Continuing Education, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000, China. Corresponding author: ZHANG Li-jie, E-mail: dwkzlj@126.com)

**Abstract:** Aiming at the strategy of personnel evacuation dynamic path optimization in complex building fire, the path optimizing model with the shortest time, the maximum evacuation capacity and the minimum risk level as the optimization objective was constructed, which was based on the dynamic evacuation network data model in fire situation and combined with the network flow optimization and swarm intelligence method. Dynamic evacuation path planning with limited node and path capacity was realized by the modified adaptive fruit fly optimization algorithm. Through the performance test and evacuation process experiment on the established model, the effectiveness of the multi-objective path optimization model was verified. The experimental results also indicates that the multi-objective path planning strategy is closer to the evacuation practice in complex building fire. It is feasible for planning complex space evacuation path under the influence of uncertain factors.

**Key words:** complex building; evacuation route; multi-objective planning; fruit fly optimization algorithm(FOA)

公共场所火灾中的群体性疏散的关键在于路径规划,而复杂建筑路径规划又是多目标优化问题<sup>[1]</sup>.针对不同的路径规划目标,学者们将路径规划问题抽象为一类具有时间约束的网络流问题.Li等<sup>[2]</sup>提出时延疏散网络路径规划算法.Shen等<sup>[3]</sup>基于网络流算法构建了宏观疏散路径模型.Li等<sup>[4]</sup>提出启发式融合算法的网络疏散路

径优化模型.Osman等<sup>[5]</sup>提出集中式混合方法解决网络中的最优路径规划问题.网络流研究多基于疏散网络中每个路段的移动速度不变的假设.很少有研究考虑突发火灾对网络路段通行能力的实时影响.且有研究表明,火灾疏散中,烟雾、气体或热辐射的扩散随时间而动态发展<sup>[6]</sup>.这些动态变化影响疏散人员速度和路段通行能力.文献

[7]考虑到各路段受灾害影响,提出基于多目标路径规划模型.文献[8]提出危险预测数据模型来规划建筑发生火灾时最优路径.因此,优化灾害场景的动态路径,实时更新路径选择策略具有重要的意义.本文结合网络流优化和群智能方法,研究了多目标路径优化策略.

## 1 复杂建筑火灾疏散路径多目标建模

复杂建筑火灾疏散路径优化目标包括空间疏散距离、疏散时间、疏散效率.路径规划需要考虑多个目标的一致性来决策.

### 1.1 建筑火灾疏散网络问题描述

基于语义特征的网络模化方法,建立面向室内火灾动态多属性特征的疏散网络  $G(W, E, T_e, T, C_w, C_e)$ .疏散网络由节点  $w_i \in W, (i = 1, 2, \dots, j)$  和从节点  $w_i$  到  $w_j$  表示的边  $e_{ij} \in E$  组成,各节点和通道具有多个处于动态变化的属性特征,如边  $e$  的疏散时间  $T_e$ 、总疏散时间  $T$ 、节点  $w$  容量  $C_w$ 、边  $e$  的容量  $C_e$  等疏散网络特征属性.各节点和通道上的属性特征值随火烟动态表现为时间函数.网络节点特征定义为  $W_i(w_i(x_i, y_i), \rho_{w_i}(t), f_{w_i}(t))$ .人员所在位置  $W_i$  坐标  $w_i(x_i, y_i)$ ;  $\rho_{w_i}(t)$  为  $w_i$  在  $t$  时刻的人员密度;  $f_{w_i}(t)$  为  $w_i$  在  $t$  时刻的火烟风险值.边的特征定义为  $E_{ij}(e_{ij}(w_i, w_j), T_{e_{ij}}, d_{ij}, f_{ij}(t), \rho_{ij}(t))$ , 在此  $d_{ij}$  为边  $e_{ij}$  的当量距离;  $f_{ij}(t)$  为  $e_{ij}$  在  $t$  时刻的火烟风险值;  $\rho_{ij}(t)$  为  $t$  时刻  $e_{ij}$  上的疏散人员密度.从任意源点  $S = \{S_a | a = 1, 2, \dots, A\}$  至出口  $D = \{D_o | o = 1, 2, \dots, O\}$  的通道表达为路径集  $e_{sd} \in R$ .网络中任意的边  $e_{ij}$  均与建筑空间中具体的疏散路径相对应.

在火灾疏散过程中,个体的运动速度与人员密度和火烟的扩散有密切关系.将火灾产生的有害物质用温度热辐射量、有毒气体扩散度、烟雾能见度标定,建立火烟发展规律和有害物质特征参数关联公式,得到由热量  $r$  辐射值  $FED_r$ 、毒性气体  $g$  扩散值  $FED_g$ 、烟雾  $s$  能见度值  $FEV_s$  构成的火烟风险模型  $FDS_{fire}$ .

人员对热辐射的忍受能力主要由周围环境温度决定.整个过程中热量发散值的计算式为

$$FED_r = \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{t_{lr-k}} + \frac{1}{t_{lc-k}} \right) \Delta t_k + \alpha K_r. \quad (1)$$

其中:  $t_{lr-k}$  和  $t_{lc-k}$  分别为第  $k$  个方向上使人员丧失运动能力的热辐射及对流时间;  $K_r$  为基准材料燃烧的热量值;  $\alpha$  为散布热量的比例系数.其中  $FED_r$  在  $[0, 1]$  范围内取值,当  $FED_r$  值不变时,意

味着人员已经丧失了逃生能力.

毒性气体对人体的危害取决于燃烧材料散发出的有毒气体的类别、体积浓度和接触时间,燃烧过程中产生毒性气体的计算式为

$$FED_g = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{C_i \Delta t_k}{(C \times t)_i} + \alpha K_g. \quad (2)$$

其中:  $C_i$  为有毒气体  $i$  在  $\Delta t$  时间段内的平均体积浓度;  $(C \times t)_i$  为在单位时间  $t$  内有有毒气体  $i$  使人丧失运动行为的体积浓度值;  $m$  为有毒的气体种类;  $K_g$  为基准材料产生的气体值;  $\alpha$  为有毒气体的比例系数.

烟雾中大量的颗粒物质吸收了散射光,能见度受到严重影响.烟雾散布值的计算式为

$$FEV_s = 1 - S_d/5 + K_s. \quad (3)$$

其中:  $K_s$  为不可见的系数;  $S_d$  为单位的可见距离,单位为 m.当  $FEV_s$  大于阈值时,能见度较低,几乎看不清楚周围事物,人员移动速度几乎为 0.

建筑物火灾产生的火烟风险对路径的通行能力和人员疏散行为的影响直接体现在行走速度上.受火烟风险影响的通道上的人员移动速度为

$$FDS_{fire} = FED_r + FED_g + FEV_s, \quad (4)$$

$$v_{ij} = (1 - FDS_{fire}) \times v_{max}. \quad (5)$$

其中:  $v_{max}$  为正常疏散时人员在路径上的最大速度;  $v_{ij}$  为灾害情况下人员在路径  $e_{ij}$  的行走速度.

受到火烟影响导致通道人流量增加,当人员密度接近通道的瓶颈密度  $\rho_c$  时,移动速度  $v_{ij}$  为

$$v_{ij} = (1 - FDS_{fire}) \times v_{max} \times \mu_{ij}, \quad (6)$$

$$\mu_{ij} = [1 - \alpha_i \ln(\rho_i/\rho_c)]. \quad (7)$$

其中:  $\rho_i$  为第  $i$  条通道人流密度;  $\alpha_i$  为第  $i$  条通道系数;  $\mu_{ij}$  为通道  $e_{ij}$  流通系数.

### 1.2 建筑火灾中的疏散路径多目标模型

考虑建筑火灾疏散中的火烟扩散和人员分布等不确定因素,建立最短时间、最低风险和最大疏散容量路径模型,构建疏散路径多目标优化模型为

$$\left. \begin{aligned} F(X) &= \min \{ T(N) \} = \min (C_T + C_r + C_c). \\ C_T &= \min C_T, \\ C_r &= \min C_r, \\ C_c &= \max C_c. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中:  $N$  为总疏散人数;  $F(X)$  为路径优化目标函数;  $C_T$  为最小时间  $T$  目标函数;  $C_r$  为最小风险  $r$  目标函数;  $C_c$  为最大疏散容量  $c$  目标函数.

最短疏散时间路径目标函数为

$$f_T(x) = \min C_T(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)} x_{ij}^n. \quad (9)$$

最小风险路径目标函数为

$$f_r(x) = \min C_r(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W r_{ij} x_{ij}^n \quad (10)$$

最大容量疏散路径目标函数为

$$f_c(x) = \max C_c(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^W \max[c_{ij}(t)] x_{ij}^n \quad (11)$$

$$c_{ij}(t) = \begin{cases} 1, \rho\left(\frac{n_{ij}(t)}{C_{Mij}}\right) < 0.5; \\ e^{\rho\left(\frac{n_{ij}(t)}{C_{Mij}}\right)}, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

满足目标函数的约束条件如下.

疏散网络节点初始状态为

$$y_i(0) = 0, \forall i \in N. \quad (13)$$

疏散网络边的初始状态为

$$x_{ij}(0) = 0, \forall i, j \in N. \quad (14)$$

从源点处疏散的总人数为

$$\sum_{a=1}^N \sum_{j=1}^W x_{1j}^a = N. \quad (15)$$

到达目标区域的总人数为

$$\sum_{i=1}^D \sum_{w=1}^W x_{iw}^D = N. \quad (16)$$

疏散时间  $t_{ij}$  的递归方程为

$$\int_{t_i}^{t_j} v_{ij}(t) dt = d_{ij}. \quad (17)$$

节点在  $t$  时刻的人员容量为

$$\sum_{a=1}^A y_i^a(t) \leq C_{Mi}. \quad (18)$$

边在  $t$  时刻的人员容量为

$$\sum_{a=1}^A x_{ij}^a(t) \leq C_{Mij}. \quad (19)$$

进出疏散网络的人员数量恒定, 表达为

$$y_i^a(t) \geq 0; x_{ij}^a(t) \geq 0; \sum_{w_i \in W} y_i^a(t) + \sum_{e_{ij} \in E} x_{ij}^a(t) = C_{0a}. \quad (20)$$

其中:  $v_{ij}(t)$  为火烟影响下  $t$  时刻  $e_{ij}$  上的人员速度;  $x_{ij}^n$  为  $t$  时刻进入  $e_{ij}$  来自任意节点的人数;  $r_{ij}$  为  $e_{ij}$  上的风险值;  $C_{ij}(t)$  为  $e_{ij}$  在  $t$  时刻的通行容量;  $C_{Mi}$  为节点  $w_i$  在  $t$  时刻的最大通行容量;  $C_{Mij}$  为  $e_{ij}$  在  $t$  时刻的最大通行容量;  $C_{0a}$  为源点  $a$  的人员容量;  $n_{ij}(t)$  为  $t$  时刻进入  $e_{ij}$  的总人数;  $x_{ij}^a(t)$  为  $t$  时刻进入  $e_{ij}$  来自源点的人数;  $y_i^a(t)$  为  $t$  时刻进入  $w_i$  来自源点的人数.

## 2 基于果蝇算法的多目标路径优化

动态网络路径优化是由最后阶段的路径状态取其最优决策开始计算, 直到初始路径达到最优

状态为止, 即每一步最优解的汇总. 路径状态最优方程为

$$f_{k+1}(i) = \min\{c_{k+1}(i, j) + f_k(i)\}. \quad (21)$$

其中:  $f_{k+1}(i)$  为人员第  $k+1$  步从节点  $w_i$  到目标出口的最小费用;  $c_{k+1}(i, j)$  为第  $k+1$  步从节点  $w_i$  到出口  $w_j$  的费用;  $f_k(i)$  为第  $k$  步从源点到节点  $w_i$  的费用.

果蝇优化算法 (fruit fly optimization algorithm, FOA) 中, 个体搜索总是跟踪当前种群最优和目前个体最优的解空间寻优, 适合解决较大规模网络优化问题. 文中将受火烟风险影响的个体移动速度引入疏散模型中, 以人员疏散时间、路径风险水平和路径容量为目标, 提出改进的自适应果蝇算法 (modified adaptive fruit fly optimization algorithm, MAFOA) 优化的多目标模型, 规划复杂建筑疏散路径.

### 2.1 多目标果蝇算法设计

果蝇优化算法是基于果蝇觅食行为提出的全局寻优群智能算法<sup>[9-11]</sup>, 已被广泛用于解决多目标优化问题. 本文利用果蝇算法解决离散问题的特征, 研究动态疏散网络路径多目标优化问题, 引入速度变量, 提出了 MAFOA 算法. 算法如下.

1) 速度和位置更新. MAFOA 算法基于二维空间的模型设计, 根据果蝇群目标, 同一目标区域的群体属于同一子群, 将种群分为  $m$  个子群. 在当前迭代中, 人员密度、当前位置和风险水平的不断更新, 人员的速度会根据网络参数动态变化而变化. 根据人员流动特征, 在算法中增加速度调节步长, 改进后的速度和位置更新方程为

$$\left. \begin{aligned} V_{ix}^{k+1} &= \omega V_{ix}^k + c_1 r(X_{pi} - X_i) + c_2 r(X_{gi} - X_i), \\ V_{iy}^{k+1} &= \omega V_{iy}^k + c_1 r(Y_{pi} - Y_i) + c_2 r(Y_{gi} - Y_i). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} X_i^{k+1} &= X_i^k + v_{ix}^{k+1} r(v) v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{g}{g_{\max}}\right)^{\tau}, \\ Y_i^{k+1} &= Y_i^k + v_{iy}^{k+1} r(v) v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{g}{g_{\max}}\right)^{\tau}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中:  $V_{ix}^{k+1}$  为人员  $i$  在  $x$  方向  $k+1$  时刻的速度;  $V_{iy}^{k+1}$  为  $i$  在  $y$  方向  $k+1$  时刻的速度;  $V_{ix}^k$  为  $i$  在  $x$  方向  $k$  时刻的速度;  $V_{iy}^k$  为  $i$  在  $y$  方向  $k$  时刻的速度;  $X_{pi}$  为  $i$  在  $x$  方向的当前最佳位置;  $Y_{pi}$  为  $i$  在  $y$  方向的当前最佳位置;  $X_{gi}$  为  $i$  在  $x$  方向遍历后最优路径集;  $Y_{gi}$  为  $i$  在  $y$  方向遍历后最优路径集;  $X_i^{k+1}$  为  $i$  在  $x$  方向  $k+1$  时刻的位置;  $Y_i^{k+1}$  为  $i$  在  $y$  方向  $k+1$  时刻的位置;  $X_i^k$  为  $i$  在  $x$  方向  $k$  时刻的位置;  $Y_i^k$  为  $i$  在  $y$  方向  $k$  时刻的位置;  $c_1, c_2$  为学习因子;  $r$  为介于  $(0, 1)$  之间的随机数;  $\omega$  为惯



性权重; $r(\nu)$ 为介于(0,1)之间的随机数; $g$ 为当前迭代次数; $g_{\max}$ 为最大迭代次数; $\tau$ 为调节系数。 $X_{pi}, Y_{pi}$ 由每一次时间步的最优解确定。

速度分量表达式为

$$\left. \begin{aligned} v_{ix}^k &= v_{ij} \cdot \tilde{\omega}_{ix}^k, \\ v_{iy}^k &= v_{ij} \cdot \tilde{\omega}_{iy}^k. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中: $\tilde{\omega}_{ix}^k$ 为 $k$ 时刻人员 $i$ 在 $x$ 方向的速度分量系数; $\tilde{\omega}_{iy}^k$ 为 $k$ 时刻人员 $i$ 在 $y$ 方向的速度分量系数。

2) 决策变量. 基于 MAFOA 算法研究疏散问题,将果蝇在疏散网络中的位置表示为二维空间中的变量<sup>[12]</sup>. 果蝇代表疏散者,人员的疏散行为是由个体果蝇和果蝇种群来模仿. 决策变量的向量  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$  表示一群果蝇占据的位置,其维度为人员的数量,向量  $\mathbf{X}$  即为为每个人员的一条路径构成的组合.  $x_i \in R_i, R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{ik}\}, i = 1, 2, \cdots, g$ .  $R_i$  表示第  $i$  个待疏散人员可选的  $g$  条路径的集合. 建筑火灾路径规划属于多目标离散优化问题,在求解路径问题时要解空间对应到网络路径,即把果蝇种群或个体  $i$  在  $t$  时刻的位置  $x_t$  表示为路径集合中的一条可行路径编码. 果蝇位置移动对应路径编码变化。

3) 视觉搜索. MAFOA 算法视觉搜索用 Pareto 解集非支配等级排序方法,优选出果蝇种群所有位置中的两个目标的适宜度值,按照 Pareto 解集排序规则分为不同非支配解等级,选择解集中排序等级较低的解,将与之对应的中选个体的位置储存下来逐级迭代。

2.2 疏散过程流程

1) 随机产生疏散人员数量、位置和速度. 初始化形成疏散数据网络图  $G(W, E, T_e, T, C_w, C_e)$ ,获取节点及边的容量、旅行时间、待疏散人数、起火位置信息,采用 Dijkstra 算法生成  $g$  条路径集合. 测定  $g$  条路径风险水平和通行容量,与路径疏散时间合并,获得所有人员的可行路径集合。

2) 判断人员是否疏散完毕,如果疏散完毕,更新网络;否则,转到3)进行路径选择。

3) 判断是否分配到新的疏散路径,依据最优路径算法计算路径集,并分配给人员;否则,按照上一步得到的路径方向更新其速度和位置。

4) 根据人员位置判断其疏散状态,如果已经疏散到出口,则  $n = N - 1$ 。

5) 更新未疏散人数系统时间和网络状态,如果  $n > 0$ ,转到2),否则疏散结束。

3 模型应用分析

分别将模型应用于学校综合楼和超市的火灾疏散模拟场景测试. 将火灾场景的参数创建为文本文件提供给 FDS 模型软件,FDS 采用直接数值模拟方法,将火灾场景的参数求解后获得的风险值导入仿真系统中. 系统从测试对象中提取 320 个节点和 290 条边构成疏散网络. 人员的初始速度取值为 1.3 m/s,每层出口的有效宽度为 2 m,出口及走廊人流流通率为 1.5 人/(m·s<sup>-1</sup>),出口的通行能力为 3.56 人/s. 算法的参数设置:种群数量为 100,子群划分为 4 组,最大迭代次数 200. 将文中所建多目标路径规划模型用于不同规模的仿真场景,验证模型的性能。

3.1 算法效率的实现与比较

针对 5 种规模的网络进行测试,生成 60 ~ 300 个节点的网络数据,对文中提出的 MAFOA 算法效率与果蝇算法 (FOA)、粒子群算法 (PSO)、自适应粒子群算法 (APSO) 进行比较,每组数据运行 30 次求平均值得到结果见表 1. 结果表明,MAFOA 求解的平均运行时间比其他几类算法的时间少,验证了 MAFOA 算法在改善建筑火灾疏散性能方面具有可行性。

表 1 算法运行效率的实现与比较

Table 1 Implementation and comparison of algorithm efficiency

s

网络节点	疏散人数	果蝇算法	自适应果蝇算法	粒子群算法	自适应粒子群算法
60	50	0.568 104	0.335 190	0.677 634	0.499 180
80	100	1.873 965	1.632 645	1.916 512	1.703 894
100	150	2.455 434	1.998 907	2.485 461	2.235 466
200	200	4.043 806	3.763 880	4.130 806	3.910 832
300	300	8.019 665	6.699 078	8.104 673	7.036 471

3.2 目标优化效果分析

算法对 160 个节点的网络进行单目标和多目

标路径规划模型测试,得到路径如表 2 所示. 如果仅考虑最短时间的单目标模型,仅对于疏散人员

个体所用的疏散时间是最少的,但是对于整体疏散可能会造成效率下降. 多目标路径模型是以整体疏散人员作为考虑对象,虽然在个别情况下结

果没有单目标的时间更优,但是从整体疏散效率上达到最优.

表2 两种目标优化出的路径  
Table 2 Optimized paths for two objectives

最短时间目标优化路径	疏散时间/s	疏散人数	多目标优化路径	疏散时间/s	疏散人数
95-98-21-12-1	12	3	95-98-49-30-29-1	15	7
86-84-78-15-2	11	2	86-84-78-45-30-15-2	17	9
64-67-75-19-3	9	4	64-67-71-18-3	8	6
65-71-18-3	5	6	65-67-71-21-16-8-4	13	12
54-50-34-29-16-8-4	17	7	54-34-36-32-22-8-4	11	14
36-33-30-29-10-8-4	15	7	36-35-33-22-17-3	12	9
35-33-30-29-10-4	13	5	35-33-22-12-1	9	5

将单目标优化的最短距离模型、混合模型(最短时间、最短距离)和多目标模型用于相同火灾场景测试总疏散时间,疏散时间如图1所示. 结果表明,人流密度比率低于0.4时,最短距离模型的疏散效率较高;当达到0.6的瓶颈密度后,多目标模型的时间最短,单目标最短距离模型在临界密度状态下基本不起作用. 反映了多目标模型在环境复杂的较大规模疏散中具有优势.

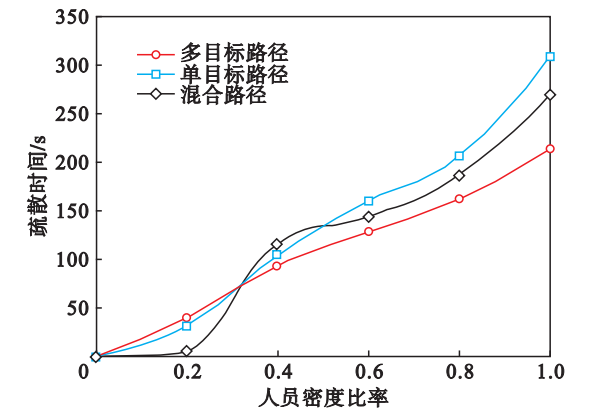


图1 不同路径模型的疏散时间

Fig. 1 Evacuation time for different route model

3.3 疏散过程仿真分析

将模型用于3 500 m<sup>2</sup> 一层布局的超市模拟疏散过程,出口1,6为2 m,其余4个出口5 m. 场所内随机分布为1 700人. 起火点1位于中心位置,起火点2位于靠近出口6的位置. 疏散过程如图2所示,反映了系统时间为35,70,90,115 s场景中人员疏散状态,体现了多目标路径规划与实际疏散目标的一致性. 过程中合理利用了场景可用资源,实时跟踪疏散环境数据,动态调整路径利用率. 验证了复杂建筑火灾中疏散路径多目标优化策略的合理性.

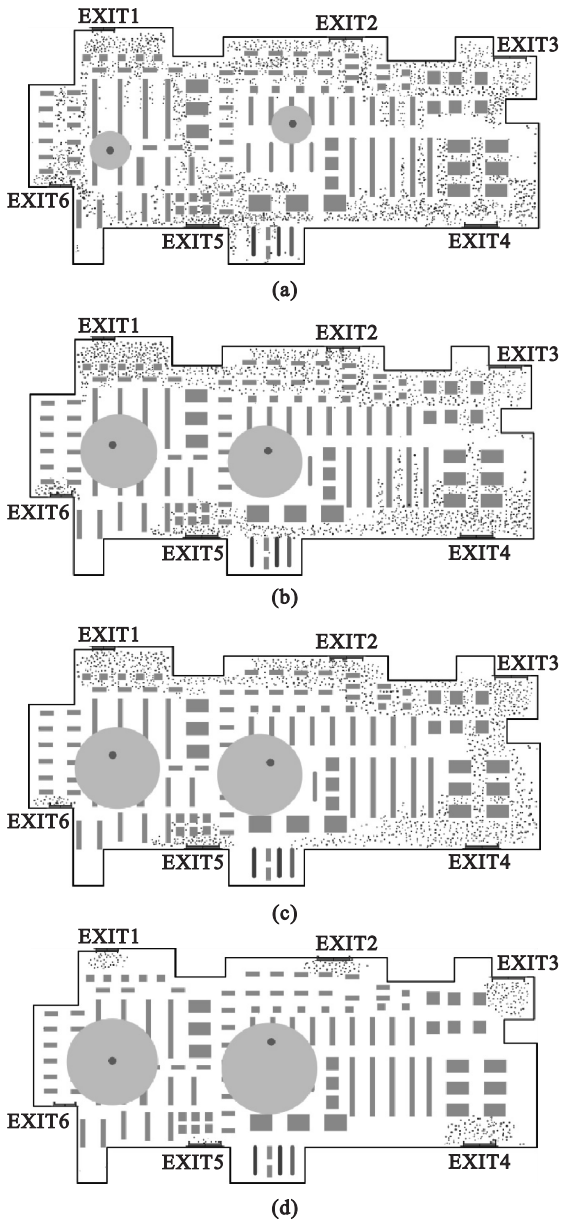


图2 疏散过程

Fig. 2 Evacuation process

(a)—35 s; (b)—70 s; (c)—90 s; (d)—115 s.

4 结 论

- 1) 验证了基于 MAFOA 多目标路径规划处理较大规模的建筑火灾疏散问题具有一定优势;多目标路径规划适用于环境复杂的疏散场景.
- 2) 揭示了复杂建筑火灾中的人员疏散行为机理和路径选择过程.

参考文献:

[ 1 ] Ren H C, Sun L H, Gao X Z. Influences of intelligent evacuation guidance system on crowd evacuation in building fire[ J]. *Automation in Construction*, 2014, 41: 78 – 82.

[ 2 ] Li X, Li Q, Claramunt C. A time-extended network model for staged evacuation planning [ J]. *Safety Science*, 2018, 108: 225 – 236.

[ 3 ] Shen Y, Wang Q, Yan W. An evacuation model coupling with toxic effect for chemical industrial park[ J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 33: 258 – 265.

[ 4 ] Li Y P, Cai W, Kana A A. Design of level of service on facilities for crowd evacuation using genetic algorithm optimization[ J]. *Safety Science*, 2019, 120: 237 – 247.

[ 5 ] Osman M S, Ram B. Routing and scheduling on evacuation path networks using centralized hybrid approach [ J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 88: 332 – 339.

[ 6 ] Wang J H, Sun J H. Principal aspects regarding to the emergency evacuation of large-scale crowds; a brief review of literatures until 2010 [ J]. *Procedia Engineering*, 2014, 71: 1 – 6.

[ 7 ] Gai W M, Deng Y F, Jiang Z A. Multi-objective evacuation routing optimization for toxic cloud releases[ J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, 159: 58 – 68.

[ 8 ] Choi M, Chi S. Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data[ J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, 94: 321 – 333.

[ 9 ] Pan W T. A new fruit fly optimization algorithm; taking the financial distress model as an example[ J]. *Knowledge Based System*, 2012, 26: 69 – 74.

[ 10 ] Pan W T. Using modified fruit fly optimization algorithm to perform the function test and case studies [ J]. *Connection Science*, 2013, 25( 2/3 ): 151 – 160.

[ 11 ] Cong Y, Wang J, Li X. Traffic flow forecasting by a least squares support vector machine with a fruit fly optimization algorithm[ J]. *Procedia Engineering*, 2016, 137: 59 – 68.

[ 12 ] 刘琼, 赵海飞. 基于多目标果蝇算法面向低碳的车间布局与调度集成优化[ J]. *机械工程学报*, 2017, 53( 11 ): 122 – 134.

( Liu Qiong, Zhao Hai-fei. Integrated optimization of workshop layout and scheduling to reduce carbon emissions based on a multi-objective fruit fly optimization algorithm [ J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53( 11 ): 122 – 134. )