

文章编号 1004-924X(2025)19-3058-12

跨尺度微纳米三坐标测量机研制及误差分析

黄强先, 刘慧洁, 张祖杨*, 李红莉, 程荣俊, 张连生, 李瑞君

(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:为解决三维超精密测量中大行程运动与高精度测量之间的矛盾,研制了一种新型的跨尺度微纳米三坐标测量机(Cross-Scale Micro-Nano Coordinate Measuring Machine, CSMN-CMM),测量体积为 100 mm×100 mm×100 mm。不同于传统坐标测量机的结构形式,CSMN-CMM采用独立的、三维方向都符合阿贝原则的计量系统布局,既消除了运动系统对计量系统的影响,又避免阿贝误差。其运动系统由三维气浮宏动台和六自由度微动台构成,宏微协同的运动模式在提高测量效率的同时完成高精度触发及测量任务。测头系统方面,采用高精度三维接触式测头或谐振式触发测头完成测量,谐振式触发测头的光纤探针测球直径可达 70 μm 以下。针对测量机存在的主要误差来源,基于坐标转换建立空间误差补偿模型并完成误差分离。依据 ISO 10360-2,对 CSMN-CMM 整机测量性能进行检验,得到其最大允许误差优于 $\pm(250\text{ nm}+3.6\times10^{-6}\times L)$ 。实验结果表明,CSMN-CMM 具有亚微米三维测量精度,可以实现低至 100 μm 内尺寸的测量,其结构设计及关键技术对高精度三维测量具有重要意义。

关键词:微纳米测量机;无阿贝误差;宏微运动系统;精密测量;误差分析

中图分类号:TH711;TB9 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253319.3058 CSTR:32169.14.OPE.20253319.3058

Development and error analysis of cross-scale micro-nano coordinate measuring machine

HUANG Qiangxian, LIU Huijie, ZHANG Zuyang*, LI Hongli, CHENG Rongjun,
ZHANG Liansheng, LI Ruijun

(Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument
Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangzuyang11@163.com

Abstract: To resolve the conflict between large-stroke motion and high-precision measurement, a novel cross-scale micro - nano coordinate measuring machine (CSMN-CMM) with a 100 mm × 100 mm × 100 mm measuring volume is presented. Unlike conventional coordinate measuring machines (CMMs), the CSMN-CMM adopts an independent metrology system layout that satisfies the Abbe principle in all three dimensions, thereby isolating the metrology system from motion-induced disturbances and eliminating Abbe error. The motion architecture comprises a 3D air-bearing macro-motion stage coupled with a six-degree-of-freedom micro-motion stage; this macro-micro collaborative motion scheme improves mea-

收稿日期:2025-06-30;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)

surement efficiency while enabling high-precision triggering and probing. For probing, either a high-precision 3D contact probe or a resonant probe is employed, with the resonant probe capable of using microspheres down to $70\text{ }\mu\text{m}$ in diameter. Major error sources were addressed by developing a spatial error-compensation model based on coordinate transformation and by applying error-separation techniques. Measurement performance was assessed in accordance with ISO 10360-2, yielding a maximum permissible error (MPE) better than $\pm(250\text{ nm}+3.6\times 10^{-6}\times L)$. Experimental results demonstrate sub-micron 3D measurement accuracy and the ability to measure internal features as small as $100\text{ }\mu\text{m}$. The proposed structural design and enabling technologies represent a significant advance for high-precision 3D metrology.

Key words: micro-nano coordinate measuring machine; Abbe error-free; macro-micro motion system; precision measurement; error analysis

1 引言

随着微机械加工及微机电系统(Micro-Electro Mechanical System, MEMS)的快速发展,超精密器件的应用日益广泛,如航空发动机燃油喷嘴、精密齿轮、光学元件、半导体器件等。这些器件的几何特征尺寸范围从数百微米到数百毫米,而精度要求则高达数十至数百纳米^[1-2]。为了确保这些高精度器件的质量,三维超精密测量技术显得尤为重要。然而,传统的三坐标测量机(Coordinate Measuring Machines, CMM)测量精度有限,难以满足测量需求。因此,开发能够测量超精密机械零件尺寸的微纳米坐标测量机(Micro-nano CMM)对于提升制造基础技术和关键部件质量具有重大意义^[3-4],具有极其广阔的应用前景。

近几十年,国内外研究人员已取得一些研究成果。1995年,Takamatsu等开始研制 Nano-CMM,机台结构采用了传统 CMM 的缩小化设计,测量范围为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,测量不确定度 50 nm ^[5]。Peggs等研发了一台测量体积 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的小型坐标测量机(SCMM),其测量不确定度达到 50 nm ^[6]。德国伊尔梅瑙工业大学(TU Ilmenau)研制的微纳米 CMM 被 SIOS 公司商品化,测量范围为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ^[7]。东京大学和日本国家先进工业科学与技术研究所(AIST)联合开发的高精度微纳米 CMM 可以在 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的测量体积内实现 50 nm 的测量不确定度^[8]。范光照等研制的宝塔型微纳米测量机,整机测量体积

$20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ^[9]。这些微纳米 CMM 在 X, Y, Z 方向上的测量范围都不大于 50 mm ,测量空间有限。其他具有大行程运动的微纳米三坐标测量机,如蔡司公司研制的 F25 测量机,荷兰代尔夫特理工大学(TU Delft)研制的 Isara400^[10],Xpress Precision Engineering 研制的 TriNano N100^[11]可以实现大范围测量,但其结构复杂,装调困难,且成本高昂,限制了其应用范围。

本文提出一种测量体积为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的跨尺度微纳米三坐标测量机(CSMN-CMM)。该测量机将大行程气浮宏动台和六自由度微动台相结合实现高精度触发及测量任务,计量系统在三维空间内符合阿贝原则且与运动系统相互独立。采用基于光杠杆原理的三维接触式测头或谐振式三维触发测头完成对工件的高精度触发测量,确保测量精度。通过分析微纳米测量机的主要误差来源,建立了完整的误差补偿模型并完成误差分离与补偿。

2 CSMN-CMM 结构设计

本文所设计的 CSMN-CMM 拓扑结构如图 1 所示,整机采用测头固定,工作台运动的测量模式。测量机计量系统由 X, Y, Z 轴激光干涉仪及 X, Y 向测角仪构成。计量系统与测头通过计量框架固定在大理石基底上。三轴激光干涉仪测量光束相互正交于测头中心点 O 。依据测量中心点 O 及三轴激光干涉仪测量光束建立理想正交坐标系 $OXYZ$ 。三维靶镜由 X, Y, Z 轴反射镜

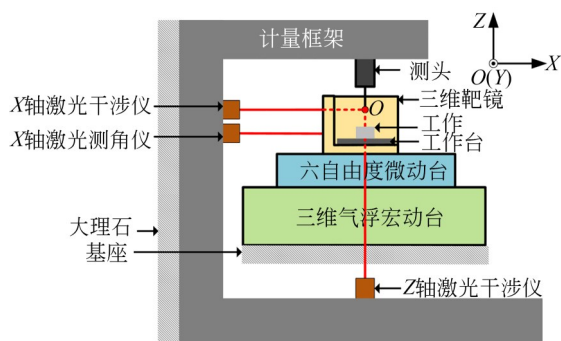
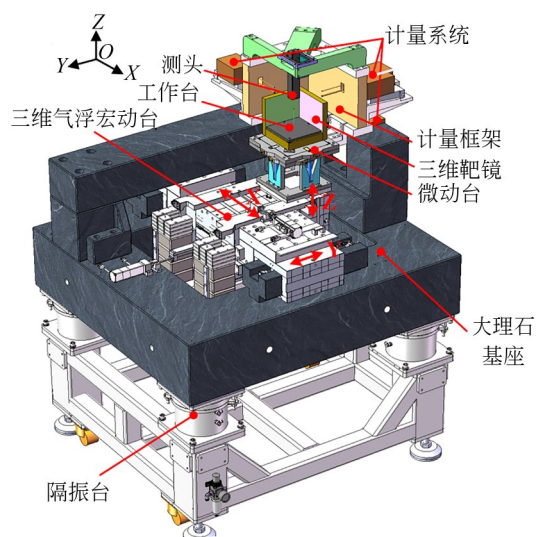


图1 跨尺度微纳米测量机结构布局

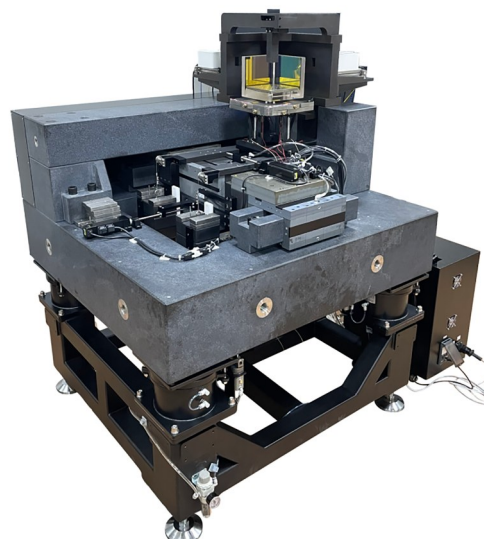
Fig. 1 Structural layout of CSMN-CMM

拼接构成,计量系统将三维靶镜各轴反射面作为各轴测量基准面,实现对工件坐标及姿态的实时



(a) 结构图

(a) Structural diagram



(b) 实物图

(b) Physical diagram

图2 跨尺度微纳米测量机

Fig. 2 Cross-Scale Micro-Nano Coordinate Measuring Machine(CSMN-CMM)

2.1 计量系统布局

在传统的三维加工与测量设备中,运动系统存在21项几何误差^[12-13]。当设备运行时,计量系统随运动系统同步移动。这些来自运动系统的误差耦合至计量系统,从而严重影响测量精度。然而,本文所设计的测量机采用计量系统与运动系统相互独立的布局结构。两个系统分别固定在大理石基座上,由此避免了系统间的耦合干扰。计量系统中的三轴激光干涉仪及X、Y轴测角仪,通过安装在运动系统上的三维靶镜实现对

测量。

测量机运动系统由三维气浮宏动台与六自由度微动台构成,工作台与三维靶镜固定在微动台上,跟随运动系统在空间中运动。三维宏动台负责提供大行程快速移动,六自由度微动台负责完成工作台高精度驱动,并搭配测角仪完成其姿态校正。宏微协同运动模式能够实现工作台高分辨力、快速驱动。

根据上述三维结构布局,设计搭建CSMN-CMM实物图如图2所示,测量体积可达100 mm×100 mm×100 mm。为了避免温度波动及振动对测量机测量性能产生影响,整机放置在防振台上并处于恒温箱内。

工作台六自由度运动的实时测量。Z轴激光束经五棱镜折射后实现垂直位移测量,如图3所示。在该结构布局下,由21项几何误差导致的工作台空间位移与旋转偏差,可由计量系统实时检测并补偿,从而消除了几何误差对测量结果的影响。为确保计量系统的热稳定性,计量框架及三维靶镜分别采用低膨胀系数的因瓦合金与微晶玻璃制成。为保证测量范围,三维靶镜整体尺寸为172 mm×172 mm×150 mm,各向靶镜面反射区域为110 mm×110 mm。

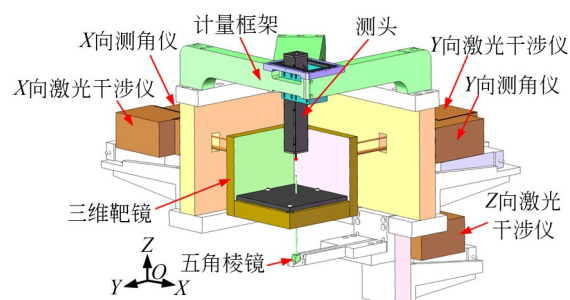


图3 计量系统结构布局

Fig. 3 Structural layout of metrology system

在传统计量系统布局中,违背阿贝原则,存在严重的阿贝误差^[14]。在本文提出的结构布局中,计量系统布局采用三轴长度基准始终正交于测头中心点的设计原则,消除各轴阿贝臂。同时,X,Y向测角仪实时监测工作台在运动过程中的角运动误差,并通过微动台进行姿态校正,补偿各轴导轨角运动误差,最终消除三维空间中的阿贝误差。

2.2 大行程三维气浮宏动台设计

传统多维运动台通常将多个一维运动台堆叠起来,但这种多维运动台各轴之间的耦合严重,稳定性差。因此,在本文研制的CSMN-CMM中,为了给工作台提供大行程,高稳定性的

快速运动,设计的三维气浮宏动台如图4所示。宏动台整体采用分体式设计,包括Y向双龙门运动台、X向横梁运动台、Z向运动台及Z向配重结构。宏动台三轴运动行程为101 mm×101 mm×100.4 mm。为了减少X向和Y向运动台之间的串扰,引入了一种特殊的共面机械结构^[15],保证X,Y向导轨运动方向在同一水平面,如图4(a)所示。X向与Y向运动台由交流伺服电机搭配精密滚珠丝杠传动,可实现高稳定快速运动。例如:当X,Y向运动台以5 mm/s的运动速度,20 mm的步距满行程往返运动5次时,X向重复定位误差为0.41 μm($k=2$);Y向重复定位误差为0.25 μm($k=2$)。

为实现Z向大范围稳定运动,设计带有平衡装置的Z向运动台,如图4(c)所示。Z向配重结构布置在X向横梁一侧,两组配重块通过钢丝绳穿过滑轮连接在X向横梁另一侧的Z向运动台上,用于平衡Z向运动台自重并降低Z方向电机的驱动负载。如图2所示,微动台、三维靶镜及工作台安装在Z向运动台上。配重块的质量可以根据Z向运动台的不同负载进行调整。运动过程中,Z向压电直线电机驱动仅需要克服气浮摩擦力,大大提高了Z向驱动稳定性。

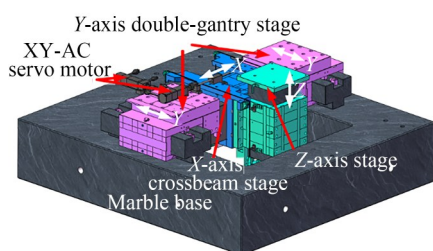
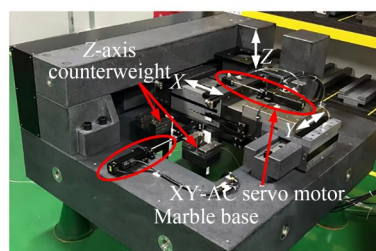
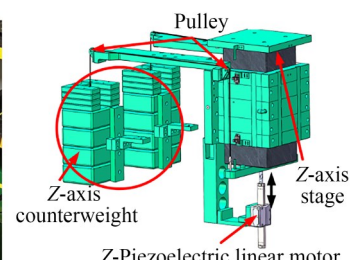
(a) 结构图
(a) Structural diagram(b) 实物图
(b) Physical diagram(c) Z轴配重结构
(c) Z-axis counterweight structure

图4 三维气浮宏动台

Fig. 4 3D air-bearing macro-motion stage

2.3 六自由度微动工作台设计

在CSMN-CMM的结构布局中,为实现测量机免阿贝误差的计量布局要求,需要对工作台进行姿态校正,补偿导轨角运动误差。此外,测头作为测量机的关键部件,为了确保其高精度触发,需要工作台具有高精度的驱动分辨率。六自由度微动台如图5所示。

所设计的六自由度微动台由平动层、转动层以及支撑层三部分组装而成。压电陶瓷通过“串并联混合驱动”的方式,将6个自由度的运动合理的分布在这3层结构中。6个自由度运动包括沿X,Y,Z轴平动以及绕X,Y,Z轴转动,均采用压电陶瓷组合柔性铰链的方式实现。平动层通过陶瓷PZT-X,PZT-Y实现沿X轴及

Y轴的平动(D_x, D_y);转动层由4块PZT实现绕Z轴转动(θ_z);支撑层由3块压电陶瓷组成,通过给PZT-Z1,PZTB-Z2,PZT-Z3提供不同的驱动电压,可以实现支撑层沿Z向平动以及绕X轴、Y轴的转动(D_z, θ_x, θ_y),6自由度微动台实物图如图5(b)所示。微动工作台在结构设计上采

用内部中空设计,为Z轴激光干涉仪测量光束提供了传输空间。依据高精度电容传感器及自准直仪对其进行性能检测,微动台三轴线位移行程均大于 $20\text{ }\mu\text{m}$,角位移行程均大于 $27''$,三轴线位移分辨率优于 0.6 nm ,角位移分辨率优于 $0.1''$ 。

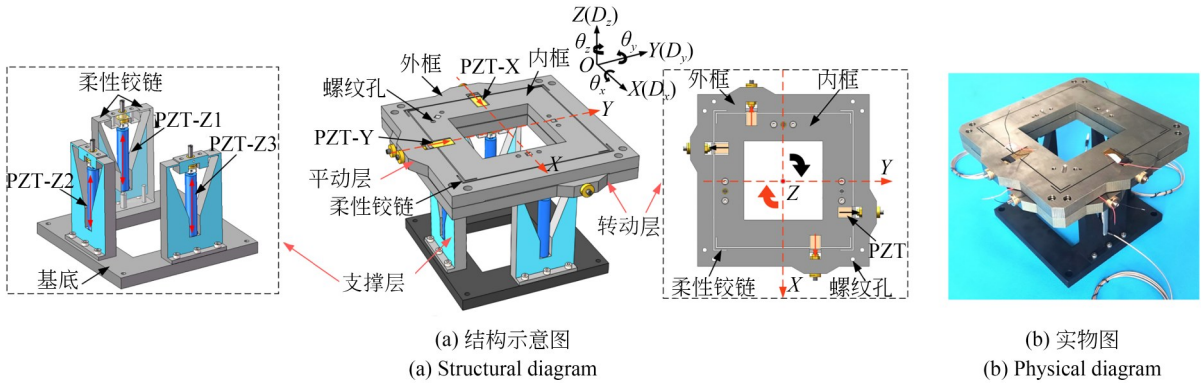


图5 六自由度微动台
Fig. 5 Six-DOF micro-motion stage

2.4 微纳三维测头系统

2.4.1 三维接触式测头

为了实现微纳米三坐标测量机的高精度测量,测头系统是影响测量精度的关键因素。CS-MN-CMM采用自主研发的三维接触式测头完成工件触发测量^[16],其结构如图6所示。

该测头系统由半导体激光器、位置敏感传感器(PSD)、多个反射镜、高灵敏度弹性簧片构成的悬浮机构以及红宝石探针5部分组成。当探针

受到触发时,簧片发生形变,激光最终投射至PSD上的光点位置发生改变。通过处理PSD 4路输出信号,即可判断测头是否被触发。此外,通过多次利用反射镜折叠光线,不仅增大了光线出射后的角度变化,还成功减小了测头的横向尺寸,使其更为紧凑。

2.4.2 谐振式三维触发测头

除了接触式测头,测量机还利用自主研发的高精度谐振式三维触发测头^[17]完成工件测量。谐振式三维触发测头由石英音叉与烧制的光纤一体式探针粘连构成,如图7(a)所示。石英音叉具有较高的品质因数,力敏感性高。光纤一体式探针测球直径可达 $70\text{ }\mu\text{m}$ 以下,能够实现低于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的内尺寸测量。

其测量原理如图7(b)所示,石英音叉在共振频率激励下做自由谐振运动,带动探针上下振动。基于石英音叉压电效应,产生输出电流 I ,输出电流通过电路处理转化成电压信号 V 并进行滤波,通过采集卡上传到上位机。当探针与被测物接触时,光纤探针受微力影响,谐振状态被破坏,振幅瞬间减小,输出电流急剧降低。上位机通过设定触发阈值,判断测头是否触发。区别于其他接触式测头,谐振式测头具有结构简单,触发力小,分辨率高等优点。能够快速反馈测量信

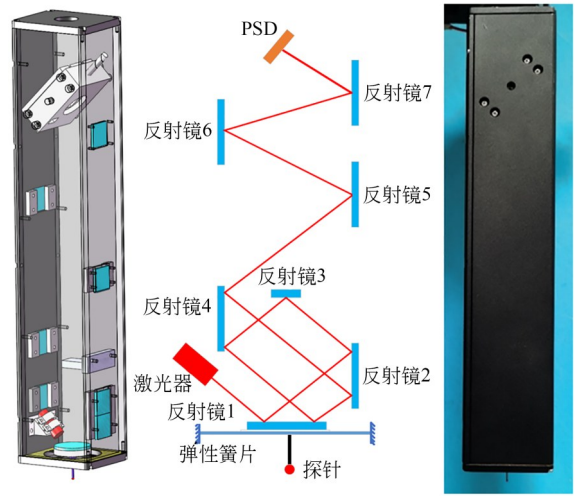


Fig. 6 Three-dimensional contact probe

号,可靠性高。经测试,测头在 X, Y, Z 方向的分辨力优于 0.5 nm ,触发力优于 $0.5\text{ }\mu\text{N}$,重复性误差优于 25 nm 。

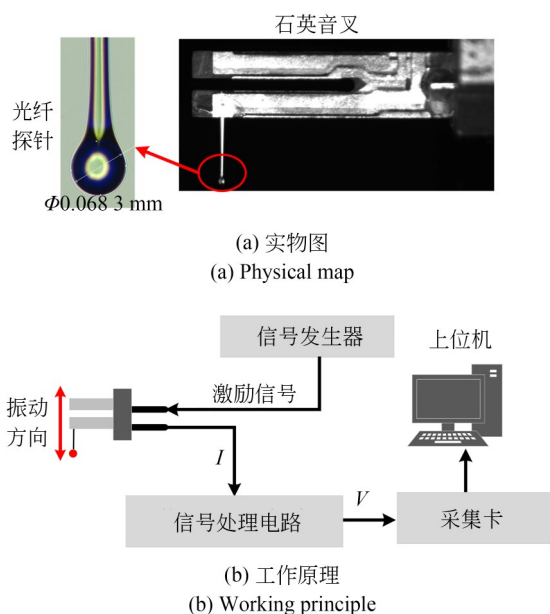


图 7 谐振式触发测头

Fig. 7 Resonant trigger probe

3 误差分析与建模

在测量机计量系统中,三轴激光干涉仪将三维靶镜各轴反射面作为位移基准面,完成工作台的空间坐标测量。结合图 1 所示的结构模型,理想状态下,计量系统布局应满足以下条件:三轴反射面两两正交,各轴测长光束垂直于各轴反射面,三轴测长光束两两正交并且相交于测量触发点。然而,在实际三维计量系统装调过程中,受限于器件加工精度及装配误差等因素影响,存在以下主要误差来源:

- (1) 各轴反射面存在面形误差;
- (2) 三维靶镜面与面之间存在正交误差;
- (3) 由于装配误差,测头中心点偏离各轴测长光束,造成残余阿贝误差;
- (4) 激光干涉仪波长稳定性误差。

为保证测量机精度,需要建立完整的误差补偿模型对这些误差来源进行补偿。这里通过坐标转换建立各项误差源与测量机空间误差之间的关系。

3.1 反射镜面形误差

计量系统各轴激光干涉仪通过三维靶镜作为基准面进行信号反射并实现空间坐标测量。因此,反射镜面形误差将直接影响其信号输出,面形误差会以 1:1 的权重叠加到各轴长度基准上。依据三维计量系统建立的理想正交坐标系 $OXYZ$,对各轴反射镜工作面建立二维坐标系,各轴反射面形误差可以视为其余两轴位移量的二元函数 $\Delta l_1 = f_x(l_2, l_3)$, $\Delta l_2 = f_y(l_1, l_3)$, $\Delta l_3 = f_z(l_1, l_2)$,如图 8 所示。

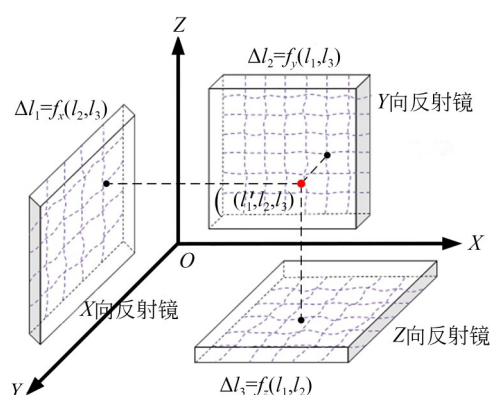


图 8 各向反射镜面形误差示意图

Fig. 8 Schematic diagram of surface shape errors in various reference planes

面形误差造成的三轴测量误差如下:

$$\begin{pmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x(l_2, l_3) \\ f_y(l_1, l_3) \\ f_z(l_1, l_2) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中: (l_1, l_2, l_3) 为三轴长度基准输出量, $(\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3)$ 为坐标 (l_1, l_2, l_3) 对应的 X, Y 和 Z 轴反射镜的面形误差。

3.2 面间正交误差

在所提出的符合阿贝原则的三维计量系统中,要求各轴长度基准两两正交且各轴反射镜两两正交。但是在实际装配过程中,各轴反射镜之间存在正交误差。

分析三轴反射镜非正交对测量结果的影响,以理想正交坐标系 $OXYZ$ 为基准, Z 轴反射面作为理想平面。此时,三面反射镜间的夹角分别表示为 $\theta_{xy}, \theta_{xz}, \theta_{yz}$,对应的正交偏差角分别表示为 $\Delta\theta_{xy}, \Delta\theta_{xz}, \Delta\theta_{yz}$ (即 $\theta = 90^\circ + \Delta\theta$)。以正交偏差角

$\Delta\theta_{xz}$ 为例进行讲解,如图 9 所示。当工作台沿 Z 轴运动 l_3 时, X 向激光干涉仪在 X 轴反射镜上的投影点由 P_1 移动到 P_2 ,对 X 轴造成 $l_3 \tan \Delta\theta_{xz}$ 的测量误差。 $\Delta\theta_{xy}, \Delta\theta_{yz}$ 造成的测量误差同理。

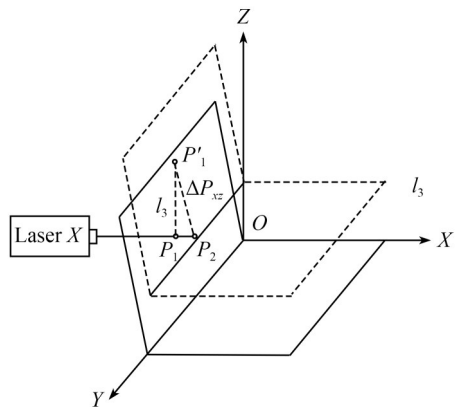


图 9 靶镜正交误差分析

Fig. 9 Analysis of target mirror orthogonal error

当三轴长度基准输出量为 (l_1, l_2, l_3) , 正交误差 $\Delta\theta_{xy}, \Delta\theta_{xz}, \Delta\theta_{yz}$ 造成的三轴测量误差如下:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_x \\ \Delta w_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Delta\theta_{xy} & \Delta\theta_{xz} \\ 0 & 0 & \Delta\theta_{yz} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\Delta w_x, \Delta w_y, \Delta w_z$ 为 X, Y, Z 三轴对应的正交误差修正量。

3.3 残余阿贝误差

由上述分析可知,理论上三维计量系统通过计量布局消除三轴阿贝臂,进而消除空间阿贝误差。但在实际装调过程中,受装配精度影响,测量中心点可能会偏移三轴长度基准,从而残留阿贝臂 a, b, c ,如图 10 所示。

当工作台绕 X, Y, Z 轴的角运动分别为 $\epsilon_{x0}(x, y, z), \epsilon_{y0}(x, y, z), \epsilon_{z0}(x, y, z)$ 时,产生空间残余阿贝误差如下:

$$\begin{pmatrix} \Delta s_x \\ \Delta s_y \\ \Delta s_z \\ 1 \end{pmatrix} = \text{Rot}(x, \epsilon_{x0}) \text{Rot}(y, \epsilon_{y0}) \text{Rot}(z, \epsilon_{z0}) \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 & -\epsilon_{z0} & \epsilon_{y0} & 0 \\ \epsilon_{z0} & 0 & -\epsilon_{x0} & 0 \\ -\epsilon_{y0} & \epsilon_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中: $\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$ 为 X, Y, Z 三轴对应的残余阿贝误差修正量。

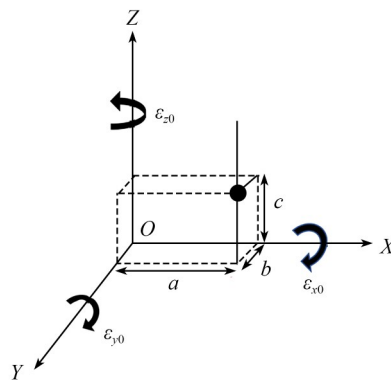


图 10 残余阿贝误差

Fig. 10 Residual Abbe error

3.4 综合空间误差模型

通过对误差源进行分析,综合式(1)~式(3),得到新的计量系统误差补偿模型如下:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 & \Delta\theta_{xy} & \Delta\theta_{xz} \\ 0 & 0 & \Delta\theta_{yz} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\epsilon_{z0} & \epsilon_{y0} \\ \epsilon_{z0} & 0 & -\epsilon_{x0} \\ -\epsilon_{y0} & \epsilon_{x0} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta l_{s1} \\ \Delta l_{s2} \\ \Delta l_{s3} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为实际测量触发点偏离理想测量触发点的坐标误差, (l_1, l_2, l_3) 为三轴长度参考测量的坐标值, $(\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3)$ 为三轴反射面对应的面形误差, $(\Delta l_{s1}, \Delta l_{s2}, \Delta l_{s3})$ 为三轴激光干涉仪波长稳定性造成的测量误差。

4 误差分离实验

为了补偿所研制测量机的空间测量误差,针对误差模型,式(4)包含的各项误差源设计分离实验。其中,工作台角运动误差 $\epsilon_{x0}, \epsilon_{y0}, \epsilon_{z0}$ 通过 X, Y 轴测角仪进行实时测量,并由六自由度微动台进行实时补偿。测角仪测量精度优于 $(\pm 0.1)'' (k=2)$, 微动台的三轴角位移分辨率优于 $0.09''$ 。因此,补偿后的角运动误差控制在 $(\pm 0.1)''$ 以内。激光干涉仪波长稳定性误差依据 Edlen 公式^[18]进行实时补偿。补偿后的激光干涉仪与示值误差小于 $0.1 \times 10^{-6} L$ (L 为测量距离,单位 mm) 的标准激光干涉仪进行对比测量。得到补偿后的激光干涉仪全行程标准测量不确定度优于 $12 \text{ nm} (k=1)$ 。

4.1 正交误差分离实验

三维靶镜各轴反射面作为激光干涉仪测量基准面实现工作台空间坐标测量。为分离三维靶镜各轴反射面面间正交误差 $\Delta\theta_{xy},\Delta\theta_{xz},\Delta\theta_{yz}$,利用高精度自准直仪(奥特梅尔的ULTRA-5050HR)和多齿分度盘(如洋精密科技有限公司的DFT-360A)搭建分离实验系统,如图 11 所示。通过计算转台旋转 90° 后自准直仪输出变化得到靶镜面间正交误差。自准直仪测量精度可达 $(\pm 0.1)''(k=2)$,测量分辨力 $0.01''$ 。多齿分度盘旋转精度优于 $(\pm 0.1)''(k=2)$ 。

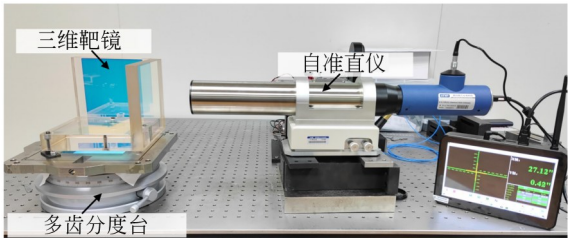


图 11 正交误差分离实验
Fig. 11 Separation experiment of orthogonal error

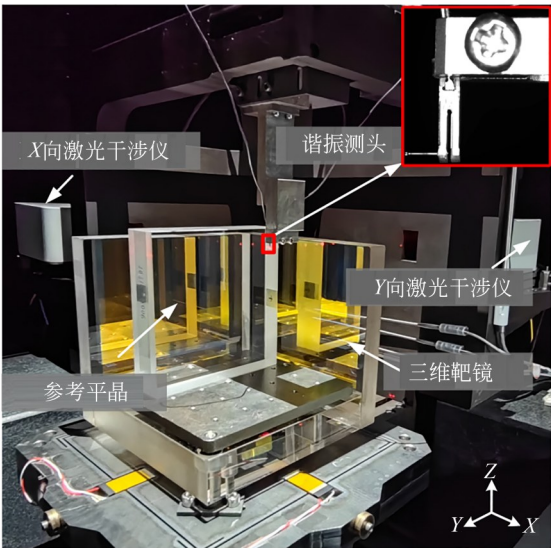
为确保精确测量三维靶镜正交误差,将每个反射面均匀划分为 9 个区域进行测量,并对每个区域重复测量 10 次。通过计算所有测量数据的平均值,得出了三维靶镜面间正交误差的最佳估计值,测量结果如表 1 所示。

表 1 正交误差测量结果		
Tab.1 Measurement results of orthogonal deviation angles		
Orthogonal deviation angles	Average	Standard deviation
$\Delta\theta_{xy}$	-3.35	0.023
$\Delta\theta_{xz}$	-0.09	0.017
$\Delta\theta_{yz}$	0.12	0.014

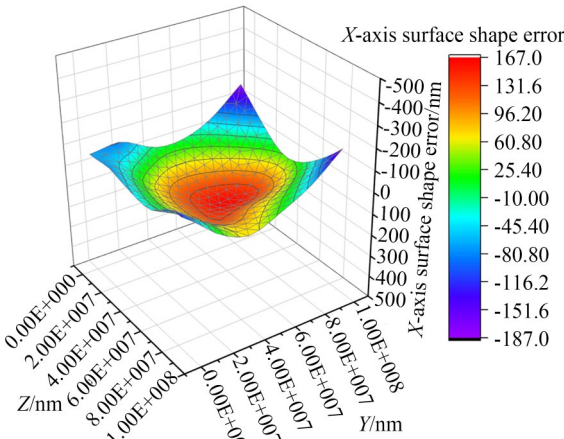
根据高精度转台及自准直仪测量精度及正交偏角重复测量标准差,对分离实验进行不确定度分析,得到正交偏差角 $\Delta\theta_{xy},\Delta\theta_{xz},\Delta\theta_{yz}$ 的测量不确定度优于 $0.074''(k=1)$ 。

4.2 面形误差分离实验

为减小靶镜安装前后轮廓变形对面形误差分离结果造成的影响,以参考平面平晶为基准,采用谐振式测头对靶镜面形误差($\Delta l_1,\Delta l_2,\Delta l_3$)进行在机分离。谐振测头在机测量重复性优于 $13.8\text{ nm}(k=1)$,参考平面平晶平面度优于 35 nm ,造成的标准测量不确定度约为 $12\text{ nm}(k=1)$ 。X 面形误差分离实验示意图如图 12 所示,Y,Z 轴与 X 轴类似。通过改变参考平面平晶与谐振式测头安装方向完成不同方向的靶镜面形误差分离。依据谐振测头点阵测量坐标,利用插



(a) 实物图
(a) Physical map



(b) 测量结果
(b) Measurement result

图 12 X 轴面形误差分离实验

Fig. 12 X-axis surface shape error separation experiment

值算法可以得到空间任一测量点对应的各轴靶镜面面形误差,进而对实际测量坐标进行补偿。 X, Y, Z 轴靶镜面面形误差($\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$)的PV值分别为364,522,390 nm,各轴面形误差的测量不确定度优于18.9 nm($k=1$)。

5 性能检验

5.1 宏微协同二次触发精度

在微纳米三坐标测量机中,测头作为关键部件,其触发重复性对保证整机测量精度至关重要。而测头触发性能与测量机所采集的运动策略及触发速度紧密相关,为保证测头性能,通常需要降低触发速度以减小惯性力及加速度引起的动态误差^[19]。针对本文提到的高精度三维接触式测头,直接采用宏动台完成触发会对测头造成较大冲击,测头稳定性及触发重复性难以保证。因此,为了实现大行程的快速驱动及高精度触发,采用了一种宏微协同二次触发策略。由宏动台带动工件快速运动进行一次触发,完成触发位置粗定位。一次触发后宏动台回退,工件脱离测头,然后由微动台带动工件低速完成二次触发。该策略在保证测头触发精度的同时提高了测量效率。

测量机控制被测件分别沿 $X+, X-, Y+, Y-, Z$ 方向对测头进行触发。每个方向重复测量10次,测头各方向触发位置相对变化量如图13所示,测量重复性及标准差如表2所示。由表2可知,三维接触式测头三轴测量重复

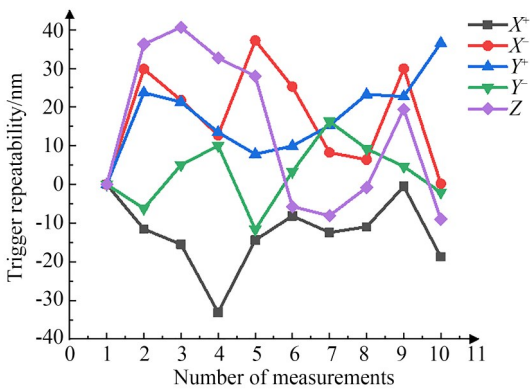


图13 三维接触式测头各方向测量重复性

Fig. 13 Repeatability measurement of 3D contact probe in different directions

表2 三维接触式测头的测量精度

Tab. 2 Accuracy of 3D contact probe (nm)

Direction	Repeatability	Standard deviation
X+	33.1	9.4
X-	41.8	13.4
Y+	36.5	10.3
Y-	38.7	8.2
Z	49.6	20.0

性最大为49.6 nm,标准差优于20 nm($k=1$)。相较于 X, Y 向测量重复性, Z 向触发测量重复性及离散程度相对较大。

5.2 低至100 μm的微槽测量

利用校准后的标准量块与一级平面平晶研合,形成槽宽为94.941 μm的微槽,如图14(a)所示。量块尺寸校准不确定度为 $U=0.02\text{ }\mu\text{m}+0.2\times 10^{-6}L$ ($k=2$), L 为量块长度。采用谐振式三维触发测头对其槽宽进行测量,验证低至100 μm的内尺寸测量能力,用于此次测量的光纤测球直径低于70 μm。

测量实物图如图14(b)所示,对微槽一个内侧面测量6个点,进行最小二乘平面拟合,另一内侧面测量1个点。计算点到面的距离并补偿测球等效直径,得到微槽的1次测量结果。槽宽测量方向的光纤测球等效直径通过测量标准量块进行分离。重复测量10次,取其平均值作为微槽的最佳估计值,测量结果如表3所示,最大测量误差为-161 nm。

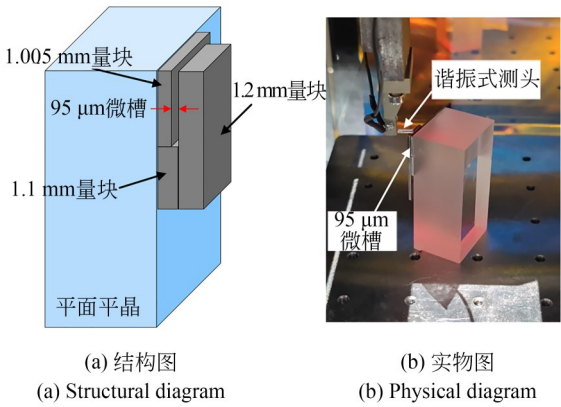


图14 微槽测量实验

Fig. 14 Microgroove measurement experiment

表 3 微槽内尺寸测量结果

Tab. 3 Micro groove dimension measurement results

Number	Measurement results/ μm	Errors/nm
1	95.064	123
2	95.028	87
3	94.852	-89
4	95.047	106
5	95.081	140
6	94.813	-128
7	94.780	-161
8	95.059	118
9	95.035	94
10	94.835	-106
Average	94.959	—

5.3 测量机最大允许误差

为了验证测量机整机测量性能,对校准后的标准量块进行长度测量,计算示值误差。针对测量机存在的主要误差,测量软件中已加入相应的误差补偿程序。依据 ISO 10360-2^[20],对测量机测量空间 7 个不同方向的 5 个不同尺寸标准量块进行测量。测量方向包括 X、Y、Z 轴方向、空间对角线 4 个方向。每个方向被测标准量块的最大长度大于该方向最大行程的 66%。标准量块各方向测量实物图如图 15 所示。在空间

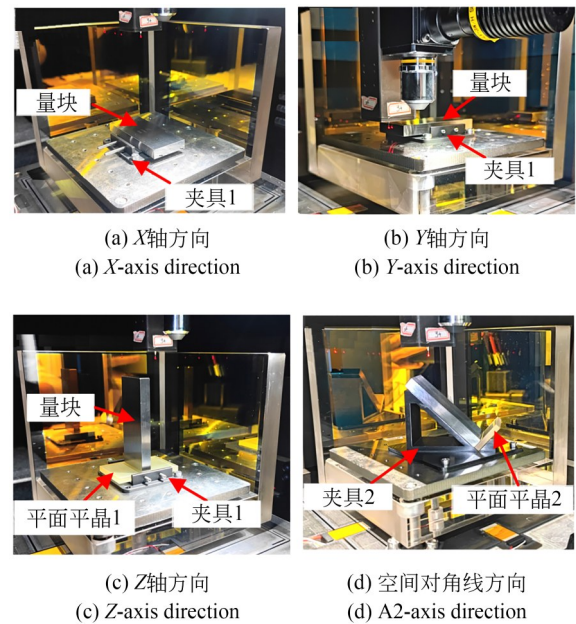


图 15 各方向量块测量实物

Fig. 15 Physical diagram of standard gauge block measurements in various directions

对角线方向与 Z 轴方向,标准量块一端工作面通过研合标准平面平晶扩展工作面,方便测头测量。

计算各量块测量结果与校准值之差,每个方向的每个量块重复测量 3 次,共计 105 次测量。得到各尺寸标准量块示值误差最小包含直线,如图 16 所示。测量机最大允许误差(Maximum Permissible Errors, MPE)优于 $\pm(250\text{ nm}+3.6\times10^{-6}\times L)$, L 为被测工件长度尺寸,单位为 mm。

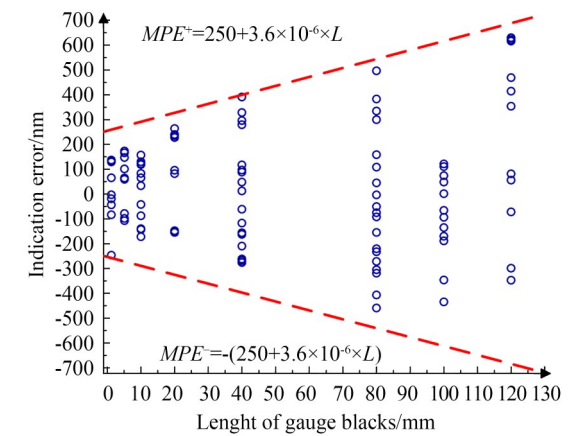


图 16 各尺寸量块示值误差

Fig. 16 Indication errors of gauge blocks in various sizes

6 结 论

本文研制了一种符合阿贝原则的新型跨尺度微纳米三坐标测量机,测量体积可达 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times100\text{ mm}$ 。该测量机计量系统在三维方向上符合阿贝原则,同时独立于运动系统,避免了运动误差与阿贝误差对计量系统造成的影响。宏微协同的运动系统在提高测量效率的同时可以完成测头高精度二次触发及测量任务。所研制的谐振式三维触发测头测球直径可达 $70\text{ }\mu\text{m}$ 以下,可实现低于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 内尺寸的测量。对于测量机存在的误差来源,建立了完整的误差模型并完成误差分离与补偿,进一步提高了测量机精度。为了验证测量机整机测量性能,依据 ISO10360-2 标准对测量机最大允许误差进行测量,结果显示其最大允许误差优于 $\pm(250\text{ nm}+3.6\times10^{-6}\times L)$ 。实验结果表明,所开发的 CSMN-CMM 具有亚微米级的测量精度,其结构

设计及关键技术对高精度三维测量具有重要意义。

作者贡献声明:

黄强先:获取资助,论文构思,研究的管理和协调;

刘慧洁:软件研发,数据整理和维护;

张祖杨:方法设计、初稿写作;

程荣俊:项目管理,论文审核与编辑;

李红莉:实验指导及验证;

张连生:实验指导,调查研究;

李瑞君:提供资源。

参考文献:

- [1] OLANIYAN T, FAISAL N, NJUGUNA J. Recent Developments in Mechanical Ultraprecision Machining for Nano/Micro Device Manufacturing [J]. *Micromachines*, 2024, 15(8): 1030.
- [2] ZHANG S J, ZHOU Y P, ZHANG H J, *et al.* Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 142: 16-41.
- [3] 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.
- [4] 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. 74001-74010.
- [5] TAKAMASU K, FUJIWARA M, NAOI H, *et al.* Friction drive system for nano-CMM[C]. *Proc. Mechatronics 2000. Sep 21-23 2000. Warsaw, Poland.*
- [6] PEGGS G N, LEWIS A J, OLDFIELD S. Design for a compact High-Accuracy CMM[J]. *CIRP Annals*, 1999, 48(1): 417-420.
- [7] JÄGER G, MANSKE E, HAUSOTTE T, *et al.* Nanomeasuring and nanopositioning engineering [J]. *Measurement*, 2010, 43(9): 1099-1105.
- [8] 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.
- [9] 范光照,朱志良,钟添东. 小型微/纳米级三坐标测量机的研制[J]. *纳米技术与精密工程*, 2003, (1): 17-23.
- FAN G ZH, ZHU ZH L, ZHONG T D. Development of a Small Coordinate Measuring Machine with Micro/Nano-Accuracy [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2003, (1): 17-23. (in Chinese)
- [10] SPAAN H A, DONKER R L, WIDDER-SHOVEN I. Isara 400: Development of an ultra-precision CMM for 3D measurement of large parts [C]. *Proc. ASPE 2009.*
- [11] BOS E, MOERS T, RIEL M V. Design and verification of an ultra-precision 3D-coordinate measuring machine with parallel drives [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 085904.
- [12] 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)
- [13] 杨婧,冯其波. 数控机床空间几何误差测量研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(08): 1901-1911.
- YANG J, FENG Q B. Research progress on volumetric geometric error measurement of numerical control (NC) machine tools [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument.* 2017, 38 (08) : 1901-1911. (in Chinese)
- [14] 石照耀,张斌,费业泰. 阿贝原则再认识[J]. *仪器仪表报*, 2012, 33(05): 1128-1133.
- SHI ZH Y, ZHANG B, FEI Y T. Re-visit to the Abbe principle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument.* 2012, 33(05): 1128-1133. (in Chinese)
- [15] ZHANG F, HUANG Q X, YE Y S, *et al.* Development of submicron precision three-dimensional low cross-interference air-floating motion stage[J]. *Rev Sci Instrum*, 2023, 94(6): 065013.
- [16] 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.
- [17] HUANG Q X, WANG W Q, WANG G P, *et al.* High precision and low force resonant probe based on quartz tuning fork[J]. *Int J Precis Eng Manuf*, 2023, 24: 2073-2082.
- [18] BÖNSCH G, POTULSKI E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae[J]. *Metrologia*, 1998, 35: 133-139.
- [19] ECHERFAOUI Y, OUAFI A E, KARGANROUDI S S. Dynamic errors compensation of high-speed coordinate measuring machines using ANN-based predictive modeling [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2022, 122: 2745-2759.
- [20] ISO 10360-2: 2009-Geometrical product specifications (GPS)-Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions[S]. Geneva, CH: International Organisation for Standardisation; 2009.

作者简介:



黄强先(1968—),男,山东即墨人,博士,教授,博士生导师,1998年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为微纳米三维测量技术、仪器精度理论及应用等。E-mail: huangqx@hfut.edu.com

通讯作者:



张祖杨(1998—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2020年于安徽大学获得学士学位,主要研究方向为微纳米测量技术与系统和精密测量理论。E-mail: zhangzuyang11@163.com