

# 考虑出航时间窗的海上风电场运维调度建模研究

唐宏芬, 王丽杰, 吴 春, 张真真, 曹庆才

(中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司, 北京 100052)

**摘 要:** 根据海上风电场的运维调度实际需求, 提出考虑出航时间窗的船只航迹规划与调度问题, 建立了以最小化出航成本与延迟成本为目标函数的数学模型。使用多种群遗传算法, 对运维任务优先级进行编码并进行求解, 同时利用移民算子和精华种群保证求解过程的有效性。案例的仿真模拟结果证明, 该算法较常规维护规则可大幅度降低运维成本。

**关键词:** 海上风电场; 设备运维; 多种群遗传算法

**中图分类号:** TM614

**DOI:** 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.03.049

## Research on Modeling of Offshore Wind Farm Operation and Maintenance Scheduling Considering Sailing Time Window

TANG Hongfen, WANG Lijie, WU Chun, ZHANG Zhenzhen, CAO Qingcai

(China Datang Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100052, China)

**Abstract:** According to the actual needs of the operation and maintenance scheduling of offshore wind farms, the problem of ship trajectory planning and scheduling considering the sailing time window is proposed, and a mathematical model with the objective function of minimizing sailing cost and delay cost as the objective function is established. The multi population genetic algorithm is used to encoding and solving the priority of operation and maintenance tasks, and the immigration operator and elite population are used to guarantee the validity of the solving process. The simulation results of the case show that the algorithm can greatly reduce the operation and maintenance cost compared with the conventional maintenance rules.

**Key words:** offshore wind farms; operation and maintenance; multiple population genetic algorithm

## 0 引言

近年来, 风力发电行业持续快速发展<sup>[1]</sup>。据全球风能委员会报道, 2020 年全球新增风电装机 93 GW, 同比增长 53%。在石油和天然气日渐短缺的当下, 风能已是当今世界清洁能源中最重要的一部分。由于海上风速较高, 因此海上风电场能获得成倍于陆上风电场的发电量, 是未来风电的主要发展趋势。但海上环境复杂, 安装与运维的成本较高, 目前海上风电的利润仍低于陆上风电。Snyder 的研究表明, 海上风电场的运维成本占据其整体收入的 20%~35%<sup>[2]</sup>。因此, 如何有效降低海上风电场运维成本, 对于增加风电场利润, 扩大海上风电场的规模, 推进全球绿色能源发展具有重大现实意义。

Feng 等人通过研究表明, 优化维修船舶的出航时间与路线, 能有效降低运维成本<sup>[3]</sup>。船舶的出航时间及路径规划问题, 可抽象成车辆路径规划问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)。VRP 作为一类经典的优化问题, 已被证明是 NP 难问题, 大规模 VRP 问题难以使用精确算法进行求解, 业界通常使用元启发式算法进行求解。常见的元启

发式算法有禁忌搜索<sup>[4]</sup>、蚁群算法<sup>[5]</sup>等。对于本文所研究的问题, Dai 提出了海上风电场船只运维路径调度问题<sup>[6]</sup>, 以最小成本为目标函数, 建立了优化维护船只路径的数学模型。Schrotenboer 利用自适应大邻域搜索算法, 以最小化平均出航次数和维护时间为目标函数的 VRP 问题进行求解<sup>[7]</sup>。Stlhane 提出了两种近似模型用以求解该问题, 并利用分支定界算法证明了近似模型的有效性<sup>[8]</sup>。

上述研究通常只考虑可运维的时间是连续的, 但是海上的环境复杂多变, 在极端恶劣环境下, 运维船只无法进行维护操作, 只能在环境允许的情况下出海维护。这类问题可被视为带有时间窗的车辆路径规划问题 (Vehicle Routing Problems with Time Windows, VRPTW)。针对 VRPTW 问题, 学界也有不少研究。Zulvia 针对具有时间窗的易腐产品的运输问题, 建立了多目标梯度演变算法进行求解<sup>[9]</sup>。Dong 针对具有多目标的 VRPTW 问题, 利用离散萤火虫搜索算法进行求解, 并通过数值实验证明<sup>[10]</sup>, 该算法比常见的其他算法效果更好。

综上所述, 考虑复杂环境下的海上风电场运维调度的研究不够充分, 国内针对考虑出航时间窗的海上风电场运维调度问题的研究较少。为此, 本文以 VRPTW 的相关研

收稿日期: 2021-06-21

究作为基础,解决考虑出航时间窗的海上风电场运维调度问题,具有重要的理论意义。

## 1 问题描述

海上风电场主要包含了一系列与电网相连的风电机组,一个或多个运维中心,运维中心的船舶及维护人员等。海上风电场的运维工作包括维护人员配置、维护设备配置、维护周期优化、船只调度及路径规划,是一个涵盖了多个部分的复杂问题。在海上风电场建成后,运维工作的主要内容为风电机组的维护与检修。对于一台风电机组,如果没有在最晚维护时间前完成维护,风电机组会产生效率降低,故障甚至停机,造成整体风电场的功率减少,因此如何安排维护路线及维护时间,对于降低成本有重要意义。此外,随着风力发电技术的发展,海上风电场将位于风力资源充足,距离海岸线很远的深水地带,周围环境复杂,时常伴随着无法出航的海上恶劣环境,因此依照天气预测,确定出航时间窗,并严格按照出航时间窗执行运维任务,在此前提下进行船只的路径优化与时间安排,从而最小化维护成本与风电机组的功率损耗,是本文的研究重点。

为了将重点放在考虑出航时间窗的海上风电场运维调度上,本文做出如下假设:运维中心只有一组船只与维护小组;运维周期内没有新的运维任务产生;在最晚维护时间前开始维护,不产生功率损耗,超时后产生功率损耗,造成利润损失;在非维护时间窗内,运维小组必须停留在运维中心,避免海上风浪造成的危险。

## 2 数学模型

本文涉及的部分参数定义如下: $u$ 为需维护的风电机组的索引, $u=0,1,\dots,U$ ,其中 $u=0$ 表示运维中心; $p_u$ 为风电机组的最晚维护时间; $c_u$ 为风电机组未及时维修产生的单位时间利润损失; $q_u$ 为风电机组需要的维护时间; $c_0$ 为单位航行时间的运输成本; $d_{ij}$ 为某风电机组 $i$ 到 $j$ 的航行时间; $k$ 为维护班次,单个维护周期内有多次出航,对应不同的维护班次,同时也对应多次出航的时间窗; $t_{hk}$ 为出航时间窗时间, $h=0$ 表示时间窗开始, $h=1$ 表示时间窗终止。

决策变量: $x_{ijk}$ 为0、1变量, $x_{ijk}=1$ 表示在第 $k$ 个维护班次中,船只由 $i$ 点向 $j$ 点航行; $y_{uk}$ 为船只在第 $k$ 个维护班次中,到达 $u$ 点开始维护的时间。

目标函数为:

$$\min z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^U \sum_{j=0}^U c_0 d_{ij} x_{ijk} + \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K c_u \times \max(0, y_{uk} - p_u) \quad (1)$$

式中,第一个求和项为总航行时间产生的运输成本;第二个求和项为未及时维护造成的利润损失。

如果船只及时维护,即 $y_{uk} - p_u < 0$ ,那么不会造成利

润损失;反之如果没有及时维护,即 $y_{uk} - p_u > 0$ ,就会造成利润损失。

约束条件:

$$\sum_{j=1}^U x_{ijk} = 1; \forall i \in U, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^U x_{0jk} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^U x_{ijk} - \sum_{j=0}^U x_{jik} = 0; \forall k \in K \quad (4)$$

$$y_{0k} < t_{1k} \quad (5)$$

$$y_{jk} = \begin{cases} y_{jk} + d_{ij} + q_i, x_{ijk} = 1, i \neq 0 \\ d_{0j} + t_{0k}, x_{0jk} = 1 \\ 0, \text{else} \end{cases}; \forall j \in U, \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_{ijk} = \{0, 1\}; \forall i \in U, \forall j \in U, \forall k \in K \quad (7)$$

$$y_{uk} \geq 0; \forall u \in U, \forall k \in K \quad (8)$$

式(2)表示每个风电机组只能被维护一次;式(3)表示每个周期内,船只都是从运维中心出发;式(4)表示每次维护完成后,船只必须离开,以及船只从运维中心驶出后必须返回运维中心;式(5)表示每个维护班次内,都在时间窗截止前返回运维中心;式(6)表示维护时间 $y_{uk}$ 与维护顺序 $x_{ijk}$ 之间的关系,每个涡轮机的维护时间 $y_{jk}$ 由维护路径中的上一个风电机组维护时间决定, $x_{0jk}=1$ 时表示 $j$ 是 $k$ 班次内第一个维护的风电机组;式(7)、式(8)分别表示了决策量的取值范围。

## 3 多种群遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)作为一种常见元启发式算法,通过种群的自然选择,逐步逼近全局最优解,对于多种复杂的优化问题都有较好的求解效果。然而遗传算法也有他的不足之处,如依赖初始种群、过早收敛等。针对遗传算法的这些缺陷,学界提出了一种多种群遗传算法(Multiple Population Genetic Algorithm, MPGA)来取代传统的遗传算法。

MPGA首先构造多个初始种群,每个种群分别采用不同的交叉因子与变异因子进行迭代,各种群的交叉和变异互不干涉,从而避免种群因逐渐趋同而陷入局部最优。同时,为了提高求解质量,实现各种群之间的协同进化,MPGA利用移民因子,将种群中优秀的个体引入其他种群,从而改进各种群的平均质量。通过循环迭代,逐渐收敛到最优解。此外,MPGA还设立了一种精华种群,精华种群中的个体独立于其他种群,避免被交叉和变异的操作破坏。MPGA的算法流程图如图1所示。

### 3.1 染色体编码与解码

染色体编码采用风电机组维护优先级列表进行编码。每条染色体有 $U$ 个基因,每个基因含有一个 $1 \sim U$ 之间的自然数,表示这个运维任务的优先级顺序。染色体的解码过程即是按照优先级规则对运维任务进行维护。每个班

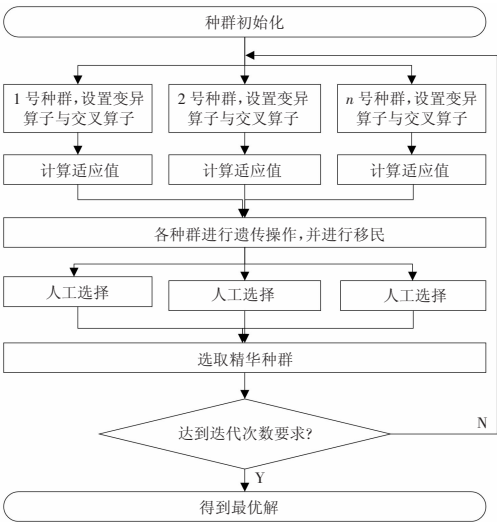


图1 多种群遗传算法示意图

次的维护从时间窗开始时出发，按染色体顺序进行运维任务，每次维护完工后判断能否在保证出航时间窗的前提下进行下一个运维任务。如果可保证，就进行下一步的运维任务，否则返回运维中心，等待下一个维护时间窗进行维护。

3.2 选择操作

遗传算法中的选择操作是指通过计算染色体的适应度，按照适应度进行选择，以便进行交叉、变异、移民等操作。染色体的适应度函数表示为本文目标函数的倒数，每得到一个染色体进行解码后，对解码得到的调度方案进行目标函数的求解，得到该染色体对应的成本 $z$ ，对其求倒数得该染色体的适应值 $1/z$ 。

3.3 交叉与变异

本文采用单点交叉的方法进行染色体交叉，即在两个配对的个体上随机选择一个运维任务，然后互换对应的基因，即任务对应的优先级。对于互换后染色体上产生的优先级重复，将未交叉任务的优先级向相应方向增大或缩小，从而得到一条完整的染色体，具体过程如图2所示。



图2 交叉操作示意图

本文的变异操作选取反转变异，选取一条父代染色体，对染色体上的一段基因进行反转，从而得到新的子染色体。

3.4 多种群遗传算法的参数

多种群染色体的特点在于不同的种群之间遗传相互独

立，因此为每个种群设定单独的交叉因子与变异因子十分重要。通过不同的遗传因子，不同种群的搜索方向不同，因此能更广泛地进行搜索。学者通过研究指出，进化过程中应选取较大的交叉概率和较小的变异概率，遗传算法能获得较好的搜索效果。两者选区的范围分别为 $[0.7, 0.9]$ ， $[0.001, 0.05]$ ，本文将在进行算法前随机选取每个种群的遗传算子，从而提高算法的全局搜索能力。

3.5 移民操作

本文将每个种群中的最优个体挑选出来，称为移民种群，用移民种群替换每个种群中等量的劣质个体，从而保证每个种群都能含有各种群的最优解，促使多种群协同进化。

3.6 精华种群

精华种群用以保留每次迭代过程中的最优秀个体，这些个体不会参与遗传的操作。当迭代完成后，从精华种群中选取最优的个体，获得多种群遗传算法的最优解。

4 数值实验

本文算例的风电机组功率、发电机机位等数据来自于真实的海上风电场，假设该风电场拥有一个运维中心，一艘维护船只及足够完成运维任务的维护人员。以7天内的监测数据进行分析，分别考虑以下4个场景：5天10个运维任务；5天15个运维任务；7天15个运维任务；7天20个运维任务。维护时间窗随机生成，每天内有6h的时间窗不可进行维护，对时间的划分以10min为最小单位。

遗传算法迭代次数为50，种群规模为维护任务的5倍，共有5个种群，交叉概率和变异概率在范围内随机选取。数值实验的结果见表1。

表1 多种群遗传算法求解结果

场景	成本/元	求解时间/s
5天10个运维任务	44183	48
5天15个运维任务	87738	105
7天15个运维任务	81346	136
7天20个运维任务	127674	185

同时，为了进行算法有效性的对比，本文将采用3种优先级规则与多种群遗传算法进行对比。3种优先级规则分别为：运维时间优先规则，运维时间最早的维护任务优先级最高；距离最近规则，距离运维中心最近的维护任务优先级最高；最大惩罚规则，延迟惩罚成本最高的维护任务优先级最高。数值实验的结果见表2。

表2 对比规则求解结果

场景	运维时间优先规则		距离最近规则		最大惩罚规则	
	成本/元	优化比率	成本/元	优化比率	成本/元	优化比率
5天10个运维任务	52002	17.70%	54855	24.15%	50509	14.32%
5天15个运维任务	101650	15.86%	110245	25.65%	101774	16.00%
7天15个运维任务	95627	17.56%	99603	22.44%	95964	17.97%
7天20个运维任务	153791	20.46%	164902	29.16%	150716	18.05%



从表1可看出,多种群遗传算法的求解时间较短,在可接受范围内。通过对规则和多种群遗传算法求解的成本进行对比,得到了表2中的优化比率。多种群遗传算法的求解质量相较于传统的利用优先级规则进行运维的方法提升了许多,算法求解质量较好。在工程上应用此方法,相较于利用优先级规则能获得更好的经济收益。

## 5 结语

本文使用多种群遗传算法,考虑风电机组功率、风电机组空间位置、出航时间、维护顺序、维护路径等,以海上风电场运维调度成本为优化目标进行求解,并与优先级规则的运维策略进行对比,结果表明本文算法可更好地指导风电场运维工作。为便于分析比较,本文在进行数值实验时设定了一些条件,与实际情况不是完全相符,在进一步的研究中,需考虑海上风电场的更多复杂情况,以符合海上风电场运维调度的真实情况。

### 参考文献

- [1]Carroll J,McDonald A,Dinwoodie I,et al. Availability,operation and maintenance costs of offshore wind turbines with different drive train configurations[J]. Wind Energy,2016 (20): 361-378.
- [2]Snyder B,Kaiser M J. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy[J]. Renewable Energy,2009, 34(6):1567-1578.

- [3]FENGQ,BI W,CHEN Y,et al. Cooperative game approach based on agent learning for fleet maintenance oriented to mission reliability[J]. Computers & Industrial Engineering,2017 (1):221-230.
- [4]Michel,Gendreau,Manuel,et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints[J]. Networks,2008,51(1):4-18.
- [5]刘志硕,申金升,柴跃廷. 基于自适应蚁群算法的车辆路径问题研究[J]. 控制与决策,2005,20(5):562-566.
- [6]DAI L,Stalhane M,Utne I B. Routing and scheduling of maintenance fleet for offshore wind farms[J]. Wind Engineering,2014,39(1):15-30.
- [7]Schrotenboer,Albert H,Broek,et al. Coordinating technician allocation and maintenance routing for offshore wind farms[J]. Computers & Operations Research,2018(8):185-197.
- [8]Stlhane M,Hvattum L M,Skaar V. Optimization of routing and scheduling of vessels to perform maintenance at offshore wind farms[J]. Energy Procedia,2015,80:92-99.
- [9]Zulvia F E,Kuo R J,Nugroho D Y. A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products[J]. Journal of Cleaner Production,2020, 242 (1):118428.
- [10]DONG W,ZHOU K,QI H,et al. A tissue P system based evolutionary algorithm for multi-objective VRPTW [J]. Swarm and Evolutionary Computation,2018,39:310-322.

(上接第129页)

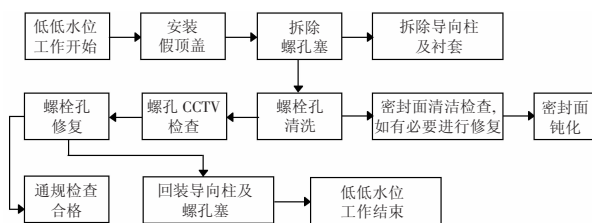


图6 优化后螺栓孔清洗工序

(1)节省反应堆压力容器开盖约6 h的大修主线关键路径时间。

(2)可第一时间、更直观地检查清洗效果,若清洗后清洗效果不佳,则直接将清洗机移动至对应的螺栓孔进行再次清洗,不会出现人工进行二次清洗的情况。

(3)新型螺栓孔清洗机均在20 m平台上通过控制台来操作,无需检修人员待在堆芯水池中,忽略拆装清洗机时受到的少许剂量,不存在人员长时间待在堆芯池接受辐照的情况,减少大修人员照射总剂量。

## 5 结语

本文通过分析原螺栓清洗工序的局限性,采用新设备对螺栓孔清洗的工序进行优化。通过优化后螺栓孔清洗的工序分析可知,没有大修主线关键路径带来的工期压力,有足够时间对螺栓孔进行充分清洗,清洗质量更好,减少检修人员接触高剂量区域的时间,满足核电站辐射防护最优化的原则。

### 参考文献

- [1]蒋严军. 核电厂反应堆压力容器顶盖开关的过程控制[J]. 中国核电,2013,6(2):148-152.
- [2]洪龙. 反应堆压力容器螺栓孔清洗机的研制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(10):132-134.
- [3]关欣. 反应堆压力容器螺栓孔清洗机设计[J]. 工业技术,2016(6):60-61.
- [4]于雷. 反应堆压力容器主螺栓孔清洗装置的设计[J]. 科技论坛,2015(13):71.