

蚁群算法在电力巡检路线规划中的应用^①

徐毅, 李章维

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 为了提高电力巡检效率, 需要制定科学合理的巡检路径规划方案. 通过分析电力线路巡检工作的内容和特点, 建立了基于 VRP(车辆路径问题)的巡检路径规划模型并利用蚁群算法对问题进行求解. 实验求解结果表明, 利用该方法进行巡检路线的优化, 改善了巡检方案的科学性、合理性, 提高电力巡检部门的工作效率.

关键词: 电力巡检; 蚁群算法; 车辆路径问题; 路径规划; VRP 模型

Application of Ant Colony Algorithm to Power Cable Patrol Route Planning

XU Yi, LI Zhang-Wei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to improve the level of inspection efficiency, a scientific and rational inspection route planning should be designed. By analyzing the contents and the characteristics of the power cable patrol, we have established the foundation of inspection path planning model based on the VRP(Vehicle routing problem). And the ant colony algorithm can be applied to solve this issue. The experimental results show that optimization of the inspection path with this method improves the scientificity and rationality of the inspection program, meanwhile the efficiency of electric inspection department has been improved.

Key words: power cable patrol; ant colony algorithm; vehicle routing problem; route planning; VRP model

社会经济飞速发展, 对电能的需求也急剧上升. 同时对电网的可靠度也提出了更高的要求. 电力设备线路巡检是电力网络维护和管理中的一项重要工作, 是电网管理部门获得电网运行状态的一种重要手段, 它对电网运行的可靠度起到至关重要的作用.

目前, 国家电网公司正在建设“大规划、大建设、大运行、大检修、大营销”的新体制^[1]. 以杭州市电力局为例, 当前市电力局与杭州 7 个区、县(市)及杭州经济技术开发区签订电网发展合作协议, 全市正式通过新农村电气化市的考评验收, 全面实现了“县县电气化”、“镇镇电气化”, 电力设备也迅速增加, 这对巡检效率提出了更高的要求. 目前巡检方式基本都以巡检人员遍历巡检点的人工巡检方式为主, 为了提高巡视效率, 降低巡视成本, 需要从全局优化的角度出发寻求输电网络的最优巡检方案. 而通过制定科学合理的

巡检方案, 优化巡检路径, 可以有效地提高巡检效率, 优化电力资源配置.

电力巡检任务主要分为常规巡检、临时巡检和保障巡检. 常规巡检作为管理人员获取设备运行第一手资料的主要手段, 主要包含对线路所属变电站、架空线、电杆、杆上设备、电缆本体等设备的巡查^[2]. 巡检任务的制定一般是由供电工区的管理人员按需定制. 巡检路径的规划与巡检车辆的派遣主要是依靠巡检人员的经验, 有着很强的主观性. 随着电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人员、车辆派遣的合理性, 以及任务实施的高效性.

由于电力巡检大部分情况都是通过派遣巡检人员和电力巡检工程车到各个巡视点进行检查以及故障排查. 因此根据电力巡检的业务特点, 可将巡检业务抽

^① 收稿时间:2014-08-18;收到修改稿时间:2014-09-19

象为 VRP 问题(车辆路径问题)进行优化. 结合某供电区域的对输电线路巡检的实际要求, 本文通过总耗费时间和巡检车辆数量为优化目标, 并利用蚁群算法求解 VRP 问题, 得到最优巡检方案.

1 电力巡检中VRP模型描述统概述

车辆路径问题(Vehicle Routing Problem,简称 VRP) 是 1959 年由 Danting 和 Ramser 在《The truck dispatching problem》一文中首次提出的一个组合优化问题, 指的是优化设计一套车辆行走的路线, 实现以最小的成本满足各个客户的配送要求. VRP 问题涉及的要害很多, 最主要的是目标和约束两个方面, 要求能在一定的约束下, 达到诸如路程最短、成本最小、耗费时间最少等目的^[3].

VRP 问题的研究方法主要有精确优化算法、启发式优化算法和仿生优化算法三大类别^[4]. 由于 VRP 是强 NP 难题, 存在高效的精确算法的可能性不大, 所以寻找近似算法是必要的也是符合现实的. 为此专家们主要把精力放在构造高质量的启发式算法^[5]和仿生优化算法上.

在电力巡检开始前需要调配巡检人员, 合理调配巡检车辆以及规划巡检路线, 以期达到最高效率即在最短路程、最短时间内完成巡检任务, 所以将线路巡检的规划问题通过车辆路径问题进行优化.

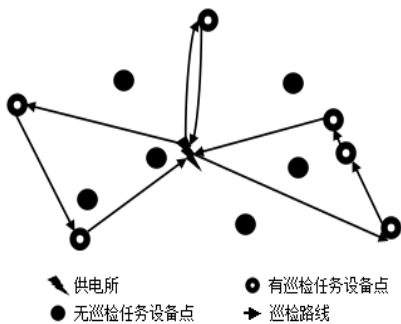


图 1 巡检 VRP 概念模型

电力巡检系统中的优化目标主要有两点:

①为了使巡检成本最低, 巡检路线应当选择最短路程, 巡检所消耗的时间最短;

②制定巡检任务时, 巡检车辆的分配也是一项非常关键的工作. 在保证巡检人员能安全高效的完成巡检任务的前提下, 优化巡检车辆数量; 根据电力巡检的特点所建立的 VRP 模型, 要求巡检车辆数最少以及

巡检总时间最少. 巡检总时间为主要的优化目标, 巡检车辆的数量为次要目标.

这里将电力巡检问题归为单车型单车场封闭式多目标 VRP 问题. 为了将电力巡检路径规划问题抽象为数学模型, 做如下约束条件:

- ① 巡检过程中, 只有一个供电所, 每条巡检路径都以供电所为起点和终点;
- ② 巡检车辆都为同型号车辆(同质车辆), 一辆巡检车辆只负责一条巡检路线;
- ③ 待巡检的任务点只能由一辆巡检车辆负责巡检且只能被巡检一次;
- ④ 巡检车辆有最大巡检路程, 巡检的路径长度不能超过最大路程;
- ⑤ 各个待巡检的任务点被巡检的机会均等;

1.1 VRP 模型的建立

VRP 问题用图 $G(V,A)$ 来表示. 其中, $V = \{0,1,2,3,,N\}$, 0 表示供电所, $V' = \{1,2,3,,N\}$ 表示所有可巡检的任务点和设备, 任务点 i 和任务点 j 之间的距离为 d_{ij} ; $A = \{ (i, j) | i, j \in V, i \neq j \}$; 设巡检人员最大巡检长度为 D , 巡检车辆数为 M , 则 $R = \{1,2,3,,M\}$ 为车辆总集合.

目标函数:

$$\min F = H \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^M x_{ijk} d_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M x_{0ik} \quad (1)$$

约束条件:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 从塔杆 } i \text{ 行驶到塔杆 } j; \\ 0, & \text{否.} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{塔杆设备 } i \text{ 的巡检任务由车辆 } k \text{ 来完成;} \\ 0, & \text{否.} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ijk} \cdot d_{ij} \leq D; \forall k \in R. \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^M y_{ik} = 1; \forall i \in V'. \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{iqk} - \sum_{j=0}^N x_{qjk} = 0; \forall q \in V', k \in R. \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=0}^N x_{ijk} \geq 1; j = 1, 2, \dots, N, \forall j \in V'. \quad (7)$$

式(1)为目标函数, 目标函数第一项表示巡检总

时间, 式子第二项表示分配的巡检车辆的数量, 式中引入参数 H , H 为一非常大的常数, 该参数的作用是保证巡检时间为主要优化目标, 而巡检车辆数为次要优化目标; 式(2)和式(3)表示决策变量; 式(4)是约定巡检距离不会超过巡检人员巡检的最大距离; 式(5)每个任务点只能由一辆巡检车辆进行巡检; 式(6)表示巡检车辆巡检完任务 d 点时, 必须离开该任务点; 式(7)表示每个任务点必须被巡检一次.

2 求解VRP的蚁群算法

蚁群算法(Ant Colony Algorithm)^[6]由意大利学者 Dorigo M 等人提出, 它是一种源于自然界生物的仿生随机搜索算法, 其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为. 该算法不依赖于具体问题的数学描述, 具有全局优化能力和本质上的并行性, 具备更强的鲁棒性、求解时间短、易于计算机实现等优点^[7].

2.1 蚁群算法的基本原理

自然界中, 蚂蚁的食物总是分部于蚁巢的周围. 蚂蚁能够找到从食物到蚁巢的最短路径, 这个路径的找寻不是通过蚂蚁的视觉搜索而是感知其他蚂蚁经过路径所留下的信息素(pheromone)来确定^[8]. 蚂蚁会选择一条信息素浓度大的路径. 当遇到没有走过的路径时, 蚂蚁则随机选择一条路径继续前进. 最优路径上的激素浓度越来越大, 而其它的路径上激素浓度却会随着时间流逝而消减, 最终整个蚁群会找出最优路径^[9]. 利用图 2 简要介绍蚁群算法的原理.

这里假设 N 点为蚂蚁的巢穴(Nest), 食物位于 F 点(Food), 蚂蚁在每个单位时间内移动距离为 1. 由于障碍物的存在, 蚂蚁只能选择 ABC 或者 ADC 这两条路径从食物与巢穴之间来回. 在 $t=0$ 时刻, 有 20 只蚂蚁从 N (Nest)出发寻找食物, $t=1$ 到达 A 点, 由于初始路径上信息素都为 0, 则蚂蚁在 A 点随机选择路径, 即蚂蚁将以相同的概率选择 ABC 或 ADC 路径. $t=2$ 时刻在 ABC 和 ADC 路径上分别各有 10 只蚂蚁. 在 $t=5$ 时, 选择不同路径的两组蚂蚁在 C 点相遇, 此时由于 CB 和 CD 路径上的信息素等量则从 F (Food)返回的 10 只蚂蚁有 5 只选择 CB 另外 5 只选择 CD . 当 $t=9$ 时, 选择 ABC 较短路径的 5 只蚂蚁离开巢穴到达 A 点, 又一次进行路径的选择, 此时 AB 路径蚂蚁运动轨迹数为 20 而 AD 为 15, AB 路径的信息素浓度高于 AD 路径, 则将有更多的蚂蚁选择 AB 路径, ABC 路径的信息素将进

一步加强. 随着时间的推移, 最短路径上的信息素浓度和较长路径上的浓度差距将会越来越大, 最终绝大多数蚂蚁都将选择最短路径. 在这个过程中, 信息素起到了一个正反馈的作用^[10].

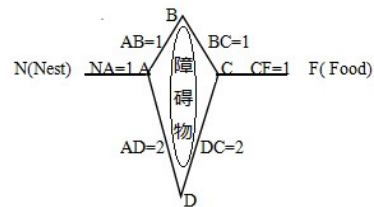


图 2 蚁群算法寻路过程

在 VRP 中, 巡检车辆被人工蚂蚁所取代, 电力巡检时, “蚂蚁”从任务点 i 转移到任务 j , 主要由两个因素影响, 一是两个任务点的可见度 η_{ij} , 可见度

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (8)$$

即两任务点距离越远则可见度就越低; 二是由当前为止所得的路径方案所体现的可行性, 即信息素浓度 τ_{ij} . 当所有人工蚂蚁完成一次循环后, 将更新相关路径的信息素, 更新规则:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^M \Delta \tau_{ij}^k \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_{ij}}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本} \\ & \text{次循环中经过 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

Q 表示信息素强度. 在 t 时刻蚂蚁 k 由任务点 i 转移到任务点 j 的概率为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in allowed_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta}, & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

2.2 算法步骤

求解 VRP 问题使用蚁群算法的步骤如下:

步骤 1: 各参数初始化, 时间变量 t 为 0 以及循环次数 N_c 为 0, 初始化禁忌表 $tabu_k$ 和 $allowed_k$, 设置最大循环次数 N_{cmax} , 并输入相关基础数据;

步骤 2: 将 M 只人工蚂蚁随机分配在 N 个节点上, 更新循环次数 N_c 增加 1, 设置禁忌表索引 k ;

步骤 3: 令人工蚂蚁 k 按照状态转移规则式(12)根据概率选择 $allowed_k$ 中的节点 j ;

步骤 4: 修改禁忌表指针, 并将所蚂蚁所选择的节点 j 加入到禁忌表 $tabu_k$ 中;

步骤 5: 判断当前蚂蚁 k 是否遍历完所有 N 个节点, 若已遍历完则进入步骤 6, 否则进入步骤 3;

步骤 6: 计算蚂蚁走过的总路径, 根据式(11)进行信息素增量的计算;

步骤 7: 对蚂蚁是否完成搜索进行判断, 若 $k < M$, 则 $k=k+1$, 跳转至步骤 3, 否则利用式(9)和式(10)进行全局信息素更新;

步骤 8: 若 $N_c < N_{c_{max}}$, 保存最短路径, $N_c=N_c+1$, 跳转步骤 3, 否则, 循环结束并输出结果.

3 实验结果与分析

利用蚁群算法对 VRP 模型进行求解验证. 这里假设巡检车辆为 2 辆, 有 20 个巡检点(20 个坐标点), 编号 0 坐标为变电所, 编号 1-19 为巡检任务点, 如表 1 所示

表 1 实验基础数据

编号	横坐标	纵坐标	编号	横坐标	纵坐标
0	35	35	10	124	134
1	41	49	11	20	65
2	35	17	12	50	35
3	55	45	13	30	25
4	55	20	14	15	10
5	15	30	15	30	5
6	25	30	16	10	20
7	20	50	17	5	30
8	10	43	18	20	40
9	55	60	19	15	60

各运行参数设置为: $M=11$, $N_{c_{max}}=500$, $Q=50$, $\alpha=1.0$, $\beta=2.0$, $\rho=0.2$. 通过实验仿真得到的最短路径为 297.166, 对应的具体路径方案为:

路线 1: $0 \rightarrow 13 \rightarrow 2 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 19 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 0$;
 路线 2: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 12 \rightarrow 3 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 18 \rightarrow 0$;
 生成的最短路径方案的仿真图为图 3 所示:

如图 3 实验结果所示两辆巡检车辆都从 0 点供电所出发, 分别沿着线路 1 和线路 2 进行巡检, 并最终回到 0 点. 利用 VRP 模型并通过蚁群算法得出的巡检方案, 相较于常规的, 由巡检工作负责人凭借工作经验主观的定制巡检方案来言更加的客观、科学、合理.

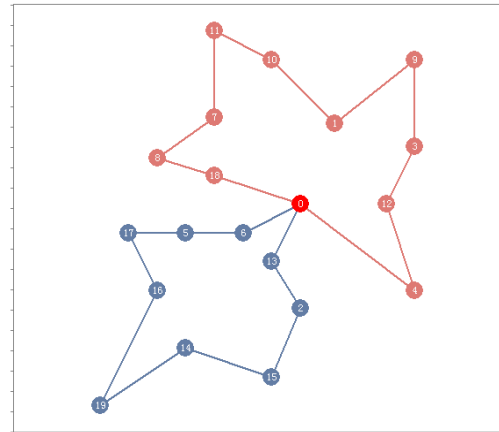


图 3 最短路径方案仿真图

为了方便比较, 这里利用模拟退火算法、遗传算法求解同样问题.

表 2 各算法比较

算法	模拟退火算法	遗传算法	蚁群算法
得到路径长度	303.965	310.193	297.166

从表 2 不难看出, 蚁群算法在求解该问题时, 相比模拟退火算法和遗传算法, 得出的结果更优.

4 结语

电力巡检工作是电力工作中的重点, 是电力管理部门确保辖区内电力线路和设备正常运行的一项重要基础工作. 电力巡检的工作效率关系到供电的稳定与安全. 本文根据电力巡检的业务特点建立 VRP 模型, 为合理分配巡检资源提供了理论依据, 并利用蚁群算法求解 VRP, 得出最佳的巡检路径, 为电力巡检路径的科学规划提供了有效的参考路径. 同时也为电力巡检综合系统软件的开发奠定了基础.

参考文献

- 1 石远鹏, 姜建军, 郑德宇, 杨忠, 黄宵宁. 输电线路巡检的路径规划与建模. 应用科技, 2011, 38(11): 18-21.
- 2 潘晨灵. GPS 用于电力巡检的可行性分析. 华东电力, 2008, 36(9): 64-66.
- 3 Zaki MJ. SPADE: An efficient algorithm for mining frequent sequences. Machine Learning, 2001, 42(1-2): 31-60.
- 4 刘志硕, 申金升, 关伟. 车辆路径问题的混合蚁群算法设计与实现. 管理科学学报, 2007, 10(3): 15-22.
- 5 Han J, Pei J, Asl BM, Chen Q, Dayal U, Hsu MC. FreeSpan:

- frequent pattern-projected sequential pattern mining. Proc. of the Sixth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM. New York, NY, USA. 2000. 355–359.
- 6 Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29–41.
- 7 Dorigo M. Special section on ant colony optimization. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 317–319.
- 8 Dorigo M, Maria L. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 1–24.
- 9 尹晓峰,杜艳萍.车辆路径问题的蚁群算法研究.太原科技大学学报,2005,26(4):279–283.
- 10 苏涛,庆田,李文强,孙聪.算法研究.计算机与现代化,2012, (11):18–21,25.
- 11 何冰,季建华,刘新平,侯晓明.基于遗传算法的城市输电网络巡视路径优化选择问题.计算机应用研究,2013,30(8): 2276–2279.
- 12 柳长安,刘春阳.基于标记分水岭算法的高分辨率遥感图像分割算法.华中科技大学学报,2010,38(1):118–120.