

水利工程机械安装新技术的应用

黄杏荣 梁 晔

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530000

摘 要：水利工程机械作为水利水电工程的核心组成部分，其安装质量直接决定了工程的运行效率、安全性和使用寿命。随着现代大型化、精密化、智能化水利枢纽的不断涌现，传统的安装工艺与技术已难以满足高精度、高效率、高安全性的施工要求。本文系统探讨了当前在水利工程机械安装领域涌现出的一系列新技术，旨在构建一个面向未来的现代化安装技术体系。研究首先分析了传统安装方法面临的挑战，继而从数字化预拼装与虚拟调试、高精度测量与定位、模块化与集成化安装、智能化工装与机器人应用，以及基于物联网的全过程质量管控等五个核心维度，深入阐述了各项新技术的原理、优势及其对安装流程的革新性影响。研究表明，这些技术的综合应用不仅能够显著提升安装精度与效率，降低安全风险与人工依赖，更能为水利工程机械全生命周期的健康管理和性能优化奠定坚实的数据基础，从而推动水利工程建设向更高质量、更高水平迈进。

关键词：水利工程机械；安装技术；数字化预拼装；高精度测量；模块化安装

引言

水利工程机械，包括水轮发电机组、大型水泵、闸门启闭机、拦污栅清污机以及各类辅助系统设备，是实现水资源调控、发电与防洪排涝的核心设备，其安装是一项多专业协同、精度要求极高的系统工程。传统依赖人工经验与现场反复调整的模式，在面对超大型抽水蓄能电站、百万千瓦级机组及巨型闸门等现代工程时已显乏力：设备尺寸与重量剧增，吊装风险高；内部结构精密（如气隙、间隙需达毫米甚至亚毫米级），人工手段逼近极限；同时工期、成本与安全压力日益加大。在此背景下，BIM、激光跟踪仪、工业机器人、物联网等“新基建”技术正深度融入安装全过程，从方案优化、过程控制到质量保障，推动安装模式向高效、精准、智能转型，为水利工程建设现代化提供关键技术支撑。

1 传统水利工程机械安装方法的挑战

1.1 高度依赖人工经验与技能

传统安装作业严重依赖于技师个人的技能水平和长期积累的实践经验。从设备的开箱验收、基础复测，到部件的吊装、找正、配合同心度调整，再到最终的系统联调，每一个环节都充满了主观判断和手工操作。这种模式存在两大弊端：一是质量稳定性差，不同班组、不同人员的操作结果可能存在差异；二是人才培养周期长，高水平技师的稀缺成为制约项目进度和质量的关键瓶颈。尤其在面对新型、复杂设备时，经验的局限性更为突出，容易导致决策失误。

1.2 现场作业环境复杂，安全风险高

水利工程机械安装多在厂房、廊道、基坑等空间受

限、光线不足、交叉作业频繁的环境中进行。大型部件的吊装、翻身、就位等操作，不仅对起重设备和索具提出极高要求，也对现场指挥、信号传递和人员站位构成严峻考验。任何微小的疏忽都可能引发严重的安全事故，威胁人员生命和设备安全。例如，在深达数十米的蜗壳内进行焊接或装配作业，通风不良、逃生困难，安全风险极高。传统管理模式下，对这些动态风险的识别和预警能力十分有限。

1.3 安装精度控制难度大，返工率高

对于大型旋转机械，如立式水轮发电机组，其轴线的垂直度、各部件法兰的同心度、镜板的水平度等关键几何参数，是决定机组能否平稳、高效、长寿命运行的核心。传统方法采用钢琴线、光学经纬仪、框式水平仪等工具进行测量，过程繁琐、耗时长，且易受温度变化、振动、人为读数误差等因素干扰^[1]。一旦在总装后发现超差，往往需要耗费大量人力物力进行拆解和返工，严重影响工期。此外，对于多台机组并列布置的厂房，还需保证各机组轴线间的平行度，这在传统模式下更是难上加难。

1.4 信息孤岛现象严重，协同效率低下

在传统模式下，设计、采购、制造、运输、安装、调试等各阶段的信息流是割裂的。安装单位拿到的往往是二维图纸和设备清单，难以直观、全面地理解设备的三维空间关系和装配逻辑。这导致在安装过程中频繁出现碰撞、干涉、预留孔洞不符等问题，需要多方协调解决，极大地降低了整体协同效率。设计变更信息无法及时、准确地传递到现场，也常常造成返工和浪费。

1.5 缺乏全过程可追溯的质量证据链

传统安装过程的质量记录多以纸质表格、手绘草图和零散照片为主,信息分散、易丢失、难查询。对于关键工序,如高强度螺栓的紧固、重要焊缝的无损检测,缺乏系统性的数据采集和关联分析。这使得在工程竣工后,若出现运行问题,很难追溯到具体的安装环节和责任人,不利于质量问题的根本原因分析和持续改进。

2 水利工程机械安装新技术的应用体系

为应对上述挑战,一个融合了数字化、自动化、智能化理念的全新安装技术体系正在形成。该体系以数据为核心,贯穿于安装前、中、后全过程,实现了从“人控”到“数控”、从“经验驱动”到“模型驱动”的根本性转变。

2.1 基于BIM的数字化预拼装与虚拟调试

2.1.1 全生命周期信息模型的构建

在项目设计阶段,即利用BIM技术构建包含所有水利工程机械设备及其基础、埋件、管路、电缆桥架等在内的精细化三维信息模型。该模型不仅是几何形状的数字化表达,更集成了设备的材质、重量、重心、接口参数、安装顺序、工艺要求等丰富的非几何信息,形成了一个统一的、权威的数据源。

2.1.2 虚拟预拼装与碰撞检测

在实体设备运抵现场前,即可在BIM平台上进行全专业的虚拟预拼装。通过将土建结构模型、机电设备模型、金属结构模型进行精确整合,可以提前发现并解决90%以上的空间冲突问题,如设备与梁柱的干涉、管道与桥架的碰撞、吊装路径的障碍等。这从根本上避免了现场“边干边改”的被动局面,确保了安装的一次成功率。

2.1.3 安装方案模拟与虚拟调试

利用BIM模型,可以对复杂的吊装、翻身、就位等关键工序进行4D(3D+时间)或5D(4D+成本)施工模拟。通过动画演示,可以优化吊点布置、选择最合适的起重机械、规划最优的运输和吊装路径,并对施工人员进行可视化交底^[2]。对于控制系统,还可进行虚拟调试(Virtual Commissioning),即在物理设备安装前,先在数字孪生环境中对PLC(可编程逻辑控制器)程序进行测试和验证,大幅缩短现场调试周期。

2.2 高精度测量与智能定位技术

2.2.1 激光跟踪仪与全站仪的集成应用

激光跟踪仪凭借其高精度(可达微米级)、大测量范围和实时动态跟踪能力,已成为大型水利工程机械安装的“新标尺”。它可以快速、精确地获取设备关键点(如主轴法兰端面、轴承座中心、机坑基准点)的三维

坐标,并实时反馈给调整机构。与高精度全站仪结合,可建立覆盖整个安装区域的高精度控制网,为所有测量活动提供统一的基准。

2.2.2 数字化找正与自动调整系统

基于高精度测量数据,开发专用的数字化找正软件。该软件能自动计算出设备当前状态与目标状态之间的偏差(如偏心量、倾斜角),并生成直观的调整指令。更进一步,可将此系统与液压千斤顶、电动推杆等执行机构联动,构成闭环控制系统,实现设备位置的半自动乃至全自动微调,将人工干预降至最低,确保调整过程的平滑、精准和高效。

2.2.3 无线传感器网络(WSN)的实时监测

在关键设备部件上布设微型无线倾角传感器、位移传感器和温度传感器,构成一个无线传感器网络。在吊装、就位及后续的混凝土浇筑、灌浆等过程中,可对设备的姿态、位移和环境温湿度进行7x24小时不间断的实时监测。一旦监测值超出预设的安全阈值,系统会立即发出预警,有效防止因外部扰动(如风载、振动、不均匀沉降)导致的安装精度失准。

2.3 模块化与集成化安装策略

2.3.1 工厂化预组装与分段运输

将原本需要在现场完成的大量装配工作,前置到制造厂内进行。例如,将水轮机的蜗壳、座环、基础环等在厂内预组装成一个大型模块;或将发电机的定子机座、下机架等集成在一起^[3]。这种工厂化作业环境优越,可使用专用工装和自动化设备,保证了极高的装配精度和焊接质量。

2.3.2 现场“乐高式”快速拼接

经过充分预组装的模块被整体或分段运输至现场后,只需进行少量的连接、紧固和管线对接工作,即可完成主体安装。这极大地减少了高空、狭小空间内的高危作业,缩短了现场安装周期,并显著提升了安装质量的可控性和一致性。模块化设计还便于未来的检修和更换。

2.3.3 集成化功能单元的交付

更深层次的集成化体现在将机械、电气、液压、润滑、冷却等多个子系统集成成为一个完整的、可独立运行的功能单元(Skid-mounted Unit)。例如,一个完整的油压装置单元,在出厂前已完成所有内部管路的连接、清洗、试压和功能测试。运抵现场后,只需接入外部电源和主油管路,即可投入运行,极大简化了现场的安装和调试工作。

2.4 智能化工装与机器人技术

2.4.1 自适应智能工装的应用

传统工装多为刚性、专用的结构,缺乏灵活性。新一代智能工装则集成了传感器、执行器和控制系统,能够根据被安装设备的实时状态进行自适应调整。例如,一种用于大型转子吊装的智能平衡梁,可通过内置的称重传感器和液压系统,自动调节各吊点的受力,确保转子在空中始终保持水平,避免因受力不均造成的变形或损伤。

2.4.2 工业机器人在特种作业中的引入

在一些重复性强、精度要求高或环境恶劣的安装环节,工业机器人展现出巨大潜力。例如,采用六轴协作机器人进行狭小空间内的螺栓紧固,可保证每颗螺栓的扭矩和角度完全一致;利用爬壁机器人对大型闸门面板进行焊缝的自动无损检测,可提高检测覆盖率和准确性;甚至在未来,有望看到自主移动机器人(AMR)承担起小型部件的自动搬运和配送任务。

2.4.3 增强现实(AR)技术辅助现场作业

通过为现场工程师配备AR眼镜或平板设备,可以将BIM模型中的设备信息、安装指引、操作步骤等虚拟信息,以叠加的方式实时投射到其视野中的真实设备上。工人无需频繁查阅纸质图纸,即可直观地看到管线走向、螺栓孔位、电缆接线端子等信息,有效减少误操作,提升作业效率和准确性^[4]。

2.5 基于物联网的全过程质量管控

2.5.1 安装过程数据的全面采集与追溯

利用RFID(射频识别)标签、二维码、NFC(近场通信)芯片等技术,为每一个关键设备部件、每一根重要螺栓、每一批焊接材料、每一位操作人员赋予唯一的数字身份。在安装的每一个关键环节,通过手持智能终端、固定式读写器或集成在工具上的传感器,自动、无感地记录操作人员、操作时间、使用的工具型号、施加的扭矩/拉力值、环境温湿度、质检员确认等信息,并实时上传至云端的项目管理平台(PMS)或企业资源计划(ERP)系统。

2.5.2 构建安装质量数字档案

所有采集到的过程数据,连同高精度测量数据、无损检测报告(含原始波形和图像)、隐蔽工程的全景影像资料、虚拟调试日志等,共同构成了该台水利工程机械独一无二的、不可篡改的“安装质量数字档案”或“数字出生证明”。这份档案不仅为竣工验收提供了详

实、客观、可追溯的电子化依据,更重要的是,它为日后的运行维护、故障诊断、寿命预测和性能优化提供了极其宝贵的历史基线数据。

2.5.3 大数据分析驱动的持续改进

通过对多个项目积累的海量安装数据进行大数据分析和机器学习,可以挖掘出影响安装质量和效率的深层次规律和关键因素。例如,可以分析出某种型号螺栓在特定环境下的最佳紧固工艺参数;可以识别出某个工序是导致工期延误的瓶颈;可以预测出某类设备在安装过程中最容易出现的质量缺陷。这些由数据驱动的洞察,可用于优化未来的安装工艺规程、改进智能工装的设计、完善人员培训的课程内容,从而形成一个“实践-数据-分析-改进”的良性循环,不断提升整个行业的安装技术水平和项目管理水平。

3 结语

水利工程机械安装技术的革新是水利工程高质量发展的关键。本文提出的现代化安装技术体系,以BIM数字化预拼装、激光跟踪仪高精度测量、工厂化模块化安装、智能工装与机器人自动化作业、物联网全过程质量管控为核心,形成有机融合、相互赋能的整体。该体系不仅提升安装效率与精度,更推动生产组织和管理模式从碎片化、经验化向系统化、数据化跃迁。通过在数字世界中映射、模拟并优化物理安装过程,再指导现场精准执行,构建起“数字-物理”闭环。未来,随着人工智能、5G、数字孪生等技术成熟,安装将更智能自主,成为数据沉淀、知识积累与价值创造的关键环节。这一数字化基因将为水利工程机械的智慧运维、预测性维护及全生命周期管理奠定基础,助力实现安全、高效、绿色、智能的水利现代化目标。

参考文献

- [1]刘洁霏.水利工程机械安装及维护技术要点[J].南方农机,2023,54(07):147-149+170.
- [2]陈波,马秀敏,蔡杨名.现代化机械设备在水利工程施工中的应用研究[J].水上安全,2026,(01):1-3.
- [3]龙江周,李毅.机械自动化技术在水利工程中的应用[J].水利水电科技进展,2026,46(01):115.
- [4]李雪艳,张明.智能化机械在水利工程建设中的应用与优化研究[J].河北农机,2025,(23):67-69.