

# 大口径标准球面镜组研制与应用

薛栋林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 为了实现大口径凸面反射镜检测,研究了大口径标准镜组的设计与研制技术。针对口径  $\Phi$  为 350 mm、焦距为 4400 mm 的标准球面镜组,完成了标准镜头设计分析、面形和曲率半径误差标定以及系统集成与实验验证。光学设计软件模拟分析结果表明镜头设计波像差达到  $0.0001\lambda$  [峰谷值(PV),  $\lambda=632.8$  nm],该标准镜头参考球面标准镜面形加工精度达到  $0.088\lambda$  (PV,  $\lambda=632.8$  nm)、 $0.006\lambda$  [均方根(RMS),  $\lambda=632.8$  nm],某项目  $\Phi$  为 320 mm、 $R$  为 4092 mm 的碳化硅凸面反射镜最终加工检测结果达到  $0.102\lambda$  (PV,  $\lambda=632.8$  nm)、 $0.011\lambda$  (RMS,  $\lambda=632.8$  nm)。结果表明采用该大口径标准球面波透镜组为大口径长曲率半径凸面反射镜提供了一种高精度检测的手段,解决了大口径长曲率半径凸面反射镜检测难题,采用该标准球面镜结合基于数字样板的非零位检测方法也可完成浅度非球面或自由曲面面形实时高精度检测。

**关键词** 光学制造;大口径;标准球面透镜组;长曲率半径;高精度检测

**中图分类号** TQ171.65; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0616001

## Manufacture and Application of Large Aperture Standard Transmission Spheres

Xue Donglin

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** In order to realize testing of a large aperture convex sphere, large aperture standard transmission spheres are designed and manufactured. The system focal length of 4400 mm,  $\Phi$  350 mm aperture are required. The design and performance comparison, surface quality and radius of curvature testing, large aperture SiC convex sphere surface testing are accomplished. The simulation result analysis of optical design software shows that the wavefront performance of the system design is  $0.0001\lambda$  [peak to valley (PV),  $\lambda=632.8$  nm], and it can offer a high-quality spherical wave and the reference spherical surface quality is up to  $0.088\lambda$  (PV,  $\lambda=632.8$  nm),  $0.006\lambda$  [root mean square (RMS),  $\lambda=632.8$  nm]. For a SiC convex sphere of  $\Phi$ 320 mm aperture and 4092 mm radius of curvature the manufactured results of the surface quality are up to  $0.102\lambda$  (PV,  $\lambda=632.8$  nm),  $0.011\lambda$  (RMS,  $\lambda=632.8$  nm). The results indicates that the large aperture standard transmission spheres are helpful for the testing large aperture convex sphere surface with large radius of curvature, the highly precision testing is accomplished only by standard sphere and non-null testing method based on digital mask, and the problems of large-aperture convex asphere or freeform mirror testing are solved.

**Key words** optical fabrication; large aperture; standard transmission spheres; large radius of curvature; high precision testing

**OCIS codes** 120.3940; 120.4630; 120.4800; 240.6700

## 1 引言

大口径、长曲率半径、凸反射镜面形高精度检测一直以来都是光学制造领域的难题和研究的热点,

采用传统样板法进行检测需要制造一对曲率半径相对应凸凹样板,样板的面形与曲率半径按等级有着不同的质量要求,要求光学制造者建立完备的样板

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013205)、国家自然科学基金重点项目(61210015)

作者简介: 薛栋林(1979—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计、高精度检测技术等方面的研究。

E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn

库,难度很大,可实现性不强。标准球波面透镜组能够产生高质量的标准球面波,透镜组中最后一面为标准球面,透镜组的焦点  $F'$  与该面的曲率中心  $C$  重合<sup>[1]</sup>。球面波在各向同性均匀介质中传输时,波面仍为球面,而曲率半径都不一样,相当于不同曲率的球面样板,它就能测试曲率半径变化范围很大的凸凹球面,克服了球面样板与半径一一对应的缺点。另外,由于标准球面透镜组测量球面面形的误差属非接触测量,不会损伤被检球面表面的光洁度,克服了球面样板接触测量的缺点。研制大口径长曲率半径标准镜组进行大口径球面检验时,标准球波面透镜组发出的标准球面波经被检球面反射,测试波面按原路返回,与其标准镜组最后的一个标准球面反射回的参考波面汇合,形成反映被检球面面形的干涉条纹<sup>[2-3]</sup>。

标准球面镜组包括大口径凹凸球面反射镜,在其研制过程中保证其曲率半径的准确性以及标准面的面形精度是保证其质量的关键。当前,测量光学球面曲率半径的方法有很多种,传统的方法有球径仪法、样板法等<sup>[4-11]</sup>。这些传统的方法设备简单、测试方便,适于现场检验。但存在主观、定量困难、灵敏度不高等缺点。此外,用干涉仪与光栅尺组成的测量设备可以精确实现对光学球面曲率半径的测量。但是,该方法很难满足长曲率半径曲面测量需求,需要超长行程、高精度的光栅尺制作成本非常昂贵。利用激光跟踪仪和激光干涉仪组合测量光学球面曲率半径的新方法,能够准确地实现对各种形状球面曲率半径的测量<sup>[12-13]</sup>。

本文完成了口径  $\Phi$  为 350 mm、焦距  $f$  为 4400 mm 标准镜组的设计、仿真分析、系统集成与大口径 SiC 凸面反射镜检测实验验证,为大口径、长曲率半径凸面反射镜面形检测提供了一种高精度测量方法。

## 2 光学设计与模拟仿真

某  $\Phi$  为 350 mm、 $f$  为 4400 mm 标准镜组产生高质量的标准球面波,透镜组中最后一面为标准球面,透镜组的焦点  $F'$  与该面的曲率中心  $C$  重合。标准镜组设计布局图见图 1,设计结果见表 1、图 2,设计残差达到  $0.0001\lambda$  [峰谷值(PV),  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ]、 $0.0000\lambda$  [均方根(RMS),  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ],能够获得理想的球面波。对某球面  $\Phi$  为 320 mm、 $R$  为 4000 mm 凸面进行检测仿真,大口径凸面检测布局见图 3,大口径凸面检测仿真结果见图 4,残差为  $0.0001\lambda$  (PV,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )、 $0.0000\lambda$  (RMS,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

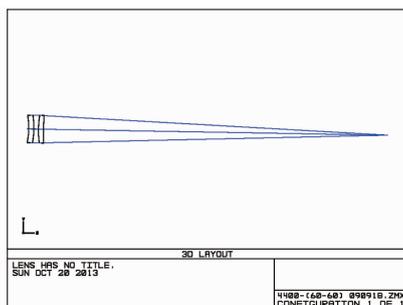


图 1 标准镜组设计布局图

Fig. 1 Layout design of standard transmission spheres

表 1 标准球面镜组设计参数

Table 1 Design parameters of standard transmission spheres

	Radius	Thickness / mm	Glass	Diameter / mm
1	-856.482	66	NBK7	350
2	-1022.217	60		360
3	123.9122	66	NBK7	364
4	4471.512			358

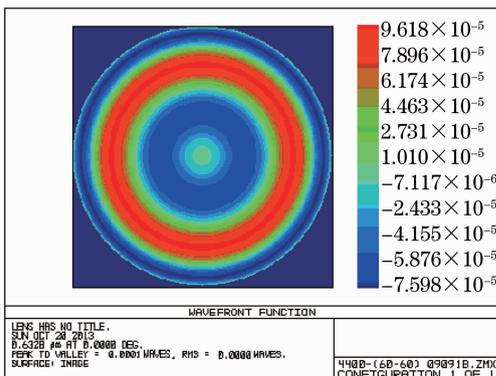
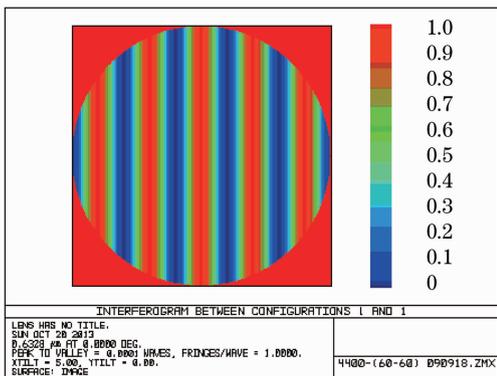


图 2 标准球面镜组设计结果

Fig. 2 Design results of standard transmission spheres

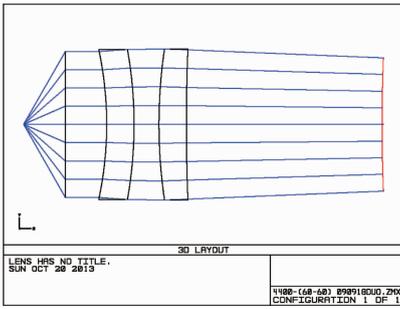


图 3 大口径凸面检测布局图

Fig. 3 Testing layout of large aperture convex mirror

### 3 标准镜组制造误差精密标定与控制

标准镜组参考波面与检测波面的共光路部分，在检测过程中实现共光路误差补偿，降低了制造精度需求，采用光学样板进行加工，在研磨过程中采用高精度三坐标进行表面轮廓测量控制曲率半径和面形，抛光后采用相同半径数值的凹面样板进行检测和面形控制，最终面形精度通过 Zygo 干涉仪进行任意子孔径测量和评估，采用激光跟踪仪和激光干涉仪组合测量实现曲率半径高精度测量与标定，各表面面形精度测量结果见图 5(a)~(c)。

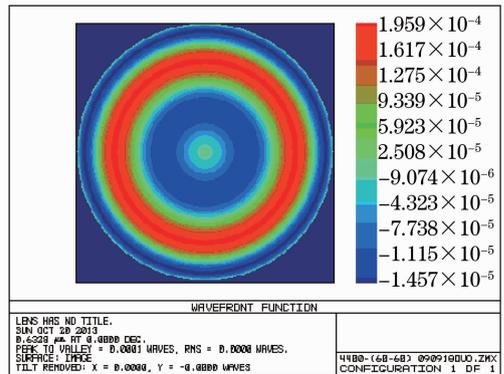
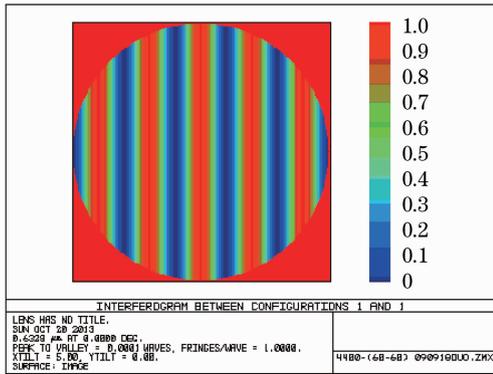


图 4 大口径凸面检测仿真结果

Fig. 4 Simulation results of large aperture convex mirrors testing

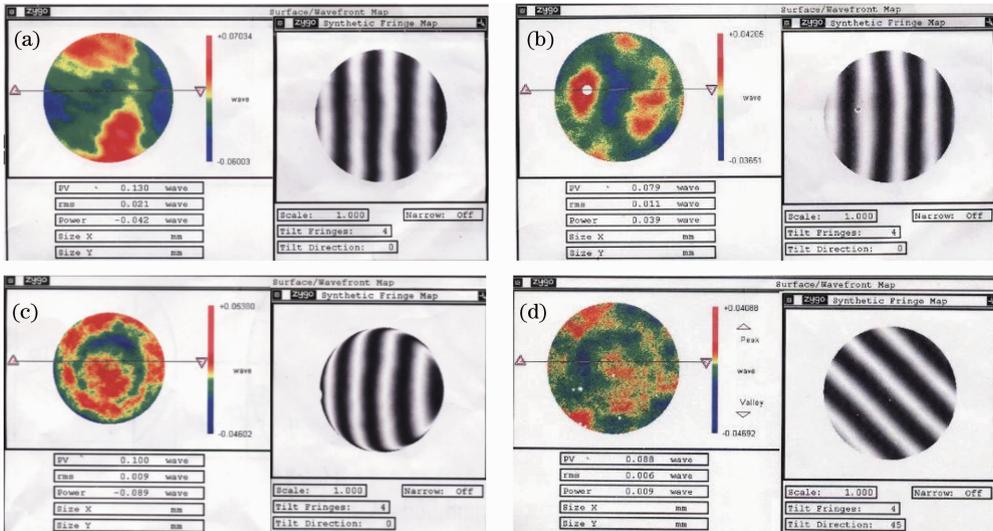


图 5 标准透镜组各面加工结果

Fig. 5 Process results of the surfaces of standard transmission spheres

标准面是系统中关键质量控制点和测量精度的标准，其面形精度需要严格保证和控制，采用 Zygo 干涉仪进行全口径面形测量，标准镜头参考球面标准镜面形加工精度达到  $0.088\lambda$  (PV,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )、 $0.006\lambda$  (RMS,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )，见图 5 (d)，能够满足大口径凸面反射镜高精度检测需求。

通过扩充激光干涉仪和激光跟踪仪的现有功

能，利用激光跟踪仪和激光干涉仪组合测量能够准确地实现对各种形状球面曲率半径的测量<sup>[12]</sup>。测量光学球面曲率半径的装置主要包括激光干涉仪、激光跟踪仪、待测球面镜和调整结构等。激光跟踪仪是一种高精度测量设备，它使用两个旋转角编码器和一个激光距离测量系统，以跟踪和测量靶标球 3 的位置。靶标球 3 是由三块互成直角的平面反射

镜组成的角反射镜,且三个反射镜的交点为靶标球的球心,因此反射光束的方向将平行于入射光束的方向,激光跟踪仪通过跟踪和调节使入射光点处于靶标球的球心上,角反射镜精确固定在加工球体内,球体外表面到中心的距离已知(即球体半径),采用激光跟踪仪可以精确测量物体之间的相对位置关系,将激光干涉仪和激光跟踪仪两者组合起来实现光学球面曲率半径的精确测量。

调节光路使干涉仪出射球面波前的焦点和激光跟踪仪标准靶标球的曲率中心点重合,通过激光跟踪仪精确定位测量此时的焦点位置坐标,再调整待测球面镜与干涉仪的相对位置,使待测球面镜达到零条纹状态,通过激光跟踪仪测定此时待测球面镜面上多个测量点的位置坐标,通过计算分析焦点与镜面之间的位置关系即可获得待测球面镜的曲率半径。图 6 是测量光学凸球面曲率半径的装置结构示意图。该装置主要包括激光干涉仪 1、激光跟踪仪 2、靶标球 3、调整机构 4、调整结构 5、调整结构 6 和待测光学球面 7。测试装备图见图 7、凸球面半径测量装置图见图 8。

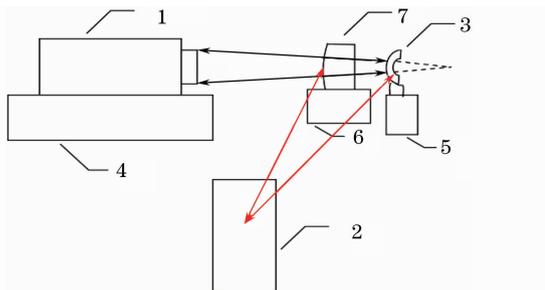


图 6 凸球面测量实验装置示意图

Fig. 6 Setup sketch for testing the convex sphere

此时干涉仪出射波前的焦点与待测球面镜的曲率中心重合,设定焦点坐标为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ,设定

表 2 标准球面透镜组制造结果与设计结果对比

Table 2 Comparison of the fabrication data and design data of standard transmission spheres

	Radius		Thickness /mm		Glass	Diameter /mm
	Design results and tolerance	Final results	Design results and tolerance	Final results		
Surface 1	$-856.482 \pm 1.5$	-855.33	$66.0 \pm 0.1$	65.96	NBK7	350
Surface 2	$-1022.217 \pm 2.0$	-1022.28	$60.0 \pm 0.02$	60.010		360
Surface 3	$1239.122 \pm 2.0$	1239.41	$66.0 \pm 0.1$	66.06	NBK7	364
Surface 4	$4471.512 \pm 4.0$	4469.57				358

#### 4 大口径 SiC 凸反射镜检测实验

采用该标准球面透镜组对某 SiC 凸反射镜  $\Phi$  为 320 mm,  $R$  为 4092 mm 进行面形检测,检测装置见

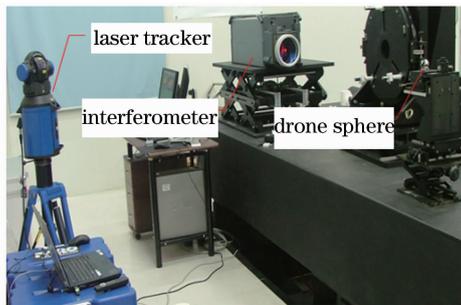


图 7 测试装备图

Fig. 7 Setup of testing

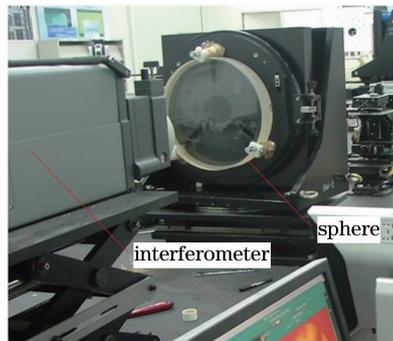


图 8 凸球面半径测量装置图

Fig. 8 Setup for testing the radius of convex sphere

所测定的镜面上的坐标点的坐标为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 。空间两点之间的距离表示为

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (1)$$

根据(1)式可以求解得到待测球面镜曲率半径。对标准球面透镜组各镜面进行半径测量和数据处理后<sup>[12-13]</sup>,将处理结果结合透镜厚度数据代入光学设计软件进行分析复核,复核结果见表 2,标准球面透镜组综合制造标定精度分析见表 3,综合制造标定精度优于 $\lambda/130$ (RMS, $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ),达到商用高精度标准镜头的质量等级,满足使用要求。

图 9,检测结果见图 10,凸面碳化硅反射镜最终加工检测结果达到 $0.102\lambda$ (PV, $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )、 $0.011\lambda$ (RMS, $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )。

表 3 标准球面镜组综合制造标定结果

Table 3 Analysis results of standard transmission spheres

Item	Analysis results (RMS)
Thickness	0.001λ
Radius (surface1-4)	0.003λ
Decenter (surface1-4)	0.001λ
Homogeneity	0.002λ
Surface irregularity (surface1-3)	0.003λ
Surface irregularity (surface4)	0.006λ
Final results ( $\Delta w$ , λ, RMS)	$\sqrt{\sum_1^6 \Delta w^2} = 0.0077$

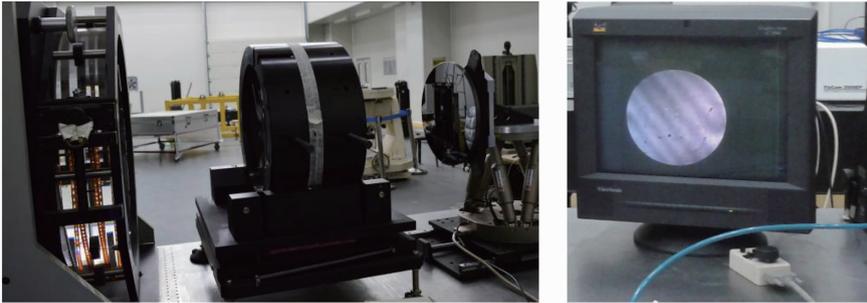


图 9 碳化硅凸面反射镜检测装置

Fig. 9 Setup for testing the SiC convex sphere

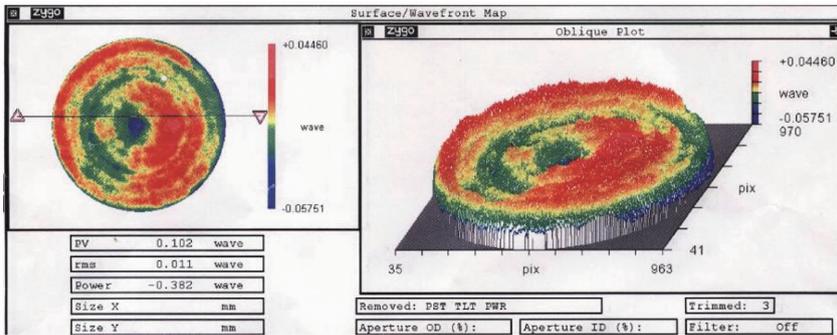


图 10 碳化硅凸面反射镜最终检测结果

Fig. 10 Final results of the SiC convex sphere

## 5 结 论

针对口径 350 mm、焦距 4400 mm 的标准球面镜组,完成了标准镜头设计分析、面形和曲率半径误差标定、系统集成与大口径 SiC 凸面反射镜高精度面形检测试验验证。光学设计软件模拟分析结果表明镜头设计波像差达到 0.0001λ (PV, λ = 632.8 nm),标准镜头参考球面标准镜面形加工精度达到 0.088λ (PV, λ = 632.8 nm)、0.006λ (RMS, λ = 632.8 nm),满足大口径反射镜高精度检测需求,对于某项目 Φ 为 320 mm、R 为 4092mm 的凸面碳化硅反射镜最终加工检测结果达到 0.102λ (PV, λ = 632.8 nm)、0.011λ (RMS, λ = 632.8 nm)。

结果表明采用该大口径标准球面波透镜组为大

口径长曲率半径凸面反射镜提供了一种高精度检测的手段,解决了大口径长曲率半径凸面反射镜检测难题,具有工程可实现性强、性能优越等一系列优点;此外,采用标准球面镜组结合基于数字样板的非零位检测方法也可完成浅度非球面或自由曲面实时高精度检测,为大口径凸非球面检测拓展应用奠定了基础。

## 参 考 文 献

- Gao Zhishan. Analysis of coincidence tolerance between F' and C for the transmission spheres with small F-number[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 793-796.  
高志山. 小 F 数标准球波面透镜组的 F'C 重合误差分析[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 793-796.
- Xu Jiajun, Xing Tingwen. Analysis of two-dimensional pinhole

- vector diffraction in visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1205003.
- 许嘉俊, 邢廷文. 可见光二维小孔矢量衍射分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1205003.
- 3 Xu Jiajuan, Xing Tingwen, Xu Fuchao. Calibration of the system errors in pinhole diffracted interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712003.
- 许嘉俊, 邢廷文, 徐富超. 点衍射干涉仪系统误差标定[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0712003.
- 4 Zhu Xiangbing, Chen Jin, Deng Shanxi, *et al.*. Aberrations in complex spectral instruments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 116—120.
- 朱向冰, 陈 瑾, 邓善熙, 等. 复杂分光仪器中的像差研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(1): 116—120.
- 5 Lin Xudong, Chen Tao, Ming Ming, *et al.*. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 75—82.
- 林旭东, 陈 涛, 明 名, 等. 球面拼接镜的相对曲率半径测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 75—82.
- 6 X Y Cai, S D Chang, C Fluerru. Compact system for measurement of optical surfaces having a large radius of curvature [J]. *Opt Eng*, 2006, 45(7): 073603.
- 7 N Gardner, A Davies. Self-calibration for microrefractive lens measurements[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(3): 033603.
- 8 Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong, *et al.*. Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres[J]. *Chinese Journal of 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.
- 9 Wang Qing, Xu Xinhua. Precision analysis of measurement of radius of curvature by interferometer[J]. *Journal of Southeast University*, 2009, 39(11): 55—59.
- 王 青, 徐新华. 干涉仪测量球面曲率半径的精度分析[J]. *东南大学学报*, 2009, 39(11): 55—59.
- 10 L A Selbeg. Radius measurement by interferometry [J]. *Opt Eng*, 1992, 31(9): 1961—1966.
- 11 Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu, *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese J Laser*, 2009, 36(5): 1156—1159.
- 王利娟, 刘立人, 栾 竹, 等. 相移雅满横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1156—1159.
- 12 Wang Xiaokun, Zheng Ligong. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 08120101.
- 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.
- 13 Yan Chengzhi, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, *et al.*. Time delay error in optical low coherence interferometry[J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(1): 0108003.
- 闫成至, 李尚远, 郑小平, 等. 低相干光干涉法延时测量中的误差分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0108003.

栏目编辑: 韩 峰