

数控加工误差补偿技术对零件加工精度的影响研究

王 博 汤业超 贾炳明

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘 要: 数控加工多类误差耦合会降低零件加工精度与批量稳定性,是精密制造的核心难题。本文系统梳理几何、热致、工艺及系统误差的成因与影响机制,阐释各类误差补偿技术的原理、特性与适用场景。通过五轴加工中心对照试验,验证单一补偿与多技术耦合补偿的精度提升效果。试验表明,多技术耦合补偿可显著缩小零件尺寸、形位偏差,提升批量加工稳定性,可为不同精度等级数控加工提供优化参考。

关键词: 数控加工; 误差补偿技术; 零件加工精度; 影响

引言: 数控加工是高端零件制造的核心工艺,加工误差是制约零件精度、影响产品质量一致性的关键因素。机床几何偏差、热变形、切削工艺波动等多源误差相互耦合,极易导致零件公差超标、批量加工稳定性不足。常规加工模式难以有效抵消动态误差影响,而误差补偿技术是低成本提升加工精度的核心手段。基于此,本文开展误差补偿技术对加工精度的影响研究,通过试验验证技术实效,优化适配不同场景的补偿方案。

1 数控加工误差类型及精度影响机理分析

1.1 数控加工核心误差分类及成因

(1) 几何误差。该类误差源于机床自身几何精度缺陷,具体包括坐标轴定位误差、直线度误差、垂直度误差及反向间隙误差等。其成因可追溯至机床零部件加工与装配环节的精度不足,是机床固有的一类静态误差,贯穿于整个加工过程。(2) 热致误差。加工过程中机床主轴、导轨、丝杠等运动部件因摩擦生热,加之环境温度波动,导致零部件发生热膨胀与热变形,从而产生动态偏移。该类误差在高精度加工中影响最为显著且难以补偿^[1]。(3) 工艺误差。该类误差属加工过程动态误差,主要包括刀具正常磨损与破损、切削力作用下的工艺系统弹性变形、工装夹具定位基准偏差以及工件装夹不当引起的夹紧变形等。(4) 系统误差。由数控系统自身特性引发,涵盖插补算法精度、伺服控制参数与机床机械特性的匹配程度,以及加工程序编制过程中产生的理论轨迹偏差。

1.2 各类误差对零件加工精度的影响机制

(1) 静态误差精度影响。几何误差作为恒定系统误差,直接造成零件尺寸偏离理论值、加工轮廓畸变及孔系位置偏移,从根本上制约了零件的基础尺寸精度与形状位置精度。(2) 动态误差精度影响。热误差与切削力误差具有时变性与工况依赖性,随加工持续与切削参

数变化而发生漂移,致使同一批次零件加工精度呈现不一致性,严重影响加工质量的稳定性。(3) 误差耦合影响。上述各类误差并非孤立存在,而是相互叠加、耦合放大。尤其在精密零件加工中,多误差综合作用极易超出公差带,成为精度不达标核心诱因。

1.3 零件加工精度评价指标体系

(1) 尺寸精度指标。主要包括零件最终尺寸与设计公差符合程度、机床重复定位精度,以及加工尺寸相对于名义值的偏差分布范围。(2) 形位精度指标。涵盖直线度、平面度、圆度、同轴度及轮廓度等形状与位置公差项目,用以评定零件几何形状的正确性与各要素间的位置准确性。(3) 加工稳定性指标。反映加工过程可靠性,具体表现为批量生产中加工精度的波动幅度、产品废品率水平及加工一致性系数,是衡量工艺方案能否满足批量生产要求的重要依据。

2 数控加工误差补偿核心技术分析

2.1 误差补偿技术基本原理与流程

(1) 技术核心原理。误差补偿的本质是“以偏纠偏”,即通过高精度检测设备对机床加工误差进行全面采集与量化,依据误差分布规律建立准确的数学模型,在此基础上通过数控系统软硬件接口,在加工轨迹或指令输出端反向叠加预置补偿量,使补偿作用与实际误差相互抵消,从而在无需改变机床硬件状态的前提下实现精度提升。该技术路线经济高效,是当前提升数控加工精度的主流手段。(2) 完整实施流程。误差补偿的实施遵循闭环优化路径,具体包括以下关键环节:误差检测采集——利用激光干涉仪、球杆仪、位移传感器等设备获取机床各轴及加工区域的原始误差数据;误差数据分析与建模——对采集数据进行滤波、拟合与数学建模,揭示误差的空间分布与时变规律;补偿策略制定——根据误差类型与加工要求确定补偿方式与执行路径;补偿

参数植入——将补偿量通过数控系统补偿接口写入对应控制参数；加工验证与优化——通过试切或在线检测验证补偿效果，依据反馈迭代优化补偿模型^[2]。

2.2 主流误差补偿技术分类及特性

(1) 几何误差补偿技术。主要包含螺距误差补偿、反向间隙补偿及垂直度补偿等静态补偿手段，针对机床装配完成后固有存在的几何偏差进行标定与修正。该技术成熟可靠，适用于常规精度加工场景，是机床出厂及定期维护的标准配置。(2) 热误差补偿技术。通过在机床关键热源部位（主轴轴承、导轨、丝杠螺母等）布置温度传感器阵列，实时采集温升数据，结合热传导与热变形理论建立误差温升映射模型，进而实时计算并补偿热致位移。该技术对长时间连续加工精度保持具有重要意义。(3) 工艺误差补偿技术。针对刀具磨损导致的尺寸漂移，采用刀具寿命管理与磨损量在线预估补偿策略；针对切削力引起的让刀变形，通过切削参数自适应调整或基于力信号的实时反馈补偿进行修正，有效抑制加工过程动态误差^[3]。(4) 智能误差补偿技术。深度融合机器学习、神经网络与大数据建模技术，构建多源误差耦合综合模型，实现误差的在线辨识、预测与自适应动态补偿，适用于复杂曲面加工、精密模具制造等高要求场景。

2.3 不同补偿技术的适用场景与优缺点

(1) 静态补偿技术。适用于精度要求适中、工况相对稳定的批量加工场景。优势在于操作流程标准化、补偿效果稳定可靠、实施成本较低；短板是无法应对热致漂移与切削力波动等动态误差，精度提升幅度存在固有上限。(2) 动态热误差补偿技术。适用于长时间连续切削、高精度轴承箱体及精密模具加工等场景。优势在于能够实时追踪并修正热致漂移，有效保障批量化加工精度一致性；短板在于热误差建模难度大、对传感器精度与布置方案要求较高，模型泛化能力受限。(3) 智能补偿技术。适用于多误差耦合显著、加工条件多变的高端精密制造场景。优势在于多误差协同处理能力强、自适应程度高、精度提升潜力大；短板在于算法开发周期长、软硬件投入成本高、系统集成与现场部署难度较大，目前尚未在普通加工环境中大规模普及。

3 数控加工误差补偿技术对零件加工精度的影响试验研究

3.1 试验方案设计

(1) 试验设备与试件。试验选用五轴联动立式加工中心作为试验平台，该设备具备螺距误差补偿与热误差补偿功能接口。试件采用45号钢阶梯轴与铝合金矩形薄

壁框两类典型零件，分别考察回转体与棱柱体类零件的精度响应特性。加工刀具选用硬质合金涂层立铣刀及金刚石车刀，工装采用精密自定心三爪卡盘及专用真空吸盘夹具，确保装夹定位一致性与重复性。(2) 试验变量设置。试验自变量为补偿技术类型及其核心参数，具体包括三类补偿状态：无补偿、单向几何补偿、几何+热误差+工艺误差多技术耦合补偿。补偿参数涵盖螺距补偿系数、反向间隙补偿值、热变形补偿增益及切削力自适应补偿阈值。因变量为零件加工精度三维指标：尺寸精度以直径偏差及孔距公差表征，形位精度以圆柱度、平面度及轮廓度表征，加工稳定性以批量尺寸极差及标准差表征。控制变量包括主轴转速、进给量、切削深度、冷却液流量及环境温度，试验过程中保持恒定^[4]。(3) 试验对照组设置。为保证数据客观性与结论可重复性，建立三组对照试验：A组为无补偿对照组，不施加任何误差补偿措施，用于获取机床原始加工精度基线；B组为单一补偿组，仅实施几何误差静态补偿，用以评估单项补偿技术的独立贡献；C组为多技术耦合补偿组，同时启用几何补偿、热误差实时补偿及切削力自适应补偿，用于验证多误差协同作用下的综合精度提升效果。每组试验重复三次，确保统计显著性。

3.2 试验过程与数据采集

(1) 预处理操作。试验前进行机床预热运行30分钟，使主轴及导轨达到热平衡状态。采用激光干涉仪对X、Y、Z三轴进行定位精度与重复定位精度检测，获取原始误差分布曲线。依据检测结果完成螺距误差补偿表与反向间隙补偿值的初始设置。同时采用标准球棒校准工件测头系统，确保对刀与测量基准统一。环境温度控制在 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度维持在45%~55%。(2) 加工试验实施。按照A、B、C三组试验计划，每组连续加工阶梯轴与薄壁框试件各10件，总计60件。每件加工过程中记录主轴轴承温度、环境温度及切削力信号，监测工况一致性。加工参数统一设定为：主轴转速8000r/min，进给量0.08mm/r，轴向切深0.5mm，径向切深3mm，采用乳化液外冷方式^[5]。(3) 精度数据采集。每件试件加工完成后，使用三坐标测量机对阶梯轴各阶梯直径、圆柱度及同轴度进行检测，采样点不少于30点/截面。薄壁框零件以非接触式激光扫描测头完成轮廓度及平面度测量。同时采用粗糙度仪检测各加工表面粗糙度，作为辅助评价指标。所有测量数据录入数据库，标定组别及加工顺序，留待统计分析。

3.3 试验结果分析

(1) 尺寸精度影响分析。A组无补偿条件下，阶梯轴

平均直径偏差为 $+12.6\mu\text{m}$ ，公差合格率仅为73.3%；B组单一几何补偿后，平均偏差缩小至 $+6.8\mu\text{m}$ ，合格率提升至86.7%；C组耦合补偿后，平均偏差降至 $+3.2\mu\text{m}$ ，合格率达96.7%。结果表明，几何补偿对系统偏差消除效果显著，而热误差与工艺补偿进一步抑制了尺寸漂移。（2）形位精度影响分析。A组圆柱度测量值分布在 $4.2\sim 7.8\mu\text{m}$ 区间，平面度最大偏差达 $12.3\mu\text{m}$ ；B组圆柱度集中改善至 $3.1\sim 4.5\mu\text{m}$ ，但轮廓度受热漂移影响仍波动较大；C组圆柱度稳定在 $1.8\sim 2.6\mu\text{m}$ ，薄壁框轮廓度偏差由A组的平均 $15.6\mu\text{m}$ 降低至 $5.2\mu\text{m}$ 。热误差补偿对形位精度的改善尤为突出。（3）批量加工稳定性分析。A组10件阶梯轴直径尺寸标准差为 $3.8\mu\text{m}$ ，极差达 $11.2\mu\text{m}$ ，批次一致性较差；B组标准差降至 $2.1\mu\text{m}$ ，但随加工顺序呈现逐渐正向漂移趋势，表明热误差未被有效抑制；C组标准差仅为 $0.9\mu\text{m}$ ，极差控制在 $2.8\mu\text{m}$ 以内，批次间无显著趋势性漂移，验证了多技术耦合补偿对加工一致性的实质性提升作用。

3.4 补偿技术应用优化策略

（1）场景化补偿方案优化。针对常规精度加工场景（公差等级IT8~IT10），单一项几何静态补偿即可满足要求，兼顾经济性。对于精密加工场景（IT6~IT7），推荐几何补偿与热误差补偿协同方案，有效抑制长时间加工中的精度漂移。针对超精密加工场景（IT5及以上），须实施几何—热—工艺多误差全耦合补偿方案，必要时辅以智能预测补偿模块。（2）补偿参数迭代优化。基于试验数据，采用正交试验与响应面法对螺距补偿倍率、热补偿滤波时间常数及切削力补偿系数进行优化。优化后参数组合使耦合补偿组的尺寸偏差较初始参数进一步

降低12.5%。建立补偿参数数据库，依据加工材料、刀具状态及环境条件动态调用最优参数组合。（3）多误差耦合补偿优化。针对复杂工况下单一补偿技术相互干扰的问题，构建基于误差主成分分析的优先级分配策略，明确各类补偿量的植入顺序与叠加权重，避免补偿过校正或相互抵消。同时引入在线检测反馈环节，实现补偿残差的二次修正，形成闭环耦合补偿架构，从根本上解决单一补偿技术的局限性问题。

结束语

本文明确了各类数控加工误差的影响机理，剖析了不同补偿技术的优劣与适用场景，通过对照试验验证多技术耦合补偿可大幅优化零件尺寸、形位精度与批量加工稳定性。结合加工精度等级，提出了场景化补偿方案与参数迭代优化策略，构建了闭环耦合补偿优化体系。研究成果有效解决了单一补偿技术的局限性，可为精密、超精密数控加工的精度提升与工艺优化提供实践支撑。

参考文献

- [1]赵建卫,李紫君.旋转耦合干扰下五轴数控机床非线性误差补偿[J].机械设计与制造,2025,23(3):167-172.
- [2]路忠响,肖元昭.基于GA优化BP神经网络的机床转台定位误差分析与补偿[J].机械管理开发,2024,39(10):81-85.
- [3]袁家斌,郭曦鹏.多轴联动超精密车削的对心误差补偿技术[J].中国机械工程,2024,35(18):2215-2222.
- [4]王鹏,刘勇.基于空间误差建模的数控机床几何误差全域补偿方法[J].机械科学与技术,2023,42(7):1082-1087.
- [5]朱旭,丁爽.精密数控机床基础部件热误差控制研究综述[J].制造技术与机床,2025,9(4):77-86.