

# 一种基于多起点、多终点的大型火灾救援路径规划方法

李珊珊 刘福江 林伟华

(中国地质大学信息工程学院 武汉 430074)

**摘要** 针对多起点、多待救援点、多出口的联合应急救援实时路径规划问题,提出了改进蚁群算法(IACA),设计了一种组合优化的路径构造方法。为了提高蚁群算法的收敛性,实时更新两位置节点间的当量距离,改进信息素更新规则,自适应地动态调整信息素挥发度参数,构造了一种与蚁群算法有效结合的局部搜索算法,提高了算法快速寻优的能力。为了解决传统路径规划的单一应急救援的局限性,文中提出一种组合优化蚁群算法的路径构造方法。仿真结果表明:所提方法能够实时、快速地找到一种从多个起点到多个待救援点再回到多个出口之间的最佳组合优化路径,且收敛速度和最短路径较传统算法更优,可以较好地提高在大型应急救援路径规划中的速率和优化程度。

**关键词** 应急救援,改进蚁群算法,路径规划

**中图分类号** TP301.6 **文献标识码** A

## Path Planning Method of Large-scale Fire Based on Multiple Starting Points and Multiple Rescue Points

LI Shan-shan LIU Fu-jiang LIN Wei-hua

(School of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Aiming at the real-time path planning of joint emergency rescue with multiple starting points, multiple rescue points and multiple exits, an improved ant colony algorithm(IACA) was proposed and a combined optimization path construction method was designed. In order to improve the convergence of ant colony algorithm, this paper updated the equivalent distance between two position nodes in real time, improved the pheromone update rules, and adaptively adjusted the pheromone volatility parameters. A local search algorithm that effectively combines with ant colony algorithm was constructed to improve the ability of fast optimization presented. To solve the limitation of the single emergency rescue of traditional path planning, this paper proposes a path construction method based on combined optimization ant colony algorithm. The simulation results show that the improved ant colony algorithm based on combinatorial optimization can quickly find a set of paths from multiple starting points to multiple rescue points and back to multiple exits in real time, and its convergence speed and the shortest path are better, which can improve the rate and optimization in large emergency rescue route planning.

**Keywords** Emergency rescue, Improved ant colony algorithm, Path planning

## 1 引言

近年来中国大型突发灾害频频发生,在 21 世纪近 10 年内重大火灾发生次数居高不下。《中国消防年鉴》<sup>[1-6]</sup>显示,每年火灾造成的经济损失达到上亿元,人民生命财产遭到严峻考验。因此,突发性灾害应急救援是当前社会关注的热点问题,探讨如何快速有效地执行救援工作,具有重要的现实意义。为此,国内外对应急救援路径规划做了大量研究,其中国外仿生智能优化算法中的蚁群算法<sup>[7]</sup>对于解决路径规划问题的贡献尤为突出。

已有国内外文献均未考虑多个待救援点和多个救援队不返回起始点的情形,只研究救援点和单一救援队之间的单向救援路线,也没有考虑救援队伍完成救援的返回时间对救援效果产生的影响,因此针对联合多起点、多待救援点、多出口的实时应急救援路径规划<sup>[8]</sup>问题亟待解决。本文首先结合无

线传感器网络<sup>[9]</sup>实时传回的现场环境信息,更新两位置节点间的当量距离<sup>[10]</sup>;其次,改进信息素更新规则并自适应动态调整信息素挥发度参数<sup>[11]</sup>,提出一种改进蚁群算法;最后,通过优化组合算法,得到多起点、多待救援点到多出口的最佳实时组合优化路径方案。

## 2 环境描述

通过部署在建筑物内的无线传感器网络获取环境信息,采用栅格法(Grid Method)<sup>[12]</sup>建立环境模型。根据栅格法建立的复杂环境模型(图 1),在 Matlab 环境下进行仿真,消防人员的起始坐标为(0,0),(25,0),(0,25),(25,25),出口终点坐标也为(0,0),(25,0),(0,25),(25,25),单个栅格大小为 1 m \* 1 m。黑色栅格表示障碍物,白色栅格表示自由空间,红色栅格表示火源中心,黄色栅格表示火源周围蔓延范围,仿真结果如图 1 所示。

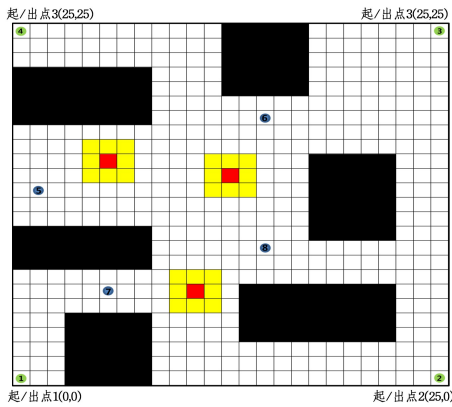


图 1 环境模型(电子版为彩色)

目标在移动过程中,如遇到障碍物或火险,其距离将被设为无穷大;若无障碍物和火险,则目标可以移动到其周围的 8 个邻近栅格位置的中间位置。

### 3 建立改进蚁群算法的组合优化模型

蚁群算法是一种模拟仿生启发式搜索算法<sup>[13]</sup>,具有较强的鲁棒性和优良的分布式计算机制,易与其他方法集成。它在解决许多复杂优化问题方面具有良好的性能和巨大的潜力。它的工作原理主要是当蚂蚁遇到多条路线时,蚂蚁会随机选择一条,而信息素浓度会随着时间的延长而减小;同时,不同长度的路线上分布的信息素浓度是不同的,距离较长的路线上剩余的信息素浓度越低。信息素浓度越高的路线将会指引更多的蚂蚁在此路线上行进,蚂蚁就是利用这种机制找到距离最短的路径,而且还能巧妙地避开障碍物的阻挡。作为群居生物的蚂蚁,它们的活动行为是同时进行的,这种习性刚好符合多个巡查人员执行任务的情况,从而保证算法的稳定性能。

设总蚂蚁数为  $M$ ,根据最近起点计算寻找各个救援点的起始救援点,蚂蚁转移过程中根据状态转移概率选择下一位置节点, $t$ 时刻第  $m$ 只蚂蚁由位置  $i$ 转移到  $j$ 的转移概率为:

$$P_{ij}^m(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in N_i^m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

当前点  $i$ 到待访问点  $j$ 这条边上的信息素为  $\tau_{ij}$ , $\tau_{ij}(t)$ 表示蚂蚁访问完点  $i$ 之后访问点  $j$ 的信息素浓度; $\eta_{ij} = 1/L_{ij}$ ( $L_{ij}$ 为点  $i$ 与  $j$ 间的当量距离),表示点  $i$ 与  $j$ 间的是与问题相关的启发式信息; $\alpha$ 为信息素的相对重要程度, $\beta$ 为启发信息的重要程度,通过调整  $\alpha$ 和  $\beta$ 来决定残留信息素和启发信息的相对作用大小; $N_i^m$ 为位于点  $i$ 的蚂蚁  $m$ 的待访问点集合。

#### 3.1 改进蚁群算法

##### 3.1.1 实时更新两位置节点间的当量距离

通过实测与模拟,影响现场通行难易程度<sup>[14]</sup>的因素主要有地面湿滑程度、风速、障碍物、气体环境和可见度等,将这些因素用巷道通行难易程度系数  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ 来表示,实时计算得到通过巷道时的难易程度系数。计算公式如下:

$$\beta_i(ij) = \frac{T(ij) - t(ij)}{t(ij)} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - \sigma_{ij}} \quad (2)$$

其中, $T(ij)$ 为有该影响因素  $\beta_i$ 时,通过该道路的时间(单位为秒); $t(ij)$ 为无该影响因素  $\beta_i$ 时,通过该道路的时间(单位为

秒); $\sigma_{ij}$ 为环境影响因子参数。

$$\gamma = 1 + \beta_1(ij) + \beta_2(ij) + \dots + \beta_n(ij) \quad (3)$$

其中, $\gamma$ 为由环境信息综合得到的权重参数。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 参照国际、国内权威机构对火灾的相关规定; $\sigma_5$ 按照我国国家标准《建筑设计防火规范》<sup>[15-16]</sup>进行设定。

表 1 环境影响因子的难易程度

影响因子编号	因子名	因子参数	等级描述	补充说明
$\sigma_1$	相对湿度/地面滑度	0.05	干燥	
		0.11	较湿润	
		0.21	湿润	
$\sigma_2$	空气温度	0.05	低温	
		0.11	中温	
		0.16	高温	
$\sigma_3$	风速/火灾蔓延速度	0.08	微风	
		0.18	中风	
		0.28	大风	
$\sigma_4$	烟雾浓度/可见度	0.05	轻度	
		0.10	中度	
		0.15	重度	
$\sigma_5$	可燃性	0.05	A 等级不燃	钢筋混凝土结构或砖墙与钢筋混凝土结构组成的混合结构
		0.1	B <sub>1</sub> 等级难燃	钢结构屋架、钢筋混凝土柱或砖墙组成的混合结构
		0.2	B <sub>2</sub> 等级可燃	木屋顶和砖墙组成的砖木结构
		0.3	B <sub>3</sub> 等级易燃	木屋顶、难燃烧墙体墙壁组成的可燃结构

计算时,假设道路  $i, j$ 点间的实际距离为  $l_{ij}$ ,计算得到实时最短当量距离<sup>[4]</sup>为  $L_{(i,j)}$ ,道路通行难易程度系数为  $\beta_i(ij)$ ,得到道路当量距离。

$$L_{(i,j)} = \begin{cases} \gamma l_{ij}, & j \in Z_0 \\ 9999, & j \in Z \\ l_{ij}, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $Z$ 为障碍物和火源位置集合; $Z_0$ 为火险周围危险区域; $\gamma$ 是由环境信息综合得到的实时权重参数,包括火焰温度、烟雾浓度、火险蔓延速度等; $l_{ij}$ 为  $i, j$ 两点之间的距离。

##### 3.1.2 进行信息素浓度 $\tau_{ij}$ 更新,并清空禁忌表

信息素更新分为两部分,即全局更新<sup>[17-19]</sup>(学者 Dorigo 研究的“蚁周系统”模型)和局部更新<sup>[17-19]</sup>。信息素更新完毕,一轮搜索结束,将禁忌表清空,为下一轮搜索做好准备。

信息素全局更新是指在所有蚂蚁都完成遍历,构建出完整路径后,只允许迄今最优蚂蚁释放信息素,规则如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (5)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q(t)}{T_k}, & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁走过 } ij \text{ 边} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q(t) = \text{const} * [1 - \sum_{r=1}^n \beta_r(t)] \quad (7)$$

其中, $Q(t)$ 是一个时变函数,表示信息素常量; $\beta_r(t)$ 表示  $t$ 时刻第  $r$ 影响因素的影响程度; $n$ 表示影响因素的个数,在本文中  $n=5$ 。

实验表明,当待救援点较多时,处于区域边缘的蚂蚁在初始时路径选择相对简单,找到优质路径的概率较大。经过一段时间到达中心区时,路径纵横交错,选择路径变得困难,且受到其他蚂蚁所走路径的影响,此时,蚂蚁找到较优路径的概率较小。据此,本文设计出一种动态的局部信息更新策略:

(1)当选择该路径的救援人员大于  $M/4$  或有大于  $M/6$  的救援人员选择该路径后,因当前距离超过上一步的最优路径长度而终止遍历,信息量的更新取  $10/L_{(i,j)}$ ,以此来平衡救援过

$$\tau_{ij}(t+1) = \begin{cases} \tau_{ij}(t) - 10/L_{(i,j)}, & \text{若本次迭代中已有 } M/4 \text{ 只蚂蚁选择同一路径或} \\ & M/6 \text{ 只蚂蚁选择该路径后,终止本次迭代的遍历} \\ \tau_{ij}(t) + 1/L_{(i,j)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

### 3.1.3 动态调整信息素挥发度 $\rho$ 参数

信息素挥发因子  $\rho$  的大小直接影响着蚁群算法的全局搜索能力及其收敛速度, $\rho$  过大会降低全局搜索能力, $\rho$  过小会降低算法的收敛速率。本文信息素挥发因子  $\rho$  按下式进行更新:

$$\rho(t) = \max(1 - \log(t)/\log(t+a), \rho_{\min}) \quad (9)$$

其中, $a$  为常数, $\rho_{\min}$  为  $\rho$  的最小值,以此消除  $\rho$  过小而降低算法收敛速度的问题。随着循环次数的不断增加,每次的最优值都相差不大,陷入某个极值点,但结果并不一定是全局最优解,此时就需要减小挥发度系数  $\rho$  以提高算法的搜索能力<sup>[20]</sup>。

### 3.2 建立组合优化模型

在灾难环境下,人员的救援路径规划,即在有效避开障碍物和火源区域的前提下,从实时最近起始点找到多个被困人员再到实时最近出口的最短距离。

$$\begin{aligned} L &= \min\{\sum L(a_1, b, a_2)\} \\ &= \min\{\sum [L(a_1, b) + L(b, a_2)]\} \\ &= \min\{\sum [\gamma_{a_1 b} l_{a_1 b} + \gamma_{b a_2} l_{b a_2}]\} \end{aligned} \quad (10)$$

程中的强烈趋众性;(2)当选择当前路径的救援人员数量一般时,取  $1/L_{(i,j)}$  为当前信息素的增量。

局部信息素的更新公式如下:

$$a_1 \in \{1, 2, \dots, A\}, a_1 \neq \emptyset;$$

$$b \in \{1, 2, \dots, B\}, b \neq \emptyset, \sum_{b=1}^B b = \{1, 2, \dots, B\};$$

$$a_2 \in \{1, 2, \dots, A\}, a_2 \neq \emptyset$$

计算最优路径,判断是否满足结束条件。如满足结束条件,输出最优路径;否则,重新开始新一轮的搜索。最后,每个被困人员点都有一个起点到终点的完整救援路径。

## 4 仿真结果及分析

通过仿真实验对提出的算法进行验证。仿真工具使用 Matlab R2014a。设定  $25\text{m} \times 25\text{m}$  的平面区域,传感器网络被均匀部署在实验环境中,监控区域内有多个障碍物和多个火源点。算法的参数配置如表 2 所列,初始环境参数设置如表 3 所列。

表 2 改进蚁群算法的参数配置

$\alpha$	$\beta$	$\rho_{\min}$	$M$	最大搜索次数
1	5	0.1	50	100

表 3 改进蚁群算法的初始环境参数

行/列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
25	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
24	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
23	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
22	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
21	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
20	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
19	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
18	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
17	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
16	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
15	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
14	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
13	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
12	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
11	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
10	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.49	1.49	1.49
9	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.49	1.49	1.49
8	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.49	1.49	1.49
7	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
6	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
5	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
4	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.49	1.49	1.49
3	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
2	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
1	1.30	1.30	1.30	9999	9999	9999	9999	9999	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49

通过表 2 和表 3 的参数设置实现了图 2 所示的最优救援路径规划,图 2 中得到的最优路径规划路线为 1-7-5-4, 1-7-8-2, 1-7-1 和 3-6-3。图 3 和表 4 为原始蚁群算法在动态环境下的路径搜索结果,可以看出,改进蚁群算法较大地提高了蚁群算法的收敛速度,减少了迭代次数,有效地避免了陷入局部最优解的问题,能够使蚂蚁首次寻路就达到良好的效果。可见,本文对蚁群算法的改进可以较好地提高在大型应急救援路径规划中的速率和优化程度。因此,该设计方案能够有效避开障碍物和火灾区域,找到安全、快速的救援路线,提高灾难救援的效率,可以为多起点、多待救援点的路径规划提供广阔的优化前景。

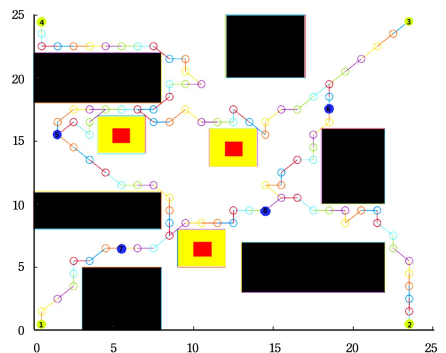
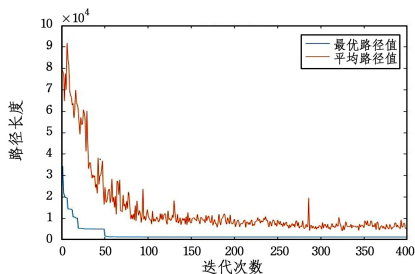
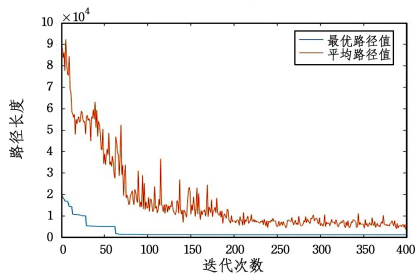


图 2 最优救援路径规划图



(a)原始蚁群算法



(b)改进蚁群算法

图 3 改进蚁群算法与原始蚁群算法中迭代次数对比

表 4 改进蚁群算法与原始蚁群算法的结果对比

算法	比较	实验 1	实验 2	实验 3	最优
改进的蚁群算法	最优路径长度/m	74.80	73.70	73.40	73.40
	时间/s	58	56	55	55
	迭代次数/次	52	50	50	50
原始蚁群算法	最优路径长度/m	81.26	80.18	80.59	80.18
	时间/s	152	154	150	150
	迭代次数/次	72	73	72	72

**结束语** 本文重点研究了灾后应急救援路径选择的特征和需求,提出了针对多个起点、多个待救援点、多个出口的联合应急救援实时路径规划方法,以此为基础建立了灾后应急救援多目标组合优化模型,设计了改进的遗传蚁群系统算法且进行了模型求解,最后进行了分析和验证。研究显示,将其用于大、小规模问题均是有效的和可行的,多目标组合优化的改进蚁群算法对灾后应急救援具有很好的求解效果,能够更好地满足灾后应急救援路径规划快速决策的需求,找到安全、快速的救援路线,提高灾难救援的效率。

参 考 文 献

[1] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2015[M]. 昆明:云南人民出版社,2015.  
 [2] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2014[M]. 昆明:云南人民出版社,2014.  
 [3] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2013[M]. 昆明:云南人民出版社,2013.  
 [4] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2012[M]. 昆明:云南人民出版社,

社,2012.  
 [5] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2011[M]. 昆明:云南人民出版社,2011.  
 [6] 公安部消防局. 中国消防年鉴 2010[M]. 昆明:云南人民出版社,2010.  
 [7] DORIGO M. Optimization, learning and natural algorithms[D]. Milano:Politecnico di Milano,1992.  
 [8] YANG J,SHI M,HAN Z. Research Intelligent Fire Evacuation System Based on Ant Colony Algorithm and MapX[C]// Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. IEEE,2015:100-103.  
 [9] 尹克强,郭勇,王丹. WSN 在地铁车辆车载设备火灾预警中应用[J]. 仪表技术与传感器,2014,3(5):87-89.  
 [10] 刘笑笑,汪云甲,毕京学,等. 矿井火灾逃生路径规划及其三维仿真研究[J]. 中国安全科学学报,2017,27(10):26-31.  
 [11] ADHIKARI J,PATIL S. Double threshold energy aware load balancing in cloud computing [C]// 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE,2013:1-6.  
 [12] NING J,ZHANG Q,ZHANG C, et al. A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm[J]. Information Sciences,2018,433-434:142-162.  
 [13] VISERAS A,LOSADA R O,MERINO L. Planning with ants: Efficient path planning with rapidly exploring random trees and ant colony optimization[J]. Int J of Advanced Robotic Systems, 2016,13(5):1-16.  
 [14] 周锦龙,易永华. 基于蚁群算法的矿井救援最短路径研究[J]. 煤炭技术,2015,34(11):196-197.  
 [15] 中华人民共和国国家标准. GB 50016-2014. 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2014.  
 [16] JIAO Z,MA K,RONG Y, et al. A path planning method using adaptive polymorphic ant colony algorithm for smart wheelchairs[J]. Journal of Computational Science,2018,25:50-57.  
 [17] MUKHOPADHYAY A,MAULIK U,BBANDYOPADHYAYS, et al. Survey of Multiobjective Evolutionary Algorithms for Data BANDYOPADHYAY:Part II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(1):20-35.  
 [18] 王晓燕,杨乐,张宇,等. 基于改进势场蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策,2018,33(10):775-1781.  
 [19] 杜鹏桢,唐振民,陆建峰,等. 不确定环境下基于改进萤火虫算法的地面自主车辆全局路径规划方法[J]. 电子学报,2014,42(3):616-624.  
 [20] PANDA R K,CHOUDHURY B B. An effective path planning of mobile robot using genetic algorithm[C]// IEEE Int Conf on Computational Intelligence & Communication Technology. Ghaziabad,2015:287-291.