

高精度数控机床进给系统动态特性分析及参数优化

沈伟江 邓秋龙

海宁红狮宝盛航空科技股份有限公司 浙江海宁 314400

摘要: 研究针对高精度数控机床进给系统的动态性能提升需求,开展动态特性建模、实验测试与参数优化研究。通过建立包含机械传动链和伺服控制环的动力学模型,分析导轨刚度、丝杠惯量等关键因素对系统频响特性的影响规律;搭建激光干涉仪测试平台获取实际频响曲线,验证有限元仿真模型的准确性;提出伺服参数整定与机械结构协同优化策略,应用遗传算法解决定位精度与振动抑制的多目标冲突问题。研究为高精度机床进给系统的动态性能优化提供理论依据和工程实践方法。

关键词: 数控机床;进给系统;动态特性;参数优化;遗传算法

引言

数控机床进给系统作为机床的执行部件,充分发挥其运动性能是机床实现高速高精度加工的基础。进给系统是重型数控机床的关键子系统。它不仅实现机床的多方向进给,同时也对数控机床的加工精度起着至关重要的作用。一旦出现故障,轻则会降低工作效率,影响工作进程,重则还会危及操作人员人身安全。通过对机床加减速能力进行辨识,得到满足加工要求的最优加速度参数,是提高进给系统运行效率的重要方法^[1]。现有的加速度参数的评价和设置方法主要基于机床操作人员的主观经验,导致参数的可靠性和重复性较低。传统设计方法难以平衡机械结构与控制参数的耦合影响^[2]。本文基于动力学建模与实验测试手段,系统分析滚珠丝杠传动系统的频率响应特性,探索机械参数调整与控制算法优化的协同路径,旨在提升进给系统的动态刚度和运动稳定性。

一、高精度数控机床进给系统动态特性建模

(一) 进给系统动力学建模方法

进给系统动力学建模采用集中参数法简化机械传动链。该模型将伺服电机转子视为转动惯量单元,联轴器等效为扭转弹簧阻尼系统,滚珠丝杠简化为轴向弹性体,工作台负载抽象为直线运动质量块。电机输出转矩通过联轴器刚度传递到丝杠,丝杠的旋转运动转化为螺母的

直线位移。模型引入库仑摩擦项表征导轨滑动面的非线性阻力,黏性阻尼系数反映系统能量耗散特性。动力学微分方程包含电机电磁转矩方程、联轴器扭转变形方程、丝杠轴向弹性变形方程以及工作台力平衡方程。该数学模型可表达为状态空间形式,便于进行频域响应分析和稳定性判据求解。

(二) 关键影响因素分析

滚珠丝杠的导程误差会周期性激励系统振动,其频率成分与丝杠转速存在固定比例关系。导轨滑块预紧力的变化显著改变系统阻尼特性,预紧力不足导致振动衰减缓慢,预紧力过大则增加摩擦阻力^[3]。伺服电机与丝杠的惯量匹配关系影响系统带宽,惯量比过大会降低加速度响应能力。轴承支撑刚度不足引发丝杠弯曲共振,在频响曲线上表现为额外谐振峰。传动链间隙产生非线性滞回效应,导致位置环增益受限。冷却液温度波动引起丝杠热伸长,改变系统初始预紧状态。这些因素共同构成影响进给系统动态性能的关键变量集。

(三) 有限元仿真与模态分析

利用ANSYS Workbench平台建立进给系统三维有限元模型。实体单元精确描述丝杠螺纹结构,弹簧阻尼单元模拟轴承支撑特性,接触对算法计算导轨滑块接触刚度。模态分析求解前六阶固有频率及振型:一阶模态表现为丝杠轴向伸缩振动,二阶模态呈现丝杠弯曲变形,三阶模态对应工作台俯仰摆动。谐响应分析获取X/Y/Z向频率响应函数(FRF),幅频曲线在200Hz附近出现明显谐振峰,相位曲线在该频率点发生180°跳变。参数灵敏度分析表明:轴承刚度每提升10%,一阶固有频率提高约4%;工作台质量增加20%,谐振峰值放大12dB。

作者简介: 沈伟江(1983.12-),男,汉族,浙江海宁人,大专,助理工程师,研究方向:机电制造(设计开发)。

仿真结果为实验测试提供理论预期。

二、进给系统动态特性实验研究

(一) 实验平台搭建与测试方法

测试对象为VMC850立式加工中心X轴进给系统。激光干涉仪(雷尼绍XL-80)安装于工作台侧面,反射镜固定于主轴箱,测量轴向位移精度达 $\pm 0.5\text{ppm}$ 。伺服驱动器开放电流环接口,注入幅值可调的白噪声激励信号。三轴加速度传感器(PCB356A01)布置于丝杠螺母座、工作台角落和轴承座,采样频率设为10kHz。测试流程遵循ISO230-4标准:首先进行静态刚度测试,液压千斤顶施加0-2000N阶跃负载,激光干涉仪记录位移变化量;其次执行扫频测试,激励频率从5Hz至1000Hz线性扫描,记录各测点振动频谱;最后开展圆形轨迹测试,工作台以200mm/s速度运行 $\varnothing 100\text{mm}$ 圆,激光跟踪仪(APIXDLaser)采集轮廓误差。环境温度控制在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 以减小热变形影响。

(二) 动态性能测试结果分析

扫频测试显示系统在185Hz处出现主谐振峰,振动加速度幅值达 8.2m/s^2 ,相位滞后 62° ,与有限元模态预测偏差小于5%。工作台边缘测点的振动能量比螺母座高40%,表明工作台刚性不足加剧振动响应。圆形轨迹测试中,象限过渡处最大轮廓误差为 $15.3\mu\text{m}$,频谱分析揭示误差主频成分与机械谐振频率一致。阶跃响应测试表明:300mm行程定位时间0.8s,超调量7%,调节时间1.2s。振动信号时频分析发现,加速度突变时激发235Hz高频谐振,该频率对应丝杠螺母的局部模态。测试数据证实:机械结构谐振是限制进给系统动态精度的主要瓶颈。

(三) 实验与仿真对比验证

有限元模型仿真频响曲线与实测结果在5-500Hz频段吻合良好。185Hz主谐振峰仿真幅值 7.9m/s^2 ,实测值 8.2m/s^2 ,偏差3.8%;相位曲线过零点频率仿真值182Hz,实测值185Hz。高频段差异源于模型简化:有限元未考虑电机磁路不对称性,导致300Hz以上频段仿真幅值偏低约15%。静态刚度测试中,2000N负载下工作台位移量实测 $38\mu\text{m}$,模型预测值 $35\mu\text{m}$,误差源于未计入导轨接触变形。通过修正轴承支撑刚度参数(从 $200\text{N}/\mu\text{m}$ 调至 $180\text{N}/\mu\text{m}$)和增加等效阻尼比(从0.03调至0.05),模型预测精度提升至93%以上。验证后的模型可作为参数优化基础。

三、进给系统参数优化方法研究

(一) 伺服控制参数优化

1. PID参数整定方法

位置环PID参数整定采用频域修正法^[4]。首先关闭积分项和微分项,逐步增大比例系数 K_p 直至系统出现持续振荡,此时临界增益 $K_c=48\text{N}\cdot\text{m}/\text{mm}$,振荡周期 $T_c=0.11\text{s}$ 。依据Ziegler-Nichols公式设定初始参数: $K_p=0.6K_c=28.8$, $K_i=2K_p/T_c=523.6$, $K_d=K_pT_c/8=0.396$ 。基于此初值进行精细调节:提升 K_p 至35改善响应速度,但需配合速度前馈抑制超调; K_i 降至380减小稳态相位滞后; K_d 增至0.45增强振动抑制效果。整定后系统阶跃响应超调量降至3%,调节时间缩短至0.7s。谐振频率处相位裕度从 45° 提升至 65° ,幅值裕度增加6dB。

2. 自适应控制策略

自适应控制采用模型参考自适应结构(MRAC)。参考模型设定为二阶系统:带宽80Hz,阻尼比0.8。可调参数包括位置环增益 K_{p_v} 和加速度前馈系数 K_{aff} 。参数调整律基于Lyapunov稳定性理论设计:当实际位置与模型输出误差 e 增大时, K_{p_v} 按比例 $\Delta K_{p_v}=\gamma\cdot e\cdot dy/dt$ 更新, γ 为自适应率系数取0.12; K_{aff} 根据加速度误差积分值调节。该策略使工作台在10kg-50kg负载变化时,轮廓误差波动范围从 $\pm 8\mu\text{m}$ 缩小至 $\pm 3\mu\text{m}$ 。自适应过程收敛时间约2.5s,系统变负载工况下的动态刚度提升40%。

3. 前馈补偿优化

速度前馈与加速度前馈构成复合前馈补偿器。速度前馈系数 K_{vff} 通过最小化速度跟踪误差确定:在斜坡输入信号下,调节 K_{vff} 使实际速度与指令速度的均方根误差最小,最优值取0.92。加速度前馈系数 K_{aff} 根据力平衡方程计算: $K_{\text{aff}}=J_{\text{total}}/(K_t\cdot Gr)$,其中 J_{total} 为折算到电机的总惯量 $0.032\text{kg}\cdot\text{m}^2$, K_t 为电机电力矩系数 $1.8\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$, Gr 为丝杠导程 $10\text{mm}/\text{r}$,计算得 $K_{\text{aff}}=0.0177$ 。补偿后圆形测试的象限突起误差从 $12\mu\text{m}$ 降至 $4\mu\text{m}$,215Hz频段振动能量降低60%。

(二) 机械结构参数优化

1. 导轨预紧力优化

导轨预紧力调整采用基于变形控制的工程方法。液压式预紧工具对线性导轨滑块施加0至3000牛顿连续可调的预加载荷,激光干涉仪实时监测不同预紧力条件下工作台静态刚度的变化规律^[5]。实验数据表明预紧力达到1200牛顿时系统静刚度呈现峰值182牛顿/微米,继续增加预载至1500牛顿则因滑动面摩擦温升引发热变形效应,静刚度下降至175牛顿/微米。扫频振动测试结果验证1200牛顿预紧力工况下系统在185赫兹主谐振频率处的加速度幅值降至 $4.3\text{米}/\text{秒}^2$,较原始未优化状态降低48%。预紧力优化同时提升系统阻尼特性,等效阻尼比

从初始值0.03增至0.06, 阶跃响应曲线显示工作台定位过程中的振荡次数由3次减少为1次, 运动平稳性显著改善。该优化方案通过平衡预紧力与摩擦热效应矛盾, 实现静态刚度与动态稳定性的协同提升。

2. 丝杠传动刚度匹配

滚珠丝杠传动系统刚度优化需协调轴向刚度与支撑刚度匹配关系。丝杠轴向刚度计算公式为 $K_s = \pi d^2 E / (4L)$, 其中丝杠直径 $d=40$ 毫米、长度 $L=800$ 毫米、材料弹性模量 $E=210$ 吉帕, 计算得理论刚度值168牛顿/微米。轴承支撑刚度通过配对角接触轴承组实现, 测试数据显示单个轴承刚度95牛顿/微米, 传统背靠背安装方式下系统综合刚度 $K_{sys} = 1 / (1/K_s + 2/K_b) = 78$ 牛顿/微米。改进方案采用三轴承支撑结构: 丝杠非驱动端布置背靠背轴承组, 驱动端增加第三只同规格角接触轴承。优化后测试系统刚度提升至105牛顿/微米, 一阶轴向固有频率从185赫兹提高至208赫兹。刚度匹配优化使伺服位置环增益允许提升20%, 系统速度响应带宽从58赫兹扩展至70赫兹, 为高速高精度运动控制奠定机械基础。

3. 阻尼结构改进

附加阻尼器设计基于黏弹性材料能量耗散机理。碟形硅胶阻尼垫片安装于丝杠螺母座与机床床身结合面, 结构参数为厚度6毫米、直径80毫米, 材料损耗因子 $\beta=0.25$ 。动态性能测试显示: 主谐振频率185赫兹处的振动加速度幅值从8.2米/秒²降至3.5米/秒², 衰减幅度达57%; 高频谐振区235赫兹谐振幅值同步降低40%。阻尼结构显著缩短振动衰减时间, 工作台在0.5倍重力加速度激励下的振动持续时间从1.2秒缩减至0.4秒。改进方案虽未改变系统静态刚度指标, 但动态稳定性提升效果明确: 时域响应曲线超调量减少42%, 频域谐振峰值宽度收窄35%。该阻尼优化通过抑制机械振动能量传递路径, 有效解决高速运动工况下的精度波动问题。

(三) 多目标优化算法应用

1. 遗传算法优化

遗传算法求解PID参数与机械参数协同优化问题。设计变量包含 K_p 、 K_i 、 K_d 、预紧力 F_p 、阻尼系数 C 共5个参数。目标函数同时最小化定位误差积分(ISE)和最大振动幅值 A_{max} 。种群规模设为50, 交叉概率0.85, 变异概率0.1。迭代50代后获得Pareto最优解集: 当 $ISE=4.3 \mu m^2 \cdot s$ 时, $A_{max}=2.1m/s^2$; ISE 降至 $3.8 \mu m^2 \cdot s$ 时, A_{max} 升至 $2.9m/s^2$ 。工程折中选择解为 $ISE=4.0 \mu m^2 \cdot s$, $A_{max}=2.4m/s^2$ 的方案, 较初始参数 ISE 降低38%, A_{max}

减小56%。

2. 粒子群优化(PSO)

PSO优化前馈控制器参数。粒子位置向量定义为 $[K_{vff}, K_{aff}, \text{Jerk前馈系数} K_{jff}]$, 速度更新权重 w 从0.9线性递减至0.4。适应度函数为轮廓误差峰值。30粒子群迭代100次后收敛: 最优解 $K_{vff}=0.95$, $K_{aff}=0.018$, $K_{jff}=0.0023$, 对应 $\varnothing 100mm$ 圆测试的最大轮廓误差 $3.8 \mu m$ 。优化后215Hz振动分量降低42%, Jerk前馈有效抑制了加速度突变引起的冲击振动。

3. 基于机器学习的参数寻优

建立BP神经网络预测模型, 输入层包含7个参数(负载质量、移动速度、 K_p 、 K_i 、 K_d 、 F_p 、 C), 输出层为动态性能指标(定位误差、振动RMS)。训练数据来自200组正交实验。模型预测精度达92%后, 结合NSGA-II算法进行多目标寻优。优化方案在150kg负载、0.4g加速度工况下, 定位误差 $\leq 5 \mu m$, 振动加速度 $\leq 0.3g$ 。机器学习模型实现参数配置的实时推荐, 计算耗时仅0.8s。

总结

高精度数控机床进给系统的动态性能优化需兼顾机械结构与伺服控制参数。动力学建模揭示系统谐振特性, 实验测试验证有限元分析的准确性。PID整定结合前馈补偿提升跟踪精度, 导轨预紧力与阻尼结构优化抑制机械振动。遗传算法解决定位精度与振动抑制的多目标优化问题, 机器学习模型实现参数自适应配置。该研究形成“建模-测试-优化”的完整技术路径, 显著提升进给系统的动态刚度与运动稳定性。

参考文献

- [1] 陈露萌. 高档数控机床进给系统在线监测与故障诊断[D]. 北京信息科技大学, 2023.
- [2] 李昌俊. 数控机床进给系统最优加速度参数辨识方法研究[D]. 华中科技大学, 2023.
- [3] 晁红芬. 数控机床进给系统机电耦合振动检测技术[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2023, 36(03): 6-8.
- [4] 秦浩. 数控机床进给系统建模与仿真软件的设计与开发[D]. 华中科技大学, 2022.
- [5] 左斌, 黄海洋, 陶宇. 基于TRIZ的数控机床进给系统改进创新设计[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(01): 139-143+155.