

文章编号 1004-924X(2015)10-2835-08

大口径离轴长条形反射镜的检测支撑机构

杨 帅^{1,2}, 沙 巍¹, 陈长征¹, 张星祥¹, 任建岳^{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. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对大口径离轴长条形反射镜光轴水平向检测的需要,设计了一套检测支撑结构。优化了结构参数,实现了由支撑结构引起的镜面面形误差最小化。通过比较长条形反射镜光轴水平向检测支撑的级联多点支撑结构,选择了结构简单、扩展性和调整性优良的两点单层固定支撑结构。利用集成仿真与优化方法,分析计算反射镜镜面面形误差随支撑间隔的变化趋势,确定了最优支撑间隔。最后,利用干涉仪结合补偿器的检测方式,对不同支撑间隔工况下镜面面形进行检测,验证了仿真分析的可靠性。结果表明:在支撑间隔为 564 mm 时,由检测支撑引起的镜面面形误差最小(RMS=8.26 nm),干涉检测得到的镜面面形误差随支撑间隔的变化趋势与仿真得到的趋势相符,仿真结果可靠性高。提出的方法可实施性好,可推广到其他大口径离轴长条形反射镜的设计和检测中,为离轴三反(TMA)相机的设计提供技术基础。

关键词:离轴长条形反射镜;检测支撑;面形误差;集成仿真与优化;离轴三反相机

中图分类号:TH703;V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2835

Detection support structure of large-aperture off-axis rectangular mirror

YAHG Shuai^{1,2}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng¹, ZHANG Xing-xiang¹, REN Jian-yue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: reny@sohu.com

Abstract: A detection support structure was designed to meet the need of a large-aperture off-axis rectangular mirror at an optical axis horizontal situation. Structure parameters were optimized to minimize the surface shape error caused by the detection support structure. Through comparing different cascaded multipoint lever support structures, a two-point support structure with simple structure, good extensibility and adjustment was chosen. Then, an integrated simulation and optimization method was used to analyze the trend curve of mirror surface shape changed with support interval and to obtain the optimized support interval. Finally, an interferometer combined with a compensator was used to measure the surface shapes corresponding to different support intervals and to verify the reliability of the simulation result. The result shows that the surface shape error caused by detection support structure reaches minimum at the support interval of 564 mm (RMS=8.26 nm), the trend curve ob-

收稿日期:2015-01-25;修订日期:2015-02-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

tained by simulation method agrees well with that obtained by the interferometry and shows a higher reliability. The method in this paper can be extended and applied to the design of detection support structure for other large aperture off-axis rectangular mirrors, and can provide a foundation for off-axis Three Mirror Anastigmat (TMA) cameras.

Key words: off-axis rectangular mirror; detection support; surface shape error; integrated simulation and optimization; Three Mirror Anastigmat(TMA) camera

1 引言

在离轴三反消像散光学系统(Three Mirror Anastigmatism, TMA)中,为了实现大视场成像,主镜、三镜常采用长条形离轴非球面反射镜。作为 TMA 光学系统中最大和次大的 2 块反射镜,主镜和三镜的面形精度对光学系统的成像质量影响敏感度高^[1-4]。在加工、镀膜等制备过程中,需要对反射镜进行多次检测以确保其面形精度,所以检测支撑结构应结构简单、便于装调,且必须保证支撑结构引起的面形误差满足检测精度要求^[5,6]。

反射镜在精加工过程中需要进行反复检测。根据反射镜光轴朝向的不同,检测方式可以分为光轴竖直式和光轴水平式。光轴竖直式是将反射镜光轴指向垂直方向,将干涉仪等仪器竖直置于光路中或采用反射镜进行光路转折进行检测。该方法的优点是在反射镜的检测和加工状态下光轴指向一致,状态相同。但由于需要将干涉仪等精密设备进行吊装,其安全性较差,操作不便,如果在光路中增加反射镜则会检测精度。所以这种检测方式主要应用于难以垂直放置的超大尺寸(超过 2 m 直径)反射镜,在工程实践中使用较少。光轴水平式是将反射镜光轴指向水平方向,各检测设备水平放置。相比光轴竖直式检测,光轴水平式具有更好的可操作性和安全性。因此,人们通常选用更为合理的光轴水平式检测方式^[7]。

在光轴水平式检测方面,常用的反射镜检测支撑有 V 形支撑、多点边缘支撑和吊带支撑等方式^[8-10]。但是这些支撑方式多是针对圆形反射镜在光轴水平式检测时使用的,对于离轴长条形反射镜并不适用,需要重新设计检测支撑方式或将适用于圆形反射镜的检测支撑方式加以改进,以

满足离轴长条形反射镜光轴水平式检测需求。

本文以某离轴 TMA 相机主反射镜(1 010 mm×480 mm)为研究对象,针对其光轴水平式检测方式,设计了一种检测支撑结构,利用集成仿真与优化设计方法,优化结构参数,最小化由检测支撑引起的镜面面形误差,利用干涉仪检测试验验证支撑结构设计的合理性。

2 光轴水平式检测支撑结构设计

Vukobratovich 指出,如果反射镜是矩形,反射镜的光轴又是处于水平状态,可以选用几个点提供垂直方向的支撑^[11]。图 1 所示为 2~5 个点的级联支撑结构。

图 1(b)、(c)、(d)所对应的 3~5 个支点的级联支撑方案中,因加入了枢轴、摇摆机构和横杆组件,其结构较为复杂,不可控因素增多。在检测过程中,采用多层级联支撑的反射镜需要较长时间才能达到稳定状态。另外,多层级联支撑方案中各支撑点的间隔相对固定,针对长度不同的长条形反射镜需要定制不同支撑点间隔的多层级联支撑结构,对于同一长条形反射镜,若要改变支撑点的间隔,也需要重新定制支撑结构,其通用性和可调整性较差。

考虑到上述问题以及实际工程应用的需要,长条形反射镜在光轴水平状态下的检测支撑应选用两点单层固定支撑结构。其结构示意图如图 2,包括基底和支撑垫块 2 个主要部分组成。

基底采用大理石气浮平台,具有较高的刚度和稳定性。支撑垫块由 45 号钢制成,垫块顶端与反射镜下边缘接触部分由橡胶包裹,以保证支撑垫块与反射镜下边缘接触良好,呈线接触关系,支反力均匀分布于 2 条接触线上。支撑垫块和大理石基底通过摩擦力约束定位。反射镜的材料为 SiC,支撑垫块及反射镜的材料属性如表 1 所示。

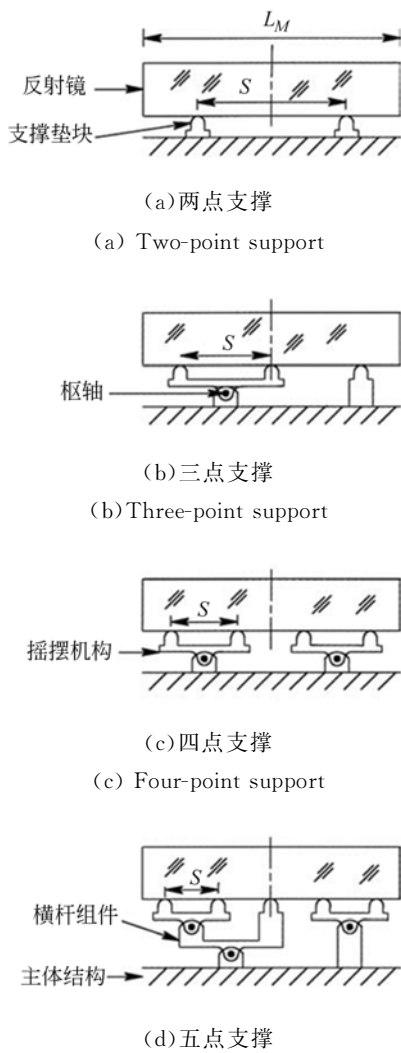


图 1 矩形反射镜用级联多点支撑机构
Fig. 1 Cascaded multipoint lever support structures for a rectangular mirror

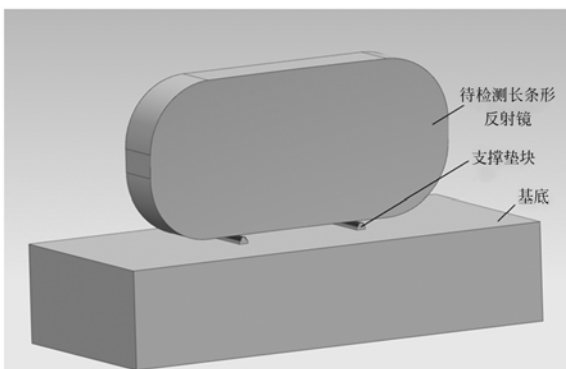


图 2 两点支撑结构
Fig. 2 Two-point support structure

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g · cm ⁻³)
SiC	400	0.26	3.2
C45	209	0.27	7.9

3 工况分析

离轴长条形反射镜在两点单层固定支撑的检测状态下,其受力示意如图 3 所示。

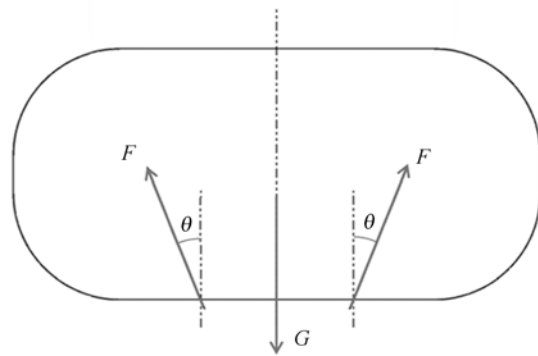


图 3 受力分析
Fig. 3 Mechanic analysis

在反射镜自身重力和 2 支撑垫块支反力的共同作用下,反射镜会产生一定的变形,引起反射镜镜面的变化,产生镜面面形误差,即在检测状态下,反射镜由检测支撑结构所引起的镜面面形误差。当 2 个支撑垫块的间隔发生改变时,反射镜在 2 支撑垫块两侧的质量分布会发生变化,支反力 F 和支反力倾角 θ 也随之改变,相应的反射镜就会产生不同程度的变形,所引起的反射镜镜面面形误差也不相同。所以,离轴长条形反射镜检测采用两点单层固定支撑结构的关键在于确定最优的支撑间隔。

Vukobratovich 指出,采用多级联支撑结构进行矩形反射镜光轴水平状态检测时,当反射镜的长 L_M 一定时,支撑点之间的最佳间隔 S_{opti} 为:

$$S_{opti} = \frac{L_M}{(N^2 - 1)^{1/2}}, \quad (1)$$

式中: N 为支撑点个数。

需要指出的是,由式(1)给出的最佳支撑点间隔所对应的前提条件是反射镜为实心结构,镜体

为标准的长方体形状。但是,本文中的反射镜为离轴长条形反射镜,背部带有轻量化孔设计,反射镜上下两边缘的矢高也不相同,这些都使得反射镜的质量分布与理想的矩形反射镜质量分布存在差异。因此由式(1)计算得到的最佳支撑间隔并不一定适用于特定形状的离轴长条形反射镜检测支撑结构的设计。

鉴于常规理论分析和经验公式的局限性,采用集成仿真与优化设计方法^[12,13],对反射镜的检测支撑状态进行模拟,并优化支撑垫块的间隔,最小化由检测支撑引入的镜面面形误差。

4 反射镜检测支撑的优化设计

离轴长条形反射镜的尺寸为 1 010 mm×480 mm,边倒圆 R 为 205 mm,背部加工有开放式的轻量化孔。建立长条形反射镜检测支撑状态的有限元分析模型,如图 4 所示。



图 4 有限元分析模型

Fig. 4 Finite element model

采用集成优化分析方法,以支撑间隔为设计变量,优化由检测支撑引起的镜面面形误差。集成优化分析流程及相应软件工具如图 5 所示。利用集成优化软件 Isight 集成有限元分析软件 Altair Hypermesh 和 Altair Optistruct 以及面形拟合 Matlab 程序,利用不同软件间的接口数据传输,实现支撑点间隔调整、有限元模型更新与分析计算、反射镜镜面面形拟合以及面形拟合结果反馈判断的一体化自动求解,构成完整的优化循环回路。避免了手工调整以及各软件单独分析计算的巨大工作量,提高了结构设计效率,有利于快速得到最优支撑间隔。

优化过程分为:

(1)整体实验设计。以两支撑垫块的间隔为

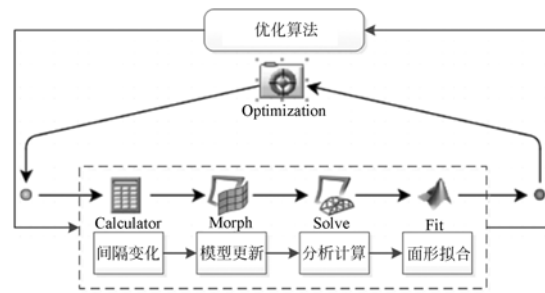


图 5 集成优化分析

Fig. 5 Integrated optimization analysis

设计变量,考虑到长条形反射镜下边缘平面横向跨距为 600 mm,支撑间隔取值区间定为 [200, 600],步长取 20 mm,得到镜面面形误差随支撑间隔变化的整体趋势,并且初步得到支撑间隔的较优值。整体实验设计反射镜镜面面形误差随支撑垫块间隔变化的整体趋势如图 6 所示。

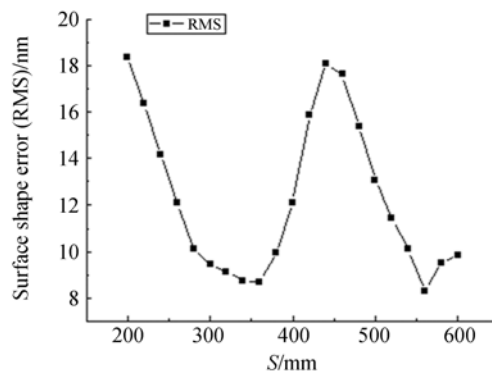


图 6 整体趋势图

Fig. 6 Overall trend diagram

可以看出,在支撑间隔为 360 mm 和 560 mm 的邻域内,面形误差 RMS 值取得极小值,在二者之间,面形误差 RMS 取得极大值。通过考察反射镜背部开放式的轻量化结构发现,在横向跨距为 300 mm 和 600 mm 处各有 2 条竖直走向的加强筋,它可提高反射镜的结构刚度,为支撑垫块提供良好的传力路径,所以在此区域内由支撑结构引起的面形误差较小。计算结果表明,并非当支撑垫块恰好作用于筋对应的支点时,面形误差最小,这是由反射镜的质量分布所决定的。因此,支撑垫块的最佳支撑间隔受反射镜的轻量化形式以及反射镜质量分布的共同影响。

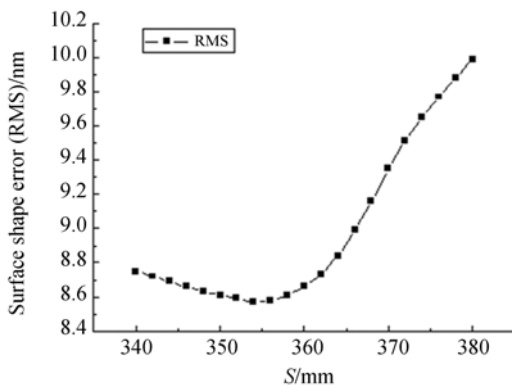
(2)精细实验设计。为了准确确定支撑间隔的最优值,需进行精细实验设计。以两支撑垫块

的间隔为设计变量,取值区间分别取[340,380]和[540,580],步长取 2 mm。精细实验设计计算结果如表 2 所示,反射镜镜面面形误差随支撑间隔的精细关系如图 7 所示。

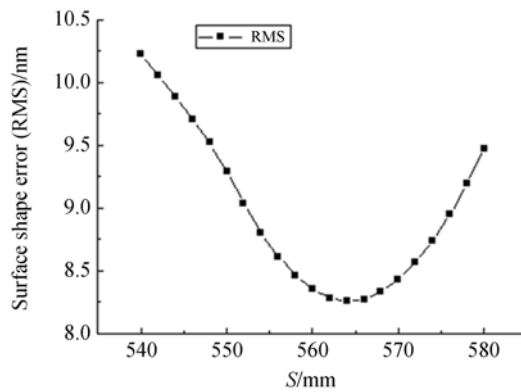
表 2 精细实验设计结果
Tab.2 Result of detailed DOE

支撑间隔 S/mm	面形误差 (RMS)/nm	支撑间隔 S/mm	面形误差 (RMS)/nm
340	8.75	540	10.23
342	8.72	542	10.06
344	8.69	544	9.89
346	8.66	546	9.71
348	8.63	548	9.52
350	8.61	550	9.29
352	8.59	552	9.04
354	8.57	554	8.8
356	8.58	556	8.61
358	8.61	558	8.46
360	8.66	560	8.35
362	8.73	562	8.28
364	8.84	564	8.26
366	8.99	566	8.27
368	9.16	568	8.33
370	9.35	570	8.43
372	9.51	572	8.57
374	9.65	574	8.74
376	9.77	576	8.95
378	9.88	578	9.19
380	9.99	580	9.47

计算结果表明,在第一取值区间[340,380]内,最佳支撑间距 $S=354$ mm,对应的镜面面形误差 $RMS=8.57$ nm;在第二取值区间[540,580]内,最佳支撑间距 $S=564$ mm,对应的镜面面形误差 $RMS=8.26$ nm。比较发现,后者对应的面



(a) [340,380]



(b) [540,580]

图 7 面形误差与支撑间隔关系图

Fig. 7 Relationship between face error and support interval

形误差要优于前者,虽然在各自邻域内,后者的面形误差 RMS 值变化程度要高于前者,但考虑到其绝对变化量较小,在可接受范围内,所以综合考虑,选择支撑间隔 S 取 564 mm 为最佳值。

5 试验验证

为了评价由集成仿真和优化方法计算得到的结果,验证反射镜面形误差与支撑间隔的变化趋势,需进行检测试验,检测对象为精加工某一状态下的反射镜。由于反射镜为离轴非球面反射镜,需在 Zygo 干涉仪($\lambda=632.8$ nm)与反射镜之间光路中加补偿器^[14],检测原理如图 8 所示,试验过程中环境温度保持在 (20 ± 4) °C。

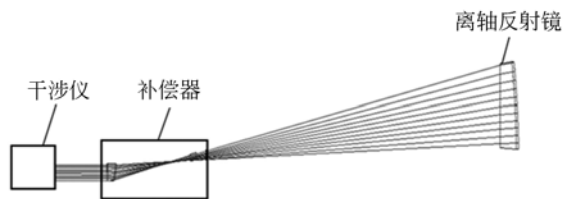


图 8 检测原理

Fig. 8 Detection principle

经检测得到的反射镜面形误差随支撑间隔变化的趋势及由仿真计算得到的趋势如图 9 所示,两者之间的差异随支撑间隔的变化趋势如图 10 所示。

对比检测结果与仿真结果,两者的变化趋势

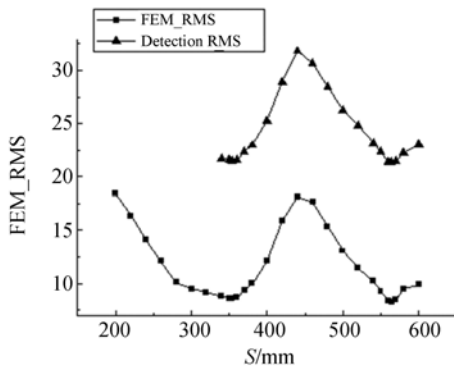


图 9 趋势比较

Fig. 9 Trend comparison

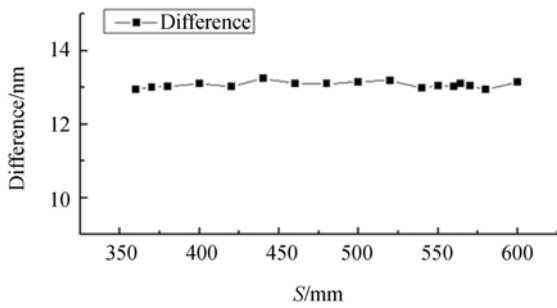


图 10 检测结果与仿真结果差异

Fig. 10 Difference between detection result and FEM result

基本一致,但是在同一支撑间隔下,检测结果与仿真结果存在较大差异,而且从图 10 可见,在各支撑间隔下,两者之间的差异基本为定值。这是因为在仿真分析中,反射镜处于理想状态,没有预先存在的面形误差。但是,在反射镜加工等过程中会产生面形误差,如非球面镜面的加工残差等^[15-17],在试验检测中,干涉检测得到的面形误差应该是上述各种面形误差和由检测支撑引起的面形误差的矢量和,所以检测结果和仿真结果有较大的差异。反射镜加工过程产生的面形误差在检

测过程保持不变,所以图 10 所反映的近于定值的差异就是由反射镜加工等引起的恒定误差。

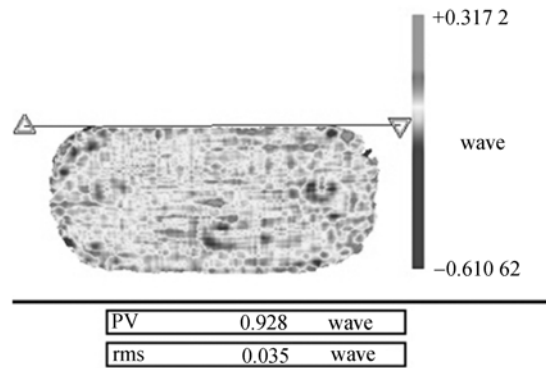


图 11 干涉检测图

Fig. 11 Detection result via interferometer

在最优支撑间隔 $S=564$ mm 工况下,干涉检测如图 11 所示。

综上所述,检测结果和仿真结果变化趋势的一致性证明了由集成仿真和优化方法所得结论的正确性。

6 结 论

本文针对长条形反射镜光轴水平向检测,考虑多级级联支撑方案结构复杂,不可控因素多,通用性与调整性能差,提出了两点单层固定支撑方案。利用集成仿真与优化设计方法,结合试验验证,得到了反射镜面形误差随支撑间隔变化的趋势图。确定了在支撑间隔 S 取 564 mm 时,由支撑结构引起的镜面面形误差最小。本文中所采用的集成仿真与优化设计方法可广泛应用于空间光学遥感器的设计过程中,可大幅度提高设计效率,缩短设计周期。

参考文献:

[1] 韩昌元. 高分辨力空间相机的成像系统研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2146-2172. (in Chinese)

[2] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12):

2813-2820.
XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2813-2820. (in Chinese)

[3] 徐炜, 吴清文, 翟岩, 等. 空间光学遥感器长圆形反射镜组件优化设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 752-757.

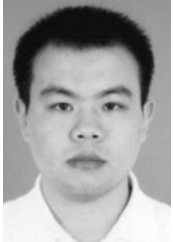
- XU W, WU Q W, ZHAI Y, *et al.*. Optimal design and analysis of long circular reflector subassembly in the space optical remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 752-757. (in Chinese)
- [4] 严从林,吴钦章,刘卫林. 大型矩形反射镜支撑结构设计[J]. *光电技术*, 2013, 40(3): 135-141.
- YAN C L, WU Q ZH, LIU W L. Design and analysis for the support of large aperture rectangular mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(3): 135-141. (in Chinese)
- [5] 王权陡,郑卫平,余景池. 非球面主反射镜检测用支撑结构的优化设计[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(6): 98-102.
- WANG Q D, ZHENG W P, YU J CH. Optimization optics support structure in test primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 98-102. (in Chinese)
- [6] 金建高. 轻质球面反射镜面形检测支撑设计仿真分析[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(4): 25-32.
- JIN J G. Design of support for surface measurement of a lightweight spherical mirror [J]. *Space Recovery & Remote Sensing*, 2013, 33(4): 25-32. (in Chinese)
- [7] 周于鸣,赵野,王海超,等. 大口径轻质反射镜光轴水平卸载支撑方式[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1285-1290.
- ZHOU Y M, ZHAO Y, WANG H CH, *et al.*. Method of off-loading supporting for large aperture light weighted reflect mirror at optical axis horizontal situation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1285-1290. (in Chinese)
- [8] 沙巍,张星祥,陈长征,等. 中小型圆形反射镜检测支撑优化[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1520-1526.
- SHA W, ZHANG X X, CHEN CH ZH, *et al.*. Detection support optimization of small and medium round mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1520-1526. (in Chinese)
- [9] 高明辉,王忠素,杨劲松,等. 大口径反射镜水银带支撑结构物理参数分析[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 18-20.
- GAO M H, WANG ZH SH, YANG J S, *et al.*. Physical parameter analysis of mercury tube mounting structure for large-aperture mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 18-20. (in Chinese)
- [10] 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): 1166-1171.
- PENG Y L, DAI Y F, CHEN SH Y, *et al.*. High-precision figure testing of large-aperture space mirrors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1166-1171. (in Chinese)
- [11] PAUL R, YODER Jr. *Opto-mechanical Systems Design(third edition)*[M]. Florida: CRC Press, 2008.
- [12] 王辉,武俊峰,李胤,等. 小卫星反作用飞轮系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 331-337.
- WANG H, WU J F, LI Y, *et al.*. Design of reaction flywheel systems for small satellites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 331-337. (in Chinese)
- [13] DOYLE K B, GENBERG V L, MICHELS G J. *Integrated Optomechanical Analysis*[M]. Washington: SPIE Press, 2002.
- [14] 丁蛟腾,许亮,马臻,等. 矩形口径离轴非球面镜的加工与检测[J]. *光学技术*, 2012, 38(5): 607-610.
- DING J T, XU L, MA ZH, *et al.*. Manufacture and test of rectangle aperture off-axis asphere mirror [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 607-610. (in Chinese)
- [15] 白满社,李攀,张晋宽,等. 大曲率半径球面反射镜球面误差的改善[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 554-560.
- BAI M SH, LI P, ZHANG J K, *et al.*. Improvement on nonuniformity for sphere mirrors with large radius of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 554-560. (in Chinese)
- [16] 许艳军,赵宇宸,沙巍,等. 大尺寸 SIC 空间反射镜离子束加工热效应分析与抑制[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2556-2561.
- XU Y J, ZHAO Y C, SHA W, *et al.*. Analysis and suppression of thermal effects of ion beam pro-

cessing for large-size SIC space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2556-2561. (in Chinese)

- [17] 刘振宇, 罗霄, 邓伟杰, 等. 大口径非球面的组合加工[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(11): 2791-2797

LIU Z Y, LUO X, DENG W J, *et al.*. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2791-2797. (in Chinese)

作者简介:



杨 帅(1988—),男,安徽安庆人,博士研究生,2011年中国科学技术大学获学士学位,主要研究方向为空间光学遥感器结构设计和仿真。E-mail: yangshuai308@126.com

导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。E-mail: renjny@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)