

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200840

基于层次分析法和改进 A*算法的电力应急机器人路径规划

路永鑫¹, 魏云冰¹, 赵启承², 李思成¹

(1. 上海工程技术大学, 上海 201620; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 电力应急机器人能够替代人工进入电力危险场景进行应急抢险作业, 机器人路径规划的合理性对其作业的时效性与准确性有很大影响。提出一种层次分析法、改进 A*算法和梯度下降法相结合的应急机器人路径规划方法。首先通过层次分析法选定复杂场景中的作业目标, 然后结合危险源风险曲线函数和机器人防护阈值对 A*算法的代价函数进行改进, 实现注重风险的全局路径规划, 再基于梯度下降法完成运动过程中的局部动态路径规划。仿真表明, 该方法能够自主选择作业目标, 规避作业风险并快速抵达目标, 有效提升电力应急作业的时效性和安全性。
关键词: 电力应急机器人; 路径规划; 层次分析法; 改进 A*算法; 梯度下降法

Path planning of a power emergency robot based on an analytic hierarchy process and improved A* algorithm

LU Yongxin¹, WEI Yunbing¹, ZHAO Qicheng², LI Sicheng¹

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Power Science Research Institute of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: A power emergency robot can replace the human to enter a dangerous scene to carry out emergency operations. The rationality of robot path planning has great influence on the timeliness and accuracy of its operation. This paper presents a path planning method for an emergency robot which combines an Analytic Hierarchy Process (AHP), improved A* algorithm and gradient descent method. First, the operation target in the complex scene is determined by the AHP, and then combined with a hazards risk curve function and robot protective threshold, the cost function of the A* algorithm is improved to realize risk-oriented global path planning. Then, based on the gradient descent method, the local dynamic path planning in the process of movement is completed. Simulation results show that this method can choose the operation target independently, avoid operational risk and reach the target quickly, and effectively improve the timeliness and safety of power emergency operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51507157).

Key words: power emergency robot; path planning; analytic hierarchy process; improved A* algorithm; gradient descent method

0 引言

电力故障应急处理往往需要面对火灾产生的高温和烟雾颗粒、二次爆炸、有毒有害气体泄露和隐藏的带电点等情况, 具有着特殊的危险性。应急人员常常无法第一时间深入现场, 极大降低抢修效率。电力应急机器人能够替代人工进入危险场所完成应急抢险作业, 解决电力应急危险性大、抢修效率低等问题。电力应急机器人利用人工智能、图像识别、

边缘计算等前沿技术实现电力故障应急处置^[1-4]。

电力应急机器人作业模式分为人机协同模式和自主作业模式。在人机协同模式下, 机器人进入现场进行环境侦测, 应急抢险人员根据机器人反馈的现场态势进行排险任务规划和作业过程控制, 机器人基于人工干预意图完成作业任务; 自主作业模式下, 机器人首先基于档案地图、激光点云和视觉等信息进行静态全局地图建模, 同时检测火焰等危险源, 并在地图上定位, 然后基于作业任务自主选择作业目标、规划排险路径和完成排险作业。

应急作业环境复杂, 可能同时存在多个作业目

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507157)

标, 需要根据其重要程度、紧急程度和危害后果等因素从中优选作业目标; 现场存在的危险源会对机器人会造成损害, 因此需要在作业过程中合理规避风险, 保障作业安全性; 此外, 为了遏制灾害蔓延, 应急抢险对作业时效性也提出了很高的要求。针对上述背景, 提出一种层次分析法、改进A*算法和梯度下降法相结合的应急机器人路径规划方法, 实现应急作业目标优化选取、作业路径规划和作业避免。

在应急作业中, 应急机器人首先需要确定作业目标, 即从多个作业目标中选择重要程度高、紧急性强且危害后果严重的目标作为首要作业目标; 目标确定后, 需要进行路径规划以便快速抵达作业目标; 鉴于作业环境的特殊性, 应急机器人需要能够合理躲避风险, 在一定程度上保证自身安全, 确保抢险任务得以完成。

多约束条件目标优选常用的方法有粒子群优化算法、层次分析法和改进人工蜂群等, 这些方法在信息系统风险评价和电力应急能力评估中得到应用^[5-14]。文献[15]在信息资产、脆弱性和威胁评估的基础上, 进行信息系统安全风险的层次结构构建, 计算相对权重和综合权重, 进而得到风险排序, 指导安全策略制定。文献[16]基于两两比较的行为方法实现Vague多目标决策, 并通过拉格朗日乘法解决一致性问题。文献[17]在多目标决策中利用已知信息建立了非线性规划模型, 并引入遗传算法对规划模型进行求解。

在难于准确直接衡量决策结果的情况下, 层次分析法能够深入分析复杂决策问题的性质、影响因子及其内部关系, 用较少的定量信息实现决策思维过程的逻辑化和数字化, 为具有多目标、多准则或无结构特征的复杂决策问题提供一种简单的决策方法^[18]。鉴于应急处置的特殊性, 本文采用层次分析法来进行应急作业目标的排序和优化选择。

确定作业目标后, 基于静态全局地图以机器人初始位置为起点, 任务目标位置为终点进行路径规划。为使机器人在运动过程中避免危险源的伤害, 本文综合危险源类型、机器人到危险源距离和机器人防护阈值等因素对A*算法代价函数进行改进, 实现全局路径规划中危险源的规避。全局路径规划整体上确定从起点到作业目标点的最优路径, 作为局部路径规划的依据和参考基准。

电力应急作业场景复杂, 加上障碍物遮挡、传感器局限性等原因使得一些危险源在全局路径规划之前是未被探知或未产生的, 只有在机器人行走过程中才能由传感器探知到, 因此还需要对路径进行局部动态调整, 规避相应危险源。人工势场法、TEB

算法以及梯度下降法是应用于局部或完全未知地图环境中的路径规划算法^[19-27]。人工势场法将机器人所处地图环境模拟成一个势场, 机器人作为移动电荷, 目标点作为提供引力的异性电荷, 障碍物作为提供斥力的同性电荷, 机器人运动受斥力和引力的共同作用。TEB 算法采用图优化方法实现路径规划, 它综合机器人位姿、运动轨迹、障碍物环境信息, 根据各约束条件所占比重, 规划出最优路径。梯度下降法则在机器人运动的局部空间中计算导航函数, 导航函数的梯度表示空间中每个点的最低代价路径方向。梯度下降法基于最优性要求, 连续地计算到达一个航点目标的最优路径。其最优性概念是把路径长度、与障碍物接近程度等成本分配给路径。本文采用梯度下降法进行局部路径规划, 梯度下降法中的最优性概念仍采用前述改进A*算法的代价函数思想。

1 应急作业目标优化选择

应急场景中往往存在多个需要处置的目标, 如何权衡多种条件约束, 选择合适的作业目标, 对于控制灾情发展, 减少灾害损失, 提高突发救援的应急能力具有非常重要的作用。

为了在多决策场景中更好地实现定性和定量分析的有机结合, 层次分析法将与决策有关的元素进行分层, 层次包括目标层、准则层和任务层。在总决策目标要求下, 依据决策标准比较决策对象的优缺点, 并最终获得各个对象的整体优缺点, 为决策和优先级别选取提供参考依据。

以某10 kV配电所应急抢险为例进行说明。

配电所是电力系统中对电能进行接收、集中和分配的场所。图1给出了典型10 kV配电房实景图, 配电所内高压配电柜数量较多, 空间有限, 当发生事故时, 人工进入场地进行应急处置的难度大, 危险度高。基于层次分析法的应急作业目标选择步骤如下所述。



图1 某10 kV 配电房实景图

Fig. 1 Real scene of a 10 kV distribution room

1.1 建立层次结构模型

首先确定目标层的目标：把从多个重要目标中选取作业对象作为总决策目标。优选准则首先从作业目标的重要程度、抢险紧急程度和潜在风险等方面进行考虑，然后综合各方面的评估结果得出优先级别。在配电所抢险作业中(见图2)，总决策目标G是选择抢险作业对象；把潜在风险C1、威胁度C2(影响范围和紧急性)和综合价值C3(资产、人员等)作为准则层要素；任务层给出具体实施方案，包括：P1为切断总进开关，P2为切断相邻线路开关，P3为扑灭零星火点，P4为排烟作业。

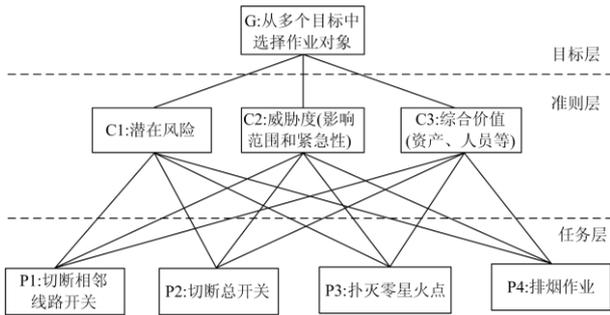


图2 配电房抢险层次分析法示意图

Fig. 2 Schematic of emergency AHP in power distribution room

1.2 构造比较矩阵

为了实现目标层、准则层和任务层中元素之间的相互比较，构造比较矩阵，并基于特定决策准则完成元素间的重要性比较。

为了建立对各元素进行成对比较的量化判断依据，引进九级分制，分制由同等重要、略微重要、明显重要、非常重要和极其重要等方面因素组成而成，如表1所示。

表1 九级分制

Table 1 Nine-point scale

因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 相比	$F(i, j)$	$F(j, i)$
<i>i, j</i> 同等重要	1	1
<i>i</i> 比 <i>j</i> 略微重要	3	1/3
<i>i</i> 比 <i>j</i> 明显重要	5	1/5
<i>i</i> 比 <i>j</i> 非常重要	7	1/7
<i>i</i> 与 <i>j</i> 极其重要	9	1/9
<i>i</i> 与 <i>j</i> 处于上述判断之间	2,4,6,8	1/2,1/4,1/6,1/8

设某一层有 n 个元素， $X = (a, b, \dots, n)$ ，需要比较该层的每一个元素对上层某个元素的作用大小并基于特定标准判断其权重。假设上层和本层的元素个数分别为 m 和 n ，那么对于该层需要构建 m 个 $n \times n$ 的成对比较矩阵，用 a_{ij} 表示第 i 个元素相对于

第 j 个元素的比较结果，比较时取 1~9 尺度。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： A 为比较矩阵； $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$

1.3 层次单排序及一致性检验

首先将比较矩阵最大特征根 λ_{\max} 相对应的特征向量归一化，归一化后的比较矩阵记为 w ；其次进行层次单排序，即进行 w 中同层元素相对上层特定元素影响程度的权值排序；最后进行一致性检验。

典型的比较矩阵如式(2)。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

从该矩阵可以看出， $\frac{w_i}{w_j} = \frac{w_i}{w_k} \times \frac{w_k}{w_j}$ 即 $a_{ik} \times$

$a_{kj} = a_{ij}$ ，其中 $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ ，满足这个性质的正互反矩阵为一致阵， n 阶互反矩阵 A 的最大特征根 $\lambda \geq n$ ，当且仅当 $\lambda = n$ 时， A 为一致阵。

定义 CI 作为一致性指标：

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) \quad (3)$$

CI 越小，一致性越好，当 $CI = 0$ 时，有完全一致性。为衡量 CI 的大小，引入随机一致性指标 RI ：

$$RI = (CI_1 + CI_2 + \dots + CI_n) / n \quad (4)$$

其中，随机一致性指标 RI 出现偏差的原因除了比较矩阵阶数过大外还有随机因素的影响，这里引入检验系数 CR ：

$$CR = CI / RI \quad (5)$$

通常，若 $CR < 0.1$ ，则认为该比较矩阵通过一致性检验。

1.4 层次总排序

层次总排序从最高层到最低层依次计算某层所有元素对于总目标的重要性权值，得到的总排序结果表明多个作业目标备选方案对总目标的最终权重，权重越大者优先级越高。

2 基于改进 A* 算法的机器人路径规划

在选取作业目标后，下一步需要开展的工作是在基于档案地图、激光点云和视觉等信息生成的静态全局地图上，以机器人出发位置为起点，以作业

目标所在位置为终点进行全局路径规划。路径规划时, 需要考虑绕过配电所内屏柜等固定障碍物, 还要考虑远离危险源。

上述全局静态地图可看作是包含障碍物、已知危险源等多节点的静态网络, A*算法是一种带有启发函数的有效静态网络路径规划方法。

在 A*的启发式搜索中, 通过设计代价函数 $f(n)$ 实现控制搜索方向、选定待扩展节点范围和确定待扩展节点等功能。代价函数为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (6)$$

式中: $f(n)$ 表示从起点经当前节点 n 到目标节点的代价; $g(n)$ 表示从起点到当前节点 n 的代价; $h(n)$ 表示从当前节点 n 到目标节点的代价。

在应急作业场合, 现有 A*算法存在一些局限, 没有考虑危险源距离机器人过近带来的风险, 即使机器人已知危险源所在也没有很好的规避措施, 因此, 对 A*算法的代价函数进行改进, 将危险源与机器人的距离关系加入代价函数以提高规划路径的安全性。

一般而言, 机器人距离危险源越近, 受到的安全威胁越大^[28]。为了避免规划路线与危险源之间距离过近, 可将节点与危险源之间的距离 $r(n)$ 作为该节点的安全威胁代价, 在算法的遍历过程中把安全威胁代价并入到代价函数中进行计算。

$$h'(n) = h(n) + r(n) \quad (7)$$

式中: $h'(n)$ 是考虑危险源因素后从当前节点 n 到目标节点的路径代价; $r(n)$ 是当前节点的安全威胁代价, 是一个与节点到障碍物距离相关的函数。

然而, 仅仅把距离危险点的距离作为安全威胁代价是不合理的, 一是没有考虑到不同类型危险源的安全威胁差异, 二是可能造成过度考虑机器人自身风险而无法实施应急作业。

不同类型的危险源对机器人的安全威胁是不等价的, 为了区分不同危险源安全威胁代价的差异, 这里引入风险曲线函数 Q , 它是距离参数的递减函数。图 3 给出了 Q 函数的两个示例: 曲线 $Q1$ 表示某类固定燃烧点, 在距危险源 80 cm 内, 代价成本非常高, 在距危险源 80 cm 之后, 成本随着距离的增加而迅速下降, 而在距危险源 160 cm 之后, 它下降的速度要慢得多; 曲线 $Q2$ 表示二次爆燃点, 在距危险源 160 cm 内, 代价成本非常高, 在距危险源 160 cm 之后, 随着距离的增加逐渐下降, 而在距危险源 240 cm 之后, 它下降的速度变得缓慢; 由此可见, $Q1$ 将允许机器人比 $Q2$ 更接近危险源, 像 $Q2$ 这样的风险曲线函数使得机器人要保持一个相对较

远的安全距离。

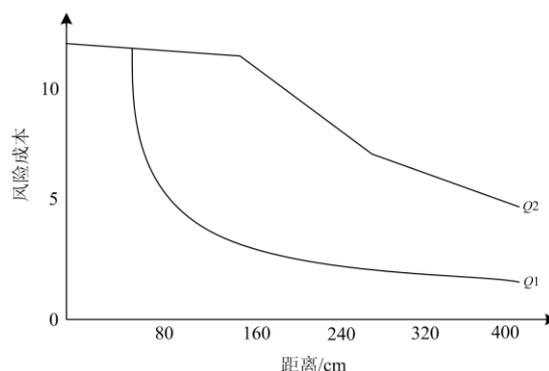


图 3 风险曲线函数

Fig. 3 Risk curve function

应急机器人设计的目的是代替人员进入危险场所进行应急作业, 设计时考虑了一定的防护能力, 如采用防热辐射、防爆结构设计和配置主动降温系统等设施, 使其具备特殊场合下作业的抗风险能力。

综合考虑危险源风险曲线函数和机器人防护能力等因素, 将 A* 算法的代价函数计算方式修改为

$$h'(n) = h(n) + c(n) \quad (8)$$

式中, $c(n)$ 为点 n 的代价成本(见式(9))。

$$c(n) = \begin{cases} Q(r(n)) - pth, & Q(r(n)) - pth \geq 0 \\ 0, & Q(r(n)) - pth < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Q 是风险曲线函数, 是 $r(n)$ 参数的递减函数(见图 3); pth 为机器人自身防护能力阈值。

3 梯度下降法

应急机器人所处的环境相对复杂, 除了传感器探测能力的局限外, 灾情蔓延会随时生成新的障碍物, 甚至产生新的危险源。机器人在运动过程中需要实时感知周边的障碍物和危险源, 进行路径局部动态调整, 这里引入梯度下降法, 通过分配内在在成本来控制障碍物周围的路径行为。局部路径动态规划时, 需要一边进行实时动态避障, 一边跟随全局规划路径。

在梯度下降法中, 通过动态检查机器人附近的障碍物, 连续地计算出到达一个航点目标的最优路径。这里最优性的概念是除了路径长度外, 还包括空间上与障碍物和危险源的接近程度, 尽可能规避风险。梯度法将成本分配与路径相结合, 在机器人的局部空间中计算导航函数, 导航函数的梯度表示空间中每个点的最低代价路径方向。应用局部路径的梯度下降法需要与传感器信息融合, 使得机器人可以有效地探索局部区域, 远离危险源并安全到达目标。

3.1 路径费用

用样本空间中一组点的有序集合来表示一条路径。

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\} \quad (10)$$

其中点集是连续的无重复点, 将从 k 点开始的路径缩写为 P_k 。

一般来说, 路径代价 $F(P)$ 是(离散的)路径的任意函数。路径成本可以分解为处于某一点的内在成本之和 $\sum I(P_i)$, 以及从一个点移动到另一个点的邻接成本 $\sum A(P_i, P_{i+1})$ 。

$$F(P) = \sum I(P_i) + \sum A(P_i, P_{i+1}) \quad (11)$$

I 和 A 均为任意函数。一般情况下将穿越给定点的成本根据区域特性进行设置, 例如, 距离危险源越近的区域分配的成本越高, 另外, 未知区域、涉水区域、高热区域也应分配较高的成本。

3.2 导航功能

导航函数 N 是为配置空间的每个元素分配一个潜在的场值, 最小化 \min 操作使得无论你在空间的哪个位置, 目标总是“下坡”。

$$N_k = \min F(P_k) \quad (12)$$

梯度方法背后的关键思想是将导航函数指定为从该点开始的最小代价路径。如前所述, 路径 P_k 表示从点 k 开始的路径, 如果内在代价为零, 则导航函数只表示最短距离路径。在一般情况下, 沿梯度运动是一条通往目标的最小成本路径。导航函数不同于一般的势场方法, 其特点是不可能陷入局部极小值, 不需要搜索就可以确定到达目标的方向。

3.3 风险成本

通过分配内在成本来控制危险源周围的路径行为。设 $r(p)$ 是点 p 到最近危险源的距离, 则:

$$I(p) = \{Q(r(p)), pth\} \quad (13)$$

式中: $I(p)$ 为点 p 的内在成本; Q 是风险曲线函数, 是 $r(p)$ 参数的递减函数(见图 3), pth 为机器人自身防护能力阈值。

这里, 风险成本同样需综合危险源风险曲线函数和机器人防护阈值等因素进行考虑, 仍然采用式(9)的方法估算机器人周围空间代价的大小。

在应急机器人处理作业中, 每隔 0.1~0.2 s, 机器人将获得一组新的传感器数据, 使梯度路径被完全重新计算。实际上, 在机器人的运动过程中, 路径可能会多次发生变化, 因为梯度法发现了原来规划的路径由于感知信息不完备造成的缺陷, 但能够不断地基于传感器实时信息对路径进行微调, 躲避风险, 构建一条到达作业目标的合理路径。

4 应用分析

4.1 应急作业目标优化仿真分析

下面以第 1 节所述的某 10 kV 配电所应急作业(参见图 2)进行实例分析计算。

首先建立准则层对目标层的比较矩阵, 准则层包含潜在风险(C1), 威胁度(C2), 综合价值(C3), 对目标层的比较矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/2 \\ 4 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

任务层对准则层各准则比较矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/3 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1/6 & 2 \\ 3 & 6 & 1 & 9 \\ 1/3 & 1/2 & 1/9 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

计算组合权重, 并作一致性检验。计算比较矩阵最大特征根 λ_{\max} 及对应的特征向量, 并将矩阵元素按列归一化处理得准则层相对权重向量 W :

$$W = \begin{bmatrix} 0.1429 \\ 0.5714 \\ 0.2857 \end{bmatrix} \quad (18)$$

计算最大特征根 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = 3 \quad (19)$$

进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3 - 3}{3 - 1} = 0 \quad (20)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0}{0.58} = 0 \quad (21)$$

可见, 由于 $CR = 0 < 0.1$, 所以通过一致性检验。同理, 可计算其他比较矩阵的层次单排序如下:

$$W_A = \begin{bmatrix} 0.4832 \\ 0.2717 \\ 0.1596 \\ 0.0882 \end{bmatrix}, W_B = \begin{bmatrix} 0.2717 \\ 0.4832 \\ 0.0882 \\ 0.1596 \end{bmatrix}, W_C = \begin{bmatrix} 0.2063 \\ 0.1108 \\ 0.6189 \\ 0.0640 \end{bmatrix} \quad (22)$$

通过计算得到总排序结果表 2 所示, 其中, 层次总排序的结果是由层次 C 中的元素 C1、C2、C3 和 P1、P2、P3、P4 的元素依次相乘并求和得到。

表 2 排序结果

Table 2 Sorted results

层次 C	C1	C2	C3	层次 P 总排序
层次 P	0.142 9	0.571 4	0.285 7	
P1	0.483 2	0.271 7	0.206 3	0.283 2
P2	0.271 7	0.483 2	0.110 8	0.346 6
P3	0.156 9	0.088 2	0.618 9	0.249 6
P4	0.088 2	0.156 9	0.064 0	0.120 5

由表 2 可以看出, 准则层中威胁度 C2 的相对权值最大, 为 0.5714, 其次是综合价值 C3, 相对权值为 0.2857, 潜在风险 C1 权值相对最小, 为 0.142 9; 作业目标选择总排序为: P2(切断总进开关, 0.3466)、P1(切断相邻线路开关, 0.2832)、P3(扑灭零星火点, 0.2496)、P4(排烟作业, 0.1205)。

4.2 应急作业路径规划仿真分析

建立某 10 kV 配电所的栅格地图(大小为 18×18), 图 4 给出了一种典型的配电房布置结构(见图 1), 其中两排黑色长条表示两排开关柜, 中间为过道, 绿色方块为机器人入门的起点, 黄色方块为位于右侧一排开关柜中部位置的作业目标点, 黑色小方块为探测到的一个零星火点即固定燃烧点。

下面在 Matlab 中先采用 A*算法进行应急作业机器人的路径规划。

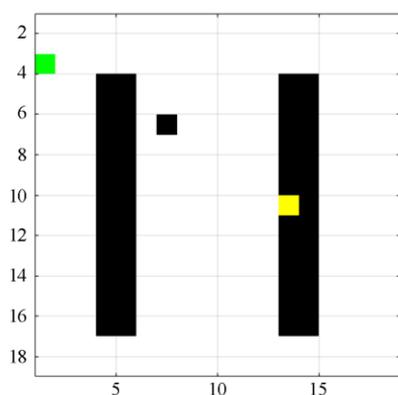


图 4 配电房栅格地图

Fig. 4 Grid map of distribution room

图 5 给出了 A*算法的路径规划仿真图, 机器人以最短路径到达作业目标, 运动路径如灰色线条所示。但从图中可见, 固定燃烧点这一危险源仅仅被当作普通障碍物, 所规划的路径紧贴着它通过, 没有进行风险规避。

在 Matlab 中再采用改进 A*算法进行应急作业机器人的路径规划。仿真条件为: 发现固定燃烧点

位于(6, 7)坐标, 基于风险曲线函数 $Q1$, 得到相对安全的作业距离为 80 cm, 机器人自身对燃烧点的防护能力阈值设为 $pth=1$ (等价于 20 cm)。

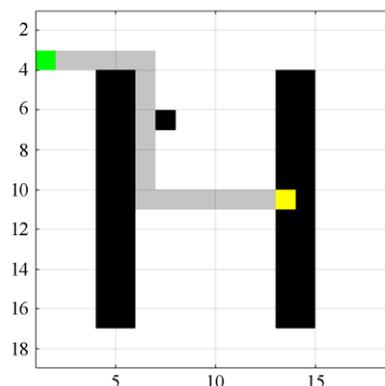


图 5 基于 A*算法的路径规划仿真

Fig. 5 Path planning simulation based on A* algorithm

图 6 给出了基于改进 A*算法的路径规划图, 机器人规划路径绕过危险源并保持 60 cm 的安全距离, 这是因为基于风险曲线函数 $Q1$, 在固定燃烧点周围区域分配了相应代价值, 使得规划的路径通过了危险源旁边代价值相对较小的区域, 从而保证了机器人在一定程度上远离危险源。

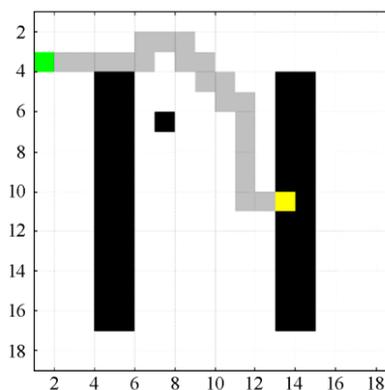


图 6 基于改进 A*算法的路径规划

Fig. 6 Path planning based on improved A* algorithm

模拟危险度增加, 采用改进 A*和梯度下降混合算法进行仿真, 仿真条件为: 发现二次爆燃点位于(6,7)坐标, 基于风险曲线函数 $Q2$, 得到相对安全的作业距离为 160 cm, 机器人自身对二次爆燃点的防护能力阈值设为 $pth=4$ (等价于 80 cm)。

图 7 给出了改进 A*和梯度下降混合算法的路径规划图, 机器人的规划路径绕过危险源并保持 80 cm 的安全距离。模拟机器人在静态全局地图建模时检测到爆燃点, 改进 A*算法基于风险曲线函数 $Q2$, 在爆燃点周围区域分配了相应代价值并有效避开危

险源；模拟机器人在运动过程中才检测到爆燃点，梯度下降法同样基于风险曲线函数 Q_2 ，在爆燃点周围区域分配了相应代价值并有效避开危险源。由于危险度增加，图 7 规划的路径相对图 6 更加远离危险源，表明机器人具备了相应的避险功能。

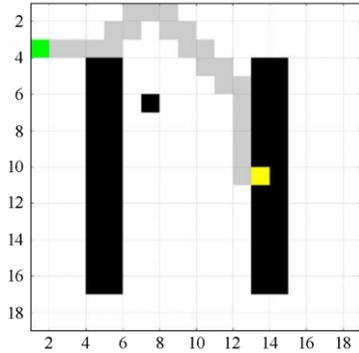


图 7 改进 A*和梯度下降混合算法的路径规划

Fig. 7 Improved A* and gradient descent mixed path planning

表 3 对 A*算法、改进 A*算法和改进 A*和梯度下降混合算法的效果进行了比较。

表 3 路径规划效果比较

Table 3 Path planning effect comparison

对比项	A*算法	改进 A*算法	改进 A*和梯度下降混合算法
规划策略	静态全局路径规划	静态全局路径规划	静态全局路径规划和局部动态路径规划
避障能力	避开静态障碍物	避开静态障碍物	避开静态、动态障碍物
风险规避	无	远离静态危险源	远离静态、动态危险源
环境变化适应性	差	环境变化适应性较差	强，很好适应环境变化和复杂场景

由此可见，改进 A*和梯度下降混合算法能够很好地适应环境变化，满足电力应急抢险作业复杂场景的应用要求。

5 结论

本文提出一种层次分析法、改进 A*算法和梯度下降法相结合的应急机器人路径规划方法。鉴于应急处置作业多目标、多准则和复杂性强的特点，采用层次分析法进行任务目标选择；为了实现注重风险的全局路径规划，综合危险源风险曲线函数和机器人防护阈值对 A*算法的代价函数进行改进；运动过程中结合梯度下降法进行动态路径规划，解决了由于传感器探测能力局限性和灾情蔓延产生新危险源等情况下的风险规避困难问题。计算与仿真表明，该方法能够自主选择作业目标，规避作业风险并快

速抵达目标位置，有效提升应急作业的时效性和安全性。

参考文献

- [1] 电力安全生产行动计划(2018—2020 年)专业(项)研究报告—电气二次专业组研究报告[J]. 电力安全技术, 2019, 21(3): 1-5.
- [2] 高培源, 牛成玉, 云亚文, 等. 电力故障应急机器人设计[J]. 电气工程学报, 2019, 14(3): 103-107. GAO Peiyuan, NIU Chengyu, YUN Yawen, et al. Design of emergency robot for power failure[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 103-107.
- [3] 胡永攀, 毛育文. 人工智能技术在救援机器人中的应用[J]. 中国应急管理, 2019(6): 52-54. HU Yongpan, MAO Yuwen. Application of artificial intelligence technology in rescue robots[J]. China Emergency Management, 2019(6): 52-54.
- [4] 何文其, 王昕, 牛成玉, 等. 一种电力应急机器人设计方案[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(1): 28-30. HE Wenqi, WANG Xin, NIU Chengyu, et al. A design scheme for an electric emergency robot[J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2020, 10(1): 28-30.
- [5] 李路军, 丁鹏堃, 房鑫炎, 等. 基于权重自适应的电力应急预案指标评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 27-33. LI Lujun, DING Pengkun, FANG Xinyan, et al. Index evaluation method of power emergency plan based on weight adaptive[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 27-33.
- [6] 王建林, 吴佳欢, 张超然, 等. 基于自适应进化学习的约束多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1765-1770. WANG Jianlin, WU Jiahuan, ZHANG Chaoran, et al. Constrained multi-objective particle swarm optimization algorithm based on adaptive evolutionary learning[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1765-1770.
- [7] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 107-114. GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimized scheduling of multi-point fault emergency repair in distribution network based on improved artificial bee swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 107-114.
- [8] 王迪, 蔡东军, 房鑫炎, 等. 动态综合评价方法在电网应急能力评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 101-107. WANG Di, CAI Dongjun, FANG Xinyan, et al. Application of dynamic comprehensive evaluation method in emergency capacity assessment of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 101-107.
- [9] 鲁鹏, 陈大军, 时珉, 等. 基于熵权法的电网应急能力水平评价研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(11): 44-48. LU Peng, CHEN Dajun, SHI Min, et al. Research on the level evaluation of power grid emergency capability

- based on entropy weight method[J]. Power Science and Engineering, 2013, 29(11): 44-48.
- [10] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 48-56.
LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 48-56.
- [11] 朱天瞳, 丁坚勇, 郑旭. 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲一熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 91-99.
ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. Integrated decision method of power grid planning scheme based on improved TOPSIS method and delphi-entropy weight comprehensive weight method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 91-99.
- [12] LI Hong, ZHANG Li. An efficient solution strategy for bilevel multiobjective optimization problems using multiobjective evolutionary algorithm[J]. Soft Computing, 2021: 1-21.
- [13] YANG Yongkuan, LIU Jianchang, TAN Shubin, et al. A multi-objective differential evolutionary algorithm for constrained multi-objective optimization problems with low feasible ratio[J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 80: 42-56.
- [14] 曲亚萍. 突发事件下应急资源管理的鲁棒决策研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
QU Yaping. Robust decision analysis on emergency resource management under emergency[J]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [15] 苏艳琴, 张光轶, 杨小林. 层次分析法在信息系统风险评估中的应用分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(6): 75-78.
SU Yanqin, ZHANG Guangyi, YANG Xiaolin. Application analysis of analytic hierarchy process in information system risk assessment[J]. Ship Electronics Engineering, 2017, 37(6): 75-78.
- [16] 陈蓉素. 多目标模糊决策算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(18): 67-69.
CHEN Rongsu. A study on multi-objective fuzzy decision algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(18): 67-69.
- [17] 刘军, 吕建伟. 多目标决策中基于遗传算法的方案排序分析[J]. 海军工程大学学报, 2000(6): 94-98.
LIU Jun, LÜ Jianwei. Analysis of scheme sort based on genetic algorithm in multi-objective decision-making[J]. Journal of Naval Engineering University, 2000(6): 94-98.
- [18] 刘怀兴, 吴绍民, 叶尔江, 等. 层次分析法在信息安全风险评估中的应用[J]. 情报杂志, 2006(5): 14-16.
LIU Huaixing, WU Shaomin, YE Erjiang, et al. Application of AHP in information security risk assessment[J]. Intelligence Magazine, 2006(5): 14-16.
- [19] 李奕铭. 基于人工势场法的移动机器人避障研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
LI Yiming. Study on obstacle avoidance of mobile robot based on artificial potential field method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [20] MARIN-PLAZA P, HUSSEIN A, MARTIN D, et al. Global and local path planning study in a ROS-based research platform for autonomous vehicles[J]. Journal of Advanced Transportation, 2018: 1-11.
- [21] 陈印, 徐红梅. 混合算法在车辆路径优化问题中的应用[J]. 计算机仿真, 2012, 29(5): 356-359.
CHEN Yin, XU Hongmei. Application of hybrid algorithm in vehicle path optimization[J]. Computer Simulation, 2012, 29(5): 356-359.
- [22] HU Yunqiang, KE Wende, CHANG Lin, et al. Research on multi-objective path planning of a robot based on artificial potential field method[J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing, 2018, 15(4).
- [23] ZHENG Yuan, SHAO Xueming, CHEN Zheng, et al. Improvements on the virtual obstacle method[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2).
- [24] PATLE B K, BABU G, PANDEY A, et al. A review: on path planning strategies for navigation of mobile robot[J]. Defence Technology, 2019, 15(4).
- [25] KONOLIGE K. A gradient method for realtime robot control[C] // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 31- November 5, 2000, Takamatsu, Japan: 639-646.
- [26] 刘洪, 戚博硕, 韩震焘, 等. 考虑移动充电车路径选择和能源补给的充电服务一体化经济调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 62-69, 84.
LIU Hong, QI Boshuo, HAN Zhentao, et al. Considering mobile charging vehicle path selection and energy replenishment charging service integrated economic scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 62-69, 84.
- [27] 刘晓胜, 张芮, 朱宏林, 等. 充换电服务网络动力电池配送最优路径建模方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 10-16.
LIU Xiaosheng, ZHANG Rui, ZHU Honglin, et al. Modeling method of optimal path for power battery distribution in charge-to-change service network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 10-16.
- [28] 张红梅, 李明龙, 杨乐. 基于改进 A*算法的移动机器人安全路径规划[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 319-324.
ZHANG Hongmei, LI Minglong, YANG Le. Safety path planning for mobile robots based on improved A* algorithm[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 319-324.

收稿日期: 2020-07-15; 修回日期: 2020-09-01

作者简介:

路永鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、智能运检等; E-mail: luyongxin1995@163.com

魏云冰(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、智能运检等; E-mail: wei.yunbing@sues.edu.cn

赵启承(1970—), 男, 高级工程师, 长期从事配电网设备监测、运维等研究工作。

(编辑 姜新丽)