

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.1.212

中图分类号: TM92

文献标志码: A

应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估方法

杨 东(中国电源学会会员), 刘治钢(中国电源学会会员), 穆 浩
(北京空间飞行器总体设计部供配电技术研究室, 北京 100094)

摘要: 为了准确获取航天器电源系统在轨健康状态, 提出了基于模糊理论的卫星电源系统状态量化评估模型。首先, 通过分析某卫星电源系统的运行特点, 建立了系统状态评估指标体系; 结合实际遥测具有的时变特性, 提出电源系统遥测预处理方法和无量纲劣化度函数; 其次, 引入变权理论和模糊理论, 建立了层层递进的卫星电源系统状态量化评估方法; 最后, 通过该卫星实际在轨和仿真数据, 并与传统方法进行了比较, 验证了所提状态量化评估方法的正确性和有效性, 且所提出的方法比仅依据阈值判断提前2天评估出系统状态恶化。

关键词: 卫星; 电源系统; 状态评估; 模糊理论; 层次分析法; 权重

Condition Quantitative Assessment Method for Satellite Electrical Power System with Fuzzy Theory

YANG Dong, *Member, CPSS*, LIU Zhigang, *Member, CPSS*, MU Hao

(Power Supply Technology Research Office, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: To accurately obtain the on-orbit health status of a spacecraft electrical power system, a condition quantitative assessment model for a satellite electrical power system with the fuzzy theory is proposed. First, an index system for evaluating the system condition is established by analyzing the operating characteristics of one satellite electrical power system. Combined with the time-varying characteristics of actual telemetry, the corresponding telemetry pre-processing method for electrical power system and a dimensionless deterioration function are put forward. Then, a hierarchical condition quantitative assessment method for the satellite electrical power system is established through introducing the variable weight theory and fuzzy theory. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed condition quantitative assessment method are verified by analyzing the actual on-orbit and simulation data of the satellite and comparing with the traditional method. Moreover, the deteriorated system condition can be assessed by the proposed method two days earlier only based on thresholds.

Keywords: Satellite; electrical power system; condition assessment; fuzzy theory; analytic hierarchy process; weight

电源系统素有航天器“心脏”之称, 其为整个航天器提供能源, 一旦失效将造成不可挽回的巨大损失, 其安全稳定运行关系着整个航天任务的成败^[1-2]。近30年航天器在轨故障与失效统计分析表明, 约37%的航天器在轨失效是由电气系统相关故障直

接或间接导致的, 因此电源系统在轨状态监视十分重要^[3]。安排设计师进行在轨状态时时监视, 人力成本巨大。健康评估作为继故障诊断之后, 健康管理系统架构中的又一重要环节, 其能通过综合多方面遥测信息对电源系统进行状态评价, 即给出不同程度故障或性能退化对系统运行状态造成的影响大小^[4], 对实现电源系统无人值守的在轨健康管理具有重要意义。

基于知识的专家系统和神经网络的智能算法已逐步应用于火电机组^[5]和大型电力变压器^[6-7]的状态评

收稿日期: 2021-07-04; 修回日期: 2021-10-05, 2021-10-31;

录用日期: 2021-12-07; 网络首发日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51707011)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars under the grant 51707011

7011

估中。基于知识的专家系统利用历史经验和专家知识形成的知识库,通过逻辑推理使得评估过程智能化,但知识库更新、维护较为困难,在一定程度上限制了其实际应用;基于神经网络的智能算法需要大量的训练样本,而大部分卫星在设计上都是独一无二的,且运行状态与所在轨道有关,进一步加剧卫星工作状态的独特性,不能利用已知故障卫星数据对其他卫星状态进行划分,这对卫星的量化评估带来了难度。国内外针对卫星系统级健康鉴定评估进行了一些研究。文献[8-9]对卫星健康状态进行了概念研究,指出健康状态依赖于遥测数据,并且应该将复杂系统的健康状态分层进行研究,但内容尚未涉及具体的健康评估方法;文献[10]研究了单个遥测参数的综合效果,还不能上升到评估系统级健康监测的高度;文献[11]从理论上研究了卫星系统的健康评估,但尚未涉及底层遥测参数的转化、权重的适应性调整以及评估结果的有效验证;文献[12]提出了卫星姿态控制系统的评估模型,并利用仿真数据验证了模型的正确性;文献[13]针对载人卫星,利用层次分析法建立了健康管理评估方法。实际上电源系统状态会随着卫星实际在轨运行环境的改变而改变,具有大范围时变特性,上述方法并未利用实际卫星遥测来验证模型的正确性,有效性还有待进一步验证。因此,有必要结合实际在轨遥测数据的特点,研究建立适合在轨卫星电源系统的状态量化评估模型。

基于此,本文提出了应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估模型。首先,针对某低轨卫星电源系统实际结构和遥测参数,建立了系统状态评估指标体系;其次,通过引入变权理论和模糊理论,基于电源系统划分的层级,提出了“层层递进”的应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估模型;最后,应用本文提出的状态评估模型对该卫星实际在轨遥测和仿真数据进行计算,以验证模型的准确性和有效性。

1 卫星电源系统状态评估指标分析

1.1 评估指标体系

本文从如图 1 所示的某低轨电源系统的组成

出发构建起如图 2 所示的基于层次型的运行状态评估指标体系。

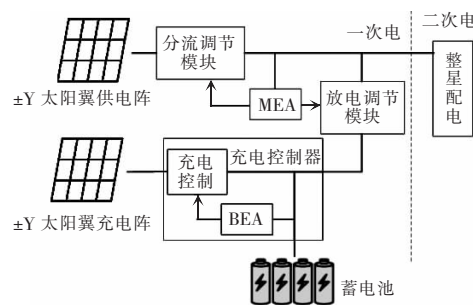


图 1 某低轨卫星电源系统结构

Fig. 1 Structure of electrical power system of one low-orbit satellite

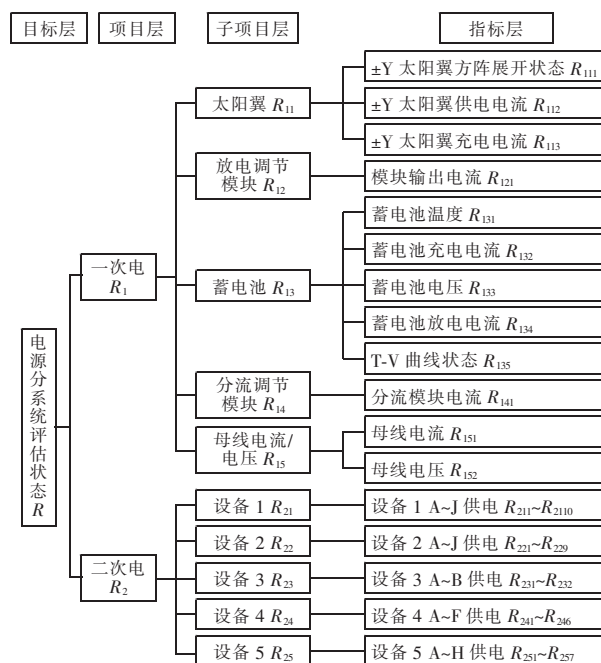


图 2 状态评估指标体系

Fig. 2 Condition assessment index system

图 1 中,MEA 为主误差放大器 (main error amplifier),其信号控制分流调节模块和放电调节模块等工作状态;BEA 为蓄电池误差放大器 (battery error amplifier),其信号对蓄电池充电状态进行控制。图 2 中,目标层卫星电源系统综合状态 R 可分解成项目层中的 2 个评判项目 $R=\{R_1, R_2\}$, 然后再继续分解,把各项目分解为下一级子项目,子项目可分解为最后一级的指标,如没有子项目层则直接把项目分解到指标。例如,该卫星电源系统一次电指标 R_1 可以分为 $R_1=\{R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15}\}$, R_{11} 又可以分

为3个指标:±Y 太阳翼方阵展开状态 R_{111} 、太阳翼供电电流 R_{112} 和太阳翼充电电流 R_{113} 。充电控制器为蓄电池服务,蓄电池充电电流 R_{132} 能够间接反映其工作状态,在卫星设计时并未专门为其配置其他的遥测,因此在如图2所示的状态评估指标体系中没有专门为其设置指标。 $R_{21} \sim R_{25}$ 为某载荷设备1~5,其对应指标层为载荷设备供电的二次配电电压遥测。

1.2 评估指标量化

卫星电源系统的健康状态仅能借助于遥测信息评估得出。而卫星电源系统与一般的稳定、非时变的电力变压器、发电机等电气设备不同,其在绕地球运行过程中遥测具有时变的特点,具体如下。

(1)电源系统存在部分遥测与轨道周期有关,呈现周期性特点,其在阴影区和阳照区状态并不一致,需要对周期性遥测和非周期遥测分开进行处理。此外,负载用电情况还受任务约束。

(2)在遥测下传过程中环境的干扰,会造成的遥测异常跳点(即野值),它容易引起虚警和误报现象的发生,必须加以剔除。

(3)太阳能电池阵受太阳入射角、地球反照、星体遮挡、温度交变、性能衰减、季节等因素影响,其在轨遥测数据正常值波动较大。

1.2.1 遥测预处理

基于此,并考虑到若仅利用某时刻的遥测信息会导致特征信息不准确,不利于做出客观的评估,本文将求取固定时间段 T 内的遥测均值作为量化评估模型的输入(本文涉及的低轨卫星轨道周期为90 min,将固定时间段 T 设为1 d),以尽量避免任务如短时间太阳翼动作引起的电源系统状态改变,减少电源系统状态评估的影响。本文针对周期性遥测和非周期性遥测数据分开处理。周期性遥测预处理方法为:①去除周期性遥测数据中的野值^[14];②利用太阳辐射强度遥测获取卫星进出阴影区和光照区时间,并基于时间获得相应周期性遥测在阴影区和光照区的数据,并分别求得固定时间段 T 内的平均值。非周期性遥测预处理具体为:去除周期性遥测数据中的野值^[14],并求取遥测在固定时间段 T 内的平均值。

1.2.2 指标量化

电源系统的遥测量纲并不统一,本文采用无量纲化的“劣化度”来表征各遥测当前状态与平常状态相比的劣化程度,其取值大小范围为[0,1],即越接近0,指标状态越好;越接近1,指标状态越差。此外,电源系统各指标均为中间型(即越接近允许值,其劣化度越低),因此本文采用“倒梯形”劣化度计算公式,即

$$g(x) = \begin{cases} 1 & x < \alpha_1 \\ \frac{\alpha_2(1-a)-x}{\alpha_2(1-a)-\alpha_1} & \alpha_1 \leq x \leq \alpha_2(1-a) \\ 0 & \alpha_2(1-a) \leq x \leq \alpha_2(1+a) \\ \frac{x-\alpha_2(1+a)}{\beta_2-\alpha_2(1+a)} & \alpha_2(1+a) \leq x \leq \beta_2 \\ 1 & x > \beta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为经过预处理后的遥测数据; $g(x)$ 为评判指标的劣化度; α_1, β_2 分别为指标的上、下限值阈值,可查询设计文件获得;由于电源系统中尤其是太阳能电池受轨道、遮挡、性能衰减和季节等影响明显,其平常状态波动明显应为一个区间,因此本文将各指标的期望状态设定为 $[\alpha_2(1-a), \alpha_2(1+a)]$,本文根据一年内地球轨道接收光照的实际情况将期望中间值 α_2 取为发射第1年5月中旬的均值。对于受轨道、季节、性能下降等因素影响显著的遥测(包括 $R_{112}, R_{113}, R_{121}, R_{131} \sim R_{134}, R_{141}$),根据实际运行状态,将 a 设为0.6;不受影响的遥测(包括 $R_{111}, R_{135}, R_{151} \sim R_{152}$ 和所有的二次电遥测), a 设为0。

卫星存在+Y侧和-Y侧两太阳翼,由于降额冗余设计,当一侧出现故障,另外一侧也能提供足够的能量,两太阳翼可视为互为热备份,可等效为并联模型^[15],其综合劣化度计算公式为

$$g(x) = 1 - g_{+Y}(x)g_{-Y}(x) \quad (2)$$

若某单机设备仅在阴影区或光照区工作,则仅取该设备在工作区间的遥测数据来计算劣化度。若某单机设备在阴影区和光照区均工作,该设备在两区间可等效为串联模型^[15],其综合劣化度计算为

$$g(x) = (1 - g_{\text{光照}}(x)) \times (1 - g_{\text{阴影}}(x)) \quad (3)$$

2 状态量化评估方法

2.1 权重系数

2.1.1 基于层次分析法建立常权值

卫星电源系统状态评估尚处在研究的起步阶段,获取大量有明确评估结论的样本存在很大困难,需要借助专家经验来确定权重。但专家经验难免存在主观性,其确定的权值可能扭曲客观实际。因此,本文先通过调查问卷获取专家对各指标重要性的打分,再利用层次分析法^[16]来确定该低轨卫星各层次的常权值,通过其严格的逻辑性对权重进行“滤波”,剔除主观因素。层次分析方法流程如图 3 所示,简单来说^[17]:相互比较评估指标之间的重要性以构造判断矩阵 P ;求出最大特征根和其所对应的特征向量,其中特征向量经过归一化即为权重分配;同时需利用最大特征向量根对判断矩阵 P 进行一致性检验,验证权重分配的合理性。

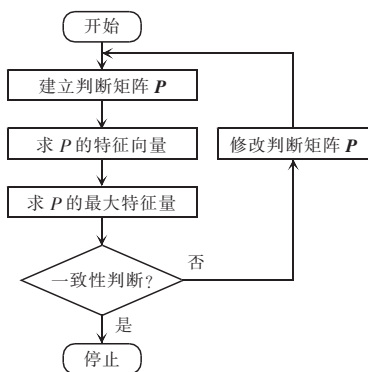


图 3 层次分析法流程

Fig. 3 Flow chart of analytic hierarchy process

本文基于各指标重要性并利用层次分析法获得的评估指标的常权值,如表 1 所示。

2.1.2 变权值确定

常权值并不会随着指标值的变化而改变,当某个指标值出现异常时往往对评估结果的影响并不是很大,但这个异常可能会导致系统出现严重劣化,而变权值使得指标权重可以随着指标值劣化而重新计算,当某个指标值相对于其他指标值而言明显偏大时,其变权值则会较之前明显增大,这使得最终的评估值也会较之前变大,更加符合

实际情况。基于此,为了保证综合评价指标的均衡性,本文采用均衡函数^[15]对各级的常权值进行变权处理,即

$$A_{R_{ijk}} = A_{R_{ijk}}^{(0)} (1 - g_{R_{ijk}})^{\delta-1} / \sum_{s=1}^d A_{R_{ijs}}^{(0)} (1 - g_{R_{ijs}})^{\delta-1} \quad (4)$$

$$A_{R_{ij}} = A_{R_{ij}}^{(0)} (1 - g_{R_{ij}})^{\delta-1} / \sum_{s=1}^f A_{R_{is}}^{(0)} (1 - g_{R_{is}})^{\delta-1} \quad (5)$$

$$A_{R_i} = A_{R_i}^{(0)} (1 - g_{R_i})^{\delta-1} / \sum_{s=1}^p A_{R_s}^{(0)} (1 - g_{R_s})^{\delta-1} \quad (6)$$

式中: $A_{R_{ijk}}^{(0)}$ 和 $A_{R_{ijk}}$ 分别为第 i 个项目中第 j 子项目的第 k 个指标对应的常权值和变权值; $A_{R_{ij}}^{(0)}$ 和 $A_{R_{ij}}$ 分别为第 i 个项目中第 j 子项目对应的常权值和变权值; $A_{R_i}^{(0)}$ 和 A_{R_i} 分别为第 i 个项目对应的常权值和变权值; δ 为变权系数,本文取 $\delta=-1$; d 为子项目层包括的评判指标个数; f 为项目层包含的子项目层个数; p 为项目层个数; $g_{R_{ijk}}$ 为评判指标 R_{ijk} 的劣化度; $g_{R_{is}}$ 和 g_{R_s} 为项目层和子项目层分别评估出来的劣化度。

表 1 评估指标的常权值

Tab. 1 Constant weight values of assessment indices

项目层 A_R 指标	子项目层 $A_{R_{ij}}$ 权值	指标层 $A_{R_{ijk}}$ 权值
R_1	R_{11}	0.257 2
	R_{12}	0.102 9
	R_{13}	0.257 2
	R_{14}	0.104 9
	R_{15}	0.277 8
R_2	R_{21}	0.250 0
	R_{22}	0.250 0
	R_{23}	0.250 0
	R_{24}	0.125 0
	R_{25}	0.125 0
	R_{26}	0.167, 0.167, ..., 0.167
	R_{27}	0.1, 0.1, ..., 0.1
	R_{28}	0.11, 0.11, ..., 0.11
	R_{29}	0.5, 0.5
	R_{210}	0.14, 0.14, ..., 0.14

2.2 模糊隶属函数和评判矩阵

本文将卫星电源系统运行状态划分为 4 种情况:“良好”、“一般”、“注意”、“严重”,评语集为: $L=\{\text{良好, 一般, 注意, 严重}\}=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ^[18]。为了得到劣化度与隶属度在不同运行状态下的模拟隶属关系,本文采用如图 4 所示的地面电网设备状态评估常用的模糊隶属函数分布^[18]。

设:用某子项目下第 i 个指标 u_i 对卫星电源系

统进行评估,评语集中状态 v_i 的隶属度为 r_{ij} (j 是子项目层的项目数, $j=1,2,3,4$), 则可用隶属度集 $V_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}\}$ 表示指标 u_i 评估的结果。于是,该子项目下的所有指标就构成了其评判矩阵。通过对指标层的评判可以得到上一层(子项目层)的评判矩阵 $V_{j \times 4}$, 对子项目层所有项目的评判结果又构成了项目层的评判矩阵。同理,最后可得到所有项目层的评判矩阵 $V_{k \times 4}$ (k 是项目层的项目数), 如太阳翼 R_{11} 的评判矩阵表示为

$$V_{R_{11}} = \begin{bmatrix} V_{R_{111}} \\ V_{R_{112}} \\ V_{R_{113}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} \quad (7)$$

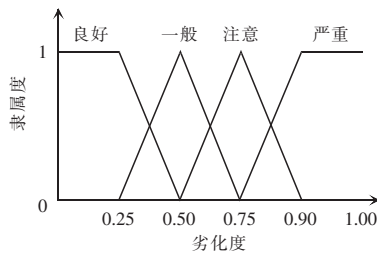


图 4 隶属函数分布

Fig. 4 Distribution of membership function

结合变权值系数和各层间的评判矩阵,各层间的模糊评判计算公式为

$$B = \sum AV \quad (8)$$

式中: A 为权值; V 为评判矩阵; B 为评判结果。

2.3 状态评估流程

模糊综合评判的基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评估事物相关的各个因素,将各项指标统一量化,并根据不同指标对评判对象的影响程度来分配权重,从而对各评判对象作出合理的综合评估。本文基于电源系统划分的 3 个层级,提出了“层层递进”的模糊综合评判流程如图 5 所示,具体步骤如下。

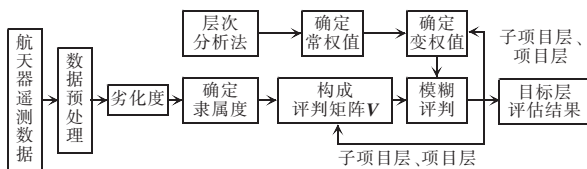


图 5 评估方法流程

Fig. 5 Flow chart of assessment method

步骤 1 评估指标量化。

对在轨遥测数据进行预处理(如 1.2.1 节所示),以祛除任务、轨道和野值等影响;再利用式(1)~式(3)计算各指标劣化度 g ,以避免太阳入射角、地球反照、星体遮挡、温度交变、性能衰降、季节等因素对电源系统评估的影响。

步骤 2 子项目层模糊评判。

利用如图 3 所示隶属函数分布确定指标层的隶属度,以构造出子项目层评判矩阵 $V_{\text{子项目层}}$;利用式(4)计算得到子项目层变权系数矩阵 $A_{\text{子项目层}}$;在得到子项目层评估矩阵和变权系数后,利用式(8)计算构造出项目层的评判矩阵 $V_{\text{项目层}}$ 。

步骤 3 项目层模糊评判。

利用式(5)得到项目层变权系数 $A_{\text{项目层}}$,并结合项目层的评判矩阵的 $V_{\text{项目层}}$ 模糊评判得到目标层的评判矩阵 $V_{\text{目标层}}$ 。

步骤 4 目标层模糊评判。

利用式(6)计算出目标层变权系数 $A_{\text{目标层}}$,并结合目标层的评判矩阵的 $V_{\text{目标层}}$,模糊综合评判得到电源系统状态 B_R 的评估矩阵。

将 B_R 中最大值所在列数 i_{\max} ,相应状态矩阵 $l = \{\text{良好, 一般, 注意, 严重}\}$ 对应的列作为系统的评估结果。

3 实例分析

其卫星电源系统在 2015 年 10 月期间发生 -Y 侧太阳电池阵电路故障,导致该侧太阳翼无输出,但由于还存在互为备份的 +Y 太阳翼,航天器仍能处于能量平衡状态,专家将卫星电源系统判定为“注意”状态。

为了验证本文提出的卫星电源系统运行状态评估方法的有效性和准确性,对该卫星电源系统 10 月 20 日运行处于“注意”状态前后的真实在轨数据和蓄电池组故障仿真数据进行处理阐述,并利用本文提出的变权评估方法和传统基于常权的模糊评估方法,对系统劣化过程的遥测数据进行处理对比分析。

3.1 真实在轨数据分析

3.1.1 模型应用

步骤 1 评估指标量化。

利用本文提出的遥测预处理方法对 2015 年 10 月 20 日处于“注意”状态时的卫星电源系统遥测进行处理,得到如表 2 所示“x”列的计算结果。在此基

础上,利用式(1)~式(3)得到各指标劣化度 g 。

步骤 2 子项目层模糊评判。

利用各指标劣化度 g 并结合图 4 所示的隶属函数分布,获得各子项目的评估矩阵 $V_{\text{子项目层}}$,同时利用式(4)计算得到子项目层相应变权值系数矩阵 $A_{\text{子项目层}}$,继而利用式(8)计算得到子项目层的评判矩阵。

表 2 某卫星电源系统相关参数和遥测预处理结果

Tab. 2 Related parameters of one satellite electrical power system and telemetry pre-processing results

周期性遥测									
遥测(光照区)	α_2	x	α_1	β_2	遥测(阴影区)	α_2	x	α_1	β_2
+Y $R_{112}(A)$	22.24	22.57	0	30	+Y $R_{112}(A)$	0	0	0	30
-Y $R_{112}(A)$	22.54	1.10	0	30	-Y $R_{112}(A)$	0	0.46	0	30
+Y $R_{113}(A)$	13.47	7.22	0	16	+Y $R_{113}(A)$	0	0	0	16
-Y $R_{113}(A)$	13.56	5.77	0	16	-Y $R_{113}(A)$	0	0	0	16
$R_{121}(A)$	0	0	0	50	$R_{121}(A)$	18.75	13.64	0	50
$R_{132}(A)$	7.35	4.76	0	11	$R_{132}(A)$	0	0	0	11
$R_{133}(V)$	52.30	52.26	40	60	$R_{133}(V)$	48.79	48.72	40	60
$R_{134}(A)$	0	0.07	0	25	$R_{134}(A)$	7.315	5.68	0	25
$R_{141}(A)$	7.37	1.38	0	5	$R_{141}(A)$	0	0	0	5
$R_{151}(A)$	20.00	16.18	0	43	$R_{151}(A)$	19.93	14.85	0	43
$R_{152}(V)$	29.09	28.95	27.6	29.6	$R_{152}(V)$	28.54	28.64	27.6	29.6
非周期性遥测									
遥测	α_2	x	α_1	β_2	遥测	α_2	x	α_1	β_2
$R_{211}(V)$	12.17	12.17	11.79	12.51	$R_{231}(V)$	12.33	12.33	11.93	12.67
$R_{212}(V)$	12.16	12.17	11.79	12.51	$R_{232}(V)$	-12.31	-12.32	-12.67	-11.93
$R_{213}(V)$	20.12	20.14	19.55	20.75	$R_{241}(V)$	15.10	15.09	14.62	15.52
$R_{214}(V)$	27.11	27.13	26.34	27.96	$R_{242}(V)$	18.25	18.50	17.97	19.09
$R_{215}(V)$	35.13	35.18	34.10	36.20	$R_{243}(V)$	5.40	5.40	5.24	5.56
$R_{216}(V)$	5.80	5.80	5.63	5.97	$R_{244}(V)$	7.50	7.59	7.40	7.86
$R_{217}(V)$	5.80	5.80	5.63	5.97	$R_{245}(V)$	-15.06	-15.04	-15.48	-14.58
$R_{218}(V)$	5.80	5.80	5.63	5.97	$R_{246}(V)$	-5.38	-5.43	-5.56	-5.24
$R_{219}(V)$	-12.18	-12.18	-12.51	-11.79	$R_{251}(V)$	15.52	15.53	15.08	16.02
$R_{2110}(V)$	-12.18	-12.18	-12.51	-11.79	$R_{252}(V)$	20.36	20.51	19.93	21.17
$R_{221}(V)$	15.32	15.31	14.84	15.76	$R_{253}(V)$	5.60	5.63	5.34	5.67
$R_{222}(V)$	15.32	15.34	14.84	15.76	$R_{254}(V)$	8.71	8.80	8.54	9.06
$R_{223}(V)$	30.53	30.58	29.59	31.42	$R_{255}(V)$	-15.54	-15.56	-16.00	-15.06
$R_{224}(V)$	5.02	5.02	4.85	5.15	$R_{256}(V)$	-5.55	-5.57	-5.69	-5.35
$R_{225}(V)$	5.51	5.53	5.34	5.67	$R_{257}(V)$	-5.59	-5.62	-5.74	-5.40
$R_{226}(V)$	5.51	5.52	5.34	5.67	+Y $R_{111}(V)$	2.484	2.479	2.47	2.52
$R_{227}(V)$	9.03	9.03	8.73	9.27	-Y $R_{111}(V)$	2.50	1.716	2.47	2.52
$R_{228}(V)$	-15.35	-15.36	-15.76	-14.84	R_{135}	1.87	1.87	1.4	2.00
$R_{229}(V)$	-15.31	-15.34	-15.76	-14.84	$R_{131}(^{\circ}C)$	3.11	1.63	-5.00	15.00

注:+Y 和-Y 分别代表+Y 侧太阳翼和-Y 侧太阳翼

$$V_{R_1} = \begin{bmatrix} B_{R_{11}} \\ B_{R_{12}} \\ B_{R_{13}} \\ B_{R_{14}} \\ B_{R_{15}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001\ 2 & 0.490\ 3 & 0.508\ 5 & 0 \\ 0.908\ 2 & 0.091\ 8 & 0 & 0 \\ 0.993\ 9 & 0.006\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.537\ 9 & 0.462\ 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{R_2} = \begin{bmatrix} B_{R_{21}} \\ B_{R_{22}} \\ B_{R_{23}} \\ B_{R_{24}} \\ B_{R_{25}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.658\ 9 & 0.341\ 1 & 0 & 0 \\ 0.570\ 0 & 0.430\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤 3 项目层模糊综合评判

由式(5)计算得到项目层的变权值系数矩阵 $A_{\text{项目层}}$, 并结合步骤 2 得到的子项目层评判矩阵, 计算得到项目层模糊评估评判矩阵, 即

$$V_R = \begin{bmatrix} A_{R_1} \times V_{R_1} \\ A_{R_2} \times V_{R_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.002\ 8 & 0.463\ 9 & 0.509\ 2 & 0.024\ 1 \\ 0.574\ 2 & 0.425\ 8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤 4 目标层模糊综合评判

由式(6)计算得到目标层的变权值系数矩阵 $A_{\text{目标层}}$, 并结合步骤 3 得到的项目层评判矩阵, 计算得到最终的评估结果 $B_R = A_R V_R = [0.003\ 3\ 0.463\ 9\ 0.509\ 0\ 0.024\ 1]$ 。

由于 $\max(B_R) = 0.509\ 0$ 属于 BR 的第 3 列, 则此时的卫星电源系统总体上处于“注意”状态, 与实际状态吻合。

3.1.2 方法对比

反映-Y 侧太阳能电池阵工作状态的遥测包括该侧的: 太阳翼方阵展开状态 R_{111} 、太阳翼供电电流 R_{112} 、太阳翼供电电流 R_{112} 和分流模块电流 R_{141} , 这些故障前后遥测数据经过预处理得到如表 3 所示的结果。

从表 3 可以看出, 遥测 R_{111} 、 R_{112} 、 R_{113} 和 R_{141} 在 13 号时已出现下降, 至 15 号及以后可观察到明显

的下降, 但这些遥测在 13 号时下降幅度不多且仍在允许范围内(相关遥测阈值参见表 2), 难以简单通过遥测的预处理结果来提前判断出异常。其中, 最能反映太阳能电池阵性能劣化的遥测: -Y 侧供电阵电流 R_{112} , 其在故障前后的变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, 10 月 15 号以前 -Y 侧太阳翼供电阵平均输出电流稳定, 至 15 号开始电流才出现明显下降, 从图中难以依据 15 号前的原始数据提前判读出异常。总而言之, 依靠单一遥测阈值难以准确获取卫星运行状态劣化程度。

表 3 -Y 侧太阳能电池阵相关遥测预处理结果

(2021 年 10 月)

Tab. 3 Related telemetry pre-processing results of -Y wing solar array (October 2021)

遥测	α_2	12 号	13 号	15 号	17 号	19 号	20 号
-Y R_{111} (V)	2.50	2.50	2.49	2.49	2.20	1.96	1.72
-Y R_{112} (A)	22.54	22.25	21.40	16.18	6.26	2.27	1.10
-Y R_{113} (A)	13.56	13.07	12.05	9.09	6.56	5.81	5.77
R_{141} (A)	7.37	7.16	6.59	4.51	3.49	2.12	1.38

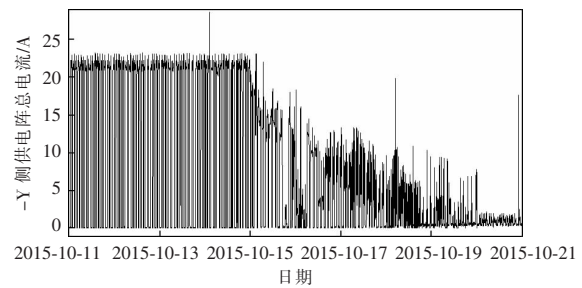


图 6 -Y 侧太阳翼供电阵电流变化曲线

Fig. 6 Curve of current of -Y wing supply array versus time

采用本文提出的变权评估方法对该卫星在故障前后的遥测数据进行了分析, 评估结果如表 4 所示。从中可以看出, 应用模糊理论的状态量化评估方法得到的卫星运行状态自发射初期(2012 年 05 月)至发射 3 年后(2015 年 10 月 11 日), 电源系统一直处于“良好”状态; 但自 2015-10-13 开始恶化, 状态开始处于“一般”。较仅依据遥测阈值提前两天发现异常, 这是因为本文提出的方法能够综合多方面遥测数据, 能更有效、更准确地评估出卫星运行状态。若能及早发现问题并及时处理, 可能避免电源

系统状态的恶化。此外,还可看出自 2015-10-13 开始,电源系统状态属于“一般”的隶属度在逐渐增大,并最终在 2015-10-20 恶化至“注意”状态,这表明-Y 侧供电阵太阳翼故障是一个缓慢过程,本文提出的方法能够准确提取出电源系统状态劣化过程。

采用传统基于常权的模糊评估方法对该卫星在故障前后的遥测数据进行了分析,评估结果如表4

所示。从中可以看出,评估得到的卫星电力系统状态均处于“良好”状态,与事实不符。这是因为传统基于常权的模糊评估方法无法客观反映个别评判指标偏离正常情况对系统状态的影响,使得评价结果与实际情况有很大的偏差。因此,本文提出的变权评估方法能够更有效地评估卫星电源系统的运行状态。

表 4 真实在轨数据评估结果

Tab. 4 Assessment result of actual in-orbit data

日期	变权值评估结果	评价	常权值评估结果	评价
2012-05-10	[1 0 0 0]	良好	[1 0 0 0]	良好
2015-10-11	[1 0 0 0]	良好	[1 0 0 0]	良好
2015-10-12	[0.868 3 .131 7 0 0]	良好	[0.966 5 0.033 5 0 0]	良好
2015-10-13	[0.355 1 0.358 7 0.286 1 0]	一般	[0.928 4 0.039 9 0.031 7 0]	良好
2015-10-15	[0.175 5 0.688 4 0.136 2 0]	一般	[0.868 3 0.118 2 0.013 5 0]	良好
2015-10-17	[0.078 8 0.762 9 0.156 6 0.001 7]	一般	[0.779 2 0.202 9 0.017 7 0.000 2]	良好
2015-10-19	[0.046 3 0.670 2 0.283 5 0]	一般	[0.802 0 0.169 7 0.028 3 0]	良好
2015-10-20	[0.003 3 0.463 9 0.509 0 0.024 1]	注意	[0.825 4 0.127 4 0.047 2 0]	良好

3.2 卫星仿真数据分析

该卫星蓄电池组采用 36 节单体电池串联而成,当单体电路发生开路故障时,能够通过保护电路将故障电池短路,以让正常单体电池继续工作。为了保证系统的可靠性,蓄电池容量设计时保留有约 10%的裕度,≤4 节单体发生开路故障

时,不会影响航天器在轨预期寿命。

本文通过设定不同数量的单体电池开路失效,仿真获取了蓄电池故障下卫星电源系统的运行数据,并利用本文提出的变权评估方法和传统基于常权的模糊评估方法对故障仿真数据进行处理,得到如表 5 所示的评估结果。

表 5 仿真数据评估结果

Tab. 5 Assessment result of simulation data

单体电池失效数量	变权值评估结果	评价	常权值评估结果	评价
2	[0.899 1 0.100 9 0 0]	良好	[0.975 0 0.025 0 0 0]	良好
4	[0.400 4 0.068 8 0.530 8 0]	注意	[0.957 1 0.004 7 0.038 2 0]	良好
5	[0.218 6 0 0.338 3 0.443 1]	严重	[0.957 1 0 0.018 3 0.024 5]	良好

当发生 2 节单体故障时,此时蓄电池仍有近 5%的裕度,系统状态应为“良好”。但当发生 4 节单体故障时,容量裕度耗尽,系统应为“注意”状态;当单体开路故障数继续增加时,将对电源系统造成严重影响,此时应为“严重”状态。从变权评估结果可以看出,评价结果与实际相符。但常权评价结果均为“良好”,与事实不符。因此,本文提出的基于变权的模糊综合评判模型更能够准确地提取出电源系统的健康状态。

4 结论

本文通过分析卫星电源系统的运行特点,建立了卫星电源系统运行状态评估的指标体系;通过引入变权理论和劣化度指标,基于电源系统划分的 3 个层级提出了“层层递进”的卫星电源系统运行状态模糊综合评判模型。利用该模型对某卫星在轨和仿真数据进行分析评估,得出如下结论。

(1)针对只有遥测参数可供分析的在轨卫星电源健康评估问题,引入无量纲化的劣化度函数和层次分析法,使得状态评估算法能够动态适应卫星在轨状态的变化,并减弱了评估的主观性。

(2)与仅依据遥测阈值判断卫星运行状态和传统基于常权的模糊评估方法相比,提出基于变权的模糊综合评估方法具有更高的灵敏度,能够综合多方面遥测信息,更早和更准确地评估出卫星运行状态。

本文提出的应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估方法在每个步骤上力求通用,可扩展到如 S3R、MPPT 等其他类型的卫星电源系统的状态量化评估中。

参考文献:

- [1] 陈琦, 刘治钢, 张晓峰, 等. 航天器电源技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
Chen Qi, Liu Zhigang, Zhang Xiaofeng, et al. Spacecraft power system technologies [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018 (in Chinese).
- [2] 韦伟军, 黄萌, 孙建军, 等. 一种 Buck 变换器大信号非线性模型[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 62-68.
Wei Lijun, Huang Meng, Sun Jianjun, et al. A nonlinear large signal model of buck converter [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1): 62-68 (in Chinese).
- [3] 冯伟泉, 韩国经. 卫星电源系统电弧短路故障及其防护[J]. 卫星工程, 2013, 22(2): 65-70.
Feng Weiquan, Han Guojing. The arc short circuit fault of satellite power system and its protection [J]. Satellite engineering, 2013, 22(2): 65-70(in Chinese).
- [4] Kang Xu, Pi Dechang. A data-driven method of health monitoring for spacecraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(2): 435-451.
- [5] 赵磊, 成永红, 陈小林, 等. 用 RBFNN 评估发电机主绝缘剩余击穿电压[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 151-154.
Zhao Lei, Cheng Yonghong, Chen Xiaolin, et al. Evaluation on residual breakdown voltage of generator insulation by RBFNN [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 151-154 (in Chinese).
- [6] Tang W H, Spurgeon K, Wu Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [7] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于物元模型的电力变压器故障的可拓诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 45-49.
Huang Wentao, Zhao Xuezheng, Wang Weijie, et al. Extension diagnosis method of power transformer fault based on matter-element model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 45-49 (in Chinese).
- [8] Aaseng G B, Hine A P, Galan C G.A review of system health state determination methods [C]// Proceeding of the 1st Space Exploration Conference.Orlando, Florida, USA, 2005: 1-13.
- [9] Yang Tianshe, Yang Ping, Dong Xiaoshe, et al. Method to diagnose fault status and to verify up-link data of satellite [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(8): 1057-1058, 1061
- [10] Liu Fan, Li Ming, Li Yi, et al. Study of spacecraft fault symptom recognizing mechanism [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(6): 1-5.
- [11] Fan Gaojie, Zhou Jun, Liu Yingying. A health state evaluation for satellite control system based on state value calculating [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 39-42, 45.
- [12] Li Xin, Liu Yingying, Li Ganhua, et al. Assessment of satellite health state based on fuzzy variable weight theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 476-480.
- [13] Xu Jiuping, Xu Lei. Integrated system health management-based condition assessment for manned spacecraft avionics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2013, 27(1): 9-32.
- [14] 孙永帅, 王少云. 基于莱特准则和小波变换的遥测数据处理方法[J]. 电子设计工程, 2016, 24(20): 82-84.
Sun Yongshuai, Wang Shaoyun. The processing method of telemetry data based on lets criterion and wavelet transform [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(20): 82-84 (in Chinese).
- [15] 朱昶文, 党建成, 张明良, 等. 基于逻辑框图的卫星健康评估方法[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 272-278.

Zhu Changwen, Dang Jiancheng, Zhang Mingliang, et al. Satellite health assessment method based on logic block diagram [J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(2): 272-278 (in Chinese).

[16] Li H, Hu Y G, Yang C, et al. An improved fuzzy synthetic condition assessment of a wind turbine generator system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1): 468-476.

[17] Qian Z, Yan Zewu. Fuzzy synthetic method for life assessment of power transformer [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2004, 151(3): 175-180.

[18] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 103-109.

Li Hui, Hu Yaogang, Tang Xianhu, et al. Method for On-

line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 103-109 (in Chinese).



杨东

作者简介:

杨东(1989-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,工程师。研究方向:卫星电源总体设计。E-mail:htyangdong@126.com。

刘治钢(1981-),男,中国电源学会会员,博士,研究员。研究方向:卫星电源总体设计。E-mail:545535055@qq.com。

穆浩(1987-),男,博士,工程师。研究方向:卫星电源总体设计。E-mail:xuanxie163@163.com。

关于论文《基于自适应滑模观测器的新型快速锁相环设计》的 撤稿声明

本刊收到举报称已发表的论文《基于自适应滑模观测器的新型快速锁相环设计》(《电源学报》,2021,19(5):143-149. DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2021.5.143)涉嫌学术不端行为。

经调查,确认该论文的主要内容来自于论文“Fast Estimation of Phase and Frequency for Single-Phase Grid Signal, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 6408-6411, 2019”的翻译,认定该文属于不当署名和整体剽窃抄袭他人学术成果的学术不端行为,明确主要责任人是第一作者李海(中山职业技术学院机电工程学院)。根据《<电源学报>预防与处理学术不端行为办法》,对此论文处理如下:

1. 在本刊纸质版和网站上刊发该文正式撤稿的公告声明。
 2. 通知合作数据库删除其网络版,终止传播。
 3. 通知作者退回《录用通知》和期刊,并书面声明已撤销此文被用于如基金项目结项、学位或职称资格认证等情况。
 4. 通知作者本刊5年之内不再接受他们投稿。
 5. 本刊保留进一步处理的权利。
- 特此声明。

《电源学报》编辑部

2024年1月5日