

太空中星敏感器光学系统温度分布研究

谭 威^{1,2} 罗剑峰¹ 刘 军² 盛定仪² 曾文锋²

(¹ 国防科技大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073; ² 武汉军械士官学校光电系, 湖北 武汉 430075)

摘要 星敏感器中光学系统温度分布不均匀会对其成像质量产生很大影响。根据有限元方法, 采用 I-DEAS 软件, 求解得出在太空中指定材料情况下星敏感器及其光学系统的温度分布。分析了内、外表面涂层, 太阳入射角, 镜筒及填充材料导热系数对系统温度分布的影响。结果表明当外表面涂层吸收发射比从 0.25 增大到 4 时, 系统的平均温度从 $-78.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $66.53\text{ }^{\circ}\text{C}$; 内表面发射率从 0.2 增大到 1 时, 系统平均温度从 $25.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $18.22\text{ }^{\circ}\text{C}$; 太阳入射角从 -60° 增大到 0° 时, 系统平均温度从 $-9.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $18.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当镜筒分别为钛合金或铝时, 系统温差分别为 $6.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$; 填充材料有效导热系数为 $237\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时, 温差为 $2.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 系统综合性能最好。

关键词 星敏感器; 平均温度; 温差

中图分类号 O43; TK121 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0231

The Study of Temperature Distribution of Optic System in the Star Sensor

Tan Wei^{1,2} Luo Jianfeng¹ Liu Jun² Shen Dingyi² Zen Wenfeng²

(¹ National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
(² Wuhan Ordnance Petty Officer Institute, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract The optic system temperature distribution that is solved by finite element method with the software of I-DEAS, that will descend the image quality in star sensor if it is not uniform. The effects of the outside and inside surface coat, the angle of sun incidence, the heat conduction of the drawtube and the thermal joint conduction on temperature distribution have been analyzed. It is shown that, the average temperature of system is decided by the outside and inside surface coat and the angle of sun incidence. The temperature difference is decided by the heat conduction of the drawtube and the thermal joint conduction. It is found that, when the ratio of absorptance and emittance of outside surface coat change from 0.25 to 4, the average temperature is from $-78.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $66.53\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the emissivity of inside surface coat change from 0.2 to 1, the average temperature is from $25.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $18.22\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the angle of sun incidence change from -60° to 0° , the average temperature is from $-9.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $18.22\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the drawtube is the alloy of titanium or aluminum, the temperature difference is $6.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the thermal conductivity of the thermal joint conduction is $237\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$, the temperature difference is $2.37\text{ }^{\circ}\text{C}$. The conclusion has great significance to the engineering.

Key words star sensor; average temperature; temperature difference

1 引 言

星敏感器属于高精度光学敏感器, 主要由光学系统模块、驱动线路、制冷模块及图像处理模块组成。通过探测天球上不同位置的恒星来确定卫星姿态, 提供航天飞行器相对于惯性坐标系的三轴姿态^[1,2]。

星敏感器中光学系统的温度梯度, 会产生热应力及热变形, 导致光学系统的波前畸变, 造成影像模糊, 从而严重影响其成像精度^[3]。根据国外通常所采用的高分辨率空间望远镜的总体均方根波像差计

算表明, 热控系统的误差在数值上占总误差的一半左右^[4]。所以星敏感器中温度分布研究十分重要。

本文采用吴峰等^[5]设计的轻小型光学系统, 安装方式如法国星敏感器系列 SED36^[6]。采用 I-DEAS 软件建立星敏感器物理模型, 根据节点热平衡方程, 采用 I-DEAS 软件计算物理模型在各种影响因素下的温度分布。

2 理论及计算模型

作者简介: 谭 威(1983—), 男, 研究生, 主要从事空间光学系统热分析方面的研究。E-mail: tanwei_@tom.com

导师简介: 罗剑峰(1969—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事数值热分析方面的研究。E-mail:

外层空间高度真空,不存在对流换热,系统主要的换热方式为热传导和热辐射^[7]。为求解系统温度场,将星敏感器系统分成许多节点,利用有限差分法进行温度场数值求解,其热平衡方程为

$$\sum_j D_{i,j}(T_j - T_i) + \sum_j E_{i,j}\sigma(T_j^4 - T_i^4) + q_{Ti} = (mc)_i \frac{dT_i}{d\tau}, \quad (1)$$

式中 $D_{i,j}$ 为节点间传导网络系数, $E_{i,j}$ 为节点间辐射网络系数, q_{Ti} 为节点总热源,包括节点的内热源和外热源, σ 为玻耳兹曼常数。在稳态下有

$$\sum_j D_{i,j}(T_j - T_i) + \sum_j E_{i,j}\sigma(T_j^4 - T_i^4) + q_{Ti} = 0. \quad (2)$$

卫星上星敏感器的搭载方式有两种:裸露于太空或者包容于卫星中。本文所研究的星敏感器的安装方式裸露于太空,具体采用 SED36^[6] 的安装方式,光学系统采用吴峰等设计的轻小型光学系统^[5]。镜筒受到太阳照射,光学系统结构如图 1 所示。光学系统由七块透镜组成,镜筒外径为 12 mm,系统全长 45.3 mm,选取镜筒材料为金属钛,其导热系数为 15.4 W/(m·k),外表面涂层为有机黑漆吸收发射比为(0.95/0.75),内表面涂层选为黑体(1/1),太阳垂直入射(0°)。太阳常数为 1367 W/m²,赤经 0°,赤纬 0°,星敏感器朝向为长度方向(Z轴)始终朝东,半径方向(X轴)朝北。模型中的网格体单元为边长为 1 mm 的正四面体单元,整个系统由 1424 个节点和 6289 个有限元单元组成,使用 I-DEAS 有限元软件在稳态下求解系统温度分布。

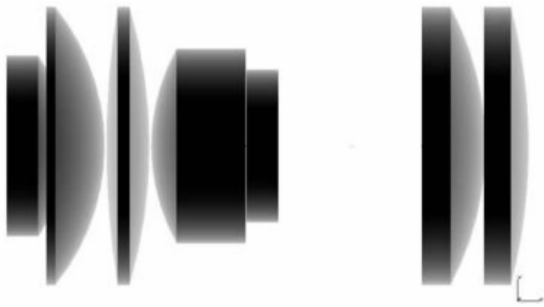


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Structure of the optic system

3 辐射因素对光学系统温度分布的影响

对星敏感器光学系统温度分布有影响的辐射条件包括外表面涂层、内表面涂层和太阳入射角。这些辐射项决定系统吸收的总能量。

3.1 外表面涂层对光学系统温度分布的影响

从星敏感器的热平衡方程可知,影响其温度分布的因素有很多,其中可供热设计者进行选择的主要因素之一就是镜筒表面的太阳吸收率 α_s 和半球发射率 ϵ_H 。星敏感器与太空环境之间的换热以及星敏感器内部之间的换热主要是以热辐射的方式进行,因此,镜筒内外表面的热辐射性质,对控制星敏感器光学系统温度水平有决定意义。保持系统其他参数不变,当星敏感器外表面分别涂有有机白漆 S781(吸收发射比为:0.2/0.8=0.25),有机黑漆 S956(吸收发射比为:0.95/0.75=1.27),电镀黑镍涂层(吸收发射比为:0.8/0.2=4)时,光学系统的温度分布如表 1 所示。图 2 为镜筒外表面涂层为有机白漆 S781 时光学系统的温度分布图。从表 1 中可以看出随着外表面涂层的吸收发射比的增大,光学系统平均温度升高,这是因为随着吸收发射比的增大,系统吸收的总能量增加。热控涂层的吸收发射比对光学系统的温度水平有决定性的作用。卫星中各部件各仪器要求的工作温度水平不一样,主要通过选择热控涂层的吸收发射比来控制其温度水平。考虑到星敏感器适宜工作温度为室温左右,所以实际中可以通过选择合适的吸收发射比涂层,以达到其工作温度要求。

表 1 各种热控涂层下光学系统温度分布

Table 1 Temperature distribution of optic system with different covers

Covers	Average temperature / °C	Temperature difference / °C
S781(0.25)	-78.10	0.91
S956(1.27)	18.22	4.22
nickel(4)	66.53	3.91

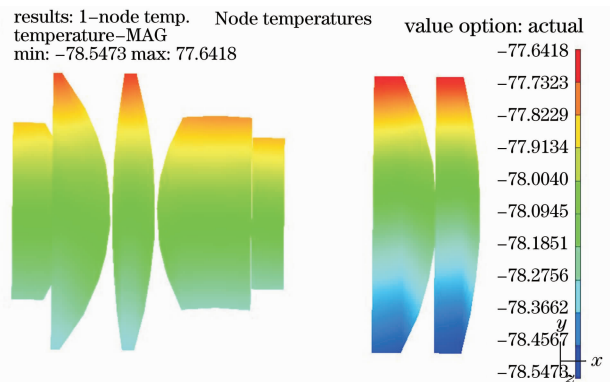


图 2 外表面涂层 S781 下光学系统温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of optic system with the cover of S781

3.2 内表面涂层对光学系统温度分布的影响

在热平衡条件下,系统通过外表面的辐射性质来控制系统所吸收的能量,同时此时可以通过调节内表面的辐射性质来控制系统所发出的能量,从而控制系统的平均温度。保持系统其他参数不变,当内表面分别涂有发射率为 0.2,0.5,0.8,1 的涂层时系统的平均温度以及温差大小如表 2 所示。从表 2 以及中可以看出,内表面发射率越大,光学系统温度分布也就越低,通过内表面涂层材料的选择可以控制光学系统的温度水平。

表 2 各种内表面发射率下光学系统温度分布
Table 2 Temperature distribution of optic system with various emissivity

Emissivity	Average temperature / °C	Temperature difference / °C
0.2	25.00	4.21
0.5	21.15	4.22
0.8	19.15	4.23
1.0	18.22	4.22

3.3 太阳入射角对光学系统温度分布的影响

保持系统其他参数不变,太阳入射角分别为 $-60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 如图 3 所示。光学系统的温度分布如表 3 所示。

表 3 各种太阳入射角下光学系统温度分布
Table 3 Temperature distribution of optic system in various angle

Incident angle / °	Average temperature / °C	Temperature difference / °C
-60°	-9.59	2.35
-30°	16.29	4.15
0°	18.22	4.22
30°	16.47	3.17
60°	-8.95	1.79

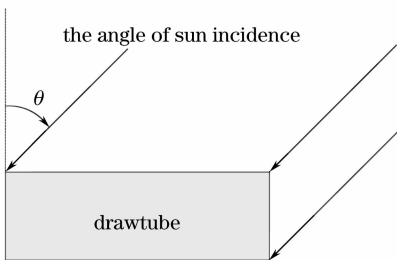


图 3 太阳入射角示意图(顺时针为正)

Fig. 3 The sun incident angle diagram

从表 3 可以看出,当太阳入射角绝对值增大后,平均温度减少,这是因为在太阳入射方向的投影面积减少,从而镜筒外表面吸收的太阳能量减少,所以光学系统和星敏感器系统平均温度降低。并且可以由对称入射时温差的大小不一致可以看出,由于光

学系统本身结构不对称,导致对称入射时光学系统中的能量分配不一致,所以入射角对称时,平均温度、温差大小不相同。

4 导热系数对光学系统温度分布的影响

4.1 镜筒材料导热系数对光学系统温度的影响

导热系数是反映材料导热能力大小的物理量,保持系统其他参数不变,当镜筒材料分别选择钛合金[导热系数为 $8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$],金属钛[$15.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$],铝合金[$153 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$],金属铝[$237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$]时,光学系统温度分布如表 4 所示。

表 4 各种镜筒材料下光学系统温度分布
Table 4 Temperature distribution of optic system in various drawtube

Drawtube	Average temperature / °C	Temperature difference / °C
Titanium alloy	18.18	6.85
Titanium	18.22	4.22
Aluminum alloy	18.29	0.48
Aluminum	18.30	0.31

表 4 可见系统平均温度变化不大,但选用导热系数大的镜筒材料,光学系统的温差明显减少。当系统辐射特性确定后,如果能有效“导通”热流通道,系统的温差就越小。热流通路的导通就是导热能力的加大。因为导热系数越小,介质传导能量的能力减弱,系统受空间辐射热流的变化影响越大,自身产生的温差也就越高。采用导热系数大的镜筒材料有利于减少系统温差。并且由于玻璃的导热系数比金属小得多,所以在系统中改变玻璃的导热系数对光学系统温差影响较小。

4.2 填充材料对光学系统温度分布影响

任何两个相互接触的固体表面,即便宏观上十分平整,但微观上它们是凹凸不平的,而实际上接触的固体面积要比名义上的小得多。两接触表面之间的总的接触热导率 H 可表示为: $H = q' / (T_1 - T_2)$, 其中 q' 为流过单元接触面积的热流, T_1 和 T_2 分别为两个接触面积的温度。我们可以用一个有效导热系数 $\lambda_{\text{eff}} = q' \int \frac{dx}{A} / (T_1 - T_2)$ 来表示。接触热阻是存在于两固体接触表面上的热阻,接触热阻的大小与接触面的连接方式,表面状况等多种因素有关,取值常有数量级的变化。因此,接触热阻常常成为导热分析中的不确定因素。接触热阻的存在使得热通路不畅通,增大沿热流途径上的温度降。最有效的控制热阻的措施就是在接触表面间加入导热材料。保持系统中其他

参数不变。当镜筒与透镜间分别选择有效导热系数为 $0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 和 $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 的导体填充材料时光学系统以及镜筒的温度分布如表 5 所示。从表 5 中可以看出,与钛相比导热系数为 $0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 和 $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时,光学系统的温差都减少。因为当材料导热系数为 $0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时,流入光学系统的能量急剧减少,而辐射性质没有太大变化,所以光学系

统温差减少。同时对于整个系统由于传递到光学系统的能量减少,则镜筒上得到的能量越多,所以镜筒的温差就越大。当材料导热系数为 $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时,同理流入光学系统的能量增大,但同时流出光学系统的能量也多,导热通路比原先畅通,所以无论是光学系统还是镜筒它们的温差都减少。

表 5 光学系统和镜筒的温度分布

Table 5 Temperature distribution of optic system and drawtube

	Optic system		Drawtube	
	Average temperature / $^{\circ}\text{C}$	Temperature difference	Average temperatur / $^{\circ}\text{C}$	Temperature difference
Heat conduction $0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	24.43	0.19	24.7	6.30
Titanium	24.60	4.21	24.59	4.60
Heat conduction $237 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	24.45	1.65	24.51	2.37

虽然在两种情况下光学系统的温差都减少,但是镜筒的温差变化不一致。由于镜筒的温度梯度会使镜筒发生热变形,从而导致光学系统发生倾斜,所以,虽说镜筒与透镜间的导热系数为 $0.001 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 时,可以使光学系统温度分布均匀,但是不可取。同时,导热系数很小的材料会降低光学系统的温度敏感性,增大热惯性,使对光学系统的主动温控的灵敏性和灵活性降低。因此镜筒与透镜间的填充材料应选择有效导热系数大的材料如导热脂。

5 结 论

根据 I-DEAS 软件求解的星敏感器温度分布可知,热控涂层、太阳入射角对系统平均温度有决定性作用,当热控涂层吸收发射比从 0.25 增大到 4 时,系统平均温度改变量为 $144.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$,太阳入射角从 -60° 增大到 0° 时,平均温度改变量为 $27.81 \text{ }^{\circ}\text{C}$;镜筒导热系数越大,系统温差越小,当镜筒材料为铝时,系统温差为 $0.31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这一结果对工程设计具有重大的指导意义。

参 考 文 献

1 Lu Xin. Optical design of CCD star sensor[J]. *Chinese Space*

Science and Technology, 1994, **4**: 49~53

卢 欣. CCD 星敏感器光学系统设计[J]. *中国空间科学技术*, 1994, **4**: 49~53

2 Li Xuekui, Hao Zhihang *et al.*. The research on the method of the star's position determination of the star sensor[J]. *Chinese J. Electron Devices*, 2004, **27**(4): 571~574

李学夔,郝志航等. 星敏感器的星点定位方法研究[J]. *电子器件*, 2004, **27**(4): 571~574

3 Niu Xiaoming. Thermal response and control for a space optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, (6): 74~78

牛晓明. 空间光学遥感器的热响应分析及热控[J]. *光学精密工程*, 1998, (6): 74~78

4 Zhao Lixin. Thermal design and thermal-optical analysis of space solar telescope[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(1): 7~12

赵立新. 空间太阳望远镜的热设计和热光学分析[J]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(1): 7~12

5 Wu Feng, Shen Weimin. Design of a light and compact optical system for star sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **33**(11): 1136~1138

吴 峰,沈为民. 轻小型星敏感器光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1136~1138

6 Ludovic Blarre, Julien Ouaknine, Oddos-Marcel Lionel *et al.*. High accuracy sodern star trackers: Recent improvements proposed on SED36 and HYDRA star trackers [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Proceedings*: 2006. 6046

7 Min Guirong. Thermal Control Technology of Satellite [M]. Beijing: Aerospace Press, 1991. 8~20

闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991. 8~20