

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.04.011

## 航天器帆板温度受火星热流的影响分析

杨 金, 朱新波, 印兴峰, 靳春帅, 盛 松, 翟载腾

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 火星热流对环火轨道航天器的太阳帆板温度有较大的影响。本文建立了火星反照率的数学模型, 分析了火星红外辐射和反照热流变化时, 太阳帆板在近火弧段和远火弧段阴影期各自的温度变化规律。研究表明, 在不同的轨道高度下, 火星红外辐射和反照热流对帆板的影响各不相同, 存在一个帆板温度受较大影响的临界轨道高度。当轨道高度小于此临界轨道高度, 火星红外辐射和反照热流对帆板温度场的影响极大, 不能忽略; 当轨道高度大于此临界轨道高度, 火星红外辐射和反照热流对帆板温度场的影响有限, 可以忽略, 为后续火星探测提供了一定的参考。

**关键词:** 火星; 红外辐射; 航天器; 太阳帆板; 温度场

**中图分类号:** V47      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)04-0578-05

## Effects of the Mars Flux on the Solar Panel Temperature of the Spacecraft

YANG Jin, ZHU Xinbo, YIN Xingfeng, JIN Chunshuai, SHENG Song, ZHAI Zaiteng

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The Mars flux has great influence on the solar panel temperature. This paper establishes a mathematical model of the Mars albedo flux and analyzes the variation of the solar panel temperature in the near Mars area and the far Mars area when the Mars infrared radiation and the Mars albedo change. The research indicates that the influence are different when the spacecraft is at different orbital heights. There exists a critical orbit height. When the orbit height is less than the critical height, the influence is very large, and when it is great than this critical height, the influence could be ignored. This research provides a reference for the future Mars exploration.

**Key words:** Mars; infrared radiation; spacecraft; solar panel; temperature field

火星探测备受瞩目, 火星探测器在环火星轨道上受到的外热流主要包含太阳辐射、火星红外辐射和火星反照。火星红外辐射及火星反照对探测器太阳帆板的热影响不容忽视, 国内外对此研究甚少。

目前国内外主要集中于对火星红外辐射源及物质辐射参数特性的研究。如对火星本体大气、土壤等辐射参数进行研究, Pimenta 等<sup>[1]</sup>分析了不同火星经纬度下大气的辐射特性, 指出质子和中子是辐射能量大于 30 MeV 的主要来源, 离子的影响可

以忽略。West 等<sup>[2-5]</sup>指出 CO<sub>2</sub> 的红外辐射是进入火星大气探测器的背景辐射的主要来源, 对于球形探测器, 在进入火星过程中最大辐射热流可达 3.5 W/cm<sup>2</sup>。Moroz 等<sup>[6]</sup>指出火星表面热辐射是火星亮度(波长大于 5 μm)的主要决定因素, 并通过与 Mars-3 和 Mariner-9 亮温观测数据进行比较计算, 得出火星反照率在 0.15~0.25。还有对火星不同波段辐射的观测分析, 如 Martínez 等<sup>[7]</sup>通过在轨相机观测数据反演出火星表面的反照率变化, 理论推出火星不同区域的亮度变化规律。O'Leary 等<sup>[8]</sup>

**基金项目:** 火星探测工程资助项目。

**收稿日期:** 2020-09-02; **修订日期:** 2021-04-16

**通信作者:** 杨金, 男, 高级工程师, E-mail: 564786470@qq.com。

**引用格式:** 杨金, 朱新波, 印兴峰, 等. 航天器帆板温度受火星热流的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4): 578-582. YANG Jin, ZHU Xinbo, YIN Xingfeng, et al. Effects of the mars flux on the solar panel temperature of the spacecraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(4): 578-582.

对火星上不同波段的观测数据进行了比较分析,对火星的各种参数进行了修正,结果表明火星反照率近似在 0.05~0.35。Kerslakefuture<sup>[9]</sup>通过在轨观测结合仿真计算得出不同经纬度下火星的反照率,火星反照率的范围在 0.175~0.45,并以此计算了能源平衡情况。

综上所述,尚没有文献系统地研究火星红外辐射热流对在轨太阳帆板温度的影响,而太阳帆板温度是影响帆板发电能力的重要因素之一,研究火星热流对太阳帆板温度的影响对于优化帆板发电能力有较高价值。基于此,本文研究了火星红外及反照辐射热流对在轨帆板温度的影响,为火星探测提供了一定的参考依据。

## 1 数学模型与求解

### 1.1 数学模型

对于火星轨道上的探测器,其上任意节点,换热方程为<sup>[10-11]</sup>

$$Q_{sj} + Q_{pj} + \sum_{i=1}^m B_{ij} A_i \epsilon_i \sigma T_i^4 + \sum_{i=1}^n D_{i,j} (T_j - T_i) = (cm)_j \frac{dT_j}{d\tau} + A_j \epsilon_j \sigma T_j^4 \quad (1)$$

式中: $Q_{sj}$ 为节点  $j$  吸收的空间外热流; $Q_{pj}$ 为节点  $j$  的热功耗; $B_{ij}$ 为格布哈特系数; $D_{i,j}$ 为节点  $i$  与  $j$  之间的热传导系数; $(cm)_j$ 为节点  $j$  的热容量; $m$ 为与节点  $j$  有辐射换热的节点数; $n$ 为与节点  $j$  有传导换热的节点数; $A$ 为节点的面积; $\tau$ 为时间。

式(1)中,空间外热流主要包含太阳直接辐射热流、火星反照热流以及火星红外辐射热流等。

上述仿真过程中作如下假定:(1)计算过程中假设太阳光为平行光,即太阳光扩散角为  $0^\circ$ ;(2)航天器建模过程中忽略紧固件等影响;(3)航天器各表面均为灰体;(4)外热流的变化在连续轨道周期内一致。

对于太阳直接辐射热流<sup>[12-13]</sup>,有

$$Q_{\text{sun}} = \alpha_e \cdot S_0 \quad (2)$$

式中: $\alpha_e$ 为该表面对太阳的吸收率, $S_0$ 为火星附近太阳常数。

火星轨道上的航天器,接收到的反照辐射热流主要包含太阳投射到火星大气上的散射热流和与火星表面作用后的反照热流,表述式为<sup>[7]</sup>

$$E_f = E_{\text{atm}} + E_{\text{surf}} \quad (3)$$

式中: $E_f$ 为火星总反照热流; $E_{\text{atm}}$ 为火星大气直接散射太阳光的热流; $E_{\text{surf}}$ 为火星表面反射太阳光的热流。

火星大气直接散射太阳光的热流表达式为<sup>[14]</sup>

$$E_{\text{atm}} = \int_0^\infty \frac{\mu_0 E_\lambda^{\text{TOA}} \omega_\lambda P_\lambda}{4\pi(\mu_0 + \mu_r)} \left( 1 - e^{-\tau_\lambda \left( \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_r} \right)} \right) d\lambda \quad (4)$$

式中: $\omega_\lambda$ 为单个粒子的反照率; $P_\lambda$ 为相函数; $E_\lambda^{\text{TOA}}$ 为火星大气顶面的太阳光谱辐射力; $\tau_\lambda$ 为粒子光学厚度; $\mu_0 = \cos\theta_0$ , $\theta_0$ 为太阳光光线与航天器星下点微平面法向方向的夹角; $\mu_r = \cos\theta_r$ , $\theta_r$ 为航天器与星下点的连线与航天器星下点微平面法向方向的夹角,见图 1。

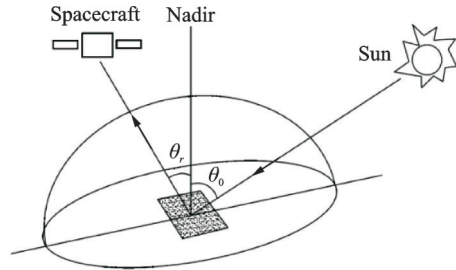


图 1 空间相对位置关系

Fig.1 Spatial relative position relationship

火星表面反射太阳光的热流计算为<sup>[15]</sup>

$$E_{\text{surf}} = \int_0^\infty E_{r,\lambda}^{\text{furf}}(\Omega_i, 2\pi; \Omega_r) e^{-\tau_\lambda/\mu_r} d\lambda + \int_0^\infty \int_{\omega_r'} T_\lambda^{\text{dif}}(\Omega_r, \Omega_r') E_{r,\lambda}^{\text{furf}}(\Omega_i, 2\pi; \Omega_r) d\omega_r' d\lambda \quad (5)$$

式中: $E_{r,\lambda}^{\text{furf}}(\Omega_i, 2\pi; \Omega_r)$ 表示太阳光线被火星表面反射到  $\Omega_r$  方向上的光谱辐射力; $T_\lambda^{\text{dif}}(\Omega_r, \Omega_r')$ 为光线从  $\Omega_r'$  方向到  $\Omega_r$  的辐射传递函数。

那么火星平均反照率可以表示为

$$\rho = \int_0^\infty \frac{\mu_0 \omega_\lambda P_\lambda}{4\pi(\mu_0 + \mu_r)} \left( 1 - e^{-\tau_\lambda \left( \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_r} \right)} \right) d\lambda + \frac{1}{E_\lambda^{\text{TOA}}} \int_0^\infty E_{r,\lambda}^{\text{furf}}(\Omega_i, 2\pi; \Omega_r) e^{-\tau_\lambda/\mu_r} d\lambda + \frac{1}{E_\lambda^{\text{TOA}}} \int_0^\infty \int_{\omega_r'} T_\lambda^{\text{dif}}(\Omega_r, \Omega_r') E_{r,\lambda}^{\text{furf}}(\Omega_i, 2\pi; \Omega_r) d\omega_r' d\lambda \quad (6)$$

式(6)可以参照文献[7]的方法进行简化,并依据该文中在轨相机的观测数据得到参数。

因此,火星的反照热流可按式(7)计算。

$$E_f = \rho \cdot S_0 \cdot \cos\eta \quad (7)$$

火星红外辐射热流为

$$E_{\rho 1} = (1 - \rho) \cdot S_0 \cdot \cos\eta \quad (8)$$

式中: $\rho$ 为火星平均反照率; $\eta$ 为太阳方向与面元法线的夹角。结合式(1~8)即可对在轨航天器温度场进行求解。

### 1.2 求解及校证

建立火星探测器热分析模型,选取火星大椭圆轨道(297 km×12 000 km,远火弧段有长阴影约 100 min)进行热仿真计算,并采用热平衡试验验证,热平衡试验条件为:探测器在真空罐内竖直放

置,真空度优于 $6.65 \times 10^{-3}$  Pa,热沉温度 100 K。试验时状态如图2所示,采用红外加热笼模拟散热面外热流,采用加热片模拟多层外的外热流,模拟在轨飞行时的温度变化情况。

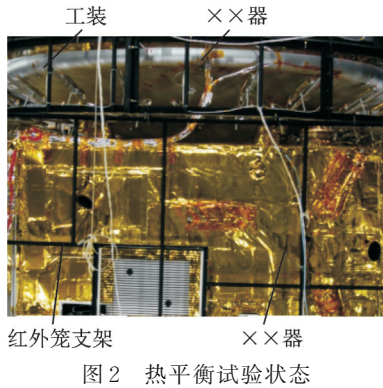


Fig.2 Status of the thermal equilibrium experiment

试验过程为:探测器在真空罐内竖直放置→抽真空→通液氮,待热沉温度达到约 100 K→进入试验工况,开始施加外热流→对红外加热笼和外热流模拟加热器施加电流,模拟航天器外热流→单机按在轨模式开机→等待单机温度平衡。

由于大椭圆轨道的工况周期为 8.2 h,外热流的施加以 8.2 h 为一周期循环一次,工况平衡的条件为在连续 4 h 内,主要单机温度波动值不超过  $\pm 0.5$  °C,待工况平衡后,该工况结束,进入下一个试验工况。

依据热试验数据对热仿真模型中参数进行修正,主要修正参数为:(1)单机的热耗;(2)单机与安装面的传热系数;(3)补偿部分不参与热试验的部件的红外热流。对舱内某单机的仿真温度和热试验温度统计结果如图3所示,由图3可知,修正后的模型仿真数据与试验数据对比最大温差 1.1 °C,修正后的仿真模型具有较高计算精度。

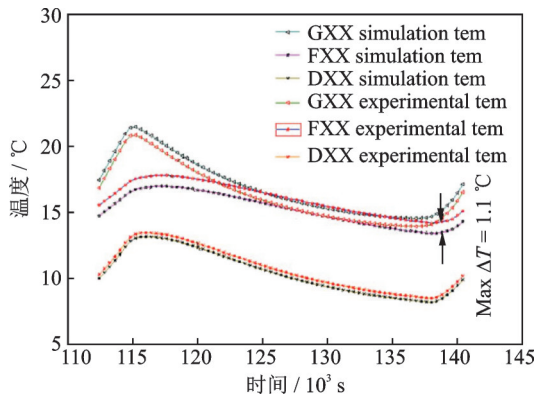


Fig.3 Comparison of the simulation analysis and experimental data

## 2 热仿真与分析

针对某运行于火星轨道上的探测器,采用该计算模型进行热仿真分析,主要分析以下几种工况:

(1)考虑火星红外辐射的变化,分析火星红外辐射大小对航天器在近火弧段无阴影情况下的帆板温度影响,找出帆板受影响的临界轨道高度,计算影响程度;

(2)考虑火星红外辐射的变化,分析火星红外辐射大小对大椭圆有阴影轨道下的帆板温度的影响,找出受影响的临界轨道高度,计算影响程度;

(3)考虑火星反照热流的变化,分析火星反照热流大小对无阴影轨道下的帆板温度的影响,找出受影响的临界轨道高度,计算影响程度。

以上总结如表1所示。

表1 仿真工况表

工况	火星红外辐射/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	火星 反照率
1 近火弧段(无阴影)	0 50 110 200 350	
2 远火弧段(有阴影)	0 50 110 200 350	
3 近火弧段(无阴影)		0 0.25

### 2.1 火星红外的影响分析

根据式(1~7)可计算出火星反照率为 0.13~0.39,据此计算的火星红外辐射的范围大约为 0~350  $W/m^2$ ,平均红外辐射约为 110  $W/m^2$ ,红外辐射为 350  $W/m^2$  的区域主要集中在近太阳直射点地区,该区域不足以说明普遍问题,以下研究中,红外辐射取值 350  $W/m^2$  作为主要对比参考。

图4是计算该航天器在环火飞行阶段(大椭圆轨道,远火弧段有阴影存在)不同火星红外辐射对帆板温度的影响曲线,由图可知,在近火弧段火星红外辐射对帆板温度的影响较大(最大温差 25 °C),在远火弧段存在阴影期时,红外辐射对帆板温度的影响也不容忽视(最大温差 35 °C)。

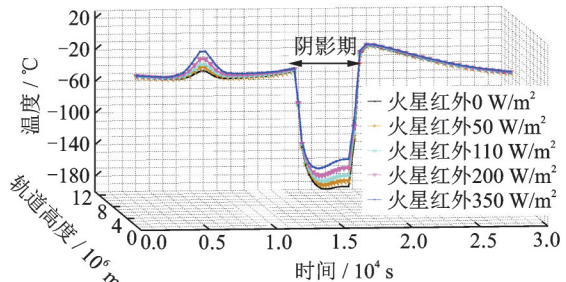


图4 火星轨道帆板温度变化曲线  
Fig.4 Temperature curve of the solar panel under the Mars orbit

### 2.2 近火弧段影响分析

图5是近火弧段红外辐射对帆板温度的影响

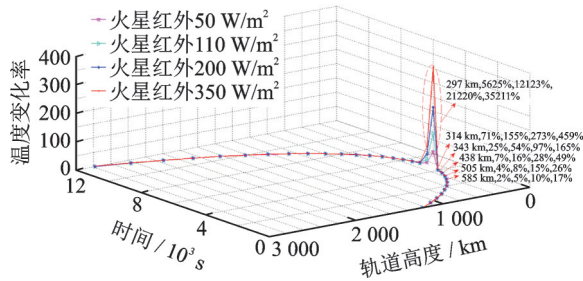


图 5 近火弧段帆板温度变化率曲线

Fig.5 Temperature rate of the solar panel under the near Mars area

曲线。图中横坐标为轨道高度和相应的轨道运行时间,纵坐标为帆板温度相对变化率(相对于红外辐射为  $0 \text{ W/m}^2$  时的温度变化率)。

由图 5 可知,相对于火星红外辐射为  $0 \text{ W/m}^2$ ,在近火弧段  $h=585 \text{ km}$  的高度,红外辐射分别为  $50、110、200$  及  $350 \text{ W/m}^2$  时,帆板温度相对变化率分别为  $2\%$  (绝对温差  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $5\%$  (绝对温差  $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $10\%$  (绝对温差  $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 及  $17\%$  (绝对温差  $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ )。

若火星红外辐射热流取平均值  $110 \text{ W/m}^2$  时,帆板温度相对变化率为  $5\%$ ,当取值为  $200 \text{ W/m}^2$  时,变化率也才  $10\%$ ,由此可知,在此条件下,当轨道高度  $h \geq 585 \text{ km}$  时,可以认为航天器帆板温度受红外辐射的影响不足  $10\%$ ,计算时可以不考虑。当轨道高度  $h < 585 \text{ km}$  时,特别是当轨道高度为  $297 \text{ km}$ ,火星红外辐射热流取  $200 \text{ W/m}^2$  时的帆板温度比火星红外辐射为  $0 \text{ W/m}^2$  时高  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,帆板温度相对变化率为  $21\ 220\%$ ,红外辐射对帆板温度影响极大。

### 2.3 远火弧段(阴影期)影响分析

图 6 是远火弧段红外辐射对帆板温度的影响曲线,该远火弧段存在阴影期。由图可知,在远火弧段  $h=7\ 800 \text{ km}$  的高度,相对于火星红外辐射为  $0 \text{ W/m}^2$  时,红外辐射分别为  $50、110、200$  及  $350 \text{ W/m}^2$  时,帆板温度相对变化率分别为  $3\%$  (绝对温差  $5.0 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $6\%$  (绝对温差  $10.4 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $10\%$  (绝对温差  $17.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 及  $15\%$  (绝对温差  $27.9 \text{ }^\circ\text{C}$ )。当取值为  $200 \text{ W/m}^2$  时,变化率为  $10\%$ ,由此可知,有阴影时,当轨道高度  $h \leq 7\ 800 \text{ km}$  时,可以认为帆板温度受红外辐射的影响不足  $10\%$ ,计算时可以不考虑。当轨道高度  $h > 7\ 800 \text{ km}$  时,特别是当轨道高度为  $12\ 000 \text{ km}$  时,帆板温度相对变化率最高为  $15\%$  (绝对温差  $27.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ),红外辐射对帆板影响较大,不能忽略。

由于在阴影期,因此该区域不受火星反照影响。

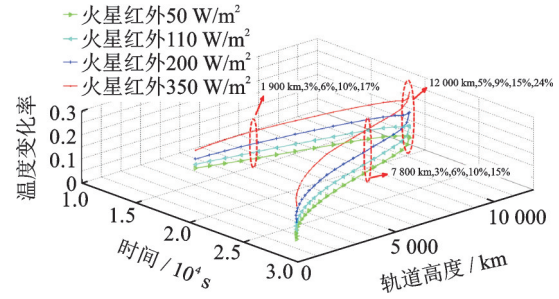


图 6 远火弧段帆板温度变化率曲线

Fig.6 Temperature rate of the solar panel under the far Mars area

### 2.4 火星反照的影响分析

图 7 是近火弧段火星反照辐射对帆板温度的影响曲线。图中横坐标为轨道高度及相应的轨道运行时间,纵坐标为帆板温度相对变化率(在不同的红外辐射下,考虑火星反照相对于火星反照为  $0$  时的温度变化率)。具体工况如表 2 所示。

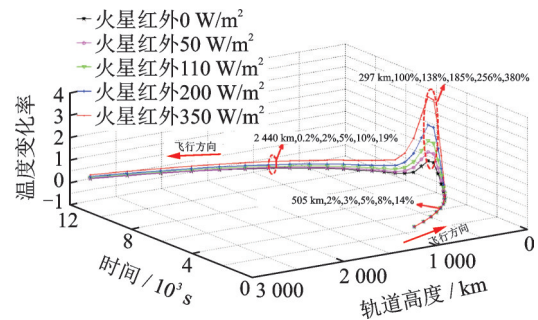


图 7 近火弧段帆板温度变化率曲线

Fig.7 Temperature rate of the solar panel under the near Mars area

表 2 仿真工况表

Table 2 Simulation condition

工况	火星反照率	火星红外辐射/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )				
1	0.00	0	50	110	200	350
2	0.25	0	50	110	200	350

根据文献[6-7]火星反照率取平均值  $0.25$ ,由图 7 可知,在近火弧段,火星反照对在轨太阳帆板的影响规律不是对称的,主要原因是航天器进出近火弧段阳光照射方向变化所致。相对于火星反照辐射为  $0 \text{ W/m}^2$  时,在近火弧段  $h=505 \text{ km}$  的高度,红外辐射分别为  $0、50、110、200$  及  $350 \text{ W/m}^2$  时,帆板温度相对变化率分别为  $2\%$  (绝对温差  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $3\%$  (绝对温差  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $5\%$  (绝对温差  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )、 $8\%$  (绝对温差  $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 及  $14\%$  (绝对温差  $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$ )。进入近火弧段,当轨道高度  $h \geq 505 \text{ km}$  时,可以认为帆板温度受反照辐射的影响不足  $8\%$ ,计算时可以不考虑,出近火弧段,当轨道高度  $h < 585 \text{ km}$  时,特别是当轨道高度为  $297 \text{ km}$  时,帆板温度相对变化率最高为  $256\%$ ,火星反照影响不容忽视。

## 2.5 讨论及分析

在近火弧段,火星红外热流对帆板温度的影响程度随着轨道高度的减小呈现增大趋势。影响趋势为:轨道高度  $h \geq 585$  km 时很小(可以忽略);  $343 \text{ km} \leq h < 585$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $297 \text{ km} < h < 343$  km 时很大(不能忽略);  $h = 297$  km 时达到极值。

在远火弧段,火星红外热流对帆板温度的影响程度随着轨道高度的增加呈现增大趋势,主要原因是在远火弧段探测器位于阴影期,轨道越高,帆板温度会越低,处于极低温度下的帆板对火星热流的响应很大。影响趋势为:轨道高度  $h < 7\,800$  km 时很小(可以忽略);  $7\,800 \text{ km} \leq h < 12\,000$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $h = 12\,000$  km 时达到极值。

在近火弧段,火星反照热流对帆板温度的影响程度随着轨道高度的减小呈现增大趋势。影响趋势为:轨道高度  $h \geq 505$  km 时很小(可以忽略);  $297 \text{ km} < h < 505$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $h = 297$  km 时达到极值。

## 3 结 论

本文研究了火星红外及反照辐射热流对环航天器太阳帆板温度的影响,研究得到以下结论:

(1)火星红外热流对帆板的影响在近火弧段和远火星弧段有阴影时都较大;火星反照热流的影响在帆板进出近火弧段时影响程度不同。

(2)在近火弧段,火星红外辐射对帆板温度的影响趋势为: $h \geq 585$  km 时很小(可以忽略);  $343 \text{ km} \leq h < 585$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $297 \text{ km} < h < 343$  km 时很大(不能忽略);  $h = 297$  km 时达到极值。

(3)在远火弧段有阴影时,火星红外辐射对帆板温度的影响趋势为: $h < 7\,800$  km 时很小(可以忽略);  $7\,800 \text{ km} \leq h < 12\,000$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $h = 12\,000$  km 时达到极值。

(4)在本文轨道下,在近火弧段,火星反照热流对帆板温度的影响趋势为: $h \geq 505$  km 时很小(可以忽略);  $297 \text{ km} < h < 505$  km 时逐渐升高(不能忽略);  $h = 297$  km 时达到极值。

### 参 考 文 献:

- [1] PIMENTA M, HUOT J P, DALY E. A model for Mars radiation environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(6): 2287-2293.
- [2] WEST T K, THEISINGER J, BRUNE A J, et al. Backshell radiative heating on human-scale Mars entry vehicles[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001, 42(5): 346-369.
- [3] BANDFIELD J L, WOLFF M J, SMITH M D, et al. Radiometric comparison of Mars climate sounder and thermal emission spectrometer measurements[J]. Icarus, 2013, 225(1): 28-39.
- [4] MURCHIE S L. Mars-Moons exploration[J]. Reconnaissance, and Landed Investigation (MERLIN), 2012, 93: 2569.
- [5] PERRIN M Y, RIVIERE P, SOUANI A. Radiation database for earth and mars entry[J]. ANSI Std, 2008, 39(8): 8-49.
- [6] MOROZ V I, KSANFCMALITI L V. "MARS-3": Infrared temperatures and thermal properties of the planet's surface[J]. NASA Technical Translation, 1975, 51: 914.
- [7] MARTÍNEZ G M, RENNO N O, ELLIOTT H M. The evolution of the albedo of dark spots observed on Mars polar region[J]. Icarus, 2021, 221: 816-830.
- [8] O'LEARY B T, REA B G. Mars: Visible and near infrared studies and the composition of the surface: NASA Grant NsG 101-61[R]. [S.l.]: NASA, 1967.
- [9] KERSLAKEFUTURE T. Mars surface solar arrays [J]. Future In-Space Operations (FISO) Working Group, 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.34165.36760.
- [10] 贾萌娜. 火星表面亮温的时空变化特征分析[J]. 遥感学报, 2016, 20(4): 632-642.  
JIA Mengna. Spatio-temporal variation characteristics of the Mars surface brightness temperature[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(4): 632-642.
- [11] 张涛,孙冰. 计算近地轨道航天器空间外热流的RUD方法[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 338-343.  
ZHANG Tao, SUN Bing. Numerical computation of external heat flux of low earth orbit spacecraft by RUD [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(1): 338-343.
- [12] 王雨飞,李强,廖胜. 目标反射环境红外辐射的模拟研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2085-2090.  
WANG Yufei, LI Qiang, LIAO Sheng. Simulation of environment infrared radiation reflected by target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2085-2090.
- [13] 杨莉,杨华,吕相银,等. 在轨太阳能帆板红外特性[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 394-397.  
YANG Li, YANG Hua, LV Xiangyin, et al. Infrared feature of the solar panels in orbit [J]. Infrared Technology, 2014, 36(5): 394-397.
- [14] MARTONCHIK J, DINER D J, PINTY B, et al. Determination of land and ocean reflective, radiative, and biophysical properties using multiangle imaging [J]. Remote Sens, 1998, 36: 1266-1281.
- [15] VAZQUEZ L, ZORZANO M, JIMENEZ S. Spectral information retrieval from integrated broadband photodiode martian ultraviolet measurements [J]. Opt Lett, 2007, 32: 2596-2598.