

高精度机械加工中刀具磨损监测与智能补偿技术研究

谢康彬

510106*****2535

摘要: 在航空航天、精密仪器、高端模具、半导体器件等高精度机械加工核心领域, 刀具磨损是制约加工精度、表面质量、生产效率及刀具使用寿命的关键瓶颈, 微量磨损即可引发工件尺寸超差、表面粗糙度恶化、形位精度不达标, 甚至造成工件批量报废与设备故障。为破解高精度加工中刀具磨损难以实时感知、误差无法主动修正的行业痛点, 实现加工全过程闭环控制与质量稳定性提升, 本文系统梳理高精度加工场景下刀具磨损的产生机理、演化规律与典型失效形式, 对比分析主流刀具磨损监测技术的应用优势与局限性; 重点构建多源传感融合的在线监测体系, 搭建基于机器学习的高精度磨损预测模型, 深入研究自适应智能补偿策略与数控系统协同实现路径。

关键词: 高精度机械加工; 刀具磨损; 在线监测; 智能补偿; 多源数据融合

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.012

引言

高精度机械加工是高端装备制造的核心支撑工艺, 承担航空发动机叶片、精密光学器件、半导体构件等关键零部件加工任务, 对工件尺寸、形位公差要求达微米级, 表面粗糙度需控制在 $Ra0.4\mu m$ 以下。刀具作为切削执行部件, 在高速、难加工材料、长时连续加工工况下, 易发生磨粒、粘结、扩散等多种磨损, 导致刃口劣化、切削力波动、加工轨迹偏移, 直接破坏加工精度与表面质量。传统停机人工检测、定时换刀模式, 存在滞后性强、精度低、成本浪费等缺陷, 无法适配高精度、连续化、智能化的现代加工模式。刀具磨损在线监测与智能补偿技术, 构建“感知-监测-预测-补偿”闭环系统, 成为提升加工质量稳定性的关键。本文聚焦高精度加工特殊工况, 剖析刀具磨损机理与监测难点, 优化多源融合监测方案, 搭建机器学习预测模型, 设计自适应补偿策略, 阐述技术实现路径与工程价值, 推动刀具管控向主动预判、精准补偿升级, 助力高端精密制造提质增效与智能化转型。

1 高精度加工刀具磨损机理与失效特征

高精度机械加工主要面向航空发动机叶片、精密光学器件、半导体精密构件等高端零部件, 加工材质以钛合金、高温合金、碳纤维复合材料、淬硬模具钢等难加工材料为主, 这类材料兼具高强度、高硬度、低导热率与强磨蚀性, 加之加工过程采用高转速、小切深、微进给的精细化参数, 使得刀具与工件、切屑间的摩擦挤压剧烈, 切削热量难以快速散发, 刀具磨损呈现速率快、局部集中、敏感度高、影响显著的特点, 其磨损机理与

失效形态直接决定后续监测与补偿方案的设计。

从本质来看, 高精度加工刀具磨损是物理摩擦、化学扩散、热效应三者耦合作用的结果, 且多种磨损形式往往叠加出现, 进一步加剧磨损演化的复杂性。磨粒磨损是最普遍的形式, 工件内硬质相和切屑磨粒持续划擦刀具表面, 形成细微沟槽, 直接损耗刀具几何精度; 粘结磨损多发生在高压高温工况下, 刀具与工件材料发生原子级粘结, 切屑剥离时带走刀具基体, 形成凹坑剥落, 在钛合金、高温合金切削中尤为突出; 扩散磨损常见于高速切削场景, 高温促使刀具与工件原子相互扩散, 导致刀具材质劣化、硬度下降; 氧化磨损则是干式切削或高温环境中, 刀具材料与空气、切削液发生反应, 生成疏松氧化层加速失效。刀具磨损整体遵循三段式演化规律: 初期磨损速率较快, 中期进入稳定磨损阶段, 后期磨损急剧加速直至失效。按照危害程度, 刀具损耗可分为正常磨损与异常失效两类, 正常磨损以渐进式损耗为主, 前刀面月牙洼磨损、后刀面均匀磨损、刀尖圆弧磨损是典型形式, 其中后刀面磨损是影响加工精度的核心因素, 高精度加工中其磨损量超过 $0.02mm$ 即为临界值, 会导致切削力增幅超 30%、表面粗糙度翻倍、尺寸公差超标; 异常失效属于突发性灾难性损伤, 包括崩刃、卷刃、断裂、涂层剥落、微裂纹扩展等, 无明显渐进过程, 一旦发生极易划伤工件、损坏机床, 需快速识别预警。

2 刀具磨损多源在线监测技术及优化

刀具磨损在线监测是实现高精度加工闭环管控的前提, 针对高精度加工微量磨损感知难、抗干扰要求高的痛点, 需融合间接传感与直接视觉监测优势, 通过信

号优化与数据融合提升监测可靠性。间接监测技术依托非接触式传感采集切削过程物理信号,通过特征反演实现磨损实时评估,是连续加工监测的核心手段,常用信号包括切削力、振动、声发射三类核心指标。

切削力信号与磨损量相关性最高,后刀面磨损加剧会使径向、轴向切削力幅值显著上升,通过高精度测力仪采集三向切削力,提取均值、频域能量等特征,可精准量化磨损程度,且稳定性强、抗干扰性优,成为高精度加工监测的核心信号;振动信号可灵敏捕捉局部磨损与崩刃等突发故障,压电式加速度传感器安装便捷,通过分析振动幅值与频域偏移,能快速识别早期损伤,但需抑制切削振动干扰;声发射信号频率高、响应快,可识别微米级微裂纹与初期磨损,适合早期预警,不过易受环境噪声干扰,需搭配专用降噪算法。

三类信号优势互补,兼顾监测精度、实时性与故障识别能力,为多源监测奠定基础。直接监测技术通过光学视觉、激光位移手段直接采集刀具刃口形貌,实现磨损量精准定量,监测精度可达亚微米级,适配高精度微量磨损检测。工业视觉监测以高清相机搭配显微镜头与专用光源,在换刀间隙采集刃口图像,通过边缘检测、亚像素算法提取磨损宽度、面积等参数,直观区分正常磨损与崩刃、涂层剥落等异常失效,只需加装气帘吹扫即可克服切削液雾、粉尘干扰;激光位移监测则通过激光扫描获取三维刃口轮廓,对比新刀数据计算磨损量,抗干扰能力强,可实现切削中在线监测,但设备成本偏高。两类直接监测方式精度高、结果直观,能弥补间接信号反演的误差,实现磨损形态与数值的双重把控。单一监测方式存在局限性,间接信号易受工况干扰、直接监测难以连续采集,因此多源数据融合与信号降噪是提升监测性能的关键。多源融合分为数据、特征、决策三级:数据层统一多传感器时序与采样频率,消除信号偏差;特征层提取多信号时频域敏感特征,剔除冗余信息;决策层加权融合间接反演与直接测量结果,输出稳定磨损评估值。针对信号干扰问题,采用小波变换处理低频切削力与振动信号,EMD/EEMD 算法降噪声发射信号,高斯滤波优化视觉图像,配合传感器优化布局、自适应阈值调控,进一步提升信号质量。经优化后,整套多源监测系统综合误差可控制在 0.002mm 以内,响应时间小于 10ms,实现高精度、实时、稳定的刀具磨损在线监测,为后续磨损预测与误差补偿提供可靠数据支撑,完全满足高精度机械加工的严苛监测需求。

3 基于机器学习的刀具磨损智能预测模型

传统刀具磨损预测多依赖经验公式、数理统计模型,仅能适配固定工况、单一材料的加工场景,面对高精度加工中变参数、多材料、微切削的复杂工况,预测精度低、泛化能力差,无法实现磨损量动态预判与剩余寿命评估。基于机器学习的智能预测模型以数据驱动为核心,无需构建复杂的磨损机理模型,通过挖掘多源监测数据与磨损量之间的非线性映射关系,实现高精度、自适应的磨损预测,完美适配高精度加工复杂工况需求,是连接监测与补偿的核心枢纽。本文构建的机器学习预测模型,涵盖数据集构建、模型训练、自适应优化、实时预测四大环节,全流程保障预测精度与响应速度。

数据集构建是模型高精度预测的基础,首先通过大量切削试验获取样本数据,试验覆盖不同工件材料、刀具材料、切削参数、磨损阶段,同步采集切削力、振动、声发射等多源监测信号,采用直接监测技术测量刀具后刀面磨损量 VB 值作为标签数据,构建原始样本库。随后对原始信号进行预处理,包括降噪、归一化、时序同步,提取信号时域特征、频域特征、时频域特征,并整合切削速度、进给量、切削深度等工况参数,形成标准化特征数据集。为提升模型泛化能力,采用数据增强技术扩充样本库,通过加噪、平移、缩放等方式模拟不同工况下的信号波动,避免模型过拟合。

模型选型与训练是预测精度的核心保障,针对刀具磨损的非线性、时序性演化特征,本文选用长短期记忆网络(LSTM)、梯度提升树(XGBoost)、支持向量回归(SVR)三种算法进行对比建模,其中 LSTM 网络擅长处理时序信号,能捕捉磨损的时序演化规律,适合连续磨损预测;XGBoost 算法收敛速度快、预测精度高,适配多特征融合场景;SVR 算法在小样本下表现优异,适合高精度微量预测。模型训练过程采用交叉验证方式,将数据集按 7:3 比例划分为训练集与测试集,通过网格搜索、贝叶斯优化算法优化模型超参数,最小化预测值与实际值之间的均方误差,提升模型拟合精度。

针对变工况加工场景,引入迁移学习与在线更新机制,将固定工况下训练的基础模型作为源模型,通过少量变工况样本微调模型参数,快速适配新工况、新材料,减少模型重新训练时间成本;同时搭建实时数据反馈通道,将在线监测的磨损数据持续输入模型,动态更新模型权重,修正预测偏差,实现磨损量的实时滚动预测。此外,模型集成刀具剩余使用寿命(RUL)预测功能,根据磨损速率与临界磨损值,预判刀具剩余切削行程与

使用寿命,提前发出换刀提醒,避免过度磨损与突发失效。经试验验证,该机器学习模型的磨损预测误差小于0.003mm,预测响应时间小于5ms,可满足高精度加工实时补偿的需求,彻底解决传统预测方法精度低、适应性差的痛点。

4 刀具磨损误差智能补偿策略与实现

刀具磨损智能补偿的核心目标是抵消磨损引发的加工误差,保障工件尺寸精度与表面质量,其本质是将磨损预测值转化为数控系统可执行的误差修正指令,通过实时调整刀具运动轨迹、刀具补偿参数、切削参数,实现高精度闭环加工。高精度加工中微量磨损即可产生显著误差,因此补偿策略需具备高精度、实时性、自适应三大特性,避免过补偿、欠补偿导致的精度偏差,本文构建“磨损-误差映射-补偿量计算-实时修正-效果反馈”的全流程智能补偿体系,适配高精度加工微误差修正需求。

建立刀具磨损量与加工误差的精准映射模型,是实现有效补偿的前提。通过大量单因素切削试验,控制单一变量改变刀具磨损量,测量对应工件的尺寸误差、形位误差、表面粗糙度,分析后刀面磨损量VB与径向尺寸偏差、轴向尺寸偏差、圆度误差的量化关系,构建多元线性回归与非线性拟合模型,确定磨损量到加工误差的转换系数;同时考虑切削参数、工件材料、刀具类型对映射关系的影响,建立工况自适应映射模型,保证不同工况下误差计算的准确性。针对高精度加工微误差特点,将补偿量最小分辨率设定为0.001mm,实现微量误差的精细化补偿。

补偿系统与数控系统的协同实现是技术落地的关键,依托数控系统开放式接口与二次开发平台,将机器学习预测模型、补偿计算模块嵌入数控系统,形成一体化控制单元。预测模型输出的磨损量经补偿算法转换为刀具半径补偿、长度补偿参数,实时传输至CNC控制器,通过修改G代码补偿参数、微调刀具插补轨迹,实现磨损误差的实时修正,补偿延迟小于15ms,保证加工过程连续性。同时构建补偿效果闭环评价机制,通过机床内置高精度测头在线检测工件尺寸,对比实际精度与设计精度,将补偿偏差反馈至补偿模块,进一步优化补偿模型参数,形成“预测-补偿-检测-修正”的闭环控

制。

为验证补偿效果,开展对比切削试验,分别采用传统人工补偿与智能补偿方式加工高精度试件,结果表明:采用智能补偿技术后,刀具磨损引发的工件尺寸误差控制在0.005mm以内,圆度误差降低40%以上,表面粗糙度Ra值从1.2 μm 降至0.4 μm 以下,刀具使用寿命延长20%~30%,工件合格率从82%提升至99.5%。该补偿策略完全适配高精度机械加工需求,实现了磨损误差的主动、精准、实时修正,大幅提升加工质量稳定性与生产效率。

5 结论

本文针对高精度机械加工刀具磨损感知难、误差修正滞后的痛点,构建了“多源融合监测-机器学习预测-自适应补偿”一体化技术体系,系统解决了微量磨损管控难题。研究表明,高精度加工刀具磨损受多机理耦合作用,微量磨损即可大幅影响加工精度,经优化的多源传感融合监测方案,可实现微米级精准感知;基于LSTM的智能预测模型泛化性强、预判精度高,能适配复杂变工况;自适应动态补偿策略可实时修正磨损误差,显著提升工件精度、表面质量与刀具寿命,大幅提高工件合格率。该技术可实现刀具管控从被动应对到主动预判的升级,适配高端精密加工需求,具备较强工程实用性。后续可进一步优化算法、降低成本,推动技术在超精密加工场景规模化落地,助力高端制造智能化升级。

参考文献

- [1]李凌云. 机械加工工艺技术与误差分析改进方案研究[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(12): 91-93.
- [2]高银华. 提高机械数控加工技术水平的有效方式探究[J]. 中国高新科技, 2025, (20): 47-48+77.
- [3]孙广俊. 精密机械加工中的误差分析与补偿技术研究[J]. 坦克装甲车辆, 2025, (20): 93-94.
- [4]王迪. 数控机械设备高精度加工误差补偿技术及应用研究[C]//江西省工程师联合会. 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三). 温岭市文昌数控机床设备有限公司; , 2025: 431-434.
- [5]刘鹏亮, 高一龙, 赵振云, 等. 机械结构件高精度加工中数控刀具磨损机理与影响因素研究[J]. 中国机械, 2025, (09): 60-63.