

高精度曲率半径测量研究

彭石军 苗二龙 史振广 陈华 隋永新 杨怀江

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 由于影响曲率半径测量精度的因素众多,因此高精度曲率半径测量一直是光学检测中的难题之一。为了实现球面光学元件曲率半径的高精度测量,提出通过环境补偿和提高对准精度的方法来减小测量误差。首先从理论的角度分析了影响曲率半径检测精度的主要因素,并给出了在曲率半径测量过程中减小测量误差的方法以及相应的补偿方式。基于此分析,在高精度实验室中采用菲佐干涉仪结合高精度测长干涉仪的干涉测量方式,分别对典型的凸球面和凹球面光学元件进行了曲率半径检测。实验结果表明:通过环境补偿和提高对准精度的方法,曲率半径检测的复现性优于 $0.2\ \mu\text{m}$,实际测得的相对误差分别为 $0.67\times 10^{-6}(2\sigma)$ 和 $0.60\times 10^{-6}(2\sigma)$,实现了高精度曲率半径测量。

关键词 测量;曲率半径;轴向对准误差;环境补偿;菲佐干涉仪

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.011201

Research on High-Precision Measurement of Radius of Curvature

Peng Shijun Miao Erlong Shi Zhengguang Chen Hua Sui Yongxin Yang Huaijiang

*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract There are many factors that affect the measurement accuracy of the radius of curvature (ROC). So, high-precision measurement of the ROC has been one of the problems in optical measurement. In order to realize high-precision ROC measurement, a method to reduce the measurement error by environment compensation and improving alignment accuracy is presented. Firstly, the main factors that affect the measurement accuracy of the ROC are analyzed theoretically. And then a method for reducing the measurement errors in the measurement process and the corresponding compensation is proposed. Based on the theoretical analysis, typical convex and concave optical parts are measured respectively by interference method which is composed by a Fizeau interferometer and a high-precision displacement measurement interferometer in high-precision laboratory. Experimental results show that the measurement reproducibility is less than $0.2\ \mu\text{m}$ and the relative errors of the measurement are $0.67\times 10^{-6}(2\sigma)$ and $0.60\times 10^{-6}(2\sigma)$ respectively through environment compensation and improving alignment accuracy. The high-precision ROC measurement is realized.

Key words measurement; radius of curvature; axis alignment error; environment compensation; Fizeau interferometer

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.4630; 120.4800

1 引言

曲率半径是光学元件的关键参数之一,其准确性对光学系统的性能具有重要的影响。曲率半径的精确测量不仅对光学元件的制造极为重要,也是光学系统装调的基础,尤其对于高精密光学系统(如光刻机物镜等较复杂的光学系统)更是如此。测量曲率半径的方法有很多,传统的方法有球径仪法、样板法等。这些传统的测试方法使用设备简单,测试方便,适用于现场检验,但是这些方法是接触式测量,会使光学表面产生一定的损伤,而且存在主观、定量困难以及测量精度不够高等缺点^[1-2]。目前曲率半径的测量已经实现了高精度测量,使用比较广泛的有坐标测量机(CMM)、激光跟踪仪与激光干涉仪结合测量法^[3]以及干涉仪测量

收稿日期: 2013-05-20; 收到修改稿日期: 2013-07-26; 网络出版日期: 2013-12-12

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 彭石军(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学精密检测方面的研究。E-mail: shijun_peng@qq.com

法(也被称为光学曲率半径测量仪法^[4])等。其中坐标测量机法测量重复性好,但是由于是接触式测量容易划伤待测表面而受到限制;激光跟踪仪与激光干涉仪结合测量法绝对精度较低,适合大曲率光学器件的测量;干涉仪测量法往往是由面形测量干涉仪以及光栅尺或者位移测量干涉仪(DMI)结合在一起对曲率半径进行测量,具有很高的测量精度,而且测量不确定度很小。对于多镜片组成的光学系统,曲率半径测量误差虽然可以通过元件间隔的调整进行补偿,但是这种调整花费的时间长,成本高昂,尤其是复杂的光学系统,并且会增加系统的像差。因此曲率半径测量精度越高,系统的成本也会相应降低,并且能够减小部分像差。

利用干涉仪法测量曲率半径时,曲率半径就是球面或者最佳拟合球面到球心之间的距离,而球面或最佳拟合球面位置被称为共焦位置,球心位置则被称为猫眼位置。这两个位置可以通过点光源干涉仪,如菲佐干涉仪或者泰曼格林干涉仪产生的会聚波来观察。在猫眼位置处,干涉仪光束在待测球面上会聚成一个点;在共焦位置处,干涉仪光束会聚点与待测面球心一致,并产生零条纹图像。移动待测件,利用光栅尺或者测长干涉仪对猫眼和共焦位置间的距离进行精确测量,就可以确定待测件的曲率半径^[5]。由于光栅尺的长度有限,而且增加光栅尺的长度会增加成本,从而使曲率半径的测量范围受限,因此,一般选择使用位移测长干涉仪对猫眼和共焦位置进行精确读取。尽管干涉仪测量法是直接测量,但是仍然存在很多潜在的误差源。这些误差源包括共焦、猫眼零位置判读误差,干涉仪波前畸变,待测面表面面形误差,测长干涉仪误差和轴向对准误差等。关于这些误差源给曲率半径测量带来的不确定度,前人在这方面已经做过很多的研究工作^[4,6-8]。影响测长干涉仪精度的主要因素是环境扰动,环境扰动主要改变干涉腔内的空气折射率,从而使测量光束的波长发生相应的改变。苗二龙等^[9]对干涉腔内空气折射率随温度变化进行了比较详细的研究^[9]。轴向对准误差是由于测量轴、运动轴以及工件轴之间不平行产生的,使测量值相对真值偏小。

本文重点关注环境变化对测长干涉仪的影响,以及待测件与运动台(工件台)之间的位置关系对测量误差的影响,并在此基础上通过对环境变化的实时测量与补偿,以及提高待测件光轴与运动轴之间的对准精度的办法,实现了曲率半径约300 mm,复现性优于0.2 μm 的高精度曲率半径测量。

2 理论分析

为实现高精度曲率半径测量,首先分析环境扰动的影响。利用激光测长干涉仪进行位移测量时,是通过精确测量猫眼和共焦位置间的距离来确定待测件曲率半径的,如图1所示。限制位移测量精度的两个主要因素是光源的真空波长和外界空气折射率^[10]。研究者们通过相应的补偿措施实现了纳米级^[11]和亚纳米级^[12]的位移测量。这种高精度的位移测量有它的局限性,就是测量的动态范围太小,仅仅几微米。在进行曲率半径测量时,往往希望其测量动态范围达到500 mm甚至更长,测量精度可以相应地有所降低。

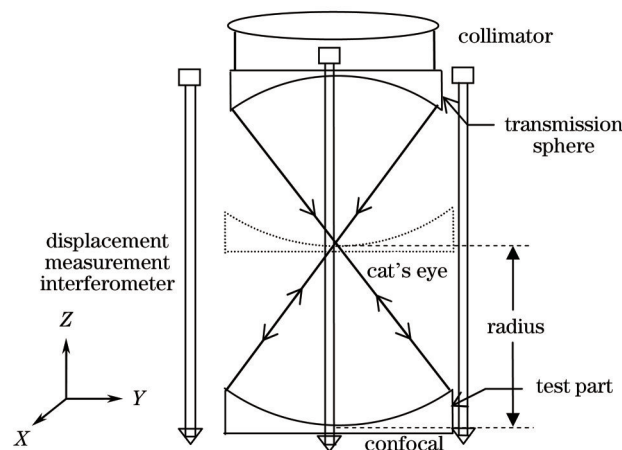


图1 干涉仪法曲率半径测量结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of radius of curvature measurement

在进行曲率半径测量时,运动台在光轴(Z轴)方向的运动分辨率为20 nm。激光测长干涉仪所使用的光源是Zeeman公司生产的He-Ne激光器,长时间波长稳定性达到了 5×10^{-9} 量级,远高于运动台的精度。因此,对于测长干涉仪来说,影响测量精度的主要因素是空气折射率^[10]。

由图1所示的结构可知,当激光测长干涉仪的相位变化 δ 时,对应的位移变化量可写为

$$d = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{4\pi n_{\text{air}}} \delta, \quad (1)$$

式中 λ_{vac} 为光源的真空波长, n_{air} 为空气折射率。由此可见,空气折射率发生改变时,测得的位移量也会发生相应的改变。而影响空气折射率的主要因素有温度、气压、湿度和空气组成成分中的 CO_2 浓度。因此,要实现长距离、高精度的曲率半径测量,就必须对环境进行严格的控制,或者对空气折射率进行精确测量,并通过实时补偿的办法来提高曲率半径的测量精度。

对空气折射率的测量主要有直接测量和间接测量两种。

直接测量是利用激光干涉仪制作的折射率计^[13]或者频率梳^[14]对当前的空气折射率进行测量,可以实现 10^{-9} 的高精度,但是这种测量装置往往需要搭建迈克耳孙干涉仪系统或者马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪系统,结构复杂,成本高。

间接测量法则是通过对环境的温度、气压、湿度以及 CO_2 浓度进行测量,然后利用Edlen公式计算得到当前空气的折射率,这种方法简单,成本低,而且能够实现 10^{-8} 量级的高精度测量^[15-18]。在标准状态(温度 $T=20\text{ }^\circ\text{C}$,压强 $P=1.013\times 10^5\text{ Pa}$,相对湿度 $H=50\%$)下,修正后的Edlen公式可写为^[17]

$$n = 1 + 271.8 \times 10^{-6} \frac{P}{101325} \frac{293.5}{T} \left[1 + 0.54 \left(\frac{C_{\text{CO}_2} - 300}{1 \times 10^6} \right) \right] - 1 \times 10^{-8} H. \quad (2)$$

利用(2)式,可计算出标准状态下空气折射率为1.000271294。对(2)式中的 P, T, H 和 C_{CO_2} 浓度求偏导,就可以得到空气折射率随气压、温度、湿度和 CO_2 浓度变化的响应度分别约为 $2.7 \times 10^{-9}/\text{Pa}$, $-0.93 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $-1 \times 10^{-8}/\%$ 和 $1.5 \times 10^{-8}/\%$ 。因此,当要使空气折射率改变 1×10^{-7} 时,每一种参数的改变量如表1所示。

表1 不同环境因素对空气折射率的影响

Table 1 Change of different environment factors required to change the refractive index of air

Parameter	Standard value	Change for $\Delta n = 1 \times 10^{-7}$
Pressure /Pa	1.013×10^5	37.3
Temperature / $^\circ\text{C}$	20.0	-0.1
Humidity /%	50	-10
Concentration of $\text{CO}_2 / 10^{-6}$	300	670

从表1中可以看出,空气折射率受温度的影响最为显著,其次是气压和湿度。为了实现高精度的曲率半径测量,必须对实验室环境进行高精度的控制,使得实验室内的温度控制在 $(22 \pm 0.2)^\circ\text{C}$,湿度控制在 $(40\% \pm 5)\%$ 。由于需要使环境的空气能够缓慢流通,因此对压强的控制不是很严格。也因为空气与外界的不断交换,使得实验室内的 CO_2 浓度与外界相差不大。利用高精度的传感设备对实验室内的温度、压强、湿度和 CO_2 浓度进行了长时间的测量。测量时所使用的传感器精度、测量范围以及准确度如表2所示,测量结果如图2所示。

表2 气压、温度、湿度和 CO_2 浓度传感器的相关参数

Table 2 Parameters of temperature, humidity, pressure and CO_2 concentration sensor

Parameter	Measuring range	Resolution	Accuracy
Temperature / $^\circ\text{C}$	0~100	0.001	0.01
Humidity /%	0~100	0.1	± 1.7
Pressure /Pa	$(0.5 \sim 1.1) \times 10^5$	10	± 10
Concentration of $\text{CO}_2 / 10^{-6}$	0~10000	1	± 1

从图2(a)可知,近100 h内实验室压强的变动范围是 $[99.0\text{ kPa}, 101.0\text{ kPa}]$ 。根据前面的分析可知,压强的变化会使折射率产生 5.4×10^{-6} 的变化,对于曲率半径100 mm的工件,将会产生 $0.536\text{ }\mu\text{m}$ 的测量误差,是干涉仪检测重复性的10倍以上。图2(b)则反映了实验室温度被精确控制在 $(22 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 内,温度的起伏变化

会使空气折射率产生 0.4×10^{-6} 的变化,对于曲率半径 100 mm 的工件,将会产生 40 nm 的测量误差,与干涉仪测量重复性相当。图 2(c) 说明湿度被精确控制在 $40\% \pm 5\%$,湿度的这种变化最大可使空气折射率变化 0.043×10^{-6} ,是温度带来影响的 1/10。而图 2(d) 则说明实验室 CO_2 浓度在 $[382 \times 10^{-6}, 404 \times 10^{-6}]$ 之间变化,而这个范围的变化,对空气折射率的影响为 0.0044×10^{-6} ,为湿度影响的 1/10,因此在曲率半径测试中可以忽略 CO_2 浓度变化的影响。

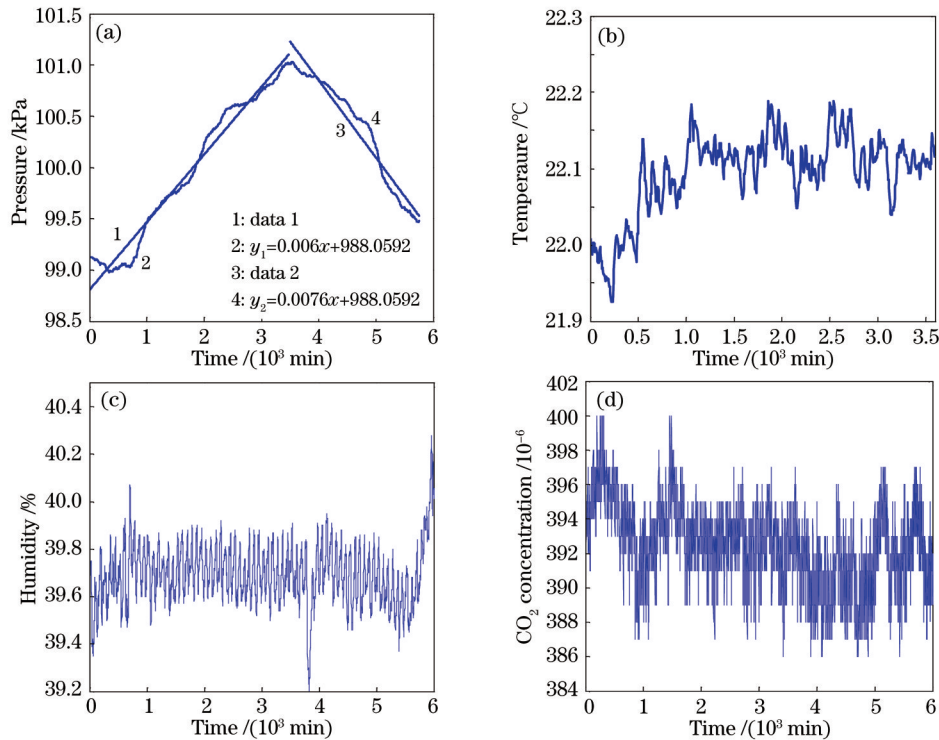


图 2 实验室环境随时间变化情况。(a)气压随时间的变化;(b)温度随时间的变化;(c)湿度随时间的变化;(d)CO₂浓度随时间的变化

Fig.2 Laboratory environment changes over time. (a) Pressure; (b) temperature; (c) humidity; (d) CO₂ concentration

接下来分析轴向对准误差的影响。在文献[4]中提到曲率半径测量中存在轴向对准误差,该误差是由于曲率半径测量中三个重要的轴之间不平行产生的。这三个轴是测量轴(d)、运动轴(r)和工件轴(p),假设三轴之间的夹角分别为 $\alpha(p,d)$ 、 $\beta(p,r)$ 和 $\gamma(r,d)$,如图 3 所示。在图 1 所示的结构中,DMI 的角反射镜被安装在只做 Z 向调整的工件台上,使得 DMI 只监测工件台的 Z 向运动,而无法监测工件台的横向方向和倾斜角的变化,这种结构在文献 [4] 中被称为 Z 向跟踪结构。该结构的轴向对准误差是复合形式,由 β, γ 决定,其形式可写为:

$$\delta R_{\text{axial}} = R(1 - \cos \beta \cos \gamma) . \tag{3}$$

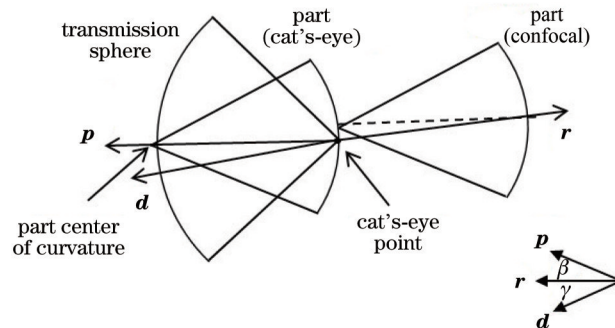


图 3 曲率半径测量相应的三个轴 d 、 r 和 p

Fig.3 Three axes of radius of curvature measurement

从(3)式可以看出,当运动轴和工件轴之间的夹角 $\beta \neq 0$ 时,在相同的 γ 角下,测量误差 δR_{axial} 会随夹角 β 而变化。因此为了将轴向对准误差进一步降低,可以使运动轴和工件轴调至平行,也就是使 $\beta=0$ 。方法就是在共焦位置处,通过调整(旋转、平移)待测工件和工件台,最后使共焦位置处干涉条纹在1个条纹内变化,从而使工件轴与运动轴之间的夹角 β 尽量接近于0,此时 $\gamma=\alpha$,则(3)式可写为

$$\delta R_{\text{axial}} = R(1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

此误差也被称为余弦误差。对比(3)式和(4)式,发现通过旋转平移的办法,可以达到减小误差的目的。

3 实验测试

由于实验室内的温度和湿度得到了精确的控制,所以影响空气折射率的最主要因素是气压的变化,这种变化最终导致测得的曲率半径发生相应的改变。为了验证这一结论,我们进行了如下实验。将表面面形误差均方根(RMS)值为3.0 nm,曲率半径约为137.69 mm的待测工件置于工件台上,利用旋转平移法使轴向对准误差尽量减小,然后将传感器测得的温度和湿度值对DMI进行实时补偿,而气压值设定为 1.013×10^5 Pa,并记录当前气压的真实值,测量此时待测件的曲率半径,重复测量10次(每隔1天测试一次),而且每次测量的口径均为82.0 mm,10次测量的结果如图5所示。从图上可以看出,气压与测得曲率半径之间有很好的线性关系,线性度为0.929。对所得数据进行拟合,得到直线方程可写为 $R = 4.678 \times 10^{-5}P + 137.6563$ 。拟合方程说明压强变化133 Pa,曲率半径变化0.04678 mm。对应此曲率半径下的空气折射率随压强变化的响应度为 2.56×10^{-9} /Pa,与理论分析值 2.7×10^{-9} Pa非常一致,证明了实时补偿的可靠性和必要性。

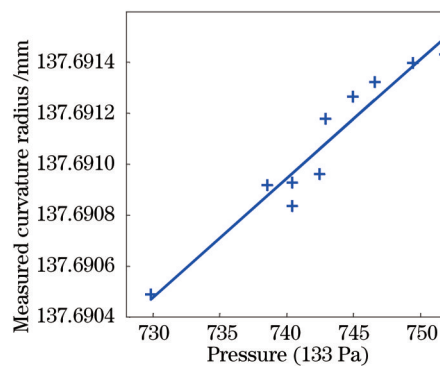


图4 测得曲率半径与气压的关系

Fig.4 Relationship between the measured curvature radius and pressure

接着,将同一待测件在加旋转平移和未加旋转平移的情况下进行曲率半径测试,每次测试过程中对环境(温度、湿度和气压)进行实时补偿,测试口径保持一致,并对曲率半径重复测量10次。为了验证长时间测量的复现性,对表面面形误差均小于8.0 nm (RMS),曲率半径为 -294.270693 mm的凹球面和曲率半径为137.691941 mm的凸球面进行长时间的测试,测试结果如图5和图6所示,单次测量的重复性由误差棒表示。

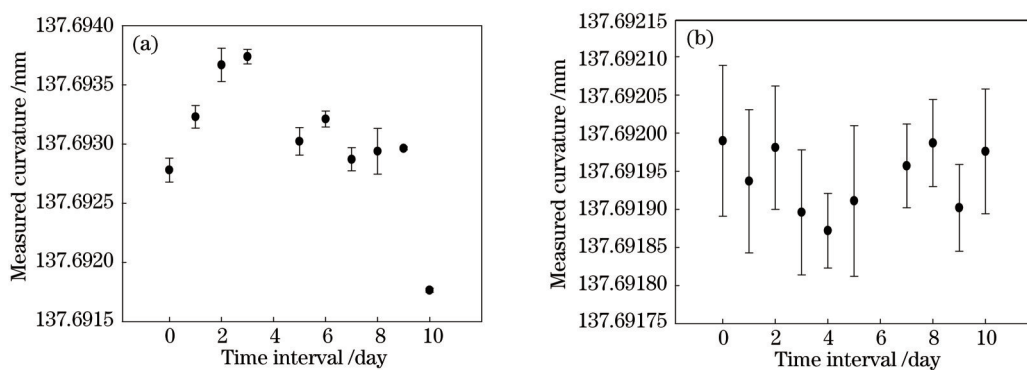


图5 实时补偿后不同时间点测得的曲率半径。(a)未加旋转平移;(b)加旋转平移

Fig.5 Measured curvature radius at different time for real-time compensation. (a) Without rotating and translation; (b) with rotating and translation

对比图 5(a),(b)可以看出,图 5(a)曲率半径变化的范围比图 5(b)大。从数值的角度分析,未加旋转平移时,10次测量的复现性为 $1.034\ \mu\text{m}$,相对误差为 7.510×10^{-6} ;而加旋转平移后,10次测量的复现性为 $0.082\ \mu\text{m}$ (2σ),相对误差为 0.596×10^{-6} 。两者相差 10 倍以上,说明旋转平移法能减小轴向对准误差。

同样,从图 6(a),(b)可以看出,图 6(a)曲率半径变化的范围比图 6(b)大。对测量的数据进行分析发现,未加旋转平移时,10次测量的复现性为 $0.825\ \mu\text{m}$,相对误差为 2.804×10^{-6} ;加旋转平移下,9次测量的复现性为 $0.197\ \mu\text{m}$ (2σ),相对误差为 0.671×10^{-6} 。两者相差近 5 倍,再一次证明旋转平移法能减小轴向对准误差。

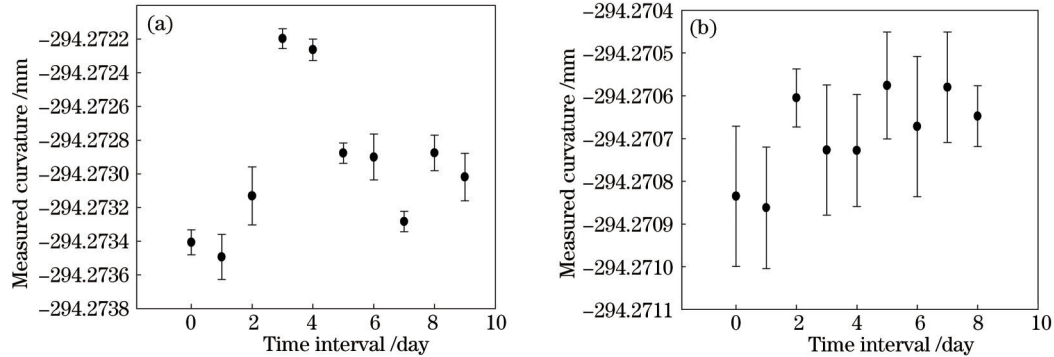


图 6 实时补偿后不同时间点测得的曲率半径。(a)未加旋转平移;(b)加旋转平移

Fig.6 Measured curvature radius at different time for real-time compensation. (a) Without rotating and translation; (b) with rotating and translation

4 结 论

通过实时的温度、气压和湿度补偿,并利用旋转平移的办法来减小轴向对准误差,实现了高精度的球面曲率半径测量。从理论的角度分析了环境变化以及轴向对准误差对曲率半径测量的影响,结合实例证明了环境补偿的可靠性和必要性。通过对凸、凹球面曲率半径的测量,得出其相对误差小于 0.70×10^{-6} ,验证了这种测量方法的有效性。该方法还具有操作简单、检测成本低、测试效率高等特点,可用于高精度光学球面曲率半径测量。

参 考 文 献

- 1 Neil Gardner, Angela Davies. Self-calibration for micro-refractive lens measurements[J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 033603.
- 2 Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong, *et al.*. Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2006, 27(9): 1159.
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.
- 3 Wang Xiaokun, Zheng Ligong. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812010.
王孝坤,郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812010.
- 4 Lars A Selberg. Radius measurement by interferometry[J]. Opt Eng, 1992, 31(9): 1961.
- 5 J Bruning. Fringe Scanning Interferometers. In: D Malacara. (ed.) Optical Shop Testing[M]. New York: Wiley, 1978. 428.
- 6 Tony L Schmitz, Neil Gardner, Matthew Vaughn, *et al.*. Improving optical bench radius measurements using stage error motion data[J]. Appl Opt, 2008, 47(36): 6992.
- 7 Tony L Schmitz, Angela D Davies, Chris J Evans. Uncertainties in interferometric measurements of radius of curvature [C]. SPIE, 2001, 4451: 432.
- 8 T L Schmitz, C J Evans, A Davies, *et al.*. Displacement Uncertainty in Interferometric Radius Measurements[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 451.
- 9 Miao Erlong, Gu Yongqiang. Temperature influence on Fizeau interferometer repeatability[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212008.
苗二龙,谷勇强. 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212008.
- 10 W Tyler Estler. High-accuracy displacement interferometry in air[J]. Appl Opt, 1985, 24(6): 808.

- 11 Guotian He, Xiangzhao Wang, Aijun Zeng, *et al.*. Real-time displacement measurement with large range and high accuracy using sinusoidal phase modulating laser diode interferometer[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(4): 211.
- 12 Yi-Jyh Lin, Ci-Ling Pan. Precision displacement measurement by active laser heterodyne interferometry[J]. *Appl Opt* 1991, 30(13): 1648.
- 13 G Bonsch, E Potulski. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae[J]. *Metrologia*, 1998, 35(2): 133.
- 14 J Zhang, Z H Lu, L J Wang. Precision measurement of the refractive index of air with frequency combs[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(24): 3314.
- 15 Bengt Edlen. The refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1966, 2(2): 71.
- 16 James C Owens. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition[J]. *Appl Opt*, 1967, 6(1): 51.
- 17 N Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. *Meas Sci Technol*, 1993, 4(9): 907.
- 18 Frank E Jones. The refractivity of air[J]. *J Research of the National Bureau of Standards*, 1981, 86(1): 27.