

# 月面巡视探测器太阳帆板热电耦合仿真计算

任德鹏, 贾阳, 刘强  
(中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 文章建立了月面巡视探测器太阳帆板热电耦合计算模型, 制定了太阳帆板的对日定向方案和输出电能分配方案, 通过数值模拟获得了月面白昼期间太阳帆板的温度及电能输出, 分析了太阳帆板背面包覆隔热材料前后及帆板是否对日定向等方案的计算结果。计算表明, 当帆板不对日定向时其背面包覆隔热材料对其温度场及电能输出无明显影响, 对日定向时帆板温度随时间的分布规律发生了明显改变, 此时帆板背面包覆隔热材料使其温度明显上升, 但帆板顶面与背面的温差减小。

**关键词:** 月面巡视器; 热电分析; 数值模拟

**中图分类号:** 476.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2008)05-0423-05

## 1 前言

目前国内已经完成月面巡视探测器原理样机的研制, 并进行了系列测试和实验。在后期的研制中仍需进行大量的设计工作, 其中太阳帆板是探测器电源分系统中重要的组成部分, 它通过热和电2种方式影响探测器主体的工作条件, 因此, 对太阳帆板进行热电耦合分析是巡视器设计中的一项重要工作。

与其他航天器不同, 月面巡视探测器工作在月球表面, 在某些时刻月表的红外辐射可以达到与太阳辐射相当的数量级, 因此不能忽略月面温度对巡视器太阳帆板的影响作用。为降低帆板的温度值, 拟考虑将帆板背面包覆多层隔热材料, 材料的表面发射率很小, 可减小月表对帆板的辐射加热。但考虑帆板对日定向时, 巡视器车体和帆板的位置均不断调整变化, 隔热材料的实际效果需计算或实验确定。以往在航天器太阳帆板的热计算中, 较少考虑帆板热电转换效率随温度的变化及供电电路的调节分流作用<sup>[1, 2]</sup>, 实际工程中帆板的工作是一个热电耦合过程, 需建立热电耦合计算模型进行分析。为延长月昼期间巡视器的正常工作时间, 需考虑太阳帆板的对日定向方案, 分析比较对日定向后帆板温度及输出电能的变化。

本文建立了月面巡视探测器太阳帆板的热电耦合计算模型, 计算中考虑了太阳辐射、月面红外加

热、巡视探测器车体部位间的辐射换热、太阳帆板对日定向、电源管理模式等方面, 通过模拟月昼期间帆板温度及输出电能随时间的变化规律, 旨在为太阳帆板的电路设计及热控设计提供理论研究数据。

## 2 计算模型及控制方程

图1为月面巡视探测器原理样机实体图。整个巡视器大致呈长方体结构, 内部安装有工作载荷, 太阳帆板可折叠或展开, 依靠调节帆板的张角并借助于车体的旋转可实现太阳帆板的对日定向。现阶段的原理样机主要用于验证控制、移动、视觉等子系统方案, 目前尚未对其进行热设计。在下一步工作中考虑将探测器顶面设计为散热面, 对巡视器太阳帆板的热、电计算可按图2所示的模型进行, 除月面和空间环境外, 与帆板存在辐射换热的主要有车体侧面和顶面散热面。

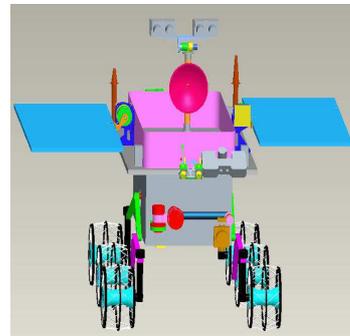
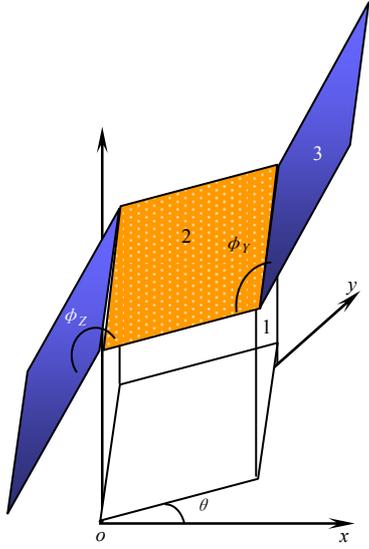


图1 月面巡视探测器样机实体图

Fig. 1 Photo of rover prototype

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-09-23

作者简介: 任德鹏(1976-), 男, 中国空间技术研究院博士后, 现主要从事月球热环境模拟、同位素温差电源热电性能研究工作。E-mail: rdpsd@163.com.



1-车体侧面；2-顶面散热面；3-太阳帆板

图2 月面巡视探测器太阳翼计算简化模型示意图

Fig. 2 The simplified model for analysis of rover solar panel

对于探测器太阳帆板的耦合计算,做以下假定:

- (1) 同一帆板表面具有相同的温度,帆板与车体间没有导热;
- (2) 不考虑月表对太阳辐射的反射对巡视器的热影响;
- (3) 不考虑巡视器阴影对月表温度及其自身温度的影响;
- (4) 月表及探测器各表面均视为漫射灰体表面;
- (5) 在每个离散时刻巡视器视为达到热平衡状态,温度按稳态计算。

在热分析中将帆板沿厚度方向离散若干层,并采用节点网络法计算温度值,则帆板瞬态的热控制方程为

$$\sum_{j=1}^N RD_{j,i} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_{j=1}^N CD_{j,i} (T_j - T_i) + Q_i = 0, \quad (1)$$

式中:  $RD$  为月面巡视器离散面间的辐射传输因子,该项包含了巡视器各面向月面、空间环境的辐射换热和巡视器各面间的辐射换热,详细计算可参考文献[3]。当太阳帆板对日定向时,该参数因车体的位置改变而变化,在每个离散时刻都需重新计算; $s$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数; $CD$  为计算节点间的热导; $Q_i$  为太阳帆板接受的太阳辐射热量,其计算式为

$$Q_i = (1 - \rho) \cdot q_0 \cdot F \cdot \cos \psi \cdot (1 - \eta), \quad (2)$$

其中:  $\rho$  为光电材料对太阳辐射的总反射率,  $q_0$

为太阳常数,  $F$  为巡视器顶面即太阳帆板的面积,  $\psi$  为太阳帆板表面法向量与阳光的夹角,  $\eta$  为材料的光电转换效率。

车体顶面散热面的当量温度计算式:

$$T_w = \sqrt[4]{\frac{Q_R + (1 - \varepsilon) \cdot q_0 \cdot F \cdot \cos \psi}{\sigma \cdot \varepsilon \cdot F}}, \quad (3)$$

式中:  $Q_R$  为散热面的净散热量;  $\varepsilon$  为散热面表面发射率。

光电材料的光电转换效率随温度变化,在  $25^\circ\text{C}$  时其效率值为  $0.267$ ,超过该温度时,平均每升高  $1^\circ\text{C}$  效率降低  $0.2\%$ ;低于该温度时,平均每降低  $1^\circ\text{C}$  效率增加  $0.2\%$ ,用公式可表示为:

$$\eta = 0.267 [1 - 0.002(T - 25)]. \quad (4)$$

太阳帆板的输出电量计算式为:

$$P = (1 - \rho) \cdot q_0 \cdot F \cdot \cos \psi \cdot \eta. \quad (5)$$

### 3 计算结果分析

#### 3.1 计算条件

##### 3.1.1 计算参数

巡视器车体的长、宽、高分别为  $1.0\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m}$ ,车体底面距地面高度  $0.3\text{ m}$ ,太阳帆板厚度为  $0.026\text{ m}$ ;月表红外发射率为  $0.92$ ;巡视器车体包覆有多层隔热材料,其红外发射率为  $0.03$ ;太阳帆板顶面的红外发射率为  $0.8$ ,对太阳辐射的总反射率为  $0.08$ ,帆板背面不包覆隔热材料时其红外发射率为  $0.78$ ;车体顶面散热面的表面发射率为  $0.8$ ;帆板的导热系数为  $0.428\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;太阳常数  $q_0 = 1353.0\text{ W}/\text{m}^2$ ;空间环境温度  $T_\infty = 0\text{ K}$ 、车体侧面温度保持  $280\text{ K}$  不变;车体顶面散热面的净散热量为  $200\text{ W}$ ;车体所有载荷所需的平均电功率为  $150\text{ W}$ 。

定义无量纲时间  $t^* = t/t_{\text{moon}}$ ,  $t_{\text{moon}}$  为月面白昼时间,即  $336\text{ h}$ ,无量纲时间表示计算时间占月面白昼的比例。

##### 3.1.2 太阳帆板定向方案

月面巡视探测器采用两个自由度实现太阳帆板的对日定向:一是依靠车体的旋转,二是依靠帆板的张合。如图2中所示的坐标系中,假设车体沿坐标系的  $Z$  轴旋转,转角为  $\theta$ ,右帆板的张角为  $\phi_y$ ,左帆板的张角为  $\phi_z$ 。若帆板不对日定向则  $\theta = 0^\circ$ 、

$\phi_Y = \phi_Z = 180^\circ$ 。

受车体结构的影响，巡视器太阳帆板的最大张角为  $225^\circ$ ，因此在某些时刻难以满足左右两帆板的同时对日定向。制定帆板对日定向的方案，首先是保障右帆的充分对日定向，使阳光垂直照射该帆面，然后再调节左帆，使该面有最好的光照条件。表 1 为月昼期间在月面赤道上巡视器帆板对日定向的姿态调整结果。

表 1 月面赤道上太阳翼对日定向巡视器姿态结果  
Table 1 Rover attitude when the solar panel is pointing to the Sun on lunar equator

$t^*$	$\theta / (^\circ)$	$\phi_Y / (^\circ)$	右帆面法向与阳光夹角/ $(^\circ)$	$\phi_Z / (^\circ)$	左帆面法向与阳光夹角/ $(^\circ)$
1/30	0	96	0	225	39
3/30	0	108	0	225	27
5/30	0	120	0	225	15
7/30	0	132	0	225	3
9/30	0	114	0	216	0
11/30	0	156	0	204	0
13/30	0	168	0	192	0
15/30	0	180	0	180	0
17/30	180	168	0	192	0
19/30	180	156	0	204	0
21/30	180	114	0	216	0
23/30	180	132	0	225	3
25/30	180	120	0	225	15
27/30	180	108	0	225	27
29/30	180	96	0	225	39

### 3.1.3 太阳帆板输出功率分配方案

式(5)提供的太阳帆板电功率计算式不完全适用于实际供电电路，该式只有在帆板电量能够完全输出的情况下适用，而实际电路中均设有分流电路，当帆板提供的电量大于车体载荷所需的总功率时，分流电路将多余的电功率又转换为热损耗加载到帆板上，此时帆板的实际输出功率即为车体载荷电功率，其热功率为

$$P_R = (1 - \rho) (q_0 \cdot F \cdot \cos \psi - P_R) \quad (6)$$

式中： $P_R$  为车体载荷电功率。

制定帆板的电功率分配方案为：首先保证右帆板的电力输出，当帆板电力剩余时左帆板不输出电量；而只有在右帆板不能满足载荷需求时，差缺电功率在左帆板上提取。

## 3.2 计算结果分析

### 3.2.1 月表温度分布

图 3 为月球赤道上月表温度在白昼期间的变

化分布图，可见在相同的高度角条件下，下午月表温度高于上午，这是由于月壤的热惯性导致的。详细计算过程可参考文献[4]，以图 3 中计算的月表温度作为巡视器帆板计算的边界条件之一。

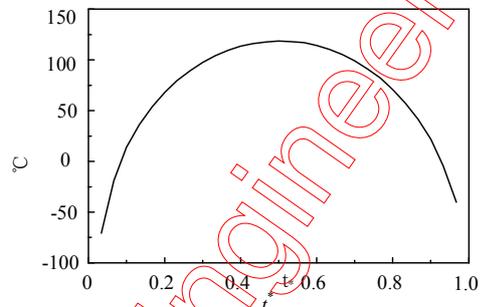
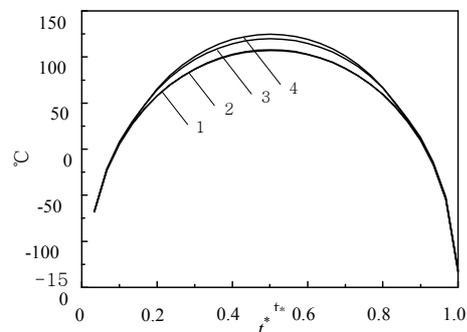


图 3 月昼期间赤道上月表温度分布  
Fig. 3 Temperature on lunar equator in a lunar day

### 3.2.2 太阳帆板热电耦合计算结果

图 4 为月面赤道上太阳帆板不对日定向时的温度分布图，其中帆板背面不包覆隔热材料。由图可见，当太阳高度角较小时，左右两块帆板的发电功率总和小于载荷的需求，此时两板的工作条件一致，因此有相同的温度；随着太阳高度角的增加，帆板的发电量出现富余，此时多余的电量首先被分在左帆板上，因此左板的温度升高，且该帆板的顶面和背面存在一定温差，该温差在月面正午时最大，约为 6 K；而右帆板的顶面和背面的温度大致相同。

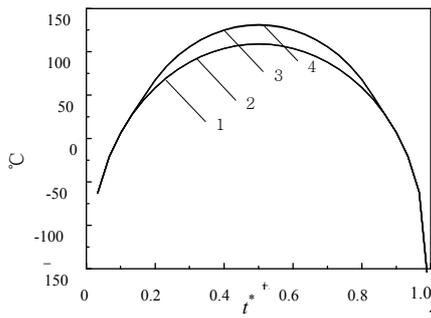
图 5 是在图 4 的计算基础上将太阳帆板背面包覆上隔热材料后的计算结果。对比图 4 可见，在太阳帆板不对日定向条件下帆板背面包覆隔热材料前后帆板的温度变化不明显。



1-右帆板背面温度；2-右帆板顶面温度；3-左帆板背面温度；4-左帆板顶面温度

图 4 背面不包覆隔热材料、太阳翼不对日定向时太阳翼温度分布

Fig. 4 Temperature of solar panel when the backside is not covered by insulation material and solar panel is not pointed to Sun

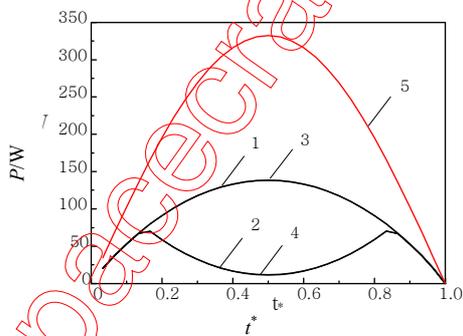


1-右帆板背面温度；2-右帆板顶面温度；3-左帆板背面温度；4-左帆板顶面温度

图5 背面包覆隔热材料、太阳翼不对日定向时太阳翼温度分布

Fig. 5 Temperature of solar panel when the backside is covered by insulation material and solar panel is not pointing to the Sun

图6为太阳帆板不对日定向时其输出电功率的变化图。计算显示，在太阳高度角较小时左右两帆板具有相同的输出电功率；随着太阳高度角的增加，两帆板的总发电量开始超过车体电功率，此时电源管理器首先保证右帆板电功率的输出，而在左帆板上进行分流调节，保证两帆板的总输出功率等于车体所需的电功率；随着太阳高度角的减小，左右两帆板又开始具有相同的电功率输出；在 $t^* = 0.2 \sim 0.8$ 期间内，太阳帆板能够满足车体载荷所需的电功率；太阳帆板背面包覆隔热材料前后对其电输出没有明显的影响作用。图中曲线5为不考虑帆板热电转换效率随温度变化、不考虑帆板分流作用时两块帆板总输出功率的分布图。可见理想条件下，帆板不对日定向时其理论总发电功率随太阳高度角的变化曲线接近线性，正午时发电量最大值超过330W。

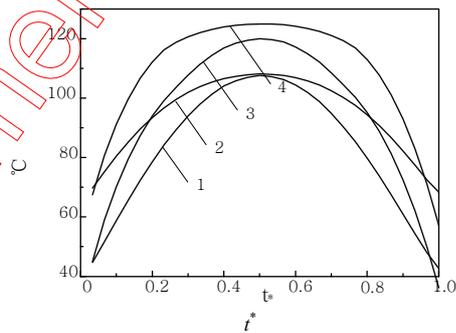


1-背面包覆隔热材料右帆板输出功率；2-背面包覆隔热材料左帆板输出功率；3-背面包覆隔热材料右帆板输出功率；4-背面包覆隔热材料左帆板输出功率；5-太阳帆板理论总发电功率

图6 太阳翼不对日定向时其输出功率的分布图

Fig. 6 Power output of the solar panel when it is not pointing to the Sun

对太阳帆板的对日定向进行热电耦合计算。图7为帆板背面不包覆隔热材料时帆板温度分布图，对比图4可见帆板对日定向后其温度场发生了明显变化：由于计算方案中保证右帆板的充分对日定向，因此该板温度明显高于不对日定向的工况；左侧帆板的定向准则是在调节范围内尽量获得最好的光照条件，在大部分时间内该板的受照条件较右板差，但由于右帆板充分对日定向其电功率输出较充分，导致左板的输出电功率较小而增大了其热功率，因此在整个计算时间内左帆板的温度均高于右侧帆板；帆板背面不包覆隔热材料使得左右两侧帆板的顶面和背面间均存在明显的温差，月面正午时该温差最小，此时右板的顶、背面温度接近一致，而左侧帆板的顶、背面温差仍在5K左右。

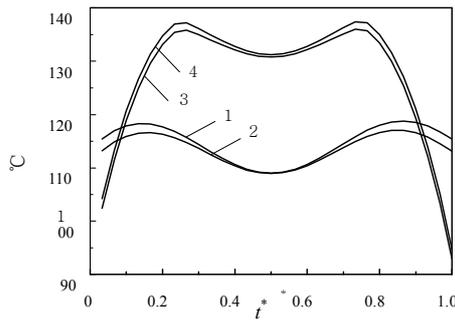


1-右帆板背面温度；2-右帆板顶面温度；3-左帆板背面温度；4-左帆板顶面温度

图7 背面包覆隔热材料、太阳翼对日定向时太阳翼温度分布

Fig. 7 Temperature of solar panel when the backside is not covered by insulation material and solar panel is pointing to the Sun

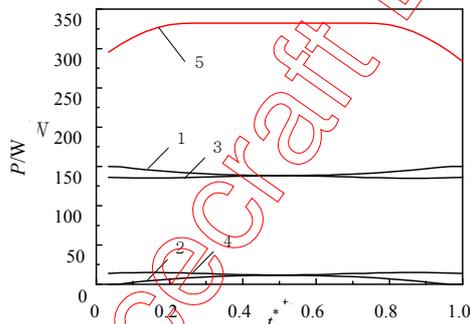
图8反映了帆板背面包覆隔热材料后在月昼期间帆板的温度变化。可见，对日定向后太阳帆板背面包覆隔热材料对其温度场产生了明显的影响作用：帆板随时间的分布规律发生了变化，没有包覆隔热材料时帆板温度随太阳高度角的增加而升高，至月面正午时帆板温度达到最高值，而包覆隔热材料后右帆板温度分别在 $t^* = 0.15$ 和 $t^* = 0.85$ 两时刻附近出现极大值，月面正午时帆板温度最低，而左侧帆板的温度则分别在 $t^* = 0.25$ 和 $t^* = 0.75$ 左右出现极大值；帆板背面的隔热材料使得帆板顶面与背面的温差减小，其最大温差不超过2K，同时使左右两帆板的温度均明显高于不包覆隔热材料的工况。



1-右帆板背面温度；2-右帆板顶面温度；3-左帆板背面温度；4-左帆板顶面温度

图 8 背面覆盖隔热材料、太阳翼对日定向时太阳翼温度分布  
Fig. 8 Temperature of solar panel when the backside is covered by insulation material and solar panel is pointing to the Sun

图 9 为对日定向后帆板输出电功率的变化分布图。由图可见，由于计算中保证了右侧帆板的充分对日定向和其电功率的优先输出，因此右帆的输出电量在整个计算时间内都保持着较大值，其提供的电功率超过载荷所需功率的 92%，帆板对日定向后在整个月昼期间均能够保障探测器载荷的电需求，并有充分的富余；当帆板背面不覆盖隔热材料时其温度随太阳高度角的增加而升高，而太阳帆板热电转换效率下降，因此右帆的输出电功率在月面正午时最低，左帆则最高；帆板背面覆盖隔热材料后，月昼期间帆板温度相对变化降低，因此两帆板的输出电功率也相对稳定。对比图 6 可见，帆板对日定向后其分布曲线发生了明显改善，太阳高度角对帆板总功率的影响作用降低，在  $t^*=0.2\sim 0.8$  期间总功率均可保持在 332 W 不变。



1-背面不覆盖隔热材料右帆板输出功率；2-背面不覆盖隔热材料左帆板输出功率；3-背面覆盖隔热材料右帆板输出功率；4-背面覆盖隔热材料左帆板输出功率；5-太阳帆板理论总发电功率

图 9 太阳翼对日定向时其输出功率的分布图

Fig. 9 Power output of the solar panel when it is pointing to the Sun

## 4 结论

通过对月面巡视探测器原理样机太阳帆板的热电耦合计算，可以得到以下结论：

(1) 当不对日定向时，在  $t^*=0.2\sim 0.8$  期间两块帆板能够保证巡视器载荷的电需求，此时帆板背面是否覆盖隔热材料对帆板的温度及电功率输出的影响较小，在计算时间内帆板的顶面与背面间的温差较小；

(2) 对日定向后在整个月昼期间太阳帆板都能提供载荷所需的电量，并有充足的富余，仅右帆输出的电功率就已占载荷所需电量的 92% 以上。

(3) 对日定向后帆板背面覆盖隔热材料对其温度场和输出电量有明显的影响作用，覆盖隔热材料使帆板温度明显升高，但月昼期间其温度变化范围减小，这使得帆板输出电功率相对稳定。同时隔热材料也导致帆板温度的变化趋势发生了变化，使右帆在正午时其温度最低。覆盖隔热材料使两帆板顶面与背面的温差明显减小。

### 参考文献 (References)

- [1] 张加讯, 文耀善, 李劲东. 单自由度太阳帆板极月轨道月球卫星的初步热分析与热设计[J]. 空间科学学报, 2004, 24 (1): 51-57
- [2] 丁勇, 薛明德, 程乐锦, 等. 空间结构瞬态温度场的 FGHJKIL-有限元分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42 (2): 198-202
- [3] 徐向华, 梁新刚, 任建勋. 月球表面热环境数值分析[J]. 宇航学报, 2006, 27(2): 153-156
- [4] 夏新林, 任德鹏, 董士奎, 等. 管内耦合换热的辐射热流特征及抽样模式比较[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 287-289