

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107425

# 激光 ICF 聚变靶丸轮廓测量系统标定方法\*

卢孟爽, 马仙仙, 黄婧雯, 刘子豪, 邱丽荣

(北京理工大学光电学院 光学测量中心 北京 100081)

**摘要:**针对激光惯性约束聚变靶丸轮廓高精度测量系统的溯源标定问题,提出一种基于激光差动共焦测量原理的标定溯源方法。该方法基于激光差动共焦靶丸测量系统轴向响应曲线过零点精确对应测量系统焦点的性质,首先利用激光差动共焦靶丸测量系统测量经中国计量科学研究院计量检定的标准椭圆块的圆度,其次通过比对测量值和标准椭圆块圆度量值,得出该系统测量传递系数为 1.03,最后通过多次检定验证测量的方法,完成系统的高精度标定。实验结果显示,利用标定完成的系统进行激光聚变靶金属球比对测量,其标准差为 37 nm,该标定方法的测量重复性为 17 nm,其为靶丸表面轮廓的高精度测量奠定了坚实基础。

**关键词:**系统标定;圆度测量;最小二乘法;差动共焦

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

## Calibration method of profile measurement system for laser ICF capsule

Lu Mengshuang, Ma Xianxian, Huang Jingwen, Liu Zihao, Qiu Lirong

(Optical Measurement Center, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of traceability and calibration of the laser inertial confinement fusion capsule profile high-precision measurement system, proposes a calibration and traceability method based on the principle of laser differential confocal measurement. Based on the property that the zero-crossing point of the axial response curve of the laser differential confocal capsule measurement system accurately corresponds to the focus point of the measurement system, the method firstly uses the laser differential confocal capsule measurement system to measure the roundness of the standard elliptical blocks calibrated by National Institute of Metrology, China. Secondly, through comparing the roundness measurement value with the roundness metrological value of the standard elliptical blocks, the measurement transfer coefficient of the system is obtained, which is 1.03. Finally, through multiple verification measurement methods, the high-precision calibration of the system is completed. The experiment results show that using the calibrated system to conduct the comparison measurement of the laser fusion target metal capsule, the standard deviation is 37 nm; the measurement repeatability of this calibration method is 17 nm, which lays a solid foundation for the high-precision measurement of the surface profile of the capsule.

**Keywords:** system calibration; roundness measurement; least square method; differential confocal

## 0 引 言

美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)利用高能激光束对处于低温场的聚变靶丸进行照射,当温度和密度达到一定的阈值时,靶丸中的氘氚燃料均匀向心压缩,开始核聚变反应并产生大量能量<sup>[1-2]</sup>。分析与

试验表明:靶丸内外表面轮廓不均匀可能导致瑞利-泰勒不稳定,造成聚变过程中的靶丸破裂,最终导致点火失败<sup>[3-4]</sup>,这就对靶丸轮廓的精准测量提出了极高的要求,因此,精准测量靶丸轮廓具有重要的科学和现实意义。

目前有很多用于激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)靶丸轮廓等参数的测量方法<sup>[5]</sup>。Nguyen 等<sup>[6]</sup>通过光纤点衍射移相干涉仪(phase-shifting

收稿日期:2021-01-22 Received Date: 2020-01-22

\* 基金项目:国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(2018YFF01012001)、国家自然科学基金(61827826)、北京理工大学创新人才科技资助专项计划(2019CX01020)项目资助

point diffraction interferometer, PSDI), 利用捕获重叠靶丸表面高度来测量靶丸相关参数, 但对靶丸表面粗糙度和透明度要求高, 只能测量表面光滑、透明度高的靶丸; Meng 等<sup>[7]</sup> 利用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 和高精度旋转空气轴承开发了纳米分辨率的靶丸测量仪, 用来测量靶丸表面轮廓参数; Wang 等<sup>[8]</sup> 利用 X 射线断层扫描技术通过滤波反投影算法 (Filtered Back Projection, FBP) 算法识别靶丸曲率半径及壳层厚度, 但 X 射线法测量时曝光时间长, 效率低。

共焦显微技术以其优异的成像能力在光学领域得到了日益广泛的应用<sup>[9]</sup>, Antipa 等<sup>[10]</sup> 结合莱卡共焦显微镜和 9 轴驱动系统, 构建靶丸组装配射系统, 轴向测量靶丸轮廓点以测量靶丸几何参数。为克服靶丸表面反射率、透光率等的影响, 赵维谦等<sup>[11]</sup> 和孙若端等<sup>[12]</sup> 提出了利用差动共焦测量系统进行靶丸表面轮廓的测量, 使靶丸表面轮廓测量具有更高的分辨率及精度, 共焦及差动共焦测量法在很大程度上克服上述测量方法的不足, 但是在实际工程测量中, 激光差动共焦靶丸测量仪器系统装配完成, 需要进行相关传递系数的标定与溯源, 方可实现激光聚变靶丸轮廓几何参数的精准测量。靶丸轮廓几何参数能否实现高精度测量, 决定着激光聚变打靶的成功与否, 而几何参数高精度测量的前提是系统精确地溯源与标定<sup>[13-14]</sup>。因此, 如何实现靶丸测量系统和精密主轴回转系统的精确溯源标定, 是靶丸高精度、高准确性测量的关键一步。

针对上述问题, 本文通过结合激光聚变靶丸差动共焦传感测量系统精准定焦标准椭圆块被测表面, 与精密

测量气浮轴系驱动标准椭圆块高精度旋转的方法, 测量经中国计量科学研究院计量检定的标准椭圆块的圆度, 通过比对圆度测量值和标准椭圆块圆度计量值, 得出系统测量传递系数, 并经过多次检定验证测量的方式, 完成测量系统的高精准性标定溯源, 以实现后续靶丸轮廓的高精度测量。

## 1 系统标定方法

激光聚变靶丸差动共焦传感测量系统, 采用高轴向定位能力的差动测量系统聚焦光斑对标准椭圆块被测表面进行定焦, 利用差动共焦系统轴向响应曲线的过零点与其物镜焦点相对应这一特性<sup>[15-16]</sup>, 实现标准椭圆块被测表面单点的高精度测量; 激光聚变靶丸旋转精密测量气浮轴系, 采用高精度静压气浮轴, 驱动标准椭圆块进行旋转, 可实现对标准椭圆块表面圆周轮廓的高精度测量, 根据测量结果和计量标准值, 得出系统标定系数, 根据该系统标定系数, 继续测量不同圆度的标准椭圆块, 验证标定结果的准确性, 最终实现靶丸表面轮廓的高精度测量。

### 1.1 测量标定系统

激光差动共焦靶丸测量标定系统原理如图 1 所示, 光源发出的光经扩束器至偏振分光镜 PBS 及 1/4 波片后, 由物镜聚焦形成探测光束到达标准椭圆块测量表面, 探测光被反射, 经 1/4 波片、偏振分光镜 PBS、会聚镜 L 后, 探测光经分光镜将返回光束分为两部分, 分别经汇聚镜焦前和焦后  $M$  位置处的针孔进入光电倍增管。

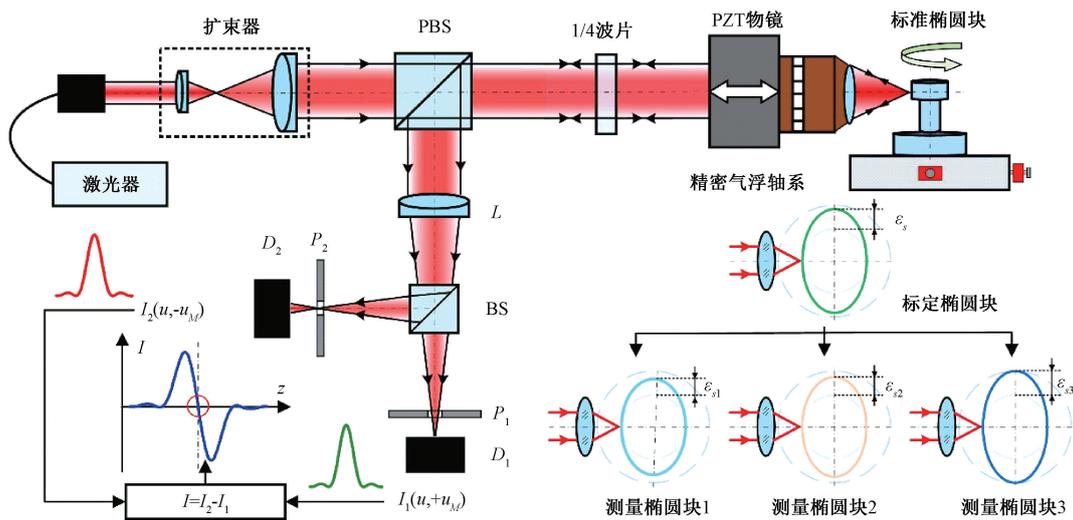


图 1 测量标定系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the measurement calibration system

对两路光电倍增管探测到的光强响应曲线进行差

动, 得到差动共焦曲线, 其光强响应为:



$$I(u, u_M) = I_2(u, -u_M) - I_1(u, +u_M) = \text{sinc}^2\left[\frac{(2u - u_M)}{4}\right] - \text{sinc}^2\left[\frac{(2u + u_M)}{4}\right] \quad (1)$$

物方光学归一化轴向离焦量  $u$  与轴向离焦量满足:

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

其中,  $\lambda$  为激光波长;物镜口径为  $D$ ;物镜焦距为  $f_c$ 。

将式(1)对归一化的轴向偏移  $u_M$  求导,并令  $u=0$ ,可以得到差动共焦轴向响应曲线,在其过零点处的斜率  $k(0, u_M)$  为:

$$k(0, u_M) = \left[ \sin\left(\frac{u_M}{4}\right) - \left(\frac{u_M}{4}\right) \times \cos\left(\frac{u_M}{4}\right) \right] \times 2 \text{sinc}\left(\frac{u_M}{4\pi}\right) \left/ \left(\frac{u_M}{4}\right)^2 \right. \quad (3)$$

由式(3)可得  $u_M = \pm 5.21$  时,该斜率绝对值最大:  $|k|_{\max} = 0.54$ ,即此条件下差动共焦测量系统轴向分辨力最高为:

$$\Delta\mu = \frac{\lambda}{2\pi \cdot NA^2 \cdot SNR \cdot |k|_{\max}} \quad (4)$$

标定测量系统采用激光波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,测量物镜  $NA = 0.80$ ,探测器信噪比为  $SNR = 200$ ,根据式(4)可得该测量系统理论轴向分辨力为:

$$\Delta\mu = \frac{633}{2\pi \cdot 0.80^2 \cdot 200 \cdot 0.54} \text{ nm} \approx 1.46 \text{ nm} \quad (5)$$

此时,差动共焦强度响应曲线  $I(u, u_M)$  的绝对零点位置具有很高的轴向分辨力,且精确对应差动共焦系统聚焦光束的聚焦点。当聚焦光束聚焦到标准椭圆块外表面时,探测到的差动共焦强度响应曲线过零点,精确对应标准椭圆块外表面上被测点的物理位置,记录其物理坐标为  $z_r$ 。

## 1.2 测量标定数据预处理

利用靶丸旋转精密测量气浮轴系驱动标准椭圆块进行旋转,驱动物镜随压电陶瓷微位移驱动器 PZT 沿椭圆块径向位置进行快速扫描聚焦测量,得到每个采样点的测量原始数据  $z_r(i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$  为:

$$z_r(i) = z_0 + \sum_{k=1}^{n-1} \left[ (p_k \cos\left(\frac{2ki\pi}{n}\right) + q_k \sin\left(\frac{2ki\pi}{n}\right)) \right] \quad (6)$$

其中,  $z_0$  为直流分量;  $k$  为谐波次数;  $p_k$  及  $q_k$  为傅里叶级数的展开系数。

$$\left\{ \begin{array}{l} z_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ri} \\ p_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_r(i) \cos(2ki\pi/n) \\ q_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_r(i) \sin(2ki\pi/n) \end{array} \right. \quad (7)$$

在标准椭圆块表面轮廓采样数据中,进行轮廓圆度评价,首先要通过式(8)去除直流分量,得到去直流分量后的标准椭圆块轮廓原始数据  $z'_r(i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ :

$$z'_r(i) = z_r(i) - z_0 \quad (8)$$

将此轮廓原始数据  $z'_r(i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$  进行高斯滤波处理,利用高斯滤波函数为:

$$g(t) = \frac{1}{\alpha f_c} \exp\left[-\pi\left(\frac{t}{\alpha f_c}\right)^2\right] \quad (9)$$

式中:  $t$  为空间域变量;  $f_c$  是截止波长;  $\alpha$  是常量。  $\alpha$  的取值为 0.47 时,可以保证高斯滤波器在  $f_c$  的通过率高于 50%。根据标准椭圆块表面轮廓测量信号为离散信号,设计其高斯滤波函数为:

$$s(i) = \exp\left[-\pi\left(\frac{\alpha}{f_c} df[i]\right)^2\right] \quad (10)$$

式中:

$$\left\{ \begin{array}{l} df[i] = \frac{i-1}{60} \\ f_c = \frac{1 * cf * zs}{60} \end{array} \right. \quad (11)$$

其中,  $cf$  为波动数;  $zs$  为采样步长。

由式(8)得到去直流分量后的标准椭圆块轮廓原始数据  $z'_r(i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$  和式(11)设计的高斯滤波函数进行卷积可得:

$$s(i) \otimes z'_r(i) = \mathcal{F}^{-1}[S(k)Z(k)] \quad (12)$$

通过将标准椭圆块表面轮廓测量数据的傅立叶变换和高斯滤波函数的傅立叶变换相乘后,再对其进行傅里叶逆变换来进行高斯滤波。

标准椭圆块表面轮廓测量数据的傅里叶变换可以根据离散信号的傅立叶变换公式进行计算:

$$Z(k) = \sum_{i=0}^{n-1} z'_r(i) \exp\left(-j\frac{2\pi}{n} ik\right) \quad (13)$$

根据以上公式,对于标准椭圆块轮廓测量数据进行高斯滤波的原理方法如图 2 所示。

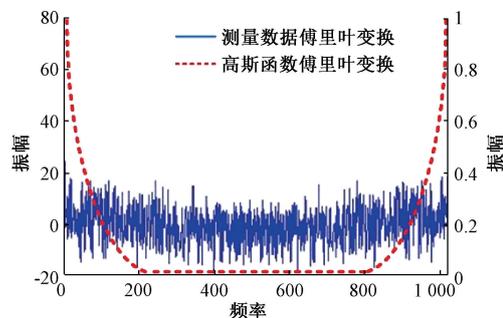


图 2 椭圆块圆周测量数据高斯滤波方法  
Fig. 2 Gaussian filtering method of elliptical block circumference measurement data



根据离散数据的傅立叶逆变换公式,可以得到用于表面轮廓圆度评价的标准椭圆块轮廓数据  $z'(i)$  ( $i=1, 2, 3 \dots, n$ ):

$$z'(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} Z(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{n} ik\right) \quad (14)$$

根据系统标定传递系数  $t$  与标准椭圆块轮廓表面原始数据之间的数量关系,得到标准椭圆块圆周轮廓测量数据  $z(i)$  ( $i=1, 2, 3 \dots, n$ ):

$$z(i) = z'(i) \times t \quad (15)$$

为了进行最小二乘拟合的相关数据运算处理,将标准椭圆块圆周轮廓测量数据  $z(i)$  ( $i=1, 2, 3 \dots, n$ ) 经过坐标转换,得到圆周轮廓测量数据  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, 3 \dots, n$ ):

$$\begin{cases} x_i = z(i) \times \cos\left(\frac{2\pi}{n} \times i\right) \\ y_i = z(i) \times \sin\left(\frac{2\pi}{n} \times i\right) \end{cases} \quad (16)$$

对该圆周轮廓测量数据采用最小二乘拟合算法进行圆度评价,即遍寻圆周轮廓测量数据拟合对应的圆心<sup>[17]</sup>。最小二乘法遍寻拟合圆心的原理是各测量点到圆心距离的平方和最小,最小二乘圆度即为该圆心至所有测量点距离的最大值与最小值之差。

根据最小二乘拟合原理,可得最小二乘圆心坐标  $O(x_0, y_0)$  为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (17)$$

$$R = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (18)$$

最小二乘算法拟合的圆心至测量轮廓数据最远点  $(x_{\max}, y_{\max})$  距离  $R_{\max}$  与最近点  $(x_{\min}, y_{\min})$  距离  $R_{\min}$  之差,即为标准椭圆块表面轮廓圆度测量值  $\varepsilon_r$ :

$$\varepsilon_r = (R_{\max} - R_{\min}) \quad (19)$$

通过多次实验测量,反复计算修正系统标定传递系数  $t$ ,使标准椭圆块轮廓圆度测量值  $\varepsilon_r$  等于标准椭圆块圆度计量值  $\varepsilon_s$ ,利用此系统标定传递系数  $t$ ,分别测量圆度计量值为  $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}, \varepsilon_{s3}$  的测量椭圆块,得到测量椭圆块表面轮廓圆度数据分别是  $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}$ 。对比椭圆块圆度计量值和激光聚变靶丸系统测量值,以验证标定的准确性和精确性。

### 1.3 测量标定步骤

激光聚变靶丸测量系统的标定,首先将标准椭圆块和测量轴系调整同轴,且相对于旋转主轴的偏心  $e$  调整至小于设定值  $e_0$ <sup>[18]</sup>,然后利用最小二乘法拟合圆度测量值  $\varepsilon_r$ ,通过修正标定系数  $t$ ,使得圆度测量值  $\varepsilon_r$  等于圆度计量值  $\varepsilon_s$ ,根据标定系数  $t$ ,验证测量其余3个标准椭圆

块,测量流程如图3所示。

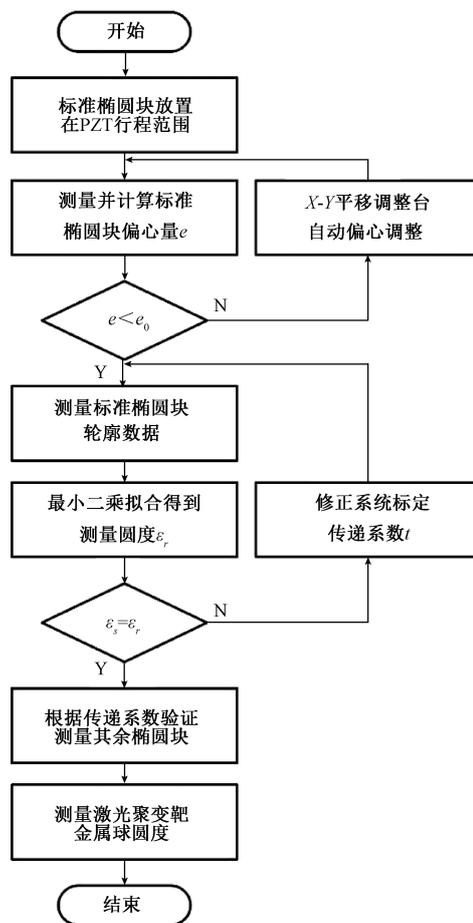


图3 测量标定系统流程

Fig. 3 Flow of the measurement calibration system

图3所示激光聚变靶丸测量系统标定流程具体细化如下:

1) 调整标准椭圆块基座高度,使标准椭圆块被测标定面与差动共焦传感器探测光路等高放置,并将标准椭圆块和精密测量轴系调整同轴,使整个被测圆周标定面均在PZT行程范围内。

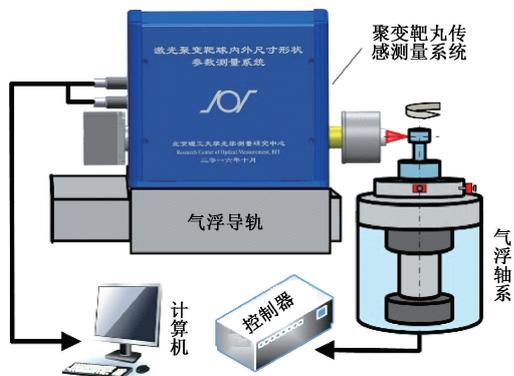
2) 给定偏心量设定值  $e_0 = 0.3 \mu\text{m}$ ,通过自动偏心调整程序,利用轴系XY平移调整台进行精确地自动偏心调整,直至满足测量偏心量  $e$  小于设定偏心量  $e_0$ ,自动偏心调整停止。

3) 通过靶丸差动共焦传感测量系统,精确定焦标准椭圆块被测标定面,主轴电机以一定的转速驱动高精度气浮回转轴转动,得到被测标定面圆周轮廓测量数据。

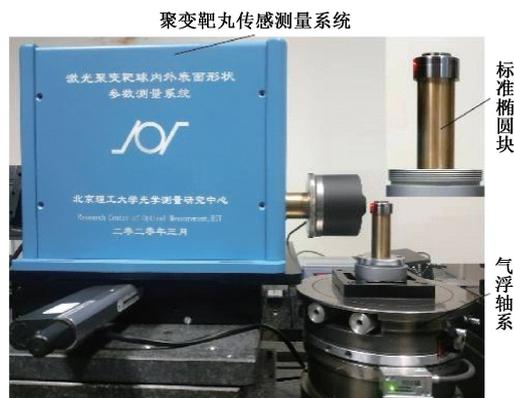
4) 采用最小二乘法对圆周轮廓测量数据进行拟合,通过修正系统标定传递系数  $t$ ,使标准椭圆块测量圆度等于标准椭圆块圆度计量值,得出系统标定传递系数,并根据此系数验证测量另外3个标准椭圆块。

## 2 标定系统构成

激光聚变靶丸测量标定系统,由激光聚变靶丸差动共焦传感测量系统和靶丸旋转精密测量气浮轴系两部分组成,如图 4 所示。



(a) 实验装置构件图  
(a) Component diagram of the experiment device



(b) 测量标定系统实物图  
(b) Picture of the measurement calibration system

图 4 激光惯性约束聚变靶丸测量标定系统

Fig. 4 Laser ICF capsule measurement calibration system

激光聚变靶丸差动共焦测量传感系统的光源为波长 632.8 nm、功率 2 mW 的 He-Ne 激光器,使用 OLYMPUS 生产的数值孔径  $NA = 0.8$ 、工作距离  $WD = 3.4$  mm 的平场消色差显微物镜,以及行程范围为 100  $\mu\text{m}$  的物镜驱动器 PI-P726.1CD。靶丸旋转精密测量气浮轴系核心是高精度静压气浮旋转轴,电机使用雅科贝思 ADR135-A90 旋转电机驱动,用于 XY 向二维偏心调整机构执行器是 New Port 公司的压电线性驱动器 8301NF,其行程范围为 12.5 mm,定位分辨率可达 30 nm。

## 3 系统标定实验

基于研制的激光差动共焦靶丸几何参数测量装置,开展了激光聚变靶丸测量系统标定实验,实验对象为经

中国计量科学研究院检测标定的标准椭圆块,其轮廓圆度计量值分别为 1.8, 2.1, 3.4, 6.6  $\mu\text{m}$ 。实验条件为:  $102\ 540 \pm 60$  Pa, 温度为  $21.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $44 \pm 5\%$ 。

### 3.1 系统分辨力测试实验

轴向分辨力是测量标定系统对样品轴向相邻位置的分辨能力,其决定着测量标定系统的精确程度,是衡量该系统的一个重要指标,所以对系统进行了分辨力测试,以 5 nm 为步距使标定系统的测量物镜进行移动,测量结果如图 5 所示,可见其返回电压清晰可辨,故可以验证本系统测量定焦分辨力优于 5 nm。

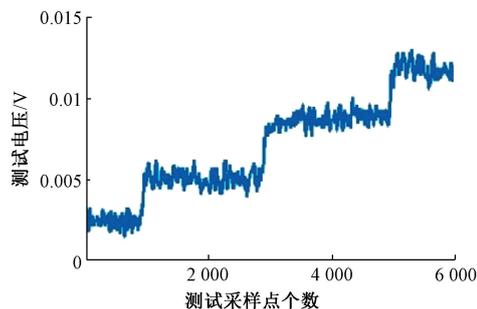


图 5 椭圆块测量标定系统分辨力测试

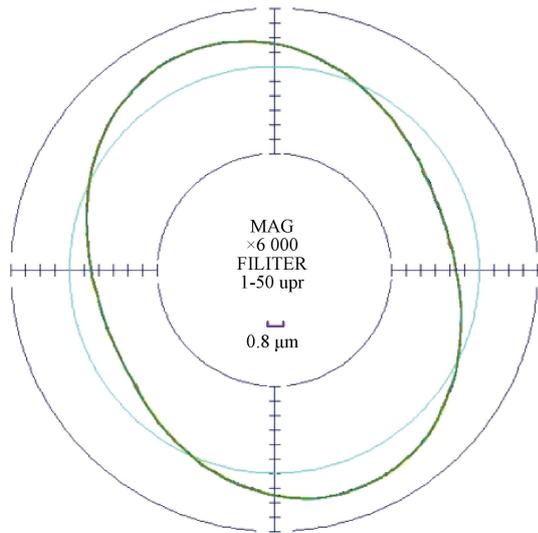
Fig. 5 Resolution test of elliptical block measurement and calibration system

### 3.2 系统标定实验结果

利用图 4(b) 所示激光聚变靶丸测量标定系统装置,对圆度计量值  $\varepsilon_s = 3.4$   $\mu\text{m}$  的标准椭圆块进行差动共焦测量,由式 (15) 得到系统标定传递系数  $t = 1.03$  时,可得标准椭圆块轮廓圆度测量值  $\varepsilon_r = 3.406$   $\mu\text{m}$ 。

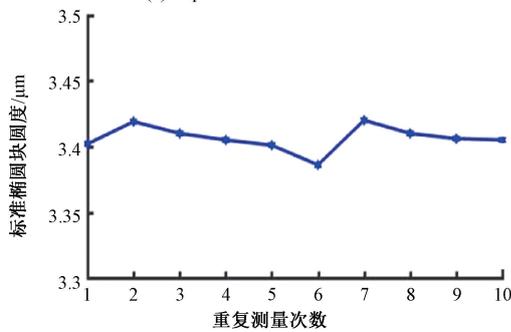
为消除测量过程中的随机扰动,对用于标定的标准椭圆块进行 10 次重复测量,根据式 (19) 计算可得该标定椭圆块轮廓圆度测量平均值  $\varepsilon_r = 3.406$   $\mu\text{m}$ , 标准差  $\sigma = 9$  nm, 结果图 6 所示。

为了对系统传递系数标定的准确性进行验证,进行不同圆度标准椭圆块的测量验证性实验,将用于测量的 3 个标准椭圆块,分别记为测量椭圆块 1, 测量椭圆块 2, 测量椭圆块 3, 其圆度计量值  $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}, \varepsilon_{s3}$  分别为 1.8, 2.1, 6.6  $\mu\text{m}$ 。分别对其进行十次重复测量,在不同放大倍数下 3 个标准椭圆块重复测量曲线如图 5 所示,根据式 (19) 计算可得 1 号标准椭圆块轮廓圆度测量平均值  $\varepsilon_{r1} = 1.799$   $\mu\text{m}$ , 标准差  $\sigma = 17$  nm, 结果如图 7(a) 所示, 2 号标准椭圆块轮廓圆度测量平均值  $\varepsilon_{r2} = 2.102$   $\mu\text{m}$ , 标准差  $\sigma = 16$  nm, 结果如图 7(b) 所示, 3 号标准椭圆块轮廓圆度测量平均值  $\varepsilon_{r3} = 6.608$   $\mu\text{m}$ , 标准差  $\sigma = 17$  nm, 结果如图 7(c) 所示。



(a) 重复测量曲线

(a) Repeated measurement curve



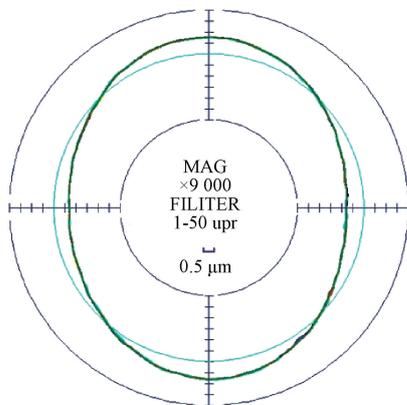
(b) 重复测量结果

(b) Repeated measurement result

图 6 标定椭圆块重复实验

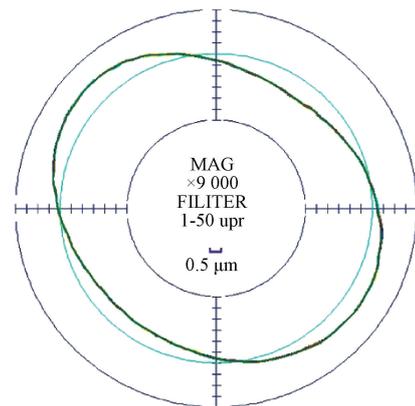
Fig. 6 Elliptical block calibration repeated experiment

根据系统标定传递系数  $t = 1.03$ , 采用激光差动共焦传感系统对 3 个标准椭圆块进行测量, 测量结果如表 1, 可以验证在进行系统参数标定情况下, 该靶丸测量系统具备很高的测量准确性和精确性。



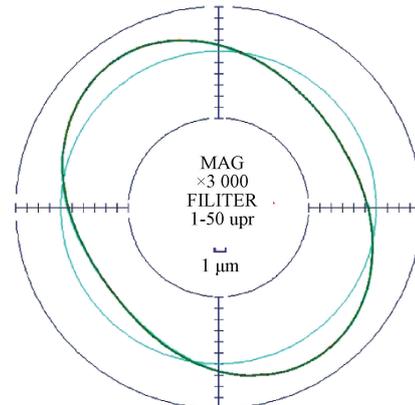
(a) 1号测量椭圆块曲线

(a) The curve of No. 1 standard elliptical block



(b) 2号测量椭圆块曲线

(b) The curve of No. 2 standard elliptical block



(c) 3号测量椭圆块曲线

(c) The curve of No. 3 standard elliptical block

图 7 标准椭圆块重复测量曲线

Fig. 7 Standard elliptical block repeated measurement curves

表 1 测量标准椭圆块实验结果对比

Table 1 Comparison of standard elliptical block measurement experiment results

椭圆块	计量值 $\varepsilon_s/\mu\text{m}$	测量值 $\varepsilon_r/\mu\text{m}$	标准差 $\sigma/\text{nm}$
1	1.8	1.799	17
2	2.1	2.102	16
3	6.6	6.608	17

### 3.3 激光聚变靶金属球轮廓实验结果

完成上述标定后, 利用激光聚变靶丸参数测量系统进行聚变靶金属球轮廓测量实验, 实验对象为中国工程物理研究院提供的激光聚变靶金属球, 其通过 AFM 装置测量金属球表面一组圆度值  $\varepsilon_A = 0.403 \mu\text{m}$ , 如图 8(a) 所示。

利用精密气浮测量轴系进行激光聚变靶金属球偏心自动调整, 经偏心调整后, 靶丸偏心收敛至  $e_0 = 0.3 \mu\text{m}$  以内, 满足后续轮廓圆度测量要求。为消除测量过程中实验环境的随机扰动, 对聚变靶金属球进行 10 次重复测

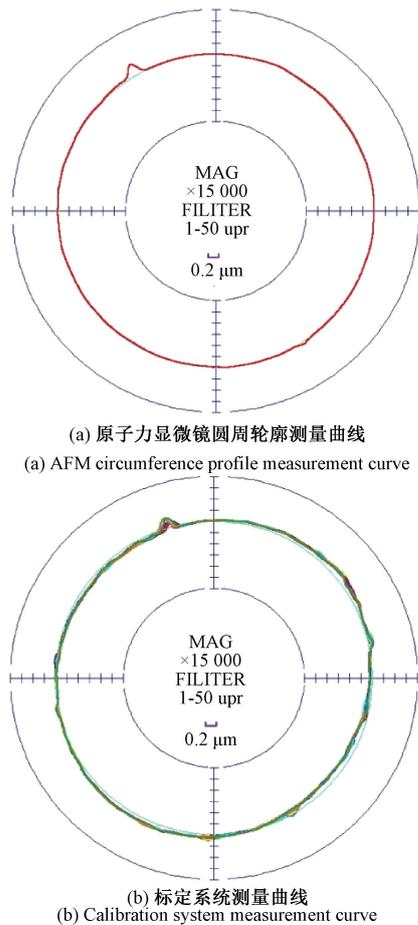


图 8 激光聚变靶金属球测量实验

Fig. 8 Laser fusion target metal capsule measurement experiment

量,根据式(19)计算可得激光聚变靶金属球轮廓圆度测量平均值  $\varepsilon = 0.439 \mu\text{m}$ ,标准差为  $37 \text{ nm}$ ,测量曲线如图 8(b)所示。将由中国工程物理研究院 AFM 装置测量的金属球轮廓圆度测量值  $\varepsilon_A$ ,和由激光聚变靶丸测量系统测量的金属球圆度测量值  $\varepsilon$  定量对比,可得两种方法圆度测量结果相差仅  $36 \text{ nm}$ ;定性对比图 8(a)和(b),两者轮廓测量数据对应,曲线吻合。由定量和定性分析,可以认为激光聚变靶丸几何参数测量系统标定结果准确可靠。

## 4 结 论

本文提出一种基于激光差动共焦测量原理的系统标定方法,其根据激光差动共焦测量系统轴向特性曲线的过零点精确对应系统焦点的性质,测量经过中国计量科学研究院计量检定的标准椭圆块的圆度,得出系统测量传递系数  $t = 1.03$ ,并通过多次检定的方式完成测量系统的高精度标定,系统 3 组测量得到标准椭圆块圆度测量

值和圆度计量值相差均不超过  $10 \text{ nm}$ ,且每组测量标准差均小于  $20 \text{ nm}$ ,极大提高了激光聚变靶丸几何参数测量系统标定结果的准确性和可靠性。该系统标定测量方法,为实现靶丸轮廓高精度测量迈出了关键一步。

## 参考文献

- [1] BETTI R HURRICANE O A. Corrigendum: inertial-confinement fusion with lasers [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(7):717-717.
- [2] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MICHEL P, et al. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies [J]. *Science*, 2010, 327(5970):1228.
- [3] KILKENNY J. National ignition facility quarterly report 2014 [J]. Technical Report, 2014, DOI: 10.2172/1179127.
- [4] SHAH R C, HAINES B M, WYSOCKI F J, et al. Systematic fuel cavity asymmetries in directly driven inertial confinement fusion implosions [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(13):135001.
- [5] HAMZA A V, NIKROO A, ALGER E, et al. Target development for the national ignition campaign [J]. *Fusion Science & Technology*, 2015, 69(1):395-406.
- [6] NGUYEN A Q L, EDDINGER S A, HUANG H, et al. Characterization of isolated defects for NIF targets using PSDI with an analysis of shell flipping capability [J]. *Fusion Science & Technology*, 2009, 55:399-404.
- [7] MENG J, ZHAO X S, TANG X, et al. Surface characterization of ICF capsule by AFM-based profilometer [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5:1-7.
- [8] WANG ZW, MA X J, MENG J, et al. Three-dimensional thickness reconstruction of ICF shells using X-ray tomography [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 100:525-530.
- [9] 许鑫,姚竹贤,王允,等. 球型惯性元件配合间隙差动共焦精密测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4):1-8.  
XU X, YAO ZH X, WANG Y, et al. Laser differential confocal-based high-precision measurement method for the matching clearance of spherical inertial element [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4):1-8.
- [10] ANTIPA N A, BAXAMUSA S H, BUICE E S, et al. Automated ICF capsule characterization using confocal surface profilometry [J]. *Fusion Science & Technology*, 2013, 63(2):150-159.
- [11] 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 inner-surface profile measurement system for ICF capsule [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5):1013-1023.
- [12] 孙若端, 邱丽荣, 杨佳苗, 等. 激光差动共焦曲率半径测量系统的研制[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12):2833-2838.  
SUN R D, QIU L R, YANG J M, et al. Development of laser differential confocal radius measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):2833-2838.
- [13] 韩江洪, 王景华, 徐娟, 等. 具有误差处理功能的动态平衡标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7):1454-1461.  
HAN J H, WANG JI H, XU J, et al. Research on new dynamic balance calibration method with measurement error processing function [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7):1454-1461.
- [14] 冯旭刚, 朱嘉齐, 章家岩. 关节臂式坐标测量机的数学建模及参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):190-197.  
FENG X G, ZHU J Q, ZHANG J Y. Mathematical model and parameter calibration of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):190-197.
- [15] 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.
- [16] ZHAO W, TAN J, QIU L. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution[J]. Optics Express, 2004, 12(21):5013-5021.
- [17] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J]. 光学精密工程, 2009(10):2486-2492.  
ZHU J, LI X F, TAN W B, et al. Measurement of short arc based on centre constraint least-square circle fitting[J]. Optics and Precision Engineering, 2009(10):2486-2492.
- [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.

### 作者简介



**卢孟爽**, 2018年于合肥工业大学获得学士学位, 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: lums1997@163.com

**Lu Mengshuang** received his B. Sc. degree in 2018 from Hefei University of Technology.

Now, he is an M. Sc. candidate in Beijing Institute of Technology. His main research interest is optical precision measurement.



**邱丽荣** (通信作者), 分别在1997年和2000年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位, 2005年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为差动共焦理论和光学精密测量。

E-mail: qiugrass@126.com

**Qiu Lirong** (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 1997 and 2000, respectively, received her Ph. D. degree in 2005 from Harbin Institute of Technology. Now, she is a professor in Beijing Institute of Technology. Her main research interest includes differential confocal theory and optical precision measurement.