

光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的应用研究

郑兴文

云南宏固工程检测有限公司 云南 昆明 650000

摘要：在全球能源结构转型背景下，光伏发电作为清洁能源的核心载体，其装机规模持续攀升。本文聚焦光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的应用研究，首先概述了光伏电站微型基桩的类型、特点及其在工程中的作用，随后详细阐述了竖向抗压试验装置的工作原理与组成，包括加载系统、测量系统和反力系统，并深入分析了装置的关键技术，如加载控制、测量精度保障及数据处理技术。研究还探讨了该装置在应用中面临的地质条件复杂、试验成本较高、技术人员缺乏等问题，针对性地提出加强地质勘察、优化试验方案以降低成本、强化技术人员培训等对策。

关键词：光伏电站；微型基桩；竖向抗压；试验装置；应用研究

引言：随着光伏产业的快速发展，光伏电站对基础工程的可靠性要求日益提高，微型基桩因适应性强、施工便捷等特点，在光伏电站基础建设中得到广泛应用。其竖向承载力是确保光伏支架结构安全的关键指标，直接影响电站的长期稳定运行。然而，当前针对光伏电站微型基桩的竖向抗压试验技术尚不完善，现有试验装置在复杂地质条件下的适用性、测量精度及成本控制等方面仍存在不足。因此，开展光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的应用研究，明确其原理、组成及关键技术，解决应用中的实际问题，对优化试验方案、提升基桩工程质量具有重要意义。

1 光伏电站微型基桩概述

1.1 微型基桩的类型与特点

光伏电站中常用的微型基桩主要包括钻孔灌注桩、螺旋桩和注浆型微型桩等类型。钻孔灌注桩通过机械钻孔成型后灌注混凝土，适用于各类土层；螺旋桩采用钢质螺旋叶片结构，可直接旋入地层，施工效率高；注浆型微型桩则通过高压注浆形成桩体，对松散地层的加固效果显著。这类基桩的共同特点是直径小（通常小于 300mm）、单桩承载力适中，能适应光伏电站大面积分散布桩的需求。同时，其施工设备轻便，对场地扰动小，尤其适合丘陵、山地等复杂地形的光伏项目，且施工周期短，可与光伏组件安装工序高效衔接，兼顾经济性与环保性。

1.2 微型基桩在光伏电站中的作用

微型基桩是光伏电站支架系统的核心承重结构，主要承担竖向荷载与水平荷载双重作用：竖向方向需承受光伏组件、支架及线缆的自重，以及风雪等附加荷载；水平方向则需抵御阵风、地震等动态力，确保支架系统不发生倾斜或倾覆。此外，在软土地基、溶岩发育区等

复杂地质条件下，微型基桩能通过深层锚固增强地基稳定性，减少不均匀沉降对光伏阵列的影响。其灵活的布置方式可适配不同地形坡度，降低场地平整成本，同时避免大规模开挖，保护地表生态，与光伏产业的绿色发展理念高度契合^[1]。

2 竖向抗压试验装置原理与组成

2.1 试验装置的工作原理

光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的工作原理基于荷载传递与变形监测的协同机制。试验时，反力系统提供与加载方向相反的稳定作用力，确保加载过程中装置整体平衡。加载系统通过液压装置向基桩顶部施加逐级递增的竖向荷载，荷载通过桩体传递至周围地基土，使桩体与地基土产生相互作用。测量系统同步采集每级荷载作用下的桩顶沉降量，形成完整的荷载-沉降关系曲线。当荷载达到基桩极限承载力时，桩体出现明显塑性变形，沉降速率急剧增大，此时可判定基桩达到承载极限。通过分析不同阶段的荷载与沉降数据，不仅能确定基桩的极限承载力和特征值，还能反映桩体与地基土的相互作用机理，为光伏电站基桩设计提供直接的力学性能依据，保障基桩在长期运营中可承受光伏组件、支架及自然荷载的综合作用。

2.2 试验装置的主要组成部分

2.2.1 加载系统

加载系统是试验装置的核心动力单元，主要由液压千斤顶、高压油泵、压力传感器及控制系统组成。液压千斤顶作为荷载输出终端，其吨位根据基桩预估承载力选定，通常为预估极限承载力的 1.2-1.5 倍，确保加载量程覆盖试验需求。高压油泵通过油管向千斤顶提供高压油液，实现荷载的平稳施加，油泵压力调节精度可达 0.1MPa，保证荷载分级的准确性。压力传感器安装在千

千斤顶与桩顶之间,实时监测输出荷载值,精度等级不低于 0.5 级,数据通过信号线传输至控制系统。控制系统具备手动与自动两种加载模式,自动模式可按照预设程序(如每级荷载维持 1 小时)实现分级加载,并能通过闭环反馈实时调整油泵压力,抵消桩体沉降导致的荷载损失,确保每级荷载保持稳定。此外,系统还设有过载保护装置,当荷载超过安全阈值时自动停止加载,避免基桩或装置受损。

2.2.2 测量系统

测量系统承担试验数据的采集与记录功能,由位移测量装置、荷载测量装置及数据采集仪组成。位移测量采用高精度百分表或电子位移计,通常在桩顶对称布置 3 个测点,以减少桩顶倾斜对测量的影响,位移计量程不小于 100mm,分辨率达 0.01mm,可捕捉微小沉降变化。荷载测量依赖安装在千斤顶下方的力传感器,其测量范围需覆盖试验最大荷载,非线性误差不超过 $\pm 0.5\%$,确保荷载数据的准确性。数据采集仪通过专用接口连接位移计和力传感器,采样频率可调节(通常为 1-10Hz),能自动记录每级荷载下的时间、荷载值及沉降量,并生成实时曲线。部分先进系统还具备数据存储、导出及初步分析功能,可自动识别沉降稳定状态(如 1 小时内沉降量小于 0.1mm),为试验终止提供判断依据,大幅减少人工记录误差。

2.2.3 反力系统

反力系统为加载过程提供稳定的反作用力,其结构形式需根据试验场地条件和基桩承载力选定,主要分为堆载反力架、锚桩反力架及组合反力架。堆载反力架由钢梁、堆载重物(如混凝土块、沙袋)组成,通过重物自重提供反力,适用于承载力较小的基桩(通常小于 500kN),堆载重量需为最大试验荷载的 1.2 倍以上,且堆载重心应与基桩轴线重合,避免产生偏心力矩。锚桩反力架由锚桩、横梁及连接部件构成,锚桩均匀布置在试验桩周围,通过张拉装置将反力传递至横梁,适用于高承载力基桩试验,锚桩数量和长度需经计算确定,确保其抗拔力满足反力需求。组合反力架结合堆载与锚桩的优势,在复杂地质条件下可灵活调整反力提供方式,增强系统稳定性。反力系统的所有构件需经过强度和刚度验算,连接部位采用高强度螺栓紧固,防止试验过程中出现变形或断裂。

3 竖向抗压试验装置的关键技术

3.1 加载控制技术

加载控制技术是保障试验数据有效性的基础,其核心在于实现荷载的稳定施加与动态调节。该技术通过闭

环控制系统将压力传感器的实时反馈与预设荷载曲线对比,通过油泵流量调节实现荷载的精准控制,控制精度可达 $\pm 2\%$ 。针对微型基桩的特点,加载控制技术采用分级加载模式,每级荷载增量通常为预估极限承载力的 1/10,且支持“慢速维持荷载法”,即每级荷载施加后需监测沉降速率,待沉降稳定(1 小时内沉降量小于 0.1mm)方可进行下一级加载。此外,系统具备过载保护功能,当荷载超过预设安全阈值时自动停止加载,同时配备应急卸荷装置,可在基桩突发失稳时快速释放荷载,保障试验安全。先进的加载控制技术还能适应复杂地质条件下的荷载波动,通过动态补偿算法抵消因地基土变形导致的荷载衰减,确保试验过程的稳定性。

3.2 测量精度保障技术

测量精度保障技术旨在消除各类干扰因素,确保荷载与沉降数据的准确性,是试验结果可信度的关键。在硬件层面,采用高精度传感器(荷载传感器精度 $\pm 0.5\%$ FS,位移计分辨率 0.001mm),并通过温度补偿技术抵消环境温度变化对传感器的影响。在安装工艺上,位移计需与基准梁刚性连接,基准梁则设置在不受试验桩沉降影响的稳定地基上,且与反力架、加载系统保持足够距离,避免振动干扰。软件层面,数据采集系统采用高频采样(采样频率 10Hz),通过数字滤波算法剔除电磁干扰导致的异常波动,并对采集数据进行实时校验,当连续 3 次测量值偏差超过 5% 时自动报警。此外,通过“多点测量法”提升沉降数据可靠性,即在桩顶对称布置 3 个位移计,取其平均值作为最终沉降量,有效抵消桩顶不均匀沉降带来的误差,确保在复杂地质条件下仍能获得高精度测量结果^[2]。

3.3 数据处理与分析技术

数据处理与分析技术是将原始试验数据转化为工程决策依据的核心环节,通过专业算法实现对基桩承载特性的深度解析。首先,系统对采集的荷载-沉降数据进行预处理,包括异常值剔除(采用 3σ 准则)、数据平滑(移动平均法)及缺失值补全(线性插值法),确保数据的完整性与连续性。在此基础上,通过绘制 Q-s 曲线(荷载-沉降曲线)和 s-lgt 曲线(沉降-时间对数曲线),结合规范判定标准确定基桩极限承载力:当 Q-s 曲线出现明显陡降段,或某级荷载下 1 小时内沉降速率未趋于稳定时,对应的前一级荷载即为极限承载力。同时,利用回归分析模型(如双曲线模型、指数模型)对沉降数据进行拟合,预测基桩在长期荷载作用下的沉降趋势,为光伏电站基础设计提供变形控制依据。先进的数据处理系统还支持多组试验数据的对比分析,可通过

聚类算法识别不同地质条件下基桩承载力的差异规律，为区域性光伏电站基桩设计优化提供数据支持。

4 竖向抗压试验装置应用中存在的问题与对策

4.1 存在的问题

4.1.1 地质条件复杂

光伏电站常选址于山地、丘陵或滩涂等地形，地质条件呈现显著复杂性。这些区域可能存在土层分布不均、局部软夹层、孤石或岩溶发育等情况，导致基桩受力状态与均质地基存在明显差异。试验过程中，复杂地质易引发荷载传递路径紊乱，使桩顶沉降数据出现异常波动，难以准确捕捉真实的荷载 - 沉降关系。同时，部分区域地下水丰富，可能对试验装置的金属部件造成腐蚀，影响设备稳定性，甚至导致传感器测量偏差，降低试验数据的可信度，给基桩承载力评估带来困难。

4.1.2 试验成本较高

竖向抗压试验装置的应用涉及多方面成本支出，导致整体试验成本居高不下。设备采购方面，高精度液压千斤顶、荷载传感器及数据采集系统等核心部件价格昂贵，单次试验的设备折旧费用占比显著。场地准备环节，为满足反力系统安装要求，需进行场地平整、地基加固等前期工程，尤其在复杂地形中，额外的土方作业和临时支撑搭建进一步增加成本。

4.1.3 技术人员缺乏

竖向抗压试验对技术人员的专业能力要求较高，但目前行业内相关人才存在明显缺口。试验操作需要人员熟悉液压系统调试、传感器校准及数据采集软件操作等多方面技能，而现有人员多缺乏系统培训，易出现加载速率控制不当、传感器安装偏差等操作失误，影响试验精度。数据分析环节，需结合地质条件与规范标准解读荷载 - 沉降曲线，部分技术人员因经验不足，难以准确判定基桩极限承载力，可能导致试验结果误判。

4.2 对策建议

4.2.1 加强地质勘察与研究

针对复杂地质条件的影响，需强化前期地质勘察的深度与广度。采用“钻探 + 物探”联合勘察模式，结合地质雷达、声波测试等技术，精准探明土层分布、软夹层位置、孤石及岩溶发育范围，建立详细的地质三维模型，为试验方案设计提供依据。同时，开展针对性研究，分析不同地质条件对基桩受力的影响规律，开发适

用于复杂地层的试验修正方法，如对岩溶区基桩试验数据引入岩溶发育程度修正系数。

4.2.2 优化试验方案降低成本

从设备、流程等多维度优化试验方案以控制成本。设备方面，推广模块化加载与反力系统，通过组件标准化实现跨项目重复利用，降低设备采购与折旧费用；对低承载力基桩，采用轻型反力装置（如便携式配重架）替代传统堆载，减少场地准备成本。流程优化上，引入“快速维持荷载法”，在确保数据可靠性的前提下，将每级荷载稳定时间缩短至 30 分钟，同时采用自动化数据采集系统实现无人值守，降低人力成本。

4.2.3 加强技术人员培训与管理

构建系统化的技术人员培养与管理体系，提升试验操作与数据分析能力。制定分级培训计划：初级培训聚焦设备操作规范，包括液压系统调试、传感器校准等实操技能；高级培训侧重数据分析，结合案例讲解荷载 - 沉降曲线解读、极限承载力判定方法，并引入虚拟仿真系统模拟复杂地质下的试验场景。建立行业统一的技能考核认证制度，将理论知识与实操能力纳入考核范围，持证上岗。同时，推行“导师制”，由资深技术人员带队参与项目，通过现场指导积累经验^[3]。

结束语

本研究系统梳理了光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的原理、组成及关键技术，针对应用中的地质复杂性、成本控制及人员技术等问题提出了切实对策。研究表明，通过优化试验装置与方法，可有效提升基桩承载力评估的精准性，为光伏电站基础工程安全提供可靠保障。未来需进一步结合智能化技术，推动试验装置的自动化与数字化升级，同时深化不同地质条件下的试验数据积累，为光伏产业的绿色可持续发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]刑克勇, 黄文莉. 光伏支架基础设计创新研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 46(1): 252-254.
- [2]常志松. 试论桩基静载现场检测试验问题分析[J]. 科学之友, 2022(22): 212-213.
- [3]韩庆祝, 胡胜华, 韩朝. 桩基静载试验自平衡法测试原理及方法[J]. 资源环境与工程, 2021(06): 232-233.