

单轴跟踪系统支架在不同风荷载条件下的稳定性分析

蒋哲浩

(浙江浙能华光潭水力发电有限公司, 浙江省杭州市, 310007; 492829442@qq.com)

摘 要: 为了研究单轴跟踪系统支架在不同风荷载条件下的稳定性, 本研究结合风荷载关键因素, 建立支架结构的力学模型, 探讨风致失稳机理。通过有限元模拟, 分析不同载荷与边界条件下支架的受力特点与稳定性表现。结果表明, 支架的稳定性受风荷载方向与大小的显著影响; 优化结构设计和选用合理的抗风措施可有效提高系统稳定性。

关键词: 单轴跟踪系统; 风荷载; 有限元模拟

引言

单轴跟踪系统广泛应用于光伏发电领域, 其支架设计的稳定性直接影响系统性能和使用寿命。由于风荷载的随机性和复杂性, 支架在风作用下易产生失稳现象, 尤其是在强风条件下, 存在安全隐患。现有研究多集中于单一条件的静态分析, 缺乏对实际复杂风荷载环境的全面评估。

1. 单轴跟踪系统与风荷载基础

1.1. 单轴跟踪系统概述

单轴跟踪系统是光伏发电中的关键技术之一, 通过使光伏组件沿单一旋转轴跟随太阳的运动轨迹, 从而提高光能利用效率。其结构包括支架系统、跟踪驱动系统和控制系统。支架通常由钢材或铝材制成, 具备承载光伏组件、抗风能力以及旋转灵活性等特性。相较固定支架, 单轴跟踪系统可使光伏发电效率提升约 15%-25%。以某典型项目为例, 在年均光照资源约 1200 小时的地区, 采用单轴跟踪系统的光伏电站发电量由常规固定支架的 8 万千瓦时提高到 10 万千瓦时, 增幅达 22.7%。但由于系统结构较复杂, 尤其是支架的动态运动特性, 使其在风荷载作用下的稳定性成为一个重要挑战, 需要深入研究和优化设计。如图 1 所示。

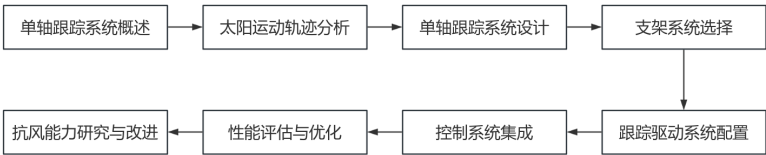


图1 单轴跟踪系统

1.2. 风荷载的关键因素

风荷载是单轴跟踪系统设计中必须重点考虑的环境负荷, 其主要影响因素包括风速、风向、湍流强度和风场分布特性。根据《建筑结构荷载规范》, 常规设计风速为 25-35 m/s, 极端天气条件下局部地区可达 50 m/s 甚至更高。风荷载的大小与光伏组件的迎风面积和倾斜角度密切相关。例如, 在风速 30 m/s、倾角 30° 时, 风荷载为 820 N/m²; 当倾角增至 45° 时, 风荷载增至 1200 N/m²。湍流强度波动性对结构动态响应影响显著, 高湍流强度可能引发支架结构振动和疲劳失效。在湍流强度 15%、风速 35 m/s 条件下, 支架可能在 10 分钟内因螺栓疲劳断裂而失稳。

2. 力学模型与稳定性理论

2.1. 支架结构受力特点

单轴跟踪系统支架的受力特点由光伏组件的自重、风荷载和运行动力荷载共同决定。自重引起的重力作用通常均匀分布，例如，每块光伏组件重量为20-25kg，每平方米支架需承载约100-125 N/m²的重力。风荷载是最显著的动态外力，其作用方式包括正压力、负压力和剪切力，且随风速和倾斜角度的变化而波动。例如，在风速25 m/s、组件倾角20°时，支架承受的正压力为600 N/m²，剪切力为150 N/m²；当风速升至40 m/s时，这两项数值分别增至1500 N/m²和380 N/m²。在不同风速条件下，组件最佳倾角通常在20°至30°之间，这样可以有效平衡发电效率与结构稳定性。运行过程中，跟踪系统的动态调整会引入惯性力和阻尼力，在频繁切换负载方向时，可能导致局部疲劳或整体失稳 [1]。

2.2. 风致失稳机理

风致失稳是单轴跟踪系统支架稳定性分析中的重要问题，主要表现为抖振失稳和颤振失稳两种形式。抖振失稳通常由湍流引起，风速不均匀导致支架结构的局部振动不断累积，最终超过材料强度或连接点承载能力。例如，某支架系统在湍流强度15%、风速35 m/s条件下发生连接螺栓疲劳断裂，破坏时间仅为10分钟。颤振失稳是由于风与支架的耦合作用导致的动力不稳定现象，当风速接近支架的固有频率时，颤振失稳的风险显著增加。实验表明，在风速30 m/s、频率3 Hz的条件下，支架的最大振幅达到25 cm，远超安全设计值的5 cm [2]。

3. 数值模拟与分析方法

3.1. 有限元模型建立

有限元模型是分析单轴跟踪系统支架稳定性的基础工具，通过将复杂结构离散化为有限的单元网格，实现对支架力学性能的精准模拟。根据支架的实际几何结构，建立三维实体模型，包括主梁、横梁、连接件和支撑柱等关键部件。选用线性弹性材料模型，常见的支架材料如Q235钢的弹性模量为210 GPa，泊松比为0.3。为了提高计算效率，采用壳单元模拟薄壁部件，并设置网格尺寸为20mm，以平衡精度与计算成本 [3]。

在模型验证过程中，实验数据是重要依据。例如，将数值模拟结果与风洞试验结果对比，发现模型预测的最大位移为3.2 mm，与实测值3.5 mm的误差率仅为8.6%。为考虑风荷载的动态变化，还需采用时间步长为0.01s的瞬态分析 [4]。建模时，应特别关注组件与支架间的接触条件，例如滑动摩擦系数取值为0.3，以确保模拟结果真实反映支架的力学行为。如表1所示。

表1 有限元模型参数表

参数	数值	用途
弹性模量 (E)	210 GPa	模拟支架材料的弹性特性
泊松比 (ν)	0.3	确定材料在受力下的横向变形比
滑动摩擦系数	0.3	反映组件与支架间的接触特性

3.2. 载荷与边界条件

载荷和边界条件的设置是数值模拟的关键环节，直接影响分析结果的准确性。风荷载的施加采用分布载荷形式，其大小和方向需依据风速和组件倾角进行调整。例如，在风速30 m/s、组件倾角20°时，施加正压力600 N/m²和剪切力150 N/m²；当倾角增至40°时，正压力和剪切力分别增加至900 N/m²和225 N/m² [5]。

边界条件的选择需体现支架的实际安装情况。例如，支撑柱底部固定，采用全约束边界条件（6个自由度均限制），以模拟地基作用。组件与支架之间的连接设置为铰接，允许一定的旋转自由度，以反映跟踪系统的动态特性。为了进一步验证边界条件的合理性，可以通过对比简化模型与真实支架的受力分布来评估设置的准确性。

4. 结语

通过对单轴跟踪系统支架在不同风荷载条件下的受力与稳定性分析，本研究发现，风荷载的方向、大小及其分布特性是影响支架稳定性的关键因素。有限元模拟结果验证了优化设计对提升抗风能力的有效性，表

明合理设置支架结构参数和边界条件，可显著降低风致失稳风险。建议进一步完善支架设计标准，并在工程实践中加强对风荷载特性与实际工况的研究，为光伏系统的高效运行提供保障。

参考文献

- [1] 张旭东, 张磊, 杨林杰等. 太阳能单轴跟踪结构和控制系统研究 [J]. 电源技术, 2022, 46(9): 1034-1037.
- [2] 郑小帆, 赵磊. 基于嵌入式系统的光伏平单轴跟踪系统设计 [J]. 科技与创新, 2021(24): 100-101.
- [3] 李华, 张宁等. 融合气象数据与历史功率的光伏功率人工智能预测方法 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 256-263.
- [4] 吴昊, 郑涛等. 改进型人工智能模型在大规模光伏电站功率预测中的应用 [J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2785-2792.
- [5] 马文勇, 马成成, 王彩玉等. 光伏阵列风荷载干扰效应风洞试验研究 [J]. 实验流体力学, 2021, 35(4).