

# 主镜稳定温度场特性分析

吴清文 卢 镔 王家骥 牛晓明

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

**摘要** 论述了主镜热设计及热分析的重要性, 并分析了在温度场作用下主镜的变形及其对光学系统成像质量的影响。对材料分别为 K9 和熔石英的主镜在径向稳定温度场的作用下的面形变形作了详细的分析、计算, 发现相同结构的主镜, 其镜面不仅变形与主镜的线胀系数和其他材料、结构特性参数有关, 而且与温度梯度的大小和方向均有密切的联系。

**关键词:** 主镜; 面形变形; 稳定温度场; 温度梯度

## 1 引 言

热控系统设计、空间环境影响是决定相机热控性能的基本因素, 在相机方案设计阶段就应考虑。主镜作为相机的关键部分, 除自身的结构可靠度影响整台相机的可靠度外, 还会通过其热控环节产生的诱发环境对相机及其他仪器设备产生一定的影响; 反之亦然。从减少相机故障、延长相机寿命角度考虑, 对主镜与相机总体的关系应予以关注。主镜不论是在检测条件下, 还是在工作状态下, 不仅受到各种力学载荷的作用, 而且受到热载荷的作用。其中热载荷的来源较多, 有内部热源发出的热量, 有外部热源的热量。其热传递方式可能同时具有传导、对流和辐射。所以主镜本身的热状态可能很复杂, 在进行光机系统设计时须对主镜进行详细的热分析并专门进行热设计, 特别是对深空探测应用及航天应用的光学仪器。

在轨卫星及其设备温度由内部热源生热、从太阳、地球或其他天体吸收的辐射热量和深层太空背景的热辐射等的平衡来决定。太空中环境热辐射可以分为两种类型<sup>[1]</sup>: ①波长在300 nm ~ 115 nm 的 UV 辐射; ②高能离子辐射。太阳是 UV 辐射的主要热源。其能量范围在4.1 eV 和10.8 eV 之间, 正好在大多数光学材料的吸收波段内。卫星外表的光学仪器的热传递机理为传导和辐射, 其温度可能达到5 K 的极低温度<sup>[1-2]</sup>。面向太阳时, 其加热强度可能达到1.35 kW/m<sup>2</sup>, 根据表面特性的不同, 可能达到摄氏几百度的高温。在暴露部分和处于阴影中的部分间产生巨大的温度差, 低热导率的光学玻璃上将有很高温度梯度, 这将引入光学性能的梯度。在飞船外表的姿态控制传感器的操作状态下的典型温度范围为20 ~ 40 , 非操作状态下为-30 ~ 50<sup>[3]</sup>。本文将研究的主镜在舱内使用, 主要受到较大的舱壁温度差的影响。

卫星在轨期间其热输入的周期性变化将导致飞船及其仪器的周期性温度变化。由于周期性的热胀冷缩导致力学特性梯度,这种热周期将引入结构材料的严峻的力学载荷,如复合结构的微裂纹、应力释放引起尺寸变化等<sup>[3]</sup>。这种瞬态温度场问题本文不做研究。

## 2 主镜在温度场作用下的变形

温度场对主镜的影响有:“边缘效应”,镜子内部形成温度梯度时的变形和主镜外部空气层形成温度梯度时对成像质量的影响等。本文针对太空设备暂不讨论外部空气层形成温度梯度时对成像质量的影响。但需指出的是在这种情况下,成像质量的好坏与镜子的放置位置有关。

### (1) “边缘效应”

主镜在使用过程中,周围环境温度发生变化时,镜子外层被加热或冷却,如图1所示。由于玻璃的导温率低,图1中中央加上阴影线的玻璃长时间地保持着起始温度,由此玻璃内、外层温度差而产生的应力使镜面变形并改变表面曲率半径,这种曲率半径不是均匀的,而是象图1所示那样,当温度降低时a点低于普遍表面以下,即塌边;当温度升高时,a点高于普遍表面以上,即翘边。这样一来,在环境温度改变条件下,玻璃镜面不仅按照不能确切肯定的规律改变它的曲率,而且还改变了表面形状,特别是靠近外部的带区。这一温度效应称为“边缘效应”<sup>[4]</sup>。

“边缘效应”随镜子材料的不同而不同。П. П. 马克苏托夫给出了一个经验公式:<sup>[4]</sup>

$$\Phi = \frac{Eq}{\alpha} \quad (1)$$

其中  $E$  为镜子材料的弹性模量,  $q$  为导温率,  $\alpha$  镜坯材料的热膨胀系数,  $\Phi$  则表示材料在减小“边缘效应”方面的一个参数。 $\Phi$  值越大,相应的材料在减小“边缘效应”方面对镜面越有利。因此在光学设计时应尽可能选择  $\Phi$  值较大的材料作为镜子材料以减小“边缘效应”的影响。

环境温度变化的幅度不大、速度较慢时,这种“边缘效应”对主镜的影响是很小的,如宇宙飞船上宇航员工作阶段时;但是当主镜所处的环境与外界环境相同时,主镜周围的温度变化很大时(如飞船留轨段),在进行热设计时,除了在镜子材料方面进行选择外,还必须从镜子的结构、使用环境方面进行考虑。

### (2) 镜子内部形成轴向温度梯度时的变形

设光学镜子在光轴方向上两表面上存在温度梯度,把镜子假设为平面镜来考虑。如图2,镜子将有如图中虚线的变形,此时左右两边直径差为  $\Delta D =$

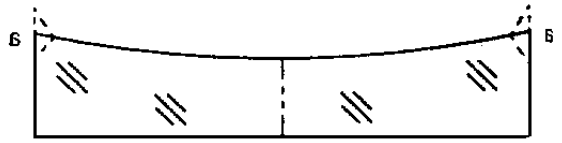


Fig. 1 Edge effect

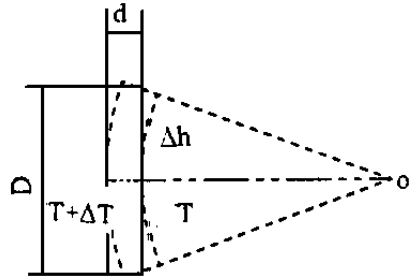


Fig. 2 Deformation of mirror brought by internal axial temperature gradient

$D\alpha\Delta T$ ; 圆盘弯曲的曲率半径为  $R = \frac{d}{\alpha\Delta T}$ , 矢高为  $\Delta H = \frac{D^2\alpha\Delta T}{8d}$ 。

对于焦距为  $f$  的球面镜和抛物镜, 矢高  $H = \frac{D^2}{16f}$ 。对矢高  $H$  求导, 并代入上式中  $\Delta H$ , 得

$$\Delta f = \frac{2f^2\alpha\Delta T}{d} \quad (2)$$

由此可知, 当镜子的两边存在温度差时, 会使得镜面的曲率半径和焦距发生变化。若镜子两边的温度在整个镜面上尽管有温度差, 但各点的温度差一致时, 曲率的变化将是一致的。这种普遍曲率变化只要不太大, 一般不会影响成像的质量。但是往往镜子所处的周围环境都不同程度地存在着温度的不均匀性, 从而使得这种曲率的变化在镜面上各点不一致。曲率的不一致性, 即使很小也会引起显著的象散。直径越大、温度差越大, 对象质影响越大; 相对厚度  $h/D$  越大、膨胀系数越小, 温度对象质影响越小。

另外, 如果光机系统中有调焦环节, 则这种由于轴向温差而引起的离焦, 可以被校正。如: 对于一个厚度为 80 mm, 曲率半径  $R = 2130$  mm 的 K9 玻璃 (线胀系数为  $7.5 \times 10^{-6}$ ) 主镜, 取其调焦量为  $\pm 0.5$  mm, 则其轴向允许的温差按 (2) 式为  $[\Delta T] = 7.347$ 。本文研究的主镜处于相机内部, 反射面吸收入射光热量较弱, 而后部又远离内部热源, 所以达到这样的轴向温差要求并不难, 一般不用进行热控处理。

以上两项变形是由于环境温差和主镜轴向温差引起的, 这两项变形量一般都较小。文献 [5] 对“火星观测者相机”中的主镜进行分析, 认为这两项温度梯度引起的镜面变形很小, 对于中心支撑的主镜, 其影响镜面变形的主要是主镜内部的径向温度梯度。

### (3) 主镜内部径向温度梯度引起的变形

主镜径向温度梯度是指主镜在半径方向上存在温度差, 明显表现在主镜内外径上有温差。这种情况下温度梯度对主镜的影响与主镜的安装结构和主镜所处的环境有关。就中心支撑的主镜而言, 据文献 [5] 报道, 径向温差将引起较大的曲率半径变化, 从而导致离焦等象差。实际上, 这基本上仅包含了各向一致的温差。如果各个方向温差不一致, 或主镜及其支撑结构不均匀, 势必引入象散、彗差等象差。对于背部支撑的主镜这种象差较为严重。径向温度梯度对主镜的影响既复杂又难以控制, 因此工程设计时须对其给以高度重视。

## 3 主镜稳定温度场特性分析

图3是中心支撑的某主镜结构, 基于前面的分析, 本文将详细研究径向温度梯度对主镜面形的影响。主镜安装在相机中, 主要热源是相机壁对主镜辐射和传导, 而传导路径为中心支承结构和周边均布的6点辅助支承处。中心支承采用铟钢和钛合金, 材料的导热率较高, 假设从相机筒内壁到

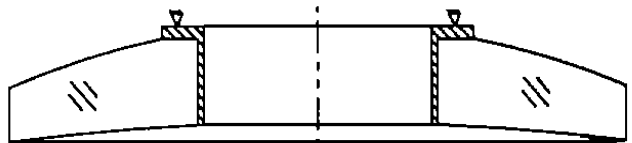


Fig. 3 Sketch of supporting structure of a primary mirror

主镜内孔壁的金属间无温差,温差仅发生在主镜自身内、外径上,由于主镜的热弹性变形与其支承结构有关,所以进行热弹性分析时,同时考虑主镜及其支承结构。选择 K9和熔石英两种材料进行不同温度梯度的有限元分析。

由于温度变化或存在温度梯度,弹性体内各点的微小长度如果不受任何约束,将发生正应变  $\alpha T$ , 其中  $\alpha$  为材料的线胀系数。但是由于弹性体所受的外在约束及体内各部分之间的相互约束,这种变形将不能自由发生,而将引起热应力。这个热应力又将按物理方程引起形变,使弹性体各部分产生热变形。

对于均匀、各向同性、常物理量、无内热源物体的三维稳定温度场,有微分方程  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ , 式中  $T(x, y, z)$  为温度函数<sup>[6]</sup>。这里采用第一类边界条件<sup>[6]</sup>, 即规定边界上的温度值  $T_c = T_c(x, y, z)$ 。将主镜及其支承结构离散为有限数量的节点和单元, 分别求出各单元的温度方程,  $[K^e][T^e] = [P^e]$ , 然后将其综合为总体的温度方程, 即可求得由于边界温度而引起的温度场分布。接下来把温度作为热载荷进行静力学分析, 则可以得到主镜镜面的变形。从而可以按照最小二乘法原理拟合出新的镜面形状及其焦点。表1、表2分别是不同径向温差引起的 K9玻璃主镜和熔石英主镜镜面面形变化情况。

Tab. 1 The deflection of K9 mirror caused by radial temperature gradient

$\Delta T$ ( )	PV (nm)	RM S (nm)	change of the spherial parameter			
			$\Delta a$ (mm)	$\Delta b$ (mm)	$\Delta b$ (mm)	$\Delta R$ (mm)
0.25	37.1903	5.13089	-.600E-05	.103E-01	.140E-04	.991430E-2
0.5	76.8496	10.8288	-.125E-03	.208E-01	.230E-04	.207446E-1
1.0	153.631	21.6584	-.250E-03	.416E-01	.470E-04	.414972E-1
2.0	297.677	41.0625	.200E-05	.800E-01	.250E-04	.797548E-1
3.0	446.464	61.5929	.200E-05	.120E+00	.370E-04	.119636E+0
4.0	595.341	82.1249	.300E-05	.160E+00	.490E-04	.159518E+0
8.0	1190.64	164.250	.600E-05	.320E+00	.990E-04	.319062E+0
-0.125	29.8972	4.53266	.100E-05	.503E-02	.000E+00	.493274E-02
-0.25	59.5879	9.06839	.100E-05	.101E-01	-.200E-05	.990399E-2
-0.5	119.234	18.1579	.200E-05	.202E-01	-.400E-05	.198336E-1
-1.0	238.707	36.3554	.400E-05	.404E-01	-.100E-04	.396518E-1
discription	Radius: $R = 2130.000000$					
	Direction of optical axis: + Y					

Tab. 2 The deflection of FS mirror caused by radial temperature gradient

$\Delta T$ ( )	PV (nm)	RMS (nm)	change of the spherical parameter			
			$\Delta a$ (mm)	$\Delta b$ (mm)	$\Delta b$ (mm)	$\Delta R$ (mm)
1.0	10.7285	1.45358	.000E+00	.293E-02	.100E-05	.292206E-2
2.0	21.4659	2.90736	.000E+00	.587E-02	.200E-05	.584710E-2
3.0	32.2101	4.36072	.000E+00	.881E-02	.300E-05	.877313E-2
4.0	42.9253	5.8143	.000E+00	.117E-01	.400E-05	.117002E-1
-0.25	4.66925	.711551	.000E+00	.619E-03	.000E+00	.604606E-3
-0.5	9.35997	1.42401	.000E+00	.124E-02	.000E+00	.121018E-2
-1.0	18.8027	2.84623	.000E+00	.248E-02	.000E+00	.242233E-2
-2.0	37.6430	5.69621	.000E+00	.496E-02	-.200E-05	.484662E-2
-3.0	56.3625	8.54402	.100E-05	.744E-02	-.200E-05	.726992E-2
-4.0	75.1459	11.3935	.100E-05	.992E-02	-.300E-05	.969322E-2

discription	Radius: $R = 2130.000000$
	Direction of optical axis: $+ Y$

这里采用的参考温度和基准温度为21℃,  $\Delta T = T_{\text{外径}} - T_{\text{内径}}$ , 当  $\Delta T > 0$  时,  $T_{\text{内径}} = 21$  ; 当  $\Delta T < 0$  时,  $T_{\text{外径}} = 21$  , 这是为了增强在同一参考温度下数据的可比性。

从表1和表2均可以得出这样的结论:  $PV \propto |\Delta T|$ ,  $RMS \propto |\Delta T|$ , 即温差越大, PV 值和 RMS 值越大。这里两组结果都针对同一个几何模型, 只是其材料特性和温度值不同。所以对于线性材料的主镜, 其 PV 值和 RMS 值也线性化。

材料的线胀系数分别为  $\alpha_{K9} = 7.5E-6$ ,  $\alpha_{FS} = 0.56E-6$ , 比较表1和表2中相同条件下的 PV 值和 RMS 值,  $\frac{PV_{K9}}{PV_{FS}} \frac{\alpha_{K9}}{\alpha_{FS}}$ ,  $\frac{RMS_{K9}}{RMS_{FS}} \frac{\alpha_{K9}}{\alpha_{FS}}$ , 说明 PV 值和 RMS 值虽然与  $\Delta T$  有线性关系, 但与线胀系数却没有线性关系, 也就是说 PV 值和 RMS 值的变化尚与材料的比刚度等其他因素有关。

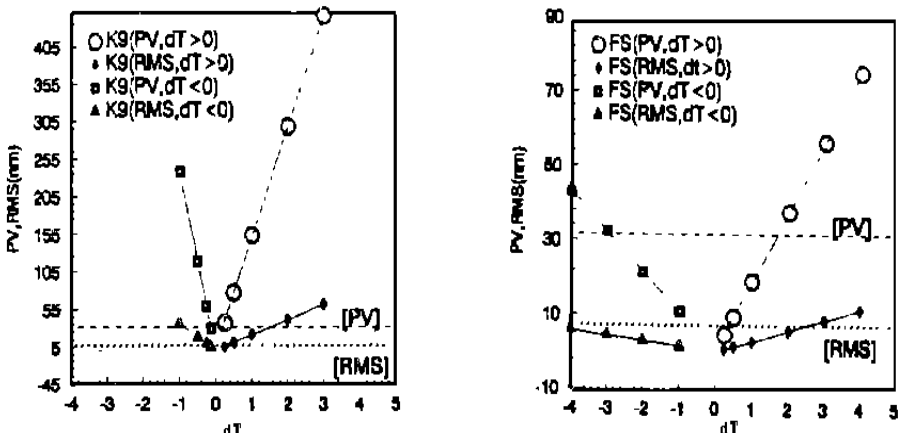


Fig. 4 Curve of PV & RMS values vs. temperature gradient

表中的  $\Delta a$ 、 $\Delta b$  和  $\Delta c$  是温度场作用下原始球心  $P(a, b, c)$  在  $x, y, z$  轴上的移动值, 而  $\Delta R$  是根据变形后的曲面拟合出相当半径相对于初始球面半径之差。比较各组数据均可得  $\Delta R$

$\sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta c)^2}$ 。说明主镜镜面的变形并不仅仅是镜面的平移和旋转, 也不仅仅是由于大小半径间的变化, 其中尚有镜面畸变, 这样就可能会给光学系统引入离焦的同时, 引入像散、彗差等像差。

为了研究许用温差  $[\Delta T]$ , 首先假设  $[PV] = \lambda/20$ ,  $[RMS] = \lambda/80$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 将表1和表2中的 PV 值和 RMS 值对  $\Delta T$  的数据绘成曲线并作线性回归如图4所示。从图中可以看到就  $[PV]$  和  $[RMS]$  有不同的  $[\Delta T]$ , 如表3所示。基本上呈现为, 不论是 K9 玻璃还是熔石英, 当外径温度高于内径温度时, 其允许温差  $[\Delta T_{\text{外径}}]$  要大于内径温度较高时的  $[\Delta T_{\text{内径}}]$ , 即  $[\Delta T_{\text{外径}}] > [\Delta T_{\text{内径}}]$ , 可以看出, 许用温差与温度梯度的方向有直接关系。同时由于熔石英的比刚度比 K9 的高, 线胀系数比 K9 的低, 其允许温差  $[\Delta T_{FS}] \gg [\Delta T_{K9}]$ 。所以在热设计选材时, 在保证结构性能及光学性能、成本允许的情况下应尽量选取高比刚度、低线胀系数的材料作为主镜。

Tab. 3 Acceptable radial temperature difference  $[\Delta T]$  ( )

Material of Primary mirror	$[\Delta T_{\text{outer}}] (T_{\text{inner}} < T_{\text{outer}})$		$[\Delta T_{\text{inner}}] (T_{\text{inner}} > T_{\text{outer}})$	
	datum: [PV]	datum: [RMS]	datum: [PV]	datum: [RMS]
K9	0.197	0.361	- 0.133	- 0.218
FS	2.948	5.442	- 1.684	- 2.777

## 4 结 束 语

相机热结构设计及主镜热特性分析具有十分重要的意义, 特别是对深空探测和航天应用的光学仪器。

主镜由于温度的变化将会有“边缘效应”, 产生塌边或翘边; 当镜子内部存在轴向温度梯度, 将引起镜面焦距的变化, 从而影响象质, 但其变化较易较正、易于控制, 对系统的影响不会很大, 而主镜内部的径向温度梯度主要也是引起焦距的变化, 但情况却复杂得多, 控制也比较困难。另外如果主镜周围有空气等介质, 则可能由于介质层中存在温度梯度而影响主镜的性能。

本文针对某一应用的主镜进行稳定温度场热特性分析, 重点讨论了径向温度梯度对 K9 材料的主镜和熔石英主镜面形质量的影响。分析表明: 镜面变形的 PV 值和 RMS 值与径向温差成正比, 但并不与线胀系数成正比; 对给定的  $[PV]$  和  $[RMS]$  标准, 得出了对应的  $[\Delta T]$ , 发现当镜子外径温度高时其允许温差  $[\Delta T_{\text{外径}}]$  大于内径温度较高时的  $[\Delta T_{\text{内径}}]$ , 且熔石英的  $[\Delta T_{FS}]$  远大于 K9 玻璃的  $[\Delta T_{K9}]$ , 主镜在受到热载荷时镜面的变形不仅仅是镜面的平移或旋转, 也不仅仅是大小半径的变化, 镜面上还存在局部畸变, 引入离焦的同时, 也引入像散、彗差等像差。显然径向温度场对主镜面形的影响不仅与线胀系数等材料 and 结构参数有关, 而且与温度梯度的大小和方向有直接关系。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Martin Schreiber, Philip Young, Design of infrared astronomical satellite (IRAS) primary mirror mounts. SPIE, 1980, **250**, 50– 58
- [ 2 ] Philip Young, Martin Schreiber, Alignment design for a cryogenic telescope. SPIE 1980, **251**, 171– 176
- [ 3 ] 华诚生, 提高卫星热控系统可靠性的对策. 航天器工程, 1995, **4**( 1 ), 41– 50
- [ 4 ] 伍 凡, 温度对大型光学镜子质量的影响. 光学工程, 1986( 4 ), 24– 29
- [ 5 ] Roger W. Applewhite, The effects of thermal gradients on the Mars Observer Camera primary mirror. SPIE, 1992, **1690**, 376– 386
- [ 6 ] 林春福, 空间遥感相机的温度场分析与热弹性计算. 中国科学院长春光学精密机械研究所硕士论文, 1996年1月

## A Study on Static Thermal Properties of Primary Mirror

Wu Qingwen, Lu E, Wang Jiaqi and Niu Xiaoming

(*Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

The importance of thermal design and thermal analysis of primary mirror is stated in this paper. The deformation of the primary mirror in temperature field and its effect on the image quality of the optical system is analyzed. The deformation of surface figure of a primary mirror in radial static temperature field, K9 and fused silica respectively, is calculated and analyzed in detail. It is found that as though the structure is not different, the deflection of the surface figure of the mirror is not only connected with  $\alpha$  and other thermal and structural parameter, but also directly connected with the magnitude and direction of the temperature gradient.

**Key Words:** Primary mirror, Deformation of surface figure, Static temperature field, Temperature gradient

吴清文 男, 1968年出生于四川省简阳市。1994年毕业于哈尔滨工业大学, 获硕士学位, 同年考入长春光学精密机械研究所攻读博士学位。现从事光学仪器 CAE 及塑料注塑模具 CAD、CAE 工作。