

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.020

基于故障树的目标航天器在轨故障定位

邢晓辰¹, 蔡远文², 程龙², 孙建³, 李伟³

(1. 解放军装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 解放军装备学院航天装备系, 北京 101416;
3. 解放军装备学院训练部, 北京 101416)

摘要: 针对目标航天器在轨运行时极易发生故障的问题, 采用故障树分析方法对目标航天器实施在轨故障定位研究。介绍故障树的基本概念和故障树分析原理, 给出在轨故障定位故障树的构建和实施步骤, 以某型号卫星电源系统对星上负载的供电故障为例进行验证。结果表明: 该方法是可行的, 为后续在轨故障检测活动的开展奠定基础。

关键词: 目标航天器; 故障检测; 故障定位; 故障树

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

On-Orbit Fault Positioning of Target Spacecraft Based on Fault Tree

Xing Xiaochen¹, Cai Yuanwen², Cheng Long², Sun Jian³, Li Wei³

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*
2. *Department of Spaceflight Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*
3. *Department of Training, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China*)

Abstract: The faults happened frequently when the target spacecraft is on-orbit. To solve this problem, the positioning technology of the target spacecraft's on-orbit fault based in fault tree analytical technique is on research. The basic concept and analytical principle of fault tree are introduced, and the building process of the on-orbit fault tree is presented. The method is verified by an example of the power supply system fault of a certain type satellite. The result show that the method is feasible and the following process of on-orbit fault detection could be implemented.

Key words: target spacecraft; fault detection; fault positioning; fault tree

0 引言

由于受外界太空恶劣环境及自身所携带仪器设备寿命的影响, 目标航天器在轨运行过程中极易发生故障。开展目标航天器在轨故障检测, 能够降低航天任务的初始和后续成本, 提高航天器的寿命和运行可靠性。

基于在轨故障检测专家系统对目标航天器进行故障检测, 首先应进行在轨故障定位分析。通过在轨故障定位, 可避免盲目的故障检测, 有效节约故障检测时间, 提高检测效率, 为后续在轨故障检测活动的开展奠定基础。

1 在轨故障定位方法选择

故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法, 将系统故障的各种原因(包括硬件、环境、人为因素等), 由总体至部分, 按树枝状结构, 自上而下逐层细化。该方法可用来分析系统故障产生的原因, 计算系统各单元的可靠度以及对整个系统的影响, 从而搜寻薄弱环节, 以便制定改进措施。

目前, 故障树分析方法已渗透到各个工业应用领域, 尤其是在航空、航天、核能等应用领域。该方法在可靠性和安全性分析中被公认为是简单、有效和最具有发展前途的分析方法, 其实质是一种敏感性分析。美国在导弹和运载火箭型号的研制中, 规定必须要进行故障树分析。

将故障树分析方法应用于目标航天器的在轨故障定位, 具有如下优势^[1-4]:

1) 故障树将目标航天器在轨运行故障的故障现象和故障原因用逻辑门连接起来, 形成一个有向树图。在故障树的构建过程中即对航天器故障原理详细分析, 并通过逻辑门将其内在相互关系予以反映, 因此它能直观形象地揭示航天器在轨运行故障情况, 且具有严密的逻辑性。

2) 故障树并非是对某次特定故障原因的简单分析, 而是对同类系统或设备历次故障事件资料详细分析、估计的结果。因此, 故障树能够全面概括目标航天器上系统或设备发生故障的各种原因因素, 包括环境、人为、设计、制造、运行、维护等, 是对人、机、管理、环境的综合考虑, 具有很强的

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-05-14

基金项目: 在轨服务新技术探索研究

作者简介: 邢晓辰(1988—), 男, 山东人, 博士研究生, 从事航天测试发射控制理论与技术研究。

系统性。

3) 在对目标航天器进行在轨故障定位时,通过对故障树求最小割集、最小路集,并进行定性分析和定量分析,能够找出导致故障事件发生的所有底事件,以及各个底事件对故障事件的重要度,为后续在轨故障检测的开展奠定基础。

4) 一个完整的故障树即为一套完整的航天器在轨运行故障分析资料,既可作为进行生产工艺、安全教育的辅助教材,又可作为分析人员充分理解目标航天器在轨故障定位系统的工具,有较强的适用性。

5) 故障树分析方法将量的概念引入目标航天器在轨故障定位,能够利用星载计算机进行复杂的计算分析,并能与其他航天器在轨故障检测技术综合应用,从而满足目标航天器快速在轨故障检测的需求。

综上所述,基于故障树分析方法对目标航天器在轨运行故障进行故障源的搜寻,兼顾了基于规则和定量模型检测的优点,为目标航天器等大型复杂系统的在轨故障定位提供了一种有效的途径。因此,选取故障树分析方法,对目标航天器实施在轨故障定位。

2 故障树分析方法

2.1 故障树的基本概念

故障树是描述被检测对象结构、功能和关系的一种定性因果模型。它包含顶事件、中间事件和底事件。用相应的符号代表这些事件,再用适当的逻辑门(与门、或门、异或门等)把这些事件连接成树状图,这种能体现故障传播逻辑关系的倒立的树状图形就称作故障树。故障树的基本概念包括事件、部件、故障的分类、故障树常用事件符号及逻辑门符号。图 1 所示为常用故障树符号示意图。

顶事件	底事件	中间事件	基本事件	省略事件	转入符号	转出符号
与门	或门	转移符号	非门	禁止门	表决门	异或门

图 1 常用故障树符号示意图

故障树的规范和简化不是故障树分析的必要步骤,也不会影响定性分析和定量分析的结果。但对目标航天器这类大型复杂系统而言,其在轨运行故障所构造的故障树应尽可能早地进行规范和简化,

这样可极大减少在后期进行定性分析和定量分析的工作量,提高在轨故障定位效率。

规范后的故障树仅含有基本事件、结果事件、与门及或门。故障树规范的原则^[5]为:顺序与门变换为与门、表决门变换为或门或与门、异或门变换为或门和与门的组合、禁门变换为与门等。

按照布尔代数的运算规则,故障树简化的基本原理主要包含以下公式:

$$\text{加法结合律: } (x_A + x_B) + x_C = x_A + x_B + x_C$$

$$\text{乘法结合律: } (x_A x_B) x_C = x_A x_B x_C$$

$$\text{加法分配律: } x_A x_B + x_A x_C = x_A (x_B + x_C)$$

$$\text{乘法分配律: } (x_A + x_B) \cdot (x_A + x_C) = x_A + x_B x_C$$

$$\text{乘法吸收律: } x_A (x_A + x_B) = x_A$$

$$\text{加法吸收律: } x_A + x_A x_B = x_A$$

$$\text{加法幂等律: } A + A = A$$

$$\text{乘法幂等律: } A \cdot A = A$$

2.2 故障树分析原理

对故障树可进行定性分析和定量分析^[5]:

1) 故障树定性分析。

故障树定性分析,即求出它的所有最小割集或最小路集。

对故障树求最小割集,可以掌握目标航天器上某系统或设备故障发生的各种可能性,并且可直观反映系统整体的危险性。最小割集的阶数越低,即每个割集中所包含的基本事件数目越少,则系统的危险性越高。因为阶数越低,意味只需很少的基本事件发生,即能导致系统故障事件发生。

对故障树求最小路集,可以明确能防止目标航天器上某系统或设备发生故障的所有途径,从而选择控制事故的最佳方案。最小路集反映了系统的整体安全性,只要保证最小路集对应的基本事件不出现,即能防止故障事件的发生。

由于原故障树的最小割集对应该故障树对偶故障树的最小路集,即二者存在一一对应关系,因此笔者只需研究如何求故障树的最小割集。

计算故障树的最小割集,通常采用上行法或下行法。上行法即从故障树最底层开始,利用逻辑与门和或门运算法则,顺次向上,将中间事件用底事件表示,直到顶事件为止,得到割集,简化吸收后得最小割集。下行法即从故障树顶事件开始,由上至下顺次把上一级事件置换为下一级事件,遇到与门将输入事件横向并列写出,遇到或门将输入事件

竖向写出,直到把全部逻辑门都置换成底事件为止,此时最后一列代表所有割集,将之简化吸收得最小割集。

2) 故障树定量分析。

故障树定量分析,即求出各底事件的重要度。底事件重要度表征了各底事件对系统故障产生作用的大小,即各底事件对故障事件的灵敏度。通过对底事件重要度的分析,可以改善系统的设计,明确系统在运行过程中需要重点监控的部位,适用于目标航天器的在轨故障定位。

在对故障树进行定量分析前,一般要作如下假设:一是底事件间相互独立;二是顶事件和底事件只考虑故障和正常2种状态。求出故障树的最小割集后,为防止直接对故障树定量分析会产生组合爆炸问题,对最小割集采取不交化处理。通过不交化方法得到不交和,就可求得顶事件发生概率,即系统不可靠度。

设故障树有 n 个底事件,每个底事件发生概率为 $F_i(1 \leq i \leq n)$,顶事件发生概率为 F_s ,则第 i 个底事件的重要度定义为 $\frac{\partial F_s}{\partial F_i}$ 或 $\frac{\partial R_s}{\partial R_i}$ 。其中, $R_i(1-F)$ 为底事件不发生概率, $R_s(1-F_s)$ 为顶事件不发生概率。

3 基于故障树的在轨故障定位分析

当目标航天器发生在轨运行故障时,通过对所构建故障树的定性和定量分析,明确可能引发航天器故障的故障原因事件以及各原因事件重要度,完成目标航天器在轨故障定位。

3.1 在轨故障定位故障树构建

在轨故障定位故障树的构建,是应用故障树分析法对目标航天器进行在轨故障定位的关键一环。只有建立的故障树全面准确,才能进行正确高效的在轨故障定位。针对目标航天器上某一具体系统或设备,其故障树建立的一般步骤为:

1) 广泛收集和分析目标航天器上某系统或设备在轨运行故障,包括故障现象、故障原因、故障机理、故障后果和采取的解决措施等相关技术资料。

2) 选择顶事件。找出目标航天器上某系统或设备所有可能的故障模式,对每一个故障模式构建故障树,则每一个故障模式即为其所对应故障树的顶事件。

3) 对应每一个故障模式,将引发顶事件的所有直接原因事件,作为第二级事件放置在相应原因事

件符号中,并根据其相互间逻辑关系,用逻辑符号进行连接。

4) 依次逐级向下发展,直至最底一级原因事件无底事件可分为止,则各故障模式所对应的在轨故障定位故障树被建立起来。

5) 对所构建的在轨故障定位故障树进行规范和简化。

3.2 在轨故障定位实施步骤

基于故障树进行在轨故障定位步骤如图2。

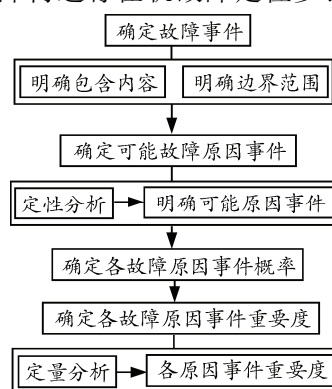


图2 在轨故障定位分析步骤

1) 确定故障事件:明确目标航天器上的待分析设备,以及该设备包含的内容与边界范围。

2) 确定可能的故障原因事件:前文对该设备已构造在轨故障定位故障树,对该故障树进行定性分析,明确可能引发故障事件(即待分析设备故障)的所有故障原因事件。

3) 确定各故障原因事件概率:通过以往的经验数据、实际验证或给出的指标等计算或找寻出各故障原因事件的故障率;或者通过在轨故障检测专家的主观判断,获得没有统计数据故障原因事件等模糊事件的模糊发生概率,可采用各种模糊数或模糊语言值表示。

4) 确定各故障原因事件重要度:对在轨故障定位故障树进行定量分析,得出各故障原因事件对故障事件的重要度,完成航天器在轨故障定位^[6]。

4 案例验证

电源系统是目标航天器的关键部件,该系统出现故障将给整个目标航天器带来灾难性后果。通过对267颗故障卫星发生的2096次故障进行统计发现,电源系统发生故障的概率高达9.5%^[7];因此,以某型号卫星电源系统对星上负载的供电故障为例,对笔者所提出的基于故障树的在轨故障定位方

法进行分析与验证。

某型号卫星电源系统，采用可调节直流母线方案，太阳电池供电阵输出的电流和镉镍蓄电池的放电电流，都分别经过电压调整，稳定在规定的电压范围内，然后并网构成母线电源^[8]。不管卫星轨道状态和负载特性在正常范围内如何变化，电源系统输出都稳定地保持在(28.0±0.6) V。

卫星电源系统根据卫星负载的功率需求和工作方式，太阳电池分成充电阵和供电阵 2 部分。采用这种处理方式，可以按照蓄电池的最高充电电压和母线供电电压，分别设置充电阵和供电阵的输出电压，能够充分利用太阳电池的发电能量，提高电源系统的利用效率。卫星电源系统的工作原理简图如图 3 所示。

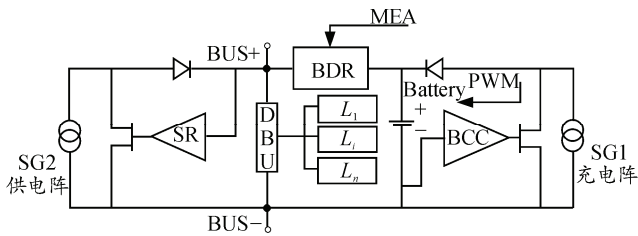


图 3 电源系统工作原理简图

图 3 中，SG₁ 为太阳电池充电阵；SG₂ 为太阳电池供电阵；BDR 为放电调节器；BCC 为充电控制器；MEA 为误差放大器；PWM 为脉宽调制电路；Battery 为蓄电池；SR 为分流器；DBU 为配电箱；L₁、L_i、L_n 为有效载荷。

通过对电源系统工作原理的分析，得出电源系统的母线电源供电故障主要分为 2 种：一种是母线电压过低，小于星上所规定的最小值 27.4 V。电压值过低的原因可分为电源系统内部故障、电源系统外部连接负载出现异常或太阳电池阵和蓄电池供电异常。另一种是母线电压过高，高于星上负载所能承受的最大值 28.6 V。

母线电源的电流信号是卫星电源系统中最重要的技术指标之一，该指标性能的好坏直接决定卫星电源系统的最终性能。以母线电压值过低这一故障为例，通过监测母线电流信号，可对此种故障模式进行判别：母线电流信号值过大，则判定是电源系统外部连接负载出现异常；母线电流信号值正常，则判定为电源系统内部故障。

通过对卫星电源系统工作原理与故障模式的分析和研究，对星上负载供电故障这一事件建立在轨故障定位故障树，如图 4 所示。

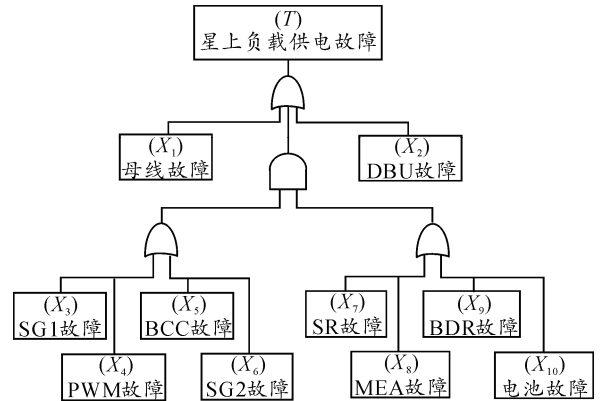


图 4 某卫星负载异常电压输入故障树

下面，对该故障树进行在轨故障定位分析。首先，对故障树进行定性分析，可通过下行法(或上行法)求得该故障树的最小割集为 {X₁}、{X₂}、{X₃, X₇}、{X₃, X₈}、{X₃, X₉}、{X₃, X₁₀}、{X₄, X₇}、{X₄, X₈}、{X₄, X₉}、{X₄, X₁₀}、{X₅, X₇}、{X₅, X₈}、{X₅, X₉}、{X₅, X₁₀}、{X₆, X₇}、{X₆, X₈}、{X₆, X₉}、{X₆, X₁₀}。由其最小割集可以看出，当星上负载出现“供电故障”这一故障模式时，其可能原因事件有 18 种之多，显然给后续故障检测带来极大难度；因此，需要对故障树进行定量分析，先求故障树的不可靠度，进而求得各底事件的概率重要度。通过对故障树的定量分析，明确各原因事件对故障事件重要度的大小，为后续在轨故障检测指明方向。

假设所构建故障树中各个底事件发生的概率(不可靠度)分别为：

$$F_1=F_2=0.15$$

$$F_3=F_4=F_5=F_6=F_7=F_8=F_9=F_{10}=0.12$$

由于故障树最小割集的数目庞大，直接通过最小割集求不可靠度会很复杂。对偶树最小割集对应原故障树最小路集，通过对原故障树最小路集不变化求得系统可靠度。

顶事件的对立事件用 S 表示，则对偶树最小割集(即原故障树最小路集)的表达式为：

$$\begin{aligned} \bar{T} = S &= \overline{X_1 X_2 (X_3 X_4 X_5 X_6 + X_7 X_8 X_9 X_{10})} \\ &= \overline{X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6} + \overline{X_1 X_2 X_7 X_8 X_9 X_{10}} \end{aligned}$$

对其进行不变化得：

$$\begin{aligned} S &= \overline{X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6} + \overline{X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6} \times \\ &\quad \overline{X_1 X_2 X_7 X_8 X_9 X_{10}} = \\ &= \overline{X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6} + (\overline{X_3} + \overline{X_3 X_4} + \overline{X_3 X_4 X_5} + \\ &\quad \overline{X_3 X_4 X_5 X_6}) \overline{X_1 X_2 X_7 X_8 X_9 X_{10}} \end{aligned}$$

顶事件不发生的概率为：

$$P(S)=R_1R_2R_3R_4R_5R_6+(F_3+R_3F_4+R_3R_4F_5+R_3R_4R_5F_6)R_1R_2R_7R_8R_9R_{10}=$$

$$0.85 \times 0.85 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.88 + (0.12 + 0.88 \times 0.12 + 0.88 \times 0.88 \times 0.12 + 0.88 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.12) \times 0.85 \times 0.85 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.88 \times 0.88 \approx 0.606\ 724$$

所以顶事件发生(星上负载供电故障)的概率：

$$P(T)=1-P(S)=1-0.606\ 724=0.393\ 276$$

由于第 i 个底事件的概率重要度为 $\frac{\partial R_s}{\partial R_i}$ ，所以

各底事件的概率重要度分别为：

$$\frac{\partial R_s}{\partial R_1} = \frac{\partial R_s}{\partial R_2} \approx 0.713\ 793$$

$$\frac{\partial R_s}{\partial R_3} = \frac{\partial R_s}{\partial R_4} = \frac{\partial R_s}{\partial R_5} = \frac{\partial R_s}{\partial R_6} = \frac{\partial R_s}{\partial R_7} = \frac{\partial R_s}{\partial R_8} = \frac{\partial R_s}{\partial R_9} = \frac{\partial R_s}{\partial R_{10}} \approx 0.197\ 095\ 4$$

显然，当星上负载发生供电故障时，原因事件 X_1 (母线故障)和 X_2 (DBU 故障)相比于其他原因事件对故障发生的影响最大，其余 8 个原因事件对故障事件具有相等的重要度。

因此，在后续的在轨故障检测中，首先对重要度最大的原因事件(本例中 X_1 和 X_2)进行故障检测，判断其是否确实发生故障。若经验证，这 2 个原因事件对应设备未发生故障，则转入次一级原因事件(本例中其余 8 个事件)对应设备的故障检测，直至

(上接第 70 页)

仿真系统通过 RS232 串行口与地面站通信。仿真传感器通过 RS232 接口输出 GPS 的信息；通过 RS485 接口输出磁航向传感器、高度传感器的信息；通过 8 个 D/A 通道输出垂直陀螺和发动机信息；通过 2 个 A/D 通道采集飞行控制系统执行机构的信息。

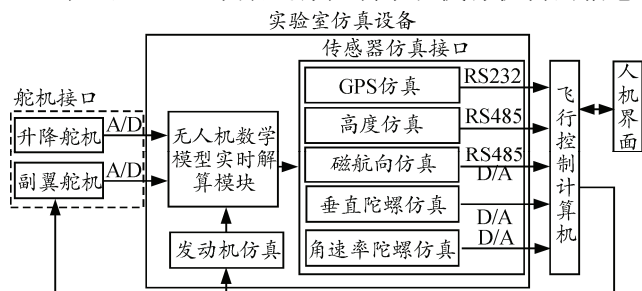


图 3 实验室仿真连接图

无人机实时仿真系统以实物(飞控计算机、执行机构等)接入系统，根据需要验证的功能控制无人机的飞行状态和飞行航迹，仿真计算机实时采集舵面数据，同时实时完成无人机模型解算；飞行状态数据则通过遥测软件显示和记录，并实现事后对飞行

5 结束语

笔者采用故障树分析方法对目标航天器的在轨运行故障进行故障定位研究。分析了采用故障树分析方法进行航天器在轨故障定位的优势，研究了航天器在轨故障定位的具体实施方法，包括在轨故障定位故障树的构建、在轨故障定位分析的步骤。最后，以某型号卫星电源系统对星上负载的供电故障为例，对所提出的在轨故障定位方案进行验证，证明了所提方法的可行性。

参考文献：

[1] 纪常伟, 荣吉利. 基于故障树和 G2 的航天器故障诊断系统开发[J]. 北京理工大学学报, 2002, 11(4): 444-448.

[2] 解仑, 刘帆, 巩潇, 等. 基于混合智能的航天器故障诊断系统[J]. 信息与控制, 2010(1): 106-113.

[3] 张晓洁, 赵海涛. 基于动态故障树的卫星系统可靠性分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1249-1254.

[4] 周佳琦, 王岩, 张勇. 卫星光通信瞄准控制系统的故障树分析[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2009(1): 62-67.

[5] 金星, 洪延姬. 系统可靠性与可用性分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 94-112.

[6] 李岩, 党常平. 空间在轨服务技术进展[J]. 兵工自动化, 2012, 31(5): 79-82.

[7] 阎列, 邓宁丰, 舒承东. 航天系统故障与对策[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.

[8] 何传严. 粗糙集在卫星电源故障诊断中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 29-35.

数据进行分析功能。

4 结束语

笔者通过仿真实验验证了飞控系统设计的可行性和正确性。目前，该系统已通过飞行验证，实现了超低空掠海 20 m 飞行，系统工作正常。仿真系统已被其他型号无人机飞控系统推广使用。

参考文献：

[1] 赵德林, 王社伟, 吴云靖. 基于相对主元分析的飞控系统故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(11): 29.

[2] 樊尚春, 吕俊芳, 等. 航空测试系统[M]. 北京: 北京航空航天大学, 2005: 311-385.

[3] 张健民, 王涛, 王忠礼. 智能控制原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 85-130.

[4] 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术[M]. 北京: 北京航空航天大学, 1998: 45-168.

[5] 胡延霖. 飞控系统技术说明书[S]. 郑州: 防空兵指挥学院, 2010: 88-103.

[6] 李春涛, 胡盛华. 基于动态逆的无人机飞行控制律设计[J]. 兵工自动化, 2012, 31(5): 1-4.