

文章编号: 1006-9941(2007)01-0079-04

## 火工品可靠性评估试验信息熵等值方法

蔡瑞娇, 翟志强, 董海平, 温玉全

(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:** 为解决评估高价值、高可靠性要求火工品试验周期长、费用高的问题, 提出一种基于试验信息熵等值原理的火工品可靠性评估方法, 解决了 GJB376 所需的样本量过大和 GJB377 评估结果缺乏验证的问题。应用该方法能以 300 发以下的样本量实现对 0.999 可靠度要求的火工品的可靠性评估, 实际产品的验证试验表明其评估结果与大样本方法相符, 证明应用本方法是可行的。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 火工品; 可靠性; 试验信息熵

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

### 1 引言

现有关于火工品可靠性评估方法的国军标有两个: 一个是 GJB376-87《火工品可靠性评估方法》<sup>[1]</sup>, 另一个是 GJB/Z377A-94《感度试验用数理统计方法》<sup>[2]</sup>。这两个方法均有优点和不足。GJB376 规定的试验方法简便, 结果直观; 但因它仅仅利用了计数试验数据, 没有利用其它试验信息, 因此所需试验样本量过大。用它来评估高价值、高可靠性要求的火工品时试验周期长, 费用高, 研制单位和用户均难以承受。采用 GJB/Z377A 评估可靠性时, 利用序贯试验数据求得分布参数外推的方法, 降低了试验样本量, 但因分布参数估计的误差及模型选择错误都会使评估结果造成较大的误差。Wu C. F. J.<sup>[3]</sup> 指出, 当可靠度指标在 [0.2, 0.8] 区间时, 分布模型对可靠度估计的影响较小。但当可靠度指标在 [0.1, 0.9] 区间之外时, 分布模型对可靠度估计的影响非常大, 而火工品可靠度指标全部在 [0.1, 0.9] 之外, 因此分布模型对火工品可靠性评估的影响很大。并且, GJB/Z377A 没有再用计数试验验证, 难以验证评估结果的准确性。

从可靠性信息利用的角度考虑, 这两个方法的不足是因为没有综合利用各种试验数据, 所以不是样本量过大, 就是评估结果得不到验证。

本文以 GJB376 规定的信息量为基准, 运用试验信息熵等值基本原理, 以单个试验样本获得更多的可靠性信息, 使少量样本试验的可靠性试验信息熵值和

GJB376 试验信息熵值相等, 达到既降低样本量, 评估结果又可信的目的。

### 2 试验信息熵等值原理与方法

#### 2.1 试验信息熵等值原理

熵在概率论中是描述随机变量取值不确定程度的数字特征<sup>[4]</sup>。随机变量  $X$  取值不确定程度的大小, 反映了它所包含的信息量的多少。成败型可靠性试验中, 信息可取自产品在一定条件下试验成功所带来的信息。成败型产品试验信息熵可定义为<sup>[5,6]</sup>:

$$TH = -\ln R \quad (1)$$

式中,  $R$  为产品的可靠度值。

试验信息熵  $TH$  的值表示单个产品试验成功所获得的可靠性信息量的大小,  $TH$  值大, 表示获得的可靠性信息量大;  $TH$  值小, 获得的可靠性信息量小。

本方法用升降法试验求得分布参数并通过分布函数确定一个可靠度相对较低的点, 在该点进行规定数量的计数试验, 这样以增加每次试验所获得的信息量, 使总信息量等于按照 GJB376 进行试验所包含的可靠性信息量的前提下, 达到减少试验样本量的目的。可靠度  $R(x)$  与刺激量  $x$  的关系如图 1 所示。其中:

$f(x)$  为感度分布概率密度函数。

$Y_B$  为技术指标规定的刺激量点。

$Y_A$  为与技术指标规定的刺激量对应的试验信息熵等值试验点。

$X_B$  为满足在指定置信水平下, 达到按照 GJB376 评估可靠度指标的最小试验点。根据火工品的裕度设计方法, 一般该点小于技术指标规定的刺激量, 即  $X_B < Y_B$ ;  $Y_B$  与  $X_B$  的比值为可靠度设计裕度系数。

$R_A$  为与技术指标规定的刺激量对应的试验信息

收稿日期: 2005-11-17; 修回日期: 2006-05-17

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

熵等值试验点处的可靠度。

$R_B$  为技术指标规定的刺激量处的可靠度。

由  $R_A < R_B$ , 则  $(-\ln R_A) > (-\ln R_B)$ , 可得  $TH_A > TH_B$ , 即在具有高失效概率(低可靠度)的 A 点试验, 比在低失效概率(高可靠度)的 B 点试验的单个样本, 能获得更高的可靠性信息量。

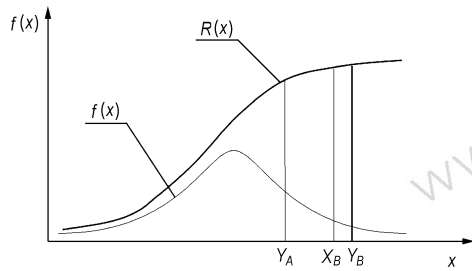


图1 可靠度和刺激量关系图

Fig. 1 Relationship between reliability and stress level

如果选择某一低可靠度的刺激量进行试验, 根据试验信息熵可加性原则, 少量样本所取得的试验信息熵值可以等于 GJB376 规定的样本量得到的试验信息熵值, 即

$$n_A(-\ln R_A) = n_B(-\ln R_B) \quad (2)$$

式中,  $n_B$  为根据可靠性指标要求按照 GJB376 规定的评估方法需要进行的试验量,  $n_A$  为本方法中在与技术指标规定的刺激量试验信息熵等值点处的试验量。

该式表示在高可靠度的技术指标规定的刺激量点  $Y_B$  做  $n_B$  发试验, 可以用在低可靠度的等值点  $Y_A$  做  $n_A$  发试验来代替。

## 2.2 刻度参数纠偏

由 GJB/Z377A 规定的序贯感度试验方案得到的试验结果确定感度分布参数时,  $\mu$  的估计是无偏的, 而  $\sigma$  的估计是有偏的<sup>[7]</sup>。这势必影响可靠度估计的准确性, 因此纠偏问题成为本方法的关键问题。对此, 国外文献提出了修正系数<sup>[8]</sup>, 我国在长期使用中发现升降法试验中标准差  $\sigma$  的估计值系统地偏低, 也给出了一个经验的修正项<sup>[7]</sup>。

本文根据 10000 次升降法计算机模拟试验结果和 128 组实际同一产品测试结果统计分析, 发现标准差  $\sigma$  估计值系统地偏小, 其真正含义是指标准差  $\sigma$  估计值多次的平均值比真值小, 而对于每组升降法数据, 只有约 2/3 是偏小的, 还有约 1/3 是偏大的。研究表明, 刺激量个数  $S$  是影响  $\sigma$  估计值偏离真值程度大小的主要因素<sup>[9]</sup>。本文在此基础上, 根据计算机模拟结果采用  $\beta$  分位数确定了在不同试验样本量、不同刺激量

个数情况下的纠偏系数(见表 1 和 2)。采用  $\beta$  分位数的目的是为了保证  $\sigma$  估计值纠偏后大于真值的概率至少为  $(1-\beta)$ 。通过多组升降法数据求得的  $\sigma$  的纠偏后的结果与采用大样本试验求得的  $\sigma$  进行比较后, 表明这种纠偏方法是合理的。

表 1 正态分布纠偏系数表

sample size	$S=4$	$S=5$	$S=6$	$S=7$
30	0.555	0.785	1.07	1.515
50	0.577	0.764	0.936	1.193

表 2 逻辑斯蒂分布纠偏系数表

sample size	$S=4$	$S=5$	$S=6$	$S=7$
30	0.6	0.838	1.179	1.663
50	0.599	0.802	0.99	1.293

## 2.3 试验信息熵等值评估方法

已知技术指标规定产品的刺激量为  $Y_B$ , 可靠性指标为置信水平  $\gamma$ , 可靠度  $R$ 。

(1) 进行升降法试验, 求出感度分布参数的极大似然估计

假设产品感度分布服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 进行 3 组各 30 或 50 发产品的升降法试验, 分别求出对应每组升降法试验数据的参数估计值  $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$ , 并求出  $\hat{\mu}$  的 3 组平均值  $\bar{\mu}$ , 然后分别对 3 组  $\hat{\sigma}$  按表 1 所列的纠偏系数进行纠偏, 再求出纠偏后的 3 组平均值  $\bar{\sigma}^*$ 。

如果被评估产品已有升降法数据, 这项可不作。

(2) 确定  $X_B$

由  $\gamma, R$  从 GJB376 查取  $f=0$  处的  $n$ 。由于试验的独立性, 若以  $P$  表示一次试验成功的概率, 则可由  $P^n$  与  $\gamma$  的关系解得  $P$ , 即  $X_B$  对应的可靠度  $R_{X_B}$ 。

查标准正态分布得  $R_{X_B}$  点的分位数  $u_{R_{X_B}}$ 。由上述求得的  $\bar{\mu}, \bar{\sigma}^*$ , 可得  $X_B$  为:

$$X_B = \bar{\mu} + u_{R_{X_B}} \bar{\sigma}^* \quad (3)$$

(3) 与技术指标规定的刺激量  $Y_B$  对应的试验信息熵等值试验点  $Y_A$  的确定

先由  $u_{R_{Y_B}} = \frac{Y_B - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}^*}$  求得  $u_{R_{Y_B}}$ , 根据分位点  $u_{R_{Y_B}}$ , 查

标准正态分布表得  $Y_B$  点对应的可靠度为  $R_{Y_B}$ 。

再由生产方和使用方根据产品设计、工艺、性能、管理等可靠性信息确定计数试验样本量  $n_A$ , 也可根据研究

结果采用本方法推荐的计数试验样本量(见表 3)。由试验信息熵等值基本方程求出  $R_{Y_A}$ , 然后查标准正态分布表得分位数  $u_{R_{Y_A}}$ , 则可求得与  $Y_B$  点试验信息熵等值试验点  $Y_A$ :

$$Y_A = \hat{\mu} + u_{R_{Y_A}} \hat{\sigma}^* \quad (4)$$

(4) 试验验证与结果判定

在刺激量  $Y_A$  处, 取确定的试验样本量  $n_A$  发进行试验, 全发火, 则停止试验, 判产品满足可靠性指标; 若不是全发火, 重复  $n_A$  发试验, 若全发火, 则仍判产品满足可靠性指标; 否则判产品不满足可靠性指标要求。

(5) 当产品满足可靠性指标时, 还可通过下式计算产品可靠性设计裕度系数  $k$ 。

$$k = \frac{Y_B}{X_B} = \frac{Y_B}{\hat{\mu} + u_{R_{X_B}} \hat{\sigma}^*} \quad (5)$$

表 3 试验信息熵等值评估方法计数试验样本量推荐表  
Table 3 Test number for assessment method based on test information entropy equivalence

$R$	$\gamma$	$n_A$
0.99	0.90	4
	0.95	5
0.999	0.90	22
	0.95	29

3 验证试验

51A 针刺雷管是子母弹多用途子弹引信用的改型雷管, 要求可靠性指标为  $\gamma = 0.90, R \geq 0.999$ , 发火能量为球重 7 g, 落高 8 cm。

3.1 用本方法评估

按本方法的要求, 进行了 3 组升降法试验, 第一组升降法出现了 6 步, 第二、三组出现了 5 步, GJB/Z377A-94 要求升降法试验在 4~7 步之间, 因此此三组升降法试验都符合 GJB 的要求。原始数据列于表 4 中。

表 4 3 组升降法试验数据

Table 4 Three groups of up-and-down test data

stress level /cm	group 1		group 2		group 3	
	response number	non-response number	response number	non-response number	response number	non-response number
2.2	0	3	0	7	0	2
2.6	3	9	7	12	2	13
3.0	9	7	12	5	13	9
3.4	7	4	5	1	8	2
3.8	4	2	1	0	1	0
4.2	2	0				

根据经验和感度分布研究结果, 选其感度分布为对数正态分布。利用极大似然估计原理求出参数估计值(见表 5)。

表 5 3 组升降法参数估计结果

Table 5 Estimated parameters of three groups of up-and-down test data

No.	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
1	1.12	0.26
2	1.02	0.15
3	1.08	0.13

求出  $\hat{\mu}$  的 3 组平均值  $\bar{\mu}$ , 然后分别对 3 组  $\hat{\sigma}$  按表 1 所列的纠偏系数进行纠偏, 再求出纠偏后的 3 组平均值  $\bar{\sigma}^*$  为:

$$\bar{\mu} = 1.07, \bar{\sigma}^* = 0.22$$

根据可靠性试验信息熵等值原理计算得发火上限等值点为 6.5 cm。

在 6.5 cm 处试验产品 22 发, 全部发火, 表明该产品的可靠度达到了置信水平  $\gamma = 0.90$ , 可靠度为  $R = 0.999$  的要求。

另外, 由式(3)计算, 可得发火可靠度最小设计试验点为 6.9 cm, 而发火指标为 8 cm, 则得出该产品的发火上限的设计裕度系数为 1.16。

3.2 用大样本方法对比评估

由于步进法试验数量较大, 且其参数估计较为稳定, 因此在实际工程中也把步进法称为大样本方法。大样本方法是根据步进法试验数据估计分布参数, 然后求出满足可靠性指标的刺激量上限, 若其上限小于该产品的技术指标规定的刺激量, 则也可判定该产品达到了可靠性指标要求。

对本产品进行了 2400 发的步进法试验, 并采用极大似然原理估计了感度分布的参数, 得到极限百分位点的区间估计的置信上限为:

$$\hat{x}_{0.999U} = 6.65 \text{ cm}$$

由于发火指标为 8 cm, 则可判断发火可靠度达到了  $R = 0.999$  的要求。由此可以看出, 用大样本方法评估结果与本方法一致。由大样本方法求得该产品的发火限的设计裕度系数为 1.2, 而用本方法求得的设计裕度系数为 1.16, 比大样本方法略微保守。

4 结论

本方法将数理统计有关理论与信息熵理论相结合, 采用试验信息熵等值原理实现火工品可靠性评估,

大幅度地降低了试验样本量。通过本方法与大样本方法的对比评估,本方法评估结果与大样本方法相符,且略微保守,符合可靠性评估原则,验证了本方法的正确性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] GJB376 - 87. 火工品可靠性评估方法[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,1987.  
GJB376 - 87. Assessment method of reliability of initiating devices [S]. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense,1987.
- [2] GJB/Z377A - 94. 感度试验用数理统计方法[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,1994.  
GJB/Z377A - 94. Sensitivity tests, statistical methods for [S]. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense,1994.
- [3] Wu C F J. Efficient sequential designs with binary data[J]. *Journal of the American Statistical Association*,1985,8:974 - 984.
- [4] 李贤平. 概率论基础[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [5] 刘炳章. 航天火工装置可靠性的优化试验法:最大熵试验法[J]. 导弹与火工技术,2001,(1):23 - 38.  
LIU Bing-zhang. The maximum entropy test method; The optimized test method for reliability of initiating devices of spaceflight [J]. *Technology of Missile and Pyrotechnics*,2001,(1):23 - 38.
- [6] 刘炳章. 小子样验证高可靠性的可靠性评估方法及其应用[J]. 质量与可靠性,2004,(1):19 - 22.  
LIU Bing-zhang. Assessment method of high reliability with small samples and its application[J]. *Quality and Reliability*,2004,(1):19 - 22.
- [7] 刘宝光. 敏感性数据分析与可靠性评定[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [8] MIL-STD-331B. Environmental and Performance Test for Fuze and Fuze Components. 1989.
- [9] 张天飞,蔡瑞娇,董海平,等. 升降法试验下标准差 $\sigma$ 估计的Monte Carlo分析[J]. 火工品,2004,(2):43 - 47.  
ZHANG Tian-fei, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, et al. Study on  $\sigma$  estimation in Up-Down sensitivity test with Monte Carlo method[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2004,(2):43 - 47.

## Assessment Method for Reliability of Initiating Devices Based on Test Information Entropy Equivalence

CAI Rui-jiao, ZHAI Zhi-qiang, DONG Hai-ping, WEN Yu-quan

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

**Abstract:** A new method, based on test information entropy equivalence, for assessing reliability of initiating devices is presented. The method can be used to solve the problems which exist in GJB376 and GJB377. Less than 300 products are sufficient for estimating reliability of 0.999 by this new method and the result is consistent with that of the large sample assessment method. The verification test shows the method is suitable for reliability assessment of initiating devices.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics technique; initiating device; reliability; test information entropy

(上接 75 页)

## Performance of Liquid Smoke Agents Based on Titanium Tetrachloride

CHEN Xin<sup>1</sup>, PAN Gong-pei<sup>1</sup>, CAO Chuan-xin<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Engineering Institute of Engineering Corps., PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** Acidity and infrared attenuation ability of water, methanol and ammonia using titanium tetrachloride as liquid smoke agent were studied in detail. In small trunk, the smog of water and methanol is acid and the smog of 10% - 20% ammonia is almost neutral; infrared attenuation ability of all these smog is satisfactory. In large trunk, the smog formed by 14% ammonia with titanium tetrachloride with proportion of 13 : 1 to 16 : 1 is neutral; the target-temperature increases from 50 °C to 198 °C, the 3 - 5  $\mu\text{m}$  infrared radiation rate of the neutral smog falls from 74% to 20%, the 8 - 12  $\mu\text{m}$  infrared radiation rate of the neutral smog maintains upon 95%.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; smoke agent; titanium tetrachloride; acidity; infrared attenuation ability; ammonia; methanol