

## 【兵器与装备】

## 某型导弹控制系统故障树分析\*

马瑞萍<sup>1</sup>,尹晓飞<sup>2</sup>,焦纲领<sup>1</sup>

(1.海军装备研究院,北京 100161; 2.海军潜艇学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**介绍故障树分析的原理,结合某型导弹控制系统的实例建立故障树模型,进行相应的故障树定性分析和定量分析,根据重要度分析计算概率重要度,为导弹控制系统的设计和改进提供了一定的参考。

**关键词:**控制系统;故障树分析;定性分析;定量分析

**中图分类号:** TB115

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2008)05-0003-03

某型导弹控制系统是其导弹武器系统的重要组成部分,它主要由制导系统、姿态控制系统和电源配电系统等组成。控制系统是一个十分复杂的系统,它以可靠性逻辑为基础,将控制系统看作一个串并联系统,来分析控制系统各部件的功能和相互影响关系。因此在对控制系统进行可靠性设计时,可以采用故障树分析,找出并确定具有较大影响的故障因素,以期通过设计来提高导弹控制系统可靠性。

## 1 故障树分析法

故障树分析法<sup>[1-2]</sup>是美国贝尔电话研究所的 H A Waston 在分析民兵导弹发射控制系统安全性时首先提出并应用的。经过多年的发展,故障树分析法已形成完整的理论体系,成为国际上公认的可靠性安全性分析的一种简单、有效的方法。

故障树分析是以一个不希望发生的系统失效事件(顶事件)作为分析的目标,先去寻找所有引起顶事件的直接原因,再去寻找引起每一个原因的直接原因,依次层层寻找,直至不需要进一步分析为止,以此方式找出系统内部可能发生的硬件失效、软件差错、人为失误及环境影响等因素(底事件)和顶事件所代表的系统失效之间的逻辑关系,并用逻辑门符号连成一棵倒立的树状图形。故障树分析法考虑的基本单元是故障事件,追溯的是系统失效根源,深入到故障组合之中。故障树分析法属于演绎法,即由上而下,由系统的特定故障状态(顶事件)出发,分析导致故障的一切可能原因或原因组合。

## 2 某型导弹控制系统实例分析

### 2.1 控制系统分析

某型导弹的控制系统由方位捷联平台、无线电高度

表、导航计算机、模拟控制机、组合电源和电动舵系统组成。控制系统的主要任务就是在发射前对导弹进行葸全、快速、准确的检测和可靠的点火发射,在飞行中对导弹进行姿态控制,确保其稳定飞行,并保证弹头的投掷精度或引导弹头准确命中目标。在导弹发射准备和飞行过程中,首先进行惯导加电自检、平台启动、调平、射检,随后进行转导航后的导航计算及发射后的飞行控制。其中导航计算的主要功能是利用计算机分析计算得到导弹的速度和位置及其他导航信息;飞行控制则主要采用滚动控制通道稳定导弹的滚动姿态角,通过俯仰通道和航向通道分别控制导弹的纵向弹道和横向弹道,使导弹准确飞向预定目标。

### 2.2 建立故障树

建立故障树是故障树分析中最关键的一个部分,故障树建造的完善程度将直接影响定性分析与定量分析的准确性。建树人员必须对系统的工作机理和过程非常熟悉和了解,从而找出系统故障和导致故障的各个因素之间的逻辑关系。整个建树过程是对导弹控制系统的分析思考过程,通过从不同角度的建树过程,能进一步得到系统的各种信息而更加熟悉系统。通过故障树分析可以帮助设计人员判明潜在的故障,以便改进设计,改进运行和维修方案。但由于建树工作较繁,若能使系统设计、使用和可靠性方面的专家密切合作,便会取得很好的效果。

本研究以导弹控制系统故障作为顶事件来建立故障树。在建造导弹控制系统故障树时,首先要对系统划定边界即导弹控制系统故障,然后分析顶事件发生的、直接的、必要的和充分的原因得出2个次级顶事件:平台系统故障和姿态失去控制。通过不断地将看问题的角度从失效机理转变到失效模式,进而不断地接近失效机理和失效模式中的较精细的答案,一直到达故障树的分解极限,最后将故障树分解为若干个底事件。如图1所示(其中表1为故障树各门事件的含义)。

\* 收稿日期:2008-06-25

作者简介:马瑞萍(1965—),女,陕西蒲城人,高级工程师,博士研究生,主要从事导弹测试与故障诊断研究。

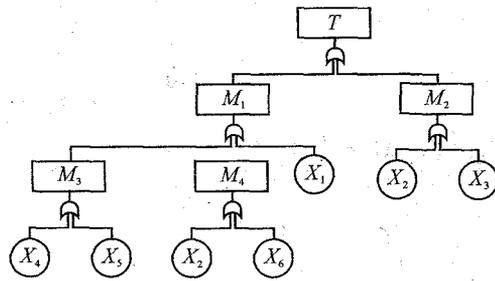


图1 导弹控制系统故障树

表1 故障树门事件含义

门或事件	定义
$T$	控制系统故障
$M_1$	平台系统故障
$M_2$	姿态失去控制
$M_3$	平台初始未对准
$M_4$	导航计算机故障
$X_1$	加速度计故障
$X_2$	模拟控制机故障
$X_3$	电动舵系统机械故障
$X_4$	方位未对准
$X_5$	水平未对准
$X_6$	无线电高度表故障

### 2.3 故障树定性分析

定性分析的主要任务就是寻找故障树的最小割集。最小割集表示系统的一种失效模式，系统的全部最小割集就构成系统的故障谱。最小割集给出了导致系统故障的所有部件失效的为唯一组合。求系统故障树最小割集的方法有很多，常用的有下行法、上行法与参数转换法<sup>[3]</sup>等。表2通过下行法求导弹控制系统故障树的最小割集。

表2 下行法求最小割集

步骤	1	2	3	4	5
	$M_1$	$M_3$	$X_4$	$X_4$	$X_4$
	$M_2$	$M_4$	$X_5$	$X_5$	$X_5$
过程		$X_1$	$M_4$	$X_2, X_6$	$X_2, X_6$
		$M_2$	$X_1$	$X_1$	$X_1$
			$M_2$	$M_2$	$X_2$
					$X_3$

可得5个最小割集分别为： $\{X_1\}$ ， $\{X_2\}$ ， $\{X_3\}$ ， $\{X_4\}$ ， $\{X_5\}$

可以写出故障树的布尔表达式：

$$T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5$$

### 2.4 故障树定量分析

故障树定量计算的任务就是要计算或估计顶事件发生的概率。要计算顶事件发生的概率，首要条件是必须了解底事件发生的概率，底事件发生的概率首先是机械设备的元件故障概率。

1) 已知故障间隔时间求底事件发生概率。

对于一般可修复系统，元件或单元的故障概率为 $\lambda$ ，即单位时间(或周期)故障发生的概率，它是元件平均故障间隔期(或称平均无故障时间，MTBF)的倒数。平均故障间隔时间是可修复部件的可靠性参数。它的度量方法为：在规定的条件和条件下，部件的寿命单位总数与故障总数之比。有如下公式：

$$\bar{T}_{BF} = \frac{1}{\lambda}$$

故障分布函数为：

$$f(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{BF}}\right)$$

2) 已知寿命分布求底事件发生概率。

由于部件的失效机理不同，不同部件具有不同的寿命分布形式。最常见的分布形式有指数分布、威布尔分布、正态分布等。即使不知道具体的故障分布函数，也可以通过对该型分布的参数估计求得某些特征量的估计值。

指数分布： $f(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$

正态分布：

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx$$

其中： $\mu$ 为位置参数， $\sigma$ 为标准差。

威布尔分布：

$$f(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

其中： $\alpha$ 为尺度参数； $\beta$ 为形状参数。

最后，在利用上述方法计算出底事件的故障分布函数(累积故障概率)之后，可以利用最小割集求出顶事件的发生概率为<sup>[4]</sup>：

$$P(T) = P(k_1 \cup k_2 \cup \dots \cup k_{N_k}) = \sum_{i=1}^{N_k} P(k_i) - \sum_{i < j=2}^{N_k} P(k_i k_j) + \sum_{i < j < k=3}^{N_k} P(k_i k_j k_k) + \dots + (-1)^{N_k-1} P(k_1 k_2 \dots k_{N_k})$$

式中： $k_i, k_j, k_k$ 分别为第 $i, j, k$ 个最小割集；通过对导弹控制系统各部件的分析，可得到控制系统各底事件的部件累积故障发生概率如表3。

表3 控制系统底事件概率计算表

底事件	分布	$\lambda/\alpha, \beta$	故障概率
$X_1$	指数	0.002	0.181 3
$X_2$	指数	0.001 5	0.139 3
$X_3$	威布尔	283.51, 2	0.117 0
$X_4$	—	—	0.091 3
$X_5$	—	—	0.100 4
$X_6$	指数	0.001	0.095 2

### 2.5 重要度分析

重要度是底事件的发生对顶事件发生的贡献，它是时间、故障、维修和系统结构的函数。工程人员可以按重要度排序进行监测、维修和发现故障，通过改进重要度较大的部件来提高系统的可靠性。

根据不同的情况,重要度有多种定义.常见的有概率重要度、结构重要度、关键重要度<sup>[5]</sup>等.在计算导弹控制系统中各部件的重要度时,主要分析概率重要度,进而可以通过改进设计来提高控制系统的稳定性,确定控制系统需要监控的部位,制定控制系统故障诊断时的核对清单等.

由故障树可知系统的不可靠度计算公式为<sup>[6]</sup>

$$f_s(t) = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)(1 - F_3)(1 - F_4) \cdot (1 - F_5)(1 - F_2 F_6)$$

由表3的数据,我们可以得知各底事件的寿命分布和故障发生概率,假设工作时间  $t = 100$  h,则底事件  $X_1$  的概率重要度为:

$$\Delta g_1(100) = \frac{\partial f_s(t)}{\partial f_1(t)} = 0.6130$$

同理可得:

$$\Delta g_2(100) = 0.6315; \Delta g_3(100) = 0.5684;$$

$$\Delta g_4(100) = 0.5523; \Delta g_5(100) = 0.5579;$$

$$\Delta g_6(100) = 0.4378.$$

### 3 结束语

在导弹武器系统等大型复杂武器系统的可靠性研究中,故障树分析法是一种良好的可视化分析工具,具有简

明、灵活、直观等优点,通过对系统进行的定量定性分析和重要度计算,发现和查明系统内各种固有的或潜在的危险因素,找出系统的薄弱环节,得出部件对系统可靠性的影响程度,为可靠性设计提供依据.但在实际使用过程中,故障树分析法存在工作量大、比较浪费时间的缺点,应该使用相关故障树分析软件<sup>[6]</sup>来提高方法的操作性.

### 参考文献:

- [1] 魏选平,卞树檀.故障树分析法及其应用[J].电子产品可靠性与环境实验,2004(8):43.
- [2] 郝杰忠,杨建军,杨若鹏.装备技术保障运筹分析[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] 陈金水,蔡佳昆,蔡惠明.利用矩阵运算实现故障树参数间转化[J].天津大学学报,2004(8):682.
- [4] 徐宗昌.保障性工程[M].北京:兵器工业出版社,2002.
- [5] 孙红梅,高齐圣,朴营国.关于故障树分析中几种典型重要度的研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2007(2):39.
- [6] 周海,赵熙萍,刘品.故障树分析软件研究[J].哈尔滨工业大学学报,2001(5):666.

(上接第2页)

### 3 结论

1) 利用雷达对贮存在4个不同地区弹药发射时的初速进行了测定以及计算,初速平均值在结果在  $122.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  到  $125.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,中间误差在  $1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  到  $1.66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间.

2) 利用秩和检验方法对测定结果进行了分析,贮存于北方地区与南方地区弹药的初速存在着一定的差别.

3) 与其他地区相比较,贮存于热带地区弹药的初速与中间误差有明显的变化.

### 参考文献:

- [1] 金志明.枪炮内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,2004.
- [2] Cayton L H. Chemical structural aging effects[R]. AD-A002836,1974.
- [3] 鲁健.MVR-1雷达在炮兵测速中的开发与应用[J].无线电工程,1995,25(1):51.
- [4] 高尔生,王金桃.秩和检验[J].上海实验动物科学,2001,21(1):60.
- [5] 苏金明,阮沈勇.MATLAB6.1实用指南[M].北京:电子工业出版社,2002.