

文章编号 1004-924X(2017)增-0180-07

## 低轨卫星硅太阳能电池阵输出功率衰减估计

李 强<sup>1,2\*</sup>, 李会锋<sup>2</sup>, 曹继宏<sup>2</sup>, 李剑锋<sup>2</sup>, 段崇雯<sup>1</sup>

(1. 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043;

2. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

**摘要:**针对长寿命低轨卫星太阳能电池阵的输出功率衰减问题,提出了一种衰减估计方法。首先选取降交点地方时在 10:00 AM 附近的太阳同步轨道卫星的硅太阳能电池阵为对象,在分析倾角、光照角与日地距离等卫星轨道参数漂移与太阳能电池阵温度变化的基础上,建立太阳能电池阵输出电流拟合模型,接着进行光照角与日地距离归一化,进而估计太阳能电池阵输出功率衰减,并结合实际在轨数据进行检验。结果表明,在轨道受晒率降低、光照角偏大的条件下,硅太阳能电池阵输出功率的年衰减因子约为 0.003 1,年衰减率约为 0.31%,明显低于晨昏轨道下的衰减情形;预测在轨 18 年后,输出功率衰减低于 6%,可满足长寿命低轨卫星的能源需求。结果应用于在轨卫星长期测控与管理中的遥测诊断辅助、能源估计与预测、器件健康状态评估。

**关键词:**低轨卫星;硅太阳能电池阵;衰减估计;输出功率;遥测

**中图分类号:**V556.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0180

## Degradation estimation for output power of silicon solar array of low earth orbit satellite

LI Qiang<sup>1,2\*</sup>, LI Hui-feng<sup>2</sup>, CAO Ji-hong<sup>2</sup>, LI Jian-feng<sup>2</sup>, DUAN Chong-wen<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

\* Corresponding author, E-mail: E-mail: buffalo126126@126.com

**Abstract:** Aimed at degradation for output power of solar array for long-lived low earth orbit satellite, silicon solar array for satellite in sun-synchronous orbit near 10:00AM at the time of descending node place was selected as object. On the basis of analyzing satellite orbit parameter drifting for inclination, illumination angle and earth-sun distance etc. and temperature change in solar array, fitting model for output current of solar array was established, and normalization of illumination angle and earth-sun distance was conducted to estimate degradation for output power of solar array and to conduct detection combined with actual in-orbit data. The result shows that under condition of orbital exposure decrease and relatively large illumination angle, annual degradation factor for output power of silicon solar array is approximately 0.003 1, and annual degradation rate is approximately 0.31%, which is obviously lower than degradation under morning and light orbit; it is predicted that degradation for output power will be lower than 6% 18 years later in-orbit, which can meet energy demand of long-lived low earth orbit

收稿日期:2017-08-28;修订日期:2017-10-10.

基金项目:青年科学基金资助项目(No. 61401515)

satellite. Result is applied in telemetry diagnostic aid, energy estimate and prediction, healthy state evaluation of device in long-term measurement and control and management for in-orbit satellite.

**Key words:** low earth orbit satellite; silicon solar array; degradation estimation; output power; telemetry

## 1 引 言

近地卫星在轨运行中大都需要太阳能电池阵将太阳光能转换为电能为其提供工作能源。目前,在轨运行卫星大多使用硅太阳能电池或者砷化镓太阳能电池。在太阳光照角、工作温度、日地距离、地球遮挡以及反照、太阳活动等因素的影响下,太阳能电池阵输出功率会经常发生变化。在复杂空间环境影响下,太阳能电池阵的光电转换效率不断下降,输出功率呈现长期衰减趋势。

高欣等研究了空间辐射环境对中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)轨道卫星硅太阳能电池的功率输出影响,认为高能质子引起的功率衰减要比高能电子的严重<sup>[1]</sup>。雷刚等设计了一种红外截止滤光片用于空间太阳能电池,可使硅太阳能电池在轨工作温度降低 5~10℃,输出功率增加 1.4~3.3%<sup>[2]</sup>。刘春明对背反射(Back Surface Reflection, BSR)、背场背反射(Back Surface Field and Reflection, BSFR)、薄型 BSFR、薄型绒面 BSFR 等四种单晶硅太阳能电池和锗衬底单结砷化镓太阳能电池样品进行了辐照试验,认为砷化镓太阳能电池光电转换效率和抗辐照性能优于硅太阳能电池<sup>[3]</sup>。王荣等研究了国产卫星用背场硅太阳能电池和锗衬底单结砷化镓太阳能电池性能在质子辐照下的变化,实验表明,背场硅太阳能电池短路电流和最大输出功率衰降变化要快于锗衬底单结砷化镓太阳能电池<sup>[4-5]</sup>。

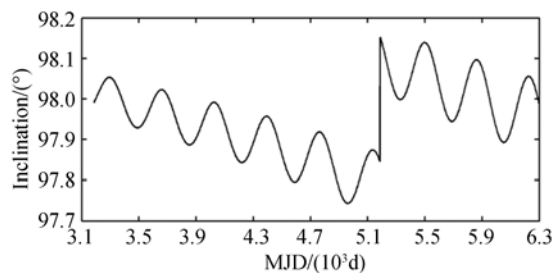
对于在轨应用卫星硅太阳能电池阵功率衰减估计,文献[6]与文献[7]给出的 LEO(Low Earth Orbit, LEO)太阳同步轨道卫星的年衰减率在 1.5%附近,文献[8]与文献[9]给出的 MEO 轨道卫星的年衰减结果在 1.7%左右,文献[10]给出的地球静止轨道卫星的年衰减约为 1%。其中,文献[6]所选取的卫星运行在晨昏轨道,对应的太阳能电池阵在全年中光照时间比较长。对于其它降交点地方时的近地太阳同步轨道,因为每一圈中

都要经历地影与光照,对应卫星的太阳能电池阵功率衰减应该有所不同。在航天器长期管理与测控中,太阳能电池阵输出功率与变化是卫星遥测诊断<sup>[11]</sup>与健康状态评估的重点关注内容之一。这里选取降交点地方时在 10:00 AM 附近的长寿命卫星为对象,进行硅太阳能电池阵输出功率衰减估计与预测,用于测控中的能源管理工作。

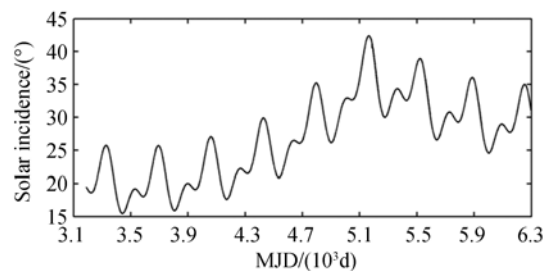
## 2 硅太阳能电池阵电流

某近地卫星 A 运行在太阳同步轨道,降交点地方时在 10:00 AM 附近,近圆轨道(偏心率接近于 0),初始轨道高度约为 650 km,姿控为偏置动量控制,设计寿命为 3 年。卫星太阳能电池阵安装在卫星本体±Y 翼,单轴驱动对日定向。太阳能电池为背场(Back Surface Field, BSF)硅太阳能电池,光电转换效率约为 14.5%,掺铈玻璃盖片。

卫星入轨以来的轨道倾角、光照角、降交点地方时和日地距离因子的变化如图 1 所示。



(a)倾角  
(a)Inclination



(b)光照角  
(b)Solar incidence

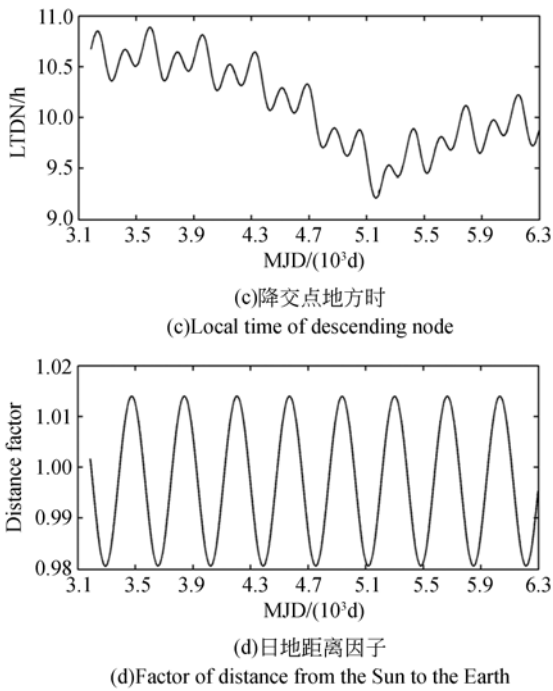


图 1 卫星轨道参数变化  
Fig. 1 Orbit element variation

光照角定义为地日矢量与太阳能电池阵法线的夹角,日地距离因子定义为日地距离与参考距离 ( $1.5 \times 10^8$  km)的比值。在日月引力作用下(主要是太阳引力摄动),卫星轨道倾角整体呈现逐渐减小趋势,同时具有年周期变化规律:当太阳位于南半球时,倾角摄动加速度大于 0,倾角变化曲线开口向上;当太阳位于北半球时,倾角摄动加速度小于 0,倾角变化曲线开口向下。光照角整体呈现先升后降趋势,同时也有年周期变化规律:冬至前后,光照角最大;夏至前后,光照角最小。日地距离因子数值在 0.98~1.02 之间大致按照年周期规律变化:夏至前后日地距离远,极小值;冬至前后日地距离近,极大值。降交点地方时整体呈现先降后升趋势,同样地具有年周期变化规律(主要是太阳在天赤道上的投影点的角速度变化所致)。

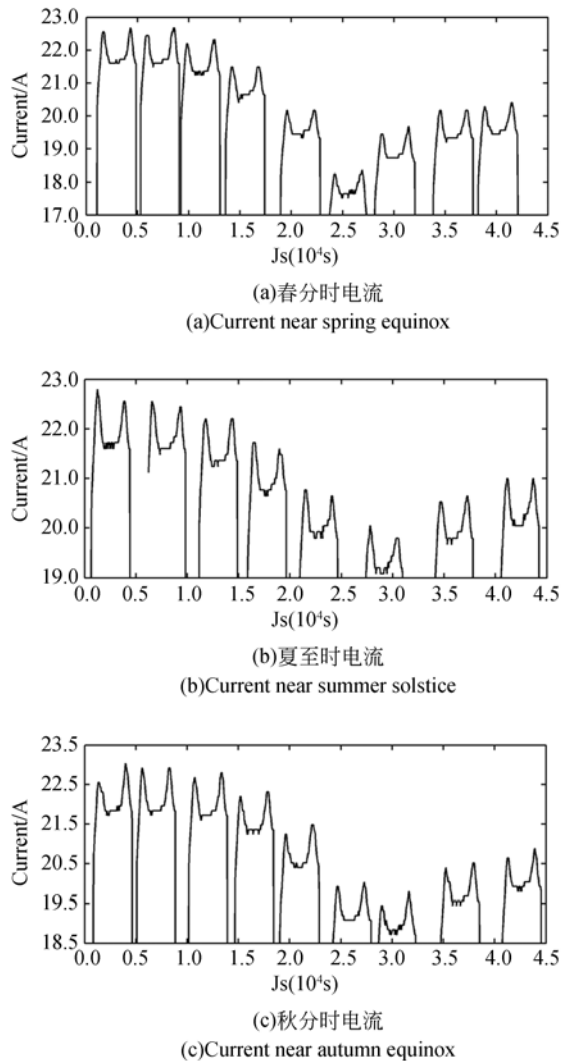
显然,卫星在轨期间进行过倾角控制,其目的正是在于调整光照角与降交点地方时:倾角调整后,光照角逐年减小,轨道光照得到改善;降交点地方时也在调整后逐年增大,数值保持在 10:00 AM左右。如果不进行轨道调整,则图 1 中光照角曲线应一直呈上升趋势,降交点地方时曲线一直呈下降趋势,而两者的年周期变化规律则继续保持。

太阳能电池阵输出功率一般用太阳能电池阵输出电流  $i$  表示<sup>[12]</sup>:

$$i = F[I_0 + \beta(T - 25)]\cos \varphi, \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为寿命初期光照角为  $0^\circ$ 、工作温度为  $25^\circ\text{C}$  单位日地距离时的硅太阳能电池阵的输出电流,单位为 A;  $\beta$  为电流温度系数,单位为  $\text{A}/^\circ\text{C}$ ;  $T$  为太阳能电池阵工作温度,单位为  $^\circ\text{C}$ ;  $\varphi$  为太阳光照角,单位为 rad;  $F$  为功率系数,无量纲。

显然,日地距离影响电池阵太阳入射功率,距离太阳越近则入射功率越大。工作温度影响输出电流和输出电压,进而影响输出功率。在复杂的空间环境中,空间粒子辐照、紫外辐照、微流星体碰撞以及遮挡、地球反照、太阳活动强弱等,均会影响太阳能电池阵输出功率。卫星入轨以来的硅太阳能电池阵电流如图 2 所示。



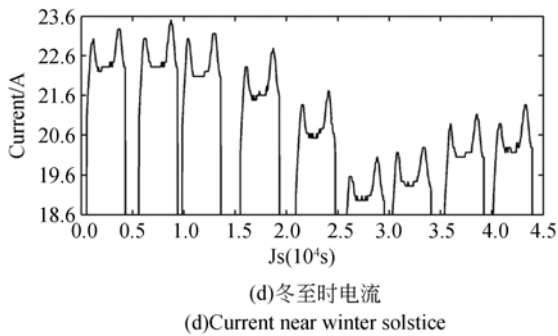


图 2 太阳电池阵电流  
Fig. 2 Solar array current

图 2 中,选取每年中的分至日的一轨数据为样本,时段为 2008 年 9 月至 2017 年 3 月,图中曲线按照时间先后顺序从左至右依次排列;另外,地影期间的电流为 0 的数据段并未画出。

电流具有双峰值特征,在进出地影附近的电流具有极大值,其原因可能为地球反照所致:在进出地影时段附近,电流多为极大值,此时对应的空间位置大致在南北极上空。这一区域冰雪相对较多,地球反照强烈,太阳电池阵的输入光照功率增加,对应的输出电流大。

同时,按照分至日单独来看(例如仅取春分时的数据),寿命后期的电流明显低于前期电流,衰减特征非常明显;同一年中,冬至时的电流基本上为最高水平,夏至时的情形则为最低水平(图 2)。但是,春夏之间、秋冬之间的遥测数据差别并不明显,需要进一步的归一化处理。

太阳电池阵的温度数据如图 3 所示。太阳电池阵温度变化就有明显的轨道周期规律,在阳照区温度水平最高,大致在 60℃~80℃之间;在阴影区温度水平最低,约在-80℃~-60℃之间;另外,阳照区温度变化呈现先升后降,而阴影区则是持续降温(不考虑进出影的过渡段)。全年之中,温度变化差异不明显,四季之间的温度变化区间基本相近。

虽然倾角控制对整星热流水平有影响,这里选取的冬至温度数据也以 2013 年倾角控制为界限,但是在整个在轨运行期间,倾角控制前后的太阳电池阵温度出入并不明显,温度水平相对比较稳定,后期冬至高温水平甚至略微低于前期(图 3)。

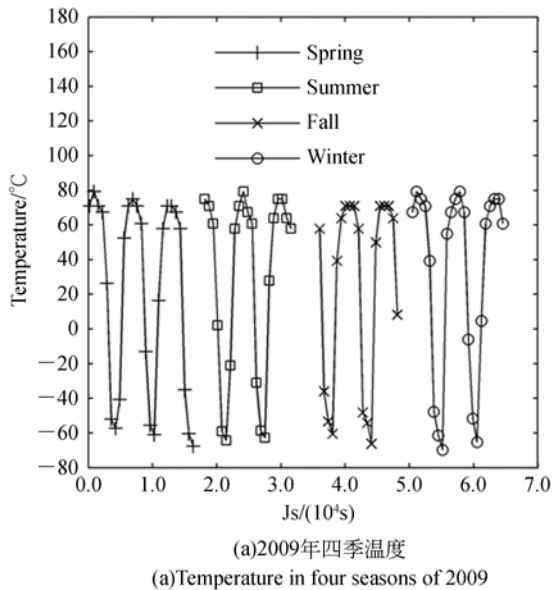


图 3 太阳电池阵温度  
Fig. 3 Solar array temperature

### 3 太阳电池阵电流归一化

针对太阳电池阵的电流变化情况,这里主要对其进行光照角与日地距离的归一化处理;至于温度,综合图 3 和文献[6]、文献[13]的分析结果,这里不考虑温度对电流的影响。在归一化之前,需要对图 2 中的电流进行均值化处理。这里,将阳照区的电流进行正弦拟合:

$$i = D \cos \omega t \cos \psi - D \sin \omega t \sin \psi + b, \quad (2)$$

其中: $D$ 为电流振幅,A; $\omega$ 为轨道周期,rad/s; $t$ 为时间变量,s; $\psi$ 为初相,rad; $b$ 为均值,A。得到均值电流后,再进行光照角与日地距离的归一化处理:

$$b_1 = b \frac{\gamma^2}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

其中: $b_1$ 归一化电流,A; $\gamma$ 为日地距离因子(图 1),无量纲; $\alpha$ 为光照角(图 1),rad。

最后,用线性拟合与指数拟合方法进行衰减估计。线性拟合为:

$$i_m = kt + b_0, \quad (4)$$

其中: $i_m$ 为归一化后的平均电流,即(3)式中的  $b_1$ ,A; $k$ 为斜率,A/d; $b_0$ 为截距,A; $t$ 为时间变量,d。

指数拟合为:

$$i_m = ce^{-\lambda t}, \quad (5)$$

式中,  $i_m$  为归一化后的平均电流, 即(3)式中的  $b_1$ , A;  $c$  为零值, A;  $\lambda$  为衰减因子,  $d^{-1}$ ;  $t$  为时间变量, d。

#### 4 检 验

按照式(1)与式(2)的处理方法, 图 2 中电流数据的均值与归一化值如图 4 所示。

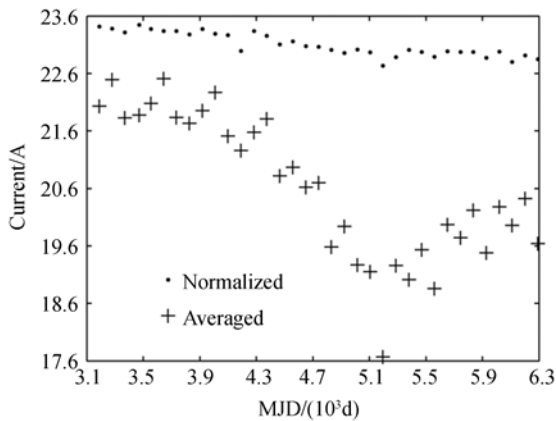


图 4 均值电流与归一化电流

Fig. 4 Averaged current and normalized current

以倾角控制时间为参考(图 4 中最小数值点), 在距离控制时间较远的年份中, 均值电流在冬至前后的数据值较大, 而夏至前后的数据值较小, 年周期变化规律相对明显; 而在距离控制时间较近的年份中, 均值电流变化相对较小, 甚至出现夏至前后电流大于冬至前后电流的情形。

在轨道倾角控制前, 均值电流整体上呈现下降趋势, 而在倾角控制后, 电流出现明显回升(图 4)。归一化处理后, 电流衰减趋势相对明显, 且一致性也较好, 但是衰减幅度并不是很大: 在卫星运行 8 年多时间里, 第一组数据 23.417 A 与最后一组数据 22.849 A 仅相差 0.568 A, 约下降 2.4%。

由图 4 中的归一化数据, 得到的拟合结果为: 线性拟合, 斜率  $-1.948 \times 10^{-4}$  A/d, 截距 24.028 A; 指数拟合, 衰减因子  $-8.423 \times 10^{-6} d^{-1}$ , 零值 24.045 A。

根据指数拟合结果, 可进一步计算得到年均衰减率约为  $-3.072 \times 10^{-3}$ , 即硅太阳能电池阵输出功率年均下降约为 0.307%, 这与低轨卫星应用场合下的文献[6]和[7]的估计值 1.5% 差别明显: 前者低, 后者高。这一现象可能是太阳电池阵

实际输入功率差异所致: 一是光照角不同, 导致输入功率不同, 前者光照角的平均值在  $26.9^\circ$  左右(图 1), 后者在  $16.9^\circ$  左右, 两者的余弦均值对应约为 0.886 和 0.994; 二是降交点地方时不同, 前者在 10:00 AM 附近(每一圈都有光照与地影), 后者在 06:00 AM 附近(仅在夏至前后出现地影), 年均受晒率也不同。

对于晨昏轨道, 受晒率明显要高于非晨昏轨道, 在相同的寿命时间内, 前者实际光照时长显然要大于后者。在相同的输入功率条件下(假定光照功率为恒值), 前者衰减也应该大于后者。具体的对应关系, 可能还需要进一步积累更多不同轨道类型下的相关数据, 再作分析和研究。

另外, 输入功率的稳定性也可能产生影响。从图 1 的光照角曲线和日地距离因子曲线可以看出, 由于轨道设计与选择的不同, 这里的光照角在冬至附近较大、夏至附近较小, 其与日地距离因子的综合作用结果则是光照功率输入值相对平稳: 光照角极大值大致与日地距离因子极小值对应, 而光照角极小值大致与日地距离因子极大值对应。这也可从图 2 的电流曲线看出: 全年的光照电流输出值相对平稳, 起伏在 0.5 A 左右, 而均值在 22 A 附近, 前者约为后者的 2.2%, 平均电流的变化、波动确实很小。输入功率的稳定应该有利于器件性能的保持。

此外, 文献[14]对辐射下的单结砷化镓太阳能电池与硅太阳能电池的功率衰减进行了地面测试, 数据表明玻璃盖片的厚度对于衰减速率或者电池寿命也有很大影响: 盖片越厚, 衰减越慢, 期望寿命越长。此外, 电池生产、制造工艺水平提高, 器件抗辐射性能增强, 衰减率也会降低。

利用线性拟合与指数拟合结果, 可以针对归一化电流进行线性与指数预测, 如图 5 所示。可以看出, 两种方法下的预测结果差别不大, 从 2017 年 3 月向后预测 10 年, 线性预测结果为 22.075 A, 指数预测为 22.098 A。与图 4 中的第一组数据的 23.417 A 相比, 衰减不足 6%。考虑到当前光照角还处于减小趋势(图 1), 有利于增强电池阵的光照输入, 则输出电流在未来一段时间中仍将处在增大趋势。综上, 硅太阳能电池阵的输出功率在未来 10 年能够满足应用需求。

显然, 衰减率越低, 电池阵输出功率的变化则相对较小, 电源供给也愈稳定、有保障; 相应地, 在

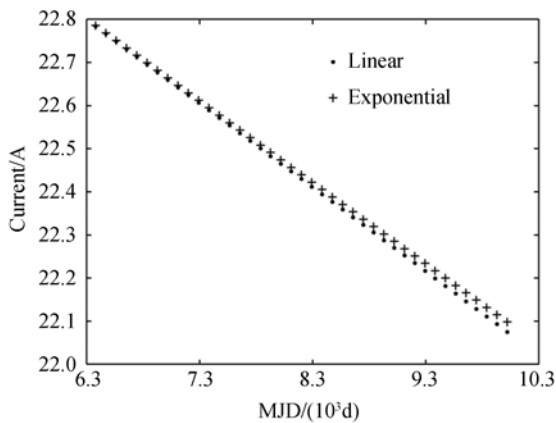


图 5 太阳能电池阵电流预测

Fig. 5 Prediction of solar array current

轨卫星也可能具有更长的期望寿命。在卫星长期管理与测控中,重点关注夏至前后的最低功率(图 2)变化,监测整星能源供给水平与平衡状况,实施有效管理,也可减小相关的测控管理工作量。

需要指出的是,在以上的分析和讨论中,并未考虑太阳入射功率变化带来的影响而是认为太阳入射功率一直不变。显然,这与真实情况并不相符。太阳活动具有周期性,同时还有突发性。因此,太阳入射功率应该持续变化。在后续工作中,还需考虑这一情况,按照太阳活动的高年与低年进行太阳能电池阵功率衰减估计,结果可能更好。

#### 参考文献:

- [1] 高欣,杨生胜,王云飞,等. MEO 轨道辐射环境对 Si 太阳能电池影响研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 931-935.  
GAO X, YANG SH SH, WANG Y F, *et al.*. The Effects of medium-earth-orbit radiation environment on Si solar cells [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 931-935. (in Chinese)
- [2] 雷刚,曹佳晔,王艺帆. 空间用太阳能电池红外干涉截止滤光技术研究[J]. 上海航天, 2015, 32(4): 59-62.  
LEI G, CAO J Y, WANG Y F. Research of IRR for space solar cell[J]. *Aerospace Shanghai*, 2015, 32(4): 59-62. (in Chinese)
- [3] 刘春明. 空间用新型太阳能电池抗辐照特性[J]. 电源技术, 2005, 29(3): 136-139.

## 5 结 论

根据硅太阳能电池阵功率衰减估计,可以得到以下结论:

(1) 日地距离对功率输出影响相对明显,冬至前后功率为全年最高水平,夏至前后则为最低水平;

(2) 在每一轨中进出地影的附近区域,功率处于极大值,地球反照对功率输出影响比较明显。电池阵温度变化相对稳定,在轨期间波动小,对功率影响较小;

(3) 轨道受晒率对功率衰减有影响,一年中平均受晒率越高,则光照时间越长,对应衰减越大;

(4) 对于降交点地方时约为 10:00 AM、轨道高度约为 650 km、在轨运行超过 8 年的卫星,硅太阳能电池阵的年均功率衰减约为 0.307%。在轨 18 年后,功率衰减不超过 6%;

(5) 通过恰当的轨道设计与选择,能够实现光照功率的稳定输入,有利于减小太阳能电池阵的功率衰减,适于低轨长寿命卫星应用。

针对太阳辐射对电池阵输出功率的影响,后续还需要积累更多卫星(不同高度、光照角、降交点地方时等)的太阳电池(硅、单结砷化镓、三结砷化镓等)衰减数据,以进一步研究。

- LIU CH M. Study on the radiation resistance characteristic of some new types of space solar cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2005, 29(3): 136-139. (in Chinese)
- [4] 王荣,司戈丽,张新辉,等. 国产空间实用太阳能电池抗质子辐射性能研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, 37(4): 507-510.  
WANG R, SI G L, ZHANG X H, *et al.*. A study on proton irradiation effects of home-made solar cell for space use[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2001, 37(4): 507-510. (in Chinese)
- [5] 王荣,周宏余,司戈丽,等. 空间实用背场 Si 太阳能电池和 GaAs/Ge 太阳能电池性能随质子辐照剂量变化的比较[J]. 半导体学报, 2002, 23(1): 49-52.  
WANG R, ZHOU H Y, SI G L, *et al.*. A comparison of electric properties of back-field Si solar cell

- and GaAs/Ge solar cell for space use as a function of proton irradiation fluence[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(1): 49-52. (in Chinese)
- [6] 彭梅, 王巍巍, 吴静, 等. 太阳同步轨道卫星太阳电池阵衰减因子研究[J]. *航天器工程*, 2011, 20(5): 61-67.  
PENG M, WANG W W, WU J, *et al.*. Study on attenuation factor of Si solar array for satellite in sun synchronous orbit[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(5): 61-67. (in Chinese)
- [7] 井元良, 孙海涛, 雷英俊. 太阳同步轨道卫星太阳电池阵在轨特性分析[J]. *航天器工程*, 2013, 22(5): 61-66.  
JING Y L, SUN H T, LEI Y J. Analysis on performance of solar array for satellite in sun synchronous orbit[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(5): 61-66. (in Chinese)
- [8] 张晓峰, 左子瑾. MEO 卫星太阳电池在轨衰降特性分析[J]. *航天器工程*, 2014, 23(1): 75-80.  
ZHANG X F, ZUO Z J. Analysis on solar cell degradation characteristic of MEO satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(1): 75-80. (in Chinese)
- [9] 尹兴月, 林君毅, 王晟. MEO 卫星太阳电池阵在轨功率分析[J]. *电源技术*, 2013, 37(6): 1007-1009.  
YIN X Y, LIN J Y, WANG SH. Analysis of power output on orbit of MEO-satellite solar array[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(6): 1007-1009. (in Chinese)
- [10] 刘震, 杜红. 地球静止轨道卫星硅太阳电池在轨特性分析[J]. *航天器工程*, 2011, 20(5): 68-72.  
LIU ZH, DU H. Analysis on performance of Si solar cells in geostationary orbit satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(5): 68-72. (in Chinese)
- [11] 郝培杰, 徐冰霖, 卢晓东, 等. 卫星单粒子闩锁异常的诊断与自动报警[J]. *飞行器测控学报*, 2014, 33(6): 512-517.  
HAO P J, XU B L, LU X D, *et al.*. Diagnosis and automatic alarm of single event latch-up anomaly of satellites[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2014, 33(6): 512-517. (in Chinese)
- [12] 穆肯德 R 帕特尔. 航天器电源系统[M]. 韩波, 陈琦, 崔晓婷, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 159-172.  
PATEL M R. *Spacecraft Power Systems* [M]. HAN B, CHEN Q, CUI X T, translated. Beijing: China Astronautics Press, 2010: 159-172. (in Chinese)
- [13] 解晓莉, 高剑锋, 房爱省. 低轨三结砷化镓太阳电池阵遥测数据分析[J]. *电源技术*, 2014, 38(2): 279-281, 289.  
XIE X L, GAO J F, FANG A X. Remote sensing data analysis of LEO triple-junction GaAs solar array[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2014, 38(2): 279-281, 289. (in Chinese)
- [14] WOIKE W T. Radiation-induced power degradation for GaAs/Ge solar arrays[C]. *6th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 1994: 1-13.

#### 作者简介:



李 强(1976—),男,湖北荆州人,硕士,工程师,1998年于武汉测绘科技大学获得学士学位,2007年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事卫星测控与在轨管理。E-mail: buffalo126126@126.com