

激光聚变靶丸球度测量与评定*

马仙仙, 赵维谦, 李少白, 王龙肖, 王允

(北京理工大学 光学测量研究中心 北京 100081)

摘要:为了解决激光聚变靶丸表面形貌高精度测量与评定的难题,提出一种激光差动共焦靶丸球度测量与评定方法,该方法利用激光差动共焦测量系统的轴向响应曲线的过零点与其物镜焦点位置相对应这一特性实现对靶丸表面的定焦,通过将靶丸在两个正交的方向上分别旋转,测量并获取靶丸表面的数个截面,实现靶丸表面全形貌测量,利用最小区域球度评定算法,建立靶丸球度评定的三维模型,对靶丸表面形貌进行定量评定。搭建实验装置对靶丸表面进行采样测量,评定结果显示,该方法的测量重复性为 $0.15\ \mu\text{m}$,为靶丸表面形貌测量与评定提供了一种可行方案。

关键词:差动共焦;激光聚变靶丸;最小区域评定;球度评定

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.30

Sphericity measurement and evaluation for laser fusion target

Ma Xianxian, Zhao Weiqian, Li Shaobai, Wang Longxiao, Wang Yun

(Optical Measurement Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of high precision measurement and evaluation of the surface morphology of laser fusion target, a laser differential confocal sphericity measurement and evaluation method for the laser fusion target is proposed. This method uses the property that the zero-crossing point of the axial response curve of the laser differential confocal measurement system corresponds to the focus point position of the objective lens to realize the target surface focusing. Through rotating the target in two orthogonal directions respectively, a number of cross-sections of the target surface are measured and acquired; and the whole morphological structure measurement for the target is achieved. The minimum zone sphericity evaluation algorithm is used to establish the three-dimensional model for the target sphericity evaluation, the quantitative evaluation of the target morphological structure is conducted. Based on the method, an experiment system was built to perform the morphological structure measurement of the target surface. The evaluation results show that with the proposed method the measurement repeatability reaches $0.15\ \mu\text{m}$, which provides a feasible scheme for the morphological structure measurement of fusion target.

Keywords: differential confocal; laser fusion target; minimum zone evaluation; sphericity evaluation

0 引言

激光惯性约束核聚变(inertial confinement fusion, ICF)可为人类提供理想清洁能源,是模拟天体运动和演化的重要手段^[1]。靶丸是 ICF 试验的关键部件,分析与实验表明,靶丸表面形貌缺陷是导致 ICF 试验打靶失败的重要原因。为了提高打靶的成功率,精确测量与评定靶丸表面形貌具有重要的现实意义^[2-3]。

在靶丸表面形貌测量方面,主要有干涉法、X 射线法、扫描电子显微镜法(scanning electron microscope, SEM)和原子力显微镜法(atomic force microscope, AFM)。其中干涉法较早用于测量靶丸的壳层厚度等参数的测量,如文献[4-6]用光纤点衍射移相干涉仪与五维精密工作台结合,实现靶丸表面形貌的测量;X 射线法利用 X 射线穿透靶丸,在胶片上成像,进而测量靶丸表面参数,美国劳伦斯利弗莫尔实验室较早利用 X 射线显微照相技术来测量靶丸的特性^[7];SEM 法利用扫描电子显微

镜具有放大倍数高及景深长的特点,可以在高放大倍数下清晰地观察靶丸形貌,如王明达等人^[8]研制了对靶丸 4π 绕动的扫描电子显微镜样品台,可用于精确测量靶丸 4π 表面缺陷的三维数据;AFM 法利用原子力显微镜的探针测量靶丸表面高度值,经过数据处理,实现对靶丸表面形貌的测量,其测量精度达纳米级,为靶丸测量提供了新思路^[9]。在靶丸球度评定方面,有最小二乘法、最小区域法、最大内切球法和最小外接球法4种评定方法,朱训生等人^[10]较早从事最小二乘球度计算算法的研究,建立了部分球面、完整球面的球度最小二乘计算公式;徐烈等人^[11]用“经线法”在超精型圆度仪和相应的支撑装置上实现球面轮廓的测量,在最小二乘球度评定模型的基础上,建立了采样数据的维数转换并实现了球面形貌的评定;刘飞等人^[12-13]针对直角坐标系下的球度评定,提出了一种基于弦线截交关系的最小外接球度评定方法,为球度误差评定提供了一种新方法;Lei X. Q. 等人^[14]结合球度误差的几何意义,提出了一种基于几何搜索的球度误差最小区域评定方法,该算法不仅能得到最小区域解,而且计算结果有良好的稳定性。

但是目前的靶丸形貌测量方法仍然存在不足,干涉法测量精度高,但是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;X 射线法利用胶片曝光成像,曝光时间长、效率低;SEM 法需要事先对靶丸进行导电处理,过程繁琐;AFM 法扫描范围较小,制约了它在靶丸整体形貌测量中的应用。文献[15-16]针对原子力显微镜等的不足,基于激光差动共焦原理构建测量系统,对靶丸内外表面及壳层厚度径进行高精度测量,但其未对靶丸整体形貌进行测量与评定。本文针对靶丸表面形貌高精度测量与评定这一需求,提出了一种激光差动共焦靶丸球度测量与评定方法,该方法为非接触式测量,测量范围大、空间分辨率高、测量重复性好,对靶丸无破坏,同时基于最小区域球度评定原理,利用一种改进的最小区域球度评定算法对靶丸表面形貌进行评定,评定速度快,实现了靶丸表面形貌的定性观察与定量评定,为靶丸表面形貌快速分析提供了一种可行性方案。

1 激光聚变靶丸球度测量与评定原理

1.1 测量原理

靶丸表面形貌的单点测量利用差动共焦测量系统的轴向响应曲线的过零点与其物镜焦点位置相对应这一特性^[17-19],其原理如图1所示,激光器发出的光经过准直镜、偏振分光镜和1/4波片后,经物镜会聚到靶丸表面,而后经靶丸表面反射后再次通过物镜、1/4波片和偏振分光镜,经分光镜被分为两路:一路经过收集镜1聚焦,再通过针孔1,被探测器1接收;另一路经过收集镜2聚

焦,通过针孔2,被探测器2接收。针孔1置于收集镜1焦前 $-M$ 处,针孔2置于收集镜2焦后 $+M$ 处, M 对应的归一化光学坐标为 u_M 。

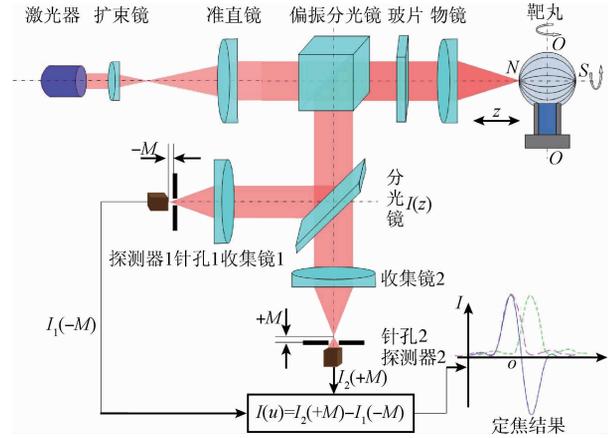


图1 靶丸表面形貌测量原理

Fig. 1 The target surface morphological measurement principle

探测器1和探测器2探测到的光强响应信号的光强响应函数分别为:

$$\begin{cases} I_2(u + u_M, v) = \left| \int_0^1 2\pi\rho P(\rho) \exp[i(2u + u_M)\rho^2/4] J_0(\rho v) d\rho \right|^4 \\ I_1(u - u_M, v) = \left| \int_0^1 2\pi\rho P(\rho) \exp[i(2u - u_M)\rho^2/4] J_0(\rho v) d\rho \right|^4 \end{cases} \quad (1)$$

令 $v = 0$,两光强响应信号相减得到差动共焦光强信号,其光强响应函数为:

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

其中:

$$\begin{cases} u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f}\right)^2 z \\ v = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f}\right)^2 r \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 是轴向归一化光学坐标, v 是横向归一化光学坐标, z 是轴向坐标, r 是镜像坐标, D/f 是差动共焦系统物镜的相对孔径。两路探测器输出的信号经过处理后送入计算机,与物镜驱动器的位移信息相结合,得到差动共焦曲线 $I(u)$,利用差动共焦曲线 $I(u)$ 的过零点 o 可以精确地计算出靶丸表面上单点的物理位置。

为了实现靶丸表面的全形貌测量,提出正交回转模型,驱动靶丸在两个正交的方向上分别旋转,对靶丸表面上数个截面进行测量。如图1所示,测量时,所有的测量

截面过靶丸的自转轴 N-S,且 N-S 垂直于测量轴线 $O-O$ 。对某一个截面进行测量时,由直流电机与精密计数装置驱动靶丸绕测量轴线 $O-O$ 旋转一周,同时物镜微位移驱动器驱动物镜对靶丸进行扫描测量,并对该截面上 n 个点进行定焦测量,得到每一个测量点的差动共焦曲线 $I(u)$,根据 $I(u)$ 的过零点计算得到每一个测量点的物理位置,当前截面测量完成后,由步进电机与精密计数装置驱动靶丸绕 N-S 轴旋转 φ_0 ($\varphi_0 = \pi/m$) 角,使靶丸置于下一测量截面,再对下一个截面进行测量,这样共对靶丸表面 m 个测量截面进行测量,从而实现靶丸表面全形貌测量。

1.2 评定原理

因为上述测量方法采集到的是靶丸表面每个截面上各个采样点沿 N-S 轴线的物理位置,这些物理位置是用二维极坐标来表示的,为了方便靶丸球度误差的计算,先对这些测量数据进行极坐标向轴坐标的转换,使得球度评定在三维直角坐标系中进行。

如图 2 所示,平面 γ 是某一测量截面,与 xoy 平面的夹角是 β , P_i 是其上某一采样点,它对应的物理位置即极坐标是 ρ_i , P_i 与 γ 平面上 X 轴的夹角是 α ,与 Y 轴的夹角是 $90^\circ - \alpha$ 。

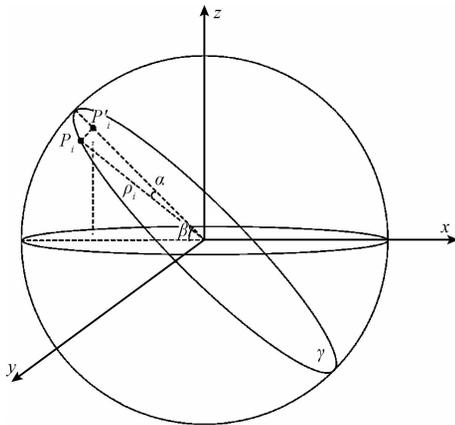


图 2 坐标转换数学模型

Fig. 2 Coordinate transformation mathematical model

根据几何关系, P_i 在直角坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} x_{P_i} = \rho_i \cos\alpha_i \cos(90^\circ - \beta_i) \\ y_{P_i} = \rho_i \sin\alpha_i \\ z_{P_i} = \rho_i \cos\alpha_i \sin(90^\circ - \beta_i) \end{cases} \quad (4)$$

将所有测量点的极坐标都按照式(3)进行坐标转换,得到所有测量点的 x, y, z 坐标。

最小区域球度评定原理如图 3(a) 所示,以最小二乘拟合球心为中心构造一个边长为 f_0 的正四面体,并计算出正四面体的 4 个顶点坐标。假设球的方程为:

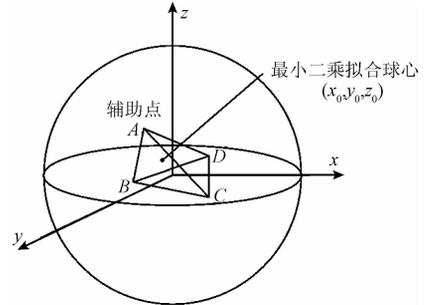
$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = R^2 \quad (5)$$

展开得:

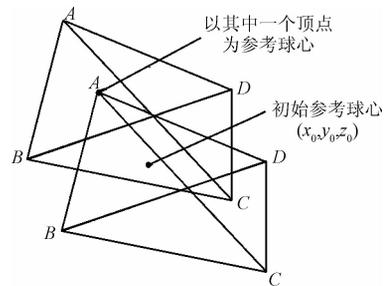
$$x^2 + y^2 + z^2 - 2ax - 2by - 2cz + d = 0 \quad (6)$$

式中: $d = a^2 + b^2 + c^2 - R^2$ 。

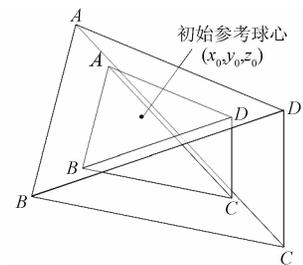
根据最小二乘拟合条件,就是要保证 $V = \sum (x^2 + y^2 + z^2 - ax - by - cz + d)^2$ 中 V 最小。



(a) 正四面体构造原理
(a) Regular tetrahedron construction principle



(b) 几何搜索原理($\epsilon_{LSC} > \epsilon_{min}$)
(b) Geometric search principle($\epsilon_{LSC} > \epsilon_{min}$)



(c) 几何搜索原理($\epsilon_{LSC} < \epsilon_{min}$)
(c) Geometric search principle($\epsilon_{LSC} < \epsilon_{min}$)

图 3 最小区域球度评定原理

Fig. 3 Minimum area sphericity evaluation principle

对于最小二乘的求解方法,可以采用求偏导的方式,令其对各参数的偏导都为 0,也可以采用矩阵法。这里采用矩阵法解该方程,得:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

两边同时左乘 $\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}$ 得到:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & -\sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum z_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ -\sum(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

解得:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & -\sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & -\sum z_i \\ -\sum x_i & -\sum y_i & -\sum z_i & n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum x_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ \sum z_i(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \\ -\sum(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

则最小二乘拟合球心坐标 (x_o, y_o, z_o) 以及最小二乘拟合半径 R_{LSC} 为:

$$x_o = \frac{a}{2}, y_o = \frac{b}{2}, z_o = \frac{c}{2}, R_{LSC} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 - d} \quad (10)$$

最小二乘球度误差是 ε_{LSC} 为:

$$\varepsilon_{LSC} = R_{LSC\max} - R_{LSC\min} \quad (11)$$

式中: R_{LSCi} 为所有测量点到最小二乘拟合球心的距离。根据几何关系,构造的正四面体的4个顶点坐标分别为:

$$\begin{cases} A(x_o, y_o, z_o + 0.530330f_o) \\ B(x_o - 0.5f_o, y_o - 0.288675f_o, z_o - 0.176777f_o) \\ C(x_o + 0.5f_o, y_o - 0.288675f_o, z_o - 0.176777f_o) \\ D(x_o, y_o + 0.577350f_o, z_o - 0.176777f_o) \end{cases} \quad (12)$$

分别以A、B、C、D为最小区域球心,计算各测量点到球心的距离:

$$\begin{cases} R_{x_i, y_i, z_i} = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} \\ R_{x_B, y_B, z_B} = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2} \\ R_{x_C, y_C, z_C} = \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2} \\ R_{x_D, y_D, z_D} = \sqrt{(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2} \end{cases} \quad (13)$$

分别计算它们的球度误差:

$$\begin{cases} \varepsilon_{MZC} = R_{(x_i, y_i, z_i)\max} - R_{(x_i, y_i, z_i)\min} \\ \varepsilon_{MZC} = R_{(x_B, y_B, z_B)\max} - R_{(x_B, y_B, z_B)\min} \\ \varepsilon_{MZC} = R_{(x_C, y_C, z_C)\max} - R_{(x_C, y_C, z_C)\min} \\ \varepsilon_{MZC} = R_{(x_D, y_D, z_D)\max} - R_{(x_D, y_D, z_D)\min} \end{cases} \quad (14)$$

从这4个球度误差中找出最小的一个 ε_{\min} ,比较 ε_{\min} 和 ε_{LSC} 的大小,如果 $\varepsilon_{LSC} > \varepsilon_{\min}$,如图3(b)所示,则参考球心变为与 ε_{\min} 相对应的顶点,重新计算并构造辅助正四面体,且计算 ε_{LSC} 和 ε_{\min} ;如果 $\varepsilon_{LSC} < \varepsilon_{\min}$,如图3(c)所示,参考球心不变,把辅助正四面体的边长缩小0.618倍,重新构造辅助的正四面体,且计算 ε_{LSC} 和 ε_{\min} ,以此类推,这样不断循环,直到正四面体的边长小于某一设定阈值,这里取 $0.001 \mu\text{m}$,则认为搜索完毕,此时认为 ε_{LSC} 和 ε_{\min} 中较小值就是符合最小区域条件的球度误差 ε_{MZC} 。

2 实验

2.1 测量系统

为了验证方法的可行性与有效性,搭建了如图4所示的实验系统,该系统主要由差动共焦传感器、主轴回转系统、辅助轴回转系统及其三维调整机构、负压吸附装置等组成。

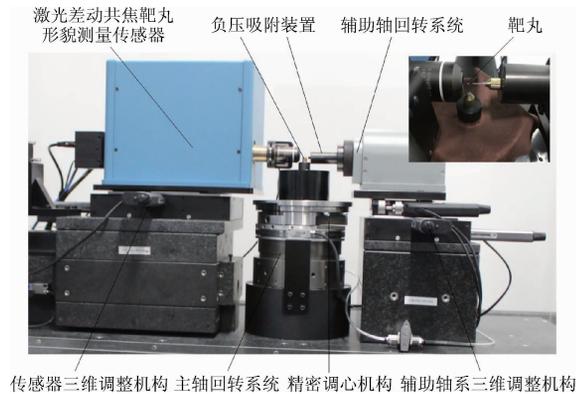


图4 激光差动共焦靶丸球度测量系统

Fig. 4 Laser differential confocal target sphericity measurement system

其中激光差动共焦传感器采用波长为405 nm的半导体激光器和数值孔径(numerical aperture, NA)为0.8的高数值孔径物镜,物镜微位移驱动器采用普爱纳米位移技术有限(Physilk Instrumente, PI)公司的P-725.4CD型号、运动量程为 $400 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷驱动器,光电探测器采用光电倍增管;主轴回转系统主要由超精密气浮回转轴系、负压吸附装置、高分辨力调心工作台、微位移驱动器、直流电机、高精度圆光栅及零位检测装置等组成,其中,高分辨力调心工作台结合NEWPORT公司的

8301NF 型号微位移驱动器可以对靶丸进行偏心调整,减小偏心误差对靶丸回转测量的影响;辅助轴回转系统主要由超精密气浮回转轴系、负压吸附装置、精密光电编码器、步进电机以及三维调整机构组成;负压吸附装置主要由微型真空泵、电动机机械手和靶丸吸嘴组成,利用微型真空泵产生合适的负压吸附力将靶丸吸附在吸嘴上,使靶丸的装卡稳定可靠,减小靶丸装卡不稳定带来的测量误差。主轴回转轴系的回转轴线垂直于辅助轴回转轴系,二者构成正交回转轴系,驱动靶丸在正交的方向上不断分别回转,实现靶丸表面全形貌测量。

2.2 系统标定

靶丸球度测量系统是通过激光差动共焦系统的聚焦点对被测样品进行焦点触发瞄准测量,被测靶丸轮廓差异引起的焦点轴向位移是由物镜微位移驱动器决定,而物镜微位移驱动器 P-725.4CD 已经过 PI 公司出厂标定,其闭环控制模式下的分辨力为 1.25 nm,线性度为 0.03%,重复性为 $\pm 5\%$,物镜微位移驱动器的溯源标定确保了靶丸球度测量系统的准确性。

2.3 测量过程

实验中采用中国工程物理研究院提供的直径为 876.90 μm 的聚变靶丸作为被测件,测量时,利用微型真空泵提供合适的负压将靶丸吸附在主轴的吸嘴上,由于靶丸形貌测量是回转测量,回转测量不可避免的存在偏心误差,为了减小偏心误差对测量的影响,每个截面在测量之前,都要先对靶丸进行偏心调整,调整时,对靶丸进行当前截面测量,计算其拟合偏心量,利用调心工作台和 NEWPORT 公司的 8031NF 型号微位移驱动器对靶丸进行自动偏心调整,当偏心量调到一定范围之内(这里认为 0.5 μm),即可对靶丸当前截面进行测量。

偏心调整完成后,由直流电机驱动主轴旋转,主轴带动靶丸旋转,同时安装在激光差动共焦传感器上的压电陶瓷驱动器驱动物镜扫描,通过美国国家仪器(National Instrument, NI)的数据采集卡板卡采集光电倍增管获取到的差动共焦光路中的两路光强信号,并记录压电陶瓷驱动器的实时位置。在此过程中,安装在主轴上的圆光栅以及零位检测装置通过脉冲计数可以精确控制主轴旋转一圈,对当前截面上 1 024 个点进行定焦测量;当一个截面测量完成后,通过精密三维调整机构将辅助轴移至主轴负压吸嘴附近,利用电动机机械手控制阀门,关闭主轴负压,开启辅助轴负压,使靶丸被吸附到辅助轴的吸嘴上,同时三维调整机构带动辅助轴退回一定距离。当步进电机和精密光电编码器通过脉冲计数精确控制辅助轴旋转一定角度(15°)后,通过精密三维调整机构将辅助轴移至主轴负压吸嘴附近,开启主轴负压,关闭辅助轴负压,将靶丸放回到到主轴的吸嘴上,继续对当前截面进行测量。

2.4 测量结果

图 5 所示为对某一截面进行测量的结果,该截面的采样点数为 1 024 个点,对测量数据进行差动共焦计算、去直流、滤波以及最小区域圆度拟合,并用 GDI+ 图形接口将测量结果复现,得到该截面的轮廓形貌及其最小区域圆度误差为 2.54 μm 。

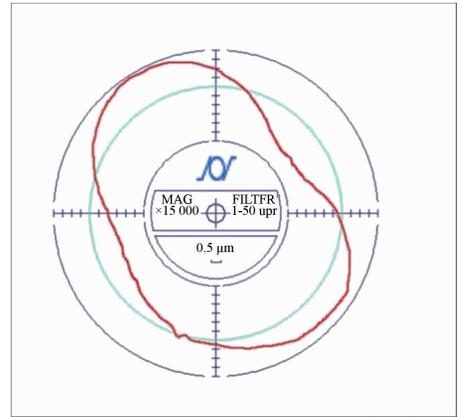


图 5 某一截面测量结果

Fig. 5 The measurement result for a certain section

通过将靶丸在两个正交的回转轴系上旋转,共对其上 12 个截面进行测量,对测量数据进行差动共焦计算、去直流、滤波以及最小区域球度误差计算,建立靶丸球度评定的三维模型,利用 OpenGL 图形接口对靶丸形貌进行复现,如图 6 所示,得到靶丸表面的全形貌及其最小区域球度误差为 3.70 μm ,形貌复现结果结合最小区域球度误差评定结果可以对靶丸表面形貌进行定性观察及定量分析。

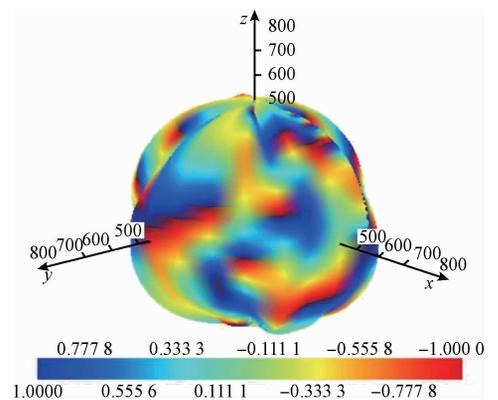


图 6 靶丸表面形貌测量结果

Fig. 6 The target surface morphological measurement result

实验中对靶丸形貌进行十次重复测量并对其进行最小区域球度评定,得到测量结果如表 1 所示。

表1 十组球度评定结果

Table 1 Ten groups of the sphericity evaluation results

测量次数	最小区域拟合球心	最小区域球度 (μm)
1	(-0.18, -0.04, -0.02)	3.70
2	(-0.64, -0.07, 0.30)	3.25
3	(0, 0.13, 0.07)	3.48
4	(-0.10, 0, 0.15)	3.53
5	(0, -0.06, 0.27)	3.63
6	(-0.02, 0.33, -0.16)	3.69
7	(-0.07, 0.06, 0.01)	3.38
8	(0.12, 0.27, 0.10)	3.72
9	(0.07, -0.08, 0.25)	3.62
10	(-0.31, -0.09, -0.56)	3.49

测得靶丸的最小区域球度平均值为 $\varepsilon_{\text{MZC}} = 3.55 \mu\text{m}$, 标准差为 $\sigma = 0.15 \mu\text{m}$ 。

3 不确定度分析

在测量过程中,所引入的不确定度来源主要包括精密回转轴系的回转误差引入的不确定度 u_1 ,靶丸测量系统偏心调整机构的偏心调整误差的不确定度 u_2 ,靶丸形貌重复测量的不确定度 u_3 以及环境误差带来的不确定度 u_4 。

精密回转轴系的回转误差采用 Taylor Hobson 公司的 TALYMIN4 型号高精度电感传感器进行测量,得到其引入的不确定度为 $u_1 = 0.02 \mu\text{m}$ 。

偏心调整机构的偏心误差采用的是 NEWPORT 公司的 8301NF 型号压电陶瓷微位移驱动器作为偏心调整驱动,其具有数十纳米的分辨力,经过多次测量与调整后,测量靶丸的偏心量的最终收敛值,得到其引入的不确定度 $u_2 = 0.03 \mu\text{m}$ 。

靶丸形貌测量的不确定度是由于重复测量引起的 A 类不确定度,根据表 1 的测量数据,用贝塞尔公式计算得到:

$$u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10 - 1}} = 0.15 \mu\text{m} \quad (15)$$

对于环境误差带来的不确定度,本实验在恒温 23°C , 1 个标准大气压和恒湿度的实验环境下,故忽略环境误差带来的误差影响。

上述各不确定分量相互独立,因而系统所测球度的合成不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} =$$

$$\sqrt{0.02^2 + 0.03^2 + 0.15^2 + 0^2} = 0.15 \mu\text{m} \quad (16)$$

4 结 论

将激光差动共焦测量原理应用于靶丸表面形貌测量,搭建实验装置,编写靶丸球度测量与评定的软件,通过测量系统的轴向强度响应曲线的过零点精确计算得到靶丸表面每个点的物理坐标,利用改进的最小区域球度评定算法对测量结果进行评定,并利用 OpenGL 图形接口将靶丸形貌复现,实现靶丸表面形貌的定量分析。选用中国工程物理研究院提供的直径为 $876.90 \mu\text{m}$ 的聚变靶丸进行测试,测量结果重复性为 $0.15 \mu\text{m}$,为靶丸表面形貌分析提供了一种可行性方案。

参考文献

- [1] 李玉同. 快点火激光核聚变和实验室天体物理中的几个前沿问题[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(9): 9-13.
LI Y T. Frontier of high power laser based high energy density physics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(9): 9-13.
- [2] 何凯, 缪文勇, 涂绍勇, 等. 靶参数对收缩几何瑞利-泰勒不稳定性诊断的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 146-154.
HE K, MIAO W Y, TU SH Y, et al. Effect of capsule parameters on diagnosis geometry Rayleigh-Taylor instability[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 146-154.
- [3] 李波, 张占文, 何智兵, 等. 激光惯性约束聚变靶丸制备与表征[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 194-211.
LI B, ZHANG ZH W, HE ZH B, et al. Preparation and characterization of inertial confinement fusion capsules[J]. High Power Laser And Particle Beams, 2015, 27(3): 194-211.
- [4] Project Staff. FY07 ICF Annual Report (General Atomics Report GA-A26008)[R]. General Atomics & Affiliated Companies, 2008.
- [5] MONTESANTI R C, JOHNSON M A, MAOLES E R, et al. Phase shifting diffraction interferometer for inspecting NIF ignition-target shells [C]. American Society for Precision Engineering Annual Meeting, 2006.
- [6] 徐永祥, 陈磊, 朱日宏, 等. 微小球面曲率半径的测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1159-1162.
XU Y X, CHEN L, ZHU R H, et al. Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9): 1159-1162.

- [7] SINGLETON R M, WEINSTEIN B W, HENDRICKS C D. X-ray measurement of laser fusion targets using least squares fitting [J]. *Applied Optics*, 1979, 18 (24): 4116-4123.
- [8] 王明达,高党忠,刘元琼,等. 扫描电子显微镜测量靶丸表面形貌 [J]. *原子能科学技术*, 1999, 33 (4): 290-293.
WANG M D, GAO D ZH, LIU Y Q, et al. Measurement of the surface morphology of laser target by SEM [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1999, 33 (4): 290-293.
- [9] COOK R, OVERTURF G E, BUCKLEY S R, et al. Production and characterization of doped mandrels for inertial-confinement fusion experiments [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 1994, 12(4) :1275-1280.
- [10] 朱训生,任新生,杨建国,等. 球度最小二乘评定的一般公式 [J]. *上海交通大学学报*, 1998, 32(5) :43-45.
ZHU X SH, REN X SH, YANG J G, et al. General formula for the least square sphericity [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1998, 32(5) :43-45.
- [11] 徐烈,谭久彬,张杰. 经线法球度测量的评定方法研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2001, 33(5) :620-624.
XU L, TAN J B, ZHANG J. Evaluation of longitude sphericity error measurement [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2001, 33(5) :620-624.
- [12] 刘飞,彭晓南. 最小外接球法球度误差评价与实现 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(9) :243-247.
LIU F, PENG X N. Evaluation of sphericity error by using minimum circumscribed sphere [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9) :243-247.
- [13] LIU F, XU G H. Minimum zone evaluation of sphericity deviation based on the intersecting chord method in Cartesian coordinate system [J]. *Precision Engineering*, 2016, 45(7) :216-229.
- [14] LEI X Q, GAO Z B, DUAN M D, et al. Method for sphericity error evaluation using geometry optimization searching algorithm [J]. *Precision Engineering*, 2015, 42:101-112.
- [15] ZHAO W Q, GUO J J, QIU L R, et al. Low transmittance ICF capsule geometric parameters measurement using laser differential confocal technique [J]. *Optics Communications*, 2013, 292(4) :62-67.
- [16] 郭俊杰,邱丽荣,王允,等. 用于惯性约束聚变靶丸测量的激光差动共焦传感器 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3) :644-651.
GUO J J, QIU L R, WANG Y, et al. Laser differential confocal sensor for ICF capsule measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3) :644-651.
- [17] QIU L R, XIAO Y, ZHAO W Q. Laser differential confocal radius measurement method for the cylindrical surface [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (11): 12013-12025.
- [18] 史立波,邱丽荣,王允,等. 激光差动共焦透镜测量系统的研制 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3) :683-688.
SHI L B, QIU L R, WANG Y, et al. Development of lens central thickness measurement system using laser differential confocal microscopy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3) :683-688.
- [19] 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.

作者简介



马仙仙, 2015 年于河北工业大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为精密光学检测。

E-mail: 18811529558@163.com

Ma Xianxian received her B.Sc. degree from Hebei University of Technology in 2015. Now she is a M.Sc. candidate in Beijing Institute of Technology. Her main research interest is precise optical test technique.



赵维谦(通讯作者), 分别在 1993 年和 2003 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为差动共焦理论和精密光学检测。

E-mail: zwq669@126.com

Zhao Weiqian (Corresponding author) received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 1993 and 2003, respectively. Now he is a professor in Beijing Institute of Technology. His main research interest is differential confocal theory and precise optical test technique.