

联合结构和随机相关性的风电机组机会维护策略^{*}

成 卉, 刘勤明, 叶春明, 张震宇

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要:【目的】针对风电机组系统内部结构复杂,子系统间相互耦合、维护费用高的特点,提出了联合考虑结构相关性和随机相关性影响下的风电机组的机会维护策略。【方法】首先,用 Weibull 分布描述风机组子系统的劣化趋势,并根据子系统间的随机相关性表达子系统的综合故障率和综合可靠度。其次,通过经济相关计算维护准备费,用不同维护方式下的维护概率计算维护调整费,用结构相关计算停机损失费,以总维护费用为目标函数建立模型。【结果】算例分析表明:考虑随机相关性时,受随机相关性影响的子系统的预防维护周期变短,系统的维护费用有所增加;而联合考虑随机相关性和结构相关性后,可分摊的停机损失费用增加,总维护费用降低。【结论】提出的机会维护策略更符合风电机组实际运行情况,在保证风电机组子系统高可靠性的同时,维护费用也大大降低。

关键词:风电机组;机会维护;结构相关性;随机相关性

中图分类号: O226;TB472

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2022)01-0127-10

随着风力发电技术的快速发展,风电机组作为实现风力发电的主要设备,应用范围越来越广。截至 2017 年底,风电机组的全球累计装机容量约为 540 GW,产生电能占总电能产量的 5.6%^[1]。然而,风电机组常年在高温、高寒、高海拔等恶劣环境下运行,相比于其他可修设备来说,它们的运行和维护费用更加高昂,占全寿命周期成本的 15% 以上^[2]。因此,通过选择合理的维护策略来制定科学的维修计划,以降低风电机组的运维费显得颇为重要。

目前,不少学者研究了机会维护策略,并将该策略应用到大型复杂设备的维护中,例如通用飞机、轨道交通列车、港口装卸系统等^[3-5]。风电机组也属于大型复杂系统,它的子系统间存在着 3 种不同的相关关系:经济相关、随机(故障)相关以及结构相关。Thomas^[6]给出了相关性定义:经济相关性指几个部件的更换或维修费用少于单独更换或者维修的费用之和;随机相关性指某些部件故障时会一定程度上影响到其他部件的故障率或运行状态;结构相关性则意味着必须替换或者至少拆除某些部件才能替换或者维修故障部件。因此,在考虑到子系统的相关性时,相比于传统用于维护单部件的维修策略,机会维护策略更能满足风电机组这类大型复杂系统的维护需求^[7]。

国内外诸多学者在研究风电机组的机会维护策略时,通常假设子系统是相互独立的来研究子系统的经济相关性^[8-11]。而风电机组在实际运行过程中,各个子系统间存在耦合关系,所以故障并非独立。因此,学者们进一步研究机组子系统间的随机(故障)相关性。符杨等人^[12]利用 Copula 函数构建联合风险度模型,从而建立风电机组预防维护的双层优化模型,其中考虑了故障相关的风电机组风险度的下层优化模型有效降低了风电机组在全寿命周期内的风险度。赵洪山等人^[13]考虑风电机组中部件的运行状态,用比例失效模型来刻画机组中部件的劣化过程,通过设立状态维护阈值和机会维护阈值建立状态——机会维修模型,从而减少维修成本。逯红霞等人^[14]将风电机组的故障相关性考虑在内,用被影响度刻画某个子系统受到因其他子系统的故障带来的影响,同时被影响度也作为维修策略的决策依据,他们的研究表明考虑故障相关能在一定程度上解决“过修”和“欠

^{*} 收稿日期:2020-01-20 修回日期:2020-04-14 网络出版时间:2022-02-09 16:36

资助项目:国家自然科学基金(No. 71632008;No. 71840003);上海市自然科学基金(No. 19ZR1435600);2020 年上海理工大学大学生创新创业训练计划(No. XJ2020154);教育部人文社会科学研究规划基金(No. 20YJAZH068);上海理工大学科技发展项目(No. 2020KJFZ038)

第一作者简介:成卉,女,研究方向为设备维护与决策,E-mail:prayerch@163.com;通信作者:刘勤明,男,副教授,博士,E-mail:lqm0531@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20220209.1508.028.html

修”的问题。以上研究只考虑了风电机组子系统相关性的一种或两种,未能全面地将结构相关性考虑在风电机组的机会维护策略的研究当中。目前,结构相关性有关研究大都在机械工程领域展开,主要从拆卸序列、维护计划的更新方法、决策变量的重要度等角度展开论述,来构建考虑结构相关性的多部件维护模型^[15-17]。而在风电机组维护领域,考虑结构相关的机会维护策略的研究仍处于起步阶段。

基于上述文献不难发现,风电机组在相关性这一方面的研究比较单一,已有研究通常不能全面地将经济相关性、结构相关性和随机相关性一同考虑在风电机组的机会维护中,这可能会导致维护方案不能切实反映风电机组的运行情况。考虑到现有模型的局限性,本文在考虑了风电机组子系统经济相关性的同时,将结构相关性和随机相关性一并考虑在内。根据子系统间的随机相关性计算子系统的综合故障率和综合可靠度,用结构相关性来反映子系统的可摊停机损失费,以最小期望总维护费用为目标,提供更贴合风电机组实际情况的机会维护策略。

1 问题描述

风电机组是由叶轮系统、主轴系统、齿轮箱、发电机、偏航系统、刹车系统、电气系统、主控系统、传感器、油系统、机舱、塔架等子系统组成的大型复杂设备。它的子系统内部结构错综复杂,以故障独立为前提研究风电机组子系统的维护策略则在一定程度上忽视了子系统间结构的复杂性,弱化了各子系统间的相关性。联合考虑结构相关性和随机相关性的机会维护策略模型通过引入结构相关系数和随机相关系数来反映子系统间的耦合程度,同时子系统通过机会维护的方式共享维护资源,获得更多的经济效益。风电机组的机会维护策略是通过判断子系统役龄 t 满足的条件来选择维护方式,它的机会维护策略如图 1 所示。

设子系统 i 的预防维护时间阈值为 t_i^p , 机会维护时间阈值为 t_i^o 。当子系统 k 的役龄 t 满足条件 $0 < t < t_k^o$ 时,如果子系统 k 出现故障,则采用最小维修的维护方式,这类维护旨在恢复子系统的状态,使得它的瞬时故障率不发生改变。当役龄满足预防维护条件 $t \geq t_k^p$ 时,则采取预防更换的方式对子系统 k 进行维护,换后如新。在机组停机维护期间,其他子系统均获取维护机会,当役龄 $t_k^o < t < t_k^p$ 时,则符合机会维护的条件,将一次停机期间所需机会维护所有部件记于集合 O 中, $O = \{1, 2, \dots, i\}, k \notin O$ 。采用更换的方式对子系统 i 进行维护,换后如新。

本文使用符号设定如下: β, η 为 Weibull 分布参数; $\chi(\chi)$ 为随机相关系数; λ 为结构相关系数; C_{mm} 为总最小维修费用; C_{om} 为总机会更换费用; C_{pm} 为总预防更换费用; $c_{i,mm}$ 为部件 i 的最小维修费; $c_{i,om}$ 为部件 i 的机会更换费; $c_{i,pm}$ 为部件 i 的预防更换费; c_l 为单位时间的停机损失费; D 为全寿命周期; C_E 为总期望维护费; C_{EF} 为总期望维护准备费; C_{EL} 为总期望停机损失费; C_{EM} 为总期望维护调整费; $f_i(t)$ 为部件 i 的故障概率密度分布函数; $g_i(t_i^o, t)$ 为部件 i 的机会维护概率密度函数; $h_i(t)$ 为部件 i 的故障概率密度函数; $p_i(m)$ 为部件 i 的最小维护的概率; $p_i(o)$ 为部件 i 的机会维护维护的概率; $p_i(p)$ 为部件 i 的预防维护的概率; $R_i(t)$ 为可靠度函数; t_i^o 为机会维护时间阈值; t_i^p 为预防维护时间阈值; t^d 为停机时间; t^m 为维护耗时; t^{set} 为维护准备时间; w 为机会维护区间长度。

2 模型建立

2.1 可靠度演化

传统的故障率模型通常以部件或系统故障独立为前提,通常用二参数 Weibull 分布来描述自身的退化趋势,子系统 i 的故障率函数和可靠度函数分别表示为:

$$h_i^1(t) = \frac{\beta^{(i)}}{\eta^{(i)}} \left(\frac{t}{\eta^{(i)}} \right)^{\beta^{(i)}-1}, \quad (1)$$

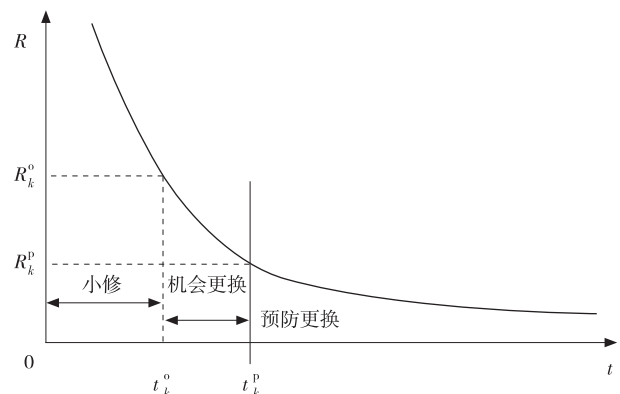


图 1 风电机组的机会维护策略

Fig. 1 Opportunistic maintenance strategies of wind turbines

$$R_i^1(t) = \exp \left[- \int_0^t h_i^1(t) dt \right]。 \quad (2)$$

其中: $\beta^{(i)}, \eta^{(i)}$ 为各子系统的形状参数和尺度参数,且 $\beta^{(i)} > 0, \eta^{(i)} > 0$ 。

在实际运作期间,子系统间存在耦合关系,也即故障并不是互相独立的。Murthy 等人^[18-19]先后提出 3 种类型的随机(故障)相关:类型 I 随机(故障)相关是指系统中某一部件发生故障时会以一定的概率导致内部其他部件发生故障;类型 II 随机(故障)相关是指系统中某一部件发生故障时会在某种程度上影响内部其他部件的故障率;类型 III 是冲击损害相关,具体是指系统中某一部件的故障会使内部其他部件形成随机损伤,损伤累积到一定程度后部件将发生故障。本文引入随机相关系数^[20] $\chi_{i,j}$ 来描述类型 II 随机(故障)相关,此时子系统的综合瞬时故障率函数可表示为:

$$h_i(t) = h_i^1(t) + \sum_j \chi_{i,j} \cdot h_j(t)。 \quad (3)$$

其中: $i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j; \chi_{i,j} \in [0, 1]$ 。 $\chi_{i,j} = 0$ 表示两子系统不存在随机故障相关关系,此时 $h_i(t) = h_i^1(t)$; $\chi_{i,j} = 1$ 表示两子系统完全相关,其中一个子系统的故障必然导致另一子系统故障。依据风电机组中子系统间的故障传递关系,绘制故障传递关系图^[21] (图 2),并基于此图用矩阵 χ 记录量化后的随机相关系数 $\chi_{i,j}$ 。

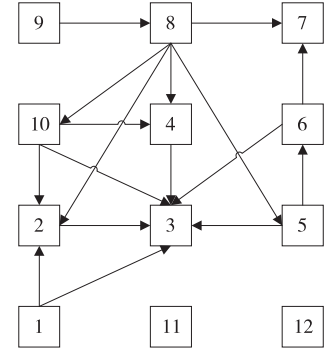


图 2 风电机组故障传递关系图

Fig. 2 Fault transmission diagram of wind turbines

$$\chi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \chi_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{2,8} & 0 & \chi_{2,10} & 0 & 0 \\ \chi_{3,1} & \chi_{3,2} & 0 & \chi_{3,4} & \chi_{3,5} & \chi_{3,6} & 0 & 0 & 0 & \chi_{3,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{4,8} & 0 & \chi_{4,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{5,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{6,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{7,6} & 0 & \chi_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{8,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{10,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

根据可靠度理论,将(3)式代入(1),(2)式,可以推算出子系统在综合故障影响下的可靠度。因此,子系统 i 的综合可靠度函数表示为: $R_i(t) = \exp \left[- \int_0^t h_i(t) dt \right] = R_i^1(t) \cdot \prod_j [R_j(t)]^{\chi_{i,j}}$ 。

2.2 期望总费用模型

在机会维护策略下,以机组的维护总费用期望为目标函数建立模型。 $C^{(n)}$ 表示第 n 个周期的维护成本由维护准备费 C_F 、维护调整费 C_M 和停机损失费 C_L 组成。系统在任一周期内的维护成本期望统一表示为:

$$C_E = C_{EF} + C_{EM} + C_{EL}, \quad (4)$$

1) 维护准备费。子系统维护前需要维护人员、车辆和塔吊等设备辅助维护动作的实施。维护准备费主要包括人工服务费、车辆运输费和设备租赁费等。假设子系统 $i \in M, M$ 为一次维护活动中所需维护的所有子系统的编号。在传统维护策略中,维护准备费取决于所需维护子系统的费用总和, $C_{EF} = \sum_{i \in M} C_i^0$ 。而在机会维护策略下,子系统成组维护时将经济相关性考虑在内,即多个子系统一起维护时共享维护资源,分摊维护准备费。此时,维护准备费的表达式为:

$$C_{EF} = C_i^0。 \quad (5)$$

2) 维护调整费。为了使子系统恢复到正常的运行状态,在实施维护策略时,不同的维护方式会产生不同的维护费用,这里统称为维护调整费。包括最小维修费 C_{mm} 、预防更换费 C_{pm} 和机会更换费 C_{om} 。用维护概率计算维护调整费。 $p(m)$ 表示子系统在预防维护之前出现故障时,采取小修的方式进行维护的概率。 $p(p)$ 表示子系

统 k 在区间 $t \in (t_k^o, t_k^p)$ 没有出现故障,且获得维护机会的子系统 i 在此区间内性能良好,需要进行预防维护的概率。 $p(o)$ 表示在区间 $t \in (t_k^o, t_k^p)$ 子系统 k 状态良好,子系统 r 出现故障需要更换的概率。子系统 i 的机会维护时间 t_i^o 近似服从指数分布^[9,21], 概率密度函数为:

$$g_i(t_i^o, t) = \frac{1}{\eta^{(i)}} \cdot \exp\left[-\frac{t-t_i^o}{\eta^{(i)}}\right]. \quad (6)$$

维护调整成本期望函数表示为:

$$C_{EM} = E(C_{mm} + C_{pm} + C_{om}) = \sum_{i=1}^n [c_{i,mm} \cdot p_i(m) + c_{i,om} \cdot p_i(o) + c_{i,pm} \cdot p_i(p)]. \quad (7)$$

维护概率 $p_i(m), p_i(o), p_i(p)$ 具体展开式如下:

$$\begin{cases} p_i(m) = \begin{cases} \int_0^{t_k^o} f_i(t) dt, i=k \\ \int_{t_k^o}^{t_k^p} f_k(t) \cdot \prod_i \left[1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, u) du\right] dt, i \in O \end{cases} \\ p_i(o) = \int_{t_k^o}^{t_k^p} \left[\left(1 - \int_{t_i^o}^t f_k(u) du\right) \cdot g_r(t_r^o, t) \cdot \prod_{i \in O, i \neq r} \left(1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, u) du\right) \right] dt \\ p_i(p) = \left[1 - \int_{t_k^o}^{t_k^p} f_k(t) dt\right] \cdot \prod_{i \in O} \left[1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, t) dt\right] \end{cases} \quad (8)$$

3) 停机损失费。由于子系统的预防更换和机会更换都需要机组停机才得以完成维护活动,在此期间,机组无法正常发电,因此将停机损失费一并计算到总维护费用中。停机损失费等于单位时间损失费乘以停机时间,表达式如下:

$$C_L = c_l \cdot t^d = c_l \cdot (t^{\text{set}} + t^m). \quad (9)$$

在风电机组的维护过程中,结构相关性主要表现在有多个子系统一同维护时,其中一个子系统的拆卸安装过程在一定程度上会影响其他子系统。子系统维护所耗时间等于预防维护 t_k^m 和机会维护耗时 t_i^m 的总和。在计算机会维护所耗时长时,将结构相关性考虑在内,选择机会成组维护中耗时最长的子系统。用结构相关矩阵 λ 来表示子系统的结构间的强弱关系,因此, t^m 可以表示为:

$$t^m = t_k^m + \lambda_{k,i} \cdot \max\{t_i^m\}, i \in O. \quad (10)$$

其中:结构相关系数为结构相关矩阵 λ 的矩阵元 $\lambda_{i,j}, \lambda_{i,j} \in [0, 1], \lambda_{i,j} = \lambda_{j,i}$ 。结合(9),(10)式,停机损失费的期望值可以表示为:

$$C_{EL} = E(c_l \cdot t^d) = c_l \cdot [t^{\text{set}} + t_k^m \cdot p_k(p) + \lambda_{k,i} \cdot \max\{t_i^m\} \cdot p_i(o)]. \quad (11)$$

将(6),(8)式代入(7)式中得到 C_{EM} 的表达式;将(5),(8),(11)式代入(4)式则可得到一个维护周期内的总维护费用期望。假设在全寿命周期 D 内,共有 n 个维护周期,则在全寿命周期内的总维护费用期望为:

$$\begin{aligned} C_E &= \sum_{n=1}^N E(C^{(n)}) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^n [C_i^0 + (c_{i,mm} \cdot p_i(m) + c_{i,om} \cdot p_i(o) + c_{i,pm} \cdot p_i(p)) + c_l \cdot t^d] = \\ &\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^n \left[C_i^0 + \left(c_{k,mm} \cdot \int_0^{t_k^o} f_k(t) dt + c_{i,mm} \cdot \int_{t_k^o}^{t_k^p} f_k(t) \cdot \prod_i \left[1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, u) du\right] dt \right) + \right. \\ &\quad c_{i,om} \cdot \int_{t_k^o}^{t_k^p} \left[\left(1 - \int_{t_i^o}^t f_k(u) du\right) \cdot g_r(t_r^o, t) \cdot \prod_{i \in O, i \neq r} \left(1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, u) du\right) \right] dt + \\ &\quad \left. c_{i,pm} \cdot \left[1 - \int_{t_k^o}^{t_k^p} f_k(t) dt\right] \cdot \prod_{i \in O} \left[1 - \int_{t_i^o}^{t_k^p} g_i(t_i^o, t) dt\right] + c_l \cdot [t^{\text{set}} + t_k^m \cdot p_k(p) + \lambda_{k,i} \cdot \max\{t_i^m\} \cdot p_i(o)] \right]. \end{aligned}$$

3 模型求解

在该机会维护模型中,当机会维护阈值 t_i^o 发生变化时,满足机会维护条件的子系统 $i \in O$ 会发生变化,直接影响下一个周期的维护计划,从而动态的改变整个维护过程以及总维护费用。为便于计算,假设每个子系统的机会维护区间长度相同,并用变量 w 来表示机会维护区间的长度,即 $t_i^o = t_i^o - w$ 。在 $w \in [0, \min\{t_i^p\}]$ 内,通过遍历 w 使得在该机会维护阈值下的总维护费用 C_E 取得最小值,此时 w^* 为最优机会维护长度, $t_i^{o*} = t_i^o - w^*$ 为最优机会维护阈值。图 3 为求解流程图,具体计算步骤如下:

步骤 1:输入已知条件 Weibull 分布参数、故障相关系数及维护成本;

步骤 2:判断运行时长 t 是否达到预防维护阈值 $t_k^p = \min\{t_i^p\}$ 。若 $t < t_k^p$,更新运行时长 $t = t + 1$,并循环该步骤,直到满足预防维护条件;

步骤 3:对于没有出现故障的其他子系统 i ($i \neq k$),根据 w 的值计算 t_i^o 并判断子系统是否需要机会维护。若 $t_i^o < t < t_i^p$,部件 i 满足机会维护条件,此时子系统 i 和 k 成组维护。若 i 不满足机会维护条件,则子系统 k 单独实施预防维护。计算第 n 个维护周期的维护概率 $p(m), p(p), p(o)$ 和维护成本期望 $C_E^{(n)}$ 。更新 $T^{(n)} = t_k^p + t^d$;

步骤 4:若 $\sum_{n=1}^N T^{(n)} < D$,返回至步骤 2,进行下一个周期的维护。直至 $\sum_{n=1}^N T^{(n)} \geq D$,退出循环;

步骤 5:计算在全寿命周期内的期望总维护费用 C_E ,确定最优机会维护间隔 w^* ,以及最佳机会维护阈值 t_i^{o*} 。

4 算例分析

4.1 数值准备

本文选用某风电场中同一型号的风电机组进行案例分析,主要以子系统的关键部件来分析叶轮系统、主轴系统、齿轮箱和发电机,依次编号为 1~4。该类风电机组规定的可运行年限为 15 年。子系统的 Weibull 分布参数、单次维护费和维护所耗时间如表 1 所示^[12]。

表 1 子系统维护参数

Tab. 1 Maintenance parameters of subsystems

编号 i	子系统	Weibull 分布参数		维护费/万元					维护时间/h	
		$\eta^{(i)}$	$\beta^{(i)}$	C_0	C_{mm}	$c_{i,pm}$	$c_{i,om}$	c_l	t^{set}	t_i^m
1	叶轮系统	3 000	3	3.5	0.65	63.2	63.2	0.24	2	240
2	主轴系统	3 750	2			65.8	65.8			480
3	齿轮箱	2 400	3			180.0	180.0			360
4	发电机	3 300	2			75.7	75.7			168

文献[12]中用部件之间的联合风险度来描述部件之间的随机故障相关程度。结合故障相关系数和图 2 得

出随机相关系数矩阵: $\chi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.031 & 0 & 0 & 0 \\ 0.042 & 0.13 & 0 & 0.11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

根据风电机组无故障运行的可靠性要求,参照子系统的可靠性图像(图 4),得出在该要求下子系统的预防维护时间阈值(见表 2)。

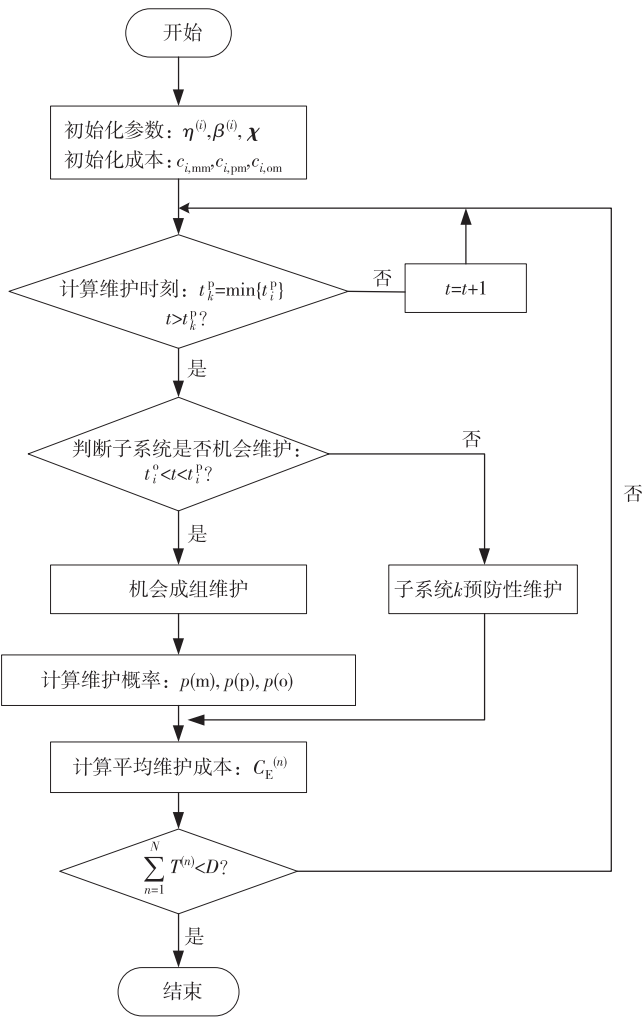


图 3 求解流程图

Fig. 3 Solution flow chart

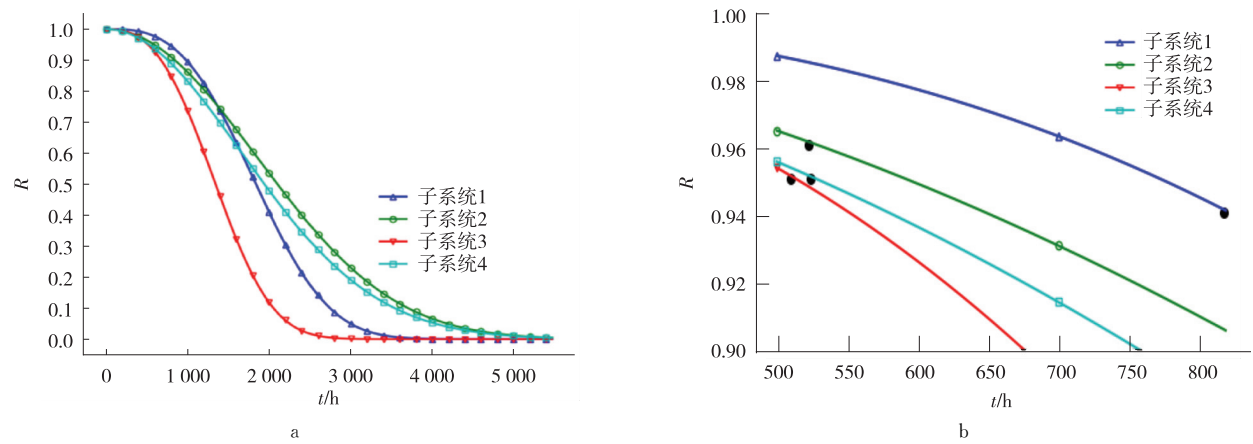


图 4 4 个子系统的可靠度图像
Fig. 4 Reliability of four subsystems

表 2 预防性维护可靠度阈值及其对应的时间阈值

Tab. 2 Preventive maintenance reliability threshold and its corresponding time threshold

子系统 i 编号	1	2	3	4
R_i^p	0.94	0.95	0.96	0.96
t_i^p	823	536	619	529

4.2 对比分析预防维护与机会维护策略

机会维护策略与传统的预防维护策略相比,主要是考虑了子系统间的经济相关性,具体体现在维护费用随停机次数的减少而降低。表 3 列出了风电机组在传统的预防维护和机会维护两种维护策略下的维护结果。在预防维护策略下,风电机组在全寿命周期内的总停机数为 34 次。而在机会维护策略中,总停机数为 19 次,停机次数减少了 15 次,约占 44.12%。

表 3 预防维护策略与机会维护策略维护结果对比

Tab. 3 Comparison of maintenance results between preventive maintenance strategy and opportunistic maintenance strategy

周期	传统预防维护		机会维护 ($w=220$)		
	t/D	子系统 i	t/D	预防更换子系统 i	机会更换子系统 i
1	529	4	529	4	2
2	536	2	619	3	1
3	619	3	1 058	4	2、3
4	823	1	1 442	1	2、3、4
5	1 058	4	1 971	4	2
6	1 072	2	2 061	3	1
7	1 238	3	2 500	4	2、3
8	1 587	4	2 884	1	2、3、4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	2 476	3	5 384	4	2、3
⋮	⋮	⋮			
34	5 360	2			

图 5 反映了随着机会维护区间长度 w 的增加,总维护费的变化趋势。 $w=0$ 时,即不考虑机会维护的情况。此时,频繁的停机产生了高昂的维护准备费,最终总维护费的期望值 $C_E=6\,244.01$ 万元。考虑机会维护后,子系统获得机会维护的概率随着机会维护区间的增加而增大,此时机会维护产生的费用不断增加;而由于停机次数

的减少,在机会维护中的维护准备费和停机损失费大大降低。当 $w^* = 220$ 时,取得目标函数最优值 2 547.98 万元。最终,与不考虑机会维护相比,总维护费期望值下降了 3 696.03 万元,约 59.19%。

4.3 考虑结构相关和随机相关的机会维护策略

在机会维护的基础上考虑随机相关性对风电机组维护活动的影响。类型 II 随机相关在不同程度上加速子系统的故障速度,子系统为达到运行可靠度要求的预防维护时间阈值会受到随机相关系数的影响从而发生改变。表 4 是考虑随机相关性后计算的预防维护时间阈值,子系统 3 在子系统 1,2,4 的影响下,预防维护阈值较不考虑随机相关时提前了 105 天,成为率先达到预防维护可靠度要求的子系统,维护计划随之发生变动。与不考虑随机相关的机会维护策略相比,以机会维护区间长度为 220 时的维护计划为例(表 5),此时总维护费期望值为 2 888.51 万元,维护费用因子系统 3 的维护方式从以机会更换为主到以预防更换为主的转变而增加,共增加了 340.53 万元。

表 5 $w=220$ 时考虑随机相关性的机会维护策略结果

Tab.5 Maintenance results under opportunistic maintenance strategy considering stochastic dependence when $w=220$

周期	t/D	预防更换子系统 i	机会更换子系统 i	周期	t/D	预防更换子系统 i	机会更换子系统 i
1	514	3	2,4	9	3 229	1	3
2	823	1	3	10	3 449	4	2
3	1 043	4	2	11	3 788	3	2,4
4	1 382	3	2,4	12	4 052	1	
5	1 664	1		13	4 307	3	2,4
6	1 901	3	2,4	14	4 812	3	1,2,4
7	2 406	3	2,3,4	15	5 326	3	2,4
8	2 920	3	2,4				

考虑随机相关性的机会维护策略下,机会维护时间长度为 240 时,目标函数取得最优值 2 576.13 万元(见图 6)。在此基础上,进一步将子系统间的结构相关性考虑在内。 $w=240$ 时,有两种成组维护分类情况: $M=\{3, 2,4\}$,子系统 3 采取预防更换,子系统 2,4 实施机会更换; $M=\{1,2,3,4\}$,子系统 1 采取预防更换,子系统 2,3,4 实施机会更换。所以,当 $k=3$ 或 1 时, $\max\{t_i^m\}=t_2^m$ 。此时,只需考虑结构相关系数 $\lambda_{3,2}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 对停机损失费的影响。

将 $\lambda_{3,2}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 在区间 $[0,1)$ 内以 0.1 为单位依次取值,计算停机损失费。结构相关系数都取 0 的时候表示只考虑随机相关性和经济相关性的情况,此时停机损失费为 993.24 万元。从表 6 中不难发现,停机损失费随着

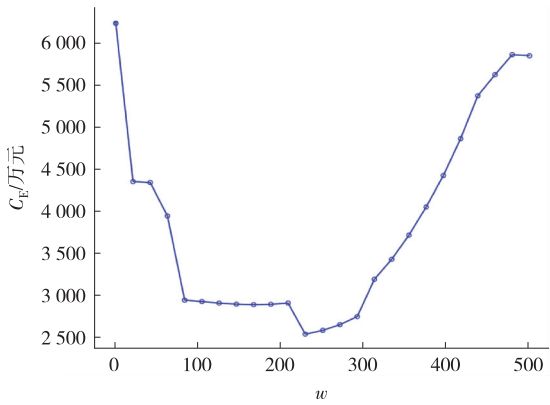


图 5 机会维护策略下的 C_E

Fig.5 Expected cost under the opportunistic maintenance strategy

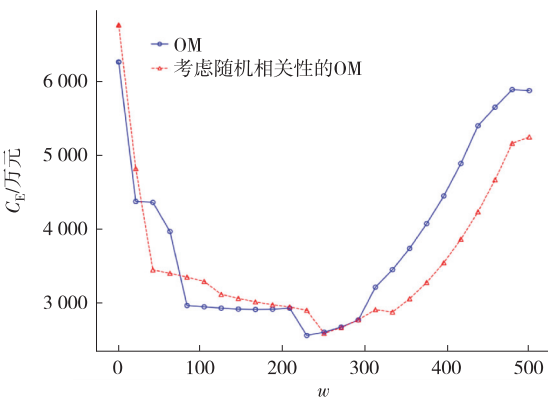
表 4 考虑随机相关性的预防性维护时间阈值

Tab.4 Preventive maintenance time threshold with the consideration of stochastic dependence

子系统 i 编号	1	2	3	4
t_i^p	823	530	514	529

图 6 是否考虑随机相关性的机会维护策略下的 C_E

Fig.6 Expected cost under the opportunistic maintenance strategy before and after considering stochastic dependence



结构相关系数的增加而减少,当 $\lambda_{3,2}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 取 0.9 时,停机损失费为 864.04 万元,与不考虑结构相关性时相比,减少了 129.2 万元。

图 7 中横纵轴分别表示 $\lambda_{3,2}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 的取值,能更加直观地反映出不同结构相关系数下所节约的停机损失费。 $\lambda_{1,2}=0.9, \lambda_{3,2}=0$ 时,停机损失费节约 71.5 万元; $\lambda_{1,2}=0, \lambda_{3,2}=0.9$ 时,停机损失费节约 57.7 万元,这表明子系统 2 与子系统 1 之间的结构相关性对机组的损失费影响程度更大。

表 6 $\lambda_{3,2}$ 和 $\lambda_{1,2}$ 不同取值下的停机损失费

Tab. 6 Downtime cost under different values of $\lambda_{3,2}$ and $\lambda_{1,2}$

单位:万元

$\lambda_{3,2}$	$\lambda_{1,2}$									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	993.24	985.30	977.36	969.41	961.47	953.53	945.59	937.65	929.70	921.76
0.1	986.83	978.88	970.94	963.00	955.06	947.12	939.17	931.23	923.29	915.35
0.2	980.41	972.47	964.53	956.59	948.65	940.70	932.76	924.82	916.88	908.94
0.3	974.00	966.06	958.12	950.17	942.23	934.29	926.35	918.41	910.46	902.52
0.4	967.59	959.64	951.70	943.76	935.82	927.88	919.93	911.99	904.05	896.11
0.5	961.17	953.23	945.29	937.35	929.40	921.46	913.52	905.58	897.64	889.69
0.6	954.76	946.82	938.87	930.93	922.99	915.05	907.11	899.17	891.22	883.28
0.7	948.34	940.40	932.46	924.52	916.58	908.64	900.69	892.75	884.81	876.87
0.8	941.93	933.99	926.05	918.11	910.16	902.22	894.28	886.34	878.40	870.45
0.9	935.52	927.58	919.63	911.69	903.75	895.81	887.87	879.92	871.98	864.04

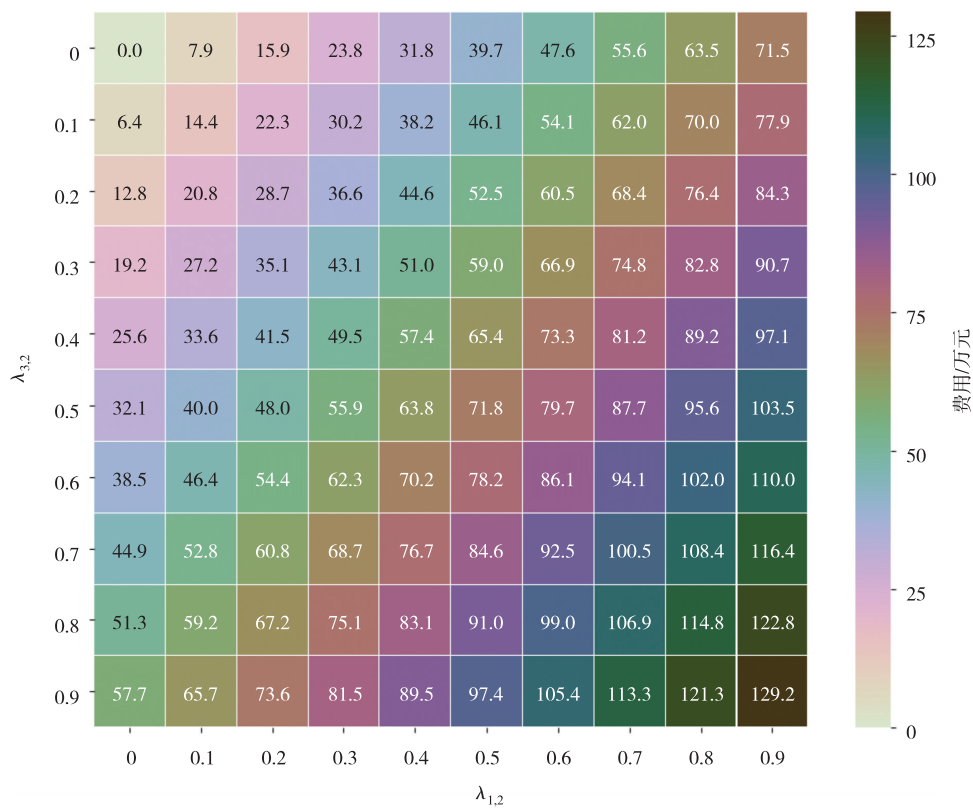


图 7 不同结构相关系数下节约的停机损失费

Fig. 7 Saving downtime cost under different values of $\lambda_{3,2}$ and $\lambda_{1,2}$

5 结论

本文主要研究了风电机组的机会维护策略,并将子系统间的随机相关性和结构相关性联合考虑在内。在已

有研究的基础上,用故障链构建随机相关系数矩阵来刻画子系统可靠度,用结构相关系数来描述停机损失费用,建立机会维护模型。通过算例分析可以看出,考虑随机相关性时,系统的维护费用有所增加;而联合考虑随机相关和结构相关后,可有效改善总维护费。因此,本文提出的方法对风电机组的维护策略可为风电机组的维护工作提供建议和指导,运维人员可根据有效的维护策略合理安排风电机组的维修计划。未来研究方向可以从研究对象和维护目标等方面延伸。本文以单台风电机组为研究对象,未来可将该机会维护策略模型应用至整个风电场,对多台机组的维修进行统筹规划。此外,本文以维修费用为目标函数建立的单目标模型,后续可拓展成从费用函数、可用度、风险度等多个方面建模分析。

参考文献:

- [1] 王达梦,马志勇,柳亦兵,等.风电机组的机会成组更换维修策略[J].机械科学与技术,2019,38(9):1470-1476.
WANG D M, MA Z Y, LIU Y B, et al. Opportunistic group replacement maintenance strategy for wind turbines[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9): 1470-1476.
- [2] 李想,朱才朝,李焱,等.基于延迟时间模型的风电机组维修策略[J].重庆大学学报,2020,43(10):20-28.
LI X, ZHU C C, LI Y, et al. Maintenance strategy of wind turbine based on the delay time model[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(10): 20-28.
- [3] 王颖,余芬.以可靠度为中心的通用飞机机会成组维修研究[J].机械工程与自动化,2019(5):47-49.
WANG Y, YU F. Reliability-centered general aircraft opportunity group maintenance research[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(5): 47-49.
- [4] 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 D Q, SUN Y, MIAO J, et al. Opportunity maintenance model of train bogie based on global optimization threshold[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(2): 462-469.
- [5] 张耀周,夏唐斌,陶辛阳,等.面向港口复杂装卸系统的动态机会维护策略[J].上海交通大学学报,2015,49(9):1319-1323.
ZHANG Y Z, XIA T B, TAO X Y et al. Dynamic opportunistic maintenance policy for complex quayside container crane systems [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(9): 1319-1323.
- [6] THOMAS L C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems[J]. Reliability Engineering, 1986, 16(4): 297-309.
- [7] 赵洪山,鄢盛腾,刘景青.基于机会维修模型的风电机组优化维修[J].电网与清洁能源,2012,28(7):1-5.
ZHAO H S, YAN S T, LIU J Q. Optimization maintenance of wind turbines based on opportunistic maintenance model[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(7): 1-5.
- [8] 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 Y, XU W X, LIU L J, 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.
- [9] 芮晓明,谢鲁冰,李帅,等.面向可及度的海上风电机组维修策略研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(5):92-99.
RUI X M, XIE L B, LI S, et al. Research on maintenance of offshore wind turbines from accessibility evaluation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 92-99.
- [10] WANG J J, ZHAO X, GUO X. Optimizing wind turbine's maintenance policies under performance-based contract [J]. Renewable Energy, 2019, 135(5): 626-634.
- [11] 王金贺,张晓红,曾建潮.非完美维修模型下的风电机组最优维修决策[J].计算机集成制造系统,2019,25(5):1151-1160.
WANG J H, ZHANG X H, ZENG J C. Optimal maintenance decision for wind turbines based on imperfect maintenance model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(5): 1151-1160.
- [12] 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 Y, YANG F, LIU L J, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbines considering component correlation [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4057-4063.
- [13] 赵洪山,张健平,高夺,等.风电机组的状态一机会维修策略[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3851-3858.
ZHAO H S, ZHANG J P, GAO D, et al. A condition based opportunistic maintenance strategy for wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3851-3858.
- [14] 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 H X, ZHANG R P, DONG H Y. Considering maintenance strategy of wind turbines with fault correlation[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(4): 477-483.
- [15] ZHOU X J, HUANG K M, XI L F, et al. Preventive maintenance modeling for multi-component systems with considering stochastic failures and disassembly sequence[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 231-237.
- [16] IUNG B, DO P, LEVRAT E, et al. Opportunistic maintenance based on multi-dependent components of manufacturing system [J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 401-404.
- [17] WU S M, CHEN Y, WU Q T, et al. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 146(10): 26-32.
- [18] MURTHY D N P, NGUYEN D G. Study of two-component system with failure interactions[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1985, 32(2): 239-247.
- [19] NAKAGAWA T, MURTHY D N P. Optimal replacement policies for a two-unit system with failure interactions[J]. Rairo Operations Research, 1993, 27(4): 427-438.
- [20] 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 X Y, SHEN G X, ZHANG Y Z, et al. Dependent coefficient model for complex system based on failure chains[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2): 442-447.
- [21] 韩思远. 考虑故障相关的双馈风电机组状态机会维修策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- HAN S Y. Research on condition based opportunistic maintenance strategy for double-fed wind turbine under failure interaction [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.

Operations Research and Cybernetics

Integrating Structural Dependence and Stochastic Dependence for Opportunistic Maintenance Strategy of Wind Turbines

CHENG Hui, LIU Qinming, YE Chunming, ZHANG Zhenyu

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: [Purposes] In view of the complex internal structure of the wind turbine systems, the coupling between subsystems, and the high maintenance cost, an opportunistic maintenance strategy for wind turbines under the influence of structural dependence and stochastic dependence is proposed. [Methods] Firstly, the Weibull distribution is used to describe the deterioration of the wind turbine subsystems, and the comprehensive failure rate and comprehensive reliability of the subsystems are expressed according to the stochastic dependence between the subsystems. Secondly, the maintenance preparation cost is calculated by economic dependence, the maintenance adjustment cost is calculated by the maintenance probability under different maintenance methods, and the downtime loss is calculated by the structural dependence. The model is established with the expected total maintenance cost as the objective function. [Findings] The analysis of an example shows: when stochastic dependence is considered, the preventive maintenance cycle of the subsystem becomes shorter and the maintenance cost of the system increases; when stochastic dependence and structural dependence are jointly considered, the apportionable downtime loss has increased, so the total maintenance cost has been reduced. [Conclusions] This opportunistic maintenance strategy is more in line with the actual operation of the wind turbines. While ensuring the high reliability of the wind turbine subsystems, the maintenance cost is also greatly reduced.

Keywords: wind turbines; opportunistic maintenance; structural dependence; stochastic dependence

(责任编辑 许 甲)