

光学学报

激光差动共焦干涉高精度测量技术及仪器

杨帅, 邱丽荣, 汤亮, 杨铮, 崔健, 王允, 赵维谦*

北京理工大学光电学院, 复杂环境智能感测技术工信部重点实验室, 北京 100081

摘要 球面光学元件的曲率半径、厚度、折射率、焦距和面形等多参数的高精度检测是光学元件超精密制造的迫切需求, 但现有测量方法受层析定焦能力、抗散射能力及抗环境扰动能力的制约, 难以实现上述参数的高精度共基准测量。为此, 本团队提出了高层析、高分辨、抗散射和抗干扰的激光差动共焦多参数高精度共基准测量方法, 并进一步与菲索干涉光路融合, 实现了球面元件多参数的高精度、共基准、高效率测量。本文系统地介绍了所提出的激光差动共焦干涉元件参数系列测量方法及其仪器化研究进展, 分析了目前存在的问题, 展望了未来的发展趋势。

关键词 测量; 差动共焦干涉; 球面光学元件; 高精度测量; 层析定焦; 共基准测量

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230752

1 引言

超精密球面光学元件因其优异的加工性能而在激光核聚变装置^[1-2]、极紫外光刻物镜^[3]、高端手机/车载成像镜头模组^[4]等光学系统中广泛应用, 其曲率半径、厚度、折射率、焦距和面形等参数共同决定了元件的性能指标, 进而在很大程度上决定了光学系统的整体性能。然而, 现有测量方法因难以突破被测表面的高分辨精准定焦、抗表面粗糙散射和抗环境扰动等技术瓶颈而难以实现对上述球面元件多参数的高精度测量^[5], 并且因测量原理各异而难以实现多参数的共基准、高效率综合测量, 进而极大地制约了高端球面光学元件的加工精度和加工效率的提高。

在曲率半径测量方面, 现有方法主要包括接触式的球径仪法、三坐标法和非接触式的干涉法、自准直法等, 其中以球径仪法和干涉法最为常用。球径仪法通过测量被测件的矢高来间接计算曲率半径值^[6], 其优势在于测量速度快, 但容易损伤被测表面且精度不高: 目前高端球径仪的测量精度仅可达 0.01%。干涉法通过干涉条纹对被测球面的猫眼位置和共焦位置进行定焦来实现曲率半径测量^[7-9], 但其精度受环境扰动影响严重, 在实际光学车间加工检测的条件下^[10]测量精度难以保证; 且非抛光元件的粗糙散射将导致测量精度降低甚至无法测量, 在检测-返修-检测的过程中元件的反复抛光极大地制约了加工效率的提升。在焦距测量方面, 现有方法包括放大率法^[11]、莫尔偏折法^[12]和泰伯干涉法^[13]等。放大率法根据分划刻线物像之间

的放大关系实现透镜焦距测量, 该方法的测量效率高, 但缺乏高精度定焦能力, 因此测量精度不高, 仅可达 0.4%。莫尔偏折法和泰伯干涉法基于干涉(莫尔)条纹的空间周期等信息实现焦距测量, 测量精度可达 0.05%, 但受限于干涉技术的抗扰动能力, 其测量精度难以进一步提高。在厚度测量方面, 现有方法包括接触式探针法和低相干干涉法等。接触式探针法利用接触式探针测量被测元件中心点的高度来实现厚度测量, 其优势在于测量效率高、成本低, 但测量精度仅能达到 1 μm 。低相干干涉法利用低相干光源的相干层析特性^[14]实现透镜前后表面的定焦和厚度测量^[15], 测量精度可达 0.4 μm , 但高分辨层析定焦能力不足, 制约了其测量精度的进一步提升。在折射率测量方面, 现有方法包括阿贝折射法^[16]和最小偏向角法^[17]等。阿贝折射法通过测量被测样品与已知折射率样品之间的全反射角来计算被测折射率, 测量精度可达 2×10^{-4} 。最小偏向角法利用测量光束通过被测三角棱镜后的偏折角度来实现折射率测量, 测量精度可达 3×10^{-6} 。上述两种方法都是针对透镜加工前玻璃材料的折射率测量, 通常需要从整块玻璃毛坯上取下边角部分加工出一个平面或三角棱镜进行测量, 受到材料不均匀性等因素的影响, 难以真实反映球面光学元件的折射率。在面形测量方面, 菲索移相干涉法是目前公认的精度最高的主流测量方法。该方法基于菲索干涉光路的共光路优势避免了非共光路误差, 利用移相干涉技术消除背景干扰, 进而实现高精度面形测量^[18]。在高稳定的环境条件下, 其测量精度主要受限于参考镜的面形

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-25; 录用日期: 2023-05-09; 网络首发日期: 2023-06-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701203)、国家杰出青年科学基金(51825501)

通信作者: *zwq669@126.com

精度,通常可达 $\lambda/20$ 。菲索干涉法还具有曲率半径测量能力,但是受限于层析定焦能力和抗扰动能力不足等,难以实现厚度、折射率和焦距等多参数高精度综合测量。

综上所述,现有方法难以实现球面光学元件多参数的高精度共基准综合测量,其普遍存在的共性问题在于:

1)难以突破被测表面的高分辨精准层析定焦瓶颈。事实上,现有光学测量仪器的精度之所以难以显著提高,是因为其受光学衍射极限的限制,轴向分辨力和层析能力很难显著提高,进而制约了元件表面定焦精度和参数测量精度的提高。

2)难以突破抗表面散射和抗环境扰动的抗干扰测量瓶颈。基于干涉技术的测量方法难以测量具有表面散射特性的样品,并且测量精度受气流扰动、地面震动等环境因素的影响严重。

3)难以突破多参数共基准综合测量瓶颈。现有球面元件多参数测量原理各异,不同仪器测量结果难以统一溯源,因而难以实现多参数的高精度、共基准综合测量。

激光差动共焦干涉高精度测量技术有效突破了上述瓶颈,为球面光学元件多参数的高精度共基准综合测量提供了重要手段。北京理工大学于2009年首次提出激光差动共焦超长焦距测量方法^[19],其利用差动共焦精密层析定焦技术实现组合透镜焦点的高精度定焦,以实现超长焦距的高精度测量。此后,北京理工大

学基于激光差动共焦精密层析定焦技术,提出了球面元件曲率半径^[20-22]/超大曲率半径^[23-24]、焦距^[25]/超长焦距^[26]、厚度^[27]及折射率^[28]等多参数高精度测量系列方法,并于2016年提出激光差动共焦干涉球面元件多参数测量方法^[5],利用激光差动共焦精密定焦技术突破了被测表面精准层析定焦瓶颈和抗干扰瓶颈,通过差动共焦-干涉有机融合突破了多参数共基准综合测量瓶颈,研制出激光差动共焦干涉高精度测量仪器,首次在同一仪器上实现了球面元件多参数的高精度共基准综合测量。

本文综述了激光差动共焦干涉高精度测量的技术发展及仪器研制现状,并对目前仍存在的问题和未来的发展趋势进行了分析和展望。

2 激光差动共焦干涉高精度测量技术

2.1 激光差动共焦-干涉高精度测量原理

激光差动共焦-干涉高精度测量原理如图1所示,其将差动共焦测量光路与菲索干涉光路融合为同一测量光路。点光源发出的光经过物镜1 (micro-objective 1),再经偏振分光镜(PBS)和 $\lambda/4$ 波片后由准直镜(collimator)准直行成平行光束,由标准镜(standard lens)会聚成测量光束照射在被测元件(measuring lens)的表面。元件反射的测量光束被BS 1透射和反射,分别进入差动共焦探测模块和移相干涉探测模块,利用CCD 1进行粗瞄,监测光斑位置,以调整被测镜的姿态,从而实现球面元件多参数高精度测量。

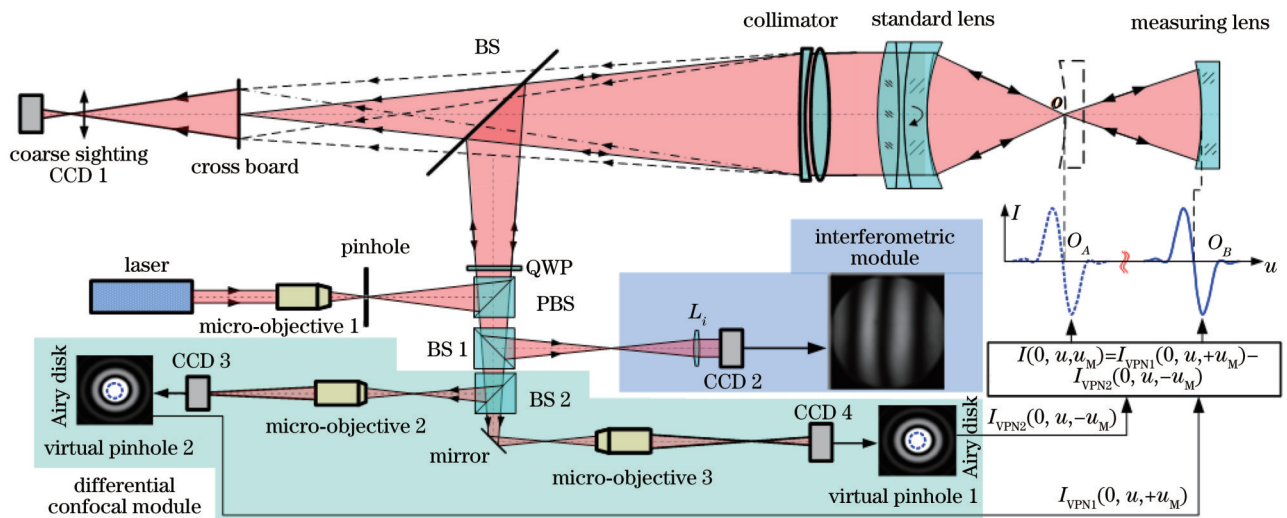


图1 激光差动共焦-干涉元件参数测量原理

Fig. 1 Principle of laser differential confocal-interference element parameter measurement

进入差动共焦测量模块的光束经分光镜BS 2分成两路,分别被位于准直镜焦点一前一后等量离焦的物镜2 (micro-objective 2)及点探测器CCD 3和物镜3 (micro-objective 3)及点探测器CCD 4探测接收。当被测件在物镜会聚光斑附近沿测量光束光轴方向进行

移动扫描时,CCD 3和CCD 4分别探测得到焦前响应信号和焦后响应信号,将其差动相减后得到式(1)和图2所示的差动共焦响应信号,即

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

式中： u 表示样品归一化轴向位移量； u_M 表示探测器归一化离焦量。

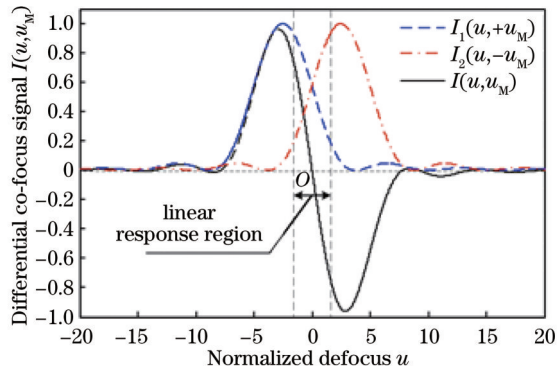


图 2 差动共焦响应曲线

Fig. 2 Differential confocal response curves

从式(1)及图 2 可以看出,差动共焦响应曲线具有以下优势:

1) 具有高分辨精准层析定焦能力。具有大小相同、方向相反离焦量的共焦响应曲线 $I_1(u, +u_M)$ 和 $I_2(u, -u_M)$ 经过差动处理后,在差动共焦曲线定焦位置附近出现了具有大斜率、高线性度的响应区域(传统共焦技术在定焦位置附近的斜率接近 0),因此具有高分辨精准层析定焦能力。

2) 具有较强的抗散射和抗环境扰动能力。差动共焦信号是基于光强探测得到的,相比于基于干涉条纹实现定焦的干涉技术,差动共焦光强信号具有更强的抗表面粗糙散射和抗气流扰动能力。

基于上述两点独特优势,激光差动共焦技术为球面元件多参数高精度共基准测量提供了关键技术基础和保障。

进入移相干涉探测模块的测量光束与参考光束发生干涉,干涉图被 CCD 2 采集记录,通过压电陶瓷驱动参考镜机械移相来采集多幅移相干涉图,通过以式(2)所示五步移相干涉算法^[29]为典型代表的相位提取方法实现移相干涉测量。

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{2(I_4 - I_2)}{2I_3 - I_1 - I_5} \right], \quad (2)$$

式中： φ 表示被测相位； $I_1 \sim I_5$ 表示移相干涉图。

2.2 激光差动共焦-干涉球面元件综合参数测量方法

基于图 1 所示的激光差动共焦-干涉高精度测量原理,激光差动共焦-干涉球面元件综合参数测量方法如图 3 所示。图 3(a) 所示为差动共焦-干涉有机融合原理光路,基于该光路在同一台仪器上可以同时实现曲率半径及超大曲率半径、焦距及超长焦距、厚度、折射率、平面面形和球面面形等多参数高精度共基准测量。

2.2.1 曲率半径和超大曲率半径测量方法

激光差动共焦-干涉曲率半径测量原理如图 3(c)

所示,从标准镜出射的测量光束聚焦在被测球面的表面顶点(即猫眼位置 A)和被测球面的球心位置(即共焦位置 B)后被原路反射,在猫眼位置 A 和共焦位置 B 附近扫描被测球面,再通过差动共焦测量模块分别探测得到差动共焦响应曲线 $I_A(z)$ 和 $I_B(z)$,由 $I_A(z)$ 和 $I_B(z)$ 的过零点精确定位被测球面的猫眼位置 Z_A 和共焦位置 Z_B ,进而通过 $R = Z_A - Z_B$ 得到被测球面的曲率半径 R 。该方法对曲率半径的测量精度可达 5×10^{-6} 。

超大曲率半径的测量原理如图 3(d) 及图 4 所示,在猫眼位置 A 处和猫眼-猫眼位置 C 处(C 处反射光束会聚在标准物镜后表面顶点 D)轴向扫描被测镜并获得两条差动共焦曲线,根据两条共焦曲线过零点之间的小距离 L_T 及式(3)所示几何光学模型^[23]即可实现超大曲率半径 r_ρ 的“以小测大”高精度测量。

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left(\frac{\rho D}{2f'_{\text{RBF D}}} \right) \\ \tan \frac{\theta_1}{2} = \frac{2f'_{\text{RBF D}} r_\rho (1 - \cos \theta_1)}{\rho D [L_T - r_\rho (1 - \cos \theta_1)]}, \\ r_\rho = \frac{(f'_{\text{RBF D}} - L_T) \sin(\theta - 2\theta_1)}{\sin(\theta - \theta_1) - \sin(\theta - 2\theta_1)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中： D 为参考镜的通光口径； ρ 为光束的归一化口径； θ 为参考镜出射光线与参考镜光轴的夹角； r_ρ 为口径 ρ 处的光线由 A 点成像到 D 点时对应计算得到的被测镜曲率半径； θ_1 为 r_ρ 与参考镜光轴 m 的夹角； $f'_{\text{RBF D}}$ 为参考镜后顶焦距。在超大曲率半径测量方面,测量误差主要包括定焦误差、测长系统误差、系统调整和测量环境误差等。对曲率半径理论值为 20 m 的被测镜进行 10 次超大曲率半径重复测量,测量结果的重复精度为 5.1 mm,相对测量精度达 0.03%^[23-24]。

2.2.2 焦距和超长焦距测量方法

焦距测量原理如图 3(e) 所示,出射平行光通过被测镜会聚,并将平面反射镜分别放置在其焦点 A 位置和 1/2 焦距 B 位置进行轴向扫描,即可获得两条差动共焦曲线,将两条曲线过零点之间的距离记为 ΔL ,进而根据 $f = 2\Delta L$ 得到被测球面的顶焦距 f 。该方法对焦距的测量精度可达 10×10^{-6} 。

超长焦距测量原理如图 3(f) 及图 5 所示,出射平行光经过参考镜会聚在 B 点,在光路中插入被测镜后,平行光经过由被测镜和参考镜组成的组合透镜后会聚在 A 点,在 A、B 两点附近轴向扫描平面反射镜即可得到两条差动共焦曲线。将这两条差动共焦曲线过零点之间的距离记为 l ,根据小距离 l 及式(4)所示的计算模型^[26]即可实现超长焦距(后顶焦距) f'_{TBFD} 的“以小测大”高精度测量。

$$f'_{\text{TBFD}} = d_0 - f'_R + \frac{f'^2_R}{l}, \quad (4)$$

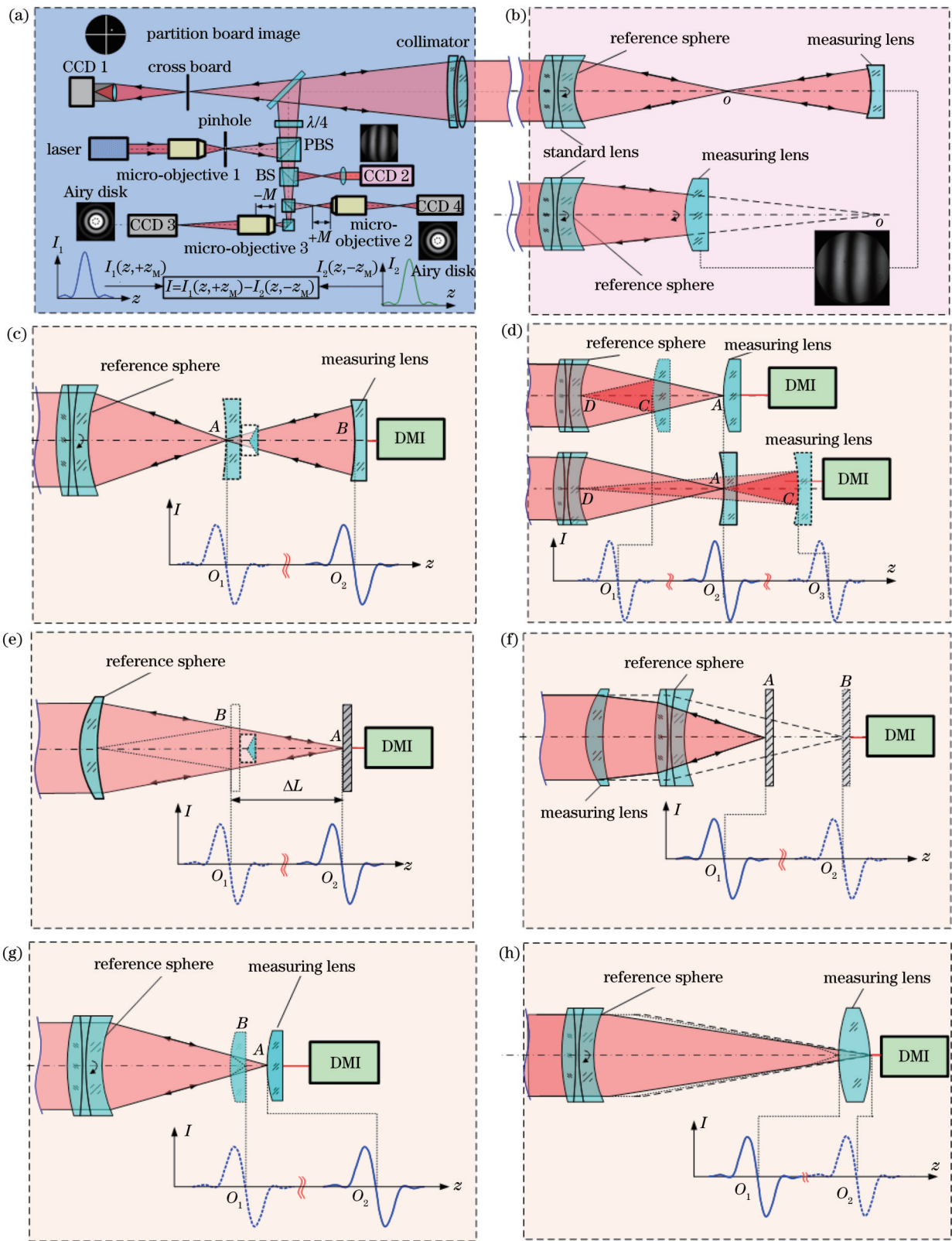


图 3 激光差动共焦干涉多参数测量。(a)差动共焦干涉测量光路;(b)干涉球面面形;(c)曲率半径;(d)超大曲率半径;(e)焦距;(f)超长焦距;(g)厚度;(h)折射率

Fig. 3 Laser differential confocal interferometry multi-parameter measurement. (a) Laser differential confocal interferometry optical path; (b) interferometric spherical surface; (c) curvature radius; (d) ultra-large curvature radius; (e) focal length; (f) ultra-long focal length; (g) thickness; (h) refractive index

式中: f'_r 为参考镜焦距; d_0 为组合透镜镜组间隔。在超长焦距测量方面,测量误差主要包括定焦误差、系统调

整和测量环境误差等。对超长焦距理论值为 3000 mm 的被测镜进行 10 次超长焦距重复测量,得到平均值为

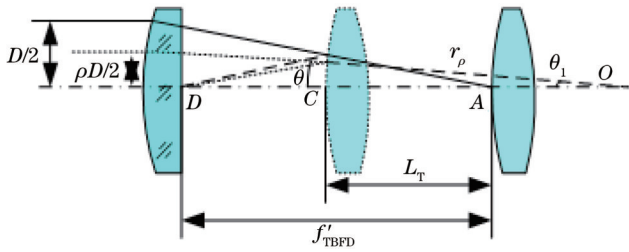


图 4 超大曲率半径的测量原理

Fig. 4 Ultra-large curvature radius measurement principle

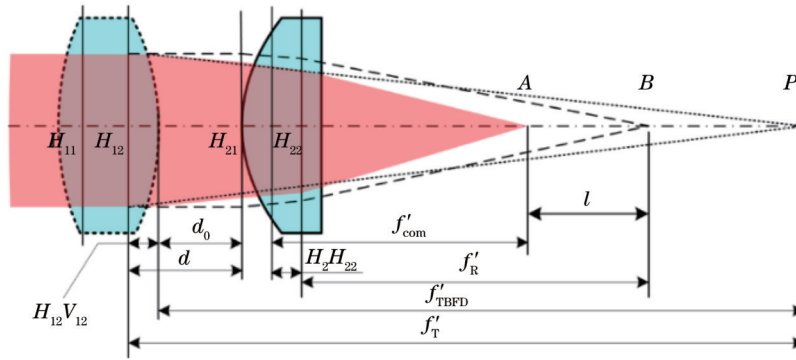


图 5 超长焦距测量原理

Fig. 5 Ultra-long focal length measurement principle

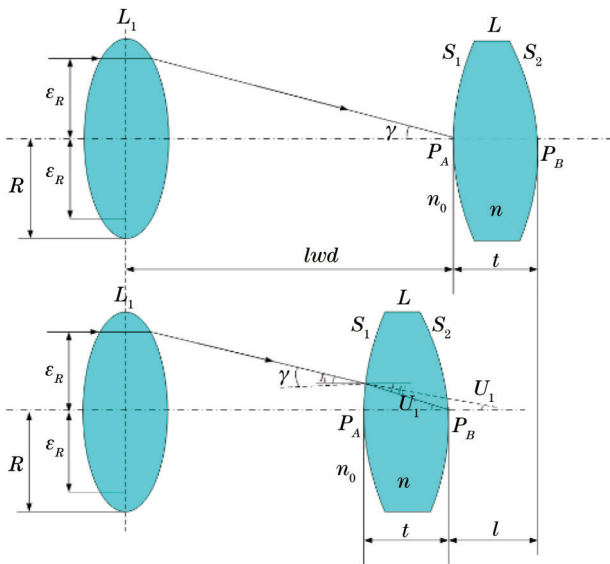


图 6 厚度/折射率测量原理

Fig. 6 Thickness and refractive index measurement principle

根据透镜内部的几何光线追迹公式推导的厚度计算模型^[27]为

$$t = \frac{\int_0^1 d(r_1, l, n, \rho, NA) \cdot 2\pi\rho \cdot d\rho}{\pi \cdot (1 - \epsilon^2)} \quad (5)$$

式中： d 表示追迹一条出射归一化口径为 ρ 的光线所得的厚度测量结果； r_1 表示被测透镜前表面曲率半径； n 表示被测透镜的折射率； NA 表示测量光束的数值孔径； ϵ 表示归一化环形光瞳半径。对透镜厚度理论值为

31218.34 mm, 标准差为 1.59 mm, 相对标准差为 0.0051%^[26]。

2.2.3 厚度测量方法

激光差动共焦-干涉厚度测量原理如图 3(g)和图 6 所示。将被测透镜的前、后表面分别在标准物镜会聚光斑处进行轴向扫描, 以实现透镜的精准层析定焦, 并根据所获得的两条差动共焦曲线绝对零点之间的距离 l 实现透镜厚度测量。

5 mm 的被测镜进行 10 次厚度重复测量, 得到平均值为 5.0735 mm, 标准差为 1.5 μm , 相对标准差为 0.03%^[27]。

2.2.4 折射率测量方法

激光差动共焦-干涉折射率测量方法如图 3(h)所示, 将被测透镜的前、后表面分别在标准物镜会聚光斑处进行轴向扫描, 以实现精准层析定焦。根据所获得的两条差动共焦曲线绝对零点之间的距离 l 实现透镜折射率测量, 根据图 6 所示的光线追迹模型, 得到的透镜折射率计算模型^[28]为

$$n = \int_0^1 F_n(r_1, d, t, n_{\text{air}}, NA, \rho) d\rho \quad (6)$$

式中： r_1 表示被测透镜前表面曲率半径； F_n 表示追迹一条出射归一化口径为 ρ 的光线所得的折射率测量结果； d 表示被测透镜的光学厚度； t 表示被测透镜前表面焦点； n_{air} 表示空气的折射率； ρ 为归一化光瞳半径。对透镜折射率理论值为 1.5 的被测镜进行 10 次重复测量, 得到折射率平均值为 $n=1.51355$, 标准差为 $\sigma=2.5 \times 10^{-4}$ ^[28]。

2.2.5 面形测量方法

激光差动共焦-干涉面形测量方法如图 3(b)所示, 参考镜和被测镜原路反射的参考光和测量光发生干涉, 通过式(2)所示的移相干涉技术提取干涉图的相位分布 φ , 通过相位解包裹和 Zernike 拟合剔除处理后, 根据式(7)实现元件面形 w 测量:

$$w(x, y) = \varphi(x, y) \frac{\lambda}{4\pi} \quad (7)$$

在高稳定的环境下,该方法的面形测量精度主要取决于所用参考镜的面形精度,通常可达 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)^[5]。

3 激光差动共焦干涉高精度测量仪器

3.1 仪器系统构成

根据图 1 所示的激光差动共焦干涉测量原理及图 3 所示的多参数综合测量方法,构建了图 7 所示的激光差动共焦干涉高精度测量系统框架,该系统共包括 5 个功能模块:1)激光差动共焦干涉高精度测量主机,

用来完成对测量数据的采集;2)机械移相系统,用来移相测量获取面形数据;3)自动调整工作台,实现对被测元件姿态和位置的调整;4)扫描测长系统,用于精确测量被测元件的移动距离;5)控制系统,用于实现对整个系统的控制以及数据采集。将除控制系统外的所有系统放在同一个气浮隔振底座上,以降低环境震动对测量精度的影响。该系统的光源采用高稳定的氦氖激光器,在同一仪器上实现多参数综合测量,进而可将多参数测量结果统一溯源至光源波长,以此缩短溯源链条并实现“共基准”测量。

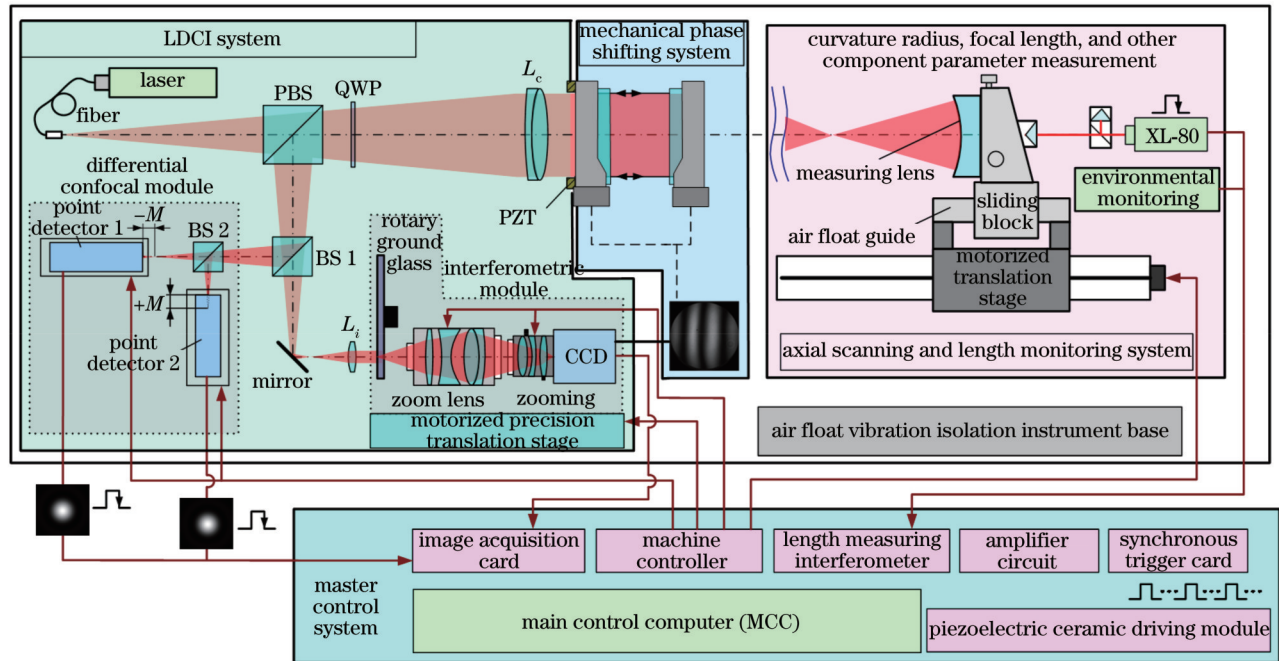


图 7 激光差动共焦高精度测量系统框架

Fig. 7 Frame of laser differential confocal high precision measurement system

激光差动共焦干涉测量主机中包含差动共焦干涉核心光路,用于提供系统光源并实现差动共焦光强信号探测和干涉条纹采集;机械移相系统采用压电陶瓷-铰链结构精密驱动标准物镜来实现高精度移相;自动调整工作台具有五维自动调整功能,用于实现对被测元件姿态和位置的快速自动调整;扫描测长系统主要用于驱动被测元件轴向移动、扫描及位置监测;控制系统包括主控计算机、图像采集卡、电机控制器和压电陶瓷驱动电源模块等,用于实现对整个系统的硬件控制和数据采集。

根据图 7 所示的系统框架,研制出图 8 所示的激光差动共焦干涉高精度测量仪器,在同一台仪器上实现了球面光学元件曲率半径/超大曲率半径、焦距/超长焦距、厚度、折射率和面形等多参数的高精度共基准测量。

3.2 仪器测控软件

针对样机总体的测量控制、数据处理、结果分析等需求,开发了多功能、模块化的激光差动共焦干涉

高精度测量软件,其部分界面图 9 所示。图 9(a)所示的差动共焦元件参数测量控制界面用于观察被测元件光斑、设置扫描测量参数等;图 9(b)所示的差动共焦元件参数分析界面用于观察记录的差动共焦响应曲线和分析元件参数的测量结果等;图 9(c)所示的移相干涉测量界面用于实现移相干涉面形测量和测试结果分析等;图 9(d)所示的实时显示及界面模块用于控制五维自动工作台,以调整被测件的位置和姿态。

4 总结与展望

激光差动共焦干涉高精度测量技术突破了高精度层析定焦、抗表面粗糙散射及环境扰动和多参数共基准综合测量等现有球面光学元件参数测量所面临的共性技术瓶颈,首次在同一激光差动共焦干涉高精度测量仪器上实现了球面光学元件曲率半径/超大曲率半径、焦距/超长焦距、厚度、折射率和面形等多参数的高精度共基准测量,为我国高端球面光学元件的超精密

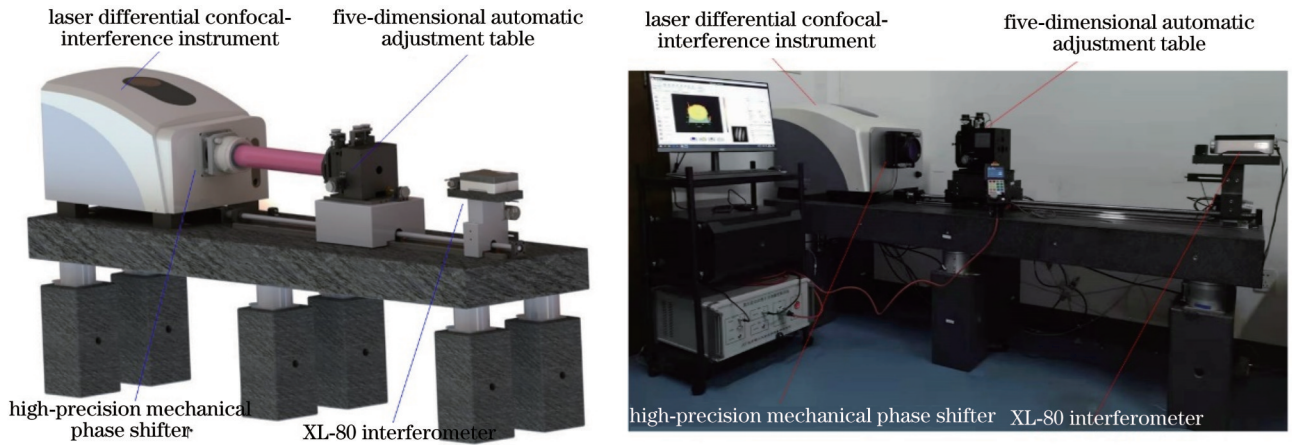


图 8 激光差动共焦干涉高精度测量仪器

Fig. 8 Laser differential confocal-interference high-precision measurement instrument

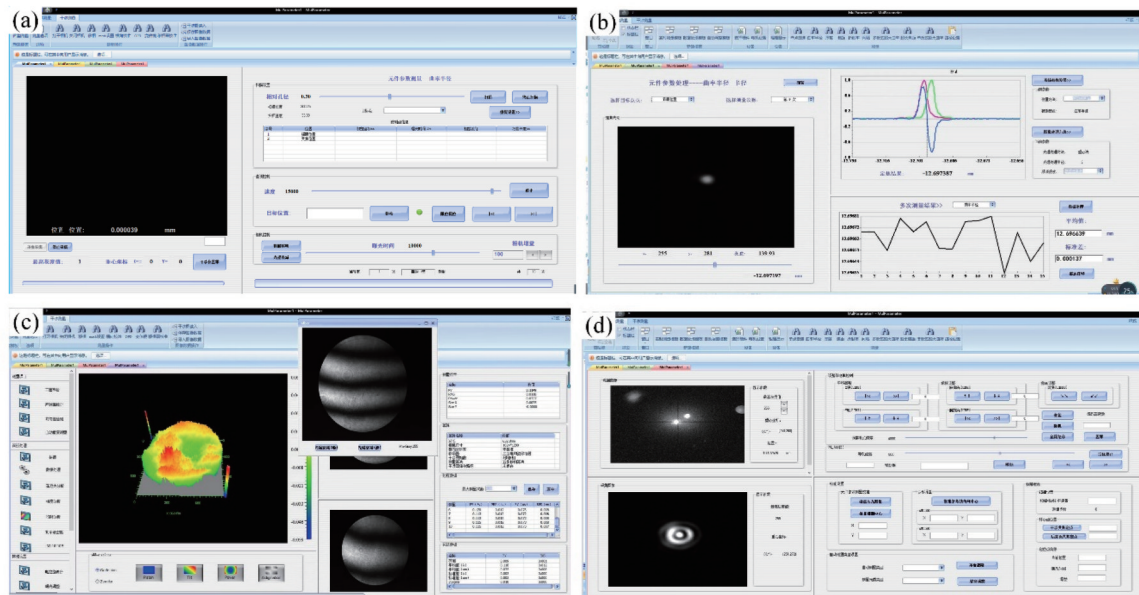


图 9 测量软件界面。(a)差动共焦测量控制界面;(b)差动共焦参数测量分析界面;(c)移相干涉测量界面;(d)实时显示及调整界面
Fig. 9 Interfaces of measurement software. (a) Differential confocal measurement control interface; (b) differential confocal parameter measurement and analysis interface; (c) phase shift interferometry interface; (d) real-time display and adjustment interface

加工检测提供了重要的技术手段。

所研制激光差动共焦干涉高精度测量仪器的发展趋势在于:1)实现全自动化高效测量。随着技术发展和产能扩大,高端球面光学元件加工对检测效率的要求越来越高,亟待解决大批量元件的全自动化装填、调整和测量难题。2)实现抗环境扰动测量。通过空间同步移相或单帧干涉图解算等手段,尽可能地缩短进行一次面形测量所需的时间,并通过多次重复测量取平均值来抑制随机的环境扰动影响,进而扩大仪器的使用范围。3)实现多领域推广应用。核聚变靶丸、轴承球形偶件和大口径晶圆等球形/平面元件是激光核聚变、航空发动机和半导体光刻等领域的核心元件,激光差动共焦干涉高精度测量技术有望为上述核心球面/平面元件的高精度加工检测提供可行途径。

参 考 文 献

- [1] Tollefson J. US achieves laser-fusion record: what it means for nuclear-weapons research[J]. Nature, 2021, 597(7875): 163-164.
- [2] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers [J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 435-448.
- [3] 李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 865-868.
Li Y Q. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 865-868.
- [4] 李升辉. 大相对孔径高分辨率手机镜头设计[J]. 激光技术, 2022, 46(1): 139-142.
Li S H. Large numerical aperture and high resolution mobile phone lens[J]. Laser Technology, 2022, 46(1): 139-142.
- [5] Zhao W Q, Qiu L R, Xiao Y, et al. Laser differential confocal interference multi-parameter comprehensive measurement method and its system for spherical lens[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22813-22829.

- [6] Soares O D D, Fernandez J F. Laser-aided spherometer[J]. Proceedings of SPIE, 1989, 0954: 234-240.
- [7] Selberg L A. Radius measurement by interferometry[J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1961-1966.
- [8] Kredba J, Psota P, Stašik M, et al. Absolute interferometry for fast and precise radius measurement[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12531-12542.
- [9] Griesmann U, Soons J, Wang Q, et al. Measuring form and radius of spheres with interferometry[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 451-454.
- [10] 王汝冬, 田伟, 王平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112001.
Wang R D, Tian W, Wang P, et al. Analysis of vibration effect to surface figure measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112001.
- [11] Man Y Y, Li H C. Focal length precise measurement method for optics system based on lunar imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9301: 93010M.
- [12] Singh S. Analysis of Lau interferometric fringe for measurement of focal length by using wavelet filtering techniques[J]. Optik, 2014, 125(12): 2847-2850.
- [13] Luo J, Bai J, Zhang J C, et al. Long focal-length measurement using divergent beam and two gratings of different periods[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 27921-27931.
- [14] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [15] 刘富国, 查学军, 杨波, 等. 基于光纤低相干干涉技术的透镜中心厚度测量方法研究[J]. 应用激光, 2016, 36(5): 605-610.
Liu F G, Zha X J, Yang B, et al. Study on the method of measuring the center thickness of the lenses based on low coherence interferometry of optical fiber[J]. Applied Laser, 2016, 36(5): 605-610.
- [16] Rheims J, Köser J, Wriedt T. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(6): 601-605.
- [17] 孟庆华, 向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2114-2119.
Meng Q H, Xiang Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2114-2119.
- [18] Yang S, Zhao W Q, Zhang P J, et al. Measured element phase-shifting interferometry with a single piezoelectric transducer and low-friction workbench[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105847.
- [19] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20051-20062.
- [20] Zhao W Q, Sun R D, Qiu L R, et al. Laser differential confocal radius measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2345-2360.
- [21] Li J J, Tang L, Li Q, et al. Laser transverse dual differential confocal radius measurement with high efficiency and high precision[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 24481-24496.
- [22] Tang S, Li Y H, Qiu L R, et al. High-precision laser transverse differential confocal radius measurement method[J]. Optics Express, 2021, 29(19): 29960-29971.
- [23] Li Z G, Qiu L R, Zhao W Q, et al. Laser differential confocal ultra-large radius measurement for convex spherical surface[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19746-19759.
- [24] Xiao Y, Qiu L R, Zhao W Q. Laser reflection differential confocal large-radius measurement for concave surfaces[J]. Applied Optics, 2018, 57(23): 6693-6698.
- [25] Yang J M, Qiu L R, Zhao W Q, et al. Laser differential reflection-confocal focal-length measurement[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 26027-26036.
- [26] Zhao W Q, Li Z G, Qiu L R, et al. Large-aperture laser differential confocal ultra-long focal length measurement and its system[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17379-17393.
- [27] Wang Y, Qiu L R, Song Y X, et al. Laser differential confocal lens thickness measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(5): 055204.
- [28] Zhao W Q, Wang Y, Qiu L R, et al. Laser differential confocal lens refractive index measurement[J]. Applied Optics, 2011, 50(24): 4769-4778.
- [29] Ansari N, Ashurst W R. Experimental requirement of the error-compensating five-frame interferogram-collecting sequence used in phase-shifting interferometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 214-216.

High-Precision Measurement Technology and Instrument with Laser Differential Confocal Interference

Yang Shuai, Qiu Lirong, Tang Liang, Yang Zheng, Cui Jian, Wang Yun, Zhao Weiqian*

Key Laboratory of Complex-Field Intelligent Exploration, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Significance Ultra-precision spherical optical elements are widely used in optical systems such as inertial confinement fusion devices, extreme ultraviolet lithography objectives, high-end mobile phone/vehicle imaging lens modules, and other optical systems due to their excellent processing properties. The performance of the optical elements and the overall optical system is determined by various parameters, such as curvature of radius, thickness, refractive index, focal length, and surface shape. The high-precision measurement of the above parameters is an important means to ensure the performance of optical elements and systems.

However, it is difficult for the existing methods to realize the high-precision common reference comprehensive measurement of multiple parameters of spherical optical elements. The common bottleneck problems are as follows.

1) It is difficult to break through the bottleneck of high resolution and precise focusing of the measured surface. In

fact, one of the key reasons why the accuracy of existing optical measurement instruments is difficult to be significantly improved is that their axial resolution and focusing capacity are difficult to be significantly improved due to the limitation of the optical diffraction limit, which restricts the improvement of the surface focusing accuracy of components and the measurement accuracy of parameters.

2) It is difficult to break through the bottleneck of anti-surface scattering and anti-environmental disturbance measurement. The measurement method based on interference technology is difficult to measure samples with surface scattering characteristics, and the measurement accuracy is seriously affected by air flow disturbance, ground vibration, and other environmental factors.

3) It is difficult to break through the bottleneck of multi-parameter common reference comprehensive measurement. The existing multi-parameter measurement principles of spherical elements are different, and the measurement results of different instruments are difficult to be traced uniformly, so it is difficult to realize the high-precision common reference comprehensive measurement of multiple parameters.

To sum up, it is difficult for existing measurement methods to achieve the high-precision measurement of multiple parameters of spherical optical elements due to the difficulty in breaking through the technical bottlenecks of high-resolution and accurate focusing, anti-surface rough scattering, and anti-environmental disturbance of the measured surface, and it is difficult for existing measurement instruments to achieve the common reference and high-efficiency comprehensive measurement due to different measurement principles. Furthermore, it greatly restricts the improvement of processing precision and efficiency of high-end spherical optical elements.

Progress We propose the principle of the laser differential confocal-interference high-precision measurement method (Fig. 1). The differential confocal measurement optical path and Fizeau interference optical path are organically fused into the same measurement optical path. Differential confocal detection is used to achieve high-precision, anti-scattering, and anti-disturbance focusing (Fig. 2), and thereby high-precision common reference measurement of multiple parameters [Figs. 3(c) - (h)] is achieved. Fizeau phase-shifting interference technology is used to achieve the high-precision measurement of the surface shape of the spherical/plane element [Fig. 3(b)].

Based on the proposed method, the laser differential confocal-interference high-precision measurement instrument (Figs. 7 and 8) is invented and developed. The instrument adopts a highly stable He-Ne laser to realize multi-parameter comprehensive measurement on the same instrument, and then the multi-parameter results can be uniformly traced to the wavelength of the light source, thus effectively shortening the traceability chain and realizing common reference measurement.

Conclusions and Prospects The laser differential confocal-interference high-precision measurement method has broken through the common technical bottlenecks faced by the current spherical optical element parameter measurement, such as high-precision focusing, anti-surface rough scattering and environmental disturbance, and multi-parameter common reference comprehensive measurement. For the first time, the high-precision common reference measurement of multiple parameters, such as curvature radius/ultra-large curvature radius, focal length/ultra-long focal length, thickness, refractive index, and surface shape has been realized on the same laser differential confocal-interference high-precision measurement instrument, which provides an important technical means for the ultra-precision processing and testing of high-end spherical optical components.

Key words measurement; differential confocal interference; spherical optical components; high-precision measurement; tomography focusing; common reference measurement