团体标准

发 布

中国电机工程学会

20XX—XX—XX实施

20XX—XX—XX发布

海上风电机组支撑结构及

升压站结构健康监测技术规范

Technical specification for structural health monitoring

of offshore wind turbine support structure

and booster station structure

（征求意见稿）

T/CSEE XXXX—YYYY

ICS 19.020

CCS K85

目 次

[前 言 3](#_Toc92980900)

[1 范围 4](#_Toc92980901)

[2 规范性引用文件 4](#_Toc92980902)

[3 术语和定义 4](#_Toc92980903)

[4 总则 5](#_Toc92980904)

[5 监测项目与监测点布置 5](#_Toc92980905)

[5.1 一般规定 5](#_Toc92980906)

[5.2 巡视检查 8](#_Toc92980907)

[5.3 变形与位移监测 10](#_Toc92980908)

[5.4 振动监测 11](#_Toc92980909)

[5.5 力与应力监测 11](#_Toc92980910)

[5.6 腐蚀监测 12](#_Toc92980911)

[5.7 环境量监测 12](#_Toc92980912)

[5.8 专项监测 12](#_Toc92980913)

[6 监测方法及传感器类型 12](#_Toc92980914)

[6.1 一般规定 12](#_Toc92980915)

[6.2 传感器的选型 15](#_Toc92980916)

[6.3 监测仪器设备的安装 15](#_Toc92980917)

[7 数据采集、存储与处理 16](#_Toc92980918)

[7.1 一般规定 16](#_Toc92980919)

[7.2 动态监测参数的数据采集与处理 16](#_Toc92980920)

[7.3 静态监测参数的数据采集与处理 17](#_Toc92980921)

[8 监测系统与监测资料分析 17](#_Toc92980922)

[8.1 系统框架 17](#_Toc92980923)

[8.2 系统功能 17](#_Toc92980924)

[8.3 监测资料分析 18](#_Toc92980925)

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准管理办法（暂行）》的要求，依据GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会火力发电专业委员会技术归口和解释。

本文件起草单位：中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、华能江苏能源开发有限公司、华能江苏清洁能源分公司、华能（福建）能源开发有限公司、华能福建清洁能源分公司、华能（浙江）能源开发有限公司清洁能源分公司、华能烟台新能源有限公司、华能南方分公司、华能辽宁清洁能源有限责任公司。

本文件主要起草人：、、、。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条1 号，100761，网址：http：//www.csee.org.cn，邮箱：[cseebz@csee.org.cn](mailto:cseebz@csee.org.cn)）。

海上风力发电机组及升压结构健康监测技术规范

1. 范围

本文件规定了海上风电场风力发电机组（简称“风机”）支撑结构（基础及塔架）和海上升压站结构（下部支撑结构和上部组块结构）健康监测系统的专业术语、总体原则、基本结构、主要功能、测点布置及相关技术要求。

本文件适用于海上风电场风力发电机组支撑结构（不包括漂浮式机组）和海上升压站结构的变形与位移、振动、力与应力、腐蚀、环境量等的监测与分析。

1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。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；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。

GB/T 2298 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 2900.53 电工术语 风力发电机组

GB/T 6075 在非旋转部件上测量和评价机器的机械振动

GB/T 14914 海滨观测规范

GB/T 19873 机器状态监测与诊断 振动状态监测

GB/T 20921 机器状态监测与诊断 词汇

GB/T 31517 海上风力发电机组设计要求

GB/T 32128 海上风电场运行维护规程

CECS 333 结构健康监测系统设计标准

NB/T 31004 风力发电机组振动状态监测导则

NB/T 31006 海上风电场钢结构防腐蚀技术标准

DL/T 5178 混凝土坝安全监测技术规范

DL/T 5313 水电站大坝运行安全评价导则

JTJ/T 277 水运工程波浪观测和分析技术规程

JTS 153-3 海港工程钢结构防腐蚀技术规范

JTS 235 水运工程水工建筑物原型观测技术规范

SL 258 水库大坝安全评价导则

SL 601 混凝土坝安全监测技术规范

NB/T 10105海上风电场工程风电机组基础设计规范

1. 术语和定义

GB/T 2900.53、GB/T 2298、GB/T 20921界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

风力发电机组支撑结构 support structure of wind turbine

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。

海上升压站结构 offshore booster station structure

海上升压站是指将海上风电场风电机组的输出电压升高到更高等级电压并送出的设施，设施中的结构部分为海上升压站结构。通常，海上升压站结构包括下部支撑结构（桩基础、导管架等）和上部组块结构。

健康监测 health monitoring

对风电机组基础与塔架的运行状态进行连续或周期性地检测和评估。

状态监测参数condition monitoring parameters

反映风电机组支撑结构运行状态的监测量，如：振动值、应力应变值、倾斜度值、基础不均匀沉降值等。

运行参数 operating parameters

可以控制或决定风电机组运行工况的物理量，如：风速、主动偏航角等。

1. 总则

监测系统应遵循“安全可靠、先进成熟、灵活配置、标准统一”的技术原则设计，监测系统的安装和运行不应影响风电机组及其支撑结构的安全性和可靠性。

监测系统服务于风电场的基建期和运营期，新建工程的监测系统设计和施工应与项目实施同步进行。

监测系统设计时，宜将风电场内的风机分为常规监测风机和重点监测风机，常规监测以了解风机支撑结构的运行状态为主要目的，重点监测的目的在于可进一步分析支撑结构运行状态变化的内在机理。

监测系统设计时，应合理确定监测项目、监测方法和系统规模，监测项目的选定和监测点的布置应考虑全面、突出重点，对风机影响较大的环境因素宜同步进行观测。

监测系统，一般由传感器、数据采集装置、通信网络、存储设备、服务器及软件等组成，应具备对支撑结构状态信息进行采集、存储、传输、分析、统计、展示等功能。

在满足技术要求的前提下，风电场SCADA系统或风电机组主控制系统能够提供的状态量和工况量，监测系统应以通信方式获取，不宜重复安装传感器。

监测系统应具有良好的扩展功能和系统升级功能，以不断满足运维管理的需要。

监测资料应及时整编分析，并结合其他资料，定期评估风机支撑结构的运行状态。当发现支撑结构存在安全隐患时，应立即上报上级主管部门。

1. 监测项目与监测点布置

5.1 一般规定

海上风力发电机组支撑结构和升压站结构的监测项目，按监测类别可分为巡视检查、变形与位移监测、振动监测、力与应力监测、腐蚀监测、环境量监测和专项监测。

监测系统设计时，应根据风电机组型式、单机容量、风电场气象及水文环境、风机支撑结构型式、升压站结构形式等条件和实际运维需要，合理确定监测项目及监测点安装位置。

一般情况下，宜选择不低于风电机组总数量的10％、且应覆盖最不利状况的代表性风机，作为重点监测风机，重点监测风机的监测项目可参考表5.1进行选择，常规监测风机的监测项目可参考表5.2进行选择。

监测项目的选定，应兼顾全面、突出重点，对风机影响较大的环境因素应同步进行观测，以满足对支撑结构状态进行监控、预警及安全评估的要求。

监测点的安装位置，应根据监测目的和设计计算成果等确定，关键和重要部位的监测点应有冗余。

各监测项目的监测频率，应根据基建期和运营期的实际需求，以能反映各项目的重要变化过程，而又不遗漏其变化时刻为原则，合理确定和适时调整。在出现台风、地震、海啸及其他影响风机安全运行的特殊情况或监测值异常时应及时加密观测。

表5.1 重点监测风机支撑结构及海上升压站结构健康监测项目选择

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 监测类别 | 监测项目 | 海上升压站结构 | 基础 | | 塔架 | | |
| 钢结构 | 钢筋混凝土结构 | 底节 | 中间节 | 顶节 |
| 一 | 巡视检查 | 锈蚀、裂纹、裂缝、螺栓松动、烟雾、火苗、有害气体等 | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 二 | 变形与位移监测 | 水平位移 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 竖向位移 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 基础不均匀沉降 | ● | ● | ● | / | / | / |
| 倾斜 | ● | ● | ● | ● | ○ | ● |
| 间隙 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 三 | 振动监测 | 振动加速度 | ● | ● | ● | ● | ○ | ● |
| 振动速度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 振动位移 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 四 | 力与应力监测 | 钢结构应力 | ● | ● | / | ● | ● | ○ |
| 混凝土应变 | / | / | ● | / | / | / |
| 钢筋应力 | / | / | ● | / | / | / |
| 混凝土温度 | / | / | ● | / | / | / |
| 螺栓应力 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 土压力 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 孔隙水压力 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 波浪力 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 冰压力 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 船舶力 | ○ | ○ | ○ | / | / | / |
| 五 | 腐蚀监测 | 钢结构腐蚀保护电位 | ● | ● | / | / | / | / |
| 外加电流 | ● | ● | / | / | / | / |
| 牺牲阳极外形尺寸 | ○ | ○ | / | / | / | / |
| 牺牲阳极的输出电流 | ○ | ○ | / | / | / | / |
| 钢筋混凝土腐蚀 | / | / | ○ | / | / | / |
| 六 | 环境量监测 | 波浪要素 | ○ | | | | | |
| 风速、风向 | ○ | | | | | |
| 海流流速、流向 | ○ | | | | | |
| 气温、湿度、水温 | ○ | | | | | |
| 七 | 专项监测 | 水下地形冲刷 | ● | | | | | |
| 灌浆体 | ○ | | | | | |
| 冻融 | ○ | | | | | |

注：（1）●为应测项目，○为选测项目，/为不作要求；

（2）对于负压筒式基础，筒内外的土压力和孔隙水压力为应测项目。

表5.2 常规监测风机支撑结构健康监测项目选择

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 监测类别 | 监测项目 | 基础 | | 塔架 | | |
| 钢结构 | 钢筋混凝土结构 | 底节 | 中间节 | 顶节 |
| 一 | 巡视检查 | 锈蚀、裂纹、裂缝、螺栓松动、烟雾、火苗、有害气体等 | ● | ● | ● | ● | ● |
| 二 | 变形与位移监测 | 水平位移 | ○ | ○ | / | / | / |
| 竖向位移 | ○ | ○ | / | / | / |
| 基础不均匀沉降 | ● | ● | / | / | / |
| 倾斜 | ● | ● | ○ | ○ | ● |
| 间隙 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 三 | 振动监测 | 振动加速度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 振动速度 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 振动位移 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 四 | 力与应力监测 | 钢结构应力 | ○ | / | ○ | ○ | ○ |
| 混凝土应变 | / | ○ | / | / | / |
| 钢筋应力 | / | ○ | / | / | / |
| 混凝土温度 | / | ○ | / | / | / |
| 螺栓应力 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 土压力 | ○ | ○ | / | / | / |
| 孔隙水压力 | ○ | ○ | / | / | / |
| 波浪力 | ○ | ○ | / | / | / |
| 冰压力 | ○ | ○ | / | / | / |
| 船舶力 | ○ | ○ | / | / | / |
| 五 | 腐蚀监测 | 钢结构腐蚀保护电位 | ○ | / | / | / | / |
| 外加电流 | ● | / | / | / | / |
| 牺牲阳极外形尺寸 | ○ | / | / | / | / |
| 牺牲阳极的输出电流 | ○ | / | / | / | / |
| 钢筋混凝土腐蚀 | / | ○ | / | / | / |
| 六 | 环境量监测 | 波浪要素 | ○ | | | | |
| 风速、风向 | ○ | | | | |
| 海流流速、流向 | ○ | | | | |
| 气温、湿度、水温 | ○ | | | | |
| 七 | 专项监测 | 水下地形冲刷 | ● | | | | |
| 灌浆体 | ○ | | | | |
| 冻融 | ○ | | | | |

注：（1）●为应测项目，○为选测项目，/为不作要求；

（2）对于负压筒式基础，筒内外的土压力和孔隙水压力为应测项目。

5.2 巡视检查

巡视检查，包括日常巡视检查、年度巡视检查及特殊情况下的应急巡视检查，重点检查部位为基础、塔架及相关连接构件等。

巡视检查，应根据海上风电场的特点，分别制定基建期和运营期的巡视检查规程，规定检查时间、检查路线、检查项目与检查人员等。

巡视检查项目，可参考表5.3进行选择。

表5.3 巡视检查项目选择

| 检查部位 | 检查项目 | 日常巡视检查 | 年度巡视检查 | 应急巡视检查 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 升压站基础结构 | 锈蚀、腐蚀 | ● | ● | ● |
| 裂纹、裂缝 | ● | ● | ● |
| 螺栓松动 | ● | ● | ● |
| 灌浆体 | ● | ● | ● |
| 晃动、抖动 | ● | ● | ● |
| 升压站上部组块结构 | 锈蚀、腐蚀 | ● | ● | ● |
| 裂纹、裂缝 | ● | ● | ● |
| 螺栓松动 | ● | ● | ● |
| 晃动、抖动 | ● | ● | ● |
| 基础部位 | 锈蚀、腐蚀 | ● | ● | ● |
| 裂纹、裂缝 | ● | ● | ● |
| 螺栓松动 | ● | ● | ● |
| 晃动、抖动 | ● | ● | ● |
| 基础与塔架结合部位 | 锈蚀、腐蚀 | ● | ● | ● |
| 裂纹、裂缝、错动 | ● | ● | ● |
| 螺栓松动 | ● | ● | ● |
| 灌浆体 | ● | ● | ● |
| 晃动、抖动 | ● | ● | ● |
| 塔架部位 | 锈蚀 | ● | ● | ● |
| 裂纹、错动 | ● | ● | ● |
| 螺栓松动 | ● | ● | ● |
| 晃动、抖动 | ● | ● | ● |
| 电气设备 | ○ | ● | ● |
| 油品泄露 | ● | ● | ● |
| 烟雾 | ● | ● | ● |
| 火苗 | ● | ● | ● |
| 监测设施 | 传感器 | ○ | ● | ● |
| 数据采集装置 | ● | ● | ● |
| 传输线缆 | ○ | ● | ○ |
| 通信设施 | ● | ● | ● |
| 防雷设施 | ○ | ● | ● |
| 供电设施 | ● | ● | ● |
| 保护设施 | ○ | ● | ● |

注：●为应检查的项目，○为可选的检查项目。

日常巡视检查，应由相关术人员进行。日常检查频率：基建期，每季度不宜少于2次；运营期，每季度不宜少于1次，在风机运行异常时，宜增加检查次数。日常巡视检查报告，应在检查结束后2天内完成。

年度巡视检查，在每年恶劣工况（如冰冻严重地区的冰冻及冻融期、台风期）前后，风电场管理单位应组织运行维护专业人员按规定的检查程序，对风机支撑结构及海上升压站结构进行全面详细的现场检查，并查阅风电机组及其支撑结构、海上升压站及其支撑结构的检查、运行、维护记录和监测数据等档案资料。年度巡视检查，每年不少于1次，应在检查结束后20天内完成年度巡视检查报告。

应急巡视检查，在风电场所处海域（或其附近）发生强震、台风、超强海浪、低气温以及发生其他影响风机安全运行的特殊情况时，主管单位（或业主）应组织安全检查组及时进行应急检查，必要时还应派专人进行连续监视。应急巡视检查，应在检查结束后立即提交简报，检查结束后10天内完成详细报告。

日常巡视检查报告内容应简单、扼要说明问题，必要时附上照片及略图。

年度巡视检查报告和应急巡视检查报告应包含的内容如下：

1. 检查日期。
2. 检查的目的和任务。
3. 检查组参加人员名单及其职务。
4. 对规定项目的检查结果（包括文字记录、略图、素描和照片）。
5. 历次检查结果的对比、分析和判断。
6. 不属于规定检查项目的异常情况发现、分析及判断。
7. 必须加以说明的特殊问题。
8. 检查结论（包括对某些检查结论的不一致意见）。
9. 检查组的建议。
10. 检查组成员的签名。

巡视检查中如发现风机（或升压站）存在异常迹象，应分析原因并立即上报，同时对该风机（或升压站）内监测仪器设备进行加密观测。必要时及时增加监测仪器设备或开展专项检查和处理。

5.3 变形与位移监测

变形与位移监测，包括水平位移、竖向位移、基础不均匀沉降、倾斜、间隙等监测项目。

水平位移监测，每台风机宜在基础顶部设置至少1个监测点；每座升压站宜在上部组块最上层平台四周设置4个监测点，监测点宜布置在组块结构柱位置上。

竖向位移监测，单桩（柱）基础，每台风机宜在基础顶部设置至少1个监测点；多桩及导管架基础，每台风机宜在基础顶部均匀设置至少4个监测点；升压站宜在上部组块最上层平台均匀设置4个监测点，监测点宜布置在组块结构柱位置上。

基础不均匀沉降监测，每台风机应在基础顶部设置至少1组监测点。多桩承台及导管架基础的不均匀沉降量，也可通过观测竖向位移监测点之间高程差的变化量来计算。升压站结构的整体不均匀沉降量，也可通过观测竖向位移监测点之间高程差的变化量来计算。

倾斜监测，每台风机应在基础顶部及塔架顶部各设置1组监测点。重点监测风机（如基础和塔架采用分段组装的结构形式），宜分段监测基础和塔架不同高程处组件的倾斜。升压站结构宜分段监测基础和上部组块不同高程处的倾斜。

间隙监测，宜根据需要在重要间隙上设置至少2个监测点，监测间隙的开合度。

变形与位移监测频率，可参考表5.4确定。

表5.4 变形与位移监测频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 监测项目 | 基建期 | 运营期 |
| 水平位移 | 1次/月 | 1次/季度 |
| 竖向位移 | 1次/月 | 1次/季度 |
| 基础不均匀沉降 | 1次/周 | 1次/天 |
| 倾斜 | 1次/周 | 1次/小时 |
| 间隙 | 1次/天 | 1次/天 |

5.4 振动监测

振动监测，包括振动加速度、振动速度、振动位移等监测项目。

振动监测点的安装位置，宜安装在结构振动敏感处。

振动加速度监测，每台风机应在基础顶部及塔架顶部各设置1组监测点，监测风机在顺主风向和垂直于主风向上的振动加速度。重点监测风机（如基础和塔架采用分段组装的结构形式），宜分段监测基础和塔架不同高程处组件的振动加速度。升压站结构，宜分段监测下部基础和上部组块不同高程处的主体结构振动加速度。

做振型测试的风机，宜根据所测振型阶数等的要求，在需识别的振型关键点位置布置合适的监测项目，监测点应覆盖结构整体。做振型测试的升压站，宜根据所测振型阶数等的要求，在需识别的振型关键点位置布置合适的监测项目，监测点应覆盖结构整体。

当某一位置需同时监测振动加速度、振动速度、振动位移中的两项或全部监测时，应分别安装相应的传感器，多个传感器宜布置同一个监测点位上。

5.5 力与应力监测

* + 1. 力与应力监测，包括钢结构应力、混凝土应变、钢筋应力、混凝土温度、螺栓应力、土压力、孔隙水压力力、波浪力、冰压力、船舶力等监测项目。
    2. 所在海域首次使用某种风电机组型式或基础结构型式的海上风电场，重点监测风机应监测基础和塔架的外荷载及结构应力。
    3. 钢结构应力监测，主要监测钢结构的轴向应力；在结构复杂或主应力方向不明确的部位，钢结构应力宜进行三向应力监测。钢结构应力监测，应同步监测测点安装部位的温度。。
    4. 混凝土应变、钢筋应力及混凝上温度监测，主要监测钢筋混凝土结构内的混凝土应变、钢筋应力和温度应力：在结构复杂或主应力方向不明确的部位，混凝土应变宜进行三向应变或多向应变监测。
    5. 螺栓应力，主要监测螺栓的轴向应力，宜在重要部位按比例均匀选择10％的螺栓进行监测。
    6. 力与应力监测频率：基建期，应在基础所受上部荷载变化前后各观测1次，且每季度不宜少于1次；运营期，每天不宜少于1次；发生特殊情况或监测数据异常时，监测频率应加密直至实时监测。

5.6 腐蚀监测

* + 1. 腐蚀监测，包括钢结构腐蚀（阴极保护电位）、外加电流、牺牲阳极外形尺寸、牺牲阳极的输出电流、钢筋混凝土腐蚀等监测项目。
    2. 钢结构腐蚀（阴极保护电位）、外加电流、牺牲阳极外形尺寸、牺牲阳极的输出电流等，可参考NB/T 31006《海上风电场钢结构防腐蚀技术标准》、JTS 153-3《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》确定监测位置和监测点数量，宜按比例均匀布置监测点。
    3. 腐蚀监测频率：基建期，每季度不宜少于1次；运营期，每年不宜少于2次；发生特殊情况或监测数据异常时，监测频率应加密。

5.7 环境量监测

* + 1. 环境量监测，包括波浪要素、风速、风向、海流流速、流向、气温、湿度、水温等监测项目。
    2. 应根据风电场运维管理、结构安全评估等的需要，设置环境量监测项目，确定监测点位置和监测点数量。
    3. 环境量监测频率：运营期，环境量宜进行实时监测。

5.8 专项监测

* + 1. 专项监测，包括水下地形冲刷监测、灌浆体、冻融等监测项目。
    2. 应根据工程建设、运维管理、结构安全评估等的需要，设置专项监测项目，确定监测点位置和监测点数量。
    3. 应根据监测目的，合理确定各专项监测项目的监测频率，发生特殊情况或监测数据异常时，监测频率应加密。
    4. 水下地形冲刷监测频率：基建期，宜在基础建成后的1个月、3个月和半年内对海床水平、局部冲刷和侵蚀防护情况进行至少一次监测；运营期，在强海潮期后宜进行监测，且每年不宜少于1次；发生特殊情况或监测数据异常时，监测频率应加密。

1. 监测方法及传感器类型

6.1 一般规定

监测方法的选择，应根据风电机组型式、风电场气象及水文环境、基础结构型式、升压站结构形式、实际运维需要、当地经验和方法适用性等因素综合确定，监测方法应合理易行。

监测方法可分人工方式监测和自动化监测，各监测项目的监测方法可参考表6.1进行选择。

表6.1 监测方法选择

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 监测类别 | 监测项目 | 监测方法 | |
| 基建期 | 运营期 |
| 一 | 巡视检查 | 日常巡视检查 | 人工方式 | 以自动化监测为主（摄像机、烟雾报警器等），以人工方式为辅 |
| 年度巡视检查 | 人工方式 | |
| 应急巡视检查 | 人工方式 | |
| 二 | 变形与位移监测 | 水平位移 | 人工方式：位移点+GNSS接收机 | |
| 竖向位移 | 人工方式：位移点+GNSS接收机 | |
| 基础不均匀沉降 | 人工方式：①水平倾角仪+读数仪；②水准点+水准仪 | 自动化监测：水平倾角仪+数据采集装置 |
| 倾斜 | 人工方式：①倾斜仪+读数仪；②激光垂线仪 | 自动化监测：倾斜仪+数据采集装置 |
| 间隙 | 人工方式：钢直尺、游标卡尺、塞尺 | 自动化监测：①测缝计+数据采集装置；②摄像机 |
| 三 | 振动监测 | 振动加速度 | 人工方式：加速度计+读数仪 | 自动化监测：加速度计+数据采集装置 |
| 振动速度 | 人工方式：速度计+读数仪 | 自动化监测：速度计+数据采集装置 |
| 振动位移 | 人工方式：振动位移计+读数仪 | 自动化监测：振动位移计+数据采集装置 |
| 四 | 力与应力监测 | 钢结构应力 | 人工方式：钢板应变计+读数仪 | 自动化监测：钢板应力计+数据采集装置 |
| 混凝土应变 | 人工方式：混凝土应变计+读数仪 | 自动化监测：混凝土应变计+数据采集装置 |
| 钢筋应力 | 人工方式：钢筋应力计+读数仪 | 自动化监测：钢筋应力计+数据采集装置 |
| 混凝土温度 | 人工方式：温度计+读数仪 | 自动化监测：温度计+数据采集装置 |
| 螺栓应力 | 人工方式：应力计+读数仪 | 自动化监测：应力计+数据采集装置 |
| 土压力 | 人工方式：土压力计+读数仪 | 自动化监测：土压力计+数据采集装置 |
| 波浪力 | 人工方式：水压力计+读数仪 | 自动化监测：水压力计+数据采集装置 |
| 孔隙水压力 | 人工方式：孔隙水压力计+读数仪 | 自动化监测：孔隙水压力计+数据采集装置 |
| 冰压力 | 人工方式：压力计、应变计+读数仪 | 自动化监测：压力计、应变计+数据采集装置 |
| 船舶力 | 人工方式：应变计+读数仪 | 自动化监测：应变计+数据采集装置 |
| 五 | 腐蚀监测 | 钢结构腐蚀（阴极保护电位） | 人工方式：参比电极+万用表 | 自动化监测：参比电极+数据采集装置 |
| 外加电流 | 人工方式：万用表 | 自动化监测：数据采集装置 |
| 牺牲阳极外形尺寸 | 人工方式：水下探摸、摄像 | |
| 牺牲阳极的输出电流 | 人工方式：万用表 | 自动化监测：数据采集装置 |
| 钢筋混凝土腐蚀 | 人工方式：回弹、炭化深度检查 | 自动化监测：混凝土腐蚀传感器+数据采集装置 |
| 六 | 环境量监测 | 波浪要素 | 自动化监测：波浪综合测试系统 | |
| 风速、风向 | 自动化监测：风速、风向仪+数据采集装置 | |
| 海流流速、流向 | 自动化监测：流速流向仪+数据采集装置 | |
| 气温、湿度、水温 | 自动化监测：温度计、湿度计+数据采集装置 | |

专项监测和临时性监测项目，根据监测目的和监测频率要求，合理确定监测方式。

所有人工巡视和监测的数据、异常情况及成果报告，在确认无误后48小时内全部录入到监测数据库中。

水平位移和竖向位移的测量误差，宜在预计最大变化量的1/10以内；其余监测项目的测量误差，宜在预计最大变化量的1/20以内。

水平位移和竖向位移的基准网，宜与工程控制网坐标系统保持一致，应在正式观测前3个月建造完成。

传感器安装（埋设）后，应及时按适当频率观测以便获得基准值。基准值应根据监测点安装位置、被测结构材料的特性、传感器的性能及周围的温度等，宜从安装初期的各次合格的观测值中选定。

为便于监测资料分析，在各分析时段的起点宜加密观测，以确定各分段时段的基准值。

6.2 传感器的选型

* + 1. 传感器应可靠、耐久、实用、有效，力求先进和便于实现自动化监测。当选用新型的监测仪器设备或监测方法时，需对其工作原理、安装工艺和监测方法以及测值分析技术进行必要的论证。
    2. 传感器的技术性能指标，应满足相关规范及工程要求。
    3. 传感器应满足实际使用环境的要求，其使用年限应满足监测持续的时间。
    4. 传感器应在监测期间具有良好的稳定性和抗干扰能力，采集信号的信噪比应满足实际工程需求。
    5. 传感器的性能参数应符合下列要求：

1. 量程宜为预计最大变化范围的1.5倍，宜具有温度补偿功能。
2. 动态传感器的频响范围应为需监测到的结构最大频率的2倍以上。
3. 应具有良好而稳定的线性度，在对结构位移及应变等反应进行监测时需要满足较高的线性 度要求。
4. 应具有良好而稳定的灵敏度和信噪比。
5. 应具有良好而稳定的分辨率，且不应低于被测物理量的最小单位量级。
6. 应具有满足监测要求且足够小的迟滞差值。
7. 应具有良好而稳定的重复性。
8. 测量值的漂移应严格控制。

6.3 监测仪器设备的安装

* + 1. 监测仪器设备的安装、埋设，应在减少对主体工程施工影响的前提下及早进行；主体工程施工过程中应为监测仪器设备安装、埋设和观测提供必要的时间和空间。
    2. 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、数据采集装置与通讯设备的存放位置及电源等。
    3. 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。
  1. 新投运风电机组（或升压站），安装位置为钢结构时，宜采用焊接的方式将传感器安装支座（架）安装在钢结构表面；安装位置为混凝土结构时，宜在混凝土浇筑时将传感器安装支座（架）埋设在混凝土内，或采用膨胀螺栓固定在混凝土表面；安装在钢筋上时，宜采用焊接的方式将传感器安装支座（架）固定在钢筋上。
  2. 己投运风电机组（或升压站），安装位置为钢结构时，宜采用胶粘（或磁吸）的方式将传感器安装支座（架）粘接（或磁吸）在风电机组结构上；安装位置为混凝土结构时，传感器安装支座（架）宜采用膨胀螺栓固定在混凝土表面。
  3. 传感器与安装支座（架）的连接应为刚性连接。
     1. 监测仪器设备安装完成后，及时做好监测仪器的初期测读，并填写监测点基本资料表、绘制电缆走向，存档备查。
     2. 监测仪器设备，应定期进行检查、维护和测试，测读仪表应定期检定或校准，以确保测值的有效性。在条件允许的情况下，宜及早实现自动化监测。
     3. 各监测项目，应根据设计计算成果及类似工程经验，设置合适的预警值。

1. 数据采集、存储与处理
   1. 一般规定

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，数据采集应采用同步采集仪，不宜使用扫描式非采集仪，采集仪的各通道应能连续、同步采集。

动态传感器宜进行实时监测，静态传感器宜进行定期连续监测。

数据的采样频率应能真实反映被测结构的行为和状态。对于动态信号，数据的采样频率应在被测物理量预估最高频率的5倍以上。

配套采集仪应具有存储功能，其存储容量应大于或等于10Gbit，可连续保存数据文件应大于1000个。

动态传感器的数据采集装置，应具有自动触发功能，触发后自动记录、分析和保存监测数据，超过触发阈值的数据应采用触发模式来存储。静态传感器的数据采集装置，可视具体情况设置和调整采集时间间隔。

当同类或不同类数据需要做相关分析（含模态分析）时，所有相关数据应同步采集：否则，可选择伪同步采集或异步采集。

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，可对含噪信号进行降噪处理，以提高信号的倍噪比。

数据远程传输时应以数据包形式等时间间隔地、实时把转换后的原始电压值数据或振动加速度、振动位移、动态倾斜度等数据传输到远程监控室，相连数据包传输时间间隔不宜超过规定值。数据传输的通讯方式应采用标准的TCP/IP协议、UDP协议，数据包山数据包开始标符+数据包编号+数据+数据包结束标符构成。

数据文件的格式建议为标准的txt、dat格式；数据文件的文件头里要包含采集时间间隔、通道数、单位、第1个数据采集时刻等信息。

数据分析处理之前，应正确处理粗差、系统误差、偶然误差等，应正确判断异常数据是由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起，剔除由监测系统自身引起的异常数据。

* 1. 动态监测参数的数据采集与处理

表7.1 动态状态监测参数的采集与处理要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 状态监测参数 | 采样频率 | 数据包传输时间间隔 |
| 振动加速度 | ≥50Hz | ≤2s |
| 振动位移 | ≥10Hz | ≤2s |
| 动态倾斜度 | ≥10Hz | ≤2s |
| 动态应变 | ≥10Hz | ≤2s |
| 风速 | ≥1Hz | ≤2s |

配套的数据远程接收与在线分析软件应满足下述需求：

1. 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，并能够显示或查询各测点的数据时程波形、频谱图；
2. 应能够定时分析出各时间段内各测点的振动加速度峰峰值、均方根值、主频率值等特征值。
   1. 静态监测参数的数据采集与处理

表7.2 静态状态监测参数的采集与处理要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 状态监测参数 | 采样时间间隔 | 数据采集仪的数据备份 | 数据传输 | 数据在线处理 |
| 静态应变值 | ≤2小时 | 全部保存 | 以数据包形式发送，采用标准的TCP/IP、UDP、RS485协议传输 | 存储到数据库、显示不小于1个月内的变化时程图 |
| 腐蚀电位监测值 |

1. 监测系统与监测资料分析
   1. 系统框架

监测系统宜采用分层分布式结构，分为风电机组就地层、风电场层，根据需求可扩展设置集控中心层、集团层面的监控。层间由通信传输网络连接，可与SCADA集成系统，也可单独设立系统。

监测系统就地层应按每台风电机组为一个就地监测单元进行划分，监测设备由各类传感器、数据采集装置、通信设备以及电源模块等附属设备组成，完成风电机组支撑结构状态量信息的自动采集、就地数字化处理、数据存储以及通信等功能。

风电机组支撑结构监测系统应配置一套风电场层设备，包括服务器、工作站及配套网络设备等，实现场内风电机组支撑结构在线监测数据的汇集、分析、存储、监测预警和远程通讯等功能。

风电场层服务器与就地采集装置可通过局域网组网通信。

* 1. 系统功能

风电场层自动化监测系统应能自动连续记录至少5年以上的风电机组支撑结构与升压站结构的监测数据，并配备通用数据库，提供必要的软件工具，对历史数据进行维护、检索、回放、下载、分析等操作。人工监测数据应能及时录入通用数据库。

监测系统应提供必要的远程通信接口，具备与其他平台进行通讯的功能。

监测系统应具备同区域集控中心、集团集控中心融合的能力。

监测系统应能对风电机组支撑结构状态量进行实时显示，并提供预警功能。预警阈值可根据风机机组支撑结构及升压站结构的设计计算成果、运行工况及经验确定。

系统应提供完备的数据分析软件工具，包括但不限于：趋势分析、关联分析、统计分析、频谱分析等。

系统提供的分析工具，能够辅助用户诊断的结构故障至少应包括表8.1所列内容。

表8.1 系统应能诊断的结构故障

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 监测部位 | 故障类型 |
| 1 | 塔架 | 振动异常，倾斜量过大，螺栓松动，结构应力过大 |
| 2 | 基础 | 振动异常，沉降异常，不均匀沉降异常，结构腐蚀速率/保护电位异常，结构应力过大 |
| 3 | 升压站结构 | 振动异常，沉降异常，不均匀沉降异常，结构腐蚀速率/保护电位异常，结构应力过大 |

系统应能自动生成风电机组支撑结构和升压站结构服役状态的评价报告或报表，报告应能反映风电机组支撑结构和升压站结构状态量的数值和变化趋势。

* 1. 监测资料分析

每次仪器监测或现场检查后应及时对原始记录加以检查和整理，并做出初步分析。每年应进行一次监测资料整编。在整理和整编的基础上，应定期进行资料分析。

应建立监测资料数据库或信息管理系统。

资料整理与分析过程中发现异常情况，应立即查找原因，并及时上报。

整编成果应做到项目齐全，考证清楚，数据可靠，方法合理，图表完整，规格统一，说明完备。

在下列时期应进行资料分析，并提交资料分析报告：

1. 完工验收时；
2. 竣工验收时；
3. 安全检查、安全鉴定时；
4. 出现异常或险情状态时；
5. 地震、台风过后或其他极端工况出现时。

**━━━━━━━━━━━**