

多元红外三通道辐射制冷器研究

韩 军,潘雁频,陆 燕,洪国同,逢 伟,王少臣
(兰州物理研究所,甘肃 兰州 730000)

RESEARCH ON RADIANT COOLERS FOR THREE CHANNELS MULTIELEMENT INFRARED DETECTORS

HAN Jun, PAN Yan-pin, LU Yan, HONG Guo-tong, PANG Wei, WANG Shao-chen
(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A spaceborne radiant cooler for cooling multielement infrared detector array in Infrared Multispectra Scanning System (IRMSS) is developed. The infrared remote sensors used in space must be cooled to the low temperature and The radiant coolers are quite suitable to the needs of such an application. The developing process, program design, its fundamental construction, theoretical calculating method, environment simulation experiments and their results are described. The working properties in orbit are also included.

Key words: radiative cooling; infrared remote sensing; simulation experiment

摘 要: 研制了一台用于冷却红外多光谱扫描仪中多元红外探测器列阵的星载辐射制冷器。空间红外遥感器需要制冷系统,而辐射制冷器非常适合空间遥感器的需求。简要介绍了它的研制情况,方案设计思路,辐射制冷器基本构成,理论计算方法,做过的模拟试验及其结果,并对在轨使用情况作了简介。

关键词: 辐射制冷;红外遥感;模拟试验

中图分类号: TB651

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2000)03-0138-04

1 引 言

人类利用卫星红外遥感技术实现了天文观测、大气环境监测、地球资源普查、军事侦察、海洋资源调查等工作。红外遥感设备中的核心部件红外探测器件必须在低温环境下才能正常工作,得到满意的性能。目前空间红外遥感器在轨使用过的制冷机主要有辐射制冷器(辐冷器)及斯特林制冷机。辐冷器是利用宇宙空间的真空与冷黑环境,以辐射换热方式,通过辐射器不断向冷黑空间辐射热量并尽可能屏蔽外部热流以达到被动制冷的目的。它具有无振动、无噪声干扰、极少耗功、寿命长、可靠性高等优点,非常适合空间遥感器的需求。随着技术及工艺的不断提高,为了获取更高的成像分辨率,先进的红外遥感器一般都采用多谱段、多元红外探测器列阵的成像系统,从而需要为其提供更大的制冷量及更低的制冷温度,这就给制冷量相对较小、

收稿日期:2000-05-12

作者简介:韩 军(1936-),男,陕西汉中,人,研究员,长期从事空间低温技术与物理研究工作。

制冷温度相对较高的辐冷器提出了更高要求。研制大制冷量、较低制冷温度的辐冷器势在必行。经过多年努力,已研制成一种用于3个谱段、2路耦合进光、冷却多元红外探测器列阵的辐射制冷器。

2 方案设计

红外多光谱扫描仪有3个红外谱段,每个谱段均为多元红外列阵。按光学设计要求,3个红外列阵冷焦面需共面,其中2个谱段的红外列阵拼接在一起,减少了一个通道的冷损。方案上考虑将一个谱段列阵安装在二级冷头上,拼接的2个谱段列阵安置在一级冷头上,光路分两个通道进光,对结构设计而言有一定的困难。红外探测器件的制冷温度要求达到105 K以下,为此,辐冷器设计成二级制冷结构形式。

设计时需要重视以下几方面的问题:(1)减小漏热;(2)三防(防污染、防辐照、防冷焊);(3)抗电磁干扰;(4)力学稳定性;(5)模态分析;(6)星地兼容。

根据给定边界参数条件,确定了辐冷器的基本外形:一级锥体、二级辐射器、一级辐射器、地球屏构成W型,其主要结构由二级组件(二级)、一级组件(一级)、外壳(包括地球屏)、安装圈组成,如图1所示。

由于二级与一级、一级与外壳之间存在较大温差,采用级间隔热支撑将它们相连;其中二级为最低制冷工作温区,是辐冷器的核心部分,一级作为二级与外壳之间的冷屏蔽,外壳上装有地球屏,可屏蔽地球对一级的红外辐射及阳光反照,安装圈是辐冷器与红外多光谱扫描仪的机械接口。为了防止环境污染,屏口设置了防污罩,入轨后根据情况发指令解锁打开。辐冷器的辐射器只有面对温度比它更低的低温冷黑背景时才能够降温制冷,在大气环境下不存在这一条件,而红外多光谱扫描仪需要在大气环境中进行光学准直、排除电磁干扰、实验室成像等工作,要求辐冷器在大气环境中也能够制冷,为此在一级与二级上设计了两个小型杜瓦。需制冷时可以连接液氮制冷系统或节流制冷系统,达到为红外探测器列阵提供冷源的目的。辐冷器对漏热较为敏感,主要有辐射漏热和传导漏热。为了减少辐射漏热,金属表面要制成红外反射率很高的镜面。级间支撑选择低热导、高强度的材料制作。一级与外壳之间及外壳背面包络高效多层隔热体。传感器引线也要选择耐低温、热导率小的材料。在辐冷器的各个温区设置了测温传感器及温控加热器,并为此研制配备了一台辐冷控制器。

3 设计结果

辐冷器热设计计算是依据卫星总体给出的轨道特性及红外多光谱扫描仪提出的各项技术要求,选择最合适的几何参数,以便达到最佳的辐冷器性能指标。实际计算过程选择了数十种参数组合进行比较,选择多种参数组对各部件热平衡参数进行计算,根据计算结果选择了其中最合适的参数组进行结构设计。辐冷器热设计计算工作量是很大的,要经过大量繁杂的数学运

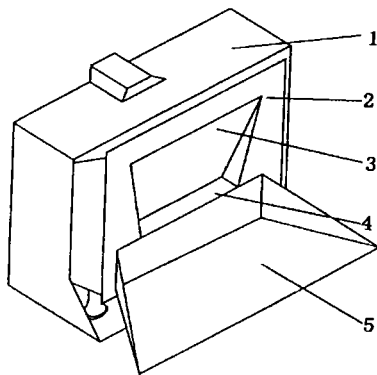


图1 辐射制冷器结构示意图

1. 安装圈; 2. 外壳; 3. 一级组件;
4. 二级组件; 5. 地球屏。

算。依据辐射换热原理对辐冷器二级、一级、外壳分别列出下列热平衡方程^[1]

$$\varepsilon_p A_p \sigma T_p^4 = \phi_{2e} + \phi_{2r} + \phi_{2s} + \phi_o + \phi_{2k} + \phi_{2l} + \phi_{2j} \quad (1)$$

$$\varepsilon_d A_d \sigma T_c^4 = H_e + H_h + H_i + H_k + H_l + H_o + H_j \quad (2)$$

$$\varepsilon_h A_h \sigma T_h^4 = H'_e + H'_i + H'_l + H'_k + H'_s + H'_l - H'_c \quad (3)$$

式中 ε_p 、 ε_d 、 ε_h 为二级辐射器、一级辐射器、外壳辐射板的发射率; A_p 、 A_d 、 A_h 为有效辐射面积 (m^2); T_p 、 T_c 、 T_h 为温度 (K); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϕ_{2e} 为地球反照经锥散射给二级的热量 (W); ϕ_{2r} 为二级辐射器接收锥体正面的辐射热 (W); ϕ_{2s} 为二级背面接收一级的辐射热 (W); ϕ_o 、 H_o 为光学窗口的漏热 (W); ϕ_{2k} 、 H_k 、 H'_k 为支撑传导漏热 (W); ϕ_{2l} 、 H_l 、 H'_l 为引线漏热 (W); ϕ_{2j} 、 H_j 为焦耳热 (W); H_e 为锥口接收地球的红外辐射和反照阳光 (W); H_h 为一级接收地球屏的辐射热 (W); H_i 、 H'_i 为级间多层隔热的等效辐射热 (W); H'_e 为外壳接收地球的红外辐射和反照阳光 (W); H'_l 为地球屏和防污罩接收卫星表面的辐射热 (W); H'_s 为与多光谱扫描仪接口的传导漏热 (W); H'_c 为一级传给外壳的冷功率 (W)。解联立方程, 得到辐冷器在工作寿命内二级制冷温度及冷功率平均值: 小于 105 K、大于 16 mW。

4 模拟试验

辐冷器作为星载产品在发射入轨之后具有不可维修性, 因此它的可靠性要求很高。地面模拟试验既要接近真实, 模拟又要完整, 星载产品一般要经过力学环境试验、热真空试验、热平衡试验、高能粒子辐照试验、防冷焊试验等。

4.1 力学环境试验

主要是验证辐冷器在发射状态下各结构件是否稳定可靠, 冷焦面是否变形位移, 并根据实验效果选取合适的支撑部件参数, 改进辐冷器结构薄弱环节。试验前要考虑设计强度好、刚度足够高的连接支架以保证试验不失真。我们为试验准备了一台工程力学样机, 进行了离心、冲击、正弦扫描、随机振动试验等。在各项试验中, 各结构件都完好无损, 特别是在产品与红外多光谱扫描仪的整机试验后测量冷焦面变化率在规定指标内。

4.2 热模拟试验

根据辐冷器的特性, 辐冷器的性能指标测试必须要在空间环境模拟器中进行, 因此它的热模拟试验既完成了热真空试验、热平衡试验, 也完成了对辐冷器各性能指标的测试。试验是在自行研制的小型空间环境模拟器中进行的^[2], 该系统清洁无油, 不会对辐冷器表面产生污染, 模拟的冷背景温度低于 30 K, 黑度 0.98, 热沉温度低于 100 K, 有载真空度优于 $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。在第一台飞行样机的试验中, 二级制冷温度达到了 96.8 K 之后还在缓慢降温, 因时间关系停止了最低温度的测试试验。根据推算估计可达 95 K 左右, 回温后温控在 100.5 K。测出的冷功率 18 mW, 满足设计指标要求。

4.3 其它试验

(1) 对于辐冷器活动部件, 上天后在高真空状态下有发生冷焊的可能, 为此对活动部件表面进行了处理与防冷焊试验。

(2) 辐冷器暴露在星体外的表面涂层在空间环境中要受到宇宙高能粒子的辐射而使表面性能衰退, 要对这些结构件表面进行一定剂量的辐照试验, 以检测是否满足使用寿命要求。

(3) 辐冷器设计了星地兼容小型杜瓦,用于配合地面制冷系统使用,以便解决红外多光谱扫描仪需要在大气环境中制冷问题。靠冷却的红外探测器列阵把辐冷器光学准直在红外多光谱扫描仪的光轴上。当辐冷器配节流制冷系统工作时,一、二级制冷温度在 $80 \sim 190 \text{ K}$ 之间可调;当配液氮制冷系统时,最低温度可达 92 K ,并能调节、设定到所需的温度,完全能够满足红外多光谱扫描仪在大气环境下的各种试验和测试要求。

5 结 论

(1) 根据卫星轨道条件以及红外多光谱扫描仪提出的各种要求,建立了一整套数学模型,并进行了辐冷器各项轨道外热流的分析与量化,进行了辐冷器的优化设计和繁杂的辐射耦合视因子的数学运算求解。

(2) 设计的星地兼容系统实现了多通道多元红外列阵在大气环境下与红外相机的光学准直与调焦技术,既保证了星上工作精度,便于靶场测试,也方便了红外多光谱扫描仪繁多的地面试验,节省了大量经费开支。

(3) 通过了各项模拟试验,试验结果表明辐冷器理论计算准确、可靠,结构设计合理,各项性能指标达到了使用要求,为上天应用提供了保证。

(4) 在轨测试结果表明辐冷器初期工作温度可达到 96 K ,冷功率富裕量较大。地面模拟试验结果与其比较基本相当,说明在地面的热模拟试验方法正确,设定的模拟参数合理。

(5) 虽然多元多通道的红外多光谱扫描仪的辐冷器热环境较恶劣,但选取合适的设计参数,优化结构设计,严格控制质量,试验充分,是能够获得满意的性能指标的。

致 谢:有许多同事参与了本项目的研制并给予了帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 达道安. 空间低温技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991, 8: 36 ~ 41.
- [2] 韩军. 空间辐射制冷器的热模拟试验方法[J]. 真空与低温, 1996, 2(3): 145.

敬 告 作 者

为适应我国信息化建设需要,扩大广大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”,其作者提成与本刊印刷版稿酬一次付清。如作者对此不同意,则请来稿时说明,本刊将做适当处理。

(本刊编辑部)