

doi:10.3788/gzxb20154407.0712003

# 曲率半径干涉测量定焦误差分析

毛洁<sup>1,2</sup>, 侯溪<sup>1</sup>, 伍凡<sup>1</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:** 为了提高曲率半径定焦准确度, 从移相干涉仪, 标准镜头透射波前误差, 被测光学元件表面面形误差及调整误差等方面出发, 分析影响干涉仪定焦准确度的各因素, 并给出各误差补偿表达式. 通过对比实验发现, 在猫眼及共焦位置处调整误差补偿后, 离焦量及曲率半径测量结果的变化趋势由近似线性变为随机变化, 同时由离焦量引入的曲率半径变化量由  $7.05 \mu\text{m}$  减小为  $0.5 \mu\text{m}$ . 在曲率半径干涉测量中, 调整误差为影响定焦准确度的主要误差源, 调节调整误差可有效控制离焦量的变化, 提高曲率半径测量准确度.

**关键词:** 测量; 干涉测量; 光学球面; 曲率半径; 定焦; 离焦量; 误差分析

**中图分类号:** TH741; O436.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)07-0712003-5

## Position Error Analysis in Radius Interferometric Measurements

MAO Jie<sup>1,2</sup>, HOU Xi<sup>1</sup>, WU Fan<sup>1</sup>

(1 Institute of Optical and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to improve the position precision, a single analytical expression for position errors was presented in terms of the various error contributors, including phase measuring interferometer errors, wavefront errors of transmission sphere, surface deviation and adjustment errors. The contrastive experiments indicate that after controlling the adjustment errors, the linear trend of power and radius is changed to the random trend, and the radius variation is decreased from  $7.05 \mu\text{m}$  to  $0.5 \mu\text{m}$ . The adjustment errors are the main error contributors. The power can be effectively controlled by minishing adjustment errors. Thus the interferometric radius precision is improved.

**Key words:** Measurement; Interferometry; Optical spheric surface; Radius of curvature; Position; power; Error analysis

**OCIS Codes:** 120.3180; 120.3940; 120.4630; 120.4800

## 0 引言

曲率半径为光学元件的一个重要参量, 其测量准确度直接影响光学系统的成像质量, 曲率半径的高准确度测量在光学精密测量领域具有重要意义<sup>[1-2]</sup>. 曲率半径检测方法有多种, 传统方法包括球径仪法及样板法, 其测试方便, 适合于现场检验, 但测量准确度不高且均为接触式测量, 易造成被测光学元件表面变形甚至磨损<sup>[3-4]</sup>. 目前曲率半径已实现了高准确度测量, 其中坐标测量机通过多次采集表面点坐标, 拟合得到曲

率半径, 其测量准确度较高, 但该方法为接触式测量, 易划伤光学表面<sup>[5]</sup>; 激光跟踪仪结合激光干涉仪的测量方法不需要移动件, 适合长曲率半径光学元件的检测, 但跟踪仪的靶标球仍需要与元件表面接触<sup>[6-7]</sup>; 干涉测量法由于具有高准确度、操作简便且非接触测量等优点, 因而得到广泛使用<sup>[8-10]</sup>. 球面元件曲率半径干涉测量的关键是实现光学元件球心及表面中心位置的高准确度定焦, 这是光学测量领域的一个共性难题<sup>[11]</sup>.

目前国内外的定焦方法主要有传统清晰度定

**基金项目:** 国家科技重大专项(No. XXXXXXXX)资助

**第一作者:** 毛洁(1988—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密光学检测. Email: maojie.2006@163.com

**导师(通讯作者):** 侯溪(1958—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为精密光学检测. Email: hxxh6776@sohu.com

**收稿日期:** 2015-01-15; **录用日期:** 2015-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

焦<sup>[12]</sup>、差动共焦定焦<sup>[13-15]</sup>和干涉定焦<sup>[1]</sup>.其中传统清晰度定焦受限于衍射极限;差动共焦定焦采用光强曲线定焦,具有较高的定焦灵敏度且抗环境干扰能力强;干涉定焦法定焦准确度较高,但易受被测件面形误差、调整误差、环境等因素的干扰.本文针对干涉测量法对曲率半径定焦误差进行分析,提出误差补偿表达式,并通过对比实验,得到修正调整误差后,可有效控制离焦量及曲率半径的变化,提高曲率半径测量准确度.

## 1 曲率半径干涉测量原理

曲率半径干涉测量基本原理如图 1<sup>[8-9]</sup>,由激光器发出的平行平面光经准直系统及标准镜头后,会聚在被测光学元件表面中心位置,光束在被测表面中心位置发生光路反转,此时可在 CCD 上观察到干涉条纹,并且呈“S”形对称分布,如图 2(a),即为猫眼位置;然后沿导轨移动被测光学元件,使入射光会聚点与被测光学元件表面球心重合,干涉条纹呈零条纹分布,如图 2(b),此时为共焦位置.移动被测光学元件,通过观察干涉条纹分布情况,以确定猫眼和共焦位置.然后通过测距干涉仪测量两位置之间的相对距离,即为测量得到的曲率半径.

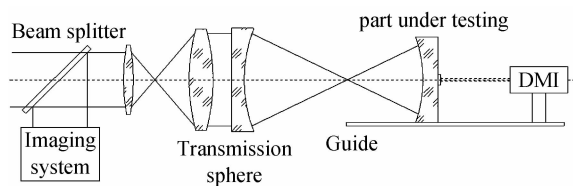


图 1 曲率半径干涉测量结构  
Fig. 1 Schematic diagram for radius measurement

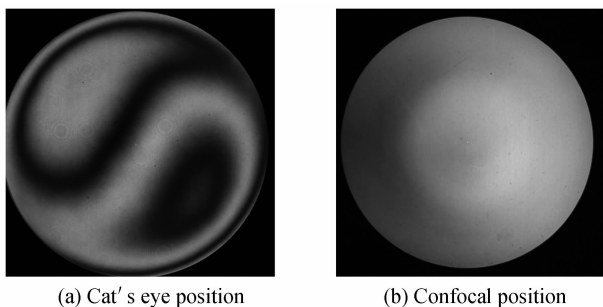


图 2 干涉条纹  
Fig. 2 Interferogram

## 2 定焦误差分析及合成

根据图 1 所示的曲率半径干涉测量原理图,可以分析得到影响曲率半径定焦准确度的因素主要有:移相干涉仪的影响,标准镜头透射波前误差,被测光学元件表面面形误差,调整误差,测长系统误差,环境及空气扰动的影响.下面针对所述几种误差源进行分析.

### 2.1 移相干涉仪

移相干涉仪对定焦准确度的影响主要来自激光光

源的不稳定性,移相算法及解包裹算法的非线性,以及成像系统畸变.其中,激光光源波长若不稳定,将会在参考光与被测光之间引入光程差,从而导致测量误差的产生;算法的非线性将会引入离焦项;而光束通过有畸变的成像系统后,将引入畸变误差,此时离焦项不再由实际面形拟合限定,而是由畸变后的面形数据拟合得到<sup>[9,16-18]</sup>.本文假设这三种误差源为一小量.

### 2.2 非理想球面波前

由于光学元件加工误差的存在,使得准直系统出射的平行平面光经标准镜头透射及被测光学元件反射后形成非理想球面波前.因而由非理想球面波前引入的定焦误差主要包括标准镜头透射波前误差及被测光学元件表面面形误差.在猫眼位置时,标准镜头透射波前会聚于被测光学元件表面中心位置,此时测量光束与被测表面重合面积很小,可视为被测表面面形对猫眼位置定焦的影响可忽略不计,因而猫眼位置处,测量得到的干涉条纹包含标准镜头透射波前误差及被测表面重合区域面形误差(可忽略);而在共焦位置时,测量得到的干涉条纹包含标准镜头透射波前误差及被测表面面形误差.以上误差可通过干涉测量得到的离焦量进行计算.

离焦量即 Power 值,指测量过程中实际波前与其最佳拟合球面在光轴方向的差值<sup>[8, 16]</sup>,其计算原理如图 3.

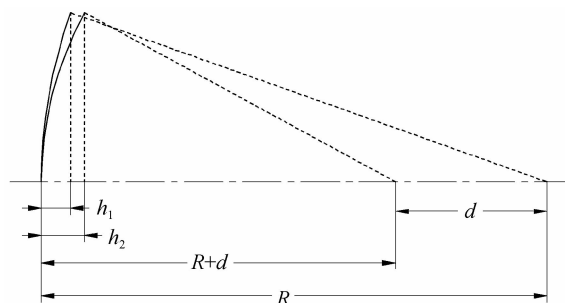


图 3 离焦量与矢高的关系  
Fig. 3 Relationship between power and sag

图 3 中,在出射光瞳处有两个球面波前,其中一个球面波前是由一个理想平面波经过入射光瞳后得到的,该波前在焦平面上产生一个焦点;另一个球面波前是由非理想平面波经过入射光瞳后得到,该波前的焦点在理想球面波焦点的  $\delta$  处.出射光瞳处的两球面波均存在矢高  $h_1$  及  $h_2$ ,这两个球面波矢高差等于波前间的离焦量  $W_{20}$ ,因而得到  $\delta$  与  $W_{20}$  的关系式近似为

$$W_{20} = h_2 - h_1 = \left(\frac{r^2}{2}\right) \left[\frac{1}{R+\delta} - \frac{1}{R}\right] = \left(\frac{r^2}{2}\right) \left[\frac{-\delta}{R^2 + R\delta}\right] \quad (1)$$

式中  $h_1$  及  $h_2$  分别为测量球面矢高及最佳拟合球面的矢高,  $2r$  为出瞳处口径.由于  $R^2$  远大于  $R\delta$ ,因此

$$W_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R}\right)^2 (-\delta) \quad (2)$$

当物距位于无穷远时,  $f_{\text{number}} \approx R/2r$  且  $R \approx f'$ , 其中  $f'$  为标准镜头的焦距,  $f_{\text{number}}$  为标准镜头测量时的  $F$  数. 此时式(2)变为

$$\Delta R_{\text{power}} = \delta = -8 \cdot (f_{\text{number}})^2 \cdot W_{20} \quad (3)$$

若波前是发散的, 则  $W_{20}$  为“负”且  $\Delta R_{\text{power}}$  为“正”. 根据式(3)可知, 离焦量所引入的半径偏差与离焦量成正比, 并且与标准镜头测量  $F$  数平方成正比.

在猫眼位置的实际测量中, 当测量光束恰好与被测表面瑕疵处重合时, 将会引入较大的猫眼位置定焦误差, 该测量结果可通过  $3\sigma$  法剔除.

### 2.3 调整误差

调整误差主要包括标准镜头和被测光学元件的调整误差, 其主要表现为被测光学元件的旋转和平移. 对于猫眼位置, 由于测试发生光路反转而不满足共光路条件, 导致其干涉测量结果对调整误差不敏感, 极易在检测结果中引入慧差等调整误差, 进而影响检测结果的准确性.

#### 2.3.1 被测光学元件的旋转

被测件在猫眼与共焦位置之间沿导轨轴向运动时, 在猫眼位置易发生俯仰  $\epsilon_x$  及偏摆  $\epsilon_y$ , 从而引入测量误差. 如图 4, 若测长系统测量轴线与被测件运动轴存在偏移量  $x_{\text{abbe}}, y_{\text{abbe}}$ , 被测件的俯仰和偏摆则会引入阿贝误差, 影响曲率半径测量结果. 引入的曲率半径偏差为

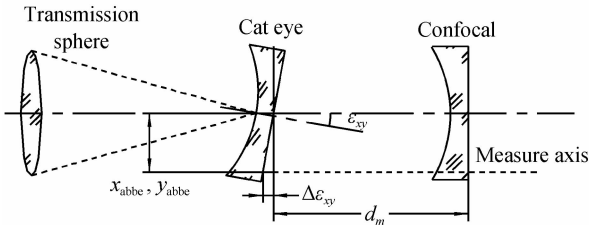


图 4 被测件旋转误差  $\epsilon_{xy}$   
Fig. 4 Rotation error  $\epsilon_{xy}$

$$\Delta R_{\epsilon_{xy}} = \sqrt{x_{\text{abbe}}^2 + y_{\text{abbe}}^2} \cdot \tan(\epsilon_{xy}) \quad (4)$$

由式(4)可发现, 在测量曲率半径前, 可先对导轨的旋转误差和阿贝距离进行标定, 根据式(4)对干涉仪的测量结果  $d_m$  进行补偿. 从而减小被测件运动过程中的测量误差.

#### 2.3.2 被测光学元件的平移

在曲率半径检测理想情况下, 测长系统的测量轴线应与被测件运动轴线同轴. 但实际他们之间存在一定夹角, 使被测件运动过程中发生径向平移. 若将被测件从猫眼位置移动到共焦位置的过程中, 两轴线之间的径向偏差为  $\delta_x, \delta_y$ , 则曲率半径的测量误差为

$$\Delta R_{\delta_{xy}} = R(1 - \cos \gamma), \text{ 其中 } \gamma = \arctan\left(\frac{\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}}{d_m}\right) \quad (5)$$

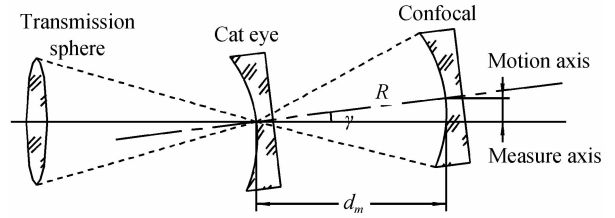


图 5 径向平移误差  $\delta_{xy}$   
Fig. 5 Shift error  $\delta_{xy}$

可以看出, 通过调整测量轴线与运动轴线至共轴, 可减小  $\gamma$ , 从而减小曲率半径的测量误差. 选用直线度优良的导轨, 经精密调整后, 夹角  $\gamma$  可小于  $0.5 \text{ mrad}^{[9]}$ . 此时由径向平移量引入的半径偏差  $\Delta R_{\delta_{xy}}$  约为  $0.1R \text{ ppm}$ .

#### 2.3.3 被测表面中心位置的径向偏移量

被测光学元件球心的径向定位偏移是指猫眼位置处标准镜头测量光束顶点与被测表面中心位置之间的径向偏移量, 如图 6.

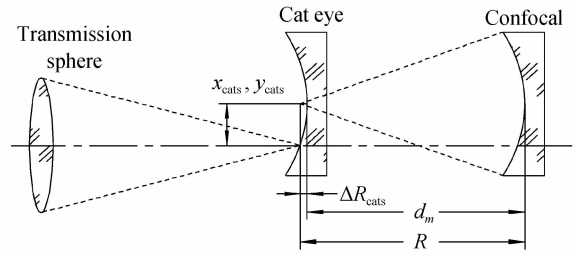


图 6 被测表面中心位置的径向偏移

Fig. 6 Shift in the center of measured surface

假设当被测件球心的径向偏移量为  $x_{\text{cats}}, y_{\text{cats}}$  时, 将引入曲率半径测量误差

$$\Delta R_{\text{cats}} = R \left[ 1 - \cos \left( \arctan \frac{\sqrt{x_{\text{cats}}^2 + y_{\text{cats}}^2}}{d_m} \right) \right] \approx \frac{x_{\text{cats}}^2 + y_{\text{cats}}^2}{2d_m} \quad (6)$$

与被测光学元件的径向平移量一样,  $\Delta R_{\delta_{xy}}$  与  $\Delta R_{\text{cats}}$  均为余弦误差, 补偿公式类似. 区别在于  $\Delta R_{\delta_{xy}}$  表明测长系统测量轴线与被测件运动轴线之间的相对平移关系, 在测长结果中引入余弦误差, 从而影响曲率半径测量结果;  $\Delta R_{\text{cats}}$  表明测量光束顶点与被测表面中心位置之间的偏移量, 直接影响被测件在共焦位置的定焦, 改变曲率半径测量结果.

### 2.4 测长系统、环境及气流扰动的影响

平移测长系统需要保证被测光学元件实现高准确度的轴向运动以及高准确度的测长定位, 其运动误差及热变形都会引入定位误差, 从而影响曲率半径测量结果, 具体表现为测长系统轴线、被测件的运动轴线与被测件光轴存在夹角, 及测量时猫眼及共焦位置环境参量不一致. 前者在已进行了讨论, 后者在稳定环境中测量时, 所引入的误差在  $\text{nm}$  级别, 可忽略不计. 气流扰动所引入的定焦误差为一随机量, 该误差可通过大

量重复性实验去除。

### 2.5 误差合成

综上所述,测长干涉仪测量值  $d_m$  与被测光学元件曲率半径  $R_0$  的关系为

$$d_m = R_0 \cdot \cos(\gamma) + \Delta R_{\text{power}} + \Delta R_{\text{cats}} + \Delta R_{\epsilon} + \Delta R_{\text{other}} \quad (7)$$

式中  $\cos(\gamma)$  由被测件径向平移量引起的;  $\Delta R_{\text{power}}$  由于干涉仪系统、标准镜头及被测表面的面形引起;  $\Delta R_{\text{cats}}$  由被测表面中心位置的径向偏移量引起;  $\Delta R_{\epsilon}$  由被测件旋转偏移量引起;  $\Delta R_{\text{other}}$  由测长干涉仪系统误差、环境及空气扰动误差引起,各参量由定焦误差分析可得。

## 3 对比实验

在曲率半径实际测量中,测长系统,环境及气流扰动对定焦误差的影响可通过误差补偿及重复性实验去除;而移相干涉仪、标准镜头透射波前、被测光学元件表面面形及调整误差的影响均可通过离焦量计算进行补偿。以通光口径  $D=120\text{ mm}$ , 曲率半径标称值  $R=-504.93\text{ mm}$  的 K9 材料光学样板为实验对象,置于测量光腔内稳定足够时间,排除温度及被测件自变形对测量结果的影响。然后利用商用 ZYGO 菲索干涉仪进行重复准确度测试,实验表明干涉仪对同一位置离焦量的测量重复准确度小于  $1\text{ nm}$ 。

将光学样板置于共焦位置并记录此时坐标为初始坐标,然后移动样板至猫眼位置,记录两位置处的离焦量。重复上述操作并保持初始坐标及移动距离  $d_m$  不变。得到图 7 所示的离焦量变化曲线及图 8 所示的曲率半径变化曲线。

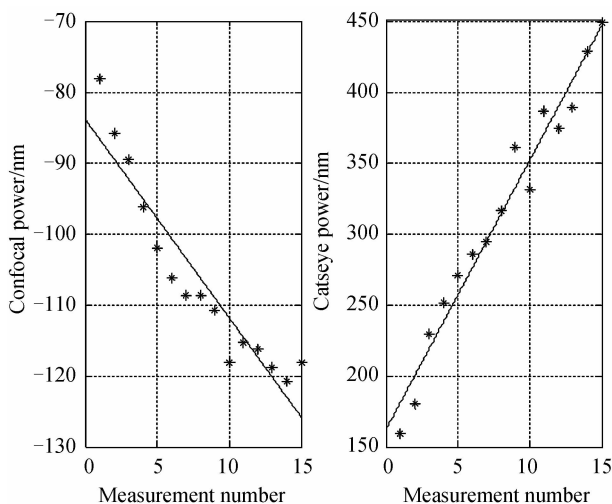


图 7 初始坐标及  $d_m$  恒定时离焦量变化曲线  
Fig. 7 Power trend as initial position and  $d_m$  fixed

测量得到的离焦量随着测量次数近似呈线性变化,每次测量将引入约  $-2.8\text{ nm}$  的共焦离焦量偏移;约  $18.5\text{ nm}$  的猫眼离焦量偏移。该偏移量与标准镜头透射波前、被测光学元件表面面形及调整误差有关,并且猫眼位置更加敏感。由图 8 可知,曲率半径也随测量

次数近似线性减小,15 次重复测量中由离焦量变化引入的曲率半径变化量为  $7.05\text{ }\mu\text{m}$ ,每次测量的曲率半径偏差近似为  $-0.47\text{ }\mu\text{m}$ 。

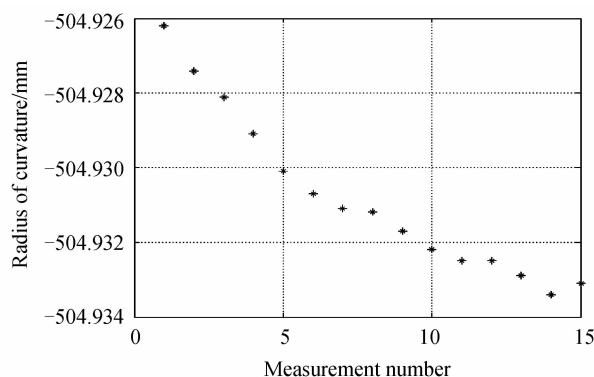


图 8 初始坐标及  $d_m$  恒定时曲率半径变化曲线  
Fig. 8 Radius trend as initial position and  $d_m$  fixed

为去除调整误差的影响,将光学样板置于共焦位置,调整光学元件保持共焦离焦量随机小量变化,然后移动光学样板至猫眼位置,重复上述操作并保持移动距离  $d_m$  不变。得到图 9 离焦量变化曲线和图 10 曲率半径变化曲线。

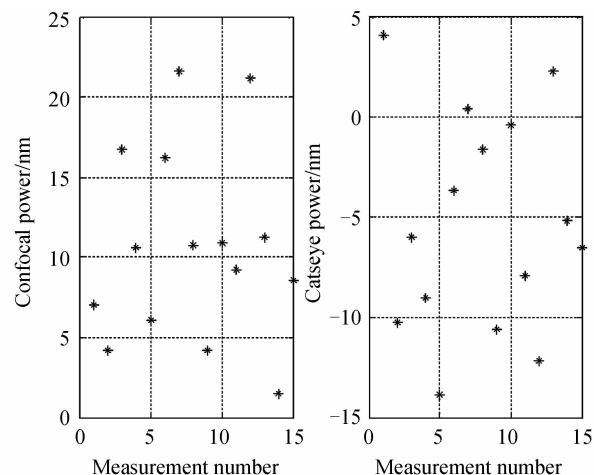


图 9 被测件调整后,  $d_m$  恒定时离焦量变化曲线  
Fig. 9 Power trend as  $d_m$  fixed after aligning

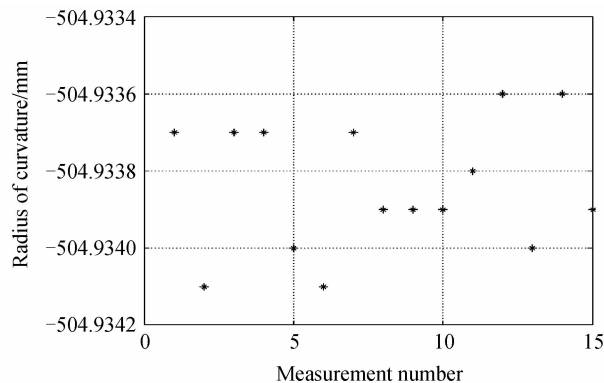


图 10 被测件调整后,  $d_m$  恒定时曲率半径变化曲线  
Fig. 10 Radius trend as  $d_m$  fixed after aligning

测量得到的离焦量及曲率半径随机变化,15 次重

复测量中由离焦量变化引入的曲率半径变化量为  $0.5\ \mu\text{m}$ ,远小于去除调整误差前的测量结果.该变化趋势只与标准镜头透射波前及被测光学元件表面面形有关.

## 4 结论

曲率半径干涉测量的定焦误差主要包括:移相干涉仪测量误差,标准镜头透射波前误差,被测光学元件表面面形误差,调整误差,测长系统误差,环境及空气扰动的影响.其中由于移相干涉仪测量误差、标准镜头透射波前、被测光学元件表面面形及调整误差的存在,曲率半径每次测量过后,被测件与标准镜头都会存在偏移量.由调整误差所引入的定焦误差最大,并呈线性变化趋势.而在每次测量前对光学元件进行调整过后,由调整误差引起的定焦误差会一定程度的去除.环境及空气扰动引入的定焦误差最小,与猫眼及其共焦位置实时测量的环境参量有关.

### 参考文献

- [1] DANIEL M. Optical shop testing[M]. Yang Li, Wu Fan, Wan Yong-jian, et al. transl. Beijing: China Machine Press, 2012.  
DANIEL M. 光学车间检测[M]. 杨力, 伍凡, 万勇建, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] ZHOU Xie-hai. Measurement of radius of curvature for optical spherical surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1984(6): 32-40.  
周学海. 光学球面曲率半径的测量[J]. 光学精密工程, 1984(6): 32-40.
- [3] GATES J W, A R C S, Sc M, D I C, et al. A precision spherometer[J]. *Journal of Scientific Instruments*, 1953, 31(2): 60-64.
- [4] CARNELL K, WELFORD W. A method for precision spherometry of concave surfaces[J]. *Journal of Physics E*, 1971, 4: 1060-1062.
- [5] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 32(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.
- [6] ZHAO C Y, RENE Z, JAMES H B. Measuring the radius of curvature of a spherical mirror with an interferometer and a laser tracker[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(9): 090506.
- [7] CAI X Y, CHANG S D, COSTEL F. Compact system for measurement of optical surfaces having a large radius of curvature[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(7): 073603.
- [8] LARS A S. Radius measurement by interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(9): 1961-1966.
- [9] TONY L S, ANGELA D D, CHRIS J E. Uncertainties in interferometric measurements of radius of curvature [C]. SPIE, 2001, 4451: 432-447.
- [10] TONY L S, CHRIS J E, ANGELA D D, et al. Displacement uncertainty in interferometric radius measurements[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 451-454.
- [11] LI Jia, QIU Li-rong, YANG Jia-miao. Gaussian filtering process on the confocal component measurement system data processing[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(2): 157-162.  
李佳, 邱丽荣, 杨佳苗. 共焦元件测量系统数据处理中的高斯滤波算法[J]. 光学技术, 2013, 39(2): 157-162.
- [12] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. 3rd Edition. New York: The McGraw-Hill Companies Inc., 2000.
- [13] WANG F S, TAN J B, ZHAO W Q. The optical probe using confocal technique for surface profile measurement [C]. SPIE, 2000, 4222: 194-197.
- [14] ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2004, 12: 5013-5021.
- [15] ZHAO W Q, QIU L R, SUN R D. Laser differential confocal radius measurement[J]. *Optics Express*, 2012, 18: 2345-2360.
- [16] TONY L S, HYO S K. Monte Carlo evaluation of periodic error uncertainty[J]. *Precision Engineering*, 2007, 31: 251-259.
- [17] TIAN Zhi-hui, SHI Zhen-guang, LIU Wei-qi, et al. High-accuracy measurement for radius of curvature and its uncertainties[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2013, 22(10): 2495-2501.  
田志辉, 史振广, 刘伟奇, 等. 曲率半径的高准确度测量及其不确定度[J]. 光学精密工程, 2013, 22(10): 2495-2501.
- [18] MIAO Er-long, ZHANG Jian, GU Yong-qiang, et al. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2029-2034.  
苗二龙, 张健, 谷勇强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高准确度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2029-2034.