

doi: 10.3788/gzxb20164501.0122001

空间相机中变形镜的结构设计

袁健^{1,2}, 沙巍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, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:设计了一种适用于空间环境的变形镜装置,以校正高分辨率空间相机中大口径主反射镜的波像差.讨论了空间相机用变形镜的设计准则,确定了该变形镜的结构形式;给出了具体的结构组成和材料组合,并设计了柔性结构.仿真结果表明,该结构在 z 向重力工况下 RMS 值仅 17.2 nm,4℃温升时的 RMS 值仅为 3.7 nm,且一阶频率为 1 015 Hz,各模拟空间工况下的反射面经主动展平后,均可获得近似的标准平面;该结构能够较准确地拟合前 36 项泽尼克多项式所对应的基元波面,残留误差较小,不仅具有良好的力学性能和热稳定性,还能保证变形镜的像差校正能力得到充分发挥,从而满足空间相机的使用需求.

关键词:空间光学;变形镜;空间环境适应性;柔性结构;基元波面

中图分类号: TP391.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0122001-5

Structure Design of a Deformable Mirror Used on Space Camera

YUAN Jian^{1,2}, SHA Wei¹, 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 100049, China)

Abstract: In order to calibrate the wave aberration caused by large aperture mirror in high resolution space camera, a deformable mirror suitable for space environment was designed. The design criterion of deformable mirror used on space camera was discussed, and the structure form of the deformable mirror was determined; the concrete structure and combination of materials were given, and the flexible structure was added. Simulation results show that, its RMS value is 17.2 nm under z axis gravity and only 3.7 nm when temperature is increased by 4℃, its 1st natural frequency is 1 015 Hz, and after active flattening, the reflecting surface under these simulated space conditions can be corrected to approximate standard plane; it can accurately fit the wave elements corresponding to the first 36 Zernike polynomials, and the residual errors are small. This deformable mirror not only has good mechanical properties and thermal stability, but also can guarantee the aberration correction ability, which meets the application requirement of space camera.

Key words: Space optics; Deformable mirror; Space environmental applicability; Flexible structure; Wave element

OCIS Codes: 220.4830; 120.0280; 120.6085; 120.6810; 350.6090

0 引言

随着用户对地面分辨率提出的要求越来越高,空间相机中所采用的主镜口径逐步增大.然而在主镜的

重量及体积不断增加的同时,空间相机的制造和装调难度大大提高,且对空间环境的适应性也会变差,从而使空间相机的成像质量降低^[1-2];传统的技术路线,包括选用工艺成熟的航天材料、反射镜的支撑技术以及

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 863-2-5-1-13B)资助

第一作者:袁健(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为空间相机光机结构设计与分析. Email: jyuan@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):任建岳(1952—),男,研究员,博士,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价. Email: renjy@ciomp.ac.cn

收稿日期:2015-07-07;录用日期:2015-09-23

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

轻量化设计方法等已无法克服空间反射镜的口径限制。基于主动光学原理的变形镜技术能够有效校正光路中的波前畸变,提高光学系统的成像质量,目前已在天文望远镜、激光光束整形等诸多领域内得到广泛应用^[3-5];若将变形镜应用到大口径空间光学系统中,则可以用来校正采用大口径主镜所引入的波像差,从而突破空间反射镜的口径限制、实现空间相机的高分辨率需求。

Laslandes 等人设计了一种口径为 90 mm、具有 24 个促动器的变形镜,该结构可以布置在空间望远镜的出瞳处,用来校正大口径轻量化主镜产生的变形^[6]。Wirth 等人介绍了 Xinetics 公司在变形镜技术方面的研究现状,并讨论了不同结构变形镜的优缺点,以及变形镜的研究热点和发展方向^[7]。林旭东等研制了一系列具有不同数量促动器单元的变形镜,给出了系统的结构组成,并测得了相应的性能参量^[3];陈新东等尝试将变形镜应用在空间相机上,设计了一套由 9 个促动器单元组成的变形镜,能够有效校正空间相机中存在的低阶像差^[8-9]。国内类似的研究多是从主动光学的相关原理出发,给出变形镜的结构形式,未考虑变形镜实际机械结构的设计过程,和变形镜在特定应用场合下的适应性问题。本文针对变形镜在空间相机中的应用展开研究,设计了一种具有良好空间环境适应性的变形镜装置。通过理论分析,确定该装置的结构形式以及各部分所选用的材料,在有限元仿真中重点考察该变形镜在微重力环境和变化温度场作用下反射面的面形质量,以及在空间工况下反射面的展平能力;通过对泽尼克多项式基元波面的模拟,验证该变形镜的像差校正能力。

1 结构形式的选择

空间环境的特殊性对空间相机中使用的变形镜提出了非常苛刻的设计要求。空间遥感在轨工作时要面对真空环境、微重力环境、粒子辐照和变化的温度场,在运输及发射过程中还要经历各种振动和冲击^[10-11],因此要求空间相机用变形镜必须具有良好的力学性能及温度适应性、质量轻、比刚度高、能耗低、可靠性好等特点。

目前,研究较多的变形镜主要有:连续镜面分立促动器式变形镜、子镜拼接式变形镜、基于电致形变效应的薄膜变形镜、基于压电效应的双压电片式变形镜和基于集成微机电技术的 MEMS 变形镜^[12-14]等。其中,连续镜面分立促动器式变形镜在大口径光学系统中得到了最为广泛的应用,相关理论和制造技术也最为完善,其基本结构和工作原理如图 1。变形镜中某促动器施加单位作用力时所引起的镜面变形称为响应函数,各响应函数之间相互耦合,拟合出与系统内畸变波前

共轭的面形,从而抵消系统内的波像差,通过合理安排促动器的分布,以及恰当地设计结构刚度,可以获得理想的校正能力。MEMS 变形镜虽然具有小型化、集成度高的特点,但其口径较小、行程近;与之相比,连续镜面分立促动器式变形镜则具有行程远、口径大的优点,另外,采用该结构形式的变形镜不仅机械强度高、可靠性好,而且空间频率可设计、能够抵御复杂的空间电磁环境,能够满足前文述及的设计要求。因此,本文所设计的空间相机用变形镜采用连续镜面分立促动器式结构。

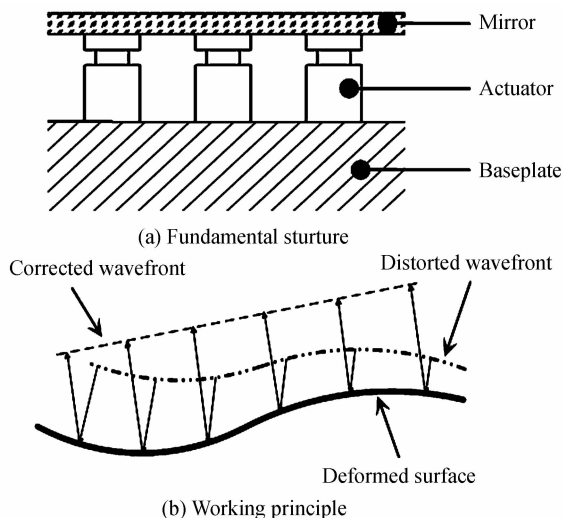


图 1 连续镜面分立促动器式变形镜示意图
Fig. 1 Schematic of deformable mirror with discrete actuators and continuous mirror

2 变形镜的结构设计

2.1 结构组成

设计的变形镜主要由反射镜、促动器组件、镶嵌件和支撑底座四部分组成,结构简单、布局紧凑,采用元件个数较少,如图 2 所示。其中,反射镜的口径为 $\Phi 420$ mm、厚 5 mm。促动器组件主要包括推杆、压电陶瓷模块和基座三部分,通过推杆与反射镜胶接;镶嵌件作为过渡部分,先通过螺钉与促动器基座连接,再与支撑底座胶接;支撑底座的外径为 $\Phi 450$ mm,在与促

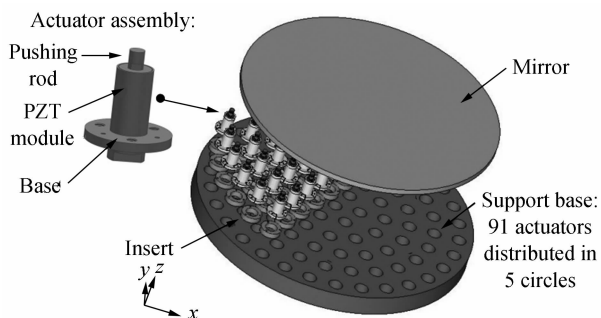


图 2 变形镜结构示意图
Fig. 2 Structure schematic of deformable mirror

动器对应的位置上预留通孔. 选用的压电陶瓷促动器的理论工作行程不低于 $50\ \mu\text{m}$, 最大负载在 $1\ 000\ \text{N}$ 以上, 变形镜在工作中的可控 PV 值高达 $20\ \mu\text{m}$ 以上, 对于欲校正的大口径空间反射镜的变形而言, 数值完全满足应用要求. 在大口径空间反射镜所引入的波像差中, 除了球差、慧差、像散等常见的低频像差外, 还包含有部分空间频率较高的像差, 根据这些波像差的数值特点和空间分布形式, 在支撑底座上共布置 5 圈、91 个促动器, 全部为主动支撑点.

2.2 材料选择

表 1 空间相机中常用材料的物理属性

Table 1 Physical properties of common materials in space camera

Group	Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	E/ρ	$a(1\text{E}-6/\text{K})$
A	Al	2.7	68	25.19	22.5
	TC4	4.4	114	25.91	9.1
	4J36	8.9	141	15.84	0.65
	Mg/Al alloy	1.8	40	22.22	25
	High volume fraction SiC/Al	2.94	213	72.4	8
	Low volume fraction SiC/Al	3.0	100	33.33	16
	CFRP	1.6	180	112.5	1.1
	45#	7.81	200	25.6	11.6
B	SiC	3.2	400	155	2.4
	Si	2.33	131	137	2.6
	Be	1.85	287	216	11.4
	Zerodur	2.53	91	1.64	0.05
	FS	2.19	72	1.4	0.5
	C/SiC	1.9	130	12	1

A: Structural material; B: Optical material

反射镜材料与支撑底座材料之间的热胀系数差别是导致变形镜热稳定性变差的主要因素, 空间相机中常用的光学材料的物理属性见表 1, 其中碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料(C/SiC)的热胀系数最接近用来制作支撑底座的 CFRP, 因此文中的反射镜选 C/SiC 制作.

镶嵌件可以起到弥补 CFRP 材料机加工性能不足

支撑底座起到为反射面提供位置基准的作用, 必须选用高比刚度和低热胀系数的材料来制作, 才能保证变形镜在重力工况和温升工况下的变形较小. 空间相机中常见的结构材料及其物理属性如表 1. 碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)的比刚度在表 1 中所列的各种结构材料中居首, 且热胀系数较低, 因此, 本文设计的变形镜采用 CFRP 来制作支撑底座. 由于支撑底座体积较小, 且 CFRP 密度很小, 所以无需作轻量化处理, 直接采用实体式结构, 从而获得更高的刚度.

的作用, 为了减小结构的热变形, 镶嵌件应选择线胀系数可调制的殷钢(4J36)来制造, 并使其线胀系数与支撑底座的 CFRP 材料相一致. 出于限制反射镜粘接处局部热变形的目的, 推杆采用线胀系数与 C/SiC 一致的殷钢(4J36)制造. 基座由于结构相对复杂, 故采用密度低、机加工性能良好的钛合金(TC4)制造. 综上所述, 文中变形镜的各部分所选材料及其属性如表 2.

表 2 变形镜中各部分的材料属性

Table 2 Material properties of deformable mirror

Part	Materials	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	$a(1\text{E}-6/\text{K})$	
Reflector	C/SiC	1.9	130	1.0	
Actuator assembly	Push rod	4J36	8.9	141	1.0
	PZT module	PZT	7.8	75	2.2
	Mounting base	TC4	4.4	114	9.1
	Insert	4J36	8.9	141	1.1
Support base	CFRP	1.6	180	1.1	

2.3 柔性结构的引入

由于不同结构间的刚度差异大且各零件采用不同的材料制造, 因此在设计过程中采用柔性结构, 使关键零件之间得到恰当连接, 并协调不同材料间的物理属性差异. 为了使变形镜拟合出的面形更加圆滑, 防止反

射面上产生空间频率较高的误差, 必须协调推杆和反射镜之间的刚度. 在推杆上设计了两个相互正交的柔性切槽结构^[15], 增加结构柔度, 通过自身变形来适应反射面的起伏, 如图 3(a). 镶嵌件与促动器基座之间存在较大的热胀系数差异, 为了使整套装置能够应对在

轨运行时复杂的热环境,在促动器基座上增加如图 3 (b)所示的环形切槽,通过变形来吸收温度变化时系统内的应变能。

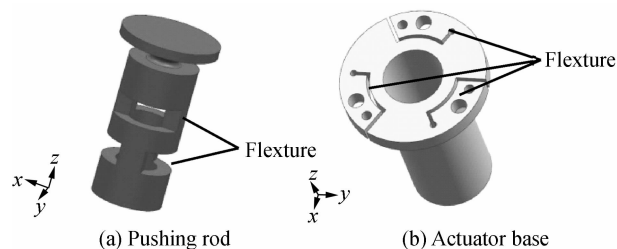


图 3 变形镜中的柔性结构

Fig. 3 Flexible structure in deformable mirror

3 工作性能分析

3.1 空间环境适应性

变形镜结构的有限元模型见图 4,模型中涉及材料的物理属性见表 2.考察变形镜的空间环境适应性时,主要分析该结构在微重力环境和变化的温度场中

的表现.分别在重力沿不同方向以及 4℃温升时,对该结构进行仿真分析,根据变形后的节点数据,拟合得到对应工况下反射面的面形;再基于最小二乘法求出各促动器所需的加载量,并对反射面进行主动展平,结果如表 3 和图 5.其中,反射镜的边缘部分面形较差,翘曲明显,这是由于该处结构的刚度发生突变所致,而反射镜的中心区域则变化平缓,保持了较好的面形准确度。

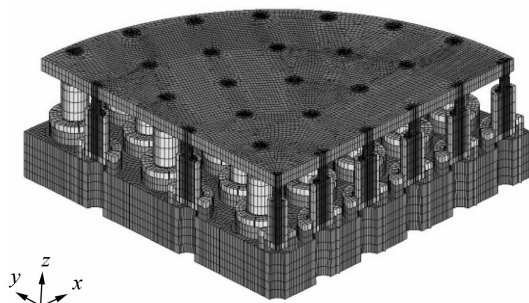


图 4 有限元模型(1/4 模型)

Fig. 4 FEM model (quarter model)

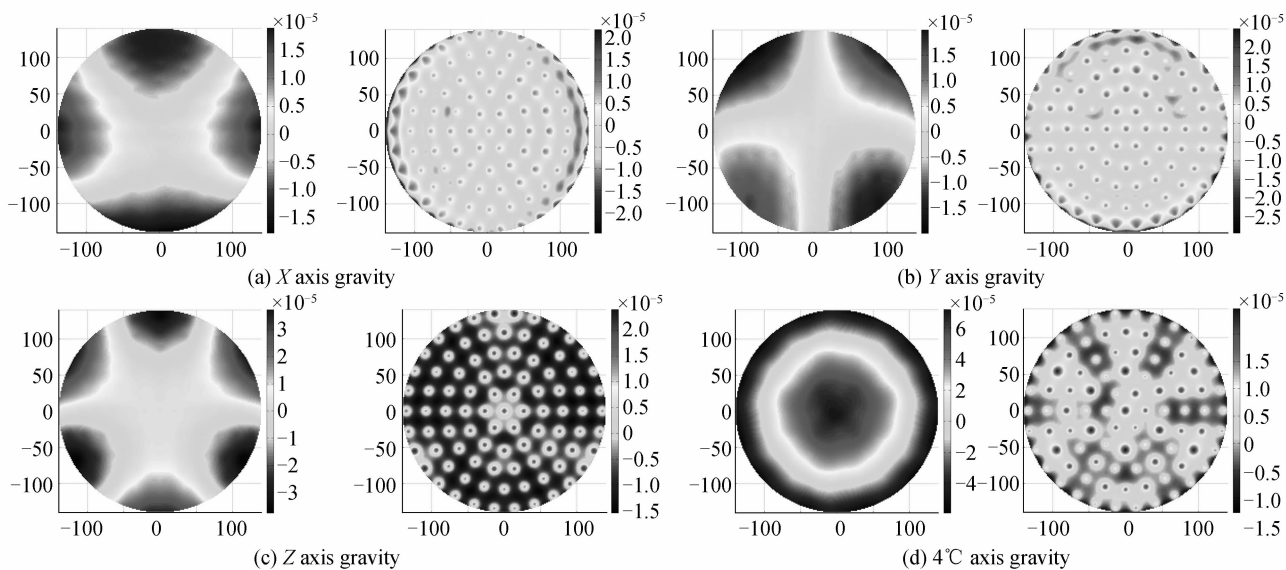


图 5 不同工况下的面形(左:未展平;右:展平后)

Fig. 5 Surface shape under different loadcases(Left: before flattening; right: after flattening)

表 3 不同工况下的面形数据

Table 3 Statistics of surface shape under different loadcases

Loadcases	Original		Flattened	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
X gravity	71.6	15.8	3.17	0.34
Y gravity	66.0	15.0	2.91	0.33
Z gravity	85.1	17.2	4.60	0.54
+ 4℃	13.3	3.7	0.96	0.11

重力沿光轴(z向)时,反射镜面形质量最差,RMS值为 17.2 nm,略大于 $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 的设计要求;4℃温升时,PV 值仅 3.7 nm,说明该结构具有良好的温度稳定性;而经主动展平后,各工况下反射面的 RMS 值均小于 1 nm,接近标准平面,说明该结构能

够适应空间环境.另外,固定支撑底座时,该结构的一阶频率达到 1 015 Hz,其动力学特性满足空间遥感器的设计要求,该结构的前 3 阶自然频率和相应的振型如表 4.

表 4 前三阶自然频率及振型

Table 4 First three order frequency and vibration mode

Order	Frequency/Hz	Vibration mode
1 st	1 015	Z axis vibration
2nd	1 192	Y axis rotation
3rd	1 214	X axis rotation

3.2 像差校正能力

光学系统中的像差可以理解为若干泽尼克多项式基元波面以不同的系数进行叠加的结果,因此,变形镜

对泽尼克多项式基元波面的拟合准确度可以反映其像差校正能力。为了评价该结构的像差校正能力,模拟使用该变形镜拟合出多个基元波面,这些基元波面分别与前36项泽尼克多项式对应,且系数均为100 nm,再将拟合的结果与标准泽尼克多项式相比较,计算出残余波像差。各拟合基元波面的残余误差如图6所示,该结构对大多数的中、低阶像差能够进行较为准确的拟合,少数几项残差相对较大,但仍能够满足设计要求。

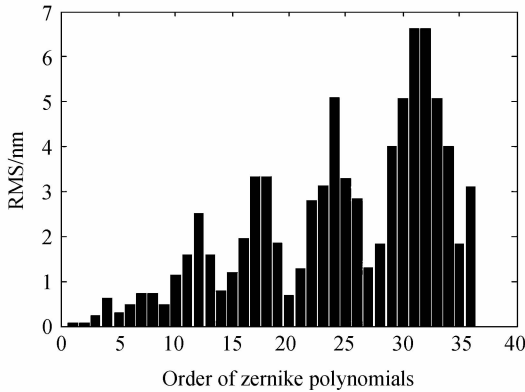


图6 变形镜的拟合误差

Fig. 6 Fitting errors of deformable mirror

4 结论

本文针对空间相机这一特殊的应用场合,设计了一套采用连续镜面分立促动器形式的变形镜装置。通过恰当地选择材料,并在设计中引入柔性结构,使得该变形镜具备良好的力学性能以及热稳定性。该结构可以将变形镜在微重力环境和变化的温度场中的变形限制在很小的范围内,经主动展平后的反射面接近标准平面;此外,该结构具备良好的像差校正能力,能够较为精确地拟合泽尼克多项式基元波面。综上,本文的变形镜不仅结构紧凑、简单可靠,且具有良好的空间环境适应性,相关的研究可以为今后变形镜在高分辨率空间相机中的进一步应用提供借鉴和参考。

参考文献

[1] CHEN Rong-li, ZHAO Xin-min, XIE Yong-jie, *et al.* Engineering analysis on high resolution space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 267-271.
陈荣利,赵信民,解永杰等.高分辨率空间相机的工程分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 267-271.

[2] XU Hong, GUAN Ying-jun. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(S): 83-88.
徐宏,关英俊.大口径SiC轻量化反射镜组件的结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(S): 83-88.

[3] LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, *et al.* Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezo-

ceramic actuator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(9): 090003.
林旭东,刘欣悦,王建立,等.基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(9): 090003.

[4] HU Xiao-chuan, PENG Jia-qi, ZHANG Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(1): 0102003.
胡小川,彭家琪,张彬.变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *中国激光*, 2015, **42**(1): 0102003.

[5] LIU Wen-jin, NING Yu, DONG Li-zhi, *et al.* Aberration correction ability of bimorph deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(7): 1611-1614.
刘文劲,宁禹,董理治,等.双压电片变形镜像差校正能力[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(7): 1611-1614.

[6] LASLANDES M, HUGGOT E, FERRARI M, *et al.* Mirror actively deformed and regulated for applications in space: design and performance[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 091803.

[7] WIRTH A, CAVACO J, BRUNO T, *et al.* Deformable mirror technologies at AOA xinetics[C]. SPIE, 2013, **8780**: 87800M.

[8] CHEN Xin-dong, ZHENG Li-gong, LUO Xiao, *et al.* A deformable mirror with 9 actuated points for low order aberration correction-design and experiments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322001.
陈新东,郑立功,罗霄,等.校正低阶像差的9点促动变形镜—设计与实验[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322001.

[9] CHEN Xin-dong. Testing of a 9-points deformable mirror and its application in space camera system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(10): 1023001.
陈新东.9点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(10): 1023001.

[10] WANG Hong-juan, WANG Wei, WANG Xin, *et al.* Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1212-1217.
王红娟,王伟,王欣等.航天器微振动对空间相机像质的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1212-1217.

[11] ZHANG Xing-xiang, REN Jian-yue. Analysis and testing on imaging-performance stability of TMA space camera at various states[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(9): 2996-3004.
张星祥,任建岳.TMA空间相机性能稳定性的全状态分析与测试[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(9): 2996-3004.

[12] MARK A E. Active and adaptive optical components; the technology and future trends[C]. SPIE, 1991, **1543**: 2-34.

[13] LIN Xu-dong, XUE Chen, LIU Xin-yue, *et al.* Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(4): 337-351.
林旭东,薛陈,刘欣悦,等.自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. *中国光学*, 2012, **5**(4): 337-351.

[14] ROBERT K T. Principles of Adaptive Optics [M]. 3rd edition. Boca Raton: CRC Press, 2011: 177-196.

[15] YAN Yong, JIN Guang, YANG Hong-bo. Design and analysis of large spaceborne light-weighted primary mirror and its support system[J]. SPIE, 2007, **6721**: 67210V.