

风电塔架结构稳定性分析及其优化策略

李佳璠

中国华电科工集团有限公司 北京 100160

摘要：文章围绕风电塔架结构稳定性展开研究，先阐述桁架式、圆筒式和拉索式三种结构形式及其力学特性，再分析静力、动力、疲劳稳定性分析方法。深入探讨材料特性、几何形状、荷载条件和环境因素对稳定性的影响，并针对性提出优化设计目标，从结构参数、材料、连接方式等方面给出优化策略，为风电塔架设计与维护提供理论参考。

关键词：风电塔架；结构稳定性；优化策略

1 风电塔架结构类型与力学特性

1.1 塔架结构形式

风电塔架作为风力发电机组的核心支撑部件，其结构形式直接影响机组性能与可靠性，主要分为桁架式、圆筒式和拉索式三种类型。桁架式塔架采用空间桁架结构，由弦杆与腹杆通过节点连接，利用三角形稳定性原理，在保障强度的同时减轻重量。弦杆承受轴向力，腹杆抵御侧向力，具有耗材少、运输安装便捷的优势，适用于复杂地形；但风阻大，复杂结构易积灰积水，导致腐蚀风险与维护成本增加^[1]。圆筒式塔架是应用最广的类型，分为锥筒式和圆柱式。锥筒式底部到顶部直径递减，符合力学原理且便于运输安装；圆柱式制造工艺简单。圆筒式表面光滑，风阻系数低，密封性好，内部可布置设备，利于维护；不过钢材用量大，制造成本较高。拉索式塔架通过顶部拉索与地面锚点相连增强稳定性，在降低自重和成本上优势显著，适合高塔。但对地基要求严苛，拉索易松弛、腐蚀，需定期检查调整，维护复杂。

1.2 塔架力学特性

风电塔架运行时承受多种复杂荷载，其力学特性体现在荷载响应与自身性能两方面。荷载方面，风荷载影响最为突出。风的随机脉动使塔架产生顺风向静、动力荷载，静力导致弯曲变形，脉动引发振动，频率接近自振频率时易共振致结构破坏。另外，还有重力荷载与地震荷载，前者产生轴向压力，后者以水平和竖向力加剧受力复杂性。力学性能上，塔架需具备良好强度、刚度与稳定性。强度要求在荷载组合下材料应力不超许用应力，避免断裂；刚度确保变形可控，防止因变形过大影响机组运行，如叶片与塔架碰撞；稳定性关乎塔架平衡，细长结构若稳定性不足，易屈曲失稳，造成整体倒塌，因此在设计与运行中需重点考量。

2 风电塔架结构稳定性分析方法

2.1 静力稳定性分析

静力稳定性分析主要研究风电塔架在静力荷载作用下的平衡状态及稳定性。常用的方法包括线性分析和非线性分析。线性分析基于小变形假设，认为结构的应力-应变关系服从胡克定律，结构的变形与荷载呈线性关系。在进行线性静力稳定性分析时，通常采用有限元方法，将塔架结构离散为众多单元，通过求解线性方程组来计算结构的应力、应变和位移。线性分析方法计算效率高，适用于结构在弹性阶段、变形较小的情况，能够快速得到塔架在静力荷载作用下的基本力学响应，为初步设计提供参考。但它无法考虑结构的几何非线性和材料非线性，对于接近临界荷载或变形较大的情况，计算结果的准确性会受到影响。非线性分析则能够更真实地模拟结构的实际受力情况。它考虑了结构的几何非线性（如大变形、大转动引起的非线性效应）和材料非线性（如材料的塑性、弹塑性行为）。在几何非线性分析中，随着结构变形的增大，结构的几何形状发生改变，从而导致结构的刚度矩阵发生变化，这种变化反过来又影响结构的受力状态。材料非线性分析则关注材料在超过弹性极限后的力学性能变化，通过建立合适的本构模型来描述材料的塑性变形过程。非线性静力稳定性分析能够准确地预测结构的屈曲荷载和失稳模式，但计算过程复杂，对计算机硬件要求较高，计算时间较长。

2.2 动力稳定性分析

风电塔架在运行过程中会受到风荷载、地震荷载等动力荷载的作用，动力稳定性分析旨在研究塔架在这些随时间变化的荷载作用下的动态响应和稳定性。时域分析是动力稳定性分析的常用方法之一，它直接在时间域内求解结构的运动方程，能够精确地描述结构在动力荷载作用下的整个响应过程，包括位移、速度、加速度随时间的变化。常用的时域分析方法有Newmark法、Wilson- θ 法等。这些方法通过逐步积分的方式，将时间划

分为多个微小的时间步,在每个时间步内求解结构的动力响应。时域分析可以考虑各种非线性因素和复杂的荷载时程,适用于分析地震等具有不规则波形的动力荷载作用下塔架的响应,但计算量较大。频域分析则是将结构的动力响应从时间域转换到频率域进行分析。通过对结构进行模态分析,得到结构的固有频率和振型,然后根据动力荷载的频谱特性,分析结构在不同频率下的响应情况^[2]。频域分析方法计算效率较高,能够快速评估结构在简谐荷载或具有特定频率成分的动力荷载作用下的响应,但它对复杂非线性问题的处理能力相对较弱,且难以考虑非平稳荷载的影响。

2.3 疲劳稳定性分析

风电塔架长期在交变荷载作用下运行,疲劳破坏是其主要的失效形式之一。目前,常用的疲劳分析方法有应力-寿命(S-N)法和应变-寿命(ϵ -N)法。应力-寿命法基于材料的S-N曲线,该曲线描述了材料在不同应力水平下的疲劳寿命。通过计算塔架关键部位在交变荷载作用下的应力幅,结合S-N曲线,可以预测结构的疲劳寿命。应力-寿命法适用于高周疲劳问题,即应力水平较低、循环次数较多的情况,在风电塔架的初步设计阶段应用较为广泛。应变-寿命法则考虑了材料的塑性变形,更适用于低周疲劳问题,即应力水平较高、循环次数较少但伴有较大塑性变形的情况。应变-寿命法通过建立材料的应变-寿命关系,结合局部应力应变分析,来评估结构的疲劳寿命。在风电塔架中,一些应力集中部位或存在焊接缺陷的区域容易出现低周疲劳问题,此时采用应变-寿命法能够更准确地预测疲劳寿命,还有基于断裂力学的疲劳分析方法,它从裂纹扩展的角度研究结构的疲劳性能,对于分析含有初始缺陷的结构疲劳寿命具有重要意义。

3 风电塔架结构稳定性影响因素

3.1 材料特性对稳定性的影响

材料的力学性能和物理特性对风电塔架的稳定性起着决定性作用。首先,材料的强度直接关系到塔架的承载能力。高强度钢材能够在相同截面尺寸下承受更大的荷载,从而可以减小塔架的构件尺寸,降低结构自重。但高强度钢材的韧性和可焊性可能相对较差,在焊接过程中容易产生裂纹等缺陷,影响结构的整体稳定性。材料的弹性模量决定了结构的刚度,弹性模量越大,在相同荷载作用下结构的变形越小,有利于保证塔架的稳定性。然而,材料的弹性模量在一定程度上是由其化学成分和微观组织结构决定的,改变材料的弹性模量往往需要对材料进行特殊处理,这会增加成本。材料的疲劳性

能也是影响塔架稳定性的重要因素。具有良好疲劳性能的材料能够承受更多次数的交变荷载作用而不发生疲劳破坏,延长塔架的使用寿命。

3.2 几何形状与尺寸参数的影响

风电塔架的几何形状和尺寸参数对其稳定性有着显著影响。从几何形状来看,塔架的高宽比是一个关键参数。高宽比越大,塔架的细长比越大,结构的稳定性越差,越容易发生屈曲失稳。塔架的截面形状也会影响其稳定性。圆形截面具有各向同性的特点,在风荷载作用下,其风阻系数小,受力均匀,稳定性较好;而矩形等非圆形截面在不同方向上的力学性能存在差异,容易在某些方向上产生较大的变形和应力集中。塔架的壁厚对稳定性也有重要影响。适当增加壁厚可以提高塔架的局部稳定性和整体刚度,但会增加钢材用量和成本。

3.3 荷载条件的影响

荷载条件是影响风电塔架稳定性的重要外部因素。风荷载的大小、方向和特性直接决定了塔架的受力状态。强风作用下,塔架会承受巨大的水平荷载和弯矩,可能导致塔架发生弯曲变形甚至失稳破坏。此外,风的湍流特性会引起塔架的振动,增加结构的疲劳损伤。重力荷载主要由塔架自身重量和机组设备重量组成,它使塔架产生轴向压力。过大的重力荷载会增加塔架底部的轴力,降低结构的稳定性。地震荷载具有突发性和随机性,其产生的水平力和竖向力会对塔架造成强烈冲击,可能引发塔架的共振或局部破坏。不同地区的地震烈度和频谱特性不同,对塔架稳定性的影响也不同,在设计时需要根据当地的地震参数进行合理的抗震设计^[3]。

3.4 环境因素的影响

环境因素对风电塔架的稳定性有着不可忽视的作用。温度变化会导致材料的热胀冷缩,在塔架结构中产生温度应力。当温度变化较大时,温度应力可能会超过材料的许用应力,导致结构破坏。温度变化还会影响材料的力学性能,如钢材在低温下的韧性会降低,容易发生脆性断裂。湿度和腐蚀环境会加速塔架钢材的腐蚀。长期处于潮湿环境或含有腐蚀性介质(如盐雾、酸雨等)的区域,钢材表面会发生电化学腐蚀,导致构件截面减小,承载能力下降,进而影响塔架的稳定性。风沙、冰雹等自然现象也会对塔架表面造成磨损和冲击,削弱塔架的结构性能。

4 风电塔架结构优化策略

4.1 优化设计目标

风电塔架结构优化设计的目标是在保证结构安全性和可靠性的前提下,实现经济性、轻量化和环保性的统

一。安全性是首要目标,要求塔架在各种荷载工况和环境条件下都能保持稳定,不发生破坏或失稳现象,确保风力发电机组的正常运行和人员安全。经济性目标旨在降低塔架的全生命周期成本,包括材料成本、制造成本、运输成本、安装成本和维护成本等。通过优化设计,减少钢材用量、简化制造工艺、降低运输和安装难度,可以有效降低成本。轻量化设计不仅能够减少钢材消耗,降低成本,还能减轻塔架自身重量,减小基础荷载,进一步降低建设成本。轻量化设计有利于提高塔架的运输和安装效率。环保性目标则要求在塔架设计和制造过程中,尽量采用环保材料和工艺,减少能源消耗和废弃物排放,降低对环境的影响。

4.2 结构参数优化

结构参数优化是风电塔架优化设计的核心环节,对提升结构性能、降低成本有着关键作用。通过对塔架几何形状和尺寸参数的精细化调整,能够在保障稳定性的同时实现经济效益最大化。在几何形状优化方面,变截面设计成为主流趋势。塔架底部是承载的关键区域,承受着上部机组设备和自身重量带来的巨大弯矩与轴力,适当增大底部截面尺寸,可有效增强承载能力,分散应力集中;而顶部受力相对较小,减小截面尺寸既能减轻结构重量,又不影响整体稳定性。例如,某海上风电项目采用变截面设计后,塔架重量降低约15%,同时满足了复杂海洋环境下的承载需求。对于尺寸参数优化,需综合权衡强度、刚度和稳定性要求。利用有限元分析软件对不同尺寸方案进行力学性能模拟,结合遗传算法、粒子群算法等智能优化算法,可快速筛选出最优的构件尺寸组合。此外,对塔架支撑形式和连接节点的优化同样重要。合理设计支撑形式,如增加斜撑或改变支撑角度,能有效提升结构抗侧移能力;优化连接节点的构造细节,可减少应力集中,增强结构整体协同工作性能,进一步提升塔架的可靠性和使用寿命。

4.3 材料优化

材料优化是提升风电塔架性能的关键环节。一方面,可以选择高性能的新型材料,如高强度、高韧性的钢材,这些材料能够在保证结构安全性的前提下,减小构件尺寸,降低结构重量。另一方面,对现有材料进行表面处理和改性,也是提高材料性能的有效途径。通过

热浸镀锌、喷涂防腐涂料等表面处理工艺,可以增强钢材的防腐性能,延长塔架的使用寿命。还可以研究和应用复合材料,如碳纤维增强复合材料,其具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点,有望在风电塔架中得到广泛应用,为塔架的轻量化设计提供新的思路。

4.4 连接方式优化

连接方式的优化对风电塔架的结构性能和稳定性有着重要影响。传统的焊接连接方式虽然能够保证结构的整体性,但焊接过程中容易产生焊接应力和变形,还可能出现焊接缺陷,影响结构的可靠性。因此,可以采用新型的连接方式,如高强度螺栓连接。高强度螺栓连接具有施工方便、可拆卸、便于维护等优点,能够有效减少焊接缺陷的影响,提高结构的可靠性和可维护性^[4]。在节点设计方面,需要优化节点的构造形式,确保节点具有足够的强度和刚度,能够有效地传递荷载。例如,采用合理的节点板形状和尺寸,加强节点区域的局部刚度,避免出现应力集中现象。另外,还可以研究和应用智能连接技术,通过在连接部位安装传感器,实时监测连接部位的受力状态和损伤情况,为塔架的维护和管理提供数据支持。

结束语

综上所述,风电塔架结构稳定性关乎风力发电系统安全运行与经济效益。本文系统分析其结构类型、力学特性、稳定性影响因素及优化策略。未来,随着风电技术发展,需进一步结合新材料、新技术,深化对复杂环境下塔架稳定性研究,持续优化设计方案,推动风电产业向高效、安全、环保方向迈进。

参考文献

- [1]齐涛,邓然,向宇,等.海上风电机组预应力复材双壁塔架结构分析与设计[J].科学技术与工程,2025,25(7):2886-2896.
- [2]宋恭杰,裴慧杰,何先照,等.不同结构形式对风电机组塔架轻量化设计的影响研究[J].机电工程,2021,38(2):250-255.
- [3]纪田亮.陆上风电混塔塔架结构混凝土管片拼接技术研究[J].建筑工程技术与设计,2025,13(10):61-63.
- [4]王宇航,周绪红,杨琳,等.风电机组支撑结构技术发展现状及趋势[J].钢结构(中英文),2024,39(10):1-13.