

doi: 10.7690/bgzdh.2013.03.022

基于模糊故障树的基带设备故障诊断方法

孙福安, 郭亚坤, 戴兵

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 针对基带设备的某些故障因素因存在模糊性而难以运用数学模型精确评价的问题, 提出一种基于模糊故障树的基带设备故障诊断方法。该方法基于基带设备故障原理, 利用故障树分析法, 以基带信号失锁为研究对象建立故障树, 通过建立故障树的最小割集、底事件的精确故障概率和模糊故障概率以及底事件的重要度分析等模型, 对故障树进行定性和定量分析, 并通过数据演算验证了该故障树分析模型的可行性。该研究为后续开发基带设备故障诊断的专家系统打下了基础。

关键词: 基带; 模糊故障树; 故障诊断

中图分类号: TJ768.3 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis Method of Base Band Equipment Based on Fuzzy Fault Tree

Sun Fuan, Guo Yakun, Dai Bing

(Satellite Maritime Tracking & Control Department of China, Jiangyin 214431, China)

Abstract: Aimed at the base band problem that it's hard to evaluate exactly for some fault factors by using math model because of fuzziness, put forwards base band fault diagnosis method based on fuzzy fault tree. Based on base band fault theory, the method uses fault tree analysis method to establish fault tree by taking based band signal unlock as research object. And then the qualitative and quantitative analysis of the fault tree is accomplished, by establishing models such as minimal cut set, exact and fuzzy fault probability of bottom things, and importance analysis of bottom things. Finally, the feasibility of models is validated by data calculating. The study provides the base for developing the expert system of base band fault diagnosis.

Key words: base band; fuzzy fault tree; fault diagnosis

0 引言

基带设备属于车载 USB 系统的终端部分, 主要完成火箭或卫星信号的遥测解调、测距、测速以及发送遥控指令等; 因此, 基带设备的工作状况直接决定了测控任务的成败。基带设备也是 USB 系统中内部结构原理最复杂, 与外部设备联系最密切的部分, 这给基带设备的故障诊断带来了很大的难度。传统的依靠设备操作人员的经验判断来诊断故障的做法, 往往难以准确定位, 不仅浪费时间, 而且由于频繁地拆卸检查设备也会大大降低设备的使用寿命。因此了解基带设备故障原理, 科学定量地评价故障因素具有重要意义。

故障树分析法 (fault tree analysis, FTA) 是一种用于复杂系统可靠性、安全性预测的方法^[1], 目前已在众多领域获得广泛应用。FTA 的特点是形象, 清晰, 逻辑性强, 既适用于定性分析, 又能进行定量分析^[2]。针对实践中, 基带设备的某些故障因素难以运用数学模型精确评价, 存在模糊性的问题, 笔者对其进行模糊化处理, 采用模糊故障树的方法

对基带设备的故障因素进行分析评价。

1 典型基带故障的故障树建立

基带信号锁定是基带完成其主要功能的前提条件, 基带信号失锁能够第一时间从基带软件界面发现。因而, 笔者选取基带信号失锁作为典型基带故障研究对象。

1.1 基带信号失锁机理分析

卫星信号由天线接收后, 经由信道系统变频为中频信号后传输到达基带设备, 对于扩频基带, 中频信号还需要经过中频分路组合。此外, 基带正常工作还需要由频率分路器和时码器等插箱设备提供频标信号和时码信号。笔者假设信道系统工作正常, 故不将其列入故障分析范围内。

以扩频基带为例, 基带接收解调板是基带接收信号的主要硬件部分。中频接收解扩模块是接收板处理信号的主要功能模块, 负责完成短码和载波的捕获、短码辅助长码的捕获、多路信号的捕获、PN 码和载波的跟踪、异步数据的解调等。若中频接收

收稿日期: 2012-09-06; 修回日期: 2012-10-10

作者简介: 孙福安(1983—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事航天测控研究。

解扩模块异常, 扩频基带将不能正常锁定信号。接收板电源模块给中频接收解扩模块供电, 该电源模块异常时, 将直接导致中频接收解扩模块硬件不能正常工作。中频接收解扩模块使用 DSP+FPGA 的结构, 功耗较大, 滤波电容较容易损毁, 会导致接收解扩模块进入保护状态停止工作。接收板上频标模块为接收解调模块提供频标信号, 接收板使用频标信号综合产生内部工作的时钟, 实现相干检测。接收板上时码模块运用 DDS 技术在频标输入信号基础上产生内部需要的各种时钟。频标模块或时码模块故障均会导致接收板信号失锁。

在当前基带软件版本稳定可靠的前提下, 基带锁定信号的软件因素主要是各种参数的设置, 例如 I/Q 功率比、捕获门限、伪码码组、伪码码率等, 还有一些可能影响接收模块工作的参数, 但此类参数通常只影响接收机工作的速度, 当发生严重不匹配时, 才会导致中频接收解扩模块工作异常。

为基带设备提供辅助功能的插箱设备主要包括时码器、频率分路器和中频分路组合等。其中频率分路器和时码器分别为基带提供频标信号和时码信号, 中频分路组合是中频信号进入扩频基带的必经设备。此外, 插箱设备均通过线缆与基带设备连接, 由于长时间的振动或者频繁地插拔线缆, 可能造成设备电缆之间接触不良甚至损坏, 就会使基带收不到各种信号, 造成失锁。

1.2 故障树建立

故障树分析法把系统最易观察到的故障现象作为故障树的顶事件, 把引发该项事件故障的最终原因作为底事件, 中间事件则反映了顶事件和底事件之间的因果关系^[3]。笔者把扩频基带信号失锁作为顶事件, 根据上节基带信号失锁分析确定故障树的中间事件和底事件, 构建故障树如图 1 所示。

其中, T 表示扩频基带信号失锁, M₁ 表示时码失锁, M₂ 表示中频接收解扩模块异常, M₃ 表示频标失锁, M₄ 表示中频输入信号异常, M₅ 表示时码输入信号异常, M₆ 表示中频接收解扩模块硬件异常, M₇ 表示中频接收机参数不匹配异常, M₈ 表示频标输入信号异常, M₉ 表示载波参数不匹配, M₁₀ 表示接收通道参数不匹配, X₁ 表示接收板时钟模块损坏, X₂ 表示时码器故障, X₃ 表示时码器连接线缆故障, X₄ 表示接收板电源模块故障, X₅ 表示滤波电容损毁, X₆ 表示 I/Q 功率比不匹配, X₇ 表示捕获门限不匹配, X₈ 表示伪码码组不匹配, X₉ 伪码码率不

匹配, X₁₀ 表示其他参数不匹配, X₁₁ 表示接收板频率综合模块损坏, X₁₂ 表示频率分路器故障, X₁₃ 表示频率分路器连接线缆故障, X₁₄ 表示中频分路组合故障, X₁₅ 表示中频分路组合连接线缆故障。

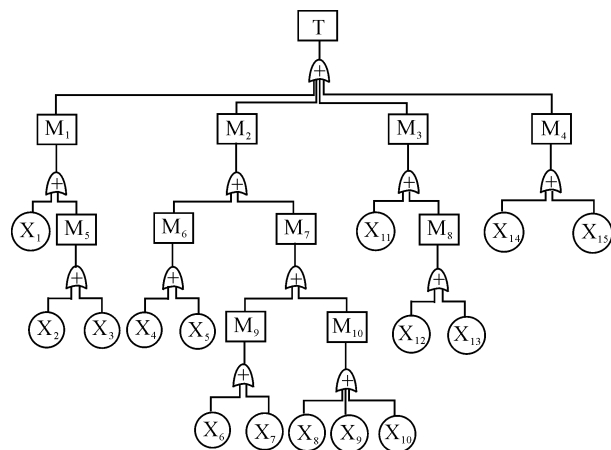


图 1 基带信号失锁故障树

2 典型基带故障的模糊故障树分析

2.1 故障树的定性分析

定性分析主要是确定故障树的最小割集, 最小割集是导致顶事件发生所必要的最小限度的集合。最小割集中所有的底事件发生时, 才会导致顶事件的发生, 仅有部分的底事件发生时, 并不会引起顶事件的发生。

为了确定故障树的最小割集, 首先要将故障树转化为其等效的布尔方程, 然后再利用“自上而下”或“自下而上”的代换方法而求得^[4]。分配律和吸收律这两个布尔定律常用来在代换和展开布尔表达式中消除冗余项。对图 1 所示的故障树进行等效的布尔方程代换, 可以写出故障树的布尔表达式:

$$T = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{15} \quad (1)$$

可得 15 个最小割集分别为: {X₁}、{X₂}、{X₃}、{X₄}、{X₅}、{X₆}、{X₇}、{X₈}、{X₉}、{X₁₀}、{X₁₁}、{X₁₂}、{X₁₃}、{X₁₄}、{X₁₅}。

2.2 故障树的定量分析

故障树的定量分析即计算底事件发生的概率, 根据底事件概率来计算顶事件发生的概率, 并确定底事件的重要度。建立底事件的概率计算模型分为 2 种情况, 一种是可以运用数学表达式进行描述, 根据底事件的性能指标参数等, 推算出底事件发生的精确概率; 另一种是无法运用数学表达式进行描述, 或无法获得相关参数的模糊底事件, 由专家进行判断打分或根据经验数据、实际验证等, 运用模

糊数学方法推算出模糊底事件的模糊发生概率。

2.2.1 精确概率模型

对底事件 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 、 X_{14} 、 X_{15} 建立精确概率模型。要建立底事件的发生概率的模型，首先需了解底事件的寿命分布形式。常见的分布形式有威布尔分布、指数分布和正态分布等。笔者对威布尔分布进行介绍。

威布尔分布的适用范围较广，在分析半导体器件的故障分布时应用较多。它的累积故障概率函数和故障概率密度函数分别^[5]如式 (2)、(3)：

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha}} & t \geq r \\ 0 & t < r \end{cases} \quad (2)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} (t-r)^{\beta-1} e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha}} & t \geq r \\ 0 & t < r \end{cases} \quad (3)$$

式中： α 为尺度参数； β 为形状参数； r 为位置参数。

当 $\beta < 1$ 时， $f(t)$ 曲线随时间单调下降， $F(t)$ 随着时间的递增而迅速下降，相当于底事件的早期故障期；当 $\beta = 1$ 时， $F(t)$ 呈现常数形式，相当于底事件的偶然故障期，此时 $f(t)$ 分布形式为指数分布；当 $\beta > 1$ 时， $F(t)$ 随着时间的递增而迅速上升，相当于底事件的损耗故障期，特别是当 $\beta > 4$ 时，分布形式可看作正态分布。

尺度参数 α 决定 $f(t)$ 曲线的陡度。 α 越小， $f(t)$ 曲线越陡；反之，曲线越平缓。

2.2.2 模糊概率模型

对于其他无法精确求得故障概率函数的底事件，对其故障概率进行模糊处理，三角模糊数、梯形模糊数和正态模糊数是常见的模糊数隶属度函数，笔者对三角模糊数进行介绍。

设论域 U 为实数域， \bar{q} 表示为线性的三角模糊数， $\mu_{\bar{q}}(x)$ 为其隶属度函数，则隶属度函数^[6]为：

$$\mu_{\bar{q}}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x < b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $x, a, b, c \in R$ ，三角模糊数可记为 $\bar{q} = (a, b, c)$ 。 b 给出了 $\mu_{\bar{q}}(x)$ 的最大隶属度，一般而言为 1，它是评价数的最大可能值。 a 和 c 为评价数适用区域的上下边界。记底事件故障概率为 \bar{F} ，运用专家打分

法，得到 $a = F_1$ ， $b = F_0$ ， $c = F_2$ ，则运用三角模糊数可记为 $\bar{F} = (F_1, F_0, F_2)$ 。

为了便于精确概率模型和模糊概率模型的统一计算，笔者对精确概率模型也进行模糊化处理。实际上在精确概率模型中使用的参数在工程上也并不是绝对确定的值，因此对其模糊化处理是合理的。笔者假定形状参数 β 和位置参数 r 是确定的，而尺度参数为三角模糊数， $\bar{\alpha}$ 的隶属度函数为：

$$\mu_{\bar{\alpha}}(x) = \begin{cases} (x-\alpha_1)/(\alpha_0-\alpha_1) & \alpha_1 \leq x < \alpha_0 \\ (\alpha_2-x)/(\alpha_2-\alpha_0) & \alpha_0 \leq x \leq \alpha_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

根据扩展原理^[7]， $\bar{F}(t)$ 的隶属度函数为：

$$\mu_{\bar{F}(t)}(x) = \begin{cases} \frac{\alpha_2 \ln(1-x) + (t-r)^\beta}{(\alpha_2-\alpha_0) \ln(1-x)} & 1 - e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha_2}} \leq x < 1 - e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha_0}} \\ \frac{\alpha_1 \ln(1-x) + (t-r)^\beta}{(\alpha_1-\alpha_0) \ln(1-x)} & 1 - e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha_0}} \leq x < 1 - e^{-\frac{(t-r)^\beta}{\alpha_1}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

可记 $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_0, \alpha_2)$ ，则累积故障概率函数 $\bar{F}(t) = (F_{\alpha_2}(t), F_{\alpha_0}(t), F_{\alpha_1}(t))$ 。

运用概率模型计算出底事件的累积故障概率后，根据最小割集可求出顶事件的发生概率。若所有底事件的概率都是精确的，则顶事件发生概率为

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^{15} [1 - P(X_i)] \quad (7)$$

综合考虑模糊底事件的模糊概率，可得到顶事件的发生概率为

$$\bar{P}(T) = \left(1 - \prod_{i=1}^{15} [1 - \bar{P}_1(X_i)], 1 - \prod_{i=1}^{15} [1 - \bar{P}_0(X_i)], 1 - \prod_{i=1}^{15} [1 - \bar{P}_2(X_i)] \right) \quad (8)$$

2.2.3 重要度分析模型

底事件的重要度是制定故障诊断方案的重要依据，常用重要度分析有结构重要度分析、概率重要度分析和关键重要度分析等。

结构重要度是不考虑底事件发生的概率，而仅仅从故障树的结构入手，分析底事件的重要程度。结构重要度可根据最小割集得出，阶数越小的最小割集越重要，同一个最小割集中出现的底事件重要度相同，在相同阶数的最小割集中，出现次数多的重要度高。很明显，笔者研究的故障树各底事件的结构重要度是相同的。

概率重要度是分析底事件从故障状态变为正常

状态时, 顶事件的故障概率改善的程度。记底事件 X_j 的概率重要度为 $I_p(j)$, 则

$$I_p(X_j) = P(T)|_{P(X_j)=1} - P(T)|_{P(X_j)=0} \quad (9)$$

针对笔者研究的故障树, 上式可推导为

$$I_p(X_j) = \frac{\partial P(T)}{\partial P(X_j)} = 1 - \left(\prod_{i=1}^{j-1} [1 - P(X_i)] \cdot \prod_{i=j+1}^{15} [1 - P(X_i)] \right) \quad (10)$$

关键重要度是底事件的故障概率变化率与由它引起的顶事件发生概率的变化率之比, 记底事件 X_j 的关键重要度为 $I_c(j)$, 则

$$I_c(X_j) = \lim_{\Delta P(X_j) \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta P(X_j)}{P(X_j)} \right] / \left[\frac{\Delta P(T)}{P(T)} \right] = \frac{P(X_j)}{P(T)} \frac{\partial P(T)}{\partial P(X_j)} = \frac{P(X_j)}{P(T)} I_p(j) \quad (11)$$

由上式可知, 关键重要度从底事件故障概率、顶事件发生概率和底事件的概率重要度 3 方面评价了底事件对顶事件的影响度; 因此, 关键重要度更客观地评价了底事件对顶事件的重要度。在故障诊断的过程中以及日常设备维护当中, 对底事件的关注度可以其关键重要度大小排序为依据。

2.2.4 算例分析

假定基带设备处于偶然故障期, 此时威布尔分布函数 $f(t)$ 的分布形式变为指数分布, 即 $\beta=1$, 令 $r=0$, 则得到

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{t}{\alpha}} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 α 实际上为底事件所属元件的平均无故障时间。因基带设备参数不便给出, 笔者给出底事件 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 、 X_{14} 、 X_{15} 粗略的平均无故障时间值, 对其模糊化处理得到 $\bar{\alpha}$ 的数据, $\bar{\alpha}_{X_1} = (3\ 000, 3\ 200, 3\ 400)$, $\bar{\alpha}_{X_2} = (4\ 100, 4\ 400, 4\ 700)$, $\bar{\alpha}_{X_3} = (1\ 000, 1\ 200, 1\ 400)$, $\bar{\alpha}_{X_4} = (2\ 600, 2\ 800, 3\ 000)$, $\bar{\alpha}_{X_5} = (2\ 400, 2\ 600, 2\ 800)$, $\bar{\alpha}_{X_{11}} = (2\ 800, 3\ 000, 3\ 200)$, $\bar{\alpha}_{X_{12}} = (3\ 800, 4\ 000, 4\ 200)$, $\bar{\alpha}_{X_{13}} = (1\ 000, 1\ 200, 1\ 400)$, $\bar{\alpha}_{X_{14}} = (4\ 200, 4\ 600, 4\ 900)$, $\bar{\alpha}_{X_{15}} = (1\ 000, 1\ 200, 1\ 400)$ 。

令 $t=100$, 求得 $\bar{P}(X_1)=(0.029\ 0, 0.030\ 8, 0.032\ 8)$, $\bar{P}(X_2)=(0.021\ 1, 0.022\ 5, 0.024\ 1)$, $\bar{P}(X_3)=(0.068\ 9, 0.080\ 0, 0.095\ 2)$, $\bar{P}(X_4)=(0.032\ 8, 0.035\ 1, 0.037\ 7)$, $\bar{P}(X_5)=(0.035\ 1, 0.037\ 7, 0.040\ 8)$, $\bar{P}(X_{11})=(0.030\ 8, 0.032\ 8, 0.035\ 1)$, $\bar{P}(X_{12})=(0.023\ 5, 0.024\ 7, 0.026\ 0)$, $\bar{P}(X_{13})=(0.068\ 9, 0.080\ 0, 0.095\ 2)$, $\bar{P}(X_{14})=(0.020\ 2, 0.021\ 5, 0.023\ 5)$, $\bar{P}(X_{15})=(0.068\ 9, 0.080\ 0, 0.095\ 2)$ 。

根据专家的打分并结合部分数据统计, 得到 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 的模糊故障概率, $\bar{P}(X_6)=(0.019, 0.02, 0.021)$, $\bar{P}(X_7)=(0.019, 0.02, 0.021)$, $\bar{P}(X_8)=(0.023, 0.024, 0.025)$, $\bar{P}(X_9)=(0.023, 0.024, 0.025)$, $\bar{P}(X_{10})=(0.015, 0.016, 0.017)$ 。

根据关键重要度公式, 可得到每个底事件的关键重要度, 这里给出隶属度最大的关键重要度, $I_c(X_1)=0.029\ 5$, $I_c(X_2)=0.021\ 8$, $I_c(X_3)=0.070\ 9$, $I_c(X_4)=0.033\ 4$, $I_c(X_5)=0.035\ 8$, $I_c(X_6)=0.019\ 5$, $I_c(X_7)=0.019\ 5$, $I_c(X_8)=0.023\ 2$, $I_c(X_9)=0.023\ 2$, $I_c(X_{10})=0.015\ 7$, $I_c(X_{11})=0.031\ 3$, $I_c(X_{12})=0.023\ 9$, $I_c(X_{13})=0.070\ 9$, $I_c(X_{14})=0.020\ 9$, $I_c(X_{15})=0.070\ 9$ 。比较得到

$$I_c(X_3)=I_c(X_{13})=I_c(X_{15}) > I_c(X_5) > I_c(X_4) > I_c(X_{11}) > I_c(X_1) > I_c(X_{12}) > I_c(X_8)=I_c(X_9) > I_c(X_9) > I_c(X_2) > I_c(X_{14}) > I_c(X_6)=I_c(X_7) > I_c(X_{10})$$

根据底事件的关键重要度大小排序可以看出, 当基带信号失锁时, 应首先排查线缆故障。

3 结束语

笔者运用故障树直观地描述了基带信号失锁的故障机理, 采用模糊方法解决了某些底事件无法求得精确故障概率的问题, 并建立了底事件重要度计算模型。通过数据演算验证了该模型的可行性, 为后续开发基带设备故障诊断的专家系统打下了基础。笔者对故障树的定量分析仅仅考虑了底事件的故障概率, 为更全面地研究底事件对顶事件的重要度, 下一步将会建立底事件的综合评价指标体系, 对故障树进行模糊综合评价。

参考文献:

- [1] 李馨. 模糊故障树方法新探[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(1): 27-30.
- [2] 崔铭. 基于故障树法的电动自行车安全性研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2011, 42(4): 467-471.
- [3] 郑雷雷, 宋丽华, 郭锐, 等. 故障树分析法在信息安全风险评估中的应用[J]. 计算机科学, 2011, 38(10A): 106-108.
- [4] W.E. 维齐利. 故障树手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 64-68.
- [5] 卢其庆, 张安康. 半导体器件可靠性与失效性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1981: 13-15.
- [6] 胡圣武. GIS 质量评价与可靠性分析[M]. 北京: 测绘出版社, 2006: 112-113.
- [7] 王海涛, 王景芹, 聂俊岚. 基于梯形模糊数的低压开关设备可靠性研究[J]. 低压电器, 2011(18): 9-11.