

文章编号: 1006-9941(2008)05-0553-03

## 火工品可靠性计量-计数评估方法的有效性研究

董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜

(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:** 采用 Monte Carlo 方法研究了 GJB376 规定的用计数数据估计火工品可靠度的方法和已建立的计量-计数评估方法在试验方面的等效性, 根据评定准则采用这两种方法判定试验结果合格的接收率最大误差小于 1%。对 20 种不同类型的火工品及两种人为设定为不合格产品, 采用计量-计数法和步进法进行了对比试验研究, 两种方法得到的可靠性评估结果一致。分析结果表明, 计量-计数评估方法与 GJB376 规定的用计数数据估计火工品可靠度的方法等效, 工程应用可行, 对评估高可靠性的火工品, 能大幅度降低样本量。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 火工品; 可靠性; 评估; 计量-计数法

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

### 1 引言

火工品的可靠度, 一般要求在置信水平 0.95 或 0.90 情况下不低于 0.999。如果按 GJB376 - 1987<sup>[1]</sup> 评估, 需要试验 2996 或 2303 发产品而无一发失效。这对于很多航天航空或其它武器装备用高价值火工品, 需要大量的研制经费和较长的研制时间。为解决 GJB376 规定的用计数数据估计火工品可靠度所需样本量过大的问题, 刘炳章等<sup>[2]</sup> 基于功能裕度系数提出一种针对航天火工品可靠性验证的“最大熵试验法”; 荣吉利等<sup>[3]</sup> 利用裕度思想提出了一种加严条件下的火工机构的可靠性评估方法。这些方法为火工品高可靠性评估指明了方向。针对有设计裕度<sup>[4]</sup> 的火工品, 蔡瑞娇等<sup>[5-6]</sup> 建立了火工品计量-计数可靠性综合评估方法, 即先运用计量法试验估计感度分布参数<sup>[7]</sup>, 对参数进行纠偏<sup>[8]</sup>, 再按可靠性试验信息熵等值原理计算计数试验刺激量, 并在该刺激量处进行一定数量的计数试验, 根据计数试验结果评定产品的可靠性。采用该方法, 评估可靠性要求不低于 0.999 的火工品, 所需样本量可少于 300 发, 与 GJB376 规定的用计数数据估计火工品可靠度所需样本量相比, 降低了样本量。本文采用 Monte Carlo 方法, 模拟了计量-计数法与 GJB376 大样本法试验, 分别获得了根据评定准则两种方法判定试验结果合格的接收率, 分析了两种方法的等效性; 并对多种机械激发火工品及电激发火工品的可靠性进行了对比研究。

### 2 GJB376 评估法和计量-计数评估法等效性的 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo 模拟试验方法又称为概率统计模拟方法, 是以概率统计理论为指导的一类数值计算方法<sup>[9-10]</sup>。按照 Monte Carlo 方法的原理, 模拟火工品感度试验需要产生临界刺激量和试验刺激量两种变量序列。临界刺激量的产生要服从选定的概率分布模型, 在试验中是随机的, 属于随机变量; 试验刺激量由试验方案确定。

假设产品技术指标规定的刺激量为  $x_H$ , 按 GJB376 方法在零失败情况下所需样本量为  $n_{x_H}$ ; 在计量-计数法中, 根据产品的感度分布参数和可靠性试验信息熵等值原理, 在低刺激量为  $x_L$  计算得到的对应的计数试验样本量为  $n_{x_L}$ 。

在 Monte Carlo 模拟试验中, 先产生  $[0, 1]$  区间上的均匀分布随机数, 再通过分布函数的反函数变换和产品的感度分布模型得到一系列随机临界刺激量  $x_c$ <sup>[11]</sup>。试验刺激量是上述的  $x_H$  和  $x_L$ 。计算机产生一个  $x_c$  对应着一次试验。当按 GJB376 试验时, 比较  $x_c$  与  $x_H$ , 若  $x_c < x_H$ , 记为成功, 否则记为失败, 重复试验  $n_{x_H}$  次, 记为一组, 若这一组试验全部成功, 则试验成功组数加 1; 当按计量-计数法试验时,  $x_L$  为根据感度分布和可靠性试验信息熵等值方程计算的等值试验刺激量, 比较  $x_c$  与  $x_L$ , 若  $x_c < x_L$ , 记为成功, 否则记为失败, 重复试验  $n_{x_L}$  次, 记为一组, 若这一组试验全部成功, 则试验成功组数加 1。各自重复试验  $N$  组。记在  $x_H$  处试验成功组数在  $N$  组中占的比例为接收率  $r_H$ ; 同样记  $r_L$  为在  $x_L$  处试验时成功组数所占的百分比。为进一步减小随机性的影响, 对每个产品重复进行了 5 次, 每次  $N$  组。本文的模拟是针对某电雷管和某针刺雷管进行的, 模

收稿日期: 2008-07-21; 修回日期: 2008-09-10

作者简介: 董海平 (1969 -), 男, 讲师, 博士, 从事火工燃爆产品可靠性评估与设计技术研究。e-mail: dhpphd@bit.edu.cn

拟试验结果及两种方法的接收率分别见表 1 和表 2。

表 1 某电雷管计算机模拟试验对比结果

Table 1 Simulation results of an electronic detonator with GJB376 and variables-attributes method

test parameters	GJB376					variables-attributes method				
	$x_H = 700 \text{ mA}, n_{x_H} = 2996$					$x_L = 505 \text{ mA}, n_{x_L} = 29$				
serial number	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
success group number	10000	10000	10000	10000	9999	9968	9982	9972	9970	9966
receptance/%	100	100	100	100	99.99	99.68	99.82	99.72	99.70	99.66
$\Delta = \left  \frac{r_H - r_L}{r_H} \right  \%$ (maximum)						0.34				

表 2 某针刺雷管计算机模拟试验对比结果

Table 2 Simulation results of a stab detonator with GJB376 and variables-attributes method

test parameters	GJB376					variables-attributes method				
	$x_H = 8 \text{ cm}, n_{x_H} = 2303$					$x_L = 6.5 \text{ cm}, n_{x_L} = 22$				
serial number	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
success group number	9949	9947	9946	9946	9952	9971	9974	9967	9958	9973
receptance/%	99.49	99.47	99.46	99.46	99.52	99.71	99.74	99.67	99.58	99.73
$\Delta = \left  \frac{r_H - r_L}{r_H} \right  \%$ (maximum)						0.28				

从表 1 和表 2 可以看出,对某电雷管和某针刺雷管分别采用 GJB376 和计量-计数法评估, Monte Carlo 模拟试验结果表明,它们试验结果合格的接收率之间的最大误差分别为 0.34% 和 0.28%, 由于 Monte Carlo 模拟试验的随机性,这种接收误差属于正常波动,因此可以认为 GJB376 和计量-计数法对火工品可靠性的评估结果等效,两者在工程上均可采用。

### 3 GJB376 评估法和计量-计数评估法等效性的验证试验

#### 3.1 现役产品试验验证

步进法试验数量大,参数估计较为精确,实际工程中步进法试验结果反映了产品的可靠性。将步进法试验评估结果和计量-计数法试验评估结果进行比较,可以反映出计量-计数法试验评估结果的准确性。

以某电雷管为例,阐明步进法试验评估方法和计量-计数法试验评估方法。

某电雷管可靠性指标为置信水平  $1 - \alpha = 0.95$ , 可靠度  $R = 0.999$ , 发火能量为  $x_H = 700 \text{ mA}$ 。

步进法试验: 先根据步进法试验数据估计感度分布参数,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,则可判定该产品达到了可靠性指标要求。对该电雷管进行步进法试验,试验样本量为 1800 发,并采用极大似然原理估计感度分布参数,得到满足可靠性指标的刺激量上限为:  $\hat{x}_{0.999U} = 424 \text{ mA}$ 。由于实际的技术指标规定的刺激量  $x_H = 700 \text{ mA}$ , 则可判断发火可靠度达到了  $R = 0.999$  的要求。

计量-计数法: 先进行三组升降法试验,分别求出产品感度分布参数  $\hat{\mu}, \hat{\gamma}$ , 并对  $\hat{\gamma}$  进行纠偏,再按可靠性试验信息熵等值原理计算计数试验点  $x_L$ , 最后在  $x_L$  处进行计数试验,由试验结果判定产品是否达到可靠性指标。求得该电雷管三组的平均值  $\bar{\mu}$  和三组  $\hat{\gamma}$  纠偏后的估计值  $\hat{\gamma}^*$  的平均值  $\bar{\gamma}^*$  为  $\bar{\mu} = 346.53 \text{ mA}, \bar{\gamma}^* = 17.31 \text{ mA}$ 。从可靠性指标  $1 - \alpha = 0.95, R = 0.999$ , 可以确定计数试验样本量  $n_{x_L} = 29^{[6]}$ , 由可靠性试验信息熵等值方程,求得  $x_L = 505 \text{ mA}$ 。取 29 发产品在 505 mA 处进行发火试验,结果为全部发火,则可判定该产品发火可靠性达到了置信度  $1 - \alpha = 0.95$ , 可靠度  $R = 0.999$  的指标。

本文采用步进法和计量-计数法,进行了多种电能激发火工品和机械能激发火工品的对比试验,部分结果见表 3。

表 3 计量-计数法和步进法对比试验结果

Table 3 Comparative test results of variables-attributes method and run-down method

product name	technical index			run-down method	variables-attributes method		result	
	$\gamma$	$R$	$x_H$		$n_{x_L}$	$x_L$	run-down method	variables-attributes method
an electric detonator	0.95	0.999	700 mA	1800	29	505 mA	✓	✓
a stab detonator	0.90	0.999	8 cm	2200	22	6.5 cm	✓	✓
a primer	0.90	0.999	8 cm	9550	22	5.6 cm	✓	✓
an igniter	0.90	0.999	700 mA	2000	22	523 mA	✓	✓
an electric igniter	0.95	0.999	5 A	2000	29	2.68 A	✓	✓

从表 3 可以看出,采用计量-计数法的评估结果与步进法评估结果一致。由于计量-计数法需要 3 组升降法试验,每组 50 发,共 150 发,加上计数试验样本量 22 发或 29 发,总计需要样本量 172 发或 179 发,比步进法极大地降低了样本量。

#### 3.2 不合格产品试验验证

由于我国火工品设计裕度大,根据上述两种方法的评估结果表明,现役产品可靠性都达到了指标要求。本文提出了“人为设定不合格品试验法”来进一步验证本计量-计数法评估的正确性。在对产品进行了步

进法试验获得接近真实的感度分布模型的基础上,人为缩小施加于火工品的激发能量,使合格品变为不合格品,然后采用计量-计数法进行评估,验证其在产品可靠性不合格情况下与大样本试验结果的相符程度。

某针刺火帽可靠性指标为(0.90,0.999),技术指标规定的刺激量7 cm。通过步进法试验确定其能达到可靠性指标的刺激量上限为3.04 cm。某电点火头可靠性指标为(0.90,0.999),技术指标规定的刺激量60 V,通过步进法试验确定其能达到可靠性指标的刺激量上限为58.52 V。分别降低两种产品的刺激量,设定其为不合格产品,采用计量-计数法进行评估试验。根据感度分布和可靠性试验信息熵等值方程计算出相应的等值刺激量,然后在该处进行多组计数试验,每组试验22发,记录全发火组数,把全发火组数占所有计数试验组数的百分比记为计量-计数法接收率。步进法接收率按在相应的人为设定刺激量处进行2303发试验全成功的概率来计算。结果见表4。

表4 设定为不合格产品的对比试验验证结果

Table 4 Comparative test results of unqualified products assumed artificially

product name	stress level assumed artificially	stress level with equivalent information entropy	attributes test group number	all-fire group number	receptance of variables-attributes method	receptance of run-down method
a stab primer cap	2.98 cm	2.48 cm	10	7	70	79.4
	2.80 cm	2.20 cm	10	5	50	31.6
	2.75 cm	2.10 cm	14	1	7.14	10.0
	2.57 cm	1.80 cm	14	0	0	0.000097
an electric igniter	56.4 V	45.3 V	3	2	66.7	79.4
	52.3 V	42.0 V	9	1	11.1	31.6
	50.6 V	40.6 V	4	0	0	10.0
	46.9 V	37.2 V	2	0	0	0.000097

从表4的两者的接收率比较可以看出,对于不同的人为设定刺激量,两种方法的接收率的变化趋势是一致的,随着人为设定刺激量降低,即离达到可靠性指标越远,则能通过可靠性评估的概率也越低。表中两种方法的接收率数值上有差异,是由于受实际试验样本量的限制,计数试验组数不能太多所造成的。如果不断增加计数试验组数,其计量-计数法接收率数值上也会逐渐接近步进法接收率。

## 4 结论

从 Monte Carlo 模拟和实际产品的对比试验两方面研究了火工品可靠性计量-计数综合评估方法和大样本评估方法的等效性,表明采用计量-计数综合评估方法可行,

结果可信。对于评估高可靠性指标要求的成败型产品,采用计量-计数综合评估方法可节省大量的试验样本量。

## 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.
- [2] 刘炳章,丁同才. 小子样验证高可靠性的可靠性评估方法及其应用. 质量与可靠性[J]. 2004(1): 19-22.  
LIU Bin-zhang, DING Tong-cai. Assessnebt method and its application on validating high reliability with small samples [J]. *Quality and Reliability*, 2004(1): 19-22.
- [3] 荣吉利,白美,刘志全. 加严条件下火工机构可靠性评估方法[J]. 北京理工大学学报,2004,24(2): 118-120.  
RONG Ji-li, BAI Mei, LIU Zhi-quan. Reliability assessment of pyrotechnical devices under rigorous conditions [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(2): 118-120.
- [4] GJB1307A-2004. 航天火工装置通用规范[S]. 国防科学技术工业委员会. 2004.
- [5] 蔡瑞娇,董海平,温玉全,等. 信息熵在成败型产品高可靠性评定中的应用[C]//中国航空学会可靠性工程专业委员会第十届学术年会论文集. 国防工业出版社,2006: 254-258.  
CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, WEN Yu-quan, et al. Application of information entropy on assessment of high reliability of pass-fail products [C] // Paper Collections of the 10th Annual Seminar of Reliability Committee of Aviation Association of China. Press of Industry for National Defense, 2006: 254-258.
- [6] 蔡瑞娇,翟志强,董海平,等. 火工品可靠性评估试验信息熵等值方法[J]. 含能材料,2007,15(1): 79-82.  
CAI Rui-jiao, ZHAI Zhi-qiang, DONG Hai-ping, et al. An assessment method of reliability of initiating explosive devices based on test information entropy equivalency [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 79-82.
- [7] 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.
- [8] 董海平,温玉全,蔡瑞娇. 升降法试验标准差估计的偏差研究[C]//中国航空学会可靠性工程专业委员会第十届学术年会论文集. 国防工业出版社,2006: 259-263.  
DONG Hai-ping, WEN Yu-quan, CAI Rui-jiao. Study on error of estimator of standard deviation in up-down method test [C] // Paper Collections of the 10th Annual Seminar of Reliability Committee of Aviation Association of China. Press of Industry for National Defense, 2006: 259-263.
- [9] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M]. 北京:北京工业出版社,1988.
- [10] 肖茹云. 概率统计计算方法[M]. 天津:南开大学出版社,1994.
- [11] 董海平,蔡瑞娇,严楠,等. 计算机模拟升降法试验随机数产生与统计检验[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1): 49-53.  
DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao, YAN Nan, et al. Generation and verification of random numerical series for computer simulation sensitivity Test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(1): 49-53.

(下转 559 页)

## 参考文献:

- [1] Buchler R J. Confidence interval for the product of two binomial parameters[J]. *Journal of America Statistical Association*, 1957, 52 (280): 482 - 493.
- [2] Barry T Neyer. A D-optimality-based sensitivity test[J]. *Technometrics*, 1994, 36(1): 61 - 70.
- [3] Chao M T, Fuh C D. Bootstrap method for the up and down test on pyrotechnology sensitivity analysis[J]. *Statistica Sinica*, 2001, 11: 1 - 21.
- [4] 温玉全, 洪东跑, 王玮. 基于试验熵的火工品可靠性评估理论与方法研究[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(6): 553 - 556.
- Wen Yu-quan, HONG Dong-pao, WANG Wei. Study on theory and method of reliability assessment of explosive initiator based on testing entropy[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(6): 553 - 556.
- [5] Langlie H J. A reliability test method for "One-Shot" items [R]. Technical Report U-1792, Third Edition, Aeronutronic Division of Ford Motor Company, Newport Beach, CA, 1965.
- [6] Jeff Wu. Efficient sequential designs with binary data[J]. *Journal of America Statistical Association*, 1985, 80: 974 - 984.
- [7] SHI Ning-zhong, JIANG Hua. Normal means with unknown Maximum likelihood estimation of isotonic variances[J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 1998, 64(2): 183 - 193.
- [8] Ayer M, Brunk H D, Ewing G M, et al. An empirical distribution function for sampling with complete information[J]. *Ann Muth Statist*, 1955, 26(4): 641 - 647.

## Order Restricted Analysis of Reliability Tests for Explosive Initiator

HONG Dong-pao<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>, WEN Yu-quan<sup>2</sup>

(1. Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

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

**Abstract:** A new analysis method of reliability tests for explosive initiator was proposed to improve the analysis of reliability tests for explosive initiator with small sample size. The reliability data were collected by Langlie test, and then were processed to be order restricted with the isotonic regression. The new parameters estimates were obtained from the order restricted data. The simulation was used to compare the efficiency of the new estimates with the traditional estimates, and the result shows that the new estimate of location parameter is better. The present method was used to assess the high reliability of one initiating device with small sample size. And the feasibility and applicability are validated, compared with the run-down method.

**Key words:** systems engineering; explosive initiator; reliability; Langlie; order restriction

(上接 555 页)

## Validity of Variables-Attributes Assessment Method for Reliability of Initiating Explosive Devices

DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao, MU Hui-na

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

**Abstract:** By Monte Carlo, the equivalence between GJB376 method and variables-attributes assessment method was studied. According to reliability assessment rule, it is required that the maximum error of acceptance between two methods is less than 1%. Twenty kinds of qualified and unqualified products assumed artificially were assessed with variables-attributes method and run-down method respectively. The conclusions from two methods are consistent. Results show that variables-attributes assessment method is equivalent to GJB376 method and the variables-attributes method is feasible for assessing high reliability of initiating explosive devices with small samples.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics technique; initiating explosive device; reliability; assessment; variables-attributes method