

# Athermal Design for Space Telescope Deformable Mirror

Changzheng Chen

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun

Email: [may328@163.com](mailto:may328@163.com)

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2014; revised: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2014; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Space deformable mirror is widely used in compensating system wavefront error for space telescope. Space telescope resides harsh environment in space, and needs survive launch environment. Space deformable mirror is structurally non-kinematic. Thermal stress caused by thermal environment may cause unacceptable figure error for optics due to material mismatch in CTE. A new athermal structure is proposed by flex transition for a  $\Phi 200$  mm space deformable mirror with 19 actuators. Optimization design is performed. Final design shows the figure error PV/RMS 47.26 nm/9.31 nm for thermal environment change of  $\pm 8^\circ\text{C}$ , the figure error PV/RMS 20.56 nm/3.50 nm for gravity, and first mode 1832 Hz for dynamic performance. Athermal design meets design specification well.

## Keywords

Space Telescope, Deformable Mirror, Athermal Design

# 空间光学遥感器变形镜消热结构设计

陈长征

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春

Email: [may328@163.com](mailto:may328@163.com)

收稿日期: 2014年11月19日; 修回日期: 2014年12月3日; 录用日期: 2014年12月10日

## 摘要

空间光学遥感器用变形镜可以校正光学系统像差, 具有广泛的应用前景。由于空间光学遥感器所处空间

环境恶劣, 并需经受发射冲击振动等力学环境, 因此空间光学传感器变形镜需满足微重力变形, 热环境变化, 冲击振动等方面要求; 同时, 由于变形镜促动器较多, 结构非静定, 由于变形镜各部分材料线胀系数(CTE)不匹配, 在热环境变化条件下热变形严重。本文研究了促动器数量为25, 口径为 $\Phi 200$  mm的空间光学传感器变形镜, 提出了一种消热柔性结构取代原有殷钢材料的柔性结构, 通过同材料过渡和柔性结构消除不同材料间热胀影响, 并对该结构进行优化设计。设计结果表明该设计在温度变化 $\pm 8$  °C工况下, 镜面变形PV/RMS为47.26 nm/9.31 nm面形提高约17.8%, 柔性结构质量减少约58.5%。微重力变形PV/RMS为20.56 nm/3.50 nm, 满足微重力变形要求; 一阶频率为1832 Hz, 动态性能满足设计要求。消热结构工艺合理, 满足空间变形镜设计要求。

## 关键词

空间光学传感器, 变形镜, 消热设计

## 1. 引言

随着空间光学传感器的不断发展, 对大视场、高分辨力和高光谱分辨力的需求不断提高, 空间光学传感器的口径越大, 光机设计的难度也越大。空间光学传感器所属空间环境恶劣, 有微重力, 高真空, 原子氧等环境条件, 且在发射过程中, 须承受火箭发射带来的冲击和振动等力学条件, 设计难度大, 同时需尽可能轻量化, 以满足发射重量要求。

由于空间光学传感器在地面环境进行装调, 发射至空间轨道后, 重力环境变化, 导致空间光学传感器变形, 尤其是大口径空间光学传感器, 其重力变形严重, 以致在地面装调完成成像质量满足设计要求后, 由于重力释放, 系统发生变形, 导致光学成像质量严重下降[1]。

同时, 对于大口径空间光学传感器, 由于其结构尺寸大, 在热环境变化条件下, 其结构变形也较大。由于卫星整体重量和热控功率的限制, 热控设计很难保证整体温度恒定, 其热环境变形对空间光学传感器成像质量也有很大影响[2]。

采用空间光学变形镜可以校正微重力释放、热环境变形对大口径空间光学传感器系统波像差的影响, 同时减少对光机结构的约束, 提高大口径空间光学传感器系统成像质量, 提高系统可靠性[3]。美国正在研制并将在2018年发射的詹姆斯韦伯望远镜 JWST, 口径为6.5 m, F数为1.2, 光学设计为在 $2\ \mu\text{m}$ 波长达到衍射极限, 为达到该目标采用了主动光学变形镜方案。

空间光学传感器主动光学方案有以下两种:

第一种方案为大口径主镜主动光学方案, 如 JWST 太空望远镜的主镜由18块可变姿态和曲率的变形镜构成[4]。

另一种方案为从光学设计出发, 对带有实出瞳的光学设计方案, 在系统出瞳处设置变形镜[5]。

本文设计的变形镜为第二种方案。变形镜包含25个独立伸缩的促动器, 口径为200 mm。由于变形镜促动器较多, 结构非静定, 变形镜各部分材料线胀系数(CTE)不匹配, 在热环境变化条件下热变形严重。本文通过有限元分析方法对空间光学变形镜变形进行研究, 并提出了一种消热结构。

## 2. 空间光学传感器变形镜方案

### 2.1. 大口径空间光学传感器介绍

空间光学变形镜应用于某大口径空间光学传感器, 光学系统如图1所示, 为同轴三反系统, 工作波段为 $0.45\ \mu\text{m}\sim 0.8\ \mu\text{m}$ , 视场角为 $1.2^\circ \times 0.1^\circ$ , 主镜口径2.4 m, F数为11, 出瞳处设置变形镜, 实际出瞳大小为 $\Phi 160$  mm, 为减小变形镜边缘效应和印透效应的影响, 设计出瞳镜大小为 $\Phi 200$  mm。

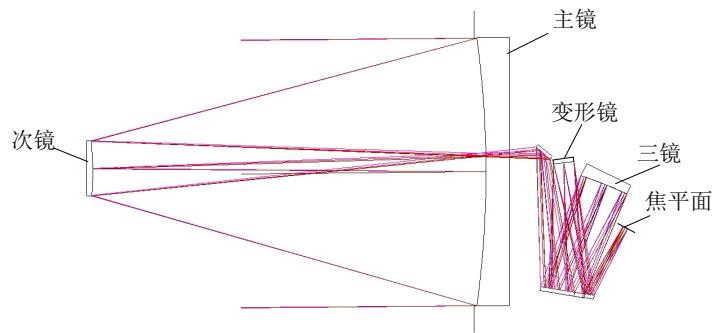


Figure 1. Layout of coaxial three-mirror optical system  
图 1. 同轴三反光学系统结构布局

## 2.2. 空间光学遥感器变形镜设计

空间光学变形镜结构及促动器布置如图 2 所示,变形镜采用薄镜面,厚度为 2 mm,材料为微晶玻璃,尺寸为  $\Phi 200$  mm,有效口径为  $\Phi 180$  mm,促动器在镜面上均布,采用压电陶瓷材料,促动器最大行程为  $15\ \mu\text{m}$  (120 V)。

通过有限元仿真优化分析,该变形镜可以矫正低阶像差,矫正效果见表 1。由表 1 可知,该变形镜对低阶像差矫正能力优良[6]。

## 3. 空间光学遥感器变形镜热变形分析

### 3.1. 空间光学遥感器变形镜材料分析

典型的空间光学遥感器用结构材料和光学材料如表 2 所示。空间光学变形镜镜面厚度为 2 mm,材料为微晶玻璃,尺寸为  $\Phi 200$  mm。变形镜连接方式如图 3 所示,柔性结构通过粘接方式与镜面和压电陶瓷连接,压电陶瓷粘接在基板上。

由材料力学可知,一方面若柔性结构材料与镜面材料的线胀系数不同,则在热环境变化条件下,由于镜面和柔性结构材料变形不一致,导致镜面在与柔性结构连接处发生较大变形,如图 4(a)所示,柔性结构采用钛合金材料,基板材料为和镜面线胀系数相同的殷钢,对基板进行运动学约束,在均匀温升  $8^\circ\text{C}$  工况下,镜面变形量 PV/RMS 为  $292.9\ \text{nm}/83.3\ \text{nm}$ ,远超过变形镜设计要求  $\text{PV} < \lambda/10$ ,  $\text{RMS} < \lambda/50$  ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ );图 4(b)为相同条件下,柔性结构改用殷钢材料,在均匀温升  $8^\circ\text{C}$  工况下,镜面变形量 PV/RMS 为  $34.5\ \text{nm}/8.9\ \text{nm}$ 。

因此,不能将线胀系数与镜面不同的材料直接与镜面粘接。使用与镜面材料线胀系数相同的材料,目前可选的仅有殷钢。不同组分的殷钢的线胀系数不同,其线胀系数可以定制为与镜面材料一致,但殷钢材料密度大,应尽可能少使用。

另一方面若基板材料与镜面材料的不同,则在热环境变化条件下,由于镜面和基板材料变形不一致,导致镜面发生变形,如图 5(a)所示柔性结构部分为和镜面线胀系数相同的殷钢结构,基板材料采用碳纤维材料,对基板进行运动学约束,在均匀温升  $8^\circ\text{C}$  工况下,镜面变形量 PV/RMS 为  $59.66\ \text{nm}/11.33\ \text{nm}$ ,满足变形镜设计要求  $\text{PV} < \lambda/10$ ,  $\text{RMS} < \lambda/50$  ( $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ )。图 5(b)为相同条件下,基板材料采用和镜面线胀系数相同的殷钢,在均匀温升  $8^\circ\text{C}$  工况下,镜面变形量 PV/RMS 为  $34.5\ \text{nm}/8.9\ \text{nm}$ 。

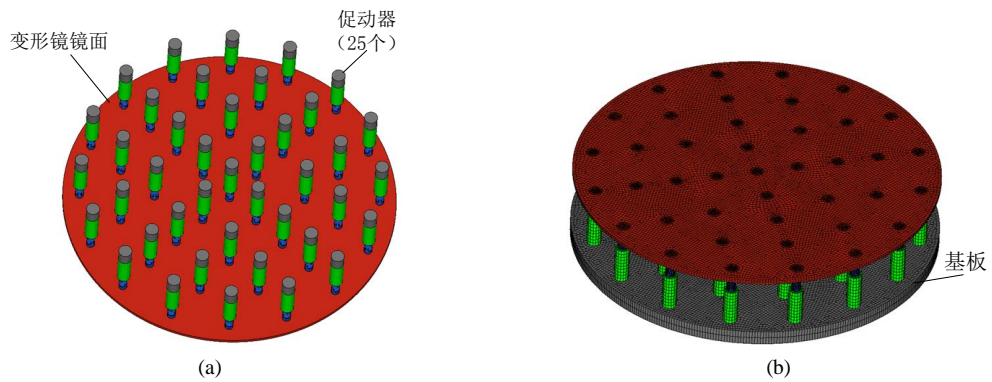
综上,在变形镜材料选择方面,基板材料线胀系数与镜面材料线胀系数相差越小越好,但由于镜面材料为微晶玻璃,不适合作为基板材料;殷钢材料可以与镜面材料匹配,但殷钢结构重量太大,不适合作为空间光学遥感器变形镜使用。碳纤维材料密度低,弹性模量大,且线胀系数与微晶玻璃材料接近,

**Table 1.** Compensation performance of deformable mirror  
**表 1.** 变形镜校正能力

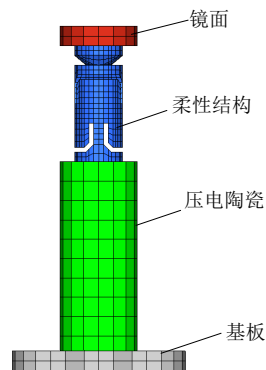
像差项	像差大小(nm rms)	校正残差(nm rms)
Coma3	1000	3.2
Astigmatism3	1000	3.7
Spherical3	1000	4.2
Trefoil5	1000	5.9
Astigmatism5	1000	6.0
Tetrafoil7	1000	4.2
Trefoil7	1000	5.4
Pentafoil9	1000	8.6
Tetrafoil9	1000	15.2

**Table 2.** Typical key material properties  
**表 2.** 典型光机材料属性

属性参数	单位	微晶玻璃	Be	SiC	钛合金	殷钢	碳纤维
密度 $\rho$	$\text{g/cm}^3$	2.53	1.85	3.05	4.4	8.9	1.6
弹性模量 E	Gpa	91	287	455	180	141	180
线膨胀系数 $\alpha$	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	0.02	11.4	2.5	9.1	可调	1
泊松比 $\mu$	-	0.24	0.25	0.14	0.3	0.3	0.3



**Figure 2.** Layout of deformable mirror. (a) Principle of deformable mirror; (b) Finite element model of deformable mirror  
**图 2.** 变形镜示意图。(a) 变形镜促动器分布示意图；(b) 变形镜有限元模型



**Figure 3.** Layout of deformable mirror assembly  
**图 3.** 变形镜连接结构示意图

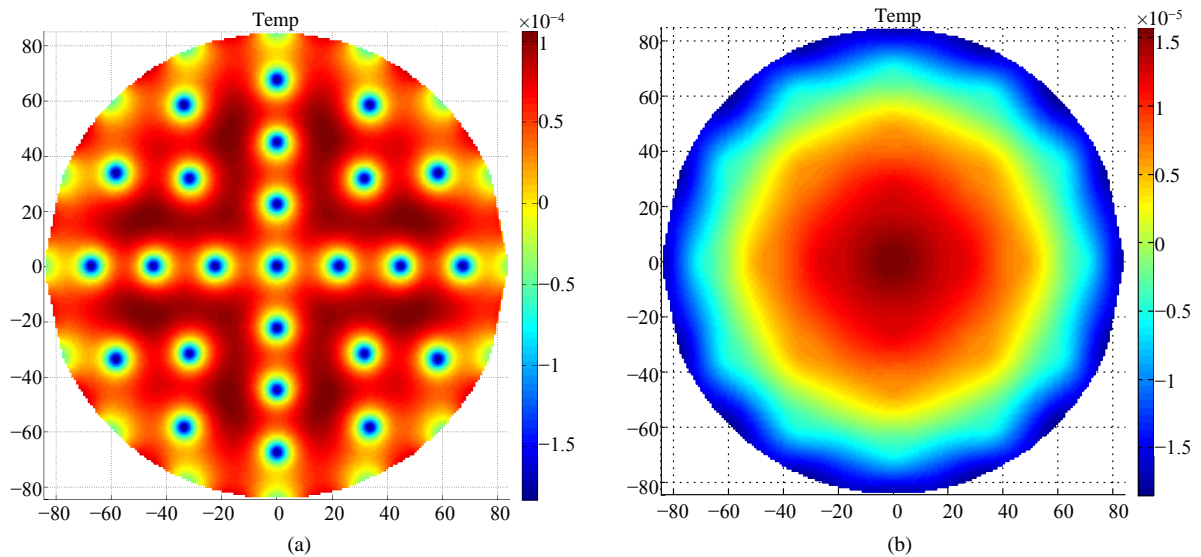


Figure 4. Material analysis results of Mirror and flex. (a) Mirror and flex with different CTE; (b) Mirror and flex with same CTE

图 4. 变形镜镜面与柔性结构材料分析结果。(a) 镜面与柔性结构材料线胀系数不匹配；(b) 镜面与柔性结构材料线胀系数匹配

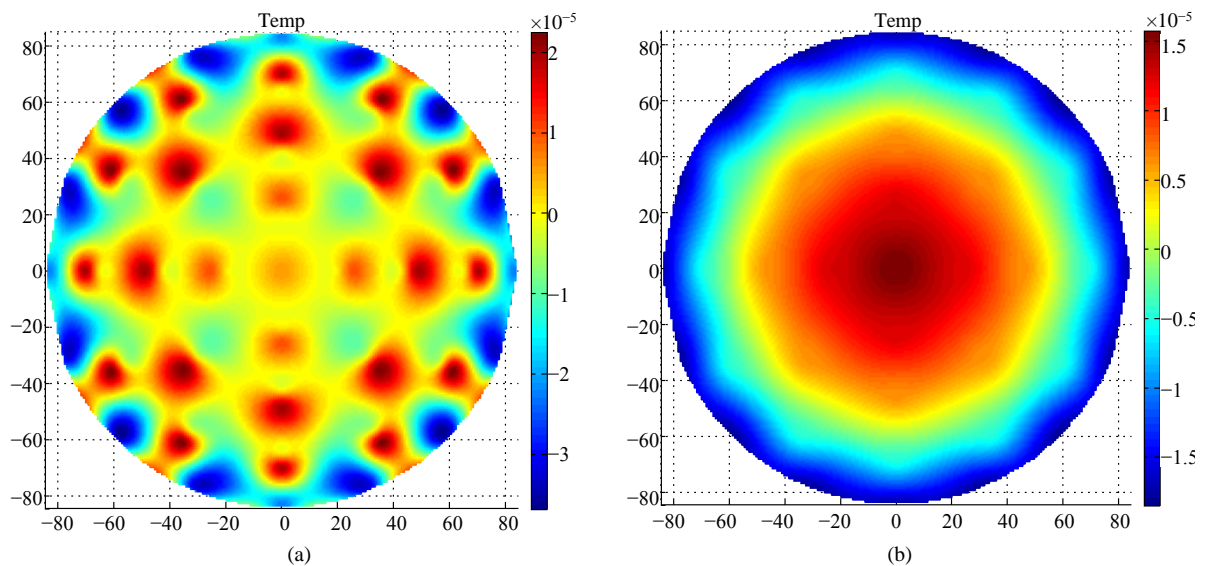


Figure 5. Material analysis results of Mirror and base. (a) Mirror and base with different CTE; (b) Mirror and base with same CTE

图 5. 变形镜镜面与基板材料分析结果。(a) 镜面与基板材料线胀系数不匹配；(b) 镜面与基板材料线胀系数匹配

可以作为基板材料，因此，通过上述考虑，原设计柔性结构部分为和镜面线胀系数相同的殷钢结构，基板材料采用碳纤维材料，在均匀温升  $8^{\circ}\text{C}$  工况下，镜面变形量 PV/RMS 为  $59.66\text{ nm}/11.33\text{ nm}$ ，满足变形镜设计要求  $\text{PV} < \lambda/10$ ， $\text{RMS} < \lambda/50$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ )，面形图如图 5(a) 所示。

### 3.2. 具有同材料过渡结构的消热结构

由上节可知，原设计在变形镜材料选择方面，柔性结构采用殷钢材料，镜面材料为微晶玻璃，基板材料选用密度低，高刚度的碳纤维材料。



为减重设计，柔性结构部分需要通过结构设计选用钛合金等其他低密度材料取代殷钢。借鉴大口径反射镜设计，提出增加与镜面材料相同的过渡结构，减小钛合金材料的柔性结构直接与镜面粘接带来的影响。具有同材料过渡结构的消热结构如图 6 所示，过渡结构采用与镜面相同的材料，连接镜面与柔性结构，柔性结构与过渡结构材料线胀系数不匹配带来的热应力经过渡结构减弱，从而减少了对镜面的影响。

### 3.3. 消热结构优化设计

具有同材料过渡结构参数如图 6 所示，过渡结构外围直径  $\Phi 2$  尺寸由变形镜校正能力决定，尺寸为  $\Phi 5$  mm，限定开口角度  $\alpha = 60^\circ$ ，则过渡结构尺寸由内圈直径  $\Phi 1$  和高度  $H$  决定。设置  $H$  变化范围为 2 mm~5 mm， $\Phi 1$  变化范围为  $\Phi 2$  mm~ $\Phi 5$  mm，计算温升 8℃ 工况下镜面面形 PV/RMS，以 RMS 最小为目标进行优化。

#### 3.3.1. 高度 $H$ 优化

首先，对高度  $H$  进行摸底仿真， $H$  变化范围为 0.5 mm~2 mm， $\Phi 1 = 5$  mm。计算结果见表 3。在厚度  $H$  较薄时，柔性结构与镜面之间材料线胀系数不匹配为主要影响面形因素，在厚度  $H$  较厚时，基板与镜面之间材料线胀系数不匹配为主要影响面形因素。

#### 3.3.2. 高度 $H$ 与直径 $\Phi 1$ 优化试验设计

为减少基板与镜面之间材料线胀系数不匹配而设计加工开槽，根据实际工艺，设置  $H$  变化范围为 2 mm~5 mm， $\Phi 1$  变化范围为  $\Phi 2$  mm~ $\Phi 5$  mm，计算温升 8℃ 工况下镜面面形 PV/RMS，以 RMS 最小为目标进行优化。计算结果见表 4，图 7 为镜面面形 RMS 对内圈直径  $\Phi 1$  和高度  $H$  的响应面。结果可知，在  $H = 2$  mm， $\Phi 1 = 2$  mm 处面形结果最优。

### 3.4. 变形镜消热结构设计结果

综上，过渡结构最终设计结果为  $H = 2$  mm， $\Phi 1 = 2$  mm，如图 8 所示。空间光学传感器变形镜柔性结构原设计质量为 69.9 g，温升 8℃ 工况下面形 PV/RMS 为 59.66 nm/11.33 nm，空间光学传感器变形镜消热柔性结构设计质量为 29.0 g，质量减少约 58.5%，温升 8℃ 工况下面形 PV/RMS = 47.26 nm/9.31 nm，面形提高约 17.8%。钛合金材料强度(800 Mpa)比殷钢(235 Mpa)高，采用钛合金材料作为柔性结构工艺上更为合理，且钛合金材料刚度较殷钢小，作为柔性结构性能更好，从计算结果得到了验证。

## 4. 空间光学传感器变形镜指标分析

### 4.1. 静力载荷变形分析

对空间光学传感器变形镜施加其在轨应用时所受的载荷，分别进行分析，验证优化设计后的变形镜空间应用适应能力。按照变形镜空间应用状态，对变形镜基板底部施加固定约束，然后分别施加三方向微重力、8℃ 温升载荷，计算变形镜面形，计算结果见表 5，均满足设计要求  $PV < \lambda/10$ ， $RMS < \lambda/50$  ( $\lambda = 632.8$  nm)。

### 4.2. 动态性能分析

模态是衡量结构动态性能的重要指标。通过模态分析计算空间光学传感器变形镜的基频和振型，评估空间光学传感器变形镜在经历运输颠簸和发射振动载荷过程中的适应能力。模态计算结果如表 6 所示，一阶基频为 1832 Hz，远高于国内一般火箭的发射过程主要谐振频率 100 Hz，可以满足空间使用要求。

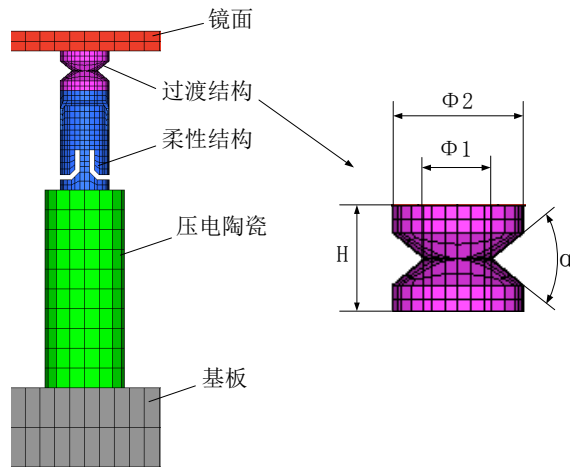


Figure 6. Layout of athermal design with same material  
图 6. 具有同材料过渡结构的消热结构示意图

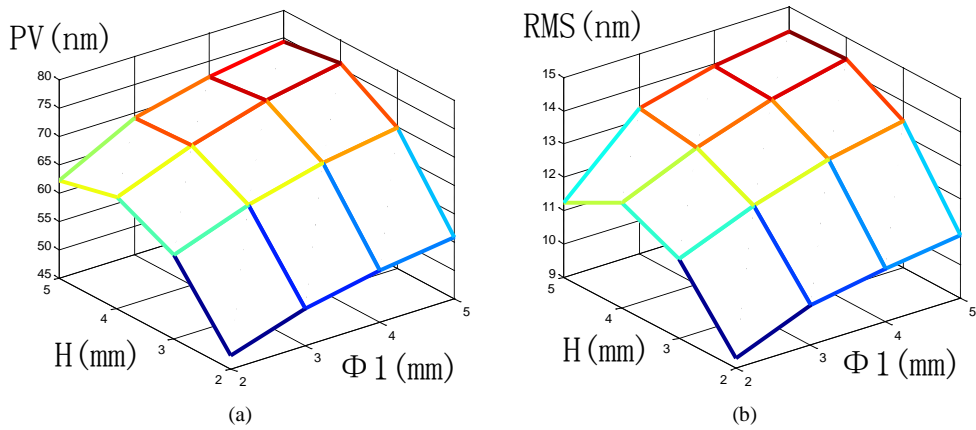


Figure 7. Response surface for PV and RMS of H and  $\Phi 1$ . (a) Response surface for PV; (b) Response surface for RMS

图 7. 面形 PV 和 RMS 对 H 与  $\Phi 1$  响应面。(a) 面形 PV 响应面；(b) 面形 RMS 响应面

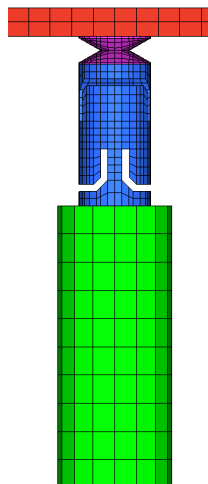
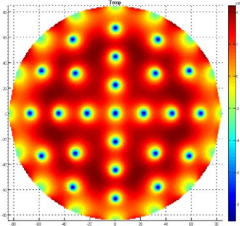
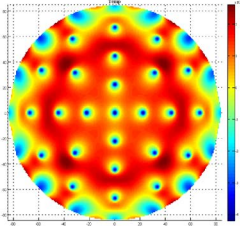
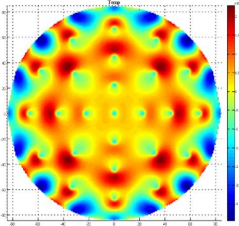
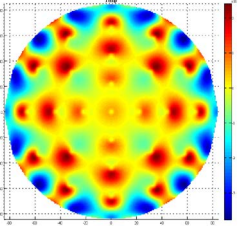


Figure 8. Final design for deformable mirror

图 8. 变形镜消热结构设计结果

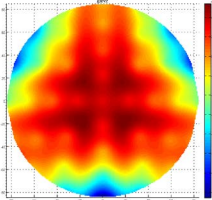
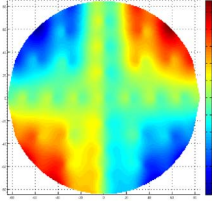
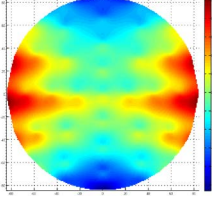
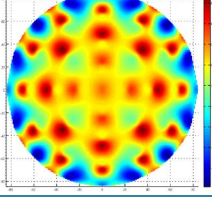
**Table 3.** Optimization results for H  
**表 3.** 高度 H 优化结果

PV/RMS (nm)	H = 0.5 mm	H = 1 mm	H = 1.5 mm	H = 2 mm
	137.00/34.83	70.02/15.47	57.77/9.93	62.20/11.25
面形				

**Table 4.** DOE results for H and  $\Phi 1$   
**表 4.** 高度 H 与直径  $\Phi 1$  试验设计结果

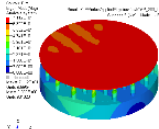
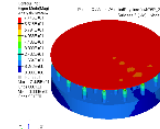
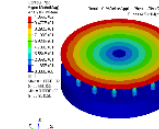
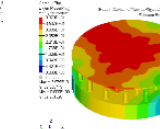
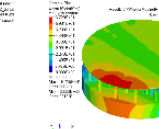
PV/RMS(nm)	H = 2mm	H = 3mm	H = 4mm	H = 5mm
$\Phi 1 = 2\text{mm}$	47.26/9.31	51.52/10.20	54.20/10.60	55.90/10.90
$\Phi 1 = 3\text{mm}$	59.80/11.38	64.43/12.29	67.71/12.96	69.87/13.42
$\Phi 1 = 4\text{mm}$	64.62/12.15	69.71/13.12	73.43/13.85	75.92/14.37
$\Phi 1 = 5\text{mm}$	62.20/11.25	69.13/13.38	72.32/13.95	74.43/14.27

**Table 5.** Figure error results for space load case  
**表 5.** 各空间载荷工况下变形镜面形结果

序号	工况	载荷	PV (nm)	RMS (nm)	变形云图
1	Z 向微重力	1 g	20.56	3.50	
2	X 向微重力	1 g	22.80	3.84	
3	Y 向微重力	1 g	21.25	3.49	
4	均匀温度	$\pm 8^\circ\text{C}$	47.26	9.31	



**Table 6. Normal mode analysis results**  
**表 6. 变形镜前 5 阶模态结果**

阶数	1	2	3	4	5
频率(Hz)	1832	1909	2001	2593	3120
变形云图					

## 5. 结论

本文研究了促动器数量为 25，口径为  $\Phi 200$  mm 的空间光学遥感器变形镜，提出了一种消热柔性结构取代原有殷钢材料的柔性结构，通过同材料过渡和柔性结构消除不同材料间热胀影响，并对该结构进行优化设计。设计结果表明该设计在温度变化  $\pm 8^\circ\text{C}$  工况下，镜面变形 PV/RMS 为 47.26 nm/9.31 nm 面形提高约 17.8%，柔性结构质量减少约 58.5%。对空间光学遥感器变形镜在轨应用时所受的载荷进行分析，微重力变形 PV/RMS 为 20.56 nm/3.50 nm，满足微重力变形要求；一阶频率为 1832 Hz，动态性能满足设计要求。采用钛合金材料作为柔性结构工艺上更为合理，且钛合金材料刚度较殷钢小，作为柔性结构性能更好，从计算结果得到了验证，消热结构工艺合理，满足空间变形镜设计要求。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈新东 (2013) 9 点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究. *光学学报*, **10**, 241-247.
- [2] 马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 李保庆, 褚家如 (2014) 200 单元硅基单压电变形镜的设计与测试. *光学精密工程*, **8**, 2047-2053.
- [3] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 王亮, 卫沛锋 (2014) 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展. *激光与光电子学进展*, **9**, 31-40.
- [4] 吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 邵亮, 明名 (2014) 4m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统. *光学精密工程*, **9**, 2451-2457.
- [5] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 刘欣悦, 李洪文, 王亮, 林旭东, 赵雨菲 (2013) 961 单元自适应光学系统波前处理器. *光学精密工程*, **6**, 1387-1393.
- [6] 陈新东, 郑立功, 张学军 (2011) 一种新型的变形镜促动器排布方式 - 设计与分析. *中国光学学会 2011 年学术大会摘要集*, 中国光学学会, 北京, 418.