

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241253

## 基于改进淘金算法的变电站巡检路径两阶段规划方法

蒋伟俊<sup>1</sup>, 蒋文平<sup>2</sup>, 陈孝明<sup>3</sup>, 付涵<sup>1</sup>, 刘笑宇<sup>1</sup>, 张三<sup>1</sup>, 徐艳春<sup>4</sup>

(1. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430015; 2. 国网湖北技术培训中心, 湖北 武汉 430079; 3. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 4. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为适应电力需求的持续增长, 国网各省市公司新建、扩建变电站的数量正逐年递增, 部分地市供电公司面临变电运检人员承载力不足、日常巡检任务重的紧张局面。为给基层一线员工巡检维护工作减负增效, 提出了一种基于改进淘金算法的变电站巡检路径两阶段规划方法。首先, 针对新兴的淘金算法提出一种改进策略, 通过引入淘金者自由探索行为和基于余弦形式的收敛因子来提高其搜索效率和全局寻优能力, 用于后续变电站巡检路径两阶段规划模型求解。其次, 构建“多队同行”和“单队出行”两种变电站巡检模型, 预设路线最长通行时限、巡视类型和车辆数等巡检参数, 利用改进的淘金算法优化筛选出基准出行模型。再次, 基于基准出行模型, 结合“多队同行”和“单队出行”两类模型各自出行优势, 对各路线实施二次优化, 确定出周期内总用时最少的变电站最优巡检路径。最后, 分别对实际的变电工区和集控站算例进行仿真分析, 结果验证了所提规划方法的有效性和普适性。

**关键词:** 变电站巡检路径; 改进的淘金算法; 巡视类型; 基准出行模型; 二次优化

### Two-stage substation inspection path planning method based on improved gold rush optimizer

JIANG Weijun<sup>1</sup>, JIANG Wenping<sup>2</sup>, CHEN Xiaoming<sup>3</sup>, FU Han<sup>1</sup>, LIU Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHANG San<sup>1</sup>, XU Yanchun<sup>4</sup>

(1. State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430015, China; 2. State Grid Hubei Technical Training Center, Wuhan 430079, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 4. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To accommodate the continuous growth of electricity demand, the number of new and expanded substations being built by State Grid companies across provinces and cities is steadily increasing. As a result, some local power supply companies are facing staff shortages and heavy daily inspection workloads. To reduce the burden and increase the efficiency for frontline inspection and maintenance staff, this paper proposes a two-stage planning method of substation inspection path based on improved gold rush optimizer. First, an enhancement strategy is introduced for the emerging gold rush optimizer. The search efficiency and global optimization ability are improved by incorporating the free exploration behavior of gold miners and a cosine-based convergence factor, making it suitable for solving the subsequent two-stage substation inspection path planning model. Second, two substation inspection models are constructed: “multi-team work together” and “single-team work”, and the inspection parameters such as maximum route duration, type of inspection, and number of vehicles are preset. The improved gold rush optimizer is used to optimize and identify the benchmark work model. Next, based on the benchmark work model, the distinct advantages of the two work modes are leveraged to perform secondary optimization on each route, ultimately determining the substation inspection path that minimizes total time across the inspection cycle. Finally, simulation analyses are conducted using real-world substation work zones and centralized control stations. The results verify the effectiveness and general applicability of the proposed planning method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277108).

**Key words:** substation inspection path; improved gold rush optimizer; inspection type; benchmark work model; secondary optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277108)

## 0 引言

近年来, 国家电网有限公司持续推进运维、检修一体化建设, 全力打造“设备主人+全科医生”的变电站巡检队伍, 但随着新建、扩建变电站的数量与日俱增<sup>[1]</sup>, 部分地市供电公司暴露出人员配置不足、巡检工作量大等问题<sup>[2]</sup>。为此, 个别地区开始推行智能巡检机器人和无人机等数字化装备来优化变电站巡检路径, 以减轻巡检人员工作负担。

目前, 国内外针对巡检机器人和无人机的路径优化主要集中于站内层面<sup>[3-5]</sup>。文献[6]提出了一种改进的蚁群-模拟退火算法, 旨在提高变电站巡检机器人的工作效率并解决传统蚁群算法路径优化能力弱、收敛速度慢等问题。文献[7]基于强化学习和多层神经网络<sup>[8]</sup>, 提出了一种机器人巡检路径规划算法, 实现了变电站巡检机器人在复杂环境下的快速部署和执行检测点遍历的功能。文献[9]简化处理了变电站环境, 采用拓扑图构建了机器人的工作环境, 并将特殊交叉算子、自适应变异算子和淘汰算子引入遗传算法中, 优化出了平均路径长度更短的巡检路线。由于机器人规划不适用于大区域复杂环境等场合<sup>[10]</sup>, 文献[11]为提高其大范围复杂环境下的适应能力和路径规划算法的收敛速度, 对传统 A\* 路径规划算法<sup>[12]</sup>进行了改进——修改了网格大小以平滑规划路径, 增强了算法的避障能力和规划效率; 增加规划循环机制, 实现多个目标点的连续路径规划。文献[13-14]指出当前机器人的路径规划方法只考虑局部避障, 全局规划路径与局部规划路径之间存在冲突, 基于此建立了远程巡检机器人的动力学平面模型, 引入人工势场<sup>[15]</sup>计算出蚁群算法的初始启发信息, 并通过双向搜索获得左右规划路径, 实现了路径的全局最优。相比巡检机器人, 无人机因为灵活、覆盖范围广、工作效率高等优势更受研究者青睐<sup>[16]</sup>。由于无人机飞行受电磁环境和安全距离等因素制约, 文献[17]基于模拟放电试验<sup>[18]</sup>, 建立无人机巡检变电站母线、主变的 3 维仿真计算模型, 计算出了电场控制条件下的作业安全距离。基于此, 文献[19]搭建了强电场耐受试验平台和强磁场耐受试验平台, 在电场和磁场环境下对无人机进行测控性能安全距离试验, 提出了无人机巡检高压设备的安全距离确定方法, 为巡检距离控制和巡检路线优化奠定了理论前提。针对站内路线优化, 文献[20]提出了一种双无人机巡检路径协同规划思路, 基于改进的图论网络算法, 考虑单无人机或双无人机协同巡检, 优化筛选出最佳巡检路径。无人机巡检路

线时长主要取决于待检部件图像采集耗时, 面向待检部件的多位置检测, 文献[21]提出了一种基于强化学习参数调优机制的遗传算法, 最小化无人机的最长飞行距离, 一定程度上提高了巡检效率。

综上所述, 当前依托数字化装备的巡检路径优化方法大都是对优化算法进行改进, 其改进质量受原始算法鲁棒性的影响较大, 且均着眼于单一巡检模型的优化, 未考虑多模型下的最优路径的求解。此外, 现今研究重点聚焦于站内范围, 面向站间巡检路线规划的研究较少, 究其原因还是由于数字化装备投资维护成本高昂, 站内外复杂环境适应性有限, 使其无法完全取代人工, 实现广泛推广<sup>[22-23]</sup>。鉴于此, 本文提出一套变电站巡检路径两阶段规划方法, 其主要贡献如下。

1) 改进了一种鲁棒性强的智能优化算法, 引入了自由探索行为和基于余弦形式的收敛因子, 提高了巡检模型的求解精度。

2) 计及多巡视类型<sup>[24]</sup>对巡检路径的影响, 基于多站系统, 建立了变电站巡检路径两阶段规划模型, 通过分阶段二次优化, 求解出了周期内总耗时最少、路线行驶总数折中的最优巡检方案。

3) 所提方法具备较强的普适性, 支持人员自定义路线最长通行时限、巡视种类等参数, 合理规划出差异化的巡检方案。

## 1 改进的淘金算法

### 1.1 淘金算法主要原理

作为新兴的智能优化算法, 淘金算法(gold rush optimizer, GRO)具备更强的全局寻优能力和更快的收敛速度, 在工程问题的求解上, 效率高、鲁棒性强<sup>[25]</sup>。该算法的核心是通过模拟淘金者的迁移、淘金和协作行为来逐步寻到最优解, 其中淘金者的迁移过程可用式(1)和式(2)来描述。

$$\overline{D}_i = C_1 \cdot \overline{X}^*(t) - \overline{X}_i(t) \quad (1)$$

$$\overline{X}_i^{\text{new}}(t+1) = \overline{X}_i(t) + A_1 \cdot \overline{D}_i \quad (2)$$

式中:  $\overline{D}_i$  为迁移向量;  $\overline{X}^*(t)$  为最佳金矿位置;  $\overline{X}_i(t)$  为淘金者  $i$  的当前位置;  $t$  为迭代次数;  $\overline{X}_i^{\text{new}}(t+1)$  为淘金者  $i$  的新位置;  $A_1$ 、 $C_1$  为变系数, 其值分别如式(3)、式(4)所示。

$$A_1 = 1 + l_1 \cdot \left( r_1 - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

$$C_1 = 2 \cdot r_2 \quad (4)$$

式中:  $r_1$ 、 $r_2$  为 [0,1] 之间的随机量;  $l_1$  为收敛因子, 其计算方法如式(5)所示。

$$l_e = \left(2 - \frac{1}{t_{\max}}\right) \cdot \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - 1}\right)^e + \frac{1}{t_{\max}} \quad (5)$$

式中:  $l_e$  为收敛因子;  $e$  为因子编号, 其值取 1 或 2;  $t_{\max}$  为最大迭代次数。

淘金者在各区域淘金的数学模型如式(6)和式(7)所示。

$$\overline{D}_2 = \overline{X}_i(t) - \overline{X}_g(t) \quad (6)$$

$$\overline{X}_i^{\text{new}}(t+1) = \overline{X}_g(t) + A_2 \cdot \overline{D}_2 \quad (7)$$

式中:  $\overline{D}_2$  为淘金向量;  $\overline{X}_g(t)$  为随机选择的淘金者  $g$  的位置;  $A_2$  为变系数, 其值如式(8)所示。

$$A_2 = l_2 \cdot (2r_1 - 1) \quad (8)$$

式中:  $l_2$  的计算方法参考式(5)。

为获取更多黄金, 淘金者之间通常会进行协作, 其协作行为如式(9)和式(10)所示。

$$\overline{D}_3 = \overline{X}_{g'}(t) - \overline{X}_g(t) \quad (9)$$

$$\overline{X}_i^{\text{new}}(t+1) = \overline{X}_i(t) + r_1 \cdot \overline{D}_3 \quad (10)$$

式中:  $\overline{D}_3$  为协作向量;  $\overline{X}_{g'}(t)$  为随机选择的淘金者  $g'$  的位置。

若淘金者  $i$  在新位置时能获取更多黄金, 则更新  $i$  的当前位置。

## 1.2 算法改进策略

### 1.2.1 自由探索行为

协作期间, 淘金者  $i$  是在随机选择的 2 名淘金者指定的方向进行搜寻, 理论上讲该方向并非均为最佳的淘金路径, 寻优精度无法得到保障, 为此, 在协作过程中引入淘金者自由探索行为, 以提升算法的寻优能力, 避免算法陷入局部最优, 图 1 给出了其原理示意图。

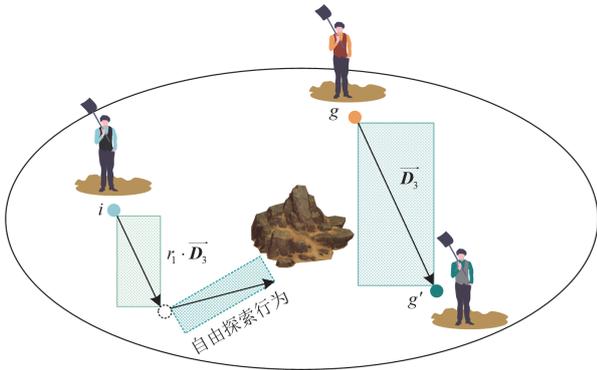


图 1 自由探索行为示意图

Fig. 1 Diagram of free exploration behavior

该策略的灵感来源于灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO), 狼群因 3 条头狼带领, 使其狩猎

到了最佳的猎物, 其位置更新公式<sup>[26]</sup>为以 3 条头狼为顶点构成的三角形重心, 文献[27]指出: 在重心附近动态地更新狼群位置, 将更有利于指导狼群前进, 算法不易陷入局部最优。鉴于此, 本文在淘金者协作期间增加淘金者自由探索行为, 动态改变淘金者的寻金方向, 其过程如式(11)一式(14)所示。

$$\omega_1 = \frac{|\overline{X}_g(t)|}{|\overline{X}_g(t)| + |\overline{X}_{g'}(t)| + |\overline{X}_i(t)|} \quad (11)$$

$$\omega_2 = \frac{|\overline{X}_{g'}(t)|}{|\overline{X}_g(t)| + |\overline{X}_{g'}(t)| + |\overline{X}_i(t)|} \quad (12)$$

$$\omega_3 = \frac{|\overline{X}_i(t)|}{|\overline{X}_g(t)| + |\overline{X}_{g'}(t)| + |\overline{X}_i(t)|} \quad (13)$$

$$\overline{X}_i^{\text{new}}(t+1) = \frac{\omega_1 \cdot \overline{X}_g(t) + \omega_2 \cdot \overline{X}_{g'}(t) + \omega_3 \cdot \overline{X}_i(t)}{3} \quad (14)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  分别为淘金者  $g$ 、 $g'$ 、 $i$  的位置权重;  $|\overline{X}_g(t)|$ 、 $|\overline{X}_{g'}(t)|$ 、 $|\overline{X}_i(t)|$  分别为淘金者  $g$ 、 $g'$ 、 $i$  的欧氏距离。

加入自由探索行为后算法寻优的精度变化将在算例分析中予以体现, 这里不过多说明。

### 1.2.2 基于余弦形式的收敛因子

GRO 收敛因子的特性直接影响淘金者种群的探索能力和开发能力<sup>[27]</sup>, 为拓宽淘金者的探索空间, 保障算法的寻优精度, 现引入一种基于余弦形式的收敛因子  $l'_1$  来代替  $l_1$ , 其表达式如式(15)所示。图 2 对比了两收敛因子的变化特性。

$$l'_1 = \frac{1}{t_{\max}} + \left(2 - \frac{1}{t_{\max}}\right) \frac{1 + [\cos((t-1)\pi/(t_{\max}-1))]^\mu}{2} + \zeta \cdot r_3 \quad (15)$$

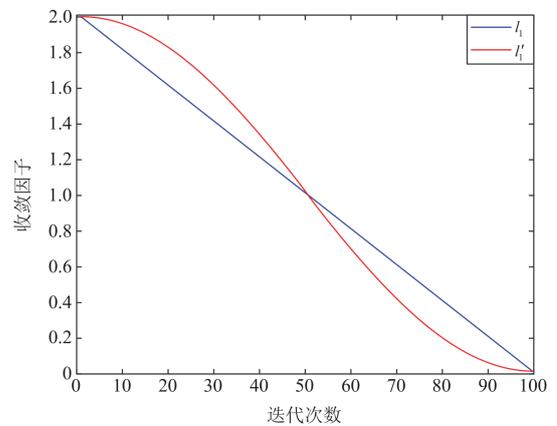


图 2 收敛因子对比图

Fig. 2 Comparison diagram of convergence factor

式中： $\cos(\cdot)$  为余弦函数； $\mu$  为衰减因子， $0 < \mu \leq 1$ ，本文取 0.95； $\zeta$  为扰动系数，取 0.02； $r_3$  为  $[0,1]$  之间的随机量。

图 2 中， $l'_1$  相比  $l_1$ ，在迭代过程前期呈缓慢下降趋势，这为淘金者向大范围迁移寻金提供了可能，提高了算法前期的搜索能力。同时， $l'_1$  在迭代后期减小得更快，保持较小值的时间更长，加强了算法后期的寻优精度。

关于  $l'_1$  的应用效果，后文将通过仿真对比来进一步体现，限于篇幅，这里不做过多说明。

## 2 变电站巡检路径两阶段规划模型

### 2.1 “多队同行”模型

鉴于当前各集控站、变电工区所辖变电站数量逐年递增，所配巡检人员和工程车辆又极为紧缺，巡检队的承担能力正濒临极限，此时为在规定周期内完成各站的巡检任务，队与队之间通常会选择共同出行，以充分利用资源。“多队同行”的模型如图 3 所示。

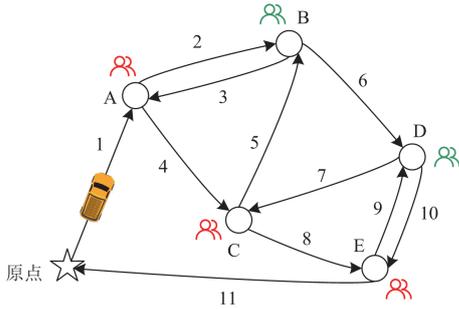


图 3 “多队同行”模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of “multi-team work together” model

图 3 中，工程车配合 2 支巡检队完成巡检任务：车辆先将巡检队 1 送至 A 站，再将巡检队 2 送至 B 站，随后车辆返回 A 站接载巡检队 1 并将其送往 C 站，紧接着前往 B 站载运巡检队 2 至 D 站……“多队同行”的数学模型如式(16)所示。

$$f_1(n) = \sum_{m=0}^1 t_{m,m+1} + \sum_{m=1}^{n-2} (t_{m,m+1} + t_{m,m+2}) + 2t_{n-1,n} + t_{n,0} + \sum_{m=1}^n \Delta t_m \quad (16)$$

式中： $f_1(\cdot)$  为“多队同行”模型的时间函数； $n$  为变电站的数量； $m$  为变电站编号； $t_{m,m+1}$ 、 $t_{m,m+2}$  分别为车辆从变电站  $m$  到变电站  $m+1$ 、 $m+2$  所需的平均用时； $t_{n-1,n}$  为车辆从变电站  $n-1$  到变电站  $n$  的时间； $t_{n,0}$  为车辆从变电站  $n$  返回原点的时间； $\Delta t_m$

为变电站  $m$  的时间补偿量，其值由式(17)定义。

$$\Delta t_m = \begin{cases} 0, & t_{m,m'} > T_{m,d}^l \\ T_{m,d}^l - t_{m,m'}, & t_{m,m'} \leq T_{m,d}^l \end{cases} \quad (17)$$

式中： $t_{m,m'}$  为车辆从变电站  $m$  出发到再次返回该站所经历的时间； $T_{m,d}^l$  为变电站  $m$  的巡视时长； $l$  为巡视类型，其中  $l=1, 2, 3$  分别对应全面巡视、例行巡视、熄灯巡视； $d$  为变电站的重要程度，其中  $d=1, 2, 3, 4$  分别表示 1 类站、2 类站、3 类站、4 类站。

“单队出行”模型示意图如图 4 所示。图 4 中，所有站的巡检工作均由一支巡检队来完成，其数学模型如式(18)所示。

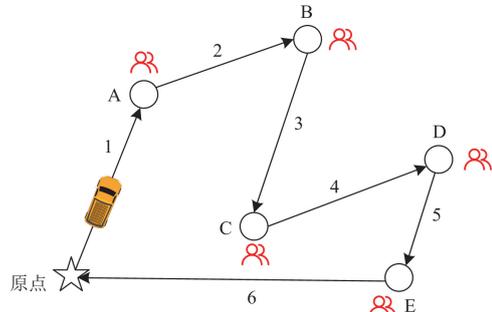


图 4 “单队出行”模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of “single-team work” model

$$f_2(n) = \sum_{m=0}^{n-1} t_{m,m+1} + t_{n,0} + \sum_{m=1}^n T_{m,d}^l \quad (18)$$

式中： $f_2(\cdot)$  为“单队出行”模型的时间函数。

可以证明，当满足式(19)时，“多队同行”模型相较于“单队出行”模型在时间层面上更加“经济”。

$$\sum_{m=1}^n (T_{m,d}^l - \Delta t_m) > t_{1,2} + \sum_{m=1}^{n-2} t_{m,m+2} + t_{n-1,n} \quad (19)$$

式中： $t_{1,2}$  为车辆从变电站 1 到变电站 2 的平均时长。

### 2.2 第一阶段规划

#### 2.2.1 目标函数

第一阶段规划以总通行时间最小为目标，分别对两类出行模型实施优化，筛选出基准出行模型(以下简称“基准模型”)，其目标函数如式(20)式(22)所示。

$$\min F_1 = \sum_{c=1}^C \sum_{m=0}^{n_c} \left( \Delta t_m \Big|_{l \in L} + \sum_{k=0}^{n_c} t_{m,k} \chi_{m,k}^c \right) \quad (20)$$

$$\min F_2 = \sum_{c=1}^C \sum_{m=0}^{n_c} \left( T_{m,d}^l \Big|_{l \in L} + \sum_{k=0}^{n_c} t_{m,k} \chi_{m,k}^c \right) \quad (21)$$

$$\min F_{\text{base}} = [F_1, F_2] \quad (22)$$

式中： $\min(\cdot)$  为取函数的最小值； $F_1(\cdot)$ 、 $F_2(\cdot)$  分别

为“多队同行”模型和“单队出行”模型下的通行时间函数； $F_{\text{base}}$ 为基准模型； $C$ 为工程车辆数； $c$ 为车辆编号； $n_c$ 为车辆 $c$ 所行线路上的变电站总数； $k$ 为车辆 $c$ 经过所行线路上变电站的次序号； $t_{m,k}$ 为车辆从变电站 $m$ 到变电站 $k$ 的时间； $\chi_{m,k}^c$ 为逻辑变量，其值为0或1，对于车辆 $c$ ，当车辆从变电站 $m$ 行至变电站 $k$ 时， $\chi_{m,k}^c$ 取1，若车辆从变电站 $m$ 出发不经过变电站 $k$ ，则取0； $L$ 为巡视种类数，本文取3；注意，当 $m=0$ 时， $\Delta t_m = T_{m,d}^l = 0$ 。

### 2.2.2 约束条件

#### 1) 车辆约束

$$1 \leq c \leq C \quad (23)$$

#### 2) 时间约束

限制出行模型中各路线的通行时限，即

$$0 \leq \sum_{m=0}^{n_c} \left( \Delta t_m \Big|_{l \in L} + \sum_{k=0}^{n_c} t_{m,k} \chi_{m,k}^c \right) \leq T_{\text{lim}} \quad (24)$$

$$0 \leq \sum_{m=0}^{n_c} \left( T_{m,d}^l \Big|_{l \in L} + \sum_{k=0}^{n_c} t_{m,k} \chi_{m,k}^c \right) \leq T_{\text{lim}} \quad (25)$$

式中： $T_{\text{lim}}$ 为设置的路线最长通行时限。

#### 3) 起点和终点约束

每辆车的路径必须从原点出发，在路线终点返回。

$$\sum_{k=1}^{n_c} \chi_{0,k}^c = 1 \quad \forall c = \{1, 2, \dots, C\} \quad (26)$$

$$\sum_{m=1}^{n_c} \chi_{m,0}^c = 1 \quad \forall c = \{1, 2, \dots, C\} \quad (27)$$

式中： $\chi_{0,k}^c$ 为车辆 $c$ 从原点行至变电站 $k$ 时的逻辑变量值； $\chi_{m,0}^c$ 为车辆 $c$ 从变电站 $m$ 行至原点时的逻辑变量值； $\forall$ 为任意符号。

#### 4) 访问次数约束

变电站的访问次数取决于该站需要完成的巡视次数，对于“单队出行”模型，有

$$\sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^{n_c} \chi_{m,k}^c = N_L \quad \forall c = \{1, 2, \dots, C\} \quad (28)$$

式中： $N_L$ 为每个变电站规定巡视的次数。

针对“多队同行”模型，有

$$\sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^{n_c} \chi_{m,k}^c = 2N_L \quad \forall c = \{1, 2, \dots, C\} \quad (29)$$

## 2.3 第二阶段规划

第二阶段规划基于2.2.1节的基准模型，对各路线逐一进行二次优化，确定各路线的最终出行模型，筛选出变电站的最优巡检路径，其模型如式(30)一

式(32)所示。

$$\begin{cases} F_{\text{new}}(\kappa, \lambda) = \sum_{c=1}^{C-1} \sum_{m=0}^{n_c^c} \left( \varphi(m) + \sum_{k=0}^{n_c^c} t_{m,k} \chi_{m,k}^c \right) \\ \kappa = \{1, 2, \dots, R_{\text{base}}\}, \lambda = \left\{ 1, 2, \dots, \sum_{\gamma=1}^{R_{\text{base}}-1} C(R_{\text{base}}-1, \gamma) \right\} \end{cases} \quad (30)$$

$$F_{\text{base}}^{\text{new}} = F_{\text{base}} \Big|_{\kappa \notin \lambda} + F_{\text{new}}(\kappa, \lambda) \quad (31)$$

$$F_{\text{best}} = \begin{cases} F_{\text{base}}^{\text{new}}, F_{\text{base}}^{\text{new}} < F_{\text{best}} \\ F_{\text{best}}, F_{\text{base}}^{\text{new}} \geq F_{\text{best}} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $F_{\text{new}}(\cdot)$ 为新路线的通行时间函数； $\kappa$ 为基准模型中的路线序号； $R_{\text{base}}$ 为基准模型中的总路线数； $\lambda$ 为新路线划分方案编号； $n_c^c$ 为方案 $\lambda$ 下车辆 $c$ 经过的变电站总数； $\varphi(\cdot)$ 为优选函数，当基准模型为“单队出行”模型时， $\varphi(m) = \Delta t_m \Big|_{l \in L}$ ，否则， $\varphi(m) = T_{m,d}^l \Big|_{l \in L}$ ； $C(\cdot)$ 为组合数函数； $\gamma$ 为计数编号； $F_{\text{base}} \Big|_{\kappa \notin \lambda}$ 为基准模型剔除方案 $\lambda$ 中的路线后，剩余路线的通行时间总和； $F_{\text{base}}^{\text{new}}$ 为新的基准模型； $F_{\text{best}}$ 为变电站最优巡检路径模型。

变电站巡检路径两阶段规划模型整体优化流程如图5所示。

## 3 算例分析

本文基于MATLAB仿真平台，分别对某地市的某变电工区算例和某集控站算例进行仿真分析，验证所提方法的有效性和普适性。鉴于本文算例均只涉及3类站和4类站，故设置的变电站的巡视参数如表1所示。此外，设置路线最长通行时限 $T_{\text{lim}} = 240 \text{ min}$ ；淘金算法的通用参数：淘金者总数30人； $t_{\text{max}} = 100$ 。

表1 变电站巡视参数

Table 1 Patrol parameters of substation

$d$	$l$	$T_{m,d}^l / \text{min}$	$N_L / (\text{次}/\text{月})$
3	1	90	1
	2	45	4
	3	45	1
4	1	75	1
	2	45	2
	3	45	1

### 3.1 变电工区所辖站算例

图6展示了该工区所辖站的地理分布概况，根据各站地理坐标，利用地图导航软件计算各站之间的通行时间，生成变电站通行时间矩阵。

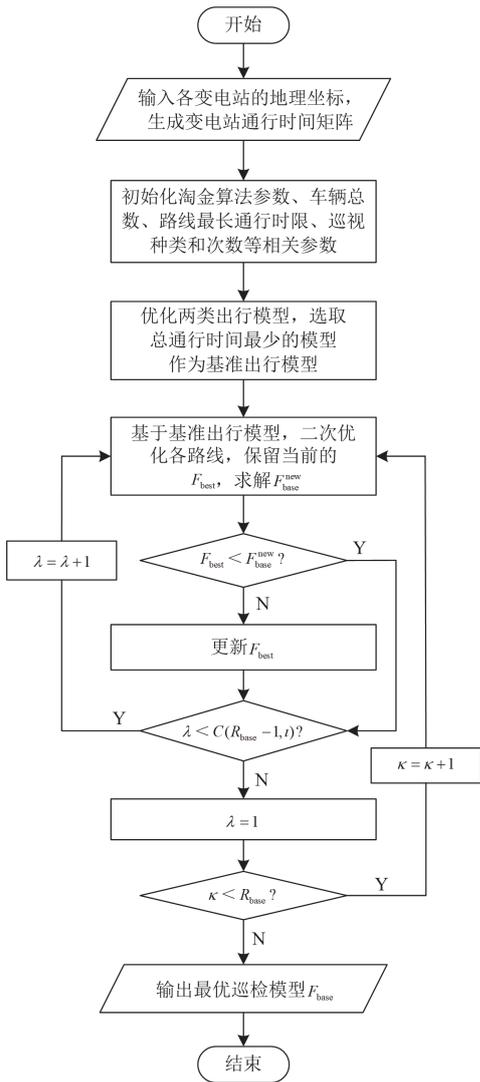


图 5 整体优化流程图

Fig. 5 Flow chart of overall optimization

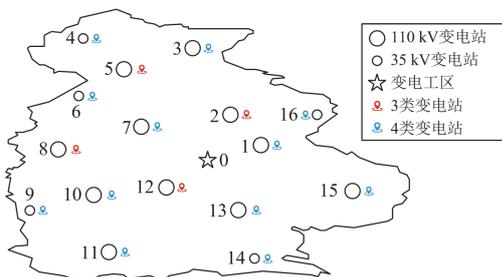


图 6 变电工区所辖站地理分布图

Fig. 6 Geographic distribution map of substations managed by substation department

3.1.1 算法改进效果

为体现引入基于余弦形式的收敛因子和自由探索行为后算法的精度优势, 现分别将其进行算法对

比, 图 7 给出了两种算法的收敛曲线图, 图 8 对比了基于两种收敛因子的算法收敛曲线。

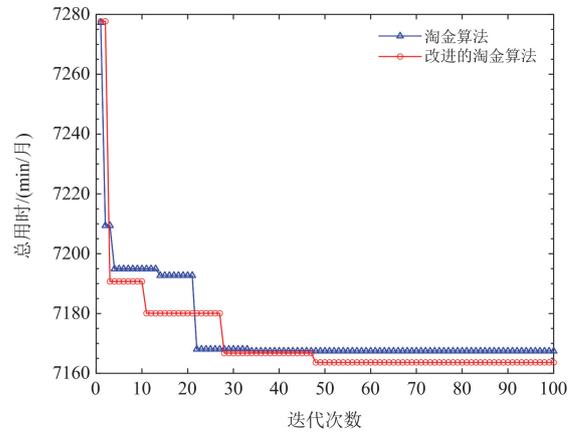


图 7 算法收敛曲线图

Fig. 7 Algorithm convergence curve

由图 7 可知: 改进的淘金算法相比淘金算法在路线总用时上节约了 3.79 min, 这说明本文提出的改进策略在一定程度上能改善算法的寻优精度, 增强算法的全局寻优能力。

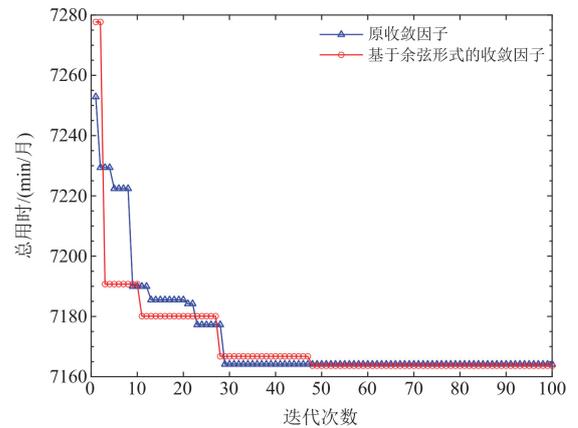


图 8 基于不同收敛因子的淘金算法迭代曲线图

Fig. 8 Iteration curve diagram of GRO based on different convergence factors

图 8 中, 基于余弦形式的收敛因子的迭代曲线收敛精度更高, 这是因为改进的收敛因子提高了算法在迭代前期时的搜索效率和后期时的寻优精度, 使其更易搜寻到较小值, 且能较长时间保持, 算法的全局搜索和局部搜索能力获得平衡。特强调: 由于优化时间不是工程规划问题的主要关注点<sup>[28]</sup>, 故本文对其不予考虑。

3.1.2 工区算例巡检方案对比

本文规划周期取 1 个月, 在该周期内共需对所辖站巡视 72 次, 为凸显本文两阶段规划方法的优

势, 现将变电站最优巡检路径模型与“多队同行”模型和“单队出行”模型进行对比, 对比结果如表 2 所示, 附录 A 表 A1—表 A3 给出了各模型的优化方案。

表 2 变电工区算例二次规划结果

Table 2 Secondary optimal result of substation department example

模型	路线行驶总数/(次/月)	总用时/(min/月)
最优巡检模型	38	7163.63
“多队同行”模型	41	7565.57
“单队出行”模型	38	8064.74

由表 2 和附录 A 表 A1—表 A3 可知: 变电站最优巡检路径模型以第一阶段规划筛选出的总用时 7565.57 min 的“多队同行”模型为基准, 结合“单队出行”模型的出行优势, 最终优化出了总用时 7163.63 min 的最佳巡检路径。此外, 在路线行驶总数方面, 最优巡检模型相较于基准模型行驶总数更少, 减少了周期内巡检队的外出巡检频次, 一定程度上提高了工作效率。

### 3.2 集控站所辖站算例

图 9 所示的集控站负责某市西部地区变电站的集中监控和综合管理, 其中包含 11 座 220 kV 变电站、39 座 110 kV 变电站和 2 座 35 kV 变电站, 涉及 3 类站 16 座, 4 类站 36 座, 各巡检队聚集于集控站, 受其统一调配。

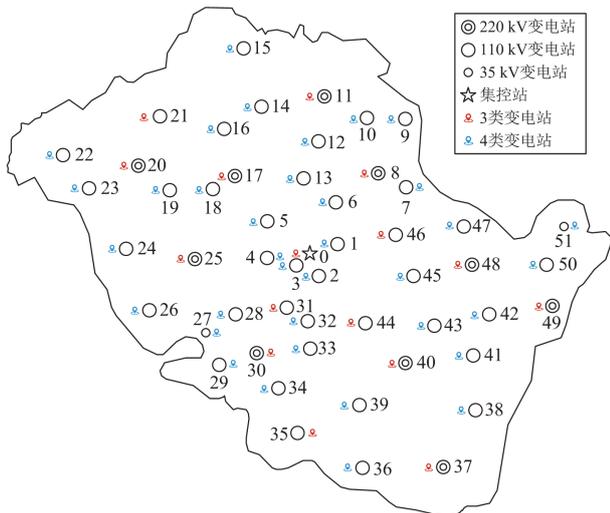


图 9 集控站所辖站地理分布图

Fig. 9 Geographic distribution map of substations managed by the centralized control station

#### 3.2.1 寻优算法对比

在路径优化领域, 麻雀搜索算法(sparrow search

algorithm, SSA)、贪婪算法(greedy algorithm, GA)、GWO 作为当今主流算法, 相比其他一些经典算法, SSA、GA、GWO 搜索效率更高, 不易陷入局部最优<sup>[29]</sup>。为体现 GRO 算法的竞争力, 现将其进行横向对比, 比较结果如图 10 所示。

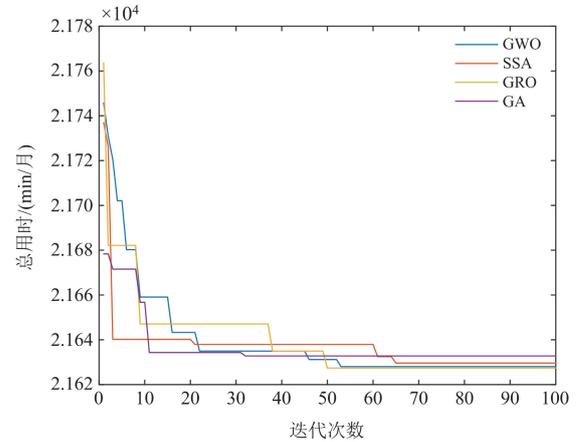


图 10 不同算法收敛曲线图

Fig. 10 Convergence curves of different algorithms

由图 10 可知: 各算法在迭代过程中均未陷入局部最优, 都搜寻到了全局范围内的最优解。在寻找竞争解方面, GRO 算法优于其他算法, 全局寻优能力更强, 其收敛曲线在第 50 次迭代过程中便趋于平稳, 展现出较快的收敛速度。由此可见, GRO 算法是求解路径优化问题的更好选择。

#### 3.2.2 集控站算例巡检方案对比

为进一步证明本文规划方法的普适性, 现对大规模的集控站系统进行仿真验证。算例第一阶段规划筛选出了总通行时间更小的“单队出行”模型作为基准模型, 第二阶段规划基于此, 优化出了总行驶次数 99 次的出行方案, 其路线图如图 11 所示, 二次规划的优化结果见表 3。

图 11 中: 虚线表示“单队出行”模型的巡检路线, 实线表示“多队同行”模型的巡检路线。针对部分路线采用“多队同行”模型的优势在于: 若当车辆第一次到达变电站至再次返回该站的路线用时小于该站对应的巡视时长时, 则相较基准模型, 该模型能节省从该站至下一站 2 倍的路程用时, 显著减少车辆的行程时间。

由表 3 可知, 最优巡检模型的周期总用时相较基准模型节约了 640.7 min, 约 11 h, 且路线行驶总数比基准模型少 7 次, 极大地提升了巡检队的巡检效率, 增强了集控站的管理效能。

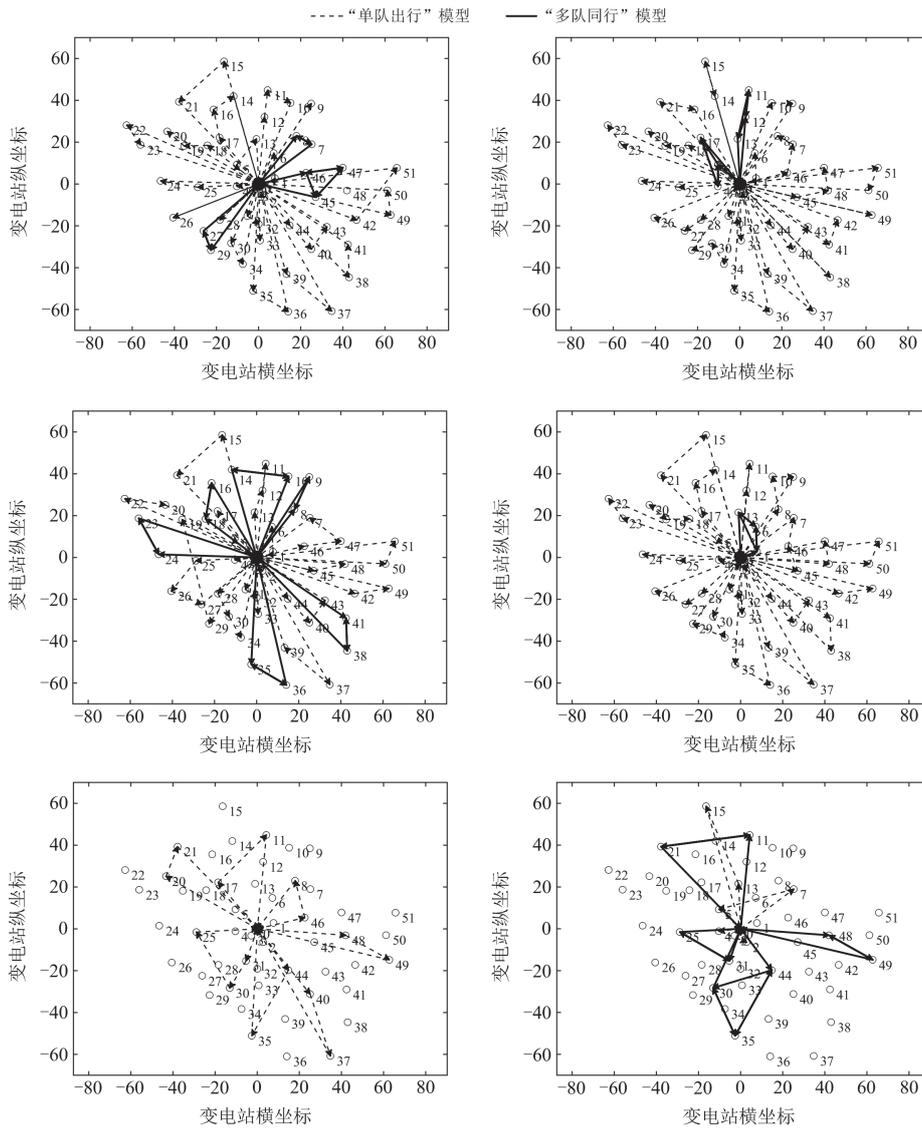


图 11 最优巡检模型路线图

Fig. 11 Route map of the optimal inspection model

表 3 集控站算例二次规划结果

Table 3 Secondary optimal result of the centralized control station example

模型	路线行驶总数/(次/月)	总用时/(min/月)
最优巡检模型	99	21 625.74
“单队出行”模型	106	22 266.44
“多队同行”模型	95	22 482.16

#### 4 结论

针对目前国网各市、县公司变电运维的工作现状，本文提出了一种变电站巡检路径两阶段规划方法，通过改进淘金算法加以求解，所得结论如下。

1) 规划计及所有巡视类型，在最优巡检模型中融合“多队同行”模型和“单队出行”模型各自优

点，所得出行方案是周期内总耗时最少、路线行驶总数折中的最佳巡检方案。

2) 引入自由探索行为和基于余弦形式的收敛因子后，淘金算法的前期搜索效率获得了改善，全局寻优能力得到一定程度的提升。

3) 支持巡检人员联系实际情况，自定义通行时限、巡视种类和车辆数，基于本文方法规划出差异化巡检方案。

此外，本文规划方法不只局限于变电领域，对于配电和输电领域，合理调整巡检模型，预设相关参数，本文规划方法依旧适用。未来，针对具备技术条件的变电站，如何将人工、无人机、智能机器人 3 种巡检方式有效结合是笔者下一步的研究重点。

## 附录 A

表 A1 “单队出行”模型优化方案

Table A1 Optimization scheme of “single-team work” model

路线序号	巡检路径	巡视类型	路径行驶数/(次/月)	路线总用时/(min/月)
1	0→8→12→13→0	例行巡视(8、12、13)	1	230.26
2	0→15→1→2→0	例行巡视(15、1、2)	1	238.05
3	0→3→16→0	例行巡视(3、6)	1	226.28
4	0→11→14→0	例行巡视(11、14)	1	231.90
5	0→4→5→0	例行巡视(4、5)	2	460.10
6	0→9→0	全面巡视(9)	1	177.28
7	0→7→6→0	全面巡视(7), 例行巡视(6); 例行巡视(7), 全面巡视(6)	2	481.92
8	0→10→0	全面巡视(10)	1	246.46
9	0→13→14→0	例行巡视(13、14)	1	200.28
10	0→1→2→3→0	例行巡视(1、2、3)	1	225.23
11	0→8→12→0	例行巡视(8、12)	3	485.28
12	0→15→16→0	例行巡视(15、16)	1	217.84
13	0→9→11→0	例行巡视(9、11)	1	225.89
14	0→7→6→0	例行巡视(7、6)	1	210.96
15	0→10→0	例行巡视(10)	1	216.46
16	0→13→14→0	熄灯巡视(13、14)	1	200.28
17	0→1→2→3→0	熄灯巡视(1、2、3)	1	225.23
18	0→8→12→0	熄灯巡视(8、12)	1	161.76
19	0→15→16→0	熄灯巡视(15、16)	1	217.84
20	0→9→11→0	熄灯巡视(9、11)	1	225.89
21	0→7→6→0	熄灯巡视(7、6)	1	210.96
22	0→10→0	熄灯巡视(10)	1	216.46
23	0→9→10→0	例行巡视(9、10)	1	262.91
24	0→4→5→0	熄灯巡视(4、5)	1	230.05
25	0→2→0	例行巡视(2)	1	103.90
26	0→2→5→0	例行巡视(2、5)	1	218.58
27	0→5→0	例行巡视(5)	1	152.31
28	0→1→16→0	全面巡视(1、16)	1	262.41
29	0→11→12→0	全面巡视(11、12)	1	258.62
30	0→8→0	全面巡视(8)	1	124.65
31	0→15→0	全面巡视(15)	1	143.72
32	0→2→3→0	全面巡视(2、3)	1	224.65
33	0→4→5→0	全面巡视(4、5)	1	290.05
34	0→13→14→0	全面巡视(13、14)	1	260.28

表 A2 “多队同行”模型优化方案

Table A2 Optimization scheme of “multi-team work together” model

路线序号	巡检路径	巡视类型	路径行驶数/(次/月)	路线总用时/(min/月)
1	0→15→16→15→1→16→1→0	全面巡视(15), 例行巡视(16、1)	1	216.75
2	0→3→2→3→2→0	例行巡视(3、2)	1	119.65
3	0→8→7→8→7→0	例行巡视(8、7)	1	139.16
4	0→6→4→6→4→0	全面巡视(6、4)	1	246.92
5	0→13→14→13→12→14→12→0	例行巡视(13、14), 全面巡视(12)	1	205.98
6	0→5→0	例行巡视(5)	2	304.62
7	0→11→9→11→9→0	例行巡视(11、9)	1	197.17
8	0→10→0	例行巡视(10)	2	432.92
9	0→12→13→12→13→0	例行巡视(12、13)	1	119.19
10	0→1→15→1→15→0	例行巡视(1、15)	1	122.33
11	0→3→5→3→5→0	例行巡视(3、5)	1	176.41
12	0→8→9→8→7→9→7→0	例行巡视(8、9、7)	1	207.95
13	0→2→16→2→16→0	全面巡视(2), 例行巡视(16)	1	195.96
14	0→14→11→14→11→0	例行巡视(14、11)	1	207.22
15	0→4→6→4→6→0	例行巡视(4、6)	2	493.84
16	0→8→9→8→7→9→7→0	例行巡视(8、7), 全面巡视(9)	1	229.98
17	0→1→15→1→15→0	熄灯巡视(1、15)	1	122.33
18	0→16→2→16→2→0	熄灯巡视(16、2)	1	192.19
19	0→12→13→12→13→0	熄灯巡视(12、13)	1	119.19
20	0→14→11→14→11→0	熄灯巡视(14、11)	1	207.22
21	0→3→5→3→5→0	熄灯巡视(3、5)	1	176.41
22	0→10→0	熄灯巡视(10)	1	216.46
23	0→12→13→12→13→0	例行巡视(12), 全面巡视(13)	1	149.19
24	0→2→3→2→1→3→1→0	例行巡视(2), 全面巡视(3、1)	1	194.48
25	0→8→9→8→7→9→7→0	熄灯巡视(8、9、7)	1	207.95
26	0→15→16→15→16→0	例行巡视(15), 全面巡视(16)	1	203.00
27	0→5→6→5→6→0	例行巡视(5), 熄灯巡视(6)	1	187.80
28	0→14→11→14→11→0	全面巡视(14、11)	1	216.90
29	0→10→0	全面巡视(10)	1	246.46
30	0→4→0	熄灯巡视(4)	1	182.03
31	0→2→0	例行巡视(2)	2	207.80
32	0→5→7→5→7→0	全面巡视(5、7)	1	212.82
33	0→8→0	例行巡视(8)	2	189.30
34	0→12→0	例行巡视(12)	2	191.40
35	0→8→0	全面巡视(8)	1	124.65

表 A3 最优巡检模型优化方案

Table A3 Optimization scheme of the optimal inspection model

路线序号	巡检路径	巡视类型	路径行驶数/(次/月)	路线总用时/(min/月)
1	0→8→7→8→7→0	例行巡视(8、7)	1	139.16
2	0→13→14→13→12→14→12→0	例行巡视(13、14), 全面巡视(12)	1	205.98
3	0→11→9→11→9→0	例行巡视(11、9)	1	197.17
4	0→12→13→12→13→0	例行巡视(12、13)	1	119.19
5	0→8→9→8→7→9→7→0	例行巡视(8、9、7)	1	207.95
6	0→1→15→1→15→0	熄灯巡视(1、15)	1	122.33
7	0→16→2→16→2→0	熄灯巡视(16、2)	1	192.19
8	0→12→13→12→13→0	熄灯巡视(12、13)	1	119.19
9	0→14→11→14→11→0	熄灯巡视(14、11)	1	207.22
10	0→2→3→2→1→3→1→0	例行巡视(2), 全面巡视(1、3)	1	194.48
11	0→5→7→5→7→0	全面巡视(5、7)	1	212.82
12	0→8→0	全面巡视(8)	1	124.65
13	0→15→1→2→0	例行巡视(15、1、2)	2	476.10
14	0→5→4→0	例行巡视(5、4)	2	476.10
15	0→12→8→0	例行巡视(12、8)	1	161.76
16	0→9→0	全面巡视(9)	1	177.28
17	0→14→0	全面巡视(14)	1	185.26
18	0→3→6→0	例行巡视(3、6)	1	223.78
19	0→13→14→0	全面巡视(13), 例行巡视(14)	1	230.28
20	0→11→9→0	例行巡视(11), 熄灯巡视(9)	1	225.89
21	0→10→0	全面巡视(10)	1	246.46
22	0→16→2→0	全面巡视(16), 例行巡视(2)	1	240.96
23	0→15→0	全面巡视(15)	1	143.72
24	0→4→0	全面巡视(4)	1	212.03
25	0→12→11→0	例行巡视(12), 全面巡视(11)	1	228.62
26	0→2→3→0	全面巡视(2), 熄灯巡视(3)	1	194.65
27	0→6→7→0	全面巡视(6), 熄灯巡视(7)	1	240.96
28	0→5→4→0	例行巡视(5), 熄灯巡视(4)	1	230.05
29	0→10→0	例行巡视(10)	2	432.92
30	0→16→0	例行巡视(16)	1	156.80
31	0→8→12→0	例行巡视(8、12)	1	161.76
32	0→6→5→0	例行巡视(6), 熄灯巡视(5)	1	226.17
33	0→3→16→0	例行巡视(3、16)	1	226.28
34	0→6→0	熄灯巡视(6)	1	158.41
35	0→8→10→0	熄灯巡视(8、10)	1	267.00

## 参考文献

- [1] 李明节, 刘宇, 舒治淮, 等. 中国变电站二次系统技术发展趋势分析[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 1-12.  
LI Mingjie, LIU Yu, SHU Zhihui, et al. Development trend of secondary system technology in China's substations[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 1-12.
- [2] 常丽丽, 张菁, 李念超. “双优双调双落地”创建变电运维柔性团队[J]. 中国电力企业管理, 2024(15): 86-88.
- [3] 毛建旭, 贺振宇, 王耀南, 等. 电力巡检机器人路径规划技术及应用综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3009-3024.  
MAO Jianxu, HE Zhenyu, WANG Yaonan, et al. Review of research and applications on path planning technology for power inspection robots[J]. Control and Decision, 2023, 38(11): 3009-3024.
- [4] 胡金磊, 朱泽锋, 林孝斌, 等. 变电站无人机机巡边缘计算框架设计及资源调度方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 425-433.  
HU Jinlei, ZHU Zefeng, LIN Xiaobin, et al. Framework design and resource scheduling method for edge computing in substation UAV inspection[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 425-433.
- [5] 焦嵩鸣, 首云锋, 白健鹏, 等. 变电站巡检无人机分层运动规划方法研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(9): 1975-1984.  
JIAO Songming, SHOU Yunfeng, BAI Jianpeng, et al. Research on hierarchical motion planning method for UAV substation inspection[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1975-1984.
- [6] 刘胜, 张豪, 晏齐忠, 等. 基于 ACO-SA 算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 75-82.  
LIU Sheng, ZHANG Hao, YAN Qizhong, et al. Path planning of inspection robot in substation based on ACO-SA algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 75-82.
- [7] 马松玲, 陈起源, 康佳欢. 基于强化学习的变电站巡检路径规划算法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 103-107, 120.  
MA Songling, CHEN Qiyuan, KANG Jiahuan. Substation inspection path planning algorithm based on reinforcement learning[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 103-107, 120.
- [8] 晋殿卫, 顾则宇, 张志宏. 锂电池健康度和剩余寿命预测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 122-130.  
JIN Dianwei, GU Zeyu, ZHANG Zhihong. Lithium battery health degree and residual life prediction algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 122-130.
- [9] 柯清派, 史训涛, 袁智勇, 等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 144-149, 156.  
KE Qingpai, SHI Xuntao, YUAN Zhiyong, et al. Route planning for substation patrol robot based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 144-149, 156.
- [10] TANG B, HUANG X, MA Y, et al. Multi-source fusion of substation intelligent inspection robot based on knowledge graph: an overview and roadmap[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10.
- [11] 赵崇娟, 朱奕弢, 胡钰莹, 等. 基于改进 A\* 算法的变电站自动巡检路径规划研究[J]. 机械设计, 2024, 41(S1): 153-158.  
ZHAO Chongjuan, ZHU Yitao, HU Yuying, et al. Research on automatic path planning of substation inspection robot based on improved A\* algorithm[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(S1): 153-158.
- [12] 黄博, 胡博, 谢开贵, 等. 计及交通事故影响的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 47-59.  
HUANG Bo, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Electric vehicle path planning and charging navigation strategies considering the impact of traffic accidents[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 47-59.
- [13] WANG Leilei, CI Wenbin, LIU Xinghua, et al. Autonomous global path planning method for substation remote patrol robot[C/OL] // 18th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2022), July 2-3, 2022, China: 1261-1266.
- [14] WU Jianbin, XUE Lei, ZHENG Yuming, et al. Substation digital patrol route optimization based on differential evolution particle swarm optimization[C] // 2023 4th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM), May 26-28, 2023, Nanjing, China: 522-525.
- [15] 孙淑琴, 祁鑫, 袁正海, 等. 基于混沌理论的电力系统微弱谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 76-86.  
SUN Shuqin, QI Xin, YUAN Zhenghai, et al. A weak harmonic detection method for a power system based on chaos theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 76-86.
- [16] 陈智雄, 杨家伟, 肖楠, 等. 基于无线携能传输和多级边缘卸载的空地协作巡检算法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3961-3969.  
CHEN Zhixiong, YANG Jiawei, XIAO Nan, et al. Air-ground cooperative inspection algorithm based on

- Wireless Power Transfer and multi-level edge offloading[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3961-3969.
- [17] 蔡焕青, 付晶, 杨宁, 等. 500 kV 变电站无人机巡检作业安全距离[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3199-3208. CAI Huanqing, FU Jing, YANG Ning, et al. Safe distance of inspection operation by unmanned aerial vehicles in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3199-3208.
- [18] 郑含博, 敬佳兴, 罗晓庆, 等. 基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 119-128. ZHENG Hanbo, JING Jiaying, LUO Xiaoqing, et al. Defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 119-128.
- [19] 李游, 刘卫东, 邓维, 等. 变电站高压设备无人机巡检安全距离确定方法研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 76-84. LI You, LIU Weidong, DENG Wei, et al. Study on safety distance determination method of UAV inspection of high voltage equipment in substation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2023, 42(3): 76-84.
- [20] 束庆霏. 基于改进图论网络算法的双无人机协同巡检路径规划[J/OL]. 无线电工程: 1-11[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.TN.20230517.1136.016.html> SHU Qingfei. Path planning of Dual-UAV cooperative patrol based on improved graph theory network algorithm[J/OL]. Radio Engineering: 1-11[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.TN.20230517.1136.016.html>
- [21] 赵慧敏, 罗贺, 阴酉龙, 等. 面向集合任务的多无人机电力巡检任务分配方法研究[J/OL]. 系统工程理论与实践: 1-23[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20240507.1609.003.html> ZHAO Huimin, LUO He, YIN Youlong, et al. Research on task allocation method for multiple drones power inspection for collective tasks[J/OL]. Systems Engineering-Theory & Practice: 1-23[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20240507.1609.003.html>
- [22] 徐其春, 郭晨晨, 刘志明, 等. 无人机线路自主巡检的动态轨迹规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 24-31. XU Qichun, GUO Chenchen, LIU Zhiming, et al. Drone autonomous inspection method for transmission line based on dynamic trajectory planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(10): 24-31.
- [23] 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. HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. Review of electric power intelligent inspection robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 26-38.
- [24] 卫春峰, 殷展, 陈冠, 等. 考虑通行时间的大量变电站巡视路径两阶段规划[J]. 电力学报, 2023, 38(2): 110-116. WEI Chunfeng, YIN Zhan, CHEN Guan, et al. Two stage planning of patrol routes for a large number of substations considering traffic time[J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(2): 110-116.
- [25] ZOLFI K. Gold rush optimizer: a new population-based metaheuristic algorithm[J]. Operations Research and Decisions, 2023, 33(1): 113-150.
- [26] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [27] 张丽, 李世情, 艾恒涛, 等. 基于改进 Q 学习算法和组合模型的超短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 143-153. ZHANG Li, LI Shiqing, AI Hengtao, et al. Ultra-short-term power load forecasting based on an improved Q-learning algorithm and combination model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 143-153.
- [28] 徐艳春, 蒋伟俊, 汪平, 等. 考虑暂态电压稳定的含高渗透率风光的电网动态无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 79-88. XU Yanchun, JIANG Weijun, WANG Ping, et al. Dynamic reactive power planning method for power grid with high permeability wind power and photovoltaic considering transient voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 79-88.
- [29] 张志文, 刘伯威, 张继园, 等. 麻雀搜索算法-粒子群算法与快速扩展随机树算法协同优化的智能车辆路径规划[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 993-999, 1009. ZHANG Zhiwen, LIU Bowei, ZHANG Jiyuan, et al. Cooperative optimization of intelligent vehicle path planning based on PSO-SSA and RRT[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 993-999, 1009.

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-11-19

作者简介:

蒋伟俊(1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新型电力系统暂态电压评估与控制、变电站运行维护新技术。E-mail: 980094945@qq.com

(编辑 魏小丽)