

海上风电导管架卧式建造精度控制技术研究

张 威

华电科工股份有限公司 北京 100070

摘 要：随着海上风电向深远海发展，导管架结构日益大型化，传统立式建造面临挑战。本文聚焦海上风电导管架卧式建造精度控制技术。首先阐述其卧式建造工艺特点与精度核心要求，接着从工装设备、焊接过程、测量监测、材料性能、施工人员等方面剖析精度影响因素。随后详细介绍工装定位、焊接过程、测量监测等精度控制核心技术，以及数字化建造与仿真模拟技术。最后探讨该技术智能化、数字化、绿色化、标准化的发展趋势，旨在为海上风电导管架建造提供全面的精度控制理论支持与实践指导。

关键词：海上风电；导管架；卧式建造；精度控制

引言：在全球能源转型与绿色发展的大背景下，海上风电作为清洁能源的重要组成部分，发展势头迅猛。导管架作为海上风电的关键支撑结构，其建造质量直接影响风电设施的安全与稳定运行。卧式建造是导管架常用的建造方式之一，然而，由于海上环境复杂、建造规模大、精度要求高，卧式建造过程中面临诸多挑战。精度控制成为保障导管架质量的核心环节，研究海上风电导管架卧式建造精度控制技术，对于提高建造效率、降低成本、推动海上风电产业可持续发展具有重要意义。

1 海上风电导管架卧式建造工艺特点及精度要求

1.1 卧式建造工艺特点

海上风电导管架卧式建造工艺突破了传统立式建造的局限，具有显著的空间适应性优势。该工艺通过将导管架主体结构平放于地面胎架进行组装，有效利用了码头或船坞的平面空间，避免了立式建造中高空作业带来的安全风险与操作难度。其核心工艺流程分为车间预拼装与外场总装两个阶段：车间内完成侧片预拼装，通过胎架调平、地样线定位等技术手段确保单片结构精度；外场总装阶段则通过立体拼装胎架实现多片体的精准对接，形成完整导管架结构。相较于立式建造，卧式工艺在大型构件吊装、焊接变形控制及测量基准统一性方面更具优势，尤其适用于大尺寸、高精度要求的非嵌岩式导管架制造，可显著提升建造效率与质量稳定性。

1.2 精度控制核心要求

导管架卧式建造的精度控制体系涵盖几何尺寸、形位公差与结构稳定性三大维度。几何尺寸方面，需严格管控立柱开档尺寸、对角线误差及整体直线度，其中预拼装阶段需预留焊接收缩量，确保侧片组装后跨距偏差 $\leq 10\text{mm}$ 。形位公差控制聚焦于空间坐标定位，要求主管轴线与侧片管轴线交点坐标误差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，垂直度偏差

$\leq 2\text{mm}$ ，通过全站仪三维测量技术实现关键点位的动态监控。结构稳定性控制则强调焊接变形补偿与应力释放管理，需采用对称焊接工艺、刚性固定工装及焊后热处理等措施，将整体高度偏差控制在 $\leq 6\text{mm}$ ，上端面平面度偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。此外，与吸力筒或上部结构的对接接口需预留 $0.5\text{-}1\text{mm}$ 的加工余量，通过激光跟踪仪进行最终精度复核，确保导管架在复杂海洋环境下的长期服役性能^[1]。

2 海上风电导管架卧式建造精度影响因素分析

2.1 工装设备因素

工装设备的精度与稳定性直接影响导管架建造精度。胎架的强度和刚度不足会导致建造过程中发生变形，使导管架的尺寸和形状出现偏差；定位装置的制造误差或安装不准确，会使构件的定位不精确，影响各部件间的相对位置关系；吊装设备的性能不稳定，在起吊和转运构件时可能产生晃动，导致构件碰撞变形，进而影响导管架的整体精度。此外，工装设备的老化、磨损也会逐渐降低其精度，对建造质量产生潜在威胁。

2.2 焊接过程因素

焊接是导管架建造的关键环节，对精度影响显著。焊接热输入会使构件产生热变形，不同部位的受热不均匀会导致局部收缩和弯曲，改变构件的几何尺寸和形状；焊接顺序不合理会加剧变形积累，影响整体精度；焊接残余应力也会使构件在后续使用中发生缓慢变形，降低结构的稳定性。同时，焊接参数的选择不当，如电流、电压、焊接速度等，会影响焊缝质量，进而影响构件的连接精度和整体强度。

2.3 测量监测因素

测量监测是保障建造精度的重要手段，其准确性至关重要。测量仪器的精度和分辨率不足，会导致测量数据存在误差，无法准确反映构件的实际尺寸和位置；

测量方法的选择不当,如测量基准的确定不合理,会使测量结果缺乏可靠性和一致性;测量环境的影响,如温度、湿度、振动等,也会干扰测量仪器的正常工作,导致测量数据失真。此外,测量人员的操作水平和经验也会影响测量结果的准确性,进而影响导管架的建造精度。

2.4 材料性能因素

材料性能对导管架建造精度有着内在影响。材料的化学成分、力学性能不均匀,会导致构件在加工和建造过程中变形不一致,难以控制精度;材料的热膨胀系数不同,在焊接等热加工过程中会产生不同程度的热变形,影响构件的尺寸精度;材料的可加工性也会影响建造精度,如材料的硬度、韧性等会影响切割、弯曲等加工工艺的效果,导致构件的尺寸和形状出现偏差。此外,材料的存储和保管不当,如受潮、生锈等,也会改变材料的性能,影响建造质量。

2.5 施工人员因素

施工人员的技能水平和责任心对导管架建造精度起着关键作用。操作人员的技能不熟练,在构件加工、组装、焊接等过程中会出现操作不规范的情况,导致构件的尺寸和形状偏差;施工人员对工艺要求的理解不准确,会忽视关键环节的精度控制,影响整体建造质量;责任心不强的人员可能在工作中敷衍了事,不严格按照操作规程进行施工,对精度问题视而不见。此外,施工人员的团队协作能力也会影响建造精度,各工序之间配合不默契可能导致精度控制出现漏洞^[2]。

3 海上风电导管架卧式建造精度控制核心技术

3.1 工装定位精度控制技术

海上风电导管架卧式建造中,工装定位精度控制是保障整体建造质量的核心环节。首先,胎架设计需根据导管架结构特点定制,如针对四桩导管架,胎架需具备足够的强度和刚度,以防止建造过程中发生变形。胎架调平精度要求严格,整体水平度需控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,确保导管架立柱开档尺寸、对角线尺寸等关键参数的准确性。其次,地样线划线精度直接影响导管架组装精度,偏差需控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内,通过全站仪等高精度测量设备进行校准。此外,工装定位还需考虑焊接变形补偿,在胎架设计时预留焊接收缩量,如侧片预拼装时开档尺寸需加放 10mm 焊接收缩量。最后,工装定位需与数字化技术结合,通过三维建模和仿真模拟优化胎架布局和定位方案,实现工装定位的智能化和精准化,为导管架卧式建造提供可靠的精度保障。

3.2 焊接过程精度控制技术

焊接过程对海上风电导管架卧式建造精度影响重

大。在焊接工艺规划上,需依据导管架材质、结构特点,精准选定焊接方法,如采用气体保护焊保证焊缝质量。同时,合理确定焊接顺序,遵循对称、分段退焊等原则,减少焊接变形积累。焊接参数的精确控制是关键,电流、电压、焊接速度等参数需严格匹配材料特性与焊缝要求,确保热输入稳定,避免因参数波动引发局部过热或未熔合等缺陷。焊接过程中,运用刚性固定工装对构件进行约束,限制焊接变形自由度。此外,实时监测焊接变形情况,利用应变片、激光位移传感器等设备,及时获取变形数据并反馈调整。焊接完成后,对焊缝进行无损检测,排查内部缺陷,同时评估变形情况,对超出精度要求的部位进行矫正处理,全方位保障焊接过程对导管架建造精度的有效控制。

3.3 测量监测精度控制技术

测量监测精度控制技术是海上风电导管架卧式建造中保障最终精度的关键支撑。在测量设备选用上,针对导管架大尺寸、高精度的测量需求,配备高精度全站仪、激光跟踪仪等先进设备。全站仪可实现三维坐标的快速、精准测量,测量精度可达毫米级;激光跟踪仪则具备实时动态跟踪测量能力,能对构件在建造过程中的微小位移进行精确捕捉。测量基准的统一与稳定至关重要,需建立贯穿整个建造过程的高精度测量控制网,确保各测量环节基准一致。同时,对测量环境进行严格控制,温度、湿度、振动等因素都会影响测量精度,通过搭建恒温恒湿测量室、采取防振措施等,减少环境干扰。在测量方法上,采用多站测量、重复测量等方式提高测量数据的可靠性。并且,运用数字化测量技术,将测量数据实时传输至计算机系统,通过专业软件进行分析处理,及时发现精度偏差。

3.4 数字化建造与仿真模拟技术

数字化建造与仿真模拟技术为海上风电导管架卧式建造精度控制提供了强大的创新手段。在数字化建造方面,借助三维建模软件构建导管架的精确数字模型,将设计数据与建造工艺深度融合,实现从设计到建造的无缝衔接。通过数字化模型,可直观呈现导管架各部件的空间位置和尺寸关系,提前发现潜在的设计冲突和建造难题,为精度控制提供前置保障。仿真模拟技术则贯穿于建造全过程。在焊接模拟中,利用有限元分析软件模拟焊接热过程,预测焊接变形趋势和残余应力分布,据此优化焊接顺序和工艺参数,从源头上减少焊接对精度的影响。在吊装模拟环节,通过虚拟吊装场景,评估吊装方案的可行性和安全性,精确计算吊装过程中的构件变形和位移,确保实际吊装时导管架的精准就位^[3]。

4 海上风电导管架卧式建造精度控制技术的发展趋势

4.1 智能化发展

未来,海上风电导管架卧式建造精度控制将深度融入智能化元素。借助人工智能算法,可对建造过程中的海量数据,如焊接参数、测量数据、变形数据等进行智能分析,自动识别精度偏差模式与趋势,提前预警潜在问题。智能传感器将广泛应用,实时采集构件的应力、应变、温度等关键参数,实现建造状态的全方位感知。同时,智能机器人将在焊接、测量、搬运等环节发挥重要作用,其精准的操作和稳定的性能可有效提升建造精度。此外,智能决策系统能根据实时数据和预设规则,自动调整建造工艺参数,实现建造过程的自适应控制,减少人为因素干扰,进一步提高导管架建造的精度和效率,推动海上风电产业向智能化、自动化方向迈进。

4.2 数字化发展

数字化发展是海上风电导管架卧式建造精度控制的重要趋势。通过构建数字孪生模型,将导管架的物理实体与虚拟模型实时映射,实现建造过程的可视化、可预测和可控制。在数字孪生环境中,可对建造工艺进行虚拟验证和优化,提前发现并解决精度控制难题。同时,数字化技术将打通设计、建造、运维等环节的数据壁垒,实现全生命周期的数据共享与协同管理。利用大数据分析技术,可挖掘建造过程中的规律和经验,为精度控制提供数据支持和决策依据。此外,数字化交付将成为常态,通过数字化手段完整记录导管架的建造信息和精度数据,为后续的运维和改造提供精准的基础资料。

4.3 绿色化发展

随着环保意识的增强,海上风电导管架卧式建造精度控制将更加注重绿色化发展。在材料选择上,优先选用环保型、可回收材料,减少对环境的污染。同时,优化材料使用方案,提高材料利用率,降低资源浪费。在建造工艺方面,推广节能型焊接技术和设备,降低能源消耗。采用先进的焊接工艺,如激光焊接、搅拌摩擦焊等,不仅可提高焊接质量,还能减少焊接烟尘和有害气体的排放。此外,加强建造现场的环境管理,采取有效的防尘、降噪、废水处理等措施,减少建造过程对海洋

生态和周边环境的影响。通过绿色化发展,实现海上风电导管架建造与环境保护的和谐共生。

4.4 标准化发展

标准化发展对于提升海上风电导管架卧式建造精度控制水平至关重要。制定统一的建造精度标准和规范,明确各环节的精度要求和检验方法,为建造过程提供明确的指导。建立完善的标准化管理体系,涵盖设计、采购、建造、检验等全过程,确保每个环节都符合标准要求。加强行业内标准化的交流与合作,推动标准的统一和互认,促进海上风电产业的健康发展。同时,鼓励企业开展标准化创新,将先进的技术和经验转化为标准,提升行业的整体技术水平。通过标准化发展,实现海上风电导管架建造的规范化、规模化,提高建造精度和产品质量,降低建造成本,增强我国海上风电产业的国际竞争力^[4]。

结束语

海上风电导管架卧式建造精度控制技术研究意义重大且成果斐然。通过对工装定位、焊接过程、测量监测等关键环节精度控制技术的深入钻研,以及数字化建造与仿真模拟等前沿技术的融合应用,我们显著提升了导管架的建造精度与质量。展望未来,智能化、数字化、绿色化与标准化发展将成为该领域的主流趋势。持续推进相关技术研究,不仅能进一步优化建造工艺、降低成本,还能推动海上风电产业向更高质量、更可持续方向迈进,为我国能源结构转型与“双碳”目标实现提供坚实有力的技术支撑。

参考文献

- [1]谢瑞灵,郭才金,赖金顺.海上风电导管架T型法兰焊接缺陷防治分析[J].建筑理论,2025,167.
- [2]潘晓亮.海上风电导管架结构与桩基灌浆连接施工方法浅谈[J].建筑技术科学,2022,190.
- [3]杨超.海上风电导管架基础钢管桩稳桩平台结构强度分析[J].建筑理论,2023,211.
- [4]郑庆弟,林志彪,侯林高.海上风电吸力桩型导管架基础施工关键技术研究[J].电力系统及自动化,2022,204.