

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205085

# 面向表计读数的变电站巡检机器人路径规划\*

童泉军<sup>1,2</sup> 陈洋<sup>1,2</sup> 路浩<sup>3</sup> 熊凌<sup>1,2</sup> 程磊<sup>1,2</sup>

(1. 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心 武汉 430081; 2. 武汉科技大学机器人与智能系统研究院 武汉 430081; 3. 国电南京自动化股份有限公司 南京 211100)

**摘要:**将巡检机器人应用于变电站内的表计自动读数可以降低人力成本、提高工作效率,但由于仪表通常悬挂在高处,为了获取准确的读数,机器人观测时的位姿受到苛刻的约束。此外,机器人读数时云台调整时间消耗大大降低了巡检效率。针对此问题,本文通过分析观测窗约束、路网约束,以及云台姿态调整时间消耗,以机器人完成巡检任务的总时间为代价,建立了面向表计读数的机器人路径规划模型。然后,提出一种信息素重利用的蚁群优化算法以求解机器人的巡检路径与停靠方案。仿真实验表明本文方法得到的巡检路径在时间消耗上比初始时间代价节省了66%,从而验证了模型的有效性与算法的可行性。

**关键词:** 变电站巡检机器人; 路径规划; 观测窗; 信息素重利用; 蚁群优化算法

**中图分类号:** TP242.6; TN830.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Path planning of substation inspection robot for meter reading

Tong Xiaojun<sup>1,2</sup> Chen Yang<sup>1,2</sup> Lu Hao<sup>3</sup> Xiong Ling<sup>1,2</sup> Cheng Lei<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Detecting Technology of Ministry of Education, Wuhan 430081, China; 2. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Applying the inspection robot to the automatic reading of the meter in the substation can reduce the labor cost and improve the work efficiency, but because the instrument is usually suspended in the high place, the posture of the robot is severely restricted in order to obtain accurate reading. In addition, the time consumption of PTZ adjustment during robot reading greatly reduces the inspection efficiency. In order to solve this problem, by analyzing the observation window constraint, the route map constraint, and the time consumption of PTZ adjustment, at the cost of the total time for the robot to complete the inspection task, a robot path planning model for meter reading is established. Then, an ant colony optimization algorithm based on pheromone reuse is proposed to solve the inspection path and parking scheme of the robot. Simulation results show that the time consumption of the inspection path obtained by this method is 66% less than the initial time cost, thus verifying the effectiveness of the model and the feasibility of the algorithm.

**Keywords:** substation inspection robot; path planning; observation window; pheromone reuse; ant colony optimization algorithm

## 0 引言

变电站是各级电网的核心枢纽,对站内设备例行巡检是保证电网安全运行的关键技术手段<sup>[1]</sup>。传统的变电站巡检采用人工定时定点抄表的方式,劳动强度大,巡检

效率低下,检测质量没有保障。智能机器人的应用为变电站巡检提供了新的方式。变电站巡检机器人通过搭载各类传感器,可以代替人工对站内电气仪表进行自动识别与自动读数。然而,要想实现正确识别和准确的读数,巡检机器人的位置和姿态通常受到各种限制<sup>[2]</sup>。

文献[3]提出的基于四轮平台的室内变电站巡检机

收稿日期: 2022-01-05 Received Date: 2022-01-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62173262, 62073250, 62003249)、湖北省重点研发计划(2020BAB021)、辽宁省联合基金机器人学国家重点实验室开放基金(2021-KF-22-14)项目资助

器人能够在狭窄的室内环境中实现无轨自主定位和精确导航。特别地,该机器人搭载了作业半径高达 3.5 m 的视觉伺服机械臂,可用于读取在狭窄与高空等复杂区域的电气仪表。文献[4]将搭载了云台变焦相机的巡检机器人作为试验平台,提出了一种用于变电站指针式仪表读数自动化检测和识别的系统。该系统综合应用了快速卷积网络,特征对应以及透视变换等方法,可以实时自动检测电气仪表的位置并读取示数。文献[5]研发的适用于变电站设备巡检的机器人系统,由轮式移动机器人和数据中心组成。该移动机器人可以在预定的停靠点停靠并转动云台以获取图像和温度信息。不足的是,需要事先在变电站内铺设多个地标用以指导机器人导航。

路径规划是变电站巡检机器人执行巡检任务的重要环节,其优劣程度影响到整个巡检任务的效率<sup>[6-7]</sup>。本文以“变电站环境下自主识别表计读数”为应用背景,以“面向仪表示数监测<sup>[8]</sup>”的巡检机器人路径规划”为研究对象,进而求取机器人的巡检路径和停靠位置序列。

文献[9]研究了多移动机器人的变电站巡检问题,提出了一种改进的生物激励神经网络方法。基于该方法设计的多机器人协同巡检系统在执行特殊巡检和例行巡检等任务时,能够有效缩短路径长度和转弯次数,体现出明显的优化效果。在给定输电路线和工作时长受限的情况下,文献[10]研究出针对任务分配的最小巡检小组数目的理论值。在此基础上,结合改进的 K-means 算法和蚁群算法提出了一种最小化巡检小组数目与巡检路径的求解框架,为车辆路径问题和旅行商问题等提供了新的解决思路。在工业巡检环境中,为给多机器人系统下的每个机器人分配最佳的任务数量以及规划出最优巡检路径,文献[11]分别以巡检的总距离最短和总时间最小为目标建立模型,利用遗传算法和 A\* 算法进行求解。文献[12]研究了路网约束下无人机与地面车协作路径规划问题,为地面巡检机器人系统中的路径规划问题提供了新的解决思路。文献[13]在无人机监视问题中考虑了成像时间和拍摄角度,为地面巡检机器人对仪表进行观测提供了新的解决思路,尽管它在理论上与地面巡检机器人对仪表进行观测具有相似之处,但是却没有考虑地面路网对机器人运动的限制这一问题。文献[14]考虑地面机器人在路网中对目标点测温时的位姿约束,基于图论对变电站环境进行建模,建立了以巡检时间最小为目标的路径规划模型,为变电站巡检机器人在路网和观测位姿约束下对仪表进行观测提供了重要的指导意义。

现有文献中,变电站巡检机器人路径规划问题大多数以行驶距离或行驶时间为优化指标。与作者前期的研究<sup>[14]</sup>相比,本文的主要创新工作包括:

1) 以表计巡检为主要任务,首次提出了仪表检测的观测窗约束,并以提高巡检效率为目标建立了路径规划

模型。

2) 考虑了云台姿态调整过程中的时间消耗,通过减少该消耗,进一步提高巡检效率。

3) 提出了一种信息素重利用的蚁群优化算法,通过重新设计启发函数和引入自适应概率因子,对状态转移过程进行调节,增强了蚂蚁探索的针对性与多样性。同时,通过重新定义最优解来设计全局信息素更新策略,使有效信息得到充分的利用。

## 1 问题描述与约束分析

### 1.1 问题描述

为了对压力、液位等参数进行检测,变电站内安装了大量仪表,通常竖直固定于立柱或设备高处。为方便观测和维护,安装时仪表大多与地面平行且略向下倾斜<sup>[15]</sup>。为了保证设备安全,机器人只能在变电站内已知的道路网络中运动。图 1(a)中机器人停靠在路网中对变压器油位计和油温计进行读数。机器人对仪表进行观测时,从两个方面考虑提高读数的准确性,一是机器人读数时必须到达最佳观测位置并停止运动,二是读数相机须调整到最佳姿态(通常倾斜向上)。一般而言,当读数相机位于仪表正对面或附近区域时才能获得准确读数,本文将这种区域称为观测窗。由于读数相机固联在机器人云台上,因此减少云台姿态的调整时间便可以提高巡检效率。机器人每次停靠时,应当在满足观测窗约束的前提下对尽可能多的表计进行读数,以节省机器人停靠和云台调整时间。因此,机器人每次停靠便可以完成一组表计的读数。文中使用的变电站地图<sup>[14]</sup>如图 1(b)所示。其中实线表示该变电站的道路网络。

综上所述,巡检机器人路径规划问题可以描述为:考虑云台调整时间消耗和观测窗约束以及路网对机器人运动的限制,以完成巡检任务总时间最短为目标,合理规划出一条使得巡检时间达到最小的路径,同时计算出巡检机器人的停靠位置序列和各个停靠点对应的仪表。

图 2 为机器人巡检示意图。假设无向图  $G = \{V, E, W\}$  表示某变电站道路网络,其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ , 道路结点  $v_i \in \mathbb{R}^{1 \times 2}, i = 1, 2, \dots, N, N$  代表变电站内道路结点总数目。 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ , 其中  $e_{i,j} = (v_i, v_j) \subset E$  表示结点  $v_i, v_j$  之间构成的路段。 $W$  表示路段的权值矩阵,本文中为表示机器人连续运动经过此路段所花费的时间。假设机器人执行仪表观测任务时,经过的闭合路径  $C = \{v'_1, v'_2, \dots, v'_N\} \subset V$ , 组成该路径的边为  $e_{i',i'+1} = (v'_{i'}, v'_{i'+1}) \subset E$ , 其中  $i' = 1, 2, \dots, N' - 1$ 。仪表为  $A_i \in A$  (仪表  $A_i$  在水平面的投影为  $a_i$ ),  $i = 1, 2, \dots, I, I$  表示变电站内待观测的电气仪表总数目,  $A$  表示电气仪表总集合。将机器人执行仪表观测任务时的停靠点记为  $s_k \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ ,

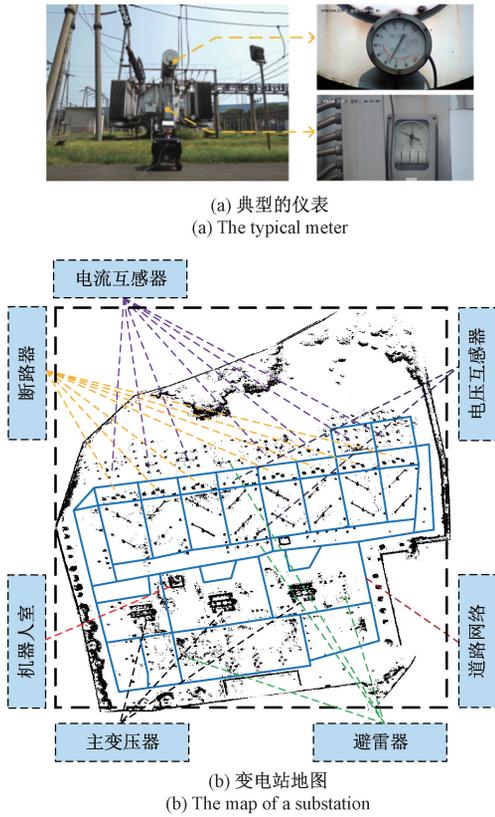


图 1 变电站环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of substation environment

于是机器人执行任务时的停靠位置序列可以记为  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ , 其中  $K$  表示停靠总次数。

假设机器人在边  $e_{i,j} = (v_i, v_j)$  上可以实施有效观测的<sup>[16]</sup>仪表数目记为  $\sigma_{i,j}$ 。在闭合路径的整个巡检过程中, 机器人行驶距离  $L$  由式(1)计算, 机器人能实施有效观测的仪表数目之和  $\Gamma$  由式(2)计算。

$$L = \sum_{i'=1}^{N'-1} |e_{i',i'+1}| \quad (1)$$

$$\Gamma = \sum_{i'=1}^{N'-1} \sigma_{i',i'+1} \quad (2)$$

式中: 符号  $| \cdot |$  表示求边长。

由于机器人随时可以在路段上停靠, 本文通过对路段均匀插值, 获得离散化路径点, 并将其作为机器人停靠的候选结点。假设相邻两个离散路径点之间的最小距离为  $l_L$ , 离散路径点的坐标按访问顺序依次储存在  $L \in \mathbb{R}^{D \times 2}$  中, 其中  $D$  为闭合路径中包含的离散路径点数目。

**定义 1** 二值逻辑邻接矩阵  $\alpha \in \mathbb{R}^{N \times N}, \alpha_{i,j} \in \{0, 1\}$  表示机器人能够访问各个道路结点的决策过程。

仅当两个道路结点相邻时,  $\alpha_{i,j} = 1$ 。其他情况下,  $\alpha_{i,j} = 0$ 。因此二值变量由式(3)计算。

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1, v_i \text{ 与 } v_j \text{ 相邻} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

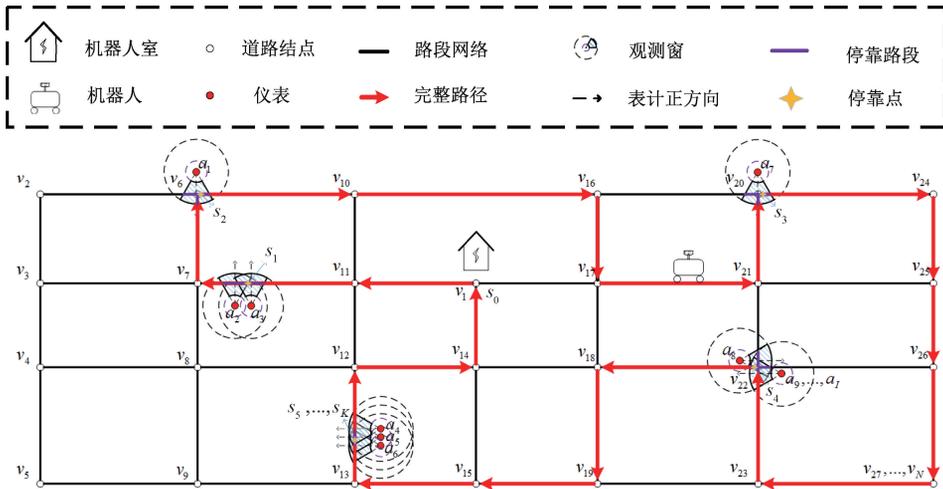


图 2 机器人巡检示意图

Fig. 2 Schematic diagram of robot inspection

对于  $\forall i, j = 1, 2, \dots, N$  均成立。

**定义 2** 在闭合路径的整个巡检过程中, 如果机器人能实施有效观测的仪表数目之和等于仪表总数目, 即

$\Gamma = I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j} \sigma_{i,j}$ , 则称该巡检路径为完整路径, 记为  $C'$ 。

### 1.2 位姿约束

拍摄仪表图像时, 相机的姿态需要借助于巡检机器人的云台系统进行调节, 而相机的位置则依靠机器人的底盘运动来调节。因此, 巡检机器人的位姿约束包括云台俯仰角约束和相机最大视距约束。

设相机安装位置离地高度为  $H$ , 仪表离地高度为  $h$ , 记为  $A_i(x_i, y_i, \theta)$ 。为方便理解, 将机器人执行仪表观测任务的过程简化, 如图 3(a) 所示。其中, 云台可实现方位轴  $(-\pi, \pi)$  旋转、俯仰轴  $(0, \zeta_{\max})$  旋转,  $\zeta_{\max}$  表示相机在云台机械结构约束下的最大俯仰角度<sup>[17]</sup>, 其中  $0 < \zeta_{\max} < \frac{\pi}{2}$ 。  $d_{\max}$  表示相机在满足观测质量要求下<sup>[18]</sup> 的最大视距。  $\rho_i$  表示机器人的停靠点  $s_k$  与待观测的仪表  $A_i$  之间的水平距离, 即  $\rho_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ 。

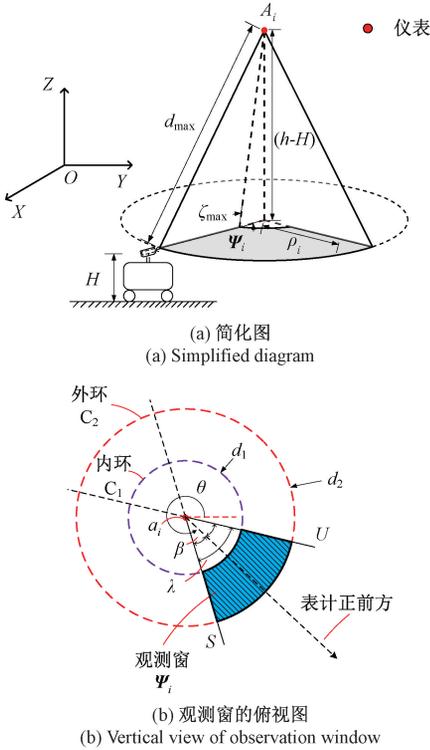


图 3 与目标点成像相关的关键参数

Fig. 3 Illustration of key imaging parameters associated target

综上所述, 云台俯仰角和相机视距分别需要满足以下约束:

$$\arctan\left(\frac{h - H}{\rho_i}\right) \leq \zeta_{\max} \quad (4)$$

$$\sqrt{\rho_i^2 + (h - H)^2} \leq d_{\max} \quad (5)$$

其中, 式(4)和(5)分别表示机器人需要在云台机械结构约束下, 相机的最大视距内对仪表进行观测。易得,  $\rho_i$  的取值范围如式(6)所示。

$$d_1 \leq \rho_i \leq d_2 \quad (6)$$

其中,  $d_1 = \frac{h - H}{\tan \zeta_{\max}}$ ,  $d_2 = \sqrt{d_{\max}^2 - (h - H)^2}$ , 均为由机器人参数决定的常量。

### 1.3 观测窗约束

为了分析 1.1 节提出的观测窗约束, 本文采用扇形圆环来近似从仪表发出的观测区域, 如图 3(b) 中阴影部分所示。其中  $\beta$  表示仪表观测窗边缘直线与它正前方之间的夹角, 仪表观测窗的角度  $\lambda = 2\beta$ 。

**定义 3** 仪表观测窗  $\Psi_i$ , 表示机器人对仪表  $A_i$  进行观测时需要满足的观测方位约束。

**定义 4** 设逆时针旋转为正, 把从平面直角坐标系  $x$  轴的正半轴旋转到仪表正前方经过的角度称为方位角, 其取值范围  $[-\pi, \pi]$ , 如图 3(b) 中的  $\theta$  所示。

不失一般性, 变电站环境下仪表的方位角是有可能朝向各个方向的。在地面参考坐标系下, 仪表  $A_i$  的观测窗边缘直线  $a_i S$  与另一条边缘直线  $a_i U$  的表达式如式(7)和(8)所示。

$$z_1(x, y) = \tan(\theta - \beta)(x - x_i) - (y - y_i) = 0 \quad (7)$$

$$z_2(x, y) = \tan(\theta + \beta)(x - x_i) - (y - y_i) = 0 \quad (8)$$

当仪表  $A_i$  的方位角取不同值时, 结合式(6)~(8), 仪表  $A_i$  的观测窗的表达式如式(9)所示。

$$\Psi_i = \left\{ (x, y) \left\{ \begin{array}{l} z_1(x, y) < 0, z_2(x, y) > 0, d_1 \leq \rho_i \leq d_2, \theta \in [-\lambda, \lambda]; \\ \text{或 } z_1(x, y) < 0, z_2(x, y) < 0, d_1 \leq \rho_i \leq d_2, \theta \in (\lambda, 2\lambda]; \\ \text{或 } z_1(x, y) > 0, z_2(x, y) < 0, d_1 \leq \rho_i \leq d_2, \theta \in ((2\lambda, \pi] \cup [-\pi, -2\lambda)); \\ \text{或 } z_1(x, y) > 0, z_2(x, y) > 0, d_1 \leq \rho_i \leq d_2, \theta \in [-2\lambda, -\lambda) \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

上述分析表明, 仅当机器人位于观测窗时才能对仪表进行有效观测。

### 1.4 停靠点求取分析

为了分析机器人位于观测窗内的具体停靠位置, 本文以完成云台姿态调整的时间消耗为代价函数, 建立停靠位置求解模型。

**定义 5** 机器人第  $k$  次停靠时对仪表进行观测的过程中, 云台姿态调整转动的角度集合记为  $\Phi_k(\varphi)$ 。

$$\mathbf{A}_s(k) \neq \emptyset \quad (10)$$

式(10)表示机器人第  $k$  次停靠时必须能够观测到仪表。

$$\bigcup_{k=1,2,\dots,K} \mathbf{A}_s(k) = \mathbf{A} \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{A}_s(k)$  表示机器人位于停靠点  $s_k$  处观测的仪表集合, 式(11)表示机器人必须巡检全部的仪表。

$$\mathbf{B}_k \subseteq \left( \bigcap_{A_i \in \mathbf{A}_s(k)} \Psi_i \right) \cap \mathbf{L} \quad (12)$$

其中,  $\bigcap_{A_i \in \mathbf{A}_s(k)} \Psi_i$  表示机器人第  $k$  次停靠时可以观测到的所有仪表对应的观测窗之间的交集。  $\mathbf{B}_k$  表示机器人第  $k$  次停靠对应的离散路径点集合。

为了求取最优的停靠位置序列,考虑到云台姿态调整转动的角度与云台姿态调整转动的的时间消耗是成正比的,因此可以将时间最小化转化为角度最小化,进而将最优的角度对应的停靠点纳入到机器人的停靠位置序列当中。

$$\begin{aligned} \min \quad & \Phi_k(\varphi) \\ \text{s. t.} \quad & A_s(k) \neq \emptyset \\ & B_k \neq \emptyset \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)表示依次计算出机器人位于  $B_k$  中每一个离散点处的云台调整值,并将它们储存在  $\Phi_k(\varphi)$  中,然后从中选取最小的云台调整角度值  $\Phi_k^*(\varphi)$  对应的离散点作为停靠点。于是,以上所有停靠点便构成了机器人执行任务时的停靠位置序列。

## 2 机器人巡检路径规划模型

传统的最优路径模型通常采用行驶距离或行驶时间作为优化指标,忽略了机器人启停和云台调整(以下均指机器人位于停靠点观测仪表时的云台调整)对巡检过程带来的影响。为了建立贴近实际情况的路径规划模型,本文通过对上述巡检影响因素的分析,考虑启停时间与云台调整时间消耗。

### 2.1 模型假设

对于模型中影响机器人巡检的因素做出如下假设:

假设 1 各个仪表离地高度一致。

假设 2 各道路结点及各边在竖直轴上的投影坐标均为  $\theta$ ,即变电站地面平整,无坡度。

假设 3 机器人在不同的停靠路段之间运动的过程中,云台可以完成姿态调整和准备工作,即自动对准下一个停靠点对应的仪表集合内的第一个目标点。

### 2.2 模型建立

以完成巡检任务总时间为代价函数,建立相应的目标函数。总的巡检时间  $f$  可依机器人是否停靠的情况,分为两部分:1) 机器人停靠下来后执行拍摄任务的时间由机器人当次停靠与再次启动之间消耗的启停时间之和  $\delta K$  与云台调整转动的的时间之和  $\frac{1}{a} \sum_{k=1}^K \Phi_k(\varphi)$  组成,其中  $\delta$  表示启停时间常数,  $a$  表示云台旋转平均角速度。

2) 机器人的行驶时间  $\frac{L}{v}$ ,其中  $v$  表示机器人的平均行驶速度。于是目标函数如式(14)所示:

$$\begin{aligned} \min f = & \delta K + \frac{1}{a} \sum_{k=1}^K \Phi_k^*(\varphi) + \frac{L}{v} \\ \text{s. t.} \quad & d_1 \leq \rho_i \leq d_2 \\ & A_s(k) \neq \emptyset \\ & B_k \neq \emptyset \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bigcup_{k=1,2,\dots,K} A_s(k) = A$$

综上所述,该路径规划研究的目的可以概括为:求取机器人的最优巡检路径  $C^*$ ,停靠位置序列  $S^* = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$  以及各停靠点对应的测量仪表集合  $A_s(1), A_s(2), \dots, A_s(K)$ 。

## 3 路径规划模型求解

路径规划求解过程中须着重考虑解的构建与更新方法,闭合路径  $C$  是解的主要组成部分,具有路径结点数目不确定的特点,即解的维数不确定。而蚁群优化算法可以通过状态转移规则与禁忌表的设计,实现蚂蚁在路网中寻找路径并构建维度不一的初始解,同时易于将不同解的优劣转化为信息素的强弱,从而影响蚂蚁对路径的选择,并将测量约束贯穿于整个求解过程。

考虑变电站巡检的特殊性,在传统蚁群优化算法研究<sup>[19]</sup>的基础上,提出了一种信息素重利用的蚁群优化算法(pheromone reuse-ant colony optimization, PR-ACO)。通过重新设计启发函数和引入自适应概率因子对状态转移过程进行调节,增强了蚂蚁探索的针对性与多样性,并且通过重新定义最优解来设计全局信息素更新策略,使得有效信息得到充分的利用。路径规划算法流程如图 4 所示。本文中提及的“最优解”如定义 6 所示。

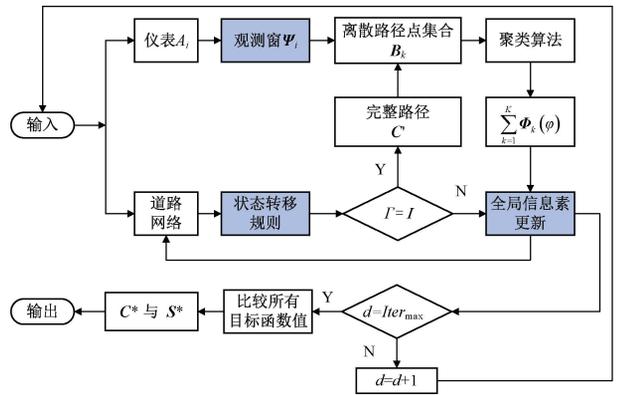


图 4 路径规划算法求解流程

Fig. 4 Solution flow of path planning for inspection robot

其中,  $d$  表示当前迭代次数,  $Iter_{max}$  表示最大迭代次数。

定义 6 在没有找到可行解之前,“最优解”指在当前迭代中,“允许蚂蚁可视仪表数目最多”对应的闭合路径。在找到可行解之后,“最优解”指在当前迭代中,满足“目标函数值最小”对应的完整路径。

值得一提的是,“全局最优解”指所有蚂蚁完成最大迭代次数之后,满足“目标函数值最小”对应的完整路径。

### 3.1 基于 PR-ACO 的路径规划

#### 1) 状态转移规则设计

本文受文献[20]的启发,引入伪随机比例规则作为本文信息素重利用的蚁群优化算法的一部分内容,通过此方法可以使得蚂蚁搜索具有多样性、选择路径时具有针对性。设蚁群中的蚂蚁数量为  $M$ ,第  $m$  只蚂蚁从结点  $v_i$  转移到结点  $v_j$  的概率如式(15)所示。

$$P_{i,j}^m = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(d)]^\mu [\eta_{i,j}(d)]^\gamma}{\sum_{p \in allow_m} [\tau_{i,p}(d)]^\mu [\eta_{i,p}(d)]^\gamma}, & j \in allow_m \\ 0, & j \notin allow_m \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $m = 1, 2, \dots, M$ 。 $\mu$  表示信息素重要程度因子,  $\gamma$  表示启发函数因子。 $allow_m$  表示第  $m$  只蚂蚁即将访问的结点集合。 $\tau_{i,j}(d)$  为信息素浓度函数。本文受文献[21]启发,为了保证蚁群优化算法能够求解出可行解,于是需要引导蚁群朝着“机器人的行驶路径短,并且在闭合路径的巡检过程中,机器人可以观测到的仪表数目尽量多”这一方向进行迭代,因此本文重新设计了启发函数  $\eta_{i,j}(d)$ ,该启发函数如式(16)所示。

$$\eta_{i,j}(d) = \frac{1}{|e_{i,j}|} + b\sigma_{i,j} \quad (16)$$

其中,  $b \in (0, 1)$  为常系数。

本文引入参数  $q_0$ ,用来平衡探索新路径与利用已有信息之间的相对重要程度<sup>[22-23]</sup>。

$$j = \begin{cases} \arg \max_{p \in allow_m} \{ [\tau_{i,p}(d)]^\mu [\eta_{i,p}(d)]^\gamma \}, & q \leq q_0 \\ J, & q > q_0 \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $q \in [0, 1]$  是随机数,  $q_0$  是“目标函数”与“迭代次数”构建的自适应概率因子,如式(18)所示。 $J$  为从“按照式(15)给出的概率分布”中选择最大概率值对应的节点。式(17)即称为伪随机比例规则。

$$q_0 = \begin{cases} \left[ \operatorname{sech} \left( \frac{f_{low}}{f_0} \right) \right]^{\frac{Iter_{max}-d}{Iter_{max}}}, & C' |_{d-1} \neq \emptyset \text{ 且 } d \neq 1 \\ \left[ \operatorname{sech}(1) \right]^{\frac{Iter_{max}-d}{Iter_{max}}}, & C' |_{d-1} = \emptyset \text{ 或 } d = 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $f_{low}$  表示上一代可行解中最大的目标函数值,

$f_0 = \delta l + L_0/v$  表示初始目标函数值,  $L_0 = \sum_i \sum_j \alpha_{i,j} |e_{i,j}|$  表示所有路段的长度总和。 $y = \operatorname{sech}(x)$  表示双曲正割函数,该函数值域为  $(0, 1]$ ,并且在  $(0, +\infty)$  上严格单调递减。 $C' |_{d-1} \neq \emptyset$  表示上一代蚁群搜寻结果中存在可行解,同理,  $C' |_{d-1} = \emptyset$  表示上一代结果中不存在可行解。

在 PR-ACO 没有求解出可行解之前,随着迭代次数的增加,自适应概率因子  $q_0$  的底数不变,指数逐渐减小,因此  $q_0$  在缓慢增大,这时 PR-ACO 仍然能够以比较大的概率去探索新路径,如此一来便增强了蚂蚁探索的多样性。然而,在 PR-ACO 找到可行解之后,随着迭代次数的增加,  $q_0$  的底数在  $(0, 1)$  中逐渐增大,指数逐渐减小,因此  $q_0$  增大的速率在加快,这时 PR-ACO 将以比较大的概率去利用可行解对应的有效信息,如此一来便增强了蚂蚁探索的针对性。

#### 2) 全局信息素更新策略设计

本文受文献[24]的启发,当全部蚂蚁完成一次循环之后,各个路径上的信息素浓度根据如下策略进行迭代更新。

从传统蚁群算法的思想<sup>[19]</sup>中不难了解到,伪可行解(指定义6中“算法未求解出可行解”条件下的最优解)是不能用于全局信息素更新的,为了避免蚁群优化算法陷入到“迭代结束后都没能求解出可行解”的状况,于是本文提出了“将伪可行解对应的路径信息利用起来”这一想法,如式(19)~(20)所示。

综上所述,使用 PR-ACO 求解本文路径规划问题的流程如算法1所示。

算法1 PR-ACO

```

Input:  $V, A, \alpha$ 
Output:  $C^*, S^*$ 
1: Initialize all parameters
2: for each  $d$  do
3: //State transition rules
4: for each  $m$  do
5: if  $q_0 < q$  then
6:  $j \leftarrow J$ 
7: else
8:  $j \leftarrow \arg \max \{ [\tau_{i,p}(d)]^\mu [\eta_{i,p}(d)]^\gamma \}, p \in allow_m$ 
9: end if
10: end for
11: return all  $\Gamma$ 
12: //Global pheromone updata
13: if  $\Gamma \neq I$  then
14:  $\tau_{i,j}(d+1) \leftarrow (1-\rho)\tau_{i,j}(d) + c\Delta\tau_{i,j}(d)$ 
15: else16: return  $C'$ ; then
17: do "Clustering Algorithm" then
18: return  $K; S; A_s(k), \Phi_k(\varphi), \forall k = 1, 2, \dots, K$ 
19:  $\tau_{i,j}(d+1) \leftarrow (1-\rho)\tau_{i,j}(d) + c\Delta\tau_{i,j}(d)$ 
20: end if
21: end for
22: while  $d = Iter_{max}$  do
23: Compare all  $f$ 
24: end while
25: return  $C^*, S^*$ 
    
```

(1) 如果在当代所有蚂蚁搜寻的结果中不存在可行解,则全局信息素更新策略按式(19)~(20)进行。

$$\tau_{i,j}(d+1) = (1 - \rho) \tau_{i,j}(d) + c\Delta \tau_{i,j}(d) \quad (19)$$

$$\Delta \tau_{i,j}(d) = \begin{cases} g \frac{\Gamma_{\max|d}}{I}, & e_{i,j} \subset L \\ 0, & e_{i,j} \not\subset L \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{其中, } c = \begin{cases} \frac{\rho}{\frac{r_{\max|d} - r_{\max|d-1}}{\Gamma_{\max|d}}}, & d = 1 \\ \rho, & d \neq 1 \end{cases}, c \in (0, 1]。 g =$$

$$\begin{cases} 1.0, & \Gamma_{\max|d} \neq \Gamma_{\max|d-1} \text{ 或 } d = 1 \\ (1 + \rho) \frac{r_{\max|d}}{I}, & \Gamma_{\max|d} = \Gamma_{\max|d-1} \text{ 且 } d \neq 1 \end{cases}, \Gamma_{\max|d=1} \text{ 表}$$

示第 1 代蚂蚁可视的最大仪表数目,  $\Gamma_{\max|d}$  表示当代蚂蚁可视的最大仪表数目,  $\Gamma_{\max|d-1}$  表示上一代蚂蚁可视的最大仪表数目。

(2) 如果当前代蚂蚁搜寻的结果中存在可行解,那么全局信息素更新将按式(21)~(22)进行。

$$\tau_{i,j}(d+1) = (1 - \rho) \tau_{i,j}(d) + \Delta \tau_{i,j}(d) \quad (21)$$

$$\Delta \tau_{i,j}(d) = \begin{cases} \frac{Q}{f_{\min|d}}, & e_{i,j} \in L \\ 0, & e_{i,j} \notin L \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $Q$  是常系数,  $f_{\min|d}$  表示当代可行解中最小的目标函数值。

### 3.2 基于贪婪思想的停靠方案

在蚂蚁获得一条完整路径后,便可以对仪表进行聚类,以便获得机器人在该路径下的停靠位置序列。本文基于贪婪思想<sup>[25]</sup>将满足观测窗约束的仪表分成多类。聚类算法的实现流程如算法 2 所示。

算法 2 Clustering Algorithm

```

Input:  $C'; L, \Psi_i, \forall i = 1, 2, \dots, N^*$ 
Output:  $K; S; A_s(k), \Phi_k(\varphi), \forall k = 1, 2, \dots, K;$ 
1: Initialize  $A$ 
2: for each  $i, j, \forall i, j = 1, 2, \dots, N^*, j > i$  do
3:    $B_i \leftarrow \Psi_i \cap L; B_j \leftarrow \Psi_j \cap L$ 
4:    $B_{i,j} \leftarrow B_i \cap B_j; |B_{j,j1}| \geq |B_{i,j2}| \geq \dots \geq |B_{i,jZ}|, Z = N^* - 1;$ 
5:   if  $|B_{i,j1}| = 0$  then
6:     return  $A_s(k) = \{A_i\}$ 
7:   else
8:      $r^* \leftarrow (\bigcap_{r=1}^Z B_{i,j_r}) \neq \emptyset$ 
9:     return  $A_s(k) = \{A_i, A_{j1}, \dots, A_{j_r^*}\};$ 
10:    $B_k \leftarrow (\bigcap_{A_i \in A_s(k)} \Psi_i) \cap L$ 
11:   end if
12: end for
    
```

```

13:  $A \leftarrow A - A_s(k); // \text{Update } A$ 
14: repeat
15: while  $A = \emptyset$  do
16:   return  $K; A_s(k), B_k, \forall k = 1, 2, \dots, K;$ 
17: end while
18:  $// \text{Solve Parking Sequence}$ 
19: for each  $k$  do
20:   if  $|A_s(k)| = 1$  then
21:      $s_k \leftarrow B_k(\lceil \frac{\chi+1}{2} \rceil); // \chi = |B_k|$ 
22:   else
23:      $u^* \leftarrow \min\{\varphi(u), \forall u = 1, 2, \dots, \chi\};$ 
24:      $s_k \leftarrow B_k(u^*);$ 
25:   end if
26: end for
27: while  $k = K$  do
28:   break
29: end while
30: return  $K; S = \{s_k | \forall k = 1, 2, \dots, K\}; A_s(k), \Phi_k(\varphi), \forall k = 1, 2, \dots, K$ 
    
```

在获得类别总数  $K$ 、仪表集合  $A_s(1), A_s(2), \dots, A_s(K)$  以及对应的离散路径点集合  $B_1, B_2, \dots, B_K$  之后,停靠位置序列的求取方法如下:

1) 当  $|A_s(k)| = 1$  时,为保证观测质量,选择  $B_k$  中的中间一点作为停靠点。

$$s_k = B_k \left( \left\lceil \frac{\chi + 1}{2} \right\rceil \right) \quad (23)$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整函数,  $\chi = |B_k|$ 。

2) 当  $|A_s(k)| \geq 2$  时,选择  $B_k$  中能够满足式(13)的离散点作为停靠点。令  $\Phi_k(\varphi) = \{\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(\chi)\}$ , 云台调整角度值如下所示:

(1) 当  $|A_s(k)| = 2$  时,  $\varphi(u)$  的计算公式如式(24)所示。令  $w(1) = |A_s(k)(1), B_k(u)|, w(2) = |A_s(k)(2), B_k(u)|, t(1) = |A_s(k)(1), A_s(k)(2)|$ 。  $A_s(k)(1)$  表示  $A_s(k)$  中入选的第 1 个仪表。同理,  $A_s(k)(2)$  表示  $A_s(k)$  中入选的第 2 个仪表。  $B_k(u)$  表示  $B_k$  中第  $u$  个离散点。以  $|A_s(k)(1), B_k(u)|$  为例,表示  $A_s(k)$  中入选的第 1 个目标点与  $B_k$  中第  $u$  个离散点之间的距离。

$$\varphi(u) = \arccos \left( \frac{[w(1)]^2 + [w(2)]^2 - [t(1)]^2}{2 \times w(1) \times z(2)} \right) \quad (24)$$

其中,  $u = 1, 2, \dots, \chi$ 。

(2) 当  $|A_s(k)| > 2$  时,同情形(1)类似,  $\varphi(u)$  的计算公式如式(25)所示。

$$\varphi(u) = \sum_{r=1}^{\xi} \left\{ \arccos \left( \frac{[w(r)]^2 + [w(r+1)]^2 - [t(r)]^2}{2 \times w(r) \times w(r+1)} \right) + \arccos \left( \frac{[w(r+1)]^2 + [w(r+2)]^2 - [t(r+1)]^2}{2 \times w(r+1) \times w(r+2)} \right) \right\} \quad (25)$$

其中,  $u = 1, 2, \dots, X, \xi = |A_s(k)| - 2$ 。

### 4 实验分析

根据某钢铁企业变电站实测数据,道路网络由 96 条路段组成,共包含 64 个道路结点以及 123 个仪表。

首先,设置本文模型的参数。相机离地高度  $H = 0.5 \text{ m}$ ,云台最大俯仰角  $\zeta_{\max} = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ ,相机最大视距  $d_{\max} = 15 \text{ m}$ ,机器人平均行驶速度  $v = 0.8 \text{ m/s}$ ,云台旋转平均角速度  $a = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ ,机器人启停时间常数  $\delta = 7 \text{ s}$ ;目

标离地高度  $h = 5 \text{ m}$ ,仪表观测窗的角度  $\lambda = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$ ;初始信息素浓度  $\tau_{i,j}|_{t=0} = 1.0$ ,相邻离散路径点之间的最小距离  $l_L = 0.1 \text{ m}$ ,信息素重要程度因子  $\mu = 1.2$ ,启发函数因子  $\gamma = 1.8$ ,信息素挥发因子  $\rho = 0.3$ ,信息素常数  $Q = 1\ 000$ ,最大迭代次数  $Iter_{\max} = 80$  次,蚂蚁数目  $M = 100$ ,常数  $b = 0.1$ 。

接着,采用 MATLAB R2018a 作为仿真平台,计算得出的最优路径如图 5 所示。其中圆圈表示道路结点,方框表示机器人室,细线段表示路段,空心六角星则表示停

靠点,星号表示仪表,粗线段则表示停靠路段。特别地,加粗大圆圈表示机器人的可视范围。扇形圆环表示仪表的观测窗。带有箭头标识的粗线段表示机器人最终的巡检路径,共经过 42 个道路结点,包含 35 次停靠。

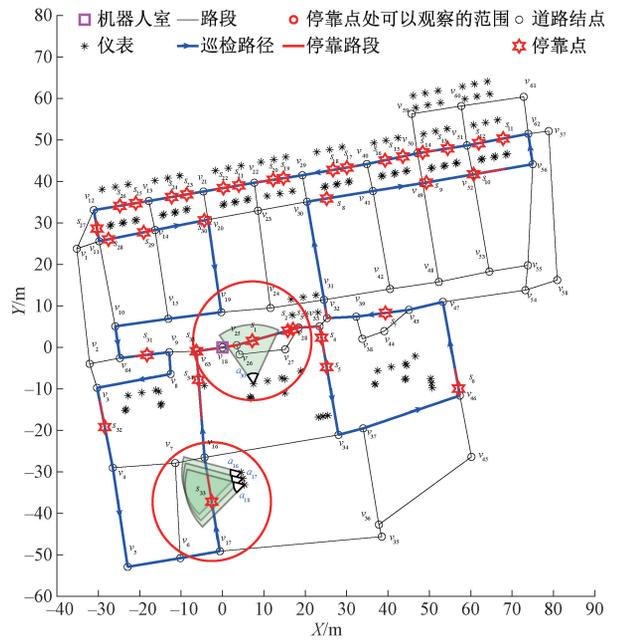


图 5 最优路径规划结果

Fig. 5 The optimal inspection planning result

表 1 最优解对应的停靠位置序列

Table 1 Sparking position sequence corresponding to the optimal path

停靠点/m	对应的仪表集合	停靠点/m	对应的仪表集合
$s_1(7.20, 1.61)$	$A_{30}$	$s_{19}(14.74, 40.79)$	$A_{40}, A_{59}, A_{60}, A_{41}, A_{65}, A_{66}$
$s_2(15.79, 4.04)$	$A_{26}, A_{32}, A_{31}, A_{29}, A_{63}, A_{62}$	$s_{20}(12.26, 40.41)$	$A_{58}, A_{64}$
$s_3(17.05, 4.40)$	$A_{57}$	$s_{21}(3.96, 39.06)$	$A_{21}, A_{111}, A_{110}$
$s_4(23.95, 2.35)$	$A_{61}$	$s_{22}(0.22, 38.42)$	$A_{109}$
$s_5(25.18, -4.74)$	$A_{33}, A_{34}, A_{45}, A_{43}, A_{35}, A_{36}, A_{55}, A_{56}$	$s_{23}(-8.64, 36.90)$	$A_{108}$
$s_6(57.06, -9.91)$	$A_{46}, A_{51}, A_{54}, A_{52}, A_{53}$	$s_{24}(-12.28, 36.26)$	$A_{106}, A_{107}$
$s_7(39.38, 8.32)$	$A_{44}, A_{50}, A_{47}, A_{49}, A_{48}$	$s_{25}(-20.95, 34.78)$	$A_{105}$
$s_8(25.19, 35.90)$	$A_{37}, A_{38}, A_{42}, A_{39}, A_{94}$	$s_{26}(-24.79, 34.14)$	$A_{103}, A_{104}$
$s_9(49.29, 39.75)$	$A_{67}, A_{68}, A_{72}, A_{82}, A_{69}, A_{93}$	$s_{27}(-30.33, 28.66)$	$A_4, A_5$
$s_{10}(60.70, 41.73)$	$A_{79}, A_{80}, A_{81}$	$s_{28}(-27.55, 26.05)$	$A_1, A_2, A_6, A_{100}$
$s_{11}(67.82, 50.35)$	$A_{87}, A_{122}, A_{123}$	$s_{29}(-19.04, 27.75)$	$A_3, A_{101}, A_{102}, A_{97}, A_{98}$
$s_{12}(61.94, 49.24)$	$A_{85}, A_{89}, A_{90}, A_{121}, A_{86}$	$s_{30}(-4.39, 30.63)$	$A_{19}, A_{24}, A_{99}, A_{23}, A_{20}, A_{22}$
$s_{13}(54.44, 47.96)$	$A_{75}, A_{83}, A_{88}, A_{119}, A_{84}, A_{120}$	$s_{31}(-18.23, -1.78)$	$A_8, A_{14}, A_{13}, A_{12}$
$s_{14}(48.39, 47.00)$	$A_{73}, A_{76}, A_{77}, A_{78}, A_{118}, A_{74}$	$s_{32}(-28.44, -19.17)$	$A_7, A_9$
$s_{15}(43.59, 46.05)$	$A_{116}, A_{117}$	$s_{33}(-2.59, -37.16)$	$A_{16}, A_{17}, A_{18}$
$s_{16}(39.29, 45.14)$	$A_{70}, A_{92}, A_{91}, A_{71}, A_{115}$	$s_{34}(-5.77, -7.77)$	$A_{10}, A_{15}, A_{28}, A_{27}, A_{25}$
$s_{17}(30.06, 43.36)$	$A_{95}, A_{96}, A_{114}$	$s_{35}(-6.30, -0.90)$	$A_{11}$
$s_{18}(26.71, 42.78)$	$A_{112}, A_{113}$		

最优路径对应的停靠位置序列以及测量仪表集合,如表 1 所示。以停靠点  $s_1$  与停靠点  $s_{33}$  为例,从表 1 中可知,机器人在停靠点  $s_1$  处仅需对目标点  $A_{30}$  进行观测,即  $A_s(1) = \{A_{30}\}$ 。机器人在停靠点  $s_{33}$  处则需要对  $A_{16}, A_{17}, A_{18}$  一共 3 个目标点进行观测,即  $A_s(33) = \{A_{16}, A_{17},$

$A_{18}\}$ 。与此同时,从图 5 中的“位于停靠点  $s_1$  处的可视范围内包含了目标点  $A_{30}$ ”这一点可看出,仿真结果与实际情况相符。同样地,可以清楚地看到停靠点  $s_{33}$  可视范围内包含了目标点  $A_{16}, A_{17}, A_{18}$ ,由此进一步地验证了模型的有效性与算法的可行性。

图6为最优解对应的迭代过程曲线。其中包含了路径长度曲线、平均云台调整角度值曲线、停靠次数曲线以及三者加权得到的最小时间代价曲线。最优解对应的路径长度  $L^* = 577.8 \text{ m}$ , 平均云台调整角度值  $\frac{1}{K^*} \sum_{k=1}^{K^*} \Phi_k^*(\varphi) = 125.7^\circ$ , 停靠次数  $K^* = 35$  次, 巡检时间  $f^* = 1407.5 \text{ s}$ , 该最优巡检时间  $f^*$  相比于初始目标函数值  $f_0$  (初始巡检时间) 节省了 66%。

在迭代初期, PR-ACO 并没有立即求解出一条完整路径, 根据 3.1 节 2) 中可知, 在“允许尽可能多地访问目标点”的路径下, 信息素累积量逐渐增加; 相反地, 那些“允许访问目标点数目少”的路径中留下的信息素将越来越小。因此, 算法迭代至第 3 代时才出现可行解。随着全局信息素的更新, 蚂蚁“搜索”出的路径逐渐趋向于时间代价更小的路径。从第 16 代开始, 时间代价曲线不再变化(为了更好地呈现结果, 此处仅保留了前 30 代的迭代过程), 算法开始收敛, 这说明了该模型已经达到最优值。

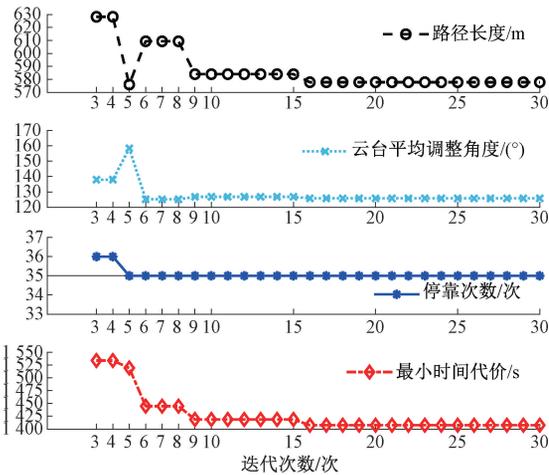


图6 最优解对应的迭代过程

Fig.6 Iterative process of optimal solution

值得注意的是, 算法迭代至第 5 代时, 路径长度为 576.0 m, 尽管它属于所有路径中最短的, 但是其对应的时间代价却不是最小的。由此可见, 仅仅以路径长度最短为目标的路径规划结果往往不是最优的选择。

## 5 结论

本文对变电站巡检机器人执行表计巡检任务的路径规划问题进行了研究。考虑了仪表观测窗、云台姿态调整过程的时间消耗、机器人位姿等多种约束, 以机器人完成巡检任务总时间最短为目标建立数学模型。提出一种信息素重利用的蚁群优化算法来求解路径规划, 仿真实

验表明该方法具有可行性, 可以准确计算出机器人的最优路径, 停靠位置序列以及各停靠点对应的测量仪表集合。其中, 机器人巡检路径长度为 577.8 m, 平均云台调整角度值为  $125.7^\circ$ , 停靠次数为 35 次, 总的巡检时间为 1407.5 s。

由于本文重点研究路径规划问题, 所以文中将“仪表发出的观测区域”这一实际约束进行简化, 并且将仪表观测窗近似表达为扇形圆环, 后续工作将对其深入研究。此外, 本文未考虑仪表观测顺序优化问题, 为了更加贴近实际, 后期拟将“机器人对仪表进行观测时云台调整时间尽可能小”这一约束加到模型中, 对仪表的观测顺序做进一步优化。在未来的研究中, 考虑继续在有效测量方面开展工作。例如对同一个仪表多次从不同角度进行观测, 以提高测量的可靠性。

## 参考文献

- [1] LU S Y, ZHANG Y, SU J J. Mobile robot for power substation inspection: A survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 830-847.
- [2] 方雄兵, 李涛涛. 维修部位导向的可视性分析方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(2): 137-142.  
FANG X B, LI T T. A method for maintained part oriented visibility analysis[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(2): 137-142.
- [3] WANG C J, YIN L, ZHAO Q, et al. An intelligent robot for indoor substation inspection [J]. The Industrial Robot, 2020, 47(5): 705-712.
- [4] LIU Y, LIU J, KE Y C. A detection and recognition system of pointer meters in substations based on computer vision[J]. Measurement, 2020, 152(C): 107333.
- [5] WANG B H, GUO R, LI B Q, et al. SmartGuard: An autonomous robotic system for inspecting substation equipment[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(1): 123-137.
- [6] MAC T T, COPOT C, TRAN D T, et al. Heuristic approaches in robot path planning: A survey [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 86: 13-28.
- [7] GALCERAN E, CARRERAS M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1258-1276.
- [8] 方立. 面向电力巡检机器人的仪表示数识别[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
FANG L. Instrument indication recognition for power inspection robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [9] CHEN N K, WANG Y N. Design and collaborative operation of multimobile inspection robots in smart microgrids[J]. Complexity, 2021, 2021: 6695688.

- [10] HU Z L, LI J H, CHEN A, et al. Optimize grouping and path of pylon inspection in power system [J]. IEEE Access, 2020, 8:108885-108895.
- [11] JOSE K, PRATHIHAR D K. Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 80: 34-42.
- [12] CHEN M Q, CHEN Y, CHEN Z H, et al. Path planning of UAV-UGV heterogeneous robot system in road network [C]. 2019 12th International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA). Springer, Cham, 2019: 497-507.
- [13] PETERS J R, SUEANA A, TAYLOR G S, et al. Unmanned aerial vehicle surveillance under visibility and dwell-time constraints [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2019, 141(6): 064501.
- [14] 路浩, 陈洋, 吴怀宇, 等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(16): 1972-1982.
- LU H, CHEN Y, WU H Y, et al. Path planning of substation inspection robot under road network and measurement constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16): 1972-1982.
- [15] 邢浩强, 杜志岐, 苏波, 等. 变电站指针式仪表检测与识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2813-2821.
- XING H Q, DU ZH Q, SU B, et al. Detection and identification method of pointer instrument in substation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2813-2821.
- [16] 苏庆华, 李俊韬, 眭晓虹, 等. 基于空间可视性的星球表面巡视路径分析 [J]. 航天器工程, 2017, 26(3): 17-22.
- SU Q H, LI J T, SUI X H, et al. Aster surface patrol path analysis based on space-visibility [J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(3): 17-22.
- [17] 朱柏林. 巡检机器人云台结构设计及其指针仪表识读技术 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- ZHU B L. The design of turntable and recognition technology of pointer meters of inspection robot [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [18] SATO Y, MINEMOTO K, NEMOTO M, et al. Automatic data acquisition for visualizing radioactive substances by combining a gamma-ray imager and an autonomous mobile robot [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(1): P01020.
- [19] 张永刚, 张思博, 薛秋实. 求解约束满足问题的改进蚁群优化算法 [J]. 通信学报, 2015, 36(5): 44-50.
- ZHANG Y G, ZHANG S B, XUE Q SH. Improved ant colony optimization algorithm for solving constraint satisfaction problem [J]. Journal of Communications, 2015, 36(5): 44-50.
- [20] 葛斌, 韩江洪, 魏臻, 等. 求解带时间窗车辆路径问题的动态混合蚁群优化算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(7): 641-650.
- GE B, HAN J H, WEI ZH, et al. Dynamic hybrid ant colony optimization algorithm for solving the vehicle routing problem with time windows [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, 28(7): 641-650.
- [21] 张宏宏, 甘旭升, 李双峰, 等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 257-266.
- ZHANG H H, GAN X SH, LI SH F, et al. UAV route planning considering regional risk assessment under complex low altitude environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 257-266.
- [22] 李志锟, 黄宜庆, 徐玉琼, 等. 改进变步长蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 15-21.
- LI ZH K, HUANG Y Q, XU Y Q, et al. Path planning of mobile robot based on improved variable step ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 15-21.
- [23] 徐玉琼, 娄柯, 李婷婷, 等. 改进自适应蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 89-95.
- XU Y Q, LOU K, LI T T, et al. Path planning of mobile robot based on improved adaptive ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 89-95.
- [24] 夏亚梅, 程瀚, 陈俊亮, 等. 基于改进蚁群算法的服务组合优化 [J]. 计算机学报, 2012, 35(2): 2270-2281.
- XIA Y M, CHENG B, CHEN J L, et al. Optimizing services composition based on improved ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(2): 2270-2281.
- [25] KAZAKOVITSEV L A, ROZHNOV IP, POPOV E A, et al. Parallel implementation of the greedy heuristic clustering algorithms [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019: 022052.

## 作者简介



童泉军,2019 年获得赣南科技学院学士学位,现为武汉科技大学硕士研究生,主要研究方向为机器人导航与路径规划。

E-mail: xiaojun\_tong@163.com

**Tong Xiaojun** received his B. Sc. degree from Gannan University of Science and Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include navigation and path planning of mobile robot.



陈洋(通信作者),2012 年获中国科学院沈阳自动化研究所博士学位,现为武汉科技大学教授,主要研究方向为移动机器人建模、规划与控制等。

E-mail: chenyang@wust.edu.cn

**Chen Yang** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences in 2012. Now he is a professor at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include modeling of mobile robot, planning and control, etc.