

磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的多目标优化控制

冯泽智

国网黑龙江电力有限公司红兴隆供电分公司 黑龙江双鸭山

【摘要】针对高精度设备在复杂环境下运行时易受多方向扰动影响的问题,提出一种基于磁流变-电磁复合驱动的六自由度隔振平台多目标优化控制方法。该平台利用磁流变阻尼器的快速可调特性与电磁驱动的高响应性能,实现对平移与转动六个自由度的主动与半主动协同隔振。建立系统动力学模型,结合多目标优化算法,对隔振性能、能耗与控制稳定性进行综合权衡。通过仿真与实验验证,优化控制策略在宽频域内显著降低振动传递率,并在能耗与控制精度之间取得平衡。研究结果为高端精密仪器、航空航天设备及大型机电系统的隔振设计提供了新思路。

【关键词】磁流变阻尼器; 电磁驱动; 六自由度隔振平台; 多目标优化控制; 振动传递率

【收稿日期】2025 年 4 月 12 日

【出刊日期】2025 年 5 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250159

Multi-objective optimization control of a magnetorheological-electromagnetic composite six-degree-of-freedom vibration isolation platform

Zezhi Feng

Hongxinglong Power Supply Branch of State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Shuangyashan, Heilongjiang

【Abstract】 Aiming at the problem that high-precision equipment is susceptible to multi-directional disturbances when operating in complex environments, this paper proposes a multi-objective optimization control method for a six-degree-of-freedom vibration isolation platform based on magnetorheological-electromagnetic composite drive. The platform utilizes the fast adjustable characteristics of magnetorheological dampers and the high response performance of electromagnetic drives to realize active and semi-active cooperative vibration isolation for six degrees of freedom (translation and rotation). A system dynamics model is established, and a multi-objective optimization algorithm is combined to comprehensively balance vibration isolation performance, energy consumption, and control stability. Through simulation and experimental verification, the optimized control strategy significantly reduces the vibration transmissibility in a wide frequency domain and achieves a balance between energy consumption and control accuracy. The research results provide new ideas for the vibration isolation design of high-end precision instruments, aerospace equipment, and large electromechanical systems.

【 Keywords 】 Magnetorheological damper; Electromagnetic drive; Six-degree-of-freedom vibration isolation platform; Multi-objective optimization control; Vibration transmissibility

引言

高精度设备在运行过程中常面临来自地面、机械振动及环境扰动等多源干扰,这些振动不仅影响测量与加工精度,还可能造成结构疲劳与性能衰减。传统单一驱动的隔振平台在频率适应性、响应速度及控制精度方面存在不足。磁流变阻尼器以其阻尼可实时调节的特点,适合应对低频和突发振动;电磁驱动则具备高响应性和精确控制能力,适用于宽频带振动抑制。将二者结合,可形成互补优势,实现对六自由度的高效隔振。

本研究通过构建磁流变-电磁复合六自由度隔振平台,并引入多目标优化控制策略,在提升隔振性能的同时兼顾能耗与系统稳定性,为精密工程领域隔振技术的发展提供参考。

1 磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的系统构成与工作原理

磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的核心构成包括磁流变阻尼模块、电磁驱动执行单元、六自由度运动支撑结构、传感检测系统以及实时控制单元。磁流变

阻尼模块利用磁流变液在外加磁场作用下粘度瞬时变化的特性,通过调节线圈电流控制阻尼力,实现半主动隔振功能。电磁驱动执行单元采用稀土永磁材料和高导磁软磁合金组成磁路系统,驱动线圈在控制电流作用下产生可控的电磁力,提供主动隔振能力^[1]。六自由度运动支撑结构通常由并联或混联型机构构成,能够实现三个平移自由度与三个转动自由度的解耦运动,确保平台在全方向上的隔振性能。传感检测系统包括加速度传感器、位移传感器以及力传感器,通过多点布置实时监测平台的振动状态与载荷变化。实时控制单元基于高性能嵌入式处理器,执行复杂的多目标优化算法,实现对磁流变阻尼和电磁驱动的协同控制。

该平台的工作原理依托于磁流变阻尼器和电磁驱动的互补特性。在低频大幅扰动下,磁流变阻尼器通过调节阻尼力系数吸收振动能量,同时避免系统发生共振放大现象。在高频微振动情况下,电磁驱动单元可输出精确反向控制力,实现振动的快速抑制。通过多传感器融合技术,控制系统获取平台在六个自由度上的振动信息,并根据动态反馈实时调整磁场强度与电磁力大小,从而在全频带范围内维持较低的振动传递率。该协同工作模式不仅提升了隔振效果,也在一定程度上降低了能量消耗,因为半主动阻尼与主动驱动可按需分配工作负载。在工程应用中,这种复合驱动隔振平台能够有效应对航空航天器姿态调整过程中的扰动补偿、精密光学仪器在地震微振背景下的稳定支撑以及大型数控机床在多轴高速切削时的振动控制^[2]。其优点在于平台的控制策略可根据工况动态调整,使系统在不同振动频率和方向上的隔振效果均达到最优状态。这种灵活性与高效性使得磁流变-电磁复合隔振平台成为高端装备制造和精密工程领域的潜在关键技术。

2 动力学建模与多目标优化控制策略设计

为了实现对磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的有效控制,需要建立精确的动力学模型。该模型应同时考虑刚体动力学与柔性结构动力学,涵盖平台质量分布、惯性矩阵、阻尼系数及刚度特性等参数。磁流变阻尼器的力学特性可通过 Bingham 模型或改进的 Herschel - Bulkley 模型描述,这些模型能够刻画其屈服应力随磁场变化的非线性关系。电磁驱动单元的力学输出则需基于麦克斯韦方程组结合磁路等效模型进行计算,从而获得电流与输出力之间的精确映射关系。在模型中还需引入力-位移与力-速度的耦合项,以反映实际工况下驱动与阻尼的相互作用。

多目标优化控制策略的设计以提升隔振性能、降

低能耗及保证控制稳定性为主要目标。控制目标之间存在一定冲突,例如提高隔振性能往往需要较高的控制力输出,但这会增加能耗与发热风险。为此,可以采用基于权重分配的 Pareto 最优解方法,在多目标优化框架下进行控制参数寻优。控制算法可选用滑模控制、 H^∞ 控制或模型预测控制等方法,并结合自适应权重调整机制,根据工况变化动态分配各目标的重要性。在实际计算中,通过多目标遗传算法(MOGA)或粒子群优化(PSO)等智能优化算法对控制律进行迭代优化,确保在多种扰动场景下均能实现综合性能最优。

在控制策略的实施过程中,传感数据采集与信号处理的实时性对系统性能具有决定性作用。平台配置的高速多通道信号采集卡能够在极短延时内,将加速度、速度以及位移等多种关键物理量同步传输至中央控制器。控制器在接收信号后,首先利用卡尔曼滤波器对数据进行动态估计与噪声抑制,再通过小波包分解方法对不同频段的振动特征进行提取与分离,从而获得更加精准的状态信息。这些处理后的特征信号被输入至多目标优化控制模块,模块会依据实时动态反馈,精确计算并输出电磁驱动电流与磁流变阻尼调节电流,实现对六自由度运动的协同控制。在仿真阶段,通过对不同权重分配条件下的控制效果进行频谱与时域对比分析,可为实际工程选取最优参数组合^[3-6]。而在实际运行中,平台依托在线学习与自适应参数更新机制,可根据工况变化不断修正控制策略,从而持续提升隔振性能与系统稳定性。

3 仿真分析与实验验证的隔振性能对比研究

仿真分析阶段主要依托多体动力学软件与有限元分析工具相结合的方法。在多体动力学模型中输入平台的质量、刚度与阻尼参数,并引入磁流变阻尼器与电磁驱动的非线性力学特性函数。利用随机激励、谐波激励及冲击激励三种典型振动工况,对平台在不同控制策略下的隔振性能进行对比。频率响应分析结果表明,复合控制策略在低频段能显著降低共振峰值,高频段能抑制振动能量的传递,振动传递率曲线在全频域均优于单一控制方式。

实验验证在专用六自由度隔振试验台上进行,试验台配备多通道振动激励系统与高精度测量传感器。通过施加已知频谱特性的振动信号,记录平台在不同控制模式下的响应。实验结果与仿真数据高度吻合,验证了模型与控制策略的有效性。在恒定扰动与突发冲击双重作用下,复合控制平台的加速度均方根值明显低于单一控制平台,且响应时间更短,这说明多目标优

化控制不仅提升了隔振效果,还增强了系统对非平稳扰动的适应能力。

在进一步的对比研究中,对能耗与温升情况进行监测分析。结果显示,复合驱动平台在相同隔振性能条件下的平均功耗低于单一主动控制平台约 20%,且磁流变阻尼器因工作在低功耗状态而温升较小^[7]。这种节能优势对于长时间运行的航空航天及大型精密制造设备尤为重要。实验还发现,当优化算法权重偏向能耗指标时,虽然隔振性能略有下降,但系统总体稳定性得到提升,说明该平台在不同应用场景下具有良好的可调节性与适配性。

4 优化控制在复杂工况下的应用效果分析

在复杂工况下,磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的多目标优化控制表现出较高的鲁棒性和自适应性。在地震波模拟实验中,平台能够在毫秒级响应时间内调整阻尼与驱动力分配,有效抑制低频大幅振动的影响,同时保持高频段的稳定支撑。在航空航天模拟试验中,当飞行器经历姿态快速调整和气动扰动时,平台通过实时调整控制参数,保持承载设备的工作精度与成像稳定性。对于多轴加工中心的应用场景,平台能在切削力脉动与机床结构振动同时作用下维持较低的振动幅值,提高加工表面质量。

该平台在多种扰动耦合环境下的优异表现,核心源于控制算法所具备的动态权重调整机制。系统能够根据外界振动信号的频谱特性实时分析并优化控制力分配。当外部扰动频谱能量主要集中在低频区间时,控制策略会增加磁流变阻尼的输出比重,以充分利用其可变阻尼特性有效衰减低频大幅振动;当频谱分布较为分散且含有明显高频成分时,则会提升电磁驱动的作用比重,以发挥其快速响应和高精度补偿优势,实现对全频段振动的综合抑制^[8]。同时,传感器网络采用冗余布局设计,即便个别传感器出现失效或数据异常,系统仍能通过多源数据融合与动态估计算法,保持隔振控制的精确性与稳定性,从而保障平台在复杂工况下的连续高效运行。

在工程推广过程中,这种优化控制平台展现了较强的通用性与可扩展性。通过更换驱动模块规格与调节控制参数,可适配不同质量等级、不同工作环境及不同隔振需求的设备。对于要求极高精度的光学探测任务,可将优化目标权重集中于振动抑制性能;对于能源

有限的深空探测任务,则可适当降低控制强度以延长运行时间。未来该类平台可与人工智能预测控制方法结合,实现对复杂振动模式的提前识别与预防控制,从而进一步提升多目标优化的整体效能。

5 结语

本研究围绕磁流变-电磁复合六自由度隔振平台的多目标优化控制展开,构建了兼具精确建模与协同驱动特性的隔振体系,并通过仿真与实验验证了其在全频域内的优越隔振性能。平台在低频大幅与高频微振条件下均表现出良好的动态适应性与能耗控制能力,能够满足航空航天、精密制造及重大科学装置等多领域的应用需求。研究成果为复杂工况下高性能隔振技术的发展提供了可行方案与理论参考,具有显著的工程推广价值与研究意义。

参考文献

- [1] 乔明涛,李祥,齐靖泊,等.核壳式链状电磁复合吸波材料的研究进展[J].复合材料学报,2025,42(5):2488-2500.
- [2] 段金明,陈恒,吴利伟,等.基于双面提花结构的电磁复合材料性能研究[J].针织工业,2025(1):11-14.
- [3] 崔学松.电磁复合场中带电粒子运动问题的多层次解析[J].中学生理科应试,2025(5):60-63.
- [4] 李霞,许云威,刘本学,等.磁力调控驰振压电-电磁复合俘能器设计与研究[J].压电与声光,2024,46(1):128-135.
- [5] 彭召洋,宋芳,熊玉仲.三稳态压电-电磁复合能量采集器性能研究[J].压电与声光,2023,45(6):872-877.
- [6] 吴建军,欧阳,张宇,等.激光-电磁复合推力器研究现状与展望[J].推进技术,2023,44(6):48-67.
- [7] 寇发荣,洪锋,王睿,等.电磁复合悬架切换控制与能量双向流动分析[J].机械科学与技术,2022,41(3):363-370.
- [8] 廖思华,刘丹,刘雅琪,等.摩擦-电磁复合式能量回收带设计与动力学分析[J].动力学与控制学报,2023,21(10):43-50.

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