

doi: 10.7690/bgzdh.2021.06.013

# 佩戴空气呼吸器的救援小组路径规划

李梦琪<sup>1</sup>, 张宏远<sup>2</sup>

(1. 陆军防化学院研究生队, 北京 102205; 2. 陆军防化学院指挥系, 北京 102205)

**摘要:** 为使抢险救援任务小组在有毒有害环境现场尽快完成工作、保护人员安全, 对救援小组中组员行动的路径规划问题进行研究。针对佩戴空气呼吸器的救援小组多名人员行动特点, 改进蚁群算法判断条件, 增加模拟退火算法解的存储环节、算法循环层数与产生新解的方法, 将 2 种改进后的算法结合, 得到适合 2 维环境的多人佩戴空气呼吸器的路径规划算法。结果表明, 该算法与单独用模拟退火算法路径规划的结果相比更优。

**关键词:** 空气呼吸器; 多人小组; 蚁群算法; 模拟退火算法; 路径规划

**中图分类号:** TJ92 **文献标志码:** A

## Path Planning of Rescue Team Wearing Air Breathing Apparatus

Li Mengqi<sup>1</sup>, Zhang Hongyuan<sup>2</sup>

(1. Brigade of Postgraduate, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China;

2. Department of Command, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract:** In order to making the rescue team finish the work as soon as possible and protect the safety of personnel in toxic and harmful environment, it has studied the path planning problem of rescue team members. According to the action characteristics of multiple personnel in the rescue team wearing air breathing apparatus, improved the judgment condition of ant colony algorithm, added the storage link of simulated annealing algorithm solution, the number of algorithm cycle layers and the method of generating new solution. Combined the 2 improved algorithms, obtained a path planning algorithm suitable for two dimensional environment with many people wearing air breathing apparatus. The results show that the algorithm is better than the simulated annealing algorithm alone.

**Keywords:** air breathing apparatus; multi-person team; ant colony algorithm; simulated annealing algorithm; path planning

### 0 引言

危化品灾害事故易形成有毒有害环境, 甚至可能引发着火爆炸<sup>[1]</sup>, 增加抢险救援工作的难度和危险性。在有毒有害或缺氧环境中, 执行救援任务的人员通常需要佩戴空气呼吸器(以下简称空呼)。若在工作过程中, 救援人员防护意识不强, 或指挥员安排工作不科学, 更易造成救援人员伤亡<sup>[2]</sup>。

执行任务全程通过空呼供气维持呼吸, 但空呼气瓶容量有限, 如果人员在气体用尽时没有离开危害环境, 就极有可能面临生命危险, 因此人员在危害环境停留的时间越短越好。救援人员根据任务、空呼气体量等条件, 如何能高效到各任务点, 少走或不走“冤枉路”, 使人员尽快完成任务脱离危害环境是亟需解决的问题。

笔者针对空呼使用的特点, 对救援小组中组员行动的路径规划问题进行研究, 以达到小组成员高效完成任务, 快速撤离事故现场, 降低人员安全风险的目的。

### 1 救援小组多人行动路径规划问题描述

救援小组多人行动路径规划问题, 首先要考虑单人佩戴空呼执行任务的情况。由于人员行动受限于空呼的气瓶容量, 在规划路径时要密切掌握空呼气体的使用情况, 根据人员消耗气瓶气量、速度、位置等因素及时安排给空呼充气。

其次, 还要考虑小组多人行动的整体情况。执行任务时, 所有人都完成工作返回起点视为任务结束, 即以最后一名返回人员所用时间作为该小组完成任务的整体用时; 因此, 规划路径要注意每名组员任务的均衡性, 避免有人很早结束, 而有人耗时过长的现象。

通常, 专业救援队伍会配备移动充气车或足够的可替换气瓶, 救援人员能通过补充气体完成现场所有工作。基于任务明确和可充气这 2 个前提, 对本文中研究的救援小组多人路径规划问题设立约束:

1) 所有人员从起点出发, 完成各自工作后, 回

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-15

作者简介: 李梦琪(1994—), 女, 山西人, 硕士, 从事装备指挥管理研究。E-mail: zhybeijing@sina.com。

到起点；

- 2) 人员工作过程中空呼气体量始终大于零；
- 3) 所有任务节点位置已知，且重要程度相等；
- 4) 人员必须在起点补充气体或更换空呼气瓶。

在图 1 任务区域中，圆点为需要进行作业的任务点，三角形为任务区域出入口，也是执行任务时的起点、终点和充气点，所有点均在同一平面。

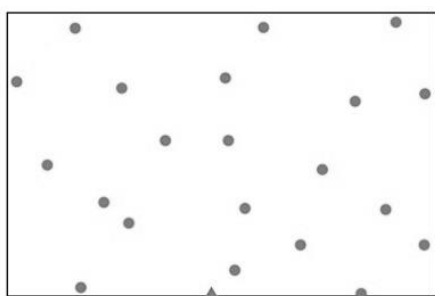


图 1 简单任务区域

此设定下，本文中研究的多人佩戴空呼执行既定任务的小组路径规划问题可以描述为：在一个有若干任务点的同一平面的 2 维环境中，同时规划多名佩戴空呼人员的行进路径。在所有空呼储气始终大于零，各条任务路径不重复且包含所有任务点的前提下，使最后返回起点的人员用时尽可能短。

本文中研究对象选定为 5 人规模的救援小组，含 1 名指挥员和 4 名组员。接到救援任务后，小组所有人员携装备赶赴现场，指挥员在起点统筹全局工作，组员进入现场分别进行实际作业。

为了得到能够应用于实际工作的普遍方法，可通过假设对现实情况做出一些理想化规范。假设内容具体如下：

- 1) 所有人员独立行动，不进行互助操作；
- 2) 一个任务点的工作由一名人员一次性完成；
- 3) 人员完成自己工作后无需等待他人返回；
- 4) 所有人员技能熟练，进行同一种操作的时间相同；
- 5) 所有人员身体素质良好，能顺利完成各自的任务；
- 6) 所有空呼状态良好，工作中不发生故障；
- 7) 执行任务过程中不给人员增加临时任务。

笔者通过改进蚁群算法和模拟退火算法，将两者结合，求解多人佩戴空呼执行既定任务的救援小组路径规划问题。

蚁群算法在解决简单路径规划问题时，鲁棒性强、组织性好、正反馈机制优势较为明显<sup>[3]</sup>，但随

着问题规模的增大和要素增多，算法设计复杂，易导致求解时间过长，出现收敛速度慢、陷入局部最优等弊端。模拟退火算法的概率突跳特性和渐近收敛性可以有效避免问题求解陷入局部最优，且 2 个算法都具有并行性，将 2 种算法结合有利于缩短求解时间。

根据问题描述，最后完成任务的人员所用时间尽可能短就是救援小组路径规划的目标条件，也是算法筛选最优路径时的判断标准。

## 2 多人佩戴空呼的路径规划算法设计思路

对多人佩戴空呼的路径规划算法设计结合改进的蚁群算法和模拟退火算法。对蚁群算法的改进有 1 处：根据空呼气量改进对任务点选择与确定的判断；对模拟退火算法的改进有 3 处：增加解的存储及搜索步骤、增加循环层数和增加产生新解的方法。

用改进算法求解问题时，先通过蚁群算法得到一条不考虑空呼气瓶容量约束的包含所有任务点的路径，将其作为初始解给模拟退火算法进行任务分配。对分配给每名组员的任务点再次用改进的蚁群算法规划执行顺序，在不断迭代中得到多种路径规划方案，其中最后一名人员完成任务用时最短为最优路径规划结果。

### 2.1 对蚁群算法任务点选择与确定的改进

对蚁群算法的改进主要是考虑人员执行任务过程中空呼储气量应始终大于零的约束，改进了确定任务点的条件。

蚁群算法受启发于蚂蚁觅食过程中前方蚂蚁通过信息素影响后方蚂蚁行动<sup>[4]</sup>，从而使蚁群快速找到最优路径的行为，经典蚁群算法伪代码如下：

```

for 迭代循环
    for 单只蚂蚁循环
        根据概率公式选择任务点 a
        蚂蚁前往任务点 a，路径增加
    end for 单只蚂蚁循环
    记录本次循环最优路径，更新信息素
end for 迭代循环
输出算法运行全过程的最优路径

```

在经典蚁群算法中，根据概率公式选出的任务点即为下一目标点；改进后的蚁群算法，增加了根据空呼气量判断选出的任务点能否作为目标点的过程，改进内容如图 2 中的虚线矩形所示。

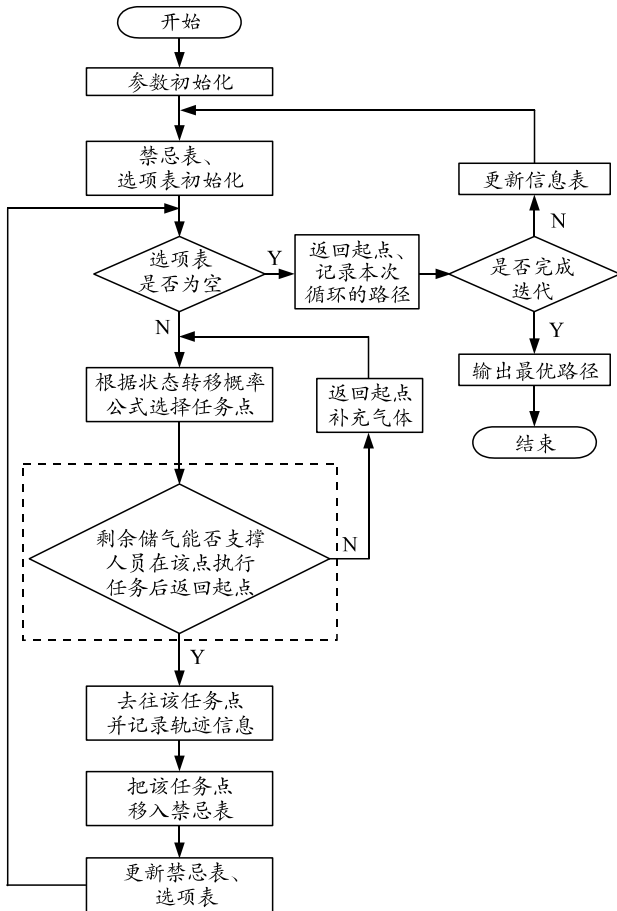


图 2 改进的蚁群算法流程

改进后蚁群算法与经典蚁群算法的数学模型<sup>[5-6]</sup>基本一致。模型中一些参数含义如下：

$A$  为任务点集合，第  $n$  个任务点记为  $a_n$ ； $m$  为算法中蚂蚁的总数； $L_{ij}$  为连接任务点  $i$  与任务点  $j$  的路径  $(i, j)$ ； $\alpha$  为信息启发因子，常数，通过信息素浓度表示蚂蚁走过的路的重要程度； $\beta$  为期望启发因子，常数，表示路径本身能够启示蚂蚁做出选择的重要程度； $D_{ij}$ 、 $T_{ij}$  为蚂蚁在路径  $L_{ij}$  上行走的时间和距离； $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻  $L_{ij}$  上的信息素浓度； $\eta_{ij}(t)$  为启发函数，表示蚂蚁在  $t$  时刻从任务点  $i$  转移到任务点  $j$  的期望值，与两任务点间距离成反比，有  $\eta_{ij}(t) = 1/D_{ij}$ ； $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻  $L_{ij}$  上的信息素浓度； $\Delta\tau_{ij}(t)$  为在蚂蚁经过所有任务点各一次的循环中， $L_{ij}$  上信息素的增量，初始时刻  $\Delta\tau_{ij}(t) = 0$ ； $allowed_k$  为蚂蚁  $k$  接下来可以选择的任务点，在此称为选项表； $tabu_k$  为蚂蚁  $k$  已经到过的任务点，在此称为禁忌表，与选项表对应，有  $allowed_k = \{A - tabu_k\}$ ； $Q$  为信息素强度。

蚂蚁  $k$  在任务点间行进时，对下一步行动目的地的选择由状态转移概率  $P_{ij}^k(t)$  决定，计算方式为：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta}, & \text{if } j \in allowed_k, \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

增加对任务点的判断在这一步后进行。若点  $i$  为人员当前位置，点  $j$  为式(1)选出的目标任务点，人员从点  $i$  至点  $j$ ，再到完成点  $j$  处任务，为结束一次任务点转移的全过程。为最大限度保证人员安全，就要确保该过程中无论何时突发状况，气瓶内都应存有气体供人员顺利撤离现场。选出点  $j$  后，要判断按照人员当前的空呼耗气率，气瓶剩余气量，能否支撑人员前往点  $j$  执行任务并返回起点，判断成立才可以将点  $j$  确定为目标点。

为了防止信息素过度积累或挥发，在蚂蚁行动中的一定时机(如  $t+x$  时刻)对路径上的信息素浓度进行更新，信息素的更新规则如下：

$$\tau_{ij}(t+x) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t). \quad (3)$$

式中： $\rho$  为信息素挥发系数，在  $[0,1]$  范围内取值，与  $\rho$  对应； $1-\rho$  为信息素残留系数。

计算  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  通常采用蚁周模型<sup>[7]</sup>(ant-cycle)：

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/D_k, & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 在 } t \text{ 和 } t+x \text{ 时段内走过 } L_{ij}. \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 对模拟退火算法的改进

本文中对模拟退火算法的改进主要通过增加解的存储及搜索、循环层数和产生新解的方法。

### 2.2.1 增加算法解的存储和搜索过程

模拟退火算法是基于概率，简单模拟退火算法没有存储环节，直接通过概率选择决定结果的保留和遗弃，在不断迭代中使保留结果趋近最优，其伪代码如下：

```

for 外循环
    for 内循环
        计算当前方案评价值 1；
        生成新方案；
        计算新方案评价值 2；
        if 评价值 2 < 评价值 1
    
```

更新新方案为当前方案；

else

根据 Metropolis 准则计算一个概率；

生成一个 [0, 1) 区间的随机数；

if 该随机数小于这个概率

更新新方案为当前方案；

end if

end if

保留当前方案和其对应的评价值；

end for 内循环

按衰减系数降温；

end for 外循环

从代码可知，模拟退火算法的新解接受概率根据 Metropolis 准则确定，其公式为：

$$p = e^{-(E_j - E_{j-1})/T} \quad (5)$$

式中： $E_j$  为当前的状态值； $E_{j-1}$  为前一次的状态值； $T$  为当前温度。

温度  $T$  与迭代次数有关，在不断迭代中，从初始温度  $T_0$  按照一定的衰减系数降低，温度变化公式为：

$$T_k = \alpha \cdot T_{k-1} \quad (6)$$

式中： $\alpha$  为温度衰减系数； $T_k$  为衰减后  $k$  时刻的温度； $T_{k-1}$  为衰减前  $k-1$  时刻的温度。

函数  $y=e^{-x}$  的曲线如图 3 所示。幂的自变量部分在  $x$  轴的正半轴时，函数值从 1 不断减小趋近于 0。对于式(5)和(6)来说，随着温度  $T$  的降低， $(E_j - E_{j-1})/T$  部分整体不断增大，算法解的突跳可能性越来越低，使结果趋近最优。

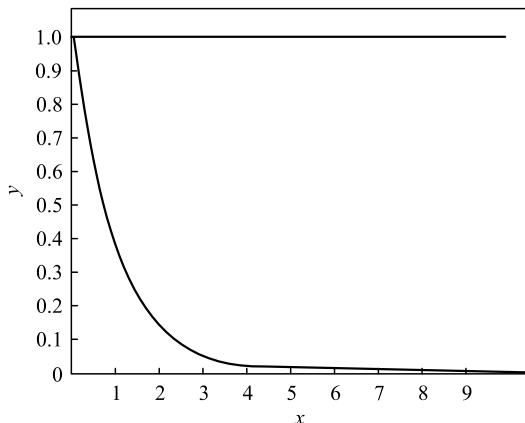


图 3 函数  $y=e^{-x}$  在  $x$  轴正半轴的曲线

模拟退火算法的突跳性选择在防止算法陷入局部最优的同时也会降低收敛速度。为了避免搜索过程中由于接受概率结果而遗失遇到的较优解，可以通过增加记忆存储和补充搜索过程改进算法。具体

操作：不论选用哪个方案，都将新旧方案记录下来，在某温度下的循环结束后，对之前所有的解进行比较，以搜索到的最优解为初始状态执行温度衰减后的新循环。当达到最大迭代次数，比较每个温度循环下存储的最优解，再次择优即为最优路径规划结果。改进内容见图 4 中虚线矩形①所示。

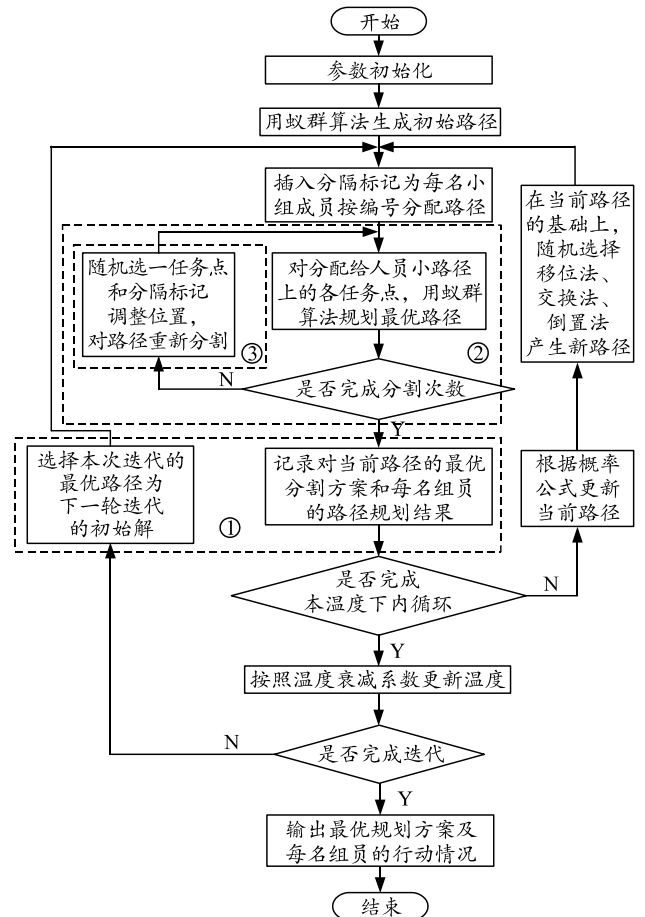


图 4 改进的模拟退火算法流程

需要注意：模拟退火算法得到的解不一定是对该问题的最优解。虽然通过马尔科夫过程可以证明在一定条件下，当温度降为 0 °C 时，模拟退火算法得到的解一定是全局最优解<sup>[8]</sup>，但由于设计算法时考虑到的限制条件不一定能涵盖所求解问题的全部方面，所以在有限的迭代次数下，只能认为得到的解是当前条件下的最优解，而不能保证是全局全过程的最优解。

### 2.2.2 增加算法路径分割循环

简单模拟退火算法有 2 层循环，外循环改变退火温度，内循环产生新的解。在内循环里又加入了一个循环，因此改进后的模拟退火算法共有 3 层循环，分别为温度循环—新路径循环—路径分割循环。

温度循环对应简单模拟退火算法的外循环，也

是迭代循环，每次迭代中温度降低，影响根据 Metropolis 准则计算出的选择概率。

新路径循环对应简单模拟退火算法的内循环，主要对未分割的长路径进行顺序调整，形成新的任务点排序，该循环所有路径中用时最短的任务点排序方案将作为下一轮温度循环中的初始解。

路径分割循环是增加的循环，如图 4 中虚线矩形②所示。它对同一条路径以不同方式多次分割进行寻优。该循环结束后用时最短的分割方案将存储为该条路径的最优分配方式。

### 2.2.3 增加算法产生新解的方法

模拟退火算法一个重要的环节是产生新的解，新路径循环和路径分割循环是产生新解的过程。

新路径循环采用苗卉等<sup>[9]</sup>提出的 3 种方法产生新解，分别为移位法、交换法和倒置法。

1) 移位法:如图 5 所示,随机选择 3 个任务点,将前 2 个任务点之间的所有点移动到第 3 个后,其余任务点的位置保持不变。

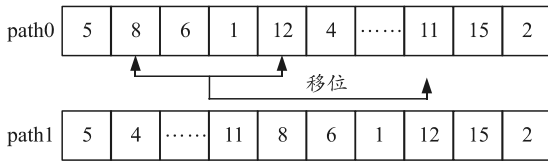


图 5 移位法

2) 交换法:如图 6 所示,随机选择 2 个点,交换它们的位置,其余点的位置保持不变。

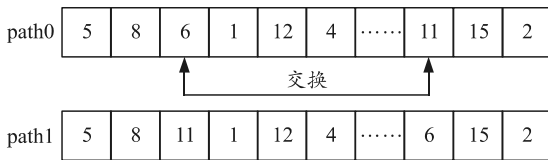


图 6 交换法

3) 倒置法:如图 7 所示,随机选择 2 个点,将这 2 个点之间所有点(含 2 个端点)的顺序完全颠倒,其余点的位置保持不变。



图 7 倒置法

路径分割循环产生新解的方法是笔者提出的随机调整法，如图 4 中虚线矩形③所示。路径分割是随机在初始路径中插入比人员数目少 1 个 0，对每 2 个 0 之间或任一端点与最近 0 之间的路径段依次编号，与人员编号对应的路段上的任务点，就是分配

给该人员的任务。因为插入 0 的随机性，可能会出现 2 个 0 相邻的情况，此时它们之间路径为空，意味着与空路径编号一致的组员本次不执行任务。

如图 8 所示，随机调整法是随机选择 1 个任务点和 1 个 0，将这个 0 移动到该任务点后，路径其余部分保持不变。

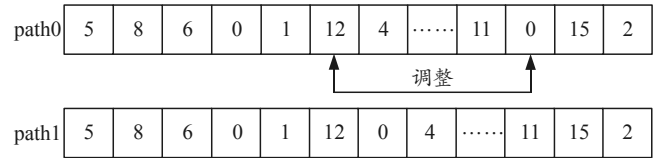


图 8 随机调整法

通过路径分割分配给每名组员的任务点，再次用蚁群算法规划行动顺序，以求路径规划结果更优。

## 3 救援小组路径规划算法整体设计

本文中构建了改进的蚁群-模拟退火算法求解救援小组多人路径规划问题，主要包括 2 大部分：

1) 改进蚁群算法，其任务是否结束或如何进行下一步动作，遵循的流程如图 2 所示。

2) 模拟退火-蚁群算法，执行操作的流程如图 4 所示，清楚地表示了改进后模拟退火算法中的 3 个循环。

## 4 多人佩戴空呼路径规划算法实例及验证

### 4.1 实例规划具体场景和人员活动参数设置

如图 9 所示，对图 1 中的场景条件进一步细化为具体任务，将任务区域的长和宽分别设置为 1 500 m 和 1 000 m，并列出所有点的具体坐标。

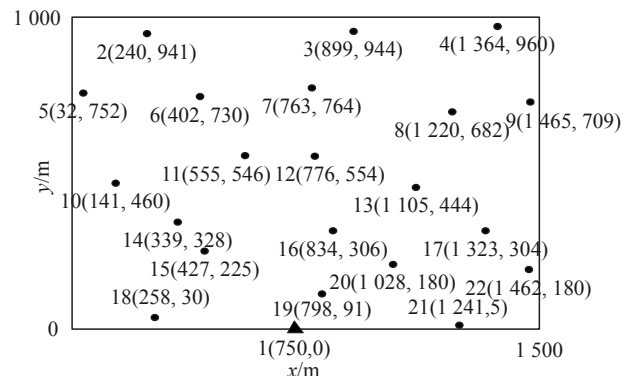


图 9 实例规划场景具体设置

判断人员每步行动消耗的空呼气量时，需要根据耗气率与工作时间进行计算。文献[10]基于样本数据对防护人员几种常见活动类型的强度等级进行划分，通过回归建模得到不同活动强度下的耗气率变化量方程，并证明了方程对预测人员使用空呼耗气情况的有效性。采用该文献中划分活动强度的标

准和耗气率变化量方程进行实例计算。本文中救援小组多人佩戴空呼执行既定任务的行动设为中等活动强度，对应的耗气率变化量公式为： $Y=e^{1.667-5.82/v}$ 。Y 表示某活动强度下人员活动状态相比静止状态耗气率的变化量，MPa/min；v 表示某活动强度下人员行进的速度，m/min。

视所有人员活动情况一致，参数取值：静止耗气率为 0.441 MPa/min，行进速度为 100 m/min，每个任务点执行任务的时间为 24 s。计算出执行任务时的耗气率为  $0.441+e^{1.667-5.82/100}=0.608$  MPa/min。

### 4.2 救援小组路径规划实例计算

根据图 9 给定条件，用本文中设计的蚁群-模拟退火算法对 1 名指挥员指挥 4 名救援组员执行 21 个任务点任务的问题进行路径规划。

算法运行环境：Windows XP；编译环境：MATLAB R2019a；参数设置：1) 蚁群部分(前后 2 次参数相同)： $m=15, \alpha=1, \beta=5, \rho=0.5, Q=1$ ，最大迭代次数 50 次；2) 模拟退火部分： $T_0=1\ 000, \rho=0.95$ ，温度循环 100 次，新路径循环 500 次，路径分割循环 100 次。

运行算法，得到该救援小组 4 名组员的最优路径规划结果(0 为任务分割点)：19-16-8-13-17-22-21-20-0-9-4-3-0-12-7-11-6-2-0-15-14-5-10-18，如图 10 所示。图中实线、短虚线、中虚线、长虚线依次表示组员 1、2、3、4 的路径。

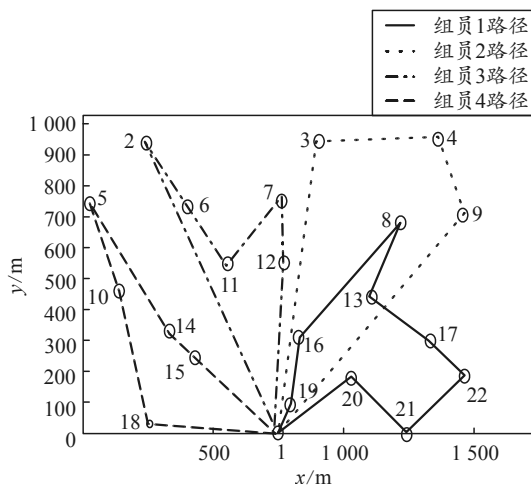


图 10 改进的蚁群-模拟退火算法路径规划结果

按照该方案，组员 1 行走的路径为(1 表示起始点)：1-19-16-8-13-17-22-21-20-1，共 2 458.17 m，用时 27.78 min；组员 2 行走的路径为：1-9-4-3-1，共 2 698.45 m，用时 28.18 min；组员 3 行走的路径为：1-12-7-11-6-2-1，共 2 641.96 m，用时

28.42 min；组员 4 行走的路径为：1-15-14-5-10-18-1，共 2 299.57 m，用时 25 min，所有成员均可一次性完成任务，不需返回起点充气。任务小组完成当前全部工作，即最后一位组员(即组员 3)任务结束用时 28.42 min。

从轨迹来看，规划方案基本按照 4 个方向为 4 名组员分配任务，以起点所在的横坐标线面向任务场地的 180°区域内，每名组员负责一定角度范围内的工作，并按照该范围内任务点的远近对工作分配进行大致调整，与实际行动中指挥员按照方位对组员分配任务的情况一致，证明本文中改进算法具有实际意义。

### 4.3 两种算法的对比较证

单独采用模拟退火算法，保持算法运行环境和编译环境不变，外循环执行 200 次，内循环执行 1 000 次，得到路径规划结果如图 11 所示。

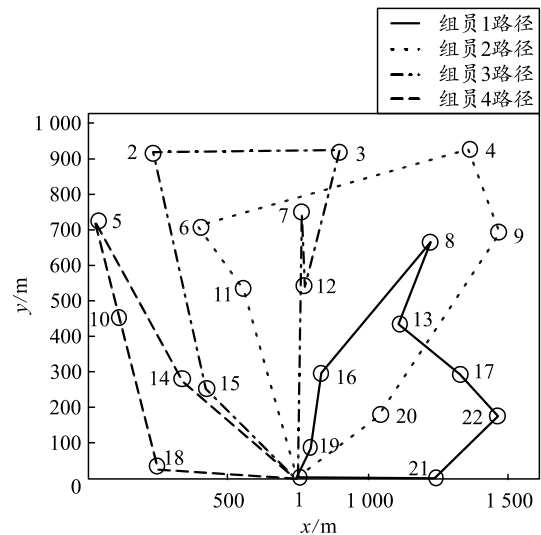


图 11 简单模拟退火算法路径规划结果

按照图 11 方案(1 表示起始点)，组员 1 行走的路径为：1-19-16-8-13-17-22-21-1，组员 2 行走的路径为：1-20-9-4-6-11-1，组员 3 行走的路径为：1-7-12-3-2-15-1，组员 4 行走的路径为：1-14-5-10-18-1。

所有成员均可一次性完成任务，不需返回起点充气，最后一名成员完成任务用时 33.65 min。与本文中改进设计的蚁群-模拟退火算法的路径规划结果相比，该方案执行完所有任务用时略长，且路径轨迹没有达到最简，较为明显的是组员 3 在任务点 7 与任务点 12 处的路径轨迹。比较 2 个路径规划方法的结果表明，采用本文中的算法更优。

此外，使用简单模拟退火算法得到的路径规划

结果虽然没有实现路径最简,但也基本遵循按照方向对人员分配任务的规律,进一步证明了本文中改进算法的合理性。

### 5 结论

笔者根据佩戴空呼执行既定任务的多人行动特点,改进蚁群算法确定任务点的条件,增加模拟退火算法记忆寻优环节、循环层数和新解生成方法,求解救援小组路径规划问题。采用本文中算法得到的路径规划结果与指挥员基于经验做出的决策吻合,优于采用简单模拟退火算法的路径规划,结果证明了该算法所得方案的参考价值和实际意义。由于选取的研究对象和设置的场景条件还存在一些局限性,如 3 维场景需要上下楼梯、队伍规模扩大后出现人员充气较集中时的保障情况等,可进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] 慕洋洋,李晋,任常兴,等. 危化品泄漏围堵材料理化性能及燃烧行为研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 55-59.

\*\*\*\*\*

(上接第 57 页)

[2] 禹珉. 计量管理信息系统的设计[J]. 电子质量, 2016, 37(3): 26-35.

[3] 王歆鑫. 计量检测信息综合管理系统的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[4] PENG Y, DI L, ZHAO P, et al. Semantic Augmentations to An ebRIM Profile of Catalogue Service for Web[M]. Springer Berlin Heidelberg: Standard-Based Data and Information Systems for Earth Observation, 2010: 189-208.

[5] TAPPER J, LABRIOLA M, BOLES M, et al. Adobe Flex 3: Training from the Source[G]. USA: Adobe Press, 2013: 10-11.

[6] ABDELNUR A, HEPPEL S. Java Portlet Specification Version 1. 0[S]. USA: Java Community Process, 2003.

[7] KUMAR V, GARCIA D M. Portlet Integration Using JSR 286[C]. In: Beginning Oracle WebCenter Portal 12c. Apress, Berkeley, CA, 2017.

[8] WEGE C. Portal Service Technology[J]. IEEE Internet

[2] 宇国文. 灭火救援实战中消防人员的安全保障分析[J]. 科技与创新, 2016(3): 50.

[3] 徐显. 基于蚁群算法的路径规划问题研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 5.

[4] 王文双, 王锐, 顾钧元, 等. 改进蚁群算法优化通用器材配送路径[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 14-18.

[5] 王群笑. 基于改进蚁群算法的路径寻优研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019: 14-15.

[6] 张雷. 面向灾难应急的人员疏散与救援规划机制的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018: 16-18.

[7] GAMBARDELLA L M, DORIGO M. Q: A Reinforcement Learning approach to the traveling salesman problem-Machine Learning Proceedings 1995-Ant[J]. Machine Learning Proceedings, 2000, 170(3): 252-260.

[8] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法(第一册)模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 145-150.

[9] 苗卉, 杨韬. 旅行商问题(TSP)的改进模拟退火算法[J]. 微计算机信息, 2007(33): 241-242.

[10] 张宏远, 李梦琪. 基于活动强度的空气呼吸器耗气率预测[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(10): 1404-1408.

\*\*\*\*\*

Computing, 2002, 6(3): 73-77.

[9] SCHAECK T. Web Services for Remote Portals (WSRP) 10 Whitepaper[OL]. Oasis Web Services for Remote Portal Tc: [2002-10-28]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=217B4E8173032A373D5AC0631C7E2410?doi=10.1.1.400.4856&rep=rep1&type=pdf>.

[10] DIAZ A L. Web Services for Remote Portals (WSRP)[OL]. [2017-9-28]. <http://xml.coverpages.org/wsrp.html>.

[11] KATHRYN B, FARRUKH N. OASIS ebXML RegRep Version 4.0. Overview Document[OL]. (2012)[2017-9-28]. <http://docs.oasis-open.org/regrep/regrep-core/v4.0/regrep-core-overview-v4.0.pdf>.

[12] 柳泉伟. 基于 B/S 结构的计量业务管理系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

[13] 超红, 万春红. E-R 图的精细设计[J]. 计算机教育, 2015, 13(8): 78-81.

[14] 孙雨生, 陈卫, 仇蓉蓉. 基于 Jetspeed 的 Portlet 应用构建[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(4): 539-547.