

文章编号: 1003-501X(2011)05-0069-06

高精度 6 inch F/5.4 球面标准具结构研究与设计

田 伟, 史振广, 隋永新, 杨怀江

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

摘要: 193 nm 光刻投影物镜光学元件面形精度为纳米级, 因此要求检测精度为纳米到亚纳米级。在高精度的光学元件面形检测中, 为了保证检测的精度, 干涉仪标准球面镜的精度要优于 $\lambda/40$ 。根据检测要求, 设计了一种新的标准镜装卡结构。采用有限元方法分析了参考面在重力作用下的面形变化情况, 其最大面变形变化峰谷(PV)值仅为 4.88 nm, 均方根(RMS)值为 1.04 nm。同时对不同环境温度下参考面的变形进行了计算得出面形的峰谷值和均方根值。利用标准具面形的 Zernike 系数, 得到了标准具系统的 MTF, 以实现标准具在重力作用下的像质评价。结果表明, 所设计的标准具的结构可以满足标准具的设计要求。最后设计了差动螺钉驱动误差补偿机构。

关键词: 应用光学; 光学检测; 球面标准具; 参考面; 有限元法

中图分类号: TH702

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.05.013

Investigation and Design for the Structure of 6 inch F/5.4 Reference Spheresmirror with High Accuracy

TIAN Wei, SHI Zhen-guang, SUI Yong-xin, YANG Huai-jiang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The surface accuracy of lithography projection objectives is nanometer scale, so the accuracy of the testing interferometer is also needed on nanometer to sub nanometer scale. In the field of high-accuracy optical testing, in order to ensure the measuring precision, the accuracy of the interferometer reference spheres mirror should be higher than $\lambda/40$. A kind of new mechanical structure of reference spheres mirror was designed. The reference surface deformations of interferometer reference mirror were computed by means of finite element method under gravitational conditions. In that case, maximum Peak to Valley (PV) value is only 4.88 nm and the maximum Root Mean Square (RMS) value is 1.04 nm. At the same time, The PV and RMS surface figure error of reference Spheres caused by ambient temperature fluctuation was achieved. Lens system Modulation Transfer Function (MTF) was calculated by using lens shape Zernike coefficients to evaluate the image quality under gravitational conditions. Results demonstrate that the designed mechanical structure of reference spheres mirror can satisfy high demands of reference spheres mirror. At last, a compensated mechanism driven by difference bolt was designed to compensate some errors.

Key words: applied optics; optical test; reference spheres mirror; reference surface; finite element method

0 引 言

作为微电子技术的标志, 集成电路(Integrated Circuit, IC)的发展日新月异。自 70 年代 IC 诞生至今, 短短几十年, 经历了从小规模到超大规模和特大规模集成电路的发展阶段, 其进步得益于微电子技术和微细加工技术的迅速发展。投影曝光光刻系统是目前微电子领域的主流设备, 其曝光工艺是 IC 制造过程中最

收稿日期: 2011-01-11; 收到修改稿日期: 2011-01-29

基金项目: 02 专项基金资助项目(2009ZX02205)

作者简介: 田伟(1983-), 男(汉族), 河北秦皇岛人。研究实习员, 硕士, 主要研究是光学仪器的结构设计。E-mail: tw_919@163.com。

为重要的工艺步骤之一^[1]。为提高我国微电子的加工制造水平,国家成立重大科技专项,研制90 nm节点的新一代光刻机。新的曝光光刻设备都对分辨力提出了更高的要求,因而涉及到大口径、超高精度光学表面的检测。国外的各大光刻机厂商都是自己研发高精度的光学元件面形检测设备,因此要完成193 nm光刻投影物镜的研制,必须自己研制高精度的光学检测设备。

球面标准具是光干涉测试凸凹球面面形质量的重要测量器具,它能产生PV值优于 $\lambda/40$ 的标准球面波,透镜中最后一个面为标准球面,面形量PV值优于 $\lambda/40$ 。标准球面透镜组测量球面面形误差属非接触测量,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。标准具参考面是对光学元件面形进行检测的基准。干涉仪的精度主要取决于其标准具参考面的面形精度。标准球面透镜组是球面面形加工与测量行业十分关注的组件,相应的干涉测试球面方法是实现高精度光学元件面形检测唯一方法。因此研制高精度6 inch球面标准具是完成193 nm光刻投影物镜光学元件面形检测任务的必要条件。

本文针对193 nm光刻投影物镜光学元件面形检测的需求,根据光学设计的要求,设计了口径6 inch, F数5.4的球面标准具的装卡结构及精密调整机构。

1 6 inch F/5.4 标准具光学系统设计结果

图1为6 inch F/5.4标准具光学系统设计结果。设计通光口径6 inch, F数为5.4,光学传递函数如图1所示,达到衍射极限。标准具光学系统在波长为632.8 nm的波差图如图2所示,从中可知,对应主波长 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 的波差PV为 0.021λ , RMS为 0.004λ 。

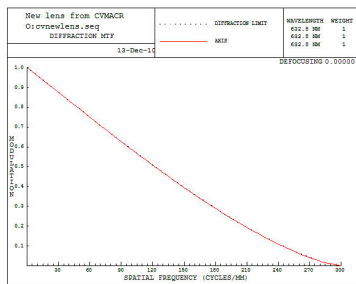


图1 标准具传递函数设计结果

Fig.1 MTF of reference spheres mirrors

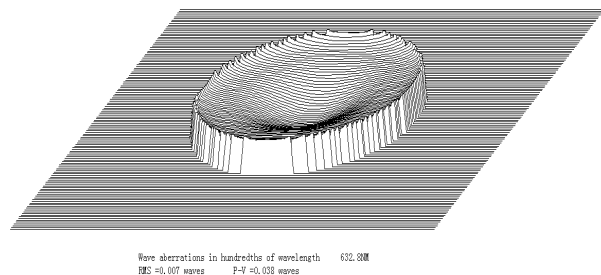


图2 标准具波差图

Fig.2 Wave aberrations of reference spheres mirrors

2 6 inch F/5.4 标准具光机结构设计

2.1 材料选择

标准具参考面材料除了具备所要求的光学特性和良好的光学面形外,还应该具有稳定性、可加工性、低热膨胀系数、良好的导热性能、微观结构均匀(无气孔、结石等缺陷)、高弹性模量、低密度等综合特性。通过对参考面镜坯材料做性能综合比较,认为进口合成熔石英不失为一种良好的光学玻璃材料^[2]。

标准具在光学设计时,为满足设计指标,部分透镜的径厚比设计偏薄,透镜容易变形,要求镜筒材料的热膨胀系数与透镜材料相兼容。另外镜筒材料要求具有较高的结构稳定性。综合考虑光学元件的机械性能、对工作环境的适应性、加工工艺性、采购渠道,各零件选择如表1所示的材料^[3]。

表1 标准镜组件的材料属性

Table 1 Martial parameter of the lens and frame

Name	Material	Density/(kg/m ³)	Elastic modulus/(GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion
Len1	K9	2.47e3	61.7	0.20	3.5e-6
Len2	K9	2.47e3	61.7	0.20	3.5e-6
Len3	JGS1	2.20e3	72.7	0.17	5.5e-7
Structural adhesive	Adhesive	1.10e3	20.0	0.49	2.0e-4
Lens cell	H62	8.43e3	200.0	0.35	2.06e-5
Lens cone	Aluminum alloy	2.70e3	70.6	0.33	2.2e-5

2.2 标准具光机结构设计

随着光学元件面形检测精度要求越来越高, 标准具参考面的面形精度的要求也将越来越高。标准具的技术参数要求极其严格, 几乎达到苛刻的要求。在设计标准具参考面的支撑、安装固定结构时, 除了标准镜头中镜片之间有较高的同轴度要求以外, 对镜片之间的间距, 镜片受力后的变形问题的解决都是技术关键。

传统光学系统光学镜片固定装校方法比较简单, 适合一般精度要求的光学系统。采用传统的压圈隔圈的装卡方式不能满足光学性能指标的要求。为了保证每个光学折射面的定心精度, 需要减少中心基准轴的环节。通过精密研磨镜座以及精密调整镜组在镜筒中的位置来保证各透镜间的间隔和同轴要求。本文经过研究, 从理论与实践结合, 设计了如下标准具的机械结构, 如图 3 所示。标准具采用镜框镜筒式结构, 各个镜框单元单独设计、加工和装调, 从而保证较高的定位精度。

标准具镜筒内有 3 片光学零件, 设计成 3 组独立的单镜组。其中上两组镜框单元同轴度与镜片之间的光轴轴心间隙要求的误差相对较低。为了保证同轴度和光轴轴心间隙, 将光学零件装入带有内螺纹的镜座中, 依靠光学零件外圆与镜座内孔的配合及端面轴向定位, 再利用带有外螺纹的压圈将光学零件压紧。该装卡方法每个镜片可单独调整互不影响, 单独压紧透镜的超薄螺紋压圈压紧力要严格控制, 防止镜片发生过度变形, 该结构具有拆卸、修配和装配方便的特点。

最下面镜框单元为参考面, 要求装卡后参考面的面形量 PV 值优于 $\lambda/40$ 。标准具透镜采用胶粘接固定在镜框上。镜框与透镜圆周为 12 点均布的胶点, 保证所有胶点质心与透镜质心在同一个平面上。图 4 给出胶粘剂的粘接强度都随着胶层厚度的变化趋势曲线^[4]。在实际的胶结中胶层过薄, 容易缺胶, 胶层不连续, 会降低强度和刚度。结合工程实践, 胶层厚度为 0.02 ~ 0.025 mm^[5]。

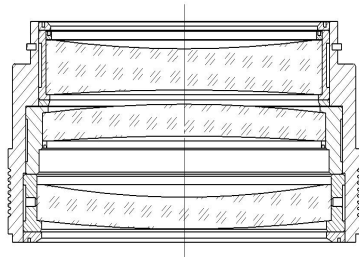


图 3 标准具光机结构

Fig.3 Opto-mechanical structure of reference Spheres mirrors

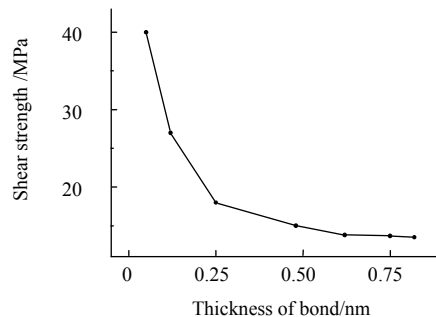


图 4 粘接强度与胶层厚度的关系

Fig.4 Relation of intensity of adhibition and thickness of bond

参考面镜框的设计采用了挠性结构, 如图 5 所示。在一个实心矩形横截面镜框上加工出 6 条穿过镜框的细长曲线狭缝, 从而将整个镜框分割为内圈和外圈两部分。内圈通过 6 个狭缝的挠性构件与外圈隔离。参考面透镜通过胶粘接在内圈上。该镜框结构具有隔振, 减镜装配应力的作用。当温度变化时, 其可以保证透镜的倾斜和共轴精度不受材料不同膨胀系数不匹配的影响。

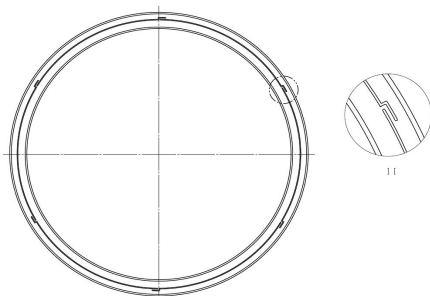


图 5 参考面镜框结构

Fig.5 Structure of reference surface cells

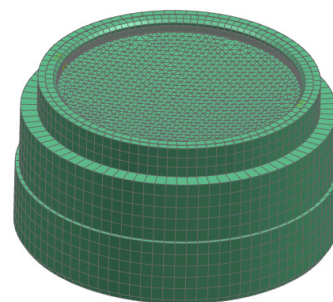


图 6 标准具有限元模型

Fig.6 Finite element model of reference Sphere mirrors

2.3 光机性能分析

在高质量的标准球面透镜组的装配过程中, 光学件的夹持变形是影响透镜组质量的重要指标之一, 需从机械结构的形式设法避免, 尤其要设法避免最后一个球面的装夹变形。运用 UG NX 软件对标准具进行有限元建模, 如图 6 所示。运用 NX NASTRAN 软件进行静力学、动力学和热分析。

2.3.1 参考面的重力变形分析

参考面重力变形和镜子的应力分布与透镜的装卡方式和工作时的放置方向有密切关系。下面针对所设计标准具装卡结构, 分析了标准具在水平方向、垂直向上和垂直向下的工作状态时的参考面的变形情况。将有限元分析得到的镜面节点信息输入到自编 Matlab 程序中进行面形的计算。面形计算时, 假设镜面变形量较小, 变形后仍然是球面, 采用最小二乘法进行球面拟合, 求变形后各节点与最佳拟合球面间的 PV 值和 RMS 值。三种工作状态下的参考面的变形情况如表 2 所示。

表 2 标准具不同工作方向的参考面面形

Table 2 Reference mirror surface figure in different working direction

Working direction	Horizontal	Down	Up
PV/nm	0.83	4.88	4.875
RMS/nm	0.13	1.04	1.035
Δ 曲率半径/ μm	3.24	8.16	-8.160

图 7(a)(b)(c)分别给出了标准具水平放置、垂直向下和垂直向上时参考面面形变形后各节点去掉最佳拟合球面后的面形。

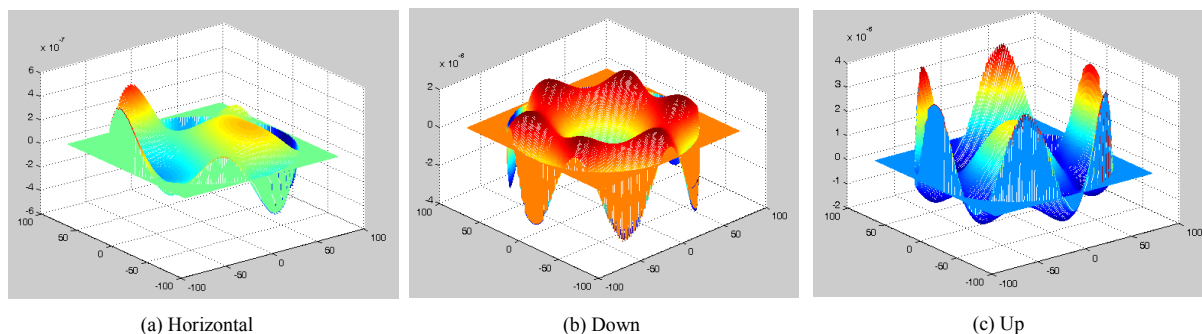


图 7 参考面的重力变形

Fig.7 The distortion structure of reference surface under gravitational conditions

分析表明, 该标准具在三种工作方式下, 垂直向下工作参考面变形变化最大, 其参考面的 PV 值为 4.88 nm, RMS 为 1.04 nm。标准具参考面的重力变形分布均匀, 面形起伏与镜框的挠性结构的位置相对应。综合分析, 当参考面加工面形 PV 值优于 $\lambda/50$ 时, 卡装后参考面的面形满足设计要求。

2.3.2 参考面温度变形分析

在高精度干涉检测中, 温度是一个非常重要的因素。在实际检测过程标准具始终处于热环境中, 各种热效应将影响到标准具的光学性能, 导致参考面的热弹性变形, 发生表面变形和透射波畸变, 很大程度影响检测的精度^[7]。

分析时将整个标准具施加均匀温度场作为温度边界条件, 分别计算了温度变化 5℃、2℃、1℃、0.1℃ 参考面的面形变化。经计算分析, 参考面面形的 PV 值、RMS 值、曲率半径变化值见表 3。

表 3 不同环境温度变化参考面面形

Table 3 Reference mirror surface figure under different level of temperature

Temperature	Temperature rise 5℃	Temperature rise 2℃	Temperature rise 1℃	Temperature rise 0.1℃
PV/nm	14.89	8.18	4.09	0.409
RMS/nm	3.12	1.24	0.62	0.062
Δ 曲率半径/ μm	25.96	10.34	5.17	0.517

分析表明, 标准具参考面面形受温度影响相对较大。因此在采用该标准具进行高精度面形检测时, 要

求检测环境的实施温度控制。根据计算结果得出, 在检测时环境温度变化控制在 $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时, 标准具完全可满足设计精度要求。曲率半径的变化在光学设计给定的公差范围内, 可以满足光学设计的要求。

2.3.3 标准具结构动力学分析

为了使整个标准具装配体的刚度满足要求, 对整个标准具进行了模态分析。在进行模态分析时, 因结构阻尼较小, 对固有频率和振型影响甚微, 故忽略不计^[6]。按照标准具使用装卡方式对标准具施加约束, 模态分析时用 Lanczos 法提取其前 4 阶弹性模态, 其中前两阶对应的振型如图 8、图 9 所示, 固有频率如表 4 所示。标准具的固有频率满足要求。

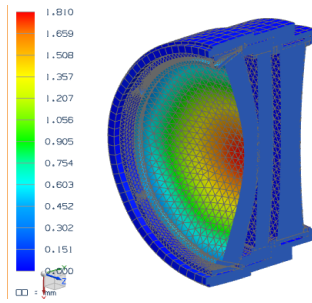


图 8 一阶振型

Fig.8 First order mode

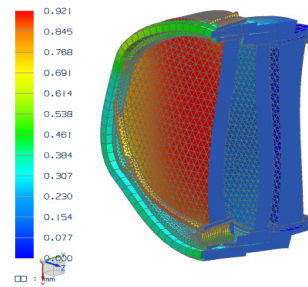


图 9 二阶振型

Fig.9 Second order mode

表 4 标准具前 4 阶固有频率

Table 4 Nature frequencies of reference Sphere mirrors

Order	Nature frequencies /Hz	Description of vibration mode
1	265	Axial vibration of reference surface
2	345	Radial vibration of reference surface
3	356	Radial vibration of reference surface
4	469	Radial torsion of reference surface

2.3.4 光机综合分析

镜子的变形主要引起光学性能的降低, 应该采用光学性能的降低程度来评价。对于高精度、小像差系统通常计算变形引起的波面误差大小, 其指标为 PV 值和 RMS 值^[7]。

有限元软件求得光学元件表面的变形后, 采用 Zernike 多项式作为热结构分析和光学分析软件之间的数据接口。将有限元模型分析各透镜表面在重力和温度影响下的变形量通过自己编制 Matlab 程序对变形后的面形进行 Zernike 拟合, 并依次输入 CODE V, 分析光学系统在重力影响下的成像质量。得出的标准具在重力作用下的传递函数如图 10 所示, 波差图如图 11 所示。

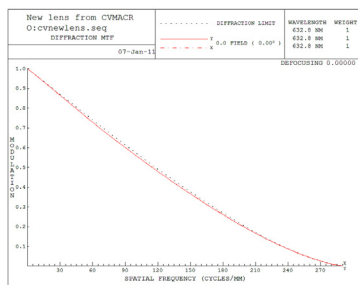


图 10 标准具重力作用下传递函数

Fig.10 MTF of reference spheres mirrors under gravitational conditions

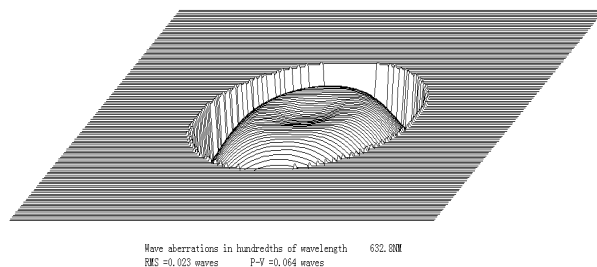


图 11 标准具重力作用下波差图

Fig.11 Wave aberrations of reference spheres mirrors under gravitational conditions

从图中可知, 标准具在重力作用下的 MTF 基本没有变化, 对应主波长 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ 的波差 PV 为 0.064λ , RMS 为 0.023λ , 满足标准具的设计指标。综合以上分析, 标准具的主要性能均满光学设计的公差要求和面形使用要求。

2.4 标准具补偿调节结构设计

透镜组的各片透镜的加工误差必定对波象质量造成一定影响,对于PV值优于 $\lambda/40$ 的标准球面透镜组而言,微小的加工可以造成比较大的PV值误差。为了抵消加工误差和降低光学对机械结构公差的要求,在光学设计时引入补偿调节环节补偿各种误差。因此需要对透镜1单元的轴向位置进行补偿,补偿量为 ± 0.75 mm,补偿精度要求小于 $5\ \mu\text{m}$ 。F5.4标准具的补偿器补偿调节采用3个差动螺纹顶丝;透镜1单元与透镜2单元中间的隔圈采用弹性隔圈。当顶丝挤压透镜1单元镜框时,弹性隔圈压缩从而使透镜1单元可以轴向移动补偿。补偿后镜框1与镜筒胶结固定,其结构如图12所示。

差动螺纹经过精密加工,螺距分别为 0.7 mm和 0.8 mm,用手拧动直径为 20 mm的微调螺母时,精度一般可以控制在 10° ,所以微调机构的微动灵敏度为

$$\Delta s = (t_1 - t_2) \frac{\Delta\varphi}{360} = 0.0027\ \text{mm}$$

式中: t_1 为螺旋1的螺距; t_2 为螺旋2的螺距; $\Delta\varphi$ 为手动转角。

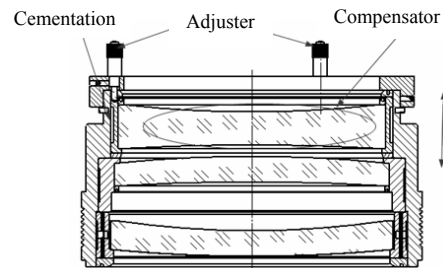


图12 标准具的补偿器调整

Fig.12 Adjuster and compensator of reference spheres mirrors

3 结 论

在高精度标准具结构设计中,本文通过标准具各零件材料的合理选型,采用合理的支撑方式设计的结构具有较高的刚度,能够抑制动力学环境干扰,具有良好的动态特性,具有较好的热尺寸稳定性。标准具参考面在重力作用下的最大面形PV值为 4.88 nm,RMS值为 1.04 nm,将标准具各透镜在重力作用下的面形变化后的结果带入CODE V重新分析计算,标准具的光学指标可以满足要求。另外,所设计的补偿器微调机构采用了差动螺纹传动的方式,具有结构简单、体积小、重量轻的优点,经过理论分析和初步的使用试验证明,调节精度可以达到 0.0027 mm,能够满足使用要求。

参考文献:

- [1] 王相森. 光学光刻技术的发展历程及趋势 [J]. 微处理机, 2002, 36(4): 122.
WANG Xiang-sen. The growing and trend of optical photolithographic technology [J]. *Microprocessors*, 2002, 36(4): 122.
- [2] 武旭华, 陈磊, 王磊. 300 mm 干涉仪标准镜的设计及测试 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1235-1240.
WU Xu-hua, CHEN Lie, WANG Lei. Design and test of reference mirror in 300mm interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1235-1240.
- [3] Toshiyuki Takatsuji, Sonko Osawa. Stability of the reference flat used in Fizeau interferometer and its contribution to measurement uncertainty [J]. *Proc. of SPIE(S0277-786X)*, 2003, 5190: 431-436.
- [4] 刘强, 何欣, 谭进国, 等. 离轴四反光学系统反射镜支撑技术研究 [J]. 光学技术, 2010, 36(4): 489-494.
LIU Qiang, HE Xin, TAN Jin-guo, et al. Investigation on mirror supporting structure of four mirror reflective anastigmat optic system [J]. *OPTICAL TECHNIQUE*, 2010, 36(4): 489-494.
- [5] Paul R Yoder Jr. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 220-223.
Paul R Yoder Jr. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 220-223.
- [6] 李飞, 袁艳. 光学成像仪箱体的结构模态影响因素分析 [J]. 机械设计与制造, 2010, 1(1): 187-189.
LI Fei, YUAN Yan. Factors influencing optical imager cabinet structure mode analysis [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, 1(1): 187-189.
- [7] 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.
XU Rong-wei, LIU Li-ren, LIU Hong-zhan, et al. Support Schemes and Thermal Deformation Analysis of Large Aperture Interferometer Mirrors [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2005, 25(6): 809-815.