[线路巡检]

电力线路无人机巡检路线蚁群规划方法

文/张满　谌业刚　刘宏辉　王琪　刘海洋　石明明
国网安徽省电力有限公司蚌埠供电公司

设计了电力线路无人机巡检路线蚁群规划方法。确定电力线路无人机巡检路线规划约束，在电力线路网中设定路线航程、步长、路径偏转角等约束条件，确保规划效果。基于蚁群算法建立无人机巡检路线规划规则，确定巡检路径规划性能指标，并将路线规划选择代价考虑在内，实现路线的最优规划。

电力线路是传送电能的线路，能够将各类用电设备联接在一起，满足用户的用电需求。无人机巡检是利用无人机巡视、检查和监测电力线路的方式，具有高效、安全和智能等优势。在无人机巡检的过程中，受到天气等环境因素的影响，可能限制其应用范围。只有规划出合理的路线，才能确保无人机的续航效果，实现电力线路的有效巡检。针对此类问题，研究人员设计了多种规划方法。

其中，文献[1]基于改进D*Lite-APF算法的电力线路无人机巡检路线规划方法，主要是利用动态A Lite算法，对路线平滑处理，并通过自适应势能场提高了路线规划效率。然而，该方法计算的复杂度较高，对电力线路网的实时性要求较高，可能出现计算资源不足的问题，影响巡检质量。文献[2]基于栅格遗传算法的电力线路无人机巡检路线规划方法，主要是利用栅格划分巡检区域，通过遗传算法优化全局路线，从而确保路线规划效果。但是，该方法在地图上找出最优路线的过程中，存在信息损失的问题，无法反映电力线路周围环境的详细信息，容易陷入局部最优的问题。因此，本文结合蚁群算法的优势，设计了电力线路无人机巡检路线规划方法。

基于蚁群算法的线路无人机巡检路线规划方法设计

在电力线路巡检的过程中，考虑到巡检任务、无人机性能参数等变化情况，在电力线路网中设定路线航程、步长和路径偏转角等约束条件，确保规划效果。巡检线路中，无人机最大航程为V_{max}，在线路中共有n个巡检点位，则最大航程如图1所示。

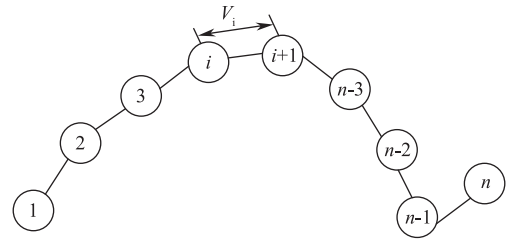

图1　最大航程示意图

由图1可知，V_i为巡检节点i到i+1位置上的航程，则总航程表示为

$$V=\sum_{i=1}^{n-1}V_i \tag{1}$$

式中，V为巡检总路线，V满足$\leqslant V_{max}$的条件时，能够满足无人机续航需求。

巡检点位并不在同一水平线上，克服飞行惯性，才能避免偏离路线的问题。本文将飞行管线距

离作为最小步长L_{min}，将L_{min}作为基础条件，其他步长$l_i \geqslant L_{min}$，即可确保路线规划效果。受到无人机机动性能的影响，需要约束最大路径偏转角，避免无人机偏离路线的问题。最大路径偏转角表示为

$$\Delta\varphi_{max} = \arcsin\left(L_{min}/(2\times r_{min})\right) \tag{2}$$

式中，$\Delta\varphi_{max}$为最大路径偏转角；r_{min}为无人机最小转弯半径。

当V、l_i、$\Delta\varphi_{max}$均满足约束需求时，路线能够达到全局最优，避免陷入局部最优的问题。

基于蚁群算法建立无人机巡检路线规划规则

无人机巡检路线上的点位均是分散的状态，这些点构成的巡检无向图，就是最佳规划路线。本文利用蚁群算法，建立无人机巡检路线规划规则。并确定巡检路径规划性能指标，综合考虑路线规划选择代价，实现路线的最优规划。巡检路线规划情况如图2所示。

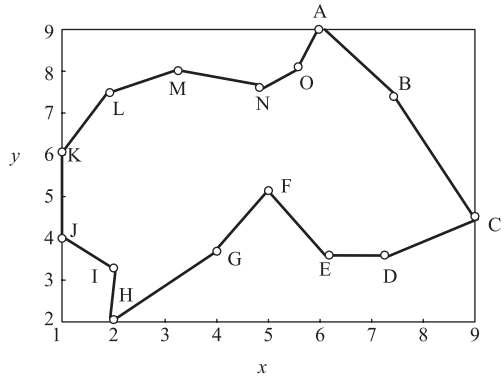

图2　巡检路线规划示意图

A～O共15个巡检节点，利用蚁群算法不断迭代、更新，使A～O的路线最短，实现无人机的高效巡检[7]。在巡检路线规划的过程中，分为适应阶段与协作阶段。在适应阶段，通过信息素调整路线，减少路线上信息素挥发量。在协作阶段，多次迭代，并分析局部最优与全局最优，选择出最佳规划路线。信息素挥发系数需要自适应，通过减小挥发系数，提高全局规划能力。假设挥发系数的初始值为$\rho(t_0)$=1，则挥发系数表示为

$$\rho(t) = \begin{cases} 0.95\rho(t-1) \\ \rho_{min} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$\rho(t)$为t时刻信息素挥发系数；$\rho(t-1)$为$t-1$时刻的挥发系数；ρ_{min}为挥发系数最小值。

在$0.95\rho(t-1)$满足$\geqslant\rho_{min}$的条件下，设置自适应参数

$$\begin{cases} \alpha = 4t/M \\ \beta = 1.5(M-t)/t \end{cases} \tag{4}$$

式中，α、β为自适应参数；M为临界时刻。

在M时刻之前，为规划开始阶段，信息素浓度较小，利用能见度因素获取更多的巡检节点信息素[8]。在M时刻之后，信息素浓度增加，α随时间增加，β随时间减小，且$0\leqslant t\leqslant M$，确定此时的巡检路径规划性能指标

$$J_{ij} = \alpha T_{ij} + \beta Pf_j/Pf_i \tag{5}$$

式中，J_{ij}为第i、j线路上路线规划代价；T_{ij}为无人机巡检在线路i、j之间移动花费的时间；kPf_j/Pf_i为线路j的高运行风险概率，与线路i的高运行风险概率的比值。

最优路线同时满足三个条件。①每个巡检节点只经过一次；②总巡检时间最短；③优先经过运行风险高的线路。J_{ij}能够标定规划路线的质量，在三个条件均满足的情况下，J_{ij}越小，路线规划质量越高。

实验

为了验证本文设计的方法，是否满足电力线路无人机巡检路线规划需求，本文对上述方法进行了实验分析。规划结果则以文献[1]基于改进D*Lite-APF算法的规划方法、文献[2]基于栅格遗传算法的规划方法，以及本文设计的基于蚁群算法的规划方法，综合对比的形式展现。

1. 实验过程

本次实验设置了15个无人机巡检点位，坐标分别为(5,5)、(3,4)、(1,1)、(2,3)、(1,4)、(7,2)、(1,6)、(8,7)、(4,3)、(9,4)、(7,9)、(2,2)、(10,6)、(3,8)、(5,7)，巡检点编号为1～15。巡检点位1(5,5)为起始点，蚂蚁个数设定为20，最大循环次数为50，确保本次实验的准确性。巡检路线规划流程如图3所示。

在一次算法的循环中，m只蚂蚁完成搜索，比较每一只蚂蚁经过路径的代价J_{ij}，并从循环中找出代价之和最小的路线，作为局部最优规划路线。将局部最优规划路线与其他全局最优路线比较，新生成的路线优于全局最优路线，则将此路线代替全局

最优路线，反之则保留全局最优路线，确保无人机巡检路线为最佳路线。

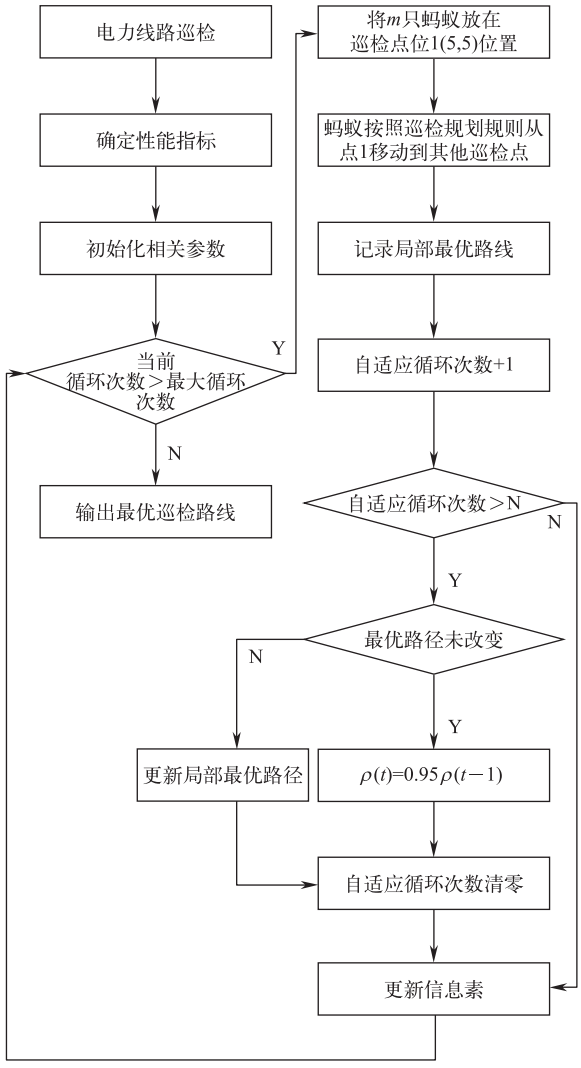

图3　巡检路线规划流程图

2. 实验结果

在上述实验条件下，本文随机选取出10、30、50的循环次数，对每次循环的路径及规划代价进行分析。在其他条件均已知的情况下，对比了文献[1]基于改进D*Lite-APF算法的规划性能、文献[2]基于栅格遗传算法的规划性能，以及本文设计的基于蚁群算法的规划性能。实验结果见表1。

本次实验将起始位置设定为1，终止位置设定为2，路线全程的$\sum J_{ij}$越小，规划效果越佳。在其他条件均已知的情况下，使用文献[1]方法之后，循环第30次时，出现了节点未全覆盖，重复巡检的问题，且整体$\sum J_{ij}$偏高，无法满足路线规划需求。使用文献[2]方法之后，循环第30次与50次时，路径保持了高度的一致，但仍未完全稳定，亟需对其进一步优化。而使用本文设计的方法之后，循环到第30次、50次时，路径完全一致，整体$\sum J_{ij}$在30以内，规划代价较小，路线最优稳定较快，能够满足无人机巡检需求，符合本文研究目的。

表1　实验结果

方法	循环次数	路径	$\sum J_{ij}$
文献[1]	10	1-15-7-12-5-4-14-3-13-9-6-11-10-8-2	62.74
	30	1-15-14-4-5-3-12-7-10-11-6-9-11-8-2	58.39
	50	1-15-14-7-5-4-12-3-11-9-6-10-13-8-2	50.04
文献[2]	10	1-15-14-7-5-4-12-3-13-9-6-10-8-11-2	41.36
	30	1-15-14-4-3-12-10-8-13-11-5-7-6-9-2	31.52
	50	1-15-14-4-3-12-10-8-13-11-5-7-9-6-2	30.47
本方法	10	1-15-14-13-8-11-9-6-12-3-4-10-7-5-2	26.47
	30	1-15-14-13-8-11-9-6-10-7-5-4-12-3-2	23.22
	50	1-15-14-13-8-11-9-6-10-7-5-4-12-3-2	23.22

结束语

近些年来，无人机技术的优势逐渐凸显，在电力线路的巡检方面尤为重要，不仅提高了巡检效率，还降低了人工巡检成本，对于电力线路的安全运行具有重要作用。因此，本文利用蚁群算法，设计了电力线路无人机巡检路线规划方法。从规划约束、规划规则两个方面，应对复杂多变的电力线路环境。并通过蚁群算法的自适应性能，调整与更新信息素，保持巡检线路规划的稳定性与经济性，真正意义上提高了电力线路的运行安全。**EA**

（收稿日期：2024-06-24）

参考文献

[1] 胡粒琪，曾维，陈才华，等．基于改进D*Lite-APF算法的巡检机器人路径规划[J]．现代电子技术，2024，47(5)：155-159．

[2] 王兴涛，舒畅，李晓金．基于栅格遗传算法的巡检机器人全局路线规划[J]．电子设计工程，2022，30(23)：148-151+158．

[3] 吕强，李永强，王辉，等．基于机器视觉技术的变电站巡检机器人自动导航系统[J]．自动化与仪表，2023，38(4)：65-69．