

## 摆镜面形在温度梯度场中的动态响应特性

张家齐 夏茂斌 郭艺博 郭旭

### Dynamic response characteristics of mirror-shaped structures in temperature gradient fields

ZHANG Jia-qi, XIA Mao-bin, GUO Yi-bo, GUO Xu

#### 引用本文:

张家齐, 夏茂斌, 郭艺博, 郭旭. 摆镜面形在温度梯度场中的动态响应特性[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 325–336. doi: 10.37188/CO.2025–0111

ZHANG Jia-qi, XIA Mao-bin, GUO Yi-bo, GUO Xu. Dynamic response characteristics of mirror-shaped structures in temperature gradient fields[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 325–336. doi: 10.37188/CO.2025–0111

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0111>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 柔顺型光纤光栅水听器阵列理论与实验研究

Theoretical and experimental research on flexible fiber grating hydrophone array

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 366 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0079>

#### 静态干涉型高温温度场成像探测方法研究

Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(4): 796 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0168>

#### 模式能量梯度上升的光束入腔指向方法

Cavity alignment method based on mode energy gradient ascent

*中国光学 (中英文)*. 2025, 18(3): 682 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0053>

#### 基于机器视觉的正碰假人胸部的研究

Design and simulation of the dummy thoracic finite element model based on machine vision

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(3): 673 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0005>

#### 基于贝叶斯神经网络的相位梯度计算方法

Phase gradient estimation using Bayesian neural network

*中国光学 (中英文)*. 2024, 17(4): 842 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0168>

#### 激光内通道热晕效应的快速模拟与相位畸变评估

Rapid simulation and phase distortion evaluation of thermal blooming effect in internal laser propagation channels

*中国光学 (中英文)*. 2025, 18(3): 520 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0022>

文章编号 2097-1842(2026)02-0325-12

## 摆镜面形在温度梯度场中的动态响应特性

张家齐<sup>1,2\*</sup>, 夏茂斌<sup>1,2</sup>, 郭艺博<sup>3</sup>, 郭旭<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 上海国科航星量子科技有限公司, 上海 200000)

**摘要:** 飞机起飞到抵达巡航高度的过程中, 外界环境温度会发生剧烈变化, 由于内部摆镜转台在步进扫描工作模式下周期性快速启停, 驱动电机和轴承会持续产生热量, 导致转台整体形成温度梯度, 进而对摆镜面形产生影响, 最终影响整个光学系统的成像质量。针对这一问题, 本文建立了摆镜转台热平衡方程, 并结合实际热边界条件, 构建热固耦合有限元分析模型。利用该模型, 可以优化摆镜转台和粘接层的设计。本文通过分析摆镜在复杂温度环境变化及步进扫描工况下的面形变化规律和胶层参数的关系, 得到胶层厚度为 1 mm 时, 摆镜面形最优精度 RMS 为 43.54 nm。在地面温箱中模拟起飞时温度变化和工作状态, 检测摆镜面形。检测结果与分析方法所得仿真结果相比, 误差小于 10%, 验证了该方法可用于评估摆镜面形在温度梯度场中的动态响应特性, 有利于摆镜粘接层和相关部件的设计。

**关键词:** 步进扫描; 温度梯度; 热固耦合; 有限元模拟

中图分类号: V248.1; TH703

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0111

CSTR: 32171.14.CO.2025-0111

## Dynamic response characteristics of mirror-shaped structures in temperature gradient fields

ZHANG Jia-qi<sup>1,2\*</sup>, XIA Mao-bin<sup>1,2</sup>, GUO Yi-bo<sup>3</sup>, GUO Xu<sup>1</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Shanghai Guoke Hangxing Quantum Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

\* Corresponding author, E-mail: zjq\_cust@foxmail.com

**Abstract:** During the ascent of an aircraft to its cruising altitude, the external environmental temperature changes drastically. Simultaneously, the internal stepper motors and bearings continuously generate heat due to the periodic rapid start-stop operations of the scanning mirror turntable in the step-scanning mode. These factors cause a temperature gradient across the turntable, which induces thermal deformation of the mirror surface figure and ultimately degrades the imaging quality of the optical system. To address this issue, an

收稿日期: 2025-08-25; 修订日期: 2025-10-29

基金项目: 移动信息网络国家科技重大专项(No. 2025ZD1302900)

Supported by The Mobile Information Networks-national Science and Technology Major Project (No. 2025ZD1302900)

analysis method based on thermal-structural coupling is proposed. First, the thermal balance equation of the scanning mirror turntable was established. Combined with the actual thermal boundary conditions, a finite element analysis (FEA) model was constructed. This model was utilized to optimize the design of the mirror assembly and the adhesive layer by analyzing the relationship between the surface figure and adhesive parameters under complex thermal environments and working conditions. The optimization results show that when the adhesive layer thickness is 1 mm, the mirror achieves the optimal surface figure accuracy with a root-mean-square (RMS) value of 43.54 nm. Furthermore, ground thermal chamber tests were conducted to simulate the temperature variations and operating status during takeoff. The relative error between the experimental measurements and the simulation results is less than 10%. These results verify that the proposed method is effective for evaluating the dynamic response characteristics of the scanning mirror surface in a temperature gradient field, providing theoretical support for the design of the mirror bonding layer and related components.

**Key words:** step scanning; temperature gradient; thermal-structural coupling; finite element simulation

## 1 引言

随着第四代战斗机的快速发展,步进扫描型红外搜跟系统得到了广泛应用,同时也对IRST(红外搜索与跟踪系统,简称IRST)的性能提出了更苛刻的要求<sup>[1]</sup>。该系统通常采用一种转台带动摆镜,摆镜将目标图像折转到成像系统的结构形式,从而实现远距离目标探测。从飞机起飞到抵达巡航高度的过程中,外界温度由于飞行高度的急剧升高而迅速降低,内部转台在运行过程中会驱动电机运转、轴承摩擦持续发热,导致转台自身温度场分布不均匀,使得摆镜转台产生温度梯度,摆镜转台受热变形的同时也将热量传递到摆镜上,影响摆镜面形,进一步降低整个光学系统的成像质量<sup>[2-4]</sup>。

近年来,国内许多研究人员针对温度对摆镜面形的影响开展了多方面研究,并取得了一定成果。杨勋<sup>[5]</sup>等通过研究不同温度梯度载荷下反射镜的热变形,分析了温度场对镜面面形精度的影响。王丹艺等<sup>[6]</sup>研究了吊挂式金属摆镜在立式光照模拟设备中结构特性对系统整体面形的影响。吴清文等<sup>[7]</sup>研究了在稳定径向温度场作用下,不同材料对摆镜面形的影响规律。王富国等<sup>[8]</sup>研究了反射镜在被动支撑和自由膨胀时不同温度梯度对反射镜面形的影响。谷果果等<sup>[9]</sup>研究了空间温变场对不同结构平面反射镜的性能影响。然而,

上述研究多以特定结构形式、环境分布或材料为研究对象,热源普遍设定为环境温度场,较少考虑电机工作发热、轴承摩擦生热以及热传导等对摆镜面形的影响。同时考虑环境温度、电机发热、轴承生热和热传导效应的研究相对较少。

针对此类问题,本文提出了一种对应的分析方法,先建立摆镜转台热平衡方程,再结合实际热边界条件,构建起热固耦合有限元分析模型。把环境温度、内部产热、内部及外部对流换热等复杂热传导机制考虑在内,以此分析结构在多因素热源共同作用下的热变形情况,同时对摆镜在复杂环境变化和工作状态下的面形变化规律展开评估,优化粘接层设计。本文以粘接层厚度为例进行分析,借助地面测试来验证步进扫描模式下温度梯度引起的面形变化<sup>[10-12]</sup>。该分析方法能够比较准确地模拟实际工况下温度梯度对摆镜面形的影响,有助于摆镜粘接层和相关部件的设计,为系统在复杂热环境中的稳定运行给予技术支持。

## 2 结构组成及胶层计算

摆镜是机载摆镜转台的核心部分,也是整个光学系统的关键部件。它的动态刚度以及镜面面形精度会直接影响系统成像质量、跟踪稳定性和精密指向能力。为使摆镜达到高精度面形要求,摆镜主体选用比刚度高、热稳定性优异的碳化硅(SiC)材料,并且将尺寸设定为 275 mm×168 mm。

支撑结构采用线胀系数和 SiC 相近的殷钢材料, 以此来提供高动态刚度, 同时避免因热胀冷缩不一致而产生的结构变形。转台主体部分, 选用了密度较低、比刚度高且加工性能较好的 40% 铝基碳化硅(40%ALSiC)材料, 其材料参数见表 1。

表 1 摆镜转台主要材料参数

Tab. 1 Main material parameters of the scanning mirror turntable

部件	Material	Density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Young's modulus $E/(\text{Gpa})$	CTE $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	Thermal conductivity $\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})]$
摆镜	SiC	3.2	450	2.3	155
背板	4J32	8.1	150	2.4	145
结构件	ALSiC (40%)	2.89	135	11	130

在粘结方面, 结合先前对于宽温条件下摆镜组件与粘接层设计的研究, 主体采用热隔离性能优良的硅橡胶粘接摆镜锥孔与背板, 同时在摆镜锥孔环状端面与背板间增加局部环氧胶进行辅助加固, 以增强整体抗振性能和粘接可靠性<sup>[13-14]</sup>。

在摆镜转台中胶层厚度主要影响热膨胀造成的剪切变形与应力。摆镜和背板间由于材料不同, 热膨胀系数存在差值, 由于热胀冷缩变化不一致, 会引起相对位移:

$$\Delta L = L\Delta\alpha\Delta T \quad (1)$$

式中:  $\Delta L$ 为胶层界面的相对拉伸差;  $L$ 为热膨胀方向的有效粘接长度;  $\Delta\alpha$ 为摆镜和背板的热膨胀系数差;  $\Delta T$ 为摆镜和背板间的温差, 取最大值。

根据相对位移求得剪切力:

$$\tau = G\gamma = G\frac{\Delta T}{t} \quad (2)$$

式中:  $\tau$ 为剪切应力;  $G$ 为胶层材料的剪切模量, 材料为 D04 硅橡胶;  $\gamma$ 为剪切应变;  $t$ 为胶层厚度。

反推得到所需要的胶层最小厚度:

$$t_{\min} = \frac{GL\Delta\alpha\Delta T}{\tau_{\text{allow}}} \quad (3)$$

式中:  $t_{\min}$ 为保证胶层剪切压力不超过 $\tau_{\text{allow}}$ 时的最小厚度,  $\tau_{\text{allow}}$ 为允许剪应力。经计算可得最小厚度 $t_{\min}=0.29 \text{ mm}$ 。

根据工程经验和制造公差, 薄胶层(厚度小于 0.5 mm)难以均匀涂布, 易产生气泡、局部偏薄, 同时硅胶长期受载会缓慢变形, 厚度越大越能分散应力。为了装配可控性和长期稳定性, 选用 1 mm胶层, 同时分析 0.5 mm、1.5 mm胶层厚度对摆镜面形的影响。

下文通过对摆镜转台的整体分析, 进一步研究转台温度梯度对摆镜面形的影响, 同时对胶层厚度进行仿真验证。摆镜粘接层结构示意如图 1(彩图见期刊电子版)所示, 整机结构如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

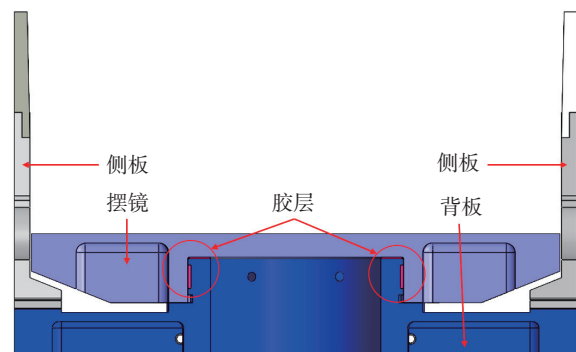


图 1 摆镜粘接层结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the bonding layer structure for the scanning mirror

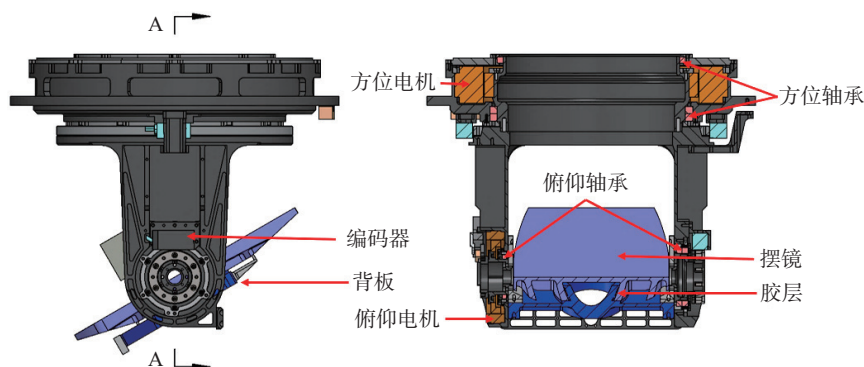


图 2 摆镜转台结构组成

Fig. 2 Components of the scanning mirror turntable

### 3 热分析原理及建模

本文研究的摆镜转台组件安装于机载光电吊舱的密闭光窗舱段内。根据机载光电设备的通用环境适应性设计要求,舱体结构采用充氮密封及压力平衡设计,通过压力调节装置或刚性密封结构,舱内气压波动范围通常控制在设计基准值的 $\pm 2\%$ 以内。

根据气体热物理性质,在上述微小的压力波动范围内,气体的密度、动力粘度及导热系数等关键热物性参数的变化量级极小,其对流场形态及对流换热系数的影响在工程计算中可忽略不计。因此,为了简化模型并聚焦主要矛盾,本文在分析中假设舱内气压恒定,主要考察环境温度变化及内部热源对摆镜面形的影响。

#### 3.1 构建转台的热平衡方程

在热力学系统中,物体的热量收支过程遵循能量守恒定律。物体单位时间内从环境吸收的热量与它内部产生的热量之和,等于它向环境释放的热量与它本身内能的变化量之和,将转台视为一个整体,具体为:

$$Q_{in} + Q_{gen} = Q_{out} + \Delta U \quad (4)$$

式中:  $Q_{in}$  为转台从温度场中吸收的热量;  $Q_{gen}$  为转台内部产生的热量;  $Q_{out}$  为转台向外界释放的热量;  $\Delta U$  为转台内能的时间变化率。

随着飞行高度的增加,大气温度逐渐降低,由于摆镜转台处于密闭环境中,内部恒压,外界大气压对内部温度场影响小,同时为了方便计算,忽略温度在光窗内外传递的时间,则有

$$Q_{in} + Q_{gen} - Q_{out} = \frac{dU}{dt} = mc \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

式中:  $\frac{dU}{dt}$  为转台内能对时间的变化率;  $m$  为转台的质量;  $c$  为转台的比热容;  $\frac{dT}{dt}$  为温度对时间的变化率。

待飞机到达巡航高度后,外界温度基本保持不变,转台趋于稳定。 $\Delta U = 0$ , 即进入系统的热量等于流出的热量:

$$Q_{in} + Q_{gen} = Q_{out} \quad (6)$$

根据热力学第二定律,热量只会自发地从高

温物体传向低温物体。摆镜转台安装在机载平台上,直接与平台相连,会发生热传导现象。随着飞行高度的增加,外界温度和舱内温度迅速降低,舱内产生对流换热,并且转台向舱内发出热辐射。具体如式 (7) 与公式 (8):

$$Q_{conv} = \sum_{i=1}^n h_i A_i (T_{surface} - T_{in}) \quad (7)$$

式中:  $Q_{conv}$  为转台各个部件通过对流换热产生的热量传递;  $h_i$  为各个部件的对流换热系数;  $A_i$  为转台各个部件的换热表面积;  $T_{surface}$  为转台表面温度;  $T_{in}$  为舱内环境温度。

$$Q_{rad} = \sum_{i=1}^n \sigma \varepsilon_i A_i (T_{1i}^4 - T_2^4) \quad (8)$$

式中:  $Q_{rad}$  为转台各部件通过热辐射传递或接收的热量;  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数;  $\varepsilon_i$  为转台各个部件的表面发射率;  $T_{1i}$  为转台各个部件的表面温度;  $T_2$  为舱内的等效辐射温度。总结出物体从环境吸收的热量计算公式 (9) 与物体向外界释放的热量计算公式 (10):

$$Q_{in} = Q_{ABT} \quad (9)$$

式中:  $Q_{ABT}$  为机载平台输入转台的总热量。

$$Q_{out} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (10)$$

方位电机额定功率大、发热量较小,此外,由于布局合理,沿方位轴呈中心对称,故温度梯度均匀。编码器组件功率低,同时采用无接触式结构,发热量极低,可以忽略。俯仰电机由于体积限制,储备力矩较少,多数时间为满功率工作,发热量较大。轴承由于滚动摩擦也会产生少量热量。整理得到转台内部产生热量的公式:

$$Q_{gen} = Q_{AZB} + Q_{ELB} + Q_{AZM} + Q_{ELM} \quad (11)$$

式中:  $Q_{AZB}$  为方位轴承摩擦产生的热量;  $Q_{ELB}$  为俯仰轴承摩擦产生的热量;  $Q_{AZM}$  为方位电机总发热量;  $Q_{ELM}$  为俯仰电机总发热量。

整理得到转台的热量守恒公式:

$$Q_{ABT} + Q_{AZB} + Q_{ELB} + Q_{AZM} + Q_{ELM} - Q_{conv} - Q_{rad} = \Delta U \quad (12)$$

通过热平衡方程可有效界定转台结构在不同运行环境中的热工况,进而为热设计提供依据。

### 3.2 热边界条件

大气温度的变化与高度有关,随着时间的推移,高度迅速升高,根据国际标准大气(ISA)模型建立温度时间的关系方程:

$$T_{\text{env}}(t) = T_0 - L \cdot h(t) \quad , \quad (13)$$

式中:  $T_{\text{env}}(t)$ 为 $t$ 时刻(高度 $h$ )的温度;  $T_0$ 为海平面温度;  $L$ 为温度递减率。

假设飞机的爬升过程是均匀的,得到飞行高度与时间的方程:

$$h(t) = \begin{cases} vt, & h(t) < h_{\text{max}} \\ h_{\text{max}}, & h(t) \geq h_{\text{max}} \end{cases} \quad , \quad (14)$$

式中:  $v$ 为爬升速度;  $h_{\text{max}}$ 为最大爬升高度。

无温控的舱体内部温度可以采用一阶热传导模型(Newton 冷却公式)进行计算:

$$\frac{dT_{\text{in}}(t)}{dt} = -\frac{[T_{\text{in}}(t) - T_{\text{env}}(t)]}{\tau_c} \quad , \quad (15)$$

式中:  $T_{\text{in}}(t)$ 为舱内温度;  $\tau_c$ 为舱体热惯常数(时间常数),用于表征舱体温度响应的快慢;  $T_{\text{env}}(t)$ 为环境温度。

对微分方程进行数值积分求解,同时由于  $T_{\text{env}}(t)$ 变化不太剧烈。将模型简化为线性滞后模型:

$$T_{\text{in}}(t) = T_0 - Lh(t) + \frac{h(t)}{\alpha}(1 - e^{-t/\tau_c}) \quad . \quad (16)$$

在 MATLAB 中将方程拟合成温度时间曲线,如图 3 所示。

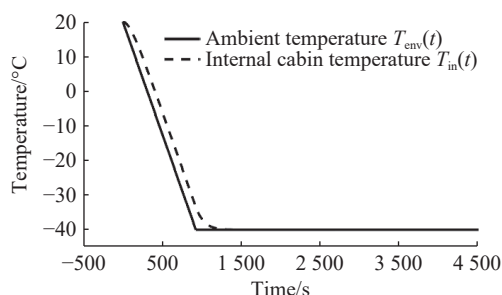


图3 舱内及环境温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Cabin and ambient temperatures varying with time

金属具有较强的导热性,使得舱内温度会较快地朝外界温度靠近,在飞机爬升阶段,外界温度的变化较大,使得舱内温度急剧降低,而玻璃光窗可减缓这一过程,在低温环境下,玻璃的保温效果更好,舱内温度会在环境温度的作用下逐渐降低

并趋向一致,不过由于金属和玻璃复合材料的传导以及辐射特性,温度的变化呈现出滞后的特点。

在转台的热平衡分析中,电机是内部热量产生的主要部件。电机发热主要是因为能量转换过程中会产生损耗,部分能量以热能的形式损失掉。在步进扫描模式下,电机反复启停且功率较大,能量损耗严重。为了确保计算的准确性,以设计最大加速度产生的摆动频率下的步进扫描模式进行分析。

摆镜转台在进行扫描时,按照步进模式进行,方位步进的角度为 $2.16^\circ$ 。扫描角度是 $60^\circ$ 。一个完整的扫描周期由四部分构成:首先,方位轴在 $2.825\text{ s}$ 内完成 $60^\circ$ 视场方位扫描,然后俯仰轴在 $0.175\text{ s}$ 内向下扫描一个俯仰视场( $1.8^\circ$ );再然后方位轴在 $2.825\text{ s}$ 内完成 $60^\circ$ 视场的回扫;最后,俯仰轴在 $0.175\text{ s}$ 内向上扫描一个俯仰视场( $1.8^\circ$ ),使摆镜回到扫描起点,开始下一个扫描过程。

经计算,转台方位轴速度需要大于 $124^\circ/\text{s}$ ,加速度需大于 $9\ 927^\circ/\text{s}^2$ ,才能在 $106\text{ ms}$ 内,完成 $2.16^\circ$ 步进过程。转台俯仰轴速度大于 $25^\circ/\text{s}$ ,加速度大于 $500^\circ/\text{s}^2$ ,才能在 $175\text{ ms}$ 内,完成 $0.9^\circ$ 步进过程。在此过程中,方位电机和俯仰电机的发热功率分别约为 $8\text{ W}$ 和 $24\text{ W}$ 。电机产生的热量传导到转台内的各个零部件,同时向环境发出热辐射,由于电机呈不对称布局,使俯仰轴系处于不均匀的温度场中,使转台产生温度梯度。

根据转台的热平衡方程可知,内部热源的发热对整机温度场的分布影响较大。轴承在转动的时候,由于滚珠与滚道之间的摩擦,会产生少量热量,并通过轴系结构逐步传导至转台,也会使转台产生温度梯度。为简化分析,仅对轴承进行实体建模,忽略内部的热量传递过程,只分析轴承由于摩擦而产生热量,同时又通过内外圈传导至周围结构<sup>[15]</sup>这一过程。轴承发热功率通常来源于摩擦损耗,可通过公式(17)估算:

$$P_f = M_f \cdot \omega \quad , \quad (17)$$

式中:  $P_f$ 为轴承发热功率;  $M_f$ 为轴承的摩擦力矩;  $\omega$ 为轴承的旋转速度,其可以由转速 $n$ 换算得到:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad . \quad (18)$$

由式(17)~式(18)可以看出,轴承的发热功

率主要取决于轴承的摩擦力矩和轴承转速<sup>[6]</sup>。由于轴系均为往复式旋转,转动角度有限,在最大跟踪速度下,方位俯仰轴的等效转速分别为 40 r/min 和 20 r/min。由此可得到方位俯仰轴系单个轴承的发热功率分别为 0.21 W 和 0.81 W。

### 3.3 构建热固耦合分析模型

根据热弹性力学理论,建立数学模型,分析在温度场下,物体的应力和应变。对于转台零部件,在仅考虑力学条件时,应力-应变关系由广义胡克

定律描述,用张量形式表达材料的弹性性质,描述应力张量 $\sigma_{ij}$ 与应变张量 $\varepsilon_{kl}$ 之间的线性关系:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (19)$$

式中: $\sigma_{ij}$ 为应力张量分量; $\varepsilon_{kl}$ 为应变张量分量; $C_{ijkl}$ 为弹性刚度分量。

对于线性弹性各向同性材料,刚度矩阵由杨氏模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 表示:

$$C = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

整理得:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

在建立热固耦合分析模型时,需要引入温度场。假设某点的温度变化为 $\Delta T$ ,材料的线胀系数

为 $\alpha$ ,无约束时自由热应变为 $\alpha\Delta T$ 。修正后的胡克定律为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \alpha\Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha\Delta T \\ \varepsilon_z - \alpha\Delta T \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

联立方程 (21) 和 (22),可解出应力与应变的

关系方程:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \left[ (1-\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu} \\ \sigma_y = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \left[ (1-\mu) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu} \\ \sigma_z = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \left[ (1-\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right] - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu} \end{cases}, \quad (23)$$

将上述热应力表达式代入力平衡微分方程:

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0 \quad (24)$$

将热应力问题转化为经典弹性力学问题, 通过数值方法(如有限元法)求解位移场后, 即可通过本构方程计算应变和应力分布, 最终评估摆镜的面形精度。

由于结构热应力导致的应力应变受结构形状、材料非线性及边界条件等因素的影响较大, 基于公式仅能提供近似估算, 且计算量大。为获得更准确的应力与变形分布, 将在下一章节中利用 ANSYS 软件对结构进行详细的有限元分析。

## 4 热固耦合分析

### 4.1 热分析过程

根据热分析原理和模型, 结合实际热边界条件, 确定  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  为温度场分析的最大边界条件, 这是转台设计中温差最大的工作环境。将温度边界条件导入有限元软件中, 并对各个部件的热边界条件进行设置。通过分析摆镜转台整体、摆镜基体及镜面在不同时间节点下的温度变化, 可以对不同结构的温度响应情况进行深入探讨。

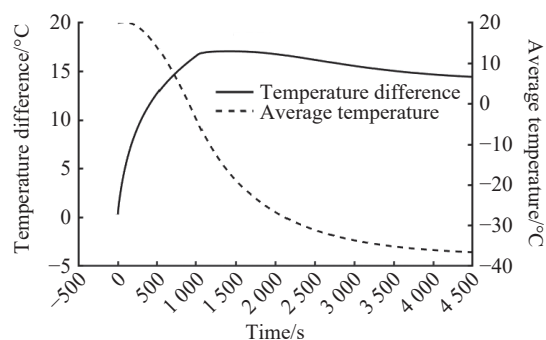
为了确保仿真条件的准确性, 各个零部件之间采用胶结和螺钉连接的方式同时使用梁单元模拟螺钉连接, 胶层厚度选取  $1\text{ mm}$ 。

建立有限元模型并采用 ANSYS 软件中的隐式时间积分算法进行求解, 利用牛顿-拉弗森迭代法并结合自适应时间步长控制技术, 可有效应对非线性材料属性以及边界条件的变化, 还可以保证计算过程的数值稳定性, 提高复杂热传导问题的求解精度与求解效率。

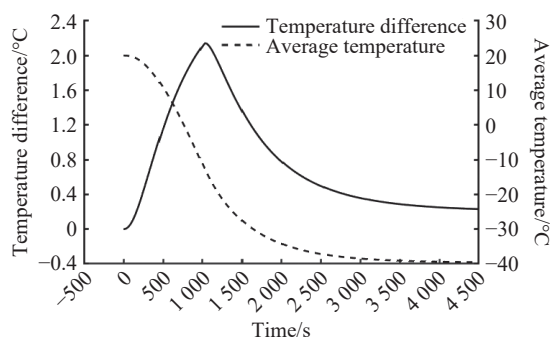
导出仿真结果, 以便进一步进行分析。导出不同时间下各个节点的最高温度、最低温度以及平均温度等关键指标, 计算得出温差等数据, 对数据开展曲线拟合, 以更好地描绘温度变化趋势。明确摆镜转台温度变化的关键节点, 有利于优化系统设计并提高其热稳定性。

飞机爬升过程中, 转台的温度变化较为剧烈, 随着时间的推移, 高度不在增加, 进入巡航状态,

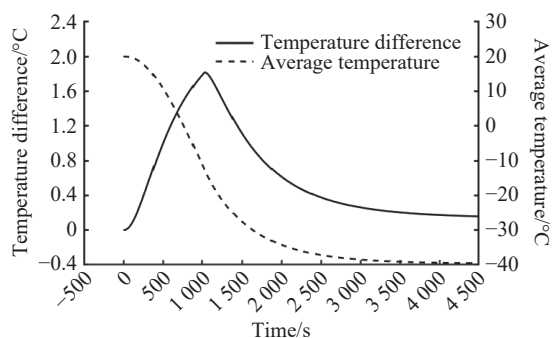
之后温度变化会逐渐稳定, 最终趋于平缓。在整个过程中, 转台内部温度变化与外部温度并没有完全同步, 特别是在电机、轴承等发热源作用下, 摆镜转台会产生较大的温度场。为了清晰地显示出初始瞬态阶段的温度动态, 精确地观察温度达到平衡状态前的变化过程, 对 1 小时内的曲线进行了放大, 如图 4 所示。



(a) 转台平均温度及温差变化曲线  
(a) Variations of average temperature and temperature difference of the turntable



(b) 摆镜基体平均温度及温差变化曲线  
(b) Variations of average temperature and temperature difference of the mirror body



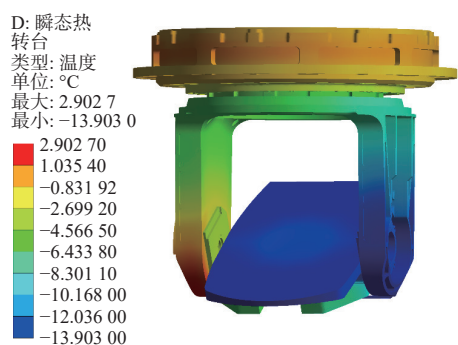
(c) 镜面平均温度及温差变化曲线  
(c) Variations of average temperature and temperature difference of the mirror surface

图 4 结构在 1 h 内的温度变化曲线

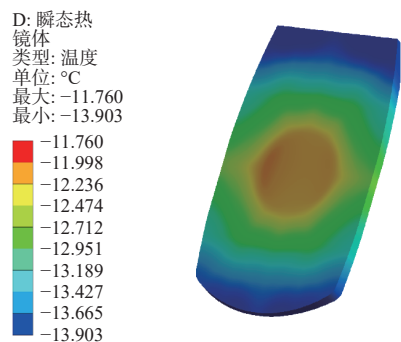
Fig. 4 Temperature variations of the structure within 1 h

随着时间的推移, 温差呈现出先增大, 后降低, 最后趋于稳定的状态。由于转台内部布局的不对称性, 在到达稳态时, 依旧存在一定的温差。

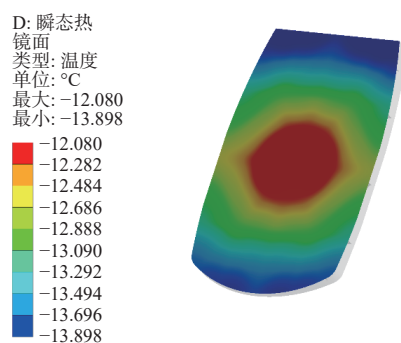
平均温度在初期略有上升,随后逐渐降低,最后趋于稳定,但因为内部热源的持续发热与转台散热过程同时进行,稳定后的温度会略高于外界环境温度。对镜面温差最大时的结构温度场进行单独提取,如图 5(彩图见期刊电子版)所示。



(a) 转台温度场  
(a) Temperature field of the turntable



(b) 镜体温度场  
(b) Temperature field of the mirror body



(c) 镜面温度场  
(c) Temperature field of the mirror surface

图 5 镜面温差最大时刻的结构温度场

Fig. 5 Temperature field of the structure at the maximum mirror surface temperature difference

结合分析数据和温度场云图,在 1037 s 时,镜体温差达到最大值 2.14 °C,镜面温差达到最大值 1.82 °C;工作 3 h 后,镜面最大温差降至 0.14 °C,但转台整机仍存在 13.99 °C 的温差。

#### 4.2 热固耦合及静态结构分析

通过上述对摆镜转台的热分析,得到转台任

一时刻的温度场分布。基于顺序耦合分析方法,导入温度场和重力场,获得在温度场和重力场共同作用下摆镜转台的总变形。接着进行静态结构分析;也可对瞬态分析进行提取,得到某一时刻的静态变形。

飞机起飞后开始上升。需注意,实际起飞过程中重力加速度可能会超过或小于 1G,但为突出温度变化对系统性能的影响,转台在起飞初期不工作,简化假设上升阶段为匀速上升,忽略超重与失重效应。重力场按标准重力设置。

以 1037 s 时为例,此时镜体温差达到最大值 2.14 °C,镜面温差达到最大值 1.82 °C,同时由图 3 得,此时舱内温度大致为 -40 °C,飞机处于巡航状态。导入温度场,同时叠加标准重力场,进行静态结构分析。得到位移云图,如图 6(彩图见期刊电子版)所示。从云图可得,转台的固定约束区域变形基本为零,重力场造成的变形较为明显;摆镜转台由于温度场变形而在远端呈现出非对称状态;摆镜表面的变形大致处在同一个量级,摆镜的变形主要是由转台刚体位移导致的,摆镜自身表面畸变较小,对摆镜的面形精度的影响有限。

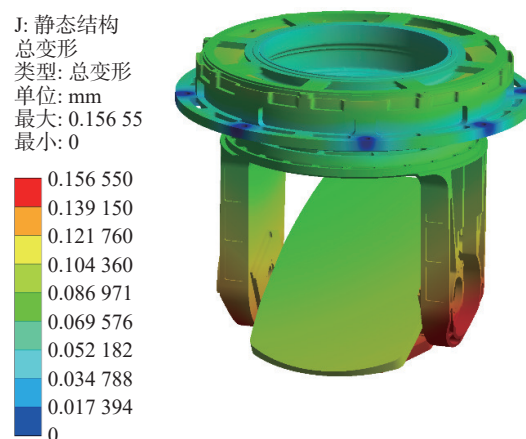


图 6 热固耦合下的结构位移云图

Fig. 6 Structural displacement contours under thermal-structural coupling

提取节点数据,主要是摆镜表面的节点位移,同时叠加摆镜加工导致的原始误差( $\lambda/40$ ),通过 MATLAB 对数据进行处理,使用 Zernike 多项式对摆镜的面形进行拟合。使用软件可以查看拟合出的摆镜表面波像差,如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

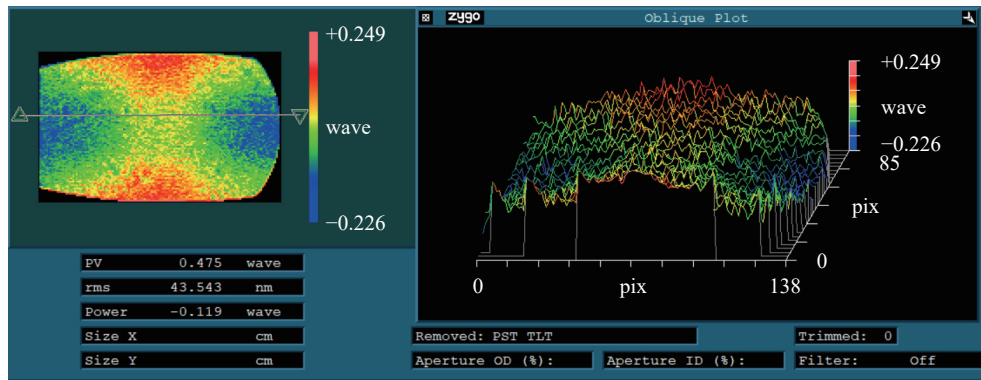


图 7 1037 s 时重力场叠加温度场下的镜面面形图

Fig. 7 Mirror surface figure at 1037 s under combined gravity and thermal fields

### 4.3 对比分析

考虑装配可控性和长期使用稳定性, 选用 1 mm 胶层, 但为了确定胶层厚度的合理性, 对 0.5 mm~1.5 mm 胶层厚度进行分析验证。

改变胶层的厚度, 从 0.5 mm 到 1.5 mm, 每隔 0.1 mm 作为一个分析数据, 进行多次重复分析。经对比发现, 镜面温差的变化趋势并没有发生改变。不论胶层厚度如何变化, 随着时间的推移, 镜面温差均呈现出先增大, 后降低, 最后趋于稳定的状态。

摆镜镜面温差最大时刻均出现在 1037 s 附近, 由此可知, 摆镜镜面温差受胶层厚度的影响较小。为了方便观察, 选取最大、最小和中间厚度的数据点拟合出镜面温差的变化曲线, 如图 8 所示。

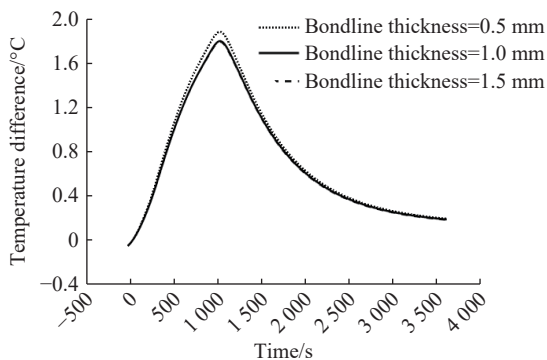


图 8 摆镜镜面温差随时间的变化曲线

Fig. 8 Temperature difference of scanning mirror surface varying with time

由于低导热系数胶层厚度发生改变, 使得达到稳态时镜面的温差发生略微变化, 为了展示摆镜镜面温差随胶层厚度的变化情况, 对 1037 s 时

刻不同胶层厚度摆镜镜面温差进行绘图, 如图 9 所示。可见, 随着胶层厚度增加, 镜面温差会变小, 但下降趋势会呈现先急后缓的特点, 整体能够保证摆镜镜面温度一致性。

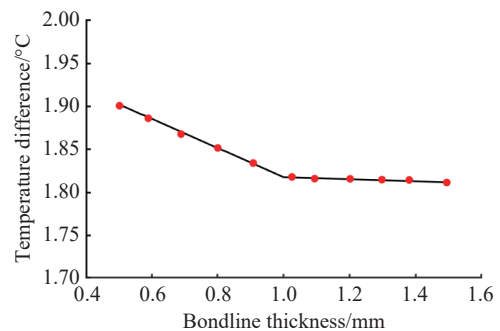


图 9 摆镜镜面温差随胶层厚度的变化曲线

Fig. 9 Temperature difference of scanning mirror surface varying with adhesive layer thickness

将转台所处的温度场数据导入到静态分析所需的温度场边界条件, 通过对比不同胶层厚度下的单重力和重力叠加最大镜面温差时温度场下的摆镜面形曲线, 见图 10(彩图见期刊电子版)。可见, 随着胶层厚度的增加, 在单重力作用下摆镜面形 RMS 值略有升高。这是由于胶层过厚会降低支撑刚度, 导致结构变形增大; 而在重力叠加温度场工况下, RMS 值随厚度增大明显减小, 这说明温度场影响较大, 较厚的胶层能够有效缓冲材料间的热膨胀应力, 减小温度导致的面形畸变。综合考虑两类工况, 可以发现当胶层厚度为 1 mm 时, 单重力引起的形变增量较小, 同时温度场叠加后的 RMS 值明显降低, 综合性能较高。同时结合加工及装调工艺的可实现性, 最终确定胶层厚度取 1 mm 较为合理。

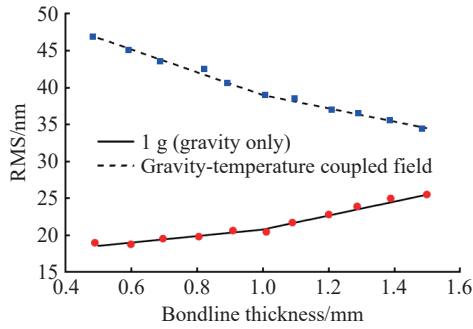


图 10 不同工况下的摆镜面形

Fig. 10 Scanning mirror surface figure under different working conditions

改变边界条件,分析不同工况下,摆镜表面节点位移,拟合出不同工况下摆镜的面形 RMS 值。经 4.2 分析得到,在 1037 s 时,摆镜温度梯度最大,此时镜面面形 RMS 值为 43.54 nm。到 3 h 时,随着时间的推移,摆镜温度趋于稳定,摆镜面形精度 RMS 值降至 39.59 nm。对常温状态下摆镜的面形精度进行分析,其 RMS 值为 20.77 nm。模拟地面工作 3 小时后,分析得到面形精度 RMS 值为 33.80 nm。均低于光学系统对摆镜面形精度 ( $RMS \leq \lambda/10$ ) 的要求,具体见表 2。

表 2 不同工况下的摆镜面形

Tab. 2 Scanning mirror surface figure under different operating conditions

时间	模拟飞行 1037 s	模拟飞行 3 h	常温 0 s	常温 3 h
RMS/nm	43.54	39.59	20.77	33.80

## 5 地面检测

对常温步进扫描模式下的面形精度 RMS 值进行检测。同时,在地面温箱中模拟起飞时的温度变化和工作状态,检测摆镜面形精度 RMS 值。

如图 11(彩图见期刊电子版)所示,使用大口径干涉仪对摆镜面形进行检测,常温下的面形检测 RMS 值为 22.54 nm。将转台放入密闭环境中,启动摆镜转台,进行步进扫描,3 h 后,对反射面形进行检测,面形检测 RMS 值为 32.08 nm。干涉仪测得的摆镜面形误差伪彩色图如图 12(彩图见期刊电子版)所示。

将摆镜放入温箱中,模拟起飞时的温度变化和工作状态,在 1037 s 左右对摆镜面形精度 RMS

值进行检测,面形检测 RMS 值约为 45.98 nm。待充分冷却后,再度模拟温度变化和工作状态,在约 3 h 时对摆镜面形精度 RMS 值进行检测,面形检测 RMS 值约为 41.52 nm。结果与热力耦合分析结果接近,各项数值的差值均小于 10%。证明了所采用的分析方法能够较为准确地模拟出实际工况下温度梯度对摆镜面形的影响。

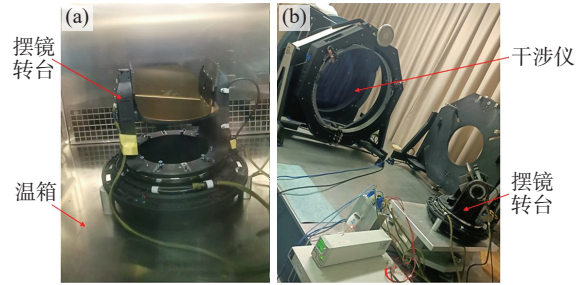
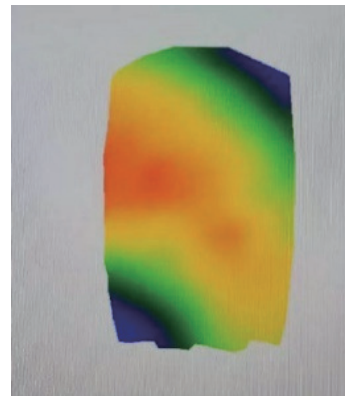


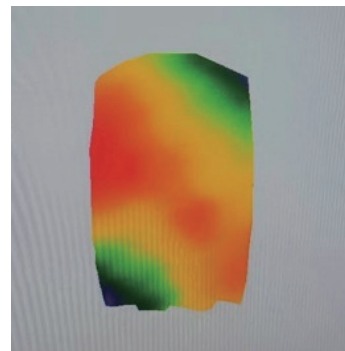
图 11 摆镜面形地面模拟与干涉检测试验平台。(a) 温箱环境模拟;(b) 面形检测

Fig. 11 Ground simulation and interferometric testing platform for scanning mirror surface figure. (a) Thermal chamber simulation; (b) surface figure measurement



(a) 常温面形检测结果

(a) Surface figure test results at room temperature



(b) 3 h 步进扫描后面形检测结果

(b) Surface figure test results after 3 h of step scanning

图 12 干涉仪检测结果

Fig. 12 Interferometer test results

## 6 结 论

由于摆镜转台的热边界条件比较复杂,转台内部存在多个热源,热量在不同结构之间传递,形成复杂的传热现象,内外传热辐射情况复杂,摆镜转台存在温度梯度,从而影响摆镜的面形精度。本文在模拟实际飞行工况的基础上,建立了摆镜转台热平衡方程,并结合热边界条件,构建了摆镜转台热固耦合分析模型。该模型用于评估摆镜在复杂温度梯度变化下面形精度的变化规律,通过

对比分析,最终确认了硅橡胶胶层厚度为1 mm。分析得到在1 G重力及最差温度场条件下,摆镜的面形精度RMS值为43.54 nm,低于光学系统对摆镜面形精度( $RMS \leq \lambda/10$ )的要求。

通过地面试验,对比了仿真分析得到的各工况下面形精度的RMS值和地面模拟飞行实验的面形精度的RMS值,两者差值小于10%。验证了所提出的分析方法能够较为准确地模拟实际工况条件下温度梯度对摆镜面形的影响,得到摆镜面形在温度梯度场中的动态响应特性。

### 参考文献:

- [1] QU R, ZHANG H W, YANG L, *et al.*. Analysis and design of infrared search and track system with afocal zoom telescope[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13132.
- [2] LI H, ZHANG J J, CAI L X, *et al.*. The dynamic prediction method for aircraft cabin temperatures based on flight test data[J]. *Aerospace*, 2024, 11(9): 755.
- [3] 王瑾, 柳鸣, 安志勇. 基于牛顿反射式红外系统的二维转台的结构设计与有限元分析[J]. *光学仪器*, 2015, 37(4): 358-362.  
WANG J, LIU M, AN ZH Y. Two-dimensional turntable structure design and finite element analysis based on Newton's reflex infrared system[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(4): 358-362. (in Chinese).
- [4] WANG D X, LI ZH G, LIN J Q, *et al.*. Thermal-optical characteristics analysis of an aerial camera optical system[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(28): 8190-8196.
- [5] 杨勋, 徐抒岩, 李晓波, 等. 温度梯度对大口径反射镜热稳定性公差的影响[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 916003.  
YANG X, XU SH Y, LI X B, *et al.*. Influence of temperature gradient on thermal stability tolerance of large aperture reflective mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 916003. (in Chinese).
- [6] 王丹艺, 蒋山平, 周盈, 等. 用于航天光照模拟的吊挂式米级金属反射镜热稳定性分析[J]. *光学技术*, 2021, 47(4): 385-389.  
WANG D Y, JIANG SH P, ZHOU Y, *et al.*. Thermal stability analysis of Meter-scale metal mirrors for space illumination simulation[J]. *Optical Technique*, 2021, 47(4): 385-389. (in Chinese).
- [7] 吴清文, 卢锸, 王家骥, 等. 主镜稳定温度场特性分析[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(6): 47-53.  
WU Q W, LU E, WANG J Q, *et al.*. A study on static thermal properties of primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(6): 47-53. (in Chinese).
- [8] 王富国. 温度和支撑方式对1.2m SiC主镜面形的影响分析[J]. *光子学报*, 2011, 40(6): 933-936.  
WANG F G. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2m SiC primary mirror surface figure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 933-936. (in Chinese).
- [9] 谷果果. 空间温变场对不同结构平面反射镜的性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
GU G G. *Research on the effects of space temperature field on performance of different structures plane mirror*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese).
- [10] 郑潇逸. 基于热致主动光学的大口径空间相机波前校正关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.  
ZHENG X Y. *Research on key technology of wavefront correction of large aperture space camera based on thermal active optical*[D]. Changchun: Jilin University, 2025. (in Chinese).
- [11] 林子轩. 非均匀温度场下的多折叠肋式可展天线结构热响应分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.  
LIN Z X. *Analysis of thermal response of multi-folding rib flexible antenna structure at non-uniform temperature field*[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2024. (in Chinese).
- [12] 张庆. 基于温度反馈与有限元分析的光学天线自动装调技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.

- ZHANG Q. *Research on automatic alignment technology of optical antenna based on temperature feed back and finite element analysis*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024. (in Chinese).
- [13] 张家齐, 郭艺博, 张友建, 等. 机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(3): 578-586.
- ZHANG J Q, GUO Y B, ZHANG Y J, *et al.*. Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 578-586. (in Chinese).
- [14] ZHANG X M, LIU J H, XIA H X, *et al.*. Effects of curing, temperature, pressure, and moisture on the surface-figure of a high-precision bonded Mirror[J]. *Precision Engineering*, 2024, 85: 205-216.
- [15] 曹赛赛, 杨海生, 罗斌, 等. 热力耦合作用的航空发动机主轴球轴承动力学分析[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(12): 20220890.
- CAO S S, YANG H SH, LUO B, *et al.*. Dynamic analysis of aero-engine spindle ball bearings with thermal-mechanical coupling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(12): 20220890. (in Chinese).
- [16] 朱爱华, 朱成九, 张卫华. 滚动轴承摩擦力矩的计算分析[J]. *轴承*, 2008(7): 1-3.
- ZHU A H, ZHU CH J, ZHANG W H. Analysis on calculation of friction torque of rolling bearings[J]. *Bearing*, 2008(7): 1-3. (in Chinese).

#### 作者简介:



张家齐(1985—), 男, 吉林白山人, 博士, 副高级实验师, 硕士生导师, 2019年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事伺服跟踪结构、光机系统集成方面的研究。E-mail: [zjq\\_cust@foxmail.com](mailto:zjq_cust@foxmail.com)