

卫星热控简介

王华涛

哈尔滨工业大学（威海）

材料科学与工程学院

Wanghuatao@hit.edu.cn

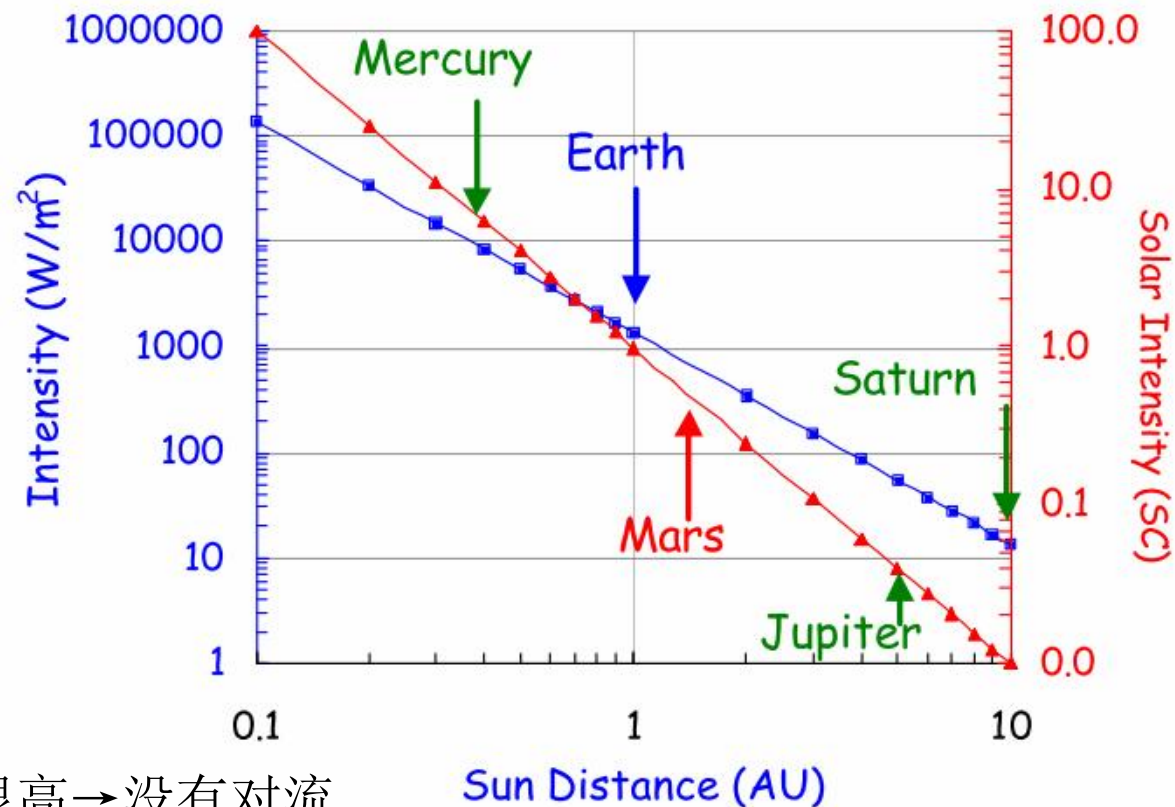
2014.02.17

目录

- 1. 卫星周围的热环境
- 2. 卫星热控的背景
- 3. 卫星热控的主要手段
 - 被动热控（PTCS, Passive Thermal Control System）
 - 黄金甲
 - 棉袄，多层隔热组件，柔性热控薄膜
 - 辐射器（OSR，汗衫）
 - 传热片
 - 界面填料
 - 主动热控（ATCS, Active Thermal Control System）
 - 热管
 - 加热器
 - 百叶窗（辐射量可调节的辐射器）

卫星周围的热环境

Solar Intensity vs Sun Distance

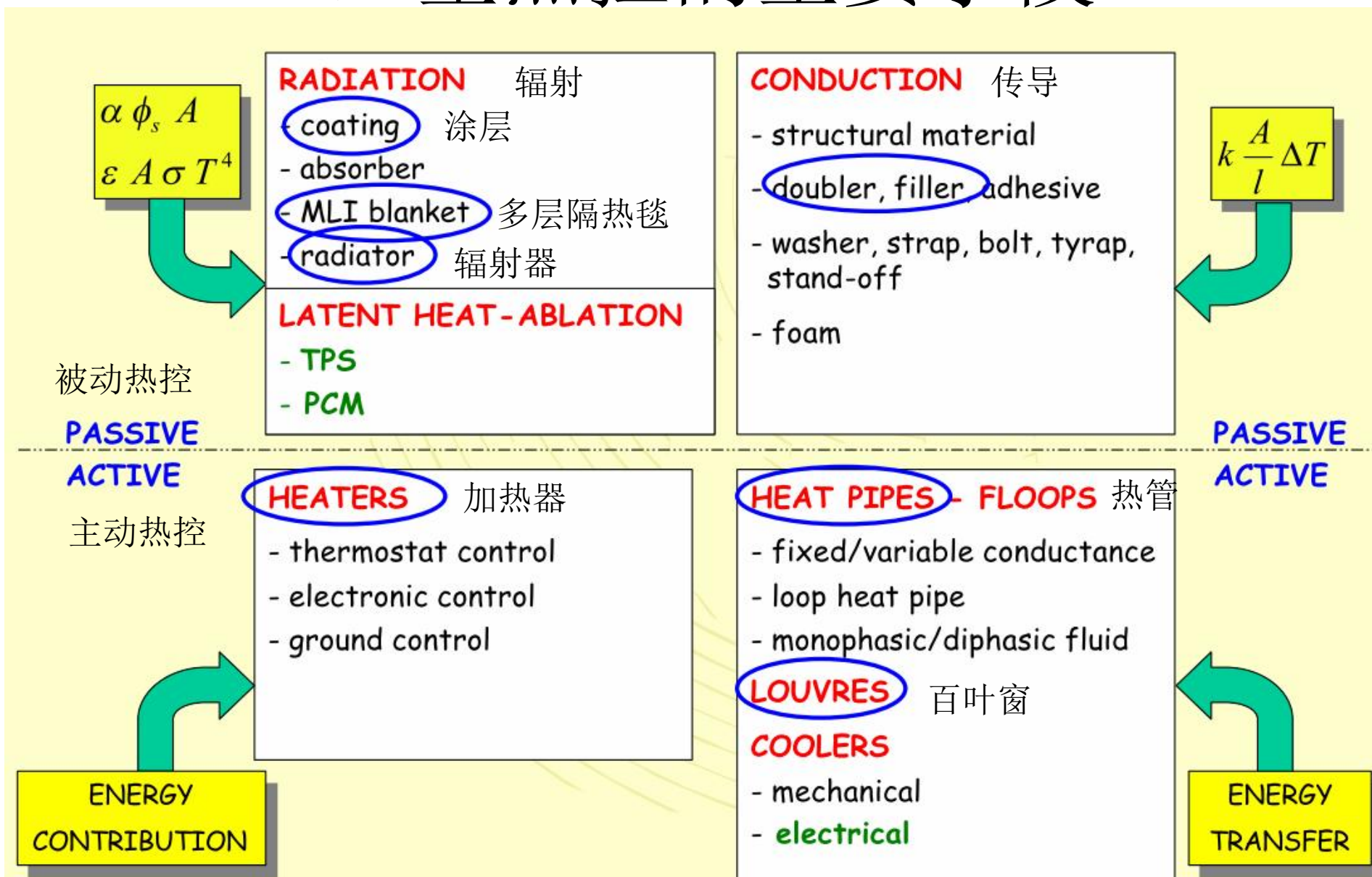


- 1. 真空度很高→没有对流
- 2. 深太空→冷, 2.7K
- 3. 太阳的热流密度→ 1367 W/m^2
- 4. 来自地球和其他星体的辐射

卫星热控的背景

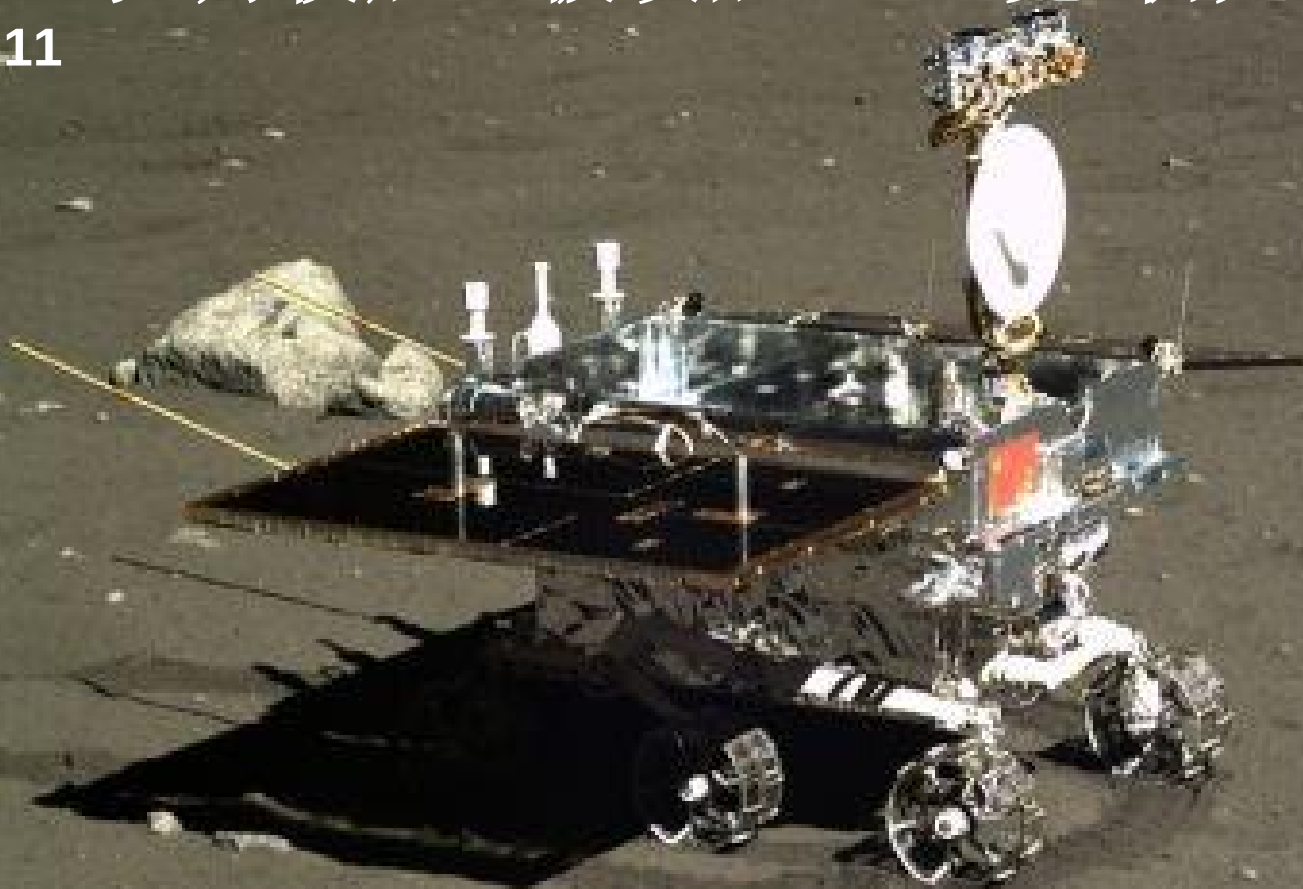
- **Narrow Temperature Ranges** 温度范围 窄
 - electronics equipment
 - classical equipment $[-10, +40] ^\circ\text{C}$
 - battery $[0, +20] ^\circ\text{C}$
 - propulsion system $[+10, +50] ^\circ\text{C}$
- **limited Temperature Gradients** 温度梯度 小
 - ΔT $< 5^\circ\text{C}$ across optical instrument (1.5 m)
 - $\Delta T/\Delta x$ $< 2^\circ\text{C/m}$ for structural element
 - ΔT $< 5^\circ\text{C}$ between MMH and NTO tanks
- **Stable Temperatures** 温度波动 小
 - $\Delta T/\Delta t$ $< 5 \text{ K/h}$ for typical electronic unit
 - $\Delta T/\Delta t$ $< 0.1 \text{ K/mn}$ for CCD camera
 - $\Delta T/\Delta t$ $< 100 \mu\text{K/mn}$ for cryogenic telescope
- **Why is it so important?**
 - low temperatures for reliability of components
 - narrow temperature ranges for sensitivity of detectors, units
 - small temperature gradients for pointing of instruments, S/C

卫星热控的主要手段



“嫦娥三号”月夜后已被唤醒，“玉兔”仍无消息

2014.02.11



嫦娥、玉兔

为什么要月夜休眠？

- 月球上无大气, 温差超过 300°C
- 朝向太阳一面 130°C
- 背面, 零下 180°C
- 没有太阳, 就没有电能供给

<http://www.cnbeta.com/articles/271988.htm>

身披黄金甲的“嫦娥三号”

如此的高温和低温，嫦娥如何全身（保温）？ -180°C $+130^{\circ}\text{C}$

黄金甲：卫星的“棉袄”

反射镜OSR：卫星的“汗衫”，辐射器

热管：高效传热



黄金甲

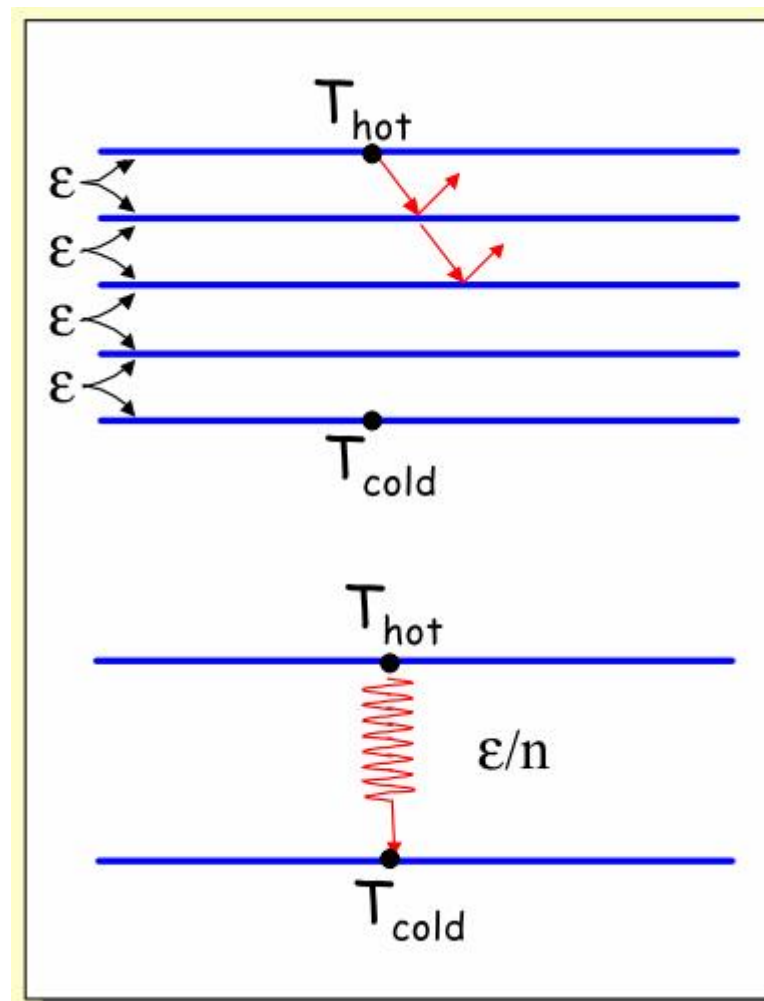
- （黄金甲）需要具备何种特性？
- 高反射率（低吸收率）----反射太阳光
- 低热导率----阻止热量传入、传出
- 耐高温----**130 °C**
- 黄金甲：（反射层+间隔层）多层隔热组件。高温时隔热；低温时保温；聚酰亚胺镀铝膜
- 聚酰亚胺：耐高温达 400°C 以上，长期使用温度范围-200~300°C
- 铝膜：反射率很高，大于90%，熔点660 °C

多层隔热组件

- 在真空环境中，热量只能通过热传导、热辐射的方式进行传递，被卫星吸收的来自太阳、月亮热能，和卫星内部各仪器工作产生的废热最终通过热辐射形式辐射到外空环境中。
- 为了有效调节"嫦娥"的体温，设计人员对星外表的状态进行了精心设计，主要使用了两种材料：第一种最为常见，卫星舱体外壁的大部分都被贴上了金灿灿的超级隔热材料--多层隔热组件。高温时有隔热效果；低温时，它保证卫星"体温"不至于急剧下降，算是卫星的"棉袄"了。

多层隔热组件

- 多层隔热组件（MLI, multi-layer insulation）由多层反射膜和间隔层组成。由于其优良的真空绝热性能而被称做“超级隔热面”。MLI分为三种，低温、中温和高温。
- 低温MLI: $-196\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +120\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - 反射层材料是镀铝聚酯
 - 间隔层材料是涤纶
- 中温MLI: $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - 反射层材料是镀铝聚酰亚胺
 - 间隔层材料是玻璃纤维
- 高温MLI: $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - 反射层材料是镍箔
 - 间隔层材料是玻璃纤维
- 应用
 - 各类卫星及载人飞船



反射层（柔性热控薄膜）

- 柔性热控材料是一种高效的被动温控材料，常用于航天器。传导型聚酰亚胺基板不仅用于卫星控温，还能消除充电/放电效应及原子氧效应。我方的产品有四种材料：包括二次表面镜、主表面镜、透明传导涂层（tcc）及涂锗pi。基底是pet（[聚对苯二甲酸乙二醇酯](#)），pi（聚酰亚胺）和fep（氟化乙烯丙烯共聚物）。

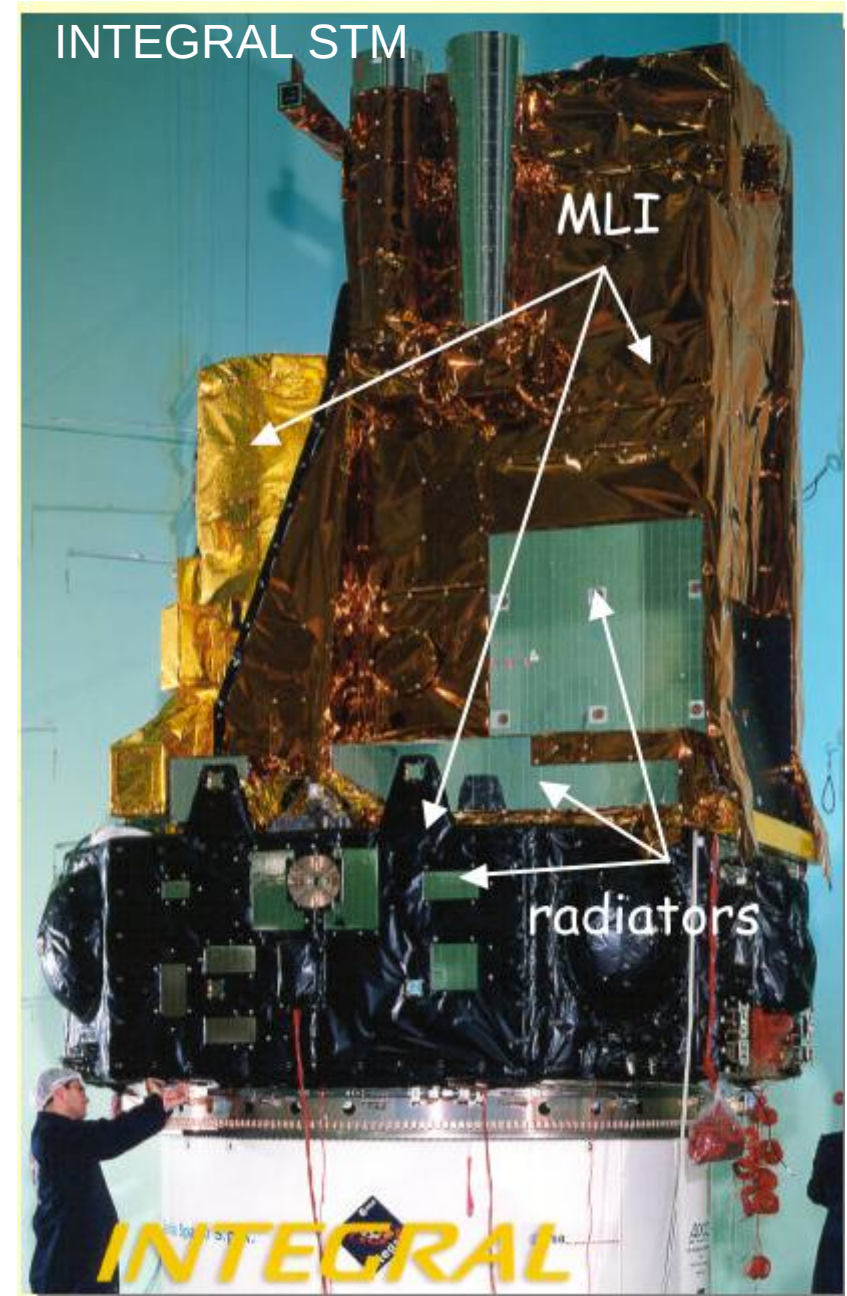
产品		基底	太阳吸收率	半球发射率	表面阻抗 (w/口)	射频插入损失
二次表面镜	铝/fep	50 μm fep	≤0.14	≥0.60		
	铝/fep/ tcc	50 μm fep	≤0.19	≥0.60	≤10 ⁵	
	镍基合金/银/fep	50 μm fep	≤0.09	≥0.60		
	镍基合金/银/fep/ tcc	50 μm fep	≤0.14	≥0.60	≤10 ⁵	
	铝/pi	25 μm pi	≤0.39	≥0.62		
	铝/pi/tcc	25 μm pi	≤0.44	≥0.62	≤10 ⁵	
镀铝主表面镜		pi或pet	≤0.14	≥0.05		
透明传导膜		pi或pet			≤10 ⁵	
涂锗pi		pi	≤0.48	≥0.75	≤10 ⁵	≤0.1db

汗衫（辐射器）

- （反射镜**OSR**）需要具备何种特性？（与基尔霍夫定律是否矛盾？）
- 低吸收率（高反射率）----反射太阳光
- 高**IR**发射率----内部热量辐射出去
- 耐高温----**130** °C
- 底部：金属反射膜，吸收率低，反射率高
- 顶部：掺**CeO₂**的石英玻璃，透射率高，发射率高
- 太阳光透过玻璃，由金属辐射层反射出去
- 热量通过反射层，由玻璃层辐射出去

OSR

- 光学太阳反射镜（ Optical Surface reflectors, OSR），
- 像小镜子，表面银光闪闪，卫星的散热面（辐射器）。
- 贴在卫星“体表”，“占领”的面积少。
- 能将90%的太阳辐射能量直接反射回太空，同时自身的热辐射能力又很强，从外部环境中吸收的热量 and 卫星内部热量都会被一块块的 OSR辐射出去，堪称卫星的“汗衫”。



光学太阳反射镜

- OSR, 一种寿命长、被动热控制元件, 广泛用于航天器以保持设计的工作温度。传导型OSR不仅用于卫星控温, 还能消除静电充电/放电的潜在危害。目前在中国, 以石英玻璃和掺杂 CeO_2 的玻璃为基板的OSR已开发, 并成功用于各类卫星。

类型	太阳吸收率 (α_s)	半球发射率 (ε_h)	表面电阻 (r)
q-osr	≤ 0.08	≥ 0.76	—
q-osr/c	≤ 0.08	≥ 0.76	$\leq 400 \Omega/\text{mm}$
ce-osr	≤ 0.10	≥ 0.80	—
ce-osr/c	≤ 0.10	≥ 0.80	$\leq 400 \Omega/\text{mm}$

中国卫星有了自己的二次表面镜

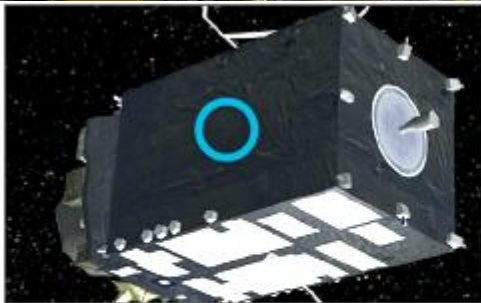
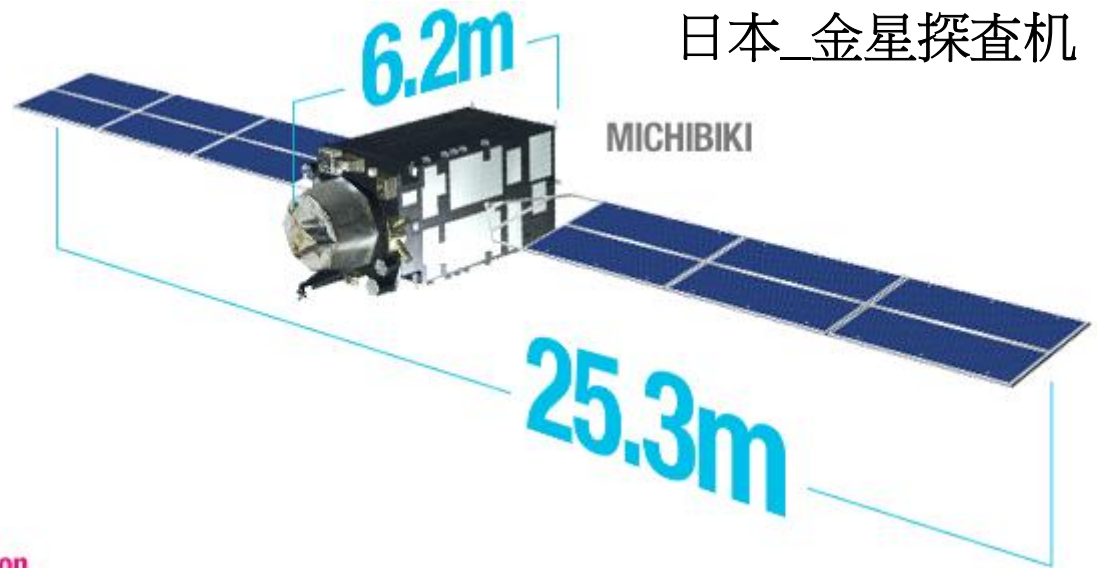
- 卫星二次表面镜（OSR）是航天器热控系统中非常重要的被动热控器件。2010年，由510所自主研发的新型卫星二次表面镜产品的光学、热学、电学性能等主要技术指标达到了国际同类产品的先进水平，具有低太阳吸收率、红外发射率高、防静电、抗辐照等特点。该产品通过了相当于地球同步轨道卫星在轨15年所接受辐照剂量的模拟空间环境试验，已应用于高、中、低不同轨道的卫星，产品在轨性能稳定，最长在轨使用已超过10年。



中国卫星有了自己的二次表面镜

	α_s	ε_h	Front surface	Rear surface	Front to back
	Solar absorptance	Hemi-sphere	sheet resistance	sheet resistance	conductivity
		emittance			
Non-conductive	0.07 ± 0.02	0.78 ± 0.02	—	≤ 1Ω/ sq	≤ 200kΩ
fused quartz OSR					
Conductive fused	0.07 ± 0.02	0.78 ± 0.02	≤ 21kΩ /sq	≤ 1Ω/ sq	≤ 200kΩ
quartz OSR					
Non-conductive	0.09 ± 0.02	0.82 ± 0.02	—	≤ 1Ω/ sq	≤ 200kΩ
CeO ₂ -doped glass OSR					
Conductive CeO ₂ -doped	0.09 ± 0.02	0.82 ± 0.02	≤ 21kΩ /sq	≤ 1Ω/ sq	≤ 200kΩ
glass OSR					
ITO Coated Aluminized Polyimide	≤ 0.40	0.60 — 0.80	≤ 250K Ω /sq	≤ 3Ω/ sq	—

日本_金星探查机



Multi Layer Insulation

【熱制御系】 MLI (多層断熱材)

多层隔热层，由反射层和隔热层多层结构组成
反射太阳光，防止热量传入和传出，保温作用



Optical Solar Reflector

【熱制御系】 OSR

光学太阳反射镜，反射太阳光，防止温度升高
辐射内部热量到周围空间

<http://qz-vision.jaxa.jp/PLAY/>



<http://qz-vision.jaxa.jp/READ/qz-navi04.html>

传热片 (thermal doubler, 热倍增)

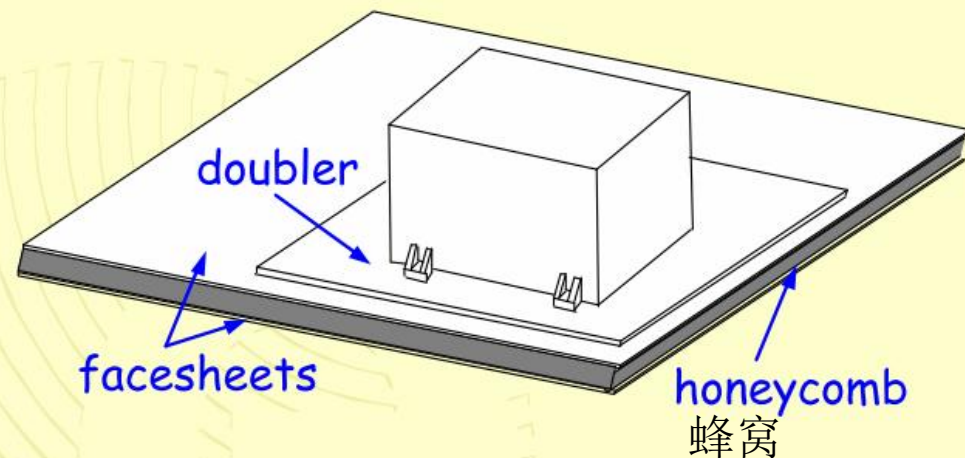
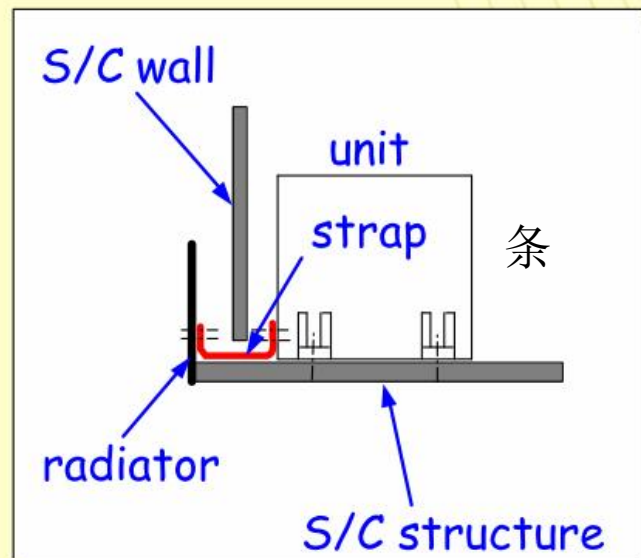
Thermal doublers

to spread on the radiator surface the heat dissipated by equipment

将设备产生的热传递到辐射器表面

- **Structural Material Selection**

- Al alloy 120-170 W/m.K
- Ti alloy 7-15 W/m.K
- steel 10-40 W/m.K



- **Thermal Doublers**

- spread heat dissipation under unit
- 1 mm thick Al alloy sheet

- **Straps/Braid (detector to radiator)**

- Cu, Al alloy wrapped in MLI/SLI
- short < 10 cm

- **Contact Area**

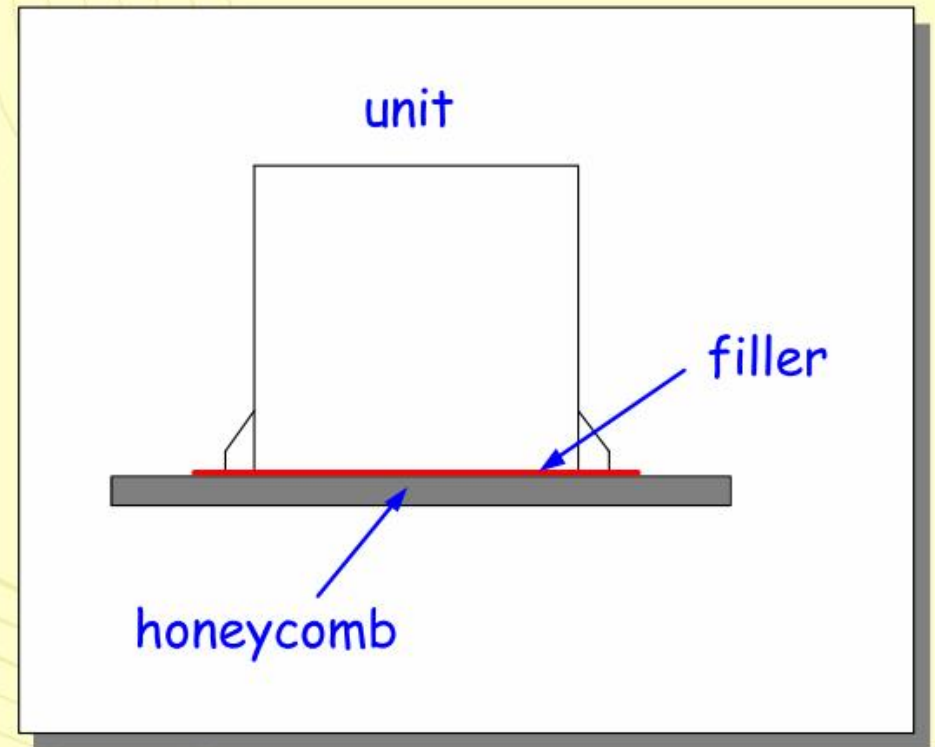
界面填料

- Interface Fillers

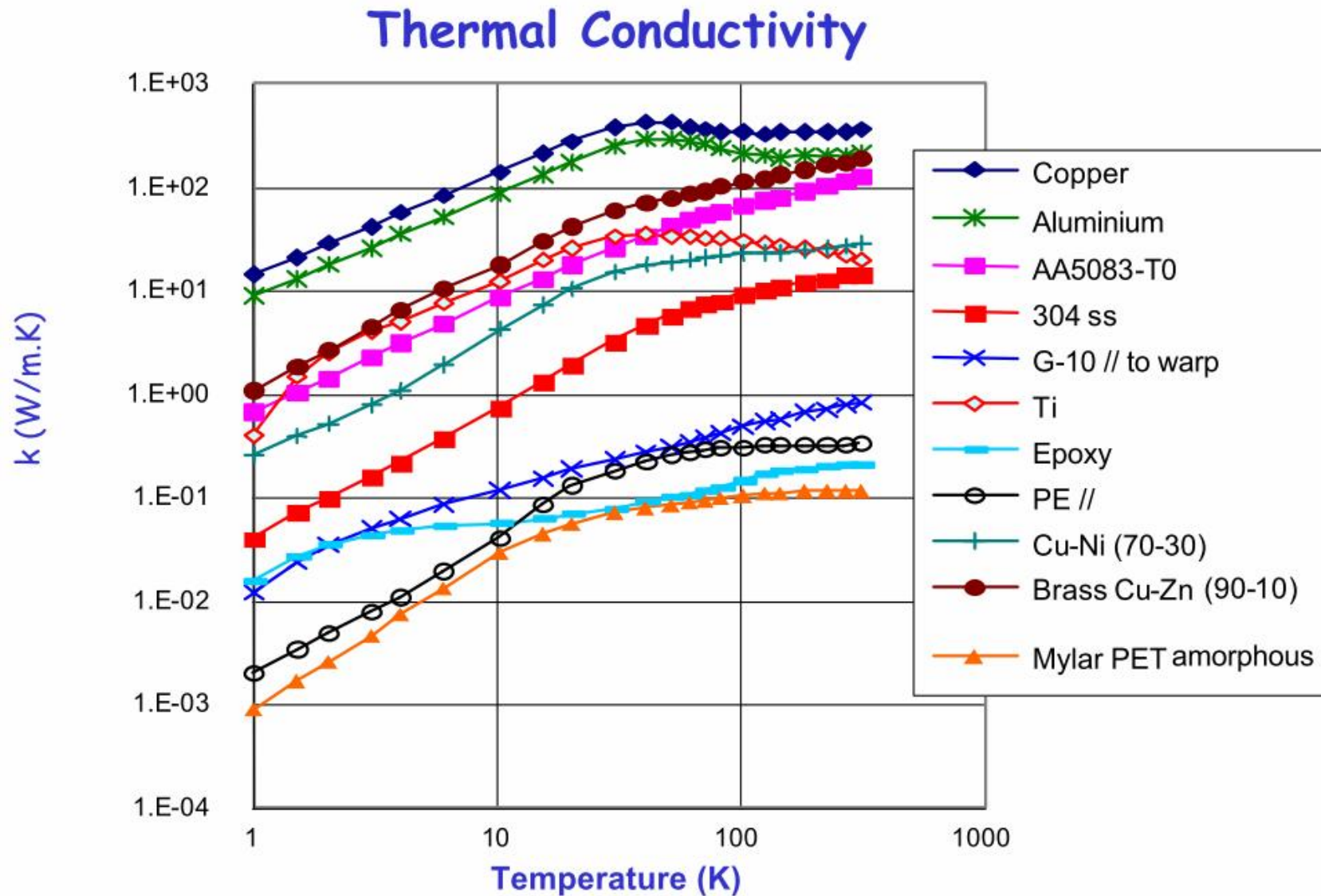
- better unit to S/C conductance
- graphite (Sigraflex®)
 - laminated graphite sheet 层状的石墨片
 - electrical conductor
 - thickness 0.25 mm

有机硅弹性体，实质上就是 导热硅脂

- silicone elastomer (Cho-therm® 1671)
 - silicone binder, filled with boron nitride particles, reinforced with fibreglass cloth
 - electrical isolator
 - 硅氧烷粘结剂，填充了BN颗粒，并用玻璃纤维布增强
 - 电绝缘



卫星常用材料的热导率

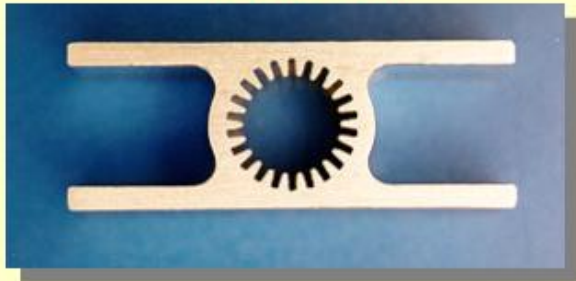


热管

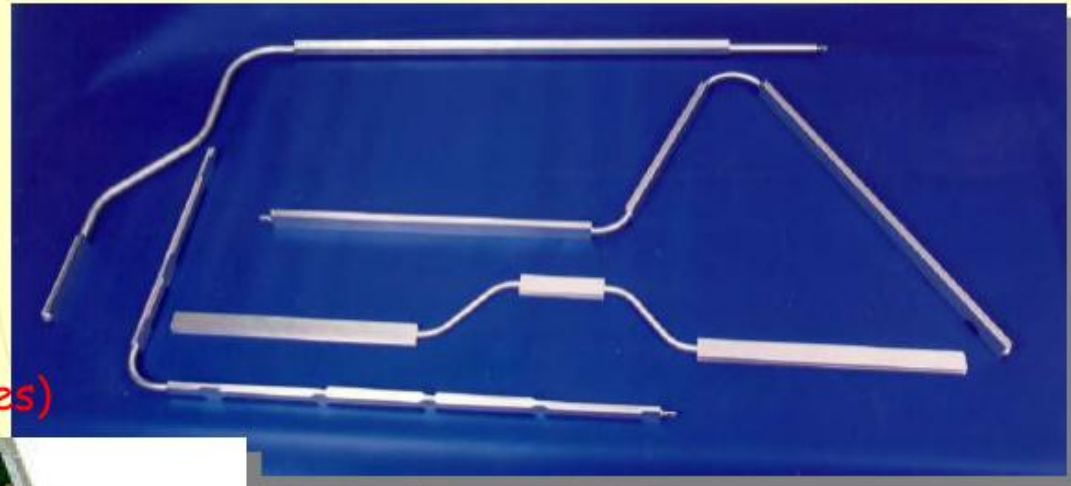
- 卫星热控系统还采用了一种特殊的产品--热管，其导热性能是紫铜的200倍
- 拿着一根长2~3米长的热管一端，将另一端放入100℃沸水中，几秒的功夫，手感觉到热而不能把持。
- 卫星上装热管，就是利用它将一个设备或者部位的热量迅速传递到另外一个的设备上去。
- 如立体相机中的CCD，如果温度过高，燥点过多将影响成像。设计人员用热管将CCD及周围器件工作时产生的热量引导到舱外，辐射出去，保证了其工作温度的要求。

热管

Ø 12 mm



Telecom Panel Heat Pipe (Swales)



bi-tube



举例

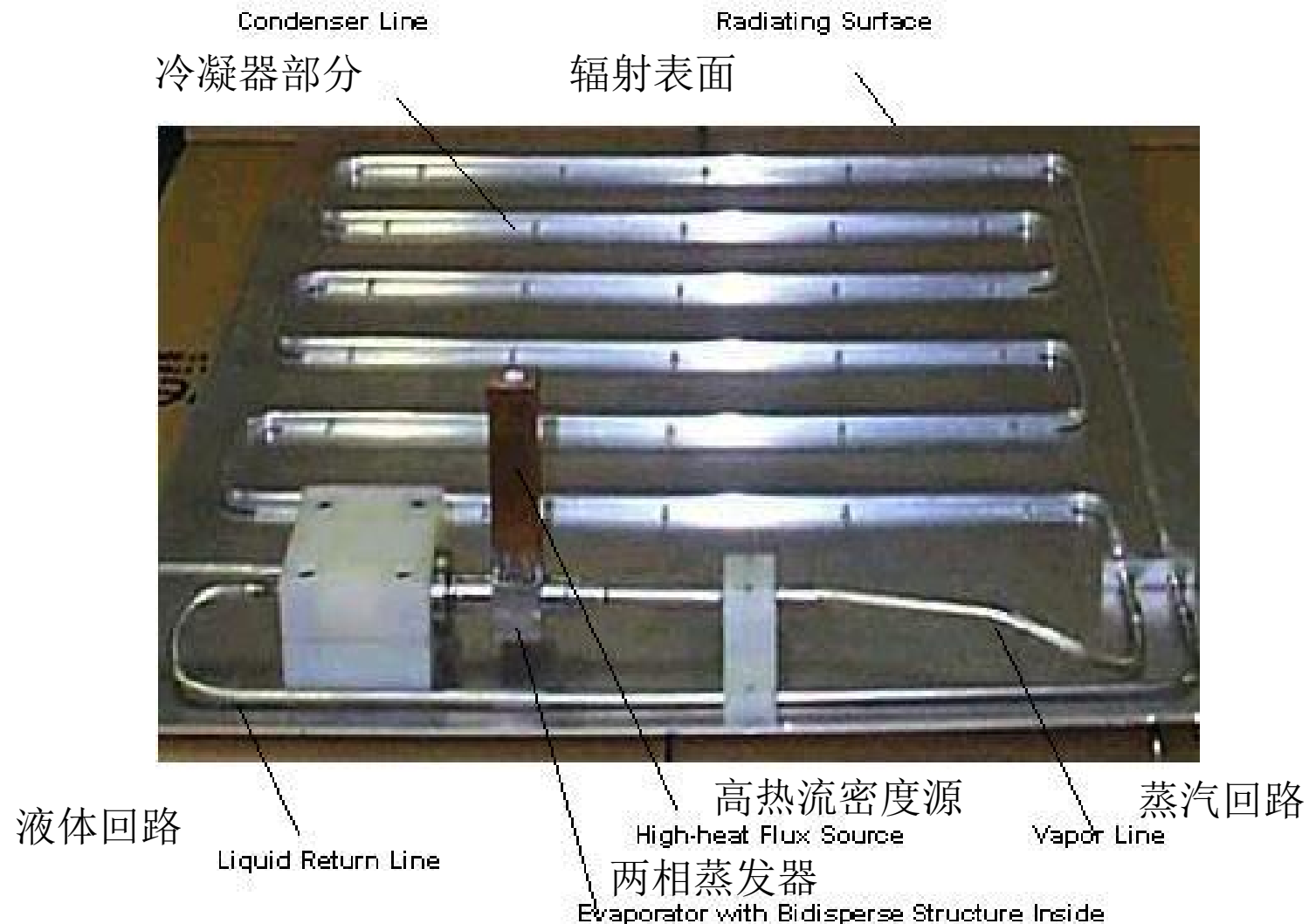
U型热管

- 正常状态下，嫦娥一号卫星在距月球表面**200公里**高度的轨道上运行，交替经过月球的阳面、阴面。卫星飞行在月球的阳面时，在太阳的照射和月球红外热流共同影响下，卫星朝阳面的温度会迅速升高，卫星的另一面温度又会很低。
- 按照卫星任务安排，这样的情况交替在卫星的两个面上重复
- 热控设计人员巧妙地设计了**3根U型热管**贴在卫星舱外舱板上，将一侧的热量快速传递到另一面，

举例

Loop Heat Pipe for High Density Small Satellite Thermal Control

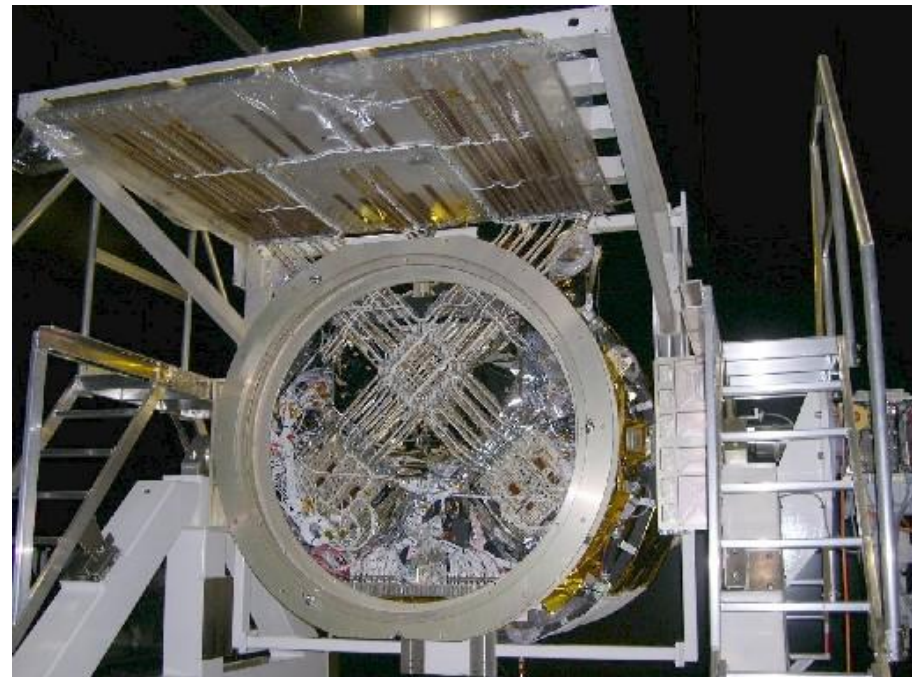
高密度小卫星热控系统用回路热管



ALADIN卫星上的热管

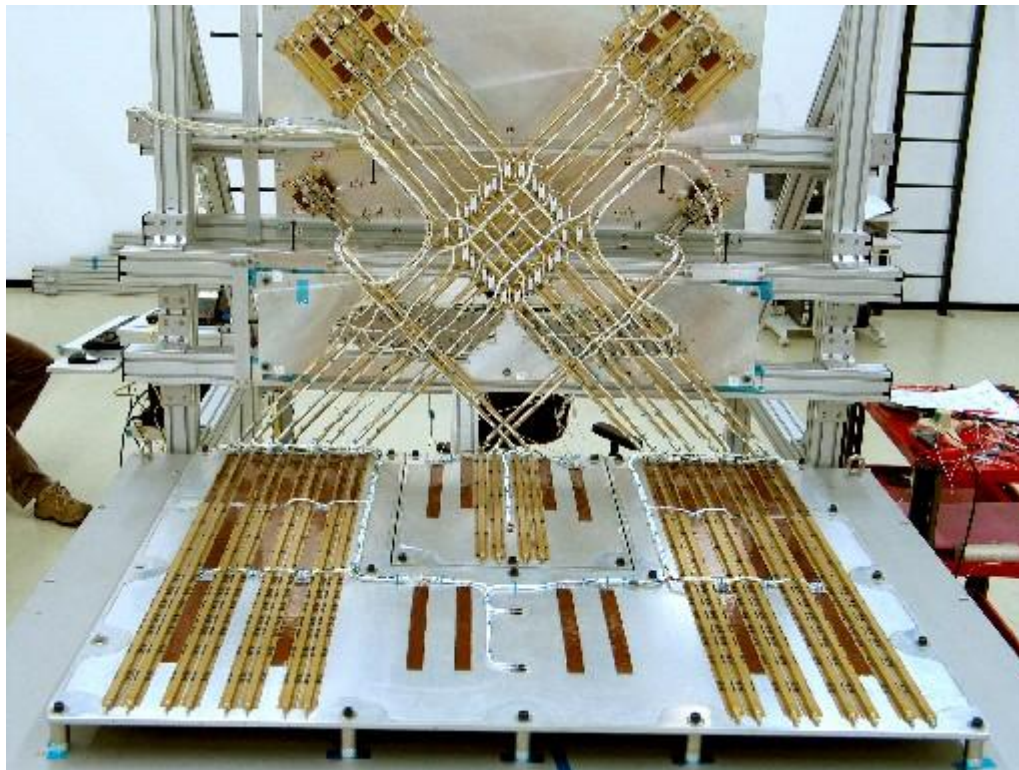
- ALADIN 卫星上的热管散热系统

Dutch Space

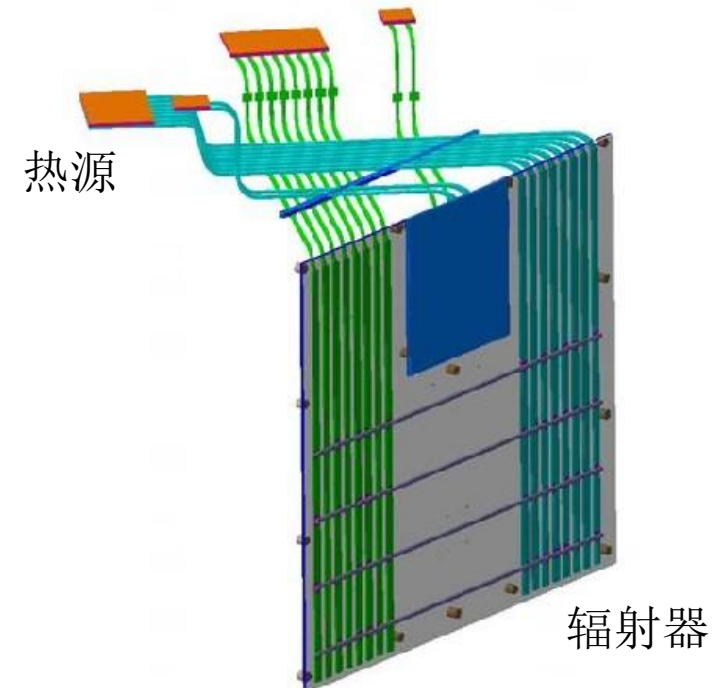


热管_ALADIN

- 热管和辐射散热器

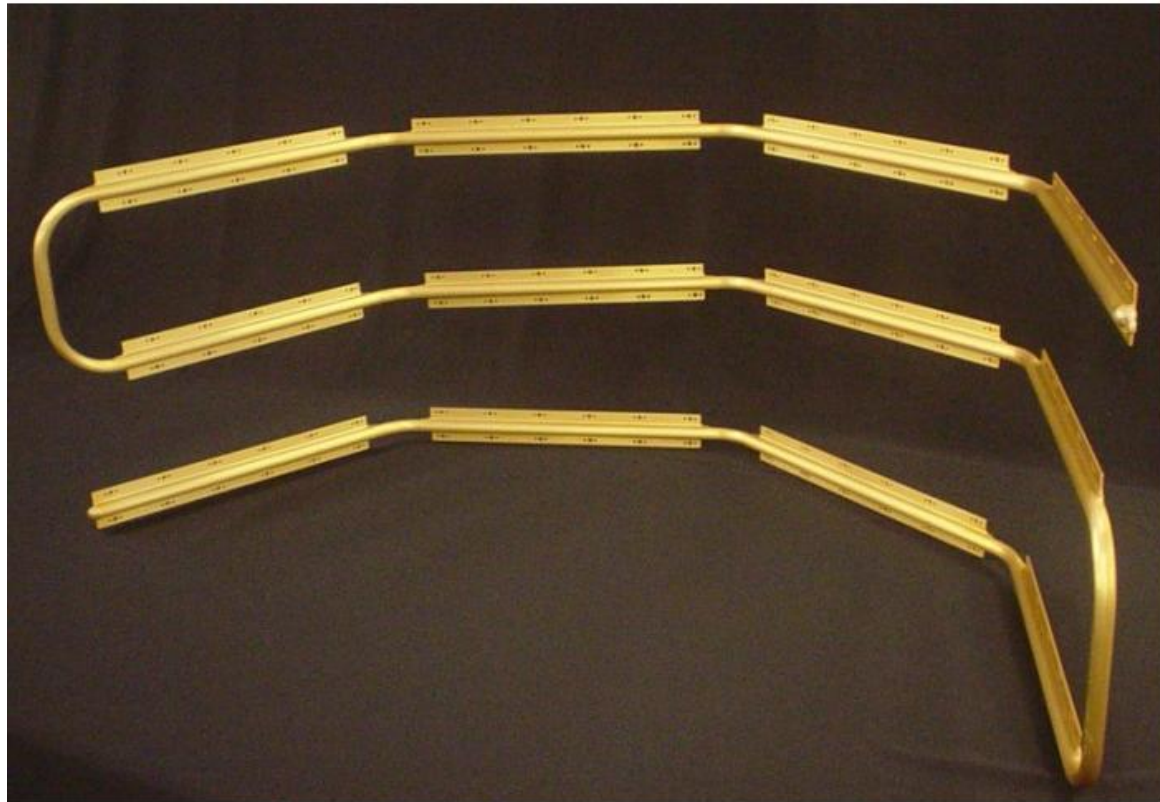


Aladin Laser Radiator Back-end



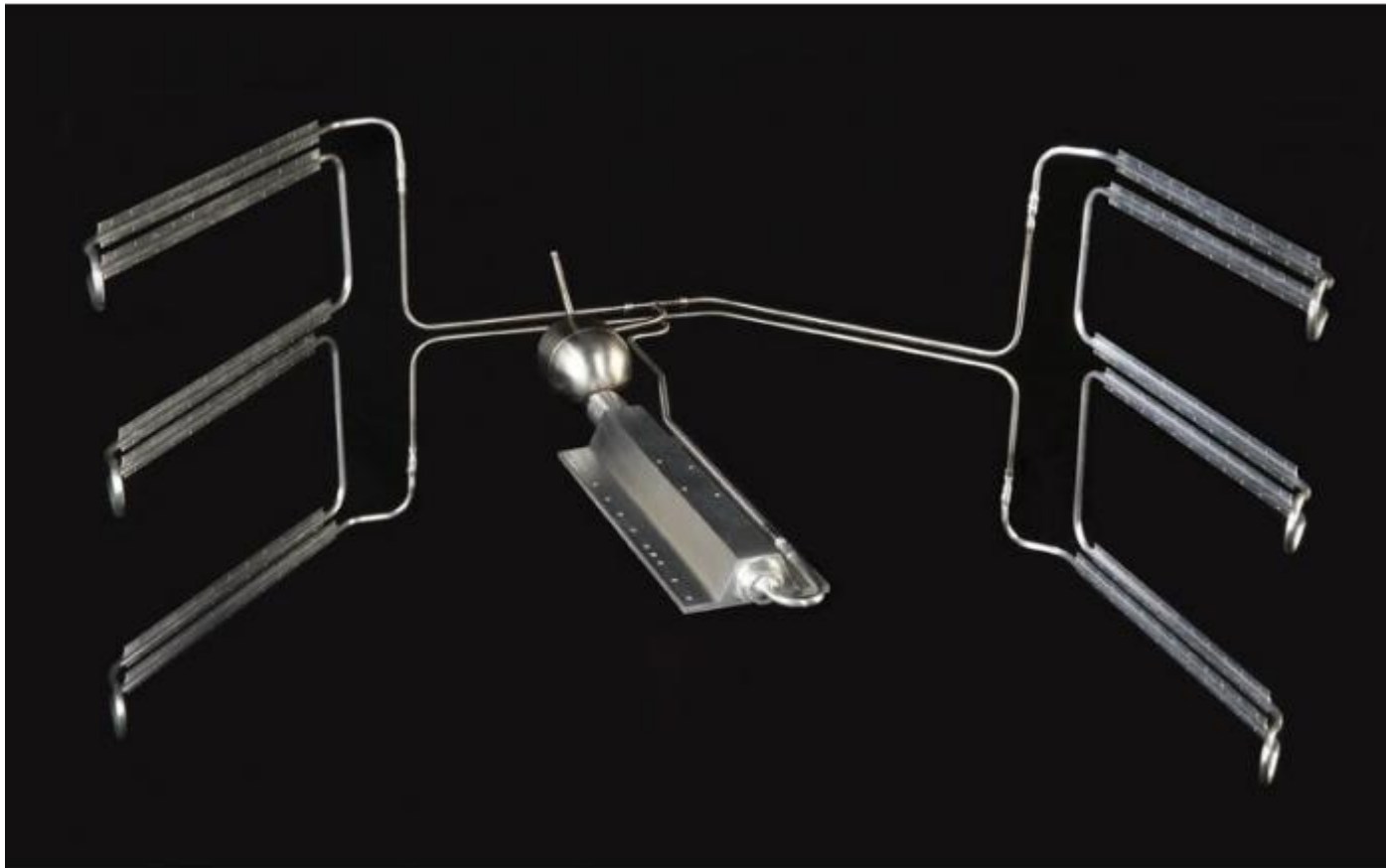
热管举例

Satellite thermal control constant conductance heat pipes



热管举例

Satellite thermal control loop heat pipe



更多资料

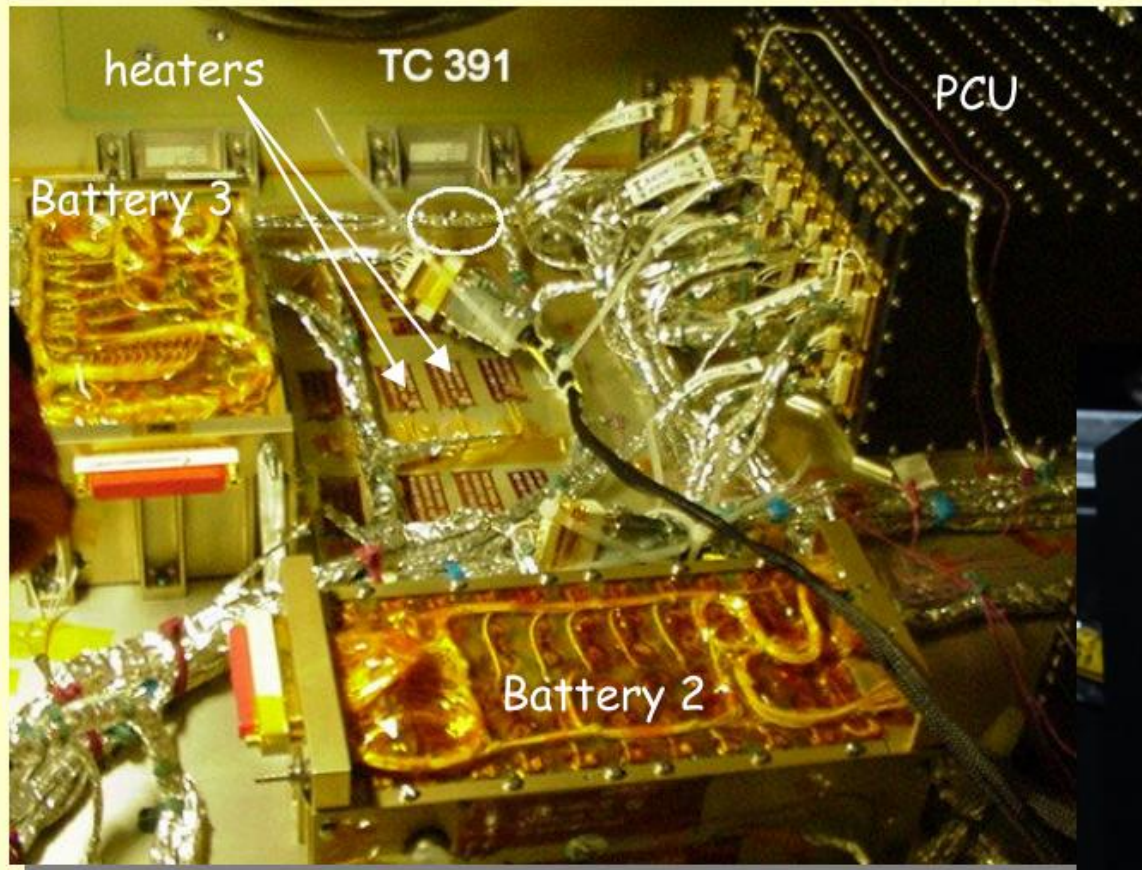
<http://www.1-act.com/resources/heat-pipe-fundamentals/heat-pipe-gallery/>

加热器_Heater

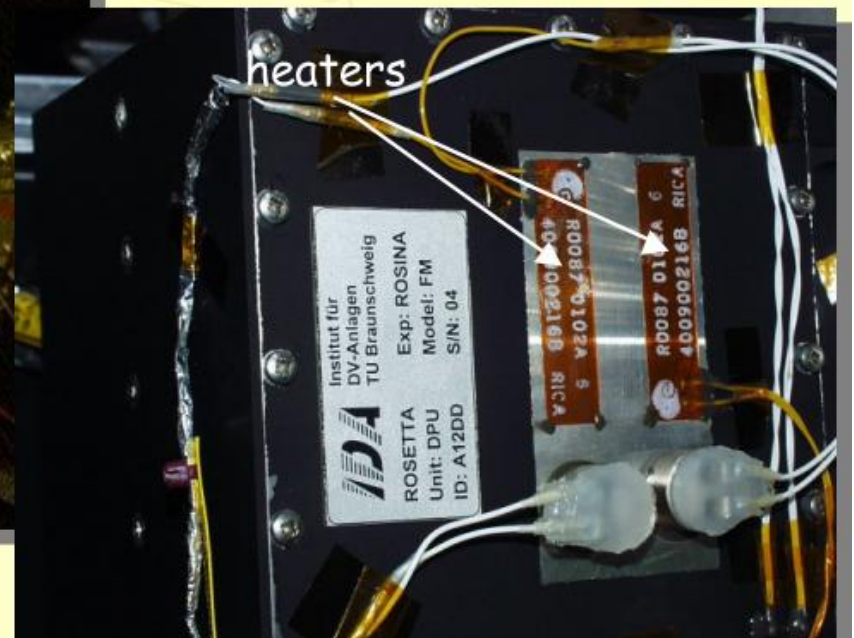
- 卫星哪个部位套上“棉袄”，哪个部位只穿“汗衫”，哪些设备需要热管导热，都是很讲究的。
- 这些热控材料的布局与卫星的体内的设备的位置密切相关。所有的设备不能被热着，也不能被冻着
- 如电池，在低温下其工作效能很受影响，其星内部分被“棉袄”包裹了起来，形成了单独的温度控制空间，而且，在电池的周围，还配上了加热器，以保证它必须的温度。

加热器_Heater

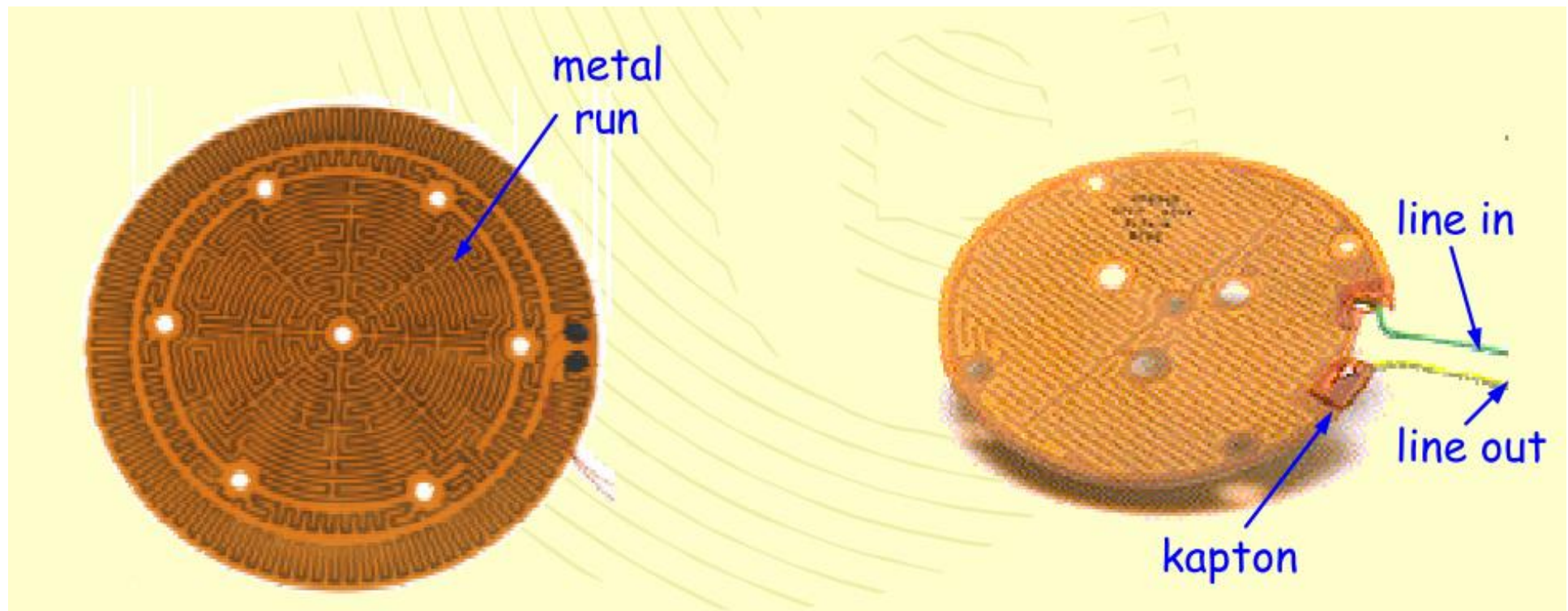
ROSETTA FM Heaters



ROSETTA FM ROSINA DPU



加热器_Heater



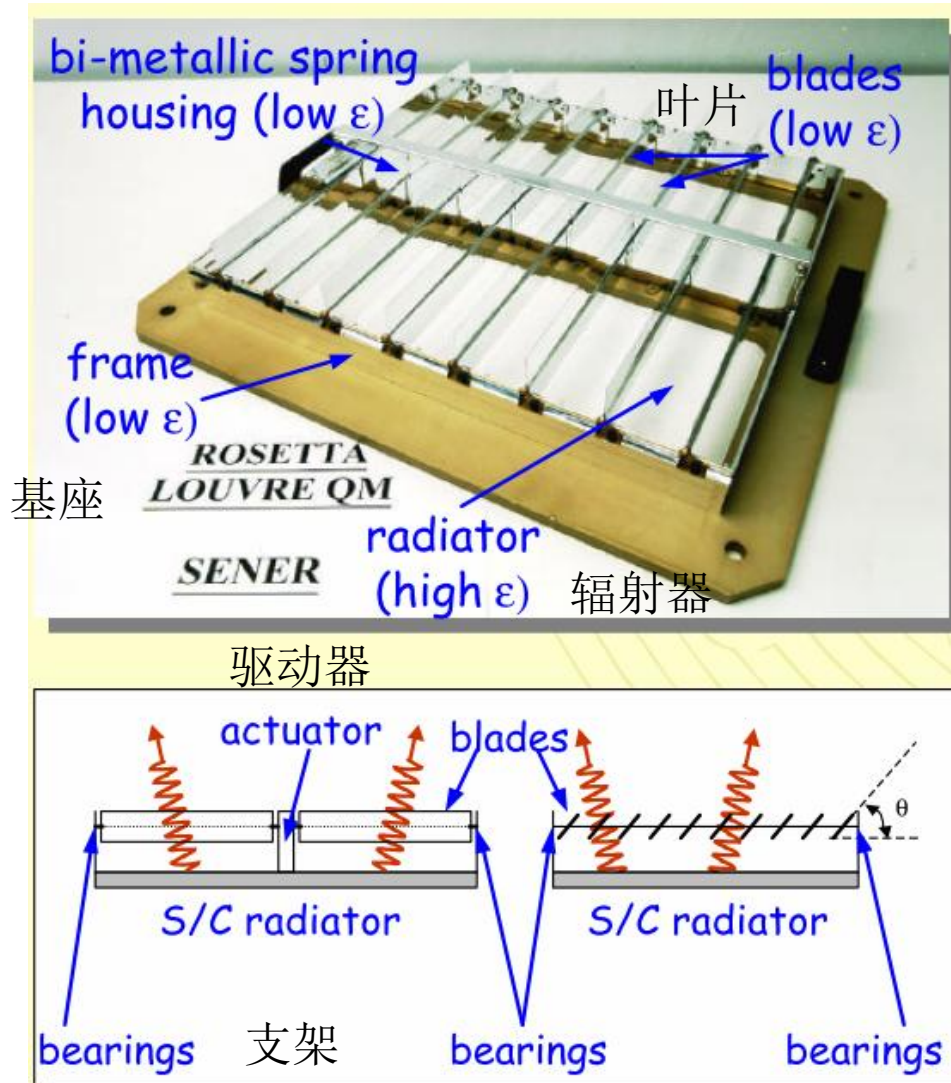
加热器_Heater

ROSETTA FM OSIRIS PEM-H



Louvre_百叶窗

双金属弹簧



- 用途

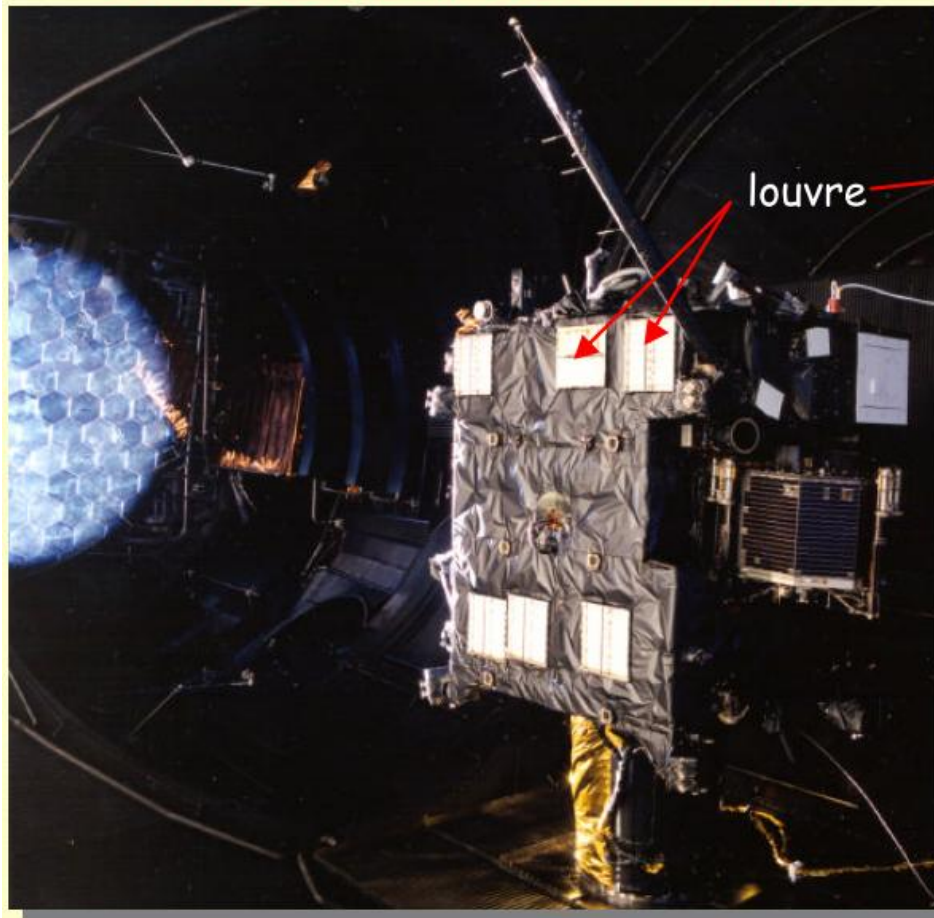
- 根据温度，控制辐射器的辐射热量

- 原理

- 辐射器（高辐射率）上方是可按一定角度摆动的叶片（低辐射率）
- 温度变化，促使双金属的弹簧形变，驱动叶片摆动
- 从而控制辐射出去的辐射量

Louvre_百叶窗

SENER Louvre on ROSETTA* PFM



*without Solar Panels

Louvre on CASSINI-HUYGENS



“嫦娥三号”身上披着的黄金甲——聚酰亚胺 镀铝柔性热控膜

- 510所为“嫦娥三号”披上金色外衣
- “嫦娥三号”身上披着的黄金甲——柔性热控膜也是航天器热控制技术采取的主要手段之一。510所柔性膜研制组承担了“嫦娥三号”深空探测器热控分系统导电型聚酰亚胺镀铝柔性热控膜的研制任务，成功为“嫦娥三号”卫星研制出性能满足热控要求的“金色外衣”，保证了嫦娥卫星在太空中能满足自身温度要求，该所研制的热控材料指标均达到了国际先进水平。

“嫦娥三号”身上披着的黄金甲——聚酰亚胺 镀铝二次表面镜柔性热控膜

- 2013年
- 12月16日讯 “嫦娥三号”的成功再次给国人无比的振奋力量，同时也为510所表面工程研究室卫星热控OSR研制组送来自豪的成绩：不仅因为登陆器和月面巡视器“玉兔”展示给世人的中国国旗是由该研制组设计研制，“嫦娥”衣服上那些金光闪闪的部分(二次表面镜产品)也由他们完成。
- 510所研制生产的掺铈玻璃型OSR，是空间飞行器热控系统中重要的一部分，在利用其高效散热功能的同时，有效保护了空间飞行器不受各种空间辐射的影响。通过科学细致的工艺研究，510所不仅解决了膜层附着力、膜均匀性等一系列关键技术，还成功研制出了满足深空探测用长寿命、高可靠卫星要求的产品。该产品不仅在技术性能上达到国际水平，而且在抵抗空间辐照方面更有出色的表现。此外，该所从工艺方面进行技术攻关，减小了器件的厚度，这在方便总装粘贴及节约发射成本等方面都取得了实质性的提高。

参考文献

- 1. Philippe Poinas（欧洲航天局ESA的热设计工程师）Satellite Thermal Control Engineering，下载地址：http://www.tak2000.com/data/Satellite_TC.pdf
- 2. http://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_thermal_control
- 3. 各类网络资源，文中已经表明出处