

文章编号 1004-924X(2025)23-3672-19

微纳米三坐标测量机的技术进展

何亚雄^{1,2}, 李瑞君^{1*}, 黄强先¹, 程真英¹, 范光照¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国计量大学 计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:超精密器件是国家重大装备与高端仪器的关键组成部分,其几何特征尺寸常介于数百微米至数百毫米之间,而精度要求高达数十至数百纳米。为确保此类器件的质量,必须实现其三维形貌的超精密测量。本文首先综述了微纳米三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)的研究进展,从整机结构设计、误差补偿技术、纳米测头研制、测量环境控制及整机应用测试等方面进行了系统性归纳。其次,详细介绍了团队历经四代样机的研究成果与最新进展。进而,阐述了一种基于阿贝与布莱恩原则的空间误差建模与补偿创新方法,在此基础上,实现了对尺度小于100 μm 且具有高深宽比的内尺寸特征的纳米级精度测量。最后,对微纳米三坐标测量机未来的研究方向与应用前景进行了展望。

关键词:精密测量;微机电系统(MEMS);三坐标测量机(CMM);高深宽比结构;纳米探头;阿贝误差;空间误差补偿

中图分类号:TH71;TH74 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253323.3672 CSTR:32169.14.OPE.20253323.3672

Advances in micro/nano CMM

HE Yaxiong^{1,2}, LI Ruijun^{1*}, HUANG Qiangxian¹, CHENG Zhenying¹, FAN Guangzhao¹

(1. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China;

2. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: rj-li@hfut.edu.cn

Abstract: In the field of advanced manufacturing, ultra-precision components are indispensable for national key equipment and high-end instruments, including aircraft engine fuel nozzles, precision gears, optical elements, and semiconductor devices. The characteristic dimensions of these components range from hundreds of micrometers to hundreds of millimeters, while the required dimensional accuracy can reach tens to hundreds of nanometers. To guarantee the quality and functional performance of such components, three-dimensional ultra-precision measurement is essential. This paper presents a comprehensive review of the development of micro- and nano-coordinate measuring machines (micro/nano CMMs) over the past two decades. The structural designs and measurement principles of micro/nano CMMs are systematically sum-

收稿日期:2025-07-10;修订日期:2025-07-28.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2004900);国家自然科学基金面上项目(No. 51675157, No. 52075143, No. 52175506)

marized, and key technologies—including error compensation methods, nano-probe design, measurement environment control, and system testing and application—are analyzed in depth. Particular emphasis is placed on the research progress and latest advances in four generations of micro/nano CMM prototypes developed at Hefei University of Technology. Recent work is highlighted, including an innovative volumetric error modeling and compensation method for micro/nano CMMs based on the Abbe and Bryan principles. This method enables nano-precision measurement of internal dimensions with characteristic sizes below 100 μm and large depth-to-width ratios. Finally, future research directions and potential application prospects of micro/nano CMMs in ultra-precision manufacturing are discussed.

Key words: precision measurement; Micro-Electro-Mechanical System (MEMS); Coordinate Measuring Machine (CMM); high aspect ratio structures; nano probe; Abbe error; volumetric error compensation

1 引言

随着微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 技术与半导体产业的快速发展,微加工技术催生出一系列关键器件,如航空发动机喷油孔、精密齿轮涡轮、微透镜阵列和硅通孔 (Through Silicon Via, TSV) 等^[1-5]。这些器件的特征尺寸横跨百微米至毫米之间,具有高深宽比特征,几何精度要求高达数十纳米,例如燃油喷孔内壁光滑度直接影响燃油雾化效率,TSV 的垂直度决定芯片互连可靠性。为了保障这些微器件的加工精度和质量,需要采用三维超精密测量仪器。

非接触式光学测量设备中,白光干涉仪受衍射极限限制,横向测量难以突破百纳米分辨率,且无法穿透深孔实现内壁扫描^[6];共焦显微技术虽具备亚微米纵深分辨率,但对深径比 $>5:1$ 的盲孔测量失效^[7];原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 等扫描探针技术虽可实现原子级分辨率,但其探针悬臂量程通常小于 100 μm ,无法覆盖毫米级深孔结构,更因脆性材料易损问题难以适应工业现场测量需求^[8]。这种测量能力断层严重制约了高精度微器件的产业化进程,亟需发展新型跨尺度测量设备。传统的三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 受限于市面上测头尖端的红宝石球,其最小直径为 300 μm ^[9],无法对低于 300 μm 的内尺寸进行测量。因此,需要研制精度更高的微纳米 CMM,并配备测球直径小于待测横向尺寸的微型探针。

微纳米 CMM 的基本结构是由一个三维工作台和纳米探头组成,工作台以纳米级的定位精度将被测件移动到指定位置,其特征是能够以精度在 100 nm 以内,分辨力约为 1 nm 的规格测量通过微加工技术加工出来的产品。微纳米 CMM 兼具“毫米级行程”与“纳米级精度”的优势,故成为高深宽比结构测量的重要手段。从 20 世纪末纳米科技兴起以来,日本、美国及欧洲相继开始研究微纳米 CMM。该技术包含 4 个关键突破方向:(1) 机械结构微型化,学术界研究的纳米 CMM 三轴行程约在 50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 10 mm 以下;(2) 纳米位移测量系统,采用激光干涉仪达成 1 nm 位移分辨力,并通过温漂补偿抑制环境扰动;(3) 测量探头、探针微型化,突破商用红宝石测球 300 μm 的尺寸下限,能够伸入微器件的内部进行探测,解决微孔等内尺寸接触式测量物理瓶颈,且测球的球度要好,测杆刚度要能够抵抗测量力造成的测杆弯曲,触发重复性和测量精度要在 30 nm 以内;(4) 多传感器融合,集成接触式探头与光学探头,构建“形貌-尺寸-粗糙度”一体化、智能化测量能力。目前,德国伊尔梅瑙工业大学通过压电驱动实时校正角运动误差,将阿贝误差降低至 0.1 nm。荷兰代尔夫特理工大学开发的微纳米 CMM 将测量范围扩展至 400 mm $\times$ 400 mm $\times$ 100 mm,总体测量不确定度维持在 100 nm。然而,高昂成本(>100 万欧元)与供应链壁垒制约了我国技术推广及应用,因此,亟需一种低成本自主化解决方案。

本文系统梳理了近 30 年微纳米 CMM 的技术发展路径,聚焦“整机结构设计-探针制备工艺-

误差补偿机制-测量环境控制”四个方面,重点总结了本团队在自主化技术路线上的突破:“宝塔式”共面平台设计,采用四面对称结构抑制结构力、热变形;开发电弧放电熔融工艺,制备直径60 μm 钨测球,攻克微孔内壁探测瓶颈;提出基于阿贝-布莱恩原则的空间误差补偿模型;研制自然对流式恒温箱,将测量环境温控精度提升至±0.03 ℃。实验结果表明,该技术已成功实现深微孔($\varphi=100\text{ }\mu\text{m}$)的纳米级测量(直径测量不确定度为192 nm,深度测量重复性为22 nm),并为

微流控芯片、植入式医疗器件等新兴领域提供了新方法。当前研究正向大行程纳米定位、智能路径规划、多模态数据融合等方向延伸,推动微纳测量从实验室精度向产业落地。

2 微纳米 CMM 研究进展

世界各国研究机构的代表性微纳米 CMM 样机的基本情况如表 1 所示^[10-36]。图 1 所示为各国研究机构的代表性样机。

表 1 微纳米 CMM 代表机型汇总

Tab. 1 Summary of representative micro-nano CMM prototypes

文献来源	研究机构	测量范围/mm ³	测量不确定度	探头
[10-11]	日本东京大学	160×160×100	50 nm(目标)	接触式测头;测球直径为 0.1 mm
[12-13]	英国 NPL	50×50×50	100 nm	基于电容原理的接触式测头,测球直径为 1 mm
[14-15]	美国 NIST	50×50×50(Z:μm)	150 nm(@10 mm)	C-AFM, CD-AFM
[16]	瑞士 METAS	90×90×38	50 nm	接触式探针,测球直径为 0.1 mm
[17-19]	荷兰 IBS(ISARA 400)	400×400×100	109 nm	接触式测头,最小测球直径为 70 μm,测球偏心误差为 5 μm
[20-22]	德国 SIOS(NMM-1)	25×25×5	—	可更换多种测头(白光干涉仪测头,聚焦测头,原子力显微镜测头)
[23-26]	中国台湾大学/合肥工业大学	20×20×10	100 nm	接触扫描式测头
[27-29]	荷兰 Xpress	100×100×100	100 nm(@200 cm ³)	接触式测头
[30-32]	德国 PTB	25×40×25	100 nm	接触式测头,测球直径为 25 μm
[33-34]	合肥工业大学(三代)	50×50×50	100 nm	接触扫描式测头
[35-36]	合肥工业大学(四代)	100×100×100	700 nm(最大)	接触式测头与光学探头融合



图 1 国内外微纳米 CMM 样机图片

Fig. 1 Photos of domestic and foreign micro/nano CMM prototypes

传统的 CMM 按照结构可以分为悬臂式、桥框式和龙门式结构^[37]。悬臂式 CMM 的结构简单,2 臂的自重会导致自身变形,因此不适合高精度的测量场合。桥框式 CMM 是应用最广的结构形式,由工作台、桥框、滑架和主轴组成,桥框由两根立柱和横梁组成,具有较好的刚性。龙门式 CMM 由一根横梁、多根固定的立柱和主轴组成,横梁在固定的立柱上沿 X 轴运动,主轴在横梁上沿 Y 轴运动,这种结构刚性好,但是测量空间受限,只适用于大量程的 CMM。以上 3 种结构都存在一个共同的问题,即三轴的位移测量轴线、三轴驱动轴线和探头的测球中心点均存在较大的阿贝臂,当各轴运动产生微小的角运动误差时,该误差与阿贝臂作用造成较大的阿贝误差,此时给运动控制和测量都带来精度损失。为了提高 CMM 的精度,研究人员在研制微纳米 CMM 的过程中对传统 CMM 的结构进行了改进,旨在从机构上将误差减小至最低。

2.1 结构设计的技术演进与阿贝误差抑制

微纳米 CMM 精度提高的核心在于减小阿贝误差,该项误差的根源在于运动轴与测量轴线之间的阿贝臂与线性运动轴的角运动误差相互作用的放大效应。早期机型(如日本东京大学移动桥式结构)采用堆叠式 X 工作台^[38],Y 轴线性导轨垂直堆叠在 X 轴上,虽结构紧凑、测量空间开阔,但存在显著阿贝臂,且 Y 轴运动过程中容易产生负载不均,导致阿贝误差显著。该锥形机后来经过改良,采用更精密的线性运动轴和刚性更好的材料制成,结构仍采用堆叠式结构,在 30 mm×30 mm×10 mm 的测量空间内的目标精度为 50 nm^[11]。

阿贝原则的引入是精度提高的关键手段。荷兰埃因霍温理工大学研制的微纳米 CMM,如图 2 所示,主体机台自下而上分别由大理石台面、两根导轨、移动平台以及标尺系统构成,探头固定在移动平台上可以做 Z 向上下直线运动。该设计在 XOY 水平面上遵守阿贝原则,X 和 Y 两根运动轴处在同一水平面上,相互不产生耦合误差,通过共面光栅布局使 X/Y 轴标尺交汇于 Z 轴测量点,测量机在初始位置三轴阿

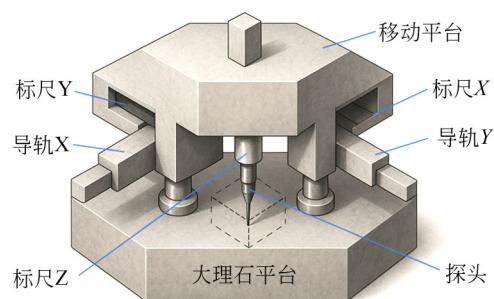


图2 荷兰埃因霍温理工大学的微纳米 CMM 结构示意图
Fig. 2 Structural schematic diagram of micro-nano-CMM at TU Eindhoven

贝臂均为零,利用空气轴承驱动实现 10 nm 的闭环定位控制精度^[27-29]。然而,该机型只在 XOY 二维平面上遵守阿贝原则,Z 轴上下运动时仍会产生 Z 方向的阿贝臂。上述两种形式的工作台都属于堆叠式,该结构占用空间小,测量空间开阔,但存在较大的阿贝臂,当运动平台产生角运动误差时,受到阿贝臂的放大作用会产生显著的阿贝误差,此结构存在于早期的微纳米 CMM 的锥形机上。

美国国家标准技术研究院于 1987 年开始研制分子测量机^[14-15]。该测量机由二维工作台和 Z 向的微动台构成,在 X 和 Y 方向上测量光轴的轴线处在同一水平面,且相交于测量点。该设计在 X/Y 方向上位移测量遵守阿贝原则,在 Z 轴方向上量程小,仅为 1.5 μm ,属于 2.5D 测量机。

3D 全阿贝设计是理想的解决方案。德国伊尔梅瑙工业大学设计的纳米测量机(Nano-Measuring Machine, NMM-1)由一个三维运动台和探头组成,三轴的测量标尺线相互正交于一点(图 3),该点与探头的测球中心重合,探头固定在基座上端,在测量过程中保持不动,测球中心点即为机器坐标系的零点,并且测球中心点与 3 个测量轴线距离均为零,即 3 个方向上的阿贝臂都为零。配合六自由度激光干涉仪同步测量位移与角误差,实现 0.1 nm 的定位分辨力^[20-22]。在三维方向上均遵守阿贝原则的还有荷兰的 ISARA400 微纳米 CMM,该机量程为 400 mm×400 mm×100 mm^[17-19],工作台由一块平板和底座构成,可在 XOY 平面上自由移动,

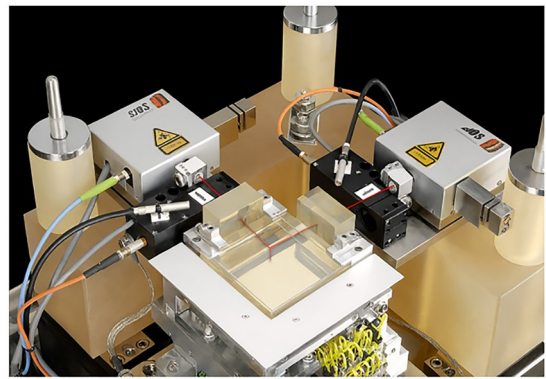
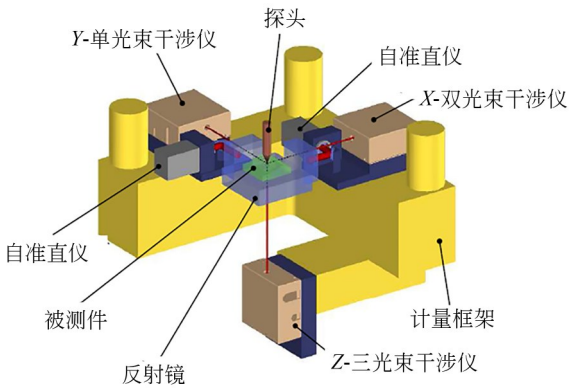


图3 SIOS 三维纳米测量机 NMM-1^[20]
Fig. 3 Nanomeasuring machine NMM-1 of SIOS^[20]



两侧安装有干涉仪的测量反射镜,Z轴上固定探头和激光干涉仪的发射端。当XY工作台和Z轴沿各自方向运动时,XYZ三轴的测量标尺线能够始终保持相互正交,且交点与探头的测球中心重合,因此其在三维方向上均符合阿贝原则,如图4所示。

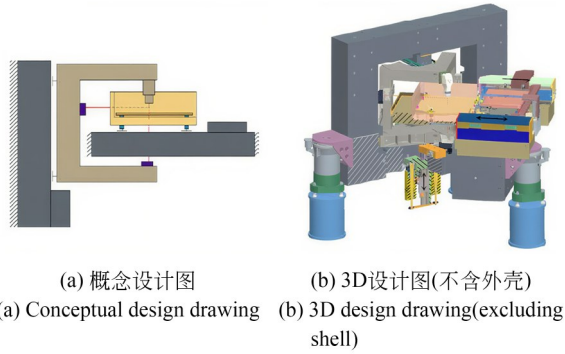


图4 荷兰 ISARA 400^[17]
Fig. 4 Netherlands ISARA 400^[17]

荷兰 Xpress 公司在^[28]的研究基础上,开发出产品型号为 Trinano N100 的超精密 CMM^[27],如图5所示。被测工件放置于正中央的载物台上,载物台采用并联机构驱动的方式,3个独立的线性驱动器相互正交、呈倒金字塔型布置,驱动器通过真空预紧的空气轴承支撑载物平台,运动机构通过完全约束设计,具有良好的定位重复性和刚度。该测量机的探头悬挂在载物台的顶部,探头保持固定不动,载物台携带被测工件到达指定位置,驱动器的位移量由3根光栅尺

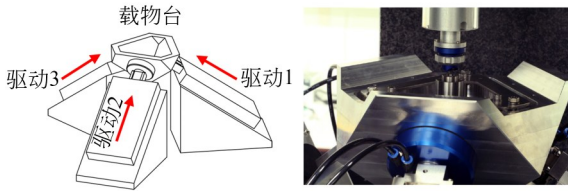


图5 Xpress 并联式超精密 CMM^[27]
Fig. 5 Parallel ultra-precision CMMs at Xpress^[27]

测量,且光栅尺的测量轴线相交于探头的测量点中心,该项设计在三维全量程范围内都遵守阿贝原则。

2.2 传感原理及探头

国内外研究机构开发的微纳米 CMM 的探头技术主要包括压阻式、电容式、电感式和光学传感式等类型。每种探头类型基于不同的传感原理,性能指标各有侧重。压阻式探头通常使用 MEMS 技术制造,刚度和测量范围受到一定限制;电容式探头对电极板的加工精度要求较高,测量范围有限;电感式探头结构复杂,但具有高精度和较大测量范围;光学传感式探头种类繁多,包括光电成像技术、光纤光栅技术、DVD 光学读取头技术等,具有高分辨力和灵敏度;振动式探头适合非接触测量或微力测量,但易受环境干扰。探头的性能参数,如分辨力、测量范围、重复性及刚度等,受到传感原理、制造工艺和探头结构的影响,整体趋势向着更高精度、更低测量力、更小尺寸方向发展,以满足高深宽比微小尺寸测量的要求。上述微纳米 CMM 探头的总结如表2和图6所示。

表 2 微纳米 CMM 配备探头汇总
Tab. 2 Summary of probes equipped with micro-nano CMMs

研究机构(CMM 型号)	探头传感原理	探头分辨力/精度
日本东京大学	三丰商业探头(UMAP110)	重复性 0.15 μm
英国 NPL	电容式	分辨力 3 nm, 量程 ± 20 μm
美国 NIST	光学传感式(AFM)	分辨力 4 nm, 重复性 20 nm
瑞士 METAS	电感式	重复性 5 nm, 量程 ± 0.2 mm, 红宝石测球直径 0.1~1 mm
荷兰 IBS(ISARA 400)	电容式	测量不确定度, $U_{x,y}=5.3\text{ nm}$, $U_z=1.6\text{ nm}$
德国 SIOS(N-MM-1)	光学传感式(聚焦传感器、白光干涉仪、AFM)	测量重复性 3 nm
荷兰 Xpress	Gannen XP 三维触觉探测系统	测球直径 0.3 mm
德国 PTB	压阻式	分辨力 3 nm, 5 nm; 重复性 10 nm, 20 nm; 量程 60 μm, 10 μm
合肥工业大学	DVD 光学读取头、QPD 传感式、光学干涉	分辨力 1 nm; 重复性: 10 nm; 量程: ± 20 μm

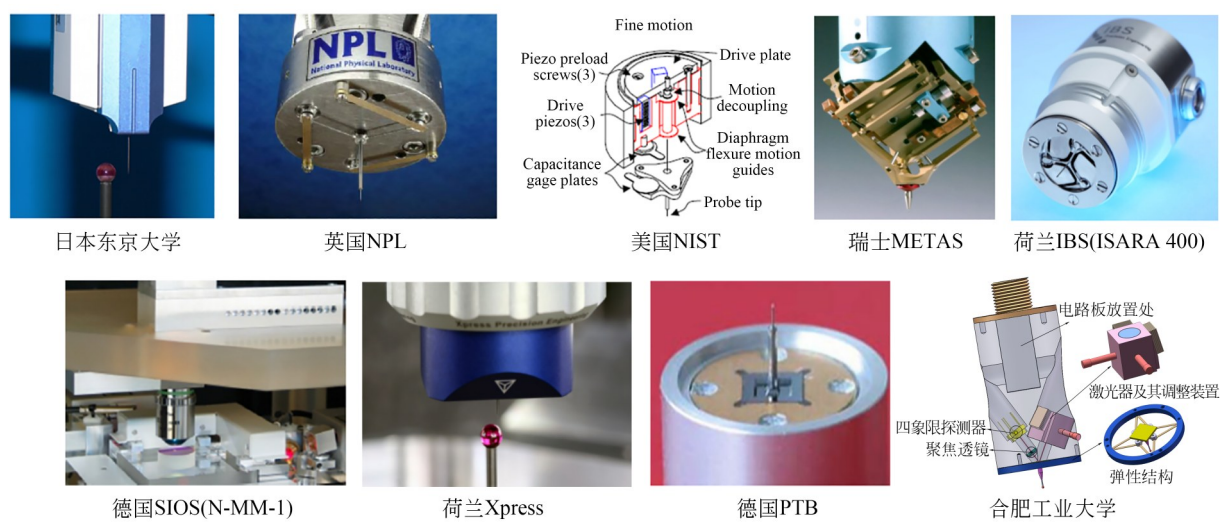


图 6 不同机构的探头图片
Fig. 6 Photoes of probes produced by different institutions

2.3 国内四代机型的迭代与创新

国内研究主要集中在合肥工业大学和台湾大学,研究方向侧重高性价比和小型化。此外,中国计量科学研究院^[39]、中航北京长城测试技术研究所也有研制出样机,但公开文献报道较少。在范光照和费业泰教授的带领下,先后研制出微纳米 CMM 两代机型,随后黄强先团队又开发了第三、四代机型,前后历经 20 余年,取得了显著成果。初代机型在 2000 年初期研制,采用“拱桥式”对称结构^[40]。这种结构借鉴中国古典建筑拱桥

的设计经验,Z 轴悬挂在拱形支撑横梁上,能够显著降低机架自重导致的结构变形,如图 7(a)所示,不足之处是该结构只在二维平面内具有对称性。第二代机型改进为“宝塔型”结构,如图 7(b)所示,借鉴中国传统宝塔建筑的四面对称布局,显著提升了热学、力学稳定性。整机由 XY 共面二维运动平台^[41]和 Z 轴^[42]构成,三轴位移分别由自研的微型迈克尔逊激光干涉仪测量^[43],其测量轴线相互正交,交点与机器坐标系的零点重合,Z 轴携带探头做上下直线运动。该结构在 XOY 水

平面上遵守阿贝原则, Z 方向的阿贝臂在数值上等于 Z 轴的位移量大小, 相对于 3D 上遵守阿贝

原则的结构而言, 具有结构简单、精度实现成本低的优点。

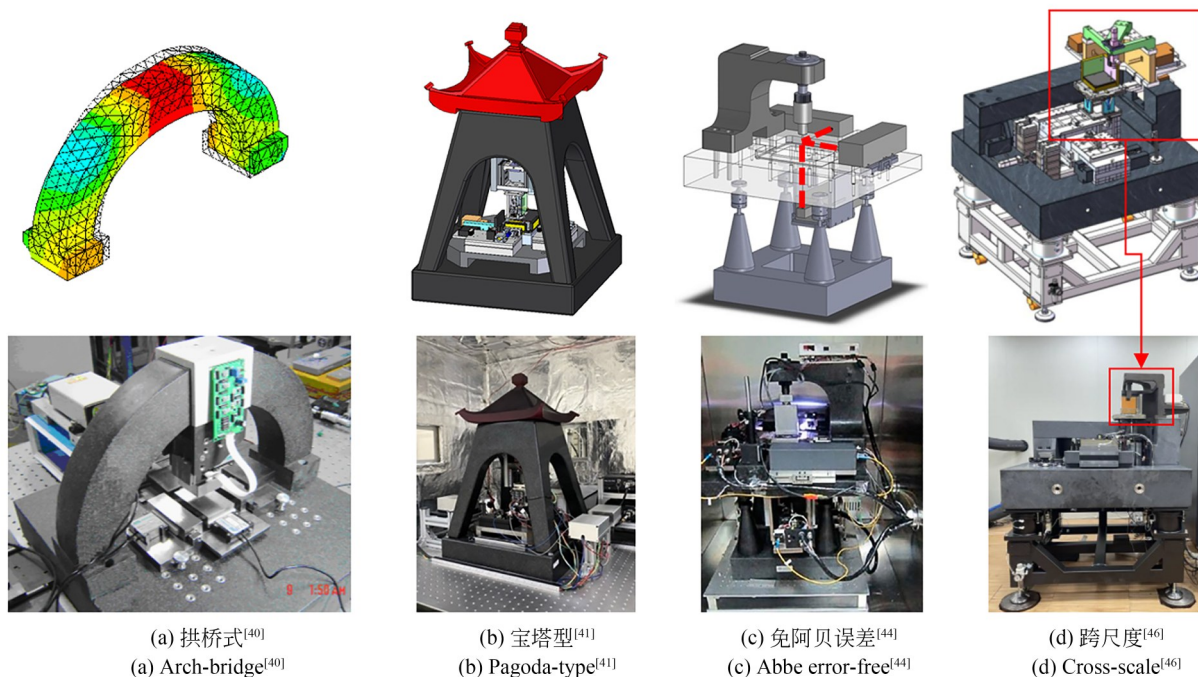


图7 合肥工业大学研制的CMM

Fig. 7 CMM developed by HFUT

费业泰和黄强先提出了微纳米CMM的“331”布局^[44-45], 如图7(c)所示。通过“三线共点、三面共面、点面重合”设计, 使三轴测量轴线相交于测球中心, 三维全量程遵守阿贝原则, 首次实现国产机型的三维免阿贝误差测量, 在 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的测量范围内, 测量不确定度优于 100 nm , 该机型为第三代“免阿贝”微纳米CMM。随后, 在前三代研究成果的基础上, 黄强先又主持开发了跨尺度微纳米CMM, 测量范围扩大至 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 如图7(d)所示。整机采用三维空间内完全符合阿贝原则的结构设计, 通过宏、微运动台协同控制和驱动^[46-49], 利用六自由度纳米微动台实现工作台的准确移动和角运动误差的精确补偿, 补偿跨尺度运动中的累积误差, 并兼容接触式和非接触式组合探头, 融合了光学探头效率高和接触式测头精度高、可探测性强的优点, 组合探头通过共基座并行安装确保空间位置固定与安全距离。针对双探头坐标不统一的难题, 程夏英等设计了标准器进行坐标配准^[50-51], 通过坐标

转换模型实现多探头空间标定(偏差 $\leq \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$)。在数据融合方面, 采用贝叶斯加权估计处理重叠区域冗余数据, 结合贝叶斯滤波降噪算法提升三维形貌重建的可靠性。该方法较传统单测头测量效率提升65%, 在微结构复合形貌(如微孔+曲面)测量中, 重叠区数据融合精度达 $\pm 0.12\text{ }\mu\text{m}$ (置信概率95%), 为燃油喷嘴、光学镜片等复杂零件的纳米级全尺寸检测提供了新技术路径^[52]。

微纳米CMM的硬件设计核心在于阿贝误差控制与多自由度误差补偿。结构设计呈现两种典型方案: 其一为三轴全阿贝布局, 通过将测球中心与三轴测量线交点重合, 从根源上抑制阿贝误差, 但其对三维运动平台制造精度要求极高, 需在不同负载条件下同时满足纳米级定位精度与动态响应, 这导致成本激增且跨尺度测量受限; 其二采用二维阿贝工作台与 Z 轴探头复合结构, 利用 Z 向阿贝臂易测量特性进行误差补偿, 兼顾精度与工程实施可行性, 方案对比如表3所示。

表 3 典型结构设计的阿贝误差抑制对比
Tab. 3 Comparison of Abbe error suppression in typical structural designs

结构类型	阿贝原则维度	关键创新	精 度	局限制
堆叠式(早期)	无	聚四氟乙烯导轨+丝杠驱动	50 nm@30 mm ³	负载不均,阿贝误差大
2D 共面式	XOY 平面	光栅共面布局+空气轴承	闭环 5 nm	Z 轴阿贝臂未消除
3D 全正交式	XYZ 三维	标尺正交于测点+多光束干涉仪	分辨力 0.1 nm	运动台制造成本高
宝塔型(国内)	XOY 平面	对称结构+宏微协同补偿	不确定度 100 nm	Z 轴需动态补偿

3 探头系统及微探针制备

3.1 一体式微球探针制备

探针由测杆和测球构成,测球作为直接接触被测表面的“触针”,其几何精度(尤其是圆度误差)以及与测杆连接的偏心误差对测量精度至关重要。对于直径小于 100 μm 的微测球,传统的胶粘方法难以确保亚微米级的同心度要求,且胶层的老化、蠕变也会引入不稳定性。在早期研究中,本研究团队以光纤为探杆材料,采用胶粘法制备了直径为 200~300 μm 的光纤式探针^[53],并利用医疗注射针管作为套筒固定测杆(图 8(a))。实验表明,其测球圆度和偏心误差均小于 1 μm。然而,裸光纤的直径为 90 μm,光纤的刚度限制了进一步缩小测球尺寸的能力。为制备更小直径的探针,团队提出了拔丝法,即光纤加热拉制成细丝状,再对裁剪后的尖端进行电弧放电处理,形成球形探头(图 8(b))。这一方法成功制备出直径为 60 μm 的一体化光纤探针,但由于光纤材料刚度较低,在接触扫描测量时测杆易发生振动或变形,导致测量误差增大。

为解决这一问题,本团队又开发了一种基于高压电弧放电的钨球探针制备技术^[54-55]。其核心原理是:在充满惰性氩气保护的环境中,在钨丝(作为阴极)与对电极之间施加瞬时高压(1~12 kV),产生温度高达 13 356 K 的电弧。电弧瞬间熔化石英管中钨丝的尖端,在熔融态下,液态金属强大的表面张力使其自然收缩凝结成一个近乎完美的球体。该工艺的成功高度依赖于对关键参数的精准控制和深入理解,最新的研究构建了基于磁流体动力学(MHD)的二维数值模型,揭示了高压电弧法制备微钨测球的多物理场机理,发现钨丝成球分两阶段进行,先通过电弧锐化至原直径 50% 形成锥尖,再双向熔融成球,如图 9 所示。通过建立电弧温度与放电参数的定量模型,实现阴极温度的精准调控,实验验证误差小于 7.5%。当电弧温度控制在 12 000 K 时,所制备的钨测球综合性能最优,其平均直径为 82.9 μm、圆度为 0.57 μm、球心偏心为 0.66 μm,较传统方法提升约 50%。该研究攻克了微球成形过程的动态控制难题,为亚微米级高深宽比微结构测量提供了工艺基础^[56]。

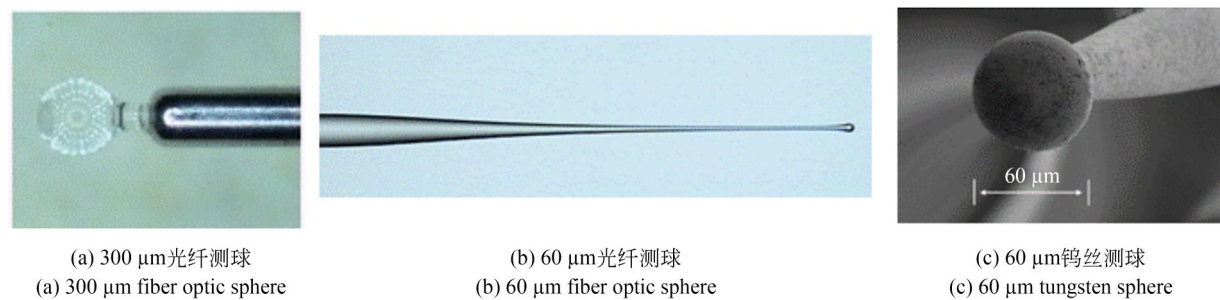


图 8 一体式微球探针^[53-54]
Fig. 8 One-piece microsphere probes^[53-54]

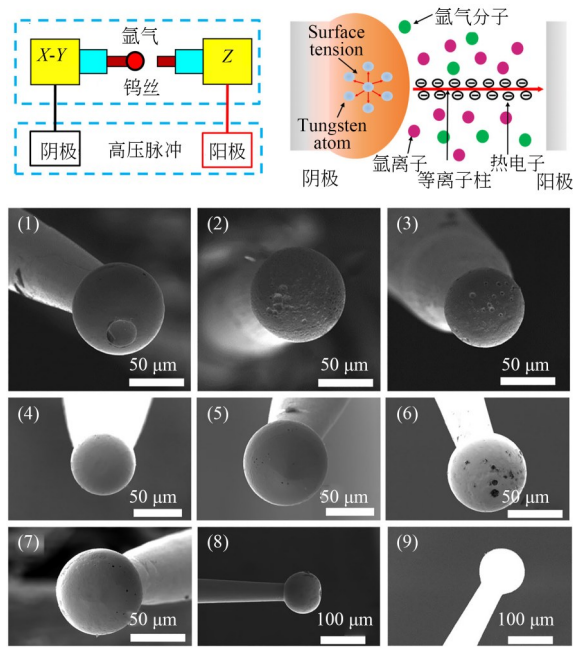


图 9 钨球成球机理示意图及钨球电镜图^[56]

Fig. 9 Schematic diagram of tungsten ball formation mechanism and electron microscope images of tungsten balls^[56]

3.2 探头系统

在微纳米 CMM 的探头系统研制方面,研究团队基于光电传感原理开发了一系列接触式纳米探头。早期采用改装 DVD 光学读取头构建四传感器阵列,使用金属簧线作为弹性机构达成 10 nm 触发灵敏度^[57-58]。随后发展的共光路探头集成二维角度传感器与迈克尔逊干涉仪,实现单轴 30 nm 的测量重复性,但受限反射镜偏摆容

差。为此并联光路方案被提出,以双激光器分立设计克服平面镜偏摆导致的信号丢失问题,将 XY 向量程扩展至 $\pm 20 \mu\text{m}$ 并保持 1 nm 的分辨率^[59]。为降低系统复杂度和成本,本团队又开发单光电传感器触发探头^[60]和双层弹性机构探头^[61],分别通过 QPD 位移检测与机械解耦设计,在达到优于 20 nm 的三维触发重复性同时显著降低成本。

为了进一步提升探头的灵敏度,研究团队最新设计了一种基于光杠杆放大原理和延长光路的探头,其结构如图 10 所示。该设计通过弹性机构上的反射镜实现入射激光的两次/多次反射,使出射激光的角度得以双重/多重放大,从而提高探头的灵敏度。为增强 Z 方向的感测灵敏度,探头采用非对称簧片设计。该设计使得在 Z 向触发时,簧片在上下平动的同时产生额外的角度变化,从而有效放大 Z 向灵敏度。实验结果表明,该探头的量程为 X, Y 方向 $\pm 12 \mu\text{m}$, Z 方向 $12 \mu\text{m}$,分辨力可达 1 nm,测量重复性优于 20 nm^[62]。其多重光路设计与机械创新将微位移检测灵敏度提升 40%,配备团队自行制备的一体式钨球微探针,为高深宽比微结构测量提供了新方法。

上述探头系统的改进和优化方式分为 3 种:其一,光学路径从共光路向并联光路和延长结构发展,以提升抗干扰能力与量程(从 $\pm 10 \mu\text{m}$ 扩大至 $\pm 20 \mu\text{m}$);其二,弹性机构设计从单层簧片演进至非对称/双层解耦结构,实现多维位移独立

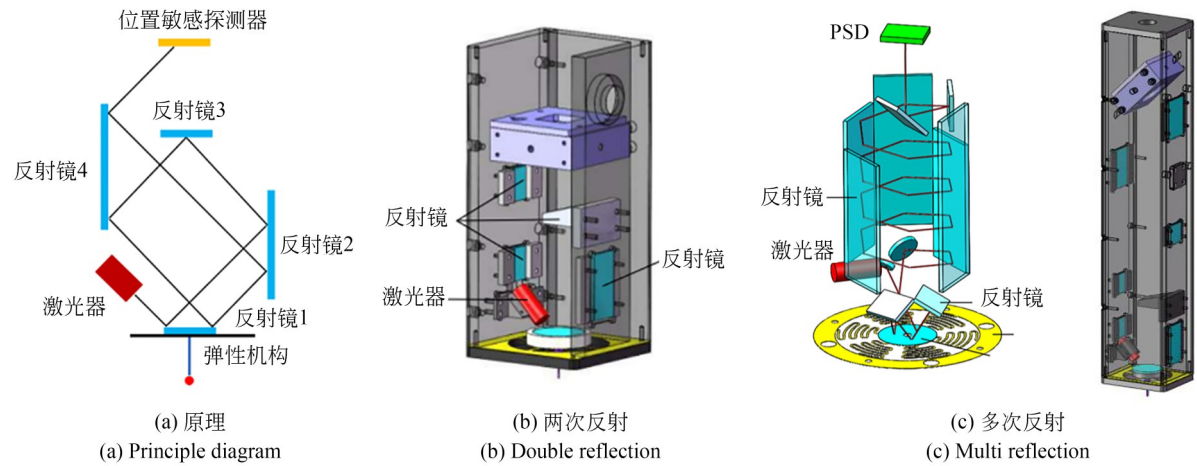


图 10 基于光杠杆原理的延长光路探头结构^[62]

Fig. 10 Extended optical path probe structure based on optical lever principle^[62]

检测;其三,在保证纳米级重复性前提下,通过光路简化与组件复用持续降低制造成本。基于光杠杆放大原理的探头多重反射与非对称簧片设计,成功解决了位移检测分辨力与量程的矛盾,其恒温环境(20 ± 0.05) $^{\circ}\text{C}$ 下在 0.5 小时内漂移小于 1 nm 的稳定性指标为微纳制造现场测量提供了可行性方案。

4 整机误差补偿技术

对于任一 CMM,其探头测球中心所能到达的 X-Y-Z 三轴极限位置点构成的长方体区域为 CMM 的测量空间,将测球中心在此空间内任意位置的测量误差称为 CMM 的空间误差^[63]。当前微纳米 CMM 的空间误差补偿主要围绕运动轴角运动误差与直线度误差展开。在角运动误差补偿方面,德国伊尔梅瑙工业大学通过双光束干涉仪测量运动平台的实时偏摆角,随后利用压电驱动器对运动台的姿态角进行主动调整,抵消三轴角运动误差,将角运动控制精度提升至 0.05",残余阿贝误差降至 0.1 nm 以下^[64-65]。上述补偿方法通过硬件闭环控制将角运动误差降低甚至抵消,实现各轴阿贝误差的补偿目的。

软件补偿技术是通过测量获取误差源数据,然后建立误差补偿数学模型的方式来提高空间测量精度。CMM 的误差源主要包括 21 项几何误差、热变形/力变形误差、探测误差和动态误差。其中,21 项几何误差是由三轴运动机构产生的多自由度误差,针对多自由度误差的测量和补偿容易通过数学建模实现,探头的探测误差可以通过三维标准位移台标定预先获得,这两类误差均能够定量分析和补偿,可利用软件将误差值存入测量软件中,在微纳米 CMM 执行测量任务时随时取出,用于补偿当前测量的三维坐标值。日本东京大学的高曾教授提出了一种多功能复合探头,专门用于测量运动平台的偏摆角和直线度误差^[11]。通过 3 台位移干涉仪对反射镜形状的冗余测量,获取 3 个位移数据和 1 个角度数据。基于这些冗余测量数据,建立了测量值、长条反射镜形状误差、运动平台直线度误差及偏摆角误差之间的映射关系。利用最小二乘法求解这一方程,能够有效分离出平台的直线度误差和偏摆角误差,从而实现误差补偿。通过该方法,微纳米

CMM 的测量不确定度可降低至 50 nm。

热/力变形以及动态特性引起的误差,其作用模型十分复杂、机理尚未明确,由于其建模还缺乏理论依据,现有研究只能通过评估该项误差的大小来实现精度提高目的。研究人员通常通过评估误差引起的测量不确定度分量来建立误差预算表。该表以误差数据库的形式描述测量机在不同位置处各类误差源导致的不确定度分量,并通过计算机测量软件实现实时补偿。荷兰埃因霍温理工大学的 Vermeulen 分析了测量机的多种误差来源,包括结构刚度、温度变化和探测误差,从而预测并建立了误差数据库,最终实现了不确定度约 100 nm 的测量精度^[27]。英国国家物理实验室的 Peggs 通过对干涉仪、反射棱镜、计量结构和探头误差的理论分析,得出综合不确定度为 11 nm^[12-13]。此外,黄强先设计了一台具有三维免阿贝误差的微纳米 CMM,并对系统误差(如激光干涉仪的波长频率稳定性、测量镜的平面度误差以及 X/Y 轴正交误差)进行标定,用于评估该测量机的综合不确定度。

上述误差补偿方法的共同特性是针对特定测量机结构开展分析,缺乏通用性。此外,大多数几何误差源的测量仍采用离线或部分离线的方式,通过理论分析与计算完成。这些方法虽能针对性提升精度,但尚未形成普适性全局补偿模型,且这类方法的有效性和可靠性可能随测量时间推移而下降。范光照等提出基于阿贝-布莱恩原则的空间误差矩阵传递法(Vector transform, VT),突破传统齐次坐标变换模型的局限^[66-67]。该方法通过明确定义阿贝点(线性误差测量基准)与布莱恩点(角度传递基准),构建几何误差向空间误差的传递模型,实现 21 项误差源的系统建模,其创新性在于将自研的微型 Michelson 激光干涉仪和自准直仪集成于测量机本体,实时采集运动轴线性运动误差与角偏差数据,通过在线解算生成动态补偿量。实验结果表明,该方法使自主研制的宝塔型微纳米 CMM 重复性精度提升 65%。该补偿方法和模型严格遵循阿贝-布莱恩原则,清晰定义了误差传递路径,并通过几何误差的原位测量与实时修正(图 11)避免离线标定导致的时效性衰减,该补偿方法具有一般通用性,可适配不同构型的测量机。

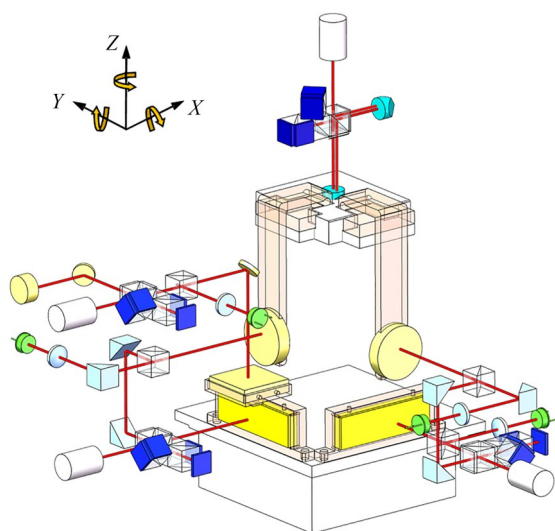
图 11 微纳米 CMM 三轴运动误差原位测量^[66]

Fig. 11 In-situ measurement of three-axis motion errors of micro/nano-CMM^[66]

5 测量环境控制

微纳米测量对环境条件的变化极为敏感,外界环境因素常成为误差的主要来源。其中,温度波动会引发测量设备和被测物的形变,同时影响传感器的稳定性,导致示值偏移;振动可能在位移检测过程中引入叠加误差。据研究,当环境温度波动 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,微纳米三坐标测量设备的热变形可达 180 nm ,远超其 100 nm 的目标测量不确定度。为确保测量结果的准确性,研究团队先后研制了高精度的恒温箱和低频加速度计,用于保障微纳米 CMM 的测量环境。

5.1 高精度恒温箱的研究与应用

分体式恒温箱依靠气流循环实现温度调节,利用送风系统将冷气导入箱体,从而达到高精度的温度控制。这种设计尽管在控温精度上优于恒温实验室,但送风系统产生的随机振动以及气体循环引发的湍流效应,可能对微纳米测量产生不可忽视的误差^[68]。为克服上述问题,李瑞君提出并研制了一种基于自然对流原理的新型高精度恒温箱,该设计兼具高精度、无振动、小体积和低成本等特点。该恒温箱以亚克力板作为主体框架,并采用真空绝热板(具有极低导热系数)构建绝热箱体。顶部均匀安装了多组可调功率的半导体制冷片,如图 12 所示。当制冷功能开启

时,冷气由上至下单向流动,与上升的热空气自然对流并进行热交换,从而确保箱体内部温度分布的均匀性,同时避免了分体式恒温箱中压缩机和送风系统引发的振动问题。实验结果表明,该恒温箱在温控达到稳态后,其温度波动小于 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温精度优于一级恒温箱的标准。该设备为微纳米测量提供了可靠的环境温度控制方案,已成功应用在宝塔型微纳米 CMM 的测量环境保障上。在该恒温箱的应用下,激光干涉仪的位移跳变量从 158 nm 降低至 7 nm ,位移漂移量降低了 95% ^[69]。

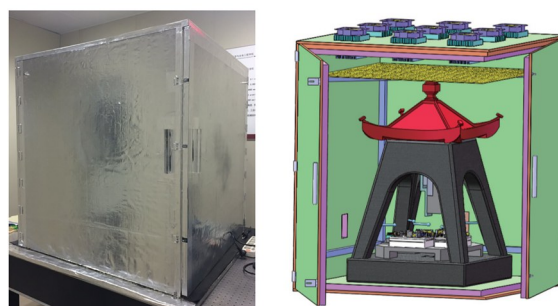
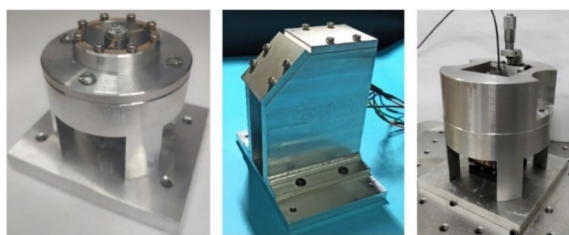


图 12 恒温箱控制系统组成及实物图

Fig. 12 Composition of constant temperature box control system and its physical diagram

5.2 振动控制与低频加速度计设计

传统被动隔振系统对于频率低于 10 Hz 的振动抑制效果有限,因此需采用主动隔振技术进行补充。主动隔振系统通常由加速度计、致动器和控制系统构成。本团队设计了一种谐振频率为 50 Hz 的低频加速度计,以满足低频环境测量的需求。该低频加速度计融合了先进的光学传感器,显著提升了性能^[70-71]。其中,利用激光聚焦位移传感器提高位移测量精度;通过激光三角法位移传感器增强灵敏度;采用基于激光自准直原理的二维角度传感器提升多维测量能力。经优化设计,低频加速度计的分辨力达到 $40\text{ }\mu\text{g}$,具备优异的灵敏度和线性度。此外,团队成功研制出一维、二维及三维低频加速度计(图 13),适用于多维振动监测需求。通过以上技术改进,低频加速度计在小于 10 Hz 的振动环境中展现出优异性能,为微纳米测量系统的振动控制提供了可靠支持,显著提升了测量精度^[72-73]。



一维低频加速度计 二维低频加速度计 三维低频加速度计

图 13 合肥工业大学开发的低频加速度计^[72-73]

Fig. 13 Low-frequency accelerometer developed by HFUT^[72-73]

6 测量机应用测试

6.1 微尺寸测量视觉导引系统

在精密制造领域,微深孔结构的几何参数测量直接决定着关键部件(如航空发动机燃油喷嘴、精密医疗器械流道等)的性能可靠性^[74-75]。传统测量方法面临严峻挑战:光学手段受衍射极限制约难以探测亚百微米孔径,而CMM虽具备纳米级精度潜力,却因微探针(直径可至 $60\text{ }\mu\text{m}$)难以精准定位进入微孔(直径 $90\sim 110\text{ }\mu\text{m}$),导致应用受限。针对这一瓶颈,本团队提出一套创新的视觉引导方法,通过双相机协同感知架构与自适应标定技术,实现了微纳米CMM在微尺度空间的测量自主导航能力^[76]。该系统采用呈 45° 夹角布局的高分辨率工业相机与远心光学系统,构建前视-侧视双传感单元,实时捕捉测针与微孔的空间位姿关系,如图14所示。摒弃传统双目视觉依赖标定板的复杂流程,利用测针首次移动的物理位移与图像像素位移自动解算比例系数,实现后续运动轨迹的实时闭环控制。这种自标定机制显著提升了系统稳定性,克服了金属反光、运动模糊等工业现场干扰。

实验验证在自主搭建的微纳CMM平台开展,结果表明,该系统成功引导 $60\text{ }\mu\text{m}$ 钨球测针无碰撞进入 $90/100/110\text{ }\mu\text{m}$ 三类深孔(深径比 >5),平面定位精度稳定在 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$,三类孔径下的成功率均达100%,单孔引导时间约15秒内(估算值)^[77]。该技术已应用于航空发动机燃油喷嘴的检测,有助于提升产品质量。所提出的视觉导引测量系统的应用价值体现在四方面:一是建立无模型化操作规范,摆脱对CAD模型与精密夹具的依赖;二是通过自适应光源与图像处理技术

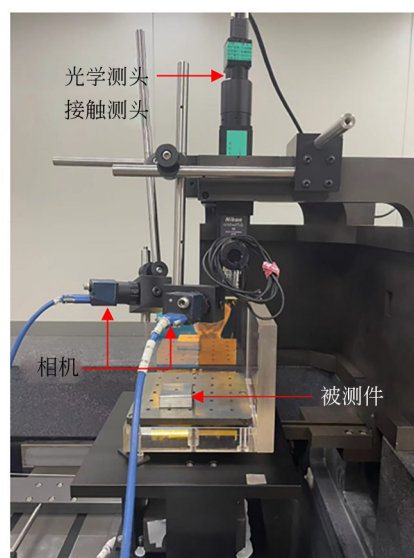


图 14 高精度视觉导引系统

Fig. 14 High-precision visual guidance system

保障强环境适应性;三是为智能测量系统提供标准化导引基础;四是采用物理位移-像素位移自标定技术,摒弃传统双目视觉的标定板依赖,在无人工干预下实现坐标系的自主建立。当前成果不仅解决了微孔接触式测量的核心难题,更通过集成深度学习目标检测算法(如YOLOv5)延伸至复杂特征的全自动测量。随着微机电系统与植入式医疗器械的微型化趋势,该视觉导引方法为跨尺度精密检测提供了可复用的技术路径,它与多传感器融合的拓展应用将成为精密测量领域的重要发展方向。

6.2 智能化测量

针对传统CMM依赖人工编程进行路径规划、难以融入自动化产线和测量效率低的问题,本团队提出了基于深度学习的智能测量系统。该系统采用双工业相机与触发式测头协同传感,融合视觉和触觉信息,利用YOLOv5算法实现工件典型特征(孔、柱体、球体、台阶、槽等)的自动实时识别(检测成功率100%)。通过逆透视变换匹配算法建立特征空间匹配模型(匹配成功率 $\geq 92\%$),系统通过蚁群算法优化测量路径序列,结合特征分类分层采样策略,实现全流程“检测-定位-测量”闭环自动化,如图15所示。实验表明,在无CAD模型且无复杂相机标定程序的条件下,系统对多特征工件的测量效率提升40%(单件测量时间 $\leq 8\text{ min}$),重复测量坐标偏差稳定在

$\pm 1.5 \mu\text{m}$ 内^[77]。该技术突破传统测量对人工干预的依赖,已成功应用于汽车零部件产线,为复杂特征工件的无人化精密检测提供标准化解决方案。

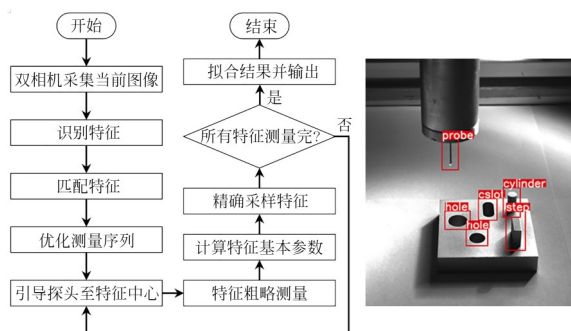


图 15 智能测量系统测量流程及特征识别

Fig. 15 Workflow of intelligent measurement system and identification of features

6.3 复杂微结构高精度测量

针对高深宽比微结构内尺寸(横向尺寸 $\leq 100 \mu\text{m}$,深宽比 $\geq 5:1$)的纳米级精度测量难题,本团队基于自主开发的微纳米CMM,利用团队自行研制的宝塔型微纳米CMM、视觉导引系统以及自行制备的一体式钨球探针(测球直径约 $60 \mu\text{m}$),实现了对百微米级盲孔内壁的直径、深度的测量。测量过程中,利用双远心视觉系统引导测针精确定位微孔中心,通过分层扫描策略(深度方向间隔 $100 \mu\text{m}$)采集截面圆轮廓数据。实验中对电火花加工成型的标称直径为 $100 \mu\text{m}$ 的微孔(深径比 $5:1$)进行重复测量,如图16(a)所示。结果表明,直径测量重复性达 48 nm (σ),深度测量重复性为 22 nm (σ)。经系统误差合成分析,直径测量扩展不确定度为 192 nm ($k=2$),圆度测量误差扩展不确定度为 226 nm ($k=2$)^[78]。该精度水平显著优于现有光学法,在工程尺度上实现了“毫米行程-纳米精度”的跨尺度测量能力。

针对宽度低至 $100 \mu\text{m}$ 微槽内尺寸测量难题(测球尺寸受限、传统测头无法进入),利用跨尺度微纳米CMM配备基于石英音叉的三维谐振触发测头实现高精度测量。如图16(b)所示,测量过程中,利用直径为 $59 \mu\text{m}$ 的光纤测球经引导装置进入微槽,通过测槽内侧面多点最小二乘拟合确定平面,再测量对侧单点计算内宽尺寸,经

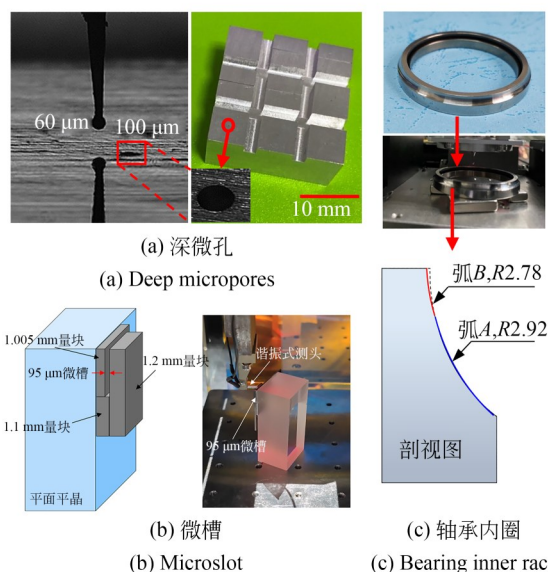


图 16 基于微纳米CMM的微结构高精度测量

Fig. 16 High-precision measurement of microstructures based on micro-nano CMM

测球直径补偿获得结果。实验表明,微槽内宽平均值为 $94.941 \mu\text{m}$,测量重复性为 238 nm ($k=2$),最大测量误差为 161 nm 。该方法实现了低于 $100 \mu\text{m}$ 微槽内尺寸的纳米级接触式测量,为微尺度精密测量技术提供了重要技术支持。

针对轴承内圈滚道精密测量难题(图16(c)),聚焦影响轴承寿命的滚珠接触弧段(对应圆心角小,测量点拟合易放大误差),采用微纳米CMM实现接触式纳米级测量。测量过程通过磁吸固定轴承内圈,建立工件坐标系,在短弧上精测连续多点获取测球球心坐标,经球径补偿与最小二乘圆拟合计算轮廓参数。实验表明,半径测量标准差达 161 nm ,圆度误差测量标准差为 $4.4 \mu\text{m}$ ^[79]。该成果在微米尺度上实现轴承滚道弧段的纳米级接触式测量,为轴承服役寿命预测与失效分析提供了可溯源的高精度数据支持。

宝塔型微纳米CMM的测量应用解决了两项工程难题:其一,微型钨测球解决了商业测球($>300 \mu\text{m}$)无法进入微孔的物理瓶颈;其二,提出了微纳米CMM全局空间误差补偿方法,并实现对CMM几何误差的实时原位测量,显著提高了测量机的空间误差精度。系统在恒温环境(20 ± 0.02) $^{\circ}\text{C}$ 下验证了长期稳定性,5日内深微

孔直径测量偏差小于 0.1%。该成果为高深宽比深微孔的内壁测量提供了接触式纳米计量的方案,为燃油喷嘴、微流控芯片等关键部件的内壁形貌检测提供了可溯源的标准化方法,并为后续内壁粗糙度测量(需更换探针)奠定了技术基础。

7 结论与展望

本文系统梳理了微纳米 CMM 近年来的技术演进,涵盖整机结构设计、纳米探头开发、误差补偿机制及环境控制等核心领域。目前,该领域研究主要由德国伊尔梅瑙工业大学、荷兰代尔夫特理工大学等国际机构主导,其成果虽已商品化,但高昂成本制约了产业推广。我国立足自主创新,通过低成本小型化路径突破技术封锁,研发出迭代样机和多种纳米探头,该系统基本实现了全国产化,并掌握了核心技术。我们自研的微型钨测球制备技术,突破了无法进入 100 μm 以内内孔测量的物理极限,成功应用于工业微零件纳米级测量。此外,本研究团队提出的基于阿贝和布莱恩原则的全局空间误差补偿方法,将空间精度提高至百纳米以内。基于以上工作,成功实现了横向尺度小于 100 μm 的高深宽比内尺寸精确测量,为高端装备国产化提供了关键技术支撑。

面向未来,微纳米 CMM 需在四大方向寻求突破性进展:

(1)兼具大行程、快速和高分辨力的驱动控制技术。当前测量范围多限于毫米级,跨尺度测量依赖宏动台和微动台搭配协同控制实现,亟需开发纳米定位系统,实现大量程和高精度闭环定位控制,在跨尺度(如 500 mm $\times$ 500 mm $\times$ 100 mm 级)测量范围内保持 100 nm 的空间精度,满足航空航天复杂构件以及半导体 12 英寸晶圆的内尺寸检测需求;

(2)高速、高效率自适应测量技术。突破现

有逐点接触式测量的效率瓶颈,提高探针逼近速度,发展基于机器学习的路径规划与动态测力控制,在保证纳米精度的前提下提升测量效率,推动微纳制造的在线应用;

(3)多模态探头测量数据融合与智能解算。结合微纳米物理探针、光学探针等多传感器,构建“单机多头”集成测量系统。利用深度学习算法融合多源数据,解决深槽盲孔等复杂结构的形貌重建难题,使测量维度从几何尺寸拓展至表面功能特性;

(4)环境自适应智能测量。突破恒温隔振实验室环境限制,开发温漂-振动-形变多物理场实时补偿模型,结合数字孪生技术构建自感知、自校准系统,使设备在工业现场环境下仍能维持纳米级稳定性,为芯片制造、精密光学等产业提供可部署的计量解决方案。

值得关注的是,微纳米 CMM 的空间精度自校正技术也将成为关键突破点。当前依赖实物标准件的精度溯源体系受限于环境稳定性与运输损耗,未来需发展基于自校正数学模型的精度校正方法,通过对标准件多姿态冗余测量实现测量机误差与标准件误差的解耦计算。该方法不依赖标准件本身的制造精度,能够实现纳米级绝对精度以内“测得准”的目标。若能在百毫米空间内达成优于 10 nm 的绝对精度(接近 EUV 光刻线宽水平),将直接支撑国产 3D 封装芯片可溯源制造,从根本上扭转高端计量设备受制于人的被动局面。该方法和技术对我国国产芯片制造业具有非常重要的应用价值。

作者贡献声明:

何亚雄:调查研究,初稿撰写;

李瑞君:研究指导,论文审阅与修改;

黄强先:提供研究资源与支持;

程真英:论文定稿与审阅;

范光照:研究思路提出及指导。

参考文献:

[1] DE HUU M, LOCHBRUNNER M, KÜNG A, *et al.* Dimensional calibration of small critical flow Venturi nozzles[J]. *Measurement: Sensors*, 2025, 38: 101539.

[2] SEN M H, SHAN H S. A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(2): 137-152.

[3] TANG Y, TAN W K, FUH J Y H, *et al.* Micro-mould fabrication for a micro-gear *via* vacuum cast-

- ing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192: 334-339.
- [4] YUAN W, LI L H, LEE W B, *et al.* Fabrication of microlens array and its application: a review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(1): 16.
- [5] MALTA D, VICK E, GOODWIN S, *et al.* Fabrication of TSV-based silicon interposers[C]. 2010 *IEEE International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*. November 16-18, 2010, Munich, Germany. IEEE, 2010: 1-6.
- [6] 陈亮嘉. 频闪白光干涉技术[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 1-30.
- CHEN L J. Stroboscopic white-light interferometry [J]. *Measurement Technology*, 2018, 38(3): 1-30. (in Chinese)
- [7] 刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2473-2479.
- LIU Q, YANG W CH, YUAN D CH, *et al.* Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2473-2479. (in Chinese)
- [8] WANG J Q, YAN Y D, LI Z H, *et al.* Towards understanding the machining mechanism of the atomic force microscopy tip-based nanomilling process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 162: 103701.
- [9] Renishaw Probe Official Store [Z/OL]. <https://www.renishaw.com/Shop/Default/Home/Style>. (2025-12-12)
- [10] CHANTHAWONG N, TAKAHASHI S, TAKAMASU K, *et al.* Performance evaluation of a coordinate measuring machine's axis using a high-frequency repetition mode of a mode-locked fiber laser [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(8): 1507-1512.
- [11] YANG P, TAKAMURA T, TAKAHASHI S, *et al.* Development of high-precision micro-coordinate measuring machine: Multi-probe measurement system for measuring yaw and straightness motion error of XY linear stage[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(3): 424-430.
- [12] PEGGS G N, LEWIS A J, OLDFIELD S. Design for a compact high-accuracy CMM[J]. *CIRP Annals*, 1999, 48(1): 417-420.
- [13] LEACH R K, MURPHY J. The design of co-ordinate measuring probe for characterising truly three-dimensional micro-structures[C]. *4th euspen International Conference*. 31 May 2004 - 2 June 2004, Glasgow, UK. NPL, 2004: 230-231.
- [14] KRAMAR J A. Nanometre resolution metrology with the molecular measuring machine [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(11): 2121-2128.
- [15] KRAMAR J A, DIXSON R, ORJI N G. Scanning probe microscope dimensional metrology at NIST [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(2): 024001.
- [16] KÜNG A, MELI F, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(2): 319.
- [17] SPAAN H A M, DONKER R, WIDDERSHOVEN I. ISARA 400: Enabling ultra-precision coordinate metrology for large parts[C]. *International Symposium on Measurement and Quality Control*. 2010.
- [18] WIDDERSHOVEN I, DONKER R L, SPAAN H M. Realization and calibration of the "isara 400" ultra-precision CMM [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, 311: 012002.
- [19] BOEHM G, PAETZELT H, ARNOLD T. Ultra-precision tactile profilometry using the ISARA 400 [C]. *Sensors and Measuring Systems 2014; 17. ITG/GMA Symposium*. June 3-4, 2014, Nuremberg, Germany. VDE, 2014: 1-4.
- [20] JÄGER G, HAUSOTTE T, MANSKE E, *et al.* Nanomeasuring and nanopositioning engineering [J]. *Measurement*, 2010, 43(9): 1099-1105.
- [21] MANSKE E, JÄGER G, HAUSOTTE T, *et al.* Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 074001.
- [22] JÄGER G, MANSKE E, HAUSOTTE T, *et al.* The metrological basis and operation of nanopositioning and nanomeasuring machine NMM-1 [J]. *Tm-Technisches Messen*, 2009, 76(5): 227-234.
- [23] FAN K C, FEI Y T, YU X F, *et al.* Study of a noncontact type micro-CMM with arch-bridge and

- nanopositioning stages[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23 (3) : 276-284.
- [24] FAN K C, CHENG F, WANG H Y, *et al.* The system and the mechatronics of a pagoda type micro-CMM[J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2012, 8(1/2): 67.
- [25] WANG H Y, FAN K C, YE J K, *et al.* A long-stroke nanopositioning control system of the coplanar stage[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 348-356.
- [26] FAN K C, LAI Z F, WU P, *et al.* A displacement spindle in a micro/nano level[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18 (6) : 1710.
- [27] BOS E, MOERS T, VAN RIEL M. Design and verification of an ultra-precision 3D-coordinate measuring machine with parallel drives[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26 (8) : 085904.
- [28] VERMEULEN M M P A, ROSIELLE P C J N, SCHELLEKENS P H J. Design of a high-precision 3D-coordinate measuring machine[J]. *CIRP Annals*, 1998, 47(1): 447-450.
- [29] BOS E, MOERS A J M, VAN RIEL M. Trina-no N100 3D measurements with nanometer repeatability and effects of probe-surface interaction[C]. *Proceedings of the Twenty-Seventh Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering: ASPE 2012 Annual Meeting. October 21-26, 2012 San Diego, California (US)*.
- [30] Brand U, Kleine-Besten T, Schwenke H. Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components[C]. *The Fifteenth Annual Meeting The American Society for Precision Engineering. October 22-27, 2000, Double-Tree Paradise Valley Resort Scottsdale, Arizona*. 2000: 542-546.
- [31] DAI G L, NEUGEBAUER M, STEIN M, *et al.* Overview of 3D micro- and nanocoordinate metrology at PTB[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(9): 257.
- [32] CAO S, BRAND U, KLEINE-BESTEN T, *et al.* Recent developments in dimensional metrology for microsystem components [J]. *Microsystem Technologies*, 2002, 8(1): 3-6.
- [33] HUANG Q X, WU K, WANG C C, *et al.* Development of an abbe error free micro coordinate measuring machine [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6 (4): 97.
- [34] HUANG Q X, CHEN C, WU K, *et al.* A three-dimensional resonant triggering probe for micro-CMM[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4): 403.
- [35] HUANG Q X, XU J, QIN X Z, *et al.* Three-dimensional nano measurement system based on resonant trigger probe [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 7504009.
- [36] LIU Y L, CHENG Z Y, CHENG M T, *et al.* High-precision multi-scale data fusion method for micro-nano CMM and white light interferometer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 188: 112927.
- [37] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machines* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [38] TAKAMASU K, HIRAKI M, ENAMI K, *et al.* Development of nano-CMM and parallel-CMM - CMM in the 21th century [C]. *International Dimensional Metrology Workshop*. 1999: 10-13.
- [39] 叶孝佑, 高思田. 几何量微纳米级精密测量技术研究的若干新进展[J]. *计量学报*, 2006(z1): 1-5.
- YE X Y, GAO S T. Some new progress in the research of geometric quantity micro-nano precision measurement technology[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006(z1): 1-5. (in Chinese)
- [40] KUANG C F, WANG W L, CHENG F. Innovative design of a new CMM structure[C]. *2nd International Symposium on Precision Mechanical Measurements (ISPM)*, 24th~ 28th, Aug, Beijing, China. 2004, 17(2):170-173.
- [41] HE Y X, LIN R W, LI R J, *et al.* Nanopositioning X-Y stage with an embedded Six-DOF error compensation system based on Abbe and Bryan principles[J]. *Measurement*, 2024, 227: 114218.
- [42] HE Y X, LI R J, LI J, *et al.* Nanometer precision height gauge for small holes with high aspect ratio [J]. *Precision Engineering*, 2022, 78: 189-198.
- [43] CHENG F, FAN K C, MIAO J W, *et al.* A BPNN-PID based long-stroke nanopositioning control scheme driven by ultrasonic motor[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3): 485-493.

- [44] 黄强先, 余夫领, 宫二敏, 等. 零阿贝误差的纳米三坐标测量机工作台及误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 664-671.
HUANG Q X, YU F L, GONG E M, *et al.* Nano-CMM stage with zero Abbe error and its error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 664-671. (in Chinese)
- [45] 费业泰, 王晨晨, 尚平. 微纳米级三维测量“331”系统及其测量方法: CN101419044B[P]. 2010-10-06.
FEI Y T, WANG CH CH, SHANG P. Micro-nano-scale three-dimensional measurement “311” system and measurement method: CN101419044B[P]. 2010-10-06. (in Chinese)
- [46] ZHANG Z Y, HUANG Q X, WANG G P, *et al.* Design method and error analysis of 3D measurement system in accordance with the Abbe principle[J]. *Measurement*, 2025, 252: 117369.
- [47] ZHANG Z Y, HUANG Q X, LIU H J, *et al.* Design and driving control of cross-scale micro-nano coordinate measuring machine[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1010411.
- [48] ZHANG F, HUANG Q X, ZHANG C B, *et al.* Design and experiment of multidimensional and subnanometer stage driven by spatially distributed piezoelectric ceramics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(5): 053702.
- [49] LI J, LIN R W, ZHANG C Y, *et al.* Online volumetric error compensation for micro-CMMs using embedded multi-DOF (degree-of-freedom) measurement systems based on Abbe and Bryan principles[J]. *Precision Engineering*, 2025, 96: 533-547.
- [50] 程真英, 徐东见, 张成瑶, 等. 接触式与白光干涉测头复合测量坐标统一与数据融合[J]. 光学精密工程, 2024, 32(17): 2698-2707.
CHENG ZH Y, XU D J, ZHANG CH Y, *et al.* Coordinate unification and data fusion for composite measurement with contact and white light interferometric probes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2698-2707. (in Chinese)
- [51] 程真英, 龚文超, 刘云龙, 等. 坐标统一用三棱台标准器设计与精度分析[J]. 机械工程学报, 2024, 60(22): 204-211.
CHENG ZH Y, GONG W CH, LIU Y L, *et al.* Design and precision analysis of high-precision triangular prism standard device for coordinate unification[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(22): 204-211. (in Chinese)
- [52] SHEN Y J, ZHANG Y, YAN L F, *et al.* Efficient calibration of a scanning probe on CMM[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1003508.
- [53] FAN K C, LI R J, XU P. Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machines[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2(1): 1-15.
- [54] 李瑞君, 赵亮, 姚攀, 等. 钨极高压微电弧温度模型的建立与验证[J]. 中国机械工程, 2024, 35(7): 1188-1193, 1204.
LI R J, ZHAO L, YAO P, *et al.* Temperature modeling and verification of high-voltage micro-arc with a tungsten electrode[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(7): 1188-1193, 1204. (in Chinese)
- [55] LI R J, CHEN C, LI D D, *et al.* Ball tips of micro/nano probing systems: a review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 30(2): 222-230.
- [56] YAO P, CHENG Z Y, CHEN L, *et al.* Modeling and verification of arc temperature and melt formation for high-precision fabrication of micro-tungsten styli[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(9): 14749-14759.
- [57] 高伟, 陈晓怀, 陈贺. 一种基于DVD读取头的非接触触发探头[J]. 计量学报, 2012(12): 35-40.
GAO W, CHEN X H, CHEN H. A non-contact trigger probe based on DVD pick-up head[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2012(12): 35-40. (in Chinese)
- [58] 李瑞君, 钱剑钊, 龚伟, 等. 基于DVD光学读取头的大量程高精度扫描探头[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(12): 1761-1763, 1835.
LI R J, QIAN J ZH, GONG W, *et al.* Long-range and high-accuracy scanning probe based on a DVD pick-up head[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2011, 34(12): 1761-1763, 1835. (in Chinese)
- [59] LI R J, FAN K C, HUANG Q X, *et al.* A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 220-229.
- [60] FENG X Y, XU P, LI R J, *et al.* Development of

- a high-resolution touch trigger probe based on an optical lever for measuring micro components[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 6466-6475.
- [61] 许鹏. 面向高深宽比微尺寸的三维纳米测量探头关键技术与系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- XU P. *Development and Key Techniques of a 3D Nano-Measurement Probing System for High Aspect Ratio Micro Structures*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [62] XU P, LI R J, SHEN Y, *et al.* Nano precision noncontact probing system using tungsten ball tip for high aspect ratio structures with horizontal internal dimensions below 100 μm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1001810.
- [63] International Organization for Standardization. ISO 10360-1. Geometrical product specifications (GPS), acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: vocabulary[S]. 2000.
- [64] CLAVERLEY J D, LEACH R K. A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 1-15.
- [65] MANSKE E, FRÖHLICH T, FÜBL R, *et al.* Progress of nanopositioning and nanomeasuring machines for cross-scale measurement with sub-nanometre precision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8): 085005.
- [66] HE Y X, LI R J, LI J, *et al.* Novel compensation method of volumetric errors for micro-coordinate measuring machines using abbe and Bryan principles [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1004510.
- [67] 赵壮, 姜志峰, 张忠宁, 等. 符合阿贝原则的数控机床几何误差建模[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 885-897.
- ZHAO ZH, LOU ZH F, ZHANG ZH N, *et al.* Geometric error model of CNC machine tools based on Abbe principle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 885-897. (in Chinese)
- [68] 张辉. 微纳米测量环境控制机理及系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- ZHANG H. *Research on Control Theory and System of Environment for Micro/Nano-Meter Measurement*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [69] 冯建, 李瑞君, 何亚雄, 等. 微纳米三坐标测量机的高精度恒温箱研制[J]. 计量学报, 2015, 36(5): 455-459.
- FENG J, LI R J, HE Y X, *et al.* Development of a high precision constant-temperature chamber for micro-nanometric CMM[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(5): 455-459. (in Chinese)
- [70] LEI Y J, LI R J, CHEN R X, *et al.* A high-precision two-dimensional micro-accelerometer for low-frequency and micro-vibrations[J]. *Precision Engineering*, 2021, 67: 419-427.
- [71] LEI Y J, LI R J, JIANG W S, *et al.* Development of a high-precision two-dimensional coplanar micro-vibration generator [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 105004.
- [72] LEI Y J, LI R J, ZHANG L S, *et al.* Optical accelerometers for detecting low-frequency micro-vibrations [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 3994.
- [73] LI R J, LEI Y J, ZHANG L S, *et al.* High-precision and low-cost vibration generator for low-frequency calibration system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(3): 034008.
- [74] 王呈, 刘涛, 穆轩, 等. 航空发动机叶片气膜孔测量技术研究[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 27-30.
- WANG CH, LIU T, MU X, *et al.* Research on aero engine blade film hole measuring technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2012, 32(5): 27-30. (in Chinese)
- [75] 段发阶, 牛广越, 刘昊, 等. 旋转叶片叶尖定时测量技术研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 45-64.
- DUAN F J, NIU G Y, LIU H, *et al.* A review of blade tip timing measurement technologies of rotating blades[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(1): 45-64. (in Chinese)
- [76] CHENG Z Y, SUN Y, LUAN H, *et al.* Self-calibration vision method and system for automatically moving CMM stylus into micro holes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3579-3584.
- [77] CHENG Z Y, SUN Y, HU K, *et al.* Deep learning - based intelligent measurement methods and system for CMM [J]. *Measurement*, 2023, 221: 113474.
- [78] HE Y X, LIN R W, LI J, *et al.* Nanoprecision

measurement of high-aspect-ratio microholes using sub-100- μm tungsten ball tip [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(24): 30893-30902.

[79] 何亚雄. 微纳米三坐标测量机空间误差补偿方法

研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.

HE Y X. *Study on Volumetric Error Compensation Method for Micro/Nano CMMs* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. (in Chinese)

作者简介:



何亚雄(1990—),男,湖北仙桃人,博士,硕士生导师,2023年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事微纳米三坐标测量机、声学光学检测等方面的研究。E-mail: yx-he@cjl. edu. cn

通讯作者:



李瑞君(1976—),男,内蒙古和林格尔县人,博士,教授,博士生导师,2013年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统及精密控制技术与系统的研究。E-mail: rj-li@hfut. edu. cn