

文章编号: 1006-9941(2008)05-0550-03

特定条件下的可靠性试验信息熵

蔡瑞娇, 董海平

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 从成败型产品的可靠性试验信息熵、有裕度的高可靠性火工品可靠性试验结果的特殊性, 研究了火工品在试验结果全部成功的条件下, 可靠性试验信息量和可靠性试验信息熵的等效性, 并用 GJB6478-2008 规定的方法评估了 20 种不同类型火工品的可靠性, 结果均与大样本步进法评估结果一致。

关键词: 军事化学与烟火技术; 可靠性试验信息熵; 信息量; 成败型产品; 裕度

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

1 引言

强化试验、恶化试验、裕度试验和极限试验等经常是火工品领域用来考核产品是否满足性能指标的检验方法, 但许多时候这些都还仅仅是定性的方法, 只是在引入信息熵概念后才解决了计算验证试验点参数难的问题, 使小样本方法有了定量化依据。

熵是随机变量不确定性的描述, 通信领域定义信源给出信息 a_i 的自信息量 $I(a_i) = -\log_a p_i$, 这一随机变量的数学期望 $H(X) = E[I(a_i)]$ 为信息熵, 作为信源发出信息平均不确定性的度量^[1]。可靠性试验的目的是获取产品的可靠性信息, 对产品可靠性进行评估或验证。可靠性试验信息也是随机变量, 提出可靠性试验信息熵概念^[2]是对产品试验获得可靠性的度量, 也是对产品总体可靠性的度量。其特征是产品的可靠性越高, 不确定性越小, 信息量越小, 当可靠性达到 100% 时, 信息量为零; 反之, 可靠性减少, 信息量增大。如果确认了在可靠度大的点试验一定量样本所得的信息熵达到要求, 就可计算低可靠度点的试验方案, 使少量样本试验得到的信息熵也满足要求, 这就是信息熵等值原理。

GJB6478-2008《火工品可靠性计量-计数综合评估方法》的评估原理提出“建立相同置信水平下的信息量等值方程”, 即用信息量度量可靠性试验信息。这个信息量和信息熵有着内在联系, 本文从成败型产品的可靠性试验信息熵、有裕度的高可靠性火工品可靠性试验结果的特殊性, 研究了特定条件下的试验信息熵, 及其和产品可靠性之间的关系, 表明在成败型产

品样本试验全部成功的条件下, 可靠性试验信息量和可靠性试验信息熵是等效的。

2 火工品可靠性试验信息量

在信息论中, 信源是信息的来源, 是产生消息或消息序列的源泉。在通信系统中信源可用一个样本空间及其概率测度-概率空间来描述, 记为 $X: [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 。
 $P: [p_1, p_2, \dots, p_n]$ 。

其中, p_i 为信源发出消息 a_i 的概率, 它所含有的信息量称为自信息量, 其值用其概率对数的负值表示, 即

$$I(a_i) = -\log_a p_i \quad (1)$$

可靠性信息用于消除用户对产品质量与可靠性的不确定性。类似地, 可以把试验前的产品看成信源, 不同的试验结果看成试验者接收到的信息。由于试验结果不需要再经过传输, 因此从试验获得的信息类似通信领域无干扰情况, 试验者从样本试验结果获得的可靠性信息量直接表征批产品的可靠性。但由于此信息是从试验结果获得的, 除和通信信息量类同外, 还有其特殊性, 因此称之为可靠性试验信息量。类似信息论中信源发出的信息, 每个样本试验获得的可靠性试验信息量可定义为 $I(x) = -\ln R$, 其中 R 为试验成功的概率, 即可靠度。

火工品属成败型产品, 对单个火工品进行试验, 假设其在试验刺激量 x 处的可靠度为 R_x , 试验结果或者成功(概率为 R_x), 或者失败(概率为 $1 - R_x$), 记为 x_i 。在相同的条件下完成 n 个火工品的试验, 成功数为 n_1 , 失败数为 n_2 , $n = n_1 + n_2$, 则 n 个火工品试验获得的总可靠性试验信息量为:

$$I(x_1, x_2, \dots, x_n) = -n_1 \ln R_x - n_2 \ln(1 - R_x) \quad (2)$$

对于高可靠性的火工产品, 在试验刺激量 x 处的可靠度为 R_x , 则单个产品试验成功获得的可靠性试验信息量为 $-\ln R_x$; 若试验 n 个产品无一失败, 则 n 个产

收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-09-10

作者简介: 蔡瑞娇(1937-), 女, 博导, 从事火工燃爆产品可靠性研究。
e-mail: cairuijiao@sina.com

品试验后获得的总可靠性试验信息量为 $-n \ln R_x$ 。

3 成败型产品的可靠性试验信息熵

可靠性试验信息熵是对产品试验获得的平均可靠性信息量的度量。当成败型产品试验成功概率为可靠度 R_x 、失败概率为 $1 - R_x$ 时,其 n 个样本试验后获得的总可靠性试验信息量为式(2),则可靠性试验信息熵为:

$$TH(x) = -\frac{1}{n} [n_1 \ln R_x + n_2 \ln(1 - R_x)] \quad (3)$$

式中, n_1 为成功数, n_2 为失败数。

对于火工品这类高可靠性产品来说,可靠性试验大多是零失败的情况,这时试验 n 发产品获得的总可靠性试验量为 $-n \ln R_x$, 则其可靠性试验信息熵可定义为:

$$TH(x) = -\ln R_x \quad (4)$$

从式(4)可看出,在试验零失败的情况下,可靠性试验信息熵等于单发产品试验获得的可靠性试验信息量。

4 有裕度的高可靠性火工品可靠性试验的特殊性

4.1 有裕度的高可靠性火工品可靠性水平

有裕度的高可靠性成败型产品是指产品设计时要求可靠性有裕度,即 $M > 1$,且可靠度在 0.99 以上的产品。它们在可靠性试验时经常出现零失效。经试验验证得到 20 种不同类型火工品步进法大样本试验结果为 $M \geq 1.17$,表 1 列出了部分火工品步进法大样本试验测定的实际可靠度下限值^[4]。这些火工品当年定型时绝大部分未要求规定可靠性指标,近年来根据不同使用状态分别规定为 0.99、0.995 和 0.999 不同的可靠性水平,现都按 0.999 对比,也均大于指标值,说明对火工品规定发火可靠性设计裕度系数 $M > 1$ 符合火工品可靠性实际水平。

鉴于火工品有裕度和高可靠性的特点,其可靠性试验一般是零失败,以 GJB376《火工品可靠性评估方法》来评估时,一般也要求零失败。这时,样本试验的

可靠性试验信息熵为式(4)。该式反映了当火工品样本的可靠性试验结果中失败数 $f = 0$ 时的可靠性试验信息熵,这时 n 个样本的试验结果代表了批产品的平均可靠性水平,即批产品总体的可靠性水平。根据可靠性试验信息量的定义,可靠性试验信息熵与单发产品试验成功获得的可靠性试验信息量相等。

表 1 部分产品大样本方法计算可靠度下限值

Table 1 Reliability limit of some products calculated by large samples method

product name	reliability value		product name	reliability value	
	index	limit		index	limit
a stab detonator	0.999	0.999997	an electric igniter	0.999	0.999968
a strike promer cap	0.999	0.999980	an electric-strike primer	0.995	0.999999
a stab primer cap	0.999	0.999999	an electric igniter	0.999	0.999999
a strike primer	0.999	0.999996	an electric primer	0.999	0.999999
a cannonball primer	0.999	0.999999	an electric explosive igniter	0.999	0.999999
an electric igniter	0.999	0.999999	an electric detonator	0.999	0.999999

4.2 用 GJB6478 - 2008 验证有裕度的高可靠性火工品可靠性

4.2.1 评估试验方法

(1) 按 GJB6478 - 2008《火工品可靠性计量-计数综合评估方法》规定的程序进行,分为三个步骤^[5]:

① 进行 3 组升降法试验,分别求出 3 组 $\hat{\mu}_j$ 及 $\hat{\sigma}_j$, 并求得 $\hat{\mu}_j$ 的平均值 $\bar{\mu}$, 和对 3 组刻度参数 $\hat{\sigma}_j$ 进行一致性检验及分别对每组刻度参数进行纠偏后求出的平均值 $\bar{\sigma}^*$ 。

② 对刻度参数 $\hat{\sigma}_j$ 通过一致性检验的产品求发火可靠度裕度系数,

③ 对裕度系数 $M > 1$ 的产品,由可靠性试验信息量等值原理,求验证试验方案 (n_l, x_l) , 然后进行计数试验,按结果判断产品是否达到可靠性指标。

(2) 大样本用 GJB/Z377A 的步进法求得可靠性指标对应的刺激量区间估计上限 $\hat{x}_{0.999}$ 和技术指标值相比。

4.2.2 验证试验结果

共评估 20 种不同类型火工品,部分对比结果见表 2。

表 2 GJB6478 方案和步进法方案对比试验结果

Table 2 Comparison test results between GJB6478 and large samples method

serial number	product name	technical index			GJB6478 method				run-down method		assessment result			
		γ	R	x_H	n_l	x_l	n	$x_{0.999U}$	pass or fail	M	small sample	large sample	small sample	large sample
1	a stab detonator	0.90	0.999	8 cm	22	6.5 cm	2200	6.65 cm	√	√	1.18	1.20		
2	a strike primer cap	0.90	0.999	10 cm	22	7.8 cm	2800	8.02 cm	√	√	1.19	1.25		
3	an electric igniter	0.90	0.999	700 mA	22	523 mA	2000	488 mA	√	√	1.20	1.43		
4	an electric igniter tube	0.95	0.999	5 A	29	2.68 A	2000	2.09 A	√	√	2.18	2.39		
5	an elecetric matchr	0.90	0.999	12 V	22	9.05 V	2300	8.63 V	√	√	1.36	1.39		
6	a stab primer cap	0.90	0.999	7 cm	22	3.9cm	1600	3.23	√	√	2.04	2.16		
7	an electric-strike primer	0.90	0.999	4000 mA	22	533 mA	2400	536.8	√	√	6.70	7.45		

从表2可以看出,所试验产品的可靠性都达到了指标要求,并且有一定的裕度;采用GJB6478与大样本步进法评估结果一致,且前者得到的 M 值略小,符合可靠性评估应略微保守的原则。

5 结论

(1) 有裕度的高可靠性火工品的可靠性试验,在失败数 $f=0$ 时,可靠性试验信息量等于可靠性试验信息熵。

(2) GJB6478规定的方法为满足可靠性试验信息量等值,验证试验必须要求失效数 $f=0$ 。

(3) 验证试验结果证明,按GJB6478和大样本步进法对比评估结果一致,求得的裕度略小于大样本方法的结果,符合可靠性评估原则,表明GJB6478-2008《火工品可靠性计量-计数综合评估方法》可用于火工品可靠性评估。

参考文献:

- [1] 李贤平. 概率论基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 蔡瑞娇, 柳维旗, 董海平. 关于试验信息熵[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 204-207.
CAI Rui-jiao, LIU Wei-qi, DONG Hai-ping. Study on test information entropy [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 204-207.
- [3] 陈向新, 孙薇薇. 简析信息熵[J]. 宜春学院学报(自然科学), 2002, 12(6): 13-14.
CHEN Xiang-xin, SUN Wei-wei. Parsing information entropy [J]. *Journal of Yichun University (Natural Science)*, 2002, 12(6): 13-14.
- [4] 中国兵器科学技术报告. 火工品小样本可靠性评估方法试验验证研究[R]. 北京理工大学, 2007.
China Ordnance Science Technology Report. Test verification study on method of assessing reliability of initiating devices with small samples [R]. Beijing Institute of Technology, 2007.
- [5] GJB6478-2008. 火工品可靠性计量-计数综合评估方法宣贯讲义[S]. 北京理工大学火工燃爆产品可靠性与失效分析中心. 2008.

Reliability Test Information Entropy under the Special Condition

CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Reliability test information entropy of pass-fail product and particularity of high reliability product with margin were studied. Results show that reliability test information entropy is equivalent to reliability test information quantity under the condition of zero failure. The assessment results of 20 kinds of initiating devices with GJB6478 are consistent with those with run-down method.

Key words: military chemistry and pyrotechnics technique; reliability test information entropy; information quantity; pass-fail product; margin

(上接 549 页)

Radiofrequency Sensitivity of Hot-bridge Electric Explosive Device

CHEN Ming-hua, ZHANG Guo-an, LU Rui-qing, XING Li-ping

(Ordnance Institute of Technology, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The effect of radiofrequency on three different hot-bridge electric explosive devices was studied by experiment and calculation. The sensitive frequency were measured using conduction method, and the radiofrequency sensitivity was tested and calculated in the condition of sensitive frequency based on the up-down method. The sensitive frequencies are 0.4 GHz through detection test of 30 samples for each electric explosive device; the fire powers are 2.818 W, 0.428 W and 0.897 W at 50% fire/no fire through radiofrequency sensitivity test of 30 samples for each electric explosive device, and the radiofrequency sensitivity decreases along with the increase of electric resistance of hot-bridge.

Key words: military chemistry; hot-bridge electric explosive device; radiofrequency; sensitivity; up-down method