

机械制造过程中的误差补偿技术研究与应用

方艳景 王川博 张宸瑞

洛阳科技职业学院 河南洛阳 471822

摘要：机械制造过程中不可避免地存在各种误差，严重影响产品质量与生产效率，误差补偿技术通过对误差进行测量、建模与控制，可有效提高机械制造精度，降低成本与资源消耗。但目前误差源识别、补偿方法适应性、实时系统集成等方面还面临挑战。本文分析了误差补偿技术在机械制造中的重要性，剖析了应用现状与难点，提出了创新应用策略：精准识别误差数据链、融合智能优化补偿模型、构建实时精微补偿系统，以期为推动机械制造过程中的误差补偿技术发展提供参考。

关键词：机械制造；误差补偿；智能优化；实时控制

引言

机械制造是现代工业的重要基础，其精度水平直接关系到下游产业的发展。然而受加工设备、工艺参数、环境因素等影响，机械制造过程不可避免地存在几何误差、力学变形、热变形等多种误差，极大制约了产品精度提升。为破解机械制造“精度瓶颈”，国内外学者积极开展误差补偿技术研究，力图通过对加工误差进行精准测量、智能建模与实时控制，实现制造全过程的动态误差补偿，从而显著提高产品精度，降低成本与资源消耗，新一代信息技术的发展，也为误差补偿技术创新应用带来新的机遇。

一、机械制造过程中误差补偿技术的重要性

（一）提高加工精度与产品质量的关键

机械制造过程中普遍存在的几何误差、力学变形、热变形等，直接影响产品的尺寸精度、形位精度与表面质量。以机床热误差为例，其占总加工误差的70%以上，是制约产品精度的关键因素。传统的被动防差措施，如结构优化、温度控制等，虽在一定程度上抑制了误差的产生，但难以从根本上消除误差。而误差补偿技术通过主动测量误差，构建精准的数学模型，实时修正数控系统，可有效克服被动防差的局限，大幅提高加工精度，有研究表明采用热误差补偿技术后，加工件尺寸精度可

提高3倍-5倍，表面粗糙度降低30%以上。可见误差补偿技术是攻克“精度壁垒”、保证产品质量的利器。对航空发动机、精密光学等高端装备制造行业而言，加工精度的“微米级”提升，对打破国外技术垄断、推动产业升级具有决定性意义，可以说谁掌握了先进的误差补偿技术，谁就把握了制造业的发展先机。

（二）降低制造成本与资源消耗的有效途径

机械制造过程中的误差，不仅影响产品精度，还会带来大量的返工、报废，造成人力物力的巨大浪费。以大型复杂零件加工为例，一旦发生尺寸超差，不仅前期投入付诸东流，返工过程还会消耗大量的材料、能源，产生环境污染。而误差补偿技术可通过实时修正数控系统，将加工参数控制在最优范围，最大限度减少废品，降低返工率，据统计应用误差补偿技术后，机械制造的一次合格率可提高20%以上，生产效率提升30%以上^[1]。同时借助实时补偿，可避免因保证精度而采取的“慢加工”策略，在提高加工效率的同时，减少能源消耗，实现绿色制造，此外误差补偿还可延长刀具、夹具等工装的使用寿命，降低损耗成本。可见误差补偿技术通过将加工过程引入最佳“轨道”，最大化生产效能，最小化资源浪费，是实现降本增效、清洁生产的有效途径。在当前制造业转型升级的关键期，加强误差补偿技术研发应用，对于化解成本压力、促进绿色发展具有重要价值。

（三）增强企业核心竞争力的战略手段

当今世界制造业竞争日益激烈，产品精度、生产效率、成本控制成为制胜的关键，而掌握核心的误差补偿技术，能够帮助企业在激烈的市场竞争中赢得先机。一

作者简介：方艳景（1995.03.01-），民族：汉族，学历：本科，职称：助教转评的助理实验师，单位：洛阳科技职业学院。

方面凭借先进的补偿技术,企业可以生产出高精度、高质量的产品,满足日益苛刻的用户需求,抢占高端市场。尤其在航空航天、精密仪器等高附加值领域,加工精度的细微差距,往往决定了产品能否达到使用要求,在市场竞争中立于不败之地;另一方面掌控关键补偿技术,有利于企业改进工艺流程,优化资源配置,在降低成本的同时提高生产效率,赢得成本与效率的“双重优势”^[2]。此外自主研发的误差补偿技术,还能够根据生产实际,灵活调整、持续优化,摆脱对国外高端装备与软件的依赖,增强企业的自主创新能力。可见加强误差补偿技术创新应用,是提升企业核心竞争力、赢得发展主动权的战略举措。在新一轮科技革命的浪潮下,抢占智能制造技术制高点,掌握高精尖误差补偿“武器”,已成为决胜未来的关键一招。

二、机械制造过程中误差补偿技术应用的现状与挑战

(一) 误差源识别与分析不够精准

机械制造过程中影响加工精度的因素错综复杂,包括几何误差、热变形、力学变形、刀具磨损等,但目前对各类误差源的识别与分析还不够精准,影响补偿效果。部分企业对加工误差的成因认识不清,常将几何误差、热变形等“混为一谈”,缺乏有针对性的补偿措施,还有企业虽意识到热误差的危害,但对热变形规律把握不够,测温点布置不当,热误差建模精度不高。同时多数补偿系统仅考虑单一误差源,忽视了几何误差、力热误差的耦合效应,静态补偿与动态补偿“各自为战”,综合补偿效果不佳。此外随着柔性化、个性化制造需求增加,加工对象、工艺参数变化频繁,给误差溯源带来更大挑战。可见当前机械制造领域对误差成因的认识还不够全面,误差数据采集不够精准,源头把控不够有力,制约了补偿技术的应用成效,亟须运用先进测试手段与数据分析方法,提高误差溯源精准度,为高效补偿奠定基础。

(二) 补偿方法与工艺适应性不足

误差补偿的核心是构建精准高效的数学模型,将各类误差映射为机床坐标系中刀具位姿的偏差,并转化为数控系统的补偿量。但目前主流的补偿方法在适应性、鲁棒性等方面还存在不足。如多项式回归等经验模型虽然简单易用,但只适用于特定工况,外推性能差,难以满足现代制造“多品种、小批量”的要求。而有限元分析等物理模型虽然精度高,但计算量大,实时性差,且往往依赖商业软件,应用成本高^[3]。近年来人工智能技

术在误差建模中崭露头角,但多局限于算法本身,与制造工艺结合不紧密,导致补偿模型“水土不服”。此外现有补偿方法大多假设工件、刀具是刚性体,忽略了材料去除引起的动态变形,静态补偿为主,动态响应能力不足,加之机床、刀具、工件系统的多源振动,给实时补偿带来干扰,鲁棒性不强。可见当前补偿方法对加工工艺的适应性不足,快速响应与抗干扰能力有待加强,提升补偿精度和效率任重道远。

(三) 实时补偿系统集成度有待提高

将误差模型应用于实际加工,还需借助软硬件平台实现与数控系统的无缝集成,然而目前补偿系统的集成化、智能化水平还不高,影响了实时补偿效果。硬件方面,当前的数据采集仍以间歇式、触式测量为主,传感器布置不够优化,实时性、柔性化不足。对于复杂产品加工引入的状态窜扰,缺乏自适应动态测量手段。软件方面,多数数控系统为封闭式架构,缺乏二次开发接口,与上位机通信不畅,而误差补偿软件与数控系统“两张皮”,实现补偿需修改加工程序,实时性差,且补偿软件算法更新慢,难以适应智能制造需求。此外从毫米级误差测量到亚微米级补偿控制,跨越多个数量级,对系统协同性、稳定性提出极高要求,而目前各模块“烟囱式”割裂,缺乏统一的标准规范,数据流、控制流衔接不紧密,系统集成度不高。可见实现高效、稳定、智能的实时补偿,还需在硬件集成、软件升级、系统协同等方面持续用力,构筑“数据流-信息流-控制流”一体化的实时补偿新架构。

三、机械制造过程中误差补偿技术的创新应用策略

(一) 测源溯本精准,数据链完整

实现高效补偿的第一步,是全面精准地识别误差来源。要充分利用多源异构传感器,构建完整的数据采集链。几何误差方面,在机床关键结构布置高精度位移传感器,实时采集运动误差数据,要重点监测机床进给轴的定位精度、重复定位精度,以及垂直度、平行度等关键几何参数。同时优化传感器布局,在满足测量不确定度的同时,最小化测量盲区,可引入在线测量技术,扫描工件加工表面,快速诊断几何缺陷。如采用在机测头,可实时测量工件加工表面的轮廓度、圆度等形状误差,及时发现刀具偏心、磨损等因素引入的系统误差。热误差方面,合理规划测温点,实时采集温度场与热变形数据,形成闭环控制,通过有限元仿真分析,识别机床热敏感区域,在关键部位合理布置高灵敏度热电偶阵列,

评估主轴、导轨等部位的温升变形规律^[4]。并嵌入红外热成像等新型传感器,掌握热变形全貌,红外热成像可无接触、宏观地反映温度场分布,与点测温形成互补,为热误差映射模型的构建提供丰富数据支撑。热成像测试结果可用于指导测温点的优化布局,为闭环控制提供依据。建立统一的数据平台,融合加工参数、环境参数等,实现制造全流程、全要素的精准溯源,开发智能数据采集终端,自动对接数控系统、刀库管理系统等,获取实时加工参数。同步记录车间环境温湿度、振动水平等,评估外界因素对加工精度的影响,并嵌入智能算法,挖掘各类因素对加工误差的影响规律,揭示误差的内在机理,为建模补偿提供数据支撑。利用相关性分析、主成分分析等方法,定量评估各误差源的敏感度,优化补偿模型的输入参数。通过智能数据挖掘,加深对误差形成机制的理解,为构建高精度补偿模型奠定基础。

(二) 算法融智能, 模型优化深

补偿的核心是构建精准高效的误差模型。要立足机理分析,数据驱动,充分利用机器学习等智能优化技术,提升建模的精准性和自适应性。针对动静态复杂误差耦合,建立多误差源综合补偿模型。综合考虑机床热特性、弹性变形、动力学特性,建立误差的物理响应机制。采用热—结构多物理场耦合仿真,探究温度场与热变形的内在关联;通过模态叠加法,描述机床动态特性对加工精度的影响机理。在此基础上,构建热误差、力学误差、运动误差等多源耦合的机理模型。在机理模型基础上,引入机器学习方法,利用监测大数据训练模型,提高补偿精度。采用支持向量机、高斯过程回归等经典机器学习算法,挖掘复杂的非线性误差规律,克服机理建模的局限性。综合运用长短时记忆网络、卷积神经网络等深度学习模型,充分挖掘时间序列、图像等多模态数据中蕴含的误差演化规律,动态描述误差随时间、位置的变化趋势,显著提高补偿精度。引入深度学习,挖掘误差数据内在规律,不断修正补偿模型,开发端到端深度学习补偿系统,通过海量加工大数据训练,使模型参数自适应收敛,最小化建模误差。针对工件材料、刀具等变化,建立自适应补偿模型,嵌入增量学习,使补偿模型根据加工状态实时调整,提高动态适应性^[5]。

(三) 控制精微妙, 实时补偿准

实现闭环、柔顺、智能的实时补偿控制,需构建面

向智能制造的开放式补偿控制系统。硬件方面,发展一体化、小型化、低成本的智能传感器,实现多参数、宽量程的实时测量,如引入微纳传感器,实现纳米级位移测量;发展无线传感网络,提高布点灵活性,在数控系统中预留补偿接口,以开放式架构支持硬件即插即用,实现传感器的自动组网与异构数据融合。软件方面,开发嵌入式补偿软件平台,预置主流误差模型与智能算法,针对不同机型,可灵活配置补偿模型,自动生成补偿控制代码,实现一键式部署,建立标准化接口,实现与数控系统的无缝集成,将补偿量直接叠加至伺服控制指令,最小化通信延迟。同时发展上位机监控系统,自动适应铣、磨、加等工艺,实现对补偿过程的实时监测,一旦发现补偿失效,系统将智能诊断原因,动态调整控制策略。引入区块链技术,以分布式架构实现生产制造协同,多系统互联互通,以数字孪生技术为桥梁,实现误差测量、建模、控制全流程仿真优化,使实时补偿更加精准高效。通过硬件集成创新、软件平台研发、控制系统优化,构建一体化智能补偿控制系统,为机械制造赋能。

结语

机械制造是国民经济的基石,其精度水平关系着制造强国的进程。而误差补偿技术在攻克“卡脖子”难题、突破“精度壁垒”中扮演着关键角色。在新一代信息技术浪潮下,机械制造正向高精、智能、绿色方向转型。对标世界一流,加快突破误差溯源、建模、控制等关键技术,已成为产业升级的紧迫任务。新时期,要准确把握智能制造发展机遇,前瞻布局误差补偿技术创新。在测量端,构建精准溯源的误差数据链;在建模端,打造自适应智能的补偿算法库;在控制端,塑造一体化开放的实时补偿系统,形成“端—边—云”协同的技术生态。

参考文献

- [1] 张雪洋. 机电一体化数控技术在机械加工与制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(01): 93-95.
- [2] 孙永志. 采矿机械制造过程中的智能检测与质量控制技术研究[J]. 冶金与材料, 2025, 45(01): 41-43.
- [3] 郭万喜, 米文晓. 仿真技术在机械设计与制造中的应用研究[J]. 工程建设(维泽科技), 2023, 6(08): 80-82. DOI: 10.33142/ec.v6i8.9122.