

融合 A^* -APF 的领航跟随法火灾疏散路径规划

于开旺¹, 祁云^{1,2}, 崔欣超¹, 肖新帅¹

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003; 2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为解决常规火灾疏散路径规划算法在局部复杂环境下易陷入“假死”状态的问题, 同时获得更优的疏散路径, 提出一种融合 A^* 算法和人工势场法(APF)的领航跟随算法。改进 A^* 算法的 OPEN 列表存储结构, 并采用八方向搜索策略, 以去除冗余节点、缩短路径长度并避开障碍物; 改进 APF 算法中的引力与斥力势场函数, 以提高其在局部环境的寻优能力, 避免陷入局部最优解, 进一步优化路径并提升避障性能。仿真实验结果表明, 采用本文算法规划的路径较短且平滑, 分散个体首先向领航者靠拢, 然后与领航者保持规范队列前进, 整体编队有效避开了障碍物节点并到达终点, 实现了受困人员按照最优的疏散路径避障逃离。

关键词: 火灾疏散; 路径规划; 领航跟随法; A^* 算法; 人工势场算法

中图分类号: X932 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.008

Fire Evacuation Path Planning Based on Leader-follower Method Integrating A^* -APF

YU Kaiwang¹, QI Yun^{1,2}, CUI Xinchao¹, XIAO Xinshuai¹

(1. Shanxi Datong University, Datong 037003, China; 2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: To address the issue that the conventional fire evacuation path planning algorithms tend to get stuck in a ‘false dead’ state in local complex environments, and to obtain a better evacuation path, a leader-follower method integrating the A^* algorithm and the artificial potential field(APF) algorithm is proposed. The storage structure of the OPEN list in the A^* algorithm is improved, and an eight-direction search strategy is adopted to eliminate redundant nodes, shorten the path length, and avoid obstacles. The gravitational and repulsive potential field functions in the APF algorithm are improved to enhance its optimization ability in the local environment, avoid getting stuck in local optimal solutions, further optimize the path and effectively avoid the obstacles. The simulation experiment results show that the path planned by the algorithm proposed is shorter and smoother. The disperse individuals first approach the leader, then maintain a standard formation to advance, and the overall formation effectively avoids the obstacle nodes and reaches the destination, achieving the evacuation of trapped personnel along the optimal evacuation path while avoiding obstacles.

Key words: fire evacuation; path planning; leader-follower method; A^* algorithm; artificial potential field algorithm

建筑功能复合化加剧了城市空间的火灾疏散复杂性^[1]。针对火灾动态与人员行为的随机性,

采用多目标优化模型通过智能算法求解时空最优疏散路径^[2], 可在提升安全性的同时降低灾害损

失,当前全球学界正着力优化此类应急策略以提高响应效能^[3]。

传统的路径规划算法主要采用图算法,如 Dijkstra 算法^[4-5]和 Floyd 算法^[6-7]等,该类算法在面对复杂环境时计算量会急剧上升。近年来,随着计算机技术、传感技术和控制技术的发展和智能优化算法被提出并应用于路径规划,如蚁群优化算法^[8]、粒子群优化算法^[9]等。当前路径规划研究聚焦于传统算法优化与智能算法融合。张苏英等^[10]创新性地融合了 Dijkstra 算法与蚁群优化算法,提出了一种新型火灾疏散路径规划算法,该算法通过实时火场数据对启发函数、转移概率、信息素更新规则及挥发系数进行优化,有效实现了火场环境下的疏散路径规划。汪金辉等^[11]和 Costa 等^[12]将遗传算法应用于火灾环境下建筑内人员安全疏散的可靠度分析,对“可用疏散时间 (ASET) 不小于必需疏散时间 (RSET)”这一评估准则进行了深入分析并优化了其表达式,显著提高了分析可靠度,为相关研究提供了新思路。董崇杰等^[13]将差分进化算法与布谷鸟算法相融合,构建了一种多目标疏散模型,提高了疏散效率。梅艺林等^[14]优化了人工势场 (APF) 算法中的斥力势场函数,解决了无人车路径规划中存在的障碍物附近徘徊问题。李明海等^[15]对 A* 算法进行改进,考虑了火灾危险因素并引入动态规划策略,提高了算法在路径规划过程中的寻优性能。王丽等^[16]将 Zigbee 技术与 A* 算法相结合,开发了一套实时疏散系统,通过 LED 点阵实现动态路径指引,显著提升了疏散效率。

为避免火灾疏散路径规划算法在局部复杂环境下陷入“假死”状态,本文提出一种融合 A* 算法和 APF 算法的领航跟随法。首先通过改进 A* 算法与 APF 算法^[17],实现全局路径规划算法与局部路径规划算法的结合,提高对局部环境的应对能力,避免出现“假死”;然后将 A* 算法和 APF 算法与领航跟随法^[18]相结合,实现高效路径规划与群体逃生协同控制^[19];最后通过仿真实验验证算法融合的有效性。

1 算法介绍

1.1 领航跟随法

领航跟随法通过指定领航单元和跟随单元构建多智能体编队,跟随者持续调节位姿以保持与领航者的预设相对距离及方位角,维持队形稳定,领

航者接收全局指令并引导编队运动,通过调整空间约束参数可重构编队形态,跟随者通过局部反馈实现协同。该方法兼具低计算复杂度与强工程实用性,其空间约束关系如图 1 所示,图中 P_0 代表领航者, P_1 、 P_2 表示跟随者,其余变量说明详见下文。

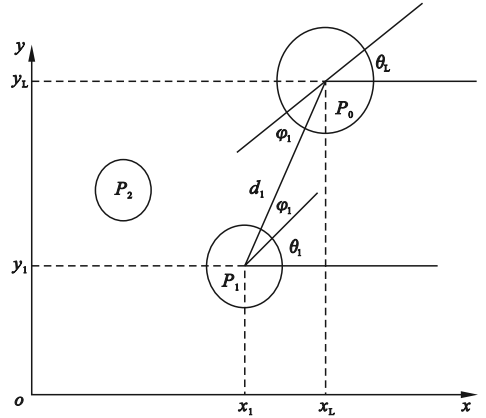


图 1 领航跟随法的空间约束关系

Fig. 1 Spatial constraint relationship of leader-follower method

跟随者 $P_i (i=1, 2, \dots)$ 的位置和角度表示为

$$\begin{cases} x_i(t) = x_0(t) - d_i \cos(\theta_0(t) + \varphi_i) \\ y_i(t) = y_0(t) - d_i \sin(\theta_0(t) + \varphi_i) \\ \theta_i(t) = \theta_0(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 表示时间变量; $[x_0(t), y_0(t), \theta_0(t)]$ 表示领航者 P_0 在 t 时刻的位置和角度; $[x_i(t), y_i(t), \theta_i(t)]$ 表示第 i 个跟随者 P_i 在 t 时刻的位置和角度; d_i 代表 P_0 和 P_i 之间的距离; φ_i 代表 P_0 和 P_i 之间的角度。

跟随者的动力学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (x, y, θ) 为跟随者的实际位置和角度; v 和 ω 分别表示跟随者的线速度和角速度。由式 (1) 和式 (2) 得到跟随者位置和角度的误差 e 为

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x \\ y_i - y \\ \theta_i - \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

进一步可得到机器人编队控制系统的误差微分方程为

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e - v + v \cos\theta_i \\ x_e \omega + v \sin\theta_e \\ \omega_e - \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 ω_e 为误差角速度。

1.2 人工势场法

APF 算法^[20]的核心思想是将机器人在环境中的运动模拟为在虚拟力场中的运动。目标点对机器人施加“引力”,障碍物对机器人产生“斥力”,通过计算这些力的合力来控制机器人的运动。

混合势场中目标点对机器人的引力作用通过引力势场函数描述,其常用形式为

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2}k_{\text{att}}\rho^2(q, q_g) \quad (5)$$

式中: $U_{\text{att}}(q)$ 为引力场; k_{att} 为引力增量系数,其值大于零; q 表示当前机器人的位置; q_g 表示目标点的位置; $\rho(q, q_g)$ 表示机器人至目标点的距离。

引力 $F_{\text{att}}(q)$ 由引力势场函数的负梯度得到,计算式为

$$F_{\text{rep}}(q) = -\nabla U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{\rho(q, q_0)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q, q_0)} \frac{\partial \rho(q, q_0)}{\partial q}, & \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (8)$$

混合势场中机器人所受合力为

$$F(q) = F_{\text{att}}(q) + \sum F_{\text{rep}}(q) \quad (9)$$

式中 $\sum F_{\text{rep}}(q)$ 表示所有障碍物对机器人产生的斥力和。

1.2.1 改进引力势场函数

鉴于目标点存在非匀速运动的可能性,为切实保障机器人能够与目标点同步运动,将相对速度及相对加速度的相关因子融入引力势场函数中。改进后的引力势场函数及引力分别表示为

$$U_{\text{att}} = U_{\text{attq}} + U_{\text{attv}} + U_{\text{atta}} \quad (10)$$

其中

$$U_{\text{attq}} = \frac{1}{2}\alpha\rho^2(q, q_t) \quad (11)$$

$$U_{\text{attv}} = \frac{1}{2}\beta(V - V_t)^2 \quad (12)$$

$$U_{\text{atta}} = \frac{1}{2}\gamma(a - a_t)^2 \quad (13)$$

式中: q_t 为目标点在 t 时刻的位置; $\rho(q, q_t)$ 表示

$$U_{\text{rep}} = \frac{1}{2}\tau_q \left(\frac{1}{\rho(q, q_0) - (r + r_0)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \rho^l(q, q_t) + \frac{1}{2}\tau_v(V - V_0)^2 + \frac{1}{2}\tau_a(a - a_0)^2 \quad (14)$$

式中: l 为大于 0 的常数; V_0 为障碍物速度; a_0 为障碍物加速度; τ_q 为相对位置斥力系数; τ_v 为相对速度斥力系数; τ_a 为相对加速度斥力系数。

1.3 A* 算法

A* 算法基于双代价评估体系,动态加权实际路径成本 $g(n)$ 与启发式估值 $h(n)$, 构建全局评估函数 $f(n)$ (n 表示计算其代价的节点), 实现路径成本与启发预估的融合。 $f(n)$ 表达式为

$$F_{\text{att}}(q) = -\nabla U_{\text{att}}(q) = -k_{\text{att}}\rho(q, q_g)\nabla\rho(q, q_g) \quad (6)$$

混合势场中障碍物对机器人产生斥力,人工势场法中斥力势场函数表达式为

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{\rho(q, q_0)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho(q, q_0) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_0) > \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{\text{rep}}(q)$ 表示斥力场; k_{rep} 为斥力增量系数; q_0 表示障碍物的位置; $\rho(q, q_0)$ 表示机器人与障碍物的距离; ρ_0 为障碍物的影响距离。

斥力 $F_{\text{rep}}(q)$ 由斥力势场函数的负梯度得到,计算式为

机器人至 t 时刻目标点的距离; V 和 a 分别为机器人的速度和加速度; V_t 和 a_t 分别为目标点在 t 时刻的速度和加速度; α 为相对位置引力系数; β 为相对速度引力系数; γ 为相对加速度引力系数。

1.2.2 改进斥力势场函数

传统斥力势场函数考虑机器人中心与障碍物中心的距离 $\rho(q, q_0)$, 该距离趋近碰撞边界值时设定无穷大斥力以避免(理论假设)。实际应用中,机器人与障碍物具有一定的物理尺寸,采用传统方法可能因两者间距低于安全阈值而引发碰撞风险。

针对上述问题,在斥力势场函数中引入机器人半径 r 和障碍物半径 r_0 , 当 $\rho(q, q_0) = r + r_0$ 时,通过引入无限大斥力有效预防机器人与障碍物之间的碰撞。

以 V_0 表示机器人与障碍物间的相对速度,当 $\rho(q, q_0) \leq \rho_0$ 和 $V_0 \geq 0$ 时,改进后的斥力势场函数 U_{rep} 表达式为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (15)$$

A* 算法性能依赖于 $h(n)$ 的设计质量。本文采用对角线距离度量 $h(n)$, 通过扩展八方向(上/下/左/右/对角线)搜索来增强路径规划的灵活性,提高算法对复杂环境的适应性。

假设目标节点 G 的坐标为 (x_g, y_g) , 起始节点 S 的坐标为 (x_s, y_s) , 沿对角线移动的栅格数量 $D(n)$ 计算式为

$$D(n) = \min[\text{abs}(x_s - x_g), \text{abs}(y_s - y_g)] \quad (16)$$

沿水平或竖直方向移动的栅格数量 $S(n)$ 为

$$S(n) = \text{abs}(x_s - x_g) + \text{abs}(y_s - y_g) \quad (17)$$

若在栅格地图中沿水平或垂直方向移动一个单位栅格时成本为 10, 其他方向移动一个单位栅格时成本为 14, 则评估函数表达式为

$$f(n) = g(n) + h(n) = g(n) + 14D(n) + 10S(n) \quad (18)$$

针对常规 A* 算法存在的 OPEN 列表操作低效问题, 采用最小堆结构优化存储机制: 将节点按 f 值构建最小二叉堆, 仅需提取堆顶最小 f 值节点, 避免全表遍历排序, 以显著提升算法运行速度。同步实施火源避让策略: 在八方向搜索时, 如检测到 10 格范围内火源, 将着火栅格实际代价放大 10 倍, 使路径规划时优先规避高风险区域。

改进 A* 算法的火灾疏散路径规划流程如图 2 所示。

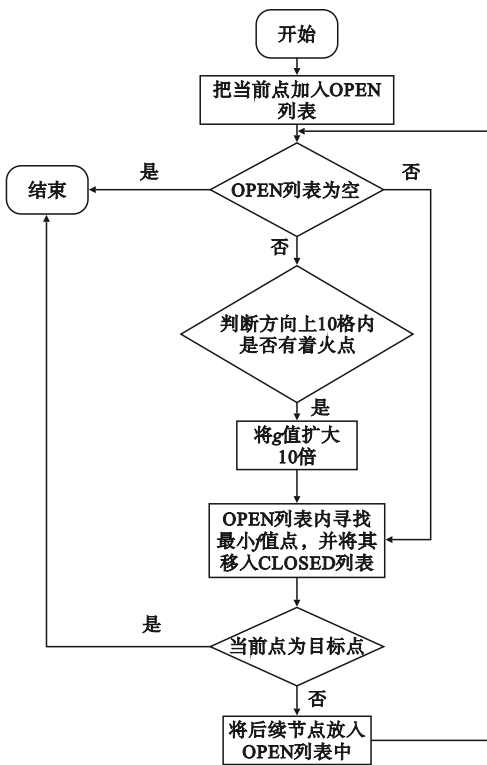


图 2 改进 A* 算法的火灾疏散路径规划流程

Fig. 2 Fire evacuation path planning process of improved A* algorithm

2 问题描述与环境建模

火灾疏散算法需规避火源、定位安全出口并规划最优逃生路径^[21]。建模时假设障碍物及出口位置已知, 人员简化为匀速质点(仅控方向), 路

径由栅格节点连接, 障碍物用规则几何体表征以降低计算负载。栅格法^[22]是一种经典的路径规划建模技术, 其基本设定如下: 黑色栅格代表障碍物区域, 表示不可通行; 白色栅格代表空闲区域, 表示可以通行。每个栅格的边长为 1 m, 按照从下到上、从左到右的顺序进行编号。地图环境模型如图 3 所示, 其中每个栅格都具有独一无二的序号和对应的位置坐标, 其编号 b 和位置坐标 (x_b, y_b) 的转换公式为

$$\begin{cases} x_b = S[\text{mod}(b, M) - 0.5] \\ y_b = S[N + 0.5 - \text{ceil}(b/N)] \end{cases} \quad (19)$$

式中: S 代表小栅格的边长, 通常取 1 m; M 代表行方向上的栅格总数; N 代表列方向上的栅格总数; mod 表示计算余数; ceil 表示向上取整。

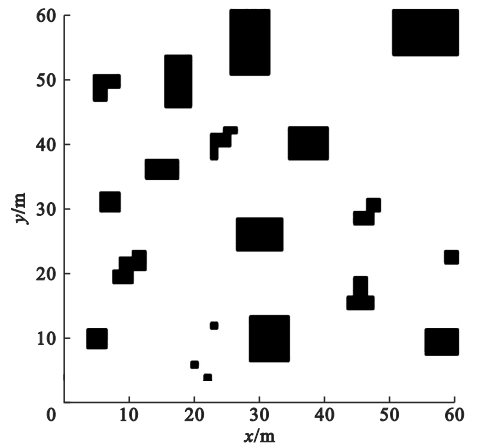


图 3 地图环境模型

Fig. 3 Map environment model

3 算法性能测试

为验证本文融合算法的性能, 在 Matlab2022b 环境下进行算法性能测试, 使用 Griewank、Shere、Shaffer 和 Rastrigin 共四个测试函数, 各测试函数图像如图 4 所示。改进后的 A* 算法维度设置为 30, 迭代次数为 500 次, 将本文融合算法与原始未改进 A* 算法、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)进行对比。图 5 所示为测试函数迭代图, 可见本文融合算法具有更快的迭代速度, 较其他算法寻优能力更强。

4 仿真结果分析

采用本文融合 A* -APF 的领航跟随法在 Matlab2022b 环境下进行模拟实验, 图 6 所示为仿真结果, 图中分散的三个圆点代表被领航的个体, 三

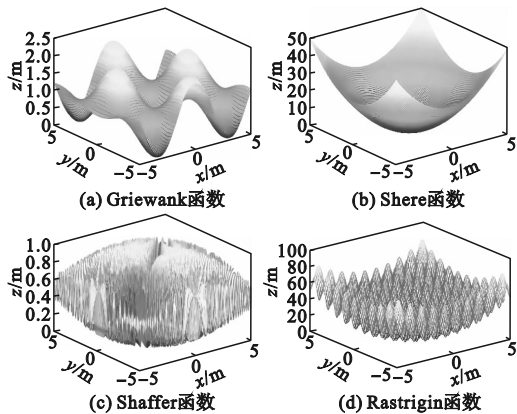


图 4 测试函数图像

Fig. 4 Test function graphs

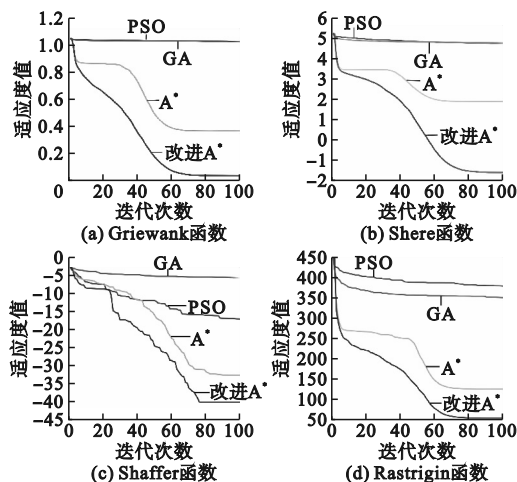


图 5 测试函数迭代图

Fig. 5 Test function iteration graphs

角形代表领航者,从起点到终点的虚线代表规划后的最优路径。

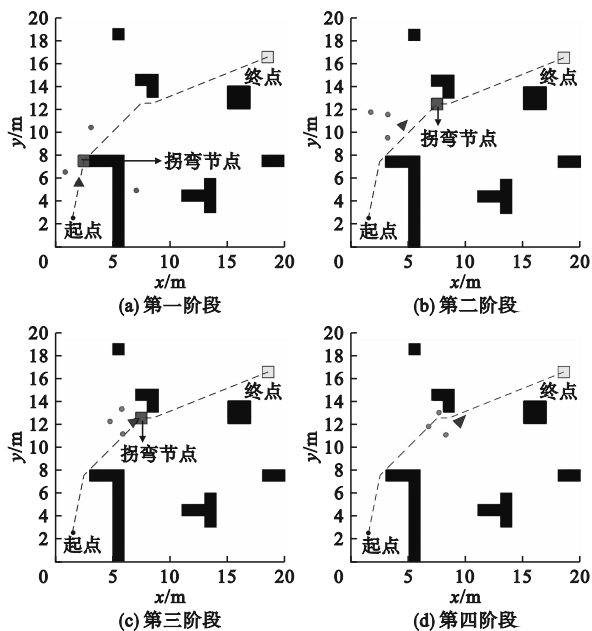


图 6 仿真结果图

Fig. 6 Simulation results graphs

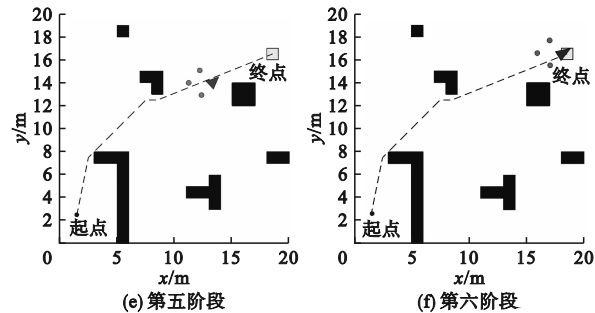


图 6 所示的路径规划过程分为六个阶段:群体聚合(散点向领航者靠拢);跟随路径(领航者引导初始规划);规范队形(聚集后沿最优路径逼近障碍);协同避障(改进算法规避局部最优停滞);穿越障碍(领航群直行终点);抵达目标。通过各阶段的行进情况验证领航跟随法在聚集效率、队形规范及动态避障方面的优化效果。

由图 6 可见:在第一阶段,依据跟随算法,领航者将分散的跟随者汇合;在第二阶段,通过结合 A* 算法,分散个体能够以更规范的距离跟随领航者,领航队伍通过算法的改进向最优路径行进;在第三阶段,领航者遇到直角障碍物,顺利避过障碍物,且跟随者一起通过,未出现“假死”状态,说明算法有效;在第四阶段,面对障碍物时分散个体能够紧跟队伍且队形不变,这是因为本文改进了人工势场法,调整了个体之间力的关系,领航队伍顺利通过障碍物;在第五阶段,领航队伍向出口移动;在第六阶段,全部跟随者跟随领航者到达终点。

经本文改进算法规划的路径中只有两个拐弯节点(图中灰色方框),减少了路径长度,且有效避开了障碍物。仿真实验结果验证了本文改进算法的有效性。

5 结论

对 A* 算法采用最小堆结构优化存储机制,并扩展八方向搜索,使规划的路径更加平滑;对 APF 算法的引力势场函数和斥力势场函数进行优化,增强了领航者的避障能力。将上述两种改进算法与领航跟随法相结合进行路径规划,仿真实验结果表明,本文改进算法规划的路径整体平滑且较短,分散的跟随者向领航者靠拢后以规范队形前进,整体编队有效避开了障碍物并到达终点,整个过程顺利完成,实现了受困人员按照最优路线进行避障逃离,很好地验证了融合算法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 宋英华, 许如霞, 郭晨. 考虑折返行为的元胞自动机人员疏散模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(9): 39-45.
- SONG Y H, XU R X, GUO C. Cellular automata model of personnel evacuation considering backtracking behavior[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(9): 39-45. (in Chinese)
- [2] 盖文妹, 张恒, 崔桐, 等. 基于应急通知方案优化的火灾疏散风险评估: 以高层大学宿舍楼为例[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1431-1441.
- GAI W M, ZHANG H, CUI T, et al. Risk assessment of fire evacuation based on optimization of emergency communication scheme; take high-rise university dormitory buildings as an example[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(5): 1431-1441. (in Chinese)
- [3] 王文斌. 基于视觉的框架结构震后安全性应急评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2023.
- [4] 卢国菊, 史文芳. 基于 Dijkstra-ACO 混合算法的煤矿井下应急逃生路径动态规划[J]. 工矿自动化, 2024, 50(10): 147-151, 178.
- LU G J, SHI W F. Dynamic route planning for emergency escape in coal mines using a Dijkstra-ACO hybrid algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(10): 147-151, 178. (in Chinese)
- [5] TANG M Q, SHENG J W, SUN S Y. A coverage optimization algorithm for underwater acoustic sensor networks based on Dijkstra method[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(8): 1769-1771.
- [6] 张帝, 毛占利, 龚美玲, 等. 基于 Floyd 的化工园区毒气泄漏人员疏散路径规划[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(10): 1475-1478.
- ZHANG D, MAO Z L, GONG M L, et al. Evacuation path planning of toxic gas leakage in chemical industrial park based on Floyd algorithm[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(10): 1475-1478. (in Chinese)
- [7] 范倪圣, 胡益波, 柯锦鸿, 等. 融合路径生成过程的改进 Floyd 算法的最短路径问题研究[J]. 现代信息技术, 2024, 8(11): 31-39.
- FAN N S, HU Y B, KE J H, et al. Research on the shortest path of the improved Floyd algorithm integrating path generation process[J]. Modern Information Technology, 2024, 8(11): 31-39. (in Chinese)
- [8] 唐宏伟, 罗佳强, 邓嘉鑫, 等. 基于学习机制蚁群算法的机器人路径规划[J]. 现代制造工程, 2024(12): 48-53, 129.
- TANG H W, LUO J Q, DENG J X, et al. Path planning of mobile robot based on learning mechanism ant colony algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024(12): 48-53, 129. (in Chinese)
- [9] 吴炳南, 刘建华, 力尚龙, 等. 记忆增强型重构粒子群算法[J/OL]. 计算机工程与应用, 2024: 1-13 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241030.1325.010.html>.
- WU B N, LIU J H, LI S L, et al. Memory-enhanced restructuring particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2024: 1-13 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241030.1325.010.html>. (in Chinese)
- [10] 张苏英, 郭宝樑, 赵国花, 等. 基于改进蚁群算法的大型综合建筑火灾疏散路径规划[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 258-264.
- ZHANG S Y, GUO B L, ZHAO G H, et al. Large-scale integrated building fire evacuation path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 258-264. (in Chinese)
- [11] 汪金辉, 陆守香. 基于遗传算法的火灾环境下建筑内人员安全疏散可靠度计算[J]. 中国工程科学, 2006, 8(3): 58-61.
- WANG J H, LU S X. Evacuation reliability calculation in case of building fire based on genetic algorithms[J]. Engineering Science, 2006, 8(3): 58-61. (in Chinese)
- [12] COSTA G H R, BALDO F. Generation of road maps from trajectories collected with smartphone; a method based on genetic algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 799-808.
- [13] 董崇杰, 刘毅, 彭勇. 改进布谷鸟算法在人群疏散多目标优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1063-1069.
- DONG C J, LIU Y, PENG Y. Improved cuckoo search algorithm applied to multi-objective optimization of crowd evacuation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1063-1069. (in Chinese)
- [14] 梅艺林, 崔立堃, 胡雪岩, 等. 基于人工势场法的复杂环境下多无人车避障与编队控制[J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 364-373.
- MEI Y L, CUI L K, HU X Y, et al. Obstacle avoidance and formation control of multiple unmanned vehicles in complex environments based on artificial potential field method[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 364-373. (in Chinese)
- [15] 李明海, 兰亚乐, 马骁, 等. 建筑火灾全局动态疏散路径规划研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(1): 205-215.
- LI M H, LAN Y L, MA X, et al. Research on global dynamic path planning for evacuation during building fires[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 205-215. (in Chinese)
- [16] 王丽, 李育萌, 刘云, 等. Zigbee 耦合 A* 算法的疏散路径动态规划与指示系统[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 142-149.
- WANG L, LI Y M, LIU Y, et al. A dynamic planning and indication system for evacuation paths based on Zigbee coupled A* algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 142-149. (in Chinese)
- [17] JIANG H X. Mobile fire evacuation system for large public buildings based on artificial intelligence and IoT[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64101-64109.
- [18] 曹晓意, 罗煦琼, 李景, 等. 改进人工势场法下的多无人机编队路径规划方法[J/OL]. 计算机应用, 2024: 1-7 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20241021.2204.010.html>.
- CAO X Y, LUO X Q, LI J, et al. Path planning of multi-UAV formation based on improved artificial potential field method[J/OL]. Journal of Computer Applications, 2024: 1-7 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20241021.2204.010.html>. (in Chinese)
- [19] 郑紫怡, 于洋, 王巍. 基于领航-跟随法的多无人车自适应神经网络编队控制[J/OL]. 系统科学与数学, 2024: 1-17 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241009.1521.002.html>.
- ZHENG Z Y, YU Y, WANG W. Adaptive neural network formation control of multiple-unmanned ground vehicles based on leader-follower method[J/OL]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2024: 1-17 [2025-03-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241009.1521.002.html>. (in Chinese)