



### 大口径ULE分块镜曲率半径调整能力分析

赵凯伦,宋刘幸,孙德伟,黄巧林,田国梁,贺金平,胡瑞

### 引用本文:

赵凯伦,宋刘幸,孙德伟,等.大口径ULE分块镜曲率半径调整能力分析[J]. 光电工程,2025, **52**(3):240291. Zhao K L, Song L X, Sun D W, et al. Analysis of curvature radius adjustment capability of large aperture ULE segmented mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(3): 240291.

https://doi.org/10.12086/oee.2025.240291

收稿日期: 2024-12-10; 修改日期: 2025-02-12; 录用日期: 2025-02-12

# 相关论文

**空间引力波望远镜超前瞄准机构致动器电荷驱动位移行为研究** 闫泽昊,周子夜,李杨,周虹,黄林海,顾乃庭,饶长辉 **光电工程** 2023, **50**(11): 230223 doi: 10.12086/oee.2023.230223

更多相关论文见光电期刊集群网站



http://cn.oejournal.org/oee









DOI: 10.12086/oee.2025.240291

CSTR: 32245.14.oee.2025.240291

# 大口径 ULE 分块镜曲率 半径调整能力分析

赵凯伦<sup>1</sup>,宋刘幸<sup>2</sup>,孙德伟<sup>1\*</sup>,黄巧林<sup>1</sup>, 田国梁<sup>1</sup>,贺金平<sup>1</sup>,胡 瑞<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京空间机电研究所先进光学遥感技术北京市重点实验室,北京 100094; <sup>2</sup>南京航空航天大学航天学院,江苏 南京 210016; <sup>3</sup>中国科学院光电技术研究所光学轻量化与新材料技术中心,四川 成都 610209



摘要:针对未来大口径分块光学系统在轨变构重构问题,提出一种大范围曲率可调的轻量化设计方法。首先分析了压 电陶瓷材料特性与热应变本构方程之间的关系,推导出压电应变可以由热应变精确等效,并根据挠性曲线方程解算出 压电陶瓷变形量,由此实现对边距离为 510 mm、曲率半径为 9000 mm 的 ULE (ultra low expansion glass)分块镜参 数化建模。仿真结果表明: 54 个交错式促动器在±20 V 控制电压区间可实现分块镜曲率半径变构 240.07 mm 且呈高 度线性变化关系。相关实验结果表明: 控制电压在-25~20 V 区间变化时,分块镜曲率半径变化量达 223.44 mm,并 且正向单位电压对应曲率半径变化量较负向大。本文提出的大范围曲率可调分块镜可为后续大口径分块光学在轨变构 重构的工程化应用提供新的思路。

关键词:分块镜; 曲率半径; 压电陶瓷; 促动器; 主动控制 中图分类号: TP79 文献标志码: A

赵凯伦,宋刘幸,孙德伟,等.大口径 ULE 分块镜曲率半径调整能力分析 [J]. 光电工程,2025,**52**(3): 240291 Zhao K L, Song L X, Sun D W, et al. Analysis of curvature radius adjustment capability of large aperture ULE segmented mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(3): 240291

# Analysis of curvature radius adjustment capability of large aperture ULE segmented mirror

Zhao Kailun<sup>1</sup>, Song Liuxing<sup>2</sup>, Sun Dewei<sup>1\*</sup>, Huang Qiaolin<sup>1</sup>, Tian Guoliang<sup>1</sup>, He Jinping<sup>1</sup>, Hu Rui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup> School of Astronautics NUAA, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>3</sup>Optics Lightweighting and New Materials Technology Center, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: In response to the on-orbit reconfiguration challenges faced by future large aperture segmented optical

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-02-12; 录用日期: 2025-02-12

基金项目: 民用航天重点项目 (D040101)

<sup>\*</sup>通信作者: 孙德伟, sdw508@163.com。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

systems, a lightweight design method with a wide range of curvature adjustability is proposed. This study initially analyzes the relationship between the characteristics of piezoelectric ceramics and the constitutive equations of thermal strain, deducing that piezoelectric strain can be precisely equivalent to thermal strain. Based on the flexural curve equation, the deformation of piezoelectric ceramics is calculated, enabling the parameterized modeling of an ultra-low expansion (ULE) glass segmented mirror with an edge distance of 510 mm and a curvature radius of 9000 mm. Simulation results indicate that 54 interlaced actuators can achieve a curvature radius reconfiguration of 240.07 mm with a control voltage range of ±20 V, exhibiting a highly linear relationship. Experimental results further demonstrate that when the control voltage is varied between -25 V and 20 V, the change in the curvature radius of the segmented mirror reaches 233.44 mm, with the positive unit voltage corresponding to a greater change in curvature radius than the negative. The proposed method for a wide range of curvature adjustable segmented mirrors provides new insights for the engineering application of large aperture segmented optics in on-orbit reconfiguration.

Keywords: segmented mirror; curvature radius; piezoelectric ceramics; actuator; active control

# 1 引 言

传统空间光学设施在轨探测功能单一、不可调整, 已不能满足日益增长的用户多样化需求,相对于传统 较重、被动、单一的主反射镜,未来大口径望远镜需 具备轻量化、主动控制、分块式的结构特征<sup>[1-2]</sup>,以具 备在轨调整探测的能力。分块镜作为主镜单元模块, 需单独加工和检测,其曲率半径必然存在差异,而且 难以通过其它光学元件进行补偿<sup>[3-4]</sup>;此外,光学系统 在轨伴有动态变化的波前像差,影响光学系统的成像 质量,因此需实时主动地对在轨扰动和加工误差进行 校正,将扭曲的波前恢复到理想波前<sup>[5]</sup>。

目前在轨运行的詹姆斯·韦伯空间望远镜 (James Webb space telescope) 采用位于分块镜中心的曲率半径致动器对曲率半径进行精细调整,但调整范围只有±10 mm<sup>[6]</sup>,而且面形校正效果只能满足红外波段观测,未来的空间望远镜在轨探测,则需要更大的调整范围和更高的调整精度<sup>[7-9]</sup>。日本的 3.6 m 地球静止轨道分块望远镜则通过在光路中加入变形镜对像差进行调节,但对于 10 m 量级大口径分块望远镜,需要面形促动器高密度分布的变形镜,在工程上实现较为困难<sup>[10-12]</sup>。我国基于 LAMOST 望远镜的建成和对能动主镜的研究,在分块主镜曲率半径调整方面作了一定的研究<sup>[13-15]</sup>,但难以满足空间望远镜的高精度校正需求,而且在工程应用转化方面还需作较为深入的研究。

伴随着望远镜口径增大,传统的调整方法已经难 以满足大范围高精度的波前像差校正需求<sup>[16-17]</sup>,通过 在分块镜背部嵌入压电陶瓷促动器,可在实现轻量化 的同时获得高集成度的主动控制<sup>[18]</sup>,是匹配当前大范 围曲率可调、高精度面形矫正的重要方法。本文采用 单模块参数可调,多模块形态可变的设计理念,对分 块镜曲率半径变构开展研究,从仿真和实验两个方面 验证了分块镜曲率半径可实现±100 mm 的变构范围, 达到了设计预期,满足单模块分块镜轻幅可调的目标 需求,为未来大口径光学系统变构重构提供重要技术 支持。

### 2 压电热模拟

### 2.1 压电本构方程

正压电效应是指某些非对称晶体材料在给定方向 上受到形变时产生的电荷与应变呈正比的性质,逆压 电效应是某些不对称晶体材料在受到外电场时产生机 械应变的性质。例如常见的石英晶体、压电陶瓷等都 具备压电性质,压电效应中的力学和电学物理量可表 示为

$$\boldsymbol{T}_{i} = -\boldsymbol{e}_{lk}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E}_{j} + \boldsymbol{c}_{ik}^{\mathrm{E}} \boldsymbol{S}_{k}, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{D}_l = \boldsymbol{\varepsilon}_{lj} \boldsymbol{E}_j + \boldsymbol{e}_{lk} \boldsymbol{S}_k, \qquad (2)$$

式中: $T_i$ 为 6×1 阶应力矢量, i=k=1,2,...,6; $D_i$ 为 3×1 阶电位移矢量, l=1,2,3; $S_k$ 为 6×1 阶应变矢量;  $E_j$ 为 3×1 阶电场矢量, j=1,2,3; $c_{ik}^{E}$ 为 6×6 阶弹性系数 矩阵; $e_{lk}$ 为 3×6 阶压电耦合系数矩阵; $\varepsilon_{lj}$ 为介电常 数,第一个下标表示电场位移方向,第二个下标表示 电场强度方向的分量,对于已经极化的压电材料, $\varepsilon_{lj}$ 只有 $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{22}$ 和 $\varepsilon_{33}$ , $e_{lk}$ 只有 $e_{15}$ 、 $e_{31}$ 和 $e_{33}$ ,即:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{lj} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0\\ 0 & \varepsilon_{22} & 0\\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\boldsymbol{e}_{lk} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} .$$
(4)

压电效应除了用弹性系数和介电常数相互关联, 还可以进行力、电相互转换,相应数学表达式为

$$\boldsymbol{e}_{lk}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{c}_{ik}^{\mathrm{E}} \boldsymbol{d}_{mn}^{\mathrm{T}}, \qquad (5)$$

式中: *d<sub>mn</sub>为* 3×6 阶压电耦合矩阵, *m*=1,2,3, *n*=1, 2,...,6。

### 2.2 热弹性本构方程

考虑热效应的广义胡克定律可表达为

$$\boldsymbol{T}_{i} = \boldsymbol{c}_{ik}^{\mathrm{E}} \boldsymbol{S}_{k} - \boldsymbol{c}_{ik}^{\mathrm{E}} \boldsymbol{\alpha}_{k} \Delta \boldsymbol{T}_{\mathrm{t}} , \qquad (6)$$

式中: *α*<sub>k</sub>为 6×1 阶热胀系数矩阵; Δ*T*<sub>1</sub>为温差变化。 此时,将式 (1)~式 (6) 联立,求得:

$$\boldsymbol{d}_{mn}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{j} = \boldsymbol{\alpha}_{k}\Delta T_{\mathrm{t}} \,. \tag{7}$$

从式 (7) 可得出压电应变与热应变的对应关系, 至此建立起压电热模拟等效关系。

## 3 曲率可调分块镜参数化建模

### 3.1 参数化建模原理

通过给定的参数化函数文件,包含对分块镜几何、 促动器布局、网格密度等参数信息描述,创建所需的 有限元模型,并计算面形图,其中用户可通过改变参 数获取最优的设计结果,迭代出最优的输出面形,参 数化建模流程见图 1。

### 3.2 促动器建模

分块镜采用筋刚度增强设计,加强筋与镜体采用 2D 面单元 (三角形) 建模,促动器采用 1D 梁单元 建模,其截面尺寸为 7 mm×7 mm,长度为 40 mm,

M

 $M_0$ 

图 2 等效双金属效应简图

Fig. 2 Equivalent bilayer effect schematic





基于其在电场环境下的轴向应变引起曲率半径局部变 化的原理,实现对曲率和面形调控。建模时,将压电 驱动视为纯力促动器,将其嵌入式安装于反射镜基体 材料背部,形成等效双金属层效应<sup>[19-20]</sup>,如图2所示, 温度载荷施加于梁单元并通过 RBE2 连接,实现与镜 体的力传递。

此时,等截面梁弯曲的控制方程为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI},\tag{8}$$

式中: ρ 为曲率; *M*(*x*) 为弯曲转矩; *E* 为弹性模量; *I* 为梁绕中性面的转动惯量。通过微积分, 任意点 (*x*,*y*) 的曲率 1/ρ 可表示为

$$\frac{1}{\rho} = \left[1 + \left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right)^2\right]^{-3/2} \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2}.$$
 (9)

在小变形条件下, dy/dx 非常小, 因此上式可以写成 1  $d^2y$  (10)

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{\mathrm{d}x^2}.$$

于是有

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{M(x)}{EI}.$$
(11)

基于上述理论基础,在简支梁边界条件上增加了 弹簧常数为 k 的转动弹簧,可更加准确地描述反射镜 动力学特性。当梁弯曲时,弹簧引入了一个反作用转 矩 M<sub>t</sub>,该反作用转矩部分可抵消相邻单元的变形, 基于图 2 优化得到图 3,相关简化模型如下:

边界条件为

$$y(0) = 0$$
  

$$y(L) = 0$$
  

$$M_{t} = -k\theta$$
  

$$x = \frac{L \pm l}{2}$$
(12)

式中:L表示简支梁长度; θ表示简支梁端转角。通

过公式推导,得到挠曲线方程为

$$y(x) = \frac{M_{t}}{2EI}x^{2} - \frac{M_{0}}{2EI}\left(x - \frac{L-l}{2}\right)^{2} + \frac{M_{0}l}{2EI}\left(x - \frac{L+l}{2}\right)^{2} + \frac{M_{0}l - M_{t}L}{2EI}x, \quad (13)$$

其中:

$$M_{t} = \frac{M_{0}l}{L + EI/k}.$$
(14)

通过上述理论推导,利用有限元方法可以计算出 反射镜背部压电陶瓷的变形,从而计算出反射镜表面 节点位移和面形变化。

### 3.3 分块镜建模

本文以对边距离为 510 mm、曲率半径为 9000 mm 的六边形分块镜为研究对象,详细参数见表 1。

分块镜采用筋刚度增强设计,6条主辐射筋以背 部中心向外辐射分布,36条辅助筋交错于其中,每 条主辐射筋上各配置3个促动器,36条辅助筋上各 配置1个促动器;仿真时采用热应变来模拟压电效应, 即令1℃温度变化与1V电压变化引起的压电陶瓷 伸缩量相同,压电陶瓷的材料属性见表2。

此时有

$$CTE_{\rm c} = \frac{\Delta L_1}{L_{\rm c}V_{\rm c}},\tag{15}$$

式中:  $CTE_{c}$ 为等效压电陶瓷的热膨胀系数;  $\Delta L_{1}$ 为封装促动器的行程;  $L_{c}$ 为封装促动器的长度;  $V_{c}$ 为 $\Delta L_{1}$ 对应的电压。

等效压电陶瓷的弹性模量为

$$E_{\rm c} = \frac{K_{\rm c} L_{\rm c}}{A_{\rm c}} , \qquad (16)$$

式中: K<sub>c</sub>为封装促动器的刚度; E<sub>c</sub>、A<sub>c</sub>分别为等效压

电陶瓷的弹性模量和截面积。

由此求得促动器梁单元属性参数 CTE<sub>c</sub>=6.27 e<sup>-6</sup>/℃, 通过上述理论推导,建立分块镜三维模型及有限元模 型,如图 4 所示。

# 4 分块镜曲率半径调整能力分析

#### 4.1 曲率半径理论计算

设节点 j 的初始矢高位置为

$$S_j = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r_j^2}},$$
(17)

式中: *k* 为非球面的偏心率; *c* 为非球面顶点处的曲率; *r* 为径向的光线坐标; *r<sub>j</sub>* 为第 *j* 个节点与光轴的距离。

变形后镜面节点矢高差为

$$E = \sum_{j} w_{j} \left[ (s_{j} + d_{j}) - (s_{j}^{*} + b^{*}) \right]^{2}, \qquad (18)$$

式中: $w_j$ 为面积加权系数; $s_j$ 为名义的矢高位置, $s_j^*$ 为基于曲率半径最佳拟合的矢高位置; $d_j$ 为节点j的 矢高位移; $b^*$ 为曲率中心的轴向运动。

通过牛顿迭代最小二乘法求解,使误差 *E*最小, 得到对应的 *c*<sup>\*</sup>(*c*<sup>\*</sup>为新的曲率),顶点曲率半径变化量 为(顶点曲率半径 *ROC*=1/*c*)

$$d_{\rm ROC} = \frac{1}{c^*} - \frac{1}{c},$$
 (19)

式中: c\*为新的曲率。

### 4.2 曲率半径仿真分析

为实现曲率半径变构±100 mm 的需求目标,并考虑分块镜的安全裕度,预设促动器控制电压区间

Table 1 Segmented mirror modeling parameters								
Material	Edge to edge	Curvature radius	Mirror surface	thickness	Actuator count	Reinforcement rib thickness	Edge rib thickness	Actuator height
ULE	510 mm	9000 mm	4 mr	n	54	2.5 mm	3 mm	29.6 mm
	表 2 Fable 2 Piezo	2 压电陶瓷属/ electric ceramic or	生参数 operty param	eters	a	b Actuator Edge rib Mirror surfa	Ce Re	Bipod einforcement rib
						图 4 分块错模型图	(a) 分块镜有限	元.樟刑 ·
Property	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	Elastic modulus	ratio u	/(10 <sup>-6</sup> .℃	-1)	(b) 分块银	竟三维模型	
Value	8	25	0.2	2	Fig. 4	Segmented mirror model (b) Three-dim	diagrams. (a) Finite ensional model	e element model;

表1 分块镜建模相关参数

# 为±20 V,不同控制电压下的仿真分析见图 5。 根据分析结果计算出不同控制电压下的曲率半径

值,建立曲率半径与促动器控制电压关系曲线,详见 表 3 和图 6。





Fig. 5 Simulation diagrams of curvature radius under different control voltages. (a) At 5 V control voltage,  $d_{ROC} = -33.57$  mm; (b) At 10 V control voltage,  $d_{ROC} = -66.46$  mm; (c) At 15 V control voltage,  $d_{ROC} = -99.43$  mm; (d) At 20 V control voltage,  $d_{ROC} = -132.28$  mm; (e) At -5 V control voltage,  $d_{ROC} = 27.59$  mm; (f) At -10 V control voltage,  $d_{ROC} = 54.55$  mm; (g) At -15 V control voltage,

 $d_{\text{ROC}}$  =82.61 mm; (h) At -20 V control voltage,  $d_{\text{ROC}}$  =109.79 mm

240291-5

从图 6 建立的曲率半径变化曲线可知:曲率半径 在±20 V 控制电压区间可实现变构±100 mm 的指标要 求,在正负两个方向均呈高度线性变化趋势,且正向 弯曲贡献较快于负向。

## 5 实验验证

为验证上述分析,本次实验选用 Leica 激光跟踪 仪对分块镜开展曲率半径测试验证,测试时分块镜光 轴竖直放置,通过3组 Bipod 安装并固定于测试工作 台。通过对分块镜施加不同工况的控制电压,使用靶 标笔在分块镜镜面沿背部加强筋轮廓均布采样靶标点, 完成采样点的球面拟合,分块镜曲率半径测试实验见 图 7。

根据实测靶球点坐标,利用非球面反射镜面形方程,借助激光跟踪仪软件拟合出对应曲率半径,分块镜曲率半径测试结果详见表4。

通过实测结果建立控制电压区间曲率半径变化曲 线,并对比分析单位控制电压对应的曲率半径变化量, 详见图 8。

从图 8(a) 可得知:实测曲率半径变化曲线呈近似 线性趋势,当正向最大控制电压为 20 V 时,曲率半 径变构 110.25 mm,负向最大控制电压为-25 V 时,

表 3	不同控制电压下曲率半径变化结果
-----	-----------------

Table 3	Results of curvature	radius variations	under different	control voltages
				Ų

Control voltage/V	Curvature radius/mm	Curvature radius variations per unit control voltage/mm
20	8867.72	-6.61
15	8900.57	-6.63
10	8933.54	-6.65
5	8966.43	-6.71
0	9000.00	—
-5	9027.59	5.52
-10	9054.55	5.46
-15	9081.61	5.44
-20	9107.79	5.39



图 6 曲率半径变化曲线



图 7 分块镜曲率半径测试实验图



#### 表 4 分块镜曲率半径测试结果

Control voltage/V	Curvature radius/mm	Curvature radius variations corresponding to unit control voltage/mm
20	8891.58	5.51
10	8953.82	4.80
0	9001.83	—
-10	9036.19	3.44
-20	9086.40	4.23
-25	9115.02	4.53

Fig. 6 Curvature radius variation curves

#### 赵凯伦, 等. 光电工程, 2025, 52(3): 240291

https://doi.org/10.12086/oee.2025.240291



图 8 分块镜曲率半径实测结果。(a) 实测曲率半径变化曲线; (b) 单位控制电压对应曲率半径变化曲线 Fig. 8 Measure curvature radius results of the segmented mirror. (a) Measured curves of radius of curvature variation; (b) Curves of radius of curvature variation per unit control voltage

曲率半径变构 113.19 mm,这与仿真的负向控制电压 -20 V 有偏差,分析原因为:1)压电陶瓷促动器的能 力特性所致,正向伸长能力强于负向缩短能力;2) ULE 分块镜初始凹反射面特征所致,对于初始弯曲 的 ULE 分块镜,倾向于正向弯曲的程度大于负向平 面方向的拉伸程度。从图 8(b)得知:单位控制电压与 其对应曲率半径变化量呈正相关趋势,且正向单位电 压对应曲率半径变化量较负向大,曲率半径变化范围 大体维持在 3.5~5.5 mm 区间。

## 6 结 论

本文针对大口径分块光学变构重构问题,开展了 单模块分块镜曲率半径调整研究。基于压电陶瓷在电 场环境下的轴向应变引起曲率半径局部变化的原理, 用热应变将其精确等效,并从挠性曲线方程推导等效 双金属层效应,由此建立对边距离为510 mm、曲率 半径为9000 mm的分块镜参数化模型。仿真分析表 明,促动器在±20 V 控制电压区间可实现分块镜曲率 半径变构±100 mm的指标;实验结果表明,促动器正 向弯曲贡献度较负向大,当控制电压在-25 V~20 V 变化时,可实现分块镜曲率半径变构±100 mm,满足 大范围曲率可调的目标需求,该研究成果可为后续开 展大口径分块光学系统变构重构以及分块镜曲率和面 形耦合调控提供技术支撑,具有工程实用价值。

### 利益冲突:所有作者声明无利益冲突

## 参考文献

- [1] McElwain M W, Feinberg L D, Perrin M D, et al. The James Webb space telescope mission: optical telescope element design, development, and performance[J]. *Astron Soc Pac*, 2023, **135**(1047): 058001.
- [2] Postman M, Argabright V, Arnold B, et al. Advanced technology large-aperture space telescope (ATLAST): A technology roadmap for the next decade[EB/OL]. [2021-8-10]. https://arxiv.org/abs/0904.0941.
- [3] Liao C H, Yu F, Liu C, et al. Research on the decoupling control method of segmented deformable mirror surface shape[J]. Spacecr Recovery Remote Sens, 2022, 43(1): 69-78. 廖春晖, 于飞, 刘成, 等. 分块变形镜面形解耦控制方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(1): 69-78.
- [4] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. Opto-Electron Eng, 2018, 45(3): 1–15.
- 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 1-15.
  [5] Guan C L, Zhang X J, Deng J M, et al. Deformable mirror technologies at institute of optics and electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(10): 51-62.

官春林,张小军,邓建明,等.中国科学院光电技术研究所的变形 反射镜研究进展[J].光电工程,2020,47(10):51-62.

- [6] Chaney D M, Hadaway J B, Lewis J A. Cryogenic radius of curvature matching for the JWST primary mirror segments[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7439**: 743916.
- [7] Chonis T S, Gallagher B B, Knight J S, et al. Characterization and calibration of the James Webb space telescope mirror actuators fine stage motion[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10698**: 106983S.
- [8] Redding D. Large segmented apertures in space: active vs. passive[EB/OL]. [2018-4-09]. https://kiss.caltech.edu/special\_events/JPL\_MPIA/presentation s/2\_Redding. pdf.
- [9] Perrin M D, Acton D S, Lajoie C P, et al. Preparing for JWST wavefront sensing and control operations[J]. *Proc SPIE*, 2016, 9904: 99040F.
- [10] Hirose M, Kumeta A, Miyamura N, et al. Wavefront correction using MEMS deformable mirror for earth observation satellite

https://doi.org/10.12086/oee.2025.240291

with large segmented telescope[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11448**: 114487D.

- [11] Kimura T, Mizutani T, Shirasawa Y, et al. Geostationary earth observation satellite with large segmented telescope[C]// IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 5895–5897. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898683.
- [12] Fujii Y, Uno T, Ariki S, et al. Experimental study of 3.6-meter segmented-aperture telescope for geostationary earth observation satellite[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11852**: 118522G.
- [13] Su D Q, Cui X Q. Active optics in LAMOST[J]. Chin J Astron Astrophys, 2004, 4(1): 1–9.
- [14] Chen J Y, Wang C, Huo T F, et al. Research on detection method of large-aperture aspheric surface by laser tracker[J]. *J Appl Opt*, 2021, **42**(2): 299-303.
  陈佳夷, 王聪, 霍腾飞, 等. 激光跟踪仪检测大口径非球面方法研 究[J]. 应用光学, 2021, **42**(2): 299-303.
- [15] Pang Z, Zong X Y, Du J X. A method measuring geometric parameters for large-aperture aspheric surface with the laser tracker[J]. *Spacecr Recovery Remote Sens*, 2020, **41**(3): 47–59.

庞哲,宗肖颖,杜建祥.利用激光跟踪仪测量大口径非球面几何参

### 作者简介



赵凯伦 (1992-),男,博士研究生,研究方向为 大口径分块望远镜光机结构精密调整技术。 E-mail: zhaokl0503@163.com



【通信作者】孙德伟(1981-),男,博士,研究员,主要从事航天光学遥感器总体设计及大口径空间遥感相机研制工作。 E-mail: sdw508@163.com 数[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(3): 47-59.

- [16] Shi Y L, Niu D S, Wang H, et al. Research on microdisplacement actuator for high precision mirror position control[J]. Astron Res Technol, 2023, 20(3): 250-257. 帅雨林, 牛冬生, 王海, 等. 高精度镜面位置控制的微位移促动器 研究[J]. 天文研究与技术, 2023, 20(3): 250-257.
- [17] Wu S H, Dong J H, Xu S Y, et al. Overview of active support technology for main mirror of segmented telescopes[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(3): 0300006.
  吴松航, 董吉洪, 徐抒岩, 等. 拼接式望远镜主镜主动支撑技术综 述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(3): 0300006.
- [18] Huang L H, Fan M W, Zhou R, et al. System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(3): 170704. 黄林海, 凡木文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. 光电工程, 2018, **45**(3): 170704.
- [19] Cohan L E. Integrated modeling and design of lightweight, active mirrors for launch survival and on-orbit performance[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [20] Ealey M A. Integrated actuator meniscus mirror: 20040165289[P]. 2004-08-26.



黄巧林 (1965-),男,博士,研究员,博士生导师,南京航空航天大学兼职教授博导,主要从 事航天光学遥感器总体设计及大口径空间遥感 相机研制工作。

E-mail: hqiaolin vip@sina.com



# Analysis of curvature radius adjustment capability of large aperture ULE segmented mirror

Zhao Kailun<sup>1</sup>, Song Liuxing<sup>2</sup>, Sun Dewei<sup>1\*</sup>, Huang Qiaolin<sup>1</sup>, Tian Guoliang<sup>1</sup>, He Jinping<sup>1</sup>, Hu Rui<sup>3</sup>



Curvature radius reconfiguration of segmented mirrors based on parametric modeling

**Overview:** With the increasing trend of global space resource development and the intensification of future space warfare, particularly the establishment of the Space Force by the United States in 2018, space is poised to become a new battlefield. Future large-scale space optical facilities for military applications face greater threats of being targeted and destroyed in warfare. There is an urgent need for large optical imaging systems to enhance their resistance to damage and their ability to be reconstructed after being hit. Additionally, traditional space optical facilities have singular and non-adjustable in-orbit detection functions, which can no longer meet the growing diverse needs of users. There is an urgent need to develop a new type of reconfigurable space optical system capable of in-orbit adjustment and detection.

This paper adopts a design concept of adjustable parameters for single modules and variable shapes for multiple modules. Focusing on the problem of in-orbit reconfiguration of large-aperture segmented optical systems, we propose a lightweight design method with a wide range of curvature adjustability. We first analyzed the relationship between the characteristics of piezoelectric ceramic materials and the constitutive equation of thermal strain, deriving that piezoelectric strain can be precisely equivalent to thermal strain. Based on this, we achieved parameterized modeling of the ULE (ultra low expansion glass) segmented mirror with a side distance of 510 mm and an initial radius of curvature of 9000 mm. Simulation results show that 54 interleaved actuators can achieve a change in the radius of curvature of the segmented mirror by 240.07 mm within a control voltage range of  $\pm 20$  V, exhibiting a highly linear relationship.

To fully verify the analysis results and achieve engineering application transformation, experimental results indicate that when the control voltage varies within the range of -25 V to 20 V, the change in the radius of curvature of the segmented mirror reaches 223.44 mm, with the positive unit voltage corresponding to a larger change in the radius of curvature than the negative. The proposed design method for a large-range curvature-adjustable segmented mirror has been verified through simulation and experiment to achieve a reconfiguration range of more than 100 mm in the radius of curvature. This provides new ideas for the engineering application of large-aperture segmented optics in in-orbit reconfiguration.

Zhao K L, Song L X, Sun D W, et al. Analysis of curvature radius adjustment capability of large aperture ULE segmented mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(3): 240291; DOI: 10.12086/oee.2025.240291

Foundation item: Key Civil Space Program Fund (D040101)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China; <sup>2</sup>School of Astronautics NUAA, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China; <sup>3</sup>Optics Lightweighting and New Materials Technology Center, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>\*</sup> E-mail: sdw508@163.com