

海上风电场通用运维路径规划模型优化及仿真

谭任深^{1,2} 徐龙博¹ 周冰¹ 荆朝霞² 黄向生³

1 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 广州 510663

2 华南理工大学电力学院 广州 510640

3 中国科学院自动化研究所 北京 100190

摘要 海上风电场运维的路径规划是一项极具挑战性和复杂性的任务,需要确定运维所需要的资源、交通工具路径,使得总运维成本最小化。文中在海上风电场运维规划建模方面采用了抽象类的方式,建立了通用性运维路径规划模型框架,该模型有利于兼容不同的海上风电场运维的路径规划与调度决策任务,可提高模型的可扩展性和多场景适用的灵活性。采用改进的自适应大邻域搜索算法(ALNS),提出在含有多个 destroy 和 repair 算子的算法基础上,求解基于抽象类的通用运维路径规划模型。选定国内某风电场数据进行仿真实验,通过在 ALNS 内部对比 6 个算子求解的结果,以及将 ALNS 与精确算法结果进行比较,结果显示该算法具有较好的优化效果和可靠性。

关键词:海上风电;通用运维规划模型;抽象类;自适应大邻域搜索;路径规划

中图法分类号 TP181, TM614, TK89

Optimization and Simulation of General Operation and Maintenance Path Planning Model for Offshore Wind Farms

TAN Ren-shen^{1,2}, XU Long-bo¹, ZHOU Bing¹, JING Zhao-xia² and HUANG Xiang-sheng³

1 China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China

2 School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

3 Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The path planning of offshore wind farm operation and maintenance is a challenging and complex task, which needs to determine the resources and transport paths needed by the operation and maintenance, so as to minimize the total operation and maintenance cost. In this paper, the abstract class method is adopted in the modeling of offshore wind farm operation and maintenance planning, and a general operation and maintenance path planning model framework is established. This model is conducive to the compatibility of different offshore wind farm operation and maintenance path planning and scheduling decision-making tasks, improve the scalability of the model and the flexibility of multi-scenario application. In this paper, an improved adaptive large neighborhood search algorithm (ALNS), is proposed to solve the general operation and maintenance path planning model based on abstract class on the basis of the algorithm with multiple destroy and repair operators. Finally, the data of a domestic wind farm is selected for simulation experiment. By comparing the results of six operators within ALNS, and comparing the results of ALNS with the results of accurate algorithm, the results show that the algorithm optimization has better effect and reliability.

Keywords Offshore windfarm, General operation and maintenance planning model, Abstract class, Adaptive large neighborhood search, Path planning

1 引言

风力发电产生清洁的能源,能够保护环境,应对气候的变化^[1]。风力发电不仅是助力全球经济、减缓新冠疫情冲击的重要推动力量,而且能够推动各国关键基础设施的更新换代。风电产业能够创造就业机会,为社会提供绿色、可负担的能源以及经济可持续发展所需的能源安全^[2]。风力发电的电机平台技术也在不断迭代升级,推动了技术创新和研发投入^[3]。

风力发电也契合中国以 2060 年的碳中和目标为指导的大方向^[4]。近年来海上风电蓬勃发展,风力发电是我国沿海地区的主要方向。海上风电的能源丰富,对环境的影响较传统火力发电小,风电场规模较容易规模化开发^[5-6]。然而,海上天气条件较为恶劣,导致了海上风电机组可靠性低、维护成本较高^[7]。海上风电的运维成本约占项目全生命周期总成本的 20%~30%^[8],超过陆地风电运维成本 2~3 倍。海上风电运维成本是制约海上风电发展的重要因素之一^[9-10]。

基金项目:2019 年度广东省促进经济发展专项基金(海洋经济发展用途);海上风电智能运维策略研究(GDOE[2019]A10 号)

This work was supported by the 2019 Guangdong Provincial Special Fund for Economic Development(Marine Economic Development Purposes)“Offshore Wind Power Intelligent Operation and Maintenance Strategy Research”(GDOE[2019]A10 号)。

通信作者:谭任深(tanrenshen@gedi.com.cn)

海上风电场维护活动中的路径规划是运维业务的重要组成部分^[11]。在特定的维护策略情况下,需要根据路径规划模型制定最优的运维路径。近年来,人们建立了众多针对各种场景的海上风电场运维模型,Stlthane等^[12]提出了周期为一天的运维规划模型,该模型属于混合整数线性规划模型,考虑了预防性和事后性维护,以及船舶运输、技术人员等因素。Zhang等^[13]介绍了一种集成的维护决策和路径规划模型,该模型旨在解决多天的海上风电场运维排程中船舶路径优化问题,同时考虑了船舶运输备件的能力。Cai等^[14]研究了多周期、多个O&M基地和多个海上风电场的维护调度和路径的优化模型。Raknes等^[15]研究了多个工作班次的维护计划、路径规划、船舶轮班等问题。Schrotenboer等^[16]考虑了不同风电场之间共享技术人员,并提出使用自适应大邻域搜索的方法求解。Stock-Williams等^[17]还研究了基于遗传算法的启发式优化模型,用于日常维护规划问题。Stock-Williams等^[17]研究了基于大邻域搜索的启发式方法解决一天的路径规划问题,同时引入了蒙特卡洛随机模拟的方法,用于模拟天气条件、涡轮状况、技术人员、备品备件的随机变化情况。

上述文献大多是基于特定的场景案例建立数学模型。本文综合典型场景并将其中出现的因素进行了抽象类分析,提出一个通用的海上风电场运维路径规划模型。该模型将数量较多的因素抽象聚类为多个类,当通用模型中的类包含的属性足够全面,就便于兼容更多的场景。在求解模型上,本文采用了改进的自适应大邻域搜索算法(ALNS)来求解所建立的通用模型^[18]。通过邻域搜索的方法改进搜索的算子,提高了局部邻域搜索的效果,得到了更好的解。本文通过经典的风电场案例,使用上述通用运维规划模型和改进的ALNS进行计算与分析,通过对比6个算子求解的结果,保证算法优化效果和可靠性。

2 基于抽象类的通用模型建立

本文建立的海上风电场通用运维路径规划模型属于确定性维护路径问题(MRP)的优化模型^[14]。该模型输入参数包括需要维护的风机信息以及进行维护所需的运维资源信息(如船舶、备件和技术人员)。风机所需的信息包括:经纬度坐标及相应的维修任务信息(所需技术人员的种类及数量、所需备件的种类及数量、维护成本、维护时间、风机维护的截止时间、风机维护的惩罚成本、人员及备件的转移时间、风机维护时是否需要船只在场)。由于各种因素的限制,包括有限的资源(如船舶、零件和技术人员)和恶劣的天气条件,如果无法在给定的截止时间之前维护风机,则会存在风机的惩罚成本,即收入损失。

所需的船舶信息包括每艘船只的行驶速度、单位油耗、载客量和载重量、购买费用/租赁费用,以及受天气影响的天气条件(此处我们通过天气窗口的大小来体现)。每艘船只的天气窗口信息包括船只离开和返回基地的时间范围,也就是说,船只不能在海上过夜,且必须返回到当天出发的基地。此外我们还考虑了基地的一些信息,如基地的经纬度坐标、可泊位数量、可用的技术人员种类及数量、可用的备件种类及数量、可用的船只数量,以及服务的风电场编号下标。

上述分析是典型的海上风电场运维过程中所涉及的因素以及部分业务规律^[14],本文将这些因素归类,即所谓的抽象类建模,目的是建立一个更加通用的海上风电场运维路径

规划模型。具体是将相关的因素分为六大类:海上任务点类、驻点类、交通工具类、天气环境类、物品资源类、人员类。通用的模型包含抽象类输入、可自定义运维规划模型、改进ALNS优化算法和结果输出,其架构如图1所示。

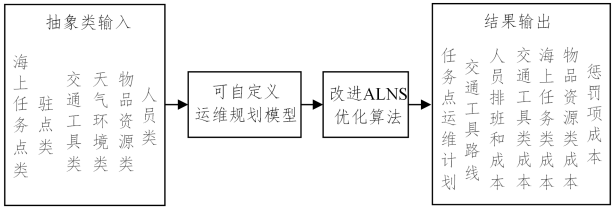


图1 通用运维规划模型

Fig.1 General operation and maintenance planning model

海上任务点类描述需要执行任务的点,可以是风机场或者待维修电缆点,其中属性包含:任务点坐标、编号、任务所需物品种类及数量、任务所需人员及数量、任务所需的船舶类型及数量、任务成本、惩罚成本、截止时间、任务时间、转移时长、是否需要交通工具在场、任务持续时间。

驻点类描述执行任务所需要的资源所在的地方,可以是岸上码头或者海上驻点,其中属性包含:驻点坐标、编号、可停靠交通工具数量、可启用人员资源种类及数量、可用物品资源种类及数量、可用交通工具数量、服务点、携带附属交通工具数量。

交通工具类描述从驻点到任务点的方式,可以是各种专业船舶、直升机等,其中属性包含:编号、购买费用、租赁费用、速度、油耗、载客量、载重量、可出行最早时间、可返回最晚时间、航行路线。

天气环境类描述天气情况和影响交通工具出行和海上运维作业的外界因素,其中属性包含:能见度、是否大雾、是否大雨、航行时风速、航行时浪高、航行时浪涌、航行时状况,最终天气环境类因素通过不同船只的出航时间窗口表达出来。

物品资源类描述备品备件或者维修工具,其中属性包含:编号、购置成本、类型、重量、所在坐标。

人员类描述巡查人员、维修人员等,其中属性包含:编号、成本、最大持续时间、所在坐标。

2.1 数学模型描述

该模型的目标是总成本最小化,总成本包括:交通工具类成本、海上任务类成本、人员类成本、物品资源类成本、惩罚项成本,如式(1)所示。

$$\min Z=Z^{\text{tr}}+Z^{\text{cm}}+Z^{\text{tech}}+Z^{\text{part}}+Z^{\text{penalty}} \tag{1}$$

交通工具类成本:

$$Z^{\text{tr}}=\sum_{v\in V}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}(c_{vij}\cdot X_{vij}) \tag{2}$$

海上任务类成本:

$$Z_{\text{cm}}=\sum_{i\in N}m_i \tag{3}$$

人员类成本:

$$Z^{\text{tech}}=\sum_{v\in V}\sum_{i\in N_u}\sum_{p\in P}(t_{ip}-\lfloor T_{vi}-\dot{T}_i\rfloor\cdot t_{ip}) \tag{4}$$

物品资源类成本:

$$Z^{\text{part}}=\sum_{i\in N}\sum_{s\in S}b_s\times b_{ip} \tag{5}$$

惩罚项成本:

$$Z^{\text{penalty}}=\sum_{i\in N}(\tilde{c}_i\cdot(\dot{T}_i-\bar{T}_i)) \tag{6}$$

其中,式(2)中的 c_{vij} 为船只 v 从风机 i 到风机 j 的路途成本, $X_{vij}=1$ 当且仅当船只 v 从风机 i 到风机 j 时,否则为0。在

此模型中我们设置出航时的码头作为风机 0、回港时的码头作为风机 $n+1$ 来看待;式(3)中的 m_i 是风机 i 的维护成本;式(4)中的 t_{ip} 为风机 i 需要 p 类工人的数量, T_{vi} 表示船只 v 到达风机 i 的时刻, \bar{T}_i 表示风机 i 维修完成的时刻;式(5)中的 b_{ip} 表示风机 i 需要种类为 s 的备件数量, b_s 为备件类型为 s 的成本;式(6)中的 \bar{c}_i 为风机 i 的惩罚成本, \bar{T}_i 为风机 i 的停机时刻; V 是所有船只的集合; N 是所有待维修风机的集合; P 是工人种类的集合; S 是备件类型的集合。

约束条件:

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} X_{vij} \leq 1, \forall j \in N \tag{7}$$
$$X_{v(n+1)i} = 0, \forall v \in V, i \in N \tag{8}$$

确保每个风机只在送出工作人员时访问一次,在接回工作人员时访问一次;

$$X_{v0j} = 0, \forall v \in V, j \in N \tag{9}$$

确保船只从接回结点返回港口;

$$\sum_{i \in N} X_{vij} = \sum_{i \in N} X_{vi(n+1)}, \forall v \in V, j \in N \tag{10}$$

每个结点的流量守恒,即船只只在一个结点上送出工作人员,就必须在这个结点接回工作人员;

$$\sum_{i \in N} X_{vij} = \sum_{i \in N} X_{vi(n+1)}, \forall v \in V, j \in N \tag{11}$$

确保船只在风机上进行工作人员的接送;

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (X_{vij} \cdot w_i) \leq \hat{w}_v, \forall v \in V \tag{12}$$

确保船只运输的备件重量不超过其载重量;

$$\sum_{p \in P} Q_{vip} \leq \hat{\rho}_v, i \in \{0, 2n+1\} \tag{13}$$

$$\sum_{p \in P} Q_{vip} \leq \hat{\rho}_v - \sum_{p \in P} \rho_{ip}, \forall v \in V, i \in I \tag{14}$$

$$\sum_{p \in P} \rho_{ip} \leq \sum_{p \in P} Q_{v(n+1)p} \leq \hat{\rho}_v, \forall v \in V, i \in I \tag{15}$$

保证船上技术人员数量不超过船只载容量;

$$T_{v0} \geq \bar{t}_v, \forall v \in V \tag{16}$$
$$T_{v(2n+1)} \leq \bar{t}_v, \forall v \in V \tag{17}$$

确保船只活动的时间范围必须在天气窗口内;

$$(\hat{\tau}_i + \bar{\tau}_i) \cdot \sum_{j \in N} X_{vij} \leq T_{v(n+1)} - T_{vi}, \forall v \in V, i \in I \tag{18}$$

保证从送出工作人员到接回工作人员的时间要大于在风机上执行维护所需的时间;

$$X_{vij} = 0 \quad \forall v \in V, i \in I, j \in N, j \neq (n+1) \tag{19}$$

确保船只在维修活动期间需要存在时,直接从出发结点行驶到接回结点;

$$\sum_{v \in V} Q_{vip} \leq \hat{\rho}_p, \forall i \in I, p \in P \tag{20}$$

确保所需的技术人员数量少于或等于基地中可用的技术人员数量。

2.2 基于启发式算法优化的通用规划模型

受邻域搜索算法的启发,本文结合了自适应大邻域搜索算法(ALNS)来对此模型进行求解。ALNS的基本原理是迭代并有方向地破坏和重建当前解决方案来进行改进。该求解方法(ALNS)为启发式方法,所以其能够在可接受的计算时间内获得一个良好的解决方案,该解决方案能使本模型中的目标函数最小化,即总维护成本最小化。ALNS的主要步骤如算法 1 所示。

算法 1 对决策模型提出的 ALNS 算法

- 1. 设置 $S_v^* = \emptyset (\forall v \in V), z^* = \infty$, 并设置请求集 $R = I$;
- 2. 设置初始解: s_v^0 ;
- 3. 在初始解为 s_v^0 的情况下,将未插入的风机组成请求集 R ;

- 4. 设置最优解: $s_v^* \leftarrow s_v^0$;
- 5. 设置当前解: $\bar{s}_v \leftarrow s_v^0$;
- 6. for iter=1 to IterMax do:
- 7. 随机选择 Removal 算子;
- 8. 从 \bar{s}_v 中移除一个风机并将其加入请求集 R 中;
- 9. $S_v' \leftarrow \text{Removal}(\bar{s}_v)$;
- 10. for i=1 to |R| do
- 11. 通过将风机 R_i 插入到解 s_v' 来重构解;
- 12. $S_v'' \leftarrow \text{Reconstruct}(S_v')$;
- 13. 令 z'' 表示解 S_v'' 的目标值, z^* 表示解 s_v^* 的目标值;
- 14. if $z'' < z^*$ then
- 15. $s_v^* \leftarrow s_v''$;
- 16. $s_v' \leftarrow s_v''$;
- 17. end if
- 18. end for
- 19. 通过将风机 s_v^* 插入请求集 R 中来更新请求集 R ;
- 20. $\bar{s}_v \leftarrow \text{Removal}(s_v^*)$;
- 21. end for
- 22. return s_v^*, z^*, R

其中, $S^* \cup v$ 由一组即将被船只 v 访问的风机组成, R 集合为请求集,存储任何船只未访问的所有风机。起初,所有风机都被指定设置 $R = I$ (第 1 行),并设置初始解、初始解情况下的请求集、最优解、当前解(第 2-5 行)。我们使用最大迭代次数(IterMax)作为终止标准(第 6 行)。在每次迭代中,随机选择一个所谓的 destroy 操作,从当前解决方案中只移除一个风机,并将其插入集合 R (第 7-9 行)。去掉这个风机之后,得到的解被称为部分解 S_v 。属于 R 集合的每个风机将重新插入部分解决方案 S_v ,以构建新的解决方案(第 10-18 行),该过程被称为 repair 操作。最后将风机 s_v^* 插入请求集 R 进行更新,再对方案 \bar{s}_v 进行一次 removal 操作(第 19-20 行)。图 2 给出了 destroy 操作和 repair 操作的流程图。

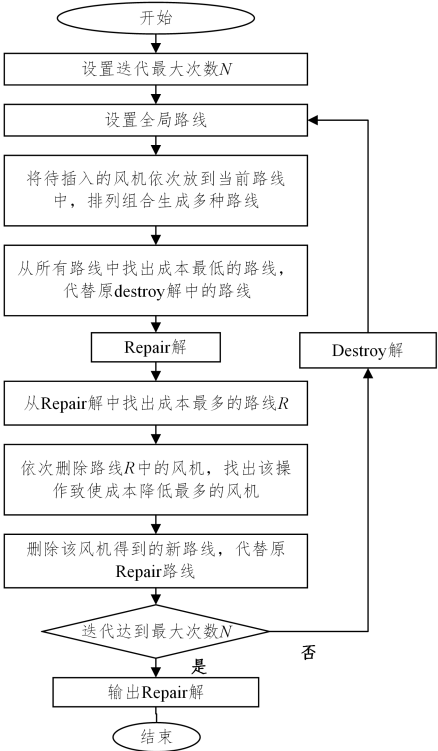


图 2 ALNS 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of ALNS algorithm

在对 destroy 解的处理中,先找到上一轮中被 destroy 掉的风机。设置全局成本、路线、船只编号,同时设置局部路线及成本。将未被访问的风机一次插入到每条路线,插入每条路线后会得到一些新排列组合路线的集合,再从这一系列集合中以局部路线成本从小到大进行排序,再依次找到路线成本小且路线可行即满足可行性约束的局部路线。依次插入每条路线后我们都能得到局部最优路线,从这几条有限的局部路线中选取最优的路线,最后将未被访问的风机插入该最优路线中,就完成了 repair 的操作。

在对 destroy 解的处理中,依次选择每艘船只的局部路线成本,找到局部路线成本最大的船只路线,确定要破坏掉风机的所属路线。在该路线中,试图判断依次删除每个风机后的路线成本变化,选择删除某个风机后路线成本变化最大的风机。其中,删除某个风机后对该路线的其他风机重新进行排列组合得到一系列新的路线集合,从这个集合中找到路线成本最低的路线。从排列组合的角度来说,该 destroy 操作是能够找到该路线中导致成本最大化的风机。

3 实验

本文对海上风电场维修调度进行一个模拟仿真。在此实验代码中,对可能存在的所有对象进行了抽象建模,例如,大

部件维修、小部件维修、巡检、定检都属于维修任务的种类,因此可以将这 4 种维修任务抽象处理成一个任务类,然后再将这 4 种维修任务继承于该任务类即可。抽象建模的好处是模型更加灵活、可扩展性更强,并且能够预防需要重新构造新任务类对象和改变算法代码的情况。

在第 1 节中我们介绍了算法中涉及的抽象类的基本属性,而本实验考虑了技术人员、备件、天气、风机、船舶、码头这 6 种对象,参考某项目部分示例,每个对象的输入信息数据如表 1—表 5 所列。

表 1 技工信息

Table 1 Technician information				
	编号	成本/万元	最大持续工作时间	当前坐标
技工 1	Tech1000	0.3	5	—
技工 2	Tech1001	0.5	4	—
技工 3	Tech1002	0.7	6	—

表 2 备件信息

Table 2 Spare parts information				
	编号	重量/T	购置成本/万元	当前坐标
备件 1	part1000	5	2	—
备件 2	part1001	10	3	—
备件 3	part1002	15	4	—
备件 4	part1003	20	5	—

表 3 船舶信息

Table 3 Vessel information										
编号	购买费用/ 万元	租凭费用/ 万元	速度/ (海里每小时)	油耗/ (万元每海里)	载客量	载重量/T	天气 情况	航行 路线	出行最早 时间	到港最晚 时间
v1000	0	2	10	30.8	100	120	—	—	6	21
v1001	0	2	12	31.0	100	120	—	—	6	22
v1002	0	2	8	29.0	100	120	—	—	5	23

表 4 码头信息

Table 4 Terminal information						
	编号	坐标	泊位个数	可用工种及数量	可用备件种类及数量	可用船只编号
码头 1	s2000	(2276970, 457670)	5	tech1000:12,tech1001:12, tech1002:12	part 1000:20,part 1001:20, part 1002:20,part 1003:20, part 1004:20	v1000 v1001
码头 2	s2001	(2278045, 457675)	5	tech1000:12,tech1001:12, tech1002:12	part 1000:20,part 1001:20, part 1002:20,part 1003:20, part 1004:20	v1002

表 5 风机任务信息表

Table 5 Fan Task Information											
	编号	坐标	转移时长/h	是否需要 船舶在场	检修所需的 工种及数量	检修所需的船舶 类型及数量	检修所需的备件 种类及数量	维护 成本	维护 时间	截止 时间	惩罚成本/ (万元每小时)
风机故障 1	1	(2278055, 456571)	0.25	0	Tech1000:2 Tech1001:0 Tech1002:1	v1000/v1001:1 v1002:0	Part1000:4,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	1.2	4	15	6.24
风机故障 2	7	(2279093, 458712)	0.25	0	Tech1000:0 Tech1001:1 Tech1002:1	v1000/v1001:1 v1002:0	Part1000:3,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	1.0	3	14	6.24
风机故障 3	9	(2276236, 458959)	0.25	0	Tech1000:3 Tech1001:0 Tech1002:0	v1000/v1001:1 v1002:0	Part1000:3,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	1.0	5	16	6.24
风机故障 4	12	(2277888, 459760)	0.25	0	Tech1000:1 Tech1001:1 Tech1002:2	v1000/v1001:1 v1002:0	Part1000:2,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	0.8	2	13	6.24
风机故障 5	16	(2280131, 460854)	0.25	0	Tech1000:1 Tech1001:2 Tech1002:2	v1000/v1001:1 v1002:0	Part1000:2,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	0.8	4	18	6.24
风机故障 6	17	(2280691, 461127)	0.25	1	Tech1000:3 Tech1001:0 Tech1002:0	v1000/v1001:0 v1002:1	Part1000:4,part1001:0, Part1002:0,part1003:0	1.2	5	16	18.72

(续表)

	编号	坐标	转移时长/h	是否需要 船舶在场	检修所需的 工种及数量	检修所需的船舶 类型及数量	检修所需的备件 种类及数量	维护 成本	维护 时间	截止 时间	惩罚成本/ (万元每小时)
风机故障 7	20	(2273880, 459440)	0.25	0	Tech1000;2 Tech1001;2 Tech1002;1	v1000/v1001;0 v1002;1	Part1000;4,part1001;0, Part1002;0,part1003;0	1.2	2	20	18.72
风机故障 8	23	(2275562, 460260)	0.25	0	Tech1000;3 Tech1001;0 Tech1002;1	v1000/v1001;0 v1002;1	Part1000;2,part1001;0, Part1002;0,part1003;0	0.5	2	21	6.24

表 1—表 5 中数据所属风机和码头的位置情况如图 3 所示,有两个码头,每个码头负责一种类型的船舶,共有 3 艘船舶(其中 2 艘船舶属于同一类型);每个码头上都配有 3 种类型的技工各 12 名;5 种类型的备件各 20 个;2 种类型的风机存在不程度的故障,故需要 2 艘不同类型的船舶。在上述背景下,本文模型的目标为求解出各艘船只的运行路线,以达到总成本(路途总成本、工人总成本、备件总成本、维护总成本、惩罚总成本)花费最小。

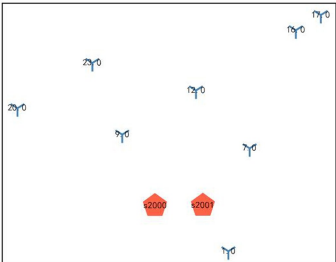


图 3 码头和风机位置情况

Fig. 3 Location of dock and wind turbine

首先将 ALNS 算法与精确求解的算法进行比较,结果如表 6 所列。

表 6 与精确算法求解结果比较

Table 6 Result comparison between ALNS and exact algorithm

	总成本/万元	运行时间/s
GUROBI 求解器	787.41	0.0189
ALNS 算法	806.00	0.0170

本文中的实验都在百度云 centos linux7.4 系统服务器(1CPU1 核)上进行,通过 GUROBI 求解器和 ALNS 算法对相同输入条件求解的结果来看,ALNS 算法求解出的结果与

精确求解的结果相近;并测试两种算法的运行时间,结果表明(测试 1 亿次,取最好的测试结果),ALNS 算法的运行时间更短,证明了启发式算法的搜索高效性。

经过模型的 repair 算子初始化后,生成的路径如图 4 所示,可见初始生成的路径无规律,错综复杂。

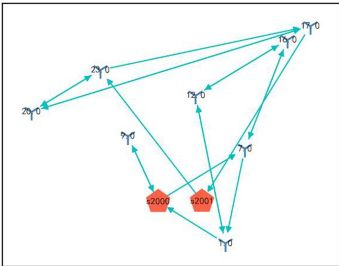


图 4 初始运维路径

Fig. 4 Initial path of operation and maintenance

在随机初始化路径的情况下总成本为 1090.94 万元。经过 60 次 ALNS 算法的迭代后,生成的最优路径如图 5 所示,可见最终的路径相比初始路径更加有序。详细结果数据如表 7 所列。

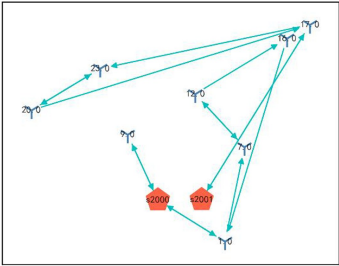


图 5 优化运维路径

Fig. 5 Optimize path of operation and maintenance

表 7 详细结果数据

Table 7 Detailed result data

	路线(起始点默认为所在码头)	路线总成本/万元	路线路途成本/万元	路线工人成本/万元	路线工人使用情况	路线备件成本/万元	路线备件使用情况	路线维护成本/万元	路线逾时惩罚成本/万元
码头 s2000 下 v1000	9-9	58.31	49.34	0.90	tech1000;3 tech1001;0 tech1002;0	6	part1000;3 part1001;0 part1002;0 part1003;0	2.0	0
码头 s2000 下 v1001	1-7-12-7-12-16-16-1	327.40	287.62	4.70	tech1000;3 tech1001;2 tech1002;4	24	part1000;12 part1001;0 part1002;0 part1003;0	7.6	3.41
码头 s2001 下 v1002	17->23->20->23->20->17	446.14	415.48	4.80	tech1000;8 tech1001;2 tech1002;2	20	part1000;10 part1001;0 part1002;0 part1003;0	5.8	0

经过模型优化后的路径总成本为 806.00 万元。详细的结果数据如表 8 所列。模型中成本迭代过程如图 6 所示。

表 8 算法迭代 1000 次的结果
Table 8 Results of 1000 iterations of algorithm

单一 Removal 算子	路途成本 removal 算子	工人成本 removal 算子	备件成本 removal 算子	惩罚成本 removal 算子	维护成本 removal 算子	总成本 removal 算子	随机 removal 算子	使用以上 7 种算子
总花费成本 平均值/万元	926.00	992.77	999.27	1143.05	998.81	926.27	871.00	854.25
方差	4.81	35.32	24.48	2.27	23.60	4.85	28.30	27.07

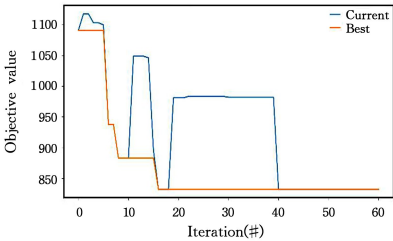


图 6 成本迭代过程
Fig. 6 Cost iteration process

由此可见,经过 ALNS 算法后成本减少了 259.09 万元,成本下降 23.75%,说明了该算法的有效性。
最终结果的各项成本数据如表 9 所列。

表 9 各项成本数据
Table 9 Various cost data

(单位:万元)

总成本	路途 总成本	工人 总成本	备件 总成本	维护 总成本	逾时惩罚 总成本
806.00	720.64	10.40	50.00	15.40	3.41

本文从 6 个角度来考虑 ALNS 模型的 removal 算子,分别是旅行成本、工人成本、备件成本、惩罚成本、维护成本和总成本。因此模型在运行的过程中会从这 6 个方面选择出对成本影响最大的风机进行 removal 操作,加快了模型的收敛。
此外,又由于本文中考虑了各路线的工人成本,而不是简单地对所有风机所需工种人员进行相加,因此在模型的迭代中能够对工人起到重复利用的作用,在现实生活中有类似的情况。如本文实验中所有带维修风机所需的工种及数目为: {‘tech1000’:15, ‘tech1001’:5, ‘tech1002’:8}, 而最后的结果中一共需要的工种及数目为 {‘tech1000’:14, ‘tech1001’:4, ‘tech1002’:6}, 可见其中每个工种的部分工人会在一次出航后进行多次维修任务。

因为本文模型涉及多个成本的计算,所以各个成本的重要性在一定程度上会影响到模型的求解过程。第一种解决方案是对成本进行加权处理,第二种解决方案是设定各个 removal 算子的使用概率。通过设置较大的成本或者较大的概率,模型会更注意节省求解成本。

从实验结果中可以看出使用“随机 removal 算子”的总花费最低,综合使用以上 7 种算子得到的效果是最好,因为使用了专注于 6 种不同成本的算子和能够跳出局部最优的随机算子。

结束语 本文在海上风电场运维规划建模方面采用了抽象类的方式,建立了通用性运维路径规划模型框架,该模型有利于兼容不同的海上风电场运维的路径规划与调度决策任务,提高模型的可扩展性和多场景适用的灵活性。本文提出了使用 ALNS 算法来解决“海上风电机组维护路径优化”问题,

并设计了 7 种 removal 算子和 repair 算子。从上述实验中可以看出,使用 alns 算法能够显著减少维护成本(在实验中降低了约 24%的成本),由此可见 ALNS 算法在此问题中的有效性和高效性。另外我们还探究了各个 removal 算子对模型的促进作用,发现随机 removal 算子能使模型跳出局部最优解,并且比使用其他单独 removal 算子的求解效果更好,由此可见随机因素在优化模型求解中的重要性。此外,综合使用了各种算子的模型能够达到最好的优化效果。

参 考 文 献

[1] LIU Y Q, MA Y C, TAO T. Research status and prospects of maintenance and management technology for offshore wind farms[J]. Global Energy Internet, 2019, 2(2): 127-137.

[2] Foreseeing 2021: Panorama of the industrial chain of wind power operation and maintenance industry[J]. China Electrical Equipment Industry, 2021(3): 18-21.

[3] GWEC Report on Wind Power[R/OL]. Africa Research Bulletin: Economic, Financial and Technical Series. 2020. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-6346.2020.09409.x>.

[4] WANG Z Y. The vision of carbon neutrality catalyzes the birth of new targets for the “landscape” industry[J]. China Investment (Chinese and English), 2021(21): 20-22.

[5] 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, 2017, 20(2): 361-378.

[6] BIDWELL D. Ocean beliefs and support for an offshore wind energy project[J]. Ocean & Coastal Management, 2017(146): 99-108.

[7] ZHANG J, GAO C, XU B, et al. Research on the electrical design of a new type of flexible DC energy consumption device for offshore wind power DC grid connection projects [J/OL]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering. https://kns-cnki-net-443.webvpn.scut.edu.cn/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2021&filename=ZGDC202112008&uniplatform=NZKPT&v=3UDY-INjhgr_IBUYZIIuqJaPtZbuXrUxnU45667DaTIUF0aFnnKpBIGHt6qjdhx.

[8] LIU L, FU Y, MA S W, et al. Preventive Maintenance Strategy for offshore wind turbine based on reliability and maintenance priority[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5732-5740.

[9] WAN Y C, WANG K, CHU Y F. Summary of the technical status and development of offshore wind power operation and maintenance[J]. Ship Engineering, 2020, 42(12): 20-25.

[10] WANG Y, HAN B, ZHAO W C, et al. Establishment and analysis of economic evaluation model for offshore wind power emergency maintenance[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S1): 605-608, 611.

[11] RUI X M, XIE L B, LI S, et al. Research on the maintenance strategy of offshore wind turbines for accessibility[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 92-99.

[12] 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.

[13] ZHANG Z. Multi-ACO Application in Routing and Scheduling Optimization of Maintenance Fleet (RSOMF) Based on Conditions for Offshore Wind Farms[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2018, 6(10): 20-40.

[14] CAI A, DO A, DJ A, et al. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(1): 76-89.

[15] RAKNES N T, ØDESKAUG K, STÅLHANE M, et al. Scheduling of Maintenance Tasks and Routing of a Joint Vessel Fleet for Multiple Offshore Wind Farms[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2017, 5(1): 11.

[16] CHROTENBOER A H, BROEK M, JARGALSAIKHAN B,

et al. Coordinating technician allocation and maintenance routing for offshore wind farms[J]. Computers & Operations Research, 2018, 98(OCT.): 185-197.

[17] STOCK-WILLIAMS C, SWAMY S K. Automated daily maintenance planning for offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2019, 133(APR.): 1393-1403.

[18] IRAWAN C A, ESKANDARPOUR M, OUELHADJ D, et al. Simulation-based optimisation for stochastic maintenance routing in an offshore wind farm[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 289(3): 912-926.



TAN Ren-shen, born in 1988, Ph.D candidate, senior engineer. His main research interests include offshore wind-farm intelligent operation and maintenance and artificial intelligence technology for offshore wind Power and economic evaluation of offshore windfarm.

(上接第 570 页)

[12] LIANG J, CHEN J, ZHANG X, et al. One-hot encoding and convolutional neural network based anomaly detection[J]. Journal Tsinghua University(Science & Technology), 2019, 59(7): 523-529.

[13] ZHU F, WU W, FU Y C, et al. A Dual Deep Network Based Secure Deep Reinforcement Learning Method[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(8): 1-15.

[14] AN T L, WANG C D, YANG C. Research on vehicle bus anomaly detection based on LSTM[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2020, 36(3): 6-10.

[15] LIU X Q, SHAN C, REN J D, et al. An intrusion detection method based on multi-dimensional optimization of traffic anomaly analysis [J]. Netinfo Security, 2019, 4(1): 14-26.

[16] LI L J, YU Y, BAI S S, et al. Intrusion Detection Model Based on Double Training Technique[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017(12): 1246-1252.

[17] CHAWALA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2002, 16(1): 321-357.

[18] LIN Y. Research on fusion algorithm of extreme learning machine and auto-encoder [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[19] PARK S, SEO S, KIM J. Network intrusion detection using stacked denoising autoencoder[J]. Advanced Science Letters, 2017, 23(10): 9907-9911.

[20] VINCENT P, LATOCHELLE H, LAJOIE I, et al. Stacked denoising auto-encoders: learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2010, 11(12): 3371-3408.

[21] SUN W J, SHAO S Y, ZHAO R, et al. A sparse auto-encoder-based deep neural network approach for induction motor faults classification [J]. Measurement, 2016, 89: 171-178.

[22] XING C, MA L, YANG X Q. Stacked denoise autoencoder based feature extraction and classification for hyperspectral images [J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 1-10.

[23] ANDREAS T. Anomaly detection in recordings from in-vehicle

networks[J]. Big Data and Applications, 2014(3): 23-29.

[24] CRISTIANINI N, TAYLOR J S. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[25] AMARNATH B, BALAMURUGAN S A A. Review on feature se-lection techniques and its impact for effective data classification using UCI machine learning repository dataset[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2016, 11 (11): 1639-1646.

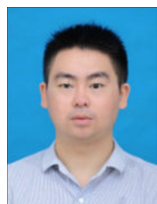
[26] MOUSTAFA N, SLAY J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems(UNSW-NB15 network data set)[C]//Proceedings of the 2015 Military Communications and Information Systems Conference. Canberra, ACT, Australia: IEEE, 2015: 1-6.

[27] GOH J, ADEPU S, JUNEJO K N, et al. A dataset to support research in the design of secure water treatment systems[C]// International Conference on Critical Information Infrastructures Security. Cham: Springer, 2016: 88-99.

[28] AHMED C M, PALLETI V R, MATHUR A P. WADI: a water distribution testbed for research in the design of secure cyber physical systems [C] // Proceedings of the 3rd International Workshop on Cyber-Physical Systems for Smart Water Networks. 2017: 25-28.



ZHOU Zhi-hao, born in 2000, postgraduate. His main research interests include information security, machine learning and embedded-development.



CHEN Lei, born in 1986, Ph.D, lecturer. His main research interests include deep learning, network representation learning, information security of industrial control system and big data analysis.