

[无人机]

基于改进蚁群算法的无人机在配电网线路巡检中的应用

文 / 冯欧阳¹ 马奇² 移强平³ 移康祺⁴

1. 国网浙江省电力有限公司瑞安市供电公司; 2. 香港理工大学电机及电子工程学系
3. 甘肃申海国际建筑工程有限公司; 4. 新疆天山长河建设工程有限公司

配电网线路巡检作业是电网系统运行状态维护的重要工作, 然而传统的人工巡检方式, 效率提高上限很小。文章通过研究蚁群算法, 使用 Python 模拟仿真, 并搭配无人机进行巡检作业, 使得配电网线路巡检工作变得高效、简单、安全。

随着社会经济的发展, 对电能的需求急剧上升, 电网的可靠性面临着更高的挑战。配电网线路巡检是电网维护管理工作中的一项重要组成部分, 是电网公司获得配电网运行状态信息的一种重要途径, 对保障电网可靠运行起着重要作用。目前配电网线路巡检的主要模式仍然是“人工为主, 设备辅助”的方式, 这样的方式存在人、财、物利用率低下、作业局限性大, 以及安全隐患等问题^[1]。近年来, 电网公司逐步加大无人机的使用力度, 将其投入到巡检工作当中。无人机凭借独特的性能优势, 已经成为配电网线路巡检的重要方式之一。但是大部分的实际环境中, 无人机仍然依靠人工遥控。本文通过研究改进蚁群算法和无人机的结合, 从全局优化的角度, 提出配电网线路的最优巡检方案, 可以有效地提高巡检效率, 同时利用无人机自身携带的图像采样设备来捕捉配电网的设备图像信息, 充实配电网设备信息的样本库。

配电网线路巡检需求

1. 巡检现状

巡检任务的制定一般是由供电所的检修管理人员按需定制, 巡检路径的规划与无人机的派遣主要依靠巡检人员的经验。这样的工作模式下, 巡检规划很大程度上依赖于巡检人员的主观性。随着配

网地理环境的日趋复杂、巡检区域的日趋扩大, 这种巡检任务的定制方式已经很难保证无人机派遣的合理性, 以及任务实施的高效性。

2. 改进方法

基于上述问题, 要找到一种客观有效的配电网线路巡检路径的规划方法, 从而得到一种参考价值更高的解决方案。在配电网线路巡检作业中, 无人机在两个杆塔之间是半高空直线飞行, 故可以将这一问题简化为经典旅行商路径规划问题 (Travelling Salesman Problem, TSP)^[2]。本文采用改进蚁群算法 (Improved Ant Colony Optimization, IACO), 利用其仿生学特性, 通过 Python 进行仿真和模拟, 可以得到配电网线路巡检路径的最优路径之一。考虑到无人机的最大巡检半径一般为 5 ~ 10 km, 添加蚂蚁访问节点的路径的总长度作为全局限制条件。

蚁群算法介绍及模型设计

1. 蚁群算法介绍

(1) 基本概念

蚁群算法最初由 Marco Dorigo 于 1992 年在他的博士论文中提出, 灵感来源于模仿蚂蚁的觅食行为。蚁群算法 (ACO) 是一种可以通过解析图, 把路径的优化问题转化为在加权图上寻找最短路径的方法, 人工模拟的蚁群可以用来解决配电网线路

巡检路径规划的近似解。改进蚁群算法（IACO）中，每一只蚂蚁会随机构建一个最短路径，对比每一只蚂蚁规划的每一条路径，更新每条路径上的信息素，得到随机生成所有路径中的最优解^[3]。

（2）目的地选择

每只蚂蚁在寻找路径的过程中都伴随着从当前位置开始，下一个位置去哪里的抉择，蚂蚁的决策基于路径的长度以及路径上的信息素水平^[4]。关于路径选择，假设第 m 只蚂蚁从节点 x 到节点 y （节点总数 N ），计算公式为

$$P_{xy}^m = \frac{(\tau_{xy}^\alpha)(\eta_{xy}^\beta)}{\sum_{z \in \text{allowed}_m} (\tau_{xz}^\alpha)(\eta_{xz}^\beta)} \quad (1)$$

式中， τ_{xy}^α 为从节点 x 到节点 y 累积的信息素数量； η_{xy}^β 为启发信息函数，表示从节点 x 向 y 转移的期望程度，用节点之间距离的倒数表示； α 和 β 分别为信息素影响因子和启发函数影响因子（ $4 \geq \alpha \geq 1$ ， $5 \geq \beta \geq 1$ ）。

（3）信息素更新

当蚂蚁完成一次循环，就会更新相应的信息素浓度，对“优秀的路径增加信息素”，对“不优秀的路径减少信息素”^[4]，其数学关系为

$$\tau_{xy} \leftarrow (1-\rho)\tau_{xy} + \Delta\tau_{xy}^{\min}, \quad 0 < \rho < 1 \quad (2)$$

式中， $\Delta\tau_{xy}^{\min}$ 为找到最短路径的蚂蚁释放信息素，用公式表示为

$$\Delta\tau_{xy}^{\min} = \frac{Q}{L} \quad (3)$$

$$L = \min(L_m) \quad 1, 2, 3, \dots, M \quad (4)$$

式中， Q 为常数，表示一个循环后释放的信息素速度总量； L_m 为某次循环中的路径长度。

2. 数据预处理

杆塔位置参数是经纬度信息，这样的数据无法直接使用，必须要对数据进行预处理。方法是将杆塔的经纬度绝对坐标转换为相对坐标，如图1所示。

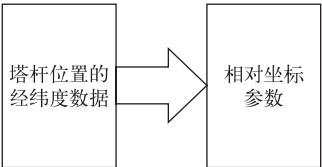


图1 参数转换

同时，处理掉数据中的空值和错误值之后，部

分杆塔相对坐标见表1。

表1 相对位置

杆塔名称	线路名称	X 相对坐标	Y 相对坐标
线路A-3号支线9号杆	A线路	0.522 568 97	0.775 691 563
线路A-3号支线7号杆	A线路	0.521 746 889	0.775 566 245
线路A-3号支线8号杆	A线路	0.522 081 49	0.775 602 676
线路A-3号支线5号杆	A线路	0.520 904 614	0.775 454 335
线路A-3号支线6号杆	A线路	0.521 348 045	0.775 526 559
线路A-3号支线3号杆	A线路	0.519 915 049	0.775 582 168
线路A-3号支线4号杆	A线路	0.520 300 247	0.775 405 645
线路A-3号支线1号杆	A线路	0.519 205 614	0.775 609 941
线路A-3号支线2号杆	A线路	0.519 572 347	0.775 684 447
线路A-3号支线10号杆	A线路	0.522 813 01	0.775 353 376
线路A-1号支线1号杆	A线路	0.515 498 429	0.768 985 817
线路A-4号支线10号杆	A线路	0.522 543 856	0.768 733 538
线路A-4号支线12号杆	A线路	0.522 954 721	0.768 258 536
线路A-4号支线8号杆	A线路	0.522 143 813	0.769 209 91
线路A-4号支线9号杆	A线路	0.522 340 715	0.768 974 848
线路A-4号支线1号杆	A线路	0.520 109 8	0.769 784 62
线路A-4号支线2号杆	A线路	0.520 678 786	0.769 814 534
线路A-4号支线11号杆	A线路	0.522 757 851	0.768 481 597
线路A-4号支线3号杆	A线路	0.521 069 69	0.769 733 454
线路A-4号支线6号杆	A线路	0.521 806 58	0.769 607 386
线路A-4号支线7号杆	A线路	0.521 982 672	0.769 406 732
线路A-4号支线5号杆	A线路	0.521 652 283	0.769 780 767
线路A-4号支线4号杆	A线路	0.521 338 661	0.769 781 562

3. 算法模型设计

（1）运行环境和初始参数信息

运行环境：Python vision 3.8.10。

初始参数：信息素初始浓度 $\tau_{xy} = \tau_{\max}$ ；最大迭代次数 $I_{\max}$ ； M 只蚂蚁随机分配出生点；节点数量为 N ；信息素浓度增量 $\Delta\tau_{xy}^{\min} = 0$ ，信息素总量 Q 。将节点坐标（见表1）代入集合 allow_n （ $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ ）。

（2）算法主循环

1) 步骤1。迭代次数 I 自增 $1 \rightarrow I=I+1$ （ $0 \leq I \leq I_{\max}$ ）。

2) 步骤2。蚂蚁数自增 $1 \rightarrow m=m+1$ （ $m=1, 2, 3, 4, \dots, M$ ），按照集合 allow_n 进行访问，（ $n=1, 2, 3, \dots, N-1$ ），根据式（1），搜索下一个节点。

3) 步骤3。更新集合 allow_n ，将探索过的节点

放入已探索节点列表 allowd_n 。

4) 步骤4。判断所有蚂蚁是否遍历过所有节点，即访问过全部节点的蚂蚁数是否小于总数 M ，若是，回到步骤2，否则按顺序进行下一步。

5) 步骤5。根据式 (2) 更新信息素浓度。

6) 步骤6。当前迭代次数是否小于最大迭代次数，若是，则跳转到步骤1；否则顺序进行下一步。

7) 步骤7。根据循环结果输出最优路径和最优路径图。

算法流程如图2所示。

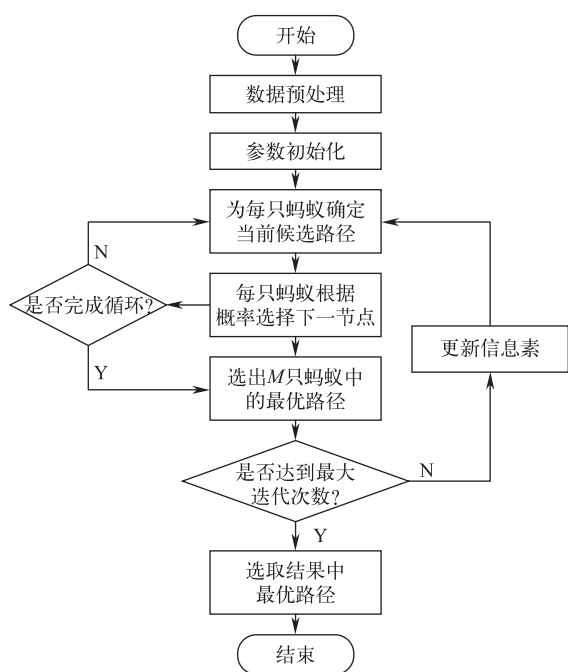


图2 算法流程图

(3) 代码实现

Begin: 初始化参数 $\tau_{xy}=\tau_{\max}$; 最大迭代次数 $I_{\max}$; M 只蚂蚁; 节点数量为 N ; 信息素浓度增量 $\Delta\tau_{xy}^{\min}=0$, 信息素总量 Q , 结果集 L_{return} 。

While $I \leq I_{\max}$;

For $\{m=1, m < M, m++\}$;

For $\{n=1, n < N, n++\}$

根据式 (1), 在 allow_n 中确定下一个节点;

更新 allow_n 和 allowd_n

所有蚂蚁完成一次循环, 计算路径长度

$L=\min(L_m)$ 并放入结果集 L_{return} ;

更新信息素增量 $\Delta\tau_{xy}^{\min}$, 根据式 (2) 更新信息素

τ_{xy} ;

$I++$;

完成所有循环, 输出最优结果。

结果分析与对比

1. 不同蚂蚁数量对比

设置不同的蚂蚁数量, 比较 50 只蚂蚁和 100 只蚂蚁的结果, 即取 $M_1=50$, $M_2=75$, $M_3=100$ (其他参数取相同值, 启发函数因子 $\alpha=1$, $\beta=2$; 信息素挥发速度 $\rho=0.5$), 如图 3、图 4 和图 5 所示。

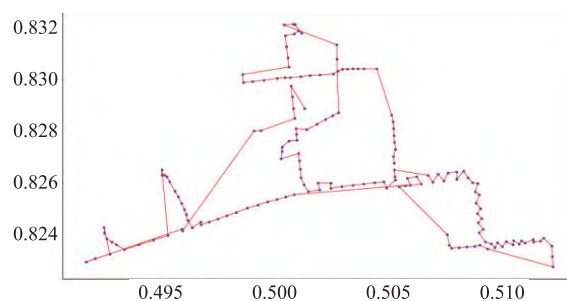


图3 $M_1=50$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.5$

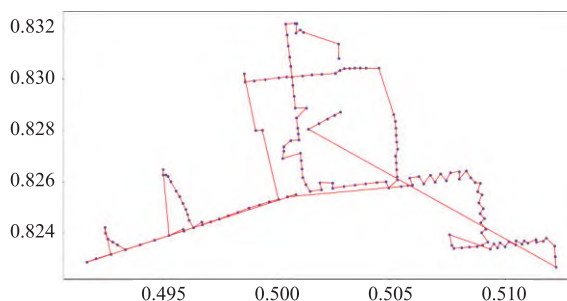


图4 $M_2=75$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.5$

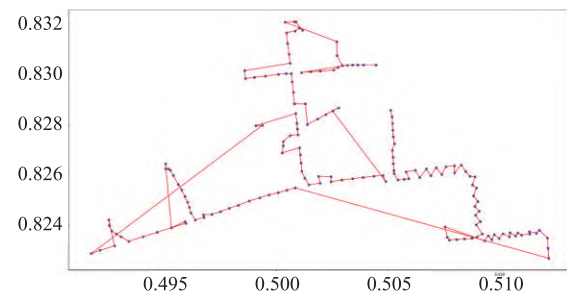


图5 $M_3=100$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.5$

通过比较输出的结果, 当蚂蚁数量变大的时候, 越多的蚂蚁就可以规划出更优秀的巡检路径, 但数量过大后算法搜索容易陷入停滞^[5], 综合考虑选择 $M=75$ 。

2. 节点排序结果

通过上节中选定参数，可以得到迭代之后的杆塔排列顺序，本文截取了部分排序结果，见表2。通过将路径导入无人机进行实际巡检，无人机单次巡检时间（200节杆塔，总长越11.1 km）由50 min下降至42 min左右，提升较为明显。

表2 杆塔顺序

杆塔名称	线路名称	X 相对坐标	Y 相对坐标
线路A-6号支线28号杆	A线路	0.50 196 515	0.82 569 407
线路A-6号支线27号杆	A线路	0.50 245 643	0.82 575 488
线路A-7号支线1号杆	A线路	0.50 245 659	0.82 595 462
线路A-6号支线26号杆	A线路	0.50 294 267	0.82 582 021
线路A-6号支线25号杆	A线路	0.50 342 378	0.82 587 205
线路A-6号支线24号杆	A线路	0.5 0389 308	0.82 592 241
线路A-6号支线23号杆	A线路	0.50 438 602	0.82 597 344
线路A-6号支线22号杆	A线路	0.5 047 764	0.82 600 845
线路A-8号支线2224号杆	A线路	0.50 490 482	0.82 576 156
线路A-6号支线2221号杆	A线路	0.50 527 935	0.82 607 327
线路A-5号支线1号杆	A线路	0.50 526 632	0.82 620 108
线路A-5号支线2号杆	A线路	0.50 525 018	0.82 646 857
线路A-5号支线3号杆	A线路	0.50 523 404	0.82 673 605
线路A-5号支线4号杆	A线路	0.50 519 645	0.82 700 355
线路A-5号支线5号杆	A线路	0.50 529 565	0.82 726 866
线路A-5号支线6号杆	A线路	0.50 524 196	0.82 754 328
线路A-5号支线7号杆	A线路	0.50 522 582	0.82 781 077
线路A-5号支线8号杆	A线路	0.50 520 968	0.82 807 825
线路A-5号支线9号杆	A线路	0.50 519 354	0.82 834 574
线路A-5号支线10号杆	A线路	0.50 512 108	0.82 860 849
线路A-6号支线11号杆	A线路	0.50 447 134	0.83 041 458
线路A-6号支线10号杆	A线路	0.50 390 007	0.83 041 498
线路A-6号支线9号杆	A线路	0.50 365 195	0.83 041 565
线路A-6号支线8号杆	A线路	0.50 341 583	0.8 304 163
线路A-6号支线7号杆	A线路	0.50 318 487	0.83 040 571
线路A-6号支线6号杆	A线路	0.50 296 436	0.83 039 689
线路A-6号支线5号杆	A线路	0.50 277 271	0.83 032 137
线路A-6号支线4号杆	A线路	0.50256873	0.83020724
线路A-6号支线3号杆	A线路	0.501972	0.83017262
线路A-6号支线2号杆	A线路	0.50154029	0.83014581

3. 不同信息素挥发速度对比

设置相同的蚂蚁数量，取 $M_1=M_2=M_3=50$ ；取相同的启发函数因子 $\alpha=1$ ， $\beta=2$ ；设置不同的信息素挥发速度 $\rho_1=0.5$ 、 $\rho_2=0.6$ 、 $\rho_3=0.7$ ，导出不同的结果，并进行分析比较，迭代结果如图6、图7和图8所示。

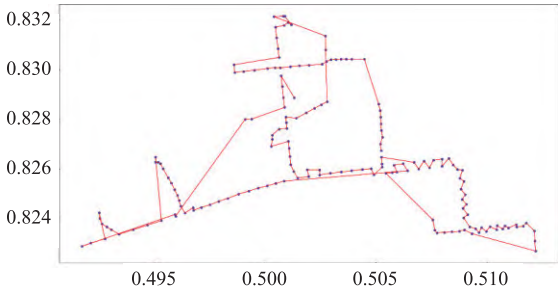


图6 $M_1=50$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=2$ ， $\rho_1=0.5$

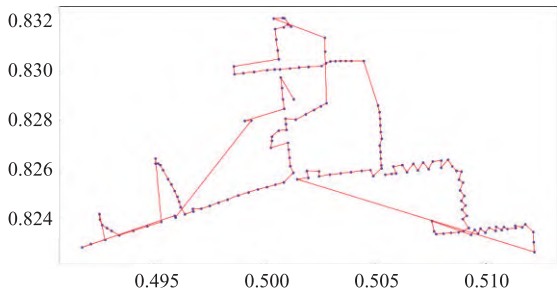


图7 $M_2=50$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=2$ ， $\rho_2=0.6$

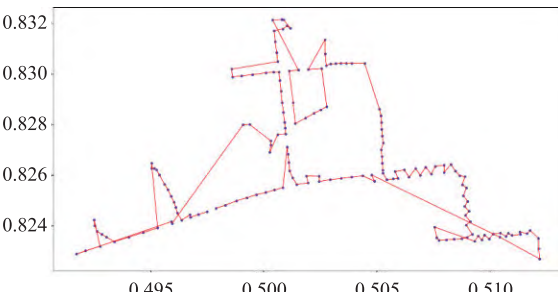


图8 $M_3=50$ ， $\alpha=1$ ， $\beta=2$ ， $\rho_3=0.7$

在信息素总量最大值允许的范围内，较高信息素挥发速度会得到更加优秀的路径（ $\rho_3=0.7$ 的结果优于 $\rho_1=0.5$ 、 $\rho_2=0.6$ 的结果），这是信息素挥发速度的属性所决定的^[6]，信息素挥发速度与蚂蚁路径选择的随机性呈正相关，最终选取 $\rho=0.7$ 。

4. 不同启发因子对比

设置相同的蚂蚁数量 $M_1=M_2=M_3=50$ ，相同的信息素挥发速度 $\rho_1=\rho_2=\rho_3=0.5$ ，不同的启发因子来比较，分析不同启发因子（ $\alpha_1=1$ ， $\beta_1=2$ ； $\alpha_2=1.5$ ， $\beta_2=2.5$ ； $\alpha_3=2$ ， $\beta_3=3$ ）对巡检路径规划的影响，如图9、图10和图11所示。

从上述结果可以看出，不同的启发因子对结果的影响是综合性的，因为 α 和 β 的取值的大小主要影响算法的搜索随机性和收敛性能^[7]，综合考虑选择 $\alpha=1.5$ ， $\beta=2.5$ 。

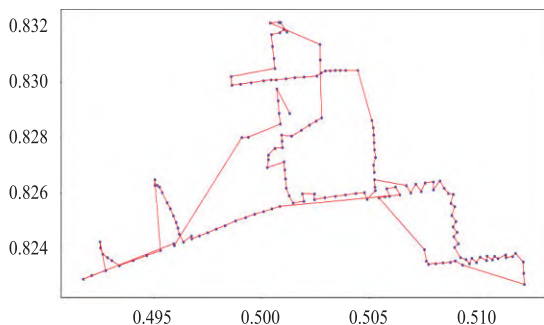


图9 $M_1=50$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho_1=0.5$

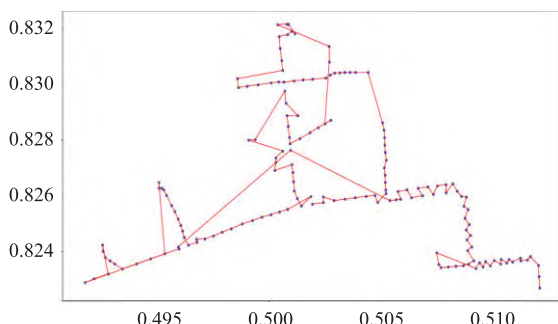


图10 $M_2=50$, $\alpha=1.5$, $\beta=2.5$, $\rho_2=0.5$

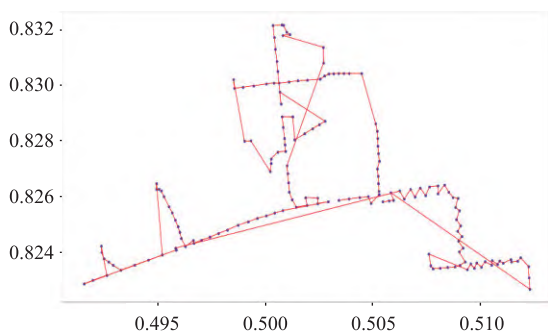


图11 $M_2=50$, $\alpha=2$, $\beta=3$, $\rho_2=0.5$

结束语

本文中,改进蚁群算法(IACO)在配电网线路巡检路径规划的应用中,取得了较为理想的结果,但是基于算法本身的属性,得到的结果只是最优结果之一。如果要进一步优化,需要大量的实践作为支撑,结合算法全局性因素、局部因素和工作实践的经验,不断地改进完善。下一阶段研究中,希望能够将IACO与无人机自身相结合,实现多台无人机在配电网线路巡检中的协同作业;同时,能否在输电线路的巡检路径规划上应用该算法也是一个研究方向。EA

(收稿日期:2024-04-23)

参考文献

- [1] 张洋,赖叶静,黄定江.基于残差网络的配电柜设备元件状态识别[J].华东师范大学学报(自然科学版),2023(2):132-142.
- [2] LU Yongliang, HAO JinKao, WU Qinghua. Solving the clustered traveling salesman problem via traveling salesman problem methods[J]. PeerJ . Computer science, 2022, 8.
- [3] Christian Blum. Ant colony optimization: Introduction and recent trends[J]. Physics of Life Reviews, 2005, 2(4).
- [4] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 1996, 26(1).
- [5] LIU Y, LIU J, LI X, et al. A self-adaptive control strategy of population size for ant colony optimization algorithms[C]//Advances in Swarm Intelligence: 7th International Conference, ICSI 2016, Bali, Indonesia, June 25-30, 2016, Proceedings, Part I 7. Springer International Publishing, 2016: 443-450.
- [6] YANG Lei, LI Kangshun, ZHANG Wensheng, Zhenxu Ke. Ant colony classification mining algorithm based on pheromone attraction and exclusion[J]. Soft Computing, 2017, 21(19).
- [7] WU M, GAO B, HU H, et al. Research on path planning of tea picking robot based on ant colony algorithm[J]. Measurement and Control, 2024; 00202940241228996.
- [8] 朱敏,胡若海,卞京.基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J].现代制造工程,2024(3):38-44.
- [9] 孙凌宇,王威,刘文瀚,等.多因素优化蚁群算法机器人路径规划[J].计算机仿真,2024,41(3):470-476.
- [10] 田智慧,张帅永,高需.遗传-蚁群算法在高性能计算任务调度中的应用[J].计算机应用与软件,2024,41(3):253-257.