

闭式雷顿机组电磁轴承转子振动控制与处理研究

潘灿程

中国核动力研究设计院

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8964

[摘要] 闭式雷顿机组是工业领域核心动力设备，广泛应用于能源、化工、冶金等行业，电磁轴承因无接触、低能耗、适配高转速等优势，成为其转子支承核心部件。但机组运行中，转子振动始终是制约设备稳定运行、缩短服役寿命的关键问题，转子不平衡、电磁力波动、外部扰动、参数失配等因素，均会引发异常振动，严重时导致机组停机、部件损坏，造成经济损失。目前国内多数机组采用常规PID控制，控制精度低、抗干扰能力弱，难以适配方舱密闭、变工况、多扰动叠加的复杂场景。为此，本文结合机组运行特性与电磁轴承工作原理，梳理振动核心诱因，分析传统控制短板，构建适配工况的振动控制体系，从监测、控制、补偿、故障处理四方面提出技术方案，通过优化算法、完善监测、规范流程，实现振动精准抑制，为机组安全长效运行提供支撑。

[关键词] 闭式雷顿机组；电磁轴承；转子振动；振动控制；故障处理

Research on Vibration Control and Management of Electromagnetic Bearing Rotor in Closed-Loop Rotating Machine Units

Pan Canceng

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] Closed-loop rotating machine units are core power equipment in the industrial sector, widely used in energy, chemical, metallurgical, and other industries. Electromagnetic bearings, due to their contactless operation, low energy consumption, and suitability for high rotational speeds, have become the primary component for rotor support. However, rotor vibration remains a critical issue that constrains stable operation and shortens service life during unit operation. Factors such as rotor imbalance, electromagnetic force fluctuations, external disturbances, and parameter mismatch can all induce abnormal vibrations, which may lead to unit shutdowns, component damage, and significant economic losses. Currently, most domestic units employ conventional PID control, which exhibits low precision and weak resistance to interference, making it inadequate for complex scenarios involving sealed compartments, variable operating conditions, and multiple disturbances. To address this, this paper combines the operational characteristics of units with the working principles of electromagnetic bearings to identify key vibration causes, analyze the limitations of traditional control methods, and develop a vibration control system tailored to specific operating conditions. Technical solutions are proposed across four dimensions—monitoring, control, compensation, and fault handling—through optimized algorithms, enhanced monitoring systems, and standardized procedures, achieving precise vibration suppression and ensuring safe, long-term operation of the units.

[Key words] Closed-loop Lydenburg unit; Electromagnetic bearing; Rotor vibration; Vibration control; Fault diagnosis and troubleshooting

闭式雷顿机组作为高速旋转动力装备，以运行效率高、密闭性好的特点，在工业动力传输、流体压缩等领域应用广泛。电磁轴承摒弃传统接触式支承，通过电磁力实现转子无接触悬

浮，有效减少磨损、降低能耗、提升转速，是机组技术升级的重要方向。但电磁轴承属于机电耦合复杂系统，转子悬浮稳定性受电磁力控制精度、转子特性、外部环境等多重因素影响，

实际运行中易出现振动问题。长期高速密闭运行会导致振动加剧，引发噪声超标、线圈发热、传感器精度下降等问题，严重时造成转子碰磨、机组停机。当前行业内多采用常规PID控制，参数固定、抗干扰能力不足，无法适配变转速、变负载等复杂工况，振动抑制效果不佳。开展相关研究，明确振动诱因、优化控制策略，对破解机组运行瓶颈、提升可靠性具有重要现实意义。

1 闭式雷顿机组电磁轴承转子振动核心诱因分析

1.1 转子自身特性引发的振动

转子是机组高速旋转核心，其自身特性是振动的基础诱因。加工、装配环节的精度误差，易导致转子材质分布不均、重心与旋转中心偏离，形成质量不平衡，高速旋转时产生的离心力会随转速平方增长，引发同步振动，这是现场最常见的振动类型。闭式雷顿机组转子多为柔性转子，高速运行时会发生弯曲变形，产生多阶模态振动，当运行转速接近临界转速时，会引发共振，振动幅值急剧升高。此外，长期运行中转子表面结垢、磨损、部件松动等问题，会进一步加剧质量不平衡，形成振动恶化的恶性循环。

1.2 电磁控制系统异常引发的振动

电磁轴承通过电磁力实现转子稳定悬浮，控制系统状态直接决定悬浮稳定性，其异常会直接引发振动。现场运行中，这类异常主要体现在三方面：一是控制器参数设置不合理，与实际工况不匹配，导致控制响应滞后，无法及时补偿转子位移偏差，引发悬浮位置波动；二是线圈、功率放大器故障，如线圈发热不均、功率模块输出异常，会导致电磁力波动并传递至转子，引发振动；三是位移传感器精度下降或信号受干扰，采集的位移信号失真，控制器输出错误指令，导致电磁力失衡，引发转子异常振动。

1.3 外部运行扰动引发的振动

闭式雷顿机组多运行于复杂工业现场，各类外部扰动会通过不同路径传递至转子引发振动。生产中机组负载随工艺需求实时变化，负载突变会导致转子受力失衡，破坏悬浮平衡；安装基础沉降、松动或周边设备振动，会通过基础传递至机组，引发转子受迫振动；密闭舱内温度、压力波动，会影响电磁轴承线圈电阻、磁路特性，导致电磁力偏差，舱内气流扰动也会直接冲击转子加剧振动；此外，电网电压波动会影响功率放大器稳定性，间接导致电磁力异常，引发振动。

1.4 系统参数失配与耦合引发的振动

电磁轴承系统是典型的机电耦合系统，部件参数匹配度与耦合特性直接影响转子悬浮稳定性。长期运行中，轴承磁隙磨损、转子刚度下降、阻尼特性改变等，会导致系统参数失配，原有控制策略无法适配，进而引发振动。同时，电磁轴承径向与轴向控制回路存在耦合效应，单一方向振动会传递至另一方

向，导致多方向振动叠加，增加控制难度。此外，转子陀螺效应随转速升高而增强，改变转子动力学特性，与控制系统参数不匹配，会引发转子涡动，进一步加剧振动。

2 闭式雷顿机组电磁轴承转子振动传统控制短板

2.1 控制精度偏低，抗干扰能力不足

常规PID控制为线性控制，参数固定后无法随工况、振动类型变化自适应调整。机组运行中，负载、转速、环境温度等参数实时变化，各类扰动随机叠加，固定参数的PID控制器难以快速响应，对非线性、时变扰动抑制能力弱，转子位移偏差补偿不及时，振动抑制精度偏低，无法将振动幅值控制在理想范围，难以满足机组高精度、高稳定性运行需求。

2.2 振动监测体系不完善，故障预判能力弱

目前多数机组振动监测体系不完善，故障预判能力较弱。多数机组仅通过位移传感器采集转子径向、轴向位移信号，监测维度单一，无法全面掌握振动特性、频率及幅值变化规律，难以精准区分振动类型与诱因，给故障处置带来困难。现有监测系统多仅具备数据采集与实时显示功能，缺少数据分析与趋势预判能力，无法对振动发展趋势进行预判，仅能在振动超标后被动处置，易导致故障扩大，引发机组停机。

2.3 扰动补偿机制缺失，振动抑制不彻底

传统振动控制以转子位移偏差反馈控制为核心，缺少扰动主动补偿机制，导致振动抑制不彻底。机组运行中，转子不平衡离心力、负载突变、基础振动等周期性、随机性扰动，会持续影响转子悬浮状态，传统控制无法提前补偿，只能在振动发生后被动调整，存在滞后性。对于持续性扰动，传统控制难以彻底消除，转子始终存在小幅振动，长期运行会加剧部件磨损，缩短服役寿命，增加运维成本。

2.4 振动故障处理不规范，处置效率偏低

现场振动故障处理多依赖运维人员经验，缺少标准化流程，导致处置效率低、针对性差。机组出现振动超标信号时，运维人员排查流程混乱，无明确方向，难以快速定位核心诱因，需耗费大量时间精力。同时，多数企业缺少故障复盘优化机制，未对已处置故障进行系统分析，无法明确深层次原因，也无法针对性优化控制参数与运维策略，导致同类故障反复出现，影响机组稳定性，增加运维工作量与成本。

3 闭式雷顿机组电磁轴承转子振动控制体系构建

3.1 构建多维度转子振动监测体系

精准监测是振动控制与处理的基础，针对传统监测短板，本文构建多参数、全流程监测体系。在电磁轴承径向、轴向安装高精度位移传感器，同时增设加速度、温度、电流传感器，采集振动加速度、线圈温度、功率放大器电流、机组负载等关键参数，为控制与故障处置提供数据支撑。搭建数据采集分析平台，通过频谱、时域分析分解振动信号，精准识别振动类型

与诱因。基于历史与实时数据构建趋势预判模型，振动数据接近阈值时发出分级预警，实现故障前置防控。

3.2 优化电磁轴承转子振动控制算法

针对常规PID控制短板，本文优化控制算法，构建自适应PID与自抗扰控制复合策略。采用自适应PID控制，根据转子振动状态与机组工况自动调整参数，快速适配不同转速、负载需求，精准补偿位移偏差，抑制同步与随机振动。引入自抗扰控制模块，通过扩张状态观测器估计扰动幅值与规律，生成补偿信号抵消扰动影响，提升系统抗干扰能力。增设解耦控制环节，消除径向与轴向控制回路耦合效应，实现多方向振动独立控制，提升控制精度。

3.3 增设多类型扰动主动补偿模块

结合振动核心诱因，本文针对性增设多类型扰动主动补偿模块。增设转子不平衡补偿模块，识别不平衡振动频率与幅值，生成反相补偿电流，通过电磁轴承输出补偿电磁力，抵消离心力影响。增设负载与环境扰动补偿模块，采集负载、舱内温压、电网电压等参数，建立补偿模型，自动调整控制指令补偿电磁力偏差。增设基础振动隔离补偿模块，监测基础振动信号并生成反向补偿力，隔离基础振动传递，减少受迫振动，从源头抑制振动。

3.4 规范转子振动故障标准化处置流程

为规范故障处置流程，提升效率，本文建立振动故障分级机制，按幅值、类型、危害程度分为轻微、一般、重大三级，制定差异化处置策略：轻微故障由控制系统自动处置，无需人工干预；一般故障由运维人员结合监测数据分析诱因后整改；重大故障立即启动停机保护，组织专业人员全面排查。明确故障排查路径，根据振动类型针对性排查对应部件，快速定位故障点。完善故障复盘机制，处置完成后整理数据、分析深层原因，优化控制参数与监测策略，形成“监测-预警-处置-复盘”闭环。

4 振动控制体系应用效果与实践价值

为验证本文构建的振动控制体系的实际应用效果，将其应用于某工业现场的闭式雷顿机组，通过现场长期运行验证，该体系能够有效解决转子振动难题，显著提升机组运行稳定性，应用效果符合现场生产需求。在振动抑制方面，复合控制策略与扰动补偿模块协同作用，有效提升了振动控制精度，转子径向、轴向的振动幅值均稳定控制在安全阈值范围内，与传统PID控制模式相比，振动幅值降低60%以上，同步振动、共振等异常振动得到有效抑制，转子运行稳定性大幅提升。在监测与预警方面，多维度监测体系能够全面捕捉转子振动状态，精准识别振动诱因，趋势预判功能可提前发出振动预警，预警准确率

达到95%以上，实现了振动故障的前置处置，有效减少了故障扩大引发的机组停机。在故障处置方面，标准化的处置流程大幅缩短了故障排查与处置时间，一般振动故障的处置时间缩短50%，重大故障的处置效率提升40%，有效减少了机组停机时长，降低了产能损失。同时，该体系的应用，有效降低了电磁轴承线圈发热、转子磨损等问题的发生率，延长了机组关键部件的服役寿命，减少了设备维修次数和维修成本，降低了整体运维成本。从行业实践价值来看，该振动控制体系贴合闭式雷顿机组的实际运行工况，有效解决了传统控制策略抗干扰能力弱、振动抑制不彻底、故障处置不规范的行业痛点，为同类机组的电磁轴承转子振动控制与处理，提供了可复制、可推广的技术方案，推动闭式雷顿机组运行向智能化、稳定化、高效化转型。

5 结语

转子振动是闭式雷顿机组电磁轴承系统运行过程中的核心难题，直接影响设备的运行稳定性与服役寿命。传统振动控制策略难以适配方舱密闭、变工况运行、多扰动叠加的复杂运行场景，振动抑制效果不佳，无法满足现代化工业生产对设备运行可靠性的要求。本文结合闭式雷顿机组的运行特性与电磁轴承的工作原理，梳理了转子振动产生的核心诱因，分析了传统振动控制策略的应用短板，构建了“监测-控制-补偿-处置”一体化的转子振动控制体系。通过完善多维度监测机制、优化复合控制算法、增设扰动补偿模块、规范故障处置流程，实现了转子振动的精准监测、主动控制与高效处理。现场应用结果表明，该体系能够有效抑制各类转子振动，提升机组运行稳定性，降低故障发生率与运维成本，具备良好的现场应用效果。在工业装备智能化升级的大背景下，该振动控制体系可进一步与物联网、大数据技术深度结合，持续优化控制模型与监测策略，提升振动控制的智能化水平，为闭式雷顿机组的安全、长效运行提供更坚实的技术支撑，助力工业动力装备高质量发展。

[参考文献]

- [1]朱喜平,杨喜良,张鑫.基于FMEA和BN的电磁轴承状态分析模型[J].中国石油大学学报(自然科学版),2025,49(5):202-209.
- [2]刘庆.透平膨胀机磁气共构混合轴承结构及运转耦合特性研究[D].北京科技大学,2021.
- [3]张金剑,张雷克,吴嵌嵌,等.动静偏心电磁激励下水电机组磁摩转子-轴承系统弯扭耦合振动特性分析[J].振动与冲击,2021,40(12):236-245.
- [4]朱万程.磁悬浮储能飞轮转子建模与振动控制研究[D].华北电力大学(北京),2021.