

doi:10.3788/gzxb20184707.0722002

1.2 m 轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离

张琰^{1,2}, 叶璐¹, 张金平¹, 郑列华¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在地面环境检测的空间反射镜面形主要是镜面加工残差和重力支撑变形等耦合的结果. 为实现 1.2 m 轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离, 通过测量镜面在等梯度支撑力下的面形, 由镜面力学响应得到镜面畸变和支撑力变化的关系, 以此作为界定有限元分析结果和优化有限元模型的依据. 将由修正模型得到的重力支撑面形畸变从反射镜面形检测结果中移除, 即可得到反射镜加工残差. 研究表明, 修正后的模型对 100 N 支撑力变化引起的面形畸变与实测结果误差 $\leq 0.001\lambda$, 面形检测为 $1/30\lambda$ 的空间反射镜, 其无重力和支撑影响的加工残差优于 $1/40\lambda$. 该结果不仅能指导反射镜面形的高精度抛光, 还可提高最终系统装调精度.

关键词: 光学制造; 光学检测; 大口径空间反射镜; 支撑力控制; 重力支撑变形分离

中图分类号: V447.1; TH703

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0722002-6

Gravity and Support Error Separation of 1.2 m Lightweight Space Mirror

ZHANG Long^{1,2}, YE Lu¹, ZHANG Jin-ping¹, ZHENG Lie-hua¹

(1 *Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The test result of space mirror figure in the ground environment is mainly composed of the surface processing residual and the distortion caused by gravity and support. In order to realize the gravity-support distortion separation of the 1.2 m lightweight space reflector, by testing mirror with equal gradient support forces, the relationship between mirror figure distortion and the change of support forces is obtained from the mirror mechanical response, which can be used as a basis for judging the result of finite element simulation and optimizing finite element model. After removing the mirror figure distortion calculated with the corrected model from the mirror test result, the surface processing residual is obtained. The research shows that the difference of mirror distortion change caused by 100 N supporting force change between the result calculated with the corrected model and the test result is $\leq 0.001\lambda$, without the effects of gravity and support, the surface processing residual of space mirror with test result rms $1/30\lambda$ is better than $1/40\lambda$. This result can not only guide the high precision surface polishing, but also improving the alignment precision of final system.

Key words: Optical fabrication; Testing; Large-aperture space mirror; Supporting force control; Gravity and support distortion separation

OCIS Codes: 220.4610; 220.4840; 120.4610; 120.4630 ; 120.4880

0 引言

除去温度等其他因素的影响, 空间反射镜在地面环境检测到的面形主要是面形加工残差和重力支撑变

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No.2011CB013206)资助

第一作者: 张琰(1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间大口径反射镜加工和检测. Email: rocketdragon203@163.com

导师(通讯作者): 郑列华(1966—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间大口径反射镜加工和检测. Email: dimo818@126.com

收稿日期: 2018-01-31; 录用日期: 2018-03-12

<http://www.photon.ac.cn>

形耦合的结果,其中重力支撑变形对检测结果影响较大,面形加工残差一定的镜面在不同支撑状态下所测得的面形可能会差异较大.重力支撑变形大小除受支撑点布局、支撑接触状态、支撑刚性等影响^[1-3]外,还和反射镜自身结构和材料力学性能相关,口径越大、轻量化率越高、比刚度越低、表面精度越高,其面形就越易受重力和支撑的影响^[4-5].如果能从反射镜检测结果中去除重力变形,直接得到表面加工残差,对大口径空间反射镜的高精度面形抛光及最终系统装调均有重要意义.

近些年,基于数控的确定性加工技术如计算机控制小磨头^[6](Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)、能动盘^[7]、磁流变抛光^[8](Magnetorheological Fishing, MRF)、离子束抛光^[9](Ion Beam Figuring, IBF)等已成为大口径、高精度空间反射镜加工的主要手段,这类技术对镜面修形的依据是干涉仪测得的耦合了重力支撑变形的面形数据.若能直接采用镜面加工残差来指导面形修正,可提高加工效率和修形精度.另一方面,地面装调时支撑变形在反射镜面形误差中所占比例越大,在空间环境重力释放引起的镜面变化就越明显^[10].采用镜面加工残差即零重力面形,来指导反射镜装调变形控制,可排除反射镜检测时的支撑变形带来的不利干扰.

大口径空间反射镜的空间支撑主要针对空间应用而设计^[11],一般支撑点少且不带支撑力检测和控制功能,不适用于米级及以上口径反射镜在地面环境的高精度加工和检测^[12].在地面光轴垂直检测时,大口径空间反射镜的支撑采用了类似大口径地基望远镜主镜加工和检测支撑的思路,即通过支撑将反射镜的重力支撑变形控制在较小范围内,这种多点支撑有 Hindle^[5]、气动或液压 Whiffletree^[13]以及计量镜座式支撑^[5]等结构形式,支撑力控制有主、被动两种形式.著名的哈勃空间望远镜主镜加工检测时为了将重力支撑变形控制在 $1/300\lambda$ 左右,采用了130点支撑力大小可调的卸载结构,支撑结构较为复杂^[14].国外 BLOEMHOF E E^[15]和国内杨利伟^[16]等采用了方位反向技术提取了反射镜的零重力面形.轻量化空间反射镜结构相对复杂,在支撑设计时,大多采用有限元工具进行理论指导,如果有限元仿真结果在一定范围内有足够高的可信度,那么可将重力支撑引起的镜面畸变从反射镜面形检测结果中移除,从而得到较为精确的加工残差.

本文通过实测某型号1.2 m轻量化碳化硅反射镜在等梯度支撑力下的面形响应,得到了反射镜的实际支撑力变化与面形畸变的关系曲线,据此修正有限元模型并将重力支撑变形误差从实际检测面形中移除,得到镜子加工残差,所得结果可用于提高空间反射镜的加工精度、效率和最终装调效果.

1 重力误差分离及实验平台

1.1 重力误差分离的思路

假定支撑引起的待检镜微小变形仍属于弹性变形,那么在同样支撑点布局、支撑力方向条件下,支撑力大小应该和镜面支撑变形大小呈现线性关系.对反射镜及支撑进行有限元建模,可计算出不同大小支撑力所对应的镜面变形,这些变形中没有加工残差,从变形结果中提取出镜面各点沿法线方向的位移,对提取结果进行 Zernike 拟合,移除其中的平移和倾斜部分,得到镜面畸变结果,从而建立理论的镜面面形畸变与支撑力大小的关系,同时也可得到支撑力变化与对应的镜面畸变之间的关系,即

$$K_I = \Delta W_I / \Delta F (\lambda / N) \quad (1)$$

式中, K_I 为支撑力变化引起的镜面面形畸变与支撑力变化关系曲线的斜率, ΔW_I 表示等梯度支撑力引起的镜面畸变的变化, ΔF 表示支撑力变化.

对实际光轴垂直检测的反射镜来说,重力和轴向支撑所引起的变形,主要包含镜面面形畸变、镜面面形的刚性位移(包括平动和转动,由镜体自身变形引起的镜面刚性位移和支撑变形引起的刚性位移两部分组成).镜面刚性位移可通过检测架调整或者软件算法进行移除,所得结果主要为镜面面形畸变和表面加工残差.在不同支撑力下,反射镜面形检测结果中镜面加工残余部分基本不变,故将两组不同支撑力下所得的两幅干涉图相减,可得到只由支撑力变化引起的镜面畸变,并且同样的支撑力变化引起的镜面面形畸变应该相当,即

$$K_T = \Delta W_T / \Delta F (\lambda / N) \quad (2)$$

式中, K_T 为实测的不同支撑力下镜面面形变化与对应支撑力变化关系曲线的斜率, ΔW_T 表示等梯度支撑力下实测镜面面形的变化, ΔF 表示支撑力的变化.

依据式(1)和(2)得到的 K_I 和 K_T 可建立判定准则,即

$$\Delta K = |K_i - K_T| \leq A (\lambda/N) \quad (3)$$

式(3)可作为衡量有限元仿真精度的依据,其中 A 与加工精度及分离精度要求相关,据此可修正和优化有限元模型,由新模型可得到较为准确的重力支撑面形畸变,将面形检测结果减去重力支撑镜面畸变即可得到镜面加工残差。

1.2 1.2 m 轻量化空间反射镜的面形检测

1.2 m 碳化硅空间反射镜工作面为抛物面,最终面形精度要求为 $1/30\lambda$,检测时采用 Offner 补偿器来对抛物面法线像差进行补偿,实现零位补偿经验,其光轴垂直检测光路如图 1,为了检测方便,采用平面转折镜将光路引致水平方向.采用 15 点最佳支撑状态下的检测结果指导反射镜的加工,经有限元分析,由最佳支撑引起的理想镜面畸变 $RMS \leq 1/100\lambda$.检测时对环境温度和气流进行严格控制,以消除温度和气流引入的测量误差,采用 4d 干涉仪及气浮隔震平台可极大降低环境振动对测量结果的影响,高精度补偿器设计和制造可将补偿系统误差控制在极小范围从而可被忽略不计.镜子检测轴向支撑采用浮动支撑结构,无附加力矩引入,故检测结果主要为镜面加工残差和重力支撑变形。

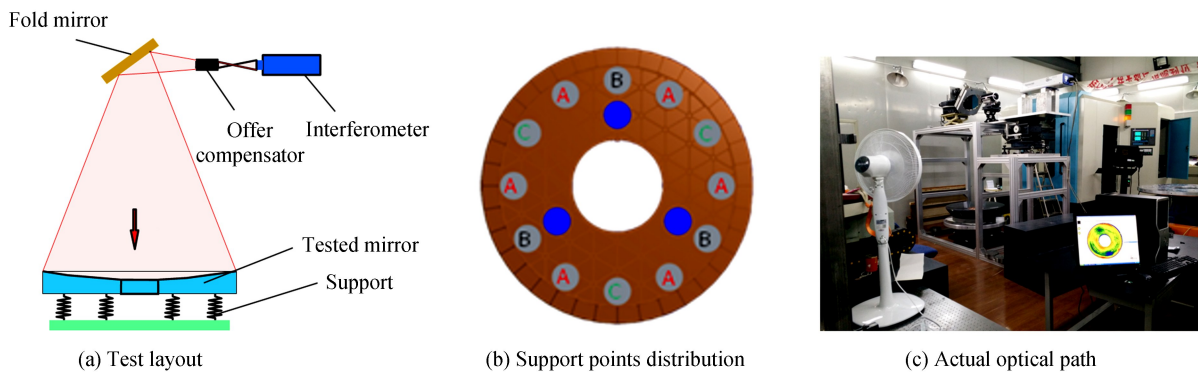


图 1 1.2 m 碳化硅空间反射镜的垂直检测光路及支撑点分布

Fig.1 Axis-vertical test layout of 1.2 m SiC space mirror and distribution of support points

1.3 带有支撑力检测和控制功能的光轴垂直检测平台

为得到不同支撑力下反射镜的面形数据,建立支撑力变化与镜面支撑畸变变化的关系,针对 1.2 m 碳化硅空间反射镜搭建了带有支撑力检测和控制功能的光轴垂直检测平台,其结构及布局如图 2。

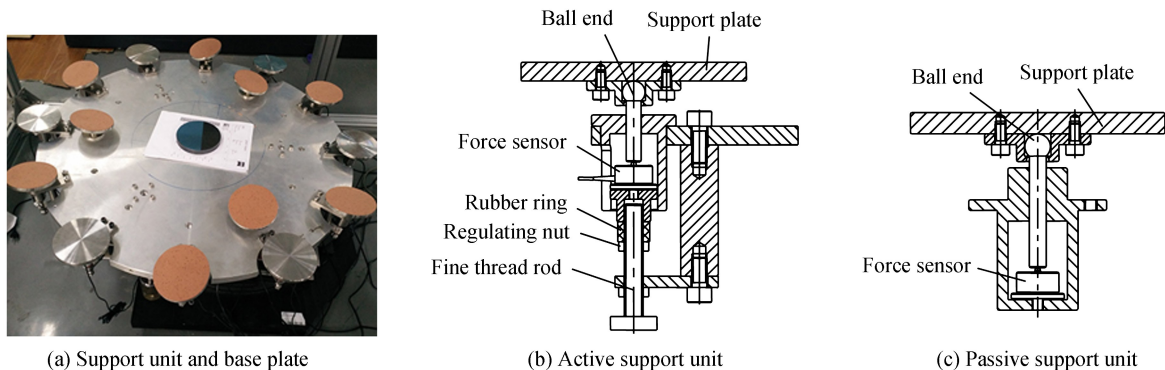


图 2 光轴垂直检测光路及其支撑单元结构

Fig.2 Axis-vertical test layout and structure of support unit

该检测支撑平台有 15 个支撑单元,中间 3 个支撑单元为被动支撑点,用于控制镜子的空间姿态和位置,周边 12 个单元为主动支撑点,每个主动支撑单元均可通过精密细牙螺纹副及橡胶垫圈精确调整支撑力的大小.在每个支撑点上有高精度压力传感器用于检测各点支撑力的大小,传感器测力范围为 $0 \sim 150$ N,精度为 0.3 N,分辨率为 0.1 N.为消除各支撑点引起的附加力矩,各支撑点采用万向球铰支撑结构.所有支撑单元通过铝制基板安装固定在五维调节机构上。

2 实验及结果

在镜子加工前,由有限元仿真可知,当如图1所示的镜子主动支撑力分别为 $F_A=67\text{ N}$ 、 $F_B=44\text{ N}$ 、 $F_C=60\text{ N}$ 时,镜子支撑变形 $\leq 1/100\lambda$,此时反射镜为15点最佳支撑状态,镜子在该支撑状态下加工至面形 $\text{RMS}=1/30\lambda$.在镜面面形 $\text{RMS}=1/20\lambda$ 和 $\text{RMS}=1/30\lambda$ 时,分别对镜子在不同支撑力下的面形进行了检测.

实验时采用9点支撑,即采用内圈3点和外圈6个 60° 均布的A点为支撑点.内圈三点仍为被动支撑,作为控制镜子空间位置和姿态的硬点,外圈A点作为主动加力点,每个A点上支撑力大小相等,方向与重力反向,竖直向上,将A点上的支撑力以10N为跨度,等梯度地由0N变化至140N,通过光路检测其相应的面形数据.镜子加工面形为 $\text{RMS}=1/20\lambda$ 时的力学响应曲线如图3中d所示,镜子加工面形为 $\text{RMS}=1/30\lambda$ 时的力学响应曲线如图3中c所示.图3中曲线a为未经修正的有限元模型相应支撑力下所得镜面变形经移除刚性位移后的表面畸变结果.图3中曲线b为修正后有限元模型相应支撑力下所得镜面变形经移除刚性位移后的表面畸变结果.

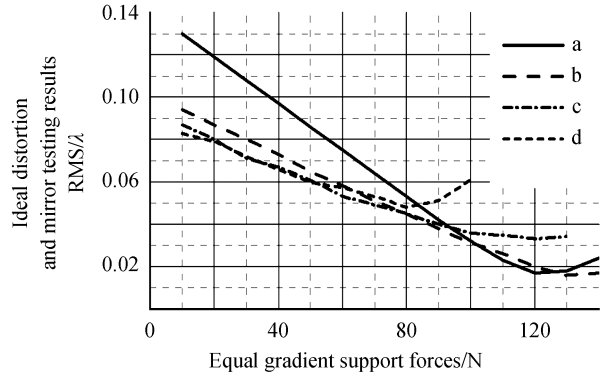


图3 有限元计算的面形畸变与实际检测面形结果
Fig.3 Actual test results of surface deformation and finite element calculation results

由图3中曲线a、c可知支撑力从0N到90N时,支撑力引起的理论镜面畸变和实际检测面形结果都与支撑力大小成较好的线性关系,但二者斜率不同,对于实际检测面形来说,A点单位支撑力变化引起的镜面面形变化为

$$K_T = \Delta W_T / \Delta F = 0.0063\lambda / 10\text{ N} = 0.00063 (\lambda/\text{N}) \quad (4)$$

采用原始有限元模型计算的A点单位支撑力变化引起的镜面面形变化为

$$K_{10} = \Delta W_{10} / \Delta F = 0.011\lambda / 10\text{ N} = 0.0011 (\lambda/\text{N}) \quad (5)$$

对比式(4)和(5)可知,100N的A点支撑力变化引起的镜面畸变和实际镜面畸变误差会达到 0.047λ ,通过修正模型,若该误差在镜面加工误差 $1/30\lambda$ 精度要求的 $1/10$ 以内 ($\leq 0.0033\lambda$),则采用该有限元模型得到的支撑镜面畸变是可以用来进行支撑变形误差分离的.

导致支撑力变化引起的理论和实际面形畸变产生较大差异的主要原因为有限元模型网格细化程度、有限元模型与实际模型的尺寸差、支撑边界条件简化、材料力学参数误差等,对以上各项检查后,发现差异主要由支撑边界条件简化引起,将支撑力边界条件由面力添加方式改为球铰方式后可得相应支撑力下镜面变形移除刚性位移后的表面畸变结果,如图3中曲线b,即

$$K_{11} = \Delta W_{11} / \Delta F = 0.0065\lambda / 10\text{ N} = 0.00065 (\lambda/\text{N})$$

此时,曲线b、c支撑力变化100N引起的镜面畸变差异 $\leq 0.002\lambda$,可用新模型计算的面形畸变进行重力误差分离.需要注意的是,在分离重力支撑变形时应采用相应面形数据进行加减,不能简单地将曲线数据进行加减.

3 分析与讨论

在理想情况下,镜子有限元模型计算的等梯度支撑力的镜面畸变曲线应该和实际检测面形的力学响应曲线平行.实际由于建模精度、结构简化、边界简化、结构尺寸误差、材料参数误差等原因,这两条曲线将不再平行.从图3中c可看出,在接近加工残差之前,镜子在等梯度力下的表面畸变与支撑力之间成线性关系,验证了等梯度支撑力与镜面畸变之间线性关系假设的正确性.另从图3还可看出镜子在加工到 $1/20\lambda$ 和 $1/30\lambda$ 时,支撑力为70N之前的力学响应基本一致,说明镜子的力学响应与镜面加工残差大小关系不大.由修正后有限元模型计得到的等梯度支撑力的镜面畸变曲线斜率与对应实测面形曲线斜率十分接近,差异为 $0.00002\lambda/\text{N}$.

对于轴向支撑检测来说,反射镜在图3中曲线c的线性区域所对应的支撑力下,实际检测面形数据会处

于理想镜面畸变的下方,这主要是因为加工残差主要为正的缘故,即面形加工是由比较球开始,从内测逐渐逼近标准非球面的.当 A 点支撑力由 0 变化至 100 N 时,耦合重力支撑变形及加工残差的镜面面形随着周边支撑力的增大,从外侧接近理想面形,然后达到 9 点最佳支撑状态,如果支撑力继续增大,则耦合重力支撑畸变及加工残差的镜面面形会向最佳支撑状态内侧逐渐弯曲而偏离最佳支撑状态.

对不同支撑力下的重力支撑误差进行分离,结果如图 4 所示.

在最佳支撑力下,用实测面形减去优化后模型计算的重力支撑变形所得结果如图 5 所示.对比不同支撑力下和最佳支撑力下重力误差分离的结果可知,各重力误差分离后的结果相差不大,其值均在 0.022λ 左右,波动范围 $\leq 0.003\lambda$.

从图 5(c)可知,加工残差明显有三叶草形状的凹下区域,造成这一现象的原因是,在实际检测时,这三部分刚好与支撑位置对应,在支撑作用下该区域的正常畸变是相对于理想面鼓出一部分高度,在基于干涉检测结果的指导下进行抛光,鼓出部分会被加工掉,故重力释放或者经重力误差分离后,在该区域会出现下凹趋势.

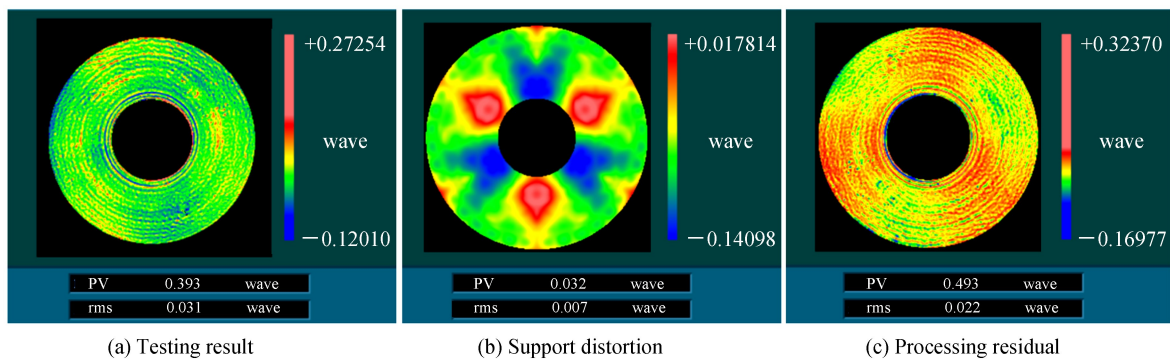


图 5 最佳支撑状态下的重力误差分离结果

Fig.5 Gravity and support distortion separation under the best support condition

4 结论

从 1.2 m 轻量化空间反射镜不同支撑力下的面形检测结果来看,在接近实际加工残差之前,镜子在等梯度力下的表面畸变与支撑力之间成线性关系;15 点最佳支撑状态下加工到面形 $RMS=1/30\lambda$ 的反射镜其表面加工残差 $RMS \leq 1/40\lambda$;采用实际测量的支撑力变化与对应反射镜面形畸变的关系作为界定有限元仿真精度的依据,可进一步提高模型仿真精度和可信性,不仅可用于现有支撑效果判断,还使高精度重力支撑变形分离成为可能.接下来将尝试从更大口径反射镜在多环带支撑点下的力学响应以及光轴水平状态下反射镜的力学响应等两方面展开进一步研究工作.

参考文献

- [1] BAO Qi-hong, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Characteristics of rear support in centre for space SiC mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 222003.
包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 空间 SiC 反射镜背部中心支撑特性[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2): 222003.
- [2] WANG Fu-guo. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2m SiC primary mirror surface figure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **40**(6): 933-936.
王富国. 温度和支撑方式对 1.2m SiC 主镜面形的影响分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 933-936.
- [3] CHEN Yong-cong, HU Yong-ming, LI Ying-cai, *et al.* Displacement analyzing and support position optimizing of the main mirror with backside support[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1730-1733.

- 陈永聪,胡永明,李英才等.背部支撑主反射镜的面形分析与支撑点优化[J].光子学报,2007,**36**(9):1730-1733.
- [4] LI Zong-xuan, CHEN Xue, ZHANG Lei, *et al.* Design of cartwheel flexural support for a large aperture space mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(6):0622003.
李宗轩,陈雪,张雷,等.大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J].光学学报,2014,**34**(6):0622003.
- [5] PAUL R. Opto mechanical systems design[M].Zhou Hai-xian, Cheng Yunfang Transl.Beijing:China Machine Press, 2008:449-452.
PAUL R. 光机系统设计[M].周海宪,程云芳译.北京:机械工业出版社,2008:449-452.
- [6] WANG Jia, FAN Bin, WAN Yong-jian, *et al.* A method to evaluate the error restraint ability of CCOS process[J].*Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0722002.
王佳,范斌,万勇建,等.一种评价 CCOS 抛光工艺误差抑制能力的方法[J].光子学报,2014,**43**(7):0722002.
- [7] ZHONG Xian-yun, FAN Bin, ZENG Zhi-ge, *et al.* Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on 1.8 m lightweight reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 322002.
钟显云,范斌,曾志革,周家斌,等.1.8m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析[J].光学学报,2012, **32**(3): 322002.
- [8] BAI Yang,ZHANG Feng,LI Long-xiang, *et al.* Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0322007.
白杨,张峰,李龙响,等.碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J].光学学报,2015, **35**(3): 0322007.
- [9] MA Zhan-long,GU Yong-qiang,PENG Li-rong, *et al.* Ultra-gradient mirror figuring by 5-axis ion beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(6): 0622001.
马占龙,谷勇强,彭利荣,等.应用五轴离子束修正超高陡度镜面[J].光学学报,2015, **35**(6): 0622001.
- [10] LI Ling, ZHAO Ye. A Gravity unloading method of on-ground alignment for large aperture remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016,**37**(5):69-76.
李玲,赵野.大口径空间相机地面装调时的重力卸载方法[J].航天返回与遥感,2016,**37**(5):69-76.
- [11] DONG Ji-hong,LIU Hong-wei.Supporting structure design of large-aperture primary mirror for space camera[J].*OME Information*, 2011,**28**(10):28-34.
董吉洪,刘宏伟.空间相机大口径主镜支撑结构设计[J].光机电信息,2011,**28**(10):28-34.
- [12] PENG Yang-lin, DAI Yi-fan, CHEN Shan-yong,*et al.*High precision figure testing of large-aperture space mirrors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011,**32**(6):1166-1172.
彭扬林,戴一帆,陈善勇,等.大口径空间反射镜高精度面形检测的支撑技术研究[J].应用光学,2011,**32**(6):1166-1172.
- [13] HU Hai-fei,LUO Xiao,QI Er-hui,*et al.*System integration and control of the hydrostatic supports for manufacturing ultra-large optics[J].*Acta Optica Sinica*, 2015,**35**(8):256-264.
胡海飞,罗霄,戚二辉等.超大口径光学制造的静压支撑系统集成与控制[J].光学学报,2015,**35**(8):256-264.
- [14] DANIEL J, TERENCE A.Design and fabrication of the NASA 2.4-meter space telescope[C].SPIE,1982,330:139-143.
- [15] BLOEMHOF E E, LAM J C,FERIA V A,*et al.* Extracting the zero-gravity surface figure of a mirror[J].SPIE,2008, 7013: 70133L.
- [16] YANG Li-wei, LI Zhi-lai, XUE Dong-lin,*et al.*Extracting zero-gravity surface figure of mirror by orientation reversal [J].*Chinese Optics*, 2016,**9**(5):606-612.
杨利伟,李志来,薛栋林等.应用方位反向技术提取反射镜零重力面形[J].中国光学,2016,**9**(5):606-612.

Foundation item: The National Key Basic Research Program of China (No.2011CB013206)

引用格式:ZHANG Long, YE Lu, ZHANG Jin-ping, *et al.* Gravity and Support Error Separation of 1.2 m Lightweight Space Mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0722002

张珑,叶璐,张金平,等.1.2 m 轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离[J].光子学报,2018,**47**(7):0722002