

文章编号 1004-924X(2026)08-1232-13

光学元件六自由度位姿高精度检测方法

刘昊天^{1,2,3}, 曾雪峰^{1,2,3*}, 李雯研^{1,3}, 王灵杰^{1,2,3}, 张学军^{1,2,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130031)

摘要:针对光刻机、精密装配及空间光学系统等领域中对光学元件位姿进行纳米级位移与微弧度级角度高精度测量的需求,以及现有方法在实现多自由度同步、集成化测量方面的不足,本文提出并验证了一种基于多通道差分激光干涉的测量系统。通过构建七路干涉仪布局与统一数学模型,实现了光学元件六自由度位姿包括位移与转角信息的同步解算。仿真表明,在理想条件下,系统在 X, Y, Z 方向的平移测量均方根误差优于 3.384 nm ,转角测量误差优于 $4.616\text{ }\mu\text{rad}$ 。实验验证中,静态环境下位移与角度稳定性RMS分别达 7 nm 与 $16.4\text{ }\mu\text{rad}$;为考查系统对微小位移变化的响应特性,在位移台驱动下施加亚微米级阶跃位移输入,对系统输出进行统计分析表明,在阶跃前后稳定区间内,系统位移输出具有良好的重复性与稳定性,其RMS波动维持在纳米量级。此外,在角度变化为 $-300\text{ }\mu\text{rad}$ 与 $-500\text{ }\mu\text{rad}$ 阶跃输入下,系统输出与自准直仪参考值之间的线性相关系数分别为 0.984 与 0.937 ,残差RMS控制在 $44\text{ }\mu\text{rad}$ 以内。该系统结构紧凑、抗干扰强、线性度高,适用于上述高精度场景中的实时位姿监测。未来将开展多自由度耦合误差标定与动态环境适应性研究,以进一步提升系统的实用性与可靠性。

关键词:精密装调;高精度测量;六自由度位姿测量;多通道差分激光干涉

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263408.1232

CSTR:32169.14.OPE.20263408.1232

High-precision measurement method for 6-DOF pose of optical components

LIU Haotian^{1,2,3}, ZENG Xuefeng^{1,2,3*}, LI Wenyan^{1,3}, WANG Lingjie^{1,2,3}, ZHANG Xuejun^{1,2,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zxf@ciomp.ac.cn

Abstract: To meet the demand for nanometer-level displacement and microradian-level angular high-precision measurement of optical components in fields such as lithography systems, precision assembly, and space optics, and to address the limitations of existing methods in achieving multi-degree-of-freedom

收稿日期:2026-01-14;修订日期:2026-02-03.

基金项目:吉林省重大专项(No. SKL202302023);基金委重大仪器研制项目(No. 62127901);中国科学院青促会(No. 2020224)

(DOF) synchronous and integrated measurement, this paper proposed and experimentally validated a measurement system based on multi-channel differential laser interferometry. By designing a seven-channel interferometer configuration and establishing a unified mathematical model, simultaneous solving of six-DOF pose parameters—including translational displacements and rotational angles—of optical components was realized. Simulation results indicated that, under ideal conditions, the root-mean-square (RMS) errors of translational measurements in the X , Y , and Z directions were better than 3.384 nm, while the angular measurement errors did not exceed 4.616 μrad . Experimental verification demonstrated that, in a static environment, the RMS stability of displacement and angular measurements reached 7 nm and 16.4 μrad , respectively. Under step inputs of $-300 \mu\text{rad}$ and $-500 \mu\text{rad}$, the linear correlation coefficients between the system outputs and autocollimator reference values were 0.984 and 0.937, respectively, with residual RMS errors maintained within 44 μrad . The proposed system featured a compact structure, strong resistance to environmental disturbances, and high linearity, making it suitable for real-time pose monitoring in high-precision applications. Future work will focus on multi-DOF coupling error calibration and adaptability under dynamic environments to further enhance the practicality and reliability of the system.

Key words: precision alignment; high-precision measurement; six-degree-of-freedom pose measurement; multi-channel differential laser interferometry

1 引言

精密光学元件在先进光学系统与高端装备中发挥着关键作用,其装调精度与在位检测精度直接影响系统整体性能。随着光刻装备、精密加工与空间光学等领域对成像质量和定位精度要求的不断提升,光学元件在装调过程中对多自由度位姿测量提出了更高要求,亟须实现纳米级位移与微弧度级姿态的高精度同步测量^[1]。然而,受测量环境复杂、装调空间受限以及测量自由度耦合等因素影响,传统测量方法难以满足上述需求。

现有光学元件位姿测量方法主要包括机械式测量、基于几何基准的光学测量以及光栅编码测量等。机械式测量方法依赖高精度机械基准,易受环境振动与热漂移影响,难以满足纳米级精度需求^[2]。基于光栅和编码器的测量方法具有结构紧凑和易集成等优点,但其精度受制造误差、安装误差及系统非线性影响,在多自由度高精度测量场景中存在一定局限性^[3]。

激光测量技术因具有非接触、高分辨率和量值可溯源等特点,已成为高精度位姿测量的重要发展方向。其中,激光跟踪与多站测量方法在大范围姿态测量领域得到了广泛应用。近

年来,国内学者围绕大范围高精度姿态测量与系统标定问题,提出了基于多位姿标靶和多参数联合标定的激光跟踪姿态测量方法,有效提升了系统姿态解算精度与稳定性^[4-5]。然而,该类方法在微小位姿变化检测与纳米级位移测量方面仍受到测量分辨率和环境扰动抑制能力的限制。

相比之下,激光干涉测量(Laser Interferometry)凭借其极高的位移分辨率和良好的动态响应特性,在纳米级位移与微小角度测量中展现出显著优势。近年来,多通道、多光束干涉测量技术不断发展,由单轴测量逐步扩展至多自由度位姿联合测量,为高精度装调与在线检测提供了新的技术途径^[6]。其中,差分干涉测量方法由于对公共光程扰动不敏感、角度测量灵敏度高,能够有效抑制环境振动与空气扰动等因素的影响,在微小位姿变化检测中具有明显优势^[7]。

在多自由度激光干涉位姿测量研究中,部分学者进一步将多束干涉测量与统一解算模型相结合,实现了六自由度位姿参数的同步获取。Nitsche等基于多干涉仪激光多边测量提出了六自由度位姿估计算法,并通过实验验证其微米/微弧度级精度能力^[8]。同时,还有研究通过构

建统一测量模型与数值验证方法,实现干涉仪与准直、自准直等量测原理的联合测量,为多自由度误差分离与高精度测量提供了有效工具^[9]。

围绕多通道干涉测量系统的精度评估问题,已有工作尝试建立系统的误差校准模型及不确定度分析框架。例如,Brosed 等人针对高精度望远式多点激光多边测量仪设计了系统校准模型,并利用 Monte Carlo 模拟进行了不确定度预算分析,为工程测量中的系统误差来源及传播特性提供了量化依据^[10]。此外,在动态测量系统与集成干涉测量配置的研究中,也进一步探讨了误差项的分解与补偿方法,指出几何结构误差、光路非理想性及环境扰动对测量输出的影响机制^[11]。

在近两年的研究中,多自由度激光干涉位姿测量技术取得了新的进展。一方面,基于多束激光干涉的空间误差建模与补偿方法不断完善,实现了对多自由度位姿误差的高精度解算与校正^[12];另一方面,紧凑化、集成化的多自由度干涉测量结构不断提出,通过单束或少束激光实现多自由度位姿信息的同步获取,为复杂装调环境下的精密测量提供了新的解决方案^[13]。

以光刻系统为代表的高端光学装备对光学元件装调精度提出了更为严苛的要求。针对光刻装备的高精度计量需求,国际上已开展多轴激光干涉测量研究。ASML 等公司在光刻机位置反馈与计量系统中广泛采用多通道激光干涉技术^[14]。德国国家计量院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt,PTB)和美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)在多自由度干涉测量系统的误差建模、灵敏度分析及校准方法方面开展了系统研究^[15]。在极紫外(Extreme Ultraviolet,EUV)光刻领域,已有研究报道了利用激光干涉仪对投影光学系统及反射镜进行高精度测量的方法,并指出反射镜位姿误差是影响系统成像性能的重要因素^[16-17]。

需要指出的是,ASML,PTB 与 NIST 等机构在多自由度激光干涉测量领域的研究,通常面向光刻装备与国家计量体系中的高稳定实验环境,其研究重点侧重于极限测量精度实现、复

杂几何标定流程以及计量溯源体系的建立^[14-15]。相比之下,本文研究不以突破单自由度测量极限为目标,而是面向光学元件装调与在位检测等工程应用场景,在结构紧凑性、多自由度同步解算及抗环境扰动能力之间寻求工程可行的平衡。通过引入冗余观测的多通道差分干涉布局,并结合统一的线性测量模型与误差传播分析方法,提升系统在复杂装调环境下的解算稳定性与实用性。

尽管现有光学位姿测量技术在不同应用场景中取得了大量研究进展,但在面向光刻装备、精密光学装调及空间光学系统等高集成、高精度、多自由度同步测量需求时,仍存在一定局限性,主要体现在以下三个方面。

(1)系统集成化程度不足。

机械式测量方法和部分基于几何基准的光学测量系统通常依赖复杂的机械结构或外部参考基准,系统体积大、装调过程复杂,难以集成到空间受限的高端装备内部。在光刻机和精密装配场景中,测量系统往往需要与执行机构、控制系统高度集成,传统方案在结构紧凑性与工程适配性方面存在不足。

(2)多自由度同步测量能力有限。

现有部分光栅编码器、激光跟踪及单轴或几轴干涉测量方案,通常针对单一或有限自由度进行优化设计,在实现多自由度位姿测量时,需要通过多系统组合或多次测量完成。这类方法在多自由度同步性方面存在不足,难以满足光学元件装调与在位检测过程中对位移与姿态变化的实时同步获取需求。

(3)测量误差耦合难以有效抑制。

在多自由度测量系统中,几何结构误差、光路非理想因素及环境扰动往往通过测量模型发生耦合,尤其在微小角度测量中,对系统解算稳定性和精度产生显著影响。部分现有方法虽然通过增加测量通道或后期补偿策略提升精度,但缺乏统一的误差建模与传播分析框架,限制了系统精度提升与工程可推广性。

基于上述背景,本文围绕高精密光学元件装调与检测过程中对六自由度位姿高精度测量的需求,提出并研究了一种基于多通道差分激光干涉的位姿测量方法。通过构建具有冗余观测能

力的多通道测量系统,建立统一的光程模型与线性测量方程,系统分析多源误差对位姿解算精度的影响规律,并通过数值仿真与实验验证相结合的方式,验证所提出方法在高精度位姿检测中的可行性与有效性。

2 测量模型

2.1 差分干涉仪原理

双频激光干涉仪通过测量测量光路与参考光路之间的光程差变化,实现被测物体位移信息的高精度获取。如图1所示,系统中激光器输出两束频率分别为 f_A 和 f_B 的正交偏振光束,经光学分束后分别进入参考光路与测量光路。其中,参考光路采用固定角锥棱镜,测量光路由安装于被测平台上的反射器构成^[18]。

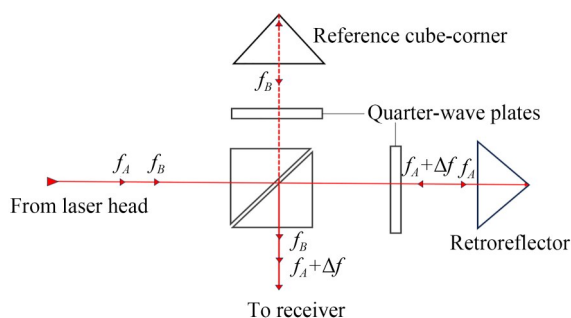


图1 差分干涉仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of the differential interferometry principle

2.2 位姿测量原理

如图2所示, X,Y 方向采用双通道差分干涉结构,用于获取平移位移及绕垂直轴的转动信息; Z 方向布置多条干涉测量通道,用于提高轴向位移及倾斜角测量的灵敏度。

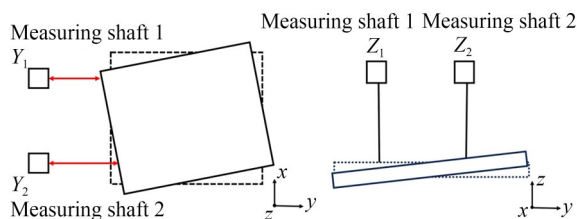


图2 角度测量原理图

Fig.2 Schematic illustration of the angle measurement principle

2.3 六自由度测量方案及建模

测量系统采用七路干涉仪,如图3所示:七路干涉仪方案由 X 方向两路、 Y 方向两路、 Z 方向三路共七通道组成,各通道分别测量工件在对应方向上的光程变化。通过对不同测量通道结果进行几何组合,可同时解算工件的三个位移自由度(X,Y,Z)以及三个转角自由度(R_x,R_y,R_z)。

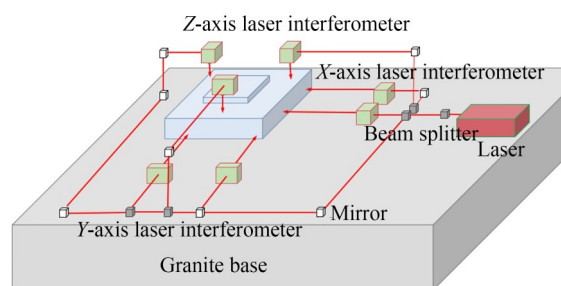


图3 位姿测量系统七路干涉仪布局图

Fig.3 Pose measurement system layout diagram of the seven-beam interferometer

为实现光学元件工件台在装调与运行过程中的高精度位姿解耦,建立干涉仪测量信号与工件台六自由度位姿之间的全局数学模型。在建模过程中需确保工件台运动满足小位移、小角度条件、旋转角度均为微弧度量级、干涉仪光束方向与反射面法向稳定,忽略高阶光学非理想效应;各干涉仪通道相互独立,其测量误差可通过模型统一传播。建立测量系统坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 和工件台坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$,其中,测量参考坐标系的原点 O_s 定义为干涉仪系统的安装基准点(固定于实验平台);被测物体坐标系的原点 O_w 定义为被测工件的几何中心。反射点位置向量均在被测物体坐标系下定义,其相对几何关系可通过系统标定获得。如图4所示。

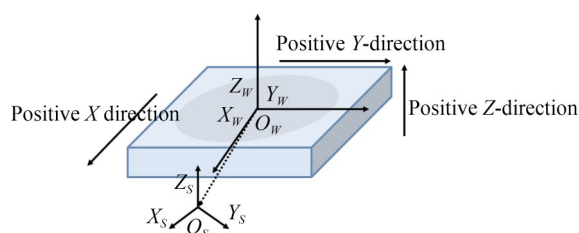


图4 工件台与测量系统建模示意图

Fig.4 Modeling schematic of the stage

此处假设第 i 路干涉仪对应的反射点在工件台坐标系下的位置向量为 $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^\top$ 。当工件台发生微小位姿变化后,该反射点在计量坐标系中的位移可表示为平移与转动引起位移的叠加: $\Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{t} + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}_i$, 其中 $\mathbf{t} = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^\top$, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^\top$ 。 $\mathbf{t}$ 表示工件台坐标系原点在测量坐标系中的平移偏移量。 $\boldsymbol{\theta}$ 表示工件台绕各轴的微小旋转角度。

对于任意一路激光干涉仪,其光程变化来源于反射点在空间中的位移在激光传播方向上的投影。故此处设第 i 路干涉仪的入射方向单位向量为 $\mathbf{n}_i$;该干涉仪对应的反射点在工件台坐标系下的位置为 $\mathbf{r}_i$ 。当工件台发生位姿变化后,干涉仪测得的光程变化量可表示为:

$$\Delta L_i = \mathbf{n}_i^\top \Delta \mathbf{r}_i. \quad (1)$$

结合光程模型,干涉仪所测得量统一可写为测量向量:

$$\mathbf{L} = \mathbf{A} \mathbf{p}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{L}$ 为干涉仪测得量组合成的测量向量, $\mathbf{p}$ 表示被测物体的位姿参数向量, $\mathbf{A}$ 为系统测量矩阵。

在本文所建立的线性测量模型中,测量矩阵 $\mathbf{A}$ 为实数矩阵,其行数对应七路干涉测量通道,其中矩阵的每一行对应一条干涉光路对六自由度位姿参数的灵敏度关系。第 i 路干涉仪测量值可表示为该通道光束传播方向与反射点位姿变化在该方向上的投影。

对于第 i 路干涉测量通道,其对应的测量方

程可表示为:

$$\Delta L_i = \mathbf{n}_i^\top (\Delta \mathbf{t} + \Delta \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}_i), \quad (3)$$

其中: $\mathbf{n}_i$ 为第 i 路干涉光束的单位方向向量, $\Delta \mathbf{t}$ 为该通道反射点在被测物坐标系中的位置向量, $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 分别表示被测物的平移位移与微小转角。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & y_{z1} & -x_{z1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & y_{z2} & -x_{z2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & y_{z3} & -x_{z3} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & +\frac{d_x}{2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d_x}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d_y}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & +\frac{d_y}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于测量矩阵 $\mathbf{A}$, (x_{zi}, y_{zi}) 表示第 i 路 Z 向干涉仪反射点在被测物体坐标系中的几何位置;用 d_x, d_y 表示 X, Y 向干涉仪对之间的几何间距。

需要指出的是,式(4)中的测量矩阵 $\mathbf{A}$ 由各干涉光路反射点在测量坐标系中的空间位置向量共同决定,其数值对系统几何参数具有较强依赖性。在实际系统中,这些几何参数不可避免地受到加工误差与装调误差的影响。测量系统几何参数如表1所示。

在实际系统中,干涉仪输出的是双频拍频相位信号。第 i 路干涉仪的相位变化为:

$$\Delta f_i = \frac{4\pi}{\lambda_1} \Delta L_i - \frac{4\pi}{\lambda_2} \Delta L_i. \quad (5)$$

经相位解调与解缠处理后,得到等效位移测

表 1 七路干涉测量通道几何参数与敏感自由度对应关系

Tab. 1 Geometric parameters of the seven interferometric channels and their contribution to the measurement matrix

Channel ID	Measurement direction vector $\mathbf{n}_i$	Reflector position $\mathbf{r}_i$	Primary sensitive translational DOF	Primary sensitive rotational DOF
X_1	$[1, 0, 0]$	(x_1, y_1, z_1)	t_x	θ_z
X_2	$[1, 0, 0]$	(x_2, y_2, z_2)	t_x	θ_z
Y_1	$[0, 1, 0]$	(x_3, y_3, z_3)	t_y	θ_z
Y_2	$[0, 1, 0]$	(x_4, y_4, z_4)	t_y	θ_z
Z_1	$[0, 0, 1]$	(x_5, y_5, z_5)	t_z	θ_x, θ_y
Z_2	$[0, 0, 1]$	(x_6, y_6, z_6)	t_z	θ_x, θ_y
Z_3	$[0, 0, 1]$	(x_7, y_7, z_7)	t_z	θ_x, θ_y

量值:

$$L_i = \frac{\Lambda}{4\pi} \Delta f_i, \quad (6)$$

其中:合成波长为 $\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 由于七路测量对

应六个未知量,系统为超定系统,可采用最小二乘法进行解算:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}. \quad (7)$$

表2为六自由度测量模型中所使用的主要符号及其物理含义。

表2 测量模型中主要符号及物理含义

Tab. 2 Main symbols and physical meanings in the measurement model

Symbol	Description
ΔL_i	Optical path length variation measured by the i -th interferometer
$\mathbf{n}_i$	Unit direction vector of the i -th interferometer beam
$\mathbf{r}_i$	Position vector of the reflection point of the i -th beam in the object coordinate system
$\Delta \mathbf{t}$	Translational displacement vector of the object (3 DOF)
$\Delta \boldsymbol{\theta}$	Small rotation vector of the object (3 DOF)
$\mathbf{A}$	Measurement matrix corresponding to the seven interferometer channels

3 误差分析与仿真

3.1 误差分析与传播

在七路双频激光干涉仪六自由度测量系统中,实际测量结果不可避免地受到多种误差因素影响。结合系统结构及测量原理,测量误差主要可分为计量误差、几何结构误差和解算误差三类。

3.1.1 激光波长与空气折射率误差

激光干涉仪以激光波长作为长度基准。激光频率漂移及环境参数变化将引起波长与空气折射率的偏差,其等效作用可统一表示为有效波长误差:

$$h_i = h_i^{\text{true}} (1 + \delta_\lambda), \quad (8)$$

其中: h_i^{true} 为理想测量值, δ_λ 为相对波长误差。该类误差以比例形式进入测量结果,主要影响系统的长期稳定性与尺度精度。

3.1.2 干涉条纹计数与电子细分误差

受电子噪声与相位插值精度限制,干涉仪测量值存在随机误差,可建模为加性噪声:

$$h_i = h_i^{\text{true}} + \epsilon_i, \quad (9)$$

其中, ϵ_i 为零均值随机噪声,其标准差由电子细分分辨率决定。

3.1.3 干涉仪非线性误差

受探测器非线性及解调算法影响,测量结果

可能存在高阶非线性项。该误差在小位移、小角度条件下影响较小,通过系统标定进行补偿或忽略。

3.1.4 几何结构误差

干涉仪光束方向误差及反射点位置误差将改变测量矩阵 $\mathbf{A}$ 的实际形式,从而引入结构性误差。该类误差主要体现在角度测量中,是限制系统角度精度的重要因素。

3.1.5 误差传播

七路干涉仪构成超定测量系统,系统采用最小二乘法对六自由度位姿参数进行解算。基于线性测量模型,测量误差可通过协方差传播分析其对位姿解算结果的影响。由前述测量模型可得线性关系:

$$\Delta \mathbf{L} = \mathbf{A} \mathbf{p} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (10)$$

其中: $\Delta \mathbf{L}$ 为七路干涉测量值向量, $\mathbf{A}$ 为测量矩阵, $\mathbf{p}$ 为六自由度位姿参数向量, $\boldsymbol{\epsilon}$ 为测量噪声向量。

采用最小二乘法对位姿参数进行估计,其解为:

$$\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{L}. \quad (11)$$

在假设测量噪声为零均值随机变量的条件下,位姿解算结果的协方差矩阵可表示为:

$$\mathbf{C}_p = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_L \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \quad (12)$$

其中: $\mathbf{C}_p$ 为六自由度位姿解算结果的协方差矩阵, $\mathbf{C}_L$ 为干涉测量值的协方差矩阵。在工程应用

中,若各干涉测量通道噪声相互独立且方差相同,可近似认为

$$C_p = \sigma_L^2 (A^T A)^{-1}. \tag{13}$$

上述关系表明,系统位姿解算不确定度不仅与单通道干涉测量噪声水平有关,还与测量矩阵 A 的几何结构密切相关。合理的干涉仪布局及冗余设计能够有效改善 $(A^T A)^{-1}$ 的条件数,从而降低位姿解算的不确定度并提升系统整体测量

稳定性。

3.1.6 误差预算分析

基于前述误差来源分析与协方差传播模型,本节对系统主要误差源进行误差预算分析,如表 3 所示,从误差量级、统计分布及相关性角度评估其对六自由度位姿测量结果的不确定度贡献。实际系统结构参数不确定性可能进一步放大误差传播结果。

表 3 七路差分激光干涉六自由度测量系统误差预算

Tab. 3 Uncertainty budget of the seven-channel interferometric 6-DOF measurement system

Error source	Typical magnitude	Statistical property	Correlation between channels
Laser wavelength & air refractive index	10^{-8} (relative)	Systematic	Fully correlated
Interferometer resolution	1.2 nm	Quantization	Uncorrelated
Displacement measurement noise	4 nm RMS	Gaussian	Uncorrelated
Common-mode vibration	4 nm RMS	Gaussian	Fully correlated
Lever-arm asymmetry	0.3%~0.6%	Systematic	Geometry dependent

3.2 测量系统仿真

为验证所建立的多干涉仪六自由度位姿测量模型的正确性与稳定性,基于系统几何布局与测量方程,开展数值仿真研究。仿真重点分析系统在理想静止状态下的六自由度测量稳定性;以及在给定单轴转角扰动(x 轴转角)条件下,系统对角度变化的响应特性及解算稳定性。

3.2.1 测量系统仿真设计

为逼近实际测量环境,在仿真中引入多源噪

声模型,包括:角度噪声,干涉仪测量噪声,伺服残余角度噪声。仿真中进一步区分了名义几何参数与实际几何参数,通过在反射点位置与杠杆臂长度中引入随机偏差与漂移项,模拟加工与装调误差对测量矩阵的影响,从而评估系统对几何参数不确定性的敏感性。

仿真流程如图 5 所示。

上述噪声水平与工程实际中高精度干涉测量系统相符,可用于评估系统在现实工况下的测量稳定性与抗噪性能。仿真参数如表 4 所示。

表 4 仿真参数设置

Tab. 4 Simulation parameter settings

Category	Parameter	Value	Unit
Sampling	Sampling frequency	10	Hz
	Single-segment duration	11	s
	Equivalent stability evaluation duration	180	s
Geometry	Lever-arm length	150	mm
Noise	Displacement noise	4.0	nm
	Common-mode vibration	4	nm
Resolution	Interferometer resolution	1.2	nm
Perturbation	Applied angular step	300/500	μ rad

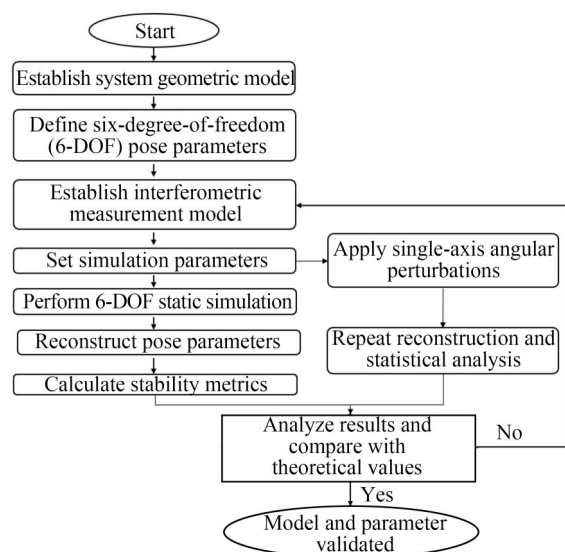


图 5 仿真流程图

Fig. 5 Simulation Flow Diagram

3.2.2 测量系统仿真结果

为评估测量系统的稳定性特性,仿真中首先生成时长为 11 s 的单次仿真序列,用于模拟实际测量过程中具有代表性的干涉仪噪声与角度扰动信号。随后通过多段仿真序列的重生成与统计分析,获得等效 180 s 时间尺度下的系统稳定性评估结果,用以表征测量系统的长期稳定性特性,如图 6 所示,为三平动三转动的稳定性误差仿真。

仿真结果统计如表 5 所示:其中, R_z 的稳定性显著优于 R_x 与 R_y , 主要得益于 x, y 轴四路干涉仪具有对 R_z 的冗余设计,可以提升 z 轴转角测量精度。六自由度静态稳定性仿真表明,系统可实现纳米级平移稳定性与微弧度量级角度稳定性。

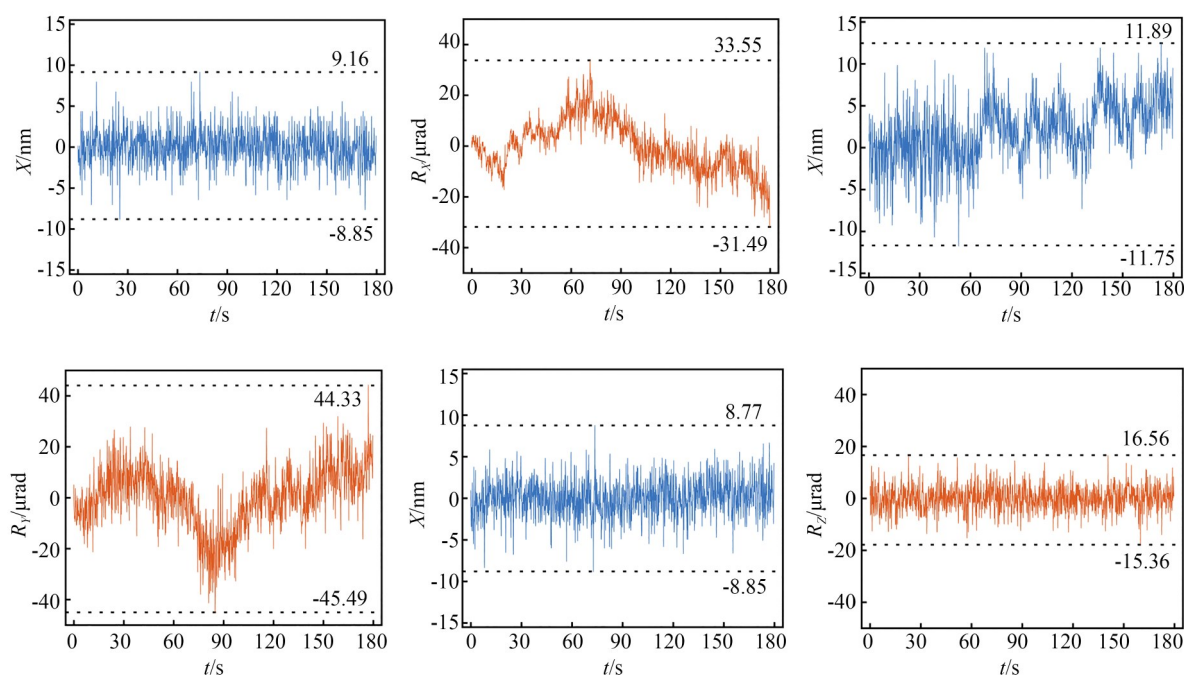


图 6 测量系统 180 s 内六自由度稳定性误差仿真

Fig. 6 Simulation of 6-DOF stability errors over an equivalent duration of 180 s

在分别施加 x 轴转角扰动 $-300, -500, -700 \mu\text{rad}$, 其余自由度保持不变的条件下,系统角度解算结果如图 7 所示。

系统角度解算结果如表 6 所示:在 $-300 \sim -700 \mu\text{rad}$ 转角范围内, R_x 解算误差稳定在 $10 \mu\text{rad}$ 以内,相对静态误差低于 1.5% 。

3.2.3 与典型六路测量系统进行比较

为定量评估冗余观测对系统稳定性与抗扰能力的影响,在保持被测物体真实运动、环境扰动、测量噪声及几何参数扰动完全一致的条件下,构建了一种典型的非冗余六通道干涉测量系统作为对照。

表 5 仿真测量系统各自由度对应 RMS 误差与最大误差
Tab. 5 RMS and maximum errors of each degree of freedom in the simulated measurement system

DOF	RMS error	Unit
X	2.59	nm
Y	2.763	nm
Z	3.384	nm
R_x	4.591	μrad
R_y	4.616	μrad
R_z	0.234	μrad

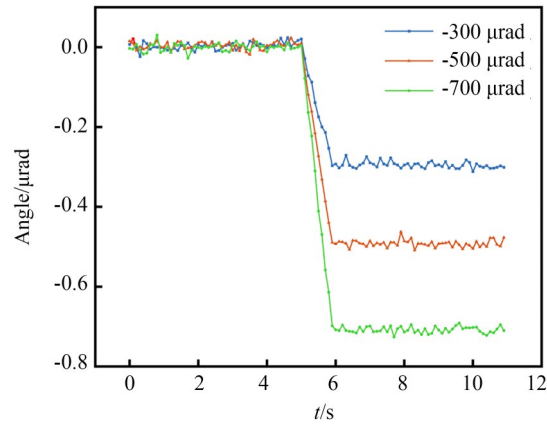


图 7 仿真中添加角度变量后三个角度解算结果
Fig. 7 Three-angle calculation simulation with added angle variables

表 6 添加角度变化量后测量系统角度稳定性
Tab. 6 Angular stability response of the measurement system to an applied angular variation (μrad)

Angle	R_x	R_y	R_z
-300	8.7	9.7	5.3
-500	9.6	8.4	6.7
-700	9.7	10	5.6

该六通道系统由 Z 向三路、X 向两路及 Y 向一路干涉仪组成,相比本文提出的七通道系统,仅在 Y 方向减少一路测量通道,其余系统参数保持不变。仿真结果如表 7 所示。

结果表明,两种系统在平移自由度上的测量精度基本一致,而冗余观测对角度解算的稳定性提升更为显著。尤其在绕 Z 轴转动自由度上,七通道系统的 RMS 误差相较六通道系统降低约 6 倍,表明在存在几何不确定性与环境扰动的情况下,Y 方向冗余测量为系统引入了有效的附加约

表 7 针对七通道与六通道系统的六自由度测量 RMS 误差
Tab. 7 RMS errors of the six-DOF measurements for seven-channel and six-channel systems

DOF	Seven-channel RMS	Six-channel RMS	Unit
X	2.59	2.61	nm
Y	2.763	3.12	nm
Z	3.384	3.40	nm
R_x	4.591	4.60	μrad
R_y	4.616	4.62	μrad
R_z	0.234	1.47	μrad

束,显著提升了角度解算的稳定性与抗干扰能力。

4 测量实验与结果

4.1 实验光路搭建

为验证所提出多自由度位姿测量方法在实际系统中的可行性与测量精度,搭建了基于双频激光干涉仪的实验验证平台。实验光路图如图 8 所示,系统主要由以下部分组成:

(1) 实验采用商用双频激光干涉仪系统 (Keysight 10705A),共配置四路测量通道,其中选取两路用于位移与角度测量。该干涉仪单通道分辨率为 1.2 nm,仪器在出厂前已完成标定,可满足纳米级位移测量需求。

(2) 位移与微小转角激励由商用六自由度纳米定位位移台(型号 MAX602D)提供。该位移台具有良好的重复性与机械稳定性,可为实验提供高重复性、可控的微位移与微角度输入,保证被测反射镜在实验过程中的运动稳定性。

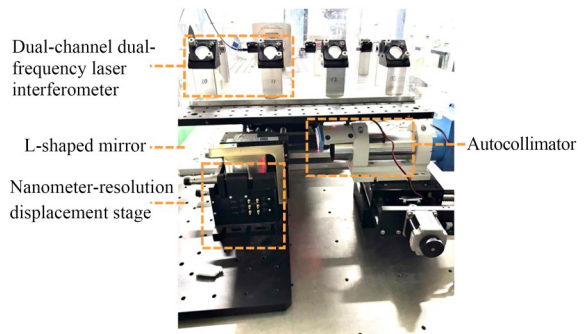


图 8 实验光路图
Fig. 8 Experimental optical setup

(3) L型反射镜:被测对象为定制加工的L型反射镜组件,其两反射面A面与B面的夹角为 $90^\circ \pm 10''$ 。该结构用于实现位移与转角之间的几何映射与放大,其非理想正交性对角度测量精度的影响已在误差分析中予以讨论。

(4) 自准直仪:实验中作为角度参考采用了Möller-Wedel Optical的ELCOMAT® 3000全自动自准直仪。该仪器具备双轴角度测量能力,全程精度约为 $\pm 0.25''$ ($\approx 1.21 \mu\text{rad}$),重复性约 $0.05''$,可为干涉仪角度解算结果提供可追溯的参考。

实验中通过位移台驱动L型反射镜产生微小角度偏转,同时由双频激光干涉仪与自准直仪同步测量角度变化,实现角度测量一致性与精度验证。

在实验中,为避免直接采用设计值带来的系统误差,本文通过施加已知角度变化,利用自准直仪作为角度参考设备,并结合双通道差分激光干涉仪输出,对干涉光路反射点间距及其等效杠杆臂参数进行反算标定。由此获得的几何参数被用于构建实际测量矩阵,从而提高位姿解算结果的准确性。

4.2 测量系统静态稳定性实验

在反射镜保持静止、环境条件稳定的情况下,对系统进行了180 s连续采样测试,用以评估测量系统的短期稳定性。

位移稳定性实验结果如图9所示,其RMS为7 nm。这表明,系统在静态条件下可实现nm量

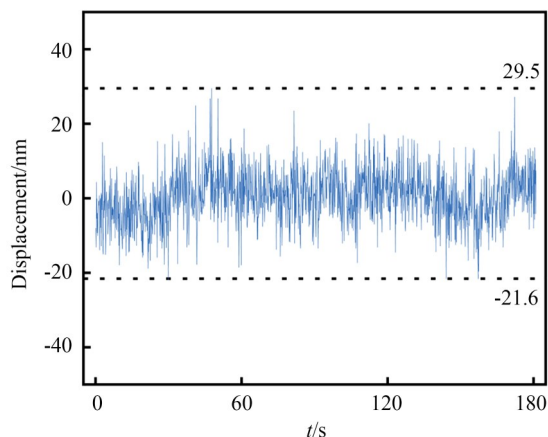


图9 实验系统180 s内位移稳定性

Fig. 9 Displacement stability of the experimental setup over 180 s

级的位移测量稳定性,验证了双频激光干涉仪在当前实验环境中的高分辨率与低噪声特性。

角度测量稳定性实验结果如图10所示,其RMS为 $16.4 \mu\text{rad}$,相较位移测量,角度结果受几何放大误差、装调偏差及环境扰动影响更为明显,但整体稳定性仍保持在数十微弧度量级,满足微角度测量的实验验证需求。

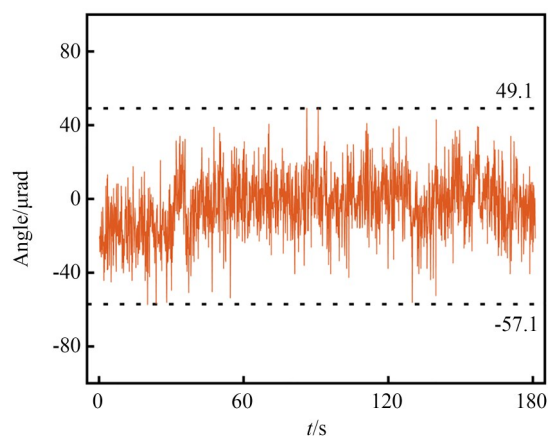


图10 实验系统180 s内角度测量稳定性

Fig. 10 Angular stability of the experimental system over 180 seconds

4.3 测量系统位移变量实验

为进一步验证所提出多通道差分激光干涉测量系统的位移检测能力,开展了位移测量实验。该实验重点关注系统对位移变化的分辨能力及测量稳定性,而非对位移执行机构的绝对位移精度进行标定。

实验过程中,通过精密位移台对被测对象施加小幅位移变化,同时记录干涉测量系统的输出数据。根据位移加载时序,将实验数据划分为位移加载前阶段与加载后阶段,并分别对两个阶段的测量结果进行统计分析。结果如图11所示。

在位移加载前阶段($t < 9 \text{ s}$),测量结果的均值为193 nm,RMS为7.1 nm;在位移加载后阶段($11 \text{ s} \leq t \leq 15 \text{ s}$),测量均值变化至461 nm,RMS为7.7 nm。位移加载前后两阶段的均值差约为268 nm,明显高于系统的噪声水平。

实验结果显示,在位移加载前后,系统RMS噪声水平约为7~8 nm,明显低于微米量级的位移变化幅值,表明系统具有纳米级位移分辨能

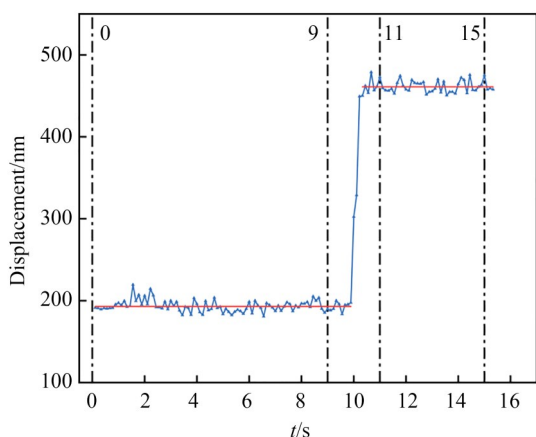


图 11 位移变化实验图

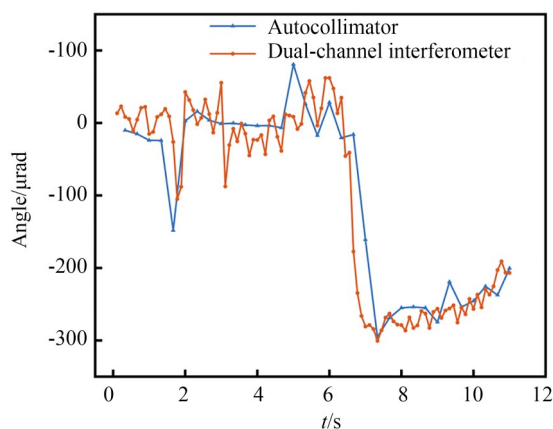
Fig. 11 Displacement variation experimental diagram

力。受限于实验条件与位移执行机构的可控性, 本工作仅对微米量级位移变化进行了验证, 更小幅值位移变化的实验验证将作为后续工作开展。

4.4 测量系统转角变量实验

为验证测量系统对微小角度变化的测量能力与稳定性, 分别对被测对象施加 $-300\ \mu\text{rad}$ 和 $-500\ \mu\text{rad}$ 的角度变化。

首先为添加 $-300\ \mu\text{rad}$ 的情况下, 实验结果如图 12 所示。

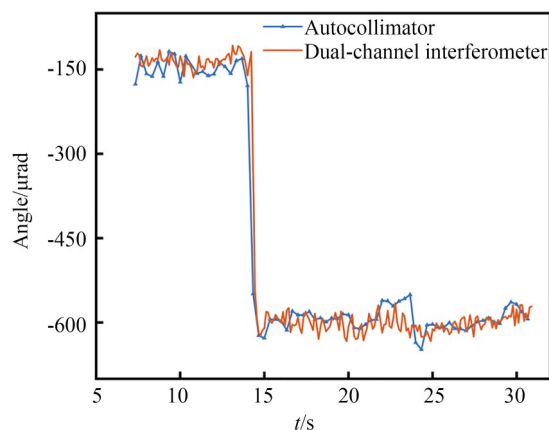
图 12 添加角度变化量为 $-300\ \mu\text{rad}$ 时测量系统角度变化图Fig. 12 System angular response to a $-300\ \mu\text{rad}$ step input

实验结果表明, 两者之间具有良好的线性一致性, 相关系数 $R=0.983\ 95$, 决定系数 $R^2=0.968\ 16$, 表明系统对微小角度变化具有较高的线性响应能力。

残差分析结果显示, 角度残差均值为

$-6\ \mu\text{rad}$, 残差 RMS 为 $37\ \mu\text{rad}$ 。说明系统在该角度变化幅值下具有良好的测量稳定性。

在施加 $-500\ \mu\text{rad}$ 角度变化条件下, 实验结果如图 13 所示。

图 13 添加角度变化量为 $-500\ \mu\text{rad}$ 时测量系统角度变化图Fig. 13 System angular response to a $-500\ \mu\text{rad}$ step input

相关系数 $R=0.937\ 22$, 决定系数 $R^2=0.878\ 38$ 。线性拟合斜率接近 1, 表明系统对角度变化具有较为准确的响应特性。

残差分析结果显示, 在较大转角 ($-500\ \mu\text{rad}$) 条件下, 尽管干涉仪与自准直仪测量结果仍保持较高线性相关性, 但残差幅值有所增大。该现象主要来源于以下因素的综合作用: 其一, 自准直仪在较大视场角下存在一定的非线性误差; 其二, 干涉测量模型中反射镜结构非理想性在角度解算中被放大; 其三, 转角增大导致干涉光束在反射镜表面的入射点发生微小漂移, 以及参考轴系不完全共线等几何不确定性, 在大角度工况下表现为系统性残差。上述因素共同导致 $-500\ \mu\text{rad}$ 条件下残差水平高于小角度工况。

分别在 $-300\ \mu\text{rad}$ 与 $-500\ \mu\text{rad}$ 两种角度幅值条件下, 对差分干涉仪角度解算结果与自准直仪测量结果进行了对比实验与线性回归分析。除线性相关系数外, 进一步给出了拟合斜率及其 95% 置信区间, 以全面评估系统的尺度误差、系统偏置及随机误差特性, 如表 8 所示。

进一步分析表明, 标定后残差 RMS 约为 $40\ \mu\text{rad}$, 其数值明显高于自准直仪的重复性水平, 因此残差并非由参考仪器随机误差主导。该残

表 8 干涉仪与自准直仪角度测量结果的线性回归分析

Tab. 8 Linear regression results between differential interferometer (DI) and autocollimator (AC) measurements

Angle amplitude/ μrad	Slope k	95%CI of k	Intercept b / μrad	CI / μrad of b	R^2	RMS/ μrad
-300	1.045 9	[1.020 3, 1.071 4]	-6.8	[-11.9, -1.6]	0.968	36.7
-500	1.022 5	[0.945 8, 1.099 2]	-2	[-11.1, 7.1]	0.878	44

差主要来源于系统结构性误差,包括:

(1) L型反射镜两反射面非理想正交性引起的几何映射偏差;

(2) 多通道干涉光路方向不完全共线导致的方向投影误差;

(3) 杠杆臂参数微小不对称及安装偏差引入的角位移耦合误差。

为统一仿真结果、静态稳定性实验及角度对比实验之间的误差逻辑关系,本文将角度测量总误差分解为随机噪声项、结构误差项及尺度误差项三部分:

$$\sigma_{\theta, \text{total}}^2 = \sigma_{\theta, \text{noise}}^2 + \sigma_{\theta, \text{structure}}^2 + \sigma_{\theta, \text{scale}}^2. \tag{14}$$

仿真阶段仅考虑随机测量噪声与伺服残余噪声,因此角度稳定性约为4~5 μrad ;静态实验中,系统实际几何参数与标称参数之间存在微小偏差,结构误差叠加后角度稳定性上升至16.4 μrad ;在大角度阶跃输入条件下,尺度误差与固定偏置进一步放大解算误差,导致线性标定前残差RMS达40 μrad 量级。

5 结 论

本文提出并验证了一种基于多通道差分激光干涉的光学元件六自由度位姿高精度测量方

法。通过构建七路干涉冗余测量结构并建立统一的线性解算模型,实现了平移与转动自由度的同步高精度解算。数值仿真结果表明,在静态条件下系统平移测量稳定性优于3.4 nm,角度测量稳定性优于10 μrad ;在-300~-700 μrad 转角范围内,角度解算相对误差低于1.5%。实验验证结果显示,系统位移测量RMS为7 nm,角度测量RMS为16.4 μrad ,且角度测量结果与自准直仪具有良好的线性一致性($R^2>0.87$)。该测量系统在达到上述高精度指标的同时,具备良好的结构适应性与环境鲁棒性,能够满足各类光学装调与在位检测场景中对多自由度同步测量的通用需求。因此,本研究为高端光学装备中光学元件的高精度装调与在位测量提供了一种稳定、可靠的工程实现方案。

作者贡献声明:

刘昊天:算法实现,实验验证,论文构思与撰写;

曾雪锋:论文构思,论文审核,提供实验资源;

李雯研:指导实验,指导写作;

王灵杰:论文审核与指导写作;

张学军:提供实验资源。

参考文献:

[1] SCHWENKE H, NEUSCHAEFER-RUBE U, PFEIFER T, *et al.* Optical methods for dimensional metrology in production engineering [J]. *CIRP Annals*, 2002, 51(2): 685-699.

[2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, *et al.* Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.

[3] GAO W. *Precision Nanometrology: Sensors and Measuring Systems for Nanomanufacturing* [M]. London: Springer London, 2010.

[4] 熊芝,钟陈小鹏,张昊,等. 基于多位姿标靶的激

光跟踪姿态测量系统参数标定[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(1): 13-24.

XIONG Z, ZHONG C, ZHANG H, *et al.* Parameter calibration of laser tracking attitude measurement system based on multi-position targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(1): 13-24. (in Chinese)

[5] 高豆豆,董登峰,邱启帆,等. 面向激光跟踪测量的大范围高精度姿态测量[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 976-986.

GAO D D, DONG D F, QIU Q F, *et al.* Large range automatic attitude measurement method for laser tracking measurement [J]. *Opt. Precision*

- Eng.*, 2024, 32(7): 976-986. (in Chinese)
- [6] CHEN J Y, LI J J, DIAO Y, *et al.* Compact six-degree-of-freedom displacement sensing based on laser reflection and position-sensitive detectors [J]. *Photonics*, 2025, 12(11): 1072.
- [7] YU L, FENG X Y, HU P C, *et al.* Development of a 3-DOF angle sensor based on a single laser interference probe [J]. *Micromachines*, 2023, 14(12): 2221.
- [8] NITSCHKE J, FRANKE M, HAVERKAMP N, *et al.* Six-degree-of-freedom pose estimation with $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ accuracy based on laser multilateration [J]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2021, 10(1): 19-24.
- [9] ZHAO Y Q, ZHANG B, FENG Q B. Measurement system and model for simultaneously measuring 6DOF geometric errors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 20993-21007.
- [10] JAVIER BROSED F, JOSÉ AGUILAR J, ACE-RO R, *et al.* Calibration and uncertainty budget analysis of a high precision telescopic instrument for simultaneous laser multilateration [J]. *Measurement*, 2022, 190: 110735.
- [11] YU X Z, GILLMER S R, WOODY S C, *et al.* Development of a compact, fiber-coupled, six degree-of-freedom measurement system for precision linear stage metrology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(6): 065109.
- [12] LEI L H, SUN C J, XIE Z N, *et al.* Development of a spatial accuracy compensation method based on multi-beam laser interferometer [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 16756.
- [13] SHI L H, ZHANG J X, CHEN J Y, *et al.* Three-degree-of-freedom measurement using a single probe beam [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(4): 1.
- [14] WISCHMEIER L, GRÄUPNER P, KÜRZ P, *et al.* High-NA EUV lithography optics becomes reality [C]. *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography XI. February 23-27, 2020. San Jose, USA.* SPIE, 2020: 4.
- [15] LAUBIS C, BUCHHOLZ C, FISCHER A, *et al.* Characterization of large off-axis EUV mirrors with high accuracy reflectometry at PTB [J]. *Emerging Lithographic Technologies X*, 2006, 6151: 61510I.
- [16] GOLDBERG K A, NAULLEAU P P, DENHAM P, *et al.* EUV interferometry of the 0.3-NA MET optic [J]. *Emerging Lithographic Technologies VII*, 2003, 5037: 69.
- [17] KIM D, LEE D Y, GWEON D G. A new nano-accuracy AFM system for minimizing Abbe errors and the evaluation of its measuring uncertainty [J]. *Ultramicroscopy*, 2007, 107(4-5): 322-328.
- [18] YEN J Y, CHEN L S, CHIU P. Line stitching in servo-assisted electron beam lithography system [C]. *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). July 3-7, 2011, Budapest, Hungary.* IEEE, 2011: 397-402.

作者简介:



刘昊天(2000—),男,山东滨州人,硕士,2022年于济南大学获得学士学位,现就读于中国科学院大学长春精密机械与物理研究所,主要从事光学精密装调方面的研究。E-mail: liuht512@163.com

通讯作者:



曾雪峰(1987—),男,江西抚州人,博士,研究员,2009年于南京理工大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxf@ciomp.ac.cn