

基于温度水平的空间相机主动热控系统

于涛,王永成,代霜,孙亮,宋克非

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为了让空间相机在适合的温度条件下工作,提出一种基于温度水平的主动热控系统。首先,分析相机达到温度平衡的条件,确定主动热控策略;其次,介绍热控系统的构成及工作原理;然后,将相机图像质量无本质影响作为条件,确定主动热控策略中的各项控温指标;最后,确定温度控制算法。相机在轨工作的实验结果表明:依据主动热控策略,系统能够控制相机温度达到平衡,主镜组件与基准温度的温差不大于 1°C ,主镜组件的周向温差不大于 1°C ,主镜与次镜组件的温差不大于 2°C ,主镜与三镜组件的温差不大于 5°C ,温度控制结果满足主动热控策略中的各项控温指标要求,满足相机工作时对温度的要求。

关键词: 温度水平; 主动热控; 空间相机

中图分类号: V443+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0249-05

Active thermal control system for space camera based on temperature level

Yu Tao, Wang Yongcheng, Dai Shuang, Sun Liang, Song Kefei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to make the space camera to work under the condition of appropriate temperature, the active thermal control system based on temperature level was proposed. Firstly, the condition of temperature balance was analyzed and the active thermal control strategy was ascertained. Secondly, the system composition and work principle were introduced. Thirdly, the temperature control indexes of active thermal control were determined under the condition of no essential influence to image quality. Finally, the algorithm of temperature control was determined. Experimental results indicate that the active thermal control system can make the camera in temperature balance based on the active thermal control strategy, the difference in temperature between primary mirror and reference temperature is no more than 1°C , the circumferential difference in temperature of primary mirror is no more than 1°C , the difference in temperature between primary mirror and secondary mirror is no more than 2°C and the difference in temperature between primary mirror and third mirror is no more than 5°C , the results of temperature control are satisfied the requirements of control indexes of the active thermal control strategy and the camera work temperature.

Key words: temperature level; active thermal control; space camera

收稿日期:2014-05-20; 修订日期:2014-06-22

基金项目:国家自然科学基金(60507003)

作者简介:于涛(1980-),男,助理研究员,硕士,主要从事空间相机控制技术方面的研究。Email:yut@ciomp.ac.cn

0 引言

由于空间相机进入轨道工作时,受到太阳辐射、地球红外辐射和地球反照及宇宙空间冷黑热沉的交替加热和冷却,当工作姿态变化时,向着太阳的部分与处于太阳阴影中的部分会产生巨大的温差,相机表面各部分接受辐射热量的不均匀性和随时间的变化,将造成其表面温度分布的不均匀和波动,而温度变化对其光学系统成像质量影响也很大。为了保证相机在恶劣的空间环境中正常工作,必须进行合理的热控制设计^[1-4]。

空间相机热控技术主要分为被动和主动热控两种^[5-7]。被动热控制技术是一种开环控制技术,在控制过程中被控对象的温度无反馈作用,一旦状态确定后,基本上没有调节的余地,通常选择具有一定热物理性能的材料,并通过航天器的布局合理安排与空间环境及内部仪器设备之间的热交换,使航天器各部分处于要求的温度范围内。主动热控技术是一种闭环控制技术,温度控制精度高,在主要结构部件上实施主动控温回路设计,以保持相机在要求的温度范围之内,现有的主动热控方法通过测得的空间相机各光学组件的温度随机消除空间相机各光学组件之间的温差实现表面温度的均匀分布,该方法随机采集的温度存在一定的不确定性及异常值,以单一阈值作为温度的控制条件,容易造成温度超调,各个光学组件温度控制比较频繁,影响相机成像的稳定性。

文中提出一种基于温度水平的空间相机主动热控系统,解决了目前主动热控的技术问题,能够消除温度异常值,提高温度采集的可靠性,根据空间相机的使用环境设定基准温度,消除主要光学组件与基准温度的温差以及主要光学组件与其他光学组件的温差,通过基准温度的调整,可以实现相机整体温度水平的调整,以上阈值和下阈值作为温度控制条件,可以有效避免温度超调,降低温度控制频度。通过某型号空间相机在轨的实际应用,可验证该系统能够有效控制相机的温度达到平衡,满足相机工作时对温度的要求。

1 需求分析和热控策略

热控策略以保证相机成像质量、减小相机焦面

位置变化为主要目的,相机焦面位置主要由光学组件决定。通过对某型号空间相机的光学系统进行分析,影响相机焦面位置的光学组件为主镜、次镜和三镜,因此热控策略可以划分为三个部分,即:主镜组件热控、次镜组件热控和三镜组件热控。通过热分析和成像试验,可知主镜、次镜、三镜组件温度对相机焦面位置的影响程度,主镜组件温度对焦面位置影响最大,次镜组件次之,三镜组件最小。

结合相机本身的特性,主镜是相机光学系统中的关键组件,体积较大,因此应消除主镜组件本身温差,并控制主镜组件的平均温度达到适合相机工作的基准温度,基准温度是相机工作时需要达到的温度水平,同时为了避免次镜和三镜组件温度相对主镜组件超调,保证相机成像质量和相机整体温度控制的稳定性,次镜组件和三镜组件的温度应根据主镜组件的温度进行适当调整,消除相机的轴向温差,最终使相机整体光学组件的温度达到平衡。

经上述分析,为了让相机达到温度水平,应采取以温度水平作为驱动条件,以主镜组件与基准温度、次镜组件、三镜组件的温差作为温控条件的主动热控策略,具体定义如下:

计算主镜组件、次镜组件及三镜组件的温度,对温度进行滤波,消除温度异常值;

计算主镜组件自身温差、主镜组件与基准温度、次镜组件、三镜组件的温差;

如果主镜组件自身的温差不小于温差的上阈值,通过加热器对主镜组件的低温区域进行加热,直到主镜组件自身的温差不大于温差的下阈值;

如果主镜组件与基准温度的温差不小于温差的上阈值,通过加热器对主镜组件的全部温区进行加热,直到主镜组件与基准温度的温差不大于温差的下阈值;

如果主镜组件与次镜组件的温差不小于温差的上阈值,通过加热器对次镜组件进行加热,直到主镜组件与次镜组件的温差不大于温差的下阈值;

主镜组件与三镜组件的温差不小于温差的上阈值,通过加热器对三镜组件进行加热,直到主镜组件与三镜组件的温差不大于温差的下阈值。

热控策略中的上阈值和下阈值具体为:在对相机成像质量无本质影响的条件下,将允许的主镜组件自身温差的极大值、主镜组件分别与基准温度、次镜组

件、三镜组件的温差的最大值作为上阈值;为了防止温度控制超调,下阈值设置为上阈值的一半。上阈值与下阈值可以通过试验确定,具体确定过程在后文介绍。

2 系统构成及工作原理

主动热控系统主要由系统控制器、测温电路、温度传感器、加热器、主镜组件、次镜组件、三镜组件等组成,结构关系如图1所示。

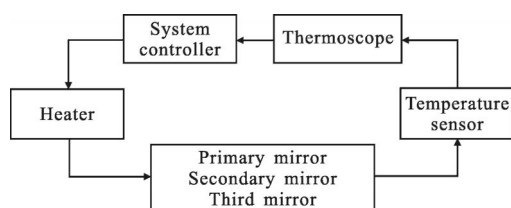


图1 主动热控系统框图

Fig.1 Block diagram of active thermal control system

由图1可知,主镜、次镜和三镜组件是相机光学系统的主要组成部分,是相机温度的被控对象;温度传感器作为主镜、次镜和三镜组件的温度感应元件,通过测温电路实现对温度的测量;加热器作为外部热源,提高主镜、次镜和三镜组件各个位置的温度;系统控制器作为系统的核心,通过温度传感器的反馈计算主镜、次镜和三镜组件各个位置的温度和温差,根据热控策略控制各个加热器的开关,对主镜、次镜和三镜组件的温度进行调整,使相机整体光学组件的温度达到平衡,满足相机工作时对温度的要求。

3 系统设计与实现

依据热控策略对系统进行设计和实现,其中测温设计、温度滤波算法、温度控制阈值及温度控制算法是系统设计的关键项,下面对上述关键项进行详细介绍。

3.1 测温设计

温度传感器采用负温度系数的珠状玻璃密封式半导体热敏电阻 MF501,反映主镜、次镜和三镜组件的温度,通过测温电路实现温度的测量。测温电路主要由电压基准单元、热敏电阻、惠斯通电桥、电压放大电路以及 A/D 转换电路组成。该系统采用了恒压分压法来测量热敏电阻的阻值,测温电路采用传统的惠斯通电桥电路。

热敏电阻 MF501 阻值与温度的计算公式如下:

$$t = \frac{2c}{-b + \sqrt{b^2 - 4c(a - \ln R)}} - 273.15 \quad (1)$$

式中: t 为温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为热敏电阻阻值, Ω ; a 、 b 、 c 为待定参数,与热敏电阻的材料有关,通过标定实验得到 a 、 b 和 c 的取值分别为 -6.012 、 $4\ 622.533$ 、 $-864\ 21.724$ 。

3.2 温度滤波算法

为了避免测温电路瞬时被干扰产生的温度坏值,提高测温的准确性,采用滤波算法计算温度值,具体算法见图2。

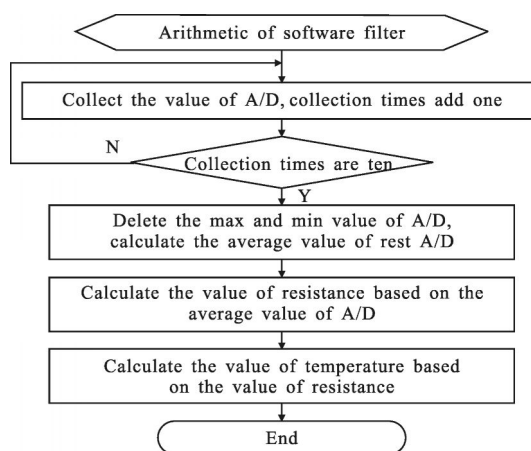


图2 软件滤波算法

Fig.2 Arithmetic of software filter

3.3 温度控制阈值

通常以调制传递函数值(MTF)作为空间相机成像质量的评价依据。MTF 值下降 5%意味着对图像无本质影响,图像总体品质没有变化,对图像分析判读和测量也无影响。采用黑白条纹等间隔目标板作为相机拍摄的目标源,根据公式(2)计算 MTF 值:

$$MTF = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

式中: MTF 为调制传递函数值; $I_{\max} - I_{\min}$ 为像的调制对比度; $I_{\max} + I_{\min}$ 为目标调制对比度。

为了达到温度平衡,光学组件的温差应满足 MTF 值下降不大于 5%的条件。将 MTF 值下降 5%平均分配给光学组件的四项温差,即每项温差导致 MTF 值的下降不大于 1.25%。上阈值的计算方法为:在相机温度平衡的条件下计算 MTF 值,然后分别制造出光学组件的各项温差,分别计算 MTF 值,并与相机温度平衡时的 MTF 值进行比较,MTF 值下降 1.25%时对应的温差即为上阈值。

通过上述方法可以确定主镜组件自身温差的上阈值为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主镜组件与基准温度、次镜组件、三镜组件的温差的上阈值分别为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 根据上阈值可以确定主镜组件自身温差的下阈值为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主镜组件与基准温度、次镜组件、三镜组件的温差的上阈值分别为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 温度控制算法

依据热控策略及温度控制阈值, 温度控制算法如图 3 所示。图 3 中 T 表示主镜组件的周向温差, $T_{\text{基}}$ 表示主镜组件与基准温度的温差, $T_{\text{次}}$ 表示主镜组件与次镜组件的温差, $T_{\text{三}}$ 表示主镜组件与三镜组件的温差。

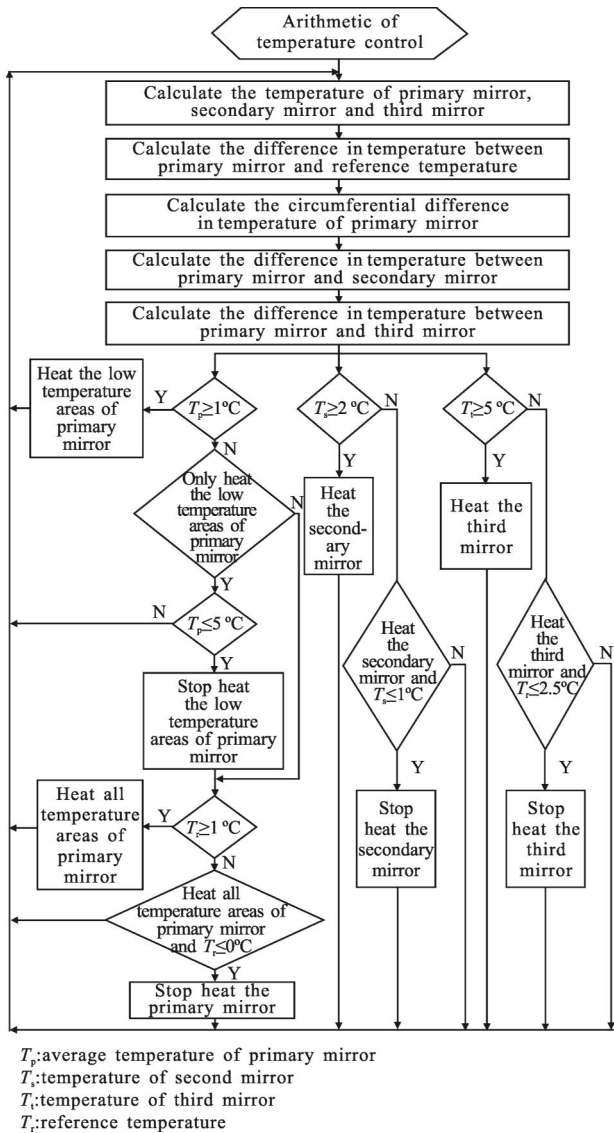


图 3 温度控制算法

Fig.3 Arithmetic of temperature control

4 相机在轨试验

通过某型号空间相机在轨的实际应用, 验证基于温度水平的主动热控系统的正确性, 测温及控温周期为 512 ms , 主镜组件自身温差验证结果见图 4。

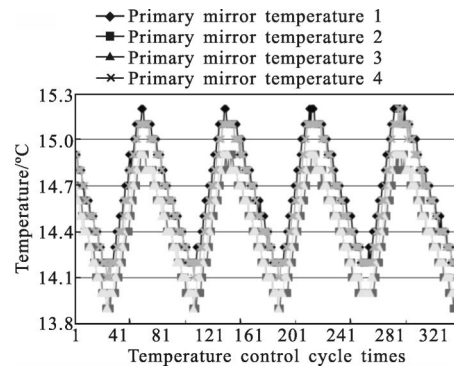


图 4 主镜组件温度

Fig.4 Temperature of primary mirror

图 4 中, 在温度平衡时, 主镜组件四个区域之间的温差始终不大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足热控策略要求。

主镜组件、次镜组件、三镜组件随基准温度达到温度平衡的验证结果见图 5。

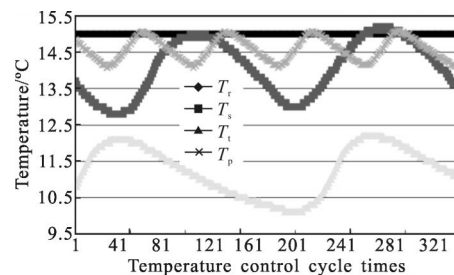


图 5 光学组件温度

Fig.5 Temperature of optics module

图 5 中, 基准温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主镜组件温度随基准温度规律性变化, 并与基准温度保持相对的温度平衡; 次镜与三镜组件温度随主镜组件温度规律性变化, 并与主镜组件温度保持相对的温度平衡; 以基准温度作为驱动条件的热控策略, 使相机主镜、次镜、三镜组件温度相对于基准温度保持较为稳定的温度水平。

主镜组件与基准温度、次镜组件、三镜组件的温差验证结果见图 6。

图 6 中, 相机温度平衡状态下, 主镜组件与基准温度的温差 $T_{\text{基}}$ 不大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主镜与次镜组件温差

$T_{\text{次}}$ 不大于 2°C ,主镜与三镜组件温差 $T_{\text{三}}$ 不大于 5°C ,相机温度控制结果满足热控策略要求。

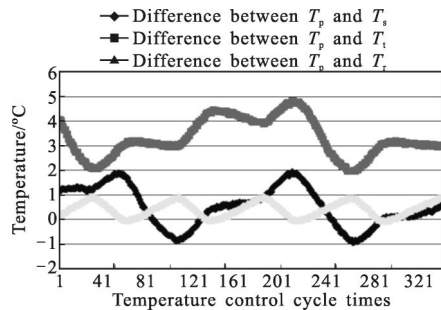


图6 热控温差

Fig.6 Difference in temperature of thermal control

5 结论

通过某型号空间相机的在轨验证,基于温度水平的主动热控系统较好地解决了相机温度不平衡、轴向温差大等问题,提高了温度采集及温度控制的可靠性。通过对相机的热控进行需求分析,确定了热控策略;相机图像质量无本质影响作为条件,通过分析和实验获得了热控策略中的各项控温指标。通过试验可知,相机温度平衡时各个主要光学组件的温度控制结果满足热控策略要求。基于温度水平的主控热控系统具有一定的通用性,可作为目前空间相机主控热控的有效补充。

参考文献:

- [1] Jin Shi, Hu Jun, Cao Xiaotao. Design of testing system of active thermal control for space camera [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optic*, 2010, 3(2): 126-132. (in Chinese)
金实, 胡军, 曹小涛. 航天相机主动热控测试系统设计[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 126-132.
- [2] Wu Xuefeng, Ding Yalin, Wu Qingwen. Thermal design for near space optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1159-1165. (in Chinese)
吴雪峰, 丁亚林, 吴清文. 临近空间光学遥感器热设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1159-1165.
- [3] Luo Zhitao, Xu Shuyan, Chen Liheng. Thermal control of high-power focal plane apparatus [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2187-2192. (in Chinese)
罗志涛, 徐抒岩, 陈立恒. 大功率焦平面器件的热控[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2187-2192.
- [4] Zi Keming, Wu Qingwen, Guo Jiang, et al. Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote-sensor [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 401-407. (in Chinese)
訾克明, 吴清文, 郭疆, 等. 空间光学遥感器 CCD 焦面组件热设计[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 401-407.
- [5] Li Ming, Wu Qingwen, Jiang Fan, et al. Design of thermal control system for three-linear array mapping cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1367-1373. (in Chinese)
黎明, 吴清文, 江帆, 等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1367-1373.
- [6] Fan Hanlin, Fan Yufeng. The demand of materials in the spacecraft thermal control subsystem [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(2): 135-138. (in Chinese)
范含林, 范宇峰. 航天器热控分系统对材料的需求分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 135-138.
- [7] Li Yunze, Wei Chuanfeng, Yuan Lingshuang, et al. Simulation of micro spacecraft active temperature control system using thermoelectric cooler [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(10): 149-152. (in Chinese)
李运泽, 魏传锋, 袁领双, 等. 应用热电制冷器的微型航天器主动温度控制及仿真 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 149-152.