

水泵电机振动控制技术的研究

李聪林

宁夏回族自治区固海扬水管理处 宁夏 中卫 755100

摘要：随着扬水先进技术的加速与能源需求的持续增长，水泵电机作为流体输送系统的核心动力设备，其运行稳定性直接关系到扬水生产效率与设备寿命。本文围绕水泵电机振动控制技术展开研究，首先阐述振动的基本概念、水泵电机振动的特点及主要成因，为后续研究奠定理论基础。在此基础上，重点分析动态平衡校正、轴承优化、电磁振动抑制、结构减振设计及振动监测与预警系统等关键控制技术的原理与应用。最后，结合水利行业发展需求，探讨未来在智能化与自动化、绿色化与节能化、集成化与系统化、高精度与高可靠性等方面的发展趋势。研究旨在为提升水泵电机运行稳定性、延长设备寿命及降低故障风险提供技术参考，对推动水利领域的技术进步具有重要意义。

关键词：水泵电机；振动控制；技术研究

引言：水泵电机作为水利生产的关键设备，其运行稳定性直接影响系统效率与安全。振动是水泵电机运行中常见的问题，不仅会降低设备运行精度、增加能耗，还可能引发部件磨损、结构疲劳甚至恶性事故，因此振动控制技术的研究具有重要现实意义。目前，尽管学界与业界已针对振动问题开展了一定研究，但随着水泵电机向大型化、高速化方向发展，振动诱因更趋复杂，传统控制手段面临新的挑战。本文立足于水泵电机振动的本质特征，系统梳理振动成因与关键控制技术，并展望未来发展方向，以期为振动控制技术的创新与应用提供理论支撑和实践指导。

1 水泵电机振动控制技术的概述

1.1 振动的基本概念

振动是物体在平衡位置附近做往复运动的一种物理现象，是机械系统运动状态的重要表现形式。从物理本质来看，振动由系统的惯性、弹性和阻尼共同作用产生，通常以位移、速度、加速度等物理量来描述其运动特性。在工程领域，振动的频率、振幅和相位是表征其特征的关键参数。按照激发方式的不同，振动可分为自由振动、受迫振动和自激振动等类型。适度的振动在某些场景下具有利用价值，但在水泵电机等设备中，过度振动往往会导致能量损耗、部件磨损，甚至引发系统故障，因此对振动的有效控制具有重要意义。

1.2 水泵电机振动的特点

水泵电机的振动具有多源性、耦合性和复杂性等显著特点。其振动并非由单一因素引起，而是机械、电磁、流体等多种因素共同作用的结果，各因素之间相互影响、相互耦合，使得振动信号呈现出复杂的频谱特性。此外，振动强度会随电机负载、转速及运行工况的

变化而动态改变，具有明显的时变特性。在振动传播方面，水泵电机的振动会通过基座、管道等结构向周围环境传递，不仅影响自身运行稳定性，还可能对周边设备和建筑物造成不良影响。同时，其振动频率范围较宽，涵盖低频到高频多个频段，增加了振动控制的难度。

1.3 振动产生的主要原因

水泵电机振动产生的原因可归纳为机械、电磁和流体三大类。机械方面，转子不平衡、轴系不对中、轴承磨损或装配不良等是常见原因，这些问题会导致旋转部件在运动中产生离心力或附加力矩，引发周期性振动。电磁方面，定子与转子之间的空气隙不均匀、绕组短路或三相电流不平衡等，会使电机内部产生不平衡的电磁力，从而激发电动。流体方面，水泵叶轮与流体相互作用时产生的水力脉动，如水流冲击、涡流、汽蚀等现象，会将流体动力转化为机械振动传递给电机，这一因素在水泵与电机刚性连接的系统中表现得尤为突出^[1]。

2 水泵电机振动控制的关键技术

2.1 动态平衡校正技术

动态平衡校正技术是解决水泵电机转子不平衡引发振动的核心手段，其原理是通过调整转子质量分布，使转子旋转时的离心力合力趋近于零，从而降低振动幅值。该技术主要分为现场动平衡和离线动平衡两类。离线动平衡适用于新制造或大修后的转子，通过专用平衡机在静态或低速旋转状态下检测不平衡量并进行校正，校正过程中需将转子从设备上拆卸下来，适合对精度要求较高的初始平衡处理。现场动平衡则针对运行中的设备，无需拆卸转子，利用便携式动平衡仪实时采集振动信号，计算不平衡相位和大小后，通过在转子特定位置加重或去重完成校正，尤其适用于大型机组或不便停机

的生产场景。在实际应用中,动态平衡校正能显著减少轴承磨损和能量损耗,延长设备的使用寿命。随着技术发展,激光动平衡技术凭借高精度、非接触的优势,在高速水泵电机中得到广泛应用,其通过激光定位实现质量调整,有效提升了校正效率和稳定性,减少了传统机械校正方式可能带来的二次误差。

2.2 轴承优化技术

轴承作为水泵电机的关键支撑部件,其性能直接影响振动水平,轴承优化技术通过改进轴承结构、材料和润滑方式实现减振效果。在结构设计上,采用双列角接触球轴承或调心滚子轴承可提高径向和轴向承载能力,减少因受力不均产生的振动,其中调心滚子轴承尤其适用于存在轴系偏斜的工况;通过优化轴承游隙,能降低转子运转时的冲击和摩擦振动,游隙的大小需根据电机转速和负载特性进行针对性调整。材料方面,陶瓷轴承凭借高强度、低摩擦系数和耐高温特性,在高速电机中替代传统钢制轴承,有效降低了振动幅值,同时其抗腐蚀性能也使其适用于潮湿或腐蚀性环境。润滑技术的优化同样重要,采用油气润滑或固体润滑方式,能减少润滑剂流失和摩擦热产生,维持轴承稳定运行,油气润滑通过持续供给微量润滑油和压缩空气,在轴承内部形成稳定的润滑膜和散热环境。此外,轴承座的刚性设计和安装精度控制,可避免因支撑变形引发的附加振动,进一步提升系统减振效果。

2.3 电磁振动抑制技术

电磁振动源于电机定子间的电磁力波动,抑制技术通过优化电磁设计和控制策略降低振动能量。在设计层面,采用正弦绕组或分布绕组可减少谐波磁场,降低电磁力的高次谐波分量,分布绕组通过合理安排线圈布局,使磁动势波形更接近正弦波;合理设计气隙长度并提高加工精度,能减少气隙不均匀导致的单边磁拉力,从而降低低频振动,加工过程中需严格控制定转子的圆度和同轴度误差。控制策略方面,变频调速系统中采用 SVPWM(空间矢量脉宽调制)技术,可优化输出电压波形,减少电流谐波对电磁力的影响,该技术通过合成空间电压矢量,使电机端电压更接近正弦波。对于三相异步电机,通过实时监测三相电流平衡度并进行动态调节,能避免因电流不对称产生的附加电磁力矩,调节过程通常借助变频器或调压器实现电流的均衡分配。此外,在定子铁芯与机座之间设置弹性阻尼层,可有效阻隔电磁振动的传递路径,阻尼层的材料选择需兼顾弹性和导热性,以确保减振效果和散热需求。

2.4 结构减振设计

结构减振设计通过优化水泵电机的整体结构和连接方式,降低振动的产生与传递,主要包括刚度设计、阻尼减振和隔振措施三大类。刚度设计中,采用箱式机座或焊接框架结构可提高机身整体刚性,避免共振现象,箱式机座通过封闭结构增强抗变形能力,适用于高转速电机;电机与水泵的连接部位采用弹性联轴器,能减少轴系不对中引发的振动传递,弹性联轴器通过自身的弹性变形补偿轴系的安装误差,常见的有梅花形、膜片式等类型。阻尼减振技术通过在机座、端盖等部件表面粘贴阻尼材料(如丁基橡胶、粘弹性复合材料),将振动机械能转化为热能耗散,粘贴过程中需保证材料与部件表面的紧密贴合,以提高能量转换效率,可有效衰减高频振动。隔振设计则在设备与基础之间安装弹簧隔振器或橡胶隔振垫,通过改变系统固有频率,避免与激励频率共振,弹簧隔振器适用于低频振动控制,橡胶隔振垫则在中高频段表现更优,在大型水泵机组中,隔振措施能显著降低基础振动传递率,减少对周边设备和建筑物的影响。

2.5 振动监测与预警系统

振动监测与预警系统是实现水泵电机振动闭环控制的关键,通过实时采集、分析振动信号,提前发现潜在故障并触发预警。系统由传感器、数据采集模块、分析软件和预警装置组成:加速度传感器或速度传感器安装在轴承座、机壳等关键部位,采集振动时域和频域信号,传感器的安装位置需靠近振动源,同时避免受到其他设备的干扰;数据采集模块将模拟信号转化为数字信号后,传输至分析系统进行特征提取,传输过程可采用有线或无线方式,无线传输适用于不便布线的场景。分析系统通过对比正常运行时的振动阈值,识别转子不平衡、轴承磨损等故障类型,其核心算法能对振动信号的频谱特征进行分析,区分不同故障的典型频率成分。基于 AI 算法的智能诊断系统可实现故障的精准定位和寿命预测,通过机器学习大量历史故障数据,不断优化诊断模型的准确性。预警装置通过声光报警或远程通讯方式,及时通知运维人员采取措施,避免故障扩大,远程通讯可接入工厂的监控平台,实现集中化管理。该系统在水利生产行业的应用,能减少水泵电机的故障停机时间,显著提升设备运行可靠性,保障生产流程的连续性^[2]。

3 水泵电机振动控制技术的发展趋势

3.1 智能化与自动化

智能化与自动化是水泵电机振动控制技术的核心发展方向,依托人工智能、物联网等技术实现振动控制全流程的自主化。未来系统将具备更敏锐的自主感知能

力,通过布置在电机关键部位的多维度传感器,实时捕捉振动的细微变化,并结合深度学习算法对海量数据进行快速分析,精准识别振动源和潜在故障类型。在控制执行层面,智能化系统可与动态平衡校正、轴承调节等设备无缝联动,根据实时监测数据实现振动的实时自适应控制,整个过程无需人工干预。例如,当系统监测到转子不平衡程度加剧时,能自动触发激光动平衡装置进行在线校正,确保振动始终处于合理范围。同时,自动化运维平台将整合设备全生命周期的运行数据,形成“监测-分析-决策-执行-反馈”的完整闭环管理体系,通过远程操控即可完成参数优化和故障处理,大幅提升控制效率和响应速度,更好地适应现代化工业生产的无人化、少人化需求。

3.2 绿色化与节能化

绿色化与节能化趋势聚焦于减少振动控制过程中的能源消耗和环境影响。在材料选择上,将更多采用可降解阻尼材料、低损耗绝缘材料、环保型润滑剂等绿色环保材料,从源头降低废弃物处理压力,减少对生态环境的污染。振动控制技术本身也将注重能量的回收与循环利用,例如通过在电机振动部位安装压电材料组件,将振动产生的机械能转化为电能,为监测系统、控制模块等小型设备供电,实现局部能源自给。在控制策略上,优化算法将更加注重平衡振动抑制效果与能耗之间的关系,避免过度调节导致的能源浪费,使振动控制过程更加高效节能。此外,绿色设计理念将贯穿设备的全生命周期,从振动控制技术的研发、材料选用、生产制造,到应用运行、维护保养乃至报废回收,均以降低碳排放和资源消耗为核心目标,与全球低碳发展理念深度契合,推动水泵电机产业向环境友好型方向转型升级。

3.3 集成化与系统化

集成化与系统化趋势强调将分散的振动控制技术整合为协同运作的整体系统。未来的振动控制方案将打破各技术之间的壁垒,实现动态平衡校正、电磁抑制、结构减振、振动监测等技术的有机融合,形成一个功能完备的“监测-分析-控制-反馈”完整体系。例如,振

动监测系统采集的数据可直接驱动结构减振模块的参数实时调整,电磁抑制技术与轴承优化技术也能根据不同工况自动联动适配,提升整体减振效果。同时,该系统将与水泵电机的整体运行系统深度集成,结合流体动力学、电机控制、热力分析等多领域数据,实现跨系统的振动协同管控。

3.4 高精度与高可靠性

高精度与高可靠性趋势致力于提升振动控制的精准度和系统稳定性,以适应高端装备对运行环境的严苛要求。在控制精度上,将广泛应用纳米级传感器和高精度执行机构,实现对振动参数的微量级调节。比如在动态平衡校正中,借助先进的测量和控制技术,可实现对转子质量的超精细调整,确保振动幅值控制在极低水平。可靠性方面,技术研发将聚焦于极端工况下的稳定运行,开发耐高低温、抗腐蚀、抗冲击的振动控制组件,确保在化工、深海、高温高压等复杂恶劣环境中不失效。同时,冗余设计将在系统中得到广泛应用,当某一控制模块出现故障时,备用系统能在瞬间无缝切换,保障振动控制的连续性^[3]。

结束语

综上所述,水泵电机振动控制技术的研究对提升扬水设备运行稳定性、延长使用寿命及保障扬水生产安全意义重大。本文梳理了振动成因、关键控制技术及发展趋势,动态平衡校正等技术为当前减振提供有效方案,而智能化等趋势指明了未来方向。随着水利行业的发展,振动控制需求将更复杂,需持续探索创新,推动技术升级,为水泵电机高效、稳定运行提供坚实支撑,助力相关产业高质量发展。

参考文献

- [1]陈义中.化工工业水泵专用电机节能改造[J].电机技术, 2021, 2,142-143.
- [2]林雅琴.工业风机水泵的节能潜力[J].山东工业技术, 2021 (13) : 125-126
- [3]刘波,霍亭,方修睦,等.水泵装置的效率分析及试验研究[J].区域供热, 2022, (001):185-191.