

离焦补偿算法提高曲率半径测量精度的研究

彭石军 苏东奇 苗二龙

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 基于立式 Fizeau 型干涉仪曲率半径测量系统, 提出了一种简捷的离焦补偿算法, 该算法对猫眼和共焦零位置的离焦量进行补偿, 达到了提高曲率半径测量精度的目的。从理论的角度分析了待测面波前像差中的离焦量与待测面位置偏移量之间的线性关系, 并得到了两者之间变化的斜率。结果表明, 猫眼和共焦零位置附近离焦量的大小与待测面位置偏移量之间为线性关系, 且拟合直线的斜率与理论值相一致。同时, 当待测面在共焦位置存在离焦时, 利用离焦补偿算法使曲率半径测量精度提高了一个数量级。

关键词 测量; 离焦补偿; 曲率半径; 立式干涉仪

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.051204

Study of Defocus Compensation Algorithm to Improve the Accuracy of Measuring the Radius of Curvature

Peng Shijun Su Dongqi Miao Erlong

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

Abstract Based on vertical Fizeau interferometer for radius of curvature (ROC) measurement system, a simple null position power compensation algorithm for defocus at cat's eye position and confocal position is proposed to improve the measurement accuracy of ROC. The linear relationship between defocus of the wave-front aberration and the offset of tested surface is theoretically analyzed. And the theory line slope between the two is got. The results show that between power value at cat's eye and confocal null position and tested surface position offset is the linear relation. And the fitting line slope of experiment is consistent with the theoretical value. Furthermore, radius of curvature measurement precision is improved by an order of magnitude with using the defocus compensation algorithm when the tested surface with some defocus at confocal position.

Key words measurement; defocus compensation; radius of curvature; vertical interferometer

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.4800; 220.1000

1 引言

光学零件的曲率半径是决定光学系统性能的关键参数之一。曲率半径的精确测量不仅对光学零件的加工极为重要,也是光学系统装调的基础。在复杂的高精密光学系统中,如光刻机物镜^[1-2],曲率半径的测量精度越高,系统的装调难度越低,系统的装调成本也越低。因此,如何提高曲率半径测量精度,实现高精度曲率半径测量是研究人员不断探索的一个方向。测量曲率半径的方法有很多,大致可分为两大类:接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要有球径仪法、样板法、坐标测量机测试法(CMM)以及轮廓仪测试法^[3]等。其中球径仪法和样板法使用设备简单,测试方便,适用于现场检验,但是存在主观、定量困难以及测量精度不够高等缺点^[4-5]。坐标测量机测试法和轮廓仪测试法的理论测量精度可达 10^{-6} ,但因为是接触式测量,容易对待测面造成损伤。非接触式测量使用比较广泛的有干涉仪测量法^[6-7]、自准直测量法^[8]等。其中干涉仪测量法因具有使用简便,不损伤待测表面,测量精度高(大于等于 10^{-6})等优点而被广泛应用。

尽管利用干涉仪测量法测得的曲率半径值精度很高,但受余弦误差、阿贝误差以及环境等因素的影响,测

收稿日期: 2014-12-10; 收到修改稿日期: 2014-12-23; 网络出版日期: 2015-03-29

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

量值与真值之间总存在一定的误差。研究人员就如何减小干涉仪测量法中测量误差做出了很多努力^[9-12],其中 Schmitz 等^[9-10]通过建立矩阵模型对待测面位置误差的修正达到提高曲率半径测量精度的目的。这种方法对测量系统本身的精度要求不是很高,但是需要对运动机构每一项测量误差进行精确测量,因为不能对离焦量进行补偿,对于曲率半径为 0.408 mm 的待测件,测量不确定度达 7 μm 。彭石军等^[11]则提出在对环境进行补偿的基础上,通过旋转平移调整,使工件轴与运动轴一致的办法提高测量精度。但是该方法中工件的旋转平移调整,无形中给测量带来很大的不便,而且测量精度提高有限。王孝坤等^[6,12]利用激光跟踪仪精确定位猫眼和共焦位置,实现曲率半径高精度测量。但是这种方法需要一个与待测球面相对应已知曲率半径大小的高质量靶标球,靶标球曲率半径测量精度会影响最终测量结果,测量时需要在待测面上取有限的几个采样点计算到猫眼的距离,也会存在一定的误差,而且这种测量方法操作繁琐。针对以上测量方法存在的问题,在立式干涉仪测量系统的基础上,提出一种简捷的零位置 Power 补偿算法,以提高曲率半径的测量精度。

本文采用立式高精度 Fizeau 型干涉仪,结合双频激光测长干涉仪,搭建了高精度的曲率半径测量平台,使用透射球面 F 数为 1.5 的球面参考镜对曲率半径约为 499.362 mm,测试口径为 140 mm 的凹球面进行相应的实验测试。

2 测量系统

2.1 曲率半径测量原理

球面曲率半径可定义为待测球面表面到相应的曲率中心之间的距离,而利用 Fizeau 型干涉仪曲率半径测量系统进行曲率半径测量时,曲率半径定义为共焦位置到猫眼位置之间的距离。参考球面波前的曲率中心与待测件的曲率中心重合时的位置被称为共焦位置;测试光束焦点与待测件表面中心重合时的位置被称为猫眼位置。因此,通过提高猫眼和共焦零位置的识别精度及测长系统的精度达到提高曲率半径测量精度的目的。然而由于待测面加工误差以及面形测量干涉仪运动机构精度的限制,往往难以识别理想的零位置,在猫眼和共焦位置处残留一定量的离焦量。因此,通过离焦补偿算法,可以提高曲率半径测量精度。

2.2 实验测量系统

如图 1 所示,立式 Fizeau 型干涉仪曲率半径测量系统主要包括位相测量干涉仪(PMI)、测长干涉仪(DMI)以及线性位移导轨等。共焦和猫眼两个零位置的识别主要由位相测量干涉仪完成;线性位移导轨则使待测件随工件台在猫眼零位置和共焦零位置之间做线性运动;两个零位置之间的相对位移量由测长干涉仪给出。

在图 1 所示的曲率半径测量系统中,由顶部入射的准直光束经透射球面(TS)参考镜后产生会聚的球面波,

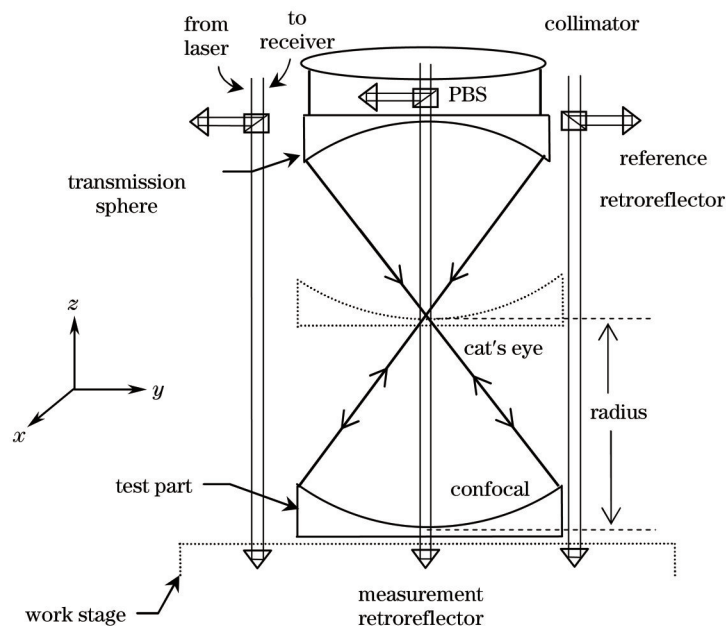


图 1 立式 Fizeau 型干涉仪曲率半径测量系统结构示意图

Fig.1 Vertical Fizeau interferometer configuration setup for radius of curvature measurement

该球面波在共焦/猫眼位置遇到待测面时被反射回来,并与TS的参考面反射回去的光发生干涉。位相测量干涉仪通过对干涉条纹的分析,实现对共焦零位置和猫眼位置的精确判读。三路DMI围绕着位PMI的光轴呈品字形分布,这种分布有利于减小位移测量中的阿贝误差^[7]。利用相应的加权算法,测长干涉仪能够实时显示待测件所处位置的位移量。DMI系统的各组件由美国Zygo公司提供,根据曲率半径测量系统的需要搭建相应的位移测量光路,且位移分辨率达到0.31 nm。在曲率半径测量过程中,测长干涉仪采用全跟踪结构^[7]的工作模式,即将DMI的测量角反射镜固定在工件台上,使角反射镜与待测件一起随工件台运动。与三路DMI的测试光路相邻的是控制工件台运动的三根导轨丝杠(图1中未标出),也围绕着位相测量干涉仪的光轴呈品字形分布,且丝杠的运动轴与PMI的光轴平行。通过三个丝杠的协调运动,能使工件台绕 x 轴和 y 轴做倾斜和俯仰运动,以及沿 z 方向上的线性运动。单个丝杠在 z 方向上移动的分率达20 nm,是实现高精度曲率半径测量的前提。当工件台沿 z 向做线性运动时,DMI实时测量三个丝杠的位移量并将结果反馈给控制系统,从而保证工件台在移动过程中不产生明显的倾斜,进一步减小位移测量中的阿贝误差。由位相测量干涉仪、测长干涉仪系统、运动机构以及扩束系统等构成的曲率半径测量系统被安装在重4吨的立式大理石支架上,大理石支架通过气浮隔振立柱与隔振地基相连,极大地降低了环境的振动对曲率半径测量的影响。

3 理论分析

由文献[13]可知,在曲率半径测量中,由于机械调整误差,气流扰动以及镜片本身面形误差大小等因素影响,共焦和猫眼位置很难实现严格的零腔,即面形Zernike系数中的Power项不为零。而零位置附近Power值与位移量之间有很好的线性关系,可用线性方程表示

$$a_{2i}^0 = b + c \cdot z_i + E_i, \quad (1)$$

式中 a_{2i}^0 为某一位置处测得的离焦量, b 为常数项, c 为斜率,位移量为 z_i , E_i 为测量值与拟合值之间的偏差,通常可忽略。假设在理想状态下,在 z_0 位置处, $a_2^0 = 0$,则由(1)式可求得 z_0 值为 $z_0 = -b/c$;当 $a_2^0 \neq 0$ 时,则此时镜片的位置相对零位置会发生微小的偏离,偏离量为 Δz ,则 $\Delta z = a_2^0/c$ 。

从以上的分析得出,DMI测得的猫眼和共焦位置随猫眼、共焦零位置附近离焦量调整误差的变化而变化,因此,如果能在曲率半径测量过程中,对猫眼和共焦零位置附近的离焦量调整误差进行补偿,可进一步提高曲率半径测量精度。

由文献[14]可知,在笛卡尔坐标系中,如图2所示,当球面波的出瞳位置距离像面的距离为 ε_z ,此时出瞳位置处的波前可表示为

$$W(x,y) = \frac{x^2 + y^2}{2(R + \varepsilon_z)} = \frac{x^2 + y^2}{2R} \cdot \left(\frac{1}{1 + \varepsilon_z/R} \right), \quad (2)$$

式中 R 为球面波前的曲率半径,即观察平面到出瞳的距离,点 (x,y,z) 为球面波前上任意一点,且 x,y 相对于 R 都很小,即出瞳孔径相对出射波曲率半径很小, $\varepsilon_z/R \ll 1$,则(2)式可近似为

$$W(x,y) = \frac{x^2 + y^2}{2R} - \varepsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R}. \quad (3)$$

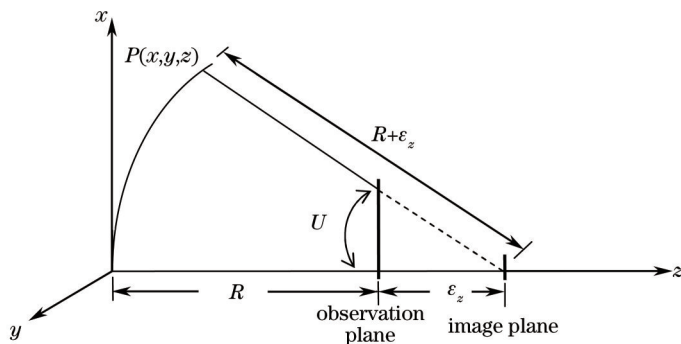


图2 球面波波前离焦示意图

Fig.2 Defocus of spherical wave-front

若在该曲率半径为 R 的球面波上增加光程差为 $A(x^2 + y^2)$ 的离焦量,则焦点偏移量可写为

$$\varepsilon_z = -2R^2 A, \quad (4)$$

(4)式表明:增加光程差使得焦点位置在出瞳附近沿着 z 的负方向移动。从另一方面表明,如果镜片的像平面沿着光轴移动量为 ε_z (ε_z 为负),则相对初始球面波前,波前的变化量可写为

$$\Delta W(x,y) = -\varepsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R^2}. \quad (5)$$

出瞳口径 $D = 2\sqrt{x^2 + y^2}$, $F = R/D$, 则离焦使得出瞳边缘的光程改变量为

$$\Delta W(x,y) = -\varepsilon_z \frac{D^2}{8R^2} = -\frac{\varepsilon_z}{8F^2}. \quad (6)$$

因此,在曲率半径测量中,如果已知猫眼或共焦位置的波前变化量为 ΔW ,就可以利用(6)式求出焦点的偏移量 ε_z 的大小,亦即待测面位置偏移量为

$$\varepsilon_z = -8F^2 \Delta W(x,y). \quad (7)$$

假设波前变化量全部分布在离焦量中,结合(1)式,即可得到离焦量调整误差引入的待测面位置偏移量为

$$\varepsilon_z = -8F^2 P. \quad (8)$$

在猫眼位置, F 为测量中所使用的TS的 F 数;在共焦位置, $F = R/D$ (R 为待测件曲率半径, D 为待测件的测试口径), P 为离焦量调整误差。

4 实验测试

4.1 离焦量与位移变化量之间的线性关系验证实验

为了对上述理论分析部分进行验证,分别进行了如下相关实验。首先,对零位置附近相对位移变化量与离焦量之间的关系进行了实验验证。实验时,将通光口径140.0 mm,曲率半径约为499.362 mm的凹球面待测件置于图1所示的立式Fizeau干涉仪上,所使用TS参考镜,参考面的 F 数为1.5,面形精度峰谷(PV)值为 $\lambda/20$ 。将待测面移动到猫眼位置,通过上下移动待测件,找到最小离焦量所对应的位置定义为猫眼的零位置。然后在猫眼零位置附近等间隔升高(或降低)待测件的位置,每次位移相对改变量为 $0.5 \mu\text{m}$,利用位相测量干涉仪测得不同位置处的离焦量,如图3所示。经分析得到猫眼位置附近离焦量随待测面位置变化的斜率为0.041,线性拟合的相关系数为0.9995,离焦量 P_{cat} 与位移改变量 Δz 的关系可表示为: $P_{\text{cat}} = 0.041 \times \Delta z - 0.035$ 。

利用相同的实验测试方法,得到共焦零位置附近的离焦量与待测面位置相对偏离量的关系,如图4所示。可知,离焦量与待测面相对偏移量之间存在很好的线性关系,离焦量随位移变化的斜率为0.0098,线性拟合的相关系数达0.9999,两者的关系可表示为 $P_{\text{con}} = 0.0098 \times \Delta z + 0.0022$ 。

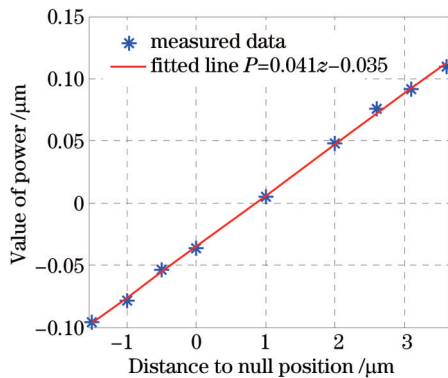


图3 猫眼零位置附近离焦量与相对偏离量的关系

Fig.3 Relationship between defocus and the departure to cat's eye null position

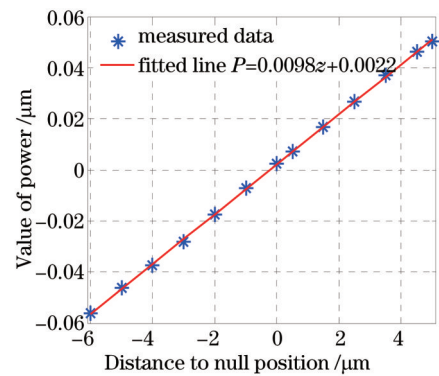


图4 共焦零位置附近离焦量与相对偏离量的关系

Fig.4 Relationship between defocus and the departure to confocal null position

两次实验结果均证明了(1)式的正确性,因此在曲率半径测量中,如果已知待测面面形误差的离焦量,就可以在猫眼位置和共焦位置分别计算得到待测面相对零位置的位置偏移量,表示为

$$\Delta z = 24.390 P_{\text{cat}} + 0.854, \quad (9)$$

$$\Delta z = 102.041 P_{\text{con}} - 0.224. \quad (10)$$

对于猫眼位置,由于所使用的TS F 数为1.5,由(8)式计算得到的直线斜率为18.00,对比(9)式测量得到的斜率24.39,相对误差大小为26.2%。因此,直接利用(8)式对猫眼位置的离焦量进行补偿,存在一定的误差。但是在猫眼位置,干涉条纹充满整个CCD空间,离焦量调整误差可以得到很好的控制,且 F 较小,因此引入的补偿误差较小。对于共焦位置,待测件的 $F=499.362/140=3.567$,则与(8)式对应的斜率为101.781,与(10)式中测量得到的斜率102.04比较,相对误差为0.3%。综上所述,完全可以利用(8)式对猫眼和共焦位置的离焦量进行补偿,从而达到提高曲率半径测量精度的目的。

4.2 离焦量补偿实验测试

根据猫眼位置与共焦位置处离焦量的正负与待测面位置偏移量方向的一致性,曲率半径测量的补偿公式可写为

$$R = R_m - 8F^2 P_{\text{cat}} + 8R^2 P_{\text{con}}, \quad (11)$$

式中 R_m 为实际测得的曲率半径值, F 为所用参考镜的 F 数, P_{cat} 表示猫眼位置处离焦量, R 为待测面的 R 数, P_{con} 为共焦位置处离焦量。为了进一步验证通过离焦补偿算法,能够极大提高曲率半径测量精度,进行了如下实验。实验过程中,将待测件的猫眼位置基本维持不变,每次都精确地移动到同一位置处,准确度约为 $0.1 \mu\text{m}$,而共焦位置逐渐向远离零位置方向移动,使离焦量逐渐增大,然后测试不同离焦量下对应的曲率半径值,得到表1所示结果。

从表1可以看出,随着共焦位置处离焦量的增大,实际测得曲率半径在不断增大。当共焦位置处的离焦量为 288.8 nm 时,未使用离焦补偿算法的曲率半径测量值相对于零位置附近的曲率半径测量值变化量为 $29.98 \mu\text{m}$;而经(15)式补偿后,曲率半径变化的PV值为 $1.335 \mu\text{m}$,约为前者的 $1/20$ 。由此证明:通过离焦补偿算法,曲率半径测量精度提高了近20倍。

通过对表1实验数据的分析可知,尽管离焦补偿算法能够对离焦量进行补偿,但是随着离焦量的不断增大,补偿误差也越来越大。在不考虑猫眼位置离焦量变化引入的误差,当共焦位置离焦量从 4.3 nm 变化到 288.8 nm 时,补偿后曲率半径变化 $1.335 \mu\text{m}$ 。这一变化量,对于亚微米级高精度曲率半径测量^[15]是相当大的。因此,需要给离焦量调整误差定义一个可接受的动态范围。根据瑞利判据可知,当波相差满足衍射极限,即 $\Delta W(x,y) \leq \lambda/4$ 时,系统是理想成像系统。利用这一思想,只有满足理想成像时,曲率半径测量才能满足亚微米级曲率半径测量。如表1中数据,当共焦位置离焦量为 146.8 nm 时,接近 $\lambda/4$,在不考虑猫眼位置离焦量引入的误差,此时补偿后曲率半径值相对于目标曲率半径值 499.362 mm 相差 $0.55 \mu\text{m}$ (3σ),达到了亚微米级曲率半径测量精度要求。

表1 不同离焦量下测量得到待测件的曲率半径

Table 1 Measured radius with different defocus

Cat's eye position /mm	Cat's eye defocus /nm	Confocal position /mm	Confocal Defocus /nm	Radius without compensation /mm	Radius with compensation /mm	Repeatability / nm
-956.48816	-11.2	-457.12582	4.3	-499.36234	-499.361695	88
-956.48816	-4.3	-457.12485	12.6	-499.36331	-499.361974	68
-956.48816	-9.3	-457.12388	22.4	-499.36428	-499.361847	11
-956.48816	-7.4	-457.12287	33.3	-499.36529	-499.361785	13
-956.48816	1.1	-457.12179	43.6	-499.36637	-499.361975	74
-956.48816	1.4	-457.12086	52.7	-499.36730	-499.361990	22
-956.48816	11.3	-457.11983	63.4	-499.36833	-499.362108	129
-956.48816	8.6	-457.11883	71.7	-499.36933	-499.362217	55
-956.48816	0.5	-457.11781	80.8	-499.37035	-499.362176	88
-956.48816	2.0	-457.11680	90.9	-499.37136	-499.362190	117
-956.48816	2.2	-457.11587	100.1	-499.37229	-499.362190	24
-956.48816	6.2	-457.11085	146.8	-499.37731	-499.362548	83
-956.48816	3.0	-457.10579	194.4	-499.38237	-499.362732	106
-956.48816	-2.1	-457.09584	288.8	-499.39232	-499.363030	102

在利用(11)式对测得曲率半径进行离焦量补偿时,还需注意离焦量测量的不确定度。因为引入补偿算法,位相干涉仪测量离焦量的不确定度对测量精度影响较大。通过对(11)式的分析可知,离焦量测量不确定度引入的曲率半径测量不确定度表达式为

$$u = 8 \sqrt{[F^2 u(P_{\text{cat}})]^2 + [R^2 u(P_{\text{con}})]^2}, \quad (12)$$

式中 $u(P_{\text{cat}})$ 为猫眼位置离焦量测量不确定度大小, $u(P_{\text{con}})$ 为共焦位置离焦量测量不确定度大小。影响 $u(P_{\text{cat}})$ 及 $u(P_{\text{con}})$ 的主要因素有位相测量干涉仪位相测量精度及环境的稳定性,不同型号的位相测量干涉仪其面形测量精度会存在差别,环境温度、湿度的变化速率以及气流扰动的大小不同离焦量测量不确定度大小也不相同。因此,在参考镜 F 和待测件的 R 一定时,使用高精度位相测量干涉仪,提高环境稳定性,猫眼和共焦位置离焦量测量不确定就减小,曲率半径测量精度越高。

5 结 论

通过理论分析得到了待测面的离焦量与猫眼/共焦零位置附近位置偏移量之间的线性关系,并且通过实验验证了这一结论的准确性。在此基础上,提出了一种简捷的离焦量补偿公式,以达到提高曲率半径测量精度的目的。结果表明,当猫眼位置基本不变,共焦位置处的离焦量测量值为 146.8 nm 时,利用补偿算法得到的曲率半径值相对于零位置曲率半径值仅相差 0.55 μm (3σ),达到了亚微米级曲率半径测量精度要求,证明了该补偿公式的有效性。由于离焦补偿算法的引入,在实际测量中还需对离焦量测量的不确定度进行控制,降低曲率半径测量不确定度。

参 考 文 献

- 1 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16~22 nm extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922005.
曹 振, 李艳秋, 刘 菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922005.
- 2 Zhao Feifei, Tang Jianyu, Huang Wei, *et al.*. Computer-aided alignment for the lithographic lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622001.
赵菲菲, 唐剑宇, 黄 玮, 等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622001.
- 3 S R Clark, J E Greivenkamp. Optical reference profilometry[J]. Opt Eng, 2001, 40(12): 2845-2847.
- 4 Neil Gardner, Angela Davies. Self-calibration for micro-refractive lens measurements[J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 033603.
- 5 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): 1159-1162.
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.
- 6 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.
- 7 Lars A Selberg. Radius measurement by interferometry[J]. Opt Eng, 1992, 31(9): 1961-1965.
- 8 Y Xiang. Focus retrocollimated interferometry for long-radius-of-curvature measurement[J]. Appl Opt, 2001, 40(34): 6211-6214.
- 9 Tony L Schmitz, Neil Gardener, Matthew Vaughn, *et al.*. Improving optical bench radius measurements using stage error motion data[J]. Appl Opt, 2008, 47(36): 6692-6700.
- 10 Angela Davies, Tony L Schmitz. Correcting for stage error motions in radius measurements[J]. Appl Opt, 2005, 44(28): 5884-5893.
- 11 Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.*. Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.
- 12 Chunyu Zhao, Rene Zehnder, James H Burge. Measuring the radius of curvature of a spherical mirror with an interferometer and a laser tracker[J]. Opt Eng, 2005, 44(9): 090506.
- 13 Tony L Schmitz, Angela D Davies, Chris J Evans. Uncertainties in interferometric measurements of radius of curvature [C]. SPIE, 2001, 4451: 432-447.
- 14 James C Wyant. Optical Testing and Testing Instrumentation[M]. New York: University of Arizona, 1985.
- 15 Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512001.
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512001.