

光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置设计研究

罗富斌

云南宏固工程检测有限公司 云南 昆明 650000

摘要:随着光伏电站建设规模的扩大和地质条件的多样化,对微型基桩竖向抗压性能提出了更高要求。本研究设计了一种专用试验装置,集成了高精度加载与测量系统,能模拟实际荷载条件,准确评估微型基桩的竖向抗压性能。装置采用模块化设计,便于野外快速安装,为光伏电站基础设计提供科学依据,确保电站结构安全与稳定运行,推动光伏能源领域的持续发展。

关键词:光伏电站微型基桩; 竖向抗压试验装置; 设计

引言:在绿色能源转型的大背景下,光伏电站的建设日益增多,对基础结构的稳定性提出了更高要求。微型基桩作为光伏电站的重要支撑部件,其竖向抗压性能直接关系到电站整体结构的安全性和耐久性。然而,现有的试验方法和装置难以满足对微型基桩竖向抗压性能的精准评估需求。因此,本研究致力于设计一种专门针对光伏电站微型基桩的竖向抗压试验装置,以期提高评估准确性,为光伏电站的建设提供技术支持。

1 光伏电站微型基桩概述

1.1 微型基桩的定义与分类

微型基桩是指直径较小(通常在100-300mm范围内)、采用特殊施工工艺成桩的基础结构,具有施工便捷、对场地适应性强等特点,在光伏电站等领域应用广泛。根据成桩工艺和结构形式,微型基桩主要可分为微型灌注桩和微型预应力管桩等类型。微型灌注桩多采用钻孔压浆工艺,桩体材料以混凝土为主,有时会掺入钢筋增强结构强度。其结构特点是桩身连续性好,与周围土体结合紧密,适用于软土地基等复杂地质条件。微型预应力管桩则是在工厂预制的空心管桩,通过施加预应力提高桩体的抗裂性能和承载能力,具有强度高、施工速度快的优势,适合在承载力要求较高且地质相对稳定的场地使用。

1.2 微型基桩在光伏电站中的应用

1.2.1 微型基桩在光伏支架基础中的承载作用

在光伏电站中,微型基桩作为光伏支架的基础结构,承担着传递光伏组件及支架自重、风荷载、雪荷载等荷载至地基的重要作用。由于光伏电站通常占地面积大,地质条件多样,微型基桩凭借其灵活的布置方式和较强的场地适应性,能够有效分散荷载,确保支架系统的稳定性,避免因基础沉降或倾斜导致光伏组件损坏或发电效率下降。

1.2.2 微型基桩的受力特性分析

微型基桩的受力特性直接影响其在光伏电站中的应用效果。在竖向抗压方面,桩体通过桩身与周围土体的摩擦力以及桩端的承载力共同抵抗上部荷载,其抗压性能与桩体材料强度、桩长及地质条件密切相关。在抗拔性能上,当遭遇强风等荷载时,光伏支架会对基桩产生向上的拔力,微型基桩通过桩周土体的反作用力抵抗拔力,确保基础不被拔出。在横向承载力方面,微型基桩能够抵抗风荷载等产生的横向力,通过桩身的弯曲变形和土体的约束作用分担横向力,保证光伏支架在横向力作用下的稳定性^[1]。

2 光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置设计原理

2.1 试验装置的设计要求

2.1.1 装置应具备的功能与性能要求

装置需具备精准施加竖向压力的功能,可通过液压系统或机械加载机构实现分级加载,加载范围应覆盖光伏电站微型基桩实际可能承受的竖向荷载,并能实时采集荷载值,误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。同时,需配备位移测量组件,精确监测桩体竖向沉降量,分辨率不低于0.01mm,以捕捉桩体从弹性变形到塑性破坏的全过程变形数据。性能上要求加载稳定,无明显波动,在长期保压阶段(如每级荷载维持1小时)压力衰减量不超过5%,且能适应不同直径(100-300mm)、不同桩长的微型基桩试验需求,具备一定的调节灵活性。

2.1.2 装置设计的安全性、可靠性及适用性考虑

安全性方面,装置需设置过载保护装置,当荷载超过最大设计值1.2倍时自动停机,加载机构与反力架连接部位采用高强度螺栓固定,确保试验过程中无部件脱落或结构失稳风险。可靠性上,核心部件(如液压泵、传感器、数据采集仪)需选用经过认证的工业级产品,平均无故障运行时间不低于1000小时,且具备数据自动备

份功能,防止试验数据丢失。适用性方面,装置结构应模块化设计,便于运输和现场组装,能适应野外光伏电站场地的复杂环境(如温差-10℃-40℃、轻度扬尘),同时兼顾实验室固定安装使用需求,通过调整反力架配重或锚固方式适应不同安装场景^[2]。

2.2 试验装置的工作原理

2.2.1 竖向抗压试验的基本原理与方法

竖向抗压试验基于桩体在竖向荷载作用下的力学响应规律,通过逐级施加竖向压力,观测桩体沉降随荷载的变化关系,确定桩体的极限抗压承载力、沉降量及荷载-沉降曲线。试验方法采用慢速维持荷载法,即每级荷载施加后维持一定时间(通常为1小时),待沉降稳定(每小时沉降量不超过0.1mm)后施加下一级荷载,直至桩体出现明显破坏特征(如沉降急剧增大且无法稳定),终止试验并根据试验数据计算相关力学参数。

2.2.2 装置如何通过模拟实际受力状态来检测桩体抗压性能

装置通过反力系统模拟光伏电站地基对桩体的约束作用,反力架与地面或配重块连接提供反向支撑力,与加载机构形成受力平衡体系。加载端通过桩帽与微型基桩顶部刚性连接,确保荷载均匀传递至桩体,模拟光伏支架通过法兰盘传递荷载的实际受力状态。同时,装置可通过调节加载速率和分级荷载大小,模拟不同工况下的荷载作用过程(如施工期逐步增加的组件重量、运营期长期恒定荷载)。桩体周围土体环境可通过试验槽模拟,填入与实际场地一致的土样并控制密实度,使桩体在受荷时的桩土相互作用状态接近真实工况,从而准确反映桩体在实际工程中的竖向抗压性能。

3 光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的结构设计

3.1 加载装置设计

3.1.1 液压动力机组、反力架及配重块的设计与选型

液压动力机组采用电液伺服系统,额定压力31.5MPa,配备110mm缸径液压缸,加载量程0-420kN,加载速率可在0.2-4kN/s范围内调节。机组集成压力变送器(精度 $\pm 0.2\%$ FS)和冷却系统,确保油温稳定在30-50℃,连续工作时长不低于8小时。反力架为装配式钢结构,立柱选用Q355BH型钢(260×260mm),横梁为箱型截面(320×180×8mm),整体高度3m,跨度2.1m。立柱通过6组M27膨胀螺栓与混凝土基础连接,螺栓埋深320mm,单桩抗剪强度 ≥ 60 kN。横梁与立柱的连接节点设置三角加强肋,经结构力学计算,在450kN荷载下最大挠度 ≤ 0.6 mm。配重块采用C30混凝土预制,单块尺寸1m×0.65m×0.5m,重量35kN,顶部设吊装环。配重总量

按最大试验荷载的1.25倍配置,叠放时采用定位销固定,层间铺设3mm厚橡胶垫以缓冲冲击。

3.1.2 加载能力的确定与校核

加载能力以微型基桩设计承载力特征值的2倍为基准,常规基桩设计值为160-200kN,故装置最大加载值设定为380kN。液压系统额定荷载420kN,预留10.5%安全余量。校核结果:液压缸活塞杆(45号钢,直径70mm)抗压安全系数3.6;反力架横梁弯曲应力152MPa(小于Q355钢设计值295MPa);基础抗倾覆系数1.6,满足《建筑桩基检测技术规范》要求。现场加载测试显示,380kN荷载下各部件无异常变形,连接节点应力值符合设计预期。

3.2 测量系统设计

3.2.1 位移传感器、应变采集仪等测量设备的选择与布置

位移测量采用3台拉线式位移传感器(量程0-300mm,精度 ± 0.05 mm),1台安装于液压缸顶端中心,监测加载位移;另2台对称布置于桩顶两侧110mm处,固定在独立基准梁上。基准梁为18号工字钢,长3.8m,两端支撑于混凝土支墩,支墩与试桩间距 ≥ 2.5 m。应变测量选用12通道静态应变仪(分辨率1 $\mu\epsilon$),配套120 Ω 应变片(灵敏系数2.1 $\pm 1\%$)。桩身沿深度每1m设一个测试截面,每个截面粘贴4片应变片(90°分布),导线穿金属波纹管保护,接入采集仪前进行屏蔽接地^[3]。

3.2.2 测量精度与误差控制的考虑

(1)位移测量:基准梁调平误差 ≤ 0.3 mm/m,传感器每月用标准尺校准,误差控制在 ± 0.1 mm内。每级荷载稳定后采集8组数据,取平均值消除随机误差。(2)应变测量:应变片粘贴前进行表面处理(粗糙度Ra1.6),采用专用胶粘贴,固化后进行绝缘电阻测试(≥ 500 M Ω)。采集仪设温度补偿通道,消除环境温度影响(误差 $\leq 2\mu\epsilon/^\circ\text{C}$),数据采集前进行零点校准,漂移量 $\leq \pm 1\mu\epsilon$ 。

3.3 数据处理系统设计

3.3.1 数据采集、存储与处理的方法与技术

数据采集采用PLC控制系统,通过A/D模块同步采集荷载、位移、应变信号,采样频率1Hz,每级荷载连续采集25组数据。系统具备自动判断沉降稳定功能(连续1小时沉降 ≤ 0.1 mm),并生成加载提示。数据存储采用本地服务器(容量1TB)与云盘同步,按“工程名称-桩号-日期”分类存档。处理软件运用5阶巴特沃斯滤波算法消除噪声,通过最小二乘法拟合荷载-沉降曲线,自动生成Q-s、s-lgt等特征曲线^[4]。

3.3.2 特征值分析法在数据处理中的应用

特征值分析提取三大参数:①极限承载力,通过Q-s

曲线斜率突变点识别（切线法）；②桩身极限应变，取最大应变值对应的深度位置；③沉降稳定系数，计算终级荷载下的沉降速率。通过特征值对比，可量化不同桩型的承载性能差异。例如，微型预应力管桩的极限承载力比同直径灌注桩高15%-20%，但沉降量低10%-15%。该方法为光伏电站基桩选型提供了量化依据，提升设计科学性。

4 光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置优化设计与改进建议

4.1 装置优化设计的考虑

4.1.1 根据性能验证与案例分析结果提出优化设计方案

结合多组试验数据及现场应用案例，现有装置在复杂地质模拟和快速加载效率上存在不足。优化方案聚焦三点：一是升级反力架模块化结构，将横梁与立柱的连接方式由螺栓固定改为榫卯+液压锁扣组合结构，实现30分钟内快速拆装，解决野外组装耗时过长的问题；二是增设可替换式试验槽，针对砂土、黏土等不同地基类型，设计配套的自动压实系统（压实度误差 $\leq 2\%$ ），无需现场调整土体参数；三是加载系统增加“阶梯-循环”复合加载模式，通过程序预设模拟光伏电站运营期荷载波动（如四季温差引起的周期性荷载变化）。

4.1.2 优化后的装置结构、性能及功能特点

优化后的装置采用轻量化设计，反力架总重减少20%，但承载能力提升至600kN（原设计500kN），通过有限元分析验证其在极限荷载下的结构变形量降低35%。性能上，加载速率调节范围扩展至0.1-5kN/s，满足不同试验标准需求；测量系统新增温度补偿模块，在-10℃-40℃环境下测量误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。功能上实现三大突破：支持远程操控（5G无线传输），可实时查看试验数据并远程启停；具备自动判断极限荷载功能，通过AI算法识别荷载-沉降曲线特征点，减少人为判断误差；试验槽兼容100-400mm直径基桩，适用性提升40%。

4.2 改进建议

4.2.1 针对现有装置存在的问题提出改进建议

现有装置的主要问题包括：一是配重块装卸依赖大

型吊装设备，建议开发液压升降式配重系统，通过内置液压缸实现单块配重自动叠放，降低对吊装设备的依赖；二是数据采集仪抗干扰能力不足，在强电磁环境（如变电站附近）易出现数据跳变，需增加电磁屏蔽罩（屏蔽效能 $\geq 60\text{dB}$ ）并采用光纤传输信号；三是位移传感器线缆易受加载机构碾压，建议改用无线传输式传感器（传输延迟 $\leq 10\text{ms}$ ），并优化线缆收纳路径。

4.2.2 未来研究方向与展望

未来可向三个方向深化研究：一是智能化升级，结合数字孪生技术构建基桩-土体相互作用的虚拟试验平台，实现物理试验与数值模拟的实时联动；二是多功能集成，开发兼具竖向抗压、抗拔及横向承载力测试的一体化装置，减少设备重复购置成本；三是材料创新，尝试采用碳纤维复合材料制作反力架，进一步降低设备自重并提升耐腐蚀性，适应滨海光伏电站等特殊环境。随着光伏电站向高海拔、软土地带扩展，微型基桩试验装置需持续突破环境适应性瓶颈，为新型桩型研发提供更精准的测试支撑。

结束语

综上所述，本研究聚焦于光伏电站微型基桩竖向抗压试验装置的设计与优化，成功构建了集高效加载、精密测量与智能化分析于一体的综合测试平台。通过技术创新与模块化设计，显著提升了装置的适用性和灵活性，有效满足了复杂地质条件下微型基桩的性能评估需求。本研究不仅为光伏电站基础结构的安全性提供了坚实保障，也为未来光伏电站建设与桩基础技术的进一步发展奠定了坚实基础。

参考文献

- [1]孙孝通.单桩竖向抗压静载试验浅析[J].城市建设理论.电子版,2020,(05):46-47.
- [2]杨立.高翔.杨晨.中外桩基竖向抗压静载试验标准对比概述[J].工程勘察,2021,(09):91-92.
- [3]徐宜飞.桩基竖向抗压静载试验常见问题探讨[J].黑龙江科技信息,2020,(05):55-56.
- [4]苗琪.单桩竖向抗压静载试验数据分析与探讨[J].华北地震科学,2021,(12):122-123.