

文章编号: 1672-8785(2008)01-0001-05

超流氦制冷系统在空间红外天文观测中的应用

刘心广, 吴亦农

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 阐述了空间红外天文观测的发展, 针对其中较先进的两颗卫星 (SIRTF 和 ASTRO-F), 研究了其低温系统的构成, 总结出了制冷的工作原理, 指出了氦制冷在空间应用所存在的关键技术问题, 并对其研究进行了展望。

关键词: 红外天文观测; 低温系统; 超流氦制冷

中图分类号: TB661 **文献标识码:** A

Application of Superfluid Helium Cryogenic System in Space Infrared Astronomy Observation

LIU Xin-guang, WU Yi-nong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The development of space infrared astronomy observation is expounded. The structures of the cryogenic systems in two advanced infrared astronomy satellites, SIRTF and ASTRO-F, are studied and their operation principles are summarized. Some key techniques about helium refrigeration used in space are pointed out and the research on them is forecasted.

Key words: infrared astronomy observation; cryogenic system; superfluid helium refrigeration

1 引言

天文学的历史久远, 其萌生和发展一是源于先民渔猎和农耕社会的需要, 二是源于占星术。随着天体物理科学的发展, 观察技术手段越来越先进, 天文学的发展也变得越来越快。自哥白尼建立日心说、伽利略使用望远镜、牛顿创立微积分解析天体的运动至今, 天文学及其相关技术已经发展到可以直接探测百亿光年外的类星体以及可以飞近太阳系行星进行拍照的水平。

但是利用红外波段进行天文观测则起步很晚, 这是因为红外光是直到 19 世纪才由英国科学家赫歇尔发现的。而且当时由于没有合适的

材料制造红外探测器, 在长达 100 多年的时间里, 天体的微弱红外辐射几乎成了天文观测的盲区。直到 20 世纪 60 年代以后, 由于红外技术的发展和空间探测的成功, 久隐深空的天体红外辐射才成了揭示宇宙奥秘的工具, 红外天文学才得以发展, 并逐渐揭开了冷宇宙神秘的面纱。

红外天文学是在 $0.7\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 波长范围内观测和研究天体的科学。一般温度低于 4000K 的天体的辐射主要在红外区, 是空间红外天文观测的主要对象, 其意义体现在^[1]: 揭示冷状态的物质、探索隐藏的宇宙、获得丰富的谱特征

收稿日期: 2007-07-29

注: 本文获中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助

作者简介: 刘心广 (1981 —), 男, 河南人, 在读博士研究生, 研究方向为空间机械制冷机可靠性。

和追溯宇宙早期的生命。红外天文观测意义重大,但是除了少数大气窗口外,地球大气层吸收了几乎所有的红外辐射,所以必须用高灵敏度的地基观测平台来进行空间红外观测。

工作中中远红外波段的探测器自身需要一个近绝对零度的环境温度,而且其探测的目标和背景也均为冷环境。因此,为了降低光学系统本身的热噪声,提高成像质量,就必须制冷。本文将国际上目前最先进的两颗红外观测卫星(SIRTF 和 ASTRO-F)为例,分析空间红外天文卫星中的低温系统的构成,指出实际应用中需要解决的关键技术,并对其发展进行展望。

2 空间红外天文卫星

第一颗空间红外天文卫星(IRAS)由荷兰航天计划局(NIVR)、美国航空航天局(NASA)和英国科学与工程研究理事会(SERC)共同研制,于1983年成功发射,采用太阳同步轨道,在轨运行10个月之久。期间发现了500,000个红外线源,迄今还有许多个源尚待进一步的研究;大约有75,000个源仍然处在恒星诞生阶段的星爆星系中,其他许多则是处在行星形成阶段,被由尘埃组成的星盘环绕着的一般恒星;新的发现包括环绕在织女星周围的尘埃盘和银河核心的第一张影像。IRAS的寿命受限于冷却系统,它携带了720升的超流体氦,藉由超流体的蒸发让探测器保持在1.6K(-272℃)的低温;其温度一旦上升,便会妨碍观测的进行。

之后,随着各项技术的成熟应用,空间红外天文卫星获得了较快的发展,针对各种任务的红外卫星相继发射成功(见表1)^[2-6]。

工作于近绝对零度深低温环境的器件,一般均可选用氦制冷系统。在常压下,液氮的汽化

温度为4.2K。根据物性,氦分为氦I和氦II。氦I和氦II可以相互转化,当对氦I进行减压降温时,在 $T_{\lambda}=2.176\text{K}$, $p_{\lambda}=5034.7\text{Pa}$ 下,液氦(HeI)转化为超流氦(HeII),通常称 λ 为相变。超流氦由于其超高导热率、极小粘度、热-机械效应等特点,被广泛应用于空间红外望远镜的冷却。自1983年的空间红外天文卫星(IRAS)开始,1989年的宇宙背景探测卫星(COBE)、1995年的红外空间天文台(ISO)、2003年的空间红外望远镜(SIRTF)以及2006年日本发射的远红外空间探测器(ASTRO-F)均使用了液氮制冷系统,液氮的携带量从400L到2200L不等。

下面以SIRTF和ASTRO-F为例,分析其低温系统的构成。

3 低温制冷系统

3.1 SIRTF

SIRTF是NASA四大天文卫星计划的最后一颗卫星,其工作波长范围是 $3\mu\text{m}\sim 180\mu\text{m}$,望远镜主反射镜的直径为85cm,是目前口径最大的空间红外望远镜。尽管SIRTF的主镜只有0.85m,但由于自身的低温和距离地球遥远的特点,它在波长 $3\mu\text{m}$ 或更长的红外波段上的表现会胜过所有的地面红外望远镜(哪怕是口径为8m或10m的地基观测台)。在 $3.6\mu\text{m}$ 波长上,SIRTF能够辨认出暗至20等的天体——这相当于从45000km外看一根燃着的火柴。SIRTF的外形及剖面构成图如图1所示。

SIRTF的轨道是“尾随地球的日心轨道”,它处在地球背面的拉格朗日点上,以与地球同样的角速度绕太阳公转。SIRTF在围绕日心运行时,会在地球背面漂移,并以0.1AU/年(1AU等于太阳到地球的平均距离,大约为1.5亿km)

表1 部分红外天文卫星概况

卫星名称	发射国家	发射时间	运行寿命	探测目标
IRAS	荷、美、英	1983.1	10 月	太阳系天体、恒星、分子云、行星状星云、银核星系、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 月	$2.4\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ 太阳系-星系
SIRTF	美国	2003.4	5 年(预计)	探测 $2.5\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$, 灵敏度比以前高 100~1000 倍
ASTRO-F	日本	2006.2	550 天(预计)	$1.7\mu\text{m}\sim 180\mu\text{m}$, 恒星、褐矮星、新彗星、太阳系外行星系

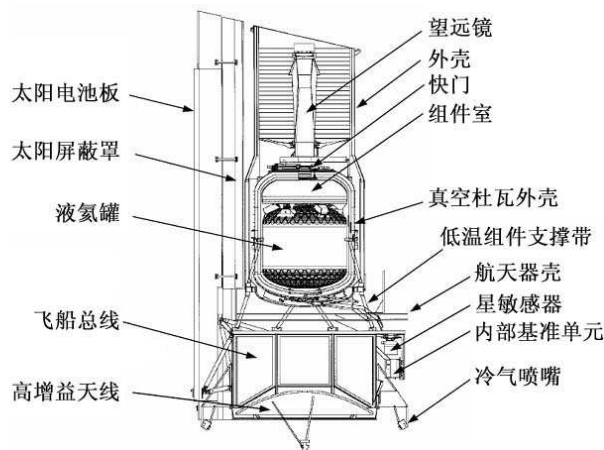
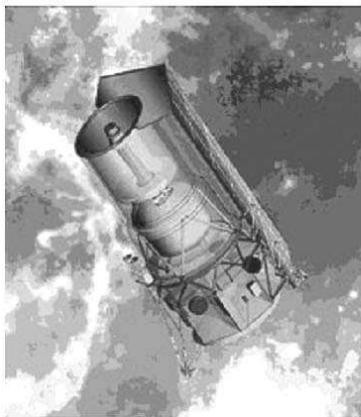


图 1 SIRTF 的外形及剖面构成图

的速度远离地球。在这样的轨道上运行, SIRTF 便有了一个好的热环境, 因为地球不仅反射来自太阳的可见光, 而且其本身也发射红外辐射。任何在地心轨道运行的卫星都沉浸在温度超过 250K 的环境内, 而漂移的日心轨道可使 SIRTF 进入深空, 那里的环境温度大约是 30K ~ 40K。通过用大自然作为冷却源, SIRTF 便可以携带很少的液氮, 从而大大减轻自身的质量。

SIRTF 的有效载荷只有在低温状态下才能正常工作, 因为它采用了对热非常敏感的红外探测器。如果这些仪器不够“冷”, 那么来自其自身的热量会对来自空间观测目标的热量产生干扰, 进而影响观测结果。SIRTF 的低温保持器能够使这些科学仪器的温度在 5 年内一直保持 1.4K。SIRTF 的低温保持器是通过放出液氮罐中的氮气来使 SIRTF 的仪器保持低温的。低温保持器由真空外壳、内部和中间蒸气冷却防护层、氮罐和流体管理系统组成, 氮罐内装有 360ml 超流氮。

望远镜外壳可以把热量辐射到背朝太阳的冷空中; 太阳电池帆板可为望远镜遮挡太阳光; 中间防护部分则可以阻断来自太阳电池帆板和卫星平台的热量。外层防护采用气体制冷, 即用氮罐里的氮气进行冷却。望远镜固定在由蒸气制冷的低温防护罩的顶部。SIRTF 在发射的过程中, 望远镜和低温防护罩会变热。进入预定轨道后, 通过与外界的辐射换热, 卫星外壳需要 1 个星期的时间冷却至 50K。然后, 其望远镜和外壳的热耦合被切断。沸腾的低温气体

用几个星期的时间将望远镜和仪器分别冷却至 5.5K 和 1.4K。这样, 望远镜和仪器便能够正常运行了。

以前的空间红外望远镜都由巨大的制冷器掩盖, 以使望远镜保持在接近绝对零度的温度。这种方式被称为“冷发射”制冷方式, 而 SIRTF 采用的是创新的“暖发射”制冷方式。SIRTF 在环境温度下发射, 在深空由辐射制冷(被动制冷), 只有探测仪器等被密封在真空壳内。“暖发射”制冷方式可大大减小制冷剂的质量和延长望远镜的使用寿命。

3.2 ASTRO-F

日本首颗红外天文卫星“ASTRO-F”于 2006 年 2 月 22 日 6 时 28 分由“M-5”型火箭运载, 从位于日本南部的鹿儿岛县内之浦宇宙空间观测所升空。卫星进入距离地面 745km 的太阳同步轨道后, 以每圈 100min 的速度沿这条轨道运行。这架望远镜能够观测 $1.7\mu\text{m} \sim 180\mu\text{m}$ 的宽广谱区, 拥有出色的空间分辨率和探测能力, 能够对 1000 万个星系进行探查。ASTRO-F 卫星长和宽约为 2m, 高近 4m, 重约 952kg。图 2 所示为 ASTRO-F 的外形及剖面构成图。

ASTRO-F 搭载有液氮冷却型红外望远镜、远红外测量仪和红外照相机, 每半年就可以将整个天空一览无余, 也可以对特定天体进行定向观测。“ASTRO-F”的观测生涯预计为 550 天。它将主要执行五大任务: 探索星系的起源和演变、关注恒星的一生、寻找褐矮星、搜索太阳系外行星系和发现新彗星。

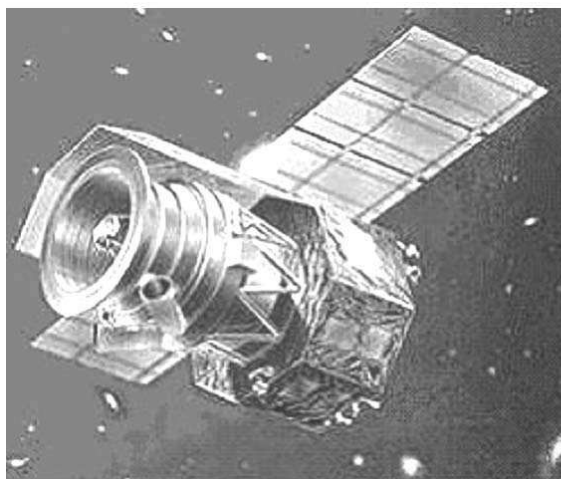


图 2 ASTRO-F 外形及剖面构成

ASTRO-F 的望远镜和大部分探测器被冷却到 5.8K，远红外探测器则被冷却到 1.8K。制冷系统采用复合制冷方式：外壳跟星体隔离，被辐射冷到 200K；外屏由两套两级斯特林制冷机冷却，这样既可以减少低温杜瓦的漏热，又可以节省氦的用量，进而减轻整体的体积和重量；低温杜瓦中盛有 170L 超流氦。

3.3 红外天文卫星中的制冷技术

从上述实例中可以看出：

(1) 为了给中远红外探测器提供极低的工作温度，红外天文卫星中均采用了氦制冷。合理利用氦 I 和氦 II 的物理特性，与被冷却器件进行热交换，可满足系统的温度需求。图 3 所示为红外天文观测有效载荷框架的示意图。

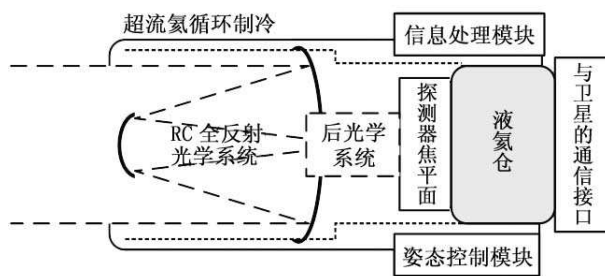


图 3 红外天文观测有效载荷框架的示意图

(2) 红外天文卫星的工作寿命取决于氦制冷系统，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。

(3) 红外天文卫星中的制冷系统设计，不仅取决于系统的热负载，而且还与卫星轨道及运

行姿态有关。

(4) 复合制冷可以有效地减小卫星的体积和重量，但系统的复杂度及可靠性设计难度会增大。

4 关键技术

氦制冷系统目前在美国、欧洲、日本、荷兰等国都已有较成熟的应用，特别是在空间环境中的应用，如上面所列举出的系列空间红外探测卫星。氦制冷系统的成功应用主要在于其关键技术的突破，氦制冷的关键技术主要有如下几个方面。

(1) 储存超流氦的容器的密封及绝热技术

低温储存容器的密封主要难在两个方面：一，超流氦具有超流动特性，粘性系数很小，能够渗透进入很窄的狭缝；二，密封装置在低温下会发生形变或物理特性的改变，导致常温下不漏的装置在低温下可能会大量泄漏。

空间红外探测卫星中超流氦的寿命直接关系到整星的工作寿命，而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。必要时还需要加冷屏，以严格控制低温杜瓦的漏热。

(2) 超流氦与被冷却器件的热交换方式

卫星在空间运行时，由于不存在重力作用，即几乎不存在自然对流的换热方式。热传导和辐射是空间主要的换热方式，超流氦与被冷却器件之间的热交换设计将关系到热量损失的大

小及工作寿命的长短。温度的均匀性可直接影响成像质量。

(3) 超流氦在无重力下的气液相分离技术

超流氦气液相分离器是空间红外探测器冷却系统中的关键部件, 它能在失重条件下限制超流氦向外空间泄漏, 同时排出超流氦制冷所产生的氦蒸气, 从而保持超流氦制冷系统恒温器的温度稳定性。在失重的条件下, 气体和液体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, 在空间应用有较高的可靠性, 已被广泛应用于空间超流氦制冷系统中, 但其设计制作相当困难。

(4) 超流氦的质量测量

由于在无重力作用下, 气体和液体不存在明显的分离界面, 因此也就不能够像在地面上那样通过测量液面高度来计算超流氦的质量。确定超流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就成了限制其应用的一个难点。

(5) 超流氦流量的调节器

在无重力条件下, 如何根据热量的大小调节超流氦的流量, 来维持器件恒定的工作温度, 也是限制其应用的一个难点。

(6) 其他技术

考虑到空间的运行环境和地面的不同, 发射前的系列实验和考核方法尚待探索。

5 展望

一直以来, 空间红外天文技术的强弱都是一个国家综合国力的直接体现。很久以前, 欧美等一些发达国家就已投入大量人力、物力对此

进行了研究, 并且取得了巨大成就。最近十年, 日本也开始了这方面的研究, 并于 2006 年成功发射了一颗红外天文卫星 ASTRO-F。到目前为止, 我国还没有发射过一颗空间红外天文观测卫星, 就连预计 2008 年发射的空间太阳望远镜也没有红外波段, 这是由于空间红外天文观测所涉及的相关技术难度大、投资多的缘故。

对空间红外天文观测仪器的低温制冷系统进行研究, 不仅可以促进氦制冷系统在空间的应用, 推动空间红外观测技术的发展, 深入对浩瀚冷宇宙的认识, 而且还将可以为我国未来的第一颗红外天文卫星升空打下坚实的理论基础, 为我国空间红外探测的进展拉开一个新的序幕。

参考文献

- [1] 焦维新. 当代空间红外天文观测技术的发展 [J]. 国际天空, 2003 年 8 月号.
- [2] P V Mason. Long-term performance of the passive thermal control systems of the IRAS spacecraft [J]. Cryogenics, 1998, 28(2): 137-141.
- [3] E L Wright. COBE observations of the cosmic infrared background [J]. New Astronomy Reviews, 2004, 48: 465-468.
- [4] D B Sanders. The cosmic evolution of luminous infrared galaxies: from IRAS to ISO, SCUBA and SIRTf [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 535-542.
- [5] Stephen M Volz, Russell B Schweickart, Bruce Heurich. Superfluid Helium Cryostat for the SIRTf Cryogenic Telescope Assembly [C]. IR Space Telescopes and Instruments, Proc. of SPIE, 2003, 4850: 1038-1049.
- [6] H Shibai. ASTRO-F mission [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 589-593.

简 讯

红外探测器

Optek 技术公司研制出 OP570 系列的硅 NPN 光电晶体管红外探测器。这种探测器被封装在 0.10×0.08in 的表面安装型管壳内, 并配有高性能的红外透镜。作为

接收器-发射器使用时, 其击穿电压为 30V, 作为发射器-接收器使用时, 其击穿电压为 5V。接收器的电流为 20mA, 功耗为 130mW。接收器的最小接通电流为 2.5mA, 接收器-发射器的最小暗电流为 100nA。它们的工作温度范围为 -25℃至 85℃。

□ 顾聚兴