

太阳电池阵火星环境发电建模仿真

石海平¹, 陈燕¹, 贾阳¹, 屈严², 刘冶钢¹, 王文强³, 彭松¹

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 苏州同元软控信息技术有限公司, 苏州 215123; 3. 上海空间电源研究所, 上海 200233)

摘要: 火星表面环境与近地空间环境有很大的不同, 火星表面太阳电池阵发电受光照强度、火星尘、温度、太阳散射等因素影响, 具有较大的复杂性。在调研国内外研究及探测成果的基础上, 通过试验与建模计算相结合的方式, 提出了一种火星表面太阳电池阵发电计算建模方法, 建立了相应的仿真计算模型, 应用于中国首次火星探测任务太阳电池阵设计及发电功率预算, 成为整器能量平衡分析及设计的依据。该计算建模方法可为后续火星探测及其它深空探测任务提供参考。

关键词: 火星; 太阳电池阵; 发电; 建模仿真

中图分类号: V442

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)05-0474-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200042

引用格式: 石海平, 陈燕, 贾阳, 等. 太阳电池阵火星环境发电建模仿真[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 474-480.

Reference format: SHI H P, CHEN Y, JIA Y, et al. Modeling and simulation for power generation of solar array in martian surface environment[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 474-480.

引言

火星作为地球最近的类地行星, 是各国开展深空探测的重要目的地, 太阳电池阵-蓄电池电源系统作为应用最广泛的航天器电源系统, 仍然是火星探测航天器重要的电源系统技术, 由于受火面光照强度、火星尘、火面气候等影响, 太阳电池阵-蓄电池电源系统在火面应用相比于近地应用有很大区别, 尤其是在太阳电池阵设计及发电功率预算方面, 对于首次火星探测任务, 无火面光谱、温度、火星尘等因素影响下的太阳电池阵发电实测数据, 给火星探测器电源系统设计造成了很大困难。

2020年之前, 美国、俄罗斯、日本等国发射了42次火星探测任务, 成功或部分成功22次, 其中4个着陆器成功着陆火星, 4辆火星车成功登陆火星, 均由美国发射完成, 除“好奇号”(Curiosity)采用同位素电源外, “勇气号”(Spirit)、“机遇号”(Opportunity)火星车均采用太阳电池阵发电, 并设计了同位素热源, 而“探路者”(Mars PathFinder, MPF)携带的火星车功率很小, 任务较为简单, 采用着陆平台有线供电。通过对火星大气、光谱等进行测量, 获得了火面光照、温度等环境数据, 并对火面光照强度的计算进行了分析, 给出了相应的计算方法^[1]。但由于设计目的

及条件的不同, 未见针对火面太阳电池阵发电仿真计算的公开报道。

本文在综合分析火面太阳电池阵发电影响因素的基础上, 针对中国首次火星探测任务火星车太阳电池阵火面发电功率预算及应用问题, 对火面光照强度、温度、火星尘、遮挡及电池阵设计等影响进行建模分析, 建立综合各种因素的火面太阳电池阵发电模型, 并结合中国首次火星探测任务实际, 给出了建模仿真实例, 可作为火星探测器及其它航天器电源系统的设计参考。

1 火星表面太阳电池阵发电影响因素分析

火面影响太阳电池阵输出功率的主要因素包括太阳光照强度、火星表面温度、火星尘、太阳电池特性、火面位置、航天器结构及姿态、季节及火星日时刻等。

1) 光照强度^[2]

火星的平均太阳光强只有地球的0.43, 目前国际上通常采用的地球轨道光强为 $1\ 353\ \text{W}/\text{m}^2$, 而火星运行轨道的平均光强为 $590\ \text{W}/\text{m}^2$, 此外, 火星的光强随着与太阳的距离变化还会有 $\pm 19\%$ 的波动, 为 $493\sim 717\ \text{W}/\text{m}^2$ 。由于火星大气层及火星尘的影响, 火星表

面光照强度要小于火星轨道光强, 并随经纬度的不同而产生差异。

2) 火星尘

火星尘对太阳能电池阵发电的影响主要有3个方面。

(1) 火星尘会使大气层顶部到火面的光照强度减弱, 该特性可通过火面光学深度进行参数化表征。

(2) 火星尘会加大达到火星表面太阳光的散射, 使火星表面太阳直射光和散射光的强度及比例发生变化, 如图1^[2]为“勇气号”在光深约为0.93时, 波长400~1 000 nm处测量得到的散射光与直射光的对比情况^[2]。可见, 该光深下, 在长波段和太阳高度角较小处, 散射光所占比重甚至超过直射光。太阳能电池阵对直射光和散射光的发电效应不同, 达到太阳能电池阵表面的直射光发电可以通过直射光的入射角进行确定计算, 而散射光来自各个方向, 无法简单通过固定的入射角进行计算, 为此, 通过散射光因子进行等效建模。

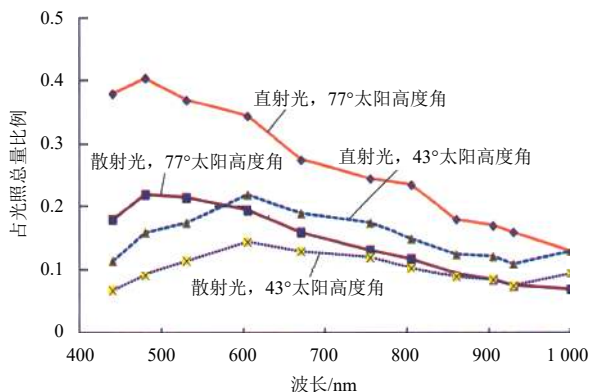


图1 “勇气号”标定的直射光和散射光对比

Fig. 1 Comparison between direct and scattered sunlight on Spirit

(3) 火星尘会在太阳能电池阵表面形成积尘, 造成透光率的减小, 致使太阳能电池阵的发电能力变差。

3) 温度

火星表面温度受海拔高度、季节、每日具体时刻以及自身的表面性质影响。火星自转周期约为24 h 37 min, 与地球大体相同。大气对火星起到一定的保温作用, “机遇号”实测太阳能电池阵温度范围为-115~+30 °C, 如图2所示, 一天中火星日早晨温度最低。在火星0°~30°纬度范围内, 火星表面温度白昼最高为+27 °C, 夜晚最低为-103 °C^[2]。太阳能电池阵的输出电压、输出电流与温度密切相关, 对于三结砷化镓太阳能电池, 温度对输出电压的影响系数为-6.5~-7.2 mV/°C, 对输出电流的影响系数为0.006~0.014 mA/(cm²·°C)。光强及入射角相同条件下, 太阳能电池在-20 °C时的最大输出功率比40 °C时的超出约15%^[2]。

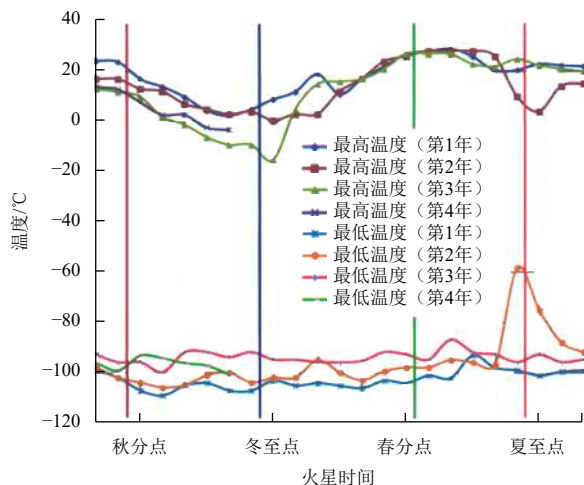


图2 “机遇号”太阳能电池阵-X板温度

Fig. 2 Temperatures of X solar array of Opportunity

4) 太阳能电池阵火面发电效率

太阳能电池阵发电效率直接反应太阳能电池阵的发电能力, 与太阳能电池阵类型、结构和太阳光光谱有关。针对火星光谱改良的三结砷化镓太阳能电池火面发电效率能达31%以上。

5) 其它因素

其他因素主要包括空间粒子辐照、遮挡、功率传输与变换损失、太阳能电池串的串并组合匹配、测试测量误差等。

空间辐照会引起太阳能电池阵性能下降, 造成发电损失, 辐射主要来源于太阳宇宙线、银河宇宙线, 火面辐照环境与月面相似^[3]。此外探测器不同构型及姿态下, 会对太阳能电池阵造成遮挡, 会直接导致功率的损失, 太阳能电池阵产生功率经过传输及控制调节后达到设备端, 也会造成功率损失。

2 火面太阳能电池阵发电建模计算

1) 火星表面光照强度计算

火星表面光照强度的计算分两部分, 首先计算火星大气层顶部的光照强度, 再计算太阳光经火星空气及火星尘的衰减及散射作用后到达火星表面的光照强度。

火星大气层顶部光照强度与火星离太阳的距离相关, 设火星到太阳的平均距离为 \bar{r} , 任一时刻火星到太阳的距离为 r , 则有^[4]

$$\frac{r}{\bar{r}} = \frac{1 + e \cos(L_s - L_s^p)}{1 - e^2} \quad (1)$$

其中: e 为火星轨道偏心率, 为0.093 377; L_s 为火星轨道黄经, 火星不同季节对应不同火星轨道黄经; L_s^p 为近日点火星轨道经度, 为248°。

当前位置, 火星大气层顶部垂直于太阳光线的光

强 S 为

$$S = S_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (2)$$

其中： S_0 为火星到太阳的平均距离上垂直于太阳入射方向上的光照强度。

$$S_0 = 590 \text{ W/m}^2$$

将式 (1) 代入式 (2) 得

$$S = S_0 \left[\frac{1 + e \cos(L_s - L_s^p)}{1 - e^2} \right]^2 \quad (3)$$

此即为火星不同季节 (对应不同黄经) 火星大气层顶部垂直于太阳入射方向上的光照强度。

由于受火星大气及火星尘的衰减与散射作用, 到

达火星表面的关照强度会减弱并发生散射。

到达火星表面垂直于太阳入射方向上的总光照强度 S_{s_tot} 为^[3-4]

$$S_{s_tot} = \frac{Sf}{(1-A)} \quad (4)$$

其中： f 为考虑火星大气和火星尘的衰减及散射作用的归一化光强系数, 是光学深度 τ 、天顶角 z 、火面反射率 A 的函数, 为

$$f(z, \tau, A) = \left[\sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^1 p(i, j, k) \cdot \tau^i \cdot \left(\frac{z}{100} \right)^j \cdot A^k \right] (1-A) \quad (5)$$

其中： $p(i, j, k)$ 为归一化光强的拟合系数矩阵 (见表1~2)； A 值对结果影响较小, 一般取0.1。

表1 归一化光强拟合系数矩阵 $p(i, j, k)$ ($k=0$ 时)

Table 1 Normalized flux fitting coefficient matrix $p(i, j, k)$ ($k=0$)

$j \setminus i$	0	1	2	3	4	5
0	1.002 8	-0.228 681	0.019 613	0.000 231	-0.000 13	0.000 003
1	-0.450 073	1.335 955	-1.131 691	0.402 126	-0.063 967	0.003 758
2	5.566 705	-16.912 405	13.739 701	-4.756 079	0.743 74	-0.043 159
3	-22.471 579	64.909 973	-52.509 47	17.997 548	-2.786 548	0.160 34
4	36.334 497	-101.800 319	79.895 539	-26.762 885	4.074 117	-0.231 476
5	-20.420 49	53.207 148	-39.949 537	12.977 108	-1.931 169	0.107 837

表2 归一化光强拟合系数矩阵 $p(i, j, k)$, $k=1$ 时

Table 2 Normalized flux fitting coefficient matrix $p(i, j, k)$ ($k=1$)

$j \setminus i$	0	1	2	3	4	5
0	0.009 814	0.226 193	-0.117 733	0.030 579	-0.004 09	0.000 218
1	-0.156 701	0.396 821	-0.313 648	0.099 227	-0.013 508	0.000 651
2	1.361 122	-3.758 111	3.007 907	-0.987 457	0.141 693	-0.007 32
3	-4.365 924	12.539 251	-10.394 165	3.486 452	-0.513 23	-0.027 401
4	5.991 693	-17.498 138	14.291 37	-4.765 323	0.703 675	-0.037 96
5	-2.915 099	8.275 686	-6.593 125	2.173 999	-0.320 308	0.173 35

由于火星大气及火星尘的散射作用, 火星表面太阳光照辐射由直射光和散射光组成。

达到火星表面垂直于太阳光入射方向上的直射光光强 S_{s_dir} 为^[4]

$$S_{s_dir} = S e^{-\frac{\tau}{\mu}} \quad (6)$$

其中： e 为自然底数； τ 为火星光学深度； μ 为太阳高度角的余弦, $\mu = \cos z$ 。

达到火星表面的散射光光强 S_{s_diff} 为^[4]

$$S_{s_diff} = S_{s_tot} - S_{s_dir} \quad (7)$$

火面垂直于太阳光入射方向上的总有效光强 S_{eff} 为

$$S_{eff} = S_{dir} + C_{dis} S_{diff} \quad (8)$$

其中： C_{dis} 为散射光有效因子, 表征散射光在直射光方向上的等效光强。

1) 太阳电池阵发电计算

(1) 太阳电池阵设计参数

太阳电池阵通过太阳电池片先串联后并联的方式构成, 设每串太阳电池串由 N_s 片太阳电池片串联组成, 共 N_p 串这样的太阳电池串并联形成太阳电池阵, 则太阳电池阵的总面积 A_{array} 为

$$A_{\text{arry}} = N_s N_p A_s \quad (9)$$

其中, A_s 为单片太阳电池面积。

单片太阳电池的性能直接决定了太阳电池阵的发电性能, 中国首次火星探测任务火星车用单片太阳电池片的主要参数及典型值如表3所示:

表3 中国首辆火星车用太阳电池主要参数及典型值
Table 3 The representative parameter value of the solar cell

参数名称	参数符号	典型值	备注
发电效率	η_{cell}	0.31	
最佳工作点工作电压	V_m	2.2 V	
工作电流密度	I_{md}	0.005 3 A/cm ²	测试光强 S_0 为
温度电压系数	C_{tv}	-6.8×10^{-3} V/°C	360 W/m ²
温度电流系数	C_{ti}	9×10^{-6} A/(cm ² ·°C)	
额定温度	T_0	25 °C	
单片电池面积	A_s	12/24 cm ²	

太阳电池阵发电后, 需通过功率通路传输及电源控制装置调节后才能到达母线, 形成可供负载使用的满足品质要求的一次电源, 这会产生功率传输及控制损耗, 通过功率传输与变换效率 η_{cell} 来表征该特性。

(2) 温度对发电的影响

太阳电池发电受温度明显影响, 太阳电池光伏发电电压具有负的温度系数, 电流具有正的温度系数, 在光照强度一定的情况下, 温度越高电压越低电流越大。标准光强下, T_0 温度下单片太阳电池片的最佳工作点电压为 V_m , 工作电流密度为 I_{md} , 则温度 T 下单片太阳电池片的最佳工作点输出电压 V_{tm} 及电流密度 I_{tmd} 为

$$V_{\text{tm}} = V_m + C_{\text{tv}}(T - T_0) \quad (10)$$

$$I_{\text{tmd}} = I_{\text{md}} + C_{\text{ti}}(T - T_0) \quad (11)$$

针对串联型MPPT(最大功率点跟踪)调节系统, 温度对太阳电池阵的发电功率影响通过温度系数 K_t 来刻画, 为

$$K_t = \frac{V_m I_{\text{md}}}{V_{\text{tm}} I_{\text{tmd}}} \quad (12)$$

对于并行型分流调节源控制系统, 由于太阳电池阵工作电压受母线电压钳位, 因此温度对火面太阳电池阵发电的影响主要通过温度对电流的影响来表述, 此系统中, 温度系数 K_t 可表示为

$$K_t = I_{\text{tmd}} \frac{S_{\text{eff}}}{S_0} \quad (13)$$

其中: I_{tmd} 为光强 S_0 温度 T 条件下的电流密度; S_{eff} 为总有效光强; S_0 为 I_{md} 电流密度测试时的标准光强。

(3) 太阳入射角对发电的影响

在太阳斜射角上, 太阳电池的功率输出能力将降低。太阳电池的短路电流将近似按照入射角的余弦值降低, 而实际的最大功率降低则比余弦值的降低趋势更为迅速。一般来说, 对于约30°或更小的偏离角来说, 这些与余弦定律的不一致性是无关紧要的, 但在光照角较大时, 这些与余弦定律的不一致性较为严重, 需要加强关注。

在较大入射角时, 由于涂层和滤光层的光学厚度发生表观变化, 因而引起光谱透射率和反射率的表观变化。光的边缘效应可能引起太阳电池和盖片、尤其是较厚的盖片发生折射、散射以及额外的光吸收。太阳电池的盖片边缘、太阳电池互联器、引线以及太阳阵的其它较小元件在太阳电池上形成的阴影, 也会引起功率损失^[5]。用入射角因子表示 $C_{\text{ill_in}}$, 其值近似为入射角的余弦值。

(4) 火星尘对发电的影响

火星尘不但造成太阳光的散射和光照强度的降低, 还会在太阳电池阵表面累积, 导致太阳电池阵发电能力的衰减, 通常采取除尘的方式降低其影响, 用火星尘衰减系数 $k_{\text{dust_D}}$ 来表征火星尘每天对发电功率的影响, 该值取(0.1%~0.3%)/d。

用除尘增益来表征采用除尘措施后对太阳发电的影响, 除尘性能测试时, 以2片为一组, 测定电流值 I_1 , 再撒上尘, 测试电流值 I_2 , 然后通过机械旋转90°, 使灰尘产生重力滑落, 再测试电流值 I_3 , 利用公式 $\frac{(I_3 - I_2)}{(I_1 - I_2)} \times 100\%$ 计算除尘增益 G_{clc} 。

则火星尘对太阳电池阵发电的总影响系数为

$$k_{\text{dust}} = (1 - k_{\text{dust_D}})^{N_{\text{Days}}} G_{\text{clc}} \quad (14)$$

火星尘除了造成积尘衰减外, 还会造成散射, 如第1节所述通过散射因子刻画散射对太阳电池阵发电的影响。在敦煌不同天气(晴天、少云天、沙尘天气)下进行了散射因子测试。天气晴朗情况下, 该值接近于1, 沙尘天气下约为0.66~0.76, 在进行火面太阳电池阵发电中, 散射光因子保守取值为0.5。

(5) 遮挡对发电的影响

由于受航天器构型及姿态影响, 太阳电池阵常会产生遮挡, 需根据不同遮挡实际并根据电源控制调节方式确定被遮挡太阳电池串的功率输出情况, 对于MPPT调节型电源控制器, 多串并联的电池串中只要有一片被遮挡, 则认为该电池串无法输出, 该串电池功

率全部损失,不同遮挡情况下,通过被遮挡电池串的串数占总电池串的比例来确定遮挡对电池阵发电的影响,记为遮挡损失系数 K_{ZD} 。

(6) 其它损耗对发电的影响

受空间辐射、温度交变等环境因素影响,会导致太阳电池阵性能衰减,此外,研制过程中,由于各串并联电池的不匹配性、电池盖片及测试误差,也会造成实际输出比设计值小,这些衰减的典型系数如表4所示。

表4 太阳电池阵常见衰减典型值

Table 4 The representative value of the solar array loss

符号	名称	典型值	备注
K_{ZH}	组合损失	0.98	
K_{ZW}	紫外损失	0.99	
K_{RB}	温度交变损失	1	短期可忽略
K_{CS}	测试损失	0.99	
K_{GP}	盖片损失	0.97	
K_{FZ}	每天的辐照损失	0.06/90	

用来 K_{loss} 表示这些因素的总损耗。则

$$K_{loss} = K_{ZH}K_{RB}K_{CS}K_{GP}K_{FZ} \quad (15)$$

对串联式MPPT(最大功率点跟踪)型功率调节电源控制系统,火星表面太阳电池阵的发电功率为

$$P_{out} = A_{array}\eta_{cell}S_{eff}k_t k_{dust}K_{loss}C_{ill_in}(1-K_{ZD})\eta_{pass} \quad (16)$$

其中: A_{array} 为太阳电池阵面积; η_{cell} 为发电效率; S_{eff} 为火面有效光强; k_t 为温度影响因子; k_{dust} 为火星尘影响因子; K_{loss} 为综合损耗因子; C_{ill_in} 为入射角系数; K_{ZD} 为遮挡系数; η_{pass} 为功率传输与变换效率。

对并联式分流功率调节电源控制系统,火星表面太阳电池阵的发电功率为

$$P_{out} = V_{tm}A_{array}I_{tmd} \frac{S_{eff}}{S_0} k_{dust}K_{loss}C_{ill_in}(1-K_{ZD})\eta_{pass} \quad (17)$$

3 火星探测实例分析与仿真

根据上述火面太阳电池阵发电建模计算方法,对中国首次火星探测任务火星车太阳电池阵火面发电进行了仿真。火星车电源系统包含体装板电池阵和展开板电池阵,采用串联型MPPT调节和S³R(顺序分流调节)分流调节相结合的调节控制方式,体装板为S³R调节,展开板为MPPT调节,都采用火面光谱下转换效率不低于31%的三节砷化镓太阳电池,体装板单片太阳电池面积为12 cm²,18串21并,展开板单片太阳电池面积为24 cm²,18串32并^[6],功率通路中功率传输及变换效率 η_{pass} 取0.91。

不同光深条件下,通过上述建模计算方法得到太阳电池板水平展开条件下的发电功率曲线如图3所示,

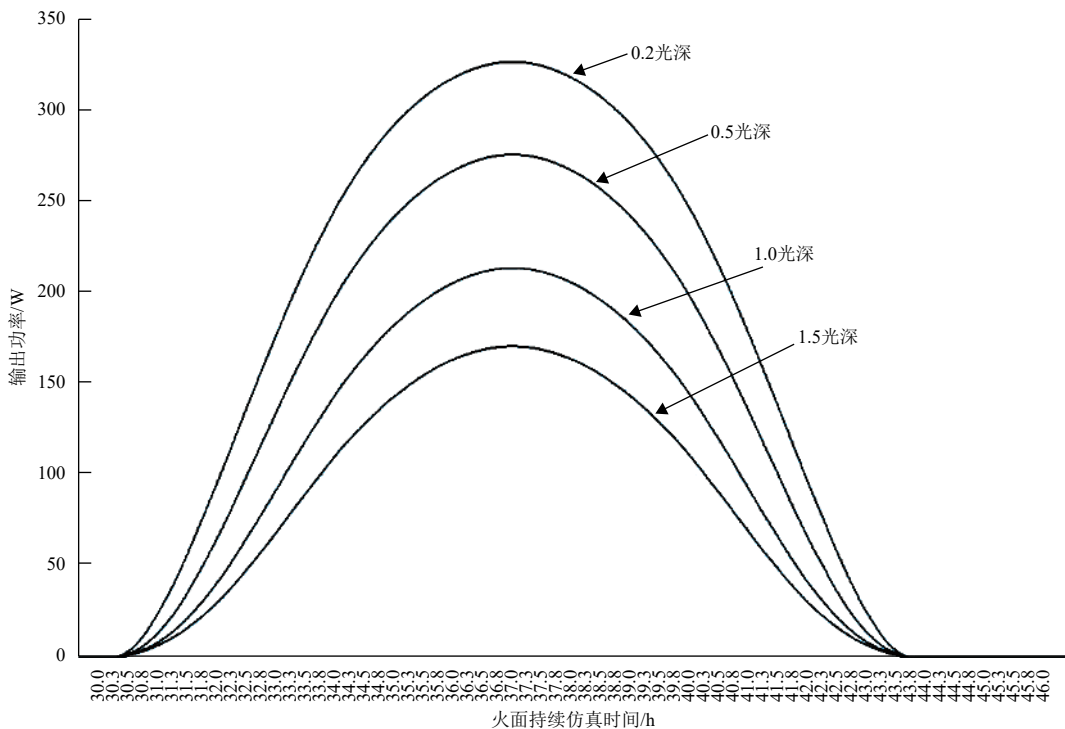


图3 不同光深发电功率曲线

Fig. 3 The power generation curve with different optical depth

图中纵坐标为仿真得到的中国首次火星探测任务火星车太阳能电池阵输出功率, 横轴为以火星日0时为起点的仿真时长。图中给出了在其它条件相同的情况下, 不同光深下火星车太阳能电池阵的输出功率曲线。

图3中仿真结果对应位置为火星北纬 28.7° 、经度 124.7° , 火面温度范围为 $-119.4^{\circ}\text{C} \sim -35.2^{\circ}\text{C}$, 火星处于近日点附近不同光深下的仿真结果。并将仿真结果与火星任务专项试验“模拟火星光谱地面测试试验”结果进行对比, 该试验通过单片太阳能电池在光深为0.5时火星光谱下输出功率推算整板相同条件下的输出功率。相同条件下, 仿真计算结果为 275.8 W , 专项试验测试结果为 284.6 W , 误差为 1.56% 。

4 结 论

本文在综合分析火面影响太阳能电池阵发电的各种因素基础上, 结合中国首次火星探测任务实际, 针对火面光谱(光强)、火星尘、温度、火面天气等影响因素, 根据不同电源调节控制方式及太阳能电池阵研制特点, 建立了一套完整的火面太阳能电池阵发电计算模型, 通过不同计算途径及与专项试验结果的侧面对比分析, 模型准确度在 2% 以内, 可作为后续火星及其它深空探测任务的参考。

参 考 文 献

- [1] APPELBAUM J, LANDIS G. Photovoltaic arrays for martian surface power[J]. *Acta Astronautica*, 1993, 30(C): 127-142.
- [2] 刘治钢, 王飞, 陈燕, 等. 火星表面环境对太阳能电池阵设计影响分析与对策[J]. *航天器工程*, 2016, 2(5): 25-239.
LIU Z G, WANG F, CHEN Y, et al. Impact analysis and solution of solar array design in martian surface environment[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 2(5): 25-239.
- [3] 阳光. 深空探测—火星探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [4] HABERLE M P, MCKAY P C, POLLACK B J. Atmospheric effects on the utility of solar power on Mars[R]. USA: NASA Ames Research Center, 1998.
- [5] 崔鹏, 鄢毅鹏, 尹兴月, 等. 大光照角入射对太阳能电池阵的影响分析与验证[J]. *电源技术*, 2014, 38(9): 1638.
CUI P, QIE Y P, YIN X Y, et al. Impact of large light angle on solar array and its verification[J]. *Power Technology*, 2014, 38(9): 1638.
- [6] SHI H P, LIU Z G, CHEN Y. MARS rover electrical power system[C]//The 12th European Space Power Conference. French: [s.n.], 2019.

作者简介:

石海平(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 航天器电源系统总体设计。

通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号

E-mail: 163shppp@163.com

贾阳(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 星球车系统设计与试验验证。**本文通讯作者。**

通讯地址: 北京5142信箱402分箱(100094)

电话: (010)68745267

E-mail: jiyangdoc@sohu.com

Modeling and Simulation for Power Generation of Solar Array in Martian Surface Environment

SHI Haiping¹, CHEN Yan¹, JIA Yang¹, QU Yan², LIU Zhigang¹, WANG Wenqiang³, PENG Song¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Suzhou Tongyuan Soft.&Ctrl. Tech. Co, Ltd, Suzhou 215123, China;

3. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200233, China)

Abstract: The environments are very different between Martian Surface and near-earth space. To estimate the output power of the Solar Array on the Mars surface is not easy, which is affected by the solar radiation, temperature, dust and diffuse irradiance. A method to calculate the output power of Solar Array in Martian Surface Environment is proposed in this paper based on a survey to the results of research all over the world. Models about how the illumination, temperature and dust to affect the power generation of the Solar Array on Martian surface are established. Those numeric models and method are used to improve the power balance of the Mars Rover in the first Mars exploration mission of china and are a reference for the intending Mars and other deep-space exploration missions.

Keywords: Mars; solar array; power generation; modeling and simulation

Highlights:

- A method to calculate the Light intensity on Martian Surface is proposed in considering of the effect of dust.
- In considering of the effect of temperature, diffuse irradiance, sun incident angle, a method to calculate the output power of the Solar Array in a Solar-battery power system on the Mars surface is proposed.
- The method to calculate the output power of the Solar Array for different power systems based on MPPT or S²R control technique is presented.
- Through the method and models introducing in this paper, the calculating result of the output power of the Solar Array designed for MARS rover of china first MARS exploration is presented.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]