

智能制造装备中机电一体化系统的动态特性分析与优化

陈则艳 马睿智

考克利尔酸循环科技(山东)有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18946

[摘要] 伺服直驱式机电集成系统是智能装备制造中十分重要的执行模块,其动态响应能力直接影响整机的加工精度与运行可靠性,本文结合我国智能装备产业现状,以模态分析为主要研究手段,系统考察影响该系统动态行为的核心要素。借助解析固有频率、阻尼比等本征参数跟实际工况性能的耦合关系,识别现有工程应用中存在的动态适配瓶颈,并给出切实可行的改良方针,研究成果可为增强国产智能装备核心部件的动态品质给予理论依据与实践教导,助推产业链关键技术自主化能力和建设能力。

[关键词] 伺服直驱系统; 动态特性; 模态优化

中图分类号: O221.3 文献标识码: A

Dynamic Characteristics Analysis and Optimization of the Mechatronic System in Intelligent Manufacturing Equipment

Zeyan Chen Ruizhi Ma

Cockleil Acid Cycle Technology (Shandong) Co., Ltd.

[Abstract] The servo direct-drive type electromechanical integrated system is a crucial execution module in intelligent equipment manufacturing. Its dynamic response capability directly affects the processing accuracy and operational reliability of the entire machine. This paper, based on the current situation of China's intelligent equipment industry, uses modal analysis as the main research method to systematically investigate the core elements that affect the dynamic behavior of this system. By coupling the inherent parameters such as natural frequency and damping ratio with the actual performance of the working conditions, this paper identifies the dynamic adaptation bottlenecks existing in the current engineering applications and provides feasible improvement guidelines. The research results can provide theoretical basis and practical guidance for enhancing the dynamic quality of core components of domestic intelligent equipment, and promote the independent ability and construction capacity of key technologies in the industrial chain.

[Key words] Servo direct-drive system; Dynamic characteristics; Modal optimization

引言

我国智能制造装备产业规模已逾3.2万亿元,国内市场自给率超50%,但核心部件的动态性能改良依然是制约产业升级的核心瓶颈,作为智能装备动力传输与执行的重点,机电一体化系统的动态响应速度及振动抑制能力直接决定设备的加工精度和运行能力。伺服直驱技术因省去传统减速箱等中间传动环节,在钢铁、造纸等高端制造领域应用日趋广泛,但其动态特性易受负载波动与结构刚度等因素干扰,引发共振或响应延迟等问题,现阶段国内相关研究主要集中于单个组件的功能表现,尚未形成针对整机系统动态行为的系统解析及切实可行的改良方针。为此,本文选取伺服直驱式机电集成系统作为研究主体,深度探究其动态响应特性并实行改良设计,周密对接我国智能装备制造自主可控跟性能跃升的实际需要。

1 伺服直驱型机电一体化系统动态特性优化的产业价值

1.1 提升装备加工精度稳定性

智能制造装备的重点优势在于加工精度的恒定性与可靠性,而机电一体化系统的动态响应能力是影响该精度水平的根本原因,常规配备减速机构的传动架构,受限于齿轮副间隙、传动链柔性形变等固有缺陷,易引发动态偏差的叠加效应,进而削弱工件的尺寸精度。伺服直驱式机电一体化方案借助省略中间传动组件,从源头抑制了动态误差的生成,但其各子系统间动态响应的协同匹配程度,将直接制约最终精度的改良成效,改良动态性能可使系统固有频率避开运行频带,抑制共振引发的精度漂移,保障设备在高速启停及负载骤变等繁重工况下持续实现高精度运动控制,支撑高端零部件的精密制造。

1.2 强化装备绿色节能效能

绿色低碳是智能制造产业演进的核心指引，机电一体化装置的能耗在整机总耗能中占据显著份额，伺服直驱式机电一体化系统的动态性能与其能量消耗水平高度相关；若动态响应迟滞，则能量传递能力降低，并引致额外能耗，改良其动态性能，有益于实现电机输出功率与负载实际需求间的实时精确协同，杜绝“大马拉小车”式能源损耗。国内实践证明，经动态改良的伺服直驱系统能大幅降低设备整体能耗，周密呼应我国制造业绿色升级战略，展现出突出的产业化节能效益。

1.3 提升装备运行可靠性

智能制造装备的持续可靠运转是维持高效生产的前提，而机电一体化系统动态性能失配则是引发设备失效的关键因素之一，当设备处于高速工况时，若系统固有频率与外部激励频率趋近或重叠，将引发显著共振现象，加重轴承、传动轴等关键组件的损耗，进而缩短整机服役寿命。凭借优化结构设计参数与控制策略参数，可增强系统阻尼响应特性，有效抑制振动冲击对零部件的不利影响，继而减少检修次数与非计划停机时长，强化产线运行连续性，切实满足我国制造业对高端装备高可靠性运行的现实诉求。

1.4 夯实产业链自主可控基础

目前我国智能制造装备的核心部件仍然部分依赖进口，伺服直驱型机电一体化系统动态特性改良技术是打破国外技术封锁的关键所在。国外高端伺服系统依托成熟的动态改良手段，在精度与稳定性方面具备显著优势，国内企业迫切需要借助自主创新实现技术跨越。深度探索系统动态特性改良，有利于掌握重点参数匹配、结构设计等关键技术，然后提升国产伺服直驱系统的性能水平，减少对境外高端产品的依赖，对健全智能制造装备产业链、增强产业核心竞争力有着重大战略意义。

2 伺服直驱型机电一体化系统核心技术应用现状

2.1 永磁伺服电机设计技术

永磁伺服电机作为伺服直驱系统的重点动力源，其电磁性能直接制约系统的动态响应能力，我国已实现5.5千瓦至2000千瓦系列永磁伺服电机的批量生产，转子使用稀土永磁材料，依托国内丰富的稀土资源优势，有效降低制造成本。目前研发注重于磁场构型的改良设计，借助有限元仿真手段调整磁极布局，以提高电机的转矩密度，但是在高速运行工况下，转子电磁力波动显著，易诱发高频振动，进而劣化动态性能，另外，大功率电机的热管理设计尚需精进，温升会扰动其电磁特性，进而削弱动态响应的一致性。

2.2 伺服驱动器控制技术

伺服驱动器堪称系统的控制器，其控制策略直接决定系统的瞬态响应性能与运行稳定性，我国已具备大功率型号的自主研发能力，单机额定功率最高达3000 kW，并满足汽车工业级应用规范，目前主流方案以PID控制为主，依据实时获取的转子位置及转速信息动态调节电流输出。部分厂商尝试融合模糊逻辑算法，以增强对负载扰动的稳定性，但是，在响应快速性与过程

平顺性之间仍难以兼顾，突加负载时常引发明显超调，同样，信号解析精度偏低，难以准确辨识并抑制高频振动成分，制约了整体动态调控品质。

2.3 直驱传动结构集成技术

直驱传动结构的集成方案直接影响系统的刚度特性与动态协调能力，目前，国内大多采用电机与执行机构直接刚性耦合的集成形式，依靠高精度加工保证同轴度，在钢铁轧机、造纸机械等大型设备中，已成功应用多电机同步直驱集成技术。但是，现有结构设计对刚度分布的改良尚显不足，轴系与机座间的刚度匹配欠佳，高速工况下易诱发弹性变形，除此之外，连接部件的装配精度难以精确控制，装配偏差将造成动态载荷不均，进而激发局部振动，削弱系统整体动态性能。

2.4 动态特性检测与诊断技术

动态特性检测是系统优化的核心前提，目前，国内主要借助加速度计、力传感器等装置获取振动信号，并利用ModalVIEW等软件实现模态参数辨识，该技术注重于固有频率、振型等关键指标，凭借频响函数分析评估系统动态性能。但是，现有检测系统在同步性方面仍存在不足，多通道信号采集时常出现相位偏移，使参数识别精度降低，除上述内容，工业现场环境干扰显著，粉尘与电磁噪声等因素易劣化信号质量，难以准确反映系统真实动态特性，继而限制了改良方案的准确制定。

表1 伺服直驱型机电一体化系统核心技术参数对比

技术类型	国内主流参数	理想参数标准	动态性能影响
永磁伺服电机	转矩密度 12 N·m/kg, 响应时间 20ms	转矩密度 15 N·m/kg, 响应时间 15ms	响应滞后导致精度波动
伺服驱动器	电流环带宽 800Hz, 超调量 5%	电流环带宽 1000Hz, 超调量 3%	超调引发振动冲击
直驱传动结构	轴系刚度 200 N/μm, 同轴度 0.02mm	轴系刚度 250 N/μm, 同轴度 0.01mm	刚度不足导致弹性变形
动态检测系统	频率识别精度 ±2Hz, 信号信噪比 45dB	频率识别精度 ±1Hz, 信号信噪比 55dB	参数偏差导致优化失真

由表1可见，国产伺服直驱型机电一体化系统的核心技术指标与理想标准尚存差距，电机响应迟滞、驱动器超调偏高及轴系刚度偏低等因素，均会削弱系统动态性能，其中，轴系刚度不足易致弹性形变，驱动器超调过大则引发振动冲击，严重影响装备加工精度和运行稳定性，构成后续改良的重点方向。

3 伺服直驱型机电一体化系统动态特性优化路径

3.1 基于模态匹配的结构参数优化

工程系统动态性能异常的主因在于结构固有频率与运行激励频率趋近，引发共振效应，为此，依托模态分析方法进行改良，融合有限元数值模拟跟实测验证调整结构参数，首先依据SolidWorks建立三维几何模型，开展模态仿真，辨识轴系、机座等重点组件的固有振动特性。实验使用多点激励方式，借助力传感器输入激励，加速度计同步获取振动响应，再凭借ModalVIEW软件识别实测固有频率及振型，结果表明，轴系实测固有频率为120Hz，落入电机运行频段(115-125Hz)内，引发共振现象。改良

措施囊括: 将轴径由80mm增至85mm, 并在机座底端增设加强筋, 改良后轴系固有频率升至145Hz, 避开运行频段, 振动幅度由0.15mm降至0.03mm, 动态稳定性明显增强。

3.2 基于模糊PID的控制参数优化

伺服驱动器应用常规PID方案时, 暴露出动态响应迟缓及负载骤变引发的超调缺陷, 当载荷由500N跃升至1000N, 系统响应耗时20ms, 超调率达5%, 制约加工质量, 为此, 引入模糊PID协同控制机制, 借助模糊单元在线整定PID参数。建立包含负载变化率跟转速误差的模糊规则体系, 以负载跃变幅值、实时偏差为输入变量, 比例、积分、微分增益为输出变量, 在驱动器控制架构中集成模糊逻辑调节单元, 持续获取电机运行状态数据, 自适应修正调控参数; 经改良后开展突加负载测试, 系统响应时长压缩至12毫秒, 峰值偏差控制在2%以内, 除了上述内容以外, 将电流环频宽扩展至1000赫兹, 加快信号解析速率, 显著改良动态响应的迅捷性跟稳定性。

3.3 基于刚度匹配的集成结构优化

直驱传动系统的轴系与机座刚度失配, 让高速运转时发生弹性形变, 动态误差显著增加, 刚度测试表明, 轴系刚度为200 N/ μm , 机座刚度达350 N/ μm , 二者差异过大造成载荷分布不均, 改良措施从结构设计和材料选型两方面展开: 结构上推行轴系跟机座一体化方案, 以减少连接部位的刚度损耗; 材料上以高强度合金钢取代普通钢材, 然后增加轴系的弹性模量。同样, 增进连接面加工精度, 使同轴度偏差不超过0.01mm, 有效缓解因装配误差引起的刚度分布不均, 改良后轴系刚度达260 N/ μm , 机座刚度设为300 N/ μm , 二者匹配性明显增强, 高速运行试验显示, 系统动态变形量由0.08mm减至0.02mm, 加工精度误差下降40%。

3.4 基于多源信号融合的动态抑制优化

工业现场的电磁噪声跟机械振荡干扰让动态监测信号发生畸变, 制约了改良性能, 为此, 引入多源信息融合方略以增强抗扰能力, 在传感器选型阶段, 优先使用高电磁兼容性的压电式加速度传感器, 并在传输途径中配置屏蔽导线结构, 有效抑制电磁耦合。数据预处理环节, 使用小波阈值去噪方法对原始振动数据实行净化, 准确辨识核心特征成分, 设计多路信号同步采集架构, 使用时间戳对齐方法校正多源传感信号的时序偏移, 增强特征参数辨识准确性, 经改良, 信号信噪比由45dB增加至58dB, 固有

频率测定误差控制在 $\pm 1\text{Hz}$ 以内。依据滤波后的高质量数据, 精细调整系统阻尼特性, 在轴系与基座接口处增设弹性减振垫片, 显著强化振动衰减效能, 阻尼比由0.02增进至0.08。

4 结语

伺服直驱式机电集成系统的动态响应能力直接关系到智能装备制造的重点指标, 本文融合我国产业发展实情, 围绕产业意义、技术发展水平及改良方针三个维度展开详细分析, 研究说明, 改良动态响应特性对增加加工准确度、提高能源利用效率、保障产业链安全稳定有着核心作用, 并指出现阶段永磁同步电机与驱动控制系统在动态协同方面仍存短板。依托模态分析与模糊PID控制等方法, 建立了包含结构参数和控制策略等四类切实可行的改良方案, 成功攻克系统共振及响应迟滞等核心瓶颈, 该成果为增强国产伺服直驱式机电一体化系统的动态响应能力给出了坚实技术基础, 有力支撑智能制造装备向高端化跃升; 将来可扩展至极端工况下的动态行为探究, 强化环境适应力, 加速它在高精尖制造场景的规模化应用。

[参考文献]

- [1] 闫肖肖, 袁丹丹, 李志彪, 等. 面向智能装备制造的人才培养模式研究[J]. 高教学刊, 2026, 12(01): 159-162.
- [2] 蒋亮, 陈逸菲, 宋长坡, 等. 自动化类应用型人才培养模式探索与实践——以集成电路智能制造装备为例[J]. 农业开发与装备, 2026, (01): 39-41.
- [3] 余娜. 从试点到普及我国制造业向智能化跨越[N]. 中国工业报, 2025-12-22(010).
- [4] 胡铨军. 机电一体化设计在设备制造中的应用[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集. 杭州华丰巨箭工具有限公司, 2025: 24-25.
- [5] 苏光鹏. 机电一体化系统在智能制造中的应用与发展[C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(三). 江苏扬州富达液压机械集团有限公司, 2025: 790-791.

作者简介:

陈则艳(1990--), 女, 汉族, 山东省临沂市郯城县李庄镇沂东村人, 研究生, 中级工程师, 研究方向: 电气机械。