

辐射制冷技术在中国气象卫星上的应用

董德平, 张玉林, 陆燕

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 配置红外探测通道的光学遥感仪器是气象卫星的主要载荷之一, 我国太阳同步轨道和地球静止轨道气象卫星的光学载荷采用辐射制冷器冷却红外探测器及其后的光学部件, 使其在规定的温度工作。概要介绍了我国风云系列气象卫星对制冷技术的要求以及近 30 年来所研制的不同型式辐射制冷器, 给出了 FY-1A~1D、FY-3A、FY-2A~2E 气象卫星辐射制冷器的在轨飞行性能, 阐述了辐射制冷技术在气象卫星上长期业务应用的关键技术和实际结果。探讨了辐射制冷技术在我国未来气象卫星上的应用前景。

关键词: 辐射制冷器; 红外遥感; 气象卫星

中图分类号: TB6 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0119-05

Application of radiant coolers on Chinese meteorological satellites

Dong Deping, Zhang Yulin, Lu Yan

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

Abstract: Optical remote sensing instruments including IR detection channels are always the major payloads of meteorological satellites. Radiant coolers are used for cooling the IR detectors and its aft optics to the desired temperatures, aboard on Chinese polar orbit meteorological satellites and geostationary orbit meteorological satellites. Depending on the requirements of optical instruments and satellites on the radiant coolers, the different style coolers such as W style, O style, L style, G style and octahedron-cone style in the past 30 years were studied, and the flight performance of the radiant coolers on FY-1A to FY-1D, FY-3A/3B, FY-2A to FY-2E meteorological satellites were presented. The lowest temperature of radiant cooler on FY-3 satellite was about 85 K and had 120 mW at 100 K. The concerned technologies needed for long-life operational meteorological satellites were discussed and its application results were also given. The possible application of passive cooling technology in future was discussed.

Key words: radiant cooler; IR remote sensing; meteorological satellite

0 引言

辐射制冷器是一种被动式制冷装置,长寿命、高可靠、无功耗。利用宇宙空间的高真空、深低温和热沉条件,辐冷器的高辐射率表面向宇宙辐射能量,进行辐射换热,降低辐射体温度;利用高反射率表面的屏蔽和减少外界及寄生热负荷,使辐射制冷器各级达到期望的温度^[1]。

自 1966 年单级方锥形辐射制冷器首次用于冷却美国风云一号卫星高分辨率红外辐射计的工作于 200 K 的 PbSe 红外探测器以来,各国科研人员研制出多种形式的辐射制冷器,并在极轨气象卫星(NOAA、Block、Meteor、FY-1、FY-3)、静止气象卫星(GOES、METEOSAT、GMS、InSat、FY-2)、陆地资源卫星(LandSat、ASEOS、ZY-1)和海洋卫星(MOS)上大量使用,取得了良好的效果^[1]。我国是自行研制太阳同步轨道(极地轨道)和地球同步轨道(静止轨道)气象卫星的少数国家之一,包含红外探测通道的光学遥感仪器是气象卫星的主要载荷之一。我国分别于 1988 年和 1997 年发射第一颗极轨(FY-1)和第一颗静止轨道(FY-2)气象卫星,其主载荷均采用辐射制冷技术作为红外探测通道的制冷手段^[2]。此后,辐射制冷技术在国内多颗卫星上得到应用,至 2009 年成功应用于气象卫星的辐射制冷器数量为 16 台。

1 我国极轨气象卫星辐冷器

1988 年,由中国科学院上海技术物理研究所研制的我国第一个空间制冷装置——风云一号 A 星(FY-1A)W 型辐射制冷器(见图 1)随星发射,在轨达到了 101.2 K 的制冷温度(要求 105 K),遥感仪器获得清晰红外图像。1990 年发射的 FY-1B 辐射制冷器在轨最低温度达到 95 K,在 105 K 温控点提供 20 mW 以上的制冷量。FY-1 卫星是我国第一代极轨气象卫星,A、B 星为试验星,C、D 星被国际气象卫星组织列为全球业务应用卫星,卫星主载荷为扫描辐射计,每颗卫星载有两台扫描辐射计,各使用一台辐冷器。与 FY-1A/B 相比,FY-1C/D 扫描辐射计红外探测通道由 1 个增加到 3 个,辐冷器作了相应的改进设计,取得了优异在轨性能。FY-1C 和 FY-1D 卫星分别于 1999 年和 2002 年发射,FY-1C 辐冷器在卫星

近 5 年的工作寿命内稳定工作,FY-1D 辐冷器至今仍在轨正常工作,红外通道工作时辐冷器最低温度为 97.8 K,105 K 温控制冷量为 27 mW,质量 6.7 kg。

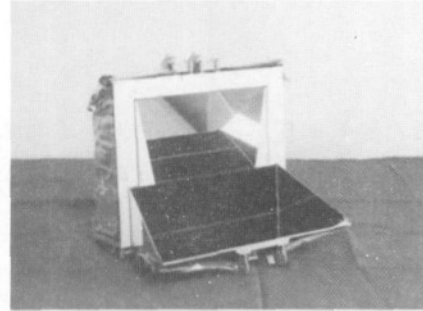


图 1 FY-1 W 型辐射制冷器

Fig.1 W style radiant cooler for FY-1 series satellites

2000 年,我国开始第二代极轨气象卫星 FY-3 的研制工作,目标是实现全球、全天候、多光谱、三维和定量探测,2008 年 5 月首发星 FY-3A 成功发射、投入运行^[3]。FY-3A 卫星配置 11 种探测仪器,其中扫描辐射计(VIRR)、红外分光计(IRAS)和中分辨率光谱成像仪(MERSI)的红外探测通道均使用辐冷器作为制冷手段。VIRR 的 3 个红外通道和 IRAS 的 20 个红外通道的探测器采用各自的抛物柱面型式的二级辐射制冷器(见图 2),在 100 K/103 K 工作。MERSI

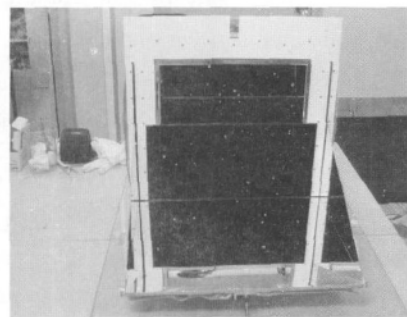


图 2 FY-3A 扫描辐射计/红外分光计辐冷器

Fig.2 FY-3A radiant cooler for VIRR/IRAS

仪器的 40 元长波红外探测器和 2×10 元双短波红外探测器分别安装在旋转抛物面型辐冷器(见图 3)的二级和一级上,在 97 K/100 K 和 ~140 K 温度工作。FY-3A 辐冷器质量和在轨性能分别为:IRAS 辐冷器质量为 9.6 kg,最低温度为 85.3 K,100 K 制冷量为 70 mW;VIRR 辐冷器质量为 10.0 kg,最低温度为 85.5 K,103 K 制冷量为 88 mW;MERSI 辐冷器质量 14.6 kg,最低温度为 84.8 K,100 K 制冷量为 120 mW。

飞行 1.5 年以来,3 台辐冷器工作正常、性能稳定,产品性能优于任务要求,同时解决了红外通道信号衰减问题,为长期业务应用提供了保证。

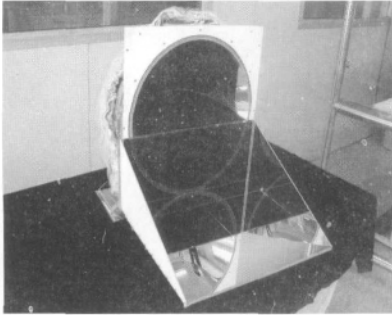


图 3 FY-3A 中分辨率光谱成像仪辐冷器

Fig.3 FY-3A radiant cooler for MERSI

2 我国静止轨道气象卫星辐冷器

我国第一颗地球静止轨道气象卫星 FY-2A 于 1997 年 6 月发射。FY-2 卫星主载荷扫描辐射计使用轴对称式 O 型二级辐冷器(见图 4)冷却其两个红外通道的探测器,红外探测器在 95 K 或 100 K(夏至附近 3 个月)工作。FY-2A/B 是试验卫星,辐冷器性能达到任务要求。FY-2A 辐冷器在探测器工作时最低温度为 89.88 K,100 K 温控制冷量为 17 mW,95 K 制冷量为 10 mW。FY-2B 星于 2000 年 6 月发射,辐冷二级温控后每年大约 9 个月工作在 95 K,3 个月工作在 100 K。辐冷子系统在卫星工作期内正常工作,红外通道和水气通道图像清晰。



图 4 FY-2 卫星 O 型辐射制冷器

Fig.4 O style radiant cooler for FY-2 series satellites

FY-2(02 批)C、D、E 星为业务应用星,增加了两个红外探测通道,制冷量要求增加 1 倍,为 8 mW,温控点为 93.5 K 和 100 K,辐冷器进行了改进设计,辐冷直径由 $\phi 460$ mm 增加到 $\phi 500$ mm,质量为 6.8 kg。

第一颗静止轨道气象业务卫星 FY-2C 于 2004 年 10 月发射,辐冷二级 93.5 K 温控制冷量为 13.4 mW。在夏至前后近 2 个月时间内,由于太阳照射,辐射制冷器工作于 100 K,探测器工作时温控制冷量为 9.2 mW,工作 5 年后辐冷性能仍满足使用要求。FY-2D、FY-2E 分别于 2006 年 12 月和 2008 年 12 月发射,至今分别工作 3 年和 1 年多,辐冷器为红外和水汽 4 个探测波段共 8 只器件提供优良的低温工作条件。尤其是 E 星辐冷器在进一步提高太阳屏保护膜膜层性能后,制冷性能有了明显提高,2009 年夏季在 93 K 稳定工作^[4]。辐冷遥测遥控、测温和控制电路工作稳定,二级温控精度达到 ± 0.1 K。

3 与长期业务应用有关的关键技术

业务应用气象卫星要求载荷仪器能够提供长期稳定的定量化遥感数据。红外通道信号是否衰减影响仪器通道的探测动态范围和定量化应用。在卫星寿命期内保证红外探测器工作在温度控制点以及有效控制红外通道信号衰减是长寿命业务应用气象卫星必需解决的关键技术之一。

我国早期的 FY-1A/B 辐冷器因严重污染而导致红外通道信号严重衰减以及制冷性能衰退,挥发性可凝污染物在红外光学表面的低温沉积是造成红外信号衰减的主要原因^[5]。在多方共同努力下,FY-1C/D 污染控制取得明显效果,在轨初期红外通道信号日均衰减量约 0.1%~0.3%,并随时间增加而减小。在 FY-3 辐冷器研制过程中,在 FY-1C/D 防污染技术基础上对红外光路进行了防污染改进设计,对红外后光路实施低漏热的准密封、间隙密封保护措施,取得了良好效果,发射至今未见红外信号明显衰减,满足了任务要求,红外通道信号衰减问题得到解决。

FY-2 卫星辐冷器的防污染设计和实施取得了良好效果,其 02 批 3 颗星至今已在轨工作多年,未见污染现象。根据星上温控点源黑体的红外信号遥测计数值(红外信号大小是 1024 减去计数值)的长期变化可以判断红外通道信号长期衰减情况,表 1 给出了 FY-2(02 批)扫描辐射计红外通道 1 点源黑体红外信号计数值的变化情况,计数值的波动均在系统测量误差范围内,表明了红外通道长期工作信号没有明显的衰减^[4]。

表 1 红外通道 1 星上黑体的计数值

Tab.1 Blackbody source signal counts of IR CH1

Style	Date	$t_{\text{black}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{detector}}/\text{K}$	Count
SAT C	2004-11-22	15.98	93.65	538
	2005-09-01	15.98	93.65	536
	2007-01-01	15.98	93.65	538
	2009-11-24	15.98	93.65	532
	2007-02-15	14.65	93.63	521
SAT D	2008-01-20	14.65	93.63	519
	2009-12-15	14.65	93.63	525
SAT E	2009-02-01	19.88	93.62	499
	2010-01-01	19.88	93.62	490

红外探测器性能随工作温度的变化而变化,特别是长波红外通道温度特性更为明显。探测器工作温度稳定性取决于辐冷器的长期性能和温控精度。辐冷器精密温控电路技术成熟、长期考核可靠,只要辐冷器提供数毫瓦温控制冷余量,即可保证红外探测器在设定的温控点工作。对极轨轨道辐冷器而言,除早期的 FY-1A/B 因严重水气污染造成辐冷器性能衰退外,此后的辐冷器在轨性能长期稳定,其制冷余量足够保证探测器在卫星数倍设计寿命期内工作温度稳定。FY-1D 辐冷器工作 7 年多、FY-3A 辐冷器在轨 1 年半以来,其二级温控温度始终稳定,温控制冷量衰减可忽略不计。对静止轨道辐冷器,情况有所不同,直射阳光影响辐冷器长期性能。比较 FY-2 辐冷器长期在轨性能,有太阳光照射时,太阳屏温度升高明显,辐冷器性能有衰退现象,第一年衰退较大(太阳屏温升约 10 K、一级温升达 2 K、温控制冷量减少 1 mW 以上),以后衰退逐年减少^[4],FY-2 辐冷器制冷量的富裕量可以保证 3 年寿命期内满足应用要求。

4 应用展望

我国 FY-3(02 星)3 台辐冷器将继承 FY-3A 技术状态,仅对 IRAS 辐冷器二级温控点进行调整,降低探测器工作温度到 97 K,进一步提高红外通道性能。FY-3(02 批)卫星将根据载荷配置和仪器要求对 01 批辐冷器进行改进或研制新型辐冷器,以满足 02 批载荷对制冷的需求。

FY-2(03 批)卫星将对红外通道做一定改进设

计,进一步提高通道性能。辐冷器将根据仪器要求做适应性改进。

我国下一代静止轨道气象卫星 FY-4 为三轴稳定卫星,将配置包括扫描成像仪和大气垂直探测仪两台大型光学载荷在内的有效载荷,进一步提高对地观测精度、观测频次和观测区域的灵活性^[3]。扫描成像仪将采用八面体型二级辐射制冷器(见图 5)冷却 10 个红外通道共计 40 元红外探测器,使其在 88 K/103 K 工作。大气垂直探测仪为干涉式红外超光谱仪器,其红外探测器采用机械制冷机制冷,干涉光路、后光路等部分采用八面体型一级辐冷器作为低温光学的制冷手段,在 200 K 工作。

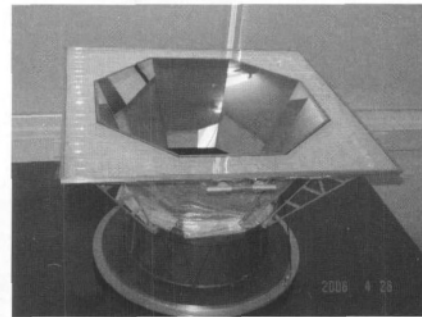


图 5 FY-4 卫星辐射制冷器

Fig.5 Radiant cooler for FY-4 series satellites

5 结论

辐射制冷技术已在我国太阳同步轨道和地球静止轨道系列气象卫星上得到成功应用,所研制的辐射制冷器长期在轨工作正常,满足了长寿命红外遥感仪器对制冷的需求。低温沉积污染引起的红外通道信号衰减问题得到解决。不同型式的辐射制冷器将在 FY-3 后续卫星及未来的 FY-4 气象卫星上得到更多的应用。

参考文献:

- [1] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 18-24. (in Chinese).
龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 18-24.
- [2] Li Qing, Dong Yaohai. Developments of Chinese meteorological satellites [J]. *Shanghai Aerospace*, 2008(1): 1-8. (in Chinese).
李卿, 董瑶海. 中国气象卫星技术成就与展望 [J]. *上海航*

天, 2008(1): 1-8.

[3] Dong Yaohai, Sun Yunzhu, Wang Jinhua, et al. FY-3A polar orbit meteorological satellite [J]. *Shanghai Aerospace*, 2008 (5): 1-11. (in Chinese)

董瑶海, 孙允珠, 王金华, 等. FY-3A 极轨气象卫星[J]. 上海航天, 2008(5): 1-11.

[4] Zhang Yulin, Zhou Xiyang. Performance of FY-2 (02) radiant coolers in orbits [J]. *Cryogenics and Superconductors*, 2009 (S): 200-204. (in Chinese)

张玉林, 周夕言. 风云二号 02 批辐射制冷器在轨情况[J]. 低温与超导, 2009(S): 200-204.

[5] Dong Deping, Wang Weiyang. Study of cryodeposition contamination of radiant coolers [C]// Proceedings of 16 th ICEC/ICMC, 1996: 719-722.

《红外与激光工程》第十四届编委会名单

顾问委员会：

母国光 周炳琨 庄松林 周立伟 陈良惠 范滇元 周寿桓
姚建铨 褚君浩 张履谦 黄培康 黄瑞松 刘永才

主 任：

曹建国 中国航天科工集团公司 研究员

常务主任：

张 锋 中国航天科工集团公司三院科技委 研究员

常务副主任：

吴志新 中国航天科工集团公司三院 8358 所 研究员

副主任：

龚海梅 中国科学院上海技术物理研究所 研究员

姚 郁 哈尔滨工程大学 教授

张广军 北京航空航天大学 教授

王英瑞 中国航天科工集团公司二院 25 所 研究员

刘 锋 中国航天科工集团公司三院 8358 所 研究员

(以下按姓氏拼音为序)

- 白 剑 柏连发 蔡 毅 曹治国 车 宏 陈洪钧 陈卫标 陈旭情 陈应航 崔得东 董雁冰 范晋祥 房建成 费锦东
付跃刚 郭 劲 过 振 胡晓扬 季一勤 金光勇 金伟其 李美成 李向阳 刘 波 刘德明 刘会通 刘银年 刘泽金
娄淑琴 卢 欣 陆 卫 陆璇辉 罗豪甦 马文坡 孟军合 孟卫华 牛燕雄 钱列加 曲士良 饶瑞中 沈为民 施翔春
史衍丽 苏建忠 孙东松 孙晓泉 孙秀冬 汤心溢 田海峰 田金文 王 璞 王 巍 王 晓 王立君 王立军 王向军
王学伟 王涌天 王占山 魏志义 温显斌 吴衍记 伍 凡 邢廷文 徐剑秋 闫秀生 杨 杰 杨建峰 杨文运 杨甬英
杨远洪 张 新 张书练 章正宇 赵 卫 赵长明 赵圣之 郑婉华 郑永超 周治平 朱晓农

国际编委：

Chao Zhang University of Wollongong (Australia)

Dayan Ban University of Waterloo (Canada)

Huichun Liu National Research Council of Canada (Canada)

Ping Hua University of Southampton (UK)

名誉主编：

金国藩 清华大学 中国工程院院士

主 编：

崔玉平 中国航天科工集团公司第三研究院 研究员

执行主编：

卢 进 中国航天科工集团公司三院 8358 所科技委 研究员

副主编：

张天序 华中科技大学图像识别与人工智能研究所 教授

陈德应 哈尔滨工业大学光电子技术研究所 教授

史泽林 中国科学院沈阳自动化研究所 研究员

陈 钱 南京理工大学电子工程与光电技术学院 教授

宋瑛林 苏州大学物理科学与技术学院 教授

常务副主编：

赵雪燕 中国航天科工集团三院 8358 所 副编室