

基于逻辑框图的卫星健康评估方法

朱昶文, 党建成, 张明良, 张发家, 庄建昆

(上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对目前无法准确量化反映在轨卫星健康状态的问题, 提出一种基于卫星部件逻辑连接关系的健康状态分层评估模型, 用任务健康度和任务风险度定量表示卫星状态; 在部件层, 选取关键遥测参数指标, 通过统计历史健康数据及查阅设计资料建立部件级非线性无量纲评估模型; 在组件层, 通过各部件的逻辑连接关系分别建立评估模型; 在分系统层, 利用组件层得到的结果及各组件的逻辑连接关系, 结合模糊层次分析 (fuzzy analytic hierarchy process, FAHP) 和变权理论, 建立分系统健康状态评估模型; 最后, 通过某卫星正常运行时期和异常运行时期的在轨遥测数据验证, 结果表明, 该评估模型具有正确性。

关键词: 卫星健康状态评估; 非线性无量纲评估模型; 模糊层次分析法; 变权理论

Satellite Health Assessment Method Based on Logic Block Diagram

Zhu Changwen, Dang Jianchen, Zhang Mingliang, Zhang Fajia, Zhuang Jiankun

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the current inability to accurately quantify the health status of on-orbit satellites, A health state hierarchical evaluation model based on the logical connection relationship of satellite components is proposed. Using task health and mission risk to quantitative representation of satellite status. At the element level, establish a component level nonlinear dimensionless evaluation model by statistical historical health data and reviewing design data. At the component level, establish an evaluation model by logical connection of each element. At the subsystem level, using the results of component layer and the logical connection relationship of each component, combined with fuzzy analytic hierarchy process and variable weight theory to establish health assessment model for subsystem. At last, verification of on-orbit telemetry data through the normal data and abnormal data, The results show that the evaluation model is correct.

Keywords: satellite health assessment; nonlinear dimensionless evaluation model; fuzzy analytic hierarchy process; variable weight theory

0 引言

随着航天事业的不断发展, 航天活动的频率快速提高, 在轨航天器的数量逐年大幅增长, 现有的卫星监测系统很难满足在轨监控任务需求, 因此航天器在轨健康管理技术越来越受重视。

自从 NASA 把故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 技术运用在航天器在轨安全保障中后^[1-3]。国内的学者们也相继针对航天器健康评估提出了不同的模型。文献 [4] 采用层次分析法, 实现各故障模式对航天器系统、分系统、单机设备影响权重的量化和分析, 并提出航天器健康评估体系分级构建思想。文献 [5] 提出一种基于投影寻踪的航天器健康评估方法, 该方法构建模型简便且便于维护。文献 [6] 提出利用贝叶斯网络评估某卫星的动量轮在轨健康状态, 并通过仿真验证该方法的有效性。文献 [7] 提出的基于模糊变权原理的健康评估方法, 通过卫星全寿命中实时改变各组件的权重, 更客观

的反映卫星在轨健康情况。文献 [8] 提出的基于可重构度的卫星评估方法, 考虑了卫星系统的高冗余, 可重构特性, 使评估结果更加准确。

本文基于卫星分系统的组成逻辑关系 (串联、并联、表决) 建立评估模型, 旨在从卫星能分系统能否完成既定任务的角度, 和卫星分系统单机冗余, 备份的角度评估卫星分系统在轨的健康状况。

1 评估模型总体设计思路

卫星分系统一般是由几个单机共同配合完成分系统的任务, 单机内又由几个部件完成各自的任务, 各部件的工作状态通过遥测数据的变化来反映。建立部件层、组件层、分系统层分层评估模型。在部件层通过选取的关键遥测参数在评估期间的变换曲线与历史正常时期的曲线之间的距离构建非线性模糊无量纲模型进行评估; 在组件层通过组件内部各部件的连接逻辑, 构建评估模型, 从组件完成既定任务的能力和完成既定任务所承担的风险两种维度进行评估, 分别定义为组件的任务健康度和任务风险度; 在分系统层通过各组件的连接逻辑, 构建评估模型, 从分系统完成既定任务的能力和完成既定任务所承担的风险累积两种维度进行评估, 分别定义为分系统的任务健康度和任务风险度, 其中任务健康度范围在 $[0, 1]$ 之间, 越大越好;

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-08-30。

作者简介: 朱昶文(1993-), 男, 江苏溧阳人, 硕士研究生, 主要从事航天器在轨故障预测与评估方向的研究。

通讯作者: 党建成(1975-), 男, 陕西商周人, 硕士生导师, 研究员, 主要从事卫星测试技术方向的研究。

任务风险度范围在 $[0, 1]$ 之间, 越小越好。

2 部件层评估

部件的评估主要通过选取能反映卫星状态的模拟量遥测参数与历史正常时期的变化情况建立评估模型来确定。

2.1 遥测参数的变化类型

一般选取的遥测参数为电压类或温度类, 根据各遥测参数的历史变化情况, 大致可以分为以下 4 类变化形式:

- 1) 范围内稳定变化: 此类遥测的特点是变化平稳, 在一个小范围里面波动。
- 2) 周期型变化: 此类遥测的特点是变化具有周期性, 且每个周期基本上相同。
- 3) 季节型变化: 此类遥测的特点是天与天之间遥测变化不大, 但要全年来看具有明显的季节性。
- 4) 周期型与季节型组合: 此类遥测的特点是短期具有周期性, 长期又具有季节性。

2.2 部件评估模型

对卫星上天初期正常工作时的遥测数据进行统计或通过设计文件查询得到遥测数据的期望值, 定为 X_a , 则某遥测评估指标的在轨实测量 X_i 与期望的偏差为 $x_i = |X_i - X_a|$, 当 x_i 较小时, 说明器件的性能良好, 当 x_i 较大时, 说明器件的性能变差。一般电子设备的故障率变化是两端高, 中间低, 像浴盆一样, 称为“浴盆曲线”, 如图 1 所示。

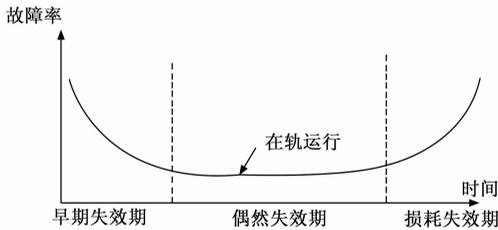


图 1 浴盆曲线

模仿电子器件的“浴盆曲线”来定义如何评价指标的“健康度”。利用历史正常运行的遥测数据与期望值作绝对值差, 进行统计得到开始损耗的偏差 x_b (具体根据遥测的类型决定取统计的分位值), 发生异常的偏差 x_{ai} (一般取统计的 0.95 分位值), 及失效的偏差 x_{di} (一般通过设计文件查询得到)。根据“浴盆曲线”的变化特性, 本文选用非线性模糊无量纲模型^[7,9]来反映指标的变化情况。当偏差在 x_{bi} 内, 指标“健康度”为 1; 当在 x_{bi} 外, 指标偏差较小时, “健康度”变化较为平缓, 指标偏差较大时, “健康度”变化逐渐加快, 所采用的模型如图 2 所示。

非线性无量纲模型为:

$$H_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x \leq x_{bi} \\ \frac{x_{di} - x}{x_{di} - x_{bi}} \cdot e^{(1 - \frac{x - x_{bi}}{x_{di} - x_{bi}}) \cdot b}, & x_{bi} < x \leq x_{di} \\ 0, & x > x_{di} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $H_i(x_i)$ 为非线性无量纲模型处理的数值, b 为形状调节参数, 根据每个遥测的 x_{ai} 值来确定 b 的大小, 当 $b = 0$ 时, 无量纲模型退化为线性模型。

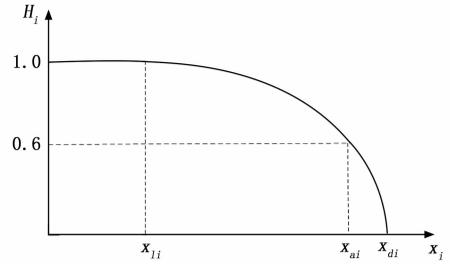


图 2 无量纲模型函数

综合各部件的遥测参数指标, 可得到部件 h_u 的模型为:

$$h_u = \frac{\sum_{i=1}^k z_i}{k} \quad (2)$$

其中: z_i 为指标的无量纲转换, k 为指标个数。

3 组件层及分系统层评估

3.1 组件层评估

组件层是由部件按照一定的逻辑关系组合而成, 而各部件相对上一层又有相对重要和相对不重要之分, 故需研究如何合理的赋予各部件权重和各部件的逻辑连接关系。

3.1.1 模糊层次分析法

模糊层次分析法确定权重系数^[10]时, 需要先分析组件的层次结构及健康状态的评估指标, 利用专家知识两两比较各指标相对于上层的相对性大小, 以相对性大小作为矩阵元素确定为判断矩阵。步骤如下:

第 1 步: 按照 0.1~0.9 九级标度法, 将模糊矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 的各因素 a_1, a_2, \dots, a_n 互比较判断, 得到模糊互补判

断矩阵 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{1n} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{nn} \end{bmatrix}$ 。

标度定义说明: 0.9 指两风险因素相比, 一个比一个极端重要; 0.8 指两风险因素相比, 一个比一个强烈重要; 0.7 指两风险因素相比, 一个比一个明显重要; 0.6 指两风险因素相比, 一个比一个稍微重要; 0.5 指两风险因素相比, 同样重要;

第 2 步: 对矩阵 A 按行求和 $r_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, i = 1, 2, \dots, n$, 并通过 $r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2(n-1)} + 0.5$ 得到模糊一致性矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

第 3 步: 求模糊一致性矩阵自身以外每行元素的和 $l_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} - 0.5, i = 1, 2, \dots, n$; 再求不含对角线元素的总和 $\sum_i l_i = n(n-1)/2$; 最后归一化处理即得各指标权重 $\omega_i = 2l_i / [n(n-1)]$ 。

第 4 步: 一致性检验, 设 A, B 为模糊互补矩阵, 则称 $CI(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - b_{ij}|$ 为 A, B 的相容性指标, 称

$CI(A,W) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - \omega_{ij}|$ 为 A 的一致性指标, 若 $CI(A,W) \leq \alpha$, 一般取 $\alpha \leq 0.1$, 则称 A 具有一致性。

3.1.2 变权理论

由以上可以得到各个权重指标的权重值, 但都是定值。实际上当卫星某一部件的健康状态不断下降, 此时对于整个系统的重要程度也会随着变大, 若用以前的权重值会导致因为权重低而反应健康状态变化不明显的问题。因此需要根据卫星部组件的健康状态的变化而权重也相应的变化。

本节使用文献 [11] 中提到的变权方法, 首先需要明确状态因素向量 x_i 。定义当健康状态处于 $(0.7, 1]$ 时状态因素向量为 0, 当健康状态处于 $(0.6, 0.7]$ 时状态因素向量为 1, 当健康状态处于 $(0.4, 0.6]$ 时状态因素向量为 2, 当健康状态处于 $(0, 0.4]$ 时健康状态为 3。令状态变权函数为:

$$S_i(x_i) = e^{\alpha \cdot x_i} \quad (3)$$

其中: α 为均衡系数, α 越小各指标权重变化也越小, 当 $\alpha = 0$ 时就退化为常权。变权公式为:

$$W(x_i) = \frac{w_i \cdot S_i(x_i)}{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot S_i(x_i))} \quad (4)$$

3.1.3 部件逻辑关系及其评估模型

卫星组件内部的各部件主要以串联、并联 (冷备份、热备份)、表决等逻辑组合而成。

1) 串联:

组件的功能需要所有部件完成其功能, 工作逻辑如图 3 所示。



图 3 串联工作逻辑

定义由非线性模糊无量纲模型得到各部件的健康度为 $h_{ui}, i = 1, 2, \dots, m$, 各部件的权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。组件的任务健康度 h_m 为:

$$h_m = \prod_{i=1}^m h_{ui} \quad (5)$$

组件的任务风险度为:

$$r_m = 1 - \left((1 - r(0)_m) \cdot \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot h_{ui} \right) \quad (6)$$

其中: $r(0)_m$ 为评估前该组件风险情况, 一般默认为 0。

2) 并联:

热备份: 所有部件均在工作, 只需一个及以上的部件正常, 整个组件就能正常工作, 工作逻辑如图 4 所示。

定义由非线性模糊无量纲模型得到各部件的健康度为 $h_{ui}, i = 1, 2, \dots, m$ 。各部件的权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。组件的任务健康度 h_m 为:

$$h_m = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - h_{ui}) \quad (7)$$

组件的任务风险度为:

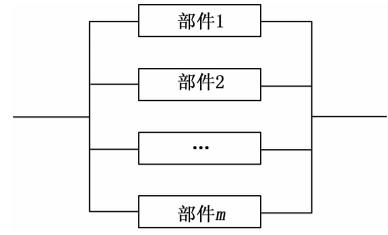


图 4 热备份工作逻辑

$$r_m = 1 - \left((1 - r(0)_m) \cdot \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (1 - h_{ui})} - e}{1 - e} \right) \right)$$

其中: $r(0)_m$ 为评估前该组件风险情况, 一般默认为 0。

冷备份: 只有一个部件在工作, 其余的关机备份, 当工作的部件故障时, 打开另一个通路, 整个组件依旧能工作, 工作逻辑如图 5 所示。

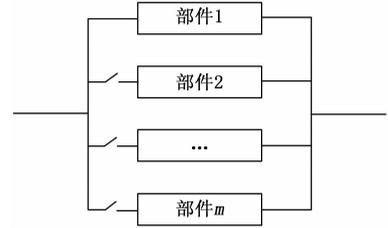


图 5 冷备份工作逻辑

定义由非线性模糊无量纲模型得到各部件的健康度为 $h_{ui}, i = 1, 2, \dots, m$ 。各部件的权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。组件的任务健康度 h_m 为:

$$h_m = h_{ui} + \sum_{j=2}^m \left(\left(\prod_{i=1}^{j-1} (1 - \Delta_i) \right) \times h_{uj} \right) \quad (9)$$

其中: Δ_i 为是否工作的遥测参数, 一般部件工作 Δ_i 为 1, 不工作 Δ_i 为 0, 若不是该类型通过相关公式转化为这种类型。

组件的任务风险度为:

$$r_m = 1 - \left((1 - r(0)_m) \cdot \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (1 - h_{ui})} - e}{1 - e} \right) \right) \quad (10)$$

其中: $r(0)_m$ 为评估前该组件风险情况, 一般默认为 0。备份部件的健康度默认为 1。

3) 表决:

表决系统为一部件中, 只允许其中 k 个无法工作, 其余均正常才能工作。工作逻辑如图 6 所示。

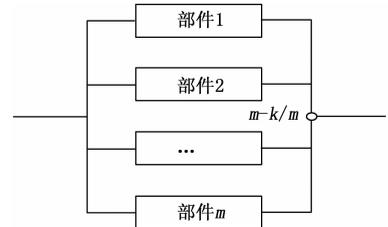


图 6 表决工作逻辑

定义由非线性模糊无量纲模型得到各部件的健康度为 $h_{ui}, i = 1, 2, \dots, m$ 。各部件的权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。组件的任务健康度 h_m 为:

任务健康度 h_m 为:

$$h_m = \min\left(\sum_{i=1}^{c_m^{m-k}} \left(\prod_{i=1}^{m-k} h_{m_i}^{w_i}\right)\right) \quad (11)$$

其中: $\sum_{i=1}^{c_m^{m-k}}$ 为在 m 个部件中任选取 $m-k$ 个部件的所有组合。

组件的任务风险度为:

$$r_m = 1 - \min\left(\sum_{i=1}^{c_m^{k+1}} \sum_{i=1}^{k+1} \omega_i \cdot h_{m_i}\right) \quad (12)$$

其中: $\sum_{i=1}^{c_m^{k+1}}$ 为在 m 个部件中任选取 $k+1$ 个部件的所有组合。

3.2 分系统层评估

分系统层由各组件按照一定的逻辑关系连接共同完成分系统任务, 一般是通过串联和并联的组合。

3.2.1 串联

该分系统由不同组件串联组合而成, 前一个顺利完成是后一个开始的前提, 若其中一个组件故障, 会导致整个分系统也无法工作, 逻辑图如图 7 所示。



图 7 串联工作逻辑

各组件的健康度 h_m 和风险度 r_m 通过 3.1.3 节方法得到, 假设共有 n 个组件, 权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, n$, 通过 3.1.1 节方法得到, 则分系统的任务健康度 H_s 为:

$$H_s = \prod_{i=1}^n h_{m_i}^{w_i} \quad (13)$$

分系统的任务风险度 R_s 为:

$$R_s = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot r_{m_i} \quad (14)$$

3.2.2 串联与并联的组合

该分系统由不同组件串联与并联混合成, 串联的工作特性与串联组合一致, 并联只需其中 1 路正常就能工作, 工作逻辑图如图 8 所示。

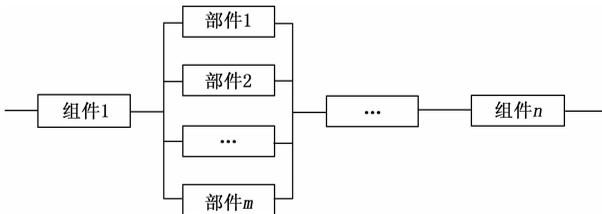


图 8 混合工作逻辑

各组件的健康度 h_m 和风险度 r_m 通过 3.1.3 节方法得到, 假设共有 n 个组件, 权重为 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, n$, 通过 3.1.1 节方法得到, 则分系统的任务健康度 H_s 为:

热备份:

$$H_s = h_{m_1}^{w_1} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - h_{m_i})\right)^{w_2} \cdot \prod_{i=3}^n h_{m_i}^{w_i} \quad (15)$$

冷备份:

$$H_s = h_{m_1}^{w_1} \cdot \left(h_{m_2} + \sum_{j=2}^m \left(\prod_{i=1}^{j-1} (1 - \Delta_i)\right) \times h_{m_j}\right)^{w_2} \cdot \prod_{i=3}^n h_{m_i}^{w_i} \quad (16)$$

其中: Δ_i 为是否工作的遥测参数, 一般部件工作 Δ_i 为 1, 不工作 Δ_i 为 0, 若不是该类型通过相关公式转化为这种类型。

分系统的任务风险度为:

$$R_s = \omega_1 \cdot r_{m_1} + \omega_2 \cdot \left(1 - \left(1 - r(0)_m\right) \cdot \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (1 - h_{m_i})} - e}{1 - e}\right)\right) + \sum_{i=3}^n \omega_i \cdot r_{m_i} \quad (17)$$

其中: $r(0)_m$ 为评估前该组件风险情况, 一般默认为 0。

4 实验结果与分析

卫星的电池和太阳电池阵是为整个卫星的各个飞行阶段的用电负载提供能源的, 在整个卫星中具有很重要的位置。为了验证本章提出的分系统评估模型的正确性, 在 MATLAB 软件上分别进行某卫星电源分系统分系统正常运行时的评估实验, 某卫星电源分系统异常运行时的实验对比以证明其正确性。数据来源于航天八院卫星运行监测中心的某系列卫星 03、04 星在轨遥测数据。某卫星电源分系统的分层结构如图 9 所示。

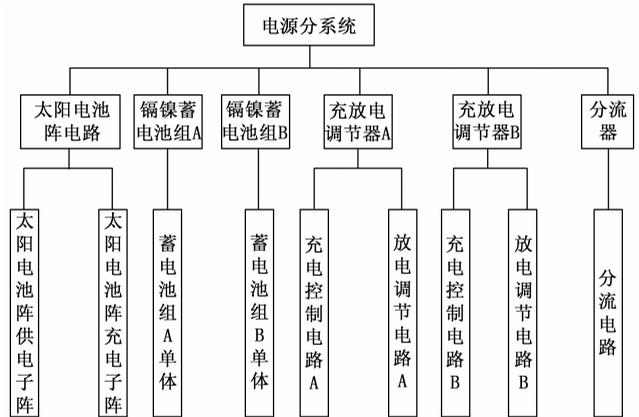


图 9 电源分系统分层结构

4.1 评估模型

4.1.1 遥测参数指标模板

统计该卫星在轨正常运行时期的遥测数据, 及查阅该卫星的详细设计资料后并建立比对模板, 建立非线性无量纲模型对各部件进行评估。由于篇幅有限, 仅展示各遥测参数指标主份的比对模板曲线。

建立了模板后, 待评估数据 (按天评估) 与模板的位置匹配后, 计算与模板的距离, 利用式 (1) 和式 (2) 评估部件的“健康度”。

4.1.2 系统逻辑框图

电源分系统主要由太阳电池阵电路、蓄电池组 (A/B)、充放电调节器 (A/B)、分流器等单机组成, 其内部各部件的逻辑连接框图如下:

太阳电池阵: 太阳电池阵选用供电阵 A7/B7 电流、充

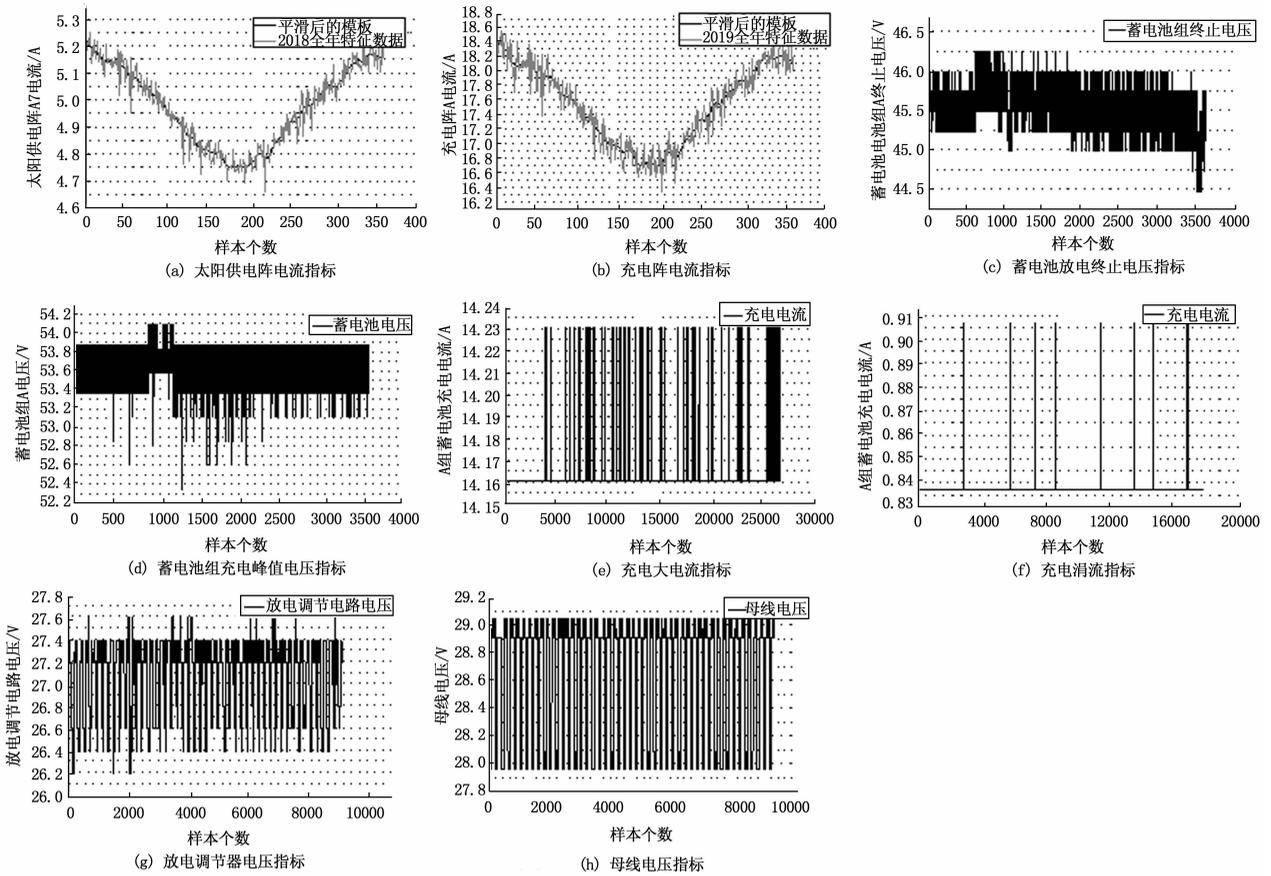


图 10 各指标模板

电阵电流、放电终止电压、放电深度参数指标。逻辑关系如图 11 所示。



图 11 太阳能电池阵逻辑框图

利用式 (5) 和式 (6) 得到太阳能电池阵电路的任务健康度和任务风险度。

蓄电池组: 蓄电池组选用充电终止电压、各单体电压指标, 利用式 (5) 和式 (6) 得到蓄电池组任务健康度和任务风险度。

充放电调节器: 充放电调节器选用充电电流, 放电调节电路电压指标。逻辑关系如图 12 所示。

利用式 (5) ~ (6), 式 (9) ~ (12) 得到充放电调节器的任务健康度和任务风险度。

分流器: 分流器选用母线电压指标, 利用式 (5) 和式 (6) 得到蓄电池组任务健康度和任务风险度。

电源分系统的逻辑关系如图 13 所示。

定义模糊互补判断矩阵为 $\begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 0.6 \\ 0.5 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$, 按照模糊

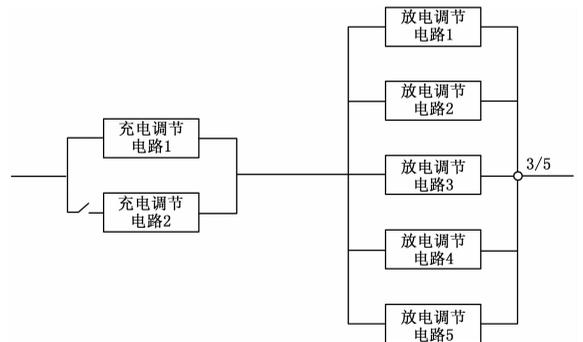


图 12 充放电调节器逻辑框图

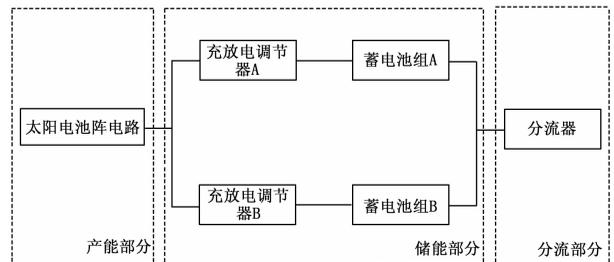


图 13 电源分系统逻辑框图

层次分析法, 得到各部分的权重为 $[0.4, 0.3, 0.4]$ 。根据式 (15) 和式 (17) 得到分系统的任务健康度和任务风险度。

4.2 实验结果与分析

为验证评估模型的正确性, 本文选用某系列 04 卫星 2019

表 1 实验结果

时间	太阳能电池阵电路		蓄电池 A 组电池		蓄电池 B 组电池		充放电调节器 A		充放电调节器 B		分流器		电源分系统	
	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度
1	0.961 6	0.037 9	1	0	0.998 5	0.001 5	0.927 6	0	0.872 8	0.060 0	0.869 0	0.131 0	0.944 9	0.061 7
2	0.953 2	0.046 1	1	0	0.999 2	0.000 8	0.928 2	0	0.875 7	0.000 8	0.873 4	0.126 6	0.944 5	0.063 0
3	0.938 5	0.060 2	1	0	1	0	0.936 9	0	0.878 1	0.058 3	0.875 5	0.124 5	0.941 5	0.065 7
4	0.943 7	0.055 2	1	0	0.997 2	0.002 8	0.9406	0	0.882 2	0.057 0	0.872 1	0.127 9	0.943 9	0.063 0
5	0.930 6	0.067 8	1	0	1	0	0.933 7	0	0.879 9	0.057 8	0.873 4	0.126 6	0.938 8	0.067 4
6	0.948 6	0.050 5	1	0	1	0	0.926 0	0	0.865 4	0.062 2	0.866 4	0.133 6	0.944 6	0.062 3
7	0.945 8	0.053 2	1	0	0.997 3	0.002 7	0.932 7	0	0.882 7	0.056 9	0.876 8	0.123 2	0.941 4	0.053 2
8	0.942 0	0.056 9	1	0	1	0	0.928 1	0	0.873 7	0.059 7	0.865 4	0.134 6	0.943 7	0.063 3
9	0.941 6	0.057 2	1	0	1	0	0.926 9	0	0.872 2	0.060 2	0.865 8	0.134 2	0.939 9	0.067 3
10	0.939 5	0.059 2	1	0	0.999 3	0.000 7	0.929 0	0	0.870 9	0.060 5	0.866 8	0.133 2	0.939 3	0.067 9
11	0.932 2	0.066 2	1	0	1	0	0.932 9	0	0.877 1	0.058 6	0.867 3	0.132 7	0.937 5	0.069 7
12	0.933 5	0.065 0	1	0	1	0	0.934 3	0	0.876 9	0.058 7	0.874 7	0.125 3	0.938 1	0.068 6
13	0.930 4	0.068 0	1	0	0.997 8	0.002 2	0.935 2	0	0.880 0	0.057 7	0.882 8	0.117 2	0.930 4	0.067 2
14	0.937 9	0.060 8	1	0	1	0	0.928 0	0	0.867 1	0.061 7	0.864 4	0.135 6	0.944 4	0.062 5
15	0.936 6	0.062 0	1	0	0.997 5	0.002 5	0.928 6	0	0.873 1	0.059 9	0.873 8	0.126 2	0.938 0	0.069 4
16	0.934 4	0.064 1	1	0	0.999 8	0.000 2	0.924 1	0	0.863 3	0.062 8	0.857 2	0.142 8	0.940 4	0.066 8
17	0.962 6	0.036 9	1	0	0.999 2	0.000 8	0.932 3	0	0.868 2	0.061 3	0.872 8	0.127 2	0.943 3	0.064 4
18	0.928 1	0.070 2	1	0	1	0	0.931 9	0	0.873 6	0.059 7	0.863 3	0.136 7	0.938 2	0.069 1
19	0.937 1	0.061 6	1	0	0.998 7	0.001 3	0.931 7	0	0.871 4	0.001 3	0.874 2	0.125 8	0.937 8	0.069 0
20	0.928 0	0.070 3	1	0	1	0	0.936 2	0	0.881 7	0.057 2	0.878 7	0.121 2	0.938 6	0.068 6
21	0.929 2	0.069 6	1	0	1	0	0.939 9	0	0.880 7	0.057 5	0.873 1	0.126 9	0.940 5	0.066 2
22	0.912 8	0.085 3	1	0	1	0	0.927 2	0	0.880 0	0.057 7	0.875 8	0.124 2	0.933 7	0.072 4
23	0.927 8	0.071 0	1	0	0.9931	0.006 9	0.933 8	0	0.856 5	0.064 7	0.860 2	0.139 8	0.939 1	0.068 0
24	0.910 7	0.087 8	1	0	1	0	0.931 0	0	0.874 8	0.059 3	0.867 6	0.132 4	0.928 7	0.079 1
25	0.906 0	0.092 3	1	0	1	0	0.924 0	0	0.874 8	0.059 3	0.867 6	0.132 4	0.929 8	0.076 9
26	0.906 0	0.092 3	1	0	0.998 9	0.001 1	0.928 0	0	0.867 5	0.061 6	0.871 3	0.128 7	0.929 8	0.076 9
27	0.918 5	0.080 2	0.998 3	0.001 7	0.998 7	0.001 3	0.933 8	0	0.877 2	0.058 6	0.874 2	0.125 8	0.934 7	0.072 8
28	0.918 2	0.080 8	1	0	0.999 4	0.000 6	0.937 5	0	0.878 6	0.058 2	0.883 9	0.116 1	0.935 7	0.071 3

年 6 月 1 号到 6 月 28 号的卫星正常运行期的遥测数据和该系列 03 卫星 2015 年 5 月 20 号到 5 月 30 号的异常运行期的遥测数据进行比对实验。

4.2.1 正常运行期实验结果与分析

电源分系统及各组件的任务健康度和任务风险度如表 1 所示。

从表 1 可以看出，在评估期间卫星电源分系统整体比较健康，任务健康度在 0.925 左右，任务风险度在 0.069 左右，如图 14 所示，但太阳能电池阵电路的健康程度虽然在相对健康的范围，但有下降的趋势，此时应该多加关注，本文评估结果与实际卫星情况相符合。评估期间，各组件的权值均未发生过变化。

4.2.2 异常运行期实验结果与分析

电源分系统及各组件的任务健康度和任务风险度如表 2 所示。

已知该卫星在 5 月 30 日发生了太阳能电池阵线路短路的

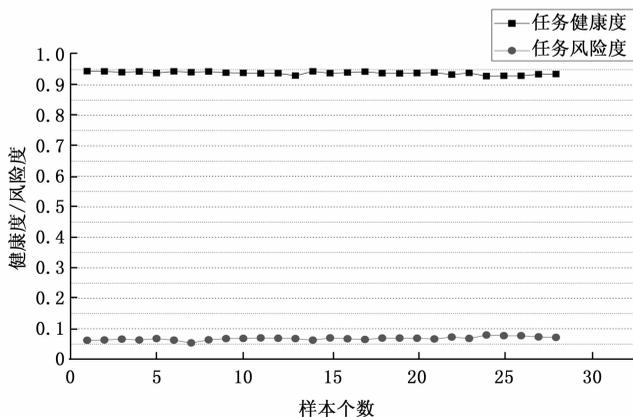


图 14 电源分系统评估结果

质量问题，从表 2 中可以看出，在当天太阳能电池阵电路的任务健康度仅为 0.1929，基本无法正常完成既定任务，任务风险度达到 0.6541，处于较高风险的状态，蓄电池组由于

表 2 实验结果

时间	太阳电池阵电路		蓄电池 A 组电池		蓄电池 B 组电池		充放电调节器 A		充放电调节器 B		分流器		电源分系统	
	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度	任务健康度	任务风险度
20	0.746 5	0.253 5	0.976 1	0.023 9	0.953 2	0.046 8	0.958 2	0	0.880 9	0	0.876 1	0.123 9	0.873 9	0.198 2
21	0.731 5	0.268 5	0.980 2	0.019 8	0.952 5	0.047 5	0.955 8	0	0.888 2	0	0.881 0	0.119 0	0.875 7	0.128 6
22	0.735 5	0.264 5	0.973 4	0.026 6	0.946 8	0.053 2	0.952 4	0	0.881 6	0	0.872 2	0.127 8	0.874 3	0.131 4
23	0.723 7	0.276 1	0.979 4	0.020 6	0.948 9	0.051 1	0.954 3	0	0.881 8	0	0.880 6	0.119 4	0.872 7	0.131 7
24	0.740 2	0.259 8	0.978 5	0.021 5	0.951 7	0.048 3	0.958 0	0	0.871 5	0.057 8	0.872 1	0.127 9	0.870 8	0.142 3
25	0.660 9	0.335 5	0.976 1	0.023 9	0.950 9	0.049 1	0.955 7	0	0.885 9	0	0.874 9	0.125 1	0.768 1	0.224 7
26	0.780 6	0.218 2	0.970 5	0.029 5	0.889 1	0.110 9	0.954 7	0	0.866 0	0.056 9	0.924 7	0.075 3	0.909 7	0.103 2
27	0.677 7	0.320 0	0.922 0	0.078 0	0.868 3	0.131 7	0.956 0	0	0.888 4	0	0.888 1	0.111 9	0.779 8	0.221 0
28	0.670 5	0.327 1	0.976 1	0.023 9	0.883 1	0.116 9	0.954 7	0	0.871 7	0	0.872 0	0.128 0	0.770 6	0.253 8
29	0.670 0	0.327 3	0.970 5	0.029 5	0.924 4	0.075 6	0.953 0	0	0.904 7	0	0.880 0	0.120 0	0.774 7	0.220 2
30	0.192 9	0.654 1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.862 5	0.017 3	0.863 5	0.058 6	0.759 8	0.240 2	0.301 1	0.528 5

电压无法达到正常水平健康度也仅为 0.5, 充电调节器和分流器的健康度也相应的下降, 电源分系统的任务健康度仅为 0.3011, 任务风险度达到 0.5285, 此时由于任务健康度的下降, 权重变化为 [0.6979, 0.2076, 0.0945]。

异常发生前 10 天的太阳电池阵电路的任务健康度和任务风险度变化如图 15 所示。

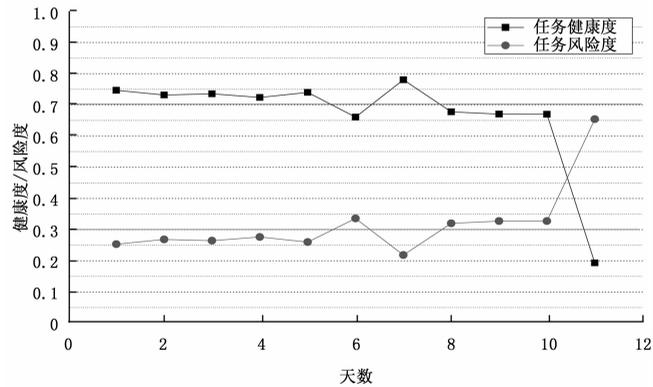


图 15 太阳电池阵电路评估结果

从图中可以看出, 太阳电池阵电路的任务健康度从 25 号突然下降到 0.6609, 权重也变化为 [0.5836, 0.2862, 0.1302]。在 27 号到 29 号稳定在 0.67 左右, 说明在 25 号已经有了故障的征兆, 此时若及时处理, 可能会避免后面的异常发生。

本文通过正常数据和异常数据验证了该方法, 结果表明评估的结果与实际相符合, 具有正确性。

5 结束语

本文以某卫星的电源分系统健康评估为例, 开展了一种基于卫星部组件连接逻辑的评估方法的研究, 以卫星分系统完成任务的能力和完成任务所承担风险累积两种维度进行评估。并利用某卫星正常运行时期和异常时期的在轨实测数据进行对比实验, 实验结果表明, 该方法具有正确性。

此外, 本文方法存在以下几点不足, 需要后续继续进行研究: 1) 在模板构建及统计过程中需耗费大量时间, 故需要研究更加智能、快速的方法; 2) 本文提出的模型需在更多的实测数据上进行验证。

参考文献:

- [1] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: Potential impact on aging aircraft problems [A]. Proceedings of 2002 IEEE Aerospace Conference [C]. BigSky, Montana, USA, 2002; 3021-3026.
- [2] Malin J T, Oliver P J. Making technology ready: Integrated systems health management [R]. Washington D. C: NASA. 2007.
- [3] 吕琛, 马剑, 王自力. PHM 技术国内外发展情况综述 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 1-4.
- [4] 冯文婧, 潘宇倩, 白东炜, 等. 应用层次分析法的航天器健康评估方法 [J]. 航天器工程, 2014 (2): 12-18.
- [5] 刘帆, 刘兵, 王力. 一种基于投影寻踪的航天器健康评估方法 [J]. 飞行器测控学报, 2016, 35 (5): 351-357.
- [6] 厉海涛, 金光, 周忠宝. 基于贝叶斯网络的动量轮可靠性建模与评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (2): 484-490.
- [7] 李鑫, 刘莹莹, 李赣华. 基于模糊变权原理的卫星健康评估方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (3): 476-480.
- [8] 陆峥, 金光, 杨天社, 等. 基于可重构度的在轨卫星多级健康评估方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2018 (8): 1770-1776.
- [9] 朱孔来. 评价指标的非线性无量纲模糊处理方法 [J]. 系统工程, 1996, 14 (6): 58-62.
- [10] 张松昌, 王昶. 基于 FAHP 法的装备研制风险评估 [J]. 军械工程学院学报, 2015, 27 (2): 19-24.
- [11] 李德清, 郝飞龙. 状态变权向量的变权效果 [J]. 系统工程理论与实践, 2009 (6): 127-131.