

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210696

基于卡尔曼预测的差动共焦轮廓跟踪测量方法*

罗杰^{1,2}, 刘子豪^{1,2}, 刘一郡^{1,2}, 赵维谦^{1,2}, 王允^{1,2}

(1. 北京理工大学光电学院 北京 100081; 2. 北京理工大学“复杂环境智能感测技术”工信部重点实验室 北京 100081)

摘要:针对轴向扫描式差动共焦测量法(ASDCM)测量轮廓效率低下问题,提出一种基于卡尔曼预测的差动共焦轮廓跟踪测量方法。该方法使用激光差动共焦轴向响应曲线数百纳米量程的线性区间实现了表面连续轮廓高精度线性传感测量,提高了测量效率;同时引入基于卡尔曼预测器的轮廓跟踪原理利用已测轮廓点数据对未测表面预测并跟踪,扩展了线性传感轮廓测量法测量范围。实验结果表明,该方法相对于ASDCM法测量效率提升了8倍,且实现了轮廓PV值大于线性传感测量范围的标准椭圆柱高精度跟踪测量,激光聚变靶丸内轮廓圆度重复测量标准差达3 nm。为精密元器件表面连续轮廓的高精度、快速、无损测量提供了一种高质量方法。

关键词: 卡尔曼预测; 差动共焦; 表面轮廓测量; 激光聚变靶丸

中图分类号: TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction

Luo Jie^{1,2}, Liu Zihao^{1,2}, Liu Yijun^{1,2}, Zhao Weiqian^{1,2}, Wang Yun^{1,2}

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. MIIT Key Laboratory of Complex-filed Intelligent Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: It is difficult to realize high efficiency of axial scanning differential confocal measurement (ASDCM). In this article, a differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction is proposed. In this method, the linear range of hundreds of nanometers of laser differential confocal axial response curve is used for high-precision linear sensing measurement of the continuous surface profile, which improves the measurement efficiency. Meanwhile, the Kalman predictor profile tracking method is introduced to predict and track the unmeasured surface using the measured profile point data, which expands the range of linear sensing profile measurement. Compared with the ASDCM, experimental results show that the measurement efficiency of this method is improved by 8 times, the high-precision tracking measurement of the standard elliptical column with the PV value of the outer profile is greater than the linear sensing measurement range, and the repeated measurement standard deviation of the roundness of the laser inertial confinement fusion capsule is 3 nm. It provides a high quality method for high precision, fast and nondestructive measurement of continuous surface profile of rotary precision components.

Keywords: Kalman prediction; differential confocal; surface profile measurement; laser fusion capsule

0 引言

激光惯性约束核聚变中与氘氚燃料直接接触的靶丸内表面形貌对点火成败有着重要影响^[1-2],可灵活自由设计的光学非球面、自由曲面^[3]的表面误差要求可达

0.1 μm ^[4]。因此对此类精密元器件表面连续轮廓的高精度、快速、无损测量具有重要的意义。

共聚焦显微法(confocal microscopy, CM)独特的光学切片能力、优越的横向分辨率、无损测量等特点使其具有卓越的轮廓测量能力,Zhang等^[5]使用CM对结构硅样品轮廓进行测量,测量不确定度达60 nm,但是CM在焦

收稿日期:2022-11-11 Received Date: 2022-11-11

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFA0701203)、国家杰出青年科学基金(61827826)项目资助

点位置处对应轴向响应曲线峰值,灵敏度最低,轴向分辨力最差。Zhao 等^[6]提出差动共焦显微法(differential confocal microscopy, DCM),将CM检测光路分为两路,使用焦前和焦后光信号差动处理得到差动共焦曲线,具有独特的轴向响应能力和高分辨检测能力。Ma 等^[7]、Wang 等^[8]和黄婧雯等^[9]使用轴向扫描式差动共焦测量法(axial scanning differential confocal measurement method, ASDCM)结合精密气浮回转轴系,首次实现了激光聚变靶丸内轮廓高精度无损测量,内轮廓圆度(1~50 upr)10次重复测量标准差达15 nm;Wang 等^[10]和 Ying 等^[11]使用ASDCM结合螺旋扫描测量硅片表面形貌,测量最大偏差小于2.71%。但是此类方法在每一个采样点处都要轴向扫描,受机械扫描的限制,采集单个采样点最短时间为12 ms^[12-13],无法实现高密度采样点的快速测量。为了实现差动共焦无轴向扫描轮廓快速测量,Qiu 等^[14]利用DCM轴向响应曲线线性区间,首次实现了高度为500 nm、周期为5 μm的标准台阶样品高精度、无轴向扫描快速测量,Shao 等^[15]在此基础上改进提出的Dual-DCM法将其测量范围拓展至±0.54 μm。尽管如此,线性区间测量范围始终处于亚微米量级,无法测量表面轮廓PV值大于线性传感测量范围的精密元器件。

针对现存DCM轮廓测量方法轴向扫描低效率和无轴向扫描测量范围小的问题,本文提出一种基于卡尔曼预测^[16]的差动共焦轮廓跟踪测量方法(differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction, KP-DCPTM)。为了实现无轴向扫描快速测量,以物镜位置为基准位置,利用DCM轴向响应曲线百纳米量程的线性区间,对被测物表面轮廓进行线性传感测量,无需轴向扫描,是一种单点触发、快速无损测量方法。为了实现测量过程中被测轮廓一直处于线性传感测量范围内,利用卡尔曼预测器(Kalman prediction, KP)使

用当前轮廓点及历史轮廓点数据对下一表面测量点进行预测,得到预跟踪点,再使用高精度物镜定位器驱动物镜对预跟踪点进行跟踪,跟踪期间轮廓使用线性传感法进行测量。最后将基准位置和线性传感测量值进行数据融合得到被测点的实际高度。搭建实验装置使用KP-DCPTM法开展了标准椭圆轮廓测量实验、激光聚变靶丸内轮廓对比测量实验,对KP-DCPTM法的高效率、高精度和轮廓测量范围进行了验证。

1 基于卡尔曼预测的差动共焦轮廓跟踪测量方法

为了解决ASDCM法测量效率低下问题,提出了KP-DCPTM方法。该方法使用激光差动共焦线性传感测量方法实现了被测件轮廓无轴向扫描快速测量,使用基于KP的轮廓跟踪法解决了线性传感测量方法无法实现大PV值轮廓精密器件测量的问题。

1.1 激光差动共焦线性传感测量方法

提出了激光差动共焦线性传感测量方法,实现了轮廓传感测量,解决了ASDCM法测量效率低下的问题。原理如图1所示,激光器出射光经过扩束镜后扩束后,由PBS选择P偏振光进入测量光路,经过快轴方向与P光呈45°放置的1/4波片后变为左旋圆偏振光,由物镜聚焦到被测物表面,经被测物表面返回的右旋圆偏振反射光经1/4波片变为s光,经PBS反射后全部进入会聚透镜PL₁,没有返回到激光器中影响激光器稳定性,会聚测量光经分光比为5:5的BS分为光强大小相同的两束光,分别进入放置在焦前-M_{off}位置处的针孔PH₁和光电倍增管D₁、焦后+M_{off}位置处的针孔PH₂和光电倍增管D₂组成的点探测器中,完成测量光信号探测。

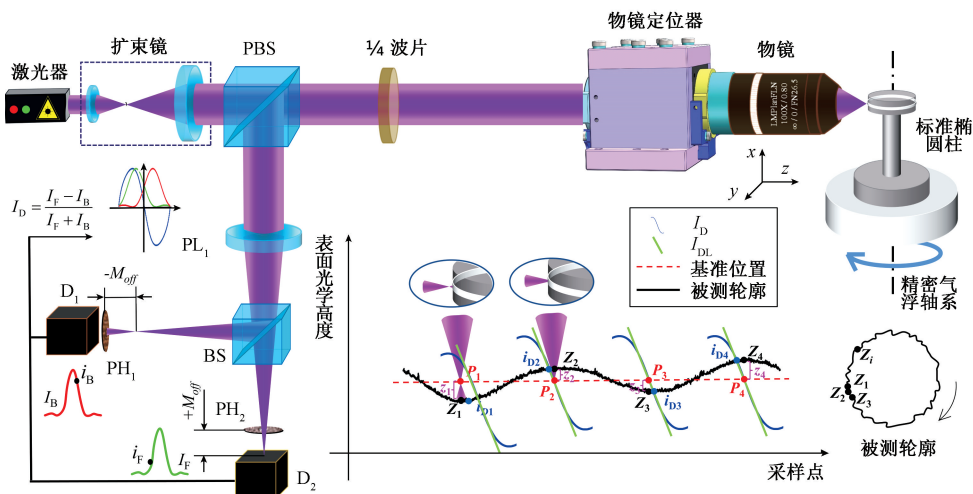


图1 激光差动共焦线性传感测量原理

Fig. 1 Principle of laser differential confocal linear sensing measurement

物镜定位器驱动物镜轴向扫描,两个点探测器探测到的光强响应信号 I_F 和 I_B 抗反射率归一化差动处理,得到抗反射率归一化差动共焦响应曲线:

$$I_D(u, u_M) = \frac{I_F(u, +u_M) - I_B(u, -u_M)}{I_F(u, +u_M) + I_B(u, -u_M)} = \frac{\text{sinc}^2\left[\frac{2u + u_M}{4}\right] - \text{sinc}^2\left[\frac{2u - u_M}{4}\right]}{\text{sinc}^2\left[\frac{2u + u_M}{4}\right] + \text{sinc}^2\left[\frac{2u - u_M}{4}\right]} \quad (1)$$

式中: u 为物空间轴向归一化坐标,与物镜轴向位置 P 满足式(2)。

$$u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f_o}\right)^2 P \quad (2)$$

式中: λ 为光源波长; D 为有效光束直径; f_o 为物镜焦距。

抗反射率归一化差动共焦曲线零点附近存在线性区间,选取最优区间拟合线性传感测量方程:

$$I_{DL} = mz \quad (3)$$

采集当前采样点对应的前焦光强 i_F 和后焦光强 i_B , 经过式(1)归一化差动处理后得到 i_D , 代入式(3)计算出被测点离焦量 z , 记此时物镜位置 P 为线性传感测量的基准位置。如图1所示,在第 i 个采样点时基准位置为 P_i , 离焦量为 z_i , 得当前采样点高度:

$$Z_i = P_i + z_i \quad (4)$$

驱动被测件转动,即可得到被测表面某一截面圆轮廓高度集 $\{Z_i, i \in [1, N]\}$, N 为一周采样点总数。但是上述方法受测量范围限制,故提出基于卡尔曼预测器的轮廓跟踪方法解决该问题。

1.2 基于卡尔曼预测器的轮廓跟踪原理

为了解决上述线性传感测量方法范围小,不能实现表面轮廓起伏大于差动共焦轴向响应曲线线性区间的元器件的测量的问题,提出 KP-DCPMT 法,该方法基于 KP 的轮廓跟踪方法对表面实时跟踪,使被测轮廓一直处于线性传感测量范围中。

定义采样时刻 k 的系统状态 \mathbf{x}_k 由被测件表面位置 Z_k 和 Z_k 的微分量速度 v_k 组成,即 $\mathbf{x}_k = (Z_k \ v_k)^T$ 。设采样周期为 ΔT ,由二阶泰勒展开式得系统状态方程:

$$\mathbf{x}_{k+1,k} = \Phi \mathbf{x}_k + \mathbf{B} a_k + \Gamma \omega_k \quad (5)$$

式中: $\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$; $\mathbf{B} = \Gamma = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \Delta T^2 \\ \Delta T \end{pmatrix}$; a_k 为 v_k 的微分量; ω_k 代表过程噪声。

由差动共焦传感测量模型得系统的观测方程为:

$$Z_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + v_k \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H} = (1 \ 0)$; v_k 代表系统观测噪声。

式(5)和(6)共同组成了系统的状态空间模型, ω_k 和 v_k 是均值为0、方差分别为 σ_ω^2 和 σ_v^2 独立分布的白噪声。 ω_k 和 v_k 的协方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 。

根据状态空间动态模型,建立卡尔曼预测器,通过离散观测值逐步估计跟踪点,实现过程如下。

1) 求解卡尔曼增益矩阵:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (7)$$

2) 使用差动共焦传感测量得到的观测值 Z_k 更新修正第 k 时刻的预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}$, 得到第 k 时刻系统状态最优估计值:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (Z_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}) \quad (8)$$

3) 计算 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 的误差协方差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k,k-1} \quad (9)$$

4) 根据第 k 时刻最优估计值 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 预测第 $k+1$ 时刻的系统状态:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1,k} = \Phi \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B} a_k \quad (10)$$

5) 计算 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1,k}$ 的误差协方差:

$$\mathbf{P}_{k+1,k} = \Phi \mathbf{P}_k \Phi^T + \Gamma \mathbf{Q} \Gamma^T \quad (11)$$

预跟踪点 $\hat{Z}_{k+1,k} = \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k+1,k}$ 为物镜定位器的运动跟踪目标,可由式(7)~(11)组成的卡尔曼预测器得到。如图2所示,如果在 $[k, k+1]$ 区间内物镜 z 向位置保持不动,那么采样段 $[k, k+1]$ 内被测轮廓将会超出差动共焦传感测量范围,以至于不能完成轮廓测量,若以预跟踪点 $\hat{Z}_{k+1,k}$ 为物镜的跟踪目标,采样段 $[k, k+1]$ 内被测轮廓将一直处于差动共焦传感测量范围内。故使用 KP-DCPMT 方法利用差动共焦线性区间进行轮廓跟踪测量,保留了 ASDCM 法的高精度特性、扩展了轮廓测量范围,且无须轴向扫描,是一种高精度、快速测量方法。

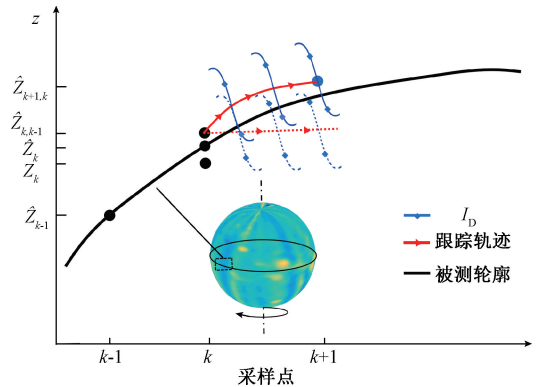


图2 基于卡尔曼预测的轮廓跟踪原理

Fig. 2 Profile prediction schematic based on KP

2 模型关键参数

2.1 最优线性传感测量范围

差动共焦线性传感测量范围越大,所带来的非线性测量误差也越大,所以必须选取最优线性传感测量范围进行线性拟合。线性拟合结果的评价参数有拟合优度、

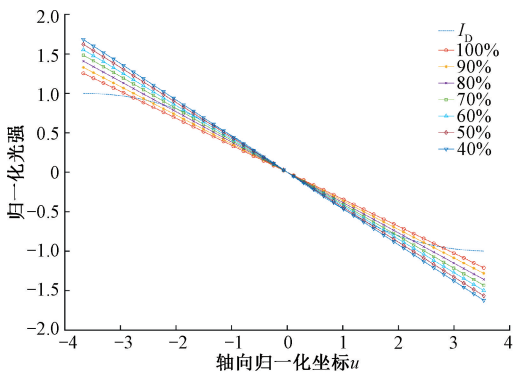
曲线斜率和线性拟合区间宽度,拟合优度可评价线性传感测量方法带来的误差,线性拟合曲线斜率和线性拟合区间宽度分别评价了线性传感测量轴向分辨力和线性传感测量范围。3个评价参数之间又相互制约,在拟合优度和曲线斜率尽量大的前提下,应选取尽可能宽的线性拟合区间。

通过可决系数 R^2 评定拟合优度:

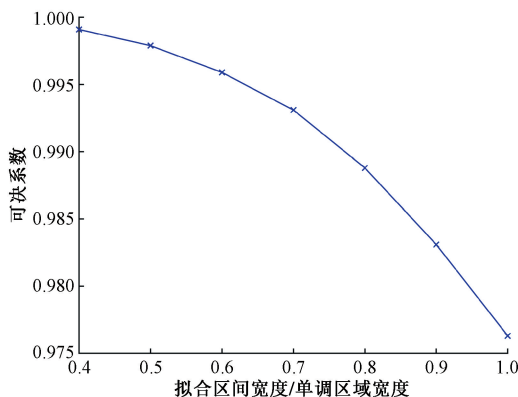
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

式中: y_i 为待拟合数据; \bar{y} 为待拟合数据均值, \hat{y}_i 为拟合值。

对选取不同差动共焦轴向响应曲线线性拟合区间宽度得到的拟合结果如图3所示。由图3(a)可知,随着选取的线性拟合区域宽度的增大,拟合曲线斜率也在减小,线性拟合传感测量轴向分辨力会下降,同时,由图3(b)可知,可决系数逐渐减小,线性拟合传感测量方法误差逐渐增大。综合考虑,选取线性区间宽度为差动共焦轴向响应曲线单调区域的60%,此时,线性归一化范围为 $[-1.3, 1.3]$,可决系数为99.6%,归一化最大非线性误差为 $(\Delta u)_{\max} = 0.025$ 。



(a) 不同拟合区间宽度各拟合曲线
(a) Fitting curves of different fitting interval widths



(b) 拟合区间与可决系数关系
(b) The relationship between fitting interval and coefficient of determination

图3 不同线性区域宽度拟合结果

Fig. 3 Fitting results of different linear region widths

2.2 最佳 KP 初始参数

根据卡尔曼滤波理论,如果系统满足完全随机可控性和可观测性,初始预跟踪点带来的测量误差会随着递推次数增加而减少,所以需要选取最佳 KP 初始参数降低测量误差。如图4所示,随着初始点与表面真实高度之间误差 δ 的增大,输出结果达到真实结果所需递推次数越多,引入的测量误差越大。故需在第1个采集点处,通过物镜定位器驱动物镜快速扫描得到 I_D 曲线,将曲线过零点位置设置为 Z_0 ,此时 $\delta = 0$,所以消除了预跟踪点的递推收敛过程和该过程引入的测量误差。

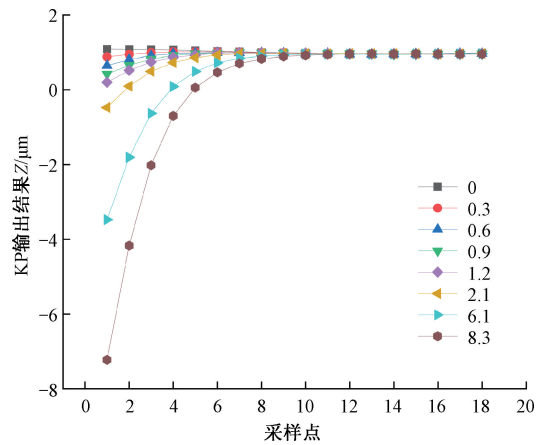


图4 不同初始预跟踪点误差 δ 下 KP 输出

Fig. 4 KP output under different initial pre-tracking point errors δ

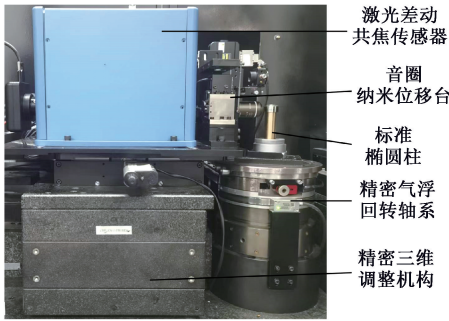
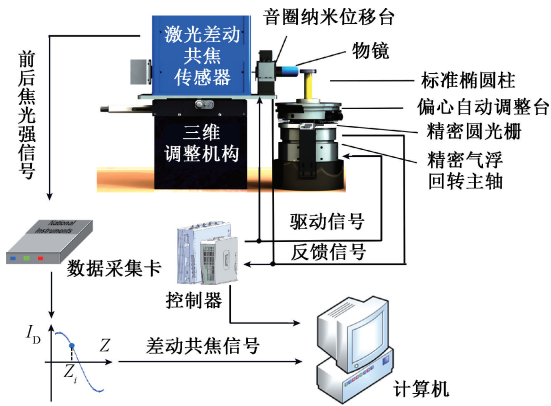
3 测量系统构建及实验

为了验证 KP-DCPMT 方法的测量效率和跟踪测量能力,构建了高精度静压气浮旋转轴和差动共焦传感器组成圆轮廓测量系统^[17],进行了一系列实验。其中,标准椭圆柱轮廓测量实验展现了本方法的跟踪测量能力,对激光核聚变靶丸分别使用 KP-DCPMT 法和 ASDCM 法作对比测量,展现了本方法的高效性与高精度。

3.1 测量系统构建

采用实验系统如图5所示,该系统由差动共焦传感器、精密气浮回转轴系、电机控制系统和数据采集卡等组成。

激光差动共焦传感器中,光源使用波长为 405 nm 的激光二极管,物镜使用 NA 为 0.5、放大倍数为 50 倍的平场消色差显微物镜。物镜定位器是由微型气浮导轨和音圈电机组成的有效行程 4 mm、双向定位精度优于 30 nm 的高精度音圈纳米位移台,其位置反馈使用海德汉 LIP201 光栅尺、海德汉 LIP28 读数头组成的光栅副,细分后分辨力达 0.125 nm,音圈电机使用 ACS 纳米级高速运



(b) Physical map of measurement system

图5 测量系统

Fig.5 Measurement system

动驱动器驱动。精密气浮回转轴系由高精度静压气浮旋转轴、Akribis ADR135-A90 旋转电机、角度分辨力为 1' 的 Renishaw 圆光栅、定位分辨力优于 30 nm 的二维偏心调整机构等组成。

3.2 系统轴向分辨力测试

为了验证所构建系统的轴向分辨能力,对系统的轴向分辨力进行测试。将测量光束定焦在标准反射镜表面,使用音圈纳米位移台驱动物镜 z 向以 5 nm 步进运动,记录电机反馈位置 z_m 和线性传感测量反馈位置 z_s ,测试结果如图 6 所示,本系统的差动共焦线性传感分辨力和轮廓跟踪分辨力均优于 5 nm。

3.3 标准椭圆柱轮廓测量

为了验证本方法对表面轮廓 PV 值超出差动共焦线性传感测量范围的样品能实现跟踪测量。由式(2)和测量系统参数可计算出本实验系统线性传感测量范围为 $\pm 0.34 \mu\text{m}$,故选用经中国科学计量研究院检定圆度为 $2.10 \mu\text{m}$ 的标准椭圆柱为被测件,测量流程如图 7 所示。

标准椭圆柱单次轮廓测量结果如图 8 所示,轮廓测量结果由基准位置和线性传感测量结果通过式(4)计算得到,为了便于数据查看,将最终轮廓测量结果偏移了 $0.5 \mu\text{m}$ 。测量过程中,使用卡尔曼预测法对轮廓表面进

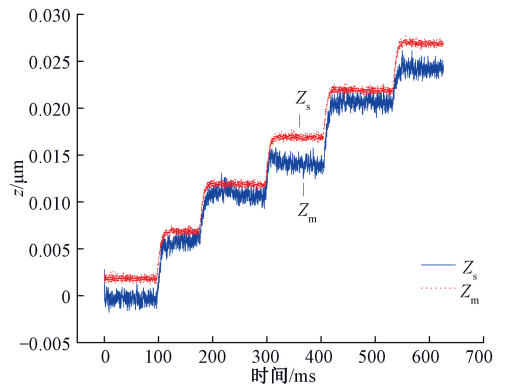


图 6 轴向分辨力测试结果

Fig.6 Axial resolution test results

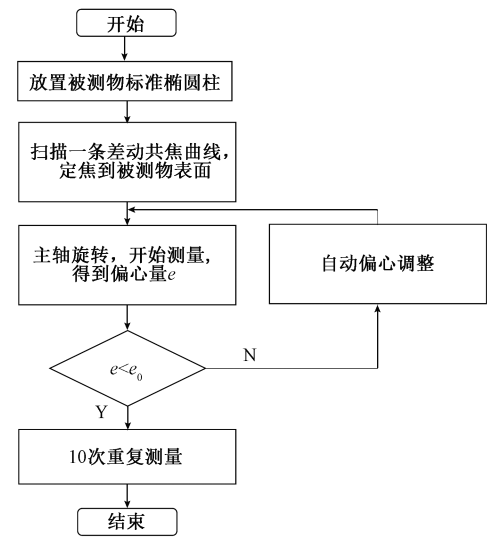


图 7 轮廓测量流程

Fig.7 Profile measurement flow chart

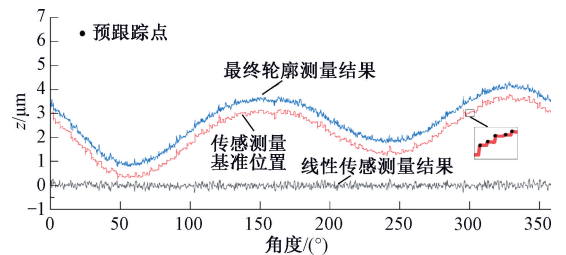


图 8 标准椭圆柱轮廓单次测量结果

Fig.8 Standard elliptical cylinder with single measurement of the profile

行跟踪,标准椭圆柱表面轮廓完全处于线性传感测量范围内,证明本文跟踪测量方法有效可行。

10次轮廓测量结果如图 9 所示,为了方便对比 10 次测量结果,将 10 次测量结果逐次分别在 z 向偏移

0.2 μm , 10次测量轮廓低阶部分重复性好。此外,随机对图9中10次轮廓测量结果的某个细节局部放大,放大处形貌有一个高度约为0.2 μm 的凸起缺陷,在10次重复测量中该凸起均被测量到,说明使用KP-DCPMT法测得的标准椭圆块的轮廓细节重复性较好。

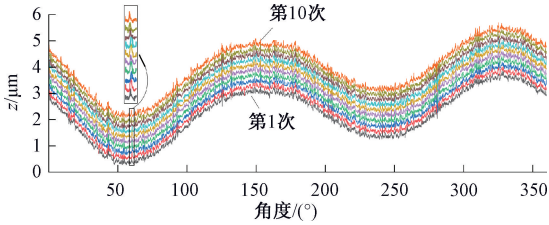


图9 标准椭圆柱外轮廓10次重复测量

Fig. 9 Standard elliptical cylinder with ten repeated measurements of the profile

将10次标准椭圆柱轮廓测量结果使用滤波范围为1~50 upr的滤波器处理和最小二乘法评定,得到标准椭圆柱10次圆度 ε_c 测量值,如表1所示,平均圆度与中国科学计量院检定结果2.10 μm 仅相差16 nm,且重复标准差达6 nm。可认为KP-DCPMT法准确可靠。

表1 标准椭圆柱圆度10次重复测量结果

Table 1 Ten repeat measurements of standard elliptic cylindrical circularity

测量次数	圆度 $\varepsilon_c/\mu\text{m}$
1	2.122
2	2.126
3	2.121
4	2.114
5	2.114
6	2.116
7	2.106
8	2.118
9	2.112
10	2.111
平均值	2.116
标准差	0.006

3.4 激光聚变靶丸内轮廓对比测量实验

为了验证本文KP-DCPMT方法能够对精密器件表面轮廓完成高效、高精度测量。选用中国物理工程研究院提供的直径为800 μm 的单层PS靶丸作为实验样品。在图5所示的实验装置中使用ASDCM法和KP-DCPMT法对激光聚变靶丸内轮廓进行对比测量实验,ASDCM法

测靶丸轮廓的高精度特性和高准确度已在文献[9]与原子力的对比实验中得到验证。

在同一测量系统中,两种方法测量效率对比如表2所示。ASDCM法需在每一个测量点出扫描一条差动共焦曲线 I_D ,受音圈纳米位移台轴向极限扫描频率90 Hz(扫描范围为10 μm)限制,设置单周采样点数为2 048点,则采集圆轮廓整周所需时长约为22.75 s,即电机转速最快不能超过2.6 r/min,故设置电机转速为2.5 r/min,此时,ASDCM法单周采样2 048点所需时间为24 s,单点测量时长为11.72 ms;KP-DCPMT法使用拟合直线 I_{DL} 线性传感测量,音圈纳米位移台作为表面轮廓跟踪器件使用,无需高频扫描,但靶球通过CCD粗调偏心后,残余偏心量仍可达20 μm ^[18],而线性传感测量量程为 $\pm 0.34 \mu\text{m}$,测量整周圆轮廓至少需跟踪轮廓60次,音圈纳米位移台的响应频率为90 Hz,故测量时电机转速最高可设置为90 r/min,但是以最高转速进行测量,只能保证表面跟踪,传感测量准确性不能保证,故为了得到准确的轮廓测量结果,将电机转速设为5 r/min,此时, KP-DCPMT法单周采样8 192点所需时间为12 s,单点测量时长为1.46 ms。所以本文所提方法相对于ASDCM法效率提升了8倍。

表2 两种方法测量效率对比表

Table 2 Comparison of measuring efficiency of two methods

方法	单周采样 点数	气浮轴转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	单点测量 时长/ms
ASDCM	2 048	2.5	11.72
KP-DCPMT	8 192	5.0	1.46

使用两种方法对激光聚变靶丸同一位置内轮廓10次重复测量,使用滤波波数为1~50 upr的滤波器和最小二乘法处理得到圆度,记两种测量方法测得的圆度分别为 ε_a 和 ε_b ,实验结果如表3所示。

KP-DCPMT法测得圆度平均值为0.168 μm ,重复标准差为3 nm,ASDCM法测得圆度平均值为0.175 μm ,重复标准差为6 nm, KP-DCPMT法圆度测量结果与ASDCM法测量结果仅相差7 nm,且KP-DCPMT法无需轴向机械扫描,减少了机械振动对测量的影响,测量重复性更好。

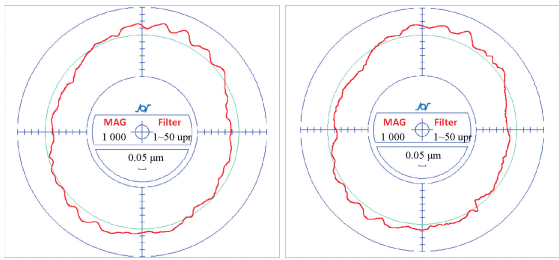
通过ASDCM法测量的内轮廓如图10(a)所示,利用KP-DCPMT法测得的内轮廓如图10(b)所示。

经过对比可知,两种方法测量同一靶丸样品同一轮廓的圆度结果仅相差7 nm,定性对比图10(a)和(b)所测轮廓结果,两者圆周轮廓复现结果相吻合,除此之外, KP-DCPMT法相对DCPMT法测量效率提升了8倍。故可认为KP-DCPMT法能够对精密元器件表面连续轮廓实现高精度、快速测量。

表 3 激光聚变靶丸内轮廓 10 次重复测量结果

Table 3 Ten repeated measurements of the inner profile of the laser fusion target

测量次数	ASDCM $\varepsilon_a/\mu\text{m}$	KP-DCPMT $\varepsilon_b/\mu\text{m}$
1	0.173	0.165
2	0.183	0.170
3	0.173	0.168
4	0.177	0.167
5	0.171	0.165
6	0.169	0.167
7	0.184	0.174
8	0.167	0.170
9	0.175	0.165
10	0.172	0.167
平均值	0.175	0.168
标准差	0.006	0.003



(a) ASDCM测量结果 (a) The results of ASDCM
(b) KP-DCPMT测量结果 (b) The results of KP-DCPMT

图 10 同一轮廓对比实验结果

Fig. 10 The same profile comparison with the experimental results

4 不确定度分析

为了分析上述实验结果的不确定度,分析总结了实验装置中主要误差:线性传感测量非线性误差、主轴回转误差、物镜扫描器定位误差、环境引入的随机误差,并对上述误差引入的不确定度的进行了评定。

4.1 线性拟合残余非线性误差引入的不确定度

使用激光差动共焦线性传感测量被测表面轮廓,存在拟合残余非线性误差,根据式(2)拟合残余非线性误差引入的不确定度为:

$$u_1 = \pm \frac{2\lambda f_o^2}{\pi D^2} (\Delta u)_{\max} = \pm 2.5 \text{ nm} \quad (13)$$

4.2 主轴回转误差引入的不确定度

精密气浮主轴回转误差包括轴向跳动误差和径向跳动误差,径向跳动误差对轮廓测量影响较大,故采用

Taylor Hobson 公司的 TALLYMIN4 高精度电感传感器测量标准玻璃半球,测得径向跳动的系统误差为 26 nm,径向回转随机误差为 4 nm,由于被测物较轻,对气浮主轴的回转状态可忽略不计,使用误差分离法将主轴径向回转的系统误差分离,误差分离后主轴回转误差引入的不确定度为:

$$u_2 = \pm 2 \text{ nm} \quad (14)$$

4.3 音圈纳米位移台定位误差引入的不确定度

音圈纳米位移台作为线性传感测量的基准位置,直接影响着轮廓的测量精度,故通过测量不确定度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ ($k=2$) 的 Renishaw XL-80 激光干涉仪进行标定,标定后定位误差引入的不确定度为:

$$u_3 = \pm 15 \text{ nm} \quad (15)$$

4.4 随机误差引入的不确定度

环境震动、气流扰动、温度等因素也会造成测量误差,主要表现为随机误差,根据表 3 可得随机误差带来的不确定度为:

$$u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}{10 - 1}} = 3 \text{ nm} \quad (16)$$

4.5 合成不确定度

上述不确定度分量相互独立,最终合成不确定度为:

$$u_c = \pm \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \pm 16 \text{ nm} \quad (17)$$

故激光聚变靶丸内轮廓测量结果为:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon}_b \pm u_c = 0.168 \pm 0.016 \mu\text{m} \quad (18)$$

5 结 论

本文提出一种 KP-DCPMT 方法,该方法结合精密气浮回转轴系,使用高精度纳米音圈位移台对 KP 得到的预跟踪点进行跟踪,使被测表面轮廓在测量过程中一直处于激光差动共焦线性传感测量范围内,实现了 DCM 无轴向扫描轮廓测量。搭建测量系统进行实验验证,实验结果表明能够实现对大轮廓 PV 值的标准椭圆柱表面轮廓进行跟踪测量;激光聚变靶丸内轮廓测量圆度重复标准差达 3 nm,不确定度优于 $\pm 16 \text{ nm}$,与 ASDCM 法测量结果高度一致,且测量效率提升了 8 倍。故本文为精密元器件表面连续轮廓进行高精度、快速、无损测量提供了一种高质量方法。

参考文献

[1] HURRICANE O A, CALLAHAN D A, CASEY D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion [J]. Nature, 2014, 506 (7488): 343-348.
[2] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement

- fusion with lasers [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [3] TAN Y, ZHU J. Spatial three-mirror off-axis freeform optical system without any symmetry [J]. *Photonics*, 2022, 9(5):326.
- [4] CHEN S, XUE S, ZHAI D, et al. Measurement of freeform optical surfaces: Trade-off between accuracy and dynamic range [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(5):1900365.
- [5] ZHANG Y, ZENG A, HUANG H, et al. Large-area three-dimensional profilometer based on digital micromirror device [J]. *Journal of Optical Technology*, 2015, 82(2):102-107.
- [6] ZHAO W, TAN J, QIU L. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution [J]. *Optics Express*, 2004, 12(21):5013-5021.
- [7] MA X, QIU L, WANG Y, et al. High-precision laser differential confocal measurement method for multi-geometric parameters of inner and outer spherical surfaces of laser fusion capsules [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7):9913-9928.
- [8] WANG L, QIU L, ZHAO W, et al. Laser differential confocal inner-surface profile measurement method for an ICF capsule [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23):28510-28523.
- [9] 黄婧雯, 马仙仙, 刘子豪, 等. 激光聚变靶丸球面经纬迹线优化球度测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1):127-135.
- HUANG J W, MA X X, LIU Z H, et al. Optimized sphericity measurement method for the latitude and longitude traces on the surface of ICF capsule [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 127-135.
- [10] WANG J, CUI Y, LIANG D, et al. Differential confocal measurement for surface topography with microstructures based on spiral scanning and wavelet filter [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(36):11359-11370.
- [11] YING R, CUI Y, HUANG J, et al. Precise measurement of surface topography with microstructures based on differential confocal and spiral scanning [J]. *Measurement*, 2021, 184:110004.
- [12] TANG Y, LIU Y, WANG W, et al. Freeform measurement method based on differential confocal and real-time comparison [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12732-12750.
- [13] 赵维谦, 王龙肖, 邱丽荣, 等. 激光聚变靶丸内表面轮廓测量系统的研制 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5):1013-1023.
- ZHAO W Q, WANG L X, QIU L R, et al. Development of innersurface profile measurement system for ICF capsule [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5):1013-1023.
- [14] QIU L, LIU D, ZHAO W, et al. Real-time laser differential confocal microscopy without sample reflectivity effects [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21626-21640.
- [15] SHAO R, ZHAO W, QIU L, et al. Dual differential confocal method for surface profile measurement with a large sensing measurement range [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3):614-621.
- [16] JIA X, LIU Z, TAO L, et al. Frequency-scanning interferometry using a time-varying Kalman filter for dynamic tracking measurements [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21):25782-25796.
- [17] 卢孟爽, 马仙仙, 黄婧雯, 等. 激光 ICF 聚变靶丸轮廓测量系统标定方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5):17-24.
- LU M SH, MA X X, HUANG J W, et al. Calibration method of profile measurement system for laser ICF capsule [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5):17-24.
- [18] LI S, WANG Y, WANG Q, et al. Rapid measurement and compensation method of eccentricity in automatic profile measurement of the ICF capsule [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14):3761-3769.

作者简介



罗杰, 2020 年于长春理工大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光学精密测量。

E-mail: cqrojer@163.com

Luo Jie received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interest is optical precision measurement.



王允 (通信作者), 分别在 2008 年和 2013 年于北京理工大学获得学士学位和博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为差动共焦理论与精密光学检测。

E-mail: alotrabbits@163.com

Wang Yun (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Beijing Institute of Technology in 2008 and 2013, respectively. He is currently a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include differential confocal theory and precise optical measurement.