

数控机床伺服系统精度补偿技术及应用

周立¹ 王磊² 李奕霖²

1. 齐重数控装备股份有限公司 黑龙江齐齐哈尔 161000

2. 霍尼韦尔(天津)有限公司 天津 300000

摘要: 在高速切削和多轴联动加工中, 伺服系统的定位误差、热漂和反间隙问题已成为制约零件尺寸一致性及表面完整性的主要瓶颈。传统的静态标定依赖于周期性停机检测, 已不能满足柔性生产线“零废品”和“零等待”的刚性要求, 行业迫切需要嵌入加工过程的精度实时补偿机制。随着光栅、磁栅和激光干涉仪等设备成本不断下降, 数控系统内核开放性的提高, 误差源在线识别和动态补偿正在由实验室走向批量生产, 为伺服精度维持提供了一条可工程化的技术途径。

关键词: 数控机床; 伺服系统; 精度补偿; 技术应用

伺服精度补偿不只是一种算法问题, 而是一个包含误差建模、感知布局、信号处理、控制重构和可靠性验证等闭环系统命题。热变形、载荷变化、摩擦非线性、电磁干扰等多个时间-空间尺度耦合放大, 导致线性迭加补偿模型快速失效。缺乏对伺服驱动-驱动-反馈链路动态特性的全面描述, 局部修改将导致新的频率和相位延迟。因此, 需要在统一的状态空间中引入几何误差、热力耦合误差和伺服动力学误差, 建立可解释、可更新、可迁移的数字化补偿方法, 实现机床全寿命周期精度自稳定。

一、数控机床伺服系统精度补偿核心特征

(一) 技术原理与误差特性

精确辨识影响伺服精度的各类误差, 建立误差-补偿量之间的映射关系, 实现指令与实际位置的动态匹配, 是数控机床伺服系统精度补偿的核心。伺服系统误差按其属性可以划分为静态误差和动态误差, 其中静态误差是可重复性的, 主要有机械传动间隙(如滚珠丝杠反向间隙、齿轮啮合间隙等)、几何误差(如导轨平行度、主轴与导轨垂直度)、电机定位误差等。负载波动(如切削力突变)、电机温升(转矩漂移和热变形)、伺服增益失配(触发滞后)、外界振动扰动等因素引起的动态误差具有随机性和时变性, 需要对其进行实时监测和动态调节^[1]。

在误差传递路径上, 通过伺服驱动器对数控系统输出的运动指令进行功率放大, 驱动电机驱动滚珠丝杠、导轨等机械传动机构进行运动, 误差在“指令传递-功率输出-机械执行”三个阶段逐级积累。如滚珠丝杠的调距差可使电机在每一转中产生固定的位置偏差, 高速

切削载荷的突然变化又会引起电机转速的瞬时波动, 从而引起跟踪误差。电机持续运转时, 定子电阻会发生变化, 从而导致转矩输出出现偏差, 进而影响定位精度。精度补偿技术需要根据不同类型误差的产生机理, 采用差异化补偿策略, 对误差进行闭环控制。

(二) 补偿材料与硬件技术要求

精度补偿系统的硬件结构要求高, 精度高, 响应快, 稳定性好。选用线性精度 $\leq \pm 0.5 \mu\text{m/m}$ 、采样频率 $\geq 1\text{kHz}$ 的激光干涉仪(如RenishawXL-80激光干涉仪), 实现对电机位置和转速的实时采集, 实现全行程误差校正。角度测量采用高精度绝对编码器(如美国海德汉ERN1387编码器), 测量精度 ≥ 16384 线/转, 零漂误差 $\leq 1/\text{s}$, 保证电机转角检测的精度。

在补偿执行机构方面, 需要实现电流环带宽 $\geq 2\text{kHz}$ 、速度环带宽 $\geq 500\text{Hz}$ 、位置环增益可调 $0-1000\text{s}\mu^{-1}$, 保证补偿指令的快速响应^[2]。实现转矩波动 $\leq \pm 3\%$ 、温升 $\leq 2\text{K/W}$ 、转子惯量与机械负载特性匹配、减小温度漂移和负载扰动对精度影响等。作为精度补偿基本载体的机械传动件, 要求滚珠丝杠精度在C3及以上, 螺距误差不超过 $5 \mu\text{m}/300\text{mm}$, 反向间隙不超过 0.01mm , 直线滚动导轨需满足摩擦力波动 $\leq \pm 5\%$, 运行平稳性误差 $\leq 0.005\text{mm/m}$, 为精度补偿提供可靠的机械支撑。

二、数控机床伺服系统精度补偿方案设计与前期准备

(一) 补偿总体方案规划

针对不同类型的数控机床(如: 立式、卧式、五

轴)、加工工况(高速铣削、精密磨削、薄壁工件)和误差特征的定制化设计。在工程适用性分析中,需要明确的核心参数是:当垂直加工中心的X轴行程为1200mm时,激光干涉测量点不少于25个,保证了整个行程的误差覆盖率。在高速加工场景(主轴转速 $\geq 10000\text{r/min}$)下,对采样频率进行动态补偿,使采样频率达到2kHz以上,避免因采样延迟引起的超调补偿。高温切削环境(切削区温度 $\geq 100^\circ\text{C}$)需要增加采样间隔 $\leq 100\text{ms}$ 的温度传感器,对温度漂移误差进行实时校正。

按照“误差校正—系统构建—补偿实施—效果验证”的逻辑顺序进行。在此基础上加装温度、载荷和振动等实时监测传感器,建立多路数据采集系统^[3]。以误差数据为基础,设计内置于伺服驱动器或CNC控制核的补偿算法,最后,利用标准件试切工艺对补偿效果进行验证,并对补偿参数进行迭代优化。

根据坐标轴的运动幅度和误差分布特性,将补偿区划分为每200mm行程一次的补偿区,对每隔200mm进行单独标定,以保证在整个行程范围内的补偿精度一致。针对五轴联动加工中心(如A轴和C轴),将每15度转角划分一段补偿区间,针对性地进行旋转和几何偏差的校正。

(二) 补偿系统选型与设计

传统的补偿方法大多采用固定参数的补偿方式,很难适应动态变化的工况。应对“多传感器融合+自适应控制”智能补偿系统进行优化设计。测量单元包括:激光干涉仪(用于对静态定位误差进行校准),高精度编码器(对电机转角进行实时监控),PT1000温度传感器(布置在电机定子、丝杠轴承座、导轨滑块等关键部位,测量精度 $\leq \pm 0.1^\circ\text{C}$),压电式力传感器(装在主轴端,量程0-5000N,测量精度不超过 $\pm 1\%\text{FS}$)^[4]。采用工业级可编程控制器(如西门子S7-1500)进行数据处理,实现了多传感器数据的同步采集和实时处理,处理时延 $\leq 5\text{ms}$ 。驱动单元采用伺服电机(如发那科 $\alpha i-B$ 系列)和伺服电机组成,实现响应时延 $\leq 2\text{ms}$ 的快速补偿指令。

该补偿系统采用模块化设计,包括误差采集模块(支持以太网/Profinet总线数据传输,同步精度 $\leq 1\text{ms}$),补偿算法模块(内嵌PID+前馈控制+交叉耦合控制算法),参数管理模块(支持补偿数据的存储、调用和历史追溯)。系统具有误差预警功能,当监测误差超出预定阈值时(如定位误差 $\geq 5\mu\text{m}$),会自动启动补偿参数调节,保证精度始终在控制范围内。

三、数控机床伺服系统精度补偿关键技术实施

(一) 静态误差标定与补偿技术

以立式加工中心X轴(1200mm行程)为例,采用激光干涉仪的全行程高精度标定方法,具体实施步骤如下:激光干涉仪发射端经磁座固定在机床床身基准面上,接收端固定在工作台专用夹具上,确保光路平行于X轴运动方向,对中偏差不超过0.1mm/m;将测量间隔设定为50mm,从原点X轴(0mm)匀速运动到最大冲程(1200mm),每一测点停留10秒,记录命令位置 and 实际位置之间的差量值,产生螺距误差曲线。对于反向间隙,采用正反向定位方法,分别在X轴等距位置(200mm、400mm、600mm、800mm、1000mm)上进行正向定位和反向定位,重复测量3次,计算反向间隙平均值(如测量反向间隙0.012mm)^[5]。

由数控系统和伺服驱动器参数配置来实现静态补偿,在数控系统内建立误差补偿表,把各测点的偏差值换算成补偿脉冲的数量(丝杠导程为20mm时,1 μm 偏差对应100次脉冲),当电机移动到这个位置时,系统会自动叠加补偿脉冲;反向间隙补偿是指在伺服驱动器中设定反向间隙补偿参数,当电机反向转动时,提前输出相应的间隙补偿脉冲(如0.012mm间隙需要600次脉冲),以消除机械间隙引起的位置迟滞。采用静态补偿方法,对某立式加工中心X轴进行静态补偿,使其定位误差由原来的15 μm 减小到3 μm ,反向间隙由0.012mm减小到0.003mm,达到精密模具的静态精度要求。

(二) 动态误差监测与补偿技术

采用多传感器同步监测电机定子温度(如:25 $^\circ\text{C}$ 升高至50 $^\circ\text{C}$),根据预先设定的“温度-转矩”映射关系,计算电机转矩补偿值。负载传感器感知切削力变化(如铝合金铣削过程中800N突然升高到1800N),并根据负载动态调节速度环增益(例如从200s量级提高到300s量级),减小由速度波动引起的跟驰误差。振动传感器(如压电式加速度传感器,量程为0-500 m/s^2 ,精度 $\leq \pm 5\%\text{FS}$),在加速度大于0.1 m/s^2 的情况下,自动降低进给速度,避免振动对精度的影响。

采用自适应前馈控制和交叉耦合控制相结合的方法,通过实时采集到的位置误差和速度误差,对位置环增益和前馈系数进行在线调节,如当X轴跟踪误差大于5 μm 时,位置环增益由500 s^{-1} 提高到600 s^{-1} ,并增加速度前馈系数,缩短响应延迟时间^[6]。针对型面误差(如圆弧插补、斜边加工等),实时计算X、Y轴误差耦合量,并对滞后轴施加补偿指令,保证型面精度。采用动态补偿技

术, 实现了高速铣削过程中X轴跟踪误差由 $12\mu\text{m}$ 下降到 $2\mu\text{m}$, Y轴跟踪误差由 $10\mu\text{m}$ 下降到 $1.8\mu\text{m}$, 圆弧表面粗糙度由 $10\mu\text{m}$ 下降到 $3\mu\text{m}$ 。

(三) 补偿系统安装与调试

对补偿系统的安装要求严格控制: 安装激光干涉仪时, 利用精密水平仪对收发端水平度进行标定, 误差不超过 0.005mm/m ; 光路调整采用激光准直仪辅助, 保证光路与坐标轴运动方向的平行度误差不超过 0.1mm/m ; 采用高导热硅脂贴合在电机定子表面, 与电机外壳接触面积 $\geq 90\%$ 。在载荷传感器安装过程中, 采用精密模具, 使其与主轴轴线同轴度误差不超过 0.02mm , 从而避免侧向力对载荷测量的影响。

调试流程分为三个阶段: 参数配置阶段, 将补偿使能、采样周期(1ms)、误差阈值(位置误差 $\geq 5\mu\text{m}$ 时触发报警), 并将静态误差补偿表导入数控系统。功能验证阶段, 检测补偿系统对误差信号的响应是否正常, 如点动, 连续运动, 插补等, 如手动控制X轴往复运动, 观察补偿系统是否实时输出补偿脉冲。在精度检测方面, 利用ISO10791-7矩形试件等标准试件, 采用三坐标测量机(测量精度 $\leq 1\mu\text{m}$)对试件尺寸误差进行测量, 并对补偿参数进行迭代优化。经过24小时的连续运行, 测量系统的位置误差波动在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内, 验证补偿参数没有漂移, 通过改变切削载荷($1000\text{N}\sim 2000\text{N}$), 系统响应时间 $\leq 10\text{ms}$, 保证动态补偿的有效性。

(四) 工程实例验证

以某型航空铝合金薄壁零件(尺寸 $500\text{mm}\times 300\text{mm}\times 5\text{mm}$)为研究对象, 采用传统补偿法和优化补偿方法, 对航空航天铝合金薄壁零件(尺寸 $500\text{mm}\times 300\text{mm}\times 5\text{mm}$)进行铣削试验, 对两种方法的补偿效果进行验证。

表1 传统补偿方法与优化补偿方法效果对比表

测试指标	传统补偿方法	优化补偿方法	优化提升幅度
X轴定位误差 (μm)	14.5 ± 2.8	2.3 ± 0.6	84.1%
Y轴跟随误差 (μm)	11.2 ± 1.9	1.8 ± 0.4	84.8%
圆弧轮廓误差 (μm)	9.8 ± 1.5	2.7 ± 0.5	72.4%
试件平面度 (mm/m)	0.015 ± 0.003	0.004 ± 0.001	73.3%
试件垂直度 (mm/m)	0.012 ± 0.002	0.003 ± 0.001	75.0%
补偿系统响应时间 (ms)	32 ± 4	7 ± 1	78.1%
连续加工24h误差波动 (μm)	5.8 ± 1.2	0.8 ± 0.2	86.2%

由表1可知, 该优化补偿方法在定位误差、跟踪误差和轮廓误差控制等方面都比传统方法有明显改善, 其中X轴定位误差减少84.1%, 圆弧轮廓误差减少72.4%, 补偿系统响应时间缩短78.1%, 完全满足航空航天薄壁零件的高精度高稳定制造需求。现场加工验证表明, 优化补偿技术可使铝合金薄壁零件尺寸精度达到 $\pm 5\mu\text{m}$, 表面粗糙度 $\text{Ra}0.4\mu\text{m}$, 一次合格率从75%提高到98%, 大大提高加工效率和质量。

结束语

综上所述, 数控机床伺服系统精度补偿技术及应用, 将离线误差抑制转化为在线自修复, 不仅能保证数控机床在连续切削、高速换向、热机波动等工况下仍能保持 μm 量级乃至亚 μm 量级精度, 还能促进制造工艺由“机床固有精度”向“系统精度可控”转变, 为复杂型面、难加工材料及轻量化构件批量制造提供可复制的质量基准。面向未来, 融合异质感知、边缘智能和自适应控制等理论, 使补偿模型具有自演化能力, 实现基于数字孪生环境的下位机策略演练和下位机直写, 实现机床精度与工艺参数同步优化, 为高端装备的高效、绿色、柔性化发展奠定基础。

参考文献

- [1] 王大龙. 数控车床加工精度的影响因素研究[J]. 中国机械, 2024, (34): 45-48.
- [2] 于志明. 伺服控制在数控加工中的应用与发展趋势[J]. 农机使用与维修, 2024, (10): 71-75.
- [3] 王翔, 刘汉忠, 蔡明洁, 孙权, 万其. 数控机床虚拟仿真实验一流课程建设探索与实践[J]. 科技视界, 2024, 14(27): 21-24.
- [4] 谢小正, 张旭, 孙子宽, 宋玉奇, 黄华. 数控机床伺服系统参数设计数字孪生实验平台[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(05): 113-120.
- [5] 闫玉玲. 数控机床电气控制系统故障诊断与管护研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(04): 34-36.
- [6] 鲍镇. 数控机床伺服控制系统误差补偿及加工质量优化[J]. 农机使用与维修, 2024, (03): 94-96.