DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0013-05.

复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划

郑武略[1]，郑扬亮[2]，张 鑫[1]，刘 楠[1]，陈庆鹏[1]

(1.中国南方电网有限责任公司超高压输电公司,广东 广州 510000;
2.中国南方电网有限责任公司,广东 广州 510663)

摘 要: 为提升协同路径规划效果,降低碰撞危险,提出复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划方法。以最小总能耗为目标函数,建立复杂环境输电线路巡检机器人路径规划模型;在该模型的基础上,引入基于优先级的交通规则与基于定时等待的交通规则,建立以最短路径距离与最小总能耗为目标的巡检机器人协同路径规划模型;利用改进蚁群算法,求解协同路径规划模型,得到最短路径距离与最小总能耗的协同路径规划结果。实验证明:该方法可有效协同规划巡检机器人路径,降低巡检时间与巡检能耗;不同障碍物比率时,该方法规划路径的覆盖率较高,规划效果较优。

关键词: 输电线路巡检;机器人;协同路径规划;蚁群算法

中图分类号:TP18;TP242 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0013-05

Cooperative Path Planning of Transmission Line Inspection Robot in Complex Environment

ZHENG Wu-lue[1], ZHENG Yang-liang[2], ZHANG Xin[1], LIU Nan[1], CHEN Qing-peng[1]

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510000 China;
2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663 China)

Abstract: The cooperative path planning method of transmission line inspection robot in complex environment is studied to improve the effect of cooperative path planning and reduce the risk of collision. Taking the minimum total energy consumption as the objective function, the path planning model of transmission line inspection robot in complex environment is established. On the basis of this model, the traffic rules based on priority and the traffic rules based on timed waiting are introduced, and the cooperative path planning model of inspection robot is established with the goal of the shortest path distance and the minimum total energy consumption. The improved ant colony algorithm is used to solve the cooperative path planning model, and the cooperative path planning results of the shortest path distance and the minimum total energy consumption are obtained. The experiment shows that this method can effectively coordinate the path planning of the inspection robot and reduce the inspection time and energy consumption. When the ratio of obstacles is different, the coverage rate of the planned path is higher, the planning effect is better.

Keywords: transmission line Patrol; robot; collaborative path planning; ant colony algorithm

0 引言

通过定期巡检的方式,可确保输电线路稳定运行。传统的人工巡检工作,效率较低[1]。因为输电线路所处环境较为复杂,所以巡检人员的安全无法得到保障[2]。随着科技的发展,机器人不断被应用于输电线路巡检内,巡检机器人不仅能加快巡检效率,还能提升巡检人员的工作安全性[3]。多机器人巡检相比单机器人巡检,具备较为显著的优势。多机器人巡检具备较优的复杂环境自适应性与鲁棒性。当下,复杂环境多机器人协同路径规划的相关方法属于一个研究难点。已有很多学者做出研究,例如,邱硕涵等人在D__Star算法内引入干扰权重,对其进行改进,通过改进D__Star算法规划巡检机器人完成巡检任务的最佳路径。该方法有效降低巡检机器人出现碰撞事故的概率,提升巡检机器人的巡检安全性[4]。路浩等人以时间消耗最小为目标,建立巡检机器人路径规划模型,通过改进蚁群算法求解该模型,得到最佳的路径规划结果。该方法可有效规划巡检机器人路径,具备较优的路径规划鲁棒性[5]。但这两种方法均存在一定的局限性,并未考虑多个巡检机器人间的作业避碰问题,容易出现巡检机器人间的碰撞、堵塞与死锁问题。为此,研究复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划方法,精准协同规划巡检机器人路径,为提升输电线路运行安全性提供帮助。

*基金项目:南方电网科技项目(CGYKJXM20210305)

收稿日期:2023-03-13

1 巡检机器人协同路径规划

1.1 复杂环境输电线路巡检机器人路径规划模型

复杂环境下，输电线路巡检机器人容易出现碰撞问题，为此，通过栅格法描绘复杂环境输电线路环境，在复杂环境输电线路环境的栅格地图内，规划出一条无碰撞的最佳路径[6]。以最小总能耗为目标函数，建立复杂环境输电线路巡检机器人路径规划模型，公式如下：

$$\min F = \min\left(E\right) \tag{1}$$

归一化处理式(1)后获取：

$$\min F = \min\left(\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}\right) \tag{2}$$

式中，最大、最小能耗是$E_{\max}$、$E_{\min}$。

E的计算公式如下：

$$E = \sum_{k=1}^{M}\left(e_k + \xi t_{wait}\right) \tag{3}$$

式中，第k个巡检机器人C_{k}的能耗是e_{k}；巡检机器人数量是M；巡检机器人冲突等待时间是t_{wait}；等待消耗能量是ξ。

式(2)复杂环境输电线路巡检机器人路径规划模型的约束条件如下：

(1) 运动边界约束

该约束用于指定巡检机器人仅可以在平面展开前后左右与暂停的运动[7]，每次运动仅可以选择一个方向，公式如下：

$$\begin{cases}\psi_k\left(0\right) = \left(x_{0k}, y_{0k}\right)\\ \psi_k\left(t_{\max,k}\right) = \left(x_{\max,k}, y_{\max,k}\right)\\ x_{0k}, x_{\max,k}, y_{0k}, y_{\max,k} \in X\end{cases} \tag{4}$$

式中，C_{k}的最初位置及坐标是$\psi_{\mathrm{k}}(0)$、$(x_{0\mathrm{k}}, y_{0\mathrm{k}})$；$C_{\mathrm{k}}$的最大移动位置及坐标是$\psi_{\mathrm{k}}(t_{\max,\mathrm{k}})$、$(x_{\max,\mathrm{k}}, y_{\max,\mathrm{k}})$；$C_{\mathrm{k}}$的最长运行时间是$t_{\max,\mathrm{k}}$；复杂环境输电线路环境的栅格地图是$X$。

(2) 运动学约束

该约束用于确保巡检机器人速度与加速度稳定与指定区间内，防止出现滑失问题，公式如下：

$$\begin{cases}v_k\left(t\right) \le v_{\max,k}\\ a_k\left(t\right) \le a_{\max,k}\end{cases} \tag{5}$$

式中，t时刻，C_{k}的运行速度与加速度是$v_{\mathrm{k}}(t)$、$a_{\mathrm{k}}(t)$；C_{k}的最大运行速度与加速度是$v_{\max,\mathrm{k}}$、$a_{\max,\mathrm{k}}$。

(3) 协同安全性约束

该约束用于确保复杂环境输电线路巡检机器人间，始终保持安全距离，防止巡检机器人间出现碰撞问题。巡检机器人间的实际距离公式如下：

$$d_{kr} = \sqrt{\left|C_k^x - C_r^x\right|^2 + \left|C_k^y - C_r^y\right|^2} \tag{6}$$

式中，巡检机器人C_{k}、C_{r}，在X内的坐标是$C_{\mathrm{k}}^{\mathrm{x}}$、$C_{\mathrm{k}}^{\mathrm{y}}$、$C_{\mathrm{r}}^{\mathrm{x}}$、$C_{\mathrm{r}}^{\mathrm{y}}$。

在X内，C_{k}与C_{r}需符合的约束为：

$$d_{kr}\left(t\right) > d_{\varepsilon} \tag{7}$$

式中，巡检机器人间的安全距离是d_{ε}。

(4) 协同时间窗约束

该约束用于确保多巡检机器人协同作业过程中，各巡检机器人进过各栅格的时间不同，公式如下：

$$T_k = \left[t_h^{in}, t_h^{out}\right] \tag{8}$$

式中，C_{k}经过一个栅格的时间是T_{k}；C_{k}开始使用栅格h的时间是$t_{\mathrm{h}}^{\mathrm{in}}$；$C_{\mathrm{k}}$离开$h$的时间是$t_{\mathrm{h}}^{\mathrm{out}}$。

$t_{\mathrm{h}}^{\mathrm{in}}$与$t_{\mathrm{h}}^{\mathrm{out}}$的计算公式如下：

$$t_h^{in} = t_h - t_b \tag{9}$$

$$t_h^{out} = t_h + \frac{\sqrt{v_k^2 + 2a_k D}}{a_k} \tag{10}$$

式中，巡检机器人安全制动时间是t_{b}；巡检机器人使用h的时间是t_{h}；巡检机器人长度是D。

1.2 基于交通规则法的巡检机器人协同路径规划模型

为提升复杂环境输电线路多巡检机器人间协作运行效果，防止出现碰撞危险。在前节建立的巡检机器人路径规划模型的基础上，引入两种交通规则，得到巡检机器人协同路径规划模型。基于优先级的交通规则是人为设置巡检机器人运行的优先级，防止出现碰撞和锁死问题，具体交通规则如下：

(1) 双向道路时，巡检机器人需靠右行驶；

(2) 巡检机器人便可按照原方向的反方向行驶，需要重新选择另一条运行方向的道路；

(3) 按照巡检机器人优先级的高低顺序，确定十字路口栅格的占用顺序。

在该交通规则下，复杂环境输电线路巡检机器人路径规划的最短距离为：

$$\min D = \min\sum_{i=0}^{n} d\left(\psi_i, \psi_{i+1}\right) \tag{11}$$

式中，在i=0情况下，代表巡检机器人处于起始点；在i=n情况下，代表巡检机器人处于目标点；X内巡检机器人位于栅格节点i、i+1间的距离是$d(\psi_{\mathrm{i}}, \psi_{\mathrm{i+1}})$。

基于定时等待的交通规则，可解决复杂环境输电线路巡检机器人间的交通堵塞问题。该规则中的前两条与上一交通规则中的前两条一样，仅有第三条规则有所改变，复杂环境输电线路区域中各十字路口均会安装红绿灯，红绿灯的时间相同，将该时间换算成距离，代入代价函数内。

该规则下，复杂环境输电线路巡检机器人路径规划的最短距离为：

$$\min D = \min\sum_{i=0}^{n} d\left(\psi_i, \psi_{i+1}\right) + ct'v \tag{12}$$

式中，复杂环境输电线路巡检区域内经过的红绿灯数量

是c；红灯等待时间是$t^{'}$。

按照复杂环境输电线路巡检的实际情况，将式(11)、式(12)，与式(2)进行搭配，获取最终的复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划模型。

1.3 基于改进蚁群算法的协同规划模型求解方法

利用改进蚁群算法，对构建的复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划模型，进行求解，得到最短路径距离与最小总能耗对应的协同路径规划结果。为解决蚁群算法容易出现的死锁问题，在启发函数η_{ij}内添加最优路径指引函数ρ_1，ρ_1的计算公式如下：

$$\rho_1 = q^{\cos(\theta_1-\theta_2)} \tag{13}$$

式中，常数是q；巡检机器人起点至终点间的夹角是θ_1；当下栅格节点至下一节点间的夹角是θ_2。θ_1与θ_2的计算公式如下：

$$\theta_1 = \arccos\frac{(x_S-x_Z, y_S-y_Z)\cdot g}{|x_S-x_Z, y_S-y_Z|} \tag{14}$$

$$\theta_2 = \arccos\frac{(x_j-x_i, y_j-y_i)\cdot g}{|x_j-x_i, y_j-y_i|} \tag{15}$$

式中，复杂环境输电线路巡检机器人起点与终点是S、Z；S与Z的坐标是(x_S, y_S)、(x_Z, y_Z)；横轴中正半轴单位向量是g；当下节点与下一节点的坐标是(x_i, y_i)、(x_j, y_j)。

为降低最佳巡检机器人协同路径规划模型的求解时间，在η_{ij}内添加终点导向函数ρ_2，ρ_2的计算公式如下：

$$\rho_2 = \frac{1}{\sqrt{\left[(x_j-x_Z)+(y_j-y_Z)\right]^2}} \tag{16}$$

改进后的启发函数为：

$$\eta'_{ij} = \rho_1\cdot\rho_2 = \frac{q^{\cos(\theta_1-\theta_2)}}{\sqrt{\left[(x_j-x_Z)+(y_j-y_Z)\right]^2}} \tag{17}$$

信息素的计算公式方式如下：

$$\gamma^{u+1}_{(x,y)} = \gamma^{u}_{(x,y)} - \alpha\gamma^{u}_{(x,y)} + \alpha\sum_{i=1}^{N}\Delta\gamma^{u}_{\hat{i}(x,y)} \tag{18}$$

式中，蚂蚁数量是N；迭代次数是u；挥发系数是α；蚂蚁$\hat{i}$在复杂环境输电线路环境栅格地图(x,y)处的信息素是$\Delta\gamma^{u}_{\hat{i}(x,y)}$；$u+1$、$u$次迭代后，信息素总量是$\gamma^{u+1}_{(x,y)}$、$\gamma^{u}_{(x,y)}$。

改进后$\Delta\gamma^{u}_{\hat{i}(x,y)}$的更新方式为：

$$\Delta\gamma^{u}_{(x,y)} = \begin{cases} \dfrac{O}{L^u_{\hat{i}}}, L^u_{\hat{i}} < \beta\cdot L^u_{mean} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \tag{19}$$

式中，信息素强度是O；蚂蚁$\hat{i}$搜索的路径长度是$L^u_{\hat{i}}$；平均路径长度是L^u_{mean}；随机数是β。

L^u_{mean}的计算公式如下：

$$L^u_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{N} L^u_{\hat{i}}}{N} \tag{20}$$

通过设计避障策略，防止蚁群算法陷入局部极值。该策略为：迭代次数为u时，蚂蚁$\hat{i}$在复杂环境输电线路环境栅格地图内栅格i处，陷入局部极值，则令$\hat{i}$回到迭代次数是$u-1$时的栅格j处，将i标记成障碍栅格。在j的下一步可选栅格集内去掉i，通过轮盘赌法再次选取迭代次数是u时$\hat{i}$需要选择的栅格i^*。

利用改进蚁群算法，求解复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划模型的具体步骤如下：

(1) 参数初始化；

(2) $\hat{i}$在位置i时，按照式(4)至式(8)的约束条件与η'_{ij}，求解$\hat{i}$的转移概率，通过轮盘赌法选取$\hat{i}$下一步需选择的栅格j；

(3) 求解j下一步可选择的栅格数量κ，在$\kappa=1$情况下，依据避障规则将j标记成障碍栅格，回到栅格i，并跳转至步骤(2)；

(4) 分析$\hat{i}$是否达到复杂环境输电线路环境栅格地图内的终点，如果到达终点，则输出最短路径距离与最小总能耗，对应的复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划结果。反之，跳转至步骤(2)。

2 实验结果分析

以某市复杂环境下的220 kV输电线路为实验对象，该输电线路全长是16.699 km，架设方式是同塔双回路，全线内共有47个杆塔，其中，上回路直线杆塔为31个，双回路耐张杆塔为12个，双回路终端杆塔数量是3个。输电线路内导线为2xJL/GIA−400/35钢芯铝绞线，地线是48芯复合光缆与GJ−80镀锌钢绞线两根而成的。海拔高度在1 000 m～1 300 m之间，该输电线路区域中峻岭占5%，高山大岭占24%，一般山地占39%，丘陵占25%，泥沼占7%。

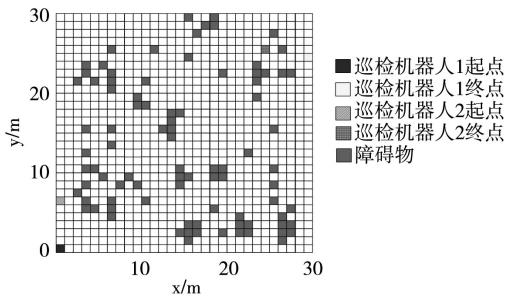


图1 输电线路巡检机器人起点、终点与障碍物位置

在该复杂环境输电线路区域中，随机选择30 m×30 m的复杂环境输电线路巡检区域，两个巡检机器人巡检起点、终点以及障碍物位置如图1所示。根据图1可知，复杂环

境下，该区域输电线路内的障碍物较多，巡检机器人1的起点位置是(1 m，1 m)，终点位置是(30 m，25 m)；巡检机器人2的起点位置是(1 m，7 m)，终点位置是(25 m，26 m)。

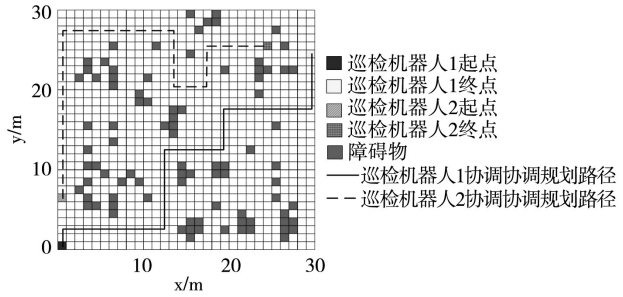


图2 复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划结果

利用本文方法根据设置的两个巡检机器人起点与终点位置，协同规划两个巡检机器人的巡检路径，复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划结果如图2所示，巡检机器人运行的安全距离是1 m。根据图2可知，根据设置的巡检机器人1与2的起点与终点位置，本文方法可有效协同规划两个巡检机器人的复杂环境输电线路巡检路径，同时，两个巡检机器人与障碍物间均距离均超过1 m，即超过安全距离，且两个巡检机器人间的距离也远远大于1 m。本文方法的协同规划结果中并无碰撞情况。实验证明：本文方法可有效完成复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划，且无碰撞危险。

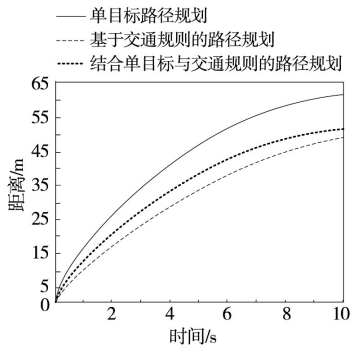


图3 巡检机器人协同规划路径距离

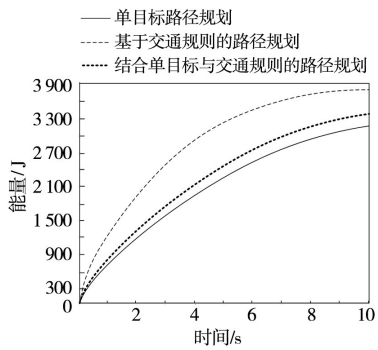


图4 巡检机器人协同规划总能耗

本文方法改进前后的复杂环境输电线路巡检机器人协同规划的路径距离与总能耗如图3、图4所示，以巡检机器人1为例。综合分析图3与图4可知，单目目标规划的巡检机器人的最终路径距离大概为61 m，基于交通规则的路径规划的最终路径距离大概为50 m，结合单目标与交通规则的本文方法最终路径距离大概为52 m；单目标规划的总能耗大概为32 J；基于交通规则的路径规划的总能耗大概为38 J，结合单目标与交通规则的本文方法总能耗大概为34 J。其中，基于交通规则的路径规划最终路径距离最短，但总能耗最高；单目标规划的总能耗最低，但最终路径距离最远，结合单目标与交通规则的本文方法，综合考虑规划路径距离与总能耗问题，在缩短路径距离的同时，还能够降低总能耗，具备较优的复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划效果。

复杂环境输电线路巡检中，巡检机器人的最大速度是1.5 m/s，分析本文方法协同路径规划中，两个巡检机器人是否符合巡检机器人的速度约束，分析结果如图5所示。根据图5可知，巡检机器人1的最高速度在1.3 m/s左右，巡检机器人2的最高速度在1.4 m/s左右，均未超过巡检机器人的最大速度，说明两个巡检机器人在进行复杂环境输电线路巡检工作时，均符合速度约束，有效防止巡检机器人出现滑失问题。

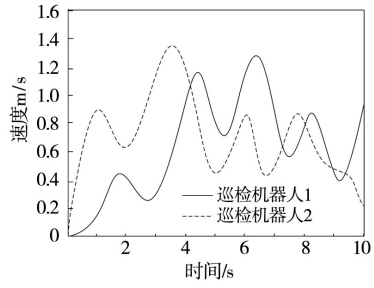


图5 两个巡检机器人的运行速度

表1 巡检机器人协同路径规划的覆盖率

障碍物比率/%	巡检机器人1	巡检机器人2
20	94.72	95.11
25	92.55	93.64
30	90.37	90.98
35	89.41	89.54
40	88.96	88.57
45	87.84	87.29
50	86.27	86.09
55	85.19	85.83
60	84.68	85.31

利用搜索路径对输电线路复杂环境的覆盖率，衡量本文方法路径协同规划效果，其值越大，说明路径搜索范围越广，路径协同规划效果越佳，覆盖率需控制在80%以上。不同障碍物比率时，本文方法巡检机器人协同路径规划的覆盖率如表1所示。根据表1可知，随着障碍物比

(下转第25页)