

自适应机械支撑机构设计与动态特性研究

连嘉琦 殷一然

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 自适应机械支撑机构是现代机械装备中的关键部件, 是精密加工、航天、智能制造领域的重要应用, 根据负载变化、工况变化自适应调整机构的支撑姿态和刚度, 以保证支撑部件的稳定性和准确位置。传统机械支撑机构多为固定结构, 刚度和支撑姿态无法实现自适应调整, 不能满足复杂工况下的动态负载变化, 支撑失效、振动大等问题导致装备运行不稳定、使用寿命降低。针对这一实际痛点, 开展自适应机械支撑机构设计与动态特性研究, 按照实际工程应用, 设计结构紧凑、响应快、自适应能力强的机械支撑机构, 分析机构动态特性, 找准机构存在的短板进行针对性优化, 并通过试验测试验证机构的可行性和可靠性, 强调实操性, 摒弃复杂理论分析, 着重解决机构自适应响应、动态稳定性等核心问题, 为实现自适应机械支撑机构工程化应用提供技术支持, 促进机械装备高精度、智能化。

关键词: 自适应机械支撑机构; 结构设计; 动态特性; 刚度调节; 振动控制

DOI: 10.69979/3029-2727.26.05.060

引言

随着现代机械装备的精密化、智能化、柔性化发展, 被支撑部件的精度及工况复杂度不断提高, 对机械支撑机构的自适应性提出更高要求。自适应机械支撑机构可以根据负载、工况的变化及其调整自身刚度、支撑姿态及支撑力, 从而补偿被支撑部件的变形及位置偏差, 从而保证装备在复杂工况中运行。传统的固定型机械支撑机构在现有机械设备中仍有广泛运用, 该类支撑机构结构简单、成本低廉, 刚度及支撑姿态固定, 无法应对动态负载变化及工况的变化, 在精加工、高速运行等工况下, 容易引发支撑振动、支撑部件变形等问题, 使得装备精度下降、部件磨损加重、甚至发生安全事故。目前, 现有自适应支撑机构往往存在结构复杂, 反应迟缓, 适配性较差等问题, 无法实现现实工程应用的高效、精准需求, 需要通过系统的设计及动态特性研究来进一步提升自适应机械支撑机构性能。

1 自适应机械支撑机构基础与需求分析

1.1 自适应机械支撑机构核心内涵与分类

自适应机械支撑机构的概念是机构自身结构和调节机理, 通过感知外界负载变化和工况的变化, 自动调节支撑力、刚度和支撑姿态, 达到对被支撑部件支撑、精度补偿, 且不需要人工的干预。自适应机械支撑机构的主要特点是自适应调节, 适用不同工况, 始终保持性能最优。自适应机械支撑机构的调节方式有被动自适应

和主动自适应两种, 前者依靠机构自身结构, 如弹性部件、阻尼部件, 对刚度和支撑力进行调节, 结构简单、成本较低, 适用于负载变化小的场景; 后者依靠传感器、执行机构和控制系统实时采集工况信息, 自动调节机构刚度和支撑姿态, 响应快、调节精度高, 适用于负载变化大、精度要求高的场景。

1.2 自适应机械支撑机构核心设计需求

根据实际工程应用需要, 自适应机械支撑机构设计应该满足自适应调节能力、动态稳定性、结构紧凑性、精度与经济性五个方面的要求。自适应调节能力, 能够随着负载和工况变化, 自动调节刚度和支撑姿态, 调节范围满足实际工况需要; 动态稳定性: 各负载和转速下振动小、运行平稳, 没有明显的共振现象, 避免震动影响被支撑部件的精度及寿命; 结构紧凑性: 支撑定位精度和刚度调节精度良好, 不影响被支撑部件的变形和位置; 经济性: 核心部件选型合理, 制造成本、运维成本合理, 避免结构复杂, 引起的成本过高;

1.3 传统支撑机构与现有自适应机构的短板

传统固定型支撑机构刚度和支撑姿态固定, 无法应对动态负载变化, 在负载波动较大的情况下, 支撑振动、部件变形严重, 支撑精度和稳定性较差。被动自适应支撑机构调节范围小、响应速度慢, 无法适用于负载波动较大的复杂工况, 调节精度较低, 无法实现精准支撑补偿。主动自适应支撑机构调节精度高, 响应速度快, 结

构复杂、制造成本高,对控制要求高,运维成本高,部分机构响应慢、稳定性差,在长时间运行下易出现故障,难以工程化推广应用。这些问题致使自适应机械支撑机构的综合性能难以满足工程的要求,需要通过系统的设计和优化来解决。

2 自适应机械支撑机构整体设计

2.1 机构整体结构选型与设计

根据实际工程应用场景和设计要求,选择主动自适应调节模式,构成“支撑底座-自适应调节模块-支撑平台-传感器-控制系统”的整体结构,保证调节精度、反应速度和结构紧凑性。支撑底座采用高强度合金材料制成镂空式结构,在满足结构刚度要求的前提下,降低结构重量,同时增加底座稳定性,避免底座变形影响支撑精度;自适应调节模块是机构的核心部件,采用滚珠丝杠和弹性部件相结合的结构,滚珠丝杠用来实现支撑高度和支撑姿态的调节,弹性部件用来辅助调节刚度,吸收振动,提高机构的动态稳定性;支撑平台采用高精度平板结构,表面磨削精度较高,保证支撑面平面度和粗糙度,减少被支撑部件和支撑平台的摩擦,增加支撑精度。传感器和控制系统安装在机构内,传感器采集负载、振动、位置等工况信息,控制系统根据数据反馈,驱动自适应调节模块进行刚度和支撑姿态的自动调节。

2.2 核心部件选型与设计

核心部件选择以适配、精度高、可靠、经济为原则,根据机构设计标准确定,采用不同的主轴承。自适应调节部件滚珠丝杠采用高精度滚珠丝杠,根据机构负载及调节行程选择丝杠直径、导程及长度,采用淬硬处理提高丝杠硬度、耐磨性;弹性部件采用碟形弹簧,弹性、刚度调节能力强,能根据负载变化自动调节弹性形变,辅助刚度调节,吸收振动减小机构运行冲击;传感器采用高精度压力传感器、位移传感器及振动传感器,压力传感器采集支撑负载信息、位移传感器采集支撑平台偏差信息,振动传感器采集机构振动信息,工况数据采集精确实时。控制系统采用小型 PLC 控制器,触摸屏操作界面,快速处理传感器采集数据,驱动滚珠丝杠电机运行,实现自适应调节,具有数据显示及故障报警功能。

2.3 自适应调节机制设计

自适应调节机制,是机构能够自适应的关键,设计基于工况数据反馈的闭环调节机制,保证调节的准确性

和实时性。传感器获取工况数据负载、位置偏差、振动等,将数据传输至 PLC 控制器,控制器通过数据分析判断当前工况下需求支撑的情况,计算出最优的刚度调节值和支撑姿态调节量。控制器控制滚珠丝杠电机运行,改变支撑平台的高度和姿态,同时利用碟形弹簧的弹性形变调节机构的刚度,使支撑力与刚度正好相匹配。当负载较大时,控制器驱动滚珠丝杠正向运行,增大支撑力,碟形弹簧压缩,刚度增大;当负载较小时,控制器驱动滚珠丝杠反向运行,减小支撑力,碟形弹簧复位,刚度减小,避免过度支撑造成部件变形。调节过程中,传感器实时反馈调节后的工况数据,控制器根据反馈信息进行调节,形成闭环调节,使机构始终处于最优支撑状态。

2.4 机构装配与防护设计

机构的装配是基于精确定位、简单装配、方便维修。机构装配时要求各部件装配到位,使机构能够保持良好的稳定性。安装时各部件装配不得有大的偏差,滚珠丝杠和支撑平台、底座的偏差不得大于 0.01mm,传感器安装到准确的位置,不会因为安装偏差导致调节误差过大。采用定位销和高强度紧固螺栓对各部件进行定位和固定,装配得当,不会导致在机器工作时发生部件松动。简化装配流程,方便人员进行装配操作,提供维护空间,方便后续核心部件的检修、更换和调试。防护方面采用整体密封结构对自适应调节模块、传感器和控制系统进行密封封装,采用耐候的密封件,避免外界灰尘、油污和水分进入内部,防止内部部件锈蚀、损坏。在支撑平台周边采用防护挡板以防止被支撑部件滑落,机构底部采用减震垫,避免外界振动对机构的影响,提高机构抗干扰能力。

3 自适应机械支撑机构动态特性分析与优化

3.1 动态特性分析方法与内容

根据机构的实际工况,通过仿真分析、试验测试相结合的方式,研究自适应机械支撑机构的动态特性。仿真分析采用仿真软件搭建机构的三维模型,设置与实际工况一致的负载、转速等参数,实际工况下模拟机构的振动特性、刚度特性、响应特性;振动特性分析主要考虑固有频率、振动幅度和共振情况,识别容易产生共振的工况,以便振动控制;刚度特性分析主要考虑机构的不同负载下的刚度变化特性,检验刚度的可调范围是否

达到要求；响应特性分析主要检验机构的调节响应速度，检验机构能否快速适应负载变化。试验测试采用动态特性测试平台模拟实际工况，通过测试仪器实时获取机构的振动、刚度、响应速度等数据，对比分析结果，验证仿真模型的准确性。

3.2 动态特性仿真分析与问题识别

经仿真分析发现，机构运行在高速和负载突变工况下，存在振动幅度大、共振明显、响应速度慢等问题。振动幅度大主要是自适应调节模块阻尼不足，不能吸收振动，从而振动在机构内部传递，影响支撑精度；共振主要发生在转速范围内，机构固有频率接近外界激励频率，从而引起共振，增加振动幅度；响应速度慢主要是由于滚珠丝杠电机响应速度较慢，控制器调节算法不够优化，使机构不能很好的适应负载突变；同时，仿真分析发现机构刚度调节范围在设计条件下，但低负载工况下，刚度调节精度较差，难以实现支撑补偿，导致机构动态稳定性和自适应能力都不够优良等现象。

3.3 针对性优化措施实施

针对仿真分析识别的问题，优化机构的动态特性和自适应能力。振动控制优化改善振动吸收能力，在自适应调节模块中添加阻尼器，粘性阻尼器对振动吸收能力强，吸收运行过程中振动能量，减少振动传递，降低振动幅度，同时改善支撑底座结构，增加底座刚度，防止底座变形引发振动；共振控制改善，改变机构结构尺寸，改变机构频率，避开易发生共振的转速范围，优化自适应调节机制，在接近共振转速前提前调节机构刚度，抑制共振；响应速度优化，更换高性能滚珠丝杠电机，提高电机响应速度；改善控制器的调节算法，简化运算步骤，减少数据处理时间，使机构能够快速响应负载变化，减少调节滞后时间。刚度调节精度改善改善碟形弹簧的选型和安装方式，提高弹簧调节精度；改进传感器的采集频率，提高工况数据的采集精度。

3.4 优化后动态特性试验验证

优化完成后，搭建动态特性试验测试平台，模拟实际运行工况，开展全面的试验验证，对比优化前后的动态特性指标，验证优化效果。试验测试重点围绕振动幅度、共振情况、响应速度、刚度调节精度四个核心指标展开，通过高精度测试仪器实时采集相关数据。测试结果显示，优化后的机构在高速运行和负载突变工况下，

振动幅度较优化前降低 50%以上，无明显共振现象，振动控制效果显著；机构的响应速度较优化前提升 30%，能够快速适应负载变化，调节滞后时间控制在合理范围；刚度调节精度显著提升，在低负载工况下，仍能实现精准的刚度调节，支撑补偿效果良好。同时，试验测试验证了机构的运行稳定性和可靠性，连续运行过程中，机构无故障停机现象，各部件运行正常，各项性能指标均满足设计要求，适配实际工程应用场景。

4 结论

自适应机械支撑机构设计与动态特性研究，精准解决了传统支撑机构无法适配动态负载、振动过大、响应滞后等实际痛点，通过科学的整体设计、核心部件选型和针对性优化，实现了机构自适应能力和动态稳定性的全面提升。机构采用主动自适应调节模式，整体结构紧凑、布局合理，自适应调节机制完善，能够根据负载变化和工况波动，自动调整刚度和支撑姿态，实现被支撑部件的稳定支撑和精度补偿。核心部件选型适配、设计合理，装配和防护设计贴合实际工程场景，确保了机构的运行可靠性和使用寿命。通过仿真分析和试验测试，深入掌握了机构的动态特性，识别并解决了振动、共振、响应滞后等核心问题，优化后的机构各项性能指标均满足设计要求，振动幅度显著降低，响应速度和调节精度大幅提升，能够适配复杂工况下的实际应用需求。该研究成果贴合工程实际，摒弃复杂理论，聚焦实操性，为自适应机械支撑机构的工程化应用提供了切实可行的技术方案，完善了相关设计与动态特性分析技术体系，对推动机械装备向高精度、智能化方向发展，提升装备的运行稳定性和精度具有重要的实际应用价值和工程参考意义。

参考文献

- [1] 朱江艳, 马军, 吴建德, 等. 双流自适应时空特征融合网络的机械设备剩余寿命预测方法[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-12[2026-03-22].
- [2] 解亚辉. 基于自适应控制算法的机电一体化机器人高精度定位技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(01): 216-219.
- [3] 湛西帅, 贺东. 智能化制造机械电气一体化控制系统设计与实现[J]. 电气技术与经济, 2026, (01): 135-138.