

自重变形对超高精度 Fizeau 干涉仪的光学性能影响

张 健^{1,2} 刘伟奇¹ 王汝冬¹ 康玉思¹ 冯 睿¹ 魏忠伦¹ 柳 华¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为实现 $\lambda/100$ 峰谷值(PV)的光刻投影物镜面形检测精度要求,深入分析了自重变形对大口径超高精度 Fizeau 干涉仪的光学性能产生的影响。设计的球面标准具结构,其系统波像差达到 $\lambda/1000$ (PV)、像方数值孔径(NA)值为 0.36,用于口径超过 300 mm 的球面镜面形检测。使用 Patran/Nastran 软件通过有限元方法(FEM)对标准具镜组中一块镜子在胶结辅助支撑和压圈切向支撑两种支撑方式下的自重变形进行分析的基础上,得出在假定载荷作用下各光学元件表面的变形量及刚体位移量。利用泽尼克多项式将变形量大小进行拟合,得到镜子的波像差大小,完成光机转换,分析得到适合的支撑方式。将此支撑方式运用到整个系统,实现了在自重变形下系统的波像差大小优于 $\lambda/100$ (PV)水平。结果证明采用这种支撑方式,可以满足超高精度检测要求,为合理的干涉仪设计提供了数据依据、为提高系统精度奠定了基础。

关键词 测量;Fizeau 干涉仪;有限元法;自重变形;波像差

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0712001

Effect of Gravity Deformation on Optical Performance of Super-Accuracy Fizeau Interferometer

Zhang Jian^{1,2} Liu Weiqi¹ Wang Rudong¹ Kang Yusi¹ Feng Rui¹
Wei Zhonglun¹ Liu Hua¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin, 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to realize the figure accuracy of $\lambda/100$ peak-valley (PV) value for the lithographic projection objective, the effect of gravity deformation on the optical performance of large-aperture Fizeau interferometer with super accuracy has been deeply analyzed. The optical configuration designed with a wavefront aberration of $\lambda/1000$ (PV) and a numerical aperture(NA) of 0.36 in image space are employed to test the spherical surface with a diameter larger than 300 mm. One element in the configuration is analyzed by the finite element method (FEM) under two supporting types: adhesive support and retainer support. Based on the finite element analysis(FEA) results, surface deformation and body displacement due to gravity are obtained under a certain condition of load. By Zernike polynomials, the surface deformation is fitted, the wavefront error is acquired, the optomechanical conversion is finished, and a proper supporting type is proposed. When this supporting type is applied to the whole configuration, the wavefront aberration of the system achieved is better than $\lambda/100$ (PV). The result verifies that super accuracy can be reached. Besides, the data offered here will be useful for a reasonable interferometer design.

Key words measurement; Fizeau interferometer; finite element method; gravity deformation; wavefront error

OCIS codes 120.4800; 220.4840; 350.4800

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2011-02-25

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期基金资助课题。

作者简介: 张 健(1983—),男,博士研究生。主要从事光学检测方面的研究。E-mail: ciomp.jian@gmail.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师。主要从事光学检测、激光显示技术等方面的研究。

E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光学技术发展到今天,现代光学元件的检测比制造和装调更加具有挑战性,光学元件的检测水平也通常能够决定光学元件的制造水平^[1]。光刻投影物镜是目前对光学设计、制造和装调要求都极高的光学系统之一。为了满足 193 nm 光刻投影物镜系统的超高精度面形检测精度要求,研制出高精度干涉仪原理样机具有重要的意义^[2]。Fizeau 干涉仪结构与其他干涉仪结构相比,以其独有的共光路特点,成为设计干涉仪过程中理应先考虑的一种结构方案。目前商用的 Fizeau 干涉仪,其精度一般在 $\lambda/20$ 峰谷值(PV)左右,并且随着口径的增大,其测量精度甚至只有 $\lambda/10$ (PV)。为保证超高精度的测量要求,检测具有大曲率半径的球面镜面形精度,必须在干涉仪各部分组件进行精确的误差分析的基础上严格控制干涉仪的精度。对干涉仪的误差分析,国外已经有过很多的深入研究^[3~5]。国内也已经开展了一些这方面的工作^[6~8]。但是除了传统地对干涉仪光源、相移、参考面和光学元件等因素引起的误差之外,在对超高精度 Fizeau 干涉仪的光学系统性能进行分析时,必须考虑镜子的自重变形对系统检测精度的影响。

镜子的自重变形是指,由于自身重力的影响,干涉仪的镜子在自然状态下以及在支撑装置中受到卡夹的应力变形^[9]。对于传统的低精度的干涉仪,由于镜片口径较小,重力等因素的影响一般可以忽略。但是对于超高精度的干涉仪,常见的三点支撑方式会导致镜面变形,远不能满足纳米级检测精度要求,因此,对大口径镜片的支撑状态进行有限元分析(FEA),选择合适的支撑方式、分析自重变形导致的精度损失,对干涉仪设计和系统误差分配十分重要。

文献中曾经针对大型镜子的自重变形进行过分析和计算^[9~11],也针对平面镜的自重变形进行过分析^[12,13],但是对于高精度要求的整个标准具镜组的自重变形进行分析还未有报道。本文以自己设计的设计标准具镜组为例,采用有限元分析方法(FEM)对镜组在铅垂状态下的不同支撑方式导致的自重变形进行了分析,通过 CodeV 自带函数命令进行泽尼克拟合,给出了变形后的系统波像差大小,设计出满足要求的支撑方式。

2 算法介绍及计算流程图

2.1 算法介绍

在使用泽尼克进行光机转换计算系统波像差分

析光学性能时,通常是采用 CodeV 的 INT 接口文件格式进行转换,在节点表面法线方向对变形量进行计算,如图 1 所示,因为存在近似关系,所以导致误差的产生^[14]:

$$PA \approx PC = \Delta R \tan \theta,$$

$$PF \approx PD = \frac{\Delta z - \Delta R \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}},$$

这极大地降低了分析结果的可靠性。如果完全沿着 Sag 方向对节点的变形量进行计算,那么前面所提到的算法产生的误差自然就会消失。本文提出的算法的基本原理如图 2 所示。这种方法的优点是无论是变形后的节点,还是在 Z 轴方向上对应的变形前的节点位置,都可以非常准确计算得到,不会有任何的近似产生。

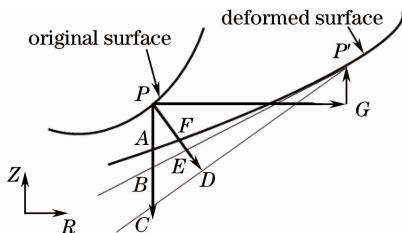


图 1 传统算法示意图

Fig. 1 Schematic of common algorithm

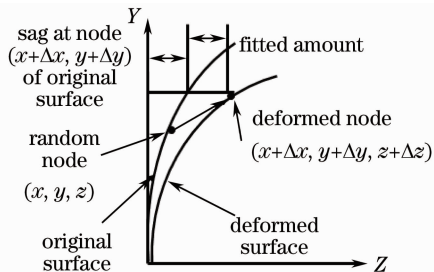


图 2 提出的算法示意图

Fig. 2 Schematic of algorithm used in this paper

2.2 计算流程图

整个分析计算过程的流程图,如图 3 所示。首

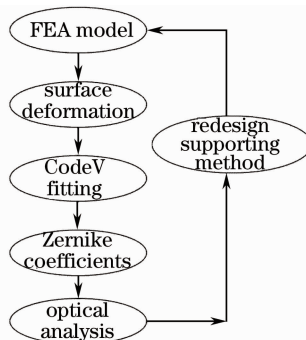


图 3 计算流程图

Fig. 3 Flow chart of calculation

先采用一定的支撑方式对镜子建立有限元模型,然后分析镜子表面变形量的大小,代入到 CodeV 软件中,通过函数命令得到泽尼克多项式系数,生成变形后的镜面,最后再次通过计算机拟合出系统的波前图,得到系统的光学性能指标 PV 值和均方根(RMS)值大小。如果光学性能指标不理想,则重新选择合理的支撑方式再次进行建模分析。

3 有限元模型与分析

3.1 球面标准具结构

为了达到 193 nm 光刻投影物镜的面形检测要求,设计了上述立式 Fizeau 干涉仪标准具结构用于检测球面镜的面形精度。因为待检元件具有口径较大、精度要求高的特点,所以要求标准具的像方数值孔径(NA)值较大、系统波像差 PV 值达到 $\lambda/1000$ 以上量级。图 4 中,透镜 6 为参考镜,因为参考面的质量对干涉仪精度起着决定性的作用,所以采用特种熔石英作为材料;其余 5 块透镜均采用普通 BK7 玻璃作为材料。入射光束经过准直滤波后,通过标准具所形成的系统波像差 PV 值大小为 $\lambda/1000$,完全可以满足检测要求。为了使像方的 NA 值尽可能满足检测需要,透镜 3~6 口径均超过了 200 mm。因为口径较大,镜子本身重量较大,所以肯定会受到自身重力和装卡应力的影响,导致镜子发生变形,影响系统的光学性能,进而影响到系统的检测精度。

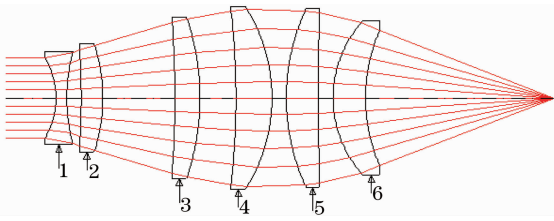


图 4 球面标准具结构示意图

Fig. 4 Spherical etalon Configuration

结合以上考虑,从标准具镜组中选取了具有代表性的透镜 4 进行了有限元分析。图 5 表示透镜 4 分别采用胶结辅助支撑和压圈支撑两种方式的示意图。

图 5 中分别采用胶结辅助支撑和压圈支撑两种方法。胶结辅助支撑方法中透镜侧面通过 6 处均布低应力胶粘结在镜框中,镜框底面和透镜镜面之间采用 6 处橡胶垫作为辅助支撑,橡胶垫和胶结交错均匀分布;压圈切向接触支撑方法中压圈和透镜切向接触可以使透镜受力好、变形小。图 6 是透镜 4 的有限元模型。

选用 Patran/Nastran 软件对自重作用下的面形

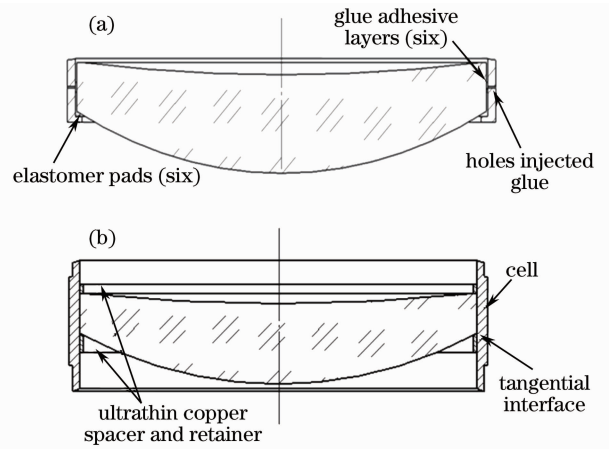


图 5 (a) 胶结辅助支撑示意图;(b)压圈支撑示意图
Fig. 5 (a) Schematic of primary adhesive and secondary pads; (b) schematic of retainer and spacer to mount

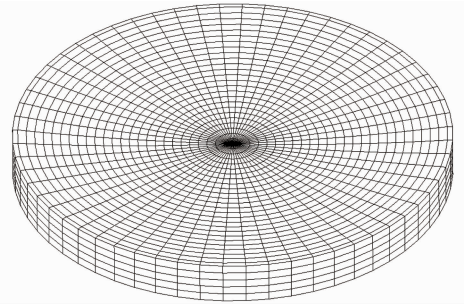


图 6 透镜 4 有限元模型示意图

Fig. 6 Schematic of FEM model for lens 4

变化进行了详细计算。透镜 4 及其支撑所涉及的材料有玻璃 BK7、胶等,其材料特性参数如表 1 所示。

表 1 材料特性参数

Table 1 Material specifications

Material	E /Pa	ν	ρ /(kg/m^3)
A-alloy	70.6×10^9	0.33	2.70×10^3
Fused silicon	74.59×10^9	0.16	2.2×10^3
BK7	82.0×10^9	0.206	2.51×10^3
Rubber shim	9×10^5	0.34	1.15×10^3

3.2 有限元计算结果及分析

镜体共建立了 2000 个三维实体单元,采用不同支撑方式得到的在各个方向上变形量的 PV 值和 RMS 值大小如表 2 和表 3 所示。

表 2 压圈支撑在各个方向上的变形量大小(单位: nm)

Table 2 Surface deformation in 3 directions using retainer and spacer to mount(unit: nm)

Deformation results		X	Y	Z
Upward surface	PV	6.0000	6.0000	15
	RMS	1.3134	1.3099	4.6972
Downward surface	PV	6.0000	6.0000	14
	RMS	1.5630	1.5599	4.5124

表 3 胶结辅助支撑在各个方向上的变形量大小(单位: nm)
Table 3 Surface deformation in 3 directions using primary adhesive and secondary pads(unit: nm)

Deformation results		X	Y	Z
Upward surface	PV	16	15	27
	RMS	3.3664	3.3504	8.0694
Downward surface	PV	10	10	29
	RMS	2.4805	2.4122	8.3

从表 2,3 的有限元计算结果可以看出,不同支撑方式下镜面上节点在三个方向变形的 PV 值和 RMS 值相差不大。说明面形变化较为均匀,产生效果基本相同。对于压圈支撑方式,光束沿 Z 轴方向传播产生的变形量 PV 值大小约为 15 nm,RMS 约为 4.7 nm;对于胶结辅助支撑方式,在 Z 轴方向产生的变形量的 PV 值和 RMS 值分别约为 27 nm 和 8 nm。所以就自重变形大小而言,压圈支撑产生的变形量相对小一些。

图 7 和图 8 是用泽尼克多项式拟合生成的采用两种支撑方式导致单个表面以及上下两个表面变形产生的系统波前图,对应的 PV 值和 RMS 值是在去除了平移、倾斜和离焦后得到的。首先,通过观察变形后生成的波前图可以看到,压圈支撑方式产生的 PV 值为 1.0235 nm、RMS 值为 0.2123 nm;相比之下,胶结辅助支撑产生的 PV 值和 RMS 值稍微大了一些,分别为 1.9408 nm 和 0.2499 nm,两者都可以满足 $\lambda/100$ (PV) 的检测精度要求。其次还可以发现,整个镜子变形产生的波前 PV 值小于上下表面单独变形后波前 PV 值之和,这表明上下表面间存在很强的补偿作用。最后,从支撑的简易性、稳定性、可靠性和成本四个角度来进行选择,压圈支撑都要比胶结辅助支撑更具有优势,所以,对整个标准具镜组采用压圈支撑方式进行进一步分析。

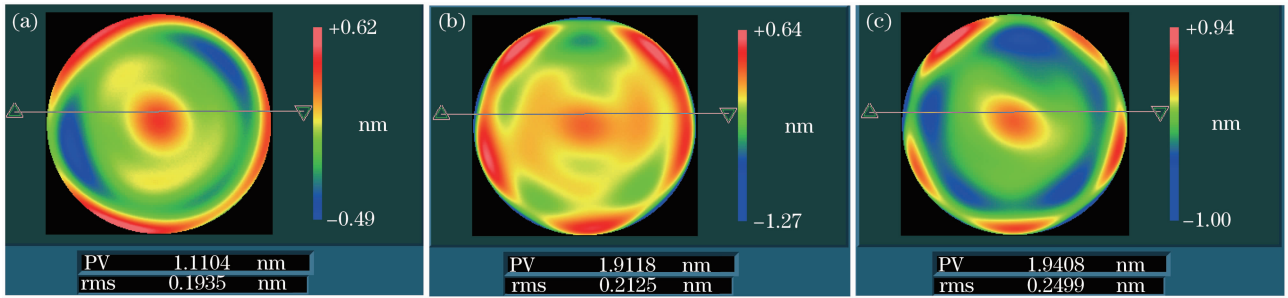


图 7 透镜 4 胶结辅助支撑波前示意图。(a) 上表面变形;(b) 下表面变形;(c) 上下表面变形

Fig. 7 Schematic of wavefront using primary adhesive and secondary pads for lens 4. (a) Deformation of the upper surface; (b) deformation of the lower surface; (c) total deformation

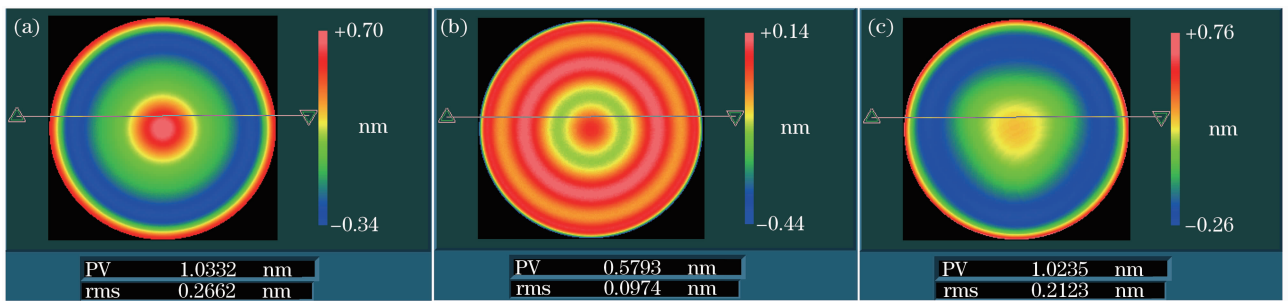


图 8 透镜 4 压圈支撑波前示意图。(a) 上表面变形;(b) 下表面变形;(c) 上下表面变形

Fig. 8 Schematic of wavefront using retainer and spacer for lens 4. (a) Deformation of the upper surface; (b) deformation of the lower surface; (c) total deformation

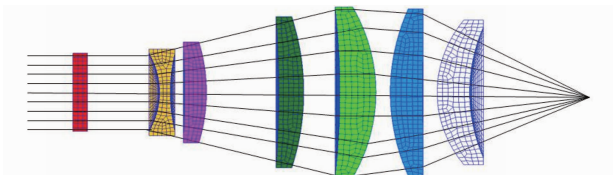


图 9 标准具有限元模型示意图

Fig. 9 FEM model for etalon configuration

4 光学性能分析结果

采用文中第 2 部分所述的拟合算法,结合有限元分析结果,对所有的镜面进行了有限元建模,如图 9 所示。使用 Code V 得到的各镜子表面发生自重变形后得到的系统波前的 PV 值和 RMS 值大小

如表 4 所示。最终得到的系统波前如图 10 所示。

从表 4 可以看出,在去除了平移、离焦和倾斜后,整个光学系统的波像差大小为 $3\lambda/1000$ (PV)、

表 4 镜子表面依次变形后得到的系统波前的 PV 值和 RMS 值

Table 4 PV and RMS of wavefront after sequential deformation of the lens surface

	Designed	Lens 2	Lens 2-3	Lens 2-4	Lens 2-5	Lens 2-6	Lens 2-7
PV	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003
RMS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001

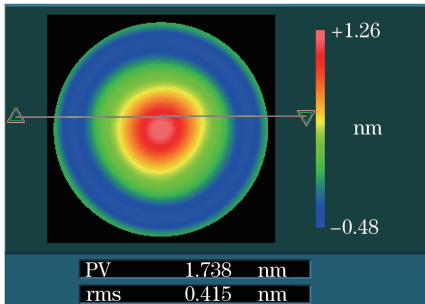


图 10 压圈支撑导致的自重变形产生的系统波前
Fig. 10 System wavefront caused by gravity using retainer and spacer to mount

5 结 论

在设计超高精度 Fizeau 干涉仪球面标准具的过程中,由于被检元件口径较大,NA 值较高,这对标准具镜组的设计、加工、装调提出了很高的要求。对于 $\lambda/100$ PV 值水平的系统波前,不同的支撑方式引起的自重变形差别也很大。本文利用有限元法对自行设计的标准具镜组中的一块镜子在两种支撑方式下的自重变形进行了详细的分析,得出压圈支撑更加有效的结论后,对整个镜组的系统波前进行了模拟分析。分析结果表明,采用压圈支撑方式得到的系统波前,在去除平移、倾斜和离焦之后,系统波前仍然优于 $\lambda/100$ PV 值的水平,完全满足设计要求,所以消除了对于重力影响的担忧。

参 考 文 献

- Xu Deyan, Wang Qing, Gao Zhishan *et al.*. Current Optical Elements Testing and International Standards [M]. Beijing: Science Press, 2009, 1~20
徐德衍,王青,高志山等. 现行光学元件检测与国际标准 [M]. 北京: 科学出版社, 2009, 1~20
- Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. 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精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034

$\lambda/1000$ (RMS),满足干涉仪光学系统性能要求。因此,在不考虑其它的误差的情况下,这种支撑方式完全可以满足 193 nm 的超高精度面形检测要求。

- J. Schmit, K. Creath, M. Kujawinska. Spatial and temporal phase-measurement techniques: a comparison of major error sources in one-dimension[C]. *SPIE*, 1992, **1755**: 202~211
- J. Schwider, R. Burow, K. E. Ellsner *et al.*. Digital wavefront measuring interferometry: some systematic error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- K. Creath. Phase-measurement interferometry: Beware these errors[C]. *SPIE*, 1991, **1553**: 213~220
- Xing Tingwen, He Guoliang, Shu Liang. Measurement errors in the 193 nm phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 67~72
邢廷文,何国良,舒亮. 193 nm 移相点衍射干涉仪的测量误差分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(2): 67~72
- Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324
马强,刘伟奇,李香波等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 688~696
刘东,杨雨英,田超等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 688~696
- Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan *et al.*. Support schemes and thermal effect s analyses of large aperture interferometer mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 809~815
徐荣伟,刘立人,刘宏展等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 809~815
- Wu Qingwen, Lu E, Wang Jiaqi *et al.*. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 1996, **4**(4): 23~28
吴清文,卢镠,王家骥等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(4): 23~28
- Zhang Dejiang, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Finite element analysis for wavefront error of lenses induced by gravity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 538~541
张德江,刘立人,徐荣伟等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 538~541
- Wu Xuhua, Chen Lei, Wang Lei. Design and test of reference mirror in $\Phi 300$ mm interferometer [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2007, **15**(8): 1235~1240
武旭华,陈磊,王磊. $\Phi 300$ mm 干涉仪参考镜的设计及测试 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8): 1235~1240
- Li Fu, Ruan Ping, Zhao Baochang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 272~275
李福,阮萍,赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 272~275
- P. A. Coronato, R. C. Juergens. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: review of techniques [C]. *SPIE*, 2003, **5176**: 1~8