

基于机电耦合的特钢轧机振动抑制策略

谷友强

河北东海特钢集团有限公司 河北唐山

【摘要】特钢轧机在运行过程中常因机电系统耦合作用引发振动，严重影响设备稳定性和产品质量。针对这一问题，本文提出了一种基于机电耦合机理的振动抑制策略，通过分析机电系统的动态特性，建立耦合模型，识别振动产生的关键因素。采用先进控制算法，实现对机电耦合振动的有效抑制。仿真与实验结果表明，该策略能显著降低轧机振动幅度，提高运行平稳性和生产效率。研究为特钢轧机振动控制提供了理论依据和技术支持。

【关键词】机电耦合；特钢轧机；振动抑制；动态模型；控制策略

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 18 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250024

Vibration suppression strategy for special steel rolling mills based on electromechanical coupling

Youqiang Gu

Hebei Donghai Special Steel Group Co., Ltd., Tangshan, Hebei

【Abstract】 During operation, special steel rolling mills often experience vibrations caused by the coupling effect of electromechanical systems, which seriously affect equipment stability and product quality. To address this issue, this paper proposes a vibration suppression strategy based on the mechanism of electromechanical coupling. By analyzing the dynamic characteristics of the electromechanical system, a coupling model is established to identify the key factors causing vibrations. Advanced control algorithms are adopted to achieve effective suppression of electromechanical coupling vibrations. Simulation and experimental results show that this strategy can significantly reduce the vibration amplitude of rolling mills, improve operational stability, and enhance production efficiency. The research provides a theoretical basis and technical support for vibration control in special steel rolling mills.

【Keywords】 Electromechanical coupling; Special steel rolling mill; Vibration suppression; Dynamic model; Control strategy

引言

特钢轧机作为重工业中关键的加工设备，其运行稳定性直接关系到产品的质量与生产效率。机电耦合作为特钢轧机振动的主要诱因之一，导致设备在高负载、高速度工况下容易产生复杂振动现象。这些振动不仅加剧机械部件的磨损，还可能引发安全隐患，给生产带来极大挑战。深入研究机电耦合机制及其对振动的影响，探索有效的振动抑制策略，成为当前特钢轧机领域的重要课题。本文围绕机电耦合模型建立及控制策略设计展开，力图通过理论分析与实验验证相结合，提出切实可行的振动抑制方案，以提升轧机的整体性能和运行安全性。

1 特钢轧机电机耦合振动的机理分析

特钢轧机在加工过程中面临复杂的力学载荷和电磁环境，这种复杂的机电耦合作用成为引发设备振动的核心原因。机械结构与电机驱动系统之间存在紧密且复杂的耦合关系，电机输出的转矩波动通过联接机构直接传递至轧机的机械部件，诱发机械振动。轧机机械系统的刚度和阻尼特性并非固定不变，而是随着轧制负载、速度及工况的变化而动态调整，这对振动的传播路径和响应特性产生重要影响。机电耦合效应使得振动表现不再是单纯的机械共振现象，而是电磁干扰与机械动态响应相互叠加形成的复杂振动模式。这种复杂的耦合振动特性极大地增加了振动控制的难度，需要针对机电系统的整体特性进行深入研究和精准调控。

机电耦合机理中, 电机的电磁转矩波动是振动的主要激励源。驱动电机在高速和大负载条件下, 其电磁场分布出现非线性变化, 产生转矩脉动和谐波分量。转矩波动通过联轴器和传动机构传递至轧机机架和轧辊, 进而引起机械振动。机械结构的弹性变形和动刚度特性对电机输出的振动力有反馈效应, 形成了电磁激励与机械响应的双向耦合^[1]。这种耦合关系使振动表现出非线性、多频率成分以及及时变特征, 传统机械振动理论难以完全解释。除电磁因素外, 轧机的运行状态变化同样影响机电耦合振动特性。轧制过程中材料厚度、速度及力矩的不断变化导致机电系统参数动态调整, 形成复杂的非稳态耦合。材料在轧辊间的变形产生力学扰动, 这些扰动经过机械结构传递, 与电机系统的动态响应叠加, 形成更为复杂的振动模式。系统的刚度、阻尼以及电机控制策略的时滞效应均对振动产生关键影响。全面理解机电耦合振动机理, 是实现有效抑制策略的基础。

2 机电耦合振动动态模型的建立

机电耦合振动动态模型在分析特钢轧机振动行为中起着至关重要的作用。通过建立精确的数学模型, 能够系统地定量描述电机输出的转矩与机械结构的变形以及振动响应之间的复杂相互作用。该模型一般包含电机电磁动力学方程和机械动力学方程两部分, 并通过耦合变量实现电机与机械系统的动态关联。电机部分利用电磁转矩的时域表达式, 结合电机电流、磁链等关键电磁参数, 详细反映转矩的波动特性和非线性变化。机械部分则采用多自由度动力学模型, 能够模拟轧机机架、轧辊以及传动系统的弹性变形过程和振动响应特征。通过这一耦合模型, 能够全面揭示机电系统振动的产生机制, 为后续振动控制策略的设计提供理论基础。

构建耦合模型需重点考虑机电系统的非线性因素。电机电磁转矩不仅受输入电流影响, 还受到负载机械特性变化的反馈, 导致转矩非线性波动。机械系统中的刚度与阻尼参数随轧制工况发生变化, 影响振动频率和幅值。将这些非线性因素纳入模型中, 可准确反映实际工况下振动的复杂特征。模型引入控制系统的反馈环节, 描述控制信号对电机转矩及机械振动的影响, 为振动抑制策略设计提供基础。为了验证模型的有效性, 通常需结合仿真分析与实验数据^[2]。通过数值仿真计算机电耦合振动的时域和频域响应, 分析不同工况下振动特性变化。实验中采集

轧机振动传感器数据和电机电流信号, 对比模型预测与实际测量值的符合程度。结果表明, 动态模型能够较好地反映机电耦合振动的时变、多频率特性, 为后续控制策略的制定和优化奠定了坚实基础。

3 基于耦合模型的振动抑制控制策略设计

对机电耦合振动机理及其动态模型的深入理解为振动抑制控制策略的设计奠定了坚实基础。设计高效的控制策略需要针对机电系统中电磁激励波动与机械结构响应这两个关键环节进行协调调整, 确保从源头上减少振动产生的激励。电磁激励的波动通过转矩脉动作用于机械系统, 促使设备产生共振和振动, 而机械结构的响应则反映在刚度、阻尼和质量分布上, 影响振动的传播与幅度。针对这种复杂耦合关系, 常用的控制方法包括基于模型预测的控制策略、自适应控制和鲁棒控制等。通过实时调整电机的驱动信号, 抑制电磁转矩中的不稳定成分, 减弱机械系统受到的激振力, 从而实现对振动的有效主动控制, 提升轧机整体运行的平稳性与安全性。

控制系统设计的核心在于精准捕捉机电耦合系统的动态特性, 以确保振动抑制策略的针对性和高效性。为了实现这一目标, 引入了先进的观测器技术和状态反馈机制, 使系统能够实时监测和估计轧机振动状态及激励波动的动态变化。这些实时采集的动态信息被迅速反馈给控制器, 控制器则依据数据对电机电流波形进行灵活调整, 主动抑制电磁转矩中的不稳定成分, 从而显著减少机械系统受到的激振力。控制策略还结合了机械系统的动态参数变化, 如刚度和阻尼的调节, 通过优化这些参数进一步改善振动响应, 降低振幅。该控制方案不仅兼顾了系统的动态响应速度和稳定性, 同时具备较强的适应能力, 能够有效满足轧机在不同工况条件下复杂振动的控制需求, 提升设备运行的可靠性和安全性。

为了实现振动抑制的实时在线控制, 控制策略融合了高精度传感技术与先进的信号处理算法, 确保对轧机振动状态的全面监测和快速响应。系统在轧机的关键部位布置了多点高灵敏度振动传感器, 能够实时采集详细且准确的振动信号。通过应用滤波技术和频谱分析方法, 系统从复杂的振动数据中提取出具有代表性的特征参数, 全面反映轧机机电耦合系统的振动状态和动态变化^[3-7]。控制系统利用这些实时数据, 动态调整控制律, 实现闭环反馈控制, 有效抑制振动。该方法不仅能够克服机电耦合系

统中存在的非线性和时变特性,还具备较强的抗干扰能力,保证振动抑制效果在各种复杂工况下保持稳定。实际应用表明,该策略在不同运行条件下表现出优良的适应性和鲁棒性,显著提升了特钢轧机的运行稳定性和生产安全水平。

4 振动抑制效果的仿真与实验验证

振动抑制策略的实际效果必须依赖仿真和实验数据的支持才能得以确认。基于所建立的机电耦合振动动态模型,仿真平台能够精确再现特钢轧机在不同工况下受到的典型振动激励。通过将设计的控制算法嵌入到仿真系统中,模拟了振动响应随时间的动态变化过程。仿真结果表明,施加振动抑制策略后,轧机系统的振动幅度有了明显的降低,特别是在高频振动成分方面,表现出显著的抑制效果。这说明控制算法能够有效削弱由电磁转矩波动和机械共振引起的振动力,使振动能量整体减少,提升系统的稳定性。仿真结果为后续的实验验证提供了理论支持和依据,证明了模型与控制策略的科学合理性。

实验验证部分则在实际的特钢轧机设备上,进一步验证了控制策略的工程应用价值。通过在轧机关键部位安装多点高精度振动传感器,实时采集设备运行过程中的振动数据,同时同步采集电机控制信号,确保数据的完整性和关联性。在实施控制算法期间,振动传感器采集到的数据明显显示出振动峰值的降低,设备的振动稳定性得到了显著改善。轧机整体运行更加平稳,机械部件的疲劳和磨损程度减轻,从而降低了故障发生率和设备维护频率。该控制策略的应用不仅提升了生产效率,还有效保证了特钢产品的质量稳定性,体现出良好的工程推广前景。

通过对仿真与实验中获取的多组数据进行深入的综合分析,可以更全面、准确地评估所建立的机电耦合振动模型的可靠性以及所设计振动抑制控制策略的实际应用效果。研究不仅深化了对特钢轧机振动产生机理的理解,还为振动的主动抑制提供了科学、有效的技术路径。未来研究将重点放在控制算法的不断优化和智能化升级,尤其是结合人工智能和机器学习技术,提升控制系统的实时响应速度和自适应能力,使其能够动态调整并应对复杂多变的轧机工况^[8]。引入更先进的传感器设备和高效数据处理方法,将显著增强振动抑制系统的智能化水平。这些技术进步将为特钢轧机实现更加安全稳定的运行

以及生产效率的持续提升提供坚实保障。

5 结语

特钢轧机的机电耦合振动问题关系到设备的运行安全和产品质量。通过深入分析机电耦合振动的机理,建立动态数学模型,并设计针对性的振动抑制控制策略,能够有效减少振动对轧机性能的影响。仿真与实验验证结果表明,所提出的控制方法在实际工况下具备良好的适应性和抑制效果,为特钢轧机的稳定运行提供了可靠保障。未来,随着智能控制技术和先进传感技术的发展,振动抑制策略将更加精准和高效,有望实现更加智能化的在线振动控制,进一步提升设备的安全性和生产效率。持续深化相关研究,将为特钢轧机领域的发展注入新的动力和技术支持。

参考文献

- [1] 何泽银,何亮,杨金,等.轴线偏斜对齿轮机电耦合系统电流特征影响[J].中国工程机械学报,2025,23(03):377-382.
- [2] 余开朗,郭童,蔺肖曼,等.复杂多级齿轮传动系统机电耦合建模及齿面剥落故障响应特征研究[J/OL].振动工程学报,1-11[2025-07-21].
- [3] 徐劲力,司马立萱,崔玥,等.同轴式动力总成机电耦合振动特性分析与求解[J].机械设计与制造,2025,(06):114-120.
- [4] 贺朝霞,王相俊,孔玉洁,等.永磁半直驱系统机电耦合建模与特性分析[J/OL].计算机集成制造系统,1-18[2025-07-21].
- [5] 陈海涛,刘威,陈磊,等.甚低频十三塔天线机电耦合协同建模与分析[J/OL].系统工程与电子技术,1-11[2025-07-21].
- [6] 赵娟.电容式加速度传感器的机电耦合分析[J].电子技术,2024,53(12):18-19.
- [7] 张硕雷.电梯曳引机轴承的机电耦合动力学建模与仿真分析[J].中国电梯,2024,35(12):15-18.
- [8] 张孔亮.行星传动机电耦合系统故障机理及智能诊断研究[D].大连理工大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS