

[文章编号] 1009-1300(2005)05-0021-03

故障树法在弹头遥测可靠性分析中的应用

王国亮, 孙新利

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

[摘要] 应用故障树分析法, 对弹头遥测可靠性进行了分析. 建立了该系统的简化故障树模型, 并在此基础上计算了遥测系统的可靠性参数. 讨论了部件的概率重要度和关键重要度, 结合所建的故障树给出了相应的结果. 通过重要度分析, 找到了提高系统可靠性的途径.

[关键词] 故障树; 重要度; 可靠性

[中图分类号] TJ760.6+23

[文献标识码] A

Application of FTA Method in the Reliability of Telemetry System

Wang Guoliang, Sun Xinli

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: An analysis of the telemetry system about warhead is presented. Based on the fault tree, the reliability of the telemetry system is studied, the reliability parameter is calculated, the importance of the components is discussed and a conclusion about the telemetry system reliability is drawn. Using qualitative and quantitative analysis, a new way to improve the system reliability is found.

Keywords: fault tree; importance; reliability

1 引言

故障树分析法(Fault Tree Analysis, 简称 FTA) 是 1961 年由美国贝尔实验室的 H. A. Watson 和 D. F. Hassl 首先提出的, 并用于“民兵”导弹的发射系统控制. 此后, 故障树分析法被越来越多地应用到航空、航天、核能和化工等领域, 并被公认为是对复杂系统进行可靠性分析的好方法.

在弹头研制过程中, 通过飞行试验所得到的遥测数据是弹头设计和定型的主要依据, 尤其是弹头的子系统, 如姿态控制系统、引爆系统等都要依据

遥测数据进行分析判断. 当导弹飞行失败或在飞行过程中出现异常情况时, 遥测系统的作用就格外重要. 例如, 通过姿态测量数据, 分析寻找故障原因; 通过遥测信号中断的时刻, 估算可能的弹头落点等. 因此, 在武器试验阶段, 遥测系统的可靠性极为重要.

目前对遥测系统的可靠性研究还不多, 本文通过对遥测系统重要子系统的故障树分析, 进而对遥测系统的可靠性进行定量评定.

2 系统故障树的建立

选取顶事件. 进行遥测的目的就是通过对检测到的数据进行处理和分析, 进而对武器的设计和定

[作者简介] 王国亮, 硕士研究生.

[收稿日期] 2004-12-02

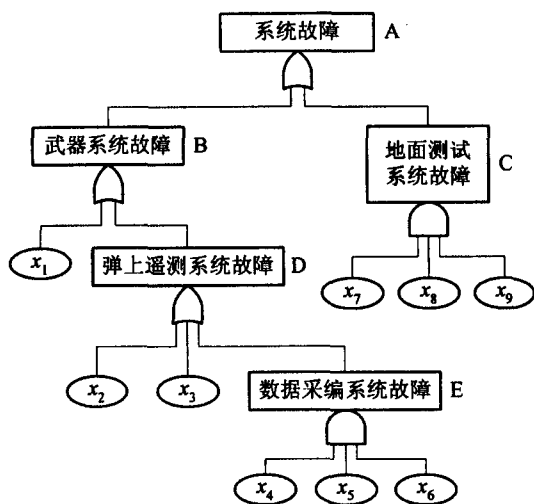


图1 遥测系统故障树

型提供依据. 因此, 定义以无有效数据接收为遥测任务失败, 并作为系统故障的顶事件.

通过分析整个遥测系统, 确定可能出现的引起系统故障的各种原因, 例如引起遥测失败的有武器系统故障和地面系统故障等. 其中, 武器系统故障主要包括弹上系统严重故障(导致全弹与遥测系统同时发生故障)和弹上遥测设备故障; 地面测试系统故障包括数据卫星故障、地面接收站故障和地面遥测站故障. 然后, 找出导致事件发生的诸因素之间的逻辑关系, 并将这些关系用故障树表示出来(如图1所示).

图1故障树中的各基本事件所代表的各故障由表1列出.

3 故障树定性评定

3.1 定义

所谓定性评定故障树就是找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式, 即求出故障树的所有最小割集. 设给定的故障树 T 由所有集合 $B_1, \dots, B_m$ 组成:

$$T = \left\{ \bigcup_{i=1}^m B_i \right\}.$$

式中 $B_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}\}$ 是基本故障事件的集合, 仅当这些事件同时发生时, 顶端事件才会发生, 则称 B_i 为故障树的一个割集.

表1 基本事件表

代号	基本事件
x_1	弹上系统严重故障
x_2	信号发射系统故障
x_3	供配电系统故障
x_4	传输型传感系统故障
x_5	传感型传感系统故障
x_6	其它数据采集故障
x_7	数据卫星故障
x_8	地面接收站故障
x_9	地面遥测站故障

表2 用下行法求最小割集

分析步骤序号				最小割集
1	2	3	4	
B	x_1	x_1	x_1	x_1
	D	x_2	x_2	x_2
		x_3	x_3	x_3
		E	$x_4 x_5 x_6$	$x_4 x_5 x_6$
C	$x_7 x_8 x_9$	$x_7 x_8 x_9$	$x_7 x_8 x_9$	$x_7 x_8 x_9$

从工程上讲, 最小割集表征了系统故障的充分和必要条件. 组成最小割集的基本故障事件的个数为该最小割集的阶数, 阶数愈小的最小割集对系统故障的影响愈大.

分析获得的最小割集能清楚地告诉分析人员, 哪些地方是系统可靠性最薄弱的环节. 下面采用下行法求本系统的最小割集.

3.2 用下行法求系统最小割集

这种方法的基本思路是从顶事件开始逐级向下, 根据不同逻辑关系分行表示, 如表2所示.

在表2中, 紧接顶事件的若是或门, 则把每个输入事件分别列入不同的行; 紧接顶事件的若是与门, 则把每个输入事件列入同一行. 依次从上到下分解, 直到得到不能再分解的基本事件为止.

简单分析后, 可以得出 $\{x_1\}$, $\{x_2\}$, $\{x_3\}$, $\{x_4, x_5, x_6\}$, $\{x_7, x_8, x_9\}$ 就是系统的最小割集.

4 故障树定量评定

4.1 通过最小割集计算顶事件发生的概率

故障树定量评定的任务就是要计算和估计出顶事件发生的概率以确定系统的可靠性指标. 用最小割集求解前, 先作假设:

(1) 底事件之间相互独立;

(2) 底事件和顶事件只考虑两种状态——发生或不发生, 即正常与故障两种状态;

(3) 底事件的故障概率为指数分布.

根据假设有:

$$F_i = P(T) = P\left(\bigcup_{j=1}^k c_j\right).$$

式中, $c_1, c_2, \dots, c_k$ 为已知故障树的最小割集, 即 $c_1 = \{x_1\}$, $c_2 = \{x_2\}$, $c_3 = \{x_3\}$, $c_4 = \{x_4, x_5, x_6\}$, $c_5 = \{x_7, x_8, x_9\}$; 其中, 底事件 $p(x_i) = 1 - e^{-\lambda_i t}$. 我们知道, 对于指数分布, $1/\lambda_i = \text{MTBF}$ 代表平均无故障工作时间. 取 $t = 20\text{h}$, 代入相应的 λ_i 的值, 就可以得到系统的故障概率:

$$\begin{aligned} P(T) &= P(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 x_5 x_6 + x_7 x_8 x_9) \\ &\approx \sum_{i=1}^9 p(c_i) \\ &= p(x_1) + p(x_2) + p(x_3) + \\ &\quad p(x_4)p(x_5)p(x_6) + p(x_7)p(x_8)p(x_9) \\ &= (1 - e^{-\lambda_1 t}) + (1 - e^{-\lambda_2 t}) + \\ &\quad (1 - e^{-\lambda_3 t}) + (1 - e^{-\lambda_4 t})(1 - e^{-\lambda_5 t})(1 - e^{-\lambda_6 t}) + \\ &\quad (1 - e^{-\lambda_7 t})(1 - e^{-\lambda_8 t})(1 - e^{-\lambda_9 t}) \\ &= 0.0107. \end{aligned}$$

因此, 可以得出遥测系统连续工作 20h 的无故障概率为 $(1 - 0.0107) = 0.9893$, 即系统可靠度为 0.9893.

4.2 概率重要度分析

系统中各元件并不是同样重要, 有的元件一旦发生故障就会引起系统故障, 有的则不然. 概率重要度的物理定义为第 i 个部件不可靠度的变化引起系统不可靠度变化的程度. 因此第 i 个元件的重要度为

$$I_i^{Pr} = \frac{\partial g(Q(t))}{\partial Q_i(t)} = g(1_i, Q(t)) - g(0_i, Q(t)).$$

将 x_1 代入公式得:

$$\begin{aligned} I_1^{Pr} &= 1 - (1 - e^{-\lambda_2 t}) + (1 - e^{-\lambda_3 t}) + \\ &\quad (1 - e^{-\lambda_4 t})(1 - e^{-\lambda_5 t})(1 - e^{-\lambda_6 t}) + \\ &\quad (1 - e^{-\lambda_7 t})(1 - e^{-\lambda_8 t})(1 - e^{-\lambda_9 t}) = 0.9614. \end{aligned}$$

同理, 得到其它底事件的概率重要度分别为

$$I_2^{Pr} = 0.9815,$$

$$I_3^{Pr} = 0.9457,$$

$$I_4^{Pr} = 0.0037,$$

$$I_5^{Pr} = 0.0017,$$

$$I_6^{Pr} = 0.0042,$$

$$I_7^{Pr} = 0.0063,$$

$$I_8^{Pr} = 0.0058,$$

$$I_9^{Pr} = 0.0069.$$

由此得到 9 个基本底事件的重要度顺序为 $x_2 > x_1 > x_3 > x_7 > x_9 > x_8 > x_6 > x_4 > x_5$.

根据重要度顺序, 我们可以得出对于导弹遥测系统, 弹上系统的性能对能否成功遥测的影响程度最大, 其次才为传感器和地面测试系统. 在这里, 我们还可以对本例再进一步的分析, 从而求出故障系统的结构重要度 $I_i^{St}(t)$ 和关键重要度 $I_i^{Cr}(t)$, 但因部分底事件的数据不易获得, 在此不予进一步讨论了.

5 结束语

通过上例的分析与计算, 我们可以认为在导弹发射试验中, 完全可以通过 FTA 法对遥测系统的可靠性进行定量和定性两方面的分析. 通过 FTA 法, 可以以一种较为直观的方式体现出遥测系统各基本事件发生故障的逻辑关系, 分析出各基本事件的各种重要度, 从而便于查找系统的故障原因, 分析系统的薄弱环节, 并采取相应的增强部件可靠性方法来提高遥测系统的整体可靠性.

[参 考 文 献]

- [1] 刘蕴才, 房鸿瑞, 张集仿. 遥测遥控系统(上)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] 王国雄, 马鹏飞, 等. 弹头技术(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [3] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 郭波, 武小悦, 等. 系统可靠性分析[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2002.