

Offshore wind turbine tower condition assessment method based on subjective-objective integration

Qiu Di¹ Djiang Chen¹ Junbo Zhang¹ Yanchao Zhang² Jiaxi Li¹

1. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311100, China

2. Shaneng New Energy (Dongying) Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

Offshore wind turbines are of great significance in promoting energy transformation and economic development, and the harsh marine environment seriously threatens the safety of offshore wind turbines. Offshore wind turbine condition assessment is a key link to ensure the safe operation of wind turbines. It is a critical issue to be solved how to use multiple assessment methods to realize the real-time study and judgment of the service state of offshore wind turbine structures. In this study, the existing hierarchical analysis method (AHP) is extended, and the AHP is combined with the ordered weighted average method (OWA) and entropy weight method (EWM) to develop a real-time hybrid assessment method (HAHP) for real-time damage assessment and early warning. The real-time integrated assessment method obtained in this study reduces the subjective random influence in the assignment process and eliminates the negative influence of entropy value not reflecting knowledge and experience, making the evaluation results more objective. The comprehensive assessment method proposed in this study is of guiding significance for the comprehensive assessment of early warning programs for large-scale marine engineering structures such as offshore wind power.

Keywords

Offshore wind turbines; Structural health monitoring; Subjective-objective assessment methods.

基于主 – 客观一体化的海上风电塔筒状态评估方法

徐狄¹ 陈大江¹ 张军波^{1*} 张燕超² 李佳禧¹

1. 浙江华东工程咨询有限公司, 中国·浙江杭州 311100

2. 山能新能源(东营)有限公司, 中国·山东东营 257000

摘要

海上风电对于推动能源转型, 推动经济发展具有重要意义, 恶劣的海洋环境严重威胁海上风机安全。海上风电状态评估是保证风机安全运行的关键环节。如何运用多种评估方法, 实现海上风电塔筒结构的精准评估, 实现海上风电结构服役状态的实时研判, 成为亟待解决的关键问题。本研究对现有的层次分析法(AHP)进行了扩展, 并将AHP与有序加权平均法(OWA)和熵权法(EWM)相结合, 开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法(HAHP)。本研究所得到的实时综合评估方法既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经验的负面影响, 使评价结果更加客观。本研究所提出的综合评估方法对于海上风电等大型海洋工程结构的综合评估预警方案具有指导意义。

关键词

海上风电; 结构健康监测; 主—客观评估方法

1 引言

海上风电作为一种清洁、可再生的能源, 在全球能源转型中扮演着越来越重要的角色, 对于缓解能源压力, 推动

能源转型, 推动经济发展, 促进可持续发展具有重要意义[1]。然而, 海上风电虽然拥有巨大的发展潜力, 但其建设和运营也面临着严峻的挑战, 尤其是恶劣的海洋环境, 对风机设计、建造和维护提出了更高的要求。海上风电结构服役更偏向于深远海环境, 这导致海上风电更容易遭受风 - 浪 - 流耦合极端环境的影响, 严重威胁海上风机安全[2]。海上风电状态评估是保证风机安全运行的关键环节。通过多种评估方法的综合应用, 可以及时识别潜在问题, 预测未来故障, 并采取相应的措施, 确保风机安全可靠运行, 提高风电场发电效率, 降低运营成本, 促进海上风电产业健康发展[3]。因此, 如何运用多种评估方法, 实现海上风电塔筒结构的精准评估, 实现海上风电结构服役状态的实时研判, 成为亟待解决的关

【基金项目】山东能源渤中海上风电项目(项目编号 HDY-SC33-20240028)。

【作者简介】徐狄(1986-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事海上风电施工技术研究。

【通讯作者】张军波(1987-), 男, 中国浙江上虞人, 博士, 工程师, 从事工程数字化研究。

键问题 [4]。

目前，国内外学者关于主观和客观的评估方法已进行了相关研究。层次分析法（AHP）是一种多目标决策方法，由美国运筹学家 Satty T.L. 于 20 世纪 70 年代提出 [5]。它通过构建层次结构模型，将复杂的决策问题分解为多个层次和因素，然后通过两两比较的方式确定各因素之间的相对重要性，最终计算出各因素的权重，为决策提供依据。有序加权平均法（OWA）是利用过去若干个按照时间顺序排列起来的同一变量的观测值并以时间顺序变量出现的次数为权数，计算出观测值的加权算术平均数，以这一数字作为预测未来期间该变量预测值的一种趋势预测法 [6]。在熵权法（EWM）中，熵是系统无序程度的一个度量。根据信息熵的定义，对于某项指标，可以用熵值来判断某个指标的离散程度，其信息熵值越小，指标的离散程度越大，该指标对综合评价的影响（即权重）就越大，如果某项指标的值全部相等，则该指标在综合评价中不起作用 [7]。因此，可利用信息熵这个工具，计算出各个指标的权重，为多指标综合评价提供依据。如何消除主观评价中主观性过重的影响，同时削弱客观评价无倾向性可能带来的异常，将多种评估方法的有机结合，是十分重要的问题。

2 主 – 客观一体化方法模型构建

海上风电塔筒安全监测拟以物联网设备监测等多种技术相结合，获取监测时段内海上风电塔筒结构安全情况。结合其他社会经济、重大工程建设等资料，依据《固定式海上风力发电机组设计要求》(GB/T 31517.1-2022) 等评估标准，将评估指标分成三个等级，其中包括一个一级指标，二个二级指标，六个三级指标，并建立区域海上风电塔筒安全风险评估模型。本研究对现有的层次分析法（AHP）进行了扩展，并将 AHP 与有序加权平均法（OWA）和熵权法（EWM）相结合，开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法（HAHP）。HAHP 计算过程由主观和客观两部分组成，主观权重计算由 OWA 修正 AHP 法组成，客观权重计算由 EWM 法组成，最后得到综合权重。HAHP 的计算流程图如下图 1 所示。



图 1 HAHP 计算流程图

3 海上风电塔筒结构主观评估体系研究

OWA 理论是一种离散数据加权方法，可以有效降低主观极值偏差对权重准确性的影响。OWA 理论与 AHP 的结合可以有效修正 AHP 方法得到的权重，考虑不同指标的相对重要性和层次重要性顺序的影响，更全面地对海上风电塔筒结构进行评价。

3.1 层次分析法计算主观权重

海上风电塔筒结构实时安全风险评估模型的技术标准定义如下：

$$A_j = \sum_{i=1}^n (w_i C_{i,j}) \quad (2-1)$$

其中， A_j 表示第 j 个时间步长下的海上风电塔筒结构安全风险指数， $C_{i,j}$ 表示第 j 个时间步长下第 i 个三级评估指标的风险分值， w_i 表示第 i 个评估指标与时间无关的权重，其中 $\sum_{i=1}^n (w_i) = 1$ 。其中 i 、 n 和 j 分别表示三级指标数、指标总数和时间步长。图 2 表示根据评估指标建立的三级实时安全风险指数评估系统。

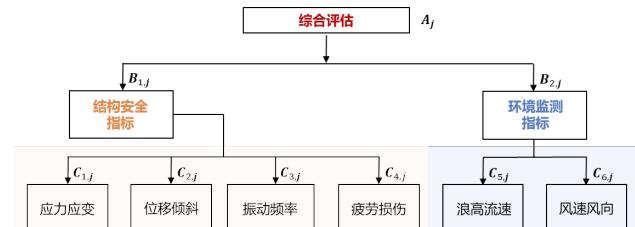


图 2 海上风电塔筒结构安全风险指数评估系统

根据 T-HAHP 方法，求解与时间无关的权重指标 w_i 的过程实质上就是求解判断矩阵最大特征根对应的特征向量，其中特征向量代表元素的重要性。计算公式如式 2-2 所示。

$$w_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2-2)$$

其中， M_i 是第 i 行元素乘积的 n 次根。

判断矩阵是否满足一致性的标准是 $CR_j \leq 0.1$ ，即当 $CR_j > 0.1$ 时，矩阵不满足一致性要求，需要重建。的计算公式如式 2-3 所示。

$$CR_j = \frac{CI_j}{RI} \quad (2-3)$$

其中， $CI_j = (\lambda_{\max,j} - n)(n - 1)$ ， n 代表矩阵的阶数。当 $n=1, 2$ 时，判断矩阵完全一致，无需检查。 RI 是通过大量实验计算出的平均一致性指数。对于固定数量的阶数 n ，随机构建一个成对比较矩阵 $A_{i \times j}$ ，其中 A_{ij} 是来自 $1, 2, \dots, 9, 1, 1/2, \dots, 1/9$ 的矩阵。在构建足够数量的矩阵 A_{ij} 后，求矩阵最大特征值的平均值 RI 。对于不同阶数 n ，平均一致性指数 RI 的值如下表 1 所示。

$\lambda_{\max,j}$ 是矩阵在第 j 个时间步的最大特征根，其值如式

2-4 所示。

$$\lambda_{\max,j} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n w_i C_{i,j}}{n w_i} \quad (2-4)$$

表 1 平均一致性指数 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

根据图 2 所示的系统层次结构, 对同一标准层之间的要素进行两两比较, 并根据相对重要性赋值采用 0-9 标度法构建判断矩阵。利用求和法计算单一标准下的权重向量, 并进行一致性检验。具体计算结果见表 2。第 j 个时间步的海上风电塔筒结构的指标权重如表 3 所示。海上风电塔筒结构指标的相对权重是根据专家打分和相关评价标准制定的。

表 2 第 j 个时间步的各层级权重向量的计算和一致性检验

A_j	$B_{1,j}$		$B_{2,j}$		w	一致性检验	
$B_{1,j}$	1		2		0.67	矩阵完全相同 无需检验	
$B_{2,j}$	0.5		1		0.33	矩阵完全相同 无需检验	
$B_{1,j}$	$C_{1,j}$	$C_{2,j}$	$C_{3,j}$	$C_{4,j}$	w	一致性检验	
$C_{1,j}$	1	1	1/2	2	0.22	$\lambda_{\max,j} = 4$	
$C_{2,j}$	1	1	1/2	2	0.22	$CI_j = 0$	
$C_{3,j}$	2	2	1	4	0.44	$RI = 0.89$	
$C_{4,j}$	1/2	1/2	1/4	1	0.11	$CR_j = 0$	
$B_{2,j}$	$C_{5,j}$		$C_{6,j}$	w		一致性检验	
$C_{5,j}$	1		0.5	0.33		矩阵完全相同 无需检验	
$C_{6,j}$	2		1	0.67		矩阵完全相同 无需检验	

表 3. 三级指标权重

二级指标	三级指标	权重
$B_{1,j}$	应力应变 ($C_{1,j}$)	0.148
	位移倾斜 ($C_{2,j}$)	0.148
	振动频率 ($C_{3,j}$)	0.294
	疲劳损伤 ($C_{4,j}$)	0.073
$B_{2,j}$	浪高流速 ($C_{5,j}$)	0.11
	风速风向 ($C_{6,j}$)	0.22

3.2 有序加权平均法修正主观权重

接下来, 利用 OWA 理论对 AHP 计算结果进行修改的过程如下:

权重重排

将 s 位专家使用 AHP 得出的某指标的得分 ($b_{11,j}, b_{12,j}, \dots, b_{1s,j}$) 按降序重新排序, 重新排序后的数据为 ($r_{0,j}, r_{1,j}, r_{2,j}, \dots, r_{s-1,j}$), $r_{0,j} < r_{1,j} < r_{2,j} < \dots < r_{s-1,j}$ 。

确定加权向量

新数据 r_{ij} 的加权向量 v 可由 $C_{s-1,j}^{ij}$ 确定:

$$v = \frac{C_{s-1,j}^{ij}}{\sum_{i=0}^{s-1} C_{s-1,j}^{ij}} = \frac{C_{s-1,j}^{ij}}{2^{s-1}} \quad (2-5)$$

其中, $C_{s-1,j}^{ij}$ 是在 $s-1, j$ 选择 i, j 数据后的组合数, $i = 0, 1, 2, \dots, s-1$ 。

计算基础权重

根据权重向量对数据进行加权, 得出指数的绝对权重

$$W_{i,j} = \sum_{i=0}^{s-1} v \times r_{i,j} \quad (2-6)$$

修改后的权重如下式所示:

$$w_{i,j} = \frac{W_{i,j}}{\sum_{i,j=1}^s W_{i,j}} \quad (2-7)$$

4 海上风电塔筒结构客观评估体系研究

熵最初是热力学中反映物质热运动无序程度的一种符号。后来人们将其引入信息论, 用来衡量整体的无序程度。EWM 是一种计算权重的客观方法。在赋值过程中不添加人为主观因素, 能相对真实地反映指标之间的关系。权重的确定步骤如下:

构建初始矩阵

假设评价中有 n 个指标和 s 个评价者, 构建初始数据矩阵 $L = (l_{im})_{n \times s}$, 其中 l_{im} 为第 m 个评价者评价第 i 个评价因子的风险等级。

定义指标熵

第 i^h 个指标的熵如式 3-1 和式 3-2 所示。

$$\overline{l_{im}} = \frac{l_{im}}{\sum_{i=1}^n l_{im}} \quad (0 \leq l_{im} \leq 1) \quad (3-1)$$

$$e_i = -c \sum_{m=1}^s \overline{l_{im}} \ln \overline{l_{im}} \quad (3-2)$$

其中, $c = \frac{1}{\ln s}$, 并假设当 $\overline{l_{im}}$ 等于零时, $\overline{l_{im}} \ln \overline{l_{im}}$ 等于零。计算熵权

第 i^h 个评价指标的熵权 H_i 由公式 3-3 计算得出。

$$H_i = \frac{1-e_i}{n-\sum_{i=1}^n e_i} \quad (3-3)$$

获取指标的熵权

计算所有评价指标的熵权, 得出桥梁上部结构安全评价因子的权重列向量

$$H = (H_1, H_2, \dots, H_n)^T.$$

5 海上风电塔筒结构主 – 客观综合评估体系研究

本研究将 OWA-AHP (主观) 与熵法 (客观) 相结合, 并采用加法合成法合成权重。这两种方法相辅相成, 既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经验的负面影响, 使评价结果更加客观。设 $Q_{i,t}$ 为由 OWA-AHP 和 EWM 合成的第 i 个指标的最终权重。

$$Q_{i,j} = \beta w_i + (1 - \beta) H_i \quad (4-1)$$

其中 $Q_{i,j}$ 表示时间序列下 w_i 和 H_i 的线性组合。

建立使 OWA-AHP 和 EWM 的权重平方差之和最小的函数如公式 4-2 所示。

$$\min s = \sum_{i=1}^n [(Q_{ij} - w_i)^2] + [(Q_{ij} - H_i)^2] \quad (4-2)$$

解得 $\beta = 0.5$, 具有普遍性, 因此第 i 个指标的综合权重如下:

$$Q_{ij} = 0.5w_i + 0.5H_i \quad (4-3)$$

最终, 利用 HAHP 对海上风电塔筒结构进行评价的专

家得分、AHP 权重、OWA 修正权重、熵权重和综合权重如表 4 所示。将所得分数与表 5 中的评判标准进行比较, 即可确定海上风电塔筒结构的预警等级。根据表 4 中各项指标的权重, 海上风电塔筒结构安全风险评估结果为

$$A_j = 0.1495C_{1j} + 0.1165C_{2j} + 0.229C_{3j} + 0.2575C_{4j} + 0.079C_{5j} + 0.173C_{6j} \quad (4-4)$$

表 4 使用 HAHP 对海上风电塔筒结构进行评估的专家评分、AHP 权重、OWA 修正权重、熵权重和综合权重

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	AHP 权重	OWA-AHP 权重	EWM 权重	Q
B1	2	2.5	4	1.5	3	0.67	0.68	/	/
	1	2	1.5	1	1	0.33	0.32	/	/
B1	C1	0.5	0.6	1	0.3	0.45	0.148	0.15	0.149
	C2	0.4	0.7	0.8	0.4	0.55	0.148	0.16	0.1165
	C3	0.8	1	1.5	0.6	1.85	0.294	0.31	0.148
	C4	0.3	0.2	0.7	0.1	0.15	0.073	0.07	0.2575
B2	C5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.36	0.11	0.12	0.038
	C6	0.7	1.5	1	0.5	0.64	0.22	0.2	0.146

表 5 海上风电塔筒结构预警级别的判断标准

分数	预警等级
[90, 100]	I
[80, 90)	II
[70, 80)	III
[60, 70)	IV
[0, 60)	/

6 结语

本研究结合其他社会经济、重大工程建设等资料, 依据国家规范和评估标准, 建立区域海上风电塔筒安全风险评估模型。本研究对现有的层次分析法 (AHP) 进行了扩展, 并将 AHP 与有序加权平均法 (OWA) 和熵权法 (EWM) 相结合, 开发出用于实时损害评估和预警的实时综合评估方法 (HAHP)。本研究所得到的实时综合评估方法既减少了赋值过程中的主观随机影响, 又消除了熵值不能反映知识经

验的负面影响, 使评价结果更加客观。本研究所提出的综合评估方法对于海上风电等大型海洋工程结构的综合评估预警方案具有指导意义。

参考文献

- [1] 丰力, 张莲梅, 韦家佳, 等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J]. 中国电力, 2024, 57(09): 80-93.
- [2] 耿大洲, 查浩, 黄洁亭, 等. 迈向深水远岸的海上风电关键技术展望与思考[J]. 水力发电, 2024, 1-8.
- [3] 马士东, 姚法仍, 刘其常, 等. 基于大数据的海上风电风机环境腐蚀性分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 123-127+183.
- [4] 刘占领, 黄远远. 基于海上风电结构安全监测系统的研究[J]. 船舶工程, 2024, 46(S1): 166-171.
- [5] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, (05): 148-153.
- [6] 高丽红, 徐格宁, 杨萍. 基于最大熵有序加权平均法的门座起重机结构可靠度优化分配[J]. 起重运输机械, 2011, (11): 1-5.
- [7] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(01): 77-81.