

# 空间辐射制冷器的发展

余 凯\*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

## 1 前言

近五十年, 随着空间技术的不断发展, 世界各国先后将气象、海洋、资源、污染监测、预警、侦察等一系列实用化对地观测卫星送入太空, 获取了大量有关地球表面信息, 为人类提供了宝贵的资料。

为获取更为详实的观测信息, 这些卫星大都载有红外探测波段的有效载荷, 而此类仪器必须在低温环境下才能够获得高的分辨率和信噪比, 保证其稳定、可靠的探测性能。在航天飞行器上使用的制冷装置主要有: 辐射制冷器, 闭式循环机械式制冷机, 开式循环制冷装置, 热电制冷器, 以及以上述方式组合构成的混合制冷装置等等。而目前在轨飞行仪器上所使用的长寿命(两年以上)应用型制冷装置只有辐射制冷器和斯特林制冷机。

辐射制冷技术是利用宇宙空间自然的高真空、深低温和黑热沉的有利条件的被动式制冷技术。其装置具有以下特点: 寿命长, 可适应空间飞行任务的时间要求; 无功耗, 省去卫星的有限能源供给; 无运动部件, 具有较高的可靠性和稳定性; 无机械振动, 无电磁干扰, 对探测器件的工作性能没有影响。后面这一点在某些应用场合是至关重要的。太阳同步轨道飞行的航天器, 卫星姿态为三轴定向稳定。其轨道平面与地-日线的相对位置在一年中基

本保持不变, 即相对于太阳的位置基本保持不变, 轨道倾角在  $90^\circ \sim 100^\circ$  左右。由于以上特点的影响, 辐射制冷装置一般设计安装在卫星背阳面的位置, 以减轻热负荷的输入。同时, 利用卫星固有背阳面的特点, 充分利用这一资源, 采用辐射技术和热管技术, 除提供红外探测装置的工作环境外, 可同时对卫星整体及其它仪器进行热控, 保证卫星的可靠工作。

## 2 辐射制冷技术的发展现状

制冷器首次在轨飞行是于 1966 年美国发射的“雨云 1 号”(Nimbus-1) 近极太阳同步轨道卫星, 用于高分辨率红外辐射计的制冷任务。辐射制冷器为单级方锥形, 制冷温度 190 K, 由美国国际电话电视公司研制。原本用于取代 TIROS 系列的 Nimbus 技术卫星, 后演化成用于其它空间实验的基本实验卫星系列。该系列共发射 7 颗卫星, 实施到 1978 年, 其搭载的红外探测装置均采用辐射制冷方式, 美国 ITT 公司光学分部承担了辐射制冷器的研制, 先后提供了方锥形、L 型等多种型式, 制冷温度分别为 200 K、176 K、120 K、115 K、110 K 的辐射制冷器。

美国最先实施和发展历史最长的 TIROS 系列业务气象卫星, 在其第二代艾托斯 (ITOS) 系列 (近极太阳同步轨道,

\* 98 级硕士研究生

1970-1978) 中开始使用辐射制冷器, 从 NOAA-2 开始一直用于高分辨率扫描辐射仪 (VHRR) 的探测元器件。该辐射制冷器由 RCA 公司研制, 最低制冷温度首次达到 100 K, 工作温度为 106 K。由于其为业务应用卫星, 故此系列辐射制冷器在结构和性能上无太大变动。在标志着第三代 TIROS 系列 (近极太阳同步轨道, 1978-1988) 的 TIROS-N 业务气象卫星上有了较大的发展, 装载了高分辨率红外辐射探测器 (HIRS/2) 和甚高分辨率辐射仪 (AVHRR), 其制冷装置均使用 ITT 公司研制的二级 L 型辐射制冷器, 并配备开启度可调节的地球屏 (兼防污罩)。HIRS/3 的辐射制冷器工作温度初期为 107 K, 最终达到 100 K 低温。AVHRR 的辐射制冷器工作温度为 105 K, 冷量为 37.5 mW, 最低温度可达到 97 K。TIROS 业务卫星已发展到 K、L、M 型号。其上使用的 AVHRR/3 目前为 6 通道; HIRS/3 取代了原先的 HIRS/2, 其工作温度降到 94 K。据报道主要是降低了元件的焦耳热, 但至今未看到飞行性能的报道。

美国的国防气象系列卫星 DMSP (1972-1974) 使用 A. D. Little 公司研制的二级圆锥型辐射制冷器, 其飞行轨道为近极太阳同步轨道, 用于冷却 WHR 红外探测系统。同类型共发射 5 颗卫星 (5B-2 至 6), 辐射制冷器飞行性能, 制冷温度 (100 - 110 K), 制冷量 (10 - 20 mW)。ADL 公司在该系列中引入低导热支撑系统, 起到了正确固定探测器位置, 热绝缘和提高抗发射振动的作用。另外的特点是以热窗口来防止污染。

1972 年美国将第一颗地球资源卫星 Landsat-1 送入太空, 其上搭载的多光谱扫描仪 (MSS) 由 Hughes 公司 SBRC 研究中心研制, 采用二级方锥型辐射制冷器, 其

运行轨道为极地太阳同步轨道, 制冷温度 95 K, 制冷量 1.0 mW, 此后继续搭载于 Landsat-2 和 Landsat-3 上。1982 年 SBRC 在原先 MSS 的基础上研制成主题绘图仪 (TM), 用于 Landsat-4 地球资源卫星, TM 所使用的辐射制冷为二级抛物面 G 型。其设计三个温控点: 90、95、100 K。在 90 K 时, 制冷量为 26 mW, 最低温度 84.4 K, 使用寿命达两年以上, 并再次用于后来发射的 Landsat-5 上。该辐射制冷器为目前在轨性能较好的辐射制冷器, 但其结构较为复杂, 成本亦高。SBRC 公司一直在对该辐射制冷器进行改进, 进一步提高其热性能和抗振强度, 并减轻重量, 准备应用于新一代陆地卫星 Landsat-7 (1998 年发射, 据报道 Landsat-6 于 1993 年发射, 但没有进入轨道)、火星轨道飞行器和地球观测系统上。TM 辐射制冷器的特点是级间支撑采用玻璃纤维带拉伸构件, 电铸圆抛物锥反射屏。另外, SBRC 还研制了用于火星太阳同步轨道伽利略飞行器有效载荷近红外成像光谱仪 (NIMS) 上的二级盆型制冷器。其工程样机的性能达到 80K 制冷温度, 10 mW (117.3 mW) 冷量, 最低温度可达 75 K。

美国加州理工大学喷气推进实验室 (JPL) 一直从事高性能的 V 型辐射制冷器的研制。其第一台热力工程样机, 在 95 K 的模拟环境下实验, 降到 99 K 的温度, 制冷量为 88 mW (117 mW)。按其实验性能推测在太空环境下可达 63 K 制冷温度, 88 mW 制冷量, 最低温度 51 K。JPL 在其热力工程样机的基础上研制成可实用的实验样机。在地面 (13-17) K 的真空模拟环境实验中, 达到 57 K 制冷温度, 25 mW 的冷量, 当制冷温度为 78 K 时, 达到 200 mW (262.7 mW) 制冷量。1985 年 JPL 又在此基础上研制成应用型的 V 型辐射制冷器并通过了振动、声学 and 热学的实验测试。该

制冷器达到 80 K 工作温度、80 mW 制冷量的使用要求。Martin Marietta 公司参照 JPL 在 V 型辐射制冷器方面的研制经验也制成类似实验样机。地面实验达到 100 K 制冷温度, 120 mW 制冷量, 最低温度为 90 K, 并通过力学环境实验。V 型辐射制冷器, 其多层 V 型斜角屏的独特设计使得单位体积和单位质量的制冷性能大大提高。辐射制冷的利用率达到 90%。在 680 mm × 400 mm 的外形尺寸和 5 kg 的质量下达到最低 57 K 的制冷温度, 是一种很有发展前途的辐射制冷器形式。

美国是目前辐射制冷技术发展和应用较完善的国家, 辐射制冷器形式多种多样, 可适应不同空间任务的要求。其主要研制单位有 Hughes 公司、SBRC 圣. 巴巴拉研究中心、ITT 公司光学分部、RCA、A. D. L、Rockwell 公司、JPL、MMA 公司等, 其中 SBRC 和 ITT 光学分部为陆地卫星和 TIROS 系列卫星提供了大量的实用型辐射制冷器。两家单位在设计方面各有其特点, 尤其在处理辐射制冷器同红外光路及器件的匹配耦合上: SBRC 在其辐射制冷器中一般配有检测杜瓦, 可在大气环境下对红外元器件进行低温性能的测试; ITT 公司光学分部则不配杜瓦, 其光路和元器件同辐射制冷器的耦合是通过一个被称为 Golden Box 的部件来实现的, 可保证常温装配后, 在空间轨道和空间环境模拟器中制冷后光路和元器件同辐射制冷器的耦合良好。两种方法各有其特点, 均可满足空间飞行的性能要求, 但从最近发展看, 有的已不再使用杜瓦这一结构。

前苏联在其流星 (Meteor) 系列气象卫星 (近极太阳同步轨道) 上使用辐射制冷器来冷却红外探测器。在 1985 年 10 月发射的 Meteor-3 上使用方锥型辐射制冷, 据说在其资源卫星北极星号 (近极太阳同步轨

道) 上也使用了可达到 90 K 制冷温度, 10 mW 冷量的辐射制冷器。此外, 还在积极发展太冷量热管辐射制冷器。

日本已研制成二级方锥型辐射制冷器, 搭载于近极太阳同步轨道地球观察卫星 (ADEOS) 和海洋观测卫星 (MOS-1) 上, 用于冷却 MOS-1 的可见与热红外扫描仪 (VTIR) 及 AEOS 的海洋颜色与温度扫描器 (OCTS)。MOS-1 辐射制冷器初期达到 110 K, 以后达到 105 K 的工作温度; ADEOS 于 1996 年 8 月发射, 辐射制冷器在轨达到 100 K 工作温度。

欧空局 (ESA) 委托荷兰福克 Fokker B.V. 公司为其地球遥感卫星研制二级抛物面 G 型辐射制冷器, 飞行轨道为近极太阳同步轨道, 用来冷却海洋彩色监测仪 (OCM), 其设计要求工作温度 105 K, 96 mW 冷量, 2 年以上使用寿命。1991 年 ESA-1 发射成功, 辐射制冷器在轨性能良好, 105 K 工作温度时达到 269 mW 冷量。该辐射制冷器为目前在轨飞行中最大尺寸的辐射制冷器 (700 mm × 700 mm)。该辐射制冷器也将用于冷却 LASS 卫星 (近极太阳同步轨道) 搭载的光学成像仪器 (OTT), 其要求工作温度 110 K, 120 mW 制冷量。

英国很早就参加了 Nimbus 实验气象卫星的工作, 开展了红外探测仪器以及辐射制冷器的研制。Nimbus-7 以后停止了政府间的研制计划但仍参与仪器和辐射制冷器的研制。目前正在研制用于行星探测的圆盆型辐射制冷装置, 工作温度 70 K, 提供 30 mW 制冷量。

### 3 辐射制冷技术的发展特点及趋势

综观辐射制冷技术近三十年的应用和发展状况, 结合航天飞行任务和空间红外

探测技术发展对制冷提出的新要求,可以看出辐冷技术的发展特点和趋势有如下几个方面。

### 3.1 结构形式向大视场、低热耦合发展

辐射制冷器结构形式有方锥型、圆锥型、W型、抛物面型等多种,V型和盆型等新型辐射制冷器结构形式也正在开发。辐射制冷器结构形式的确定主要取决于航天器轨道形式和高度、辐射制冷器在航天器上的安装位置,同时也考虑到良好的绝热方式。限制辐射制冷器视场的物体主要是太阳、地球和航天器,这些也是辐射制冷器的三个主要外热源。为保证辐射制冷器冷块不见太阳、地球、航天器,必须采用一定的热屏蔽方式,该屏蔽方式既屏蔽外热流,也将冷块的辐射热导向冷空间,但同时也限制了冷块对冷空间的视场,形成特定的辐射制冷器结构形式。辐射制冷器选型就是在航天器飞行轨道的形式和高度、辐射制冷器在航天器上的安装位置确定以后(即辐射制冷器对冷空间的视场确定以后),选择或设计某种结构形式,以保证在一定的外形尺寸的情况下,冷块不但不见太阳、地球、航天器和辐射制冷器外壳,而且对冷空间的视场最大,冷块辐射面积也最大,冷块与一级的耦合视因子最小。如:对于自旋稳定地球同步轨道卫星,辐射制冷器设计成圆锥型,安装方位保证辐射制冷器轴与卫星转轴平行。对于三轴稳定近极太阳同步轨道卫星,辐射制冷器可设计成方锥型、W型、L型或抛物面型,安放位置一般在卫星的背阳面,在靠地球一侧设置地球屏。对于同一种轨道,不同的辐射制冷器形式制冷性能也不同。如:抛物面型和L型辐射制冷器的制冷性能明显优于方锥型和W型,将来的V型辐射制冷器的制冷性能更高。

### 3.2 级间隔热技术不断革新

为拓宽辐射制冷器的应用领域,辐射制冷技术必须朝大冷量、深低温的方向发展。为此,除了在选型方面尽量保证冷块视场最大、辐射面积最大外,各研究机构在改善辐射制冷器级间隔热性能方面不断推陈出新。最初的级间支撑采用的是圆管或圆锥台结构,这种支撑结构虽然能够经受住恶劣的发射环境,但由于截面面积大,其传导漏热很大,一般占总漏热的50%左右。SBRC首次将拉杆支撑带应用于辐射制冷器。由早期的钛合金或合成碳酸树脂材料(如MSS辐射制冷器)发展使用强度与热导率比值高的环氧玻璃钢材料及掺杂环氧玻璃钢材料。红外元件电引线及测温、加热电引线则由电导与热导比值高的多层薄膜带式电缆代替传统的合金丝(尤其在多元红外元件列阵的情况下,薄膜电缆的优越性能更加明显),进一步减少传导漏热。在传导漏热减少后,级间的辐射漏热就成为了主要矛盾。为此,JPL首先提出V型斜角屏辐射制冷新技术,在冷块与外壳之间采用一组轻型、低发射率、高反射率辐射屏,相邻屏之间的夹角约 $1.5^\circ$ 。辐射屏拦截航天器和有效载荷的辐射热,经多次反射将其导入冷空间。该辐射制冷器的冷块支撑采用了记忆合金或分离式结构,在发射状态(常温),支撑由高强度、大截面的支撑体作用,当辐射制冷器冷块温度下降至一定值,由于形状记忆合金的冷缩效应,部分支撑体逐渐脱离外壳,冷块由另一部分截面较小的支撑体支撑。V型辐射制冷器外壳经辐射屏到达冷块的辐射热及经支撑的传导热均可忽略不计,实际有用的制冷量可达90%。应该指出,这种辐射制冷器由于在外壳与冷块之间采用了斜角V型辐射屏,省略了中间级壳体与辐射板,因而,体积和重量也大大减小,是一种很有发展前途的辐射制冷器形式。

由于辐射制冷器长寿命、高可靠及不

消耗航天器能源的突出优点,人们期待有朝一日在某些航天飞行任务中用辐射制冷器代替机械制冷和超流氦杜瓦制冷。为追求瓦级制冷量和 40 K 以下的制冷温度, Rock-well 公司一直致力于研究与热管相结合的大型辐射制冷器,并已达到 70 K(5 W) 的指标,最低制冷温度可望达到 33 K。这种辐射制冷器在航天器安装位置及重量、体积允许的前提下有较大优势,但由大型结构(冷块面积达 6 m<sup>2</sup>、重量约 85 kg)引起的材料、结构力学性能和可靠性、污染控制、与热管的耦合及地面组装与试验等新问题有待进一步探讨。

### 3.3 寿命和可靠性不断提高

影响辐射制冷器寿命的主要因素是光学窗口、反射镜面、辐射板涂层等敏感表面在低温下受污染引起的性能衰减。几十年来,国外对辐射制冷器污染的控制技术进行了大力研究及飞行试验。有效的污染控制方法包括:在材料选择与零部件表面处理上减少放气源;设置光学热窗,形成封闭式光学通道,阻隔污染气体的进入;设置红外元件杜瓦,减少污染气体进入元件空间的可能性;采用加热去污措施,定期对表面凝聚的污染气体进行清除;控制辐射制冷器在地面的运输、贮存环境(包括温度、湿度和洁净度)等。另外,增大辐射制冷器的控温热(即富余制冷量)和设置多个控温点也可弥补污染引起的制冷性能的衰减,提高其工作寿命。上述方法还在不断改进与完善,其中有些还受到航天器特殊要求和特殊的飞行任务与环境的制约。空间电子与质子对辐射制冷器敏感表面辐照引起的性能衰减则涉及新型长寿命薄膜防护材料的研究与开发。

在可靠性方面,辐射制冷器尽量采用对称的结构形式,装配时对拉杆支撑带施加一定的预紧力,以保证辐射制冷器经受

恶劣的发射环境,并达到严格的冷焦面位置精度要求。辐射制冷器星地兼容杜瓦及其配套的地面调焦制冷系统也是为了方便红外探测器系统地面繁杂的性能调试、冷焦面配准以及杜瓦热开关导热性能的验证等,进一步保证红外探测器系统发射前的高精度准直和辐射制冷器良好的在轨工作性能。

## 4 辐射制冷技术的下一步发展

虽然辐射制冷器受卫星轨道和星上安装位置的限制,且当前应用的制冷温度较高、制冷量较低(mW 级),但是,它具有无振动、无噪声、极少消耗航天器能源的突出优点。所以,在目前和将来,它仍然是一种较理想的太空制冷技术。应用前景看好,它不仅能用于红外探测器直接制冷,还能广泛用作其它制冷方式的前级制冷。

为适应将来卫星飞行任务的需要,满足空间红外探测器新的使用要求,必须打破辐射制冷器只能达到 mW 级冷量的传统观念,开发新型的大冷量、深低温、高效、高可靠、长寿命(5 年以上)的辐射制冷器(如 V 型和大型热管辐射制冷器)。在辐射制冷器设计中,首先应充分利用所给定的冷空间视场(大冷量辐射制冷器的垂直视场足够大),设计出新颖、独特的辐射制冷器结构形式,使来自太阳、地球、航天器的外热流减少到最低。其次,应对新型的低温绝热技术进行深入研究(包括绝热结构、材料、工艺等),并将其应用于辐射制冷器的热屏蔽、支撑等部件,研制出在体积、重量相同或增加不大的情况下(与传统辐射制冷器相比)制冷指标大大提高的高效辐射制冷器。若航天器安装位置及重量、体积允许,也可按需要开发瓦级冷量的大型热管辐射制冷器,但由大型结构和

重量引起的新问题必须予以解决。这些问题包括新材料和工艺、结构力学性能和可靠性、污染控制、与热管的耦合、地面组装与试验等技术。目前辐射制冷器地面贮运及在轨工作期间的污染控制技术还有待完善和开发, 以进一步提高其工作寿命。

另外, 辐射制冷器与多波段、多通道、大面积列阵的红外探测器的匹配、耦合技术、热管技术、作为其它制冷方式的前级制冷所涉及的高效热机械耦合技术等也有待于深入研究和开发, 以拓宽空间辐射制冷技术的应用领域。



· 简 讯 ·

### 美国网校公司获得学生台式计算机红外网络专利权

美国网校公司( NetSchools Corporation ) 最近宣布, 该公司的一项具有革新意义的可将学生用台式计算机连接到因特网上的红外网络技术已获得了专利权。

这项新型红外网络技术是一种高速无线网络, 它是专门为满足配备该网校无线台式计算机的 K - 12 学生的需要而设计的。该网校为其每一位学生和教师配备了一台 StudyPro 台式计算机, 而这些台式计算机都是通过这种红外网络互相连接并连接因特网的。

这些高速无线网络允许开展真正的一对一学

习。有了这种系统, 便可以把学生和老师的会聚在一种活泼的动态学习环境中, 从而使因特网的资源得以充分利用。此外, 在保持与因特网及网校有线局域网共享文件的恒定连接率的同时, 它还允许学生在校时从一个班级走到另一个班级, 即使在一个班级内有多达 40 名学生共享同一根连接线时, 它也能保证每位学生实现恒定的高速接入率。这是无线网络技术的一个重要突破。据该网校公司的技术负责人说, 他们已经克服了带宽问题以及射频无线 LAN 技术中常见的其它问题和限制因素。有关这项新技术的详细情况, 请参见“具有波束选择性的多波束通信网络”(美国专利 US6008923 )。

□ 高编译



· 国外专利介绍 ·

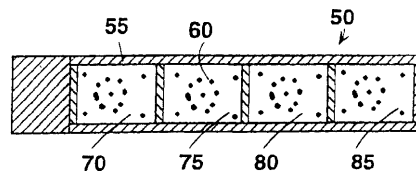
### 光学衍射生物敏感器

美国专利 US6060256  
(2000 年 5 月 9 日公布)

本专利提供一种廉价的敏感器件和方法, 它可以用来探测一种介质中存在的分析物并使其定量化。该器件包括一层镀金属薄膜, 在该薄膜上, 印刷有一种预先确定的特殊图案, 这是分析物特有的受体的一种图案。当将一种目标分析物附着在上面印刷有受体的塑料薄膜的所选区域上时,

透射光和 / 或反射光的衍射便会通过分析物的物理尺寸及限定的精确位置发生。所产生的衍射像可以用肉眼或者敏感装置进行观察。

本专利文献共 16 页, 其中有 6 张插图。



高 编译