

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108570

激光聚变靶丸球面经纬迹线优化球度测量方法*

黄婧雯, 马仙仙, 刘子豪, 赵维谦, 邱丽荣

(北京理工大学光电学院 北京 100081)

摘要:针对激光聚变靶丸表面3D全形貌的高精度测量与评价难题,提出一种基于激光差动共焦原理的靶丸球面经纬迹线优化球度测量方法。该方法采用经纬迹线划分方案提高形貌信息采样覆盖率,实现靶丸球面形貌高效高精度测量。首先,利用差动共焦测量系统对靶丸球面经纬迹线上二维圆周采样点进行精准定焦,获取二维轮廓信息;然后,利用精密三维姿态调整机构和正交回转轴系切换被测截面,获取覆盖靶丸全球面多条经纬迹线处的高度信息;最后依据建立的靶丸球面经纬迹线三维坐标转换模型,采用最小二乘算法对靶丸球度进行高精度评定,并对靶丸表面进行形貌重构。实验结果表明:测量57条迹线,被测靶丸的球度误差为 $1.946\ \mu\text{m}$ 。该方法为靶丸表面全形貌高精度测量与评定以及定性观察提供了可行性方案。

关键词:激光聚变靶丸;差动共焦;球面轨迹优化;球度评定;三维重构

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

Optimized sphericity measurement method for the latitude and longitude traces on the surface of ICF capsule

Huang Jingwen, Ma Xianxian, Liu Zihao, Zhao Weiqian, Qiu Lirong

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

Abstract: It is difficult to implement high-precision measurement and evaluation of the full surface topography of inertial confinement fusion (ICF) capsule. In this article, an optimized sphericity measurement method is proposed, which is for the latitude and longitude traces based on the principle of laser differential confocal. Firstly, the method uses the measurement system to achieve precise focusing of the circumferential sampling points on the capsule surface. Secondly, the measured cross section of the capsule is switched by using the precise 3D adjustment mechanism and an orthogonal rotary system. The height information at the latitude and longitude traces of the whole capsule spherical surface is obtained. Finally, the 3D coordinate transformation model of complete coverage mode is formulated. The least square algorithm is used to evaluate the sphericity of the capsule, and the 3D surface of the capsule is reconstructed. The experimental results show that the sphericity error of the measured capsule is $1.946\ \mu\text{m}$ when 57 traces are measured. This method provides a feasible scheme for the high-precision measurement and evaluation, qualitative observation of the full topography of the ICF capsule surface.

Keywords: laser fusion capsule; differential confocal; spherical trace optimization; sphericity evaluation; 3D surface reconstruction

0 引言

激光惯性约束核聚变(inertial confinement fusion, ICF)通过高功率激光束轰击氘氚靶丸,使燃料均匀向心压缩内爆,产生大量能量^[1]。美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)研究表明:靶丸表面球度偏离等缺陷将引起流体力学不稳定性指数性增长,造成

球壳不对称压缩甚至破裂,导致打靶失败^[2-3]。因此,靶丸表面整体形貌的高精度非破坏性测量、分析对ICF点火实验的设计改进具有极其重要的现实意义。

在靶丸表面形貌非破坏性测量方面,X射线相衬成像法利用X射线穿透靶丸后携带其结构相位信息在探测器上成像,经数字图像处理得到轮廓信息^[4],但受限于CCD尺寸,壳层分辨力仅为 $1.3\ \mu\text{m}$;扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)结合 4π 搓动定位装

收稿日期:2021-09-14 Received Date: 2021-09-14

* 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(61827826,51825501)项目资助

置可观靶丸表面形貌细微结构^[5],但导电处理过程复杂,测量效率低;美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)采用点衍射移相干涉技术(phase-shifting point diffraction interferometer, PSDI)探测靶丸表面区域形貌,结合正交回转轴和子孔径拼接技术获得完整表面^[6],但对靶丸透明度及粗糙度要求极高;LLNL结合原子力探针与精密气浮轴系构建的轮廓测量仪(sphere mapper, SM)具有纳米级分辨力^[7],但为接触式测量,扫描范围小。基于光学点扫描探测的抗反射率激光差动共焦技术可对靶丸外轮廓实现精准测量^[8-10],其传感器(laser differential confocal sensor, LDCS)轴向分辨力达3 nm,满足靶丸表面形貌非接触、非破坏快速高精度测量需求。而如何在短时间内高效获取有效的靶丸表面形貌核心数据尤为关键。

在靶丸表面三维轮廓测量轨迹优化设计方面,LLNL的Cook等^[11]采用三正交方案,利用轮廓仪测量靶丸球面三正交方向大圆迹线处轮廓,评定靶丸粗糙度、壳层均匀性及功率谱等参数;Stephens等^[12]和Huang等^[13]在上述基础上增加两组与原大圆间隔45°的圆周迹线,并扩大迹线偏移范围,获得更多形貌信息;除此之外,他们还采用经圆方案,测量围绕单轴旋转的数个等间隔角度球面经圆迹线进一步增加采样覆盖率,分析靶丸表面波动特征并进行表面三维重构^[14],该方案测量迹线密集,采样点数多,获得表面形貌信息更加丰富,但同时也增加了转位误差,且测量效率降低。Wang等^[10]和马仙仙等^[15]基

于LDCS建立了靶丸表面二维轮廓及三维形貌测量模型,采用18条经圆迹线方案开展靶丸测量实验,但此方案仍遗漏较多表面形貌数据,影响后续评定精度。

针对上述问题,本文提出一种激光差动共焦靶丸球面轨迹优化球度测量方法,采用多采样点、多截面数的球面经纬迹线方案,以最少转位路径,在短时间内稳定、高精度地获取靶丸表面核心形貌处的采样点高度数据;同时,依据建立的三维坐标转换模型,利用最小二乘法评定球度,并快速给出靶丸表面三维重构结果。该方法为靶丸3D形貌的测量评定与定性观察提供了高质量可行性方案。

1 测量原理

1.1 激光差动共焦靶丸轮廓测量原理

靶丸表面形貌高空间分辨测量原理如图1所示,其基于差动共焦特性曲线零点与焦点精确对应这一特性^[16],利用焦点附近的线性段对靶丸表面进行高分辨快速扫描测量。激光器发出的平行光经扩束镜、偏振分光镜PBS和1/4波片后,由物镜会聚形成探测光束到达被测靶丸表面,被靶丸表面反射的光经过物镜、1/4波片、BS后,经会聚镜L汇聚后被分光镜BS分为两路,一路进入位于L焦后M处的针孔P1;另一路进入位于L焦前M处的针孔P2,两路光分别被光电倍增管D1、D2接收,记为 $I_1(u, -u_M)$ 及 $I_2(u, +u_M)$ 。

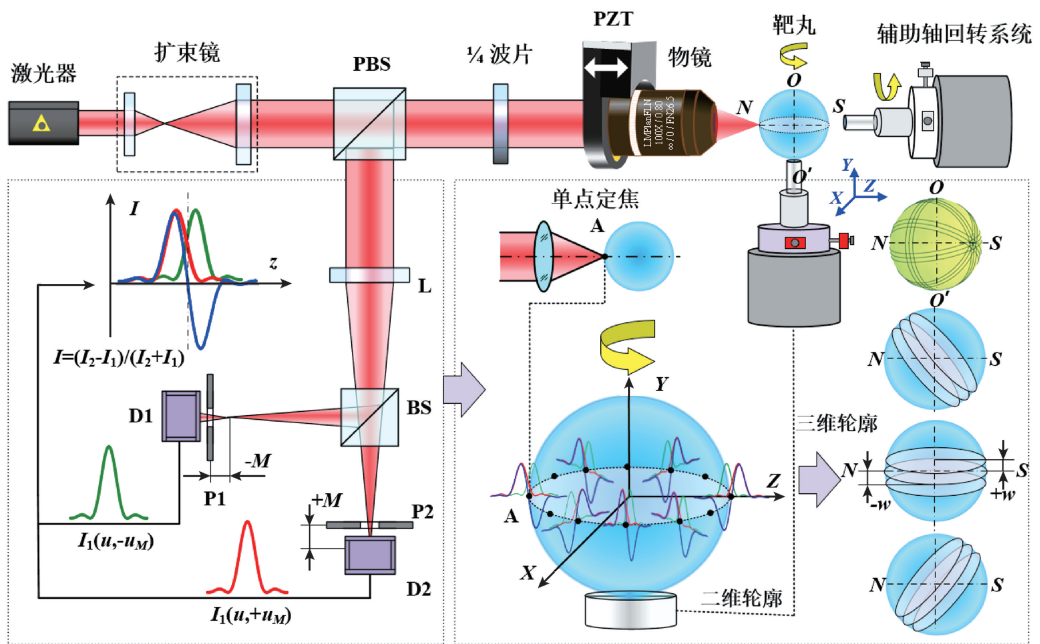


图1 靶丸三维形貌测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of capsule 3D surface measurement

根据菲涅尔衍射积分, LDCS 归一化抗反射率差动共焦光强信号的轴向响应函数为:

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

其中, u 为轴向归一化光学坐标, u_M 为 M 对应的归一化光学坐标。

测量时, PZT 驱动物镜沿光轴方向对靶丸表面采样点 A 进行精确扫描定焦, 将得到的 PZT 实时反馈位置信号与光电倍增管探测到的前焦、后焦两路光强信号进行数据处理, 根据式 (1) 得到差动共焦轴向响应曲线 $I_A(u)$, 根据 $I_A(u)$ 过零点可精确计算出点 A 的物理坐标 Z_A 。

接着, 利用图 1 所示精密气浮主轴回转系统驱动靶丸绕测量轴线 $O-O'$ 旋转, 同时 PZT 驱动物镜沿轴向对靶丸圆周的 n 个采样点进行快速扫描定焦, 得到所有采样点的物理坐标, 即获得二维圆周轮廓测量数据。

1.2 靶丸球面经纬迹线优化测量方案

靶丸表面三维整体形貌信息由多个截面的二维圆周轮廓构成, 其截面数对三维形貌测量精度具有重要影响。为增加截面数, 并减小多次切换截面时靶丸运动转位造成的偏移误差, 提高效率, 采用图 2 (a) 等间隔经圆法与图 2 (b) 三正交大圆法相结合的经纬迹线测量方案, 如图 2 (c) 所示。首先, 测量某一截面的经线大圆, 然后利用测量系统的三维姿态调整机构, 使物镜探测光束在测量轴 $O-O'$ 方向上下分别平移 w 距离, 测量与该大圆平行的两条纬圆, 以这样 3 条平行迹线为一组, 围绕靶丸的自转轴 $N-S$ 覆盖整个球面。

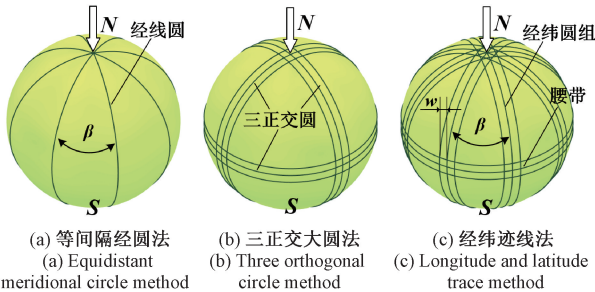


图 2 靶丸球面测量轨迹方案

Fig. 2 Trace patterns for capsule surface measurement

将球面圆周迹线分为经纬圆组迹线和“腰带”迹线两部分, 设经纬圆组迹线共 T 组, 则每组经线大圆间隔角度为:

$$\beta = \pi/T \quad (2)$$

经纬圆组迹线测量步骤如图 3 所示: (a) 主轴带动

靶丸绕 $O-O'$ 轴旋转一周, 测量第一组经纬圆迹线; (b) 回转辅助轴吸附靶丸, 使靶丸绕 $N-S$ 轴旋转 β 切换被测截面; (c) 主轴驱动靶丸旋转一周, 测量第 i 组圆周迹线 ($i = 1, 2, \dots, T$); (d) 重复 (b) ~ (c) 步骤, 直到辅助轴旋转 T 次; (e) 主轴驱动靶丸旋转一周, 测量第 M 组经纬圆迹线, 至此所有经纬圆组迹线都测量完毕。

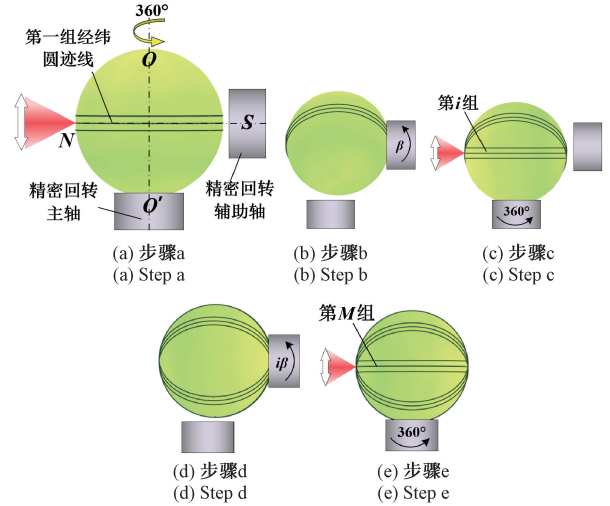


图 3 经纬圆组迹线轴系转换步骤

Fig. 3 Transfer steps of the system for the latitude and longitude traces group

“腰带”迹线测量步骤如图 4 所示: (a) 主轴驱动靶丸绕 $O-O'$ 轴旋转 90° ; (b) 辅助轴吸附靶丸, 并驱动其旋转 90° ; (c) 主轴驱动靶丸旋转一周, 测量“腰带”圆周迹线, 至此所有球面迹线测量完毕。

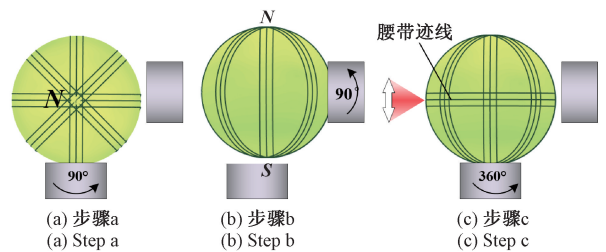


图 4 “腰带”迹线轴系转换步骤

Fig. 4 Transfer steps of the system for ‘belt’ traces

根据上述步骤, 可快速、稳定地完成对靶丸预定球面轨迹的测量, 获得靶丸表面高覆盖率的形貌数据。

2 靶丸球度参数评定原理

2.1 三维坐标转换原理

为便于球度参数评定, 将所有圆周采样点 (二维极坐标) 转换为球面采样点 (三维直角坐标), 其纬圆组采样

点空间坐标转换模型如图5所示。平面 $C1$ 为经圆迹线所在截面,平面 $C2$ 、 $C3$ 以 $C1$ 为基础分别向上和下平移 w 距离,三平面与 xoz 平面的夹角均为 β ,每个截面上圆周的采样点数均为 n 。

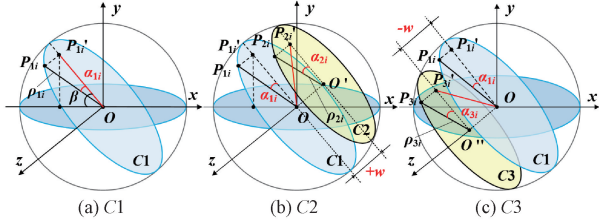


图5 经纬圆组迹线坐标转换模型

Fig. 5 Coordinate transformation model for the latitude and longitude traces group

平面 $C1$ 中,设该圆周第 i 个采样点 P_{1i} 测量值为 ρ_{1i} ($i=1,2,\dots,n$), O 为 $C1$ 圆心, OP_{1i} 与 $C1$ 内 $-x$ 轴的夹角为 α_{1i} ,如图5(a)所示,根据几何关系可得到 P_{1i} 的三维直角坐标:

$$\begin{cases} x_{P_{1i}} = \rho_{1i} \cos \alpha_{1i} \cos \beta \\ y_{P_{1i}} = \rho_{1i} \cos \alpha_{1i} \sin \beta \\ z_{P_{1i}} = \rho_{1i} \sin \alpha_{1i} \end{cases} \quad (3)$$

平面 $C2$ 中,设该圆周第 i 个采样点 P_{2i} 测量值为 ρ_{2i} , O' 为 $C2$ 圆心, $O'P_{2i}$ 与 $C2$ 内 $-x$ 轴的夹角为 α_{2i} ,如图5(b)所示,根据几何关系可得到 P_{2i} 的三维直角坐标:

$$\begin{cases} x_{P_{2i}} = \sqrt{(\rho_{2i} \cos \alpha_{2i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \cos[\beta + \arctan(w/(\rho_{2i} \cos \alpha_{2i}))] \\ y_{P_{2i}} = \sqrt{(\rho_{2i} \cos \alpha_{2i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \sin[\beta + \arctan(w/(\rho_{2i} \cos \alpha_{2i}))] \\ z_{P_{2i}} = \rho_{2i} \sin \alpha_{2i} \end{cases} \quad (4)$$

平面 $C3$ 中,设该圆周第 i 个采样点 P_{3i} 测量值为 ρ_{3i} , O'' 为 $C3$ 圆心, $O''P_{3i}$ 与 $C3$ 内 $-x$ 轴的夹角为 α_{3i} ,如图5(c)所示,根据几何关系可得 P_{3i} 的三维直角坐标:

$$\begin{cases} x_{P_{3i}} = \sqrt{(\rho_{3i} \cos \alpha_{3i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \cos[\beta - \arctan(w/(\rho_{3i} \cos \alpha_{3i}))] \\ y_{P_{3i}} = \sqrt{(\rho_{3i} \cos \alpha_{3i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \sin[\beta - \arctan(w/(\rho_{3i} \cos \alpha_{3i}))] \\ z_{P_{3i}} = \rho_{3i} \sin \alpha_{3i} \end{cases} \quad (5)$$

“腰带”三维坐标转换模型如图6所示,平面 $C1'$ 为大圆所在截面,平面 $C2'$ 、 $C3'$ 以 $C1'$ 为基础向下和上分别平移 w 距离,3平面与 xoz 平面夹角均为 $\gamma=\pi/1$ 。

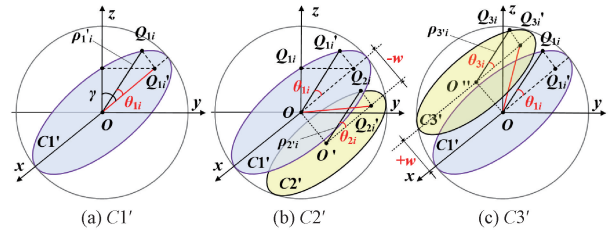


图6 “腰带”迹线坐标转换模型

Fig. 6 Coordinate transformation model for the ‘belt’ traces

平面 $C1'$ 中,设该圆周第 i 个采样点 Q_{1i} 测量值为 $\rho_{1'i}$, O 为 $C1'$ 圆心, OQ_{1i} 与 $C1'$ 内 x 轴的夹角为 θ_{1i} ,如图6(a)所示,根据几何关系可得到 Q_{1i} 的三维直角坐标如式(6)所示:

$$\begin{cases} x_{Q_{1i}} = \rho_{1'i} \sin \theta_{1i} \\ y_{Q_{1i}} = -\rho_{1'i} \cos \theta_{1i} \\ z_{Q_{1i}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

平面 $C2'$ 中,设该圆周第 i 个采样点 Q_{2i} 测量值为 $\rho_{2'i}$, O' 为 $C2'$ 圆心, $O'Q_{2i}$ 与 $C2'$ 内 x 轴的夹角为 θ_{2i} ,如图6(b)所示,根据几何关系可得到 Q_{2i} 的三维直角坐标:

$$\begin{cases} x_{Q_{2i}} = \rho_{2'i} \sin \theta_{2i} \\ y_{Q_{2i}} = -\sqrt{(\rho_{2'i} \cos \theta_{2i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \cos[\arctan(w/(\rho_{2'i} \cos \theta_{2i}))] \\ z_{Q_{2i}} = -\sqrt{(\rho_{2'i} \cos \theta_{2i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \sin[\arctan(w/(\rho_{2'i} \cos \theta_{2i}))] \end{cases} \quad (7)$$

平面 $C3'$ 中,设该圆周第 i 个采样点 Q_{3i} 测量值为 $\rho_{3'i}$, O'' 为 $C3'$ 圆心,则 $O''Q_{3i}$ 与 $C3'$ 内 x 轴的夹角为 θ_{3i} ,如图6(c)所示,根据几何关系可得到 Q_{3i} 的三维直角坐标:

$$\begin{cases} x_{Q_{3i}} = \rho_{3'i} \sin \theta_{3i} \\ y_{Q_{3i}} = -\sqrt{(\rho_{3'i} \cos \theta_{3i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \cos[\arctan(w/(\rho_{3'i} \cos \theta_{3i}))] \\ z_{Q_{3i}} = \sqrt{(\rho_{3'i} \cos \theta_{3i})^2 + w^2} \cdot \\ \quad \sin[\arctan(w/(\rho_{3'i} \cos \theta_{3i}))] \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\alpha_{1i} = \alpha_{2i} = \alpha_{3i} = \theta_{1i} = \theta_{2i} = \theta_{3i} = 2\pi/n \cdot i$ 。

2.2 最小二乘球度评定原理

采用最小二乘球度评定方法(LSS)对靶丸球面采样点进行拟合^[17],采样点总数为 N ,球面第 i ($i=1,2,\dots,N$)个采样点 P_i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,空间球体方程可表示为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = R^2 \quad (9)$$

展开可得:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2ax - 2by - 2cz + d = 0 \quad (10)$$

假设被测球面的最小二乘拟合球心坐标为: (x_0, y_0, z_0) , 则根据最小二乘拟合条件可知, 要求得最小二乘拟合球心, 就要求得 a, b, c, d 4 个参数的值保证式(11)中的 V 最小, 且 $d = a^2 + b^2 + c^2 - R^2$:

$$V = \sum_{i=1}^N (x^2 + y^2 + z^2 - 2ax - 2by - 2cz + d)^2 \quad (11)$$

a, b, c 分别为靶丸球心在 x, y, z 向的偏移量, 采用矩阵法求解方程, 可得到靶丸的最小二乘拟合球心坐标 (x_0, y_0, z_0) 、最小二乘拟合半径 R , 靶丸的拟合球度误差为球面各采样点距离拟合球心的最大值与最小值之差, 如式(12)所示:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{a}{2}, y_0 = \frac{b}{2}, z_0 = \frac{c}{2}, R = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 - d} \\ \varepsilon = \max \{ \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \} \\ \quad - \min \{ \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \} \end{cases} \quad (12)$$

3 误差分析

靶丸三维球度测量中的主要影响因素包括精密气浮主轴回转误差、传感器测量光轴径向调整误差以及辅助轴回转中心线与靶丸球心的不同轴误差。

3.1 精密气浮主轴回转误差

精密气浮主轴径向回转误差对靶丸轮廓测量精度影响较大, 采用 Taylor Hobson 公司的 TALYMIN4 高精度电感传感器测量标准玻璃半球, 测得径向回转误差优于 25 nm, 相对于靶丸轮廓测量误差可忽略不计。

3.2 传感器测量光轴径向调整误差

对传感器进行径向调整时, 测量光轴存在径向偏移误差 Δh , 对表面经圆迹线理想测量点 A_1 定焦位置变为实际测量点 A_1' , 如图 7 (a) 所示; 对表面偏移 w 距离纬圆迹线理想测量点 A_2 定焦位置变为实际测量点 A_2' , 如图 7 (b) 所示, 根据几何关系, 由 Δh 引起的靶丸表面定焦位置误差 $\Delta_1(h)$ 和 $\Delta_2(h)$ 可分别表示为:

$$\begin{cases} \Delta_1(h) = \rho_1 - \rho_1' = \rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - \Delta h^2} \\ \Delta_2(h) = \rho_2 - \rho_2' = \rho_2 - \sqrt{\rho_2^2 - \Delta h^2} - 2w\Delta h \end{cases} \quad (13)$$

其中, 迹线偏移距离 $w = 10 \mu\text{m}$, $\rho_1 = 425.66 \mu\text{m}$, $\rho_2 = 425.56 \mu\text{m}$, 根据式(13)仿真 Δh 对靶丸表面定焦位置精度的影响, 结果如图 8 所示。

测量光轴采用粗瞄 CCD 光路径向辅助调整, 其径向调整精度优于 $0.1 \mu\text{m}$, 此时 $\Delta_1(h) = 0.012 \text{ nm}$, $\Delta_2(h) = 2.4 \text{ nm}$, 因此其影响可忽略不计。

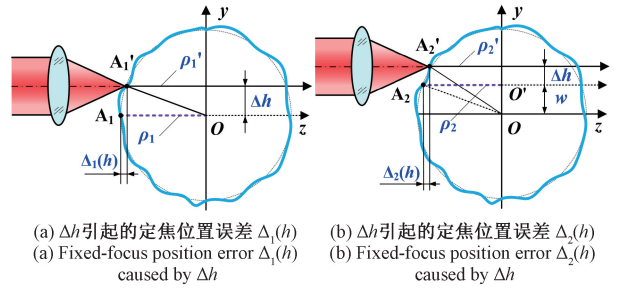


图 7 Δh 引起的靶丸表面定焦位置误差

Fig. 7 Fixed-focus position error of the surface caused by Δh

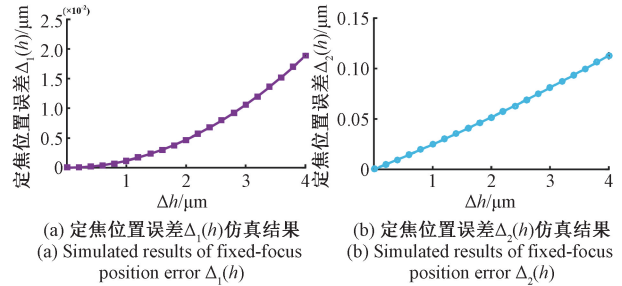


图 8 Δh 引起的靶丸表面定焦位置误差仿真结果

Fig. 8 Simulated results of fixed-focus error caused by Δh

3.3 辅助轴回转中心线与靶丸球心的不同轴误差 h_{or}

辅助轴回转中心线与靶丸球心之间存在不同轴误差 h_{or} , 当辅助轴前进时, 吸嘴下端首先接触到靶丸表面 B 点, 打开负压, 靶丸以 B 点为圆心, 以角度 φ_B 旋转最终吸附至辅助轴吸嘴端面上, 此时靶丸球心位置由 O 变为 O' 。如图 9 (a) 所示, 根据几何关系, 由 h_{or} 引起的靶丸球心转位误差 φ_B 可表示为:

$$\varphi_B = \arccos \left\{ 1 - \frac{[\sqrt{R^2 - (r_a - h_{or})^2} - \sqrt{R^2 - r_a^2}]^2 + h_{or}^2}{2R^2} \right\} \quad (14)$$

其中, $R = 425.66 \mu\text{m}$, 本文系统采用负压吸嘴内曲率半径 $r_a \approx 0.53R$, 仿真 h_{or} 对靶丸球心转位误差 φ_B 的影

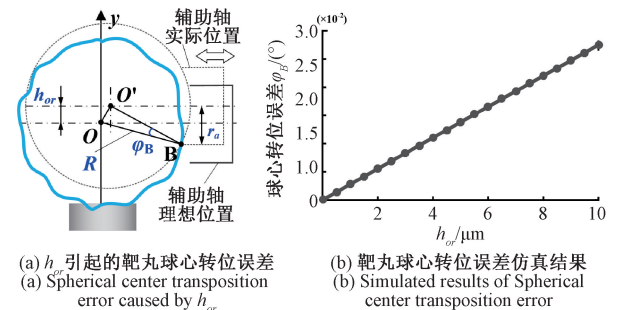


图 9 h_{or} 引起的靶丸球心转位误差

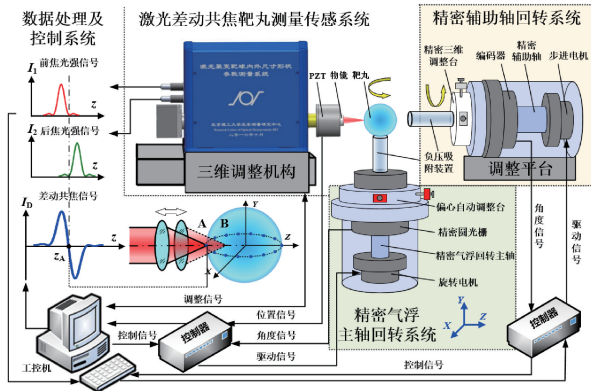
Fig. 9 Spherical center transposition error caused by h_{or}

响,结果如图9(b)所示。在系统装调时, h_{or} 可通过CCD辅助调整控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 内,此时转位误差角 $\varphi_B = \pm 0.006^\circ$,辅助轴转位角远大于该误差角,因此其影响可忽略不计。

4 实验

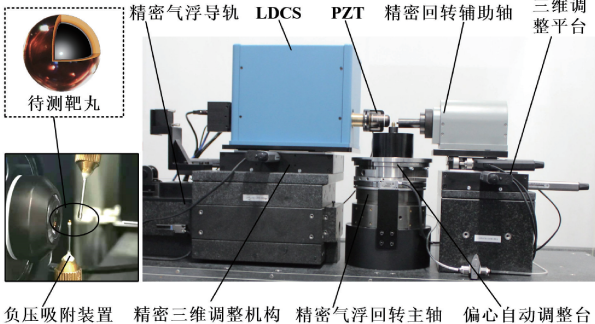
4.1 测量系统

搭建的测量系统如图10所示,主要由激光差动共焦测量传感系统、精密气浮主轴回转系统、精密辅助轴回转系统和控制及数据处理系统4部分组成。



(a) 激光聚变靶丸三维全形貌测量系统构件图

(a) Component diagram of the 3D ICF capsule measurement system



(b) 激光聚变靶丸三维全形貌测量系统实物图

(b) Picture of the 3D ICF capsule measurement system

图10 激光聚变靶丸三维全形貌测量系统

Fig. 10 Measurement system for 3D surface of ICF capsule

激光差动共焦测量传感系统光源为波长633 nm、功率2 MW的氦氖激光器,采用PI的P726.1CD型PZT(分辨率0.4 nm)驱动OLYMPUS的高数值孔径 $NA = 0.80$ 的显微物镜,精密三维调整机构用于调整传感器空间姿态。

精密气浮主轴回转系统采用Renishaw高精度增量式圆光栅,雅科贝思ADR135-A90旋转电机驱动高精度静压气浮旋转轴,NewPort压电线性驱动器8301NF(定位分辨率达30 nm)用于驱动XY向二维偏心调整台补偿靶丸回转偏心。

精密辅助轴回转系统由高精度辅助轴、两相步进电机(基本步距角为 1.8°)、增量式圆编码器、精密三维调整平台组成。采用微型真空泵、吸嘴、电磁阀门组成的负压吸附装置实现对靶丸的抓取和放回。

4.2 测量过程

基于上述测量方法及测量系统,开展靶丸三维全形貌经纬迹线法球度测量实验,实验被件采用中国工程物理研究院提供的外曲率半径为 $R = 425.66 \mu\text{m}$ 的单层激光聚变塑料靶丸。

具体的测量步骤如下:

1) 调整传感器空间位置,使待测表面进入系统测量范围内。设定经纬圆组个数 $T = 18$,待测圆周迹线组总数为 $T + 1$,当前圆周迹线组记为 $t = 0$ 。

2) 偏心误差阈值 $e_0 = 0.3 \mu\text{m}$,程序测量并计算当前偏心量 e ,控制驱动器驱动XY向二维平移台进行精确偏心自调,直至 $e < e_0$,偏心调整完成。

3) 主轴驱动靶丸旋转,测量当前组经圆迹线的 n (8192)个采样点,接着三维调整机构驱动传感器探测光束上下分别平移 $w = 10 \mu\text{m}$,测量该组两条纬圆迹线。

4) 精密调整平台驱动辅助轴吸嘴靠近靶丸,关闭主轴负压,开启辅助轴负压,辅助轴吸附靶丸,完成相应转位,开启主轴负压,关闭辅助轴负压,主轴重新吸附靶丸,辅助轴退回, $t = t + 1$ 。

5) 重复步骤2)~4),直至 $t < T + 1$,测量完毕,最终得到靶丸球面57条圆周迹线上共466944个采样点的表面高度数据。最后评定球度及显示三维重构结果。

4.3 实验结果

图11所示为测量所得靶丸表面第一个经纬圆组中经圆迹线的原始轮廓数据。

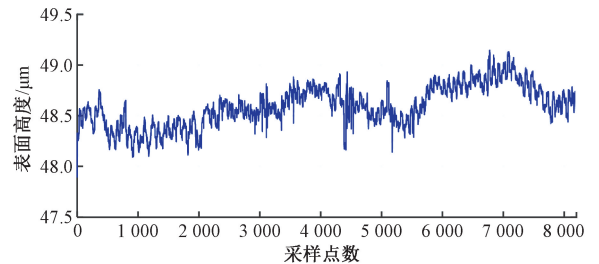


图11 经圆迹线原始轮廓数据

Fig. 11 The original profile data of the trace

原始轮廓数据包含直流分量、一次谐波分量、高频噪声,因此需要先对原始数据去直流、去偏心、滤波操作。根据参考文献[18]进行数据预处理,高斯滤波器波数范围为 $1 \sim 50 \mu\text{pr}$ 。

对上述原始数据进行预处理,所得结果为图12(a)中的曲线“ $0 \mu\text{m}$ ”。对该组两侧偏移 $10 \mu\text{m}$ 的纬圆迹线

数据进行相同预处理,在图 12 (a) 同一坐标系中显示;同样的,“腰带”3 条圆周迹线数据如图 12 (b) 所示。为便于观察,图中将两侧纬圆迹线分别上移和下移 1 μm ,可见,根据相邻 3 条圆周迹线相同位置处的轮廓,可对靶丸表面形貌的局部缺陷实现精准定位。

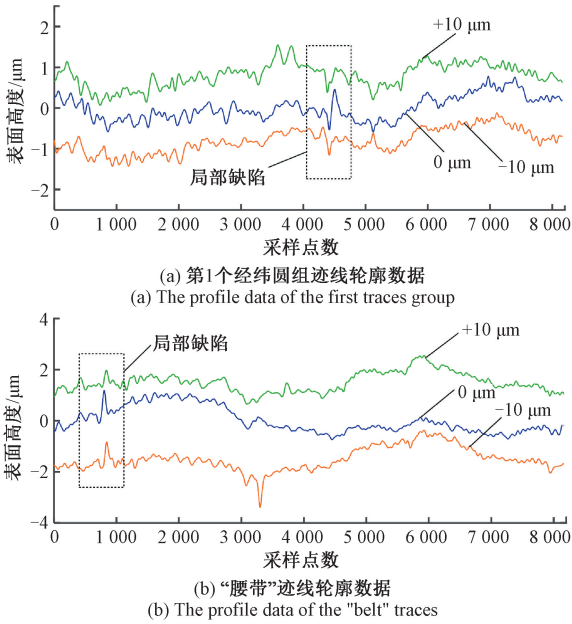


图 12 测量圆周迹线轮廓数据

Fig. 12 The profile data of the circular traces

对数据进行最小二乘圆度评定,并复现二维圆周轮廓,图 13 所示为第一个经纬圆组圆度评定结果,其最小二乘圆度分别为:1.181、1.364、1.835 μm 。图 14 所示为“腰带”的圆度评定结果,其最小二乘圆度分别为:0.946、1.078、1.150 μm 。

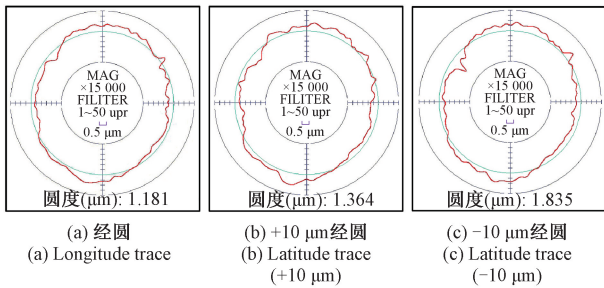


图 13 第一个经纬圆组迹线圆度评定结果

Fig. 13 Roundness evaluation results of the first traces group

根据式(3)~(8)对测量所得靶丸球面 57 条迹线采样点数据进行坐标转换。根据式(9)~(12)进行球度评定,得到待测靶丸的最小二乘拟合球心坐标:(-0.014, 0.003, 0.029),球度误差为 1.946 μm 。

对被测靶丸表面进行三维重构,图 15 (a) 为被测靶丸表面重构结果,图中色阶对应表面的相对高度。可见,根据重构结果可定性观察靶丸表面形貌特征及缺陷。

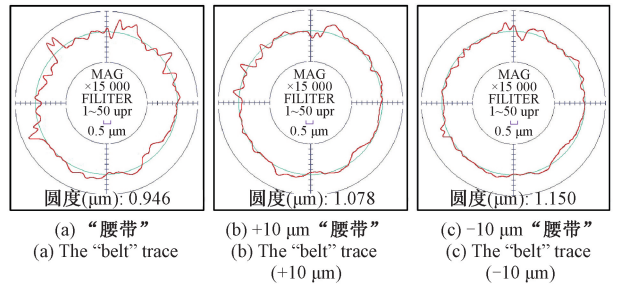


图 14 “腰带”迹线圆度评定结果

Fig. 14 Roundness evaluation results of the “belt” traces

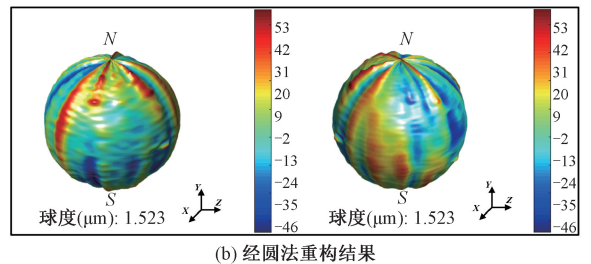
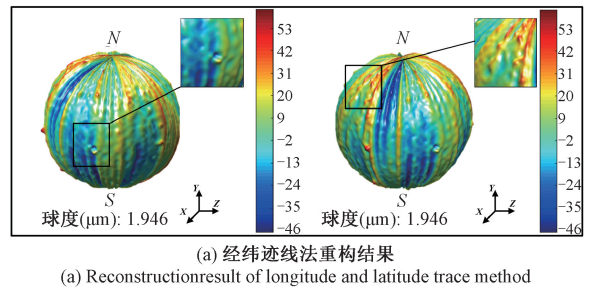


图 15 靶丸三维形貌重构

Fig. 15 3D surface reconstruction of the capsule

作为对比,图 15 (b) 重构了 18 条迹线经圆法测量的同一靶丸表面,可见,相较于优化的经纬迹线方案,其缺失大量表面关键点的形貌,难以全面评价球度及缺陷。

为测试经纬迹线优化球度测量方法的稳定性及可靠性,开展了靶丸三维形貌测量的重复性验证实验,对另一待测靶丸进行 10 次重复测量,得到其球度重复性结果如图 16 所示。

根据测量结果可知,测得靶丸的球度平均值为 1.251 μm ,标准差为 0.047 μm 。

采用中国工程物理研究院提供的金属靶丸作为实验样品,进一步开展对比验证实验,经过中国工程物理研究院的原子力轮廓仪测得其表面一条经圆迹线的圆度值为 0.403 μm ,结果如图 17 (a) 所示。采用激光聚变靶丸三维全形貌测量系统对该金属靶丸的同一条经圆迹线进行 10 次重复测量实验,可得该条迹线的圆度测量平均值为 0.439 μm ,结果如图 17 (b) 所示。

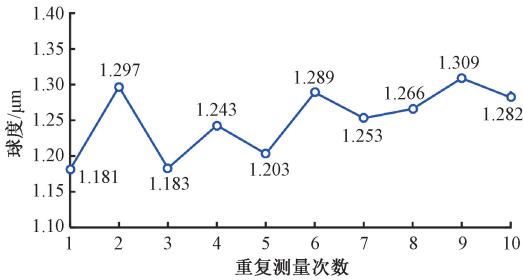


图16 球度重复性测量结果

Fig. 16 Repeated measurement results of sphericity

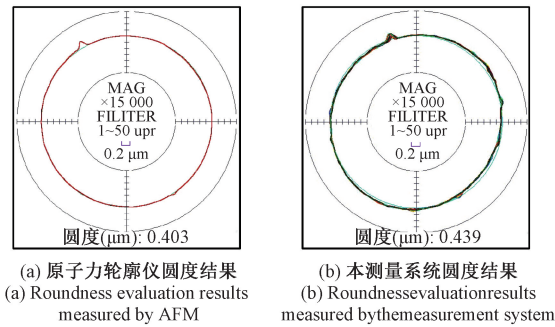


图17 同一经圆迹线的圆度测量对比结果

Fig. 17 Comparison of roundness measurement results of the same trace

经过对比可知,两种方法测量同一样品同一经圆位置迹线的圆度结果仅相差36 nm,且两者的圆周轮廓复现结果相吻合。经过定量和定性分析,可认为激光聚变靶丸三维形貌测量系统的测量结果准确可靠。

5 结 论

本文利用激光差动共焦系统轴向响应曲线过零点精确计算靶丸表面采样点物理坐标,结合三维调整机构和正交精密回转轴系,规划了一种改进的靶丸球面经纬迹线结合的测量轨迹方案,搭建了相应实验系统,对被测靶丸开展测量实验,对测量结果进行数学建模和最小二乘球度评价,并对靶丸形貌进行3D重构显示,所测靶丸球度为1.946 μm。该方法可高效率获取高覆盖率的靶丸表面关键点形貌,为靶丸3D形貌定量评定与定性观察提供了一种高质量可行性方案。

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: 343-348.

[2] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion

with lasers[J]. Nature Physics, 2016, 12 (7): 435-448.

- [3] 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.
- [4] WANG K, LEI H, LI J, et al. Characterization of inertial confinement fusion targets using X-ray phase contrast imaging [J]. Optics Communications, 2014, 332: 9-13.
- [5] 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): 290-292.
- 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): 290-292.
- [6] LEE Y T, NGUYEN A Q L, HUANG H, et al. Increasing the throughput of phase-shifting diffraction interferometer for quantitative characterization of ICF ablator capsule surfaces [J]. Fusion Science & Technology, 2009, 55 (4): 405-410.
- [7] MCEACHERN R L, MOORE C E, WALLACE R J. The design, performance, and application of an atomic force microscope-based profilometer [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1995, 13 (3): 983-989.
- [8] ZHAO W, GUO J, QIU L, et al. Low transmittance ICF capsule geometric parameters measurement using laser differential confocal technique [J]. Optics Communications, 2013, 292: 62-67.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, 1994, 12 (4):

- 1275-1280.
- [12] STEPHENS R B, OLSON D, HUANG H, et al. Complete surface mapping of ICF shells [J]. Fusion Science and Technology, 2004, 45 (2): 210-213.
- [13] HUANG H, STEPHENS R B, GIBSON J B, et al. 3D surface reconstruction of ICF shells after full surface spheremapping [J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49 (4): 642-645.
- [14] STEPHENS R B, MROCKOWSKI T, GIBSON J. Seeing shell wall fluctuations [J]. Fusion Science and Technology, 2000, 38 (1): 132-135.
- [15] 马仙仙, 赵维谦, 李少白, 等. 激光聚变靶丸球度测量与评定 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (11): 2675-2681.
- MA X X, ZHAO W Q, LI SH B, et al. Sphericity measurement and evaluation for laser fusion target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (11): 2675-2681.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] HOU M, QIU L, ZHAO W, et al. Single-step spatial rotation error separation technique for the ultraprecision measurement of surface profiles [J]. Applied Optics, 2014, 53 (3): 487-495.

作者简介



黄婧雯, 2019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, 主要研究方向为光学精密测量。

E-mail: hjwen328@163.com

Huang Jingwen received her B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2019. She is currently a master student at Beijing Institute of Technology. Her 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精密光学测量。

E-mail: qiugrass@126.com

Qiu Lirong (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an Jiaotong University in 1997 and 2000, and received her Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005. She is currently a professor at Beijing Institute of Technology. Her main research interests include differential confocal theory and precise optical measurement.