

Analysis of Influencing Factors of Roundness Error Measurement and Research on Precision Compensation Scheme

Zhizhong Dong

Kunming Metallurgical College, Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

Roundness error, a fundamental geometric tolerance, critically impacts the assembly accuracy and service life of rotary components. This study systematically investigates three key influencing factors—instrument precision, environmental interference, and workpiece condition—with the core objective of enhancing roundness measurement accuracy. Through developing technologies including instrument error calibration compensation, adaptive environmental interference compensation, and workpiece installation error correction, we establish a comprehensive multi-source error compensation scheme. The proposed solution is validated through practical applications, providing technical support for precise roundness detection of precision components. This research holds significant practical implications for advancing quality control in high-end manufacturing.

Keywords

Roundness error measurement; Influencing factors; Error compensation; Precision measurement; Multi-source error

圆度误差测量的影响因素分析及精准补偿方案研究

董志忠

昆明冶金高等专科学校, 中国·云南昆明 650000

摘要

圆度误差是一种基本的形状误差, 对回转类零件的装配精度和使用寿命有显著的影响。以下以提升圆度测量精度为核心目标, 系统剖析测量仪器自身精度、测量环境干扰及工件状态三大类关键影响因素; 重点研发仪器误差校准补偿、环境干扰自适应补偿、工件安装与自身误差修正等技术, 构建多源误差综合补偿方案, 并结合实际场景验证方案有效性。研究为精密零件圆度精准检测提供技术支撑, 对推动高端制造质量管控升级具有重要实践意义。

关键词

圆度误差测量; 影响因素; 误差补偿; 精准测量; 多源误差

1 引言

在航空航天、精密机床、高端液压等关键领域中, 轴类、套类等回转体零件被归为核心基础部件, 圆度精度直接决定装备的运动平稳性、密封可靠性与使用寿命。当前, 全球制造业向高精尖水平转型, 市场对精密零件圆度公差的要求已经达到微米甚至亚微米等级。但传统圆度测量过程中, 仪器自身漂移、温湿度波动、工件装夹变形、测量参数匹配不当等因素易叠加形成测量误差, 让检测结果偏离了真实数值, 阻碍了高端装备的研发及生产活动。在此背景下, 深入厘清各类影响因素的作用机理, 突破精准补偿技术壁垒, 拟定适应多样场景的补偿方案, 是破解精密圆度测量难题的关键。

【作者简介】董志忠(1968—), 男, 中国云南昆明人, 本科, 讲师, 从事机械工程研究。

本文对影响因素展开系统分析, 依照情况针对性设计补偿技术与综合方案, 再结合应用案例证实其可行性, 旨在为高端制造领域提供高精度的圆度测量应对方案, 推动我国高端装备制造产业打破技术壁垒。

2 圆度误差测量的影响因素分析

圆度误差测量结果受到多维度相关因素综合影响。测量仪器本身精度、主轴回转误差以及传感器灵敏度漂移为基础影响源, 直接左右着测量基准的可靠性。测量环境中的温湿度涨落、振动干扰及气压的波动, 极易引起仪器部件的形变、信号传输的失真。工件装夹引起的变形、表面的粗糙程度以及残余应力释放, 会造成被测轮廓与真实状态发生偏离^[1]。(如图一)。具体分析如下:

圆度误差测量影响因素分析

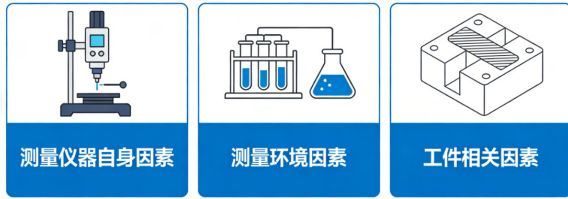


图 1 圆度误差测量的影响因素示意图

2.1 测量仪器自身因素

仪器自身性能是开展圆度测量的基础保障，其核心部件精度存在的缺陷会直接造成测量偏差。主轴作为驱动工件转动的核心零件，若产生径向跳动或者轴向窜动，能让工件回转中心偏离测量的基准中心，尤其在高精度轴类零件时，微米级跳动也会让测量结果失真。传感器身为信号采集的核心，其灵敏度漂移、线性度偏差现象会影响信号转换的精度，如电感式传感器长时间使用结束后，线圈老化会让输出信号跟实际位移之间的偏差增大，难以精准抓取工件表面的微小起伏。仪器导轨导向精度欠佳、传动机构间隙过大，会在测量过程中产生附加位移，如手动调节测量台时，导轨卡顿会导致采样点分布不均，影响圆度轮廓的完整采集。

2.2 测量环境因素

测量环境发生波动是圆度测量的关键干扰源，其影响多通过环境与仪器、工件相互作用产生。温度变化是最关键的影响因子，环境温度偏离了标准测量温度的时候，仪器和工件会由于热胀冷缩引起形变，又因为两者线膨胀系数不同会引发相对形变。湿度若出现变化，会影响仪器电子元件性能，高湿度环境下，传感器电路接口易出现氧化、短路，造成信号传输不顺畅，还会使工件表面产生凝露，改变工件表面轮廓，影响经抛光的精密零件。振动干扰源于车间设备的运转、人员的走动等现象，高频振动会造成仪器主轴、传感器出现共振，引发采集信号产生杂波现象，不能精准辨别工件真实轮廓和振动干扰信号；低频振动或许会造成工件装夹松动，引起附加的位移变动。

2.3 工件相关因素

工件自身状态及装夹方式直接决定圆度测量的基础条件，其固有的缺陷和装夹出现的变形会直接影响测量结果真实性。在工件装夹过程产生的变形是常见误差的源头，采用三爪卡盘装夹薄壁套类零件时，夹紧力会使工件产生弹性变形，成为“三棱形”或“多棱形”，测量时得到的圆度误差实际包含了装夹变形量，松开夹紧力后工件恢复原状，造成测量结果与真实圆度的偏差量较大。工件表面质量差会影响到传感器信号的采集，若工件表面存在划痕、毛刺或粗糙度值过高，传感器探头测量时，会因表面坑洼起伏而产生信号波动，难以精准把握真实轮廓，好比铸造零件的毛坯表面砂眼数量多，会引起采样点数据离散性的提升^[2]。

3 圆度误差精准补偿方案研究

3.1 仪器误差补偿技术

仪器误差补偿核心是要达成“先校准后补偿”的闭环管控机制，针对主轴回转误差、传感器漂移等关键误差发生点设计专门对策。对于主轴回转误差，采用激光干涉仪进行高精度校准，采集主轴在不同转速水平时的径向跳动、轴向窜动数据，组建主轴误差数据库，采用软件算法实时修订测量基准偏差，例如在空气轴承主轴测量仪中，把校准误差曲线添加到测量系统，测量之际同步调用对应转速的误差数据，反向减去采集的轮廓信号。针对传感器灵敏度表现出的漂移现象，采用“实时校准+动态修正”模式，用标准量块对测量间隙的传感器做在线校准，记录各时间段内的漂移系数，构建漂移预测模型，自动校正测量信号的线性偏差。就导轨导向误差与传动间隙而言，结合软件修正与机械精度补偿，机械层面以刮研工艺提升导轨的贴合程度，软件层面采集导轨运动轨迹的数据，搭建位移补偿函数，去除运动出现的附加位移。

3.2 环境误差补偿技术

环境误差补偿以“实时监测+主动调控”为关键，搭建自适应环境管控体系，抵御温湿度、振动、气压等引发的干扰。就温度补偿而言，在测量区域安置多点温度传感器，及时采集环境、仪器自身及工件的温度，按照三者线膨胀系数的差别创建温度误差补偿模型。若环境温度偏离 20℃ 的标准数值，系统自动算出仪器部件与工件的热胀冷缩量，对测量数据进行反向校正；同时添置恒温空调与隔热罩，把控制测量区域温度的波动在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 内，采用除湿机、气压稳定装置实现湿度与气压补偿，若湿度超过 60% 则自动除湿，阻止传感器电路氧化与工件表面出现凝露；对空气轴承式测量仪器，实时监测气压变化，依靠压力调节模块维持空气轴承支撑力的稳定，抵抗气压波动对主轴回转精度的影响。

3.3 工件安装与自身误差补偿技术

工件相关误差补偿聚焦装夹变形控制和自身缺陷修正，做到“装夹精准化+缺陷可视化修正”。装夹变形补偿采用“柔性装夹+夹紧力自适应调节”技术，针对薄壁套类零件，采用软爪卡盘或者真空吸附装夹工件，杜绝刚性夹紧造成的弹性变形；凭借压力传感器实时监测夹紧力数值，按照工件的材质与壁厚创建夹紧力阈值数据库，自动调节夹紧力，如针对铝合金薄壁件，将夹紧力控制在 0.5-1.2MPa，切实减少装夹变形量。工件自身误差修正方面，测量前对工件实施清洁与等温处理，清除表面杂质防止误判，保证工件与环境温度一样以减少热变形；针对工件表面划痕、毛刺等缺陷，依靠图像识别技术锁定缺陷区域，数据处理阶段去除缺陷点数据，也可拟合相邻正常轮廓点，修正缺陷区域的测量偏差^[1]。

3.4 多源误差综合补偿方案

多源误差综合补偿关键是解决多误差源耦合干扰状况，采取“数据融合+动态协同”的实操方式。通过铺设多传

传感器采集网络，同步抓取仪器主轴误差、环境温湿度、工件夹紧力、测量参数等实时数据，依托工业以太网达成数据间的互通共享。构建轻量化卡尔曼滤波融合模型，无需开展复杂理论运算，可快速判别各误差源的耦合关系及影响权重，精准估算综合误差数值。搭建动态补偿的决策模块，依照实时融合数据自动调用仪器、环境、工件等相关的单源补偿策略，共同调控补偿参数，杜绝不同方案出现冲突。同时积累不同测量工况的补偿数据，采用简单迭代的方式优化模型参数，适应航空航天、精密机床等多领域复杂的测量实际场景，维持长时间稳定的精准补偿效果。

该技术体系的核心原理是先通过模块化设计实现单源误差的精确剥离，再遵照多源数据耦合模型完成协同补偿，冲破传统单一补偿应对复合误差的局限困境。其明显优势体现为灵活性和精准度的双重提升，单源模块能依照误差类型迅速调换适配策略，多源融合层借由动态权重分配避免补偿

方面的冲突。与传统方案相比，无需重构测量系统即可实现误差补偿效率翻倍。适配场景覆盖高端制造的各类复杂工况，尤其适用于航空航天亚微米级精密轴类零件的多误差叠加测量、精密机床车间强振动环境下的主轴检测工作，以及液压薄壁套这类易变形工件的批量检测，还可延伸至半导体精密构件、汽车发动机核心部件等对测量精度要求极高的场景，为不同工况打造既涵盖标准化又有定制化的解决途径。

4 不同测量场景下的补偿方案应用案例

选取航空航天发动机主轴、精密机床主轴、高端液压薄壁套三类典型场景，应用前述多源误差综合补偿方案开展测试。航空航天场景中，发动机主轴精度要求达亚微米级，核心干扰为温度波动与主轴误差，采用环境—仪器协同补偿；精密机床车间振动显著，重点实施振动隔振+参数智能适配补偿；液压薄壁套易装夹变形，以柔性装夹+应力释放修正为主^[4]。应用效果如表2所示：

表2 应用效果统计表

测量场景	工件类型	核心干扰源	采用补偿方案	补偿后精度提升率
航空航天制造	发动机主轴	温度波动、主轴回转误差	温度自适应补偿+主轴误差实时校准	82%
精密机床加工	机床主轴	车间振动、参数匹配不当	被动隔振+主动减振+智能参数适配	76%
高端液压制造	液压薄壁套	装夹变形、残余应力释放	柔性装夹+夹紧力自适应+时效处理	85%

5 结语

综上所述，本文细致梳理了圆度误差测量的三大类核心影响状况，明确了各因素的作用机理，构造了含有单源误差补偿与多源误差融合补偿的完整技术方案，通过应用案例验证了方案的精准性与可靠性。研究表明，多源误差综合补偿可有效消除复合干扰因素，显著改善测量的精准水平。未来可把智能传感和机器学习技术结合在一起，优化现有的误差预测模型，提高方案在极端工况下的契合能力，为高精度圆度测量需求提供更高效的技术后盾。

参考文献

- [1] 龚天辉,钟飞.滚珠直径非接触式测量及圆度边缘检测研究[J].湖北工业大学学报,2025,40(05):1-5.
- [2] 张俊萍,邵萌,洪丹丹,等.基于蒙特卡洛方法的三点圆度测量不确定度评定与降低[J].工具技术,2025,59(06):128-134.
- [3] 花晓彬,阮小霞,花世群.低成本大曲率半径平凸透镜圆度误差测量[J].激光与光电子学进展,2025,62(03):208-213.
- [4] 滕玉彬,孙涛.测头圆度对齿轮极坐标测量法精度影响的分析[J].机械传动,2021,45(07):172-176.