

# 地球同步卫星 BSR 硅太阳能电池阵输出功率 衰减规律分析

刘帆, 郭静, 郭小红, 黄晓峰

(航天器在轨故障诊断与维修重点实验室, 陕西西安 710043)

**摘要:** 长期受粒子辐照、紫外辐照等因素的影响, 地球同步卫星的太阳电池阵输出功率会出现较为明显的衰减。这里选取某地球同步卫星使用的背表面反射(BSR)硅太阳能电池阵为研究对象, 采用光强因子和温度因子修正太阳电池阵的输出功率, 使用局部加权回归散点平滑法(LOWESS)分析了其设计寿命期间的输出功率衰减规律; 同时基于 LOWESS 建立了预测模型, 用于硅太阳能电池阵超寿运行期间的功率预测。实测数据表明: 本文构建的预测模型可以满足超寿地球同步卫星在轨管理使用需求。

**关键词:** 地球同步卫星; 硅太阳能电池阵; 输出功率; 局部加权回归散点平滑法(LOWESS)

中图分类号: V 412 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.017

## Analysis on Attenuation Rule of Back Surface Reflection Solar Cell Array Power in Geostationary Orbit Satellite

LIU Fan, GUO Jing, GUO Xiaohong, HUANG Xiaofeng

(Key Laboratory of Spacecraft In-orbit Fault Diagnosis and Maintenance, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**Abstract:** The output power of solar cell array in geostationary orbit satellite will obviously attenuate because of the long-term effects of space environment factors such as particle radiation and ultraviolet radiation. The back surface reflection (BSR) silicon solar cell array used in certain geostationary orbit satellite is analyzed in this paper. First, the output power is modified with the light intensity factor and the temperature factor. Then, the attenuation rule of the solar cell array power during the design life is analyzed with the local weighted scatterplot smoothing (LOWESS) method. Finally, a prediction model based on the LOWESS regression method is proposed for the prediction of the power of the BSR silicon solar cell array over its life operation. The test data show that the prediction model proposed in this paper can meet the on-orbit management requirements of extra-served geostationary satellite.

**Key words:** geostationary satellite; silicon solar cell array; output power; local weighted scatterplot smoothing (LOWESS)

## 0 引言

自 1973 年 3 月我国首次与实践一号科学试验卫星上成功使用国产硅太阳能电池阵以来, 硅太阳能电池阵在光电转换效率、输出功率、电池阵面积和布片效率等方面取得了长足的进步。由于地球同步卫星在轨运行寿命一般在 8 a 以上, 每年的全光照期约为 272 d, 太阳电池阵长期受粒子辐射、紫外辐射和冷热交变等因素影响, 其输出功率会出现缓慢且

趋势明显的衰减现象<sup>[1-3]</sup>。掌握太阳能电池阵在轨性能衰减规律不仅有助于改进功能设计, 而且可以用于优化卫星在轨运行管理策略。文献[2]基于遥测数据, 分析了背表面场反射(Back Surface Field Reflection, BSFR)硅太阳能电池阵输出电流近 6 a 在轨运行期间的衰减情况。文献[3]对我国自主研发的某类浅结、密栅硅太阳能电池阵在轨输出功率衰减率进行了分析。

收稿日期: 2020-05-05; 修回日期: 2020-06-29

作者简介: 刘帆(1978—), 男, 硕士, 主要研究方向为航天器故障诊断、数据分析。

本文以某地球同步卫星使用的  $n+/p$  型浅结、密栅、背表面反射 (Back Surface Reflection, BSR) 硅太阳能电池阵为研究对象,通过修正太阳能电池阵输出功率计算结果,并采用非参数回归方法中局部加权回归散点平滑法 (Local Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS) 分析了其在全设计寿命期间的功率变化规律。据此建立统计预测模型,用于硅太阳能电池阵超寿运行期间的性能预测。

## 1 硅太阳能电池阵输出功率计算方法

参照文献[2-7],太阳能电池阵输出功率  $P$  为太阳能电池阵输出电压  $V$  和输出电流  $I$  的乘积,太阳能电池阵输出电压  $V$  的计算公式为

$$V = V_B + V_D + V_w \quad (1)$$

式中:  $V_B$  为母线电压;  $V_D$  为隔离二极管正向电压降;  $V_w$  为太阳能电池阵与负载或蓄电池组之间线缆电压降<sup>[6]</sup>。

太阳能电池阵输出电流  $I$  的计算方法与卫星电源分系统组成结构相关。文中所分析卫星采用双独立部分调节顺序线性母线,其电源分系统的基本组成结构如图 1 所示。

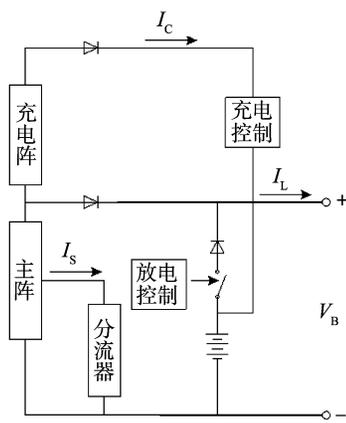


图 1 电源分系统组成结构

Fig.1 Structure chart of the power subsystem

结合卫星下传遥测参数,太阳能电池阵输出电流  $I$  的计算公式为

$$I = I_L + I_s + I_c \quad (2)$$

式中:  $I_L$  为负载电流;  $I_s$  为分流电流;  $I_c$  为充电电流。

本文选取某卫星 8 a 设计寿命期内遥测数据,依据式(1)和式(2)计算得出 BSR 硅太阳能电池阵在每天 12 时的最大输出功率。输出功率值的归一化结果如图 2 所示。

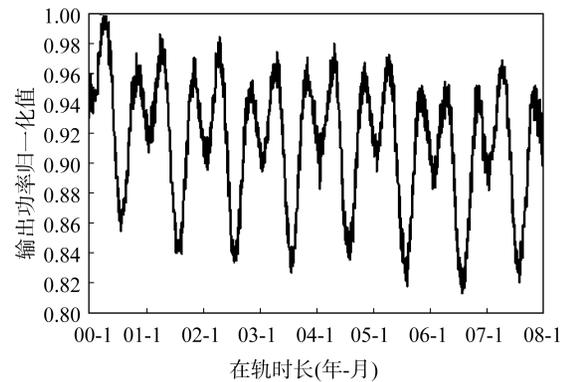


图 2 BSR 硅太阳能电池阵输出功率曲线

Fig.2 Output power curve of the BSR silicon solar array

图 2 中,太阳能电池阵输出功率变化呈现马鞍形曲线或双峰曲线形态,年周期性变化特征明显。其中,峰值出现在每年的春分点和秋分点附近,鞍点出现在冬至点附近,最小值出现在夏至点附近,整体呈缓慢下降趋势。根据该硅太阳能电池阵设计方案,寿命末期时的秋分点相对寿命早期输出功率衰减 17.6%,而夏至点输出功率将衰减 16.0%。但是通过对图 2 中实测数据进行核算,寿命末期时的秋分点实际输出功率比寿命早期仅下降 5.0%,夏至点输出功率比寿命早期也仅下降了 4.5%,由此可知,该太阳能电池阵留有相当大的设计裕度。

## 2 BSR 硅太阳阵输出功率衰减规律分析

### 2.1 硅太阳能电池阵输出功率修正

为分析硅太阳能电池阵输出功率衰减规律,需要对输出功率的光强因子和温度因子进行修正<sup>[8-11]</sup>,这里参照文献[12]中静止轨道  $1 \text{ m}^2$  太阳能电池阵面积寿命初期输出功率估算公式:

$$P_{00} = S \times \eta \times F_a \times F_c \times F_s \times \cos \alpha \times [1 - r \times (T - T_0)] \quad (3)$$

式中:  $P_{00}$  为  $1 \text{ m}^2$  太阳能电池阵面积寿命初期输出功率;  $S$  为空间太阳常数光强;  $\eta$  为太阳能电池光电转化效率;  $F_a$  为太阳能电池阵组合损失因子;  $F_c$  为太阳能电池阵布片效率;  $F_s$  为日地距离因子;  $\cos \alpha$  为太阳光与太阳能电池阵法线方向的夹角余弦值;  $r$  为太阳能电池阵功率温度系数,硅太阳阵参考值为 4.5‰;  $T$  为太阳能电池阵轨道工作温度;  $T_0$  为标准条件下测试温度,即 25℃。

由式(3)可知,  $S$ 、 $F_a$ 、 $F_c$  可视为常值,  $\eta$  虽存在长

期衰减现象,但由于可纳入太阳能电池输出功率的总衰减效应,故可作为常值使用;余下的  $F_s \times \cos \alpha$  即为光强修正因子  $F_{LSC}$ ,  $[1 - r \times (T - T_0)]$  为温度修正因子  $F_{TC}$ 。

本文使用 STK 软件获取 ECIVVLH 坐标系下的太阳相对于卫星的方位、俯仰和斜距信息:

$$F_s = 1 / \left( \frac{R}{R_0} \right)^2 = \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (4)$$

式中:  $R_0$  为日地距离常数;  $R$  为卫星到太阳的斜距。

$$\cos \alpha = \cos E * \cos A * \sin \theta + \sin E * \cos \theta \quad (5)$$

式中:  $A$  为太阳方位角;  $E$  为太阳高度角;  $\theta$  为帆板转角。

故光强修正因子  $F_{LSC}$  计算公式如下:

$$F_{LSC} = F_s \times \cos \alpha = \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \times (\cos E * \cos A * \sin \theta + \sin E * \cos \theta) \quad (6)$$

温度修正因子  $F_{TC}$  计算公式如下:

$$F_{TC} = [1 - r \times (T - T_0)] \quad (7)$$

光强修正因子  $F_{LSC}$  计算结果如图 3 所示,以  $a$  为周期,光强修正因子变化曲线与输出功率类似,在 0.878~0.998 之间变化,整体变化趋势保持平稳。

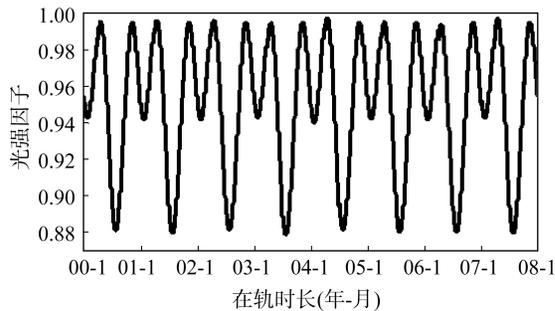


图 3 光强修正因子

Fig.3 Curve of the light intensity correction factor

温度修正因子  $F_{TC}$  计算结果如图 4 所示。图中,温度修正因子整体呈缓慢下降趋势,峰值出现在每年的夏至点和冬至点附近,且在夏至点附近值最大,最小值出现在春分点和秋分点附近。

比较图 3 和图 4 可知,光强修正因子和温度修正因子在同一时刻的变化方向相反。依据温度修正因子与光强修正因子绘制的散点图,如图 5 所示。统计结果显示,温度修正因子与光强修正因子的相关系数为  $-0.977$ ,统计特性显著,两者之间具有较强的负相关关系。

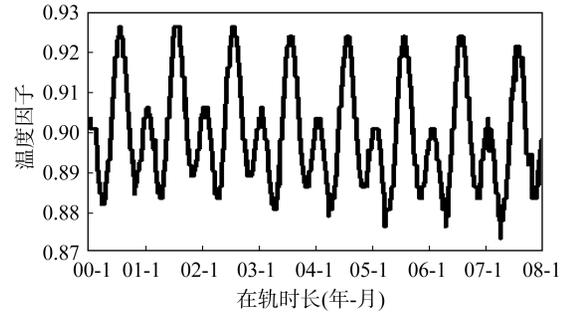


图 4 温度修正因子

Fig.4 Curve of the temperature correction factor

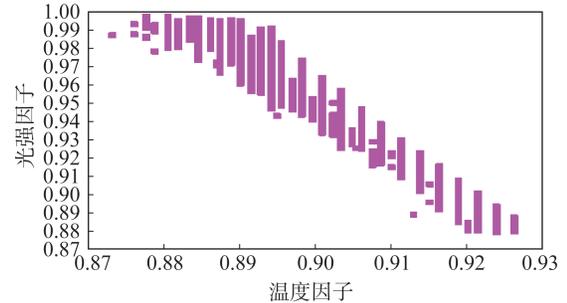


图 5 光强修正因子与温度修正因子散点图

Fig.5 Scatter plot of the light intensity correction factor and the temperature correction factor

依据式(3)~式(7),可以得出硅太阳能电池阵输出功率修正值计算公式如下:

$$P_C = P / (F_{LSC} \times F_{TC}) \quad (8)$$

式中:  $P$  为硅太阳能电池阵输出功率;  $P_C$  为输出功率的光强和温度联合修正值。

硅太阳能电池阵输出功率的修正结果如图 6 所示。图中,红色散点为输出功率归一化值,黑色实线为其修正值。对比可知,修正功率相对输出功率幅值增大,波动范围相对缩小,其曲线形态也为马鞍型曲线,且其变化周期与输出功率基本一致。

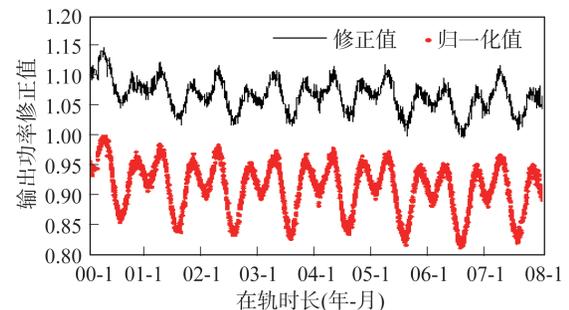


图 6 硅太阳能电池阵输出功率修正曲线

Fig.6 Correction curve of the silicon solar array output power

## 2.2 硅太阳能电池阵输出功率衰减规律

目前,分析硅太阳能电池阵输出功率衰减规律,通常采用的方法是在完成太阳能电池阵输出功率修正后,使用二分点或二至点等特定时刻的功率数据,通过多项式拟合或指数函数拟合等参数回归(Parametric Regression, PR)分析方法,提取出衰减趋势信息<sup>[3,6]</sup>。此类方法存在以下 2 个缺陷:

1) 使用特定时刻的输出功率数据分析衰减规律,相当于对原始分析数据进行了再次抽样。这种方法使分析数据量为减少,衰减规律变得易于提取,但是由于舍弃了大量有效信息,所获取衰减规律与实际衰减情况存在一定的偏差,且易受野值点、离群点等异常数据的影响。

2) 参数回归分析方法一般首先需要对数据模型进行假设,如多项式形式或指数函数形式,再估计其中的参数。虽然这些假设模型一般基于理论或前人的研究,但是由模型误设导致的设定误差(Specification Errors, SE)仍不可避免。

针对上述问题,较为合理的解决方法就是通过系统性的探索数据来找到衰减曲线,即非参数回归方法(Non-parametric Regression, NR)。NR 并不需要预设函数形式,而是通过使用样本数据,根据分组后的自变量计算因变量的平均值,并平滑成一条曲线。这条曲线用一种更加精细的方式来描述自变量与因变量之间的函数关系<sup>[13]</sup>,本文采用的是最常用的 LOWESS<sup>[13-15]</sup>。

LOWESS 是取一定比例的局部数据,在这部分子集中拟合多项式回归曲线,通过数据子集加权残差平方和最小,以此得出数据在局部展现出来的规律和趋势。LOWESS 使用的拟合多项式如下:

$$y_i = a + b_1(x_i - x_0) + b_2(x_i - x_0)^2 + \dots + b_p(x_i - x_0)^p + e_i \quad (9)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为局部子集中的数据样本点  $i$ ;  $x_0$  为局部子集的焦点;  $e_i$  为数据样本点  $i$  的拟合残差;  $a, b_j$  为多项式系数;  $p$  为多项式阶数。

LOWESS 回归结果如图 7 所示。图中,散点为硅太阳能电池阵输出功率修正值,实线为依据功率修正值得到的 LOWESS 回归曲线。依据 LOWESS 回归曲线计算得出,该硅太阳能电池阵在轨运行 8 a 期间,输出功率下降了 4.15%,与图 1 显示的秋分点和夏至点的在轨输出功率衰减情况接近,但衰减速率略有降低。由此可知,仅采用二分点或二至点等特

定时刻功率数据易产生衰减偏大的问题。

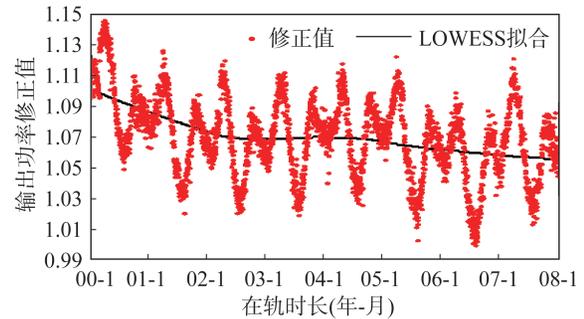


图 7 输出功率修正值的 LOWESS 回归曲线

Fig.7 LOWESS regression curve of the corrected output power

此外,图 7 中输出功率的衰减趋势呈现出阶段性变化的特点:1) 卫星转入在轨运行阶段至第 2 年 7 月份为快速衰减期,年均衰减率约为 1.15%;2) 在轨第 2 年 7 月份至第 4 年 7 月份为平稳变化期,年均衰减率基本为 0%;3) 在轨第 4 年 7 月份至第 8 年为缓慢衰减期,年均衰减率约为 0.37%。

作为对比,这里使用 3 阶多项式拟合模型提取输出功率的衰减趋势信息,如图 8 所示。

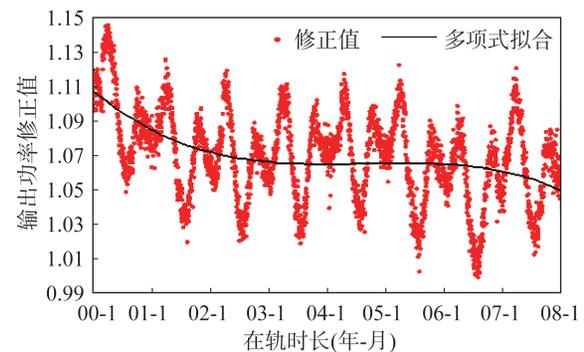


图 8 输出功率的 3 阶多项式拟合曲线

Fig.8 Third-order polynomial fitting curve of the output power

图 8 显示卫星转入在轨运行阶段至第 3 年初为快速衰减期,第 3 年至第 6 年初为平稳变化期,第 6 年初至第 8 年为缓慢衰减期。由此可知,3 阶多项式拟合模型虽较为平滑,但受限于模型设定误差,不仅快速衰减期和平稳变化期被延长,且缓慢衰减期的衰减速度呈现出逐步增大的趋势,在预测未来变化趋势时不可避免地出现估值过低的问题。

### 3 基于 LOWESS 曲线的硅太阳阵输出功率预测方法

文中获取的 LOWESS 回归拟合结果不仅可以用于揭示硅太阳电池阵输出功率衰减规律,也可应用于预测硅太阳阵输出功率。其思路较为简单,就是通过拟合 LOWESS 回归结果构建长期预测模型,并使用历史的 LOWESS 回归残差作为长期预测模型的预测残差,将模型预测值与预测残差相加得到最终的预测结果。

本文使用硅太阳电池阵在轨运行第 8 年的输出功率修正值、光强修正因子和温度修正因子,使用 SPSS 专家建模功能,构建了输出功率预测模型。鉴于光强修正因子年周期变化规律的高度一致性,本文直接使用了历史光强修正因子作为预测值。

硅太阳电池阵输出功率预测值计算公式如下:

$$P'_c = P' / (F'_{LSC} \times F'_{TC}) \quad (10)$$

式中: $P'$ 为硅太阳电池阵输出功率预测值; $P'_c$ 为输出功率的光强和温度联合修正预测值; $F'_{LSC}$ 为光强修正因子预测值; $F'_{TC}$ 为温度修正因子预测值。

输出功率联合修正预测值 $P'_c$ 计算公式如下:

$$P'_c = P'_{C-lowess} + P'_{C-residual} \quad (11)$$

式中: $P'_{C-lowess}$ 为输出功率联合修正长期预测值; $P'_{C-residual}$ 为长期预测模型的预测残差。

温度修正因子预测值 $F'_{TC}$ 计算公式如下:

$$F'_{TC} = F'_{TC-lowess} + F'_{TC-residual} \quad (12)$$

式中: $F'_{TC-lowess}$ 为温度修正因子长期预测值; $F'_{TC-residual}$ 为长期预测模型的预测残差。

$P'_{C-lowess}$ 和 $F'_{TC-lowess}$ 的长期预测模型是使用 SPSS 软件时间序列分析的专家建模功能获取,见表 1。

表 1 长期预测模型

Tab.1 Long-term prediction model

参数	模型类型	变量转换	常数项参数估计值	差分项	滞后项参数估计值
功率修正值	ARIMA(0, 1, 0)	无转换	0	1	—
温度修正因子	ARIMA(0, 1, 13)	自然对数	0	1	滞后 12 -0.535 滞后 13 -0.285

联合修正输出功率长期预测模型的预测残差 $P'_{C-residual}$ 如图 9 所示,温度修正因长期预测模型的预测残差 $F'_{TC-residual}$ 如图 10 所示。

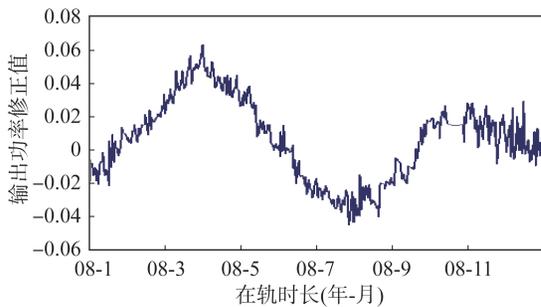


图 9 联合修正输出功率的预测残差

Fig.9 Prediction residual of the joint correction output power

硅太阳电池阵在轨运行第 9 年输出功率预测结果如图 11 所示。图中,实线为预测值,散点为目前累积 4 个月的硅太阳电池阵实际输出值。可见截至目前,预测效果与实际情况符合度较好。

模型误差和在轨遥测数据采集误差是产生预测误差的主要原因。硅太阳电池阵输出功率预测

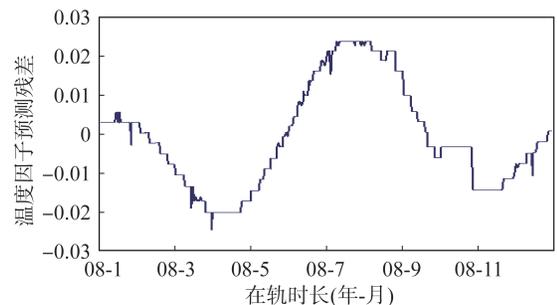


图 10 温度修正因子预测残差

Fig.10 Prediction residual of the temperature correction factor

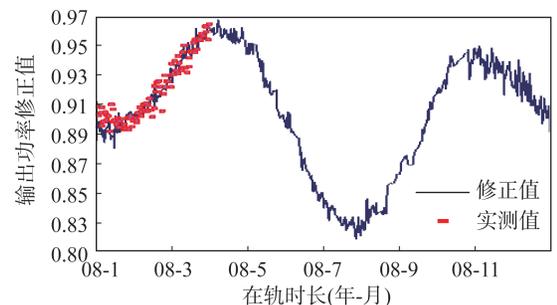


图 11 输出功率预测曲线

Fig.11 Prediction curve of the output power

误差如图 12 所示,可见实际预测误差保持在 $\pm 25$  W 内,可以满足在轨管理使用需求。

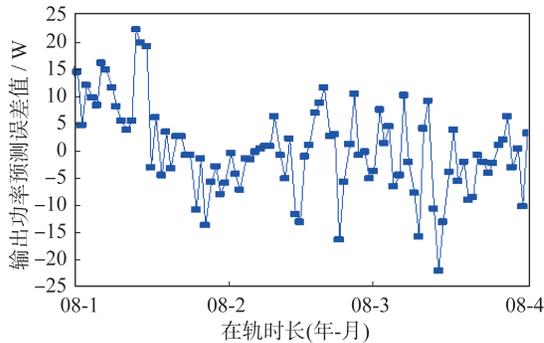


图 12 输出功率预测误差曲线

Fig.12 Prediction error curve of the output power

#### 4 结束语

本文以某地球同步卫星使用的 BSR 硅太阳能电池阵为研究对象,通过修正太阳能电池阵输出功率计算结果,采用 LOWESS 分析了其在全设计寿命期间的功率变化规律,并据此建立统计预测模型,用于硅太阳能电池阵超寿运行期间的性能预测。后续我们将继续使用在轨实测数据对预测结果进行检验,同时针对单结砷化镓、三结砷化镓以及混合布片的地球同步卫星太阳能电池阵在轨输出性能衰减规律展开研究。

#### 参考文献

[ 1 ] 薛梅,刘汉英,邹世纯,等.单结砷化镓太阳能电池阵遥测数据分析[J].电源技术,2013,37(3):393-394,397.  
[ 2 ] 高剑锋,铁琳,蒋钦琳,等.FY-2C 卫星太阳能电池在轨性能分析[J].测试与分析,2010,34(11):1186-1188.

[ 3 ] 刘震,杜红.地球静止轨道卫星硅太阳能电池在轨性能分析[J].航天器工程,2011,20(3):68-70.  
[ 4 ] 尹兴月,林君毅,王晟.MEO 卫星太阳能电池阵在轨功率分析[J].电源技术,2013,37(6):1007-1009.  
[ 5 ] 黄才勇,钱成喜,蒋钦琳,等.FY-2C 星电源分系统及其在轨性能[J].上海航天,2005(增刊1):48-54.  
[ 6 ] 彭梅,王巍巍,吴静,等.太阳同步卫星太阳能电池阵衰减因子分析[J].航天器工程,2011,20(5),61-67.  
[ 7 ] 李建成,任登高,兰宝军.带有太阳能电池阵的卫星电源分系统在轨测试方法[J].飞行器测控学报,2007,26(1):38-41.  
[ 8 ] 左子瑾,金迪,田华东.GEO 卫星太阳能电池阵输出电流拟合算法研究[J].航天器工程,2017,26(2):84-90.  
[ 9 ] 张岩,魏强,邢杰,等.GEO 轨道卫星单结砷化镓电池阵在轨衰减特性分析[J].太阳能学报,2015,36(3):546-550.  
[ 10 ] 何盼,孔陈杰,张强,等.IGSO 卫星三结砷化镓太阳能电池阵在轨特性分析[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集——S08 测试评估技术.2018:182-186.  
[ 11 ] 李强,李会锋,李少强,等.晨昏轨道卫星三结砷化镓太阳能电池阵功率衰减估计[J].空间电子技术,2019,16(1):89-96.  
[ 12 ] 谭维焯,胡金刚.航天器系统工程[M].北京:中国科学技术出版社,2009:216-217.  
[ 13 ] 约翰·福克斯,非参数回归:平滑散点图[M].上海:格致出版社,2015:1-2.  
[ 14 ] WILLIAM S C. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots [J]. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74(368): 829-836.  
[ 15 ] 苏理云,梁昌海,李凤兰,等.基于 LOWESS 的函数系数自回归模型(FAR)优化及应用[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(3):228-239.