

文章编号 1004-924X(2026)15-2369-09

电容式三维纳米测量测头

黄强先, 张星月, 郝蔚宁, 赵志浩, 张连生*, 程荣俊, 李红莉
(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室,
安徽 合肥 230009)

摘要: 三维纳米测头是微纳米三坐标测量机的一个关键部件, 现有三维纳米测头因存在测量性能不足, 无法满足实际需求的问题, 故提出一种基于电容位移传感器的三维纳米测量测头并通过实验验证了其性能。该测头主要由电容位移传感器、极板、弹性机构和探针等结构组成。三路高精度电容位移传感器呈正三角形分布, 利用建立的几何计算模型计算测球位移以得到测头姿态。实验结果表明, 测头三维分辨率优于 3 nm, 测量范围水平方向可达 260 μm , 竖直方向为 70 μm ; 水平方向接触重复性均优于 9.4 nm, 竖直方向重复性优于 8.7 nm。研究验证了该测头在微纳米尺度测量中的良好测量性能, 为精密制造与检测提供了有效的技术支撑。

关键词: 微纳米测量; 三坐标测量机; 接触式测头; 电容传感器

中图分类号: TH711; TB9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263415.2369

CSTR: 32169.14.OPE.20263415.2369

Capacitive 3D nanoscale measurement probe

HUANG Qiangxian, ZHANG Xingyue, HAO Weining, ZHAO Zhihao, ZHANG Liangsheng*,
CHENG Rongjun, LI Hongli

(Anhui Province Key Laboratory of Measurement Theory and Precision Instruments, School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

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

Abstract: Three-dimensional (3D) nanoprobe systems are critical components of micro/nano coordinate measuring machines; however, the measurement capability of existing probes remains insufficient for demanding practical applications. To address this limitation, a 3D nanoprobe based on capacitive displacement sensing is developed and experimentally evaluated. The probe comprises capacitive displacement sensors, electrode plates, a compliant mechanism, and a stylus. Three high-precision capacitive displacement sensors are arranged in an equilateral-triangular configuration. A geometric model converts the sensor outputs into the displacement of the probing sphere and determines the probe orientation. Experimental results demonstrated a 3D resolution better than 3 nm. The measurement range reached 260 μm in the horizontal direction and 70 μm in the vertical direction. Contact repeatability was better than 9.4 nm horizontally and 8.7 nm vertically. These results confirm the suitability of the proposed probe for micro/nanoscale

收稿日期: 2026-04-14; 修订日期: 2026-05-11.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2019YFB2004900)

dimensional measurement and support its application in precision manufacturing and inspection.

Key words: micro-nano measurement; coordinate measuring machines; contact probes; capacitive sensors

1 引言

微纳米三坐标测量机通常由测头系统、纳米定位和运动控制系统、数据处理和人机互动等组件构成^[1-2]。其中,测量测头作为测量机与被测物体的直接接触部件,对测量性能起着决定性作用^[3-4]。现代测量测头技术主要分为接触式和非接触式两种。在对精度要求极高的场景中,接触式测头凭借出色的重复性和可追溯性,已成为精密测量的首选^[5-7]。因此,接触式测头的性能直接决定了测量系统的精度上限,其结构与优化是突破微纳米测量技术瓶颈的关键^[8-9]。

近年来,国内外研究人员围绕三维纳米测头技术展开了多维度探索^[10-11]。根据传感原理的不同,测头主要分为压阻式、电感式、光电式、共振式与电容式等类型^[12-14]。Ferreira 等开发了一种双层薄膜堆叠结构的压阻式测头,实现了亚微米级位移测量精度,且其具备一定各向异性(水平与竖直刚度比)为 $0.4\sim 3$ ^[15]。然而,该测头的硅膜制造工艺繁琐,系统成本过高,且其精度低于电容传感设备。瑞士联邦计量局(METAS)的Meli 等研发了一种基于并联柔性铰链结构的电感式扫描测头。在该结构中,各方向测力与刚度一致,测力小于 0.5 mN ,刚度为 20 mN/mm ,触发重复性达到 5 nm ,测量范围为 $\pm 0.2\text{ mm}$,但测头惯性质量大、刚度低、共振频率过小,动态响应迟缓,扫描速度受限^[16-17]。合肥工业大学李瑞君^[18]教授团队设计并制造了一款基于双层弹性机构的低耦合扫描探头,通过上下两层的弹性机构设计,将水平方向与竖直方向信号分开,从结构上降低轴间耦合干扰,测量范围为水平 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$,竖直 $10\text{ }\mu\text{m}$,分辨力为 5 nm ,重复性优于 20 nm 。然而,该测头结构复杂,对环境因素较为敏感,且测量范围有限^[19]。英国诺丁汉大学的Alblalaihidi 等^[20-22]开发了一种基于三角柔性支撑结构的电容式测头,触发重复性为 5 nm ,三轴最大测量范围为 $14\text{ }\mu\text{m}$ 。该测头可通过压电致动器

和悬架结构实现高低刚度的切换,但存在测量范围受限,稳定性不足以及低刚度模式测量效率较低等问题。与压阻式、电感式等其他传感机制相比,电容传感具有灵敏度高、动态质量低及固有频率高的优势。但现有电容式测头的测量范围普遍较小,难以兼顾高分辨力与大测量范围的双重需求^[23],这也是当前电容式接触测头实用化的关键问题。

针对实验室自主研制的新型跨尺度微纳米三坐标测量机(CSMN-CMM)的整机性能参数及实际测量需求^[24],本文提出一种基于电容位移传感器的测量测头系统,主要由电容位移传感器、极板、弹性机构和探针组成,并通过建立一个基于该结构的测头测球位移计算模型,以验证所提系统的可行性。本设计在保持高分辨力的基础上,兼顾了测头的有效测量范围,为微纳米三坐标测量机的实用化提供了技术支撑。

2 原理

2.1 测头结构设计

本文设计的电容式三维纳米测量测头如图1所示,主要由电容位移传感器、极板、弹性机构和探针等结构组成。其中,弹性机构由外圈固定,呈水平设置;共设置3个电容位移传感器,阵列位于弹性机构上方,呈正三角形分布,正对着与弹

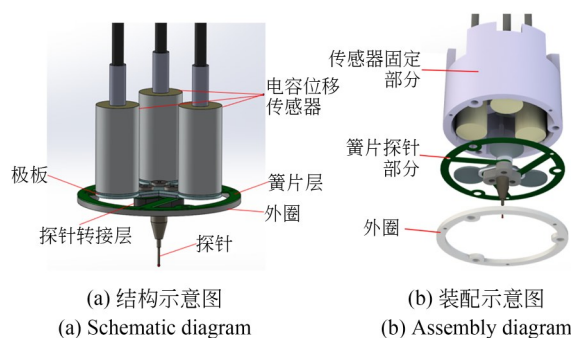


图1 测头系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the probe system structure

性机构相连的极板层;探针连接在弹性机构的下部中心位置,垂直向下延伸,探针末端有测球。

测头整体装配结构如图 2 所示,该测头主要由上部传感器固定模块与下部簧片探针模块构成,并通过外部装配压紧圈实现整体装配。其中,传感器固定模块采用类 C 型环抱式结构,可实现 3 个电容传感器的刚性定位与紧固;簧片探针模块通过螺钉连接极板层与簧片,并在下端装配探针。最终借助装配外圈将上下主体模块压紧固联,形成结构稳定、功能完备的测头。

为实现高精度位移测量需求,本测头系统采用见行科技 C202-CC05B 高精度电容位移传感器。该传感器量程为 0.3 mm,分辨力为 0.75 nm,非线性小于 $\pm 0.05\%$ FSO。该传感器支持最高达 8 kHz 的模拟输出带宽,使控制器能够实时处理快速变化的信号,提升系统的动态响应能力。探针测球为红宝石,测杆为碳化钨,底座为 304 不锈钢。根据实际测量需求,可更换不同尺寸的测针。本文中使用的探针测杆有效杆长总长为 10 mm,测球直径为 0.3 mm,测杆直径为 0.2 mm。簧片采用全硬铍青铜精密加工,厚度为 0.2 mm,兼具高强度与高弹性极限。其核心设计优势在于:外周连续环形带利用封闭几何特性均匀扩散应力,规避棱角应力集中,实现均衡微观变形与切向/径向自平衡;高度对称的三段正三角形分布在矩形形变区,确保外力均匀传递分散、各向力学响应一致,显著提升整体稳定性与抗局部过载能力;中心岛型结构连接形变区,协同保障低重心与高稳定性,簧片加工成品如图 2 所示。

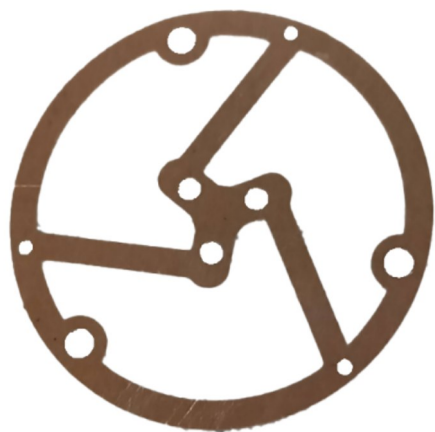


图 2 簧片加工成品

Fig. 2 Finished product of reed processing

2.2 测量原理

三维纳米测头工作过程中,其内部电容位移传感器固定不动,可动极板的三维位移改变极板间的几何构型,引起电容值精确变化,从而输出相应的电信号。通过计算这一信号变化,可以准确解算出探针的空间姿态,实现测球三维位移矢量的高精度解算。

以极板的几何中心为圆心,3 个极板的中心测点落在圆周上,拟合为一个圆,即极板测量圆,其半径 r 为 8.763 mm。如图 3(a)所示,当测球于水平方向接触时,发生大小为 δ 的水平位移,该位移经测杆传至弹性机构,促使弹性机构发生旋转,进而导致极板产生旋转变移。在此过程中,测杆与极板的倾斜角度保持一致,倾角为 θ 。极板倾斜时,极板测量圆圆周上发生的最大竖直位移为 D ,可以得到 $D = r \sin \theta$ 。

理想情况下,测杆无形变,且已知等效测杆长为 L ,则理想灵敏度为:

$$S = \frac{D}{\delta} = \frac{r}{L}. \quad (1)$$

同理,如图 3(b)所示,接触力使测球产生竖直方向(Z 轴)位移,该位移经测杆传至弹性机构。

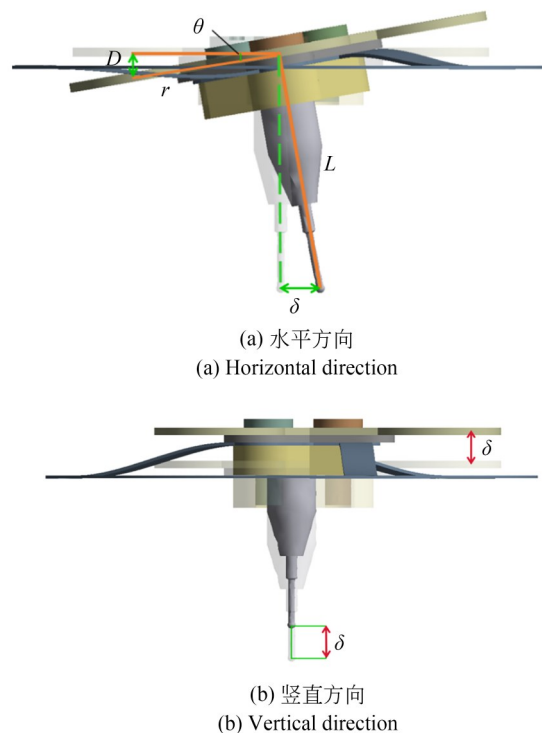


图 3 测头接触示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the probe contact

弹性机构将测球的微小位移放大并传递至极板层,致使极板层发生上下平移,电容值的改变使电容位移传感器输出相应电信号。

3 仿真分析

3.1 刚度分析

基于非线性接触理论,使用 ANSYS 软件构建了测头系统模型。精准定义铝合金极板、碳化钨探针、铍青铜簧片、红宝石测球及 304 钢螺钉的材料参数,在簧片螺孔处施加物理等效的固定约束,采用梯度自适应网格策略,通过载荷工况求解,结合高分辨率应变云图定量表征微尺度触发位移,为测量机构可靠性设计与精度优化提供了理论依据。

将水平方向 360° 均匀分为 24 个等分点,从 24 个不同方向对测球施加 1 mN 的力,并记录相应的形变量。如图 4 所示,接触力方向正对球心指向 Y+,总形变最大处为深红色,分析受力点的位移情况,得到测球位移约为 639 nm(彩图见期刊电子版)。

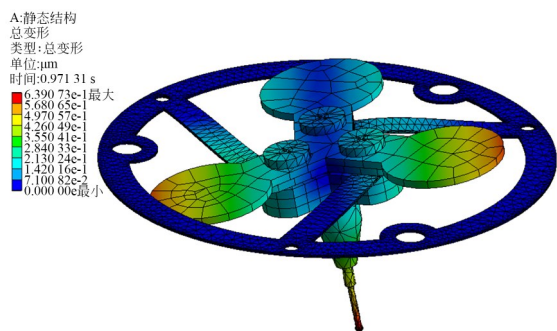


图 4 水平接触 Y+ 向 ANSYS 仿真结果

Fig. 4 ANSYS simulation results in Y+ direction of horizontal contact

利用仿真结果,计算每一方向上接触力与对应测球位移之比,作为该方向上的接触刚度值。将水平方向的刚度值汇总,得到水平各向接触位移及刚度的仿真结果如图 5 所示。从表中各向刚度数据可以看出,接触刚度在水平各向上分布较为均匀,表明该测头在水平方向上具备良好的各向同性。利用水平方向 24 个角度下的接触刚度 $K_1, K_2, \dots, K_{24}$, 计算其算术平均值 $\bar{K}$ 为 1 560 N/m。

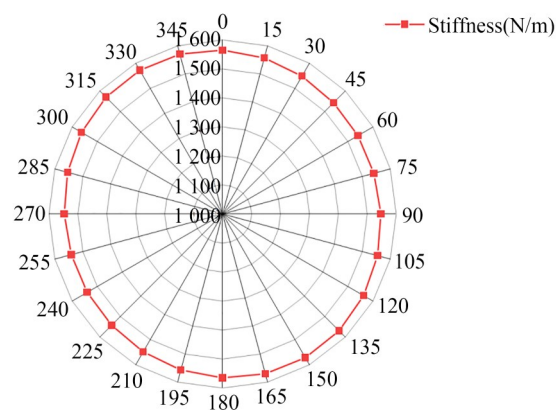


图 5 水平接触刚度关于角度的雷达图

Fig. 5 Radar chart of horizontal contact stiffness with respect to angle

竖直方向上设置相同结构与边界条件,施加指向球心大小为 1 mN 的竖直向上接触力,仿真结果如图 6 所示,得到测球位移为 191.748 nm。据此可计算竖直方向的接触刚度为 5 210 N/m。

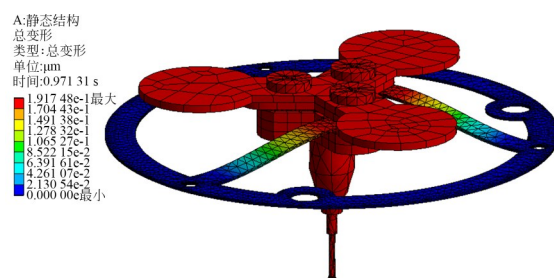


图 6 竖直接触 Z+ 向 ANSYS 仿真结果

Fig. 6 ANSYS simulation results in Z+ direction of vertical contact

综合仿真结果可知,该测头水平方向 24 个等分角度的接触刚度分布均匀,平均刚度为 1 560 N/m,波动范围较小,表明结构在水平方向具有良好的各向同性与力学一致性;竖直方向接触刚度为 5 210 N/m,约为水平方向的 3.35 倍。该差异源于力学等效模型的本质不同:水平方向受力时,测头系统以弯曲变形为主,刚度较低;竖直方向受力时,力沿探针轴向传递,主要克服簧片平面内拉伸/抗弯刚度及探针轴向压缩刚度,轴向刚度高于弯曲刚度。该空间非对称刚度分布符合测头结构长细比特征与簧片约束规律。高竖直刚度可提高轴向的抗干扰与结构稳定性。

本次仿真验证了测头水平面内的优异运动学对称性,为后续测量补偿模型建立及测头触发阈值设定提供了关键定量依据。

3.2 测头测球位移计算模型

为了评估测头的测量性能,需要基于传感器的测量数据推算其接触状态,即通过 3 个传感器的位移数据计算测球的位移大小和方向。如图 7 所示, A, B, C 为 3 个传感器探头的中心点,呈正三角形水平分布,对应边长为 L 。以三角形 ABC 的几何中心为原点 O ,建立基于传感器的空间坐标系, OA 方向定义为 X 轴正方向, Y 轴平行于边 BC 。

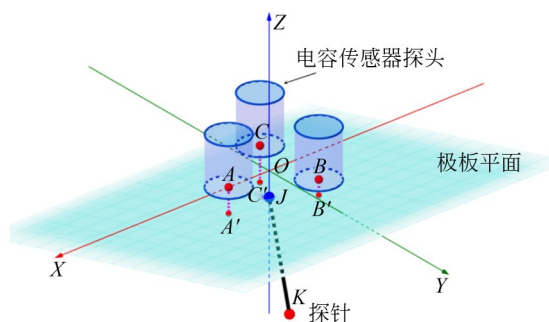


图 7 直角坐标系下传感器及探针的相对位置

Fig. 7 Relative positions of sensor and probe under rectangular coordinate system

图中绿色平面表示极板面,接触时该面处于倾斜状态,其与 Z 轴负向延长线的交点记为探针测杆的等效起点 J ,点 K 为测球球心(彩图见期刊电子版)。3 个探头在极板面上的中心测点为 A', B', C' , AA', BB', CC' 均垂直于水平面,其长度分别为 a, b, c 对应 3 个传感器探头测得的距离,即 $a = |AA'|$, $b = |BB'|$, $c = |CC'|$ 。

经过计算,可以得到极板面上的测点坐标为 $A(\sqrt{3}L/3, 0, -a)$, $B(-\sqrt{3}L/6, L/2, -b)$, $C(-\sqrt{3}L/6, -L/2, -c)$,由此可得:

$$\begin{cases} A'B' = \left(-\frac{\sqrt{3}L}{2}, \frac{L}{2}, a-b \right) \\ A'C' = \left(-\frac{\sqrt{3}L}{2}, -\frac{L}{2}, a-c \right) \end{cases} \quad (2)$$

已知极板面的法向量 $\mathbf{n}$ 与 $A'B'$ 和 $A'C'$ 都垂

直,可得极板面的法向量:

$$\mathbf{n} = \left(\frac{2a-b-c}{\sqrt{3}L}, \frac{b-c}{L}, 1 \right). \quad (3)$$

计算极板的倾角为:

$$\theta = \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2a-b-c}{\sqrt{3}L} \right)^2 + \left(\frac{b-c}{L} \right)^2 + 1}} \right). \quad (4)$$

从传感器坐标系中沿 X 轴正方向朝 X 轴负方向观察,如图 8 所示,极板的倾转中心为簧片的几何中心,等效杆长为 l ,对应测球水平位移为:

$$d = l \times \sin \theta. \quad (5)$$

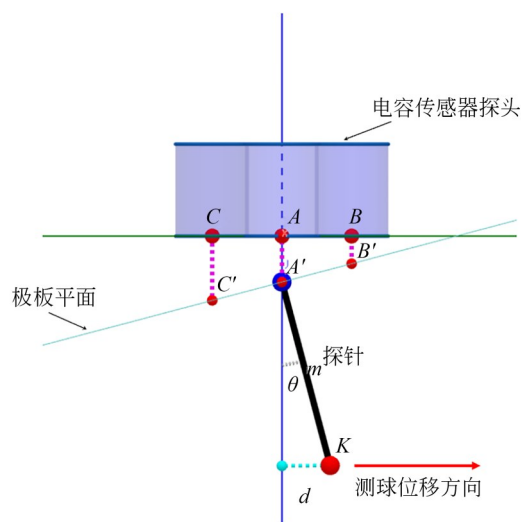


图 8 测球水平位移距离示意图

Fig. 8 Schematic diagram of horizontal displacement distance of measuring ball

4 测量实验与结果

为了对测头性能进行测试,搭建了如图 9 所示的测试平台。微动台选用的是 PI 公司的 P-562.6CD 六自由度高精度纳米定位台,线性行程可达 $200 \mu\text{m}$,环分辨力为 1 nm ,最大承重 5 kg 。宏动台可以通过手动粗调,快速将待测物移动到测量区域;工作台底部与气浮光学平台刚性连接,测试系统外部设有防尘罩,可以大幅阻隔外部气流扰动,实验室环境温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,环境湿度为 $55\% \text{ RH}$ 左右。

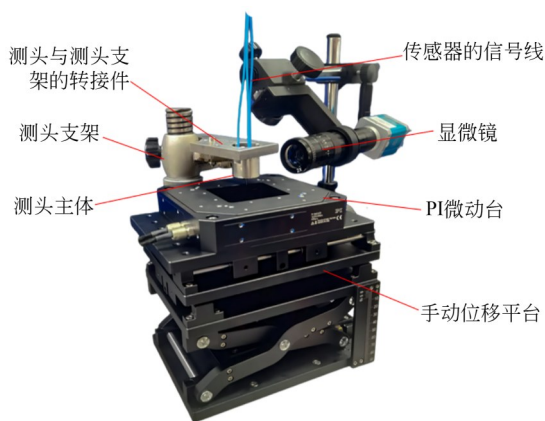


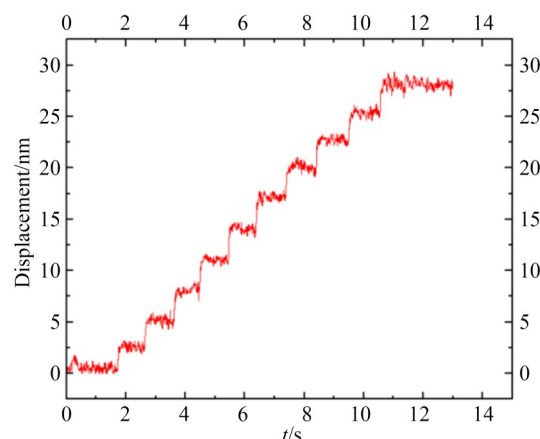
图9 测头测试平台

Fig. 9 Probe testing platform

测头支架底座宽大厚重,与工作台面接触面积大,为测头主体提供稳固的支撑,有效减少外界震动干扰,确保测头测量时的稳定性与空间位置精度;测头与测头支架间的转接件用于连接固定测头与支架横梁,当支架横梁上下调整时,可以确保测头随着支架横梁上下调整;外置显微镜为操作人员提供微观视角,便于对测量区域进行精细观察与定位。

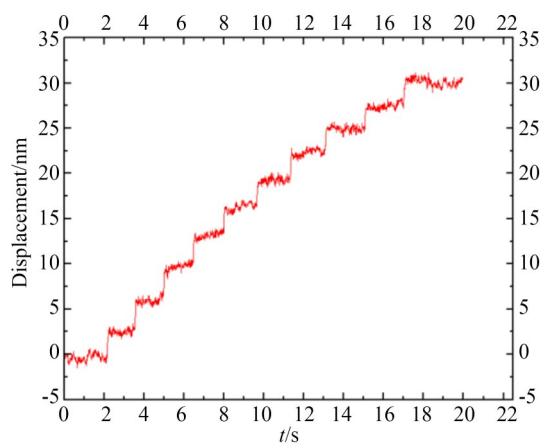
4.1 分辨力测试

为验证三维纳米测头的分辨力性能,开展了微动台步进接触实验。控制PI微动台,分别沿水平24个均匀分布的角度方向(间隔 15°)和Z+方向,以3 nm的步距驱动微动台接触测球;三路电容位移传感器信号以100 Sa/s的采样频率同步采集。基于测头测球位移的几何计算模型解算得到测球的相对位移,X+,Y+和Z+方向的测量结果如图10所示。对水平各向和Z+方向的



(b) Y+方向

(b) Direction of Y+



(c) Z+方向

(c) Direction of Z+

图10 各向接触时测球相对位移

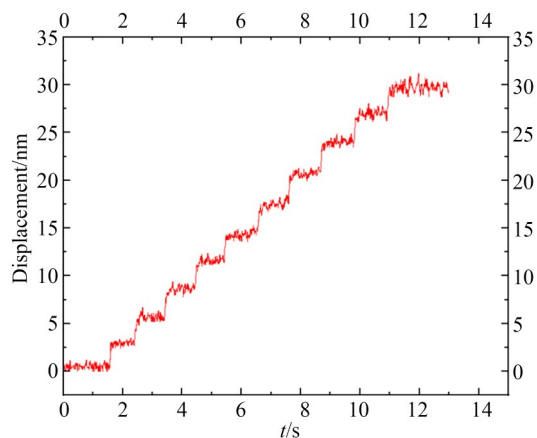
Fig. 10 Relative displacement of measuring ball in contact in all directions

信号曲线进行分析,可以观察到信号均呈现清晰的台阶,表明该测头可有效分辨3 nm的位移变化,即其三维分辨力不低于3 nm。

4.2 测量范围

为完整地表征测头的输入输出特性,需测试其测量范围。以测量件与测头测球的临界触发点作为起始触发点,控制微动台以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的步距提供位移,同时记录测头的输出,并利用测头测球位移的几何计算模型计算测球的相应位移。按此步骤分别对水平各向和Z+方向的测量范围进行测试。

测量结果如图11所示。测头水平方向测量范围可以达到 $260\text{ }\mu\text{m}$,Z+方向为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) X+方向

(a) Direction of X+

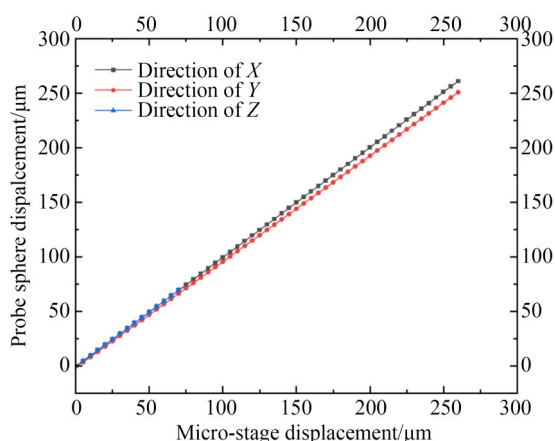


图 11 测量范围测试结果

Fig. 11 Measurement range test results

4.3 输入/输出特性曲线

为表征测头的线性测量特性,开展了大范围位移测试实验。实验前,驱动宏动台向测头方向趋近,使测头测球与待测件处于临界接触状态。随后,控制微动台分别沿水平各向及 $Z+$ 方向以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的步距进行步进驱动,同时记录三路电容位移传感器的输出信号。基于最小二乘法对 $10\sim 210\text{ }\mu\text{m}$ 量程内的输入位移与传感器输出信号进行线性拟合,并计算拟合残差。以 $X-$ 、 $Y-$ 方向和 $Z+$ 方向为例,图12展示了对应曲线。

实验表明,该测头 $X-$ 向非线性度为 0.131% , $X+$ 向为 0.132% , $Y-$ 向为 0.011% , $Y+$ 向为 0.058% , $Z+$ 向非线性度为 0.132% 。从图12中可以看出,该测头存在较明显和规律的

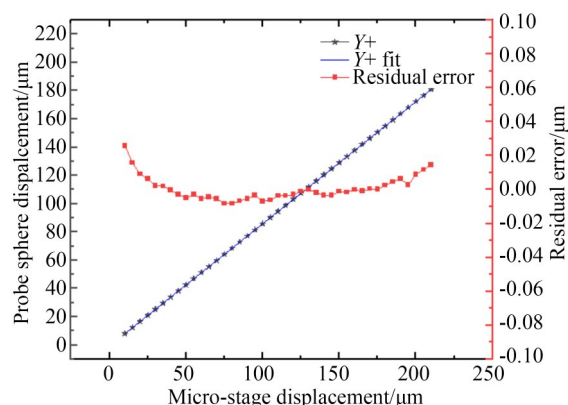
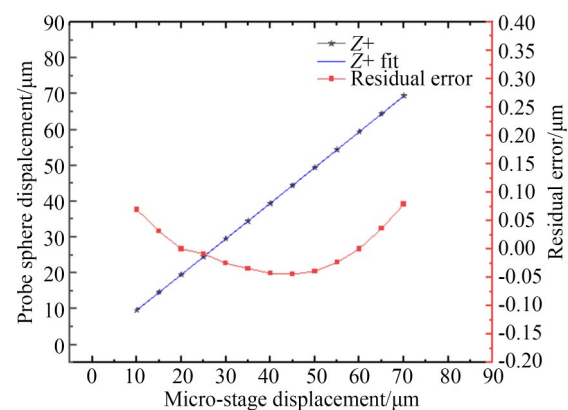
(b) $Y+$ 方向(b) Direction of $Y+$ (c) $Z+$ 方向(c) Direction of $Z+$

图 12 各向接触时输入/输出特性曲线图

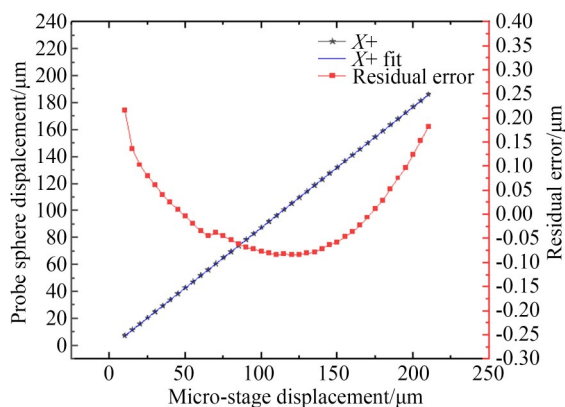
Fig. 12 Input/Output characteristic curve diagram for anisotropic contact

非线性误差,下一步将深入研究误差来源,并建立精确的误差补偿模型。

4.4 重复性测试

在微米三坐标测量机中,测头作为关键部件,其测量重复性对保证整机测量精度至关重要。因此进行多次接触重复性测试。控制PI微动台带动被测件分别沿 $X+$ 、 $X-$ 、 $Y+$ 、 $Y-$ 、 $Z+$ 方向移动到临界接触位置,随后步进 $1\text{ }000\text{ nm}$,再回退到原位。待信号稳定之后,重新沿该方向进行上述接触一行进一回退的过程,即多次接触测试。为保证测试结果的可靠性和全面性,在各方向重复测量20次。

在上述过程中,使用上位机记录传感器的数据,利用测头测球位移的几何计算模型计算出测

(a) $X+$ 方向(a) Direction of $X+$

球偏转位移。并计算测头在单一方向上 20 次重复测量的峰峰值,作为测头在当前方向上的重复性验证。测头测球各方向偏转位移相对变化量结果如图 13 所示,测量重复性及峰峰值如表 1 所示。

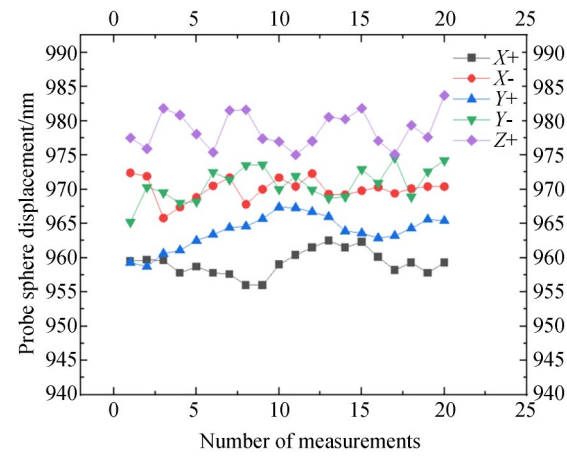


图 13 电容式三维纳米测量测头各方向测量重复性
Fig. 13 Repeatability testing of capacitive 3D nanoscale measurement probe in different directions

表 1 电容式三维纳米测量测头各方向重复测量数据
Tab. 1 Repeatability measurement data of capacitive 3D nanoscale measurement probe in all directions (nm)

测量方向	最大值	最小值	峰峰值
X+	962.5	956.0	6.5
X-	972.4	965.8	6.6
Y+	967.4	958.7	8.7
Y-	974.6	965.2	9.4
Z+	983.7	975.0	8.7

由表 1 可知,电容式三维纳米测量测头水平各向接触重复性优于 9.4 nm,竖直方向接触重复

性优于 8.7 nm,重复性总体上优于 9.4 nm。

5 结 论

本文设计并研制了一种基于电容位移传感器的三维纳米测量测头。为实现微纳米尺度三维精密接触测量,测头整体采用三路高精度电容位移传感器与铍青铜弹性机构相结合的结构设计,测端选用耐磨性优良的红宝石测球与刚度适中的碳化钨测杆。为验证测头的实际测量性能,搭建了专用实验测试平台,并开发配套上位机数据采集与分析软件,在实验室环境温度(20 ± 0.5)℃,相对湿度(55 ± 1)%的条件下,对测头的核心性能进行系统测试。实验结果表明,该测头三维分辨力优于 3 nm,水平接触重复性优于 9.4 nm,竖直方向重复性优于 8.7 nm,水平各向测量范围可达 260 μm,竖直方向为 70 μm。该电容式三维纳米测量测头通过三路高精度电容位移传感器与铍青铜弹性机构的协同创新设计,在微纳米尺度上兼具高分辨力、优良重复性与较大测量范围的综合优势。开发的测头可集成到微纳米三坐标测量机上,用以完成具有大范围、亚微米或纳米级精度要求的测量任务。

作者贡献声明:

- 黄强先:获取资助,论文构思;
- 张星月:方法设计,初稿写作;
- 郝蔚宁:调查研究,数据整理和维护;
- 赵志浩:软件研发,形式分析;
- 张连生:项目管理,论文审核与编辑;
- 程荣俊:实验指导及验证;
- 李红莉:提供资源。

参考文献:

[1] WATANABE M, SATO O, MATSUZAKI K, et al. Accurate surface profile measurement using CMM without estimating tip correction vectors[J]. *Precision Engineering*, 2024, 91: 233-241.

[2] KONDO Y, HIRAI A, KATSUBE T, et al. Two-point diameter calibration of a sphere by a micro-coordinate measuring machine using a silicon gauge block as a reference standard [J]. *Precision Engineering*, 2025, 92: 167-178.

[3] SATO O, TAKATSUJI T, MATSUZAKI K, et al. Practical experimental design and uncertainty evaluation method for dimensional and form measurements using coordinate measuring machines[J]. *Measurement*, 2024, 227: 114224.

[4] ZHUANG Q X, WAN N, GUO Y H, et al. A state-of-the-art review on the research and application of on-machine measurement with a touch-trigger probe[J]. *Measurement*, 2024, 224: 113923.

[5] BLECHA P, HOLUB M, MAREK T, et al. Capability of measurement with a touch probe on CNC

- machine tools [J]. *Measurement*, 2022, 195: 111153.
- [6] HSU C H, VU T H, NGUYEN T K. Modeling and optimization of continuous scanning probe inspired of the kirigami structure[C]. 2021 *IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*. October 29-31, 2021, Yunlin, Taiwan, China. IEEE, 2021: 443-446.
- [7] LI H T, LI X H. High-precision non-contact probes based on spectral confocal technology [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2023, 14(3): 270-279.
- [8] ZHENG W K, TIAN K, GUO J K, *et al.* A flexible vibration probe based on PZT low-frequency drive mode[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 78823-78834.
- [9] 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.
- [10] LV X F, SHEN Y J, ZHANG X, *et al.* Selection of measurement parameters based on the dynamic characteristics of the scanning probe[J]. *Measurement*, 2026, 266: 120501.
- [11] SHEN Y, MA S H, LIU Y W, *et al.* Development of a low-stiffness and high-dynamic micro - nano probe utilizing the eddy current damper[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(20): 38891-38901.
- [12] CHU C L, YE H C Y. Coordinate measuring machine touch-trigger probe using elastic stylus and optical sensors [J]. *Engineering Proceedings*, 2025, 120(1): 2.
- [13] CAO S, BRAND U, KLEINE-BESTEN T, *et al.* Recent developments in dimensional metrology for microsystem components [J]. *Microsystem Technologies*, 2002, 8: 3-6.
- [14] RUTHER P, BARTHOLOMEYCZIK J, TRAUTMANN S, *et al.* Novel 3D piezoresistive silicon force sensor for dimensional metrology of micro components[C]. *The 4th IEEE Conference on Sensors*, Oct. 31-Nov. 3, 2005, Orange County, Southern California. IEEE, 2005: 1006-1009.
- [15] METZ D, FERREIRA N, DIETZEL A. 3D piezoresistive silicon microprobes with stacked suspensions for tailored mechanical anisotropies [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 267: 164-176.
- [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] THALMANN R, MELI F, KÜNG A. State of the art of tactile micro coordinate metrology [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(5): 150.
- [18] 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.
- [19] ZHANG L S, TANG Y, LUAN H, *et al.* Measurement range enhancement of a scanning probe by the real time adjustment of the interferometer reference mirror[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24010-24018.
- [20] ALBLALAIHID K, KINNELL P, LAWES S. Fabrication and characterisation of a novel smart suspension for micro-CMM probes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 232: 368-375.
- [21] ALBLALAIHID K, LAWES S, KINNELL P. Variable stiffness probing systems for micro-coordinate measuring machines[J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 262-269.
- [22] ALBLALAIHID K, KINNELL P, LAWES S, *et al.* Performance assessment of a new variable stiffness probing system for micro-CMMs[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 492.
- [23] XU P, LI R J, JIN X W, *et al.* A new micro/nano-touch-trigger probe using an optoelectronic sensor with a wedge prism[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(7): 076103.
- [24] 黄强先,刘慧洁,张祖杨,等. 跨尺度微纳米三坐标测量机研制及误差分析[J]. *光学 精密工程*, 2025, 33(19): 3058-3069.
- HUANG Q X, LIU H J, ZHANG Z Y, *et al.* Development and error analysis of cross-scale micro-nano coordinate measuring machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33 (19) : 3058-3069. (in Chinese)

作者简介:



黄强先(1968—),男,山东即墨人,教授,博士生导师,1998年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事微纳米三维测量技术、纳米扫描探针技术及仪器精度理论的研究及应用。E-mail: huangqx@hfut.edu.com

通讯作者:



张连生(1986—),男,山东莘县人,副教授,硕士生导师,2015年于中国科学技术大学获得博士学位,主要研究方向为微纳米测量技术与系统、压电精密驱动与应用等。E-mail: ls-zhang@hfut.edu.cn