

干涉零位补偿检验研究

姚劲刚¹ 张金平¹ 郑列华¹ 郝沛明²

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²同济大学物理系, 上海 200092

摘要 零位补偿检验是现代光学用于检测非球面的主流方法。根据实际检测需要, 提出既可进行补偿检验, 又可进行干涉检验的一种新型干涉零位补偿检验方法。干涉零位补偿检验的原理是: 在零位补偿检验的基础上, 将零位补偿系统的第一面改为与激光点光源同心的参考面, 从同心参考面反射回来的参考波面与通过零位补偿检验系统的待检非球面反射回来的待检波面相干涉实现干涉零位补偿检验的目的。依据三级像差理论, 设计了零位补偿检验的光学系统, 给出像差理论分析和实际设计评价结果, 当待检非球面镜的孔径角 $2u$ 小于 $1/4.5$ 时, 系统的剩余波像差优于 $\lambda/170$ 。通过对该方法进行原理性实验, 充分证实, 干涉零位补偿检验是行之有效的。

关键词 几何光学; 干涉补偿; 零位补偿; 非球面检测

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0622003

Study on Interference Null Compensator Testing

Yao Jingang¹ Zhang Jinping¹ Zheng Liehua¹ Hao Peiming²

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

²Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract Null testing is the main measurement for aspheric surface in modern optical testing. In order to improve null testing, a novel measurement which combines compensator and interference is proposed. The principle of the method is that the radius of the first surface of the compensator is chosen to equal the distance between surface and laser point of interference. The reference wavefront reflected from the concentric surface inferred with the wavefront from the aspheric surfaces under test to accomplish the interference null testing. Base on third-order aberration theory, interference null testing system is designed and the residual aberrations are calculated. The wavefront aberration of designed system is better than $\lambda/170$, if the relative aperture is smaller than $1/4.5$. By means of theoretic test, this measurement is proved to be available for testing aspheric surface.

Key words geometric optics; interference compensation; null compensator; aspheric testing

OCIS codes 220.4840; 220.1000; 220.1250

1 引言

19世纪50年代, 莱翁·傅科发明了刀口仪, 通过刀口仪可以得到待检镜面的阴影图, 由此可以粗略判断镜面的面形误差, 刀口仪^[1]是一种定性检测镜面误差的仪器。

20世纪50年代, Maksutov提出了反射镜零位补偿检验^[2-4], 它有两个优点, 一是无色差, 二是可以缩短检测光路, 这有利于长焦距和大口径的凹非球面的检验^[5-6]。1963年 Offner提出了单透镜检测待检凹非球面的透镜零位补偿检验, 并在待检凹非球面球心放置场镜以消除高级像差, 实现了小口径透镜补偿检验大口径凹二次非球面的目的^[7]。

另一方面, 在20世纪70年代, 美国学者发明了数字干涉仪, 数字干涉仪包括以下几个要素: 激光光源、扩束

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-1-21

基金项目: 国家973计划(2011CB013206)

作者简介: 姚劲刚(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事光学检测及光学支撑结构设计方面的研究。E-mail: 121922417@qq.com

导师简介: 郑列华(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光机系统工程方面的研究。E-mail: dimo818@126.com

器^[8]、分光板、参考面、及波面复原系统^[9-11],它可用于定量地检测待检镜的误差。

目前,国内应用较多的还是数字干涉仪与补偿器的组合对非球面进行检测。利用数字干涉仪检测非球面通常需要加入标准镜头以及补偿系统,它存在价格高昂、检测光路长等缺点。本文在综合前人补偿检验的基础上,从三级像差理论出发,提出了一种新的补偿检验方法:干涉零位补偿检验,该方法简化了干涉补偿检测系统;分析了干涉零位补偿检验的设计方案,并完成了原理性实验,实验结果达到了预期目标。

2 设计思想及理论依据

2.1 几种补偿检测方式的对比

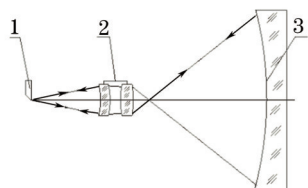


图1 刀口仪检验图

Fig.1 Diagram of knife-edge tester testing

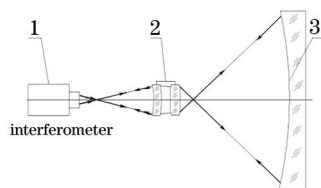


图2 数字干涉仪检验图

Fig.2 Diagram of interferometer testing

图1所示为刀口仪检验,其中1为刀口仪,2为补偿镜系统,3为待检镜,通过用刀口切割针孔像,观测待检镜的阴影图以定性地检测待检镜的面形误差;图2所示为数字干涉仪与补偿镜系统检测待检镜的面形误差,其中1为数字干涉仪,2为补偿镜^[12],3为待检镜,可以直接通过采集干涉条纹图及波面复原系统定量的得到待检镜的面形误差。相比于刀口仪测量精度的不确定性,数字干涉仪通过波面复原系统能够精确得出待检镜的波前误差。

相比于数字干涉仪与补偿器组合检测大口径非球面镜,本文所论述的方法(检测不需要数字干涉仪)通过将补偿器的第一面设置为与激光源同心的参考面,能够有效简化数字干涉仪的结构;目前大量使用的数字干涉仪在检测非球面时需要加入标准镜头,而本方法则不需要额外加入标准镜头,且检测光路比采用数字干涉仪的检测光路要短。

这种新型的检测方法将采用条纹扫描仪以实现波面复原,目前国内南京理工大学,北京理工大学,哈尔滨工业大学等高校及研究所通过图像处理技术就单幅干涉条纹图重构波面做了一定的研究^[13],所得出的实验结果与传统数字干涉仪所得结果一致,这也为本方法精确获取待检镜的波前误差提供了理论依据。

2.2 干涉零位补偿检验设计原理

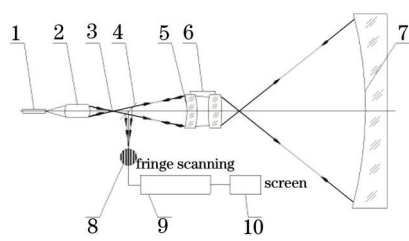


图3 检验原理图

Fig.3 Schematic diagram of testing

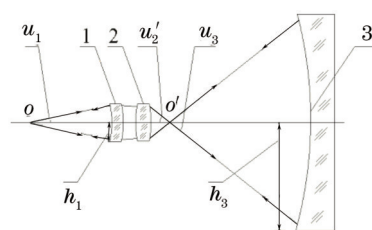


图4 检验光路图

Fig.4 Light path of testing

干涉零位补偿检验的原理图如图3所示,其中1为激光器,2为扩束器^[14],3为星孔,4为分光板,5为干涉参考面,6为补偿系统,7为待检非球面,8为干涉条纹图,9为条纹扫描系统,10为显示和输出系统。从激光器1发出的光经扩束器2会聚到星孔3形成点光源,点光源位于干涉参考面5的球心,从点光源3发出的光经分光板4到干涉参考面5,光线经干涉参考面5分为两部分,反射光部分返回球心,形成参考球面波,透射光部分经补偿系统6,沿待检非球面7的法线方向入射到待检非球面7,光线经待检非球面7反射,形成物光,即待检非球面7形成按原路返回的物光波面即待检波面,按原路返回的物光波面与参考面5形成参考球面波相干涉,生成干涉图8,干涉图条纹扫描系统9将进行波面复原,再由显示和输出系统10显示和输出非球面7的波面误差图。

2.3 三级像差理论

如图4所示,1为同心补偿透镜,2为补偿透镜,3为待检凹非球面,三级像差的消球差表示为:

$$S_1 = h_1 \vec{P}_1 + h_2 \vec{P}_2 + h_3 P_3 + h_3^4 K + h_4 \vec{P}_4 + h_5 \vec{P}_5 = 0, \quad (1)$$

其中: $h_1 = h_5$, $\vec{P}_1 = \vec{P}_5 = P_1$, $h_2 = h_4$, $\vec{P}_2 = \vec{P}_4 = P_2$, $P_3 = 0$, $K = -(n'_3 - n_3)e^2/r_{05}^3$ 。 $r_{05} = r_0$ 为待检凹非球面3的顶点曲率半径, e^2 为待检凹非球面3的偏心率。将系统的折射率定义为: $n_1 = n'_1 = n_2 = n'_2 = n_3 = 1$, $n'_3 = n_4 = n'_4 = n_5 = n'_5 = -1$ 。 n 为透镜光学材料的折射率。设定与规化: $h_3 = -1$, $r_0 = r_{05} = -1$, $u_3 = u'_3 = u'_2 = 1$ 。

设定同心补偿透镜1和补偿透镜2的遮拦比 α 和总放大率 β , $\alpha_1 = h_1/h_3 = -h_1$, $\alpha_2 = h_2/h_3 = -h_2$, $\beta_1 = u_1/u'_1 = u_1/u_2$, $\beta_2 = u_2/u'_2 = u'_1/u'_2 = u_2 = u'_1$, $\beta = \beta_1 \beta_2 = u_1/u'_2 = u_1$, $K = -(n'_3 - n_3)e^2/r_{05}^3 = 2e^2/r_{05}^3 = -2e^2$ 。

将上述值代入(1)式,得出如下关系式:

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + e^2 = 0, \quad (2)$$

透镜1是同心补偿透镜,第一面是同心面,对光线不产生偏折,第二面可生成像差, P_1 可表示为:

$$P_1 = \left[\frac{n(u'_1 - u_1)}{1 - n} \right]^2 \left(u'_1 - \frac{u_1}{n} \right) = \frac{n}{(n-1)^2} (\beta_2 - \beta)^2 (n\beta_2 - \beta), \quad (3)$$

设定 α_1 和 α_2 , 同心补偿透镜1和补偿透镜2产生的球差分别负担非球面生成的法距差为:

$$\alpha_1 P_1 = -m_{11} e^2, P_1 = -m_{11} e^2 / \alpha_1, \alpha_2 P_2 = -m_{12} e^2, P_2 = -m_{12} e^2 / \alpha_2, \quad (4)$$

其中 m_{11} 和 m_{12} 为像差系数因子: $m_{11} + m_{12} = 1$

3 初始结构求解

3.1 同心补偿透镜1曲率半径的 r_1, r_2

补偿双透镜光焦度生成的光线偏角为:

$$h\varphi = h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_2 = u'_2 - u_1 = u'_2(1 - \beta) = 1 - \beta, \quad (5)$$

生成的偏角由两透镜分别负担,即进行光焦度的分配:

$$h_1 \varphi_1 = u'_1 - u_1 = m_{21}(1 - \beta), h_2 \varphi_2 = u'_2 - u_2 = m_{22}(1 - \beta), \quad (6)$$

$$u_2 = u'_1 = m_{21}(1 - \beta) + \beta = m_{21} + m_{22}\beta = \beta_2, \quad (7)$$

其中 $m_{21} + m_{22} = 1$, m_{21}, m_{22} 为光焦度系数因子。按(7)式,设定 m_{21}, m_{22}, β 就可确定 u'_1 。

同心补偿透镜1曲率半径 r_1, r_2 的求解:

$$\begin{cases} l_1 = l_{11} = l'_{11} = r_1 = l_{21} \\ l'_{21} = l'_1 \\ \frac{1-n}{r_2} = \frac{1}{l'_{21}} - \frac{n}{l_{21}} \\ \frac{1-n}{r_2} = \frac{1}{l'_1} - \frac{n}{l_1} \\ h_1 \varphi_1 = u'_1 - u_1 = \frac{h_1}{l'_1} - \frac{h_1}{l_1} = \beta_2 = \beta \\ \frac{(1-n)h_1}{r_2} = \beta_2 - n\beta \\ r_2 = \frac{(1-n)h_1}{\beta_2 - n\beta} \end{cases} \quad (8)$$

得出同心补偿透镜1的曲率半径 r_1, r_2 分别为:

$$r_1 = l_1, r_2 = (1-n)h_1 / (\beta_2 - n\beta). \quad (9)$$

3.2 补偿透镜2曲率半径 r_3, r_4

按(6)式和(7)式,设定 m_{21}, m_{22} 和 β 就可确定 u'_1 , 已知 u'_1 和 β , 按(3)式可求解 P_1 。按(2)式可确定 P_2 , P_2 与规化 p_2 的关系式为:

$$p_2 = \frac{P_2}{(h_2\varphi_2)^3} = \frac{P_2}{(u'_2 - u_2)^3} = \frac{P_2}{(1 - \beta_2)^3} = -\frac{m_{12}e^2}{\alpha_2(1 - \beta_2)^3}, \quad (10)$$

n 为补偿透镜 2 的折射率, Q_2 表表达式为:

$$Q_2 = av_2 - b \pm \sqrt{c[p_2 - p_0^\infty + c(v_2 + v_2^2)]}, \quad (11)$$

其中, P_0^∞ , a , b 和 c 表达式为:

$$\begin{cases} P_0^\infty = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right], \\ a = \frac{2n+2}{n+2}, b = \frac{3n}{2(n-1)(n+2)}, c = \frac{n}{n+2} \end{cases}, \quad (12)$$

规化的补偿透镜 2 的孔径角为:

$$v_2 = u_2/h_2\varphi_2 = u_2/(u'_2 - u_2) = \beta_2/(1 - \beta_2), \quad (13)$$

将上述值和规化的 p_2 代入(10)式求解 Q_2 , 按 Q_2 值求解发光点位于有限远时补偿透镜 2 的弯曲半径 r :

$$\begin{cases} c_3 = Q_2 + n/(n-1) = c_7 \\ r_3 = 1/c_3\varphi_2 = r_7 \\ c_4 = Q_2 + 1 = c_6 \\ r_4 = 1/c_4\varphi_2 = r_6 \\ r_{05} = -1 \\ \varphi_2 = (u'_2 - u_2)/h_2 = (1 - \beta_2)/\alpha_2 = -m_{22}(1 - \beta)/\alpha_2 \end{cases}. \quad (14)$$

3.3 各面之间的规化间距

如图 4 所示, O 点到第 1 面顶点的间距为 d_{01} , 同心补偿透镜 1 的厚度 $d_{12} = 0$ (薄透镜), 同心补偿透镜 1 与补偿透镜 2 的间距 d_{23} , 补偿透镜 2 的厚度 $d_{34} = 0$ (薄透镜), 补偿透镜 2 到待检非球面 3 的间距为 d_{45} , 采用自准光路, 光线从待检非球面 3 返回间距为 $d_{56} = -d_{45}$, $d_{67} = d_{34} = 0$ (薄透镜), $d_{78} = d_{23}$, $d_{89} = d_{12} = 0$ (薄透镜), $d_{910} = d_{01}$ 。确定各面之间的规化间距为:

$$\begin{cases} d_{01} = 0 - l_1 = 0 - r_1 \\ d_{12} = -d_{89} = 0 \\ d_{23} = -d_{78} = (h_1 - h_2)/u_2 = (\alpha_2 - \alpha_1)/\beta_2. \\ d_{34} = -d_{67} = 0 \\ d_{45} = -d_{56} = (h_2 - h_3)/u_3 = 1 - \alpha_2 \end{cases}. \quad (15)$$

3.4 光学设计实际尺寸

3.4.1 缩放

通过前文求解的系统规划初始结构, 将其按比例缩放, 其中, 横向缩放率为 $-r_{05}$, 纵向缩放率为 $-h_3$ 。

3.4.2 加厚和求解主面

缩放后, 系统光路如图 4 所示, 同心补偿厚透镜 1 的主面位于第 2 面上, 求补偿厚透镜 2 的主距, 求解的实际的光学间距尺寸为:

$$l_2 = -\frac{r_3 d_{34}}{n(r_4 - r_3) + (n-1)d_{34}}, l'_2 = -\frac{r_4 d_{34}}{n(r_4 - r_3) + (n-1)d_{34}}, \quad (16)$$

实际的光学间距求解为:

$$\begin{cases} d_{23} = (h_1 - h_2)/u'_1 - l'_1 + l_2 = (\alpha_2 - \alpha_1)/\beta_2 - l'_1 + l_2 \\ d_{45} = (h_2 - h_3)/u - l'_2 + l_3 = (1 - \alpha_2) - l'_2 + l_3 \end{cases}. \quad (17)$$

3.5 像差平衡

在已知待检非球面的参数后,可根据上述公式求解出实际光学系统的初始结构参数,利用Zemax软件程序优化各参数,消除高级像差,使残余的高级像差满足使用要求。

4 实际设计与应用

通过上文对初始结构求解的分析与计算,分别设计了当 $\Phi_0 = 1000 \text{ mm}$ 时 $r_0 = 4000 \text{ mm}$, $r_0 = 4500 \text{ mm}$, $r_0 = 5000 \text{ mm}$, $r_0 = 5500 \text{ mm}$, $r_0 = 6000 \text{ mm}$, $e^2 = 1$ 的凹抛物面干涉零位补偿检验系统。通过优化设计,得出几组光学系统的剩余波像差与其孔径角 $2u$ 的关系如图5所示。

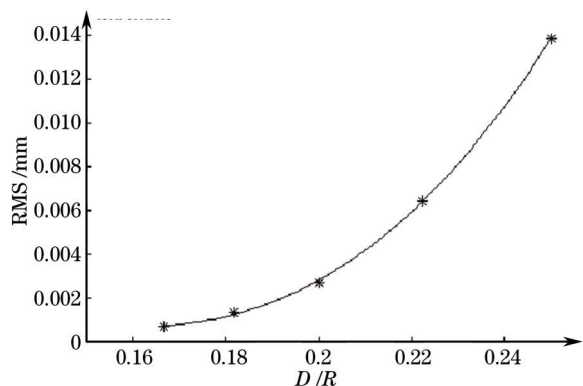


图5 相对孔径与剩余波像差关系图

Fig.5 Relationship of relative aperture and wave aberration

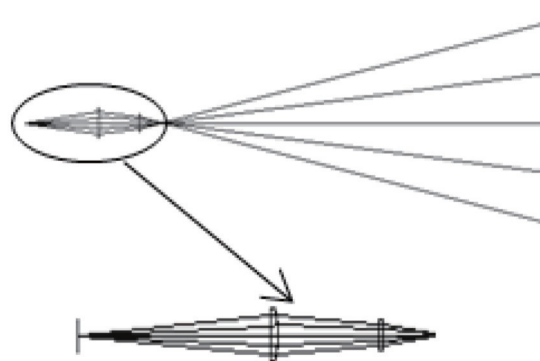


图6 补偿检验系统光路图

Fig.6 Light path of null compensator system

以 $r_0 = 5000 \text{ mm}$ 的光学系统为例,由图2知凹抛物面孔径角 $2u'_2 = \Phi_0/r_0 = 1/5$,起始孔径角 $2u_1 = h_1/l_1 = -1/10$,补偿系统放大率 $\beta = u_1/u'_2 = -1/2 = -0.5$ 。透镜1和2采用K9光学玻璃,折射率 $n_{0.6328} = 1.514664$ 。按设定规范化值 $u'_2 = 1$, $u_1 = -0.5$, $h_3 = -1$, $r_0 = -1$ 求解初始结构尺寸后缩放到实际结构尺寸进行设计。根据上文中计算初始结构的公式以及Zemax软件优化后,得出系统结构参数如表1所示:

表1 系统结构参数

Table 1 Structure parameter of the system

Surf	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
OBJ	STANDARD	Infinity	965		0	0
1	STANDARD	-965	35	K9	99.24445	0
2	STANDARD	-228.7063	579.4956		102.3827	0
3	STANDARD	1367.189	25	K9	55.46011	0
4	STANDARD	-372.6026	5423.322		53.87681	0
STO	STANDARD	-5000	-5423.322	Mirror	900.9322	-1
6	STANDARD	-372.6026	-25	K9	53.87681	0
7	STANDARD	1367.189	-579.4956		55.46011	0
8	STANDARD	-228.7063	-35	K9	102.3827	0
9	STANDARD	-965	-965		99.24445	0
10	STANDARD	Infinity	550		61.32885	0
11	COORDBRK	-	0		-	-
12	STANDARD	Infinity	0	Mirror	46.96424	0
13	COORDBRK	-	182.4438		-	-
IMA	STANDARD	Infinity			0.002330483	0

对所设计的几组光学系统优化分析,当待检非球面镜的相对孔径角 $2u$ 小于 $1/4.5$ 时,光学系统的剩余波像差优于 $\lambda/170$,检测光路图和系统剩余波像差如图6和图7所示:

在上述理论分析及光学设计的基础上,将此补偿检测方法在某凹非球面上进行原理性实验,得出较清晰的干涉条纹如图8所示,由于检测中并未加入波前复原系统,因此,对于得到的干涉条纹只能通过轻敲待

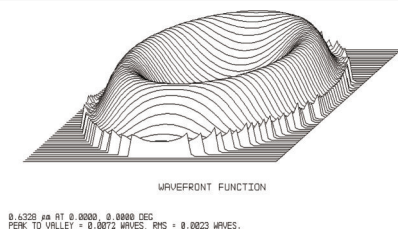


图7 系统剩余波像差图

Fig.7 Wave aberration of the system

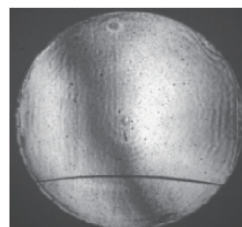


图8 干涉条纹图

Fig.8 Interference fringes figure

检测反射镜观察干涉条纹图,由干涉条纹图的走向趋势以定性的判定待检镜的误差。在前期的补偿检测原理的验证上,达到了实验预期效果。

5 结 论

在总结前人非球面零位补偿检验的基础上,提出了干涉零位补偿检验这一新的补偿检验方法。通过理论分析及实际设计验证了带有参考面的干涉零位补偿检验是可行的,在实际设计中,当待检测非球面镜的相对孔径角 $2u$ 小于 $1/4.5$ 时,光学系统的剩余波像差优于 $\lambda/170$;此方法为在线检测提供了条件,这对于非球面的补偿检验是有利的;这一补偿检验方法通过改进补偿检验系统的结构,能够缩短补偿检验光路,且能够大幅降低数字干涉仪的造价。在接下来的工作中,将进一步改进完善这一补偿检验方法,通过加入波前复原系统,实现干涉零位补偿检验方法在实际检测中应用。

参 考 文 献

- Zhang Jun, Dong Jun, Zhang Yan, *et al.*. Study on digital knife-edge test[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(5): 65-68.
张 均,董 军,张 艳,等. 数字刀口检测技术[J]. *光电工程*, 2005, 32(5): 65-68.
- Daniel Malacara. *Optical Shop Testing*[M]. Wiley-Interscience, 2007. 122-134, 435-445.
- Hao Peiming, Fu Lianxiao, Yuan Liyin, *et al.*. Compensating test of the reflective mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 831-835.
郝沛明,付联效,袁立银,等. 反射镜补偿检验[J]. *光学学报*, 2006, 26(6): 831-835.
- Xue Donglin, Zhang Zhongyu, Zheng Ligong, *et al.*. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2491-2496.
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.
- Zhang Quan, Zhang Puyang, Hao Peiming, *et al.*. Manufacturing and testing on large aspherical surface[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(3): 204-205, 208.
张 权,张璞扬,郝沛明,等. 大型非球面镜的加工和检测[J]. *光学技术*, 2001, 27(3): 204-205, 208.
- Hao Peiming. Fabrication of a convex aspherical surface[J]. *Acta optica sinica*, 1991, 11(10): 931-937.
郝沛明. 凸非球面加工[J]. *光学学报*, 1991, 11(10): 931-937.
- Chen Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design and tolerance analysis of Offner compensator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 88-93.
陈 旭,刘伟奇,康玉思,等. Offner 补偿器的结构设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 88-93.
- Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan, *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2003, 30(6): 494-496.
郝沛明,王 鹏,王占山,等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. *中国激光*, 2003, 30(6): 494-496.
- Wolffling S, Lanzmann E, Ben-Yosef N, *et al.*. Wavefront reconstruction by spatial-phase-shift imaging interferometry[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(12): 2586-2596.
- Jia Jianlu, Wang Jianli, Zhao Jinyu, *et al.*. Optimization of adaptive optical wavefront algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 1026-1031.
贾建禄,王建立,赵金宇,等. 自适应光学系统波前处理算法的优化[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1026-1031.
- Peng Aihua, Ye Hongwei, Li Xinyang. 2D lateral shearing wave-front reconstruction based on decoupling difference Zernike fitting coefficient method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0801001.
彭爱华,叶红卫,李新阳. 基于解耦差分泽尼克待定系数法的二维横向剪切波面重建算法[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0801001.

- 12 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.*. Optimization design of partially compensating lens based on Zemax[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0622002.
孟晓辰, 郝 群, 朱秋东, 等. 基于Zemax的部分补偿透镜的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0602002
- 13 Yu Xuelian, Tian Jiajun, Yao Yong, *et al.*. Wavefront reconstruction technology based on single interferogram[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(1): 39-43.
于雪莲, 田佳峻, 姚 勇, 等. 基于单幅干涉图的波前重构技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(1): 39-43.
- 14 Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai, *et al.*. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1):250-256
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 250-256.

栏目编辑: 韩 峰