文章编号：1001-1455(2014)01-0111-04

自毁装置的安全性和可靠性*

秦栋泽[1,2]，范宁军[2]
（1. 中北大学机电工程学院，山西 太原 030051；
2. 北京理工大学机电学院，北京 100081）

摘要：为了研究集束弹药自毁装置的安全性与可靠性，分析和评价自毁装置设计，对自毁装置进行了理论抽象，建立了自毁装置安全性失效模型；引入信息论方法，建立了抽象自毁装置顺序控制起爆信息输出量和顺序时间窗控制起爆信息输出量模型；对典型的 M85 子弹药引信、XM1161 引信、M230SD 引信安全性及可靠性进行了分析。理论分析表明，M230SD 引信安全性及可靠性优于 XM1161 引信、M85 子弹药引信，与实验结果一致。

关键词：爆炸力学；安全性与可靠性；顺序控制；自毁装置；顺序时间窗控制
中图分类号：O389；TJ413　　**国标学科代码**：1303599　　**文献标志码**：A

降低集束弹药未爆弹率是目前的关注热点之一，在《特定常规武器公约》框架下，对于《集束弹药议定书（草案）》提出的加装自毁装置（不同于发火装置）降低未爆弹率，目前已经基本达成共识[1-2]。秦栋泽等[1]采用可靠性框图方法探讨了不同时机启动实现高效自毁问题，认为自毁装置采用一道保险或在抛撒时启动自毁效率高，而有学者对自毁装置仅一道保险或在抛撒时启动是否会带来弹药引信本身安全性问题尚有疑虑。本文中，尝试通过理论建模和部分实验结果，说明经过合理的设计可以保证自毁装置采用一道保险或在抛撒时启动不会降低其安全性，如可利用起爆信息量大，能提高其起爆可靠性。

1 安全性建模

由于自毁装置主要目的是解决未爆弹问题，需要避免瞎火，同时不能由此引发安全性问题，导致可靠起爆和弹药安全性的矛盾非常突出。自毁装置存在起爆信息识别率和起爆信息干扰度之间的矛盾。无论选择何种识别方法设计自毁装置，总会出现两类错误。第一类是自毁预定条件不存在时，由于干扰的存在，自毁启动威胁弹药安全，这个概率为干扰度 P_{e0}；第二类是自毁预定条件存在，而自毁装置判断为不存在，这个概率为误识率 P_{e1}。第一类错误会导致引信的安全问题，在自毁装置的错误指令下，可能出现早炸。第二类错误会导致瞎火。在引信自毁装置设计中，这两类问题所带来的危害不同，由于缺乏先验概率，自毁装置起爆信号检测不宜采用最小错误概率准则和最小平均风险准则，在设计和评价环境中采用奈曼-皮尔逊（Neyman-Pearson）准则较合理。即，保持第一类错误概率 P_{e0} 为固定的允许值的同时，使第二类错误概率 P_{e1} 最小。这种准则兼顾了安全性和可靠性两大性能，为各种类型的自毁装置安全性分析建立了统一的评价标准。根据自毁装置的设计准则，自毁装置的安全性指标规定为必须满足环境干扰度指标 α。一般自毁装置由环境识别器、保险器、状态控制器、起爆元件组成，自毁装置可能有 4 种安全失效模式。第一种，环境识别器失效，保险器、状态控制器、起爆元件均可靠；第二种，保险器发生安全性失效、状态控制器工作可靠、起爆元件工作可靠；第三种，状态控制器失效、起爆元件工作可靠；第四种，起爆元件原发性失效。因此自毁装置安全失效率的计算式为：

$$P_{e0}^{SD}=P_{e0}^{E}R^{S}R^{T}R^{D}+P_{e0}^{S}R^{T}R^{D}+P_{e0}^{T}R^{D}+P_{e0}^{D} \tag{1}$$

式中：P_{e0}^{SD} 为自毁装置失效率；P_{e0}^{E} 为环境识别器安全失效率；P_{e0}^{S} 为保险器的安全失效率；P_{e0}^{T} 为状态控制

* **收稿日期**：2012-05-22；**修回日期**：2012-08-31
基金项目：引信动态特性国防科技重点实验室基金项目（30200122510002）
作者简介：秦栋泽（1981— ），男，博士，讲师。

器安全失效率;P_{e0}^{D} 为爆炸元件的原发性安全失效率;R^{S} 为保险器的可靠度;R^{T} 为状态控制器的可靠度;R^{D} 为爆炸元件的可靠度。

为了研究不同结构原理的自毁装置,对自毁装置进行了理论抽象。自毁装置本质输出起爆信息,起爆信息是从环境信源中提取一定量的信息并转变为信号,自毁装置要达到规定的可靠性指标,就有一个必须获得的最小信息量 $I_{\min}$,若自毁装置获取的信息量大于最小信息量,则性能可能趋于更优,自毁可靠性高。

2 起爆信息输出量模型

2.1 起爆信息输出量模型

自毁装置的实质,是在引信出厂到战斗部作用于目标的全寿命周期 T 中,选择对应的唯一的抛撒主发火失败后,输出起爆信号起爆爆炸元件。定义自毁所必须处理的最小信息量 $I_{\min}$ 等于从引信所经历的 N 次操作中选择不可逆抛撒过程的熵 H_0,即:

$$I_{\min}=H_0 \tag{2}$$

$$H_0=-\sum_{i=1}^{N}P_i\log_2 P_i \tag{3}$$

式中:N 为引信所经历的操作总次数;P_i 为第 i 次操作为抛撒过程的概率。

由于安全性比可靠性指标苛刻,所以优先考虑安全性指标[3]。N 是随机变量,要考虑一个自毁装置的安全性总是将问题转化为多个自毁装置的安全失效率,由此自毁装置的安全性指标 α 相当于自毁装置在$[\alpha^{-1}]$次操作中,其环境识别器只能有一次将环境干扰判断为启动条件,

$$N=[\alpha^{-1}] \tag{4}$$

式中:$[X]$表示不大于 X 的最大正整数。

考虑对安全性最不利条件,认为 P_i 等概率分布,即 $P_i=1/N$,

$$I_{\min}=-\left(\log_2\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N}=\log_2 N=\log_2\left[\frac{1}{\alpha}\right] \tag{5}$$

2.2 顺序识别法模型

现有的自毁装置输出起爆信息识别方法主要有两种,一种为顺序识别,即利用 M 个特定的阈值开关获取信息,开关按特定的顺序动作所包含的信息量。顺序识别方法包含的开关状态数为 $M!$,在这 $M!$ 个状态中,只有一种状态对应于自毁预定条件的存在,假设 X_i 状态发生的概率为 $P(x_i)(i=1,2,\cdots,M!)$,则顺序识别方法所获取的信息量 I_M 为:

$$I_M=-\sum_{i=1}^{M!}P(x_i)\log_2 P(x_i) \tag{6}$$

考虑最不利条件,顺序识别方法的所有 $M!$ 个状态等概率发生:

$$P(x_1)=P(x_2)=\cdots=P(x_{M!}) \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{M!}P(x_i)=1 \tag{8}$$

$$P(x_1)=\frac{1}{M!} \tag{9}$$

将式(9)代入式(6),得:

$$I_M=\log_2 M! \tag{10}$$

2.3 顺序时间窗模型

顺序时间窗识别方法,即 M 个开关按预定顺序并在一定的时间区域内闭合,才判断为自毁预定条件存在。M 个开关所具有得状态数为$(M-1)!\ 2^{M-1}$,其中$(M-1)!$ 为 M 个开关顺序闭合所拥有的状态数,2^{M-1}为每一种顺序闭合时,$M-1$ 个开关是否处于规定时间区内所处的状态(减 1 是因为有一个开关为时间基准)。假设 X_i 状态发生的概率为 $P(x_i)(i=1,2,\cdots,(M-1)!\ 2^{M-1})$,则顺序时间窗识别

方法所获取的信息量 I_M 为：

$$I_M = -\sum_{i=1}^{(M-1)!\ 2^{M-1}} P(x_i)\log_2 P(x_i) \tag{11}$$

考虑最不利条件，顺序时间窗识别方法的所有状态等概率发生：

$$P(x_1) = P(x_2) = \cdots = P(x_{(M-1)!\ 2^{M-1}}) \tag{12}$$

由于

$$\sum_{i=1}^{(M-1)!\ 2^{M-1}} P(x_i) = 1 \tag{13}$$

$$P(x_1) = \frac{1}{(M-1)!}2^{1-M} \tag{14}$$

将式(14)代入式(11)，得：

$$I_M = M - 1 + \log_2(M-1)! \tag{15}$$

3　实例分析

选取 3 个典型引信，分别为 M85 子弹药引信(自毁装置二道保险)、XM1161 引信(自毁装置一道保险)和 M230SD 引信(自毁装置抛撒启动)，进行分析。安全性与可靠性的结果见表 1，P_T 为靶场测试起爆率。

表 1 安全性与可靠性结果比较

Table 1 The results of safety and reliability

引信	环境识别器	保险器	状态控制器	爆炸元件	$P_{e0}^{SD}/10^{-6}$	I_M	$P_T/\%$
M85 子弹药引信	飘带	飘带	滑块	雷管	3.95	$\log_2 2$	<94.72
XM1161 引信	飘带	飘带	滑块、转子	雷管	3.92	$\log_2 6$	94.72
M230SD 引信	电池	电池	处理器、电容	雷管	3.92	$2+\log_2 2$	99.83

M85 子弹药引信自毁装置作用原理：子弹抛撒后，在空气气动力作用下，飘带打开，拉力保险解除对滑块的约束，在离心力作用下，离心保险解除对滑块的约束，滑块运动到位后，自毁锤点燃延期管，延时后点燃雷管，子弹药自毁[4]。XM1161 引信自毁装置作用原理：子弹抛撒后，在空气气动力作用下，飘带打开，拉力保险解除对滑块的约束，滑块释放转子，转子启动后点燃延期管，延时后点燃雷管，子弹药自毁[5]。M230SD 引信自毁装置作用原理：子弹抛撒后，电池上电，处理器定时，定时时间到后对发火电容充电，子弹药自毁[6]。

按照相关规定，要求安全系统失效率不超过 10^{-6}，即假设任一器部件的安全失效率不超过 10^{-6}，各元件的可靠度都为 0.99。依据公式(1)，可求得 XM1161 引信、M230SD 引信安全失效率低于 M85 子弹药引信，M85 子弹药引信安全失效率为 3.95×10^{-6}，XM1161 引信、M 230SD 引信安全失效率为 3.92×10^{-6}。M85 子弹药引信在使用过程中安全失效率满足要求，而限于安全性失效率在 10^{-6} 这个数量级，很难通过实验验证，理论计算说明，合理设计的自毁装置仅一道保险或在抛撒时启动不一定带来弹药引信本身安全性问题。因此，XM1161 引信和 M 230SD 的引信安全性也应能满足要求。且一般电子元件的可靠度要高于机械元件，因此实际情况下，M230SD 安全失效率应该低于 XM1161 引信。

M85 子弹药引信、XM1161 引信起爆信息利用采用顺序识别法(由于延期药管点燃后无法施控，不属于顺序时间窗方法)，M230SD 引信采用顺序时间窗识别法具有时间窗口(定时后仍有电容充电过程，不同于延期管直接起爆雷管)，M85 子弹药引信开关为飘带和滑块，采用顺序识别法，XM1161 引信开关为飘带、滑块和转子，采用顺序识别法，M230SD 引信采用顺序时间窗识别法，开关为电池、处理器和电容。简易计算，M230SD 引信起爆信息输出量大于 XM1161 引信，XM1161 引信起爆信息输出量大于 M85 子弹药引信，与文献[1]采用可靠度框图的起爆效率高低排序结果一致，说明在器件本身可靠性相同时，能够采用的起爆信息量大时，起爆可靠性高。依据真实的靶场测试数据，M230SD 引信的可靠性

也高于 XM1161 引信、M85 子弹药引信，一方面由于器件本身的可靠度高，另一方面也说明，由于其起爆信息利用量大，减小了环境干扰，引信装置起爆度高。

4 结 论

初步完成了自毁装置的抽象，建立了自毁装置安全性理论计算模型，在一定假设下计算结果说明，自毁装置一道保险和自毁装置在抛撒时启动不一定降低弹药引信本身的安全性。在自毁装置的研究中引入了信息论方法，建立了起爆信息输出量计算模型，对有关实例进行了分析，验证了理论模型的合理性，同时说明，在器件本身可靠性相同时，若起爆信息利用量大，引信装置起爆度高。

参考文献：

[1] 秦栋泽，吴炎煊，范宁军，等. 降低集束子弹药未爆弹率的技术路线分析[J]. 探测与控制学报，2011，33(5)：24-28.
Qin Dong-ze, Wu Yan-xuan, Fan Ning-jun, et al. The analysis on the technical route for lowering the unexploded probability of the cluster submunition[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(5): 24-28.

[2] CCW. Draft protocol on cluster munitions[R]. 2010.

[3] 高敏，马宝华. 引信安全系统环境识别器的信息原理[J]. 北京理工大学学报，1992，12(2)：52-57.
Gao Min, Ma Bao-hua. Information principle involved in environment discrimination devices in fuze safe and arming systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1992, 12(2): 52-57.

[4] L3 Communications BT Fuze Products. Low cost p-SDF for ICM rounds[C]// 51st Annual Fuze Conference. USA: 2007.

[5] L3 Communications BT Fuze Products. M234 / M235 / M236 self-destruct fuzes[C]// 48th Annual Fuze Conference. USA: 2004.

[6] Strickland S M. Adding an electronic self destruct mode to the destruct mode to the M230 fuze[C]// 47th Annual Fuze Conference. USA: 2003.

Security and reliability of a self-destructive device*

Qin Dong-ze[1,2], Fan Ning-jun[2]

(1. *College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;
2. *School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The self-destructive device in cluster munitions was theoretically abstracted to establish a security failure model for investigating its security and reliability and evaluating the corresponding design. Based on informationism, two models were proposed for the output parameters of the detonation informations with sequential control and time-window sequential control, respectively. And the security and reliability of the M85 submunition fuze were anzlyzed as well as the XM1161 fuze and the M230SD fuze. The theoretical analyse shows that the security and reliability of the M230SD fuze is better than those of the XM1161 fuze and the M230SD fuze. It is in agreement with the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; security and reliability; sequential control; self-destructive device; time-window sequential control

* Received 22 May 2012; Revised 31 August 2012
Corresponding author: Qin Dong-ze, apo1981@126.com

（责任编辑 丁 峰）