

文章编号: 1672-8785(2011)01-0016-07

制冷技术在空间红外光学系统中的应用及其发展趋势

刘建峰 沈 飞

(上海航天技术研究院第 803 研究所, 上海 200233)

摘 要: 以制冷技术在空间红外望远镜中的应用作为出发点, 详细分析了目前国外最先进的三个空间红外望远镜 (SIRFT、ASTRO-F、WISE) 的红外光学系统所采用的制冷方式和关键技术, 论述了制冷技术对空间红外光学系统的重要性及其发展趋势。通过对不同制冷方式进行优缺点分析和可行性论证, 得出了发展我国空间红外光学系统制冷技术的必要性与可行性。

关键词: 制冷技术; 空间红外光学系统; 超流氦制冷; 机械制冷

中图分类号: TB66 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.01.003

Application of Cooling Technology in Space Infrared Optical Systems and Its Development Trend

LIU Jian-feng, SHEN Fei

(No. 803 Research Institute of Shanghai Academy of Space Flight
Technology, Shanghai 200233, China)

Abstract: The cooling methods and key technologies used for infrared optical systems in three most advanced space infrared telescopes (SIRFT, ASTRO-F and WISE) in the world now are analyzed in detail. The importance of cooling technologies for space infrared optical systems and their trends are discussed. According to the analysis of the features and feasibility of different cooling methods, the necessity and feasibility to develop the cooling technologies for space infrared optical systems in China are indicated.

Key words: cooling technology; space infrared optical system; superfluid helium cooling; mechanical cooling

1 引言

随着空间红外技术和军事技术的发展, 人们对红外探测仪器性能的要求也越来越高。当探测目标信号十分微弱、信号距离相对较远以及温度较低时, 探测仪器中光学系统与支撑结构的热辐射和杂散光就会成为影响探测性能的主要因素。为了减小这一影响, 必须采用制冷技术将光学系统和相关支撑部件的温度冷却下来,

这样才能有效地减少背景光子通量, 发挥背景极限探测器的作用, 从而提高探测器的灵敏度。

但是一直以来, 由于光学系统在空间低温状态下工作时会存在一系列问题 (例如光学材料特性和光学元件单元及系统整体性能的变化、光学元件变形、低温污染等), 空间红外光学制冷技术的发展一直受到限制, 其应用领域也没有得到大范围推广。自 20 世纪 70 年代开始, 美

收稿日期: 2010-10-14

作者简介: 刘建峰 (1982-), 男, 工程师, 主要从事制冷方面的研究。E-mail: jianfengliu888@163.com

国最先对红外光学系统的制冷进行了研究, 其成果最初主要用于各种观察与测量系统, 例如低温红外望远镜、星载干涉仪器等, 而且它们都成功有效地完成了外太空探测任务。一些欧洲国家也对空间红外光学观察仪器进行了研究^[1]。我国在这方面的起步相对较晚, 目前还没有相关的报道案例。

2 制冷技术在空间红外天文卫星中的应用

为了满足对外太空中的低温星体或低温物质进行探测的需要, 空间红外光学系统一般都须采取低温制冷措施以保证观测精度。早期红外光学系统中采用的制冷方式一般为储存式(液体/固体制冷)单一的制冷系统, 其中液体以超流氦居多。表 1 所示为各个国家针对各种任务所发射的红外卫星的相关概况^[2]。

由于光学系统和仪器设备对工作温度的要求不同, 很多探测系统所采用的制冷系统也不再是简单的单一制冷方式, 而是采用两种或两种以上的制冷方式的组合。下面主要以目前最先进的 SIRTf 和 ASTRO-F 红外望远镜及其 WISE 为例介绍低温制冷技术在红外光学系统中的应用。

2.1 SIRTf

SIRTf(又称“斯皮策”)空间红外天文卫星是美国于 2003 年发射的, 它是继“哈勃”空间望远镜、康普顿 γ 射线天文台和钱德拉 X 射线天文卫星之后的第四颗天文卫星。其工作波长范围为 $3\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$, 主反射镜的直径为 85cm, 它是目前口径最大的空间红外望远镜^[3]。

SIRTf 的有效载荷须在 1.4K 的低温环境下工作, 此环境由低温保持器提供。低温保持器主要由真空外壳、内部和中间的蒸汽冷却防护层、氦罐和流体管理系统组成。其中, 氦罐内装有 360L 超流氦。SIRTf 进入预定轨道后, 须用一周时间通过与外界辐射换热使卫星外壳冷却至 50K。然后其望远镜和外壳的热耦合被切断, 沸腾的低温气体花几周的时间将望远镜冷却至 5.5K, 然后将仪器冷却至 1.4K。具体的制冷过程为: 超流氦吸热蒸发, 产生的冷蒸气通过气液相分离器从乏气管道排出液氦罐; 低温蒸气通过管道系统依次经过焦平面仪器腔、主镜、塔状镜、二次镜、障板结构和恒温器外壳的三道气冷屏后, 其冷量得到充分回收, 然后各处的寄生漏热被消除, 并通过恒温器外壳上的排气口排入太空, 其示意图如图 1 所示。像 SIRTf、ISO、IRAS 和 IRTS 等中很多成功的红外光学制冷系统都是采用这种超流氦的方式进行制冷的^[4,10]。

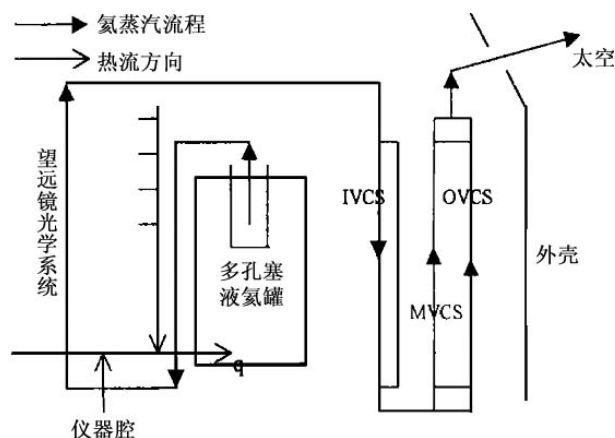


图 1 储存(液体氮)式制冷流程的示意图

表 1 部分红外天文卫星的概况

卫星名称	发射国家	发射时间	设计或运行寿命	探测目标
IRAS	荷、美、英	1983.1	10 个月	太阳系天体、恒星、分子云、行星状星云、银河星系、类星体
COBE	美国	1989.11	—	红外和微波宇宙背景探测, $1.2\mu\text{m} \sim 1.0\text{cm}$
ISO	欧空局	1995.11	30 个月	$2.4\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 太阳系—星系
SIRTf	美国	2003.4	5 年(设计)	探测 $2.5\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 灵敏度提高 1000 倍
ASTRO-F	日本	2006.2	550 天(设计)	$1.7\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$ 恒星、褐矮星、新彗星、太阳系外行星系

这种低温系统需要由新型、高效的绝热系统来支撑,如图 2 所示。其中,铝质的防太阳辐射板及其内部的一块蜂窝板有效地阻隔了太阳与恒温器外壳之间的辐射传输。两者之间还有多层绝热材料和紧凑的防辐射布置,使各个环节的温度迅速递减。经实验验证,当最外层的温度为 340K 时,多层材料的温度为 225K,蜂窝板的温度降至 114K,而恒温器外壳的温度就只有 38K 了。38K 的外壳温度是液氮浴温维持在 1.4K 的有利保障。恒温器内的绝热也是采用三层气冷屏和一个真空外壳。同时,设置在动力舱与载荷舱之间的两块蜂窝板也有效地阻止了室温设备与低温系统之间的辐射传输^[5]。

2.2 ASTRO-F

ASTRO-F 是日本的首颗红外天文卫星,它于 2006 年 2 月 22 日由“M-5”型火箭运载发射,其望远镜能够观测到 $1.7\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$ 的远红外广阔波段。

ASTRO-F 上搭载有液氮冷却型红外望远镜、远红外测量仪和红外相机。其中,望远镜和大部分探测器被制冷至 5.8K,远红外探测器

被制冷至 1.8K。它的制冷系统采用了复合制冷方式:外壳跟星体隔离,被辐冷至 200K;利用两套两级斯特林制冷机冷却外屏,既减少了低温杜瓦的漏热,又节省了氦的用量,从而减小了整体的体积和重量;低温杜瓦中有 170L 超流氦。为了保证中远红外探测器的极低工作温度,采用了超流氦制冷。通过合理利用氦 I 和氦 II 的物理特性,使其与被冷却器件进行热交换,从而满足了系统的温度需求。红外天文观测有效载荷框架的示意图如图 3 所示^[2]。

2.3 WISE

WISE 又称广域(角)红外测量探测器(红外望远镜),它于 2009 年 12 月 14 日搭载“德尔塔 II”运载火箭发射升空。它由四个 1024×1024 元红外焦平面探测器阵列组成,其探测范围能够覆盖从 $2.8\mu\text{m}$ 到 $26\mu\text{m}$ 的红外波段。其中,碲镉汞(MCT)探测器被冷却至 32K,可以探测 $3.3\mu\text{m}$ 和 $4.6\mu\text{m}$ 两个中波波段。而砷化硅(Si:As)探测器被冷却至小于 8.3K 的水平,可以用来探测 $12\mu\text{m}$ 和 $23\mu\text{m}$ 两个长波波段^[6]。

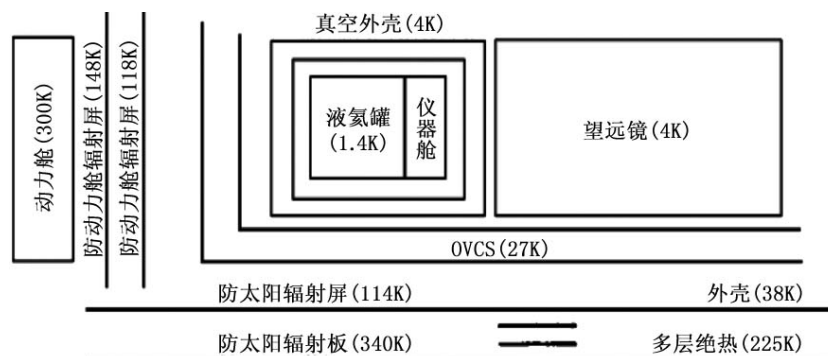


图 2 SIRTf 中绝热系统的简图

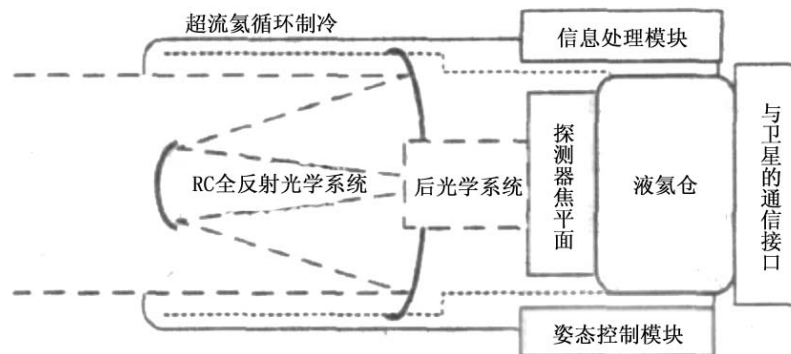


图 3 红外天文观测有效载荷框架的示意图

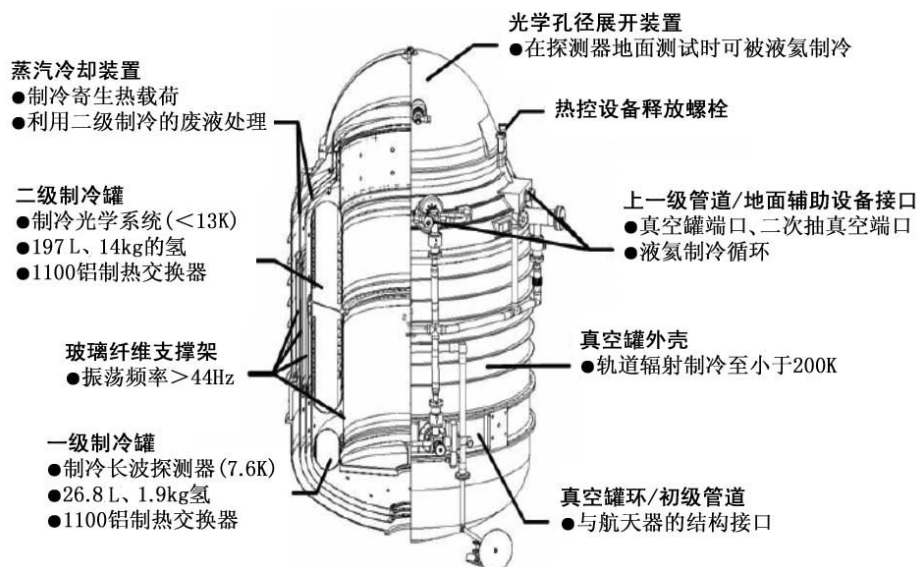


图 4 WISE 的低温保持器

WISE 的低温保持器是由美国洛克希德·马丁公司提供的。它用两个低温真空储存罐组成了两个单独的制冷区域, 制冷是由放在低温保持器中的固态氢制冷剂完成的。它们分别为探测器提供小于 17K 和小于 8.3K 的低温环境。WISE 的第二级低温储存罐工作在 10.2K 的环境温度下, 它可将光学组件冷却到小于 17K 的温度范围内, 其主要热负荷来自外壳、外界环境、MCT 探测器阵列和望远镜的光学系统。而工作温度为 7.3K 的初级低温储存罐则位于二级低温储存罐的下侧, 仅用来冷却砷化硅红外焦平面阵列 (FPMA)。根据热负荷的大小和排气口的尺寸, 可以调节低温储气罐的气体压力与温度。制冷剂的液氢量比设计时多了一倍, 这样可以减少风险和延长使用寿命。低温储存罐的排气口位于飞行系统的中心, 排气口的大小和排气速率都需要预先设计好。为了减少制冷剂的负荷, 真空的外壳必须工作在 200K 以下, 因此在面对太阳的一侧通过添加高发射率、低吸收率的 MLI 绝热涂层来减少太阳的辐射热, 在背对太阳的一侧通过向太空辐射散热将热量辐射出去。这样的设计能够使真空壳的外界温度降低。据此预测, 其在轨工作时间大概为 15.6 个月。

除了以上三个比较典型的红外光学系统采用了低温制冷技术之外, 表 2 还列出了其它空间

光学系统所采取的不同制冷措施^[7,8]。

3 制冷系统的特点及其关键技术

由以上分析可以看出, 由于目前空间红外望远镜需要较低的温度, 它们采取的制冷措施大部分都是通过储存式 (液体或固体) 的制冷方式来冷却光学系统的, 当然还有很多是采用两种或两种以上制冷方式进行组合制冷的。

表 3 列出了空间红外光学系统常用的几种主要制冷方式及其优缺点。

下面介绍红外光学系统中各种不同制冷方式的关键技术。

3.1 储存式 (超流氦、液氢或固体) 制冷

红外天文卫星的工作寿命取决于制冷系统, 而中远红外探测器性能的优劣则取决于其工作的环境温度。目前氦制冷系统在美国、欧洲和日本等都已经有了较为成熟的应用, 特别是被运用在空间环境中。

氦制冷系统的关键技术包括: 超流氦储存容器的密封及绝热技术; 超流氦与被冷却器件的热交换方式; 超流氦在无重力条件下的气液分离技术; 超流氦的质量测量技术; 超流氦流量调节器等关键技术。

由于超流氦具有超流动特性、很小的粘度系数和较高的渗透性, 在低温下会发生变形或

表 2 空间光学系统中采取制冷措施的空间飞行器及其仪器

空间飞行器及仪器	时间	研究机构	光学系统 制冷温度 (K)	光学系统尺寸	制冷方式	工作温度	制冷量
戈达德高精度光谱干涉仪	2005	戈达德空间飞行中心光学组	20	Φ1200 主镜 Φ150 通光孔	机械制冷机	20	1
哈勃望远镜 3B	2002.02	NASA HST	35 ~ 77	Φ2000 镜筒	布雷顿循环制冷机 & 辐射制冷	35K	7@35K
IRSpace-borneSensing VIII	2000	USA	< 100K		实验室光学系统冷变形		
普朗克宇宙背景辐射计 (CMB)	2000	ESA	0.1 ~ 20		吸附式制冷 & 辐射式制冷	0.1	1.5W@35K
地平线 -2000	2000	ESA	5 ~ 20	Φ1700 镜筒	微型机械制冷机 & 辐射制冷	2	1
热层 - 电离层 - 中间层探测器	1996	犹他大学 兰利实验室	230		脉管制冷机 & 辐射制冷	75	> 1
NASA-ST63 INSTEP 低温实验 (CSE)	1995.02	休斯顿 航天中心			斯特林制冷机 & 相变蓄冷器	65	
爱迪生太空望远镜	1993	ESA	20	Φ1700 镜筒	辐射制冷	15	
FIRST PLANK	2007		1.65		液氮	1.65	

表 3 几种空间常用的制冷方式

制冷器	制冷原理	优点	缺点	轨道寿命
辐射制冷器	向空间高真空、深低温冷背景辐射自身热量	无运动部件, 无振动和电磁干扰, 功耗小、寿命长, 技术成熟	体积大, 制冷温度高、冷量小, 对轨道及卫星姿态要求严格, 易污染	寿命长, 数年
储存 (固液) 式制冷	利用固态或液态进行相变制冷	无振动, 工作温度低, 对轨道无要求, 技术成熟	重量大, 体积大, 寿命短, 对卫星姿态有影响	较短, 数月
机械制冷机	利用封闭式制冷机进行循环制冷	结构紧凑, 制冷量大, 温度范围广, 对轨道及卫星姿态要求低, 安装灵活	功耗大, 有散热问题, 有振动及电磁干扰, 技术成熟度低	相对辐射制冷时间短, 相对固体时间长
热电制冷	帕尔帖效应	结构简单、可靠、紧凑, 工作时无噪音	制冷器效率低, 耗电大, 制冷温度高	较长

物理特性变化, 导致常温下不漏的装置在低温下可能会产生大量泄漏, 而且超流氦又具有超导热性的特点, 所以必须采用多层绝热技术和添加冷屏的方法来控制低温杜瓦的漏热问题。在失重条件下, 气体和液体之间不存在明显的分离界面, 它们完全混合在一起。多孔塞相分离器结构简单, 无运动部件, 在空间应用中具有较高的可靠性, 已被广泛应用于空间超流氦制冷系统, 但其设计制作相当困难。此外, 氦的质量

是确定星体工作寿命的重要依据。因此, 如何在无重力、气液相混合的空间中测定超流氦的质量, 以及如何根据热量大小调节超流氦的流量以维持器件的恒定工作温度, 都是需要解决的问题。

3.2 辐射式制冷

由于辐射式制冷器对空间环境很敏感, 在采用辐射式制冷器的制冷方式之前必须对轨道上的热环境进行详细分析, 并对不同轨道位置

和辐射器不同方位上的空间热流的影响进行热分析计算, 其中包括对屏蔽罩与冷板之间的换热分析。此外, 还应考虑屏蔽罩内侧采用镜面反射涂层等问题, 计算时常用射线跟踪的蒙特卡洛法。

在辐射制冷设计中应考虑: (1) 冷板辐射表面应有高发射率和低吸光比; (2) 合理选择辐射器的星上位置; (3) 屏蔽罩应能屏蔽和发射绝大部分的外部热流, 罩内应有高反射率涂层且有高的镜式成分, 罩外采用高性能的低温隔热材料, 外表覆盖低 α_s/δ 涂层的膜; (4) 具有良好的隔热结构; (5) 有效地防止和消除污染; (6) 提高工艺性能等。

此外, 在实际应用中, 辐射制冷器与敏感器之间的集成或者冷量传输也是非常重要的。如何把大面积冷板上的冷量传给敏感器, 并使寄生漏热降至最小都是需要考虑的重点问题。

3.3 机械式制冷

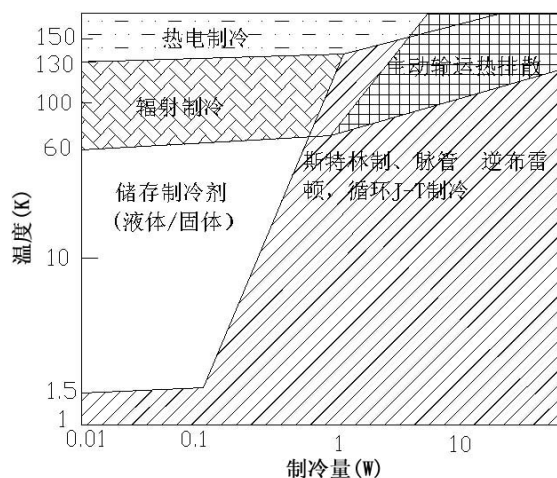
机械制冷机包括斯特林制冷机 (包括现在最新的脉管制冷机)、维勒米尔循环制冷机、逆布雷顿循环制冷机以及现在的研究热点——脉管制冷机。

斯特林制冷机一般用氦作工质。活塞往复运动产生的震动会影响探测效果。此外, 其寿命和耗电量也是斯特林制冷技术需要提高的。近年来, 随着膜片弹簧、公差密封、气体轴承和线性马达等技术的发展, 斯特林制冷机越来越符合空间技术的要求, 同时其能耗和平均无故障时间也得到了逐步优化。

就目前来说, 空间机械制冷技术的发展方向是脉管制冷机。它是一种新型的封闭循环回热式制冷机, 不仅具有回热式制冷机使用寿命长、可靠性高和能量来源方便等优点, 而且更重要的是其制冷器部分完全没有运动部件。因此, 其结构更简单, 冷头振动更小, 从根本上解决了冷腔振动、磨损等问题。但是, 脉管制冷机也有一些待突破的关键技术: 对由重力引起的对流的高敏感性, 特别是当脉管直径大于 10mm 时; 在制冷量相同的情况下, 其体积较大, 限制

了其使用范围; 压力的波动会导致冷头和封壳移位。

图 5 是美国航空航天局根据 60 多个空间制冷系统的相关数据归纳出的制冷技术选用范围的示意图^[10]。



对于一些卫星的有效载荷, 特别是高精度的红外望远镜、红外敏感器的焦平面和镜片仪器以及无线电接收器的低噪音放大器等都需要由制冷技术提供很低的背景温度。此表格为制冷方式的选择提供了一种很好的参考。

3.4 冷量的传输系统和蓄冷技术

对于制冷技术在空间红外光学系统中的应用, 制冷机固然是关键。但是还有一个系统问题不容忽视, 即冷量的传输与控制问题和蓄冷技术。

在空间红外光学系统的制冷技术中, 冷量传输也是一个重要环节。由于制冷装置的特点决定了制冷机不能直接与被冷却的探测器元器件连接, 因此需要采用合适的热传输技术对两者进行热连接, 并要求具有较高的传输效率。此外, 制冷机的制冷负载多, 负荷大, 而且负荷呈现出峰、谷特性。当制冷负荷处于峰值时, 制冷机不能承受。因此, 必须采用新的制冷方法, 以节约制冷功耗与有效负载, 并最终解决光学系统中冷量需求大、制冷负荷极不平稳的难题。

目前, 低温热管技术的发展和基于低温相变蓄冷技术方案的提出, 为低温冷量传输和峰谷问题的解决提供了有效途径。

4 展望

近年来,随着制冷技术、热管(冷量传输)技术、光学无热化处理技术和低膨胀系数光学材料应用等技术的发展,成像与探测技术性能得到了提高,低温红外光学系统表现出了卓越的性能,制冷技术在空间红外光学系统中的应用逐渐成为一种亟需而可行的方法。例如,红外遥感光学系统中将采用十几个光学元件,这些光学元件将需要被冷却至 150K 以下,其控温范围的要求将非常严格。因此,迫切需要解决光学系统的制冷问题。此外,空间交汇红外跟踪技术也需要将光学系统的温度降至一定温度以下,以达到更好的系统性能要求。因此,空间红外光学系统制冷技术是一项亟需而又具有重要应用意义的技术,需要引起我们的重视。

一直以来,空间红外天文技术实力的强弱都是一个国家综合国力的直接体现。很久以前,一些欧美发达国家已经对该研究投入了大量的人力和物力,并取得了巨大的成就。最近十年,日本也开始了这方面的研究,并且发射了 ASTRO-F 红外探测卫星。由于技术上的不成熟,我国到目前为止还没有发射过一颗空间红外天文观测卫

星。因此,加强对空间红外光学系统制冷技术的研究和开发,不仅可以推动空间红外观测技术的发展,而且也将会为我国空间红外探测研究拉开一个新的序幕。

参考文献

- [1] 刘心广, 吴亦农. 超流氦制冷系统在空间红外天文观测中的应用 [J]. 红外, 2008, 29(1): 1-5.
- [2] 刘心广, 吴亦农. 空间红外天文观测中的低温制冷系统 [C]. 中国制冷学会年会, 2007.
- [3] R. J. Spehalski. Space Infrared Telescope Facility (SIRTF) implementation plans [C]. SPIE, 1990.
- [4] 张敏, 王如竹. 超流氦冷却的红外望远镜低温系统 [J]. 低温工程, 1999, 21(6): 12-16.
- [5] 张敏, 王如竹. 空间低温技术的新进展 [J]. 低温工程, 2000, 22(2): 22-17.
- [6] Mark F Larsen. Scott Schick wide-field infrared survey explorer science payload update [C]. SPIE, 2006.
- [7] 吴亦农, 黄志光. 空间低温光学系统研究进展 [C]. 第 16 届十三省(市)光学学术会论文集, 2007.
- [8] Bernard Collaudin, Thomas Passvogel. The FIRST and PLANCK 'Carrier' mission Description of the Cryogenic System [J]. Cryogenics, 1999, 39: 157-65.
- [9] Albert Seidel. ISO after completing its successful mission [J]. Cryogenics, 1999, 39: 135-148.
- [10] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术原理及其应用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 278-279.

新闻动态 News

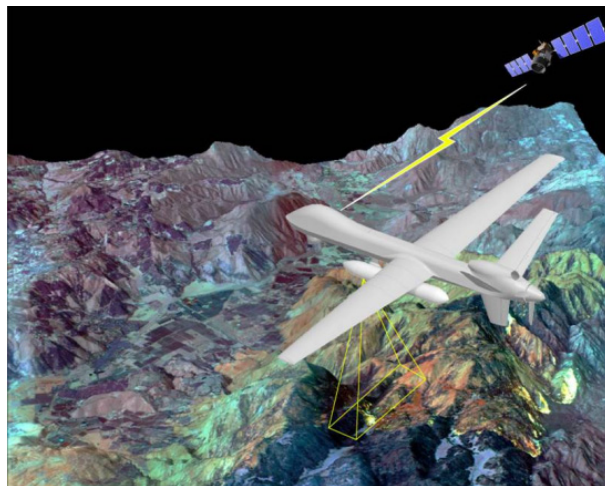
用于传送紧急野火数据的无人 机载红外传感器

据 www.techbriefs.com 网站报道, 自 2006 年以来, 美国航空航天局的德莱顿飞行研究中心 (DFRC) 和艾姆斯研究中心一直在为消防队员们不断完善和论证一种新的可用于野火地理位置定位与数据实时传输的技术能力。

他们是通过将艾姆斯研究中心研制的自主模块化扫描仪 (AMS) 安装在德莱顿飞行研究中心的 MQ-9 Ikhana 遥控飞机机翼下来执行美国西部州防火飞行任务 (WSFM) 的。

AMS 扫描仪中有一台红外传感器, 它能够

辨别出不到 0.3 °C 的温差, 并且最高可探测 540 °C 的温度。



□ 岳桢干