

# 立式太阳模拟器俯视多维调节准直镜机构设计

王丹艺, 蒋山平\*, 张鹏嵩, 向艳红, 王劭溥, 李竑松, 杨林华

中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所, 北京 100081

**摘要** 随着航空航天技术的发展,空间环境模拟的需求增多,太阳辐照模拟也备受关注。目前,较为成熟的太阳模拟器多为卧式太阳模拟器,其准直镜机构多采用拼接形式,而立式太阳模拟器具有节省空间的优势,其发展日趋成熟。根据太阳模拟器的总体要求,设计了一种应用于高辐照立式太阳模拟器的大口径俯视多维调节准直镜机构。根据高辐照、低背景工作环境特点,设计了多维可调节柔性吊装机构。为了提高系统的整体调试性能,采用单块整镜结构设计,降低了结构的复杂性。针对以上设计进行了计算及仿真分析,结果显示,柔性吊装机构可以有效平衡准直镜自身重力及环境温度造成的应力变形,最终满足太阳模拟器辐照度及辐照均匀性的使用需求。

**关键词** 光学设计; 立式太阳模拟器; 准直镜机构; 俯视调节结构; 柔性吊装机构; 大口径单元镜; 高辐照能量

中图分类号 V11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0422002

## Structural Design of Overlooking Multidimensional Adjustable Collimating Mirrors for Vertical Solar Simulator

Wang Danyi, Jiang Shanping\*, Zhang Pengsong, Xiang Yanhong, Wang Shaopu, Li Hongsong, Yang Linhua

Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** With the development of aerospace field, there exists an increase in the need of space environment simulation and solar radiation simulation has also attracted much attention. At present, most of the mature solar simulators designed and used are horizontal solar simulators, whose collimator mirrors usually adopt the form of splicing. However, the vertical solar simulators possess the advantage of space-saving and become gradually mature. In this paper, according to the general requirements of solar simulators, a large diameter overlooking multidimensional adjustable structure of collimating mirrors used for a high irradiation vertical solar simulator is designed. In addition, according to the characteristics of high radiation and low background working environment, a multi-dimensional adjustable flexible hoisting structure is designed. In order to improve the overall debugging performance of the system, a single-block whole mirror structure is adopted to reduce the structural complexity. According to the above designs, the calculation and simulation analysis are conducted and the results show that the flexible hoisting structure can be used to effectively balance the stress deformation caused by the collimating mirror's own gravity and the environmental temperature, and finally to meet the use requirements of irradiance and irradiation uniformity for the solar simulators.

**Key words** optical design; vertical solar simulator; collimating mirror structure; overlooking adjustable structure; flexible hoisting structure; large aperture unit mirror; high irradiation energy

**OCIS codes** 220.2740; 220.4830; 230.3990

## 1 引言

近年来,随着航天科学技术的迅猛发展,航天器

环境模拟的需求逐日增多,环境模拟主要包括光照环境、热环境、真空环境和低温环境模拟等。其中,光照环境模拟主要用于卫星热平衡试验<sup>[1-3]</sup>,可模拟

收稿日期: 2020-08-14; 修回日期: 2020-09-18; 录用日期: 2020-09-30

\* E-mail: jiangshp\_cast@163.com

仿真卫星的光照情况<sup>[4-6]</sup>、验证卫星的热设计以提高其可靠性,其主要通过太阳模拟器进行地面光照模拟。太阳模拟器主要包括光源、积分器、窗口镜和准直镜等<sup>[7-9]</sup>。其中,准直镜作为系统最终的输出元件,具有对前系统模拟的太阳光束进行修正、准直、传输等功能<sup>[10-12]</sup>。太阳模拟器系统的总辐照能量通过准直镜机构输出,因此光学镜表面承受了较高的热能量负荷,且需避免高热量导致的结构变形,稳固性要求较高。早期国外就对离轴立式太阳模拟器进行了研究,如美国喷气推进实验室(JPL)采用单一离轴准直镜研制的大型太阳模拟器,其准直镜为铝材制造,直径为 7 m,曲率半径为 30.4 m。国内现有的大中型离轴式太阳模拟器多采用卧式结构,如北京卫星环境工程研究所研制的 KM6 大型太阳模拟器及 KM3 中型太阳模拟器,其准直镜结构采用立式拼接结构,且支撑装置多采用硬连接支撑设计<sup>[13-14]</sup>,在装调过程中,由于重量过重,会出现姿态难以调整等问题,且因环境温度过高,试验过程中容易发生变形问题。立式太阳模拟器具有节省空间、性能高效等优点,逐渐受到关注。太阳模拟器的主体采用立式结构,其准直镜需采用俯视吊挂形式,且有高辐照能量的输入,因此需要从光、热、力多角度综合考虑结构设计。

本文设计了一种应用于高辐照立式太阳模拟器的大口径俯视多维调节准直镜结构。由于立式太阳模拟器具有高辐照能量,准直镜表面能量汇聚,结构容易出现变形、破裂等现象。本文设计的结构采用了混合柔性吊装机构,可避免该现象的发生。该机构自身的弹性变形可有效平衡高辐照、冷背景带来的准直镜组件热变形及俯视吊挂结构的重力变形,提高立式高辐照大型太阳模拟器的辐照均匀性、辐照度等光学性能。

## 2 立式太阳模拟器的总体设计

本文设计的太阳模拟器采用立式机构,由氙灯、积分器、窗口、准直镜和支撑机构组成,其中辐照度最高需达到 2 个太阳常数(即  $2706 \text{ W/m}^2$ ),辐照面直径为 1000 mm,辐照不均匀度为  $\pm 5\%$ ,系统离轴角为  $39^\circ$ ,准直角小于  $\pm 2^\circ$ 。根据立式太阳模拟器结构的特性,设计了应用于立式太阳模拟器的大口径俯视多维调节准直镜机构,立式太阳模拟器结构示意图如图 1 所示。

根据太阳模拟器设计的需求,在辐照直径为 1000 mm 的有效辐照区域上,光束有效照射面积所

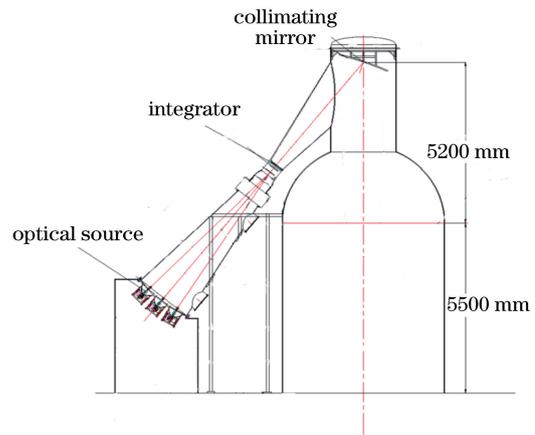


图 1 立式太阳模拟器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of vertical solar simulator

需要的总光功率为 2126 W。太阳模拟器的辐照度与氙灯的输出功率和光电转换效率成正比,为了获得更高的辐照度,本太阳模拟器选用三支欧司朗 10000 W 氙灯作为光源,其光电转换效率可达到 50%。

由于短弧氙灯的发光具有轴对称性,椭球反射镜具有双焦点的物理特性,且聚光效率高,因此本文设计的太阳模拟器聚光镜采用椭球面聚光镜结构,其椭球面结构的第一焦距为 80 mm,第二焦距为 5500 mm,聚光镜大端口径为 460 mm,小端口径为 100 mm。

在太阳模拟器中,光学积分器的主要作用是均匀光束。本文设计的光学积分器选用对称式结构,由投影镜和场镜组成。投影镜和场镜分别由 37 个圆形元素镜组成,投影镜位于准直镜的焦点位置,场镜位于聚光镜的第二焦点位置。设计的太阳模拟器的积分器口径为 310 mm,元素镜的口径为 45 mm。投影镜的曲率半径为 83.392 mm,场镜的曲率半径为 80.882 mm,投影镜与场镜之间的距离为 161.3 mm。

在太阳模拟器中,准直镜的主要作用是产生平行光束,保证光束在一定深度内沿光轴方向辐照均匀,其焦点与积分器投影镜的焦点重合,本文设计的太阳模拟器的准直镜通光口径为 1600 mm,曲率半径为 8890 mm。

## 3 大口径俯视多维调节准直镜结构的设计

根据立式太阳模拟器的总体设计,对准直镜组件进行结构设计,该结构需要满足以下要求:当镜面温度控制在目标温度  $\pm 3^\circ\text{C}$  的范围内时,太阳模拟

器的辐照均匀性应满足  $\pm 5\%$ ; 准直镜组件的整体结构形变不超过 0.1 mm; 准直镜组件可绕  $x$ 、 $y$  轴调整  $\pm 1^\circ$ , 准直镜单元镜可绕  $x$ 、 $y$  轴调整  $\pm 1^\circ$ 。

大口径俯视多维调节准直镜由金属反射镜和准直镜调节结构组成, 整体放置在真空容器内。准直镜单元镜采用单块金属反射镜结构, 采用由柔性吊装机构、四点固定支撑框架和环形框架组成的三层机构对准直镜调节结构进行连接、固定和调节。其中, 四点固定支撑机构将金属反射镜放置在  $39^\circ$  离轴角位置, 并在金属反射镜背面均匀布置吊装点位, 搭配柔性吊装机构, 降低了反射镜正面的高热量辐照及容器冷却热沉带来的反射镜背面低温辐射, 避免了正反两面温度极化现象, 平衡了温度不均产生的应力变形。环形框架作为准直镜组件的最上层结构, 对准直镜组件进行整体调节补偿, 并提供与真空容器水平连接的接口, 如图 2 所示。

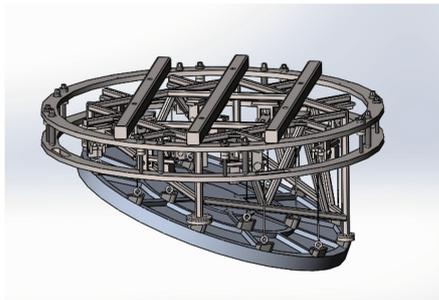


图 2 准直镜机构总图

Fig. 2 Construction profile of collimating mirror

### 3.1 准直镜单元镜

准直镜单元镜采用单块整镜结构, 其有效口径为 1600 mm, 外径为 1640 mm, 曲率半径为 8890 mm, 总质量为 272.5 kg。其采用 6061 T6 铝合金, 单元镜表面镀有  $Al+SiO_2$  反射膜, 适用于紫外、可见和红外波段。为了减轻准直镜重量并降低变形, 在准直镜背面设计了 18 处扇形结构并附有环形加强筋, 该蜂窝轻量化结构可以减小镜面重力变形。

由于准直镜垂直放置在  $39^\circ$  离轴角位置, 因此在单元镜背面设计了 18 处马蹄形转接块结构, 其作为准直镜调节机构与金属单元镜的转接部分, 将倾斜面转换为水平面, 如图 3 所示。

### 3.2 准直镜调节机构

准直镜调节机构包括柔性吊装机构、四点固定支撑框架和环形框架三部分。其中, 四点固定支撑机构的作用是将准直镜保持在  $39^\circ$  离轴角位置; 多点柔性吊装机构的作用是尽可能减小镜面重力变

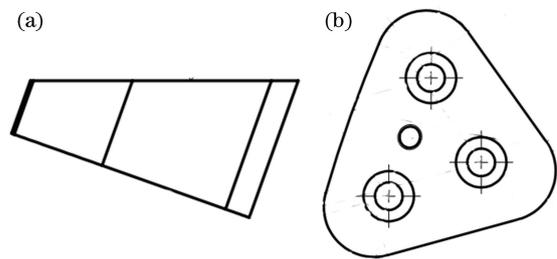


图 3 马蹄形连接块。(a) 主视图; (b) 俯视图

Fig. 3 Horseshoe joint block. (a) Main view; (b) top view  
形, 并且提供水平连接接口; 环形框架起到连接固定的作用, 整个机构通过环形框架放置于真空容器内, 实现统一调节, 如图 4 所示。

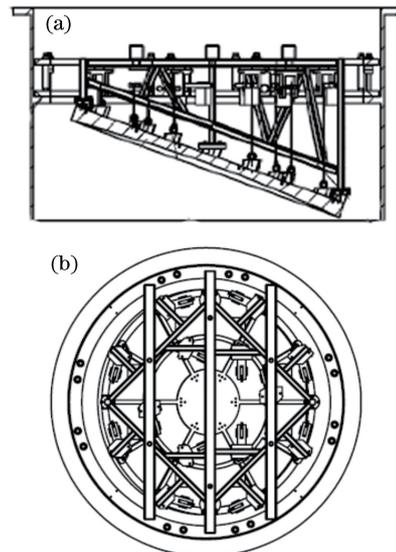


图 4 准直镜机构总图。(a) 主视图; (b) 俯视图

Fig. 4 Construction profile of collimating mirror.

(a) Main view; (b) top view

#### 3.2.1 四点固定支撑框架

四点固定支撑框架的主要作用是提升准直镜固定点的支撑力并约束准直镜的平移倾斜, 准直镜的整体框架如图 5 所示。

四点固定支撑机构共设有 18 处支撑点: 4 处为固定支撑点, 对金属反射镜的安装位置、离轴角度起到限定作用, 通过金属反射镜背面的马蹄形转接块连接; 14 处为柔性吊装机构, 通过金属反射镜背面的马蹄形转接块连接, 起到约束高低温应力变形的作用, 如图 6 所示。

#### 3.2.2 柔性吊装机构

柔性吊装机构采用弹性杠杆结构, 一端通过钢丝与金属反射镜背面的马蹄形转接块连接, 另一端设有配重块, 钢丝杠杆机构通过调整配重块的位置, 控制支撑点的作用力, 如图 7 所示。

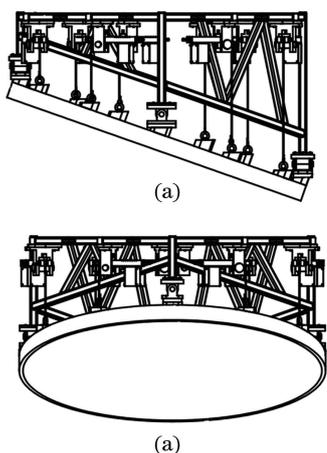


图 5 准直镜楔形板组合。(a)主视图;(b)左视图  
Fig. 5 Wedge plate combining with collimating mirror.  
(a) Main view; (b) left view

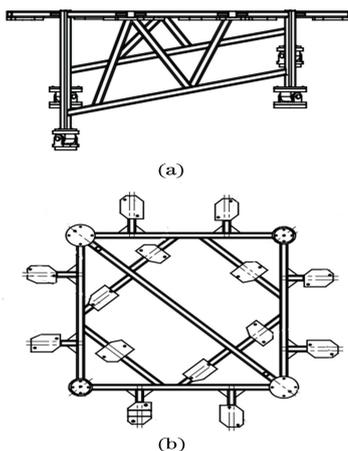


图 6 四点固定支撑框架。(a)主视图;(b)俯视图  
Fig. 6 Four-point fixed support frame.  
(a) Main view; (b) top view

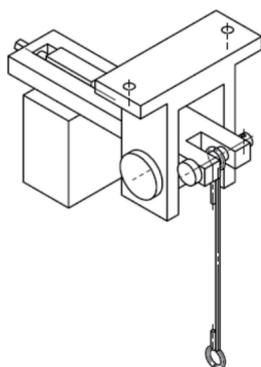


图 7 柔性吊装机构  
Fig. 7 Flexible hoisting structure

柔性吊装机构通过自身的弹性变形,平衡金属反射镜与固定支撑结构之间的变形,使金属反射镜支撑结构的力矩减小,进而减小热变形对金属反射镜的影响,在真空高低温环境下保证金属反射镜的

面形精度在使用需求范围内,从而有效保证并提高立式高辐照大型太阳模拟器的辐照均匀性及辐照度等光学性能。

### 3.2.3 环形框架

环形框架采用双层结构,通过上、下层结构之间的螺杆调节准直镜整体的高度和倾斜度,具备上下及倾斜调节功能,其中上层结构横梁用于连接并固定四点固定支撑机构,如图 8 所示。

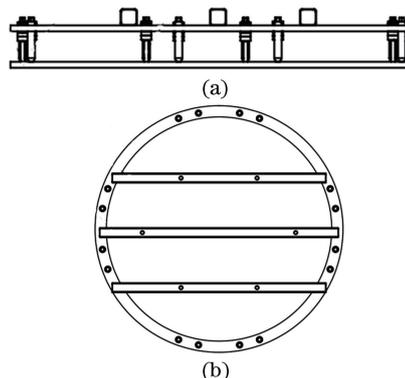


图 8 环形框架。(a)主视图;(b)俯视图  
Fig. 8 Circular frame. (a) Main view; (b) top view

## 4 大口径俯视多维调节金属反射镜的仿真计算

### 4.1 热分析

本文设计的太阳模拟器的辐照度最高可达 2 个太阳常数,为了保持准直镜面形,进行了 2 个太阳常数下的热仿真分析。太阳模拟器的光源辐照度按照三只氙灯进行计算,每支氙灯的额定功率为 10 kW,则到达准直镜的太阳辐射功率  $Q_c$  为

$$Q_c = 10 \times 3 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times k_6 \times k_7, \quad (1)$$

式中: $k_1$  为氙灯的电光转换效率; $k_2$  为聚光镜的收集效率; $k_3$  为聚光镜的反射率; $k_4$  为光学积分器的孔径利用率; $k_5$  为光学积分器的场镜透过率; $k_6$  为光学积分器的投影镜透过率; $k_7$  为光学窗口镜的透过率。经计算, $Q_c = 2.67 \text{ kW}$ 。

$$q_c = \alpha \times Q_c, \quad (2)$$

式中: $q_c$  为准直镜表面吸收的太阳辐射热量; $\alpha$  为准直镜反射面对氙灯光谱辐射的吸收率。通过(2)式,可以计算得出准直镜吸收太阳辐射的热量约为 0.4 kW。

当太阳模拟器工作时,准直镜会受到太阳辐射和冷空间的低温辐射。当辐射平衡时,准直镜吸收的太阳辐射能量等于其与周围环境间的辐射换热量,即

$$q_c = Q_F + Q_B, \quad (3)$$

$$Q_F = \epsilon_c \times F_c \times \sigma \times (T_c^4 - T_b^4), \quad (4)$$

$$Q_B = \epsilon_b \times F_b \times \sigma \times (T_c^4 - T_b^4), \quad (5)$$

式中:  $Q_F$  为准直镜反射面与热沉间的辐射换热量;  $Q_B$  为准直镜背面与热沉间的辐射换热量;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 取值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_c$  为太阳模拟器工作时准直镜的平衡温度, 单位为 K;  $T_b$  为辅容器热沉(包括尾部热沉)表面的温度, 取值为 100 K;  $F_c$  为准直镜反射面的辐射面积;  $F_b$  为准直镜背面的辐射面积;  $\epsilon_c$  为准直镜反射面的发射率;  $\epsilon_b$  为准直镜背面的发射率。经计算,  $T_c = 296 \text{ K}$ , 即  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

经过以上计算可得出以下结论: 当太阳模拟器工作时, 准直镜接受太阳辐射和冷空间的低温辐射, 太阳模拟器准直镜的平衡温度为  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### 4.2 力学分析

利用 ANSYS 对处于平衡温度  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  的准直镜单元镜进行形变分析, 发现  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  环境温度条件下最大变形为  $0.038 \text{ mm}$ , 如图 9(a) 所示。与理想状态准直镜单元镜进行拟合后, 可知镜面变形的峰谷(PV)值为  $32.9 \text{ } \mu\text{m}$ , 镜面面形误差均方根(RMS)值为  $6.3 \text{ } \mu\text{m}$ , 球面曲率半径的变化量为  $-3.38 \text{ mm}$ 。利

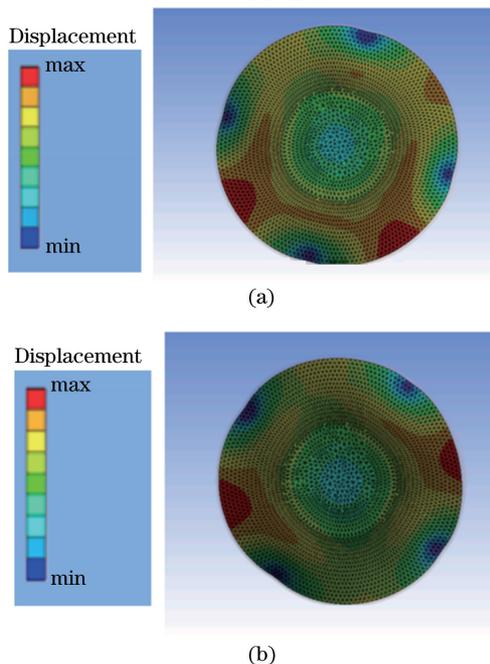


图 9 准直镜仿真分析图。(a) 准直镜单元镜;  
(b) 准直镜组件

Fig. 9 Simulation analysis diagrams of collimating mirror. (a) Unit mirror of collimating mirror;  
(b) components of collimating mirror

用 ANSYS 对处于平衡温度  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  的准直镜组件整体进行形变分析。用固定约束描述四点固定支撑框架与环状框架的 6 处连接, 用恒定向下的力约束四点固定支撑框架与杠杆钢绳机构的 14 个连接处, 准直镜和其他机械结构受恒定温度场和重力场的作用。 $23 \text{ }^\circ\text{C}$  环境温度条件下整体的最大变形为  $0.041 \text{ mm}$ , 如图 9(b) 所示。与理想状态准直镜单元镜进行拟合后, 可知镜面变形的 PV 值为  $22.6 \text{ } \mu\text{m}$ , RMS 值为  $5.2 \text{ } \mu\text{m}$ , 球面曲率半径的变化量为  $-4.4 \text{ mm}$ 。

根据以上力学仿真分析结果可知, 准直镜组件的结构设计满足要求, 即当镜面温度控制在目标温度  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  的范围内时, 准直镜组件的整体结构形变不超过  $0.1 \text{ mm}$ 。

#### 4.3 光学分析

采用 LightTools 软件进行光学分析计算, 该软件基于蒙特卡罗光线追迹方法, 对光源表面上任意点处期望数目的光线进行追迹。每束光线的能量由光源的特性决定, 这些能量随着光线到达各种类型的表面上, 然后被指定的接收器收集。通过蒙特卡罗光线追迹算法, 可以计算得到太阳模拟器在辐照参考面上的辐照度和辐照均匀性结果。

经过仿真计算, 得到的辐照面上的辐照度如图 10 所示, 此时 3 只灯均处于额定满功率工作状态下, 在辐照直径为  $1000 \text{ mm}$  的均匀辐照区域上, 辐照度达到  $3438 \text{ W}/\text{m}^2$ , 约为 2.54 个太阳常数。辐照不均匀度为  $\pm 3.75\%$ 。通过以上结果可知, 该设计满足使用需求。

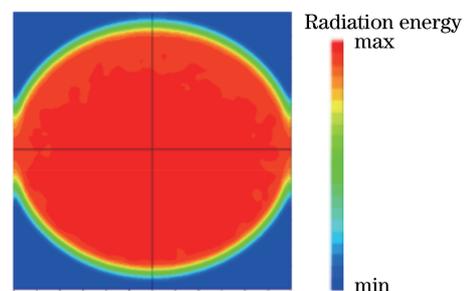


图 10 太阳模拟器辐照面不均匀性的仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of irradiation surface inhomogeneity of solar simulator

根据以上光学仿真分析结果可知, 立式太阳模拟器的辐照均匀性可以达到  $\pm 3.75\%$ 。当环境温度为  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 通过俯视多维调节机构, 可以有效平衡温度及重力作用带来的形变, 最终优于  $\pm 5\%$  的设计要求满足使用需求。

## 5 结 论

针对立式太阳模拟器结构的特殊性,设计了一种大口径俯视多维调节准直镜机构,该设计突破了传统卧式太阳模拟器拼接式结构的限制。与现有的卧式太阳模拟器准直镜机构相比,所设计的准直镜单元镜采用整镜结构,避免了结构复杂、安装调节繁琐等缺点。针对太阳模拟器的高辐照、低背景温度等环境特点,为了平衡温度不均造成的准直镜机构变形问题,设计了一种多维调节柔性吊装机构,该机构通过自身弹性变形,缓解了准直镜单元镜的形变,从而保证了立式太阳模拟器试验面的辐照度和辐照均匀性等性能。所设计的俯视多维调节准直镜机构可应用于常见的立式太阳模拟器结构中,为后续太阳辐照模拟、空间光照模拟和航天器热环境模拟等打下坚实的基础。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang R, Zhang G Y, Zhang J, et al. Uniform illumination method for large-area divergent solar simulators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 552-560.  
张燃, 张国玉, 张健, 等. 大面积发散太阳模拟器的均匀照明[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 552-560.
- [2] Xiang Y H, Zhang R, Huang B C. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(5): 288-292.  
向艳红, 张容, 黄本诚. KFTA太阳模拟器辐照均匀性仿真[J]. *航天器环境工程*, 2006, 23(5): 288-292.
- [3] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, et al. Development of solar adaptive optics [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170733.  
饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 170733.
- [4] Sun Y X, Xia Z T, Han H B, et al. Alignment of collimator and test of radiation characteristics for large solar simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0417006.  
孙永雪, 夏振涛, 韩海波, 等. 大型太阳模拟器准直镜装调及辐照特性测试[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0417006.
- [5] Song P Y. Design and simulation analysis of solar simulator with high collimation and high irradiance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.  
宋培宇. 高准直高辐照度太阳模拟器的设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] Bai G Y, Wang H, Wang Z Y, et al. Design of digital Sun sensor with panoramic field for micro-satellite [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(2): 232-236.  
白光耀, 王昊, 王志远, 等. 面向微小卫星的全视场数字太阳传感器设计[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(2): 232-236.
- [7] Lang Y Z, Yu P N, Zhong J G, et al. Spectral irradiance distribution of a typical Chinese solar simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(3): 25-29.  
郎永志, 于培诺, 仲跻功, 等. 太阳模拟器的光谱辐照度分布[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(3): 25-29.
- [8] Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Opto-mechanical structure design of collimation solar simulator with high-precision[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1229-1235.  
刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 高精度准直式太阳模拟器光机结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1229-1235.
- [9] Lv T, Zhang J X, Fu D H, et al. Research on a high collimation solar simulator[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2014, 35(6): 1029-1033.  
吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 一种高准直的太阳模拟器设计[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(6): 1029-1033.
- [10] Jia W W, Huang F, Wang Y F, et al. An optimization method for fly's eye integrator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1308-1311.
- [11] van Giel B, Meuret Y, Thienpont H. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043001.
- [12] Ren J Y, Su K Q, Wang B, et al. Development of vacuum application solar simulation Xe flash-lamp array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1699-1706.  
任建岳, 苏克强, 王兵, 等. 真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1699-1706.
- [13] Chen W Z, Jiang L L, Jiang L, et al. Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002.  
陈文志, 蒋绿林, 姜黎, 等. 太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222002.
- [14] An G F, Zhang G Y, Su S, et al. Optical design of solar simulator for weather sonde experiment [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(9): 1408-1412.  
安桂芳, 张国玉, 苏拾, 等. 气象探空仪试验用太阳模拟器光学系统设计[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(9): 1408-1412.