

空间遥感相机大口径反射镜结构优化设计

张超杰¹, 习兴华¹, 王永宪², 朱俊青², 关英俊¹

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012 ;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为满足大口径反射镜在复杂空间环境下对高面形精度和热稳定性的要求, 针对某 $\Phi 660$ mm 口径反射镜进行了轻量化研究。提出了一种采用经典理论公式创建反射镜初始结构, 结合灵敏度分析和参数优化进行综合设计的方法。首先构建了反射镜参数化模型, 采用灵敏度分析研究镜体结构参数对面形变化的影响规律, 找到对镜面面形 RMS 值灵敏度高的结构参数进行优化迭代。相比于传统反射镜结构设计方法, 此方法缩小了优化设计空间, 节约了计算成本与时间, 能够在设计空间内全局寻优, 较快收敛于最优值。优化后反射镜在自重载荷工况下镜面面形 PV 值小于 $\lambda/10$, RMS 值小于 $\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm), 镜体质量为 13.6 kg, 轻量化率达 78.4%。镜体组件一阶频率为 121 Hz, 满足反射镜动态刚度要求, 根据优化后的结果建立了反射镜的最佳结构模型, 并进行了投产制造。

关键词: 轻量化; 反射镜; 灵敏度分析; 全局寻优; 参数优化

中图分类号: V443.5 ; TH751 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0214002

Structural optimization design of large-aperture mirror for space remote sensing camera

Zhang Chaojie¹, Xi Xinghua¹, Wang Yongxian², Zhu Junqing², Guan Yingjun¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to satisfy the stringent requirement for high surface shape accuracy and thermal stability of large-aperture mirrors in the complex space environment, a lightweight design for a $\Phi 660$ mm-diameter mirror was carried out. A method for creating the initial structure of the mirror using the classical theoretical formula, combining sensitivity analysis and parameter optimization for comprehensive design was proposed. Firstly, the parametric model was established, the influence law of the structure parameters of the mirror on the surface shape change was studied, and then iterations for the structural parameters with high sensitivity to the mirror surface RMS value were optimized through sensitivity analysis. Compared with the traditional mirror design model, this method reduced the optimization design space, saved computational cost and time, could globally optimize in the design space, and converged quickly to the optimal value. The mass of optimized mirror was 13.6 kg and the lightweight rate of the

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11873007)

作者简介: 张超杰(1993-), 男, 硕士生, 主要从事空间光学遥感器结构优化设计方面的研究。Email: 1165573027@qq.com

通讯作者: 关英俊(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光学遥感器结构优化设计方面的研究。

Email: gyj5460@sohu.com

mirror reached 78.4%. The PV value of mirror surface accuracy was less than $\lambda/10$ and RMS value was less $\lambda/40$ ($\lambda=632.8$ nm) under gravity load. The first-order frequency 121 Hz of the mirror assembly met the dynamic stiffness requirements of the mirror. Finally, based on the optimized results, the optimal mirror was put into production.

Key words: lightweight; mirror; sensitivity analysis; global optimization; parameter optimization

0 引言

随着空间对地观测技术的不断发展,空间相机已经在气象监测、天文观测、资源勘探等领域成为人类认知自然、观测宇宙、探索未知世界的不可或缺的工具。为了提高空间相机的地面幅宽和成像质量,空间相机的焦距随之变得越来越长,口径变得越来越大,导致相机质量不断的增加^[1]。随着空间相机质量的增大,相机在重力、温度等因素的影响下产生的镜面变形也会随之增大,导致相机成像不良;同时,空间相机质量的大小,直接关系到制造成本和发射成本,出于对成本的考虑,在保证相机严苛的成像精度要求下,对空间相机中质量占比较大的反射镜进行轻量化设计,具有重大的工程意义。

目前,应用新型轻质材料、改进支撑方式、结合生产工艺进行轻量化设计是国内外学者实现反射镜轻量化的主要方式。美国、德国等国为实现相机减重方面的需求,从 20 世纪 80 年代开始在空间遥感领域应用 SiC 材料。Park 等在反射镜研制过程中使用变密度法,设计出了第一块轻型反射镜^[2]。国内对反射镜轻量化研究起步较晚,哈尔滨工业大学国绍文等对主要光学材料应用于反射镜制作进行了研究^[3]。北京空间机电研究所王小勇等依据反射镜轻量化特征对 $\Phi 3$ m 口径反射镜支撑点和支撑位置参数进行了优化,优化后模型镜面面形 RMS 值相比于原始设计 259.4 nm 减小了 66.6%, 仅为 86.7nm^[4]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所汪荃等针对快速反射镜引入镶嵌件,基于镜面抗弯刚度等效,设计了背部中心支撑和背部三点支撑两种不同支撑方式,并根据相机在实际工况下仿真分析结果,对两种支撑方式进行了对比优选^[5]。大连理工大学刘书田等相比于传统反射镜轻量化设计方式应用变密度法建立 SIMP 模型对大口径反射镜进行拓扑优化,优化后某 $\Phi 2 020$ mm 口径反射镜镜体轻量化率高达 86%^[6]。

反射镜轻量化设计的本质就是通过合理的等刚度设计去除实体反射镜内对镜体抗弯刚度贡献较少的材料,达到减重的目的。文中以某 $\Phi 660$ mm 口径反射镜为研究对象,在镜面面形 RMS 值不大于 $\lambda/40$ 和镜体质量小于 15 kg 两个设计指标要求下对大口径反射镜的轻量化问题进行了研究。

1 反射镜初始结构

目前,针对反射镜轻量化较多是根据传统经验公式建立反射镜结构,然后依据有限元仿真分析结果反复的进行修改,直至满足设计指标要求。此方法不仅受到传统经验理论制约,难以收敛到全局最优解,而且反复迭代的过程将耗费大量的人力、物力,极大地增加了反射镜的设计成本。相对于此,依据传统理论公式进行粗略设计,建立反射镜初始轻量化结构,在此基础上,结合灵敏度分析与参数优化,获得低质量、高比刚度镜体结构的方法把巨量工作交付计算机完成,大幅提高了反射镜的设计效率。流程图如图 1 所示,此方法设计变量为连续值,避免了各结构参数在进行优化时由于数值的离散导致割裂优化,产生局部最优解。

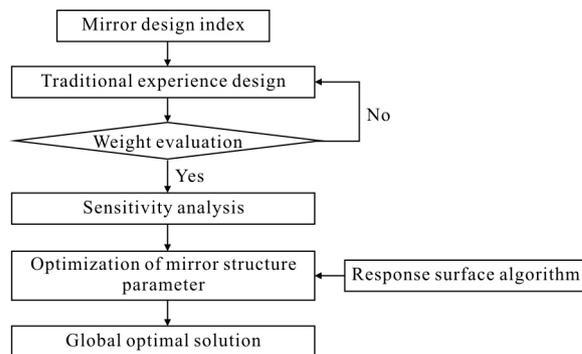


图 1 综合设计流程图

Fig.1 Process of comprehensive design

1.1 初始结构材料和轻量化形式

1.1.1 初始结构材料

反射镜入轨后进入空间微重力工作环境将会出

现重力回弹变形,严重的变形会使空间相机成像不良,这要求反射镜结构具有足够高的刚度、强度和抗冲击能力,因此需要高比刚度(E/ρ)的镜体材料, E 为弹性模量, ρ 为密度。大口径反射镜对环境温度的变化较为敏感,需要反射镜材料具有良好的热稳定性,因此要求反射镜材料应具有高导温系数(k/α), k 为导热系数, α 为材料热膨胀系数。导温系数越大,反射镜平衡镜体内部或镜体周围的温度梯度越快,相同温度水平变化时反射镜结构尺寸变化越小。镜体材料还应满足在现有的光学加工和镀膜工艺条件下,易于满足对反射镜光学表面的加工和镀膜需求,常用的反射镜材料如表 1 所示。

表 1 常用的镜体材料属性和物理性质

Tab.1 Performance and physical characters of common materials for mirror

Material	Zerodur	Si	ULE	Be	Al	SiC
$\rho/g \cdot mm^{-3}$	2.53	2.33	2.21	1.85	2.70	3.20
E/GPa	91	131	67	287	68	400
E/ρ	35.97	56.22	30.31	155.14	25.18	125
$\alpha/10^{-6}/K$	0.05	2.60	0.03	11.4	22.5	2.40
$k/m^{-1} \cdot K$	1.64	137	1.31	216	167	155
k/α	32.80	52.69	43.67	18.95	7.40	64.58

由表 1 可知,虽然 SiC 的比刚度比金属铍略低,但相比于其他常用材料具有明显的优势。而在热物理性能方面, SiC 却明显优于金属铍,对于形状复杂的大口径反射镜, SiC 材料可采用注浆工艺技术制造。综合评价, SiC 以良好的力学性能,较优的热物理性能,更适合作为镜体材料,故文中所设计的反射镜采用 SiC 材料。

1.1.2 初始结构轻量化

根据反射镜背部轻量化孔开口与否,可将反射镜分为封闭式,半封闭式和开放式三种结构^[7]。同等镜厚条件下,封闭式结构比刚度最高,但在生产制造时对加工工艺要求严格,受国内制造工艺限制不宜采用;开放式结构相比于其他结构形式轻量化程度高,但同时以损失比刚度为代价,镜体整体比刚度较差;半封闭式结构相比于封闭式结构不仅降低了加工难度,且相比于开放式结构提高了比刚度。文中选用半封闭式结构,中心预留直径为 50 mm 的盲孔,

背部轻量化孔选用轻量化程度较高的扇形结构形式。

1.2 支撑方式与支撑半径

反射镜支撑方式的稳定性对提高相机光学系统的性能,隔离外在因素对光学元件的影响具有重要作用。反射镜的主要支撑形式有:中心支撑、侧边支撑、背部支撑以及混合支撑^[8]。中心支撑多用于带有中心孔的小口径反射镜。侧边支撑结构简单,在镜框上将压圈与镜片固定,但其单独使用时,需较大的结构尺寸来保持反射镜较小的镜面变形,多用于长条形反射镜。背部支撑结构紧凑,易保证良好的镜面面形,适用于大口径圆形反射镜。

背部支撑点的个数及位置对镜面面形精度具有较大影响,所需支撑点最少个数通常可依据 Hall^[9]经验公式(1)而知:

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}} \quad (1)$$

式中: N 为支撑点最少个数; r 为大口径反射镜镜体半径; t 为大口径反射镜镜体厚度; ρ 为反射镜材料密度; g 为重力加速度; E 为反射镜材料弹性模量; δ 为反射镜自重最大变形,镜面变形要求小于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)时, r, t 初始值分别选择 330、65 mm,由上述公式计算得 $N=3.6$,考虑到在制造安装过程中可能存在过定位情况,经过有限元计算,圆整后 $N=3$ 即可完全满足在装调方向对反射镜支撑要求。

其分布位置半径可根据 Hindle^[10]给出的经验公式(2)确定。

$$R = \left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right) D_m = 0.28868 D_m \quad (2)$$

式中: R 为支撑孔所在的圆周半径; D_m 为反射镜最大口径,由公式(2)得 $R \approx 210 \text{ mm}$ 。初始模型如图 2 所示。

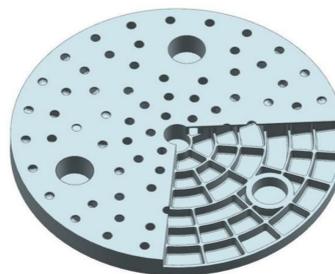


图 2 初始反射镜三维模型

Fig.2 3D model of initial mirror

1.3 支撑结构

当今，国内外学者对大口径反射镜背部三点柔性支撑方案进行了大量研究，在实际应用中较为成熟。支撑组件由锥套、柔性铰链、支撑板三部分组成，支撑孔呈 120° 均匀分布在镜体背部圆周上，支撑结构爆炸图如图 3 所示。锥套由殷钢材料制成，通过黏合剂实现与反射镜背部支撑孔的紧固；柔性结构由钛合金材料(TC4)制成，底面通过螺钉与锥套连接，顶面通过螺钉与采用高体份(SiC/Al)材料制成的支撑板相连。

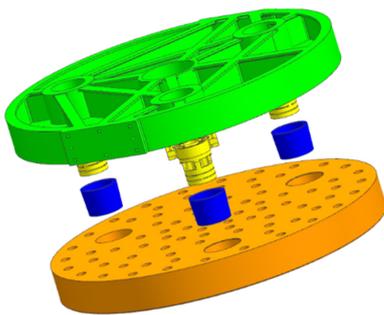


图 3 镜体支撑结构爆炸图

Fig.3 Explosion chart of mirror support structure

2 镜体结构参数灵敏度分析

反射镜各结构参数对镜面面形精度影响较为复杂，各参数之间相互影响，并不是简单的叠加而成。由于设计空间较大，各结构参数对镜体面形 RMS 影响程度不一，分析确定哪些结构参数对镜面面形 RMS 影响较大，可以减小优化设计空间实现快速寻优。文中以镜体结构参数镜面厚度(Mirror face T)、筋板厚度(Rib T)、镜体外壁厚度(Mirror wall T)、中心预留盲孔边缘厚度(Blind hole T)、支撑孔壁厚(Support hole T)、镜体后面板厚度(Back face T)和筋板高度(Rib height)作为设计变量进行灵敏度分析，主要参数如表 2 所示。随着国内 SiC 材料镜坯加工工艺日渐成熟，反射镜镜面，镜体侧壁，加强筋板厚度，可加工至 2 mm 以下。

每个因子设置三个水平(初始值，最大极限，最小极限)，采用优化拉丁超立方算法进行灵敏度分析，结果如图 4 所示。由图可知：筋板厚度、外壁厚度、支撑孔边缘厚度、支撑孔壁厚、筋板高度对面形 RMS 值的影响为正效应，镜面面板厚度和镜体后面板厚度对面形 RMS 值的影响为负效应，意味着反射

表 2 灵敏度分析主要参数

Tab.2 Main parameters of sensitivity analysis

Parameter name	Min/mm	Initial/mm	Max/mm
Mirror face T	2	6	10
Rib T	2	4	6
Mirror wall T	2	6	10
Blind hole T	2	4	6
Support hole T	8	12	16
Back face T	3	6	9
Rib height	55	65	75

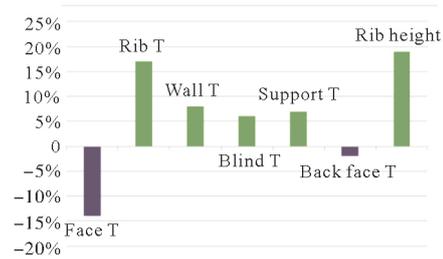


图 4 镜体结构参数灵敏度分析结果图

Fig.4 Result chart of sensitivity analysis for mirror structure parameter

镜面形精度会随着影响为正的结构参数的增大而提高，随着影响为负的结构参数的增大而变差，前者在其范围内应取较大值，后者在其范围内应取较小值。

3 反射镜结构参数优化

3.1 参数优化模型

轻量化形式确定后，建立反射镜参数化模型，对结构参数优化，能在全局设计空间内得到最优解。文中以镜体结构参数、以反射面形 RMS 值、镜体质量最小分别为设计变量、约束函数和目标函数，对反射镜结构参数进行迭代优化。

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\
 &\text{Min } \text{Mass} \\
 &\text{S.t. } \text{RMS} \leq \lambda/40 \quad (\lambda=632.8 \text{ nm})
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中： $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U (i=1, \dots, n)$ ， x_i^L 为设计变量最小极限； x_i^U 为设计变量最大极限。

通过 HyperStudy 软件内嵌的自适应响应面优化算法将目标函数与约束函数进行拟合，可表述为：

$$g_j(x) \approx \hat{g}_j(x) = a_{j0} + \sum_{l=1}^n a_{nl} X_l + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ml} X_l X_k \quad (j=1, \dots, m+1) \quad (4)$$

式中： m 为约束个数； n 为控制因子个数； a_{j0} 、 a_n 、 a_m 为二次多项式系数。

3.2 参数优化过程

基于上文灵敏度分析，优先对镜面面形 RMS 值影响较大的参数进行寻优得到最优解，以此最优解作为对下一个参数迭代的初始值，按照各结构参数灵敏度高低，依次进行优化迭代。通过 UG 软件实现对反射镜的参数化建模，利用 HyperStudy 软件内嵌的自适应响应面法进行拟合，控制因子共经过 20 次迭代完成收敛。结构参数迭代过程如图 5 所示。

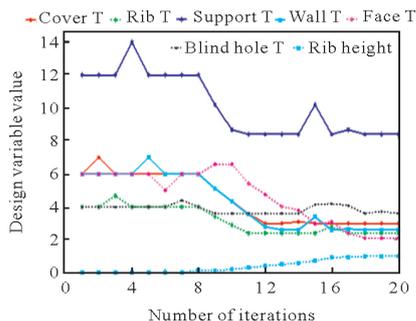


图 5 结构参数迭代曲线

Fig.5 Iteration curve of structural parameters

3.3 反射镜参数优化结果

考虑实际制造工艺对优化结果进行圆整，筋板变量为 Z 轴方向变化 10 mm(上图显示为缩放因子，+1、-1 代表正、负形状变量，0 代表形状变量初始值)，最终结构参数如表 3 所示，镜体质量为 13.6 kg，轻量化率为 78.4%。

表 3 结构参数优化结果

Tab.3 Optimization results of structure parameters

Parameter name	Range /mm	Optimization value/mm	Rounding value/mm
Mirror face T	[2,10]	2.102	2.0
Rib T	[2,6]	2.433	2.5
Mirror wall T	[2,10]	2.623	3.0
Blind hole T	[2,6]	3.601	4.0
Support hole T	[8,16]	8.414	8.5
Cover T	[3,9]	3.013	3.0
Rib height	[55,75]	75.051	75.0

4 镜体仿真分析与检测

4.1 镜坯有限元分析

对优化后的反射镜进行面形精度分析表明：重力载荷下镜面面形 PV 值为 62.0 nm，RMS 值为 14.7 nm，面形云图如图 6 所示。利用 HyperMesh 软件创建反射镜组件有限元模型，约束支撑板结构与主承力结构相连的螺钉孔位置，对反射镜组件进行模态分析，组件一阶频率为 121 Hz，振型云图如图 7 所示。结果表明优化后反射镜满足要求，足够高的动态刚度。

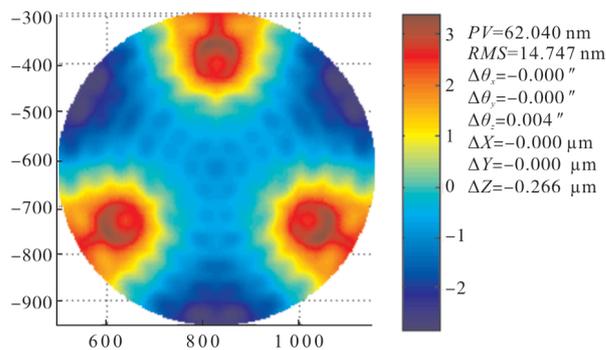


图 6 反射镜面形 PV 和 RMS 值

Fig.6 PV and RMS value of mirror surface

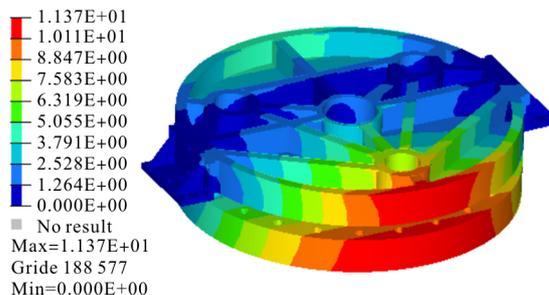


图 7 优化后整体变形云图

Fig.7 Deflection nephogram of optimized whole mechanism

4.2 镜坯加工过程检测

根据优化后的镜体结构参数成功研制出了反射镜镜坯和支撑组件，如图 8 所示。

CGH 衍射元件针对不同非球面能产生与之相匹配的波前，为了实现非球面的检测，采用 CGH 衍射元件进行零位补偿测量^[11]。检测结果如图 9 所示，镜坯面形 PV 值为 0.197λ，RMS 值为 0.019λ，满足设计指标要求。



图 8 反射镜和支撑结构

Fig.8 Mirror and support structure

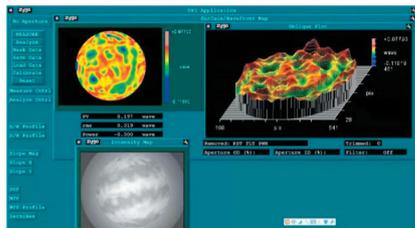


图 9 过程干涉检测结果图

Fig.9 Testing results of interference detection in the process

5 结论

文中采用传统经验设计与参数优化相结合的方法对某 $\Phi 660$ mm 口径反射镜轻量化设计进行了研究,并对优化后的模型进行了有限元分析和试验验证。有限元分析结果显示,优化后反射镜在自重载荷工况下 PV 值为 62.0 nm、RMS 值为 14.7 nm。优化后反射镜轻量化率达 78.4%,镜体组件一阶约束模态为 121 Hz,满足设计指标要求。过程干涉检测试验结果显示 PV 值为 0.197λ ,RMS 值为 0.019λ ,干涉试验测量的 RMS 值与有限元分析得出的 RMS 值误差为 2.7 nm,在允许误差范围之内,表明了文中所提出的综合优化方法在大口径反射镜轻量化设计时的可靠性、合理性,对其他同类型光学反射镜的优化设计具有一定的参考和借鉴意义。影响大口径反射镜面形的因素较多,文中只选择了部分主要因素进行分析,对于其他因素的影响需进一步研究。

参考文献:

[1] Chen Wei, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al. Design of

kinematic mount for SiC scanning reflective mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 161-166. (in Chinese)

[2] Park K S, Lee J H, Youn S K. Lightweight mirror design method using topology optimization [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 053002.

[3] Guo Shaowen, Wang Wuyi, Zhang Guangyu, et al. Lightweight mirror technology for space optical systems [J]. *Optical Instruments*, 2005(4): 78-82. (in Chinese)

[4] Wang Xiaoyong, Zhang Bowen, Guo Congling, et al. Parameter optimization of 3m aperture space-based mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(s1): S118002. (in Chinese)

[5] Wang Qui, Xin Hongwei, Xu Hong, et al. Lightweight design of fast steering mirror for space cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0418001. (in Chinese)

[6] Liu Shutian, Hu Rui, Zhou Ping, et al. Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7): 1803-1810. (in Chinese)

[7] Shi Jiaohong, Luo Shikui, Tang Lu, et al. The structural design of a $\Phi 650$ mm primary mirror subassembly [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(3): 258-262. (in Chinese)

[8] Guo Jiang, Zhu Lei, Zhao Ji, et al. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1138-1147. (in Chinese)

[9] Hall H D. Problems in adapting small mirror fabrication techniques to large mirror [J]. *NASA Special Publication*, 1970, 233: 149-152.

[10] Wang Kejun, Dong Jihong. Structural design of $\Phi 2$ m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718005. (in Chinese)

[11] Zhang Haidong, Wang Xiaokun, Xue Donglin, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surface [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)