

【武器装备】

引信安全系统信息控制逻辑分析^{*}

张贤彪,尚雅玲

(海军航空工程学院,山东 烟台 264001)

摘要:引信安全系统根据环境信息作出保险或解除保险的决策是一个对环境信息特征进行识别和提取的统计过程,同时是一个信息逻辑控制过程.对此构建安全系统信息控制逻辑模型并对模型安全性进行定量分析.分析结果表明,对于两道独立不可恢复的保险结构,无论是采取非顺序则故障保险还是非顺序则绝火控制,其安全性提高不明显;采用可恢复保险相当于加时间窗口控制,安全性提高较为明显.

关键词:引信安全系统;信息处理;控制逻辑;安全性分析

中图分类号:TJ430.3

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2010)01-0032-04

引信安全系统根据环境条件或特性作出保险或解除保险的决策即系统用阈值将环境信息转变为二进制变量,对环境信息特征进行识别和提取.安全系统经历实际物理环境具有不确定性和所有二项事件组合的逻辑性,其决策过程同时是一个逻辑控制过程.目前对引信安全系统安全性的研究主要集中于安全性设计方法^[1],安全性辨识、评价及控制分析^[2],安全性改造^[3],安全系统环境信息应用^[4-6]以及安全系统逻辑结构分析^[7].尚未见到从信息控制逻辑的角度对引信安全系统进行分析的报导.通过基于信息论的引信安全系统分析,构建安全系统信息控制逻辑模型并进行定量安全性分析.

1 基于信息论的引信安全系统分析

1.1 信源和识别体制的选择

环境信息作为信源,不同的弹种可利用的信源不同.如唯有小口径炮弹引信具有足够高的转速,可选择保险带或利用头部阻滞温度熔解易熔合金实现远距离解除保险以及利用弹丸转速的衰减实现自炸.导弹自身携带的电源为引信采用电气保险或机-电双保险提供了极有利的条件.

根据将环境信息转化为解除保险信号或动作的不同选择识别体制.同一环境信息有多种识别体制,如对于弹丸飞行中引信受到的空气动力这种环境信息可通过计算风翼的转数或通过涡轮发电机将空气动力转化为电信号来识别.同一种识别体制下有多种信源,如飞轮积分仪控制的保险机构根据采用齿条和离心齿弧的不同,其信源可以是直线惯性力或离心力.热力保险机构除利用火箭发动机热能外还可利用高速飞行中的气流摩擦热能解除保险.

1.2 单一识别体制的信源多特征提取

惯性制动力式保险机构同时提取直线惯性力幅值和持续时间两个特征.其中任一特征不满足阈值,则不解除保险.在保证可靠解除保险的前提下减轻离心子的重量并加大其行程也体现了信源多特征提取的思想.单一识别体制的信源多特征提取能较好地解决安全和可靠解除保险的矛盾,即信息识别的抗干扰能力和灵敏度的矛盾.

1.3 复合识别体制的多源特征提取

复合保险采用复合识别体制.如惯性离心综合保险机构利用后坐力和离心力两种信源解除保险.此种识别体制能实现安全系统在后效期以后解除保险.

1.4 信源特征存贮的识别体制

保险机构具有对信源特征存贮或记忆的功能.如美国M539引信中的拨叉扭簧等零件组成的第2个独立保险具有存贮信源特征(转速)的功能.引信部分解除保险时,只要弹丸转速低于“记忆”的转速—2 000 r/min^[8],拨叉又恢复至安全位置解除对回转体的锁定.不可恢复的保险也具有存贮信源特征功能.以杆式双行程保险为例.惯性杆下沉时上钢珠掉下并不再限制惯性杆.此时钢珠对后坐力这一信源特征存贮和记忆.出炮口时后坐力消失.惯性杆上升,上钢珠靠在杆的较细的部分,机构解除保险.

2 安全系统信息控制逻辑

用符号对引信安全系统进行抽象.符号含义为:带实心箭头的细实线表示环境信号的输入通道;带空心箭头的细实线表示控制信号输入通道,其上的开关 K_1 、 K_2 或 K_3 表示保险机构;带空心箭头的粗实线表示爆轰输出通道,其上的开关闭合表示系统解除保险.

* 收稿日期:2009-11-17

作者简介:张贤彪(1986—),男,湖北石首人,硕士研究生,主要从事引信安全系统分析和仿真技术研究.

将勤务处理的过程看成由一系列等间隔的区间组成并作如下假设:在各时间间隔中,每种解除保险环境信息出现的概率相同,每种解除保险环境信息最多只出现一次,若有 n 种解除保险环境信息,则出现概率分别设为 p_1 、 p_2 、 \dots 、 p_n ;所有零部件都正常工作.则引信在勤务处理中的安全状态可细分为完全未解除保险状态(保险状态)和部分未解除保险状态(半保险状态)^[7].文献[10-11]中将安全系统控制引信的状态分为安全状态、待发状态、故障保险状态和绝火状态.引信的这几种状态之间的转移是一个齐次马尔可夫过程. $t_0 \sim t_1$ 期间状态之间的转移概率为一步转移概率矩阵 P .

2.1 单一保险

单一保险机构一般由单一环境信息解除;有多个保险件但只响应一种环境的保险机构只能被认为是一种保险件;有些保险机构中多个保险件虽然响应不同环境信息,但不独立.独立保险件不受其它保险件的影响.以上3种单一保险类型的结构分别如图1中a)、b)和c)所示.3种结构具有相同的状态空间,其状态转换图如图d)所示.

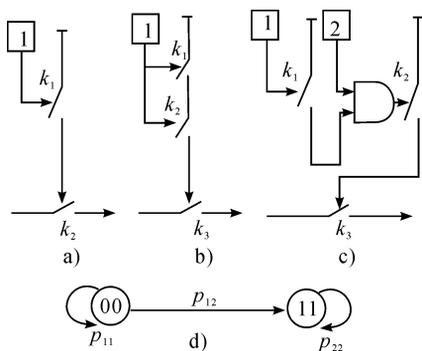


图1 单一保险

在贯彻 MIL - STD - 13116 前设计的美式引信(如 M509、M412)以及大部分前苏联引信采用 a) 结构.采用 b) 结构的有苏联中大口径榴弹用 B - 429 引信.引信的触发机构和隔离机构的保险均为后坐保险.这种结构的安全性较低,但由于仅用到一种环境信息,其通用性较强. B - 429 引信配用高初速度滑膛炮弹时仍然可靠作用.采用 c) 结构的有美国中大口径榴弹引信 M20 系列隔爆机构以及反坦克导弹引信 M114. M20 系列隔爆机构中雷管座偏离弹轴,平时被离心子锁住,离心子又被惯性锁锁住.这种结构的特点是当后坐保险失效,离心保险也同时失效,不符合 GJB373A - 1997《引信安全性设计准则》中冗余保险的要求.

单一保险状态空间 $I = \{00, 11\}$, 3 种结构的一步转移概率矩阵 P_a 、 P_b 和 P_c 分别为:

$$P_a = P_b = \begin{bmatrix} 1 - p_1 & p_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} 1 - p_1 p_2 & p_1 p_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 冗余保险

2.2.1 两道独立无顺序保险

无顺序表示两道独立保险出现的先后不影响解除保险,其结构如图2 a)所示.

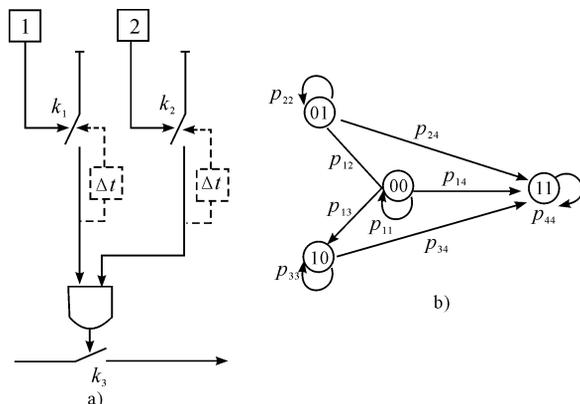


图2 两道独立无顺序保险

图2中,虚线框表示保险可恢复.两道独立无顺序保险又可分为两道保险均不可恢复、第一道保险可恢复以及两道保险均可恢复3种类型.大部分引信都至少有一个保险可恢复.第一种很少采用,其状态转换图如图2b)所示.前苏联 B - 350 弹底引信采用第2种结构.这种结构的特点是安全性不高,当第二道保险在勤务处理时提前作用,系统只剩一道保险.采用第3种结构的如美国地面炮榴弹引信 M739.这种结构的近弹安全性^[8]较高,其缺点是通用性不强,为了提高其通用信,两道保险的激励水平不会太高,这样很容易在在勤务处理过程中已解除了对转隔爆件的锁定.3种结构的一步转移概率矩阵 P_a 、 P_b 和 P_c 分别为:

$$P_a = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 - p_1 - p_2 & p_1(1 - p_2) & p_2(1 - p_1) & p_1 p_2 \\ p_1 p_2 & 0 & 1 - p_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - p_1 & p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - p_2 & 0 & p_2 \\ 0 & 0 & 1 - p_1 & p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_b = \begin{bmatrix} 1 - \frac{(1 + \lambda)p_1 p_2}{2} & \frac{(1 + \lambda)p_1 p_2}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} 1 - \lambda p_1 p_2 & \lambda p_1 p_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\lambda = \frac{\Delta t}{T}$. T 为时间间隔; Δt 为即 k_1 或 k_2 在解除保险后至复位的时间.

2.2.2 两道独立保险非顺序则故障保险

非顺序则故障保险表示两道保险按顺序解除保险,其结构如图3 a)所示.

图3中,虚线框表示保险可恢复.两道独立无顺序保险可分为两道保险均不可恢复、第1道保险可恢复以及两道保险均可恢复3种类型.第1种结构状态转换图如图3 b)

所示. 采用第 2 种结构的如美国 AIM-9B 以及 MK5Mod1 空-空导弹引信. 采用第 3 种的如美国“爱国者”大型面-空导弹, 相对于第 2 种, 第 3 种结构的安全系统具有完全可逆特性. 在纯机械式安全系统中, 这种“运动可逆”不仅能很好的解决勤务处理安全与发射时可靠解除保险的矛盾, 而且机构在装配时可对其性能百分之百地检验或调整. 在机电式安全系统(全电子式安全系统可视为直列式的机电式安全系统^[9])中利用该结构, 还可实现安全系统在解除保险和隔爆后利用指令信息完成恢复保险及隔爆的功能. 3 种结构的一步转移概率矩阵 P_a 、 P_b 和 P_c 分别为:

$$P_a = \begin{bmatrix} 1 - p_1 & p_1(1 - p_2) + \frac{p_1 p_2}{2} & \frac{p_1 p_2}{2} \\ 0 & 1 - p_2 & p_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P_b = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda p_1 p_2}{2} & \frac{\lambda p_1 p_2}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2 p_1 p_2}{2} & \frac{\lambda^2 p_1 p_2}{2} \\ 1 - \lambda & \lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

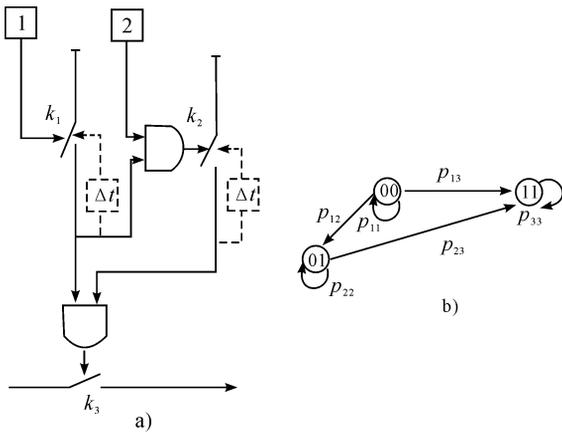


图 3 非顺序则故障保险

2.2.3 两道独立保险非顺序则绝火

这种保险结构中第 2 道保险不具有可恢复功能, 其结构如图 4 a) 所示. 当第 2 道保险先于第 1 道保险解除时, 系统进入绝火状态(如隔爆件与未解除的第 1 道保险互锁, 引信永远不会解除保险).

图 4 中, 虚线框表示保险可恢复. 两道独立无顺序保险可分为两道保险均不可恢复和第 1 道保险可恢复 2 种类型. 第 2 种结构状态转换图如图 4 b) 所示. 美国 AIM-9B 以及 MK5Mod1 空-空导弹引信采用第 1 种结构. 采用第 2 种结构的如前苏联 9K32M 触发引信以及 9Э210 弹头引信. 这种结构的逻辑是若第 2 道保险解除保险, 则系统处于待发状态或绝火状. 如果第 2 道保险是远距离解除保险, 则可实现近弹保险和故障保险. 相对于第 1 种, 第 2 种结构的状态空间中少了“01”状态. 绝火状态“10”转换为“11”和“00”的概率为零. 两者的一步转移概率矩阵 P_a 和 P_b 分

别为:

$$P_a = \begin{bmatrix} \left(\begin{matrix} 1 - p_1 - p_2 + \\ p_1 p_2 \end{matrix} \right) & p_1(1 - p_2) & \left(\begin{matrix} p_2(1 - p_1) + \\ \frac{p_1 p_2}{2} \end{matrix} \right) & \frac{p_1 p_2}{2} \\ 0 & 1 - p_2 & 0 & p_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P_b = \begin{bmatrix} 1 - p_2 & p_2 - \frac{\lambda p_1 p_2}{2} & \frac{\lambda p_1 p_2}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

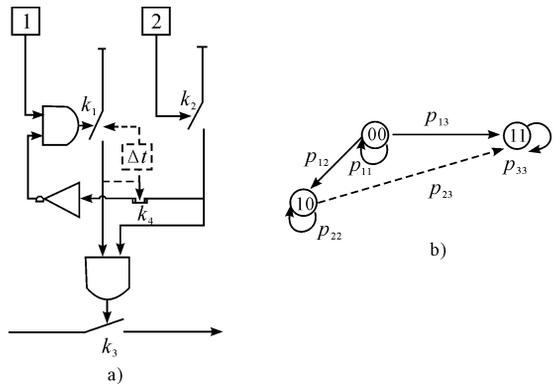


图 4 非顺序则绝火

2.2.4 三道独立保险时间窗加非顺序则绝火

全电子安全系统中逻辑控制电路根据环境信息特征与导弹飞行过程中的不同状态完成对 3 级保险开关(两级静态开关、一级动态开关)关闭时间和顺序的控制. 其时间窗个数可为 1 个或 2 个. 文中模型为 2 个时间窗结构. 三道保险不按预定顺序解除或不在规定的时间窗口内解除, 均视为非顺序并转为绝火状态. 其结构如图 5 所示.

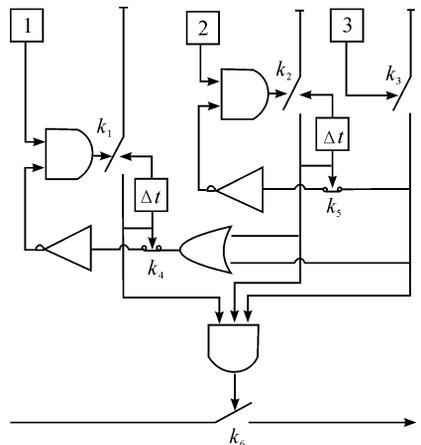


图 5 时间窗加非顺序则绝火

全电子安全系统需采用包括由微机电、微电子技术构成的各种信息传感器或探测装置、可编程器件和数字信号处理器、发火装置等技术. 这种结构要求环境信息感受装置与保险和解除保险装置分开. 其一步转移概率矩阵为:

$$P_a = \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^3 (1 - p_i) \left(1 - \frac{\lambda^2 p_1 p_2 p_3}{6} - \frac{\lambda^2 p_1 p_2 p_3}{6} \right) & & \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 信息控制逻辑定量分析

根据切普曼-柯尔莫哥洛夫方程^[2]可由一步转移概率求得 n 步转移概率。则 t_n 时刻解除保险概率 $\xi(n)$ 为:

$$\xi(n) = p_{1\alpha}^{(n)} = (p^n)_{1\alpha} \quad (\alpha = 2, 3, 4) \quad (12)$$

计算得不同逻辑结构的安全系统解除保险概率如表 1 所示。

表 1 不同逻辑结构的安全系统解除保险概率

信息控制逻辑结构		解除保险概率 $\xi(n)$
单一保险	单环境信息	9.95×10^{-3}
	双环境信息	1.00×10^{-6}
两道独立无顺序保险	保险均不可恢复	9.90×10^{-5}
	第一道保险可恢复	5.00×10^{-7}
	保险均可恢复	1.00×10^{-9}
两道独立保险非顺序则故障保险	保险均不可恢复	4.97×10^{-5}
	第一道保险可恢复	5.00×10^{-10}
	保险均可恢复	5.01×10^{-15}
两道独立保险非顺序则绝火	保险均不可恢复	4.95×10^{-5}
	第一道保险可恢复	4.98×10^{-10}
三道独立保险时间窗加非顺序则绝火		1.64×10^{-17}

从表中数据可知单一环境信息结构的安全性最差;双环境单一保险采用复合识别体制的多源特征提取思想,安全性得到明显提高。双环境单一保险与两道独立无顺序均不可恢复保险的安全性相近,这是因为假定所有零部件都正常工作。实际上零部件存在固有的失效率。若考虑到单一保险的失效率要高于两道独立保险的失效率,则双环境单一保险的安全性低于两道独立无顺序均不可恢复保险结构。现代引信在设计过程中极少采用单一保险结构。而且因为两道独立无顺序均不可恢复保险结构的安全性较低,也较少采用。

非顺序则故障保险接近于非顺序则绝火的安全性。两者的一步解除保险概率相等(均为 $\frac{p_1 p_2}{2}$)且前者虽然非顺序则转为故障保险,但在下一时刻解除保险的概率几乎为 0(当 $p_1 = p_2 = 1 \times 10^{-4}$ 时 $\frac{p_1 p_2}{2} = 5 \times 10^{-9}$, 相对于 t_n 时刻解除保险概率 $\xi(n) = 4.97 \times 10^{-5}$, 可认为 $\frac{p_1 p_2}{2} \approx 0$)。无顺序保险结构从“00”状态转为“10”状态并在下一时刻解除保险的概率为 $p_2(1 - p_1)p_1 \approx p_2 p_1$, 而非顺序则故障保险的概率

为 $\frac{p_1 p_2}{2}$ 。因此相对于无顺序保险结构,非顺序则故障保险结构的安全性约提高了一倍,其效果并不明显。因此当两道独立保险均不可恢复时,无论是非顺序则故障保险还是非顺序则绝火对安全性的提高均不明显。

当第 1 道保险可恢复时,相对于无顺序保险,非顺序则故障保险和非顺序则绝火相当于加时间窗控制,其安全性要高。因为在某时刻出现了环境信息 1, k_1 闭合;只有在 k_1 闭合的 Δt 内出现环境信息 2, 系统才解除保险,否则恢复到安全状态或处于绝火状态。而对于无顺序保险,此时虽然环境信息 1 失效,但系统处于半解除保险状态。无顺序保险及非顺序则故障保险结构中,当两道保险均具有可恢复特性时,相当于加两道时间窗,要比加一道时间窗的安全性高。三道独立保险时间窗加非顺序则绝火结构增加了独立保险个数,以牺牲系统正常作用率使安全性得到显著提高。

4 结束语

对全系统信息控制逻辑模型的定量安全性分析表明对于两道独立不可恢复的保险结构,无论是采取非顺序则故障保险还是非顺序则绝火控制,其安全性提高不明显;采用可恢复保险相当于加时间窗口控制,安全性提高较明显。这对引信安全系统提高安全性设计提供一定理论参考。经进一步研究安全系统对其它模块(如目标控制与发射控制模块以及爆炸序列的控制)有利于改进安全系统信息控制逻辑模型。

参考文献:

- [1] 路荣先. 引信系统安全性设计中的“三防”原理[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(1): 1-3.
- [2] 杏林, 孙强, 高敏, 等. 引信全寿命周期安全性分析及标准体系研究[J]. 探测与控制学报, 2004, 26(6): 13-16.
- [3] 王雨时. 引信安全系统及安全性现状与发展对策分析[C]//中国兵工学会第十五届引信学术年会. 贵州: [出版者不详], 2007.
- [4] 聂伟荣, 席占稳, 张扬. 引信环境信息应用理论和方法研究[C]//中国兵工学会第十五届引信学术年会. 贵州: [出版者不详], 2007.
- [5] 李豪杰, 张河. 引信环境特征分析及其在安全系统中的应用探讨[C]//中国兵工学会第十五届引信学术年会论文集. 贵州: [出版者不详], 2007.
- [6] 张健. 引信系统理论与复杂性科学[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4): 1-7.
- [7] 施坤林, 谭惠民. 引信安全系统逻辑结构的安全性分析[J]. 兵工学报, 1993, 11(4): 40-46.
- [8] 马宝华. 引信构造与作用[M]. 北京: 北理工大学出版社, 1983.
- [9] 《美国军用手册》编写组. 美国军用手册[K]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [10] 马宝华. 现代引信的控制功能及特征[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(1): 1-4.
- [11] 纪斌义, 李孝玉, 郑波, 等. 海岛环境下某引信贮存寿命[J]. 四川兵工学报, 2009(2): 62-64.