

doi: 10.11835/j.issn.1000.582X.2025.05.007

引用格式:李焱,余小辉,倪高翔,等.复杂环境载荷下海上风电机组综合性能评估[J].重庆大学学报,2025,48(5):76-90.



## 复杂环境载荷下海上风电机组综合性能评估

李焱<sup>1a,1b,2</sup>,余小辉<sup>1b</sup>,倪高翔<sup>1b</sup>,朱才朝<sup>2</sup>,杜雪松<sup>2</sup>,谭建军<sup>2</sup>

(1. 三峡大学 a. 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室;b. 机械与动力学院,湖北 宜昌 443002;  
2. 重庆大学 高端装备机械传动全国重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**综合考虑海上风电机组结构特征和内外激励,建立大型风电机组刚柔耦合多体动力学模型,提出一种基于解释结构模型和网络层次分析法的风电机组综合性能评估方法。建立风电机组综合性能评估架构,包含 5 个一级指标和 11 个二级指标;利用解释结构模型(interpretive structural model, ISM)分析指标间的内在联系,建立整机综合性能评估指标多层递阶结构模型;采用网络层次分析法(analytic network process, ANP)构建判断矩阵、超矩阵及极限超矩阵,求解获得整机综合性能评估指标权重,定量评估整机综合性能,比较分析 2 款机型的综合性能。结果表明:风电机组整机综合性能的主要影响因素为叶片长度、轴承时变可靠性、齿轮接触疲劳可靠性和单位兆瓦重量;5 MW 风电机组综合性能优于 6.2 MW 风电机组。

**关键词:**风电机组;综合性能;多维评估指标;解释结构模型;网络层次分析法

中图分类号:TH12

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)05-076-15

## Comprehensive performance evaluation of offshore wind turbines under complex environmental loads

LI Yao<sup>1a,1b,2</sup>, YU Xiaohui<sup>1b</sup>, NI Gaoxiang<sup>1b</sup>, ZHU Caichao<sup>2</sup>, DU Xuesong<sup>2</sup>, TAN Jianjun<sup>2</sup>

(1a. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance; 1b. College of Mechanical & Power, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Considering the structural characteristics and both internal and external excitations of offshore wind turbines, a rigid-flexible coupled multi-body dynamic model for large-scale turbines is established. A comprehensive performance evaluation method is proposed, integrating the interpretive structural modeling(ISM)

收稿日期:2024-01-26 网络出版日期:2024-11-19

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52405067);湖北省自然科学基金资助项目(2023AFB066);水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金(2021KJX10);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2021jscx-jbgsX0003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52405067), Hubei Provincial Natural Science Foundation of China(2023AFB066), the Opening Foundation of Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design and Maintenance(2021KJX10), and the Special Key Program for Technological Innovation and Application Development of Chongqing(cstc2021jscx-jbgsX0003).

**作者简介:**李焱(1989—),男,博士,主要从事机械系统动力学与可靠性研究,(E-mail)yao\_li\_@outlook.com。

**通信作者:**朱才朝,男,博士,博士生导师,教授,(E-mail)cczhu@cqu.edu.cn。

technique with the analytic network process(ANP). A multi-dimensional performance evaluation framework is built, including five primary indicators and eleven secondary indicators. The ISM method is employed to analyze the interrelationships among evaluation indicators and to develop a multi-level hierarchical structure for comprehensive assessment. The ANP is then used to construct judgment matrices, supermatrices, and limit supermatrices, through which the weights of evaluation indicators are determined. Based on these results, the comprehensive performance of offshore wind turbines is quantitatively evaluated, and a comparative analysis of two turbine models is conducted. The results show that the most influential factors affecting overall performance include blade length, time-varying reliability of bearings, gear contact fatigue reliability, and unit megawatt weight. Additionally, the 5 MW wind turbine demonstrates superior comprehensive performance compared with the 6.2 MW model.

**Keywords:** wind turbines; comprehensive performance; multidimensional evaluation indicators; interpretive structural model; analytic network process

风电机组是一种高耸、复杂的机电一体化装备,其运行环境恶劣、运维成本较高。针对复杂环境载荷下大型海上风电机组综合性能评估体系缺失,研究复杂环境载荷下整机综合性能评估方法,对海上风电装备健康管理至关重要。

近年来,学者们对风电机组性能进行了大量研究。Li等<sup>[1-2]</sup>建立了风电机组模糊可靠性评价方法,采用生存特征和故障分析树方法,评估了不同工况下风电机组传动系统时变可靠性。Pan等<sup>[3]</sup>提出了基于完全集成经验模态分解-核主成分分析和果蝇优化算法-极限学习机的风电齿轮箱性能退化评估方法。金晓航等<sup>[4]</sup>针对大型风电机组的日常监测与运维需求,提出了一种改进参数的劣化度计算模型的运行状态评估方法。王志国等<sup>[5]</sup>利用模糊数学理论,从经济技术、功能设置、可靠性与维修4个方面综合评判风电机组系统性能。Yuan等<sup>[6]</sup>考虑各部件强度退化,采用基于反向传播神经网络的改进蒙特卡罗方法,评估了系统的时变可靠性。Sun等<sup>[7]</sup>将每个序列SCADA变量的方差分析嵌入长短时记忆网络并与循环神经网络相结合,对风机的健康状态进行评估。陈岩松等<sup>[8]</sup>分析不同工况对行星级内部激励和均载特性的影响规律,重构齿轮修形参数与均载系数之间的映射关系,建立考虑不同工况影响的行星级均载系数优化模型,实现多工况下行星级齿轮修形参数优化设计。陈维兴等<sup>[9]</sup>依据风电机组结构参数和技术参数,按照效能建立评估体系;利用灰色理论和层次分析法对其效能进行综合评价。Kavade等<sup>[10]</sup>研究基于多流管模型和叶片单元理论的数值方法,研究叶片数、弦长、展弦长、风速等参数对风电机组性能的影响。李进友等<sup>[11]</sup>提出基于极端梯度提升的自动功率曲线极限算法,能够准确划分风电机组性能评估区域,并实现对风电机组健康性能的评估。伍源等<sup>[12]</sup>考虑长期风速概率分布特征,建立了大功率海上风电机组OPENFAST-SIMPACK联合仿真模型,计算对应的风电齿轮箱传动系统齿轮短期疲劳损伤,基于代理模型预测齿轮长期疲劳损伤。曾天生等<sup>[13]</sup>基于健康状态模型和信息融合,针对风电机组的数据采集与监控系统提出一种状态劣化指数加权计算性能指标的整机性能评估方法。Wang等<sup>[14]</sup>对比数值计算与模型实验,研究了不同工况下风电机组的动力学响应,并进行了时域和频域分析。Wen<sup>[15]</sup>基于蚁群优化算法和极限学习机网络,提出了一种创新的混合多变量发电机实际输出功率预测模型,并基于k均值聚类算法和马尔可夫链2种指标,提出了一种数据驱动的风电机组性能评估模型。董兴辉等<sup>[16]</sup>实现对机组不同风速、不同功率参数段局部评价和整个生产参数段整体综合评价,评估结果能为生产调度和维护维修决策提供依据,促进风电场科学、优化管理。Lee等<sup>[17]</sup>采用解释结构模型与模糊分析网络过程相结合方法对风电机组性能进行评估。

以上学者大多针对风电机组单一性能进行研究,如可靠性、经济性、功率特性等。在风电机组综合性能的定量评估方面研究相对匮乏。随着风力发电从固定式风电机组向深远海漂浮式风电机组方向发展,风电机组受到更大更复杂的气动、水动力、系泊锚链载荷等外部激励,对整机综合性能要求更加严苛,以往单一性能评估已无法满足工程要求。因此,研究大功率风电机组综合性能评估对指导风电机组健康管理和智能运

维意义重大。建立海上风电机组刚柔耦合多体动力学模型,考虑复杂环境载荷下风电机组 5 项主要性能指标,提出一种基于解释结构模型和网络层次分析法的风电机组综合性能评估方法。

1 风电机组整机多体动力学模型

1.1 风电机组坐标定义

文中整机多体动力学模型采用相对坐标系来定义物体的运动。如图 1 所示,轮毂、叶片、机舱、塔筒和基础平台的坐标系分别定义为: $O_HX_HY_HZ_H$ 、 $O_BX_BY_BZ_B$ 、 $O_NX_NY_NZ_N$ 、 $O_TX_TY_TZ_T$ 和 $O_PX_PY_PZ_P$ 。轮毂的相对坐标系( $O_HX_HY_HZ_H$ )位于轮毂中心;叶片的相对坐标系( $O_BX_BY_BZ_B$ )位于叶根;机舱的相对坐标系( $O_NX_NY_NZ_N$ )位于机舱中心;塔筒的相对坐标系( $O_TX_TY_TZ_T$ )位于塔筒底部截面中心;基础平台的相对坐标系( $O_PX_PY_PZ_P$ )位于平台重心。

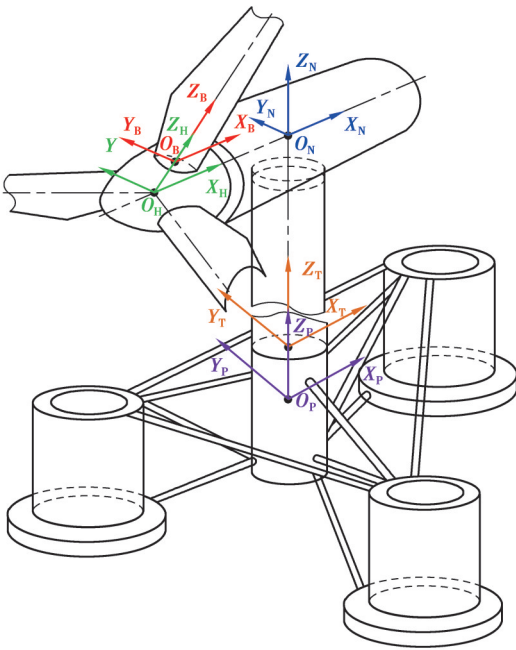


图 1 风电机组坐标系统  
Fig. 1 Coordinate systems of wind turbines

1.2 风电机组工作原理及主要参数

文中以 5 MW 和 6.2 MW 海上风电机组为研究对象,其主要参数如表 1 所示。海上风电机组结构主要包括叶片、轮毂、主轴、齿轮箱、联轴器、发电机、塔筒、基础平台、锚链等。叶片将风能转化为低转速、大扭矩的机械能传递给主轴,然后由主轴传递至齿轮箱,齿轮箱与发电机相连,依靠齿轮箱输出的高速、大扭矩载荷驱动发电机发电。

表 1 风电机组主要参数  
Table 1 Main parameters of two wind turbines

风电机组	额定功率/MW	风轮布置形式	风轮配置	控制	齿轮箱总传动比	轮毂高度/m	风轮扫掠直径/m	切入风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	额定风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	切出风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
6.2 MW 风电机组	6.2	上风向	三叶片	变速变桨调节	1:107	96	152	3.5	12.3	25
5 MW 风电机组	5.0	上风向	三叶片	变速变桨调节	1:96	90	126	3.0	11.4	25

### 1.3 风电机组空气动力学

风速频率表示在风电机组一定时间内,相同风速时长与测量总时长的百分比值,是反映风场平均风速统计特性的一个重要参数。根据某风场统计数据,采用双参数威布尔分布对风速频率进行拟合,其概率密度函数为

$$f(u) = \frac{k}{c} \left( \frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{u}{c} \right)^k \right], \quad (1)$$

对应的分布函数为

$$F(u) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{u}{c} \right)^k \right]. \quad (2)$$

式中: $u$ 为风速; $k$ 为形状参数, $k=8.426$ ; $c$ 为尺度参数, $c=1.708$ 。

考虑风切变效应,轮毂高度处的风速为

$$u_{\text{hub}} = u \left( \frac{z_{\text{hub}}}{z} \right)^{0.2}, \quad (3)$$

式中: $z_{\text{hub}}$ 为轮毂处高度; $u_{\text{hub}}$ 为轮毂处风速; $z$ 为欲求的风速离地面高度。

根据 IEC61400-1,采用 Kaimal 模型计算湍流风,湍流风在空间 3 个分量的谱为

$$S_k(f) = \frac{4\sigma_k^2 L_k}{u_{\text{hub}}} \cdot \left( 1 + \frac{6fL_k}{u_{\text{hub}}} \right)^{-\frac{5}{3}}, \quad (4)$$

式中: $k=u, v, w$ 为风的 3 个方向; $S_k$ 为功率谱; $\sigma_k$ 为标准偏差; $L_k$ 为积分尺度参数; $\bar{u}_{\text{hub}}$ 为轮毂处平均风速; $f$ 为频率。

根据 IEC 61400-1 标准得:

$$L_k = \begin{cases} 8.10\Lambda_u, & k=u; \\ 2.70\Lambda_u, & k=v; \\ 0.66\Lambda_u, & k=w. \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Lambda_u$ 为湍流尺度系数。

空间中任意 2 点处风速相关模型表示为

$$S_{i,j}(f) = P_{\text{coh}}(f) \sqrt{S_{i,i}(f) \cdot S_{j,j}(f)}, \quad (6)$$

式中: $P_{\text{coh}}(f)$ 为空间相干度; $S_{i,i}(f)$ 和  $S_{j,j}(f)$ 为  $i$ 和  $j$ 处的自功率谱; $S_{i,j}(f)$ 为空间  $i$ 和  $j$ 处互功率谱; $f$ 为频率。

### 1.4 风电机组水动力学

水动力学载荷是海上风电机组受到的重要载荷之一。在海上风电机组的研究中,简化为绕射力、水静力和辐射力。

绕射力为波浪作用于浮式平台的激振力,规则波和不规则波分别采用 Airy 波理论和叠加原理进行求解,为

$$F_i^D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \sqrt{2\pi S_{\zeta}^{2S}(\omega)} X_i(\omega, \beta) e^{j\omega t} d\omega, \quad (7)$$

式中: $F_i^D$ 为绕射力; $\omega$ 为频率; $S_{\zeta}^{2S}$ 为双边 JONSWAP 谱; $X_i(\omega, \beta)$ 为单位波浪力; $\beta$ 为波浪入射力; $i$ 为波浪入射方向; $j$ 为复数  $\sqrt{-1}$ 。

水静力为浮式平台在静水中所受浮力为

$$F_i^H = \rho_w g V_0 \delta_{i3} - C_{ij}^H q_j, \quad (8)$$

式中: $F_i^H$ 为水静力; $\rho_w$ 为水密度; $g$ 为重力加速度; $V_0$ 为排水体积; $\delta_{i3}$ 为克罗内克函数; $C_{ij}^H$ 为刚度矩阵; $q_j$ 为在  $j$ 方向上平台坐标。

辐射力为在不考虑入射波的情况下,浮式平台在自由面上震荡时向周围辐射出的波浪对平台产生的作用力,为

$$F_i^R = - \int_0^t \mathbf{K}_{ij}(t-\tau) \dot{q}_j(\tau) d\tau, \quad (9)$$

式中:  $F_i^R$  为辐射力;  $\mathbf{K}_{ij}(t-\tau)$  为波浪辐射延迟矩阵;  $\dot{q}_j(\tau)$  为  $q_j$  在时间  $\tau$  的导数。

浮式平台在水中受到的水动力之和为

$$F_i^{Hy} = F_i^D + F_i^H + F_i^R. \quad (10)$$

### 1.5 风电机组结构动力学

将塔筒视为质量和刚度连续分布的柔性悬臂梁,通过  $N$  个线性函数的叠加表示塔架随时间的位移,为

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^N C_j(t) \varphi_j(x), \quad (11)$$

式中:  $u(x, t)$  为  $t$  时刻的位移;  $x$  为塔架与塔基间的距离;  $C_j(t)$  为广义坐标系;  $\varphi_j(x)$  为形状函数。

通过拉格朗日法建立风电机组塔架系统振动方程,为

$$\sum_{j=1}^4 m_{ij} \ddot{c}_j(t) + \sum_{j=1}^4 k_{ij} \dot{c}_j(t) = 0, \quad (12)$$

式中:  $m_{ij}$  为广义质量;  $\ddot{c}_j(t)$  为广义加速度;  $k_{ij}$  为广义刚度;  $\dot{c}_j(t)$  为广义速度。

利用 Thomson-Dahleh 理论得到势能和动能:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 m_{ij} \dot{c}_i \dot{c}_j, \quad (13)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 k_{ij} c_i c_j. \quad (14)$$

结合式(12)可得

$$m_{ij} = m_{top} + \int_0^H \rho(x) \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx, \quad (15)$$

$$k_{ij} = \int_0^H E(x) \cdot I(x) \ddot{\varphi}_i(x) \ddot{\varphi}_j(x) dx - g \int_0^H \left[ m_{top} + \int_x^H \rho(x) dx \right] \dot{\varphi}_i(x) \dot{\varphi}_j(x) dx. \quad (16)$$

式中:  $m_{top}$  为塔顶组件质量;  $H$  为塔架高度;  $\rho(x)$  为  $x$  高度处塔架密度;  $\varphi_i(x)$  为  $i$  自由度的形状函数;  $\varphi_j(x)$  为  $j$  自由度的形状函数;  $E(x)$  为  $x$  高度处弹性模量;  $I(x)$  为  $x$  高度处惯性矩。

系统模态通过形态函数叠加来表示,为

$$\Phi_i(x) = \sum_{j=1}^4 c_{ij} \varphi_j(x), i = 1, 2, \dots, N, \quad (17)$$

式中:  $\Phi_i(x)$  为  $i$  阶模态;  $c_{ij}$  为广义坐标;  $\varphi_j(x)$  为形状函数。

考虑模态,系统位移可表示为

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^N q_i(t) \Phi_i(x), \quad (18)$$

式中:  $q_i(t)$  为  $i$  阶模态对应的广义坐标。

形态函数对应的广义坐标为

$$c_j(t) = q_i(t) C_{ij}, j = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

整理成矩阵形式为

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) \mathbf{C} = 0, \quad (20)$$

式中:  $\omega$  为固有频率;  $\mathbf{M}$  为广义质量矩阵;  $\mathbf{K}$  为广义刚度矩阵;  $\mathbf{C}$  为系数向量。

海上风电机组在多种载荷共同作用下的运动方程为

$$(\mathbf{M} + \mathbf{m}) \mathbf{a} + \mathbf{Q} \mathbf{v} + \mathbf{K} \mathbf{x} + \int_0^t f(t-\tau) \mathbf{v} d\tau = \mathbf{F}(t), \quad (21)$$

式中:  $\mathbf{m}$  为附加质量矩阵;  $\mathbf{a}$  为系统加速度;  $\mathbf{Q}$  为阻尼系数矩阵;  $\mathbf{v}$  为系统运动速度;  $\mathbf{x}$  为系统运动位移;  $\tau$  为时间;  $f(t-\tau)$  为系统延迟函数;  $\mathbf{F}(t)$  为系统载荷。

### 1.6 海上风电机组多体动力学建模

建立海上风电机组整机多体动力学模型,其联合仿真流程如图2所示。风载荷模型采用 Kaimal 谱输入



到空气动力学模型;空气动力学模型基于广义动态尾流和动态失速的叶素-动量理论计算得到的空气动力载荷传递到结构模型中;波浪载荷模型采用 JONSWAP 谱输入到水动力学模型中;水动力模型模拟入射波,并利用势流理论和莫里森方程相结合的方法求解海上风电机组的流体绕射力、水静力和辐射力得到的水动力学载荷传递到结构模型中;控制模型采用变速变桨距控制方法调节风轮转速和桨距角,保证风电机组按照既定的控制策略正常运行;系泊模型利用集中质量法计算系泊锚链的作用力;最后结构模型调用各个模型的载荷,将得到的参数反馈到海上风电机组的塔筒、浮式平台和系泊锚链,进而反向影响气动载荷、水动力载荷和系泊锚链载荷,从而实现了海上风电机组的耦合。

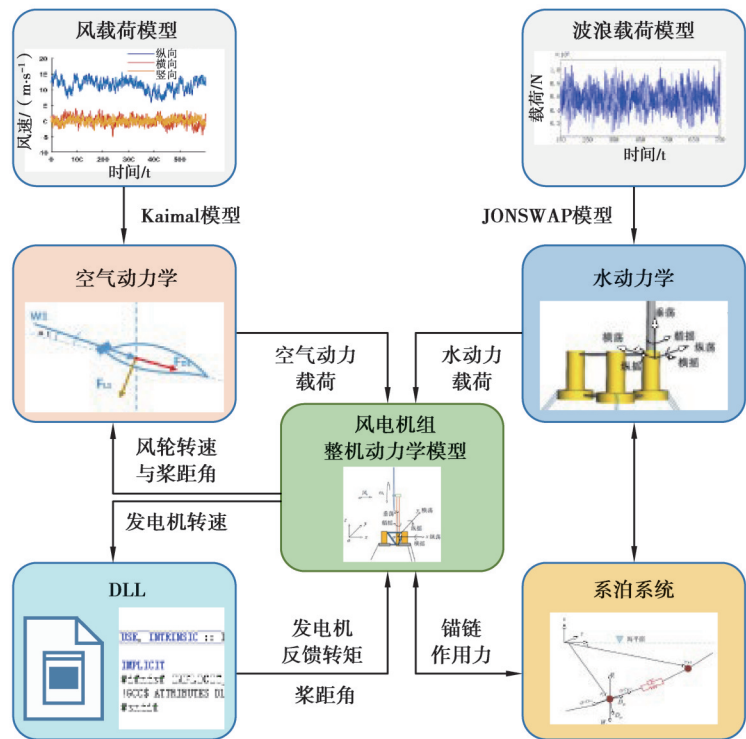


图 2 风电机组系统动力学仿真流程图  
Fig. 2 Simulation flow chart of wind turbine system

2 风电机组综合性能评估 ISM 模型

解释结构模型通过将关系复杂的系统构建成多层递阶结构模型,简化了系统,找到关键影响因素。多层递阶结构模型可清晰反映各个影响因素之间的交互关系,揭示决定综合性能高低的深层因素。文中结合风电机组的实用性与经济性,建立了包含 5 个一级指标和 11 个二级指标的风电机组综合性能评估体系,分析了各个指标之间的内在联系,构建了风电机组综合性能评估指标 ISM 模型,并绘制了各评估指标间的多层递阶结构模型。

2.1 风电机组综合性能评估体系

针对风电机组综合性能评估指标与评估方法缺失,文中基于风电机组的实用性与经济性,提出整机综合性能评估指标,其中包括 5 个一级指标和 11 个二级指标,建立如表 2 所示的评估体系。

表 2 风电机组综合性能评估体系

Table 2 Comprehensive performance evaluation system for wind turbines		
目标层	因素层	子因素层
整机综合性能 $U$	叶尖偏移系数 $D_1$	叶尖偏移距离 $D_{11}$
		叶片长度 $D_{12}$

续表2

目标层	因素层	子因素层
可靠性 $D_2$		轴承时变可靠性 $D_{21}$
		齿轮弯曲疲劳可靠性 $D_{22}$
		齿轮接触疲劳可靠性 $D_{23}$
均载系数 $D_3$		低速级均载系数 $D_{31}$
		中间级均载系数 $D_{32}$
机舱振动 $D_4$		沿 $x$ 方向机舱振动 $D_{41}$
		沿 $y$ 方向机舱振动 $D_{42}$
		沿 $z$ 方向机舱振动 $D_{43}$
功率 $D_5$		单位兆瓦重量 $D_{51}$

### 2.1.1 叶尖偏移系数

叶片受到环境载荷作用发生弹性变形,使得叶片叶尖处发生偏移。叶尖处相较于原位置的偏移距离与叶片长度之比称为叶尖偏移系数,为

$$D_1 = D_{11}/D_{12}, \quad (22)$$

式中: $D_1$ 为叶尖偏移系数; $D_{11}$ 为叶尖偏移距离; $D_{12}$ 为叶片长度。

### 2.1.2 可靠性

轴承为标准化的机械零件,其寿命一般服从三参数威布尔分布。根据寿命分布函数,轴承可靠性函数可推导为

$$D_{21}(t) = \exp\left[\left(\frac{t-\gamma}{L_h-\gamma}\right)^\beta \times \ln 0.9\right], \quad (23)$$

式中: $L_h$ 为基本额定寿命; $\gamma$ 、 $\beta$ 为位置参数和形状参数。

文中采用模糊语言来描述和评价零部件性能退化的不确定性和运行状态。考虑零部件强度退化,则零部件模糊可靠性函数<sup>[2]</sup>为

$$D_{2i}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu_i(\bar{\sigma}_i, t) g_i(t) d\sigma_i = \frac{1}{0.1r_i(t)} [1.1r_i(t) - \bar{\sigma}_i] \Phi\left(\frac{1.1r_i(t) - \bar{\sigma}_i}{S_i}\right) - \frac{1}{0.1r_i(t)} [r_i(t) - \bar{\sigma}_i] \Phi\left(\frac{r_i(t) - \bar{\sigma}_i}{S_i}\right) + \frac{S_i}{0.1\sqrt{2\pi}r_i(t)} \left[ \exp\left(-\frac{(1.1r_i(t) - \bar{\sigma}_i)^2}{2S_i^2}\right) - \exp\left(-\frac{(r_i(t) - \bar{\sigma}_i)^2}{2S_i^2}\right) \right], \quad (24)$$

式中: $S_i$ 为许用应力的标准差, $S_i = \bar{\sigma}_i C_i$ ;  $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $\bar{\sigma}_i$ 为平均应力; $r_i(t)$ 为剩余强度。

### 2.1.3 均载系数

行星传动系统的均载是指在功率分流过程中,各齿轮副间的啮合力大小相同,行星轮受到的载荷相等,然而在实际工作过程中,由于多种内外部因素,系统会出现载荷分配不均现象。均载系数越接近1,其载荷分配越均匀,系统承载能力越强。为量化风电机组行星齿轮传动系统均载特性,均载系数可描述为

$$D_{3i} = \left( \frac{N \times F_{RP-\max}}{\sum_i^n F_{RPi-\max}} + \frac{N \times F_{SP-\max}}{\sum_i^n F_{SPi-\max}} \right) / 2, \quad (25)$$

式中: $F_{RPi-\max}$ 和 $F_{SPi-\max}$ 分别为单个内齿圈行星轮、太阳轮行星轮传动最大动态啮合力; $F_{RP-\max}$ 和 $F_{SP-\max}$ 分别为每级内齿圈行星轮、太阳轮行星轮传动最大动态啮合力。

### 2.1.4 机舱振动

机舱在海上风电机组工作过程中,在风浪流等环境载荷与基础平台联合作用下,其振动特性较为复杂。而机舱的振动特性能较为直观地体现其整机的动力学特征,故取机舱振动特性为风电机组综合性能评估指

标,采用均方根值表示振动特性的大小。

### 2.1.5 功率

单位兆瓦重量用于衡量风电机组发电能力,较大的单位兆瓦重量意味着风电机组在相同重量下具有更大的发电能力,为

$$D_{51} = P/M,$$

式中: $P$ 为发电机功率; $M$ 为风电机组重量。

## 2.2 构建邻接矩阵

通过专家打分及访谈咨询等方式,对11个二级指标中任意2个指标间的影响关系进行确认。若 $D_i$ 对 $D_j$ 有直接影响,在矩阵相应位置记为1;若 $D_i$ 对 $D_j$ 无直接影响,则在矩阵相应位置记为0,表示方式如下,建立邻接矩阵 $A$ 。

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & D_i \text{对} D_j \text{有直接影响;} \\ 0, & D_i \text{对} D_j \text{无直接影响。} \end{cases} \quad (26)$$

可求得:

$$A = \begin{bmatrix} & D_{11} & D_{12} & D_{21} & \cdots & D_{42} & D_{43} & D_{51} \\ D_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \\ D_{12} & 1 & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \\ D_{21} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{42} & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ D_{43} & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ D_{51} & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

## 2.3 计算可达矩阵

可达矩阵是以矩阵的方式来表现任意2个指标相互的传递关系,即二者之间的影响关系,由邻接矩阵迭代生成。当矩阵中数字为1时,说明指标之间存在可达路径,当数字为0时,说明指标间没有关联。通过布尔代数运算法则,若邻接矩阵 $A$ 满足如下条件,得到可达矩阵 $B$ ,为

$$(A+I) \neq (A+I)^2 \neq \cdots \neq (A+I)^k = (A+I)^{k+1} = B, \quad (28)$$

式中: $I$ 为单位矩阵; $k$ 为运算次数。

对邻接矩阵 $A$ 进行迭代得,当 $k=3$ 时, $(A+I)^3=(A+I)^4$ ,可达矩阵 $B$ 表示为

$$B = (A+I)^3 = (A+I)^4 = \begin{bmatrix} & D_{11} & D_{12} & D_{21} & \cdots & D_{42} & D_{43} & D_{51} \\ D_{11} & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \\ D_{12} & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \\ D_{21} & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{42} & 0 & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ D_{43} & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ D_{51} & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

## 2.4 建立ISM递阶结构模型

将可达矩阵 $B$ 的矩阵要素分为可达集、先行集和共同集: $D_i$ 所能达到的所有指标构成集合,称为可达集 $R(D_i)$ ;所有能够达到 $D_i$ 的指标构成集合,称为先行集 $A(D_i)$ ;所有既能达到 $D_i$ 又能被 $D_i$ 所达到的指标,组成共同集 $C(D_i)$ 。依据可达矩阵 $B$ 各指标间的相互影响关系,依照由上而下的顺序,利用可达集等于共同集的条件进行划分。划分时先抽取最顶层指标,通过层层抽离,得到风电机组综合性能评估指标层级,根据指标层级表、可达矩阵和邻接矩阵,提取骨架矩阵得

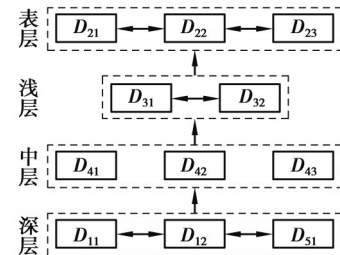


图3 风电机组综合性能评估指标的ISM模型  
Fig. 3 ISM model for comprehensive performance evaluation indicators of wind turbines



到风电机组综合性能评估指标的 ISM 模型,如图 3 所示。

### 3 风电机组综合性能评估 ANP 模型

网络层次分析法是一种通过建立具有网络结构组合分析模型,反映和量化各因素之间复杂关系的一种决策方法。ISM 模型虽然可以反映影响因素的多重反馈关系,但无法比较各影响因素影响力的大小。ANP 模型能较好地依据 ISM 模型中各影响因素间的关系,获得各影响因素的相应权重。使用 ANP 对 ISM 模型进一步优化,其具体流程如下:基于 ISM 模型,构建判断矩阵并进行一致性检验、求解超矩阵及极限超矩阵,最终得到影响风电机组综合性能指标权重并计算出其综合性能值。

#### 3.1 构建判断矩阵

以表 2 中的目标层为 ANP 的控制层,因素层与子因素层为网络层,构建 ANP 评估指标网络模型,如图 4 所示。设 ANP 的控制层元素为  $P_1, P_2, \dots, P_m$ , 网络层一级指标为  $D_1, D_2, \dots, D_5$ , 其中  $D_i$  又包含二级指标  $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}$ 。

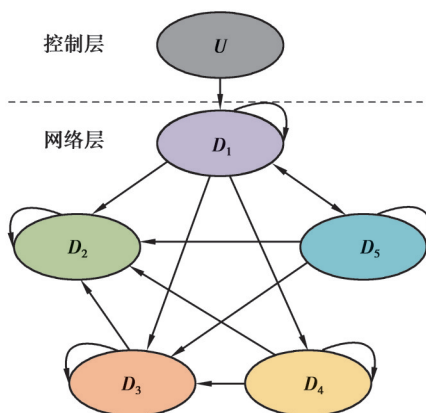


图 4 风电机组综合性能的 ANP 模型

Fig. 4 ANP model for the comprehensive performance of wind turbines

以控制层元素  $P_s$  ( $s=1, 2, \dots, m$ ) 为准则,以  $D_j$  ( $j=1, 2, \dots, 4$ ) 中的元素  $D_{jk}$  ( $k=1, 2, \dots, n_j$ ) 为次准则,将  $D_i$  中元素按其对  $D_{jk}$  的影响进行比较,采用九级标度法构建相应的判断矩阵  $L$ ,其中九级标度法的评分标度如表 3 所示。

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n_1} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_1,1} & l_{n_1,2} & \cdots & l_{n_1,n_1} \end{bmatrix} \quad (30)$$

表 3 指标重要性判断标度

Table 3 Scale for judging the importance of indicators

标度值	标度含义
1	$i$ 元素与 $j$ 元素同等重要
3	$i$ 元素比 $j$ 元素稍微重要
5	$i$ 元素比 $j$ 元素重要
7	$i$ 元素比 $j$ 元素很重要
9	$i$ 元素比 $j$ 元素特别重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中间值
倒数	$i$ 元素与 $j$ 元素相比重要度的倒数即为 $j$ 元素与 $i$ 元素的相比重要度

### 3.2 判断矩阵一致性检验

由于判断矩阵的构建具有主观性,故需要对判断矩阵的一致性进行检验。需要计算判断矩阵的一致性比率  $C_R$ ,为

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} = \frac{\lambda_{\max} - n}{R_I(n-1)}, \quad (31)$$

式中: $C_I$ 为一致性指标; $R_I$ 为随机一致性指标,取值如表4所示; $n$ 为判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。当 $n$ 为0、1时, $C_I=0$ ,此时判断矩阵具有完全一致性;当 $n \geq 2$ 时,若  $C_R < 0.1$ ,判断矩阵通过一致性检验,否则需要调整判断矩阵。

表4 平均随机一致性指标  $R_I$

Table 4 Average random consistency indicator  $R_I$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_I$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.46	1.49

### 3.3 求解超矩阵

令  $C_{ij} = \lg l_{ij}$ , 计算矩阵  $L$  的拟优一致矩阵  $M$ , 再采用特征根法计算矩阵  $M$  的排序向量, 将所有的排序向量作为矩阵的列向量, 即可得到局部超矩阵  $W_{ij}^S$ , 对于  $i=1, 2, \dots, 4$  和  $j=1, 2, \dots, 4$ , 重复上述步骤, 得到控制层元素  $P_s$  的超矩阵

$$W^S = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1i} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{j1} & W_{j2} & \cdots & W_{ij} \end{bmatrix} \circ \quad (32)$$

### 3.4 求解加权超矩阵

对  $W^S$  进行归一化处理, 得到加权超矩阵  $\overline{W}^S = (\overline{W}_{ij}^S)$ ,

$$\overline{W}_{ij}^S = M \cdot W_{ij}^S, \quad (33)$$

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \circ \quad (34)$$

式中: $M$ 为权重矩阵; $a_{ij}$ 为权重因子。

### 3.5 计算极限超矩阵与性能评估值

计算每个超矩阵的极限相对排序向量:

$$(W^S)^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{k=1}^N (\overline{W}^S)^k. \quad (35)$$

若上述极限收敛且唯一, 则  $(W^S)^\infty$  对应行的值即为求得的指标权重, 记为  $Z_{ij}$ 。

计算性能评估值方法为

$$x = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} Z_{ij}, \quad (36)$$

式中: $X_{ij}$ 为采用问卷调查的方式, 由专家打分得到获得的二级指标值; $Z_{ij}$ 为二级指标权重向量, 根据各二级指标间单向或双向的影响关系, 由3.1~3.5节计算得到。

## 4 风电机组综合性能定量评估

### 4.1 获取风电机组性能指标数据

根据1.6节构建的多体动力学模型与2.1节风电机组综合性能评估体系, 湍流风况为A级Kaimal谱, 采用不规则波浪JONSWAP波浪模型, 得到复杂环境载荷下的一、二级指标数据, 以叶尖偏移系数、轴承与齿轮

的时变可靠度和低速、中间级均载系数为例,如图5~图7所示。

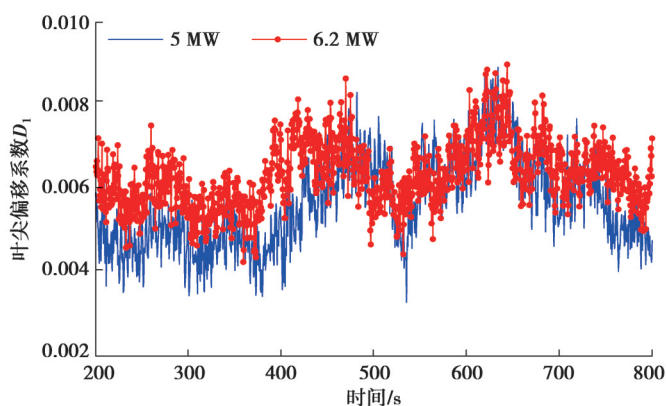


图5 复杂环境载荷下叶尖偏移系数

Fig. 5 Blade tip offset coefficients under complex environmental loads

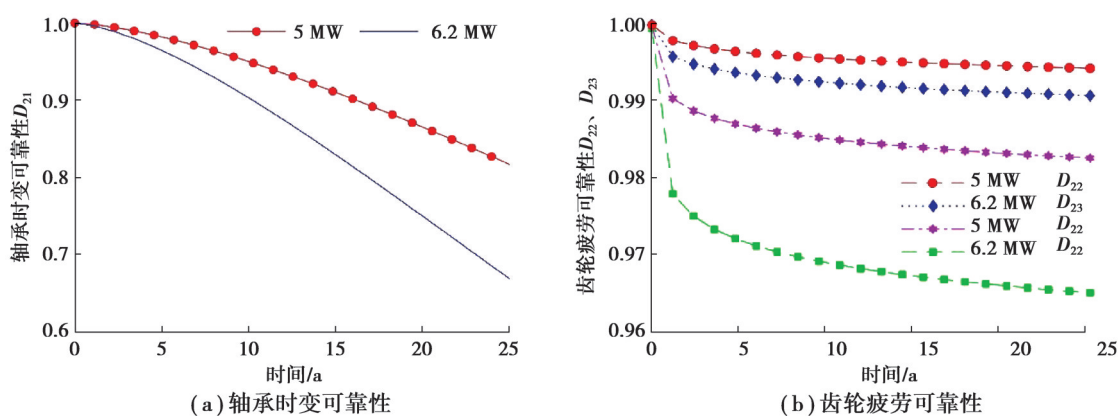


图6 复杂环境载荷下可靠性

Fig. 6 Gear reliability under complex environmental loads

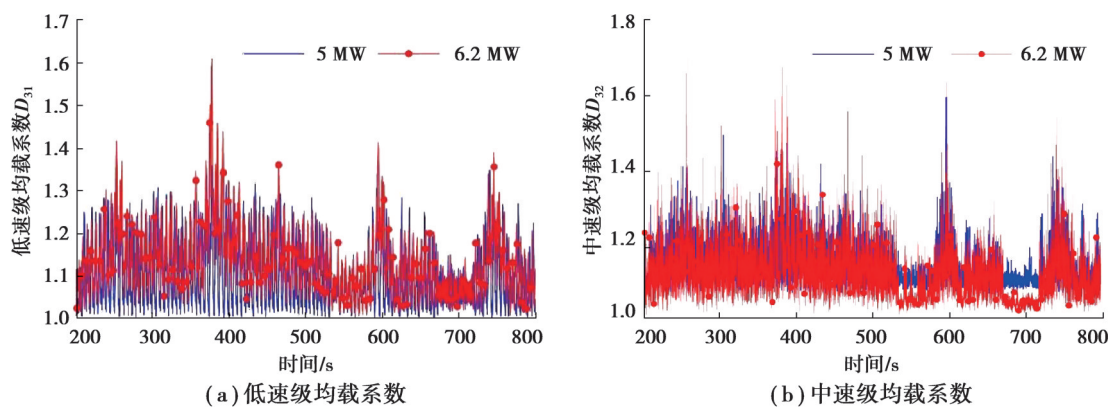


图7 复杂环境载荷下载载系数

Fig. 7 Load-sharing coefficient under complex environmental loads

#### 4.2 基于ISM-ANP的风电机组综合性能评估

根据性能优劣等级,确定评价标准,建立评语集,如表5所示。

通过2.1节分析建立的评估体系,一级指标之间视为相互独立,仅受二级指标的影响,二级指标彼此之间存在单向或双向的影响。

表 5 评判隶属等级  
Table 5 Evaluation of membership level

性能等级	低劣	缺陷	一般	良好	优秀
评价标准	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100

基于风电机组综合性能评估的 ANP 模型,采用专家打分,确定各级指标的相应权重:依照一级指标视为相互独立,依据九级标度法对其进行评分,得到控制层一级指标的判断矩阵,如表 6 所示。

表 6 控制层一级指标的判断矩阵与权重向量  
Table 6 Judgment matrix and weight vector of the first level indicators in the control layer

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$W$
$D_1$	1	1/3	1	1	1/3	0.106
$D_2$	3	1	5	3	1	0.355
$D_3$	1	1/5	1	2	1/3	0.114
$D_4$	1	1/3	1/2	1	1/4	0.090
$D_5$	3	1	3	4	1	0.335

由式(31)可得: $\lambda_{\max}=5.11, C_1=0.025, R_1=1.12, C_R=0.028<0.1$ ,判断矩阵通过一致性检验。

网络层的指标权重是在一级指标下的重要程度下进行确定的,需要考虑一级指标下的网络层元素间的相互影响关系。按照 2.1~2.4 节构建的邻接矩阵、可达矩阵和 ISM 模型得到二级指标间的相互影响关系,如图 8 所示。采用与控制层一级指标相同的权重计算方法,构建网络层二级指标的判断矩阵,并对其进行一致性检验。以可靠性为例,可靠性的判断矩阵与权重向量如表 7 所示。

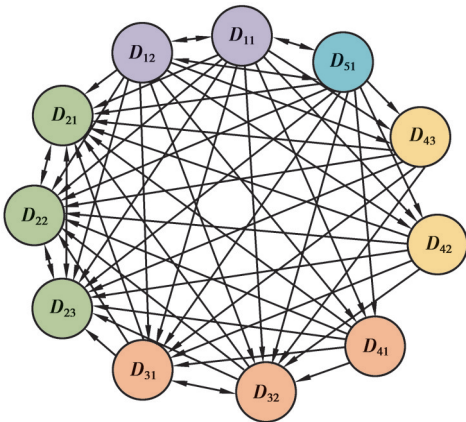


图 8 二级指标关系图  
Fig. 8 Secondary indicator relationship

表 7 可靠性的判断矩阵与权重向量  
Table 7 Judgment matrix and weight vector of reliability

	$D_{21}$	$D_{22}$	$D_{23}$	$W$
$D_{21}$	1	2	1	0.411
$D_{22}$	1/2	1	1	0.261
$D_{23}$	1	1	1	0.328

由式(32)可得: $\lambda_{\max}=3.05, C_I=0.046, R_I=0.58, C_R=0.046<0.1$ ,判断矩阵通过一致性检验。

依次构建其余网络层二级指标的判断矩阵并进行一致性检验,接着求解超举证、加权超矩阵和极限超矩阵,得到二级指标的相对权重: $W=(0.081, 0.152, 0.130, 0.085, 0.103, 0.090, 0.090, 0.047, 0.042, 0.045, 0.134)$ ,最终得到风电机组综合性能评估权重,如表8所示。

表 8 风电机组综合性能评估权重

Table 8 Weights for comprehensive performance evaluation of wind turbines

一级指标	指标权重	二级权重	局部权重	全局权重
$D_1$	0.106	$D_{11}$	0.167	0.081
		$D_{12}$	0.833	0.152
$D_2$	0.355	$D_{21}$	0.411	0.130
		$D_{22}$	0.261	0.085
		$D_{23}$	0.328	0.103
$D_3$	0.114	$D_{31}$	0.500	0.090
		$D_{32}$	0.500	0.090
$D_4$	0.090	$D_{41}$	0.633	0.047
		$D_{42}$	0.106	0.042
		$D_{43}$	0.260	0.045
$D_5$	0.335	$D_{51}$	1.000	0.134

为验证所提评估方法的有效性,选取1.6节构建的5 MW与6.2 MW风电机组整机模型为研究对象,得到2款风电机组综合性能评估结果,如表9和图9所示。

表 9 复杂环境载荷下风电机组的综合性能

Table 9 Comprehensive performance of wind turbines under complex environmental loads

一级指标	5 MW 风电机组	6.2 MW 风电机组	二级指标	5 MW 风电机组	6.2 MW 风电机组
$D_1$	18.657	19.083	$D_{11}$	6.818	6.491
			$D_{12}$	11.839	12.592
$D_2$	25.275	22.167	$D_{21}$	9.672	8.383
			$D_{22}$	6.761	6.013
			$D_{23}$	8.843	7.771
$D_3$	14.958	12.803	$D_{31}$	7.241	6.188
			$D_{32}$	7.716	6.616
$D_4$	10.137	9.067	$D_{41}$	3.288	2.841
			$D_{42}$	3.170	2.904
			$D_{43}$	3.679	3.323
$D_5$	10.903	11.682	$D_{51}$	10.903	11.682
$U$	79.930	74.802	$U$	79.930	74.802

由图9可知,5 MW风电机组在可靠性、均载性能和机舱振动等方面优于6.2 MW风电机组,但在叶尖偏移系数和功率上低于6.2 MW风电机组。由表5和表9可知,2款风电机组性能等级均为良好,并且5 MW风电机组综合性能优于6.2 MW风电机组。



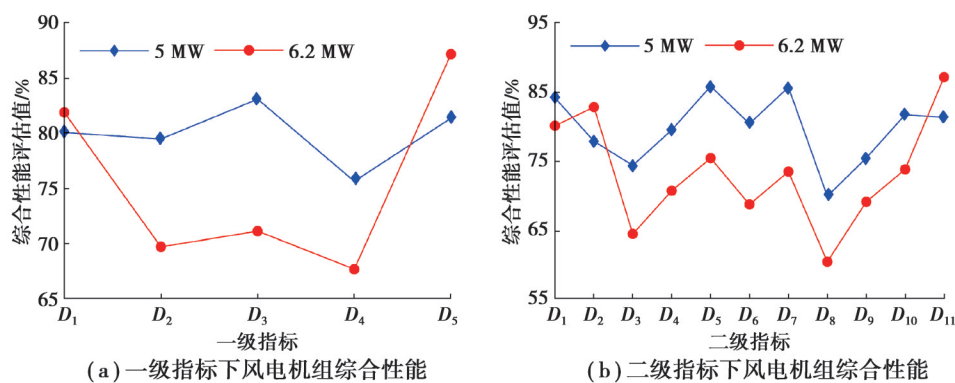


图 9 复杂环境载荷下风电机组的综合性能

Fig. 9 Comprehensive performance of wind turbines under complex environmental loads

## 5 结 论

针对海上风电机组综合性能评估指标与评估方法缺失,提出了一种基于解释结构模型和网络层次分析法的风电机组综合性能评估方法,主要结论如下:

1)风电机组综合性能评估的一级指标相对重要程度由大到小分别为:可靠性、功率、均载性能、叶尖偏移系数和机舱振动。其中,可靠性和功率的权重均在 30% 以上,表明风电机组综合性能的重点在于可靠性与功率。

2)采用 ISM-ANP 方法综合考虑了各指标间的相互影响关系,确定了叶片长度、轴承时变可靠性、齿轮接触疲劳可靠度与单位兆瓦重量 4 个风电机组综合性能评估关键指标。对该类关键指标进行优化,能够显著提升风电机组的综合性能。

3)5 MW 风电机组在可靠性、均载性能和机舱振动方面优于 6.2 MW 风电机组,但在叶尖偏移系数与功率上低于 6.2 MW 风电机组。2 款风电机组性能等级均为良好,并且 5 MW 风电机组综合性能优于 6.2 MW 风电机组。

## 参考文献

- [1] Li Y, Coolen F P A, Zhu C C. A practical reliability design method considering the compound weight and load-sharing[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2020, 127: 17-32.
- [2] Li Y, Zhu C C, Chen X, et al. Fatigue reliability analysis of wind turbine drivetrain considering strength degradation and load sharing using survival signature and FTA[J]. Energies, 2020, 13(8): 2108.
- [3] Pan Y B, Hong R J, Chen J, et al. Performance degradation assessment of a wind turbine gearbox based on multi-sensor data fusion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 509-526.
- [4] 金晓航, 秦治伟, 郭远晶, 等. 基于改进劣化度模型的风电机组日常运行状态评估[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 239-246.  
Jin X H, Qin Z W, Guo Y J, et al. Evaluation of wind turbines daily operation conditions based on improved degradation model [J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 239-246.(in Chinese)
- [5] 王志国, 马一太, 杨昭, 等. 风力发电机组性能分析的模糊综合评判方法[J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 177-181.  
Wang Z G, Ma Y T, Yang Z, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wind power generation unit[J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2004, 25(2): 177-181.(in Chinese)
- [6] Yuan R, Chen R T, Li H Q, et al. Dynamic reliability evaluation and life prediction of transmission system of multi-performance degraded wind turbine[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2023, 135(3): 2331-2347.
- [7] Sun Z X, Sun H X. Health status assessment for wind turbine with recurrent neural networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 6972481.
- [8] 陈岩松, 朱才朝, 谭建军, 等. 多工况下兆瓦级海上风电齿轮箱均载性能优化设计[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(9): 1-14.  
Chen Y S, Zhu C C, Tan J J, et al. Optimal design of load sharing performance of megawatt level offshore wind turbine

- gearbox under multi-operating conditions[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(9): 1-14. (in Chinese)
- [9] 陈维兴, 崔朝臣. 基于复合灰色的风力发电机组效能评估方法[J]. 机床与液压, 2020, 48(6): 162-168.  
Chen W X, Cui C C. A method for effectiveness evaluation of wind turbine based on composite gray[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(6): 162-168. (in Chinese)
- [10] Kavade R K, Ghanegaonkar P M. Performance evaluation of small-scale vertical axis wind turbine by optimized best position blade pitching at different tip speed ratios[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, 2019, 100(6): 1005-1014.
- [11] 李进友, 李媛, 王海鑫, 等. 基于 XGBoost-Bin 自动功率极限计算的风电机组健康性能评估及预测[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6): 2172-2185.  
Li J Y, Li Y, Wang H X, et al. Health performance evaluation and prediction methods for wind turbines based on XGBoost-Bin automatic power limit calculation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(6): 2172-2185. (in Chinese)
- [12] 伍源, 朱才朝, 谭建军, 等. 环境参数对风电齿轮箱传动系统疲劳损伤的影响[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(3): 132-144.  
Wu Y, Zhu C C, Tan J J, et al. Effects of environmental parameters on fatigue damage of wind turbine gearbox transmission system[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(3): 132-144. (in Chinese)
- [13] 曾天生, 刘航, 陈汉斯, 等. 基于多特征信息融合的风电机组整机性能评估[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1052-1061.  
Zeng T S, Liu H, Chen H S, et al. Performance assessment of wind turbine based on multi-feature information fusion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4): 1052-1061. (in Chinese)
- [14] Wang H, Hu Z Q, Meng X Y. Dynamic performance investigation of a spar-type floating wind turbine under different sea conditions[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(3): 256-265.
- [15] Wen X Q. Modeling and performance evaluation of wind turbine based on ant colony optimization-extreme learning machine [J]. Applied Soft Computing, 2020, 94: 106476.
- [16] 董兴辉, 李佳, 高迪, 等. 风电机组效能和性能统一评估模型研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 253-260.  
Dong X H, Li J, Gao D, et al. Research on unified assessment model of wind turbine efficiency and performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 253-260. (in Chinese)
- [17] Lee A H I, Hung M C, Kang H Y, et al. A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64: 289-300.

(编辑 詹燕平)