

文章编号 1004-924X(2010)01-069-06

使用红外干涉仪测量非球面面形

贺俊^{1,2}, 陈磊¹

- (1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210014;
2. 中国兵器工业集团 南京北方信息产业集团, 江苏 南京 210022)

摘要:提出用红外干涉仪在长波工作($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$)的优点检测非球面面形。首先,通过移相算法,使用泰曼型红外干涉仪测量出非球面与标准拟合球面之间的波像差;然后,根据非球面的矢高方程计算出非球面与标准拟合球面之间波像差的理论值,通过比较这两个值,计算出非球面的面形偏差。实验结果表明,使用红外干涉仪测量的非球面与标准拟合球面之间的波像差为 $8.64\ \mu\text{m(PV)}$,与理论波像差($8.11\ \mu\text{m}$)比较接近,测得非球面面形偏差为 $1.20\ \mu\text{m(PV)}$ 。为了验证这一方法的准确性,使用计算全息图(CGH)作为补偿镜在可见光干涉仪上测量了同一块非球面,两者测量结果比较吻合。结果表明,此方法有比较强的通用性,可以用于非球面在加工过程中的测试。

关键词:光学测量;非球面;红外干涉仪;波像差

中图分类号: TN216; TH744.3 **文献标识码:** A

Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer

HE Jun^{1,2}, CHEN Lei¹

- (1. *Institute of Electronic Engineering & Photo-electric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014, China;*
2. *Nanjing North Information Industrialization Group Corporation, Nanjing 210022, China*)

Abstract: The aspheric surfaces are measured by an infrared interferometer with a long working wavelength ($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$). By using the phase-shifting infrared interferometer, the wavefront aberration between aspheric wavefront and reference spherical wavefront is measured. Then, the theoretical value of the wavefront aberration is computed based on the aspheric surface equation. Finally, the surface deviation of tested asphere is obtained by subtraction of the theoretical wavefront aberration from the measured one. Experimental results show that the measured wavefront aberration is $8.64\ \mu\text{m}$ (PV), which is close to the theoretical wavefront aberration ($8.11\ \mu\text{m}$). Furthermore, the aspheric surface deviation is $1.20\ \mu\text{m(PV)}$. In order to verify the accuracy of this method, the same asphere is measured by using a Computer Generated Hologram(CGH) method, and the results show that the two methods are coincident well. It is concluded that the method has advantages of easy operation and good flexibility, and can meet the measurement requirement of the aspheric surface manufacture.

Key words: optical measurement; aspheric surface; infrared interferometer; wavefront aberration

收稿日期:2009-04-14;修订日期:2009-06-19.

基金项目:国家教育部博士点基金资助项目(No. 20070288010);兵器预研支撑基金项目(No. 62301110116)

1 引言

在光学设计中采用非球面元件不仅能增加光学设计的自由度,而且可以改善像质,提高光学性能,减小外形尺寸和重量,简化结构,有利于校正除场曲以外的各种单色像差,因此,随着现代光学的发展,非球面光学元件已经被越来越广泛地使用在平版印刷系统、照相透镜、天文望远镜及眼镜等复杂的光学系统中。现在,在天文仪器和遥感观测光学系统中,非球面的光学元件用的越来越多,但是非球面元件的制造必须与精确的非球面元件的检测技术相结合才能得到合格的非球面,所以非球面元件的检测显得尤为重要^[1]。

干涉法是测量非球面面形的一种有效而快捷的方法^[2-4],其中又分为零位检测和非零位检测两种。零位检测中最常用的方法是计算机全息法^[5-7],即将计算全息图(CGH)作为全息样板,可再现标准非球面波面,与被测非球面波面进行比较干涉,获得带有被测量面形偏差信息的干涉图,对之进行处理即可实现对各种非球面面形偏差的测量;但是制作 CGH 价格昂贵,并且一个 CGH 只能用来检测相对其参数特定的一种非球面,通用性不强。非零位检测使用可见光干涉仪进行测量,只能测量一些浅度非球面^[8],当非球面和标准球面之间的偏差比较大时,产生的干涉条纹会太密而无法进行计算和分析。使用 CO₂ 激光器为光源的红外干涉仪来测量非球面面形可以大大减小产生的干涉条纹的数目,使条纹足够用来采样和计算^[9],又因为 CO₂ 激光波长为 10.6 μm,是普通可见光波长的 17 倍,还增加了干涉仪的计量尺度。本文利用自行研制的长波长红外干涉仪测量非球面,首先测量出非球面与标准拟合球面波像差,然后将其与理论计算得到的波像差相减来得到非球面面形。

2 非球面与最佳拟合球面的波像差计算

2.1 最佳拟合球面的确定

已知非球面的矢高方程是

$$z = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - (1+K)x^2}} + a_2 x^4 + a_3 x^6 \dots + a_n x^{2n}, \quad (1)$$

其中 K 为 $-e^2$, e 为偏心率, R 是非球面的顶点曲率半径, x 是对应计算点到非球面中心轴的垂直距离, a_n 是非球面系数。

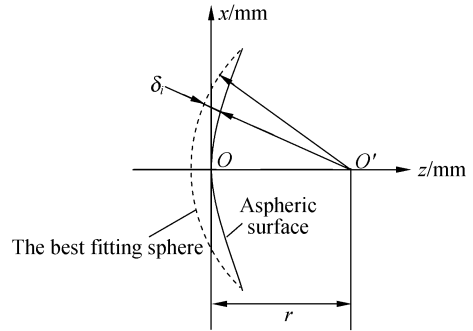


图 1 最佳拟合球面的计算

Fig. 1 Calculation of the best fitting sphere

寻找其最佳拟合球面的计算方法是:将非球面固定于坐标系中,设定各种位置和半径可变的球面,计算非球面与不同球面沿后者法线偏离量 δ_i 的最大值,找出所有最大值中的最小值,此时的球面即为最佳拟合球面。如图 1 所示,非球面顶点在坐标原点 O , r 为原点到最佳拟合球面球心 O' 的距离, R_0 为最佳拟合球面半径。此方法就是寻找 r 和 R_0 的值以确定最佳拟合球面,使其满足:

$$\delta_{\max} = \max(R_0 - \sqrt{(z_i - r)^2 + x_i^2}) = \min. \quad (2)$$

若 r 确定,最佳拟合球面的球心位置就确定了,式(2)根号内的最小值即可求出,非球面到球心的最小距离就确定了,最大偏离量随 R_0 的减小而减小。很明显,当 r 接近 R_0 时,最小的最大偏离量出现在最佳拟合球面与非球面边缘相交的情况下。在此情况下,设非球面边缘点的坐标为 (z_1, x_1) ,由于边缘点的偏离量为 0,则有 $R_0 = \sqrt{(z_1 - r)^2 + x_1^2}$ 。此时最佳拟合球面只有一个参数 r 可变。通过计算可以发现,当 $r = R_0$ 时,可得到最大偏离量的最小值^[10],最佳拟合球面就是过非球面顶点和边缘点的球面。

2.2 轴向偏差与波像差之间的关系

由以上分析可知,最佳拟合球面的方程为

$$R_0 = \sqrt{(z - R_0)^2 + x^2}, \quad (3)$$

式(3)可写成

$$z = R_0 - \sqrt{R_0^2 - x^2}, \quad (4)$$

$$\Delta l(x) = z_A - z_S = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - (1+K)x^2}} + a_2 x^4 + a_3 x^6 \dots + a_n x^{2n} - R_0 + \sqrt{R_0^2 - x^2}, \quad (5)$$

式中 z_A 表示非球面的矢高值, z_S 表示最佳拟合球面的矢高值。由式(5)所求得的是沿 z 轴方向的偏差,并不是所需要的非球面与最佳拟合球面的波像差,所以还需确定轴向偏差与波像差之间的关系。

由图2可知, $PD = \sqrt{R_0^2 - OD^2} - \Delta l$, $OD = x$,
 $OP = \sqrt{PD^2 + OD^2}$, 则有:

$$\Delta s(x) = R_0 - OP = R_0 - \sqrt{(\sqrt{R_0^2 - x^2} - \Delta l(x))^2 + x^2}, \quad (6)$$

式中, $\Delta s(x)$ 表示非球面与参考球面沿后者法线方向的偏差, $\Delta l(x)$ 则表示非球面与参考球面沿 z 轴方向的偏差, R_0 表示非球面顶点的曲率半径。将式(5)求得的 $\Delta l(x)$ 带入式(6)就可以求得

$$\begin{aligned} w_R(x, y) &= 2\Delta s(x, y) = 2(R_0 - \sqrt{(\sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} - \Delta l(x, y))^2 + (x^2 + y^2)}) = \\ &2 \left[R_0 - \sqrt{\left(R_0 - \frac{(x^2 + y^2)}{R + \sqrt{R^2 - (1+K)(x^2 + y^2)}} + a_2(x^2 + y^2)^2 \dots + a_n(x^2 + y^2)^n \right)^2 + (x^2 + y^2)} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

3 非球面面形偏差计算

3.1 用红外干涉仪测量非球面与参考球面的波像差

调整红外干涉仪,得到非球面的特征干涉图,再通过四步移向算法就可以得到非球面与标准拟合面的相位差为^[11]:

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}}{I_0 - I_\pi}, \quad (8)$$

只需分别测出 I_0 , $I_{\pi/2}$, I_π , $I_{3\pi/2}$ 的值即可算出 $\Phi(x, y)$ 的值,从而也可得到 $w_T(x, y)$ 。

3.2 非球面面形计算

图3是使用红外干涉仪测量非球面面形的实验装置,其红外干涉仪的具体构造与光路调整请详见文献[12-13]。调整干涉仪,得出清晰的干涉图。由式(8)得到非球面特征干涉图的波像差数据 $w_T(x, y)$,将其与理论的波像差数据 $\Delta s(x, y)$

而由式(1)可以求得非球面的矢高值,那么非球面与最佳拟合球面的偏差可以写成:

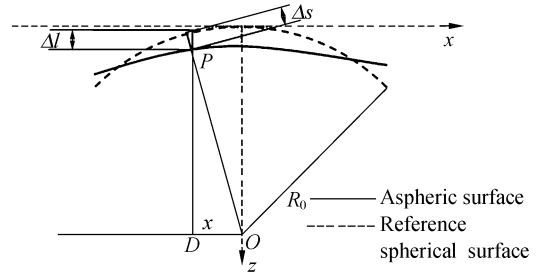


图2 轴向偏差与波像差之间关系

Fig. 2 Relation between axial deviation and wavefront aberration

非球面与最佳拟合球面的波像差 $w_R(x)$ 。扩展到三维情况有

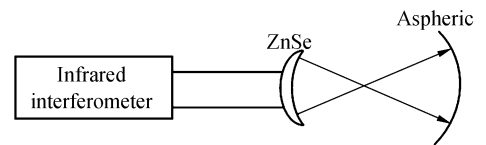


图3 非球面测量实验装置图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

比较就可以获得非球面的面形数据。由于在实际测量中,被检非球面的中心点与标准透镜的会聚点的调整会有偏差,导致测量数据中出现离焦,同时被检非球面的中心的切平面也不可能调整到与光轴严格垂直的位置,导致测量数据中出现倾斜,因此,波像差 $w_T(x, y)$ 必然包含这些调整误差,在实际计算中需要减去这些调整误差。设 $w_T(x, y)$ 可以表示为

$$w_T(x, y) = w_0(x, y) + K_x x + K_y y + D(x^2 + y^2), \quad (9)$$

式(9)中, $w_0(x, y)$ 为不带调整误差的非球面与标准球面相比较的波像差数据, K_x, K_y, D 分别为 x, y 方向上的倾斜系数及离焦系数。

因此, 非球面面形偏差 $w_F(x, y)$ 为

$$w_F(x, y) = \frac{1}{2}(w_0(x, y) - w_R(x, y)). \quad (10)$$

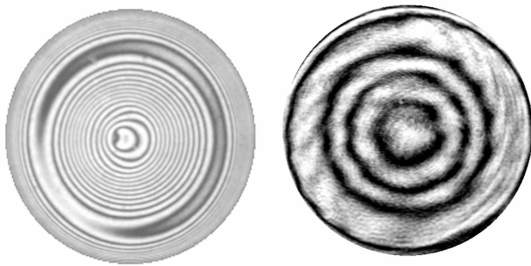
4 实验结果与讨论

本文对口径为 74 mm 的非球面进行了面形测量, 该非球面方程为:

$$z = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - x^2}} + a_2 x^4 + a_3 x^6, \quad (14)$$

式中, $R = 156.47$ mm, 系数 $a_2 = * * * \times 10^{-8}$, $a_3 = * * * \times 10^{-12}$ 。

如果使用可见光干涉仪进行测量, 由于非球面与标准球面之间的偏差较大, 以致产生的干涉条纹太密, 如图 4(a) 所示, 根本就无法进行计算; 而使用 CO_2 红外干涉仪进行测量时, 由于其工作波长比较长 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$), 约为 He-Ne 激光波长 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 的 17 倍, 其产生的干涉图(如图 4(b) 所示)可以通过移相法进行检测。



(a) 可见光干涉图 (b) CO_2 红外干涉图

(a) By visible interferometer (b) By CO_2 infrared interferometer

图 4 非球面干涉图

Fig. 4 Interferogram of aspheric surface

非球面的顶点曲率半径是 156.47 mm, 口径是 74 mm。这里选取焦距 $f = 50.8$ mm, 口径 $\Phi = 25.4$ mm 的 ZnSe 透镜作为标准透镜, 所提供的球面波可以覆盖非球面的全口径。实验采用泰曼型红外干涉仪, 如图 5 所示, 待测非球面所需的标准球面波由 ZnSe 透镜提供。取测量口径为 74 mm。

非球面测量结果如图 6(a) 所示, 其波像差的 PV 值为 $8.64 \mu\text{m}$; 根据非球面方程计算的理论结

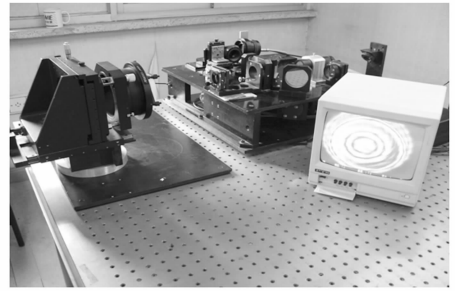
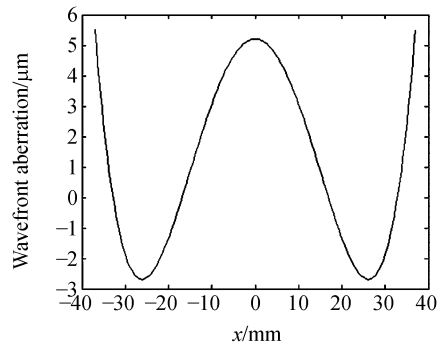


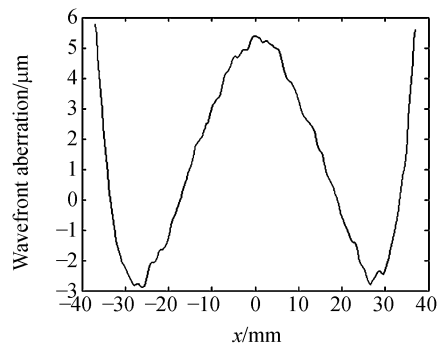
图 5 非球面测量实验装置照片

Fig. 5 Photo of aspherical surface testing setup



(a) 理论结果

(a) Theoretical result



(b) 测量结果

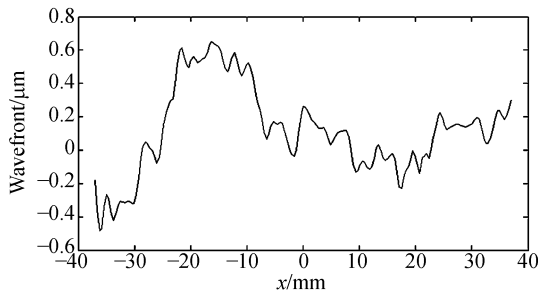
(b) Measured result

图 6 非球面与标准拟合球面之间波像差的测量结果与理论结果

Fig. 6 Theoretical and measurement results of wavefront aberration between aspheric surface and spheric surface

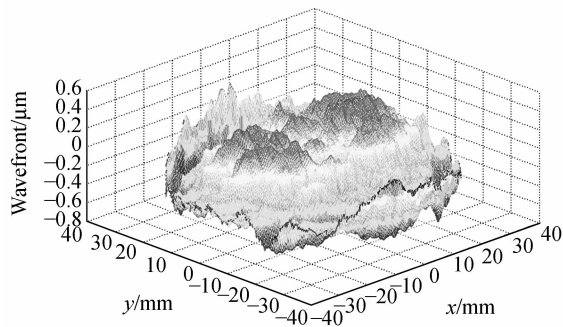
果如图 6b 所示, 其 PV 值为 $8.11 \mu\text{m}$, 测量值于理论值间的相对误差为 0.065。

用非球面与标准球面偏差的测量值和理论值相减, 就可以得到非球面的面形数据, 如图 7 为非



(a)非球面面形的一维曲线

(a)One dimensional curve of aspheric surface



(b)非球面面形的三维波面图

(b)Three dimensional wavefront of aspheric surface

图 7 非球面面形测量结果

Fig. 7 Results of aspheric surface measurement

球面面形数据的一维曲线和三维波面图。结果显示非球面面形偏差 PV 值为 $1.20 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.262 \mu\text{m}$ 。

为了验证此方法的可靠性,本文用 CGH 作为补偿镜在可见光干涉仪上对同一块非球面进行了测量,其结果如图 8 所示,非球面面形偏差为 $0.815 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.161 \mu\text{m}$ 。由于使用 CGH 方法测量非球面时,其有效测量口径为 67 mm ,小于红外干涉仪测量的测量口径,因此它的测量值偏小。如果将红外干涉仪的测量口径缩小到 67 mm ,那么其测量的非球面面形偏差 PV 值为 $0.94 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.188 \mu\text{m}$ 。可以认为两者的测量结果是一致的。

通过 Zygo GPI xp 干涉仪可测得红外干涉仪中参考反射镜的面形偏差 $PV = 0.160\lambda_1$ ($\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$),在红外干涉仪中只相当于 $\lambda/100$ (λ

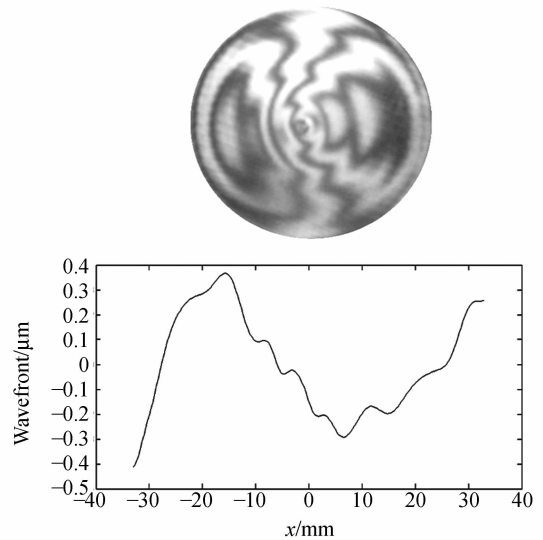


图 8 使用 CGH 测量非球面的结果

Fig. 8 Result of aspheric surface measured by CGH

$= 10.6 \mu\text{m}$)。为了标定红外干涉仪的系统误差,将图 3 中的被测非球面换成高质量的球面镜。采用 Zygo 干涉仪的标准球面镜 ($\Phi = 37 \text{ mm}$, $f/0.68$),其面形偏差 $PV = \lambda_1/20$ ($\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$),在红外干涉仪中只相当于 $\lambda/335$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)。此时测量的波面偏差就可以认为是红外干涉仪的系统偏差,测量结果为 $PV = 0.056\lambda$, $RMS = 0.009\lambda$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$),重复测量 100 次,系统测量的重复性为 0.003λ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)。

5 结 论

本文使用自行研制的长波长红外干涉仪直接检测了非球面面形,得到了非球面与标准拟合球面之间的波像差;将所得到的波像差与理论波像差做比较,得到了非球面面形。实验结果显示,所测非球面面形偏差 PV 值为 $1.20 \mu\text{m}$, RMS 值为 $0.262 \mu\text{m}$ 。通过使用 CGH 测量同一块非球面验证了该方法的可靠性。此方法操作简单,可以测量与标准球面偏差在 $10 \mu\text{m}$ 量级的非球面,具有较强的通用性。此外,利用红外干涉仪长波长的优点,在非球面制作中的精磨阶段就可以对它的面形进行检测和指导加工。

参考文献:

- [1] 张斌,王鸣,马力. 非球面的光学测试技术[J]. 南昌大学学报(工科版),2003,25(2):51-54.
ZHANG B, WANG M, MA L. Optical testing technique for aspherical surface[J]. *Journal of Nanchang University*,2003,25(2):51-54. (in Chinese)
- [2] 高宏,辛企明,李爱民,等. 非球面干涉测量方法的原理误差分析[J]. 应用光学,1993,14(3):61-64.
GAO H, XIN Q M, LI A M, *et al.*. Error analysis of interferometric method for aspheric surface testing[J]. *Journal of Applied Optics*, 1993,14(3):61-64. (in Chinese)
- [3] WYANT J C. Interferometric testing of aspheric surface[J]. *SPIE*, 1987,816:19-39.
- [4] 薛栋林,张忠玉,郑立功,等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2491-2496.
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHENG L G, *et al.*. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2491-2496. (in Chinese)
- [5] WYANT J C, BENNETT V P. Computer generated holograms test aspheric optics[J]. *Applied Optics*, 1992,31(12):2833-2839.
- [6] CHRISTOF P, STEPHAN R. Computer-generated holograms in interferometric testing[J]. *Opt. Eng.*, 2004,43(11):2534-2540.
- [7] 卢振武,刘华,李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测[J]. 光学精密工程,2004,12(6):555-559.
LU ZH W, LIU H, LI F Y. Aspheric surface testing with CGH on curved surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6):555-559. (in Chinese)
- [8] 王孝坤,王丽辉,张学军. 干涉法实时测量浅度非球面技术[J]. 光学精密工程,2008,16(2):184-189.
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing of weak aspheric surface by real-time interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):184-189. (in Chinese)
- [9] GAO ZH SH, CHEN J B, CHEN L. Use long wavelength(10.6 μm) interferometer to test a torus [J]. *SPIE*, 1998, 3557:348-352.
- [10] 刘惠兰,沙定国,郝群,等. 一种高次光学非球面度的计算方法[J]. 光电工程,2004,31(6):44-47.
LIU H L, SHA D G, HAO Q, *et al.*. A method for calculating asphericity of high-order optical aspheric surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004,31(6):44-47. (in Chinese)
- [11] De STEFANO P R, WESTERN A B, STAHL H P, *et al.*. Design review of infrared phase-shifting interferometer[J]. *SPIE*, 1992,1779:35-46.
- [12] 贺俊,王青,陈磊. 移相式泰曼-格林红外干涉仪调试技术[J]. 红外与激光工程,2008,37(3):516-520.
HE J, WANG Q, CHEN L. Alignment of Twyman-Green infrared phase-shifting interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3):516-520. (in Chinese)
- [13] 贺俊,王青,高志山,等. 移相式泰曼型 CO₂ 激光干涉仪的研究[J]. 红外与激光工程,2008,37(增刊):55-59.
HE J, WANG Q, GAO ZH S, *et al.*. The investigation of Twyman phase-shifting CO₂ laser interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,37(supp.):55-59. (in Chinese)

作者简介:



贺俊(1978—),男,江苏泰州人,博士研究生,2000年于南京师范大学获得学士学位,2005年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。E-mail: hejun-cherry@163.com

导师简介:



陈磊(1964—),男,江苏南京人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。E-mail:chenleiy@126.com