

文章编号:1007-2780(2010)05-0747-05

基于故障树法的空间相机 CCD 成像分系统故障诊断分析

刘旭跃^{1,2}, 胡 君²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: 814979185@qq. com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为提高空间相机 CCD 成像分系统故障诊断的效率, 采用故障树分析法对其故障模式进行分析, 为复杂系统的故障搜寻提供一种有效的途径。在介绍故障树分析法重要性的基础上, 详细地介绍了故障树的定量分析法, 并以空间相机 CCD 成像分系统为研究对象, 从故障树的构建、各中间事件故障树的建立和各子事件故障概率等方面出发, 实现了空间相机 CCD 成像分系统的故障定位。分析结果表明, 使用建立的故障树可以直观形象地指导设计人员摸清系统部件间故障的联系和层次关系, 提高系统维修的效率和可靠性。

关 键 词: 故障树; 故障树分析法; 故障诊断; CCD 成像分系统

中图分类号: TP311.1 **文献标识码:** A

Fault Diagnosis of Space Camera CCD Imaging Subsidiary System Based on Fault Tree Analysis

LIU Xu-yue^{1,2}, HU Jun²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: 814979185@qq. com;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To improve the efficiency of CCD imaging subsidiary system fault diagnosis, the fault tree analysis is adopted to analyse its fault mode, which provides an effective way to find faults in complex system. The importance of FTA is described, the quantitative analysis method of FTA is introduced in detail. Taking CCD imaging subsidiary system of space camera as the research object, on the basis of the forming of fault tree, the establishing of the mean event fault tree and the obtaining of the mean event fault probability, the element hiberarchy fault orientation on CCD imaging subsidiary system of space camera is realized. The analytic results show that using the fault tree guides designer to know clearly the relation and level of components faults in system intuitively, the maintaining efficiency and dependability of system can be improved.

Key words: fault tree; fault tree analysis; fault diagnosis; CCD imaging subsidiary system

1 引 言

空间相机在上天使用前, 必须对其性能进行严格的可靠性评估。CCD 成像系统是空间相机的重要组成部分, 目前对它的安全可靠性分析多运用故障模式影响分析法(FMEA)和故障分析及纠正措施系统(FRACAS)。当要知道系统各不同层次故障之间的功能逻辑关系和关联程度, 希望以最快的速度、最小的代价, 准确、高效地发现并排除系统故障时, 这些方法就不能满足要求。

因此,有必要建立一个适当的数学模型来分析 CCD 成像系统的故障模式。

故障树分析法(FTA)是分析系统可靠性和安全性的一种重要方法。针对以上原因,本文运用 FTA 分析空间相机 CCD 成像分系统的故障模式。在清晰的故障树图形下,可以显示出系统故障内在联系,并反映零部件故障与系统之间的逻辑关系,便于围绕某些特定的故障模式做层层深入分析。

空间相机产品数量少,故障经验数据相对较少。本文主要从空间相机 CCD 成像分系统结构出发,利用它的系统结构层次图,采用故障树分析法,由系统结构层次的初始约定层次向最低约定层次逐层分析。充分利用系统 FMEA 表,由表中的产品或功能标志数据得知故障的部件,将表中的故障原因作为故障树故障名称,结合故障影响中的局部影响、高一层次影响和最终影响建立故障树。建树之后,对故障树进行定性分析,得出故障树的最小割集,有助于了解系统故障的主次因素。最后对故障树定量分析,在搜索系统故障时,可按照最小割集的重要度排序,加快搜索速度。

2 FTA 简介

故障树建造是故障树诊断中最基本、最关键的环节,其建造的好坏,直接关系到运用故障树进行故障分析的成败。它是一种图示方法,反映系统故障间因果关系的工具模型。它从系统最不希望发生的故障顶事件出发,逐步分析其发生原因,获得中间原因(中间事件)和无需再分的基本原因(底事件)。

2.1 建立 FT 的基本规则

故障树的边界应和系统的边界相一致,方能避免遗漏或出现不应有的重复。一个系统的部件及部件之间的联接数目可能很多,但其中有些对于给定的顶事件不重要,为了减小树的规模以突出重点,应在 FME(C)A 的基础上,将那些不重要的部分舍去,从系统图的主要逻辑关系得到等效的简化系统图,然后从简化系统图出发建树。故障事件,尤其是顶事件必须严格定义。为防止遗漏,应从上向下逐级建树。建树时不允许逻辑门-逻辑门直接相连。若某个故障事件是共因事件,则对故障树的不同分支中出现的该事件必须

使用同一事件标号。若该共因事件不是底事件,必须使用相同转移符号简化表示。

2.2 FT 的数学表示

假设所研究的设备及其组成的部件等只取正常和故障两种状态,并假设部件、元件的故障是相互独立的,研究一个由 n 个独立的底事件构成的故障树。

设 X_i 为底事件 i 的状态变量, X_i 仅取 0 或 1 两种状态。 Φ 表示顶事件的状态变量, Φ 也仅取 0 或 1 两种状态。则有如下的定义:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{底事件 } i \text{ 发生(部件、元件故障)} \\ 0 & \text{底事件 } i \text{ 不发生(部件、元件正常)} \end{cases} \\ (i=1,2,3,\cdots n) \\ \Phi = \begin{cases} 1 & \text{顶事件 } i \text{ 发生(设备故障)} \\ 0 & \text{顶事件 } i \text{ 不发生(设备正常)} \end{cases} \\ (i=1,2,3,\cdots n)$$

故障树顶事件是设备所不希望发生的故障状态, $\Phi=1$;相应的底事件状态为元件故障状态, $X_i=1$ 。顶事件状态 Φ 完全由故障树底事件状态 X 所决定,即 $\Phi=\Phi(X)$,其中 $X=(X_1,X_2,X_3,\cdots X_n)$ 则称 $\Phi(X)$ 为故障树的结构函数。

结构函数是表示设备状态的一种布尔函数,其自变量为该设备组成单元的状态。不同的故障树有不同的逻辑结构,从而对应不同的结构函数。

(1)与门结构函数

$$\Phi(X) = \bigcap_{i=1}^n X_i, \quad i = 1,2,\cdots n \quad (1)$$

式中, n 为底事件数。当仅取 0 或 1 两值时,式(1)可改写为:

$$\Phi(X) = \prod_{i=1}^n X_i, \quad i = 1,2,\cdots n \quad (2)$$

当全部部件、元件发生故障时,设备才有故障,其中只要有一个部件正常则设备正常。

(2)或门结构函数

$$\Phi(X) = \bigcup_{i=1}^n X_i, \quad i = 1,2,\cdots n \quad (3)$$

当仅取 0 或 1 两值时,式(3)可以改写为:

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i), \\ i = 1,2,\cdots n \quad (4)$$

式(4)说明只要一个部件故障,设备就会故障。

3 CCD 成像分系统故障树的建立

3.1 系统结构树及边界的定义

根据 CCD 成像分系统的系统结构图可知,CCD 成像分系统包括 CCD 自检灯板、CCD 电源

变换板、CCD 电源稳压板、CCD 数据板、CCD 控制板和焦面组件。

在对 CCD 成像分系统故障分析的基础上,对系统边界的定义如下:

- (1)顶事件:系统失效,不能正常工作,称为故障树的顶事件;
- (2)初始条件:相机开始工作;

- (3)不容许事件:错误的人为操作;
- (4)必然事件:器件的温度在规定范围内变动;
- (5)底事件:系统(或设备)各部件的失效。

本文是在建立系统结构树的基础上建立的故障树,根据系统结构的层次关系,确定发生故障的部件,系统结构树如图 1 所示。

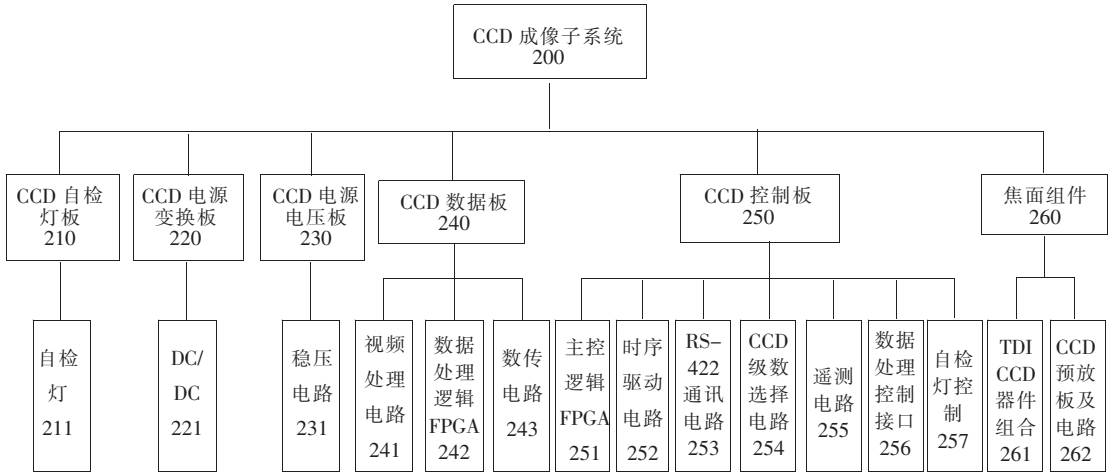


图 1 空间相机 CCD 成像分系统结构层次图

Fig. 1 Framework hiberarchy figure of CCD imaging subsidiary system of space camera

3.2 系统故障树的建立

空间相机 CCD 成像分系统故障模式主要来源于开发工程师填写的 FMEA 表。根据系统定义的边界及系统结构树,结合 FMEA 表,以系统失效为顶事件,分析可能产生顶事件的子系统,按

照与、或门的关系排列,建立了产生系统关于顶事件的故障树。本文以空间相机 CCD 自检灯板 FMEA 表为例进行分析,其他部件的 FMEA 表分析与它相似。表 1 是空间相机 CCD 自检灯板 FMEA 表。图 2 是 CCD 成像分系统故障树。

表 1 CCD 自检灯板 FMEA 表

Table 1 FMEA table of self-examining light board of CCD

代码	产品或功能标志	功能	故障模式	故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			严酷度类别	故障检测方法	
						局部影响	高一层次影响	最终影响			
211	CCD 自检灯	TDI CCD 工作状态自检	灯该亮不亮	LED 芯片损坏		无法判断	CCD 成像系统工作是否正常	不影响 CCD 成像效果	IV	没有下传的标定灯图像	
			灯该灭不灭	控制信号加载不正确		影响成像效果		严重影响下传图质量	IV	下传图像背景亮度加强	

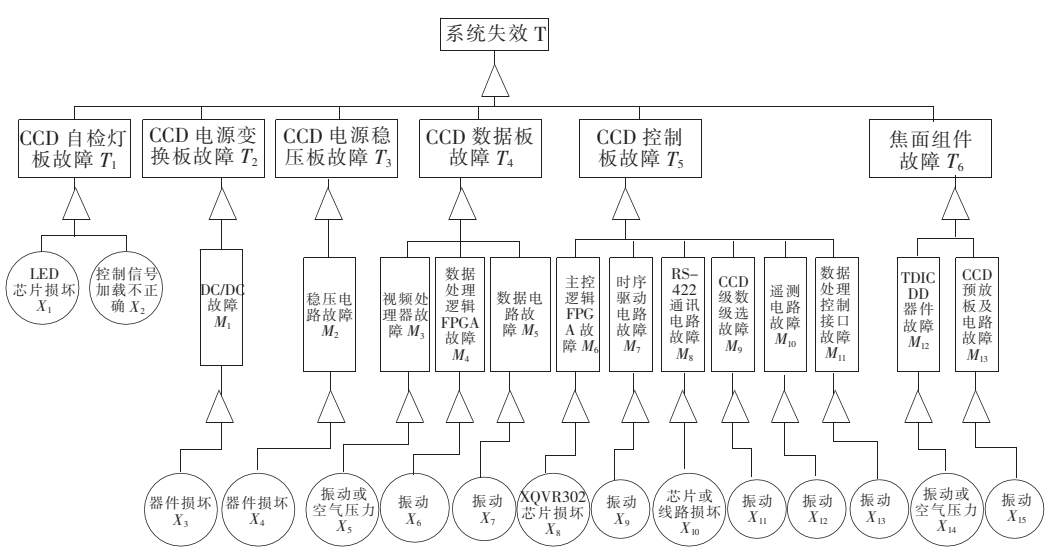


图 2 空间相机 CCD 图像分系统故障树
Fig. 2 Fault tree of CCD imaging subsidiary system of space camera

4 FT 的定性分析

故障树定性分析包括割集、最小割集的确定等主要工作内容。如果故障树实例有个 n 底事件 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, C = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 是其中一些底事件的一组集合。当集合中的全部事件都发生时(或称集合 C 发生时),顶事件必然发生,则集合 C 是故障树的一个割集。割集是指能够导致顶事件发生的一组底事件的组合。故障树最小割集求解的下行法是采用由上而下的故障树搜寻法,它是根据逻辑与门仅增加割集容量,不增加割集的个数而逻辑或门增加割集个数,不增加割集底事件数目的性质,由上而下,遇到与门就把与门下面所有输入事件都排列于一行,遇到或门就把或门下面所有输入事件都排列于一列,依此类推,一直到不能分解,全部换成底事件为止。这样得到的割集再通过两两比较,根据最小割集的定义去除那些非最小割集,余下的即为故障树的全部最小割集。

根据建立的航空相机 CCD 分析系统故障树,结合 FMEA 表中故障影响的最终影响,利用下行法找出所有最小割集:

$\{X_3\}, \{X_4\}, \{X_5\}, \{X_6\}, \{X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{15}\}$ 。

5 FT 的定量分析

故障树定量分析的任务就是计算系统顶事件

发生的概率以及系统的一些可靠性指标。通过 FTA 定性分析找出导致顶事件发生的原因和原因组合,并找出导致顶事件发生的所有故障模式。

5.1 顶事件概率分析

可以采用相容事件的概率公式计算顶事件发生的概率,即容斥定理。

顶事件: $T = C_1 + C_2 + \dots + C_n$ (5)

在式(5)中, $C_1, C_2, \dots, C_n$ 为最小割集。

顶事件发生的概率为:

$$P_T = \sum_{i=1}^n p(C_i) - \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^n p(C_i C_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n p(C_i C_j C_k) + \dots + (-1)^{n-1} p(C_1 C_2 \dots C_n)$$
 (6)

在式(6)中, C_i, C_j, C_k 分别为第 i, j, k 个最小割集。

5.2 顶事件概率计算

根据故障模式发生概率等级(OPR),假设底事件概率数值如下:

对于 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}$, 其概率分别为 $2 \times 10^{-7}, 5 \times 10^{-7}, 3 \times 10^{-7}, 6 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}, 11 \times 10^{-7}, 8 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-7}, 9 \times 10^{-7}, 13 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-7}, 15 \times 10^{-7}, 5 \times 10^{-7}, 12 \times 10^{-7}$ 。

由公式(6)及故障树逻辑结构图,计算得到故障树各中间事件和顶事件的概率如下:

$P_{M1} = P_{X3} = 3 \times 10^{-7}, P_{M2} = P_{X4} = 6 \times 10^{-7},$

$$\begin{aligned} P_{M3} &= P_{X5} = 4 \times 10^{-7}, P_{M4} = P_{X6} = 11 \times 10^{-7}, \\ P_{M5} &= P_{X7} = 8 \times 10^{-7}, P_{M6} = P_{X8} = 1 \times 10^{-7}, \\ P_{M7} &= P_{X9} = 9 \times 10^{-7}, P_{M8} = P_{X10} = 13 \times 10^{-7}, \\ P_{M9} &= P_{X11} = 1 \times 10^{-7}, P_{M10} = P_{X12} = 15 \times 10^{-7}, \\ P_{M11} &= P_{X13} = 5 \times 10^{-7}, P_{M12} = P_{X14} = 12 \times 10^{-7}, \\ P_{M13} &= P_{X15} = 10 \times 10^{-7}, \\ P_{T1} &= P_{X1} + P_{X2} = 2 \times 10^{-7} + \\ &\quad 5 \times 10^{-7} = 7 \times 10^{-7}, \\ P_{T2} &= P_{M1} = 3 \times 10^{-7}, P_{T3} = P_{M2} = 6 \times 10^{-7}, \\ P_{T4} &= P_{M3} + P_{M4} + P_{M5} = 4 \times 10^{-7} + \\ &\quad 11 \times 10^{-7} + 8 \times 10^{-7} = 23 \times 10^{-7} \\ P_{T5} &= P_{M6} + P_{M7} + P_{M8} + P_{M9} + \\ &\quad P_{M10} + P_{M11} = 1 \times 10^{-7} + 9 \times 10^{-7} + \\ &\quad 13 \times 10^{-7} + 1 \times 10^{-7} + 15 \times 10^{-7} + \\ &\quad 5 \times 10^{-7} = 44 \times 10^{-7} \\ P_{T6} &= P_{M12} + P_{M13} = 12 \times 10^{-7} + \\ &\quad 10 \times 10^{-7} = 22 \times 10^{-7}, \\ P_F &= P_{T2} + P_{T3} + P_{T4} + P_{T5} + P_{T6} = \\ &\quad 3 \times 10^{-7} + 6 \times 10^{-7} + 23 \times 10^{-7} + \\ &\quad 44 \times 10^{-7} + 22 \times 10^{-7} = 98 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

5.3 故障树底事件重要度计算

F-v 最小割集重要度描述了部件故障树对设备的总贡献,定义为:

$$I_i^{FV} = \frac{P_i(C)}{P_r} \tag{7}$$

其中, $P_i(C)$ 为包含部件*i*的所有最小割集发生概率; P_r 为故障树顶事件发生概率。

重要度是故障树分析中的一个重要概念,按照公式(7),可得各最小割集的重要度。

$$I_{X3}^{FV} = \frac{P_{X3}}{P_F} = 3 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0306$$

$$\begin{aligned} I_{X4}^{FV} &= \frac{P_{X4}}{P_F} = 6 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0612 \\ I_{X5}^{FV} &= \frac{P_{X5}}{P_F} = 4 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0408 \\ I_{X6}^{FV} &= \frac{P_{X6}}{P_F} = 11 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.1122 \\ I_{X7}^{FV} &= \frac{P_{X7}}{P_F} = 8 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0816 \\ I_{X8}^{FV} &= \frac{P_{X8}}{P_F} = 1 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0102 \\ I_{X9}^{FV} &= \frac{P_{X9}}{P_F} = 9 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0918 \\ I_{X10}^{FV} &= \frac{P_{X10}}{P_F} = 13 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.1327 \\ I_{X11}^{FV} &= \frac{P_{X11}}{P_F} = 1 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0102 \\ I_{X12}^{FV} &= \frac{P_{X12}}{P_F} = 15 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.1531 \\ I_{X13}^{FV} &= \frac{P_{X13}}{P_F} = 5 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.0510 \\ I_{X14}^{FV} &= \frac{P_{X14}}{P_F} = 12 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.1224 \\ I_{X15}^{FV} &= \frac{P_{X15}}{P_F} = 10 \times 10^{-7} / 98 \times 10^{-7} = 0.1020 \end{aligned}$$

根据计算的重要度,对改进系统设计,快速定位故障原因,制订维修策略是十分有利的。

6 结 论

详细介绍了 FT 的建立过程,运用 FTA 计算出顶事件概率和最小割集重要度,找出系统中的最薄弱因素,实现了故障模式识别、预测和诊断。结果表明,故障树的建立直观反映了故障层次间的联系,有助于 CCD 成像分系统优化和风险评价,是一种有效的故障预测和诊断方法。

参 考 文 献:

[1] 韩冬. 基本多姿态变化相机的 CCD 焦面组件热设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2665-2671.
[2] 王文华, 何斌, 任建岳. 基于线阵 CCD 的成像系统自校图形设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 2011-2016.
[3] 胡君, 王栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1810-1818.
[4] 杨国旺, 王均华, 杨淑英. 故障树分析法在大型电力变压器故障研究中的应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 385-369.
[5] 朱继洲. 故障树原理及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
[6] 李国宁, 刘妍妍, 金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 558-563.
[7] 周忠宝, 周经纶, 孙权, 等. 基于离散时间贝叶斯网络的动态故障树分析方法 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(6): 732-736.
[8] Remenyte R, Andrews J D. A simple component connection approach for fault tree conversion to binary decision diagram [C]// *Proceeding of the First International Conference on Availability, Reliability and Security*, Vienna, Austria: IEEE, 2006: 449-457.