

# 机械加工在线测量技术综述

王 翠

丹佛斯(天津)有限公司 天津制冷空调压缩机技术重点实验室 天津 300400

**摘要:** 机械加工在线测量技术是实现智能制造与精密加工的关键支撑。本文系统梳理了接触式、非接触式及复合测量技术的原理与特点,分析了传感器、数据处理、误差补偿等核心技术,并探讨了在车削、磨削、铣削及特种加工中的具体应用。在线测量技术通过实时反馈与闭环控制,显著提升了加工精度、效率与稳定性,为制造业数字化转型升级提供了重要技术保障。

**关键词:** 在线测量; 传感器; 误差补偿; 闭环控制; 智能制造

引言: 制造业向智能化、精密化迈进,机械加工精度要求日益严苛。传统离线测量方式需停机检测,效率低且难及时反馈误差,无法满足现代加工需求。在线测量技术应运而生,它能在加工过程中实时获取工件尺寸、形位误差等数据,并据此动态调整加工参数,实现误差补偿,提升加工质量与效率。深入研究机械加工在线测量技术,对推动制造业升级、增强企业竞争力具有关键作用。

## 1 在线测量技术分类与原理

### 1.1 接触式测量技术

接触式测量技术通过传感器与工件表面直接接触获取尺寸信息,其核心在于机械或电子信号的转换与传输。机械式传感器以摩擦轮法和卡规法为代表。摩擦轮法通过旋转的摩擦轮与工件表面接触,利用摩擦力传递位移信号,其结构简单,但受工件表面粗糙度或切削液影响易出现打滑现象,导致测量误差在0.01至0.05毫米范围内波动。卡规法则采用标准件与被测工件直接比对的方式,通过测量两者间隙判断尺寸是否合格,尤其适用于高精度轴类零件的加工检测,例如航空发动机转子轴的直径测量,其重复性误差可控制在0.002毫米以内。电子式传感器以电感和电容传感器为主,通过电磁场变化检测位移<sup>[1]</sup>。电感传感器利用线圈电感量随金属工件距离变化的原理,实现亚微米级精度测量,例如在精密模具加工中,其分辨率可达0.1微米,但需避免强磁场干扰。电容传感器则通过极板间电容值变化检测非金属工件尺寸,适用于半导体晶圆厚度测量,但其结构复杂,对安装精度要求较高,通常需在恒温环境下使用以减少热变形影响。

### 1.2 非接触式测量技术

非接触式测量技术通过光、声、电等信号与工件相互作用获取数据,避免了接触式测量的磨损问题。光学式传感器中,光规法利用平行光束遮挡原理检测工件直

径,其精度可达微米级,例如在汽车连杆加工中,光规法可实现每分钟300次的动态测量,但受环境光照强度影响较大,需在遮光罩内使用。CCD或CMOS成像法则通过图像处理技术提取工件边缘特征,实现全场尺寸测量,例如在印刷电路板孔径检测中,其单次测量范围可达200毫米×200毫米,且测量速度较传统方法提升5倍。超声波传感器通过发射声波并计算反射时间差测距,其优势在于抗切削液和油污干扰,例如在深孔加工中,超声波传感器可穿透10毫米厚的切削液层完成测量,但声速受温度影响显著,需通过温度补偿算法将误差控制在0.02毫米以内。激光测量技术中,三角法利用激光点、接收器与目标点构成的三角形关系计算位移,适用于曲面轮廓测量,例如在涡轮叶片加工中,其扫描速度可达每秒5000点,点间距精度优于0.01毫米。干涉法则通过光波干涉条纹计数实现纳米级精度,例如在光学镜片加工中,其测量分辨率可达0.001微米,但需严格控制环境振动和温度波动,通常要求振动小于0.001g、温度波动小于0.1摄氏度。

### 1.3 复合测量技术

复合测量技术通过融合多种测量原理与数据源,有效提升了测量系统的综合性能与适应性。接触式与非接触式技术的融合是典型应用之一,例如在轴类零件加工中,先采用光学传感器快速扫描获取工件直径的大致范围,再通过高精度接触式电感传感器对关键尺寸进行精确复检,这种组合方式兼顾了测量效率与精度要求。多传感器数据融合技术进一步扩展了应用维度,通过同步采集温度、振动、尺寸等多维度数据,构建综合误差补偿模型。例如在五轴加工中心中,系统实时监测主轴温度变化、振动频率波动以及工件关键尺寸的实时数值,当检测到温度升高2摄氏度导致工件尺寸膨胀0.005毫米时,系统自动调整加工参数进行动态补偿,实现了多因素协同

控制与精度的持续稳定。此外,复合测量技术还可结合机器学习算法,对长期积累的历史测量数据进行深度挖掘与分析,建立测量参数与加工质量之间的映射关系,从而不断优化测量策略与参数设置。这种智能化的学习机制显著提升了系统的自适应能力与长期运行的稳定性,为复杂工况下的精密加工提供了可靠保障。

## 2 在线测量系统关键技术

### 2.1 传感器技术

在线测量系统的核心依赖于传感器对工件尺寸、形位误差等参数的精准捕捉。传感器需满足高精度、高分辨率、强抗干扰能力及快速响应的核心要求。高精度确保测量结果与设计值高度吻合,例如在航空航天零件加工中,传感器精度需达到微米级甚至纳米级,以保障零件装配的严苛要求<sup>[2]</sup>。高分辨率则能捕捉微小尺寸变化,避免因分辨率不足导致的测量盲区。抗干扰能力要求传感器在切削液飞溅、电磁干扰等复杂工况下仍能稳定工作,例如采用屏蔽设计或特殊材料封装提升抗干扰性。快速响应特性使传感器能实时反馈加工过程中的动态变化,例如在高速铣削中,传感器需在毫秒级时间内完成数据采集,避免因延迟导致误差累积。当前传感器技术正朝着微型化、智能化及多参数集成方向发展。微型化传感器体积小、安装灵活,可嵌入机床内部或刀具中,实现近距离测量;智能化传感器具备自适应校准功能,能根据环境变化自动调整测量参数,例如温度漂移补偿;多参数集成传感器可同时测量尺寸、温度、振动等多维度数据,为综合误差分析提供全面支撑。

### 2.2 数据传输与处理

在线测量系统需实现数据从传感器到控制系统的实时传输与高效处理。实时性保障依赖高速通信网络与边缘计算技术。5G或工业以太网提供低延迟、高带宽的数据传输通道,确保测量数据在毫秒级时间内送达控制系统。边缘计算将数据处理能力下沉至机床端,减少数据传输延迟,例如在加工现场部署边缘计算节点,可实时完成滤波降噪、特征提取等初步处理,仅将关键数据上传至云端,减轻网络负担。数据处理算法是提升测量精度的关键。滤波降噪算法可消除传感器数据中的随机噪声,例如采用卡尔曼滤波或小波变换算法,将信号噪声降低至原有水平的十分之一以下。特征提取算法能从原始数据中识别关键尺寸特征,例如通过图像处理算法提取工件轮廓边缘,为后续误差分析提供基础。误差补偿模型则基于历史数据与实时测量结果,构建加工误差预测与补偿机制,例如通过神经网络模型预测刀具磨损对尺寸的影响,并动态调整加工参数以抵消误差。

### 2.3 误差补偿与闭环控制

误差补偿与闭环控制是在线测量系统实现高精度加工的核心环节。误差来源主要包括机床热变形、振动及刀具磨损。机床热变形因加工过程中产生的热量导致结构变形,例如在连续加工2小时后,机床主轴可能因热膨胀产生5微米以上的位移误差。振动则由切削力波动或机床动态特性引发,导致工件表面出现波纹度误差。刀具磨损会改变切削刃几何形状,例如铣刀每加工1000米后,刀具半径可能减小0.02毫米,直接影响尺寸精度。补偿策略分为实时反馈调整与预测性补偿。实时反馈调整通过在线测量系统实时监测误差,并动态优化加工参数,例如根据尺寸偏差调整进给速度或主轴转速,将误差控制在1微米以内<sup>[3]</sup>。预测性补偿则基于机器学习模型,提前预测误差发展趋势并提前干预,例如通过分析历史加工数据,建立刀具磨损与尺寸误差的关联模型,在刀具磨损达到临界值前更换刀具,避免误差超差。

### 2.4 工业互联网平台集成

工业互联网平台集成是在线测量系统实现数据驱动决策的关键支撑。数据全生命周期管理通过与MES(制造执行系统)、PLM(产品生命周期管理)系统对接,实现从设计、加工到检测的数据贯通。例如,设计数据可直接下发至测量系统,作为测量基准;加工数据可反馈至PLM系统,优化工艺路线。远程监控与诊断依托云平台与移动端可视化技术,实现设备状态实时监控与故障预警。例如,通过云平台可远程查看机床运行参数、测量数据及误差趋势,当检测到异常时,系统自动推送报警信息至管理人员手机,并生成维修建议,缩短故障响应时间。

## 3 在线测量技术应用场景

### 3.1 车削加工

车削加工中,在线测量技术主要聚焦于关键尺寸与形位误差的实时把控。针对轴类零件,系统通过接触式或非接触式传感器持续监测直径变化,例如在加工长度500毫米的轴时,每秒可完成10次直径数据采集,确保尺寸波动控制在0.005毫米以内。圆度与圆柱度检测则通过多传感器协同实现,例如在主轴旋转过程中,同步采集多个截面的轮廓数据,经算法处理后生成三维形貌图,精准识别椭圆度或锥度误差。切削力与尺寸的耦合误差补偿是车削加工的核心需求。切削过程中,切削力变化会导致工件变形或机床振动,进而引发尺寸偏差。在线测量系统通过力传感器与位移传感器的数据融合,建立切削力-尺寸误差模型。例如,当切削力从100牛增至150牛时,系统预测直径将扩大0.003毫米,并自动调整进给速度或

主轴转速,将误差抵消至0.001毫米以内,显著提升加工稳定性。

### 3.2 磨削加工

磨削加工对表面质量要求极高,在线测量技术需实现表面粗糙度的闭环控制。通过激光位移传感器或光学干涉仪,系统可实时监测工件表面微观起伏,例如在平面磨削中,每秒采集50个测量点的粗糙度数据,动态调整砂轮进给量或修整参数<sup>[4]</sup>。当检测到粗糙度值超过设定阈值0.8微米时,系统立即触发砂轮修整程序,确保表面质量始终达标。砂轮磨损自动补偿是磨削加工的另一关键应用。砂轮在长时间使用后,粒度变钝或形状改变会导致加工尺寸偏移。在线测量系统通过测量工件尺寸变化反推砂轮磨损量,例如每加工100件工件后,系统检测到直径缩小0.01毫米,即判定砂轮需补偿0.005毫米修整量,并通过数控系统自动执行修整操作,避免因砂轮磨损引发的批量超差。

### 3.3 铣削加工

铣削加工中,平面度与垂直度检测是保障零件装配精度的核心环节。在线测量系统通过激光扫描或接触式探针,快速获取工件表面三维数据。例如在加工200毫米×200毫米的平面时,系统可在30秒内完成全表面扫描,生成平面度误差热力图,标识出0.01毫米以上的偏差区域,并指导机床进行局部补铣。五轴加工的空间误差补偿则需解决多轴联动下的复杂形位误差问题。系统通过多传感器同步采集各轴位置、角度及工件尺寸数据,构建五轴空间误差模型。例如在加工复杂曲面时,模型可预测因机床几何误差或刀具姿态偏差导致的0.02毫米级形位误差,并通过调整刀具路径或旋转轴角度,将误差缩小至0.005毫米以内,满足航空航天零件的严苛要求。

### 3.4 特种加工

电火花加工(EDM)中,放电间隙控制直接影响加

工效率与表面质量。在线测量系统通过监测放电脉冲频率与工件位移,动态调整放电间隙。例如在加工硬质合金模具时,系统将间隙稳定在0.02毫米,当检测到间隙因电极磨损扩大至0.025毫米时,自动减小伺服进给量,避免放电不稳定导致的表面烧伤<sup>[5]</sup>。增材制造(3D打印)的层间精度监测是确保零件致密度与尺寸精度的关键。系统通过激光轮廓仪或视觉传感器,逐层检测打印层厚度与轮廓偏差。例如在打印金属零件时,每层厚度控制在0.05毫米,当检测到某层厚度偏差超过0.003毫米时,系统立即调整激光功率或扫描速度,修正后续层打印参数,避免层间结合不良或尺寸累积误差,保障零件最终精度达到设计要求。

### 结束语

机械加工在线测量技术凭借实时、精准的测量优势,在提升加工精度、效率及质量稳定性方面成效显著。从分类原理到关键技术,再到多领域应用场景,均展现出强大适应性与发展潜力。随着传感器、数据处理、工业互联网等技术的持续进步,在线测量技术将更智能、更高效,为制造业智能化转型提供有力支撑,推动行业向更高精度、更高质量方向迈进,创造更大价值。

### 参考文献

- [1]马桂兰.数控机械加工中在机测量技术分析[J].现代制造技术与装备,2024,60(1):200-202.
- [2]杨剑博.在机测量技术在数控机械加工中的应用分析[J].中国设备工程,2024(19):240-242.
- [3]刘艳红.探究数控机械加工中的在机测量技术应用[J].当代农机,2024(11):50-52.
- [4]洪斯.数控机械加工中的在机测量技术应用[J].上海轻工业,2023(6):147-149.
- [5]王娟.数控机械加工中在机测量技术的应用研究[J].造纸装备及材料,2023,52(4):97-99.