

# 现代技术在几何量高精度计量校准中的运用分析

杨寒涛

(忻州市综合检验检测中心, 山西 忻州 034000)

**摘要** 为切实解决以往几何量校准方法应用时存在的精度不足、适用范围有限等问题, 本文围绕现代技术在几何量高精度计量校准中的运用策略展开分析, 包括激光干涉、视觉测量、数字孪生与 AI 融合等。根据研究结果显示, 基于数据采集、智能分析、动态补偿的技术体系, 可实现几何量计量校准精度向纳米级方向的跃升, 效率可提升 80% 以上, 能够为高端制造领域提供计量保障。

**关键词** 数字孪生; 激光干涉; 几何量计量校准; 动态补偿

**中图分类号**: TB92

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.027

## 0 引言

几何量高精度计量校准是指对长度、角度等几何参数, 实施量值溯源与误差评定的工作。随着我国半导体、新能源等高端制造领域对几何量精度的要求不断提升, 以往采用的接触式测量与人工校准方式逐渐无法满足实际应用需求。且考虑到计量校准期间又难以避免地遇到环境扰动、复杂曲面, 致使传统方法想要满足纳米级精度要求愈发困难。而现代光电传感、激光干涉、智能算法等技术的出现与普及, 则可切实突破精度瓶颈, 提升校准稳定性。因此, 本文围绕现代技术在几何量高精度计量校准中的应用要点进行讨论, 旨在为精密制造与量值统一提供技术参考。

## 1 几何量高精度计量校准的技术挑战

一般情况下, 传统几何量计量校准方法较为依赖接触式测量, 比如用卡尺、千分尺等设备进行接触探测, 并结合人工操作的形式。但此类做法在实际应用期间, 经常会产生压痕变形, 且人工读数误差大, 难以满足现代产业对  $1\text{ }\mu\text{m}$  精度的要求。采用的单点测量模式, 在面临复杂零件时的校准作业, 往往会消耗数小时, 致使无法完成批量生产。同时, 接触测量的检测成本相对高昂, 在一定程度上制约了生产效率提升, 也无法有效测量深腔、薄壁等特殊结构, 动态测量能力有待提升。除此之外, 该测量方式获取的数据结果只能进行分散存储, 缺乏智能分析与反馈机制, 数据价值得不到充分挖掘与利用, 无法实现工艺优化与预测性维护。

为切实解决此类问题, 检测中心对现代技术的应用需求更多地体现在以下方面: (1) 精度突破, 力求从微米级到纳米级; (2) 效率提升, 追求测量校准时间从以往的小时级到分钟级; (3) 范围拓展, 保证测量作业覆盖复杂结构与动态过程; (4) 智能升级, 保证数据价值的充分利用, 实现数据驱动的校准决策。此类需求进一步推动了现代技术与几何量计量校准的有机结合, 形成了多元化的技术运用架构。

## 2 现代核心技术在几何量计量校准中的应用路径

### 2.1 激光干涉技术

激光干涉技术是基于光的干涉原理, 将激光波长作为自然基准, 具有非接触、高分辨率等显著优势。以常见的双频激光干涉仪为例, 该装置可通过将激光分为参考光、测量光, 凭借多普勒效应, 产生频率差, 当测量轴移动时, 频率差变化, 进一步转化为干涉条纹移动量, 结合环境补偿传感器进行动态修正, 进而实现纳米级的位移测量。其测量精度可达  $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ , 测量范围高达数十米, 适用于角度、直线度、平面度等几何量的校准<sup>[1]</sup>。

在实际应用期间, 需要技术人员预先设计校准对象的测量环境, 借助恒温、低振的实验室条件, 完成激光干涉仪主机、分光镜等器件的轴线布设, 接入温度、气压等环境补偿传感器, 在获取环境参数后, 建立动态修正模型, 以此从源头消除环境因素对激光波长稳定性的干扰。之后, 根据被校对象的类型, 比如三坐标测量机、精密机床等, 沿设备运动轴线。设计参考

**作者简介**: 杨寒涛 (1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 几何计量。

光路与测量光路, 驱动设备轴向做匀速标准位移运动, 此时, 测量光随设备位移, 形成多普勒频移效应, 干涉信号经过光电转换后, 会进一步形成连续脉冲计数。技术人员可直接利用解算软件, 将脉冲计数转化成位移测量值, 与设备显示的示值开展逐点比对, 提取定位误差、垂直度、俯仰角等空间几何误差参数。并在此基础上, 结合环境补偿模型完成测量结果的二次修正, 剔除系统偏差, 将最终测得的几何误差数据录入设备补偿系统, 实现设备运动误差的动态修正。

## 2.2 视觉测量与光学扫描技术

视觉测量与光学扫描技术凭借光学成像与图像处理,进行几何量的非接触式快速测量,适用于复杂曲面、微小结构的计量校准。其主要技术组成涉及:蓝光结构光扫描(如图1伸缩式),通过投射编码结构光,基于双目相机,实时获取变形图案,以此计算三维坐标;双远心影像测量,凭借双远心镜头,进一步消除透视误差,实现高精度二维测量;激光三角测量,通过激光反射角变化,计算距离大小,完成高速点测量;共聚焦显微镜,基于焦点扫描的形式,实时获取三维形貌,可完成亚微米级测量。

在技术应用阶段,需要技术人员优先进行工件装夹与测量系统标定,将被校工件固定在载物平台上,选用标准量块等计量标准器,对双目相机、结构光投射器等部件开展系统标定,建立像素坐标与空间实际坐标的转换关系,界定测量系统的像素当量,以此保证测量结果的尺寸准确性。直至标定结束后,依照工件尺寸与精度需求,选择蓝光结构光、激光三角扫描等测量模式,依靠投射编码光栅或激光线束,获取工件表面的光学形貌信息,搭配双目相机,同步获取变形后的光学图案,形成高密度原始点云数据。之后,技术人员要进行原始点云的去噪、精简等预处理作业,切实剔除噪声点与冗余数据,凭借曲面拟合算法,重

构工件的三维几何模型,再将其与 CAD 理论模型对齐。提取轮廓度、位置度、孔径等几何参数,计算实测值与理论值的偏差,形成偏差色谱图。最后,依照计量规范判定校准合格性<sup>[2]</sup>。

### 2.3 数字孪生与 AI 融合技术

数字孪生与 AI 融合技术的主要原理在于，依靠设置物理实体的虚拟镜像，基于机器学习算法，完成几何量计量校准的智能化决策与预测性维护。通常来说，技术人员可依靠激光扫描或 CT 技术，直接获取被校设备的三维数据，构建涵盖几何参数、运动特性的数字孪生模型。并在集成温度、湿度等环境参数后，构建热、力、流多场耦合模型，用以模拟不同工况下的设备误差变化规律，为后续的校准策略编制提供有力支持。再结合数字孪生模型，预测设备在不同工作状态下的误差，实时修正测量结果。

在技术应用期间，首先要组建多源数据融合平台，并第一时接入测量数据、设备运行状态等信息参数，形成虚实同步的数据交互链路。之后，检测中心要基于机器学习等 AI 算法，对海量校准数据进行深入挖掘，区分系统误差、异常测量数据，识别误差产生的诱因，凭借误差预测模型，预判设备漂移趋势与精度衰减规律，确定最佳的校准时机，防止过度校准或校准滞后。其次，要利用数字孪生模型的仿真分析能力，自动规划最优测量路径，减少无效测量点位，提升校准效率，根据仿真得到的工况误差分布，下发动态误差补偿参数。直至校准结束后，由 AI 系统自动实施测量不确定度评定与数据归档，形成校准过程的闭环迭代，这样不仅可以最大程度消除人工干预，还能让误差补偿更精准、结果评定更科学。

## 2.4 微纳米级计量校准技术

随着半导体、MEMS 器件等高端制造业的蓬勃发展，微纳米尺度几何量校准逐渐演变成检测中心亟需突破

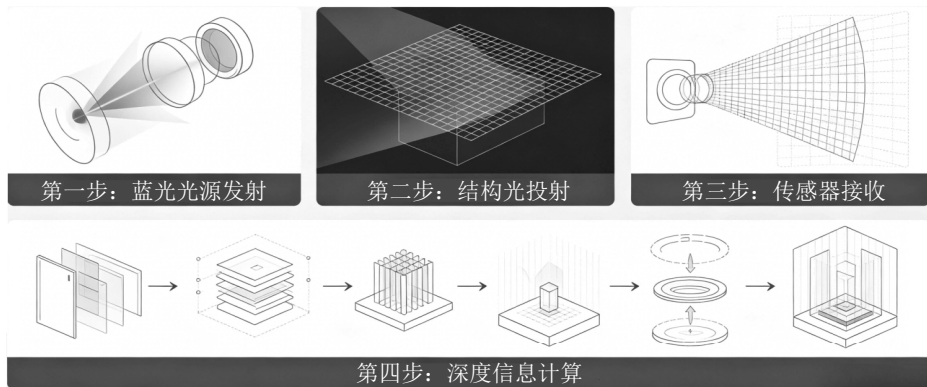


图 1 蓝光结构光扫描示意图

的技术领域，简单来说，微纳米级计量校准技术属于专门针对亚微米、纳米级规格参数所实施的校准作业。在实际应用期间，应当以超精密环境管控、量值溯源为首要任务，致力于解决微纳结构存在的测不准、难溯源等行业痛点。基于此，检测中心应做好超净、低振动微纳计量实验室的搭建，并保证全程严格把控环境温度波动、振动幅值，最大程度提高空气洁净度，并结合一维、二维栅格标准器，设计纳米级长度溯源基准，以此将所有测量结果直接追溯至国际米定义，真正意义上保障微纳量值的国际可比性。

在实际测量阶段,技术人员可优先考虑计量型扫描电子显微镜、扫描探针显微镜等高端设备,对微纳结构开展高精度成像观测,凭借探针扫描或电子束成像等方式,直接获取微纳结构的线宽、膜厚、侧壁倾角等关键尺寸信息。之后,针对成像畸变、探针半径误差,借助专业图像分析软件,实施边缘提取、畸变校正与尺寸标定,完成微纳几何参数的精准解算。再将实测数据与标准器标称值进行比对分析,以此评定纳米级测量不确定度,并要求动态剔除测量期间的各类误差影响,最终完成微纳几何量的校准核验与认证。相较于上述几种技术措施来说,该应用路径可切实突破传统几何量测量的精度极限,适配微纳尺度构件的校准需求,能够为半导体等高端产业的质量管控,提供计量支撑<sup>[3]</sup>。

### 3 检测中心技术集成应用案例分析

为验证上文阐述的技术应用策略可靠性与适用性,本文以某检测中心针对航空发动机叶片的测量作业作为研究对象,根据实际调查显示,该叶片存在复杂曲面、薄壁结构等特点,为此,经技术团队综合讨论后,决定采取激光干涉+蓝光扫描+数字孪生的集成校准系统,并最终取得了显著成效,具体情况如表1所示。

表1 几何量校准技术应用效果对比

| 校准指标  | 传统方法                | 现代技术                  | 提升幅度  |
|-------|---------------------|-----------------------|-------|
| 测量精度  | $\pm 5 \mu\text{m}$ | $\pm 0.5 \mu\text{m}$ | 10 倍  |
| 校准时间  | 4 h/ 件              | 20 min/ 件             | 12 倍  |
| 测量覆盖率 | 60%                 | 100%                  | 66.7% |
| 不确定度  | $3.5 \mu\text{m}$   | $0.8 \mu\text{m}$     | 77.1% |

该案例中，检测中心依靠蓝光结构光扫描系统，全方位获取叶片全表面点云数据，采样密度达 1 000 点/mm<sup>2</sup>，并结合激光干涉仪，测量关键基准点坐标，确保数据精度。搭配 AI 点云处理算法，实现自动去噪、

拼接,生成叶片三维模型,与设计模型对比分析,自动识别轮廓度、位置度等几何误差。再基于数字孪生模型,分析温度、振动对测量结果的影响,实时修正误差,使测量不确定度降至 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。同时,此类现代技术集成方法也能自动生成符合安全标准的校准报告,涉及三维偏差色谱图、关键参数统计分析等,并给予技术人员专业的改进建议,能够为航空发动机制造企业提供质量反馈<sup>[4]</sup>。

再以该检测中心的半导体芯片掩模几何量校准项目作为研究对象, 根据实际调查显示, 该半导体芯片掩模, 线宽不超过 100 nm, 经技术团队综合讨论后, 决定建立计量型 SEM+ 共聚焦显微镜 + AI 算法的微纳米级校准系统。一方面, 技术人员利用计量型 SEM 测量线宽、间距等二维几何参数, 精度达  $\pm 1$  nm, 用共聚焦显微镜, 测量表面形貌与三维结构。另一方面, 技术人员则通过 AI 算法将 SEM、共聚焦显微镜数据融合, 构建掩模完整三维模型, 解决单一设备测量信息不完整的问题。并基于一维、二维栅格间距标准器, 实现测量结果直接溯源到激光波长米定义, 其主要目的在于保证量值准确性、国际可比性。总体来看, 该系统可使芯片掩模几何量校准效率提升 90%, 测量不确定度降低 75%, 证明本文阐述的技术体系可以为我国半导体产业突破技术瓶颈提供计量支撑<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

激光干涉技术可为几何量校准提供纳米级位移溯源功能,视觉测量技术可实现复杂曲面的非接触数据采集,而数字孪生与 AI 技术,则可进行校准环节的智能调节与误差动态补偿。结合案例分析显示,本文提出的多技术融合体系,可显著提升检测中心的计量能力与溯源可靠性,研究结果具有较高的推广价值。

### 参考文献:

- [1] 崔石松. 几何量检测中非接触式测量技术的应用探究[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(04): 105-107.
- [2] 邓文斌, 于大国, 赵杰, 等. 基于光隙法的深孔多几何量检测[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(03): 28-33, 40.
- [3] 雷毅, 翟丽敏, 付红, 等. 基于激光干涉测量的几何量精确计量方法研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(06): 116-118.
- [4] 邵炳芳. 三坐标测量仪在提升机械零件几何量检测精度中的应用[J]. 中国机械, 2025(09): 121-124.
- [5] 李梦娇. 几何量轨检仪器检测设备模式及随机振动模拟分析[J]. 今日制造与升级, 2025(06): 9-11.