

风云一号气象卫星用辐射致冷系统

杨春江 王维扬

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——介绍了用以冷却 FY-1 气象卫星扫描辐射计红外探测器的辐射致冷系统的设计, 结构和应用。

关键词——辐射致冷器, 绝热, 热辐射。

1. 引 言

辐射致冷器是通过向外辐射热量而达到自身冷却的被动式制冷装置。它具有重量轻、无运动部件、寿命长、功耗低等优点。虽制冷量小但已能满足红外探测器所需的冷量要求 (mW), 而且外层空间有 3~4 K 的天然低温黑热沉和超高真空的工作环境, 有利于辐射制冷器工作。因此, 在卫星上使用辐射致冷器冷却红外探测器是一个合理的选择。

近二十年来, 国外少数航天工业发达的国家对辐射致冷技术进行了研究, 并陆续把它使用到近极轨道和地球同步轨道气象卫星、地球资源卫星和其它实用卫星上以冷却光电器件, 取得了满意的结果^[1]。我们研制的辐射致冷器应用于 FY-1 气象卫星, 取得了预期效果。

2. 辐射致冷器的设计原理

根据斯忒藩-玻尔兹曼定律, 黑体辐射出射度与其温度的四次方成正比。实际物体之间通过辐射交换的热量, 除与它们的温度有关外, 还和物体的几何尺寸、相互间的位置、表面特征等有关。辐射致冷器就是根据这种经由辐射产生热交换的原理制成的^[2]。

为了使红外探测器达到 105K 以下的工作温度, 并能长期进行工作, 根据目前的工艺条件, 需要设计两级致冷器(见图 1)。其外壳和地球屏蔽相联, 装于卫星上, 以防止外部热流被致冷器吸收, 它本身的辐射也要尽可能少地影响内部各部分。第一级致冷主要由一级冷块(辐射体)、锥体和结构上需要的诸部件组成。一级辐射体使该级处于较低的温度, 并对第二级起隔热保护作用。第二级致冷是靠二级辐射体, 它是辐射致冷器温度最低的部分, 红外探测器就装于其上。

为了得到好的致冷效果, 要求各部件的相对位置和几何尺寸要选用得当。主要表面要

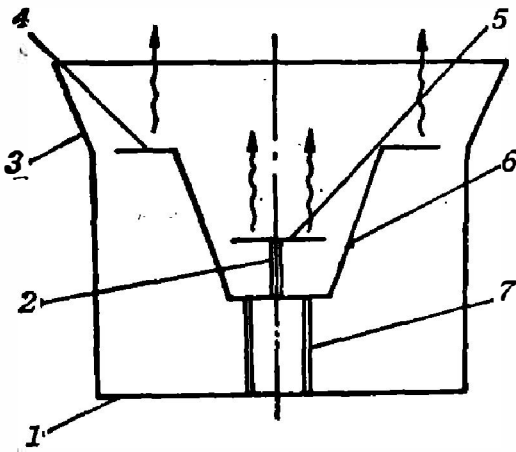


图 1 二级辐射致冷器原理图

- 1. 外壳; 2. 二级支撑; 3. 地球屏蔽;
- 4. 一级冷块; 5. 二级冷块; 6. 一级锥;
- 7. 一级支撑

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage radiant cooler.

有严格的光学要求, 而且在热学及力学上要有适当的措施. 如屏蔽和锥壁的内侧要求做成反射率很高的镜面, 一级和二级辐射体要有很高的红外比辐射率. 同时又要尽量不使它们吸收直接入射和反射进来的太阳光及地球长波辐射. 在第一级与外壳之间, 以及第一级与第二级之间都要有适当的支撑结构; 包括安装位置要适当, 支撑本身既要有足够的强度使之能承受卫星发射主动段所遇到的力学环境, 又要求该支撑有很低的导热性能, 以减少热量输入, 还要求该支撑材料热膨胀系数很小, 使得在低温及常温下红外光学系统均能正常工作. 同时, 还要在不同温度的各级间采取有效的绝热措施. 总之, 就是要使辐冷器向外辐射尽量多的热量, 又要千方百计阻止外热流进入, 以达到降温致冷的目的.

3. 辐射致冷系统的结构

辐射致冷系统包括致冷器、防污染装置, 检测和控制电路及保证其长期有效工作所需要的各种辅助部(组)件(见图 2).

为便于探测到的红外数据稳定可靠, 安装红外探测器的辐冷器(第二级)必须对工作温度进行精密控制. 为了有效地防止及去除辐冷器低温部分的污染, 用来加速放气及去污的各级加热装置是必不可少的. 另外, 还应考虑红外光学的安装要求.

根据辐射致冷器的工作原理, 致冷器的结构型式应根据不同的应用要求和使用条件而定.

因为 FY-1 气象卫星是一个太阳同步卫星, 所以可以把辐射致冷器安装在卫星的背阳面上. 根据卫星仪器的布局, 我们选择了二级“W”型辐射致冷器^[3]. 除了这些主要表面外, 辐冷器的主要表面加上屏侧和锥侧, 有效地阻止外部热流. 另外, 还设置了一块面板, 它具有低的 α_0/ϵ 值, 有利于内部第二级致冷. 致冷器安装在星体时, 要使面板高于卫星蒙皮, 以避免卫星本体向辐冷器正面辐射热量. 屏蔽和屏侧位于靠近地球的一侧, 以阻挡来自地球方向的地球长波辐射和地球反射的阳光, 对一级和二级冷块进行辐射屏蔽, 而锥和锥侧只需在离开地球方向的一侧设置, 对星上部分进行屏蔽.

图 3 是 FY-1 气象卫星用辐射致冷器结构图. 其关键部分如下:

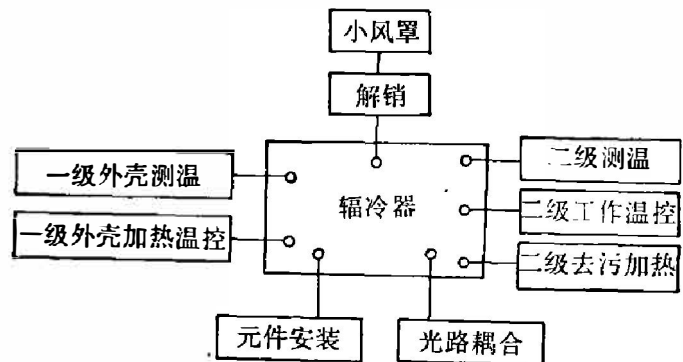


图 2 FY-1 气象卫星辐射致冷系统方框图

Fig. 2 Block diagram of the radiant cooler system in FY-1 Meteorological Satellite.

(1) 光学表面. 为增加辐冷器一级、二级向宇宙黑冷空间的热辐射能力, 将辐射体对空间一面做成蜂窝状的高比辐射率表面. 为减少级间辐射热耦合, 地球屏蔽及屏侧、锥壁及锥侧均做成高反射率的镜面.

(2) 级间绝热措施. 为了提高级间的绝热性能, 在外壳与一级之间采用多层绝热, 用镀铝的聚脂薄膜与低热导率的间隔层相间包扎; 在一级与二级之间采用多屏绝热方式, 一级与二级间均是低比辐射率的表面.

(3) 支撑与减振器. 为保证级间相对位置的稳定性, 根据该致冷器的特点, 采用了杯状刚性支撑. 它具有较高的强度和刚度, 并有很低的热导率. 为提高致冷器的力学稳定性, 在一级和二级上均装有粘-弹减振器. 它能在相当宽的频率范围内起到明显的减振作用, 从而也有利于提高致冷器的热性能.

(4) 防污染装置. 为了防止辐冷器在储存, 试验及发射时光学表面的污染和在卫星入轨初期有利于辐冷器放气, 还装有专门的防污染机构. 它由小风罩体、解锁机构、开罩驱动装置及风罩固定机构组成. 而且在提高可靠性及防止冷焊方面也均采取了相应措施.

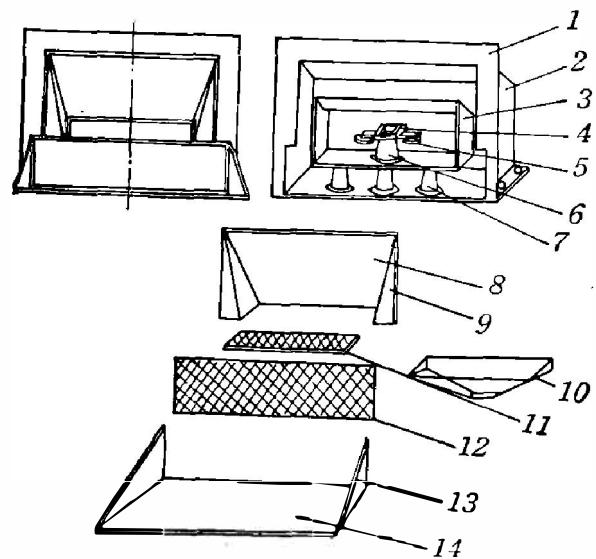


图3 FY-1气象卫星辐射致冷器结构图

1—外壳面板; 2—外壳; 3—一级筒体;
4—元件座; 5—二级减振器; 6—二级支撑;
7—一级支撑; 8—锥体; 9—锥侧;
10—内屏; 11—二级冷块; 12—一级冷块;
13—屏侧; 14—地球屏

Fig. 3 Structure of the radiant cooler in FY-1 Meteorological Satellite.

4. FY-1 气象卫星辐冷器的热力学设计

致冷器热力学设计的目的是根据卫星使用的要求, 在考虑各种限制条件 (包括几何尺寸、工艺、材料及其它保证正常工作的条件) 和辐射致冷器长期工作所需的设计余量, 选择最合适的几何参数以得到最佳致冷器性能. 在热力学设计过程中, 我们选择许多组的参数, 对各部分的热平衡方程进行了计算, 依据计算的结果, 选择了最佳参数组.

4.1 辐射致冷器各级热平衡方程

外部壳体的热平衡方程为

$$\varepsilon_h A_h \sigma T_h^4 = H_K^0 + H_r^0 - H^0; \quad (1)$$

式(1)中左面一项为外壳向致冷空间辐射的热量; H_K^0 为从星体传入的热量; H_r^0 为从星体和地球方向辐射进来的热量; H^0 为从第一级来的冷量.

第一级热平衡方程为

$$\varepsilon_d A_d \sigma T_d^4 = H_h + H_e + H_i + H_K + H; \quad (2)$$

式(2)中, 左面为一级冷块向外辐射的热量. 第一级吸收的热量包括: 从地球屏蔽来的辐射热 (H_h); 锥体接受的来自地球方向的辐射热 (H_e); 通过多层绝热层从外壳传入的热量 (H_i); 通过一级支撑及引线的导热 (H_K) 和电流引起的焦耳热 (H_j).

第二级热平衡方程为

$$\varepsilon_p A_p \sigma T_p^4 = H_r + H_s + H_{K_1} + H_{K_2} + H_j + H_0; \quad (3)$$

式(3)中,左面是第二级冷块向空间辐射的热量;它接受的热量包括从一级锥体来的辐射热(H_r);从内部的一级表面来的辐射热(H_s);通过第二级支撑的导热(H_{K_1});通过各种电引线的导热(H_{K_2})和电流引起的焦耳热(H_j);以及通过光学孔进来的辐射热(H_0).

4.2 热量的计算

在上述三个热平衡方程中,右面各项可分为四类,即经过多层绝热层和多层屏蔽板传入的热量、辐射热交换、电流通过时产生的焦耳热以及固体热导等.下面对其中两项说明如下:

(1) 经过多层屏蔽板和多层绝热层的传热;

(a) 经过多屏传递的热量.在二级和一级之间按预定间隔装置三个屏.为了简化,单独计算经过这些屏蔽板的辐射换热.这样,从二级冷块背面到一级冷块的辐射热可表示为

$$H_s = \frac{\sigma(T_c^4 - T_p^4)}{\frac{1}{A_p \varepsilon_{p_1}} + \frac{1}{A_3 \varepsilon_{32}} + \frac{1}{A_2 \varepsilon_{21}} + \frac{1}{A_1 \varepsilon_{1c}}} \quad (4)$$

式(4)中, $T_c = T_a$; A 为二级冷块和屏蔽板的背面面积;下脚 $p, c, 1, 2, 3$ 分别为二级、面对二级的一级锥体和第一、二、三层屏.在假设各表面具有相同的比辐射率 ε 时, ε_{ij} 可表示为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{A_i}{A_j} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)}; \quad (5)$$

(b) 经过多层绝热层所传递的热量.该换热过程很复杂.为利用已有的数据,在实际工程估算过程中,把经过多层的换热过程整个地视为热传导过程,

$$H_s = \frac{A_0}{\delta_i} k_e (T_h - T_a); \quad (6)$$

式(6)中, δ_i 为绝热层的厚度; k_e 为等效热导率; A_0 为一级包扎部分的外表面面积.

(2) 辐射热交换.辐射换热的计算在辐冷器热力学设计中占有相当大的比重.上式热平衡方程式(1)~(3)中的辐射换热项各不相同.

(a) 锥体吸收来自地球方向的辐射热(H_e)为

$$H_e = (\alpha_{mr} W_r + \alpha_{me} W_e) A_m; \quad (7)$$

式(7)中, α_{mr} 为锥口对地球反射阳光的有效吸收率; α_{me} 为锥口对地球长波辐射的有效吸收率; A_m 为锥口面积; W_r 为地球平均反射的太阳辐射强度; W_e 为地球的平均辐射强度.

计算 α_{mr} 、 α_{me} 需要采用镜面象阵理论.先要计算锥口对地球可见区域的视因子 $F_{m-e}^{(n)}$, 其中 n 表示地球方向来的辐射在锥壁上的反射次数;然后可写出 $\alpha_{mr} = \sum_n \alpha_{mr} F_{m-e}^{(n)}$, 其中 $\alpha_{me} = \sum_n \alpha_{me} F_{m-e}^{(n)}$, 其中 $\alpha_{me} = (1 - \alpha_{ce})^n$, α_{ce} 是锥壁对地球辐射的吸收率.

(b) 一级冷块从地球屏蔽所吸收的热量 H_h .利用镜面象阵理论,该辐射换热量可写成

$$H_h = A_d \varepsilon_d \varepsilon_{dh} \sigma T_h^4; \quad (8)$$

式(8)中, $\varepsilon_{dh} = \sum_n \alpha_n F_{d-h}^{(n)}$ 为一级冷块看到的地球屏蔽的有效比辐射率; $\alpha_n = 1 - [1 - \varepsilon_h]^n$, 是地球屏反射 n 次所产生的吸收率; ε_h 是地球屏的红外比辐射率; $F_{d-h}^{(n)}$ 是一级冷块对 n 次屏口象的视因子.

(c), 二级冷块从锥体吸收的辐射热 H_r . 利用镜面象阵理论, 该辐射热量可表示为

$$H_r = A_P \varepsilon_{Pc} \sigma T_c^4 \varepsilon_P; \quad (9)$$

式(9)中, ε_{Pc} 为二级冷块看到的锥体的有效比辐射率. 其中, $\varepsilon_{Pc} = 1 - \sum_n F_{P-m}^{(n)} (1 - \varepsilon_c)^n$, ε_c 为锥壁的比辐射率; $F_{P-m}^{(n)}$ 是二级冷块对 n 次锥口象的视因子.

4.3 热力学计算结果

在一定的零部件物理参数及致冷器使用环境条件下, 致冷器的尺寸越大, 就越容易得到好的致冷性能, 即能达到更低的温度和更大的冷量. 但是, 致冷器的最大尺寸应以满足工程上的要求为标准, 在选定辐冷器的最大尺寸以后, 还要适当地安排辐冷器各部分的尺寸, 以得到最佳的致冷性能. 根据大量的计算结果, 所选辐冷器的最大尺寸为 400 mm. 各主要几何尺寸的理论值如表 1 所示.

表 1 辐冷器的理论尺寸

Table 1 Theoretical dimensions of the radiant cooler.

参 量	尺寸(mm)	参 量	尺寸(mm)
地球屏长度	169.0	一级冷块宽度	84.0
地球屏宽度(大端)	396.2	一级冷块长度	316.0
锥体高度	121.4	二级冷块宽度	61.8
锥体宽度(大端)	272.9	二级冷块长度	216.0

用于 FY-1 气象卫星上的辐射致冷器致冷性能、电子线路的测温 and 温控性能均达到技术指标要求.

致谢

金敏达、袁祥通、朱理清、张守

德、杨晓峰、朱文兵等, 在此向他们及协助我们工作过的同志表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Radiant Cooler—Theory, Flight Histories, Design Comparisons and Future Applications, AIAA paper 75~184.
- [2] Annable, R. V. Radiant cooling, *Applied Optics* 11(1972), 1495~1501.
- [3] Annable R. V. et. al., Design of a dual patch multi-element radiant cooler, July 1970, NASA-CR-111134.

RADIANT COOLER SYSTEM FOR FY-1 METEOROLOGICAL SATELLITE

YANG CHUNJIANG, WANG WEIYANG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

The design, structure and application of the radiant cooler system used for VHSR infrared detectors in FY-1 Meteorological Satellite are reported.