

# 基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略

宋明阳, 瞿晟珉, 秦少茜, 应飞祥, 马永杰, 黄玲玲

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:**海上风电场的维修费用占发电总成本比例较高。为降低海上风电场的运维成本,在基于可靠度阈值的机会维护策略基础上,针对风电机组子系统间存在的故障相关性与子系统故障风险水平,文中提出一种包含故障风险水平、可靠度双阈值和维护矩阵的海上风电场机会维护策略。首先,采用故障链模型对风电机组子系统间的故障关系进行描述,并建立风电机组各子系统的可靠度模型。其次,引入多级维护的概念,提出考虑故障风险水平的风电场机会维护策略优化模型,采用粒子群算法对子系统机会维护的风险因子进行优化,进而确定单台机组的维护策略。然后,综合考虑海上可及性、备件库存等因素,提出一种基于维护矩阵的海上风电场维护策略优化模型,以单位时间维护成本最小为目标函数,根据子系统的备件库存和故障风险水平来对维护策略进行动态调整。最后,以某海上风电场中单台风电机组为例,分析可及率、多级维护等因素对风电场机会维护策略的影响。结果表明,考虑故障风险水平的机会维护策略相比传统机会维护策略费用率可降低27.34%,验证了所提机会维护策略在降低维护费用方面的有效性。

**关键词:**海上风电场;故障相关性;综合可靠度;维护矩阵;机会维护;故障风险水平

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)06-0117-13

## 0 引言

目前我国海上风电装机容量约40 GW,而“十四五”期间,我国沿海各省海上风电规划总量高达86 GW<sup>[1-2]</sup>。随着海上风电装机容量不断提升,风电场的维护相比以前更为频繁,如何经济高效地运维已成为风电行业亟待解决的关键问题之一<sup>[3-4]</sup>。

机会维护,作为一种考虑部件之间、系统之间的某种相关性而进行的多部件或多系统的组合性维护策略,在风电机组运维研究中受到了广泛的关注<sup>[5-7]</sup>。文献[8-9]提出了一种将状态维护与机会维护相结合的方法,利用经济相关性对状态维护阈值与机会维护阈值进行优化,利用设备之间相互配合的维护机会,达到了减少风电机组停机损失的效果。文献[10]采用可靠度与风险水平双阈值的方法对维护对象进行优化,减少了不必要的维护。文献[11]将天气因素纳入机会维护的优化过程,分析对比了天气因素对维护停机时间的影响。在海上风电场维护安排方面,由于风电场中机组众多,而维护资源有限,往往需要对维护计划进行调整。文献[12]针对维护工作人员、运维船以及备件库存问题,建立了一种考虑多个运维船、持续多天对机组维护以及多个运维基地影响的风电场运行调度优化模型。文献[13]针对海上恶劣环境对机组状态特征产生的不良影响,通过预测机组风险态势来调

整风电场调度任务。上述关于机会维护的相关研究主要考虑多部件或多机组维护之间的经济相关性,即主要以维护成本与发电损失等经济性指标为机会维护优化决策的目标函数,未考虑机会维护中各部件之间存在的物理联系。针对此问题,文献[14-15]进行了部件之间故障相关性的分析与建模研究;文献[16]采用 Copula 函数对风电机组核心部件之间的故障概率分布关系进行拟合,构建了风电机组核心部件之间的联合风险度模型;文献[17]采用故障率法对设备间的复杂耦合关系进行了推导计算;文献[18-19]利用故障链描述了复杂多部件系统中部分部件间的故障相关性,然后采用故障率法来确定系统部件之间的故障相关系数。然而,上述研究中常用的故障率法与 Copula 函数拟合主要适用于构建少数部件之间的故障相关性,难以充分体现一个复杂系统中多个部件之间的复杂故障相关性。针对该问题,文献[20]在风电机组故障相关性与有向图理论的基础上,建立了风电机组的故障链模型,并构建了风电机组多个重要子系统之间的故障相关性分析模型。但该文献仅考虑了子系统之间单向的故障影响关系,忽略了实际运行中故障传递双向作用的可能性。

针对上述问题,文中提出了一种基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略。首先,考虑风电机组子系统之间故障传递的双向作用,建立了基于改进子系统故障链的风电机组可靠度评估模型,并对子系统综合可靠度进行建模。其次,为了保证机

会维护选取的对象值得被维护,构建了一种包含可靠度指标与风险水平指标的双阈值来对其约束。然后,引入了多级维护的概念,建立以单位时间维护成本最小为目标的风电机组机会维护优化模型。最后,在得到风电机组维护策略的基础上,采用维护矩阵将风电场中所有机组的维护计划进行整合,并根据备件情况来动态安排维护策略。

## 1 考虑故障相关性的可靠度模型与风险水平指标

### 1.1 故障传递有向图

考虑到风电机组作为一个复杂的多部件系统<sup>[21-22]</sup>,各子系统间存在复杂的故障传递关系,而故障传递有向图能够用于表示一个复杂整体系统中各个子系统之间的故障传递关系。文献[20]基于风电机组各子系统的相关性分析,建立了考虑子系统间故障单向传递作用的机组子系统故障链。在文献[20]的基础上,文中进一步考虑风电机组不同子系统之间故障传递双向作用关系,建立了如图1所示的改进风电机组子系统故障传递有向图。

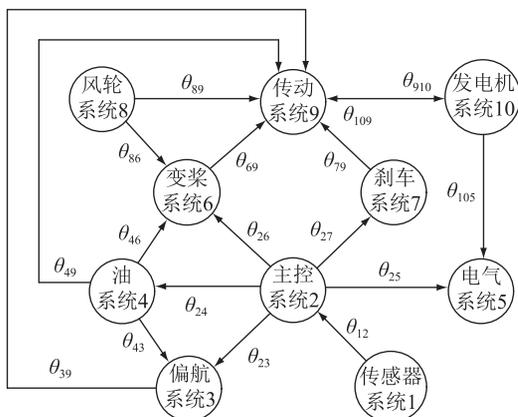


图1 故障传递有向图

Fig.1 Fault transfer directed graph

其中,节点表示子系统,节点的出边条数表示该系统的出度,节点的入边条数表示该系统的入度<sup>[23]</sup>。有向边表示该节点子系统对箭头指向的另一子系统存在故障传递作用;有向边的单向箭头表示故障传递的单向作用,双向箭头则表示有向边连接的2个子系统之间存在双向故障传递作用;有向边的权值为影响因子 $\theta_{ij}$ ,表示子系统*i*对子系统*j*的故障传递影响程度。根据故障传递有向图构建影响因子矩阵,如式(1)所示,可以计算得到子系统的综合故障率与可靠度。

由式(1)可以看出,影响因子矩阵 $\theta$ 是一个稀疏矩阵,矩阵元素 $\theta_{ij}$ 为故障影响因子,可通过故障

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_{23} & \theta_{24} & \theta_{25} & \theta_{26} & \theta_{27} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{39} & 0 \\ 0 & 0 & \theta_{43} & 0 & 0 & \theta_{46} & 0 & 0 & \theta_{49} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{69} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{79} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{86} & 0 & 0 & \theta_{89} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{910} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{105} & 0 & 0 & 0 & \theta_{109} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

率法<sup>[15]</sup>计算得到。

### 1.2 子系统可靠度模型

根据传统的可靠性分析理论<sup>[24-25]</sup>,机组子系统的可靠度与故障率在数学上可表示为:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 为某子系统在*t*时刻的可靠度; $\lambda(t)$ 为某子系统在*t*时刻的故障率。

为获取可靠度水平,首先须获取设备或子系统的故障率。根据定义,故障率是指设备在其寿命周期内,由于磨损或操作使用等原因,在单位时间内丧失其规定功能从而失效的概率。因此,子系统故障率可以表示为受自身状态退化所产生的固有故障率以及其他子系统故障传递综合作用的综合故障率。子系统*i*的综合故障率可以表示为:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{li}(t) + \Delta\lambda \quad (3)$$

式中: $\lambda_{li}(t)$ 为子系统*i*在*t*时刻的固有故障率; $\Delta\lambda$ 为子系统*i*因受其他子系统故障传递而产生的故障率变化量。

风电机组的故障分布能较好地与威布尔分布拟合,故假设子系统的固有故障率满足二参数威布尔分布<sup>[26]</sup>。子系统在*t*时刻的固有故障率 $\lambda_{li}(t)$ 可以表示为:

$$\lambda_{li}(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: $\beta$ 、 $\eta$ 分别为子系统*i*服从威布尔分布的形状参数和尺寸参数。

由式(3)可知,综合故障率是子系统自身状态退化与其他子系统故障传递综合作用的结果。当子系统*i*受到其他 $N_j$ 个子系统故障传递影响时,故障率变化量 $\Delta\lambda$ 为:

$$\Delta\lambda = \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{ji} \lambda_j(t) \quad (5)$$

式中: $\theta_{ji}$ 为子系统*j*对子系统*i*的影响因子,取值为

$0 \sim 1$ ;  $\lambda_j(t)$  为系统  $j$  在  $t$  时刻的综合故障率;  $N_j$  为对子系统  $i$  存在故障传递作用的子系统数。

则子系统  $i$  在  $t$  时刻的综合故障率  $\lambda_i(t)$  为:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{ii}(t) + \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{ji} \lambda_j(t) \quad (6)$$

传动系统与发电机系统间的故障传递双向作用关系,本质上是单向故障链模型的特殊形式<sup>[19]</sup>,可根据故障链理论推导得到,其中传动系统的故障传递关系如图 1 所示。由式(6)可知,传动系统与发电机系统的综合故障率为:

$$\lambda_9(t) = \lambda_{19}(t) + \theta_{109} \lambda_{10}(t) \quad (7)$$

$$\lambda_{10}(t) = \lambda_{110}(t) + \theta_{910} \lambda_9(t) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中可得到:

$$\lambda_9(t) = \lambda_{19}(t) + \theta_{109} (\lambda_{110}(t) + \theta_{910} \lambda_9(t)) \quad (9)$$

化简可得传动系统在  $t$  时刻的综合故障率为:

$$\lambda_9(t) = \frac{\lambda_{19}(t) + \theta_{109} \lambda_{110}(t)}{1 - \theta_{109} \theta_{910}} \quad (10)$$

同理得到发电机系统的综合故障率为:

$$\lambda_{10}(t) = \frac{\lambda_{110}(t) + \theta_{910} \lambda_{19}(t)}{1 - \theta_{109} \theta_{910}} \quad (11)$$

在得到子系统的综合故障率表达式后,由式(2)可得子系统  $i$  在  $t$  时刻受其他系统影响后的综合可靠度  $R_i(t)$  为:

$$R_i(t) = \exp \left( - \int_0^t \left( \lambda_{ii}(t) + \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{ji} \lambda_j(t) \right) dt \right) \quad (12)$$

### 1.3 故障风险水平指标

风电机组不同子系统故障将导致不同程度的停机损失。为了定量比较不同机组同一子系统故障带来的损失,定义子系统故障风险水平  $Q_{mi}(t)$  为机组  $m$  的子系统  $i$  在  $t$  时刻可能因失效而导致的停机损失,其表达式为:

$$Q_{mi}(t) = \lambda_{mi}(t) C_{mia} \quad (13)$$

$$C_{mia} = C_{mid} + C_{mio} + \sum_{j=1}^{N_{mj}} C_{mja} + (1 - \delta) C_{mz} \quad (14)$$

式中: $\lambda_{mi}(t)$  为机组  $m$  的子系统  $i$  在  $t$  时刻的综合故障率;  $C_{mia}$  为机组  $m$  的子系统  $i$  自身故障所造成的损失;  $C_{mid}$ 、 $C_{mio}$  分别为机组  $m$  的子系统  $i$  维护造成的停机损失和维护本身的费用;  $C_{mja}$  为机组  $m$  的子系统  $i$  故障引发其他系统  $j$  故障所花费的费用;  $C_{mz}$  为从其他机组前往机组  $m$  所需要的固定费用;  $\delta$  为路程标识因子,若不需要从其他机组前往机组  $m$ ,则取值为 1,否则取值为 0;  $N_{mj}$  为机组  $m$  的子系统  $i$  对其他子系统  $j$  存在故障传递作用的数目。

## 2 基于维护矩阵的风电场运维安排

### 2.1 多级维护

现行的风机维护机制实际上蕴含多级非完美预防性维修的思想,文中基于风电机组维护的实际情况,将不完全维护分为了大修、小修 2 个等级。随着风电机组运行时间的增加,若在第  $p$  次预防性维护中,风电机组其中一个子系统的可靠度满足机会维护的可靠度阈值,则须对其维护。在不同的维护等级下,子系统故障率会遵循不同的变化规则。维护前、后子系统故障率函数之间的关系可定义为:

$$\lambda_{p+1}(t) = \lambda_p(t + cT_p) \quad (15)$$

式中: $\lambda_p(t)$  为第  $p$  次维护后子系统的故障率函数;  $T_p$  为子系统第  $p$  次与  $p-1$  次维护之间的时间间隔;  $c$  为维护的役龄回退因子。

将  $\gamma$  作为子系统维护方式标识因子,则在不同维护方式下,役龄回退因子  $c$  的取值可表示为:

$$c = (1 - \gamma)c_2 + \gamma c_1 \quad (16)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{大修} \\ 0 & \text{小修} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $c_1$ 、 $c_2$  分别为大修、小修的役龄回退因子。

传统的役龄回退因子<sup>[27-28]</sup>为常数,会出现随着子系统实际役龄和维护次数的上升,维护仍然能翻新子系统的情况,掩盖了维护疲劳的现象。因此,文中引入了一种动态的役龄回退因子<sup>[29]</sup>。其中,大修、小修的役龄回退因子取值大小分别为:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{n}{5n+3} & \text{大修} \\ c_2 = \frac{n+1}{3n+5} & \text{小修} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $n$  为子系统的维护次数。

文中以维护费用与维护效果的比值(费效比)为子系统大修、小修的选择依据,如式(19)所示。

$$E_{ROI} = \frac{C_i}{\Delta R} \quad (19)$$

$$C_i = (C_{id1} + C_{io1} + C_{ir1}) \gamma_i + (C_{id2} + C_{io2} + C_{ir2}) (1 - \gamma_i) \quad (20)$$

式中: $E_{ROI}$  为费效比;  $C_i$  为子系统  $i$  维护所需总费用;  $\Delta R$  为维护前、后子系统的可靠度变化量;  $C_{id1}$ 、 $C_{id2}$  分别为子系统  $i$  大修、小修维护停机造成的费用;  $C_{io1}$ 、 $C_{io2}$  分别为子系统  $i$  大修、小修所需的维护资源费用;  $C_{ir1}$ 、 $C_{ir2}$  分别为子系统  $i$  大修、小修所需的维护人员费用;  $\gamma_i$  为子系统  $i$  的维护方式标识因子,  $\gamma_i = 1$  表示子系统  $i$  进行的是大修,  $\gamma_i = 0$  表示子系统  $i$  进行的是小修。

## 2.2 维护矩阵的构建

文中提出了一种基于故障风险水平的维护矩阵优化方法,维护矩阵包含了海上风电场当天所有机组、子系统的维护内容,表示根据维护的判别标准,确定当天需要对风电机组进行的维护内容。维护矩阵会以 1 d 为一个周期,每个周期进行一次更新,不断循环往复地推进。其中,一个由 10 台机组组成的风电场某一天的维护矩阵  $H$  为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} & h_{17} & h_{18} & h_{19} & h_{110} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} & h_{27} & h_{28} & h_{29} & h_{210} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} & h_{37} & h_{38} & h_{39} & h_{310} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} & h_{45} & h_{46} & h_{47} & h_{48} & h_{49} & h_{410} \\ h_{51} & h_{52} & h_{53} & h_{54} & h_{55} & h_{56} & h_{57} & h_{58} & h_{59} & h_{510} \\ h_{61} & h_{62} & h_{63} & h_{64} & h_{65} & h_{66} & h_{67} & h_{68} & h_{69} & h_{610} \\ h_{71} & h_{72} & h_{73} & h_{74} & h_{75} & h_{76} & h_{77} & h_{78} & h_{79} & h_{710} \\ h_{81} & h_{82} & h_{83} & h_{84} & h_{85} & h_{86} & h_{87} & h_{88} & h_{89} & h_{810} \\ h_{91} & h_{92} & h_{93} & h_{94} & h_{95} & h_{96} & h_{97} & h_{98} & h_{99} & h_{910} \\ h_{101} & h_{102} & h_{103} & h_{104} & h_{105} & h_{106} & h_{107} & h_{108} & h_{109} & h_{1010} \end{bmatrix} \quad (21)$$

在维护矩阵  $H$  中,行表示风电机组的编号,列表示子系统的编号,则  $h_{mi}$  为机组  $m$  的子系统  $i$  的维护信息。文中在维护策略中考虑了不完全多级维护的影响, $h_{mi}$  的具体含义如式(22)所示。

$$h_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{需要对机组 } m \text{ 的子系统 } i \text{ 进行大修} \\ 0.01 & \text{需要对机组 } m \text{ 的子系统 } i \text{ 进行小修} \\ 0 & \text{不需要对机组 } m \text{ 的子系统 } i \text{ 进行维护} \end{cases} \quad (22)$$

其中,大修与小修的取值依据是为了方便在后续维护矩阵的计算中识别子系统的维护等级,所以相隔了 2 个数量级。即便出现 10 台机组都需要对同一种子系统进行小修的情况,维护矩阵也能正确识别出维护所需的备件情况。维护矩阵除了可以清晰反应哪些机组、子系统需要安排维护外,还具有能迅速掌握某一子系统备件的使用情况以及单台机组维护所需时间等优点。

(1) 对维护矩阵的某一行进行求和,以表示机组  $m$  需要维护的子系统总数。根据不同子系统、不同维护等级所对应的维护时间,即可得到对该机组需要维护的子系统依次维护的总停机时间。

$$t_{dm} = \sum_{i=1}^{10} t_{di} \lceil h_{mi} \rceil \quad (23)$$

$$t_{di} = (1 - \lfloor h_{mi} \rfloor) t_{1i} + \lfloor h_{mi} \rfloor t_{2i} \quad (24)$$

式中: $t_{dm}$  为机组  $m$  不考虑可及率情况下的维护总时间; $t_{di}$  为子系统  $i$  维护所需时间; $t_{1i}$ 、 $t_{2i}$  分别为子系统  $i$  大修、小修所需时间; $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整; $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

(2) 对维护矩阵的列求和,以表示此次维护中需要对子系统  $i$  进行维护的机组总数。根据运维船所携带的该子系统的备件数,在该子系统维护所需备件数超出库存时,计算各子系统的故障风险水平,及时优化维护矩阵,从而调整维护策略。子系统  $i$  维护所需的备件计算公式如下:

$$S_{ip} = 100(B - \lfloor B \rfloor) + \lfloor B \rfloor \quad (25)$$

$$B = \sum_{m=1}^{10} h_{mi} \quad (26)$$

式中: $S_{ip}$  为子系统  $i$  维护所需的总备件数; $B$  为矩阵  $H$  第  $i$  列元素之和。

当某一天风电场的维护工作所需时间大于规定的工作时间时,根据当天的维护工作对维护矩阵进行更新。若机组  $m$  的子系统  $i$  已完成维护,则将矩阵元素  $h_{mi}$  更新为 0,并将剩余未完成的维护任务顺延至第二天。当第二天的维护工作开始时,继续对维护所需的工作时间是否满足规定工作时间进行判断,若不满足,则继续将未完成的工作顺延至下一天,并更新维护矩阵,直至维护矩阵中所有元素为 0。

当维护现场出现某一子系统备件不足,须对维护范围重新划分时,将风电机组子系统故障风险水平  $Q_{mi}(t)$  作为维护优先级的判断指标,子系统的故障风险水平越高,表示越迫切地进行维护,以此来重新制定满足备件约束的维护策略。维护矩阵的更新流程如图 2 所示,其中  $S_{iw}$  为子系统  $i$  的备件库存数。

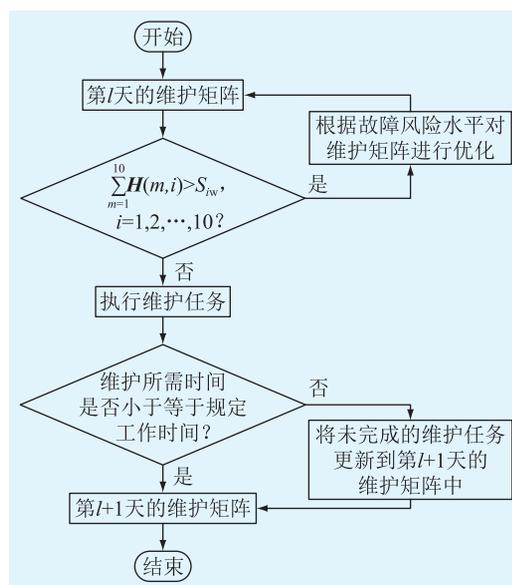


图 2 维护矩阵的更新

Fig.2 Maintain matrix updates

目前关于备件管理策略的研究对象多为单机单部件或者多机单部件<sup>[30]</sup>,能较容易地得到最大库

存、订货周期等变量的寻优结果。但当风电场有若干台风机,每台风机又有诸多子系统时,若对备品的订货策略进行优化,会出现优化变量爆炸的问题。因此针对备件问题,文中仅将其作为一个约束处理,并在后续算例中对其进行灵敏度分析。

### 3 考虑故障风险水平的风电场机会维护优化模型

文中采用的主要假设如下:

(1) 假设风电机组是一个多部件串联的可修系统,即任意子系统停运均导致机组停机;

(2) 维护效果为不完全维护,使子系统处于修复如新与修复如旧之间<sup>[31]</sup>,其维护效果取决于役龄回退因子;

(3) 假设子系统的可靠性维护阈值已知,任意子系统的维护需求均触发风电机组的机会维护,即  $R_i(t) \leq R_{ip}$ ,其中  $R_{ip}$  为子系统  $i$  的预防性维护阈值;

(4) 子系统的大修与小修使用同一种备件,两者仅耗费的维护时间与费用不同。

#### 3.1 目标函数

文中选取海上风电场为研究对象,构建以单位时间维护成本最小为目标的风电场机会维护优化模型,对机会维护的子系统及其维护矩阵进行选择与优化。建立的目标函数如下:

$$\min W(T, \mathbf{H}) = C_T / T \quad (27)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m=1}^{10} \mathbf{H}(m, i) \leq S_{iw} \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (28)$$

式中:  $W(T, \mathbf{H})$  为风电场在一段时间  $T$  内的单位时间维护成本;  $C_T$  为  $T$  时间段内风电场的维护总费用。

$T$  时间段内风电场的维护总费用主要包括维护成本与停机损失两部分,前者主要包括维护资源费用、工作人员费用、交通工具费用,后者为风电场由于维护停运造成的发电量损失。因此有:

$$C_T = \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P (C_{mpo} + C_{mpd} + C_{mpr} + C_{mpv}) \quad (29)$$

式中:  $C_{mpo}$  为机组  $m$  第  $p$  次维护资源费用;  $C_{mpd}$  为机组  $m$  第  $p$  次停机损失费用;  $C_{mpr}$  为机组  $m$  第  $p$  次维护对应的工作人员费用;  $C_{mpv}$  为机组  $m$  第  $p$  次维护的交通工具费用;  $P$  为单台风电机组在一段时间  $T$  内进行维护的总次数;  $M$  为风电场的风机总数。

(1) 维护资源费用。维护资源费用不仅与参加维护的子系统数直接相关,还与子系统的维护方式有关。风电机组在第  $p$  次的维护资源费用为:

$$C_{mpo} = \sum_{i=1}^{N_i} [(1 - \gamma_i) C_{io2} + \gamma_i C_{io1}] \quad (30)$$

式中:  $N_i$  为参加第  $p$  次维护的总子系统数。

(2) 停机损失费用。文中引入容量因子  $V_{\text{factor}}$  来描述一段时间  $T$  内、不同风速下,单台风电机组因第  $p$  次维护停机造成的发电量损失费用为:

$$C_{mpd} = V_{\text{factor}} C_{\text{ele}} P_{\text{out}} t_{pD} \quad (31)$$

式中:  $C_{\text{ele}}$  为风电机组的电价;  $P_{\text{out}}$  为风电机组所发出的功率;  $t_{pD}$  为风电机组第  $p$  次维护受可及性影响后的停机时间。

海上运行环境恶劣,因此海上风力发电机组维护工作具有随机性强、任务艰巨的特点,维护活动对可及性有一定的要求。以运维船的适航风速上限为界,将天气划分为可及状态和不可及状态 2 类,则计及可及性的影响后,维护的停机时间  $t_D$  为:

$$t_D = \frac{t_d}{A_{\text{access}}} \quad (32)$$

式中:  $t_d$  为子系统维护原本所需要的时间;  $A_{\text{access}}$  为天气可及率,即可及天数占总天数的比例。

根据某海上风电场的风速情况<sup>[32]</sup>,统计得到一年四季的容量因子、可及率、天气等待时间,如表 1 所示。

表 1 天气参数

Table 1 Weather parameters

季节	容量因子	可及率	天气等待时间/d
春	0.52	0.64	1
夏	0.40	0.77	1
秋	0.56	0.57	2
冬	0.71	0.40	4

由式(32)以及表 1 可知,当天气较为恶劣,例如冬季时,可及率较低,会使维护活动的等待时间也增长,因此在安排维护活动时,应尽可能地根据可及率来合理调整维护计划。

(3) 工作人员费用。工作人员费用包含个人的基本工资与外出维护工资,其中外出维护工资与维护时间线性相关。风电机组在第  $p$  次维护时的工作人员费用为:

$$C_{mpr} = C_{b1} + C_{b2} t_{pD} \quad (33)$$

式中:  $C_{b1}$  为工作人员的基础工资费用;  $C_{b2}$  为工作人员维护时的单位时间费用。

(4) 交通工具费用。交通工具费用根据运维船的基础租赁费用与租赁时间计算。风电机组在第  $p$  次维护时的交通工具费用为:

$$C_{mpv} = C_{\text{sea}} + C_{\text{ve}} t_{pD} \quad (34)$$

式中:  $C_{\text{sea}}$  为交通工具的基本租赁费用;  $C_{\text{ve}}$  为交通工具的单位时间成本。

### 3.2 约束条件

机会维护策略的选取对象必须满足可靠度和风险水平的要求,并且从安全角度考虑,运维工作中维护技术人员存在体力上限,以及维护工作的开展受备件库存的影响,因此文中的约束条件如下。

(1) 工作时间约束。风电机组的维护在 1 d 内仅能持续一段时间,即单个工作日的维护时长受限,具体可以表示为:

$$t_{ad} \leq t_{max} \quad (35)$$

式中: $t_{ad}$ 为单日维护操作时长; $t_{max}$ 为单日最长工作时长。

(2) 可靠度约束。机会维护所选择的维护对象,其可靠度必须小于等于机会维护的可靠度阈值。

$$R_i(t) \leq R_{ic} \quad (36)$$

式中: $R_{ic}$ 为子系统  $i$  的机会维护阈值。

(3) 故障风险水平约束。机会维护所选择的维护对象,其发生故障可能造成的损失必须大于故障风险水平阈值。

$$\lambda_i(t)C_{ia} > Q \quad (37)$$

$$Q = ZC_a \quad (38)$$

式中: $C_{ia}$ 为子系统  $i$  发生故障后所造成的经济损失; $Q$ 为风电机组子系统的故障风险水平阈值,当子系统  $i$  的故障风险水平高于  $Q$  时才能进行机会维护; $Z$ 为风险因子,为优化变量,表示发生故障的概率,取值为  $0 \sim 1$ ; $C_a$ 为子系统发生故障后所造成的经济损失平均值。

(4) 备件约束。对风电场执行预防性维护时,维护某一子系统所需要的备件数量必须小于等于备件库存数。

$$S_{ip} \leq S_{iw} \quad (39)$$

模型设定的目标函数涉及到的变量较多,且与所构建的可靠度阈值与故障风险水平阈值相关的风电场机组数较多,以及各个子系统有复杂的关联性,会相互影响,因此计算过程复杂,需要耗费大量时间。文中选取粒子群算法来进行计算,计算步骤如下。(1) 随机初始化各微粒的位置和速度。(2) 计算各个粒子的适应度,然后将每个粒子的当前位置和适应度值存储在自身的  $P_{best}$  中。在全部  $P_{best}$  中选出具有最佳适应度值的个体,将其位置和适合度值存储到  $g_{best}$  中。(3) 对粒子的速度与位置进行更新。(4) 将各粒子的当前适应度值和历史最佳位置对比,如果当前更好,则将其位置作为当前最好位置。(5) 比较当前所有  $P_{best}$  和  $g_{best}$  的值,更新  $g_{best}$ 。(6) 如果达到设置的精度或者迭代次数,则停止搜索,输出结果,否则返回步骤(3)继

续进行搜索。

粒子群参数<sup>[33]</sup>设定如下:计算时间为 1 000 d;学习因子  $u_1$ 、 $u_2$  为 1.5;惯性权重  $w$  为 0.7;最大允许迭代次数为 100;种群大小为 500。

## 4 海上风电场机会维护算例分析

### 4.1 算例数据

为验证文中提出的基于故障风险水平的风电场机会维护策略的有效性,以东海风电场中的 10 台 3 MW 华锐风电机组为对象展开研究与分析。风电场中的机组分布如图 3 所示。

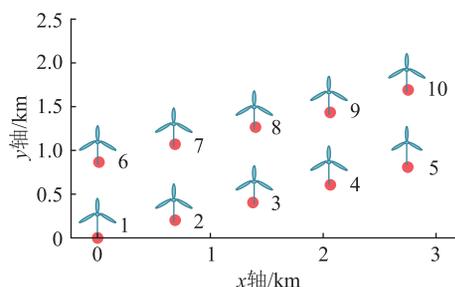


图 3 风机位置示意

Fig.3 Schematic diagram of wind turbine location

风电机组切入风速为 3 m/s,切出风速为 25 m/s,额定风速为 12 m/s;上网电价为 0.74 元/(kW·h);交通工具租赁费用为 50 000 元/d<sup>[11]</sup>;工作人员一天最长工作时间为 8 h,基本工资为 100 元/d,外出维护工资为 300 元/h<sup>[16]</sup>。

风电机组不同维护等级所消耗的维护时间、费用<sup>[34]</sup>如表 2 所示。

表 2 3 MW 海上机组的维护时间与费用  
Table 2 Maintenance time and cost of 3 MW offshore units

子系统	小修		大修	
	时间/h	费用/元	时间/h	费用/元
传感器系统 1	4	10 000	6	50 000
主控系统 2	8	9 000	14	38 000
偏航系统 3	5	18 000	12	53 000
油系统 4	4	12 000	8	42 000
电气系统 5	8	14 000	14	64 000
变桨系统 6	4	13 000	8	43 500
刹车系统 7	4	13 000	8	52 000
风轮系统 8	6	18 000	12	48 000
传动系统 9	6	16 000	12	55 000
发电机系统 10	6	18 000	14	52 000

文献[35-36]根据风机子系统实际故障数据,证明了采用威布尔分布能较好地得到各子系统的故障率。因此,文中直接采用文献[35-36]中风电机组各子系统的威布尔参数。各子系统的威布尔参数

$\beta$ 、 $\eta$ , 机会维护阈值  $R_c$  以及预防性维护阈值  $R_p$  如表 3 所示。

表 3 3 MW 海上机组的维护相关参数  
Table 3 Maintenance-related parameters for 3 MW offshore units

子系统	$\beta$	$\eta$	$R_c$	$R_p$
传感器系统 1	2.612	761.5	0.983	0.955
主控系统 2	2.012	731.7	0.976	0.954
偏航系统 3	3.330	629.7	0.955	0.912
油系统 4	3.674	747.6	0.941	0.906
电气系统 5	4.120	696.2	0.981	0.967
变桨系统 6	2.855	615.2	0.979	0.960
刹车系统 7	3.111	632.2	0.976	0.962
风轮系统 8	2.445	621.9	0.985	0.968
传动系统 9	3.114	596.3	0.989	0.951
发电机系统 10	2.559	593.8	0.987	0.942

### 4.2 子系统综合可靠度分析

根据表 3 中威布尔的形状参数、尺寸参数以及各子系统之间的故障传递关系,使用故障率法计算得到影响因子矩阵,如式(40)所示。

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 & 0.026 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.043 & 0.061 & 0.078 & 0.049 & 0.057 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.039 & 0 \\ 0 & 0 & 0.055 & 0 & 0 & 0.056 & 0 & 0 & 0.062 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.048 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.075 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.039 & 0 & 0 & 0 & 0.042 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.074 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.068 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.076 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

根据式(12)对各子系统的综合可靠度进行迭代计算,得到各个子系统的综合可靠度。传动系统的入度较大,受其他子系统故障传递影响较大;而刹车系统入度较小,仅受主控系统的故障传递影响。传动系统与刹车系统分别代表了受故障传递影响程度不同的情况,故选取这 2 个子系统的可靠度曲线进行展示。图 4 与图 5 分别为刹车系统 7、传动系统 9 的可靠度曲线。

从图 4、图 5 可以看出,综合可靠度相比固有可靠度下降速率更快;不同子系统综合可靠度变化程度不同。分析其原因:(1)固有可靠度仅考虑了子系统自身劣化过程的影响,忽略了其他子系统的影响与冲击。当计及其他子系统的故障传递作用时,故障率上升,从而导致综合可靠度下降速率更快。(2)从图论的角度出发,传动系统 9 与刹车系统 7 的入度分别为 6 与 1(如图 1 所示),即这 2 个子系

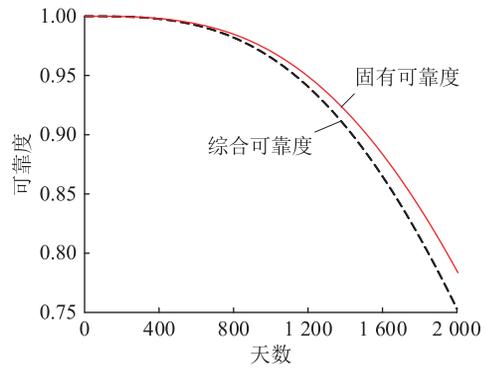


图 4 刹车系统 7 的可靠度曲线  
Fig.4 Reliability curves of brake system 7

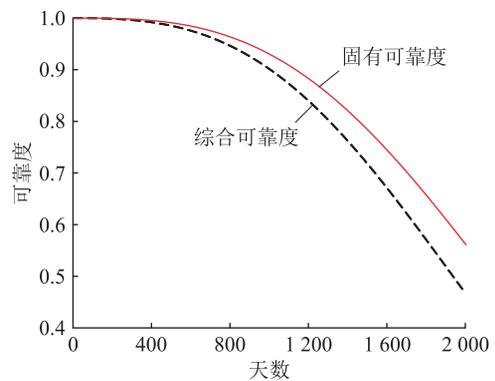


图 5 传动系统 9 的可靠度曲线  
Fig.5 Reliability curves of drive system 9

统受到其他子系统的故障传递作用程度不同,表现出子系统入度越大,所受影响程度越大的特点。由此可以看出,基于故障链的可靠度模型能更好地描述子系统间的故障相关性。

### 4.3 机会维护策略分析

#### 4.3.1 风电机组的机会维护策略分析

在得到各子系统综合可靠度的基础上,根据提出的单位时间维护成本最小的目标函数,采用粒子群算法对风险因子  $Z$  进行优化计算,进化代数与适应度的关系如图 6 所示。

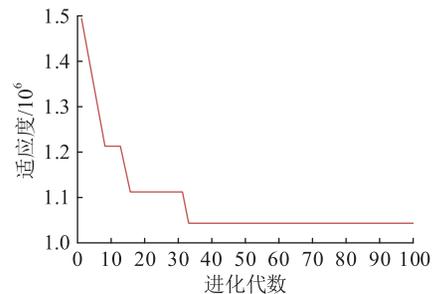


图 6 粒子群计算结果  
Fig.6 Particle swarm calculation results

从图 6 中可以看出,当进化代数为 32 时,适应度取得最小值,即当风险因子取值 0.000 12 时,风电

机组在 1 000 d 内的维护成本最小,为 104.7 万元。为体现考虑可靠度与风险水平双阈值对机会维护策略的影响,文中对比仅考虑可靠度阈值的机会维护策略,即风险水平阈值为 0 的机会维护。

2 种方案的维护结果对比如表 4 所示,其中方案 1 为考虑风险水平约束的机会维护策略;方案 2 为不考虑风险水平约束的机会维护策略。由表 4 可知,与方案 2 相比,方案 1 考虑风险水平约束,当风险因子取 0.000 12 时,单位时间维护费用从 1 441.2 元/d 减少至 1 047.2 元/d,降低了 27.34%,可见考虑风险水平约束的维护策略可以减少部分子系统的维护次数,达到节约维护成本的目的。

表 4 维护策略优化结果

Table 4 Maintenance strategy optimization results

维护参数	方案 1	方案 2
风险因子	0.000 12	0
维护总费用/元	1 047 216	1 441 255
单位时间维护费用/(元·d <sup>-1</sup> )	1 047.2	1 441.2
子系统预防性维护次数	2	2
子系统机会维护次数	4	7

方案 1 与方案 2 的维护计划分别如图 7、图 8 所示。

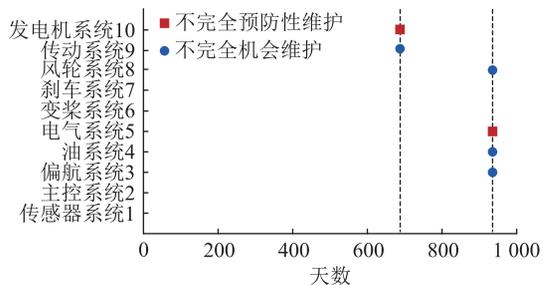


图 7 考虑风险水平约束的机会维护策略

Fig.7 Opportunity maintenance strategy considering risk level constraints

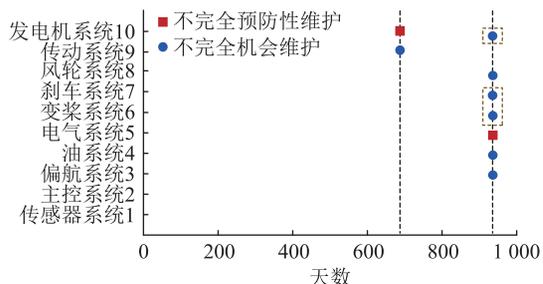


图 8 不考虑风险水平约束的机会维护策略

Fig.8 Opportunity maintenance strategy without considering risk level constraints

由图 7、图 8 可知,在 1 000 d 内,方案 1 子系统预防性维护次数与方案 2 相同,但方案 1 中子系统

机会维护次数相比于方案 2 减少了 3 次,由此看出,方案 1 有效避免了相关子系统出现过维护现象,节省了不必要的维护资源成本。

### 4.3.2 风电场的机会维护策略分析

在风电机组机会维护策略的基础上,获取风电场中各台风电机组的维护安排。采用维护矩阵将每台机组的维护信息整合,并根据子系统的故障风险水平和备件情况,以单位时间维护成本最小为目标函数,对风电场的维护策略进行优化,得到风电场单位时间维护成本的结果为 7 083.17 元/d,在 1 000 d 内共出海维护 12 次,其中对子系统进行小修 59 次,大修 5 次。为体现文中所提的海上风电场机会维护策略的有效性,与不考虑多级维护的维护策略以及不考虑备件约束的维护策略进行对比分析。设置方案 1 为不考虑备件库存、维护方式的机会维护策略;方案 2 为仅考虑多级维护的机会维护策略;方案 3 为考虑备件约束、多级维护的机会维护策略。3 种方案的维护计划分别如图 9、图 10、图 11 所示。

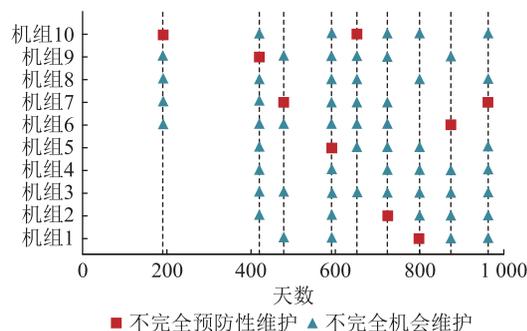


图 9 方案 1 的维护情况

Fig.9 Maintenance status of scheme 1

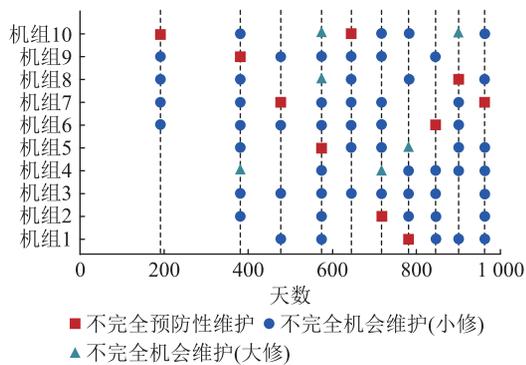


图 10 方案 2 的维护情况

Fig.10 Maintenance status of scheme 2

由图 9、图 10 可知,在 1 000 d 内,方案 2 进行了维护方式的判断,由于不完全机会维护中的小修与大修对子系统的可靠度改善程度不同,因此 2 种方案在第二次维护时,预防性维护的触发时间有差

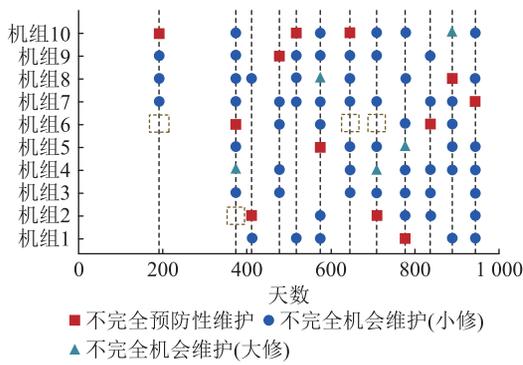


图 11 方案 3 的维护情况

Fig.11 Maintenance status of scheme 3

别,并且方案 2 总共前往维护的次数比方案 1 多一次。由此看出,考虑多级维护的方案,因不同维护方式对子系统可靠度造成的影响不同,其维护计划的触发时刻会发生改变。

由图 10、图 11 可知,在 1 000 d 内,方案 3 受备件库存的约束,在第一次维护时,仅对 3 个机组的子系统进行了维护,后续触发预防性维护的机组对象也发生变化,并且相较于方案 2,第二次维护时间也提前了些许。由此看出,考虑备件约束的方案,因备件库存数的约束,强制改变了维护计划的执行,导致后续一系列的维护安排也发生变化。因此在实际维护中,考虑备件问题是必要的。

根据 3 种不同的维护方案统计得到具体的停机费用、工作人员费用、交通工具费用、资源费用和维护总费用,并进行对比,如图 12 所示。

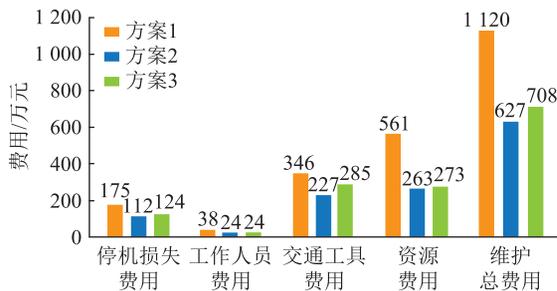


图 12 维护费用对比

Fig.12 Comparison of maintenance costs

3 种维护方案的维护费用及维修次数的对比如表 5 所示。

从图 12 和表 5 可以看出,相对于方案 1,方案 2 的维护次数更多,但总维护费用更低,其中,方案 2 的资源费用减少了 298 万元,其费用率降低约 53%,节省了大量开支,更具有优越性。与方案 2 相比,方案 3 由于备件约束,其预防性维护次数更多,单位时间维护费用更高。其中,方案 3 的交通工具费用多出了 58 万元,其费用率提高了约 26%。

表 5 维护方案对比

Table 5 Comparison of maintenance schemes

维护参数	方案 1	方案 2	方案 3
风险因子	0.000 12	0.000 12	0.000 12
维护总费用/万元	1 120	627	708
单位时间维护费用/(元·d <sup>-1</sup> )	11 200 0	6 270	7 080
预防性维护次数	9	10	12
机组小修次数	0	56	59
机组大修次数	56	6	5

分析其原因:(1) 方案 2 考虑了小修与大修 2 种不完全维护。小修所需要的维护费用、时间相对而言更少,但让子系统回退的可靠度不如大修。小修虽会让维护变得频繁,但可充分利用子系统的可靠性价值,维护费用相对更少。因此相比方案 1,方案 2 减少了大量的维护资源费用以及停机损失,这也反应在了停机损失费用与交通工具费用上。(2) 方案 3 与方案 2 的费用差异主要是体现在交通工具费用上,备件约束导致原本的维护计划被破坏,部分本应被维护的子系统只能挪到下次机会维护或触发下一次的预防性维护,使维护变得更加频繁,因此相较于方案 2,方案 3 的维护总费用更高。

#### 4.4 灵敏度分析

文中所提出的基于故障风险水平的风电场机会维护策略受到诸如维护等级的役龄回退因子、备件库存数、维护总费用、天气等多种参数变量的影响。为此,文中分别对役龄回退因子、备件库存数、维护总费用、天气因素展开灵敏度分析。

(1) 役龄回退因子。子系统的劣化过程受维护的影响,役龄回退因子取值决定了维护对子系统劣化程度的改善能力。方案 3 中,绝大多数的维护都选择的是不完全维护中的小修,因此对不完全维护中小修的役龄回退因子取值展开研究与分析。当小修的役龄回退因子取值发生变化时,对维护总费用的影响如表 6 所示。

表 6 费用降低程度随役龄回退因子变化情况

Table 6 Variation of cost reduction with service age regression factor

役龄回退因子	维护总费用/万元	费用降低程度/%
$(2n+1)/(6n+10)$	691	38.4
$(n+1)/(3n+5)$	708	36.8
$(n+2)/(3n+5)$	727	35.1

由表 6 可知,随着役龄回退因子取值的减小,子系统的劣化过程变缓,方案 3 的维护费用降低程度越明显。结合不同维护等级的维护策略,方案 3 既保证了子系统的运用可靠性,又增强了实际维护操作中的可执行性,同时还能降低总体的维护费用。

并且由图9、图10和式(18)可知,当小修的役龄回退因子取值小于大修时,会影响子系统维护等级的选择,在小修的役龄回退因子取值合理的情况下,维护能更具有经济性。同时,当小修的役龄回退因子取值较小时,其对子系统可靠度改善程度不如大修,因此子系统下一次预防性维护时间相对提前,还会影响维护策略的制定,使维护更频繁。但由于小修的维护费用远小于大修,因此维护总费用仍低于只考虑单一维护等级的情况。

(2) 备件库存数。合理的备件储备有利于子系统的正常运行,备件库存数稀缺则会影响到风机的运维工作,因此须对备件库存数进行灵敏度分析。当备件库存数变化时,维护对费用的提升效果如表7所示。

表7 费用提升程度随备件库存数变化情况  
Table 7 Variation of the degree of cost improvement with the number of spare parts in stock

备件库存数	维护总费用/万元	费用提升程度/%
2	831	32.5
4	708	12.9
6	652	4.0
8	627	0

由表7可知,当备件库存数增多时,维护费用提升程度在逐渐减小,直到和不考虑备件约束时的维护总费用相同。这是因为维护策略的制定会受备件库存数的约束,当备件数量过少时,维护策略选取的对象也随之减小,使得下一次风电场的维护提前。实际中,备件库存数过多虽会让风电场维护策略的制定更自由,但也会加大备件的管理成本。综上可知,在实际维护工作中,应合理制定备件的订货策略,有效控制维护费用,以此来更好地配合维护工作开展。

(3) 维护总费用。机会维护总费用主要由维护资源费用 $C_o$ 、交通工具费用 $C_v$ 、停机损失费用 $C_d$ 和工作人员费用 $C_r$ 四部分构成。不同费用变化对维护总费用的影响关系如图13所示。

由图13可知,维护资源费用与交通工具费用的成本变化对维护总费用的影响最为显著。这是由于在对海上风电场执行维护计划时,维护资源费用与交通工具费用的占比较大,因此在维护时,应尽量合理优化维护对象,避免出现过维护现象,以此减少维护总费用。

(4) 天气因素。随着天气变化,不同季节的出海可及率也不尽相同。各季节可及率及采用方案3对费用的降低程度如表8所示。

由表8可知,方案3的维护费用降低程度随可

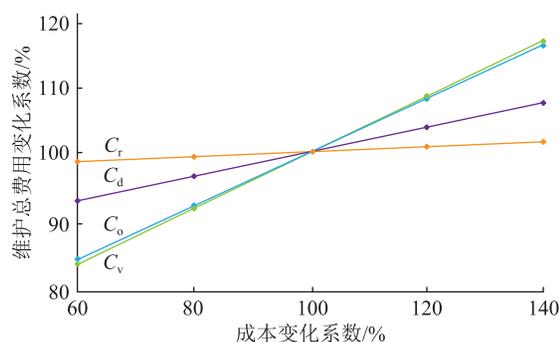


图13 各类维护成本对维护总费用的影响

Fig.13 Impact of each type of maintenance cost on total maintenance cost

表8 费用降低程度随天气变化情况

Table 8 Variation of cost reduction with weather

季节	可及率	费用降低程度/%
冬	0.40	23.5
春	0.57	13.2
秋	0.64	8.8
夏	0.77	5.2

及率的升高而减少。在冬季时,出海可及率较低,出海延迟的情况比其他季节多,导致停机损失相对而言更大。因此,为保证子系统维护的经济性,制定合理的维护计划,在维护工作执行时,应根据当时天气情况,尽可能将维护工作制定在可及率较高的时间段。其次,从备件管理的角度来思考,在可及率低季节出海机会较少,可以准备更多的维护备件来进行机会维护,以此减少因出海延迟造成的停机经济损失。

## 5 结论

文中提出了一种基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略,该方法适用于大多数海上风电场,但不同型号风机的故障传递有向图会存在差异,须根据维护经验进行修改。文中主要的创新与结论如下:

(1) 相对于传统的可靠度模型,考虑故障相关性的可靠度模型能体现子系统间复杂的故障传递关系与子系统间故障率相互影响后所引起的可靠度变化,有助于对子系统间的故障相关性进行定量分析。

(2) 文中提出考虑故障风险水平的机会维护策略,针对单台机组而言,能有效减少维护停机时间;相较于传统的机会维护,可降低的费用率为27.34%,能在一定程度上解决风电机组运维费用居高不下的问题。

(3) 文中所提基于故障风险水平的海上风电场

维护策略通过选择维护方式以及基于备件、子系统的故障风险水平优化维护矩阵来对机组展开维护,既增强了实际维护操作中的可执行性,又能降低总体的维护费用。

#### 参考文献:

- [1] 王立忠,洪义,高洋洋,等. 近海风电结构台风环境动力灾变与控制[J]. 力学学报,2023,55(3):567-587.  
WANG Lizhong, HONG Yi, GAO Yangyang, et al. Dynamic-catastrophe and control of offshore wind power structures in typhoon environment[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2023,55(3):567-587.
- [2] 李铮,郭小江,申旭辉,等. 我国海上风电发展关键技术综述[J]. 发电技术,2022,43(2):186-197.  
LI Zheng, GUO Xiaojiang, SHEN Xuhui, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2):186-197.
- [3] 孙玉巍,常静恬,付超,等. 分频输电系统模块化多电平矩阵变换器谐波特性分析[J]. 电力工程技术,2022,41(5):21-30,84.  
SUN Yuwei, CHANG Jingtian, FU Chao, et al. Harmonic characteristics analysis of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):21-30,84.
- [4] 房方,梁栋扬,刘亚娟,等. 海上风电智能控制与运维关键技术[J]. 发电技术,2022,43(2):175-185.  
FANG Fang, LIANG Dongyang, LIU Yajuan, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2):175-185.
- [5] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):729-738.  
HUANG Lingling, CAO Jialin, ZHANG Kaihua, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):729-738.
- [6] 魏书荣,闫梦飞,任子旭,等. 考虑运行环境影响的海上双馈风电机组状态判别[J]. 电力系统自动化,2022,46(20):181-189.  
WEI Shurong, YAN Mengfei, REN Zixu, et al. State discrimination for offshore DFIG-based wind turbine considering influence of operation environment[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(20):181-189.
- [7] 高晨,赵勇,汪德良,等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望[J]. 电工技术学报,2022,37(S1):30-42.  
GAO Chen, ZHAO Yong, WANG Deliang, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(S1):30-42.
- [8] 赵洪山,张健平,高夺,等. 风电机组的状态-机会维修策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3851-3858.  
ZHAO Hongshan, ZHANG Jianping, GAO Duo, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(15):3851-3858.
- [9] 赵洪山,张健平,程亮亮,等. 考虑不完全维修的风电机组状态-机会维修策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):701-708.  
ZHAO Hongshan, ZHANG Jianping, CHENG Liangliang, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine under imperfect maintenance[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):701-708.
- [10] 贺德强,孙一,苗剑,等. 基于全局优选阈值列车走行部机会维护模型优化[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(2):462-469.  
HE Deqiang, SUN Yi, MIAO Jian, et al. Opportunity maintenance model of train bogie based on global optimization threshold[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020,26(2):462-469.
- [11] 符杨,许伟欣,刘璐洁,等. 考虑天气因素的海上风电机组预防性机会维护策略优化方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(20):5947-5956.  
FU Yang, XU Weixin, LIU Lujie, et al. Optimization of preventive opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine considering weather conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(20):5947-5956.
- [12] IRAWAN C A, OUELHADJ D, JONES D, et al. Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(1):76-89.
- [13] 符杨,张耀楠,刘璐洁,等. 海上风电场维护任务动态调度策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(21):48-56.  
FU Yang, ZHANG Yaonan, LIU Lujie, et al. Dynamic dispatching strategy for maintenance tasks of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21):48-56.
- [14] GOLMAKANI H R, MOAKEDI H. Periodic inspection optimization model for a multi-component repairable system with failure interaction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1):295-302.
- [15] SUN Y, MA L, MATHEW J. Failure analysis of engineering systems with preventive maintenance and failure interactions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(2):539-549.
- [16] 符杨,杨凡,刘璐洁,等. 考虑部件相关性的海上风电机组预防性维护策略[J]. 电网技术,2019,43(11):4057-4063.  
FU Yang, YANG Fan, LIU Lujie, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbines considering component correlation[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4057-4063.
- [17] 王晓燕,申桂香,张英芝,等. 基于故障链的复杂系统故障相关系数建模[J]. 吉林大学学报(工学版),2015,45(2):442-447.  
WANG Xiaoyan, SHEN Guixiang, ZHANG Yingzhi, et al. Dependent coefficient model for complex system based on failure chains[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Tech-

- nology Edition), 2015, 45(2):442-447.
- [18] 杨国军,王红,何勇,等. 故障及经济相关下动车组系统动态成组维护策略[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 31-37.  
YANG Guojun, WANG Hong, HE Yong, et al. Dynamic group maintenance strategy of EMU system under failure and economic dependence[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 31-37.
- [19] 王炳辉,王红,何勇,等. 考虑故障相关性的动车组多部件系统机会维护策略[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(1): 60-66.  
WANG Binghui, WANG Hong, HE Yong, et al. Opportunity maintenance strategy research of EMU components considering fault correlation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(1): 60-66.
- [20] 逯红霞,张蕊萍,董海鹰. 考虑故障相关性的风电机组维修策略[J]. 可再生能源, 2020, 38(4): 477-483.  
LU Hongxia, ZHANG Ruiping, DONG Haiying. Considering maintenance strategy of wind turbines with fault correlation[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(4): 477-483.
- [21] 夏侯凯顺,李波. 基于深度置信网络的双馈风机变流器开路故障诊断[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 188-194.  
XIA Houkaishun, LI Bo. Open-switch fault diagnosis of converters of doubly-fed induction generator-based wind turbine using deep belief networks[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 188-194.
- [22] 刘昌杰,段斌,张潇丹. 基于BPNN-NCT的风电机组主轴异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 114-122.  
LIU Changjie, DUAN Bin, ZHANG Xiaodan. An abnormal identification method for the main bearing of wind turbines based on BPNN-NCT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 114-122.
- [23] 柳璐,李林芝,卢天琪,等. 基于网页链接分析的电力系统连锁故障关键环节辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 25-33.  
LIU Lu, LI Linzhi, LU Tianqi, et al. Critical link identification method for cascading failure in power systems based on web link analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 25-33.
- [24] 申坤. 威布尔分布在产品可靠性分析中的应用[J]. 现代信息技术, 2020, 4(11): 165-167.  
SHEN Shen. Application of Weibull distribution in product reliability analysis[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(11): 165-167.
- [25] 文昌俊,陈哲,徐云飞,等. 基于威布尔分布的谷物干燥机可靠性分析[J]. 机电工程, 2022, 39(7): 972-977.  
WEN Changjun, CHEN Zhe, XU Yunfei, et al. Reliability analysis of grain dryer based on Weibull distribution[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(7): 972-977.
- [26] 宋庭新,韩国晨. 基于预防性维修的舰船装备等级修理决策系统研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(4): 496-503.  
SONG Tingxin, HAN Guochen. Research and development for preventive maintenance-based ship grade repair decision-making systems[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(4): 496-503.
- [27] 薛安成,刘中硕,刘一民,等. 基于改进役龄模型和全生命周期成本的继电保护装置服役年限确定[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 219-224.  
XUE Ancheng, LIU Zhongshuo, LIU Yimin, et al. Determination of service life for relay protection device based on improved age-reduction model and life cycle cost[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 219-224.
- [28] 张炜,王佳琳,张懿议,等. 基于役龄回退分析的电力设备检修决策方法研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 201-206.  
ZHANG Wei, WANG Jialin, ZHANG Yiyi, et al. The equipment maintenance decision method based on the analysis of the age reduction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 201-206.
- [29] 张爽,田浩,焦龙,等. 基于役龄回退理论的电网设备健康指数建模方法[J]. 供用电, 2016, 33(1): 8-13.  
ZHANG Shuang, TIAN Hao, JIAO Long, et al. Research on the healthy condition of power distribution equipment based on age reduction theory[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 8-13.
- [30] 黄玲玲,寻健,王浩. 海上风机综合检修优化策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 112-119.  
HUANG Lingling, XUN Jian, WANG Hao. Optimization strategy for comprehensive maintenance of offshore wind turbines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 112-119.
- [31] 郑小霞,李佳,贾文慧. 考虑不完全维修的风电机组预防性机会维修策略[J]. 可再生能源, 2017, 35(8): 1208-1214.  
ZHENG Xiaoxia, LI Jia, JIA Wenhui. Preventive opportunistic maintenance strategy of wind turbines considering imperfect maintenance[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(8): 1208-1214.
- [32] DO P, VOISIN A, LEVRAT E, et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133: 22-32.
- [33] 邵良杉,王振,李昌明. 基于模拟退火与改进粒子群的矿井通风优化算法[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(9): 2085-2094.  
SHAO Liangshan, WANG Zhen, LI Changming. Optimization algorithm of mine ventilation based on SA-IPSO[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(9): 2085-2094.
- [34] CARROLL J, MCDONALD A, MCMILLAN D. Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2016, 19(6): 1107-1119.
- [35] 刘璐洁,符杨,马世伟,等. 基于可靠性和维修优先级的海上风电机组预防性维护策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5732-5740, 6015.

LIU Lujie, FU Yang, MA Shiwei, 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, 6015.

[36] 谢鲁冰. 海上风电机组动态机会成组维修策略的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.

XIE Lubing. Research on dynamic opportunistic grouping maintenance strategy of offshore wind turbine[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2021.

作者简介:



宋明阳

宋明阳(1997),男,硕士在读,研究方向为海上风电运行维护(E-mail: 24501193@qq.com);

瞿晟珉(1998),男,硕士在读,研究方向为海上直流输电规划与控制;

秦少茜(1997),女,硕士在读,研究方向为海上风电场并网系统优化规划。

## Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level

SONG Mingyang, QU Shengmin, QIN Shaoxi, YING Feixiang, MA Yongjie, HUANG Lingling

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The maintenance cost of offshore wind farms accounts for a high proportion of the total cost of power generation. In order to reduce the operational and maintenance costs of offshore wind farms, based on a reliability threshold, a maintenance strategy is proposed in the paper that considers the fault-relatedness among subsystems and the subsystem fault risk levels of wind turbine units. This strategy includes fault risk levels, dual reliability thresholds, and a maintenance matrix. Firstly, a fault chain model is used to describe the fault relationships among subsystems of wind turbine units, and reliability models for each subsystem are established. Secondly, the concept of multi-level maintenance is introduced, and the optimization model of wind farm opportunity maintenance strategy considering the fault risk level is proposed. The risk factor of subsystem opportunity maintenance is optimized using particle swarm algorithm, and then the maintenance strategy of a single unit is determined. Thirdly, an offshore wind farm maintenance strategy optimization model based on the maintenance matrix is proposed by considering factors such as offshore accessibility and spare parts inventory. The model takes the minimum total maintenance cost per unit time as the objective function and dynamically adjusts the maintenance strategy according to the subsystem's spare parts inventory and failure risk level. Finally, a single wind turbine in an offshore wind farm is used as an example to analyse the impact of factors such as accessibility and multilevel maintenance on the wind farm opportunity maintenance strategy. The results show that the opportunity maintenance strategy considering the failure risk level can reduce the cost by 27.34% compared with the traditional opportunity maintenance strategy, which verifies the effectiveness of the proposed opportunity maintenance strategy in reducing maintenance costs.

**Keywords:** offshore wind farm; fault correlation; comprehensive reliability; maintenance matrix; opportunity maintenance; failure risk level

(编辑 陆海霞)