

风电机组塔筒结构健康状态评估体系研究

王奋汝

国华（河北）新能源有限公司 河北 张家口 075000

摘要：随着科技的不断进步，人们对于能源的依赖逐渐加深，以及风电系统的蓬勃发展，陆上风电机组塔筒结构的应用愈发的广泛。而当代塔筒健康评估存在几大面临的难题，一是多源监测数据冲突，二是小样本损伤数据缺失，三是评估结果和运维脱节。而本文对这些问题针对性的给出解决方案和处理方法。并提出了健康评估体系的建立方法，同时也指出了层次分级法和数据驱动法两个健康评估的方法。

关键词：风电机组；健康评估；塔筒结构

1 引言

在国家“双碳”目标的推动下，全球风电产业进入了高速发展的时期。根据全球风能理事会（GWEC）2024年数据截至2023年底，全球风电累计装机容量已突破1100GW，中国以410GW的装机量位居全球首位占比超37%。作为风电机组的“支撑骨架”，塔筒需长期承载多重复杂载荷：一方面要承受机组自身的轴向重量。另一方面需抵御风载荷带来的横向推力与扭矩，极端工况下（如12级以上阵风）塔筒局部应力可超材料屈服强度的80%。

同时，陆上风电机组塔筒结构受环境影响很大，内陆高海拔风电场会遇到低温冻融、强紫外老化的问题。陆地多风沙地带会发生沙尘磨损的现象，时间久了会导致塔筒因法兰焊缝、筒壁拼接等部位发生疲劳裂纹(高原塔筒重要风险部位)、塔筒材料腐蚀减薄、塔筒螺栓松动以及塔筒基础沉降等。根据中国风电运维协会 2022-2023 统计数据：全球有塔筒结构失效导致的风电场机组停机事故案例超过 120起，一次风电场塔筒结构风机停机事件平均花费在500万元以上，个别严重的甚至导致塔筒坍塌破坏设备及人员生命危险，所以科学建立塔筒结构故障预警是保障风电安全稳定运行的根本保证。

2 陆上风电机组塔筒的机理

塔筒是风电机组“塔架-基础”承载系统的核心，塔筒需要满足强度、刚度、稳定性三个方面的要求。当前的风电机组塔筒主要以钢制锥形塔筒和混凝土塔筒两种为主，但这两种类型的塔筒结构也存在差异性和共性

2.1 钢制锥形塔筒

钢制锥形塔筒适用于1.5MW-8MW的陆上机组，单端高度在15到30m。这些单端通过法兰螺栓连接成为一个整体，钢制锥形塔筒的整体高度在60到120m，其核心的组成部分主要分为筒壁、法兰、内部附件3部分。

筒壁采用低合金高强度钢卷拼制焊接而成，锥度在3%-5%（从底部到塔筒的顶部直径组件减小，底部的直径大概为3-5m，顶部直径在1.5-2.5m），这样的结构设计既能降低风阻，又能通过锥形“下粗上细”的结构特点优化材料的分布。法兰设置在每端塔筒的上下端，采用锻钢材质（这种材质一般比筒壁的强度更高），通过环形焊缝与筒壁连接，法兰面上开有直径24-27mm的螺栓孔，是塔筒拼接的核心受力部分。内部附件主要包括爬梯，平台，电缆支架等，而在一些大型的塔筒结构中有的还会通过运用到电梯组来提高设施的便利性。

2.2 混凝土塔筒

混凝土塔筒分为全混凝土塔筒和钢混混合塔筒两类，两种类型相比，全混凝土更适合海上机组的使用，而后者更适合陆上的高容量机组（底部为30-50m的混凝土，顶部为钢制塔筒）。

筒壁采用密实混凝土浇筑，内壁设有由纵向钢筋和环形箍筋组成的钢筋骨架，部分塔筒会在混凝土表面涂上防腐涂层。在连接部分，全混凝土塔筒通过分段浇筑和预应力张拉的方法连接，每段的浇筑高度在20-30m，通过使用体内的预应力钢束张拉固定。钢混混合塔筒则是通过混凝土段顶部法兰和钢制段底部法兰螺栓连接，与钢制塔筒相比，混凝土塔筒抗沉降能力更好，整体刚度更高。

3 风电机组塔筒结构损伤类型

塔筒的损伤是由环境作用、载荷效应、材料和结构缺陷等多种因素共同作用的结果。而不同的损伤类型的诱发因素和影响效果也各不相同，演化路径存在明显的差异化。

3.1 材料损伤

材料损伤主要发生在钢制塔筒，主要表现在钢材腐蚀和疲劳裂纹。钢材腐蚀的本质是化学腐电化学反应。对于

大陆山地的风电机组塔筒来说,受到的大气腐蚀偏多。这是由于内陆地区的氧气和水蒸气的氧化腐蚀,但这种腐蚀的速率与位于海上的风电机组塔筒来说要慢很多,氧化速率年均0.05-0.1mm。但部分位于风沙地区的塔筒受到沙尘的影响,会加快对防腐层的破坏,让涂层里面的钢材直接裸露在空气中,间接加快了氧化腐蚀的效率。

3.2 连接结构损伤

结构连接是塔筒的薄弱环节,主要体现在法兰螺栓松动和焊缝开裂。螺栓作为各段塔筒之间法兰的连接构件,其连接的有效性直接决定了塔筒结构的安全稳定性,对风机结构的整体安全稳定运行有重大的影响^[1]。螺栓的预紧力是用于保证塔筒连接紧密性的核心,而螺栓松动的主要原因是因为螺栓的预紧力损失或者超过了设计的阈值(设计时预紧力通常为螺栓屈服强度的60%-70%,而当损失超过20%时即判定为松动)。导致螺栓松动的原因也有很多方面,例如塔筒的横向振动会导致螺栓和螺母之间发生相对滑动,致使两者之间的摩擦力降低,预紧力逐渐损失。温度的变化也会导致钢材与螺栓之间发生“热胀冷缩”的现象,导致螺栓预紧力随温度的波动而产生变化。

筒壁和法兰,筒壁段之间通常是使用焊接的方式相连接,而在焊缝部位也是发生问题的关键区域。若在塔筒制作的过程中出现未焊透,夹渣,气孔等缺陷,就会在这些缺陷处出现“应力集中源”,导致局部应力是其他部位的2-3倍,在交变载荷的作用下率先发生断裂。

3.3 结构基础损伤

基础是塔筒的“承载根基”,结构基础损伤主要表现为混凝土基础的沉降与开裂。混合塔筒基础在复杂地质条件下施工困难重重。在软土地质区域,基础沉降问题频发。^[2]基础沉降分为“均匀沉降”和“不均匀沉降”,这两种沉降方式相比,均匀沉降为整体下沉相对影响较小而后者的影响更加严重。陆上风电基础多建于黄土、软土或回填土地质,这类土壤的压缩性高,在长期轴向载荷(1500-3000kN)的作用下,土壤颗粒会逐渐压实,导致基础均匀下沉(年均沉降量5-10mm)。若基础下方存在局部空洞(如地下水位下降导致土壤流失)或“地质分层不均”(一侧为硬岩、一侧为软土),则会出现不均匀沉降(两侧沉降差>20mm),使塔筒产生“倾斜”,进一步加剧筒壁应力。基础浇筑后若养护不当(如浇水不及时、环境温度过高),混凝土表面水分快速蒸发,内部水分补给不足,会产生“表面收缩应力”,当应力超过混凝土抗拉强度(C50混凝土抗拉强度约3.5MPa)时,会出现“表面网状裂缝”(宽度<

0.1mm),虽早期影响较小,但会成为后期腐蚀介质(如雨水、Cl⁻)侵入的“通道”。

4 健康状态评估指标体系建构

风电机组塔筒健康状态评估指标体系为从监测数据到健康结论,依据塔筒本身特点和损伤机理展开,在兼顾“科学可量化”与“工程易实施”的基础上,通过对材料、连接、基础等不同部位重要程度的不同划分,来实现覆盖指标。因此需要先确定指标选取的基本原则,进而对核心指标分类进行设计。

4.1 指标选择原理

正确合理地选择指标对评价结果的准确性、适用性起着重要的影响作用,为使其准确、可靠和可操作性要遵守以下三方面准则:一是科学性;二是实用性;三是完整性。既要符合理论逻辑又要考虑风电现场的实际监测条件。

科学性的实质是指要体现塔筒损伤的本质,使得指标可量化并可追溯,和塔筒的损伤相对应。比如“筒壁应变值”对应结构受力状态,“钢材的腐蚀速率”对应材料劣化程度;所有相关的数据均可以通过材料力学、结构力学等相关学科的理论解释它对塔筒健康的影响。所有的指标均应为可以量化的数值。比如对于腐蚀速率要表达出精确的数值(如腐蚀速率0.08mm/年,振动幅值0.1mm),而不能是笼统模糊的概念性描述。另外指标监测与计算方法应当具有明确标准,例如法兰螺栓预紧力需采用《风电法兰连接技术规范》中的扭矩—预紧力换算公式计算,防止因为不同的技术方法产生不一样数据结果的情况。而根据不同地区的风电机组塔筒的特殊要求,指标需结合风电场现有监测设备与运维能力,避免理论可行但现场难落实。“基础沉降量”可通过全站仪远程测量,无需人员进入基础内部。“腐蚀速率”可通过预埋腐蚀探头自动采集数据,减少人工巡检频次。指标监测的设备购置、安装与维护成本需在风电场预算范围内。

4.2 核心评估指标

基于上述原则,结合塔筒损伤机理,核心评估指标可分为静态特性指标、动态特性指标、材料性能指标三大类,各类指标的“监测/计算方式”“健康阈值”“评估意义”明确。

静态指标主要包括筒壁应变值,基础沉降量,法兰螺栓预紧力,焊缝开裂宽度。混凝土环片作为塔筒最基本的安装单元,其自身的质量直接影响着整个混凝土塔架的安装质量,^[3]在塔筒的中上部、底部或其他应力集中处严格布设有应变传感器,实时采集轴向和环向的应

变数据。而法兰螺栓在安装时要选择智能螺栓,即内部带有传感器的螺栓并定期用扭矩扳手监测预紧力的损伤率。而动态特性指标主要包括固有频率,振动幅度,模态阻尼比。固有频率反应了塔筒整体刚度,固有频率通常下降是因为材料损伤或者连接松动导致的刚度降低。而振动赋值反映了动态载荷的作用强度,例如风湍流,叶片振动等。正常的横向振动幅值一般小于等于0.1mm(RMS),当幅值大于0.2mm(RMS)时塔筒就处于严格危险的状态。材料性能指标包括钢材的腐蚀速率,筒壁壁厚减薄以及疲劳裂纹的长度。对于刚才的腐蚀速率通常采用安装腐蚀探头的方法,通过计算电阻的变化换算出腐蚀的速率。陆地上的风电机组塔筒的正常腐蚀速率一年应该小于0.1mm,腐蚀速率大于0.15mm/年则是处于危险的情况。而疲劳裂纹的宽度反映了在交变载荷下的疲劳损伤累积,裂纹的长度超过危险值(表面5mm,内部3mm)时更加容易引发筒壁的突发性断裂。

4.3 指标体系的动态优化

核心评估指标并不是一尘不变的,评估指标需要结合风电场的实际运行情况采取动态优化,对不同的环境采用不同的指标,对特殊的场景补充指标。例如高海拔风场增加“低温下钢材脆性指标”而多沙尘地区增加“筒壁磨损量指标”。有关部门也应该基于历史评估数据,剔除“冗余指标”(如与其他指标高度相关的参数),增加高敏感性的指标。相关部门也要随着风电行业标准(如GB/T 19073《风力发电机组 塔架》)的更新,同步调整指标阈值。通过指标的动态优化,指标体系可以一直保持在应该全面,实用,精准的程度,为陆上风电机组塔筒的健康状态评估提供更加可靠的数据来源。

5 健康状态评估方法

5.1 层次分析法

核心原理是利用“分解-对比-计算-检验”四个步骤将塔筒健康评估拆分成健康等级输出的目标层,材料、连接和基础状态的准则层,腐蚀速率,基础沉降量等的指标层。通过专家在同层级之间重要指标的两两对比,构建判断矩阵并计算各指标的权重系数。层次分析法适合评估体系缺乏历史监测数据的初建阶段,或者没有成

熟评估标准的新型塔筒机型。但是这种方法权重依赖于专家的主观判断,但若是专家领域背景差异大或文化水平程度不一,容易导致权重偏差,而且不能实时的监测塔筒的数据。

5.2 数据驱动法

随着现代塔筒监测技术的日益进步和升级,机器学习的数据驱动方法已经成为了当前时代的主流方法。这种健康评估方法的核心优势在于不需要依靠主观的经验,仅通过历史数据训练模型,从而实现损伤识别与健康等级的自动分类。这种方法的应用在很大程度上提升了健康评估的客观性和实时性,非常适合大规模风场的评估需求。而数据驱动法主要通过采集“正常状态”与“不同损伤状态”的塔筒监测数据(如应变、振动、腐蚀数据),构建标注数据集来训练机器学习模型,让模型学习“数据特征与健康状态”的映射关系。最后再输入实时监测的数据,模型就可以自动输出损伤类型和健康等级。

6 结束语

本文研究围绕风电机组塔筒结构健康状态评估的核心需求,通过理论分析、体系构建与实例验证,形成了系统性研究成果,通过梳理钢制、混凝土塔筒的结构特性与受力特点,明确了塔筒的三类典型损伤机理,为评估指标选取提供了理论依据,避免了指标与损伤本质脱节的问题。构建了健康状态评估体系并提出了健康评估的方法。在未来的发展中仍然需要结合风电行业的发展方向并结合物联网技术并融合多源数据(如气象、运维记录)提升评估精度,探索数字孪生技术在塔筒健康评估中的应用。

参考文献

- [1]高光一,张学森,吕晰,等. L型法兰螺栓在偏心振动下的松动机理研究[J/OL].工业建筑,1-12[2025-08-23].
- [2]张春生. 陆上风电机组混合塔筒施工技术及质量控制要点研究[J].电力设备管理,2025,(09):212-214.
- [3]孙健. 陆上风电机组钢-混凝土混合塔架安装技术与质量控制[J].建设监理,2024,(10):90-94.