

# 晨昏轨道卫星硅太阳能电池阵功率衰减估计

李强<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>, 王洪浩<sup>1</sup>, 郑惠强<sup>1</sup>, 王超<sup>2</sup>

(1. 航天器在轨故障诊断与维修重点实验室, 西安 710043;

2. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043)

**摘要:** 关于空间环境对近地卫星太阳能电池阵输出功率衰减影响, 以某晨昏轨道卫星的背场硅太阳能电池阵为对象, 在分析卫星轨道半长轴摄动、降交点地方时漂移、光照角变化、日地距离波动等因素的基础上, 讨论电池阵工作温度和输出电流变化, 建立电流与温度的拟合模型; 同时以拟合电流归一化处理为重点, 在光照角、功率温度系数归一化前提下, 针对输入光源功率波动, 提出利用温度进行归一化处理; 最后利用实际在轨数据进行检验; 结果表明, 利用温度对光源功率进行归一化之后, 太阳能电池阵输出电流的数据一致性较好; 在轨3年后, 电流出现约2.35%的突降, 推测电池阵串并联支路数目在40左右, 且某个支路出现开路; 功率变化具有季节性, 冬至前后功率最强, 夏至前后功率最弱; 背场硅太阳能电池阵功率衰减因子约为 $-1.034 (10^{-5}/d)$ , 年均衰减约为0.377%; 预测卫星在轨17年后, 夏至时期的电池阵功率衰减不超过8.5%; 电池阵抗辐照性较强, 适宜于近地空间长寿命应用场合; 该方法可应用于在轨卫星长期测控与管理中的能源管理、遥测诊断与器件健康状态评估等方面。

**关键词:** 硅太阳能电池; 功率; 衰减; 估计; 预测

## Estimation to Silicon Solar Cell Degradation of Dawn—dusk Satellite

Li Qiang<sup>1</sup>, Ma Qiang<sup>1</sup>, Wang Honghao<sup>1</sup>, Zheng Huiqiang<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Spacecraft In-Orbit Fault Diagnosis and Maintenance, Xi'an 710043, China;

2. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** With respect to output power degradation of solar cell influenced by space environment, a back surface field silicon solar cell array supplying power for a LEO (low earth orbit) satellite running on dawn—dusk sun synchronous orbit is selected as a sample. Details on orbit semi major axis perturbation, LTDN (local time of descending node) shift, solar incidence change, and variation of distance from the Sun to the Earth are discussed. Situations involving solar cell array output current and working temperature are investigated and analyzed to build a fitting model from telemetry. To mitigate solar power variation influence, a new method has presented to normalize the fitting current with solar array temperature that is based on solar incidence and output power temperature coefficient. Validated by telemetry data, the results have shown that normalized current has a better consistency of degradation with a sudden declination of 2.35% after 3 years on orbit to indicate that solar array has about 40 branches among which one is probably open in circuit, and is high in winter and low in summer, and has degraded with exponential factor of  $-1.034 (10^{-5}/d)$  that is equivalent to 0.377% annually. Prediction is that current degradation in summer is lower than 8.5% in 17 years of satellite working on orbit. Degradation illustrates that indigenous silicon solar cell has a better anti-irradiation performance in near Earth space and is applicable to LEO satellite of long life. The results can be used to assist power supply balance, telemetry diagnosis and device SOH (State of Health) evaluation for long term management of satellite in TT&C (telemetry, tracking and command).

**Keywords:** silicon solar cell; power; degradation; estimation; prediction

## 0 引言

近地卫星在轨长期运行过程中, 需要太阳能电池阵为其提供电能<sup>[1]</sup>。但在空间环境<sup>[2]</sup>辐照影响下, 太阳能电池阵输出功率会不断衰减: 在入轨初期一般衰减较大, 在后期则衰减缓慢。

太阳能电池的抗辐照特性目前多采用地面测试与空间验证等方法进行研究与考察。在地面, 主要使用等效注量法与等效位移损伤法进行太阳能电池的辐照损伤效应测试<sup>[3]</sup>; 在轨应用中, 一般利用太阳能电池阵的相关遥测数据进行处

理, 然后给出功率衰减估计。

文献 [4] 认为, 砷化镓太阳能电池光电转换效率、抗辐照能力和耐高温性能要优于硅太阳能电池, 在空间领域的应用比例日益增大。尽管如此, 但目前近地卫星仍有相当比例的硅太阳能电池阵在使用之中。新的硅太阳能电池技术研发、验证和应用也仍在不断进行之中, 文献 [5] 即设计了一种红外截止滤光片, 可使硅太阳能电池在轨工作温度降低  $5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 输出功率增加  $1.4\% \sim 3.3\%$ 。因此, 对于在轨卫星长期管理中的硅太阳能电池阵的功率衰减必须给予持续的关注, 尤其是长寿命运行卫星: 早期其它卫星的估计结果能否适用于现在运行的卫星, 则需在数据检验之后才能明确。

对于国产硅太阳能电池阵早期在轨应用时期的功率衰减估计, 文献 [6-8] 分别给出了低、中、高不同轨道类型下

收稿日期: 2019-05-03; 修回日期: 2019-05-30。

基金项目: 国家自然科学基金(61801518)。

作者简介: 李强(1976-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星操控与在轨管理工作方向的研究。

的检验结果, 年衰减率对应约为 1.5%、1.7%、1%; 估计方法则是在光照角、日地距离和功率温度系数基础上针对平均电流进行归一化, 继而对归一化数据进行指数或者线性衰减估计, 给出最终结果。但是当太阳活动变化相对剧烈时, 由于太阳光源功率变化的影响难以消除, 增大了估计误差。针对该问题, 这里提出一种当量热传导<sup>[9]</sup>下的温度归一化方法, 进行 2010 年后的国产硅太阳电池阵功率衰减估计, 用于测控中的卫星能源管理、遥测诊断<sup>[10]</sup>与器件健康状态评估等工作。

## 1 太阳电池阵电流与温度

某近地卫星运行在太阳同步轨道, 降交点地方时在 06:00 AM 附近, 轨道高度约 620 km (近圆轨道), 整星为三轴零动量控制。太阳电池阵固定安装在卫星本体的一 Z 侧, 零驱动; 在轨运行时, 电池阵法线方向与轨道法线方向平行。

卫星入轨以来的半长轴、降交点地方时、光照角与日地距离因子变化如图 1 所示。其中, 光照角定义为电池阵法线与地日矢量的夹角, 日地距离因子定义为日地距离与平均日地距离的比值 (平均日地距离取为  $1.496 \times 10^8$  km)。

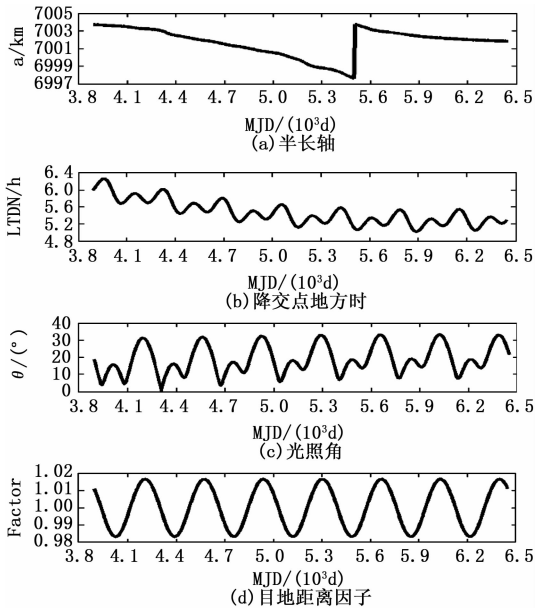


图 1 轨道参数变化

显然, 卫星在轨期间进行过轨道控制: 时间在 2015 年 1 月, 半长轴抬高约 6km。控制前的日均轨道衰减量约为 2.5 m/d, 控制后的约为 2.0 m/d。这说明卫星在轨前期, 太阳活动相对较强, 大气阻尼较大, 轨道衰减较快; 后期, 太阳活动相对较弱, 对应的轨道衰减较慢。

降交点地方时具有年周期、双峰值变化规律, 其原因主要由太阳在天赤道上的投影点运动速度变化所致: 在春、秋分点附近运行慢, 在夏、冬至点附近运行快。曲线的长期变化呈开口向上的抛物线形状; 在 2015 年冬至附近, 降交点地方时达到最小 (在 05:00 AM 附近); 其后, 一直呈

缓慢上升趋势。降交点地方时的相关变化、分析与控制, 还可参阅文献 [11-12]。

光照角也具有年周期、双峰值特征: 夏至与冬至前后有极大值, 且夏至前后的光照角最大; 春分与秋分附近有极小值, 2011 年秋分附近的光照角为最小。在卫星轨道控制前, 夏至期间的极大值呈现逐渐增加趋势; 轨控以后, 则开始缓慢下降。因此, 轨控还兼有改善轨道光照的作用: 光照角越小, 电池阵的太阳光入射功率越大, 相同条件下的输出功率也大。

日地距离因子呈年周期规律变化, 极小值在冬至前后出现, 极大值则在夏至前后出现。

综上, 夏至前后的光照角最大, 同时日地距离最远, 相应的太阳电池阵输出功率最小。因此, 在测控管理中需重点关注这一时期的卫星能源平衡情况。

卫星太阳电池为转换效率约 15.6% 的高效、背场硅太阳电池, 电池阵为单翼、5 子阵设计, 整体尺寸为  $3\ 200\ \text{mm} \times 1\ 700\ \text{mm} \times 22.6\ \text{mm} \times 5$ , 向阳总面积约  $27.2\ \text{m}^2$ , 表面粘贴掺有二氧化铈的抗辐照玻璃盖片。电池阵安装于卫星本体的一 Z 面 (朝天面), 阵面与轨道面平行, 零驱动。

卫星入轨以来的电池阵电流与温度的部分遥测如图 2、3 所示。为便于分析, 这里仅仅选取每年 3 月 22 日、6 月 22 日、9 月 22 日、12 月 22 日的遥测数据, 时间均在分至日附近, 时间起点为 2010 年 9 月 22 日, 终点为 2017 年 6 月 22 日; 每段数据时长均大于一个轨道周期, 夏至时期电流为 0 (轨道中存在地影) 的部分并未画出; 另外, 温度数据只给出了一部分进行示意说明。

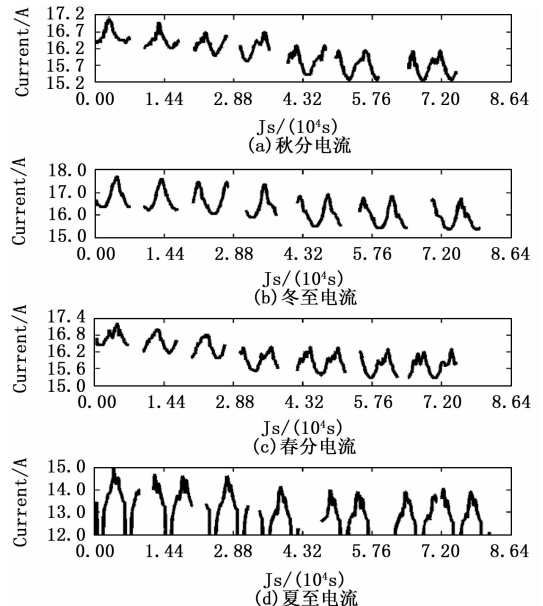


图 2 太阳电池阵电流

可以看出, 电流数据具有周期性和长期性变化, 周期性变化分为短周期与长周期两种。

短周期为轨道周期, 电流变化类似正弦曲线, 具有极大值与极小值, 极值点所在时刻的卫星星下点在极地区域

附近。夏至前后，极大值在北极附近区域出现；冬至前后，极大值则在南极附近区域出现。这种轨道周期内的电流变化主要是地球反照影响所致，极地区域因为冰雪覆盖而对阳光反射较强，电池阵输出功率相应地较大。

长周期为年周期，电流幅度大致以冬至前后最强，夏至前后最弱，春、秋分前后的情形居中。这主要与日地距离以及光照角变化有关：冬至时期日地距离最近且光照角较小，因而电流最强；夏至前后，日地距离最远且光照角往往最大，因而电流最弱。

长期变化则是在空间环境影响下的功率逐渐衰减<sup>[13]</sup>。

温度的周期变化规律与电流相似，这里不再赘述；长期变化一般是缓慢升高<sup>[6,14-16]</sup>，但在图 3 中表现并不明显。

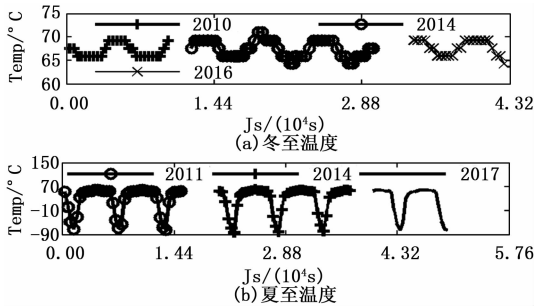


图 3 太阳电池阵温度

## 2 功率衰减估计

太阳电池功率  $P$  可表示为<sup>[17]</sup>：

$$P = FUI$$

$$U = U_0[1 + \alpha(T - 25)]$$

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

式中， $U$  为电池工作电压 (V)； $U_0$  为 AM0 条件 (太阳入射功率  $1353 \text{ W/m}^2$ ，温度  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下开路电压 (V)； $I$  为电池工作电流 (A)； $I_0$  为 AM0 条件下的短路电流 (A)； $\alpha$  为电压温度系数， $\text{V}/^\circ\text{C}$ ，一般为负值； $\beta$  为电流温度系数 ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ )，一般为正值； $T$  为电池的工作温度 ( $^\circ\text{C}$ )； $\varphi$  为太阳的光照角 ( $^\circ$ )； $F$  为功率系数，无量纲。功率系数主要受到日地距离、空间环境以及遮挡、地球反照、光源功率波动等因素的影响。

一般情况下， $\alpha$  与  $\beta$  的数值都很小，因此可以将式 (1) 简化为：

$$P = FU_0I_0[1 + \gamma(T - 25)]\cos\varphi$$

$$\gamma \approx (\alpha + \beta)(T - 25) \quad (2)$$

式中， $\gamma$  为电池的功率温度系数 ( $\text{W}/^\circ\text{C}$ )，实际的取值为  $-4.25 \times 10^{-3} \text{ W}/^\circ\text{C}$ 。显然，这里的  $U_0$  与  $I_0$  可以看作是常数。因此，对于电池功率，可以直接表示为：

$$P = FI_0[1 + \gamma(T - 25)]\cos\varphi \quad (3)$$

式 (3) 与式 (2) 之间仅仅相差一个常数，可以将太阳电池功率衰减估计转换为电流衰减估计。

传统的衰减估计方法主要是在电池电流拟合的基础上针对日地距离因子、光照角、功率温度系数进行归一化，

用归一化之后的电流值进行指数或者线性拟合，给出估计结果。这种处理的不足是当输入的光源功率波动时，归一化方法无法去除这一影响，增加了估计误差。毕竟，日地距离因子的归一化处理实际上是对功率传输链路的归一化，并未涉及光源功率波动的处理。

本文给出一种不同的针对光源功率波动的处理方法。

首先进行电流正弦拟合如下：

$$i = D\cos\omega t \cos\psi - D\sin\omega t \sin\psi + b \quad (4)$$

式中， $D$  为电流振幅 (A)； $\omega$  为卫星的轨道周期 ( $\text{rad/s}$ )； $t$  为时间变量 (遥测采集时刻) (s)； $\Psi$  为初相 (rad)； $b$  为均值 (A)。这里采用正弦拟合的缘由可以参见图 2 中的电流变化规律。显然，这里的均值  $b$ ，就是式 (3) 中的  $I_0$ 。

得到电流的均值  $b$  后，再进行太阳的光照角归一化处理：

$$b_1 = \frac{b}{\cos\varphi} \quad (5)$$

式中， $b_1$  为光照角归一化后的电流，A。接下来，进行功率温度系数的归一化处理：

$$b_2 = \frac{b_1}{1 + \gamma(T - 25)} \quad (6)$$

式中， $b_2$  为针对输出功率进行温度归一化之后得到的电流 (A)。

另外，针对输入功率波动，再一次进行温度的归一化处理：

$$b_3 = \frac{b_2}{\lambda_T} \quad (7)$$

式中， $b_3$  为针对输入功率进行温度归一化的电流 (A)； $\lambda_T$  为温度归一化因子，无量纲。 $\lambda_T$  的计算方法如下：

$$\lambda_T = \frac{T + 273.15}{T_r} \quad (8)$$

式中， $T_r$  为参考温度，这里取为  $273.15 \text{ K}$ 。

显然，这里将温度  $T$  也转换为单位 K 下的数值。输入功率温度归一化的理论基础如下：电池工作温度越高，说明入射到电池的光源功率越大，反之亦然。

温度遥测的处理同样可以仿照式 (4) 进行，电流与温度的遥测拟合如图 4 所示。

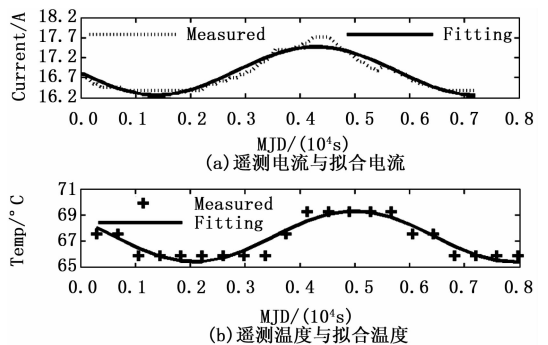


图 4 遥测与拟合

图 4 中的遥测取自图 2 中的 2010 年冬至附近的数据曲线。电流与温度的拟合振幅、初相、均值对应为：0.604 A

与 1.976 °C、1.656 rad 与 0.912 rad、16.873 A 与 67.371 °C。可以看出, 在轨道周期内, 电流与温度数据基本上同步变化: 电流大, 则温度高; 电流小, 温度低。如果太阳入射功率不变, 则地球反照越强, 温度越高。同样地, 地球反照不变时, 太阳入射功率越大, 则温度越高。进一步, 可以用电流拟合结果表征地球反照的影响, 定义地球反照系数  $\eta$ :

$$\eta = \frac{2D}{b - D} \quad (9)$$

将数值代入, 可得到结果为 7.423%。仿照式 (9), 同样可以得到温度拟合结果表征的地球反照系数, 对应为 6.045%。因此, 温度的变化可以反映太阳电池阵的功率变化。这里, 用温度拟合的均值结果来表征电池阵入射功率的变化。

最后, 用指数拟合方法针对归一化电流进行衰减估计:

$$i_m = ce^{-\epsilon t} \quad (10)$$

式中,  $c$  为零值 (A);  $\epsilon$  为衰减因子 ( $d^{-1}$ );  $t$  为时间变量 (d)。

### 3 检验

这里, 利用图 2 中的电流与温度的遥测数据进行分析、检验, 如图 5 所示。

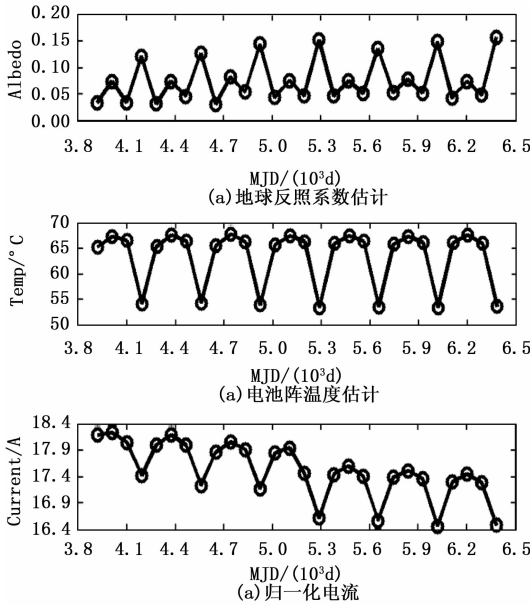


图 5 估计结果

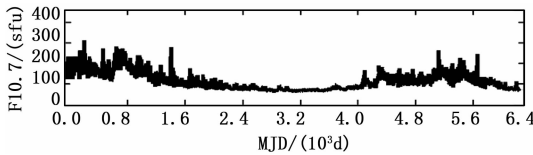


图 6 F10.7 曲线

图 5 依次给出了地球反照系数 (根据电流拟合结果得到)、拟合平均温度、归一化电流等结果。可以看出, 地球反照对于太阳电池阵电流具有明显的季节性影响: 夏至前后影响最为明显, 都在 10% 以上, 这对于夏至时节最为恶

劣的轨道光照而言, 是一个有益的补充和增强; 冬至前后的地球反照影响也很明显, 在 7% 左右, 能够使这一时期的输出电流更高; 春秋时期的影响相对较弱, 基本可以忽略不计。夏冬之间的差别可能与太阳、极地 (北极或南极)、卫星之间的几何位置有关, 夏至时期的日、极、星形成的夹角要小于冬至时期的情形, 而空间中的反射功率并非完全的漫反射分布, 可能以直射区域为中心逐渐向四周减弱, 夹角越小则反射功率越强。

太阳电池阵的温度具有明显的季节性, 夏至最低, 冬至最高; 整体的长期性变化不明显, 数据的一致性较好, 说明这一时期太阳活动并不剧烈 (可参见图 6 的 F10.7 的强度变化以及文献 [18] 的相关分析), 光源功率相对稳定。

归一化电流的长期衰减特性明显, 且具有季节性。这里的季节性差别并非仅仅是日地距离变化所致 (这里没有对日地距离进行归一化), 而主要是卫星随着地球在绕日运行中, 其所处的空间环境随着季节在发生变化, 不同环境下的辐照衰减并不相同, 因此表现出季节性差别。文献 [19] 对 Akebono 卫星 (1989 年发射、2015 年退役) 太阳电池阵功率衰减进行了分析, 其结果与图 5 (c) 很相似, 只是 Akebono 卫星在大椭圆轨道运行, 数据的季节性差异与年周期变化更大、更明显。文献 [20] 关于 TACSAT-4 卫星太阳电池在轨试验的衰减结果亦与图 5c 相似。

另外, 图 5 (c) 中的数据在 2013 年冬至与 2014 年春季之间 (从左向右, 第 14 与第 15 数据之间) 存在断层或者跳变: 跳变前、后的数据衰减变化相对一致, 后者比前者明显要低一些, 结果如表 1 所示。

表 1 电流跳变

	跳变前电流 / A	跳变后电流 / A	变化率 / %
春	17.922	17.462	2.567
夏	17.171	16.615	3.238
秋	17.854	17.443	2.302
冬	17.951	17.448	2.802

在表 1 中, 变化率的均值约 2.727%, 除夏至的变化率稍大, 其它季节的相对一致。

表 2 给出了整体数据和跳变前、后数据按照季节区分的衰减估计结果。

表 2 衰减估计

	春	夏	秋	冬
$\epsilon_0 / (-10^{-5} / d)$	2.270	2.892	2.400	2.296
$c_0 / A$	19.848	19.628	19.985	20.077
$\xi_0 / \%$	0.826	1.051	0.873	1.008
$\epsilon_1 / (-10^{-5} / d)$	1.000	2.025	1.756	1.520
$c_1 / A$	18.817	18.947	19.448	19.409
$\xi_1 / \%$	0.366	0.737	0.639	0.553
$\epsilon_2 / (-10^{-5} / d)$	0.920	0.846	1.158	1.218
$c_2 / A$	18.322	17.365	18.572	18.812
$\xi_2 / \%$	0.335	0.306	0.422	0.444

表 2 中左一栏的下标 0、1、2 分别对应整体数据、跳变前数据和跳变后数据； $\epsilon$ 、 $c$ 、 $\xi$  对应为衰减因子、零值、年衰减率 ( $1 a=365.242\ 5\ d$ )。

显然，整体数据下的衰减因子（绝对值）都相对较大，对应的衰减速度也快；跳变前、后数据得到的结果除夏至情形差异稍大外，其它季节的结果相对一致且稳定；另外，跳变后的数据的年衰减率最低，说明入轨早期衰减确实要快，这也与理论相一致，也还可参见文献 [6, 19-21] 的在轨结果。

综合表 1 与表 2，将年衰减率取为  $\xi_2$  的平均值，约为 0.377%（衰减因子约为  $-1.034\ (10^{-5}/d)$ ），再从电流跳变的变化率平均值中扣除这一因素，得到跳变前后的电流实际变化约为 2.350%，约为 1/40。由此推测：电池阵的串并联结构中共有约 40 个支路，其中一个支路在 2013 年冬至到 2014 年春分期间出现开路（断开），电池阵的输出电流减少约 1/40。当然，在合理的电池阵结构设计下，这一影响对于整星供电可以忽略不计，不会造成能源不足。

文献 [6-8] 给出的是 2000~2009 年之间发射上天的卫星硅太阳能电池阵的功率衰减估计结果，年衰减率基本上大于 1%；本例中的卫星是 2010 年发射入轨，当前的年衰减率约为 0.377%，说明国产硅太阳能电池有明显的技术进步，电池的抗辐照性能得到提高。这一结果与文献 [22] 给出的国外上世纪 90 年代的砷化镓太阳能电池 0.8% 左右的年衰减率相比，具有明显优势；而与文献 [23] 给出的国外 2010 年后的三结砷化镓电池约 0.4% 的年衰减率相比，也是不相上下（但后者是地面测试结果，并非在轨结果）。可见，背场硅太阳能电池的抗辐照性能比较好。显然，衰减率越低，卫星的能源期望寿命可能越长。因此，硅太阳能电池阵仍有其应用空间。

根据表 2 中跳变后数据的估计结果，进行电流预测，如图 7 所示。

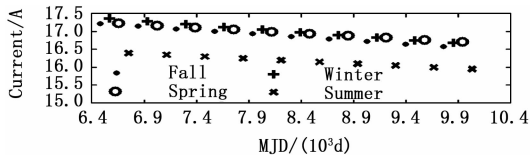


图 7 电流预测

预测的时间起点为 2017 年 9 月 22 日，向后预测约 10 年，预测日期仍是每年 3、6、9 月的 22 日。可以看出，夏至前后的输出电流始终最低，在轨 17 年后，预测电流为 15.953 A，与图 5c 中的第一个夏至电流 17.427 A 相比，减少约 8.458%，这其中还包括电流的下跳变因素。尽管如此，8.458% 的减少量相对较小，其等效年衰减率约为 0.498%（17 年的平均值）。在测控中，需要重点以夏至前后的能源状况为关注对象，这一时期轨道受晒率低、光照角大、日地距离远、蓄电池需在阳照区充电，轨道能源条件相对较差，需充分考虑卫星的能源预算与平衡，分析轨道变化对能源的影响。

## 4 结束语

对晨 620 km 高度的昏轨道卫星的高效背场硅太阳能电池进行功率衰减估计，可得到以下结论：

1) 地球反照对太阳能电池阵输出电流的影响相对明显，尤以夏至时期为最，可增加电流 10% 以上；但春、秋分时期影响较弱，可忽略不计。

2) 硅太阳能电池在近地空间的功率衰减因子约为  $-1.034 \times 10^{-5}/d$ ，年均衰减约为 0.377%；功率衰减具有季节性特征，冬至前后功率最强，夏至前后功率最弱；夏至预测卫星在轨 17 年后，夏至时期的电池阵功率衰减不超过 8.5%。

3) 利用温度对光源功率进行归一化后，太阳能电池阵输出电流的数据一致性较好，能够发现其中存在的下跳变，并进一步推测电池阵的串并联支路数目约为 40，且其中某个支路出现开路，阵电流减少约 2.35%。

4) 国产硅太阳能电池在近地空间的抗辐照性能相对优异，电池阵串并联结构设计合理，适宜于低轨卫星长寿命应用。

后续工作中，还需积累更多的砷化镓太阳能电池功率相关数据，结合高中低不同轨道类型进一步检验、改进新方法，重点以季节为分层，分别进行功率衰减估计，为在轨卫星长期管理的遥测诊断、能源估计与预测、器件健康状况评估等提供数据和技术支持。

### 参考文献：

- [1] Pospischil A, Furchi M, Mueller T. Solar-energy conversion and light emission in an atomic monolayer diode [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9 (4): 257-261.
- [2] Michael Xapsos. A brief history of space climatology: from the big bang to the present [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66 (1): 17-37.
- [3] 常晓阳, 尧舜, 张奇灵, 等. 基于分布式布拉格反射器结构的空三结砷化镓太阳能电池抗辐照研究 [J]. 物理学报, 2016, 65 (10): 1-7.
- [4] 张忠卫, 陆剑峰, 迟卫英, 等. 砷化镓太阳能电池技术的进展和前景 [J]. 上海航天, 2003, 20 (3): 33-38.
- [5] 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.
- [6] 彭梅, 王巍巍, 吴静, 等. 太阳同步轨道卫星太阳能电池阵衰减因子研究 [J]. 航天器工程, 2011, 20 (5): 61-67.
- [7] 张晓峰, 左子瑾. MEO 卫星太阳能电池在轨衰降特性分析 [J]. 航天器工程, 2014, 23 (1): 75-80.
- [8] 刘震, 杜红. 地球静止轨道卫星硅太阳能电池在轨特性分析 [J]. 航天器工程, 2011, 20 (5): 68-72.
- [9] 闵桂荣. 卫星热控制技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 177-199.
- [10] 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.