

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201581

# 对特高压变电站巡检机器人路径规划改进蚁群算法的研究

董翔宇, 季坤, 朱俊, 杨波

(国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽 合肥 230001)

**摘要:** 针对当前变电站巡检机器人路径规划算法存在的规划和适应性较弱等问题, 在特高压变电站巡检机器人系统结构的基础上, 提出了一种结合蚁群优化算法和人工势场算法的特高压变电站路径规划方法。将蚁群算法的传统单向搜索改进为双向搜索, 在启发因子中加入人工势场力的合成方向, 并对转移概率进行改进。通过栅格法构建特高压变电站仿真环境, 进一步验证了所提规划方法的优越性。仿真结果表明, 改进算法具有显著改善迭代次数和最小路径的效果, 20×20 栅格环境迭代 15 次收敛到长度 26 的最优路径, 30×30 栅格环境迭代 70 次收敛到长度 43 的最优路径。

**关键词:** 特高压变电站; 巡检机器人; 路径规划; 蚁群算法; 人工势场算法

## A retrofitted ant colony algorithm for inspection robot path planning in UHV substations

DONG Xiangyu, JI Kun, ZHU Jun, YANG Bo

(Overhaul Branch, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230001, China)

**Abstract:** Current substation inspection robot path planning algorithms are subject to problems of weak planning and adaptability. Based on the system structure of a UHV substation inspection robot, a path planning method for a substation is proposed, one which combines an ant colony optimization algorithm and an artificial potential field algorithm. The traditional one-way search of an ant colony algorithm is improved to two-way search, the synthetic direction of artificial potential field force is added to the heuristic factor, and the transition probability is improved. The grid method is used to construct the simulation environment of a UHV substation. This demonstrates the superiority of the proposed planning method. The simulation results show that the improved algorithm can significantly improve the number of iterations and the minimum path. The 20×20 grid environment converges to the optimal path of length 26 in 15 iterations, and the 30×30 grid environment converges to the optimal path of length 43 in 70 iterations.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 521203190009).

**Key words:** UHV substation; inspection robot; path planning; ant colony algorithm; artificial potential field algorithm

## 0 引言

变电站作为电网的重要组成部分, 影响着整个电网的安全运行, 而变电站巡检是保证变电站设备可靠运行的基础<sup>[1]</sup>。随着特高压交流和直流电力项目大力建设和蓬勃发展, 传统的变电站巡检方法已难以适应特高压变电站大面积和多设备的特点<sup>[2]</sup>。自动巡检机器人在变电站的应用不仅可以确保安全性和效率, 而且克服了传统人工巡检的一些不足。路径规划作为巡检机器人的关键技术之一, 对其进

行研究具有重要的现实意义。

目前, 国内外学者对特高压变电站巡检机器人相关技术进行了大量的研究, 在路径规划方面有很多突出的成果, 如 C 空间方法、网格方法、蚁群算法和遗传算法等。文献[3]提出了一种新的路径规划方法, 基于激光导航技术, 结合蚁群算法找到巡检机器人最优路径, 通过仿真验证了算法的优越性。文献[4]提出了一种新的路径规划方法, 将蚁群优化算法和 ABC 算法相结合, 并将其应用于变电站机器人的路径规划, 以提高系统的鲁棒性和复杂环境规划能力, 通过仿真验证了该方法的优越性。文献[5]针对目前国内外研究现状和不足, 对电力巡检机

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (521203190009)

机器人的相关技术、功能定位等进行阐述,对智能电力巡检机器人的现状进行了总结和探讨。在此基础上,提出了今后的研究和方向。文献[6]对于不同的检测方法,全局测试使用哈密顿算法,关键仪器巡检使用 Dijkstra 算法和遗传算法,定点检测使用 Dijkstra 算法,通过仿真验证了该方法的可行性。但是,上述研究还存在算法复杂、内存开销高以及实时性能差等问题。

蚁群算法不仅是一种自启发式算法,也是一种群体智能算法,它不受外界干扰,适应复杂多变的环境,具有很强的鲁棒性。基于此,文中选择蚁群算法进行路径规划,但该算法存在易陷入局部最优、寻优时间长、寻优速度慢等缺点。所以,文中提出了一种结合人工势场算法(Artificial Potential Field, APF)和蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)的路径规划方法,并将其应用于特高压变电站巡检机器人的路径规划。采用栅格法建立了特高压变电站的工作环境进行仿真,进一步验证了文中所提规划方法的优越性。

## 1 系统结构

图 1 为机器人巡检系统结构。它由两部分组成:上位机系统和机器人本体<sup>[7]</sup>。上位机系统包括后台监视系统、后台工业计算机,远程机器人操作、图像处理、定位系统、检查报告生成和查询、工业无线等,接收来自机器人巡检系统本体的图像信息并

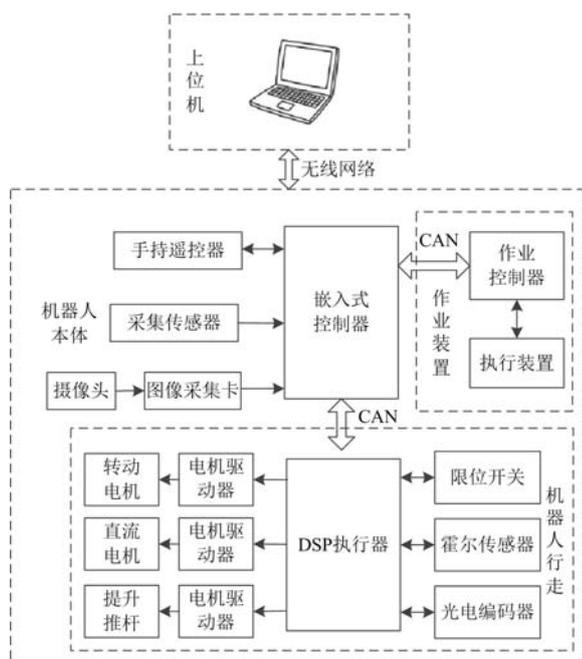


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

进行记录和处理。机器人本体主要由嵌入式主控制模块、执行控制器、作业控制器、传感器模块、图像获取模块、无线通信模块等组成,并采集现场图像信息,使用无线通信将其发送到上位机系统,从而减轻了变电站人员的工作量。

## 2 基于改进蚁群算法的路径规划方法

### 2.1 蚁群算法

对区域进行栅格化以形成网络,然后为每个网格分配分类和成本值<sup>[8]</sup>。图 2 为算法的搜索过程。

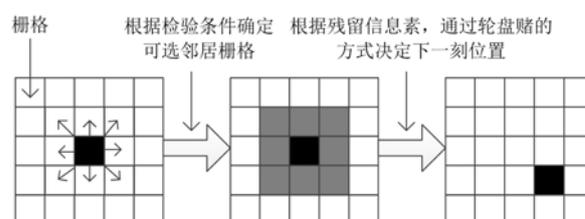


图 2 蚁群算法搜索流程

Fig. 2 Ant colony algorithm search process

蚁群算法搜索过程使用两个主要规则来确定蚂蚁下一个位置的移动规则和算法核心信息素的更新规则<sup>[9]</sup>。在信息素的指导下,蚁群的解趋向于最优方向。

如图 2 所示,可以假设蚂蚁的位置  $o$  (黑色)可以移动到下一个位置,例如 B 中的灰色部分。蚂蚁移动的方向与其移动规则有关,该规则由信息素浓度和相邻栅格之间的距离确定<sup>[10]</sup>。

假设蚂蚁的下一个位置为  $i$ ,式(1)所示为从  $o$  到  $i$  的概率<sup>[11]</sup>。

$$p_{o \rightarrow i} = c_{o \rightarrow i}^{\alpha} \tau_{o \rightarrow i}^{\beta} \quad (1)$$

归一化处理如式(2)所示。

$$p'_{o \rightarrow i} = \frac{c_{o \rightarrow i}^{\alpha} \tau_{o \rightarrow i}^{\beta}}{\sum_{i=1}^n c_{o \rightarrow i}^{\alpha} \tau_{o \rightarrow i}^{\beta}} \quad (2)$$

式中:  $c_{o \rightarrow i}$  为从  $o$  到  $i$  栅格的距离倒数;  $\tau_{o \rightarrow i}$  为  $o-i$  栅格的信息素浓度;  $\alpha$  为信息启发式因子;  $\beta$  为期望的启发系数;  $n$  为可选的相邻栅格数。

如式(2)所示,每个栅格被选择的概率  $r$  是由计算机随机生成的,介于 0 和 1 之间。采用轮盘赌法,即  $\sum_{i=1}^n p'_{o \rightarrow i} \geq r$ ,此时相邻栅格  $i$  为下一步位置。一旦找到可行的路径,就需要更新网格信息素密度。同时,引入  $\sigma$  挥发系数 ( $\sigma \in (0,1)$ ) 防止路径早熟。栅格信息素的更新如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$\tau'_i = (1 - \sigma)(\tau_i + \Delta \tau) \quad (3)$$

式中： $\tau_i$  为更新前的信息素浓度； $\Delta\tau$  为增加的信息素浓度。

## 2.2 改进蚁群算法

### 2.2.1 路径选择的改进

文中对转移概率进行了调整，在搜索的早期向信息素浓度较高的路径移动，加速收敛速度。在搜索的后期，降低信息素浓度的影响，避免陷入局部最优<sup>[13]</sup>。

预设常数  $g_0$ ，常数的大小会影响转移概率的选择。如蚂蚁的选择概率如式(4)所示<sup>[14]</sup>。

$$p'_{o \rightarrow i} = \begin{cases} \arg \max \{ [c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta] \} & \text{if } g < g_0 \\ \frac{c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta}{\sum_{i=1}^n c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

随着算法的迭代，蚂蚁迅速收敛于具有大量信息素的路径上，陷入局部最优解<sup>[15]</sup>。相反，如果  $g_0$  值较小， $g_0 = 0.1$ ，则蚂蚁选择一条可行的路径，随机性大大提高，每条路径的选择概率没有显著差异，算法收敛缓慢。

调整  $g_0$  值，在早期迭代中按式(4)选择栅格路径。随着算法的迭代，在中期为扩大解的多样性，转移概率的选择如式(5)所示<sup>[16]</sup>。

$$p'_{o \rightarrow i} = \frac{c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta}{\sum_{i=1}^n c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta} \quad (5)$$

在迭代结束时，希望加快收敛速度，选择式(4)尽快找到最优路径。

### 2.2.2 人工势场结合启发方向

特高压变电站的环境比较复杂，面积较大<sup>[17]</sup>。传统蚁群算法收敛速度慢，因此有必要提高算法的收敛速度，文中提出了一种向蚁群算法添加人工势场的方向，可以引导蚁群算法初始信息素的前进方向。

无论机器人在工作空间中的何处，都存在势场力作用<sup>[18]</sup>。因此，可以根据地图结构、初始位置、目标点位置和势场合力来设置启发式函数，在路径选择的早期阶段减少算法的盲目性，并加快算法的搜索速度。因此，不同路径上的初始信息素如式(6)所示<sup>[19]</sup>。

$$c_{o \rightarrow i} = e^{F_{tot} \cos \phi} \cdot \frac{1}{d_{oi}} \quad (6)$$

式中： $F_{tot}$  为巡检机器人接收到的势场力大小； $\phi$  为  $F_{tot}$  与蚂蚁方向的可行夹角；当可行栅格方向和目标点方向夹角较少时， $\cos \phi$  值越大， $c_{o \rightarrow i}$  值越大，对目标栅格的引导效果变得更强。

### 2.2.3 双蚁群机制

引入双蚁群算法的目的是提高传统蚁群算法的效率<sup>[20]</sup>。在每个搜索组中，两个蚂蚁从起点和终点同时开始，一直到它们相遇，路径搜索结束。蚁群双向搜索的基本思想是将蚂蚁分为两组，两队的蚂蚁是互不相关的，每个团队都有自己的信息素，一队蚂蚁放置于起始点，另一队置于终点。

迭代算法后，不同起始点的蚂蚁根据种群的信息素搜索路径，每次迭代之后，需要检测两组蚂蚁经过的路径栅格，以确定是否存在交叉栅格<sup>[21]</sup>。如果存在交叉栅格，则意味着至少有两个蚂蚁栅格可以连接起来。因此，从起点到目标点出现一条完整路径，并且锁定这两个蚂蚁，使它们在此循环中不会继续移动。这部分中最重要的是对两组蚂蚁相遇的判断，在某时刻  $T$ ，通过蚂蚁所在栅格距离来判断是否相遇形成可行路径，如式(7)所示<sup>[22]</sup>。

$$d_{oi} = \sqrt{(x_o - x_i)^2} + \sqrt{(y_o - y_i)^2} \leq \sqrt{2} \quad (7)$$

这种方法的缺点是只有两个蚂蚁同时到达同一栅格时才能检测到。

因此，文中不再以蚂蚁在某一时刻的距离作为判断的依据，而是以蚂蚁所走路径的坐标来判断。在算法过程中，如果第一队  $ant_1$  中的蚂蚁  $k_{1i}$  在一定时间到达栅格  $i_L$ ，则栅格  $i_L$  就在蚂蚁的禁忌列表中。当另一队  $ant_2$  中的蚂蚁  $k_{2o}$  到达栅格  $i_L$  时，栅格  $i_L$  也会成为  $k_{2o}$  禁忌栅格，即可以在  $ant_1$  和  $ant_2$  的两队蚂蚁禁忌列表中搜索该栅格  $i_L$ 。此时，两个蚂蚁之间的路径连接就是可行路径<sup>[23]</sup>。

### 2.2.4 改进后算法流程

改进蚁群算法的步骤如下：

1) 初始化参数，并创建两个具有不同信息素的蚂蚁团队  $ant_1$ 、 $ant_2$ 。每个团队中的蚂蚁数为  $m$ 。将两组分别放在起点 A 和目标点 B 的两端，并记录每对蚂蚁的禁忌表  $tabu_{1k}$  和  $tabu_{2k}$ 。

2) 算法开始后，蚂蚁会根据改进的启发式信息和转移概率来计算蚂蚁的行走路径。禁忌表记录两组蚂蚁的禁忌栅格。如果蚂蚁  $k_{1i}$  在某一时刻  $ant_1$  中栅格坐标标记为  $(x_i, y_i)$ ，则  $(x_i, y_i)$  被记入禁忌列表中。

3) 检测  $ant_2$  中每只蚂蚁的禁忌表。如果  $ant_2$  中某只蚂蚁  $k_{2o}$  的禁忌表具有  $k_{1i}$  坐标点  $(x_i, y_i)$ ，则可以连接蚂蚁  $k_{1i}$  和蚂蚁  $k_{2o}$  路径以形成可行路径并记录该路径。如果在  $ant_2$  中所有蚂蚁的禁忌表中没有坐标  $(x_i, y_i)$ ，则所有蚂蚁进行下一次迭代中，转到步骤 2)。

4) 实时检测两组蚂蚁的禁忌列表, 只要任意两只蚂蚁的禁忌表具有相同的元素, 就可以将它们连接起来形成新路径并记录下来<sup>[24]</sup>。

5) 蚁群完成路径搜索后, 计算最短路径并输出。改进蚁群算法流程图如图 3 所示。

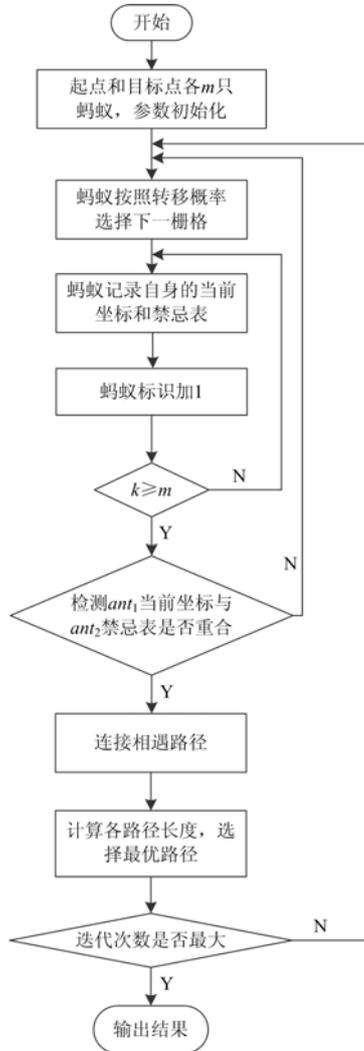


图 3 改进蚁群算法流程

Fig. 3 Improved ant colony algorithm process

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 仿真参数

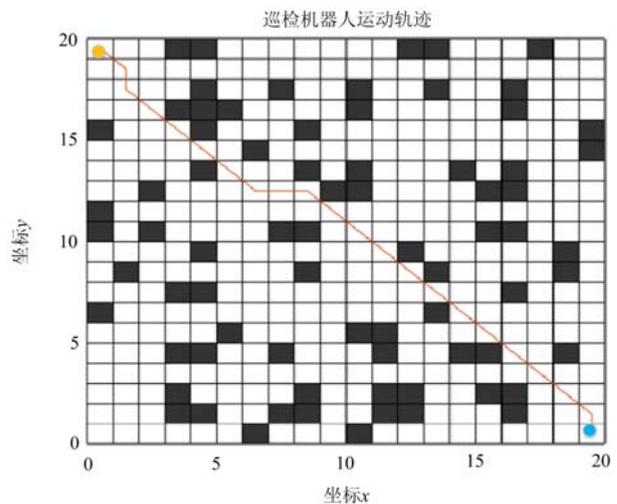
通过仿真实验对文中算法的优越性进行验证, 仿真实验计算机是 Intel i5 处理器, 8 G 内存和 Win10 系统。使用 Matlab2018 a 软件进行了仿真。由于实际的变电站环境较为复杂, 尤其是在变电站临时检修中, 应在现有栅格图的基础上适当修改仿真测试环境, 以尽可能地提高实际环境的复杂性, 使算法更加实用。在蚁群算法仿真实验中, 参数的初始选择对算法结果有很大影响。算法参数如表 1 所示。

表 1 算法参数

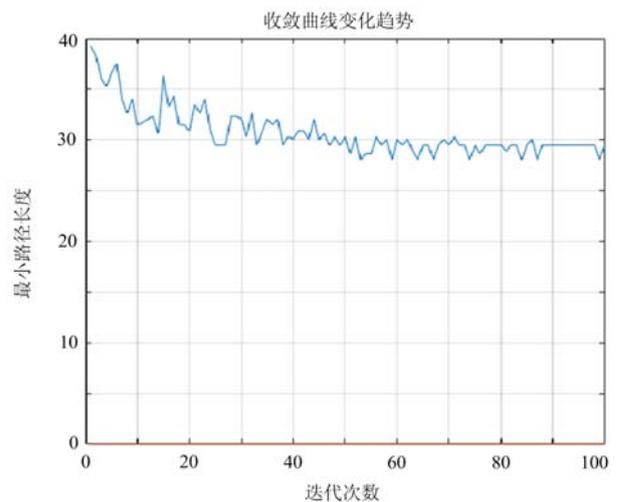
Table 1 Algorithm parameters	
参数	数值
蚂蚁数量 $n$	30
信息启发因子 $\alpha$	1
期望启发系数 $\beta$	7
信息挥发系数 $\sigma$	0.5

#### 3.2 仿真分析

路径规划仿真环境是  $20 \times 20$  栅格环境和  $30 \times 30$  栅格环境。图 4 为  $20 \times 20$  栅格环境中传统蚁群算法的仿真结果。其中橙色点是起点, 蓝色点是目标点, 路径是红线。图 5 为在  $20 \times 20$  栅格环境中改进的蚁群算法的仿真结果。



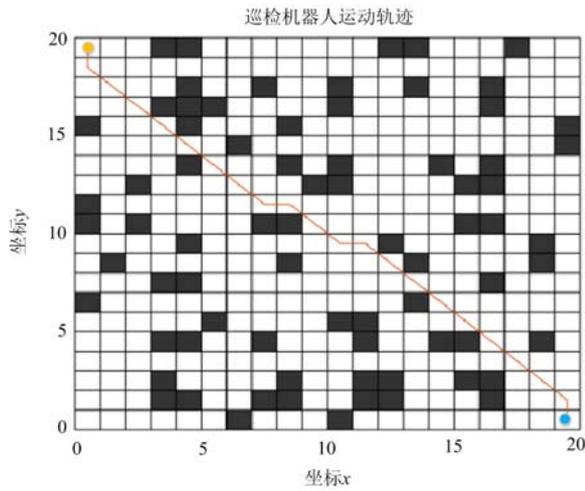
(a) 传统蚁群算法规划



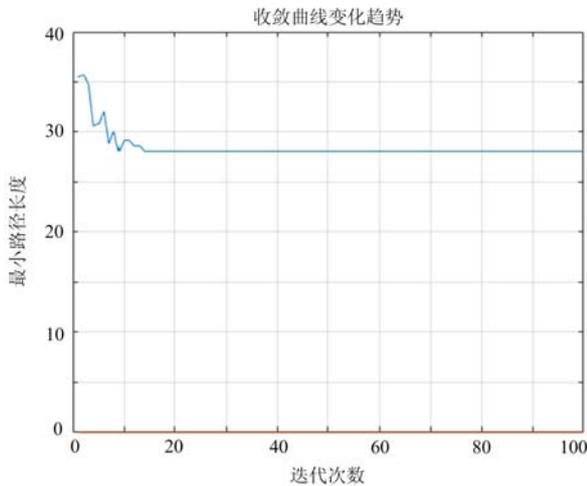
(b) 传统蚁群算法收敛图

图 4  $20 \times 20$  栅格图环境传统蚁群算法规划

Fig. 4 Traditional ant colony algorithm planning under  $20 \times 20$  grid graph environment



(a) 改进蚁群算法规划



(b) 改进蚁群算法收敛图

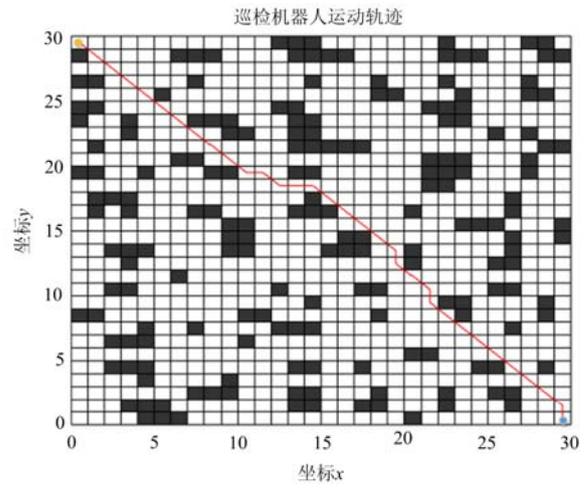
图 5 20×20 栅格图环境改进蚁群算法规划

Fig. 5 Improved ant colony algorithm planning under 20×20 grid graph environment

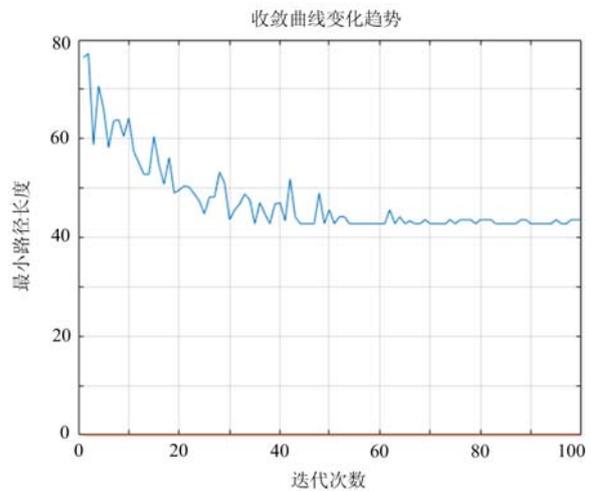
比较图 4 和图 5 的仿真结果,在相同的环境下,传统的蚁群算法经过约 88 次迭代,收敛到长度 29 的最优路径。而改进的算法进行了约 15 次迭代,收敛到长度 26 的最佳路径。由此可见,改进算法加快了收敛速度和缩短了最小路径。这是因为改进的算法对蚁群的选择概率进行改进,并将人工势场合力方向加入到信息启发式因子中,加快收敛速度,使用双向搜索策略来显著改善相同环境中的迭代次数和最短路径,从而使算法更有效。

图 6 为 30×30 栅格环境中传统蚁群算法的仿真结果,图 7 为 30×30 栅格环境中改进蚁群算法的仿真结果。

比较图 6 和图 7 的仿真结果可知,在相同的环境下,传统的蚁群算法在经过 100 次迭代后轻微振



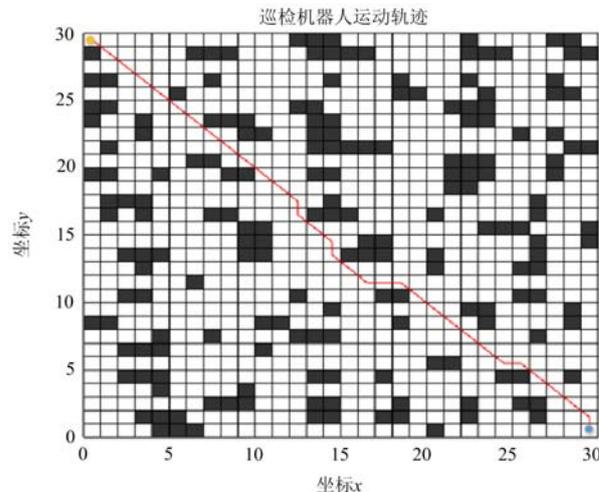
(a) 传统蚁群算法规划



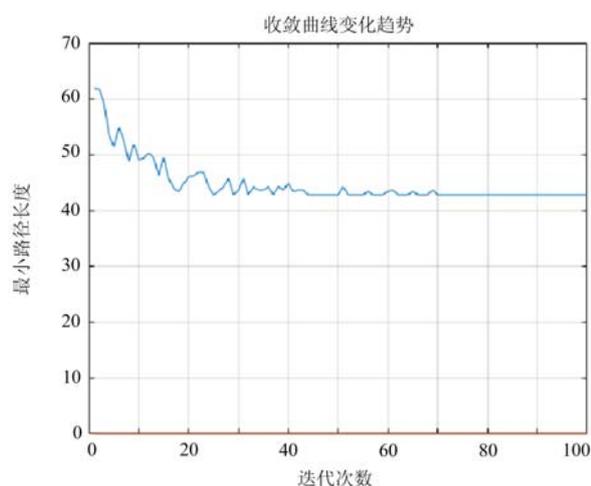
(b) 传统蚁群算法收敛图

图 6 30×30 栅格图环境传统蚁群算法规划

Fig. 6 Traditional ant colony algorithm planning under 30×30 grid graph environment



(a) 改进蚁群算法规划



(b) 改进蚁群算法收敛图

图 7 30×30 栅格图环境改进蚁群算法规划

Fig. 7 Improved ant colony algorithm planning under 30×30 grid graph environment

动,改进的算法在经过约 70 次迭代后收敛到最优路径 43。进一步证明了对传统蚁群算法转移概率的改进,在启发式因子中加入人工势场合力方向,并用双向搜索策略代替传统的单向搜索策略的优越性。在相同的环境下,算法的迭代次数和最短路径得到了显著改善,提高了算法的规划效率。

#### 4 结论

为了使特高压变电站巡检机器人能够快速有效地完成巡检任务,文中提出了一种基于人工势场算法和蚁群优化算法的特高压变电站巡检机器人路径规划方法,并在 20×20 和 30×30 栅格环境下进行了仿真实验。结果表明,在 20×20 栅格环境中,传统的蚁群算法经过约 88 次迭代,收敛到长度为 29 的最优路径,而改进的算法进行了约 15 次迭代,收敛到长度为 26 的最佳路径。在 30×30 栅格环境中,传统的蚁群算法在经过 100 次迭代后轻微振动,而改进的算法在经过约 70 次迭代后收敛到最优路径 43。改进算法的迭代次数和最小路径都有明显改善。考虑到当前的实验设备和数据规模,对特高压变电站巡检机器人的路线规划方法的研究仍处于起步阶段,仅对全局规划方法进行了研究。在此基础上,下一步重点是对局部规划方法进行研究并不断完善全局规划方法。

#### 参考文献

- [1] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
  - [2] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
  - [3] 刘焯琨, 刘红兵, 王瑾. 基于蚁群算法的变电站巡检机器人路径优化研究[J]. 电气应用, 2019, 38(2): 113-117.
  - [4] 薛阳, 俞志程, 吴海东, 等. 基于 IACO-ABC 算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 浙江电力, 2019, 38(11): 10-15.
  - [5] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.
  - [6] 王秀丽, 周鹏, 侯静楠, 等. 面向变电站机器人巡检路径规划中的算法研究[EB/OL]. 计算机工程与应用: 1-5[2020-08-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20200806.0907.008.html>.
  - [7] 袁佳泉, 李胜, 吴益飞, 等. 基于模拟退火蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 329-333.
  - [8] 苏海锋, 许道林, 李汶江, 等. 基于改进蚁群 A\* 算法的输电线路路径搜索[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2017, 37(1): 92-100.
- HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things technology in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- LIU Xuankun, LIU Hongbing, WANG Jin. Research on path optimization of substation inspection robot based on ant colony algorithm[J]. Electrical Applications, 2019, 38(2): 113-117.
- XUE Yang, YU Zhicheng, WU Haidong, et al. Path planning of substation inspection robot based on IACO-ABC algorithm[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(11): 10-15.
- HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. A review of intelligent inspection robot for electric power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 26-38.
- WANG Xiuli, ZHOU Peng, HOU Jingnan, et al. Algorithm research for substation robot inspection path planning[EB/OL]. Computer Engineering and Application: 1-5[2020-08-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20200806.0907.008.html>.
- YUAN Jiaquan, LI Sheng, WU Yifei, et al. Robot path planning method based on simulated annealing ant colony algorithm[J]. Computer Simulation, 2019, 36(10): 329-333.
- SU Haifeng, XU Daolin, LI Wenjiang, et al. Transmission

- line route search based on improved ant colony A\* algorithm[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2017, 37(1): 92-100.
- [9] 叶波. 基于负载均衡度的云计算任务调度算法[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(1): 88-95.  
YE Bo. Cloud computing task scheduling algorithm based on load balancing degree[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(1): 88-95.
- [10] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.  
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [13] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [14] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [15] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [16] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [17] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [18] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [19] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.  
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Fault characteristics analysis of circular DC distribution network under different grounding modes based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [20] 吴凯峰, 刘万涛, 李彦虎, 等. 基于云计算的电力大数据分析技术与应用[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 111-116.  
WU Kaifeng, LIU Wantao, LI Yanhu, et al. Cloud computing-based large power data analysis technology and application[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 111-116.
- [21] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.  
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on Internet of Things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [22] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.  
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [23] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.  
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [24] 方顺利, 姚伟, 姚皓, 等. 基于实时入炉煤质数据的在线掺烧优化系统在火电厂的应用[EB/OL]. 热力发电: 1-7[2020-12-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.TM.20201201.0918.001.html>.  
FANG Shunli, YAO Wei, YAO Hao, et al. Application of online blending optimization system based on real-time coal quality data in thermal power plants[EB/OL]. Thermal Power Generation: 1-7[2020-12-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1111.TM.20201201.0918.001.html>.

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-02-15

作者简介:

董翔宇(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化、输变电设备运维; E-mail: dxy198110@163.com

季坤(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统及其自动化、输变电设备技术管理工作;

朱俊(1987—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化、变电设备运维。

(编辑 张爱琴)