

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2002964

激光差动共焦反射式超大曲率半径测量系统研制^{*}

卜乙禄 李 琦 李彦宏 邱丽荣 周桃庚 赵维谦
(北京理工大学 光电学院 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室 北京 100081)

摘 要:针对球面超大曲率半径测量中存在的测量精度低、抗环境干扰能力差的难题,研制了一套激光差动共焦反射式超大曲率半径测量系统。该系统采用反射式测量光路,利用差动共焦响应曲线对被测件的猫眼和反射位置进行高精度定位,并用测长干涉仪记录位置信息,最后结合物镜顶焦距解算出超大曲率半径值。理论分析与实验表明,该系统定焦精度高,测量范围大,抗环境干扰能力强,相对测量误差优于 2×10^{-4} , -15 m 超大曲率半径测量结果的重复性可达 1.2×10^{-4} ,实现了超大曲率半径的高精度测量。

关键词: 差动共焦;反射式;超大曲率半径;定焦;测量系统

中图分类号: TN98;TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 40

Development of laser reflection differential confocal ultra-large radius measurement system

Bu Yilu Li Qi Li Yanhong Qiu Lirong Zhou Taogeng Zhao Weiqian
(Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract:To solve the low measurement accuracy and poor resistance to environmental interference in the ultra-large radius measurement field, a laser reflection differential confocal ultra-large radius measurement system is developed. The system adopts reflective measuring optical path, and uses the curve of the differential confocal system to precisely locate the cat's-eye and reflection positions of the tested device. The displacement information of the tested device is recorded by interferometer, and then combined with the vertex focal length of the objective lens to calculate the ultra-large radius value. Theoretical analysis and experimental results show that the system has high focusing accuracy and large measurement range and high anti-environment interference ability, and its relative measurement error is less than 2×10^{-4} , and its measuring repeatability reaches at 1.2×10^{-4} for -15 m ultra-large radius, and the system realizes the high-precision measurement of ultra-large curvature radius.

Keywords: differential confocal; reflection; ultra-large radius; focusing; measurement system

0 引 言

高精度的球面光学元件尤其是超大曲率半径球面光学元件在极紫外光刻机、高分辨对地观测等领域中有着广泛应用,是决定这些光学系统成像质量及使用性能的核心参数之一^[1-4]。在球面光学元件制造过程中,超大曲

率半径的检测水平直接决定了光学元件的加工质量和加工效率。随着相关领域的发展,对球面光学元件超大曲率半径测量提出了越为严苛的要求。在超大曲率半径测量方法中,矢高法和拟合法^[5-9]属于接触式测量,该类方法不易受到环境的干扰,但是在测量时被测件表面容易被划伤,且在测量超大曲率半径时精度较低。非接触测量方法中,干涉法^[10-14]具有较高的测量精度,但其抗环境

干扰能力较差,干涉条纹的判读容易受到环境因素的干扰。激光差动共焦曲率半径测量法^[15-16]在测量1 m以下曲率半径时有很高的测量精度和很强抗环境干扰能力,但是被测面曲率半径越大,所需的测量光路越长,共焦位置更易受环境等因素干扰,测量精度也越低。激光差动共焦多次反射式超大曲率半径测量法^[17]利用多次反射腔缩短了测量光路,提高了抗环境干扰能力,但是该方法只能测量凹面被测件,在调整反射腔时难度较大,且对被测面的反射率要求较高。

虽然现有方法一定程度上满足了超大曲率半径的测量需求,但是没有一种方法能在实现大测量范围的同时兼顾高精度测量和高抗环境干扰能力。为此,本课题组提出了定焦灵敏度高、测量范围大、可同时测量凹面和凸面曲率半径的激光差动共焦反射式超大曲率半径测量法^[18-19],该方法采用反射式测量光路,避免了定焦被测件的共焦位置,减小了被测件的移动距离,提高了抗环境干扰能力,实现了以小位移测量超大曲率半径。

本文研制了差动共焦反射式超大曲率半径测量系统。该系统借助激光差动共焦反射式超大曲率半径测量法测量范围大、测量光路短、定焦精度高、不易受测量环境干扰的特点,使系统对被测件位置进行高精度定位,并结合测长干涉仪记录被测件位置信息,最后通过计算获得超大曲率半径的精确值。

1 测量原理

1.1 超大曲率半径计算

激光差动共焦反射式超大曲率半径测量法采用反射式测量光路,借助物镜将测量光路折转压缩,利用差动共焦响应曲线过零点与物镜焦点相对应的特性^[18-20],对被测件猫眼位置A和反射位置B进行高精度定位,并通过测长干涉仪记录被测件的移动距离L,然后结合物镜顶焦距f计算出曲率半径值。

曲率半径计算原理如图1所示,图中D是系统有效口径, ρ 为归一化口径, R_ρ 为口径为 ρD 时计算得到的曲率半径值, θ_1 是 R_ρ 与光轴的夹角, θ 为物镜出射边缘光束 ρD 与光轴的夹角, f 为物镜顶焦距值,O点为被测面对应的球心位置。

由图1几何光学成像关系可得:

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{\rho D}{2f}\right) \\ \tan \frac{\theta_1}{2} = \frac{2R_\rho f(1-\cos\theta_1)}{\rho D[L - R_\rho(1-\cos\theta_1)]} \\ R_\rho = \frac{(f-L)\sin(\theta - 2\theta_1)}{\sin(\theta - \theta_1) - \sin(\theta + 2\theta_1)} \end{cases} \quad (1)$$

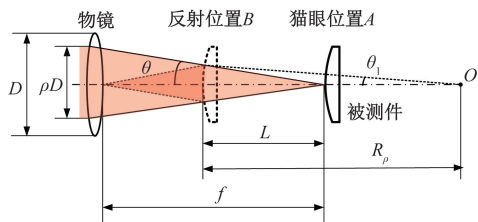


图1 超大曲率半径计算

Fig. 1 Ultra-large radius calculation

对式(1)求得的 R_ρ 进行积分可得到被测件曲率半径值R为:

$$R = \frac{\int_0^1 2\pi\rho R_\rho d\rho}{\int_0^1 2\pi\rho d\rho} = 2 \int_0^1 \rho R_\rho d\rho \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知,物镜的顶焦距f也对超大曲率半径测量产生影响,因此在测量前需对所选物镜的顶焦距f进行高精度测量。

物镜的顶焦距可以根据具体的测量需求选择,当物镜顶焦距f值一定时,被测件曲率半径R只与被测件移动距离L有关。当 $f=1\,045\text{ mm}$ 、 $D=150\text{ mm}$ 时,R与L的关系如图2所示。

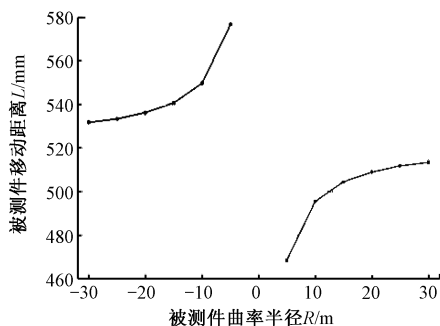


图2 R与L的关系

Fig. 2 The relationship between R and L

从图2可以看出,反射式超大曲率半径测量法在测量 $\pm 5 \sim \pm 30\text{ m}$ 范围内超大曲率半径时,被测件只需移动600 mm以下的距离,显著的缩短了测量光路,减少了被测件的移动距离,提高了抗环境干扰能力。

1.2 被测件移动距离L测量

如图3所示,当被测件位于猫眼位置A时,物镜出射光束聚焦在被测表面,经被测表面反射后原路返回,再经分光镜1和分光镜2后被焦前、焦后两路虚拟针孔探测器接收。被测件位于反射位置B时,测量光束经过被测件反射后会聚在物镜后表面顶点,再经物镜后表面反射后返回到差动共焦定焦系统中。此时,被测件位于猫眼位置A和反射位置B附近时系统的差动共焦响应曲线为:

$$\begin{cases} I_A(u, u_M) = \left[\frac{\sin(u/2 + u_M/4)}{u/2 + u_M/4} \right]^2 - \left[\frac{\sin(u/2 - u_M/4)}{u/2 - u_M/4} \right]^2 \\ I_B(u, u_M) = \left[\frac{\sin\left[\frac{(1+\alpha)u}{2} + \frac{u_M}{4}\right]}{\frac{(1+\alpha)u}{2} + \frac{u_M}{4}} \right]^2 - \left[\frac{\sin\left[\frac{(1+\alpha)u}{2} - \frac{u_M}{4}\right]}{\frac{(1+\alpha)u}{2} - \frac{u_M}{4}} \right]^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha = (f/L-1)^2$ 为测量光束经被测件反射后的系统轴向放大率, f 是物镜顶焦距; u_M 为探测器归一化离焦量; u 为轴向归一化光学坐标。

式中: λ 是激光波长; D 是系统有效口径; z 是横向坐标; M 是探测器离焦量; f_o 是物镜焦距; f_c 是准直镜焦距。

测长干涉仪测得被测件在猫眼位置 A 和反射位置 B 之间的移动距离为 L 。

1.3 物镜顶焦距 f 测量

在测量被测件超大曲率半径前, 需利用平面反射镜对物镜顶焦距 f 进行高精度测量。如图 3 所示, 利用差

$$\begin{cases} u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f_o} \right)^2 z \\ u_M = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f_c} \right)^2 M \end{cases} \quad (4)$$

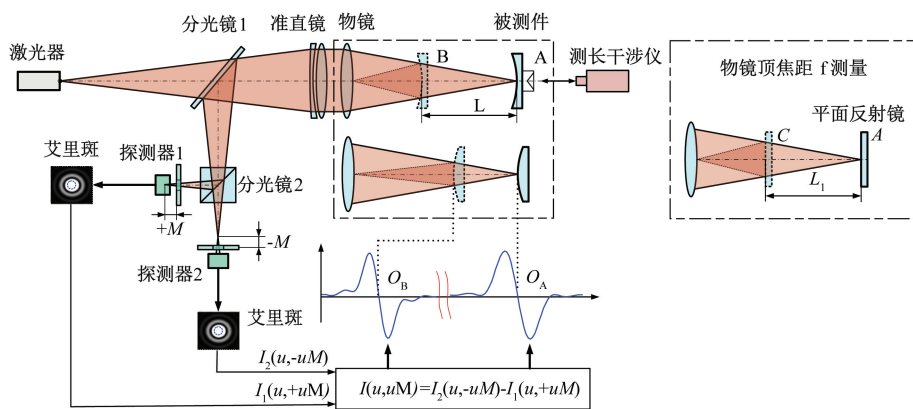


图 3 超大曲率半径测量原理

Fig. 3 Measurement principle of ultra-large radius

动共焦响应曲线的过零点对光束会聚到平面反射镜时的位置 A 和会聚到物镜后表面位置时平面反射镜的位置 C 进行高精度定位。此时, 平面反射镜位于位置 C 附近时系统的差动共焦响应曲线为:

$$I_C(u, u_M) = \left[\frac{\sin(u_A + \frac{u_M}{4})}{u_A + \frac{u_M}{4}} \right]^2 - \left[\frac{\sin(u_A - \frac{u_M}{4})}{u_A - \frac{u_M}{4}} \right]^2 \quad (5)$$

用测长干涉仪测得平面反射镜在位置 A 和位置 C 之间的移动距离 L_1 , 根据几何关系可得物镜顶焦距 $f = 2L_1$ 。

2 系统设计与搭建

2.1 系统硬件结构

激光差动共焦反射式超大曲率半径测量系统的框架如图 4 所示, 主要包括控制系统、差动共焦定焦系统、干涉测长及环境补偿系统、被测件装卡机构、位移驱动机

构。测量系统通过位移驱动机构驱动气浮滑块使被测件在气浮导轨上平稳移动。

为了提高差动共焦定焦系统的定焦精度, 差动共焦定焦系统中的准直镜选择口径为 150 mm、焦距为 1 250 mm 的双胶合透镜, 该透镜可以有效地消除像差, 减小小像差对测量的影响; 平面反射镜选择面形优于 $\lambda/20$ 的 Zygo 标准镜, 可以有效减小面形误差的影响。

为了保证被测件的高精度移动, 位移驱动机构采用了课题组自主研发的余气回收式精密气浮导轨, 该导轨在 2 m 的有效行程内直线度优于 $1 \mu\text{m}$, 可以减小导轨误差和气浮余气对测量的影响。

为了提高测长精度, 系统采用了测量不确定度高达 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ ($k=2$) 的 Renishaw XL-80 干涉仪, 完全满足超大曲率半径测量系统的精度要求。

根据图 4 的测量系统框架研制的系统实物如图 5 所示, 该系统对被测件的位置进行精确定焦, 可以减小环境因素的干扰, 且测量范围可达 $\pm 5 \sim \pm 30 \text{ m}$ 。该系统将差动共焦定焦系统光轴、被测件运动轴和干涉测长轴设置于

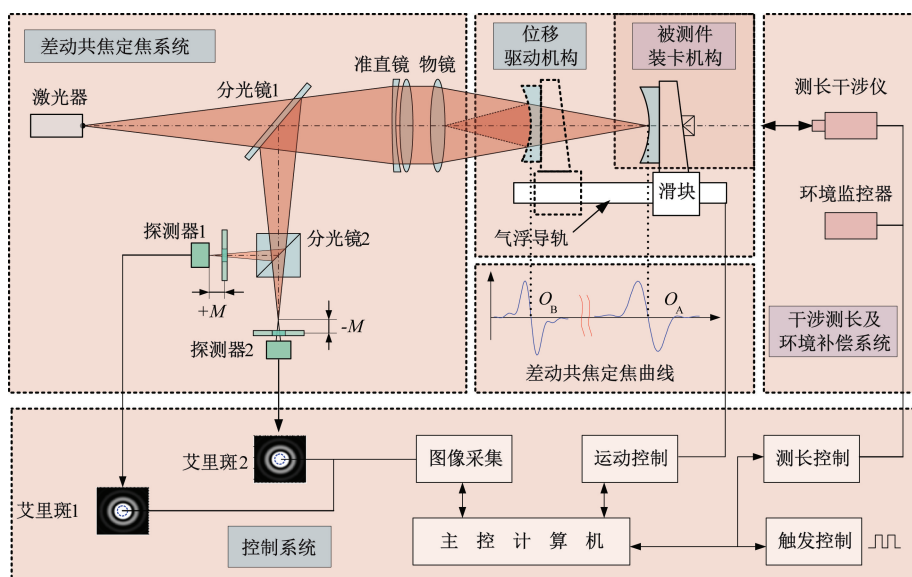


图4 系统框架

Fig. 4 System framework

同一条轴线上,可以有效的减小阿贝误差。该系统整体坐落在具有良好热稳定性的大理石基座上,并在大理石基座上添加气浮隔振底座隔绝环境震动。

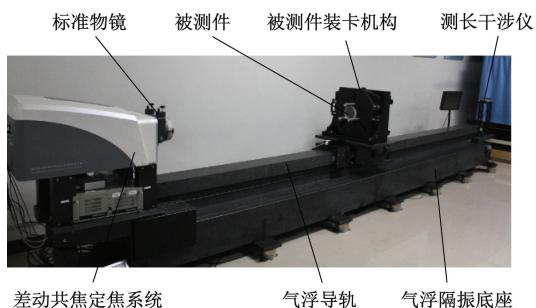


图5 系统实物图

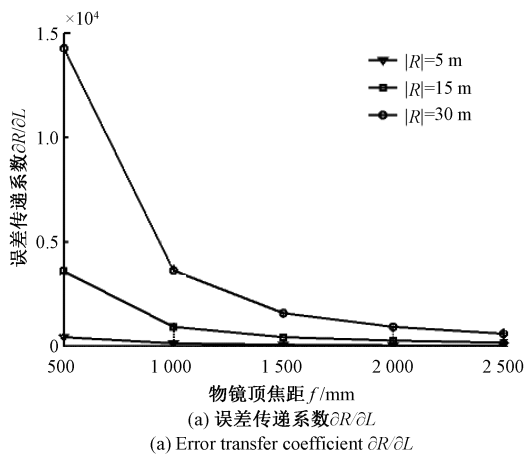
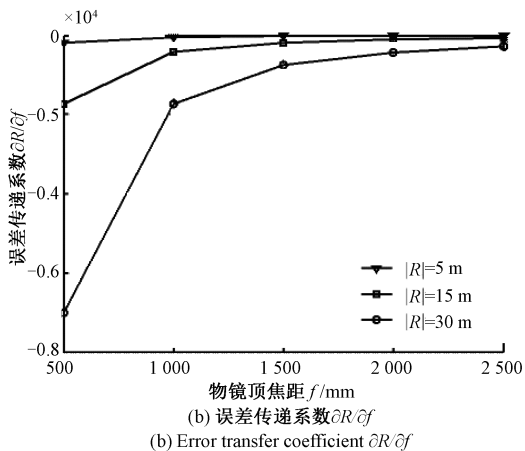
Fig. 5 The ultra-large radius measurement system

2.2 物镜选择

物镜的选择不仅影响测量光路的长短,还会影响各参数的误差传递系数,最终影响曲率半径的测量精度。选取曲率半径为 ± 5 、 ± 15 和 ± 30 m的被测件,对式(1)和(2)进行数值分析,可以得到选择不同顶焦距的物镜时 Lf 的误差传递系数 $\partial R/\partial L$ 和 $\partial R/\partial f$,如图6所示。

由图6可以看出,对同一曲率半径被测件,随着物镜顶焦距的增大, Lf 的误差传递系数随之减小。当物镜顶焦距大于1 000 mm时,各参数误差传递系数下降明显。但是当物镜口径一定时,物镜顶焦距越大系统的定焦精度越低。

因此,物镜选择150 mm口径的Zygo干涉仪标准球面镜,此镜头像差小、可替换性好,可综合考虑误差传递

(a) 误差传递系数 $\partial R/\partial L$
(a) Error transfer coefficient $\partial R/\partial L$ (b) 误差传递系数 $\partial R/\partial f$
(b) Error transfer coefficient $\partial R/\partial f$ 图6 不同物镜顶焦距 f 下各参数的误差传递系数Fig. 6 Error transfer coefficient at different f
系数和系统的定焦精度来选择不同顶焦距的物镜。

2.3 测量软件

测量软件的结构如图 7 所示,主要包括测量控制模块、CCD 图像采集模块、触发控制模块、位移控制模块、测长控制模块和数据处理模块六大部分,实现 CCD 光斑光强信号采集、位移驱动控制、被测件位移信息采集、数据处理和报表打印的功能。

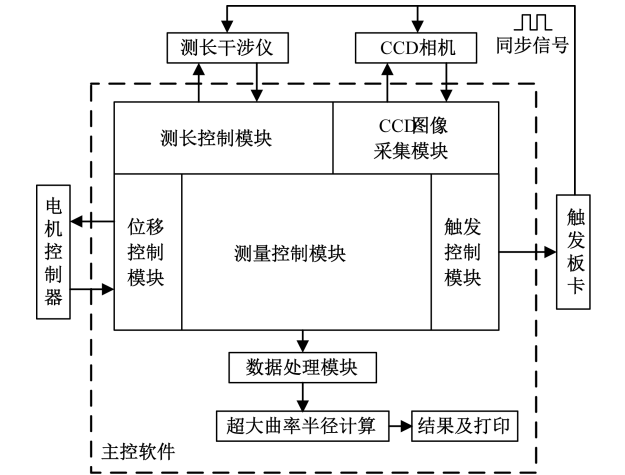


图 7 测量软件结构

Fig. 7 Structure of the measurement software

在电机控制器驱动被测件在猫眼位置和反射位置附近扫描时,CCD 相机实时采集光斑图像,并将采集到的光斑图像经数据处理模块处理后得到光强信息。同时,由测长干涉仪记录被测件位移信息并将其传输给数据处理模块。扫描完成后,可以通过测量软件查看猫眼位置和反射位置的差动共焦响应曲线、超大曲率半径测量结果的半径值和标准差。

3 实验验证

对一块 $\Phi 150\text{ mm}$ 口径、凹面标称曲率半径值为 $-15\,006.0\text{ mm}$ 的平凹透镜在室温 $20.0\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $42\%\pm 4\%$ 的环境下进行超大曲率半径测量实验。

首先利用面形优于 $\lambda/20$ 的平面反射镜对物镜的顶焦距进行高精度测量。如表 1 所示,物镜顶焦距多次重复测量的平均值为 $f=1\,045.056\,554\text{ mm}$,标准差为 $\sigma=4.646\text{ }\mu\text{m}$,相对标准差为 4.45×10^{-6} 。

表 1 物镜顶焦距重复测量结果

Table 1 Repetitive measurement result of f

次数	物镜顶焦距/mm	次数	物镜顶焦距/mm
1	1 045.063 706	6	1 045.048 856
2	1 045.060 200	7	1 045.049 614
3	1 045.054 842	8	1 045.059 458
4	1 045.058 416	9	1 045.056 336
5	1 045.055 166	10	1 045.058 944

在测量被测件移动距离 L 时,首先仔细调整被测件姿态,使被测件在反射位置时物镜出射光束聚焦在物镜后表面顶点;其次利用电机控制器驱动被测件在猫眼位置和反射位置进行触发测量;然后对系统采集到的光强信号和位移信息进行处理得到差动共焦响应曲线。单次测量时猫眼位置 A 和反射位置 B 的差动共焦响应曲线 $I_A(z)$ 、 $I_B(z)$ 如图 8 所示,响应曲线的过零点位置分为 $z_A=-0.006\,928\text{ mm}$ 和 $z_B=540.726\,522\text{ mm}$,两者相减可得到被测件移动距离 $L=z_B-z_A=540.733\,450\text{ mm}$ 。最后,将测得的 f 和 L 的精确值代入到计算公式可以求得超大曲率半径 $R=-15\,004.390\,6\text{ mm}$ 。

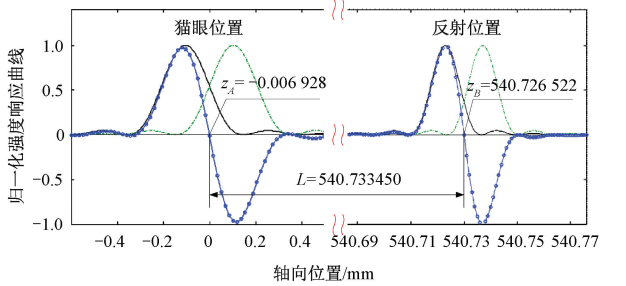


图 8 超大曲率半径测量响应曲线

Fig. 8 The response curve of ultra-large radius

系统的测量精度还受到气流扰动、震动等环境因素的影响,可以通过控制环境因素来提高系统的测量精度。对被测件曲率半径进行多次重复测量,测量结果如表 2 所示,测量平均值为 $R=-15\,003.665\,8\text{ mm}$,标准差为 $\sigma=1.809\text{ mm}$,相对标准差为 1.2×10^{-4} 。

表 2 曲率半径重复测量结果

Table 2 Repetitive measurement result of R

次数	曲率半径/mm	次数	曲率半径/mm
1	-15 004.390 6	6	-150 05.572 8
2	-15 002.140 7	7	-150 01.553 5
3	-15 001.274 4	8	-150 05.528 2
4	-15 005.498 4	9	-150 02.632 9
5	-15 005.553 0	10	-150 02.513 5

4 误差分析

4.1 误差传递系数

当 $f=1\,045\text{ mm}$ 、 $D=150\text{ mm}$ 时,对式(1)和(2)进行数值分析,得到不同曲率半径时 f 和 L 的误差传递系数 $\partial R/\partial L$ 、 $\partial R/\partial f$ 如图 9 所示。

由图 9 可以看出,被测件曲率半径 R 绝对值增大, f 和 L 的误差传递系数也显著增大。

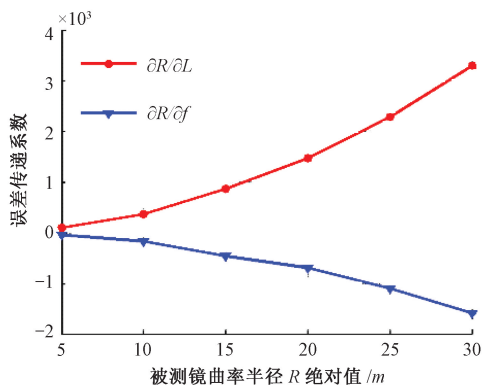


图9 不同被测件曲率半径时各误差传递系数

Fig. 9 Error transfer coefficient at different R

4.2 被测件移动距离 L 测量误差

在测量被测件移动距离 L 测量时,存在的误差项主要有光源调整误差、离焦量不一致误差、测长误差、轴线夹角误差、导轨误差和被测件面形误差。

1) 光源调整误差

由于在调整光源位置时存在误差,会造成经过准直镜的光束存在一定的发散角,影响定焦准确度。在系统装调过程中,使用剪切干涉仪对光源位置仔细调整,可将光源调整误差控制在±0.2 mm 以内。根据几何光学关系可得由光源调整误差导致的被测件移动距离 L 测量误差小于:

$$\sigma_1 = 0.034 \mu\text{m} \quad (6)$$

2) 离焦量不一致误差

在装调过程很难将两路探测器的离焦量调整到完全一致。系统中探测器放置在定位精度优于 10 μm 的微位移驱动器上,仔细调整可将离焦量不一致误差控制在 10 μm 以内。因此,由离焦量不一致误差导致的被测件移动距离 L 测量误差小于:

$$\sigma_2 = 0.874 \mu\text{m} \quad (7)$$

3) 测长误差

测长系统采用测量不确定度高达±0.5×10⁻⁶ (k=2) 的 RENISHAW XL-80 双频激光干涉测长仪。因此,由测长误差导致的被测件移动距离 L 测量误差满足:

$$\sigma_3 = 0.5 \times 10^{-6} \times L \quad (8)$$

4) 轴线夹角误差

在测量过程中应保证被测件运动轴和测长干涉仪光轴同轴,但是实际情况中,两者不能完全同轴而存在着一定的夹角 γ。

在系统装调过程中,利用导轨的有效行程,仔细调整可将夹角 γ 控制在 4' 以内。因此,由被测件运动轴与测长干涉仪光轴夹角误差导致的被测件移动距离 L 测量误差为:

$$\sigma_4 = L(1 - \cos\gamma) \approx 0.68 \times 10^{-6} \times L \quad (9)$$

5) 导轨误差

如图 10 所示,在被测件沿导轨前后移动过程中,由于气浮导轨存在加工误差,因此会使被测件随导轨发生径向平动和绕 x、y、z 轴的旋转。

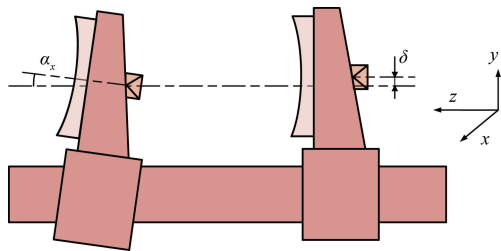


图10 导轨误差

Fig. 10 Slider error

经标定,高精度气浮导轨在有效行程 2 000 mm 内径向平动误差优于 1 μm。因此,气浮导轨径向平动导致的被测件移动距离 L 测量误差的最大值为:

$$\sigma_5 = \frac{10^{-6}}{2R} \text{ (mm | R:mm)} \quad (10)$$

在测量过程中,被测件绕 x、y、z 轴旋转会造成被测件光轴与系统光轴产生 α_x、α_y、α_z 的夹角,引入测量误差。

设测长干涉仪光轴与被测件光轴之间存在阿贝距离 x_{abbe}、y_{abbe}。系统光轴到导轨轴线之间的径向距离为 x_m 和 y_m = 445 mm,系统中 x_{abbe}、y_{abbe} 和 x_m 的调整精度可达 2 mm。经标定,高精度气浮导轨的旋转误差 α_x、α_y、α_z 均小于 5"。则旋转误差 α_x、α_y 导致的被测件移动距离 L 测量误差小于:

$$\begin{cases} \sigma_6 = -y_{abbe} \cdot \tan\alpha_x = 0.049 \mu\text{m} \\ \sigma_7 = x_{abbe} \cdot \tan\alpha_y = 0.049 \mu\text{m} \end{cases} \quad (11)$$

由旋转误差 α_z 导致的被测件移动距离 L 测量误差的最大值为:

$$\sigma_8 = \frac{5.82 \times 10^{-5}}{R} \text{ (mm | R:mm)} \quad (12)$$

6) 面形误差

当被测件位于猫眼位置附近时,物镜出射光束聚焦在被测件表面一小区域内,而被测件存在一定的面形误差,会使系统定位被测件位置时产生误差,降低超大曲率半径的测量精度。该误差可以通过 Zygo GPI 型移项干涉仪测量被测件表面面形 PV 值来补偿。系统中激光器波长 λ = 632.8 nm,被测件面形 PV 值优于 0.1λ,因此补偿后的面形误差小于:

$$\sigma_9 = 0.1PV \approx 0.006 \mu\text{m} \quad (13)$$

7) 误差合成

对式(6)~(13)的各误差项进行合成,合成后的被

测件移动距离 L 测量误差小于:

$$\sigma_L = \sqrt{\sum_{i=1}^9 \sigma_i^2} \approx 0.877 \text{ }\mu\text{m} + 0.725 \times 10^{-6} \times L$$

(14)

4.3 物镜顶焦距 f 测量误差

使用面形优于 $\lambda/20$ 平面反射镜对物镜顶焦距进行高精度测量,平面反射镜的面形对测量的影响可以忽略。当平面反射镜由猫眼位置 A 移动至反射位置 C 时,导轨径向平动误差和绕 z 轴旋转误差可以忽略。

影响物镜顶焦距 f 测量的误差项主要有:光源调整误差、离焦量不一致误差、测长误差、轴线夹角误差和导轨绕 x 、 y 轴的旋转误差。物镜顶焦距 f 测量误差如表 3 所示。

表 3 物镜顶焦距测量误差
Table 3 The measurement error of f

误差项	物镜顶焦距 f 测量误差
光源调整误差	0.068 μm
离焦量不一致误差	1.748 μm
测长误差	$0.25 \times 10^{-6} \times f$
轴线夹角误差	$0.34 \times 10^{-6} \times f$
导轨绕 x 轴旋转误差	0.097 μm
导轨绕 y 轴旋转误差	0.097 μm

对表 3 各误差项进行合成,合成后的物镜顶焦距 f 测量误差小于:

$$\sigma_f = 2.02 \mu\text{m} + 0.362 \times 10^{-6} \times f$$

(15)

4.4 曲率半径 R 测量误差

在测量曲率半径过程中,被测件移动距离 L 测量与物镜顶焦距 f 测量之间相互独立。因此可得该系统的超大曲率半径测量误差 σ_R :

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial L} \cdot \sigma_L\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial f} \cdot \sigma_f\right)^2}$$

(16)

由图 9 可知,当被测件曲率半径 $R = -15 \text{ m}$ 时,误差传递系数 $\partial R / \partial L = 864.43$ 、 $\partial R / \partial f = -461.574$ 。因此,根据式 (14) ~ (16) 可得该系统在测量 -15 m 超大曲率半径被测件时测量误差为:

$$\sigma_R \approx 1.56 \text{ mm}$$

(17)

相对误差为:

$$\frac{\sigma_R}{R} = \frac{1.56}{15\,000} \approx 1.04 \times 10^{-4}$$

(18)

由上述分析可知,离焦量不一致误差为最大误差项。理论上该系统对 -15 m 超大曲率半径相对测量误差可达 1.04×10^{-4} ,但是考虑到气流、气压等环境因素和一些忽略的误差项,该系统在曲率半径测量范围 $\pm 5 \sim \pm 30 \text{ m}$ 内测量误差仍可小于 $0.02\% |R|$,相对测量误差仍可小于 2×10^{-4} 。

5 结 论

激光差动共焦反射式超大曲率半径测量系统采用反射式测量光路,缩短了被测件移动距离,提高了抗环境干扰能力。该系统通过差动共焦光强响应曲线过零点对被测件的位置进行精确定位,提高了定位瞄准精度,并通过间接测量获得超大曲率半径的精确值。该系统定焦精度高、受环境波动影响小,测量范围为 $\pm 5 \sim \pm 30 \text{ m}$ 。实验结果表明,对 -15 m 超大曲率半径被测件,其测量结果的重复性可达 1.2×10^{-4} ,为超大曲率半径的高精度测量提供了有效途径。

参考文献

[1] 张德福,李显凌,芮大为,等. 193 nm 投影光刻物镜光机系统关键技术研究进展[J]. 中国科学(技术科学), 2017,47(6):565-581.
ZHANG D F, LI X L, RUI D W, et al. Key technology progress of optomechanical systems in 193 nm projection objective [J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(6): 565-581.

[2] 王伟兴,郎小龙,姚君. 多光谱成像仪几何特征标定技术研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(8):70-73.
WANG W X, LANG X L, YAO J. Study on geometric characteristic calibration of multispectral camera [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8):70-73.

[3] 武国梁,王刚,齐荔荔,等. 基于相位线性展开的波前误差检测与图像复原[J]. 电子测量技术,2015,38(5):50-52.
WU G L, WANG G, QI L L, et al. Wavefront phase error detection and image restoration based on linear expansion [J]. Electronic Measurement Technology, 2015,38(5):50-52.

[4] 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.

[5] DOMINGUEZ M Z, LI J X, ZHOU P, et al. Vertex radius measurement of an off-axis parabola with a three-ball spherometer [J]. Optical Engineering, 2016, 55(12):124107.

[6] 王东方,李全松,贾鹏,等. 三坐标测量曲率半径误差评价的新方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(2):186-192.

- WANG D F, LI Q S, JIA P, et al. New method of error evaluation for test of curvature radius by CMM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2):186-192.
- [7] 李俊峰. 大口径深焦比Hindle球面镜曲率半径精确测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12):1401-1407.
- LI J F. Precise measurement for radius of curvature of large-aperture fast Hindle sphere [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12):1401-1407.
- [8] TAO W, ZHONG H, CHEN X, et al. A new fitting method for measurement of the curvature radius of a short arc with high precision [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(7):75014.
- [9] 定翔, 李飞, 洪宝玉. 三维轮廓扫描法测量透镜曲率半径的实验研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4):761-765.
- DING X, LI F, HONG B Y. Curvature radius measurement by three-dimension profilometry [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4):761-765.
- [10] YANG ZH M, DOU J T, DU J Y, et al. Large radius of curvature measurement based on the evaluation of interferogram-quality metric in non-null interferometry[J]. Optics Communications, 2018, 410:756-762.
- [11] YI H Y, ZHANG R ZH, HU X Y, et al. A novel compensation method for the measurement of radius of curvature[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(4):911-915.
- [12] ABDELSALAM D G, SHAALAN M S, ELOKER M M, et al. Radius of curvature measurement of spherical smooth surfaces by multiple-beam interferometry in reflection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(6):643-649.
- [13] 陈好, 张浩, 樊红英, 等. 基于泰伯-莫尔条纹的激光波前曲率半径测量[J]. 激光技术, 2018, 42(2):156-160.
- CHEN H, ZHANG H, FAN H Y, et al. Measurement of laser wavefront curvature radius based on Talbot-Moiré fringe [J]. Laser Technology, 2018, 42(2):156-160.
- [14] WANG Q D, GRIESMANN U, SOONS J A. Holographic radius test plates for spherical surfaces with large radius of curvature[J]. Applied Optics, 2014, 53(20):4532-4538.
- [15] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, et al. Laser differential confocal radius measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(3):2345-2360.
- [16] 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.
- [17] ZHAO W Q, ZHANG X, WANG Y, et al. Laser reflection differential confocal large-radius measurement [J]. Applied Optics, 2015, 54(31):9308-9314.
- [18] LI ZH 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

作者简介



卜乙禄, 2016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, 主要研究方向为精密光学检测。

E-mail: yilu_bu@163.com

Bu Yilu received his B. Sc. degree in 2016 from Changchun University of Science and Technology, now he is a M. Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interest is precise optical testing technique.



赵维谦(通信作者), 分别在1995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. degree both from Harbin Institute of Technology in 1993 and 2003, respectively, now he is a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include differential confocal theory and precise optical testing technique.