

泵站机电设备安装质量控制与运行优化研究

焦伟

新疆水发建设集团有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6935

[摘要] 泵站作为现代水利枢纽、城市供排水系统及农田灌溉网络的核心“心脏”，其运行效能直接关系到国家水资源的调配安全、防洪排涝能力以及经济社会的可持续发展。随着国家水网建设的全面加速，大型现代化泵站的规模日益扩大，机电设备呈现出高参数、大流量、复杂集成化及智能化的显著特征。然而，在工程实践的全生命周期中，机电设备的安装质量缺陷与运行阶段的能效低下、故障频发等问题依然突出，严重制约了泵站整体效益的发挥，甚至引发安全事故。本文旨在系统综述泵站机电设备安装质量控制的关键技术与运行优化策略的最新研究进展。

[关键词] 泵站工程；机电设备；安装质量控制；运行优化；变频调速；数字孪生；全生命周期管理；预测性维护；BIM技术

中图分类号：TV675 **文献标识码：**A

Research on Quality Control and Operational Optimization of Electromechanical Equipment Installation in Pump Stations

Wei Jiao

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] As the core "heart" of modern water conservancy hubs, urban water supply and drainage systems, and agricultural irrigation networks, the operational efficiency of pumping stations directly impacts the security of national water resource allocation, flood control and drainage capabilities, as well as sustainable socio-economic development. With the accelerated advancement of the national water network infrastructure, large-scale modern pumping stations have expanded significantly, featuring electromechanical equipment characterized by high parameters, large flow rates, complex integration, and intelligent capabilities. However, throughout their entire lifecycle, persistent issues such as installation quality defects in electromechanical equipment, low operational energy efficiency, and frequent failures remain prominent, severely limiting the overall performance of pumping stations and even triggering safety incidents. This paper provides a systematic review of recent research advancements in key technologies for electromechanical equipment installation quality control and operational optimization strategies for pumping stations.

[Key words] Pump station engineering; Electromechanical equipment; Installation quality control; Operation optimization; Variable frequency speed control; Digital twin; Full life cycle management; Predictive maintenance; BIM technology

引言

泵站是调节水资源时空分布、保障防洪排涝、供水灌溉及水环境改善的关键基础设施，被誉为水利工程的“心脏”。特别是在全球气候变化背景下，极端天气事件频发，暴雨洪涝与干旱缺水交替出现，对泵站系统的可靠性、应急能力以及运行效率提出了前所未有的挑战。现代泵站已不再是简单的机械抽水设施，而是集流体力学、机械工程、电气工程、自动控制理论、信息技术及新材料科学于一体的复杂系统工程。其核心在于水泵、电

机、传动装置、阀门及附属系统的精密配合与协同运行，任何一个环节的微小失误都可能引发连锁反应，导致系统瘫痪。

然而，在实际工程建设与运营过程中，由于设计图纸与现场地质条件差异、施工工艺不规范、检测手段相对落后、管理流程缺失以及运维人员素质参差不齐等原因，导致大量泵站出现了机组振动过大、噪音超标、效率低下、漏水漏油甚至灾难性故障等现象。这些问题不仅大幅增加了后期的运维成本，缩短了关键设备的使用寿命，更可能引发非计划停机，造成巨大的直接

经济损失和严重的社会影响。例如,某大型引调水工程中,因机组基础二次灌浆不密实导致长期振动超标,最终不得不进行大规模返工,工期延误长达半年,损失惨重;又如某城市污水泵站,因电气柜散热不良及接线松动导致频繁跳闸,严重影响城市防涝能力。^[1]

近年来,随着工业4.0、物联网、大数据及人工智能等前沿技术的飞速发展,泵站机电设备的安装与运行管理迎来了革命性的变革机遇。BIM(建筑信息模型)、激光扫描、在线监测、边缘计算、数字孪生等技术的引入,为传统泵站工程提供了数字化转型的强大引擎。如何在建设阶段通过先进的工艺与技术严格控制安装质量,消除先天缺陷;在运行阶段利用智能算法科学优化调度策略,挖掘节能潜力,已成为水利工程领域亟待解决的重大课题。本文将结合国内外最新研究成果与工程实践案例,对泵站机电设备安装质量控制与运行优化技术进行系统性综述,以期提升我国泵站工程建设与管理水平提供坚实的理论支撑与技术指导,助力实现国家“双碳”战略目标。

1 泵站机电设备安装质量现状分析与关键控制点

准确识别安装过程中的质量风险点是实施有效控制的前提。必须从基础工程、机组安装及电气调试三个维度,深入剖析当前存在的突出问题及其成因,建立全方位的质量风险预警机制。

1.1 基础处理不当与预埋件偏差问题

泵站机组的基础混凝土浇筑质量是决定机组长期稳定运行的基石。在实际施工中,常见质量问题包括:基础表面平整度严重超标,导致机座安装时受力不均,产生局部应力集中;预埋螺栓位置偏差过大,超出规范允许范围,造成二次钻孔或加固困难,甚至破坏钢筋结构;二次灌浆层不密实、强度不足或存在空洞,导致机组运行时产生不均匀沉降或应力集中。此外,部分泵站地处地质条件复杂的区域,若未采取有效的地基加固措施,极易造成基础开裂、倾斜,进而威胁整个泵站结构安全。基础处理不当引发的连锁反应往往具有滞后性,初期可能仅表现为轻微振动,但随着运行时间推移,振动加剧会导致地脚螺栓松动、断裂,甚至引起机组整体位移,后果不堪设想。同时,基础混凝土养护不到位导致的收缩裂缝,也是诱发渗漏和腐蚀的重要因素。^[2]

1.2 机组轴线对中误差与联轴器连接缺陷

水泵与电机的同轴度是决定机组运行平稳性的核心指标。安装过程中,受限于测量工具精度不够、环境温度变化引起的热变形、操作人员技能不足或测量基准传递误差等因素,常导致转子轴线不同心、平行度超差。这种对中误差会引起轴承过热、磨损加快,导致轴封泄漏、填料函损坏,严重时会造成轴弯曲或断裂。同时,联轴器连接螺栓紧固力矩不均、弹性元件老化或安装间隙调整不当,也会传递额外的振动载荷,加速传动部件疲劳失效。对于大型立式机组,轴线垂直度的微小偏差在长轴传递下会被放大,导致摆度过大,严重影响机组寿命。此外,刚性联轴器与挠性联轴器的选型错误,也会导致无法有效吸收振动和补偿位移,进一步加剧设备损伤。

1.3 电气系统接线混乱与调试参数设置失误

电气系统是泵站的神经中枢,其安装质量直接关系到系统的安全性与可靠性。常见问题包括:电缆敷设不规范,如弯曲半径过小、固定不牢、标识不清,导致电缆受损或检修困难;接线端子松动、接触电阻过大导致发热起火;绝缘电阻不达标,接地系统不完善或接地电阻过大,存在触电隐患;控制柜内布线杂乱,抗干扰措施不到位,导致信号传输不稳定。在调试阶段,若保护定值整定不合理、变频器参数设置错误或PLC逻辑控制存在漏洞,将导致设备无法启动、频繁跳闸或运行失控。特别是对于大型变频调速机组,若谐波治理不到位,还可能对电网及其他敏感设备造成干扰,影响整个电力系统的稳定性,甚至引发大面积停电事故。此外,防雷接地系统的设计与施工缺陷,也是导致雷击事故频发的主要原因。^[3]

2 机电设备安装全过程质量控制关键技术

针对上述问题,需引入先进的管理理念与高精度施工技术,实现从“事后检验”向“过程预控”的根本转变,构建全方位的质量控制体系,确保每一道工序都符合高标准要求。

2.1 基于BIM技术的数字化施工与碰撞检查

利用BIM技术建立泵站机电安装的全专业三维模型,涵盖土建、机械、电气、管道等多个专业。在设计阶段即可进行管线综合排布与空间碰撞检查,提前发现并解决设计与现场的冲突,避免返工。在施工阶段,通过BIM+GIS平台进行可视化交底,指导施工人员精准定位预埋件、管道走向及设备基础。利用三维激光扫描技术对施工现场进行实景建模,与设计模型进行实时比对,自动分析安装偏差,确保施工精度控制在毫米级范围内。^[4]BIM技术还能生成施工进度模拟,优化工序衔接,提高施工效率,实现工程质量的数字化管控。通过BIM模型,可以实现预制构件的工厂化生产与现场快速装配,减少人为误差,提高安装精度。

2.2 高精度测量定位与动态纠偏技术

采用全站仪、激光准直仪、电子水准仪及激光跟踪仪等高精度的测量仪器,建立独立的测量控制网,对机组基础、机座、泵体及电机进行多次复核测量。应用动态激光跟踪仪实时监测机组转动过程中的轴线变化,结合温度补偿算法,消除热变形影响,确保测量数据的准确性。对于大型立式机组,引入在线自动对中系统,在机组试运行期间实时监测轴系状态,一旦发现偏差超出阈值,立即发出预警并指导人工微调,确保机组始终处于最佳对中状态。^[5]此外,推广使用智能扭矩扳手,确保螺栓紧固力矩符合设计要求,防止过紧或过松。通过建立测量数据库,实现历史数据的追溯与分析,为后续类似工程提供参考。

2.3 振动噪声控制与绿色施工工艺

在设备安装中,优先选用减振基座、阻尼橡胶垫及柔性连接管,从源头隔离振动传递路径。对高噪声设备(如风机、变压器)采取隔声罩、吸声材料包裹等降噪措施,降低对环境的影响。推广工厂化预制与模块化安装工艺,将部分管路、电气柜在工厂内完成组装与测试,减少现场焊接与高空作业,提高安装精度与施

工效率。同时,严格执行绿色施工规范,控制施工扬尘、噪音及废弃物排放,打造环保型泵站工程。通过引入振动频谱分析技术,在安装完成后对机组进行初步振动测试,及时发现并消除潜在的不平衡因素。此外,采用低噪声润滑油和静音轴承,进一步提升设备的静音性能。

3 泵站运行优化策略与能效提升技术

安装质量的提升只是基础,运行阶段的优化才是实现长期效益的关键。需从调度策略、设备改造及智能管控三方面入手,构建高效节能的运行体系,实现经济效益与社会效益的双赢。

3.1 基于水力模型的变工况优化调度

建立泵站群的水力模型,结合实时水文数据、水位预报及用水需求,利用遗传算法、粒子群算法、神经网络等智能优化算法,求解多目标优化调度方案。根据来水量与负荷变化,动态调整运行台数、启停顺序及叶片角度(对于轴流泵),使每台机组始终运行在高效区,避免“大马拉小车”现象。通过群控系统实现多台泵站的协同运行,平衡管网压力,降低系统总能耗,显著提升整体输水效率。优化调度不仅能节约电能,还能延长设备使用寿命,减少维护成本。此外,引入实时电价响应机制,在低谷电价时段加大抽水力度,高峰时段减少运行,进一步降低运行成本。

3.2 变频调速技术与无功补偿优化

全面推广高压变频调速技术,替代传统的阀门节流调节方式。通过改变电机转速来调节流量与扬程,实现无级调速,大幅降低启动电流与运行功耗,节能效果可达20%-40%。同时,配置SVG(静止无功发生器)或SVC(静止无功补偿器),实时补偿无功功率,提高功率因数,减少线路损耗与电压波动。针对谐波污染严重的场合,加装有源滤波器(APF),净化电网电能质量,保护电机绝缘,延长设备寿命。变频技术的应用使得泵站能够灵活适应多变的水力条件,实现真正的按需供水。此外,推广永磁同步电机等高效电机,进一步提升系统整体能效。

3.3 数字孪生驱动的预测性维护与智慧运维

构建泵站系统的数字孪生体,集成SCADA、视频监控、传感器网络等多源数据,在虚拟空间实时映射物理泵站的运行状态。利用大数据分析机器学习算法,对机组振动、温度、电流、压力等特征数据进行深度挖掘,建立故障预测模型,提前识别轴承磨损、气蚀、不平衡、电气绝缘老化等潜在隐患,实现从“定期检修”向预测性维护(PHM)的转变。通过移动端APP与AR(增强现实)技术,辅助运维人员快速诊断故障、远程专家会诊,提升运维响应速度与决策准确性。数字孪生技术还能模拟不同运行工况下的设备表现,为优化运行策略提供科学依据。此外,建立全生

命周期碳足迹追踪系统,实时监控碳排放情况,为绿色运营提供数据支持。

4 结语

泵站机电设备安装质量控制与运行优化是一项涉及多学科交叉、全生命周期管理的复杂系统工程。本文系统梳理了当前安装过程中存在的质量通病,深入探讨了BIM数字化施工、高精度测量、振动控制等关键技术的应用路径,并详细分析了变频调速、智能调度及数字孪生在运行优化中的重要作用。实践证明,只有坚持“质量为本、技术先行、智慧赋能”的发展理念,构建全生命周期的质量管控与运行优化体系,才能有效解决泵站“建得好、用不好”的难题,保障水资源安全高效利用。

未来,随着5G/6G通信、边缘计算、量子传感及生成式AI技术的深度融合,泵站系统将向更加自主感知、自愈合、自适应的方向发展。设备将具备更强的自我诊断与自我修复能力,运维模式将从“人海战术”转向“无人值守、少人巡检”。我们应持续推动产学研用协同创新,完善相关标准规范,培养高素质复合型人才,打破行业壁垒,打造“安全、绿色、智慧”的现代化泵站新标杆,为国家水网建设与生态文明建设贡献坚实力量,助力实现“双碳”战略目标。同时,应加强国际合作,引进消化吸收国际先进经验,提升我国泵站工程的整体技术水平,为全球水利事业发展贡献中国智慧与中国方案。

【参考文献】

- [1]刘宏旸.火电厂电气设备安装调试技术要点分析[J].粘接,2025,52(10):238-241.
- [2]钱程.论水泵机组安装施工技术 with 质量控制[J].中国设备工程,2025,(14):227-229.
- [3]林桂香.机电一体化设备安装要点及保障措施[J].造纸装备及材料,2025,54(05):49-51.
- [4]薛涛.W变电站工程质量管理研究[D].贵州大学,2025.
- [5]张健,孙鲁楠,董通.信息化背景下泵站机电设备维护策略研究[J].水电站机电技术,2024,47(10):111-114+133.

作者简介:

焦伟(1994—),男,汉族,河南人,本科,职称:水利工程师,研究方向:长期从事水利工程建设管理工作,研究方向为复杂地质条件下深埋输水隧洞施工技术优化及质量安全控制、压力钢管及玻璃钢管穿越特殊地质段施工技术优化及质量安全管控、泵站工程建设期施工工艺与配套建设技术优化管理,具备丰富的水利隧洞、输水管道、枢纽及相关附属建筑物现场管理及技术实践经验。