



T/CECS *-2025**

中国工程建设标准化协会标准

海上风电机组支撑结构健康状态评估 标准

Standard for health status assessment of support structures for offshore wind
turbines

(征求意见稿)

(提交反馈意见时,请将有关专利连同支持性文件一并附上)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

海上风电机组支撑结构健康状态评估标准

Standard for health status assessment of support structures for offshore wind
turbines

T/CECS *-2025**

主编单位：西安热工研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2025 年*月*日

中国计划出版社

2025 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2024 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2024]第 15 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定海上风电机组支撑结构健康状态评估标准。

海上风电机组支撑结构健康状态评估标准共分 5 章，主要内容包括：总则、术语和定义、一般要求、支撑结构监测、健康状态评估。

海上风电机组支撑结构健康状态评估标准由中国工程建设标准化协会抗风减灾与风能利用专业委员会归口管理，由中国华能集团有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给西安热工研究院有限公司（地址：陕西省西安市雁塔区雁翔路 99 号，邮编：710054，邮箱：18702927252@163.com）。

主编单位：西安热工研究院有限公司

参编单位：华能国际电力江苏能源开发有限公司清洁能源分公司、西安交通大学和北京千尧新能源科技开发有限公司。

主要起草人：许 瑾 邓 巍 赵 勇 刘溟江 姚中原 谢小军 陈 玉
 孙小迁 许 靖 胡 皓 许步锋 童 博 刘腾飞 季 笑
 周峰峰 卢文龙 袁金宝

主要审查人：

本标准批准人：

目 次

1	总则	(1)
2	术语和定义	(2)
3	一般要求	(3)
4	支撑结构监测	(4)
4.1	监测项目选择	(4)
4.2	监测仪器设备安装	(5)
4.3	数据采集、传输与存储	(5)
5	健康状态评估	(6)
5.1	监测阈值获取	(6)
5.2	塔架共振及刚度退化评估	(7)
5.3	塔架变形及基础沉降评估	(7)
5.4	塔架应力状态评估	(9)
5.5	塔架高强螺栓松动评估	(9)
5.6	健康状态综合评估	(10)
	用词说明	(11)
	引用标准名录	(12)
	附：条 文 说 明	(14)

Contents

1	General provisions.....	(1)
2	Terms and definitions.....	(错误! 未定义书签。)
3	General requirements.....	(错误! 未定义书签。)
4	Support structure monitoring.....	(错误! 未定义书签。)
4.1	Monitoring item selection.....	(错误! 未定义书签。)
4.2	Monitoring equipment installation.....	(错误! 未定义书签。)
4.3	Data acquisition, transmission and storage.....	(错误! 未定义书签。)
5	Structural health assessment.....	(错误! 未定义书签。)
5.1	Monitoring threshold acquisition.....	(错误! 未定义书签。)
5.2	Tower resonance and stiffness degradation evaluation.....	(错误! 未定义书签。)
5.3	Tower deformation and foundation settlement assessment.....	(错误! 未定义书签。)
5.4	Tower stress state evaluation.....	(错误! 未定义书签。)
5.5	High-strength bolt loosening assessment.....	(错误! 未定义书签。)
5.6	Comprehensive structural health assessment.....	(错误! 未定义书签。)
	Explanation of wording.....	(错误! 未定义书签。)
	List of normative references.....	(错误! 未定义书签。)

Addition: Explanation of provisions..... (错误! 未定义书签。)

1 总则

1.0.1 本标准规定了海上风电机组（简称“风机”）支撑结构（塔架及基础）监测及健康状态评估技术的专业术语、一般要求、支撑结构监测和健康状态评估。

1.0.2 本标准适用于固定式海上风电机组支撑结构的监测（振动、变形、力与应力、螺栓预紧力等）与健康状态评估。

2 术语和定义

以及下列术语和定义适用于本文件。

2.0.1 支撑结构 support structure

风力发电机机舱以下的整个结构为支撑结构，海上风电机组支撑结构包括塔架、连接结构（基础环、过渡段）和基础。

[来源：GB/T 2900.53，有修改]

2.0.2 基础不均匀沉降 differential settlement of foundation

同一支撑结构基础中，不同位置的沉降量存在差异。

2.0.3 塔架刚度退化 degeneration of tower stiffness

风电机组运行过程的循环反复载荷作用下，塔架刚度降低引发的固有频率降低现象。

2.0.4 健康状态 health status

根据设备状态参数确定的设备健康程度，分为健康、亚健康、故障和危险四种状态。

3 一般要求

3.0.1 海上风电机组支撑结构监测应至少包括支撑结构振动监测和变形监测，宜包含应力监测及螺栓预紧力监测。

3.0.2 海上风电机组支撑结构监测系统的总体设计、设备性能、软件功能、硬件配置、质量要求等应满足 GB/T 35854、NB/T 31004、NB/T 31122 等标准的相关要求。

3.0.3 海上风电机组支撑结构健康状态评估应基于支撑结构监测数据分析开展，应至少包括塔架共振及刚度退化评估、塔架变形及基础沉降评估内容，宜包含塔架应力状态评估和塔架高强螺栓松动评估内容。

3.0.4 海上风电机组支撑结构健康状态评估功能应部署于集团级数据运维平台或区域集控中心，具有可视化软件界面，能够对支撑结构状态量进行实时显示、预警，能够对支撑结构整体健康状态进行展示并提供检修建议。

3.0.5 海上风电机组支撑结构健康状态评估软件界面应具备对历史数据进行维护、检索、回放、下载、分析等功能。

4 支撑结构监测

4.1 监测项目选择

4.1.1 海上风电机组支撑结构监测项目、传感器类型及监测点位置见表 4.1.1。

表 4.1.1 支撑结构监测项目、传感器类型及监测点位置

监测项目	传感器类型	监测点位置			
		机舱平台	塔筒顶部	塔筒中部	塔筒底部
振动监测	低频加速度传感器	●	○	○	○
变形监测	倾角传感器	—	●	○	●
应力监测	光纤应变传感器	—	●	●	●
	光纤温度传感器	—	●	●	●
螺栓预紧力监测	—	—	○	○	○

注：表中，●为应测项目，○为选测项目，—为不作要求

4.1.2 对于新建海上风电场，应为每台机组配备振动监测和变形监测项目，宜为不低于风电机组总数量的 10%、且应覆盖最不利状况的风电机组配备应力监测项目。

4.1.3 对于已投入运营且未配备支撑结构监测系统的风电场，可根据风电场实际需求加装监测项目，加装原则可参考新建风电场。

4.1.4 海上风电机组支撑结构螺栓预紧力监测可根据风电场的实际需求确定监测方法、测点位置和数量。

4.1.5 振动监测应保证能够同时监测机舱轴向振动和径向振动，加速度传感器的选择可根据机舱内部实际安装条件选择双轴加速度传感器或两个单轴加速度传感器，传感器采样率应 $\geq 100\text{Hz}$ ，采样时长应 $\geq 100\text{s}$ 。

4.1.6 变形监测应至少在塔筒顶部偏航法兰下方 1 米处以及塔筒底部基础法兰平台下方 1 米处分别安装 1 个双轴倾角传感器，可选择在塔筒中部各节法兰下方 1 米处增加双轴倾角传感器进行塔架中间位置的变形监测，传感器采样率应 $\geq 10\text{Hz}$ ，采样时长应 $\geq 100\text{s}$ 。

4.1.7 应力监测应至少在塔筒顶部偏航法兰下方 1 米处、塔筒中部各节法兰下方 1 米处以及塔筒底部基础法兰平台下方 1 米处分别安装 4 个光纤应变传感器和 1 个光纤温度传感器，传感器采样率应 $\geq 10\text{Hz}$ ，采样时长应 $\geq 100\text{s}$ 。

4.1.8 应力监测中每个安装高度处的 4 个光纤应变传感器应分别为环向 -45° 、环向 0° 、环向 45° 、环向 90° 安装，1 个光纤温度传感器应为环向 0° 安装。

4.2 监测仪器设备安装

4.2.1 监测仪器设备安装前，应制订详细的施工方案，确定传感器安装方式、电缆敷设方法、数据采集装置、通讯设备存放位置及电源等。

4.2.2 监测仪器设备应与被测结构牢固连接，并应有适当的保护措施和醒目标识。

4.2.3 监测仪器设备安装完成后，应及时进行调试并做好监测仪器的初期测读，填写监测点基本资料表、绘制电缆走向，存档备查。

4.3 数据采集、传输与存储

4.3.1 应为每台风电机组支撑结构配备一套数据采集装置，数据采集装置的性能应与传感器性能相匹配，并满足被测物理量的要求，数据采集应尽量选取可同步采集支撑结构振动、变形、应力、螺栓预紧力等监测信号的同步采集装置，应保证采集仪的各通道能连续、同步采集。

4.3.2 数据采集装置应具备对信号进行放大、滤波、去噪、隔离等预处理功能。

4.3.3 对于传感器距离采集装置太远、采集装置无法直接采集相应传感器信号、采集装置通道数不够等情况，应配备与对应传感器信号相匹配的采集仪在当地对传感器信号进行采集和处理，并传输至数据采集装置。

4.3.4 采集装置应具备数据初步处理功能，能够实时且同步地将采集到的数据转换为实际的物理量值。

4.3.5 采集装置应具备对每个测点监测物理量的预处理功能，能够分析出各时间段内监测信号的峰值、均值、标准差、均方根值、主频率值等特征值。

4.3.6 数据传输与存储应满足 Q/HN-1-0000.17.015-2023 要求。

5 健康状态评估

5.1 监测阈值获取

5.1.1 海上风电机组支撑结构健康状态评估监测阈值通常包括塔架固有频率阈值、塔架振幅阈值、塔顶倾角阈值、塔底倾角阈值、各节法兰位置处应力阈值、螺栓预紧力阈值。

5.1.2 每一监测参量均应设立三级预警阈值，其中一级预警对应严重风险，二级预警对应中等风险，三级预警对应轻微风险。

5.1.3 海上风电机组支撑结构振动监测、倾角监测以及应力监测相关阈值应优先选择通过计算机仿真计算获取的阈值，宜参照下列步骤执行：

1 按照 GB/T 31517 和 GB/T 31517.1 要求至少仿真计算设计状态和载荷工况中发电、启动、正常关机、紧急停机、停机等状态下的机组动力学响应和部件受载情况；

2 对机组动力学响应和部件受载情况进行后处理获取所有仿真工况下的塔架振幅、塔顶倾角、塔底倾角的峰值的 1.05 倍作为对应参量的三级预警阈值；

3 基于机组动力学响应和部件受载情况，对塔筒进行精细化的有限元分析获取各节法兰位置处应力峰值，应力监测三级预警阈值应设定为分析计算获取的应力峰值；

4 塔架一阶固有频率三级预警阈值可设定为塔架理论固有频率频率 $\times 0.95$ ；

5 螺栓预紧力三级预警阈值应设定为相应螺栓施工规范要求的最小拧紧力矩。

5.1.4 对于不具备仿真计算条件的风电机组，各参量的监测阈值可通过对新装监测系统后不少于三个月的时间段内的监测数据进行分析，剔除异常数据后获取监测时间段内各参量的峰值作为三级预警阈值。

5.1.5 塔架一阶固有频率二级预警阈值可选取塔架理论一阶固有频率频率 $\times 0.93$ ，一级预警阈值可选取塔架理论一阶固有频率频率 $\times 0.9$ ；螺栓预紧力二级预警阈值可选取三级预警阈值 $\times 0.8$ ，螺栓预紧力三级预警阈值可选取三级预警阈值 $\times 0.6$ ；其他参量二级预警阈值可选取三级预警阈值 $\times 1.1$ ，一级预警阈值可选取三级预警阈值 $\times 1.25$ 。各参量监测参量及阈值表示符号见表 5.1.5。

表 5.1.5 支撑结构各监测参量及阈值表示符号

监测参量	当前监测值	监测阈值符号		
		一级预警阈值	二级预警阈值	三级预警阈值
塔架一阶固有频率	f_c	f_{i1}	f_{i2}	f_{i3}
塔架振幅	a_{vc}	a_{v1}	a_{v2}	a_{v3}
塔顶倾角	θ_{tp}	θ_{tp1}	θ_{tp2}	θ_{tp3}
塔底倾角	θ_{tb}	θ_{tb1}	θ_{tb2}	θ_{tb3}
高度 i 位置处主应力	σ_i	σ_{t1}	σ_{t2}	σ_{t3}
高度 i 位置处第 j 颗螺栓预紧力	F_{ij}	F_{t1}	F_{t2}	F_{t3}

5.2 塔架共振及刚度退化评估

5.2.1 塔架共振及刚度退化评估应基于塔架振动幅值和塔架一阶固有频率开展。

5.2.2 应对获取的每一组振动加速度数据进行频谱分析得到频谱图，在频谱图中提取理论塔架一阶固有频率 f_t 附近 $[0.9f_t, 1.1f_t]$ 范围内的峰值及其对应频率，记录峰值为塔架振动幅值 a_{vc} ，记录峰值对应频率为实际塔架一阶固有频率 f_c 。

5.2.3 将获取的每一组塔架一阶振动幅值与塔架振幅阈值进行比对，并以时间为横坐标、以实际塔架振动幅值为纵坐标进行展示。将获取的每一组塔架一阶固有频率与塔架一阶固有频率阈值进行比对，并以时间为横坐标、以实际塔架一阶固有频率为纵坐标进行展示。每一组结果的展示、预警及含义见表 5.2.3。

表 5.2.3 塔架共振及刚度退化评估结果展示、预警及含义

参量	与阈值对比	展示颜色	含义及风险评估
振动幅值	$a_{vc} < a_{v3}$	绿色	塔架一阶振动能量正常，支撑结构无共振风险
	$a_{v3} \leq a_{vc} < a_{v2}$	黄色	塔架一阶振动能量轻度超标，支撑结构有轻度共振风险
	$a_{v2} \leq a_{vc} < a_{v1}$	橙色	塔架一阶振动能量中度超标，支撑结构有中度共振风险
	$a_{v1} \leq a_{vc}$	红色	塔架一阶振动能量严重超标，支撑结构有很大共振风险
塔架一阶固有频率 f_i	$f_c < f_{i3}$	绿色	塔架频率正常，支撑结构无刚度退化风险
	$f_{i3} \leq f_c < f_{i2}$	黄色	塔架频率轻度下降，支撑结构有轻度刚度退化风险
	$f_{i2} \leq f_c < f_{i1}$	橙色	塔架频率中度下降，支撑结构有中度刚度退化风险
	$f_{i1} \leq f_c$	红色	塔架频率严重下降，支撑结构有很大刚度退化风险

5.3 塔架变形及基础沉降评估

5.3.1 塔架变形及基础沉降评估应基于塔架空间倾角及对应方位开展。

5.3.2 应对每组倾角数据中塔架不同高度位置处两个方向的倾角进行处理，获取对应高度处的空间倾角及方位。空间倾角按下式计算：

$$\theta_{ti} = \arctan \left(\frac{1}{\sqrt{(\cot \theta_{xi})^2 + (\cot \theta_{yi})^2}} \right) \quad (5.3.2-1)$$

式中： θ_{ti} ——高度 i 位置处的空间倾角；

θ_{xi} ——高度 i 位置处倾角传感器测得的 x 方向倾角；

θ_{yi} ——高度 i 位置处倾角传感器测得的 y 方向倾角。

空间倾角对应的方位按下列公式计算：

$$\theta_{axi} = \frac{\tan\theta_{xi}}{\tan\theta_{yi}} \quad (5.3.2-2)$$

$$\theta_{ayi} = \frac{\tan\theta_{yi}}{\tan\theta_{xi}} \quad (5.3.2-3)$$

$$\theta_{axi} + \theta_{ayi} = 90^\circ \quad (5.3.2-4)$$

式中： θ_{axi} ——高度 i 位置处的空间倾角相对于倾角传感器 x 轴方向的方位角；

θ_{ayi} ——高度 i 位置处的空间倾角相对于倾角传感器 y 轴方向的方位角。

5.3.3 塔架变形及基础沉降评估可参考图 5.3.3 绘制的极坐标系进行展示。极坐标系中的极径为各组数据计算获得的空间倾角 θ_{ti} ，极坐标系中的极角为空间倾角相对应的方位角，极坐标系中的黄色虚线、橙色虚线、红色虚线分别代表倾角的三级预警、二级预警以及一级预警阈值。图中 θ_{nx} 代表倾角传感器相对于正北方位的角度，高度 i 位置处的空间倾角 θ_{ti} 相对于正北方位的方位角为 θ_{axi} 与 θ_{nx} 之和。

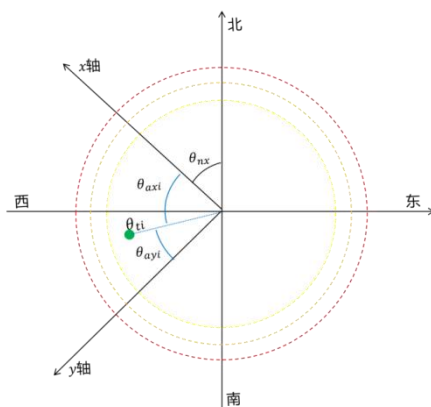


图 5.3.3 塔架变形及基础沉降评估极坐标系示意图

5.3.4 应分别绘制塔顶和塔底的极坐标系，并对每组数据获取的塔顶和塔底空间倾角及其方位在极坐标系中进行比对，每一组结果的展示、预警及含义见表 5.3.4。

表 5.3.4 塔架变形及基础沉降评估结果展示、预警及含义

参量	与阈值对比	展示颜色	含义及风险评估
塔底空间 倾角 θ_{tb}	$\theta_{tb} < \theta_{tb3}$	绿色	塔底倾角正常，支撑结构无基础不均匀沉降风险
	$\theta_{tb3} \leq \theta_{tb} < \theta_{tb2}$	黄色	塔底倾角轻度超标，支撑结构有轻度不均匀沉降风险
	$\theta_{tb2} \leq \theta_{tb} < \theta_{tb1}$	橙色	塔底倾角中度超标，支撑结构有中度不均匀沉降风险
	$\theta_{tb1} \leq \theta_{tb}$	红色	塔底倾角严重超标，支撑结构有很大不均匀沉降风险
塔顶空间 倾角 θ_{tp}	$\theta_{tp} < \theta_{tp3}$	绿色	塔顶倾角正常，支撑结构无塔架变形风险
	$\theta_{tp3} \leq \theta_{tp} < \theta_{tp2}$	黄色	塔顶倾角轻度下降，支撑结构有轻度塔架变形风险
	$\theta_{tp2} \leq \theta_{tp} < \theta_{tp1}$	橙色	塔顶倾角中度下降，支撑结构有中度塔架变形风险
	$\theta_{tp1} \leq \theta_{tp}$	红色	塔顶倾角严重下降，支撑结构有很大塔架变形风险

5.3.5 当塔架存在不均匀沉降时，应给出不均匀沉降的高度差 Δh 。不均匀沉降高度差按下式计算：

$$\Delta h = d_b \sin \theta_{tb} \tag{5.3.5}$$

式中： d_b ——塔底直径。

5.4 塔架应力状态评估

5.4.1 塔架应力状态评估应基于所安装应变传感器位置处的应力情况开展。

5.4.2 应变传感器位置处的应力情况应根据对应高度位置处的应变传感器所测得的应变计算获得的主应力进行评估，按下列公式计算：

$$\sigma_{1i} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_{0i} + \varepsilon_{90i}}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_{0i} - \varepsilon_{90i})^2 + (\varepsilon_{0i} + \varepsilon_{90i} - \varepsilon_{45i})^2} \right] \tag{5.4.2-1}$$

$$\sigma_{2i} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_{0i} + \varepsilon_{90i}}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_{0i} - \varepsilon_{90i})^2 + (\varepsilon_{0i} + \varepsilon_{90i} - \varepsilon_{45i})^2} \right] \tag{5.4.2-2}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{1i}^2 + \sigma_{2i}^2 + \sigma_{1i}\sigma_{2i}} \tag{5.4.2-3}$$

式中： E ——材料弹性模量；

μ ——材料泊松比；

ε_{0i} ——高度 i 位置处 0° 应变传感器所测应变；

ε_{90i} ——高度 i 位置处 90° 应变传感器所测应变；

ε_{45i} ——高度 i 位置处 180° 或 270° 应变传感器所测应变；

σ_i ——高度 i 位置处主应力。

5.4.3 将计算获取的每一组塔架主应力数据与应力阈值进行比对，并以时间为横坐标、以计算获取的塔架主应力为纵坐标进行展示。每一组结果的展示、预警及含义见表 5.4.3。

表 5.4.3 塔架应力状态评估结果展示、预警及含义

参量	与阈值对比	展示颜色	预警等级	含义
高度 i 位置处主应力 σ_i	$\sigma_i < \sigma_{t3}$	绿色	正常	高度 i 位置处法兰受力正常，无屈服风险
	$\sigma_{t3} \leq \sigma_i < \sigma_{t2}$	黄色	三级预警	高度 i 位置处法兰受力轻度异常，有轻度屈服风险
	$\sigma_{t2} \leq \sigma_i < \sigma_{t1}$	橙色	二级预警	高度 i 位置处法兰受力中度异常，有中度屈服风险
	$\sigma_{t1} \leq \sigma_i$	红色	一级预警	高度 i 位置处法兰受力重度异常，有重度屈服风险

5.5 塔架高强螺栓松动评估

5.5.1 塔架高强螺栓松动应基于螺栓监测传感器测得的螺栓预紧力情况开展。

5.5.2 螺栓预紧力情况应根据所选取的监测方法，计算获得每一处测点的螺栓预紧力，并与预紧力阈值进行比对展示，每一组结果的展示、预警及含义见表 5.5.2。

表 5.5.2 塔架高强螺栓松动评估结果展示、预警及含义

参量	与阈值对比	展示颜色	预警等级	含义
高度 i 位置处第 j 颗螺栓 b_{ij} 的预紧力 F_{ij}	$F_{t3} < F_{ij}$	绿色	正常	螺栓 b_{ij} 预紧力正常，无松动风险
	$F_{t2} \leq F_{ij} < F_{t3}$	黄色	三级预警	螺栓 b_{ij} 预紧力轻度异常，有轻度松动风险
	$F_{t1} \leq F_{ij} < F_{t2}$	橙色	二级预警	螺栓 b_{ij} 预紧力中度异常，有中度松动风险
	$F_{ij} \leq F_{t1}$	红色	一级预警	螺栓 b_{ij} 预紧力重度异常，有重度松动风险

5.6 健康状态综合评估

5.6.1 海上风电机组健康状态综合评估应基于塔架共振及刚度退化评估、塔架变形及基础沉降评估、塔架应力状态评估和塔架高强螺栓松动评估的结果进行。

5.6.2 健康状态综合评估可采用扣分法进行，扣分准则可参照下列规定执行：

- 1 健康状态满分为 100 分，最低分为 0 分；
- 2 每出现一次一级预警扣 30 分，每出现一次二级预警扣 15 分，每出现一次三级预警扣 5 分；
- 3 同一原因预警最高扣 60 分，预警处理后应退回相应预警被扣除的分数。

5.6.3 风电机组支撑结构健康状态应至少划分为健康、亚健康、故障和危险四种等级，健康状态等级划分及处理建议见表 5.6.3。

表 5.6.3 健康状态等级划分及处理建议

序号	健康状态分值范围	健康状态等级	处理建议
1	90~100	健康	正常状态，无需处理
2	80~90	亚健康	存在潜在风险，需关注发展趋势
3	60~80	故障	设备出现故障，需选择合适时间停机检查
4	0~60	危险	设备运行存在较大风险，需尽快停机检查

5.6.4 风电机组支撑结构健康状态为亚健康、故障或危险时，应给出具体影响支撑结构健康状态的原因及检修建议。

用词说明

为便于在执行本标准条款时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的；
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的；
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的；
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

下列文件中的内容通过文件的规范性引用而构成本标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

《电工术语风力发电机组》 GB/T 2900.53

《海上风力发电机组设计要求》 GB/T 31517

《固定式海上风力发电机组设计要求》 GB/T 31517.1

《风力发电机组及其组件机械振动测量与评估》 GB/T 35854

《风力发电机组振动状态监测导则》 NB/T 31004

《风力发电机组在线状态监测系统技术规范》 NB/T 31122

中国工程建设标准化协会标准

海上风电机组支撑结构健康状态评估 标准

Standard for health status assessment of support structures for offshore wind
turbines

T/CECS *-2025**

条 文 说 明

制 定 说 明

海上风电机组支撑结构健康状态评估标准制定过程中，编制组开展了支撑结构振动特性识别、共振特征识别、热点识别、变工况振动监测、共振监测以及受载状态评估等方面研究，总结了我国工程建设在海上风电机组支撑结构监测及健康状态的实践经验，同时参考了《电工术语风力发电机组》GB/T 2900.53、《海上风力发电机组设计要求》GB/T 31517、《固定式海上风力发电机组设计要求》GB/T 31517.1、《风力发电机组及其组件机械振动测量与评估》GB/T 35854、《风力发电机组振动状态监测导则》NB/T 31004、《风力发电机组在线状态监测系统技术规范》NB/T 31122 等技术法规、技术标准，通过试验取得了海上风电机组支撑结构应力监测、共振监测、位移监测和过载评估方法。

海上风电机组支撑结构健康状态评估标准编制原则、重要问题的处理、尚需深入研究的有关问题

为便于广大技术和管理人员在使用海上风电机组支撑结构健康状态评估标准时能正确理解和执行条款规定，《海上风电机组支撑结构健康状态评估标准》编制组按章、节、条顺序编制了海上风电机组支撑结构健康状态评估标准的条文说明，对条款规定的目的依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	(16)
3	一般要求	(17)
4	支撑结构监测	(18)
4.1	监测项目选择	(18)
4.2	监测仪器设备安装	(18)
4.3	数据采集、传输与存储	(18)
5	健康状态评估	(19)
5.1	监测阈值获取	(19)
5.2	塔架共振及刚度退化评估	(19)
5.3	塔架变形及基础沉降评估	(20)
5.4	塔架应力状态评估	(20)
5.5	塔架高强螺栓松动评估	(20)
5.6	健康状态综合评估	(20)

1 总则

1.0.1 海上支撑结构长期承受风浪耦合荷载、盐雾腐蚀及海生物附着，失效风险显著高于陆上。本标准规定了海上风电机组支撑结构健康状态评估的专业术语、一般要求、支撑结构监测和健康状态评估。

1.0.2 本标准适用于固定式海上风电机组支撑结构的监测与健康状态评估；不包含漂浮式机组，因其基础动力响应机制不同。

3 一般要求

3.0.1、3.0.3 海上支撑结构失效案例中，振动超标（如塔筒共振）和基础变形（如不均匀沉降）占比超 80%；应力与螺栓监测成本较高。结合科研成果和工程实践得出，海上风电机组支撑结构健康状态评估应至少包括塔架共振及刚度退化评估、塔架变形及基础沉降评估内容，宜包含塔架应力状态评估和塔架高强螺栓松动评估内容。

3.0.2 引用 GB/T 35854、NB/T 31004、NB/T 31122 三项标准，确保监测数据可靠性与兼容性。

4 支撑结构监测

4.1 监测项目选择

4.1.2 对于新建海上风电场，不低于风电机组总数量的 10% 的抽样原则源自统计学置信度 90%，且优先覆盖“最不利机组”。

4.1.3 对于已投入运营且未配备支撑结构监测系统的风电场，可根据风电场实际需求灵活加装，但需确保新增系统与原有 SCADA 兼容。

4.1.4 海上风电机组支撑结构螺栓预紧力监测，因法兰结构差异大，不强制统一方法，可根据风电场的实际需求确定监测方法、测点位置和数量。

4.1.6 变形监测应在法兰下方 1 米布设避免焊缝干扰；塔筒顶部、塔筒底部因两者倾角差 $\Delta\theta$ 直接计算基础倾斜率。

4.1.7 应力监测每个安装高度处 4 应变片+1 温度片是最小配置，用于解耦热应力与机械应力；采样率 $\geq 10\text{Hz}$ 因应力变化慢于振动；法兰下方 1 米避开螺栓孔应力集中区。

4.1.8 应力监测中每个安装高度处的 4 个光纤应变传感器，环向 $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ 布设形成应变花，通过莫尔圆计算主应力方向。 45° 方向对剪切应变敏感，避免 $0^\circ/90^\circ$ 布设漏检。

4.2 监测仪器设备安装

4.2.1 监测仪器设备安装前，应制订详细的施工方案，需明确传感器基座刚度，电缆铠装层厚度，数据箱 IP68 防护等。

4.3 数据采集、传输与存储

4.3.1 应为每台风电机组支撑结构配备一套与传感器性能相匹配的数据采集装置，并满足被测物理量的要求，数据采集选取可同步采集，通道间时延 $\leq 1\text{ms}$ ，避免模态分析失真。

4.3.3 对于传感器距离采集装置太远、采集装置无法直接采集相应传感器信号、采集装置通道数不够等情况，允许子采集站，但需时间戳对齐，随后传输至数据采集装置。

4.3.5 采集装置应具备对每个测点监测物理量的预处理功能，能够分析出各时间段内监测信号的峰值、均值、标准差、均方根值、主频率值等特征值。峰值/均值用于阈值预警，主频率用于刚度退化评估。要求算法透明，禁用黑箱 AI 模型。

4.3.6 引用 Q/HN—1—0000.17.015—2023 标准，该标准规定海上专用加密协议，存储周期 ≥ 10 年，数据的传输与存储应满足该要求。

5 健康状态评估

5.1 监测阈值获取

5.1.1 本条明确了海上风电机组支撑结构健康监测的核心参量，其选取基于结构力学特性与工程实践需求。塔架固有频率作为结构动力特性的关键指标，其变化反映塔架刚度退化或损伤，是评估结构整体性的重要依据。振幅与倾角，塔架振幅、塔顶、塔底倾角直接关联结构动态稳定性，超出阈值可能预示共振风险或基础沉降等隐患，需实时监测。法兰应力与螺栓预紧力，法兰连接是塔架分段的关键节点，应力异常可能导致疲劳开裂；螺栓预紧力不足会削弱连接刚度，引发振动加剧或结构失稳。这些参量覆盖了结构静动态特性、连接安全性等维度，形成多参数协同监测体系，确保评估结果的全面性。

5.1.2 本条规定三级预警机制的分级逻辑，旨在实现风险的精细化管理。按风险严重程度划分阈值，与工程应急响应机制衔接。

5.1.3 本条确立了仿真计算作为阈值获取的优先方法，其技术逻辑如下：

1 选取发电、启停等典型工况，因这些状态下结构载荷变化剧烈，易暴露潜在缺陷。GB/T 31517 和 GB/T 31517.1 系列标准为仿真提供了行业规范，确保计算模型的准确性；

2 对机组动力学响应和部件受载情况进行后处理获取所有仿真工况下的塔架振幅、塔顶倾角、塔底倾角的峰值的 1.05 倍作为对应参量的三级预警阈值，在设计极值基础上叠加 5%安全裕度，避免正常工况波动触发误预警；

3 法兰应力直接采用有限元分析峰值，因应力集中区域的局部强度是连接失效的主要诱因，需以计算极值作为基准；

4、5 塔架理论固有频率 $\text{频率} \times 0.95$ 作为阈值，基于“频率下降预示刚度退化”的原理；螺栓预紧力采用施工规范最小力矩，确保连接强度的基本要求。

5.1.4 本条是仿真方法的补充方案，适用于计算资源受限场景。由于海上环境复杂，需不少于三个月的监测数据覆盖典型载荷工况，确保阈值的代表性。并通过统计分析排除偶然干扰，避免极值误判。

5.2 塔架共振及刚度退化评估

5.2.1 本条明确塔架结构安全性评估的核心参数为振动幅值和一阶固有频率。振动幅值直接反映塔架在风荷载等动力作用下的响应强度，一阶固有频率的变化可表征结构刚度退化程度。二者结合能有效识别共振风险及结构损伤，为评估提供量化依据。

5.2.2 基于工程实践，塔架实际固有频率可能因材料老化、损伤等因素在理论值 $\pm 10\%$ 范围内偏移，此范围可覆盖典型工况。

5.2.3 通过时间-振动幅值、时间-一阶固有频率曲线图展示数据动态变化，便于直观识别趋势异常。综合振动幅值与一阶固有频率的阈值情况划分四级预警，实现风险分级管理。

5.3 塔架变形及基础沉降评估

5.3.1、5.3.2 塔架变形及基础沉降评估需基于空间倾角及方位数据，因单方向倾角测量无法全面反映塔架三维变形状态。通过融合双轴倾角传感器数据，可消除测量误差，提高评估准确性。执行中需确保传感器坐标系与地理坐标系对齐。

5.3.3 本条规定采用极坐标系可视化变形趋势，其中极径为空间倾角 θ_{ti} ，极角为方位角 θ_{axi} 与 θ_{nx} 之和。预警阈值线分三级：黄色虚线表轻度风险，橙色表中度风险，红色表严重风险。该展示方式可直观识别高风险方位，但需注意极坐标原点应设置为塔架设计中心位置。

5.4 塔架应力状态评估

5.4.1、5.4.2 应力计算基于平面应变状态，通过三向应变值求主应力，再以 Von Mises 应力 σ_i 综合表征屈服风险。

5.4.3 表 5.4.3 规定以时间-主应力曲线展示结果，超过阈值时触发相应颜色预警。

5.5 塔架高强螺栓松动评估

5.5.1 本条明确螺栓松动风险需通过实时监测预紧力来判定。因高强螺栓是塔架法兰连接的核心构件，其预紧力下降将导致连接刚度退化，引发结构滑移甚至倒塌。

5.6 健康状态综合评估

5.6.1 本条要求整合四项评估结果（刚度退化、变形沉降、应力状态、螺栓状态），避免孤立分析导致的误判。

5.6.2 健康状态综合评估可采用扣分法进行，扣分逻辑设计为：初始 100 分，最低分为 0 分三级预警扣 5 分/次，二级扣 15 分/次，一级扣 30 分/次；同一原因累计扣分 ≤ 60 分。

5.6.3 参考科研成果和工程经验的分级标准为：健康（90-100 分）仅需常规运维；亚健康（80-90 分）需增加巡检频次；故障（60-80 分）应计划性停机；危险（ <60 分）须紧急停机。

5.6.4 当风电机组支撑结构健康状态为亚健康（80~90 分）、故障（60~80 分）或危险（0~60 分）时，检修建议必须包含具体故障定位与措施。