

施,重点核查体系的合规性,并形成《外部安全评估报告》。把内外部检查结果结合起来,依据年度目标指标,计算目标达成率,并且借助鱼骨图分析法来追溯未达标的原因,识别出体系存在的漏洞。

2.2.4 改进阶段

在改进阶段,针对检查过程中所发现的各类问题,展开分类整改工作以及进行长效提升,以此形成“检查-改进-验证”的完整闭环。对于短期内可进行整改的问题,会下达《隐患整改通知书》,清晰地明确整改责任人以及完成的具时期限。安监部门会对整改效果进行跟踪验证。针对制度流程存在的缺陷,会组织设备、调度、安监等部门联合修订《跨部门安全协同规程》,新增“紧急情况调度优先响应机制”。面对技术方面的短板,则会联合科研机构对算法给予优化,对预警平台的功能进行升级。改进措施实施之后,会依靠下一季度的内部审计来验证效果,并且将有效的改进经验固化成为标准;同时同步更新风险清单以及目标指标,启动下一轮的PDCA循环,推动体系持续不断地迭代升级^[2]。

3 体系落地实施路径

3.1 试点先行

挑选高风险作业场景来开展体系试点工作,首先会覆盖电气化铁路接触网检修以及长大下坡道运输这类典型场景。在试点进程当中,系统地收集设备状态参数、人员操作行为以及环境影响因素等多方面的数据,构建起试点数据库。建立“周复盘、月优化”机制,针对试点期间所暴露出来的维保周期和实际运行强度不匹配、应急流程关键步骤有所缺失等问题,对《维保规程》《应急处置指引》等相关文件进行修订,以此形成适配现场实际情况的制度版本,为全范围推广积累实证经验。

3.2 全流程保障措施

在人员保障层面,组建了一个专项工作组,其成员由设备管理、安监以及人力资源部门的骨干构成,负责统筹整个体系的落地实施工作。培训工作分层次展开:针对管理层,着重解读体系框架与协同机制,以此保证战略认知可达成统一;针对作业层,开展“理论+实操”培训,只有培训考核通过率达到100%的人员才可以上岗。

在技术保障方面,布置了车载状态监测终端以及数据中台,达成设备运行数据可实时上传,连通与调度指挥系统的数据接口,构建起的联动通道,保证风险预警信息在15分钟内可推送至相关责任人处。

在资源保障方面,设立了年度安全管理专项经费,按照设备更新、技术研发、应急物资储备进行分类列支。其中,设备更新主要保障监测终端的采购;技术研发专门支持风险预警算法的优化;应急物资储备囊括救援工具、备用部件等

关键品类,保证资源投入可与风险防控需求精确匹配。

3.3 体系持续优化方向

3.3.1 技术迭代: AI 驱动的风险预警模型升级

聚焦能够提升风险预警的精度,借助引入AI算法来优化现有的模型架构。把设备运行数据、环境数据以及历史故障案例整合起来,构建出多源数据融合的深度学习模型,以此实现早期故障特征的精准提取。着重对微弱故障信号识别算法进行优化,降低传统阈值法所产生的误报率,并且依靠实时数据反馈来动态调整模型参数,提高对复杂工况的适应性,形成的技术迭代闭环。

3.3.2 标准完善

以企业实际运作情况作为支撑,促使安全运行管理体系标准可在行业内得以输出。对试点场景所积累的经验进行全面且系统的归纳总结,从中提炼出有可复制特性的核心要素,联合行业协会以及科研机构共同编制《自轮运转特种设备安全管理导则》,以此明确管理流程、技术参数以及考核指标等通用标准。构建标准动态更新机制,密切跟踪国家法规以及技术的发展态势,每间隔两年开展一次标准评审与修订工作,帮助行业实现从“经验管理”朝着“标准管理”的转变。

3.3.3 文化培育

构建起价值传导体系,借助常态化培训来强化全体人员的风险意识,把“隐患即事故”的理念融入到岗位职责当中。设立安全行为正向激励机制,对于那些主动排查重大隐患并且提出有效改进建议的人员给予专项奖励。开展“安全文化示范班组”的创建工作,推广“作业前进行风险预判、作业中实现过程互控、作业后开展总结复盘”这样的行为模式,形成“人人担责、事事讲规范”的安全文化氛围,为体系的持续优化夯实人文基础^[3]。

4 结语

此体系借助搭建“目标-组织-制度-技术-应急”全流程管控架构,凭借标准化制度规范、智能化技术支持以及协同管理机制,达成风险可控制,切实降低事故发生率。它的核心价值在于促使行业从经验管理转向标准管理。未来,会不断优化AI预警模型与行业标准,深入培育安全文化,为自轮运转特种设备安全运作提供长期保障。

参考文献

- [1] 宋冲. 自轮运转特种设备存在的问题及其监督管理[J]. 设备管理与维修, 2022, (10): 6-7.
- [2] 陈刚. 自轮运转特种设备行车安全管理的策略研究[J]. 运输经理世界, 2021, (25): 128-130.
- [3] 解立群, 保鲁昆, 宋付新, 等. 自轮运转特种设备调车作业规章制度规范化研究[J]. 铁道货运, 2019, 37(05): 51-55.

Study on wind load bearing capacity coefficient of solar photovoltaic bracket

Kangjie Wei¹ Weijuan Wang² Yaguang Yan^{1*}

1. Civil Engineering College, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056000, China

2. Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063210, China

Abstract

With the growing global demand for renewable energy, solar photovoltaic (PV) technology has seen widespread adoption. The structural design of solar PV support systems, as a critical component of photovoltaic power generation systems, directly impacts system safety and performance through its stability and reliability. Wind load stands as a key external environmental factor affecting the structural integrity of PV support systems. This study analyzes the wind load shape coefficient of solar PV support structures, employs numerical simulation methods to investigate wind load characteristics and influencing factors, and proposes optimization recommendations. The research findings indicate that three critical factors determine the wind load shape coefficient: structural configuration, surface morphology, and dynamic response characteristics of the support system.

Keywords

wind load; shape coefficient; solar photovoltaic bracket; numerical simulation

太阳能光伏支架风荷载体型系数研究

魏康杰¹ 王伟娟² 闫亚光^{1*}

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056000

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 中国·河北 唐山 063210

摘要

随着全球对可再生能源的需求逐渐增加, 太阳能光伏发电技术得到广泛的应用, 太阳能光伏支架结构是太阳能光伏发电系统的核心部分之一, 其结构的稳定性和可靠性直接影响光伏发电系统安全性和性能。风荷载是影响光伏支架结构安全性的外部环境因素之一。本文分析太阳能光伏支架的风荷载体型系数, 采用数值模拟方式研究光伏支架结构的风荷载特性及影响因素, 进而提出支架优化建议。研究发现: 支架结构型式、表面形貌和动态响应特性是支架结构风荷载体型系数影响的重要因素。

关键词

风荷载; 体型系数; 太阳能光伏支架; 数值模拟

1 引言

面对世界能源转型的大潮, 光伏发电作为一种清洁能源受到了世界各国的普遍关注。光伏支架作为太阳能光伏发电系统的组件支撑设施, 需要具备抵抗外界环境荷载的能力, 以保证光伏支架结构在出现恶劣天气状况下能够正常使用。而风荷载就是光伏支架结构在外界风环境影响下产生的荷载之一, 尤其是遇到强风或者极端天气下, 风荷载的影响非常大。风荷载体型系数, 就是反映风力荷载对光伏支架影

响大小的一个主要参数, 反应了不同形状和尺寸的光伏支架在风荷载作用时的气动力响应, 因此, 研究光伏发电支架的风荷载体型系数有重要意义。

2 风荷载的基本概念

风荷载就是指风对物体表面施加的作用力, 体现了风对物体的压力、风力的分布等情况。风荷载通常有静风荷载和动风荷载, 静风荷载是指在一定的风速条件下, 风压对物体表面产生的力, 是风速不变的情况下持续性的力; 动风荷载是指考虑风速的变化以及风的湍流性, 对物体表面产生的冲击性的力, 动风荷载更复杂多变, 通常有很强的动态性^[1]。风荷载体型系数为风荷载研究中的关键参数, 表示物体表面风压值与理想风压值(假定物体为理想形状, 风速恒定的物体上风压值)的比值, 它表征了物体的形状、尺寸、表面粗糙度等因素对风荷载的影响, 故体型系数的值根据不同物体

【作者简介】魏康杰(2001-), 男, 中国山东东营人, 硕士, 从事结构抗风研究。

【通讯作者】闫亚光(1978-), 男, 中国河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事隧道空气动力学研究。

的不同造型、结构而有所不同。风荷载体型系数的大小对结构设计有着至关重要的作用，尤其是对抵抗风灾，保障结构的安全性都有重要的意义。

3 太阳能光伏支架风荷载的特点

3.1 支架结构复杂

光伏发电支架系统由支架结构、紧固件、支腿、光伏组件安装部件等组件构成，其结构多维且立体。光伏支架种类主要包括固定支架、跟踪支架等，这几种支架相比，其结构布局存在区别，在风荷载作用下，风荷载特性有所区别，如固定支架在风荷载作用下其受风阻力和力矩较小，结构作用相对固定；跟踪支架因为其可以根据太阳的角度跟踪、调角，其受风荷载作用受力不一，如在较高风速下，支架的结构形式的不同将产生不同的风荷载阻抗与振动效应。



图 1: 光伏发电支架

3.2 表面形态复杂

光伏支架表面存在不同的坡面、凸面和与光伏电池板连接部位等，支架本身风阻力受其气动特性的影响较为复杂。其表面形态特征决定了风流动状态，如存在一定的凹凸面，风会将分离或发生紊流状态，进而使风压分布存在更大的不均匀性。光伏支架常会结合光伏电池板，使表面形态更为复杂，导致风流不同流动方式，从而使风压产生作用的结果也有所不同^[2]。

3.3 动态响应明显

风荷载作用下太阳能光伏支架在风荷载作用下存在较强的动态响应，其支架振动、摆动、挠曲变形等动态响应都是光伏支架动态响应的重要表现，在风速剧烈变化、风速较高时的响应尤为凸显。支架的动态响应可能激发其共振响应，造成其风荷载作用效应增大，对支架结构稳定性影响较大，某些光伏支架如高支撑架或跟踪系统因受风速和瞬时风力冲击及风向变化的影响，风荷载动态响应不容忽视。

4 太阳能光伏支架风荷载体型系数的数值模拟分析

4.1 几何建模

进行太阳能光伏支架风荷载体型系数数值模拟分析，几何建模是必要而又重要的一步。几何建模不仅是前期准备，更是后期数值模拟正确性的前提，所以要综合考虑风荷载作用，需按照太阳能光伏支架的设计，将其设计形状作为太阳能光伏支架的三维几何模型进行建立。太阳能光伏支架的三维几何模型应尽量全面与细致地反映支架各部位的细节，支架的支撑、连接处、基础、光伏电池板安装等部位。不同种类支架，如固定支架与跟踪支架其支架的几何形状和结构形式常会有较大的差异性，对此，需考虑建模过程中，须针对不同种类支架设计，进行独特的处理，对其中结构的细节处理要做到全面考虑。实际建模过程中，支架的几何形状均对应设计方案，并且对支架表面的细节，如连接处、焊缝及表面粗糙度等应尽量做出反映。这些微小处都会影响风流的局部流动特性和风压分布，几何建模时不能忽视。支架与电池板的连接部分需进行精确建模，支架与电池板的配合构造处都会影响风流，其支架的角度、形状均影响风流的分布及风压大小，进而影响风荷载体型系数的变化。特别是在多自由度的风荷载动态模拟中，支架的几何属性除了影响支架在静态风荷载下的分布形态外，还影响支架的风荷载动态响应。支架的几何形态还要在模型中体现支架的造型与风的方向的关系，例如风荷载下的支架可能会产生不同的角度形变，需要在几何建模过程中用不同的几何属性进行模拟。针对不同的支架模型和不同的风环境条件，建模精度和精细度将直接影响数值模拟的准确性。

4.2 网格划分

网格划分是数值模拟工作中非常重要的一环，网格划分直接关系到模拟结果精度与计算效率。通过将几何模型划分成很多小的网格单元，模拟过程是在各个网格单元上进行的。网格划分的精细度决定了数值计算的精度，网格划分的过粗使得数值模拟的结果出现失真，网格划分的过细则会大大的增加了计算量和计算时间。因此，对于太阳能光伏支架风荷载体型系数的数值模拟，网格划分的优化尤为重要。网格划分的目的就是在计算区域内，为了能够使得各区域计算达到所需精度对风流计算进行网格划分。针对支架表面与风流直接接触区域，由于支架的存在，导致风流流动形态发生复杂变化，如风流分离现象、漩涡现象等，同时如果能够对这些局部区域进行精细网格划分，并且精细划分的网格对风荷载分布的精确度能够起到有效影响，也同时能够模拟局部区域风流瞬时分布、廓形等，从而使风荷载体型系数的瞬变现象得到反映。对于流体区域与固体力学区域的网格划分也不应该相同，对支架支撑杆、连杆等结构关键部位应特别加密网格以保证在这些区域中进行风流和力学的精细化计算，而对于较远离支架的流体区域网格宜采用粗网格，从而节省