

文章编号: 1006-9941(2007)06-0608-04

# 火工品可靠性评估小样本试验设计方法

董海平, 蔡瑞娇

(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:** 为了实现火工品高可靠性指标的小样本评估, 研究了火工品可靠性评估小样本试验设计方案, 给出了基于试验信息熵的小样本试验设计方法。采用该方法对用于 H/DRI31 引信头部击发机构的 54 号针刺雷管可靠性进行了试验与评估。结果表明, 在试验刺激量 4.5 cm 处试验 22 发产品, 全部发火, 评估结果与采用 1800 发大样本试验验证结果一致, 该产品达到了置信水平为 0.90, 可靠度为 0.999 的可靠性指标。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 火工品; 可靠性评估; 试验信息熵; 试验设计

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

## 1 引言

可靠性试验的目的是获取产品的可靠性信息, 以此对产品可靠性进行评估<sup>[1]</sup>。火工品的特点是可靠性要求高, 可靠性设计裕度大。如新研制的火工品一般要求在置信水平  $\gamma = 0.90$  或  $\gamma = 0.95$  下可靠度  $R$  要达到 0.999。对于火工品可靠性设计裕度, GJB1307A《航天火工装置通用规范》<sup>[2]</sup> 规定火工装置最小输入能量至少应比全发火能量高 20%。根据北京理工大学课题组在国军标《火工品计量-计数综合评估方法》验证试验项目中的 14 种火工品发火可靠性的大样本测定结果, 发火可靠度裕度估计平均值为 1.51。若按 GJB376-1987 在技术指标规定的条件验证其是否满足可靠性指标, 不仅需要的样本量太大, 研制周期也难以保证; 而且没有考虑产品的可靠性裕度, 与产品的实际可靠性相差大, 为此急需设计小样本试验方法。

刘炳章在航天火工装置的可靠性评估中引入了最大熵试验法, 进行了小样本试验与评估, 极大地降低了试验样本量<sup>[3-4]</sup>。李荣等人<sup>[5]</sup> 把最大熵方法引入系统可靠性评估中, 降低了系统试验样本量。本文根据火工品的特点, 在试验信息熵等值的基础上, 设计了较小样本量下的可靠性试验, 实现对高可靠性产品的评估。

## 2 在相同置信水平下设计试验方案

### 2.1 设计依据

根据 GJB376-1987<sup>[6]</sup> 进行评估, 计数试验方案是在

技术指标规定的刺激量  $x_H$  处进行  $n_{x_H}$  发产品试验。在失效数  $f=0$  时, 可靠性指标  $R, \gamma$  由  $R = \sqrt[n_{x_H}]{1-\gamma}$  确定。小样本方法在低刺激量点做试验, 产品试验成功能获得更多的试验信息熵<sup>[3-4]</sup>。设计小样本试验方案的依据是在相同的置信水平和可靠性试验信息熵等值条件下确定低刺激量值  $x_L$  及其在低刺激量处的试验量  $n_{x_L}$ 。

### 2.2 方案设计

#### 2.2.1 计算产品估计裕度

对有裕度的火工品, 若设定使用方风险为  $\alpha$ , 由  $R_E^n = 1 - \alpha$  可求得产品可接受可靠性水平  $R_E$ , 当产品的可靠度  $R \geq R_E$  时, 则以概率  $(1 - \alpha)$  通过 GJB376-1987 评估, 即认为产品可靠性水平达到了指标要求。本文根据工程可接受原则, 定义  $R_E$  对应的刺激量为通过 GJB 376-1987 评估的估计刺激量  $\hat{x}_E$ 。 $\hat{x}_E$  由假设的分布函数及  $R_E$  及由感度试验求得的参数估计  $\bar{\mu}, \bar{\sigma}^*$  来计算。产品技术指标规定的刺激量为  $x_H$ , 发火可靠度估计裕度  $\hat{M}$  可由公式(1)计算。

$$\hat{M} = \frac{x_H}{\hat{x}_E} \quad (1)$$

当  $\hat{M} \geq 1$  时, 使用方风险小于或等于  $\alpha$ , 该产品会以大于或等于  $(1 - \alpha)$  的概率通过 GJB376-1987 评估, 可以采用本文推荐的小样本试验方法来进行评估。当  $\hat{M} < 1$  时, 使用方风险将大于  $\alpha$ , 不推荐采用本文小样本试验方法进行评估。

火工品感度常见的分布有正态分布、对数正态分布、逻辑斯谛分布和对数逻辑斯谛分布等。通过变换, 分布函数可归结为  $F(x; \mu, \sigma) = G\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$  的形式, 其中  $G(\cdot)$  为标准正态或逻辑斯谛的分布函数, 对数分

收稿日期: 2007-03-12; 修回日期: 2007-06-19

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方法研究。e-mail: dhpphd@bit.edu.cn

布时再经过对数反变换。在刺激量  $x$  处,火工品的可靠度(发火概率)为:

$$R(x) = F(x; \mu, \sigma) = G\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

若已知  $(\mu, \sigma)$  和感度分布类型,可靠度(发火概率)  $R$  对应的刺激量  $x$  可由公式(3)求取。

$$x = \mu + G^{-1}(R)\sigma \quad (3)$$

假设某火工品的可靠性指标为:在置信水平  $1 - \alpha$  下,刺激量为  $x_H$  时,可靠度下限为  $R$ 。首先确定产品的感度分布类型  $G(\mu, \sigma)$ ,一般可由经验假设,也可由历史试验数据或现场步进法试验数据,通过直方图检验或  $\chi^2$  检验确定<sup>[7]</sup>,同时获得分布参数估计  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ 。

实践证明升降法试验设计对分布参数  $\hat{\mu}$  偏差影响不大,但  $\hat{\sigma}$  偏差较大,它反映产品状态的随机性和试验设计造成的偏差,需要对  $\hat{\sigma}$  纠偏<sup>[8]</sup>。工程中为消除单独一组升降法数据对分布参数估计随机性的影响,一般求其 3 组参数  $(\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_1), (\hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2), (\hat{\mu}_3, \hat{\sigma}_3)$  的平均值作为产品的感度分布参数,  $\hat{\mu}$  直接求平均值,  $\hat{\sigma}$  纠偏后求三组的平均值,即

$$\bar{\hat{\mu}} = \frac{\hat{\mu}_1 + \hat{\mu}_2 + \hat{\mu}_3}{3}, \bar{\hat{\sigma}}^* = \frac{\hat{\sigma}_1^* + \hat{\sigma}_2^* + \hat{\sigma}_3^*}{3}$$

然后把  $R_E, \bar{\hat{\mu}}, \bar{\hat{\sigma}}^*$  代入公式(3),求得  $\hat{x}_E$ ,由公式(1)计算出  $\hat{M}$ ,如果  $\hat{M} \geq 1$ ,则计算  $n_{x_L}, x_L$ 。

### 2.2.2 计算 $n_{x_L}$

为保证小样本试验具有相同置信水平,必须以技术指标规定的可靠度  $R$ 、置信水平  $1 - \alpha$  和  $n_{x_H}$  为依据,选定低可靠度试验点  $R_L$ 。  $n_{x_L}$  由公式(4)计算。

$$R_L = \sqrt[n_{x_L}]{1 - \alpha_L}, (\text{满足 } \alpha_L \leq \alpha) \quad (4)$$

由公式(4)可计算得多组  $R_L$  与对应的  $n_{x_L}$ ,设计者可按要求选定  $R_L$  完成计算。推荐的样本量  $n_{x_L}$  列于表 1。

表 1 小样本试验设计推荐样本量  $n_{x_L}$   
Table 1 Recommended test number  $n_{x_L}$   
in test design with small samples

under the stress level $x_H$ of technical index			under the stress level $x_L$ where the reliability test information entropy is equivalent		
$R$	$1 - \alpha$	$n_{x_H}$	$R_L$	$n_{x_L}$	$\alpha_L$
0.99	0.9	230	0.8	11	0.086
	0.95	298	0.8	14	0.044
0.995	0.9	460	0.85	15	0.087
	0.95	598	0.85	19	0.045
0.999	0.9	2303	0.9	22	0.098
	0.95	2996	0.9	29	0.047

### 2.2.3 通过可靠性试验信息熵等值求对应试验 $n_{x_L}$ 发 产品的刺激量 $x_L$

#### 2.2.3.1 原理

可靠性试验信息熵等值的基本原理<sup>[9-10]</sup>是在具有高失效概率(低可靠度)的  $x_L$  点试验,比在低失效概率(高可靠度)的  $x_H$  点试验的单个样本,能获得更高的可靠性试验信息量。如果设计比在产品技术指标规定的刺激量  $x_H$  低的  $x_L$  (失效概率高)处进行试验,让单个试验样本获得更多的可靠性信息熵,使少量样本试验的可靠性试验信息熵值和按 GJB376 - 1987 规定试验获得的信息熵值相等,就能达到和 GJB376 - 1987 等效的评估结果。

设与  $x_H$  处试验信息熵等值试验点为  $x_L$ ,则由文献[9-10]得可靠性试验信息熵等值方程为

$$n_{x_L} (-\ln R_{x_L}) = n_{x_H} (-\ln R_{x_H}) \quad (5)$$

式中,  $n_{x_L}, R_{x_L}$  为在低可靠度的刺激量  $x_L$  处的试验样本量及可靠度;  $n_{x_H}, R_{x_H}$  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样本量及技术指标规定的刺激量  $x_H$  处的可靠度。

#### 2.2.3.2 不同感度分布下可靠性试验信息熵等值试 验刺激量 $x_L$ 的计算

##### ①正态分布

由  $\bar{\hat{\mu}}, \bar{\hat{\sigma}}^*$  和公式(6)求取  $x_H$  处的可靠度估计:

$$\hat{R}_{x_H} = \Phi\left(\frac{x_H - \bar{\hat{\mu}}}{\bar{\hat{\sigma}}^*}\right) \quad (6)$$

将  $n_{x_H}, \hat{R}_{x_H}$  和  $n_{x_L}$  代入可靠性试验信息熵等值方程(5),求得  $x_L$  处的可靠度估计值  $\hat{R}_{x_L}$ ,然后按公式(7)计算  $x_L$ :

$$x_L = \bar{\hat{\mu}} + \Phi^{-1}(\hat{R}_{x_L}) \bar{\hat{\sigma}}^* \quad (7)$$

##### ②逻辑斯谛分布

由逻辑斯谛分布函数  $F(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{x - \mu}{\gamma})}$

和  $\bar{\hat{\mu}}, \bar{\hat{\gamma}}^*$  按公式(8)求出  $x_H$  处的可靠度估计值:

$$\hat{R}_{x_H} = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{x_H - \bar{\hat{\mu}}}{\bar{\hat{\gamma}}^*})} \quad (8)$$

按与①相同的方法求  $x_L$  处的可靠度估计值  $\hat{R}_{x_L}$ ,然后按式(9)计算  $x_L$ :

$$x_L = \bar{\hat{\mu}} + \ln \frac{\hat{R}_{x_L}}{1 - \hat{R}_{x_L}} \bar{\hat{\gamma}}^* \quad (9)$$

##### ③对数正态分布

由  $\bar{\hat{\mu}}, \bar{\hat{\sigma}}^*$  (对数单位)和  $y_H = \ln(x_H)$  求得与  $y_H$  对

应的可靠性试验信息熵等值试验刺激量  $y_L$ , 按公式(10)计算  $x_L$ 。

$$x_L = e^{y_L} \quad (10)$$

#### ④对数逻辑斯谛分布

由  $\bar{\mu}, \bar{\sigma}^*$  (对数单位) 和  $y_H = \ln(x_H)$  按②相同的方法求得与  $y_H$  对应的可靠性试验信息熵等值试验刺激量  $y_L$  后, 按公式(10)计算  $x_L$ 。

至此, 只要在产品的技术指标  $x_H, R, 1 - \alpha$  基础上, 确定  $n_{x_L}$ , 然后通过产品感度试验求出参数估计  $\bar{\mu}, \bar{\sigma}^*$ , 即可求得可靠性试验信息熵等值试验刺激量  $x_L$ 。在  $x_L$  处试验  $n_{x_L}$  发, 若失败数为 0, 即可判定产品满足可靠性指标; 若失败数为 1, 再随机抽取  $n_{x_L}$  发产品进行试验, 若失败数为 0, 仍判定产品满足可靠性指标; 第 1 组  $n_{x_L}$  发产品试验的失败数多于 1 或第二组的失败数不为 0, 都判定产品不满足可靠性指标。

### 3 应用实例

54 号针刺雷管用于 H/DR131 引信的头部击发机构。产品可靠度指标为:  $\gamma = 0.90, R = 0.999$ 。发火上限为落高  $x_H = 6\text{cm}$ , 落锤  $(52 \pm 1)\text{g}$ 。

#### 3.1 评估试验

##### 3.1.1 小样本试验设计和评估

① 确定产品感度分布和分布参数。根据火工品感度分布模型研究结果, 该火工品感度分布服从对数正态分布。由于分布参数未知, 故要进行估计。按 GJB/Z377A<sup>[11]</sup> 进行了 3 组升降法试验, 每组试验样本量为 50 发, 试验结果列于表 2。利用极大似然估计原理分别求出其分布参数估计值, 见表 3。

对参数  $\sigma$  的估计进行纠偏<sup>[8]</sup>, 纠偏后的 3 组升降法参数估计值的平均值为:

$$\bar{\mu} = 0.733, \bar{\sigma}^* = 0.243$$

表 2 3 组 54 号针刺雷管升降法试验数据

Table 2 Three groups of Up-and-Down method test data of No. 54 stab detonator

stress level/cm	group 1		group 2		group 3	
	fire number	no-fire number	fire number	no-fire number	fire number	no-fire number
1.0	0	1	0	1	0	1
1.5	1	7	1	10	1	7
2.0	7	14	10	11	7	14
2.5	14	3	11	3	14	3
3.0	3	0	3	0	3	0

表 3 3 组 54 号针刺雷管升降法分布参数估计值 (对数单位)

Table 3 Parameter estimations of three groups of Up-and-Down test data of No. 54 stab detonator (logarithm value)

sequence number	$\bar{\mu}$	$\bar{\sigma}$
1	0.744	0.2
2	0.712	0.159
3	0.744	0.2

② 确定可靠性试验信息熵等值试验样本量  $n_{x_L}$  和刺激量  $x_L$ 。由产品可靠性指标和表 1 可确定样本量  $n_{x_L}$  为 22 发。  $x_H = 6\text{cm}$ , 对  $x_H$  取对数  $y_H = \ln(x_H) = \ln 6 = 1.79176$ 。把  $\bar{\mu} = 0.733, \bar{\sigma}^* = 0.243, \ln(x_H)$  代入(6)式可求得  $x_H$  处的可靠度估计  $\hat{R}_{x_H} = 0.999993$ 。然后把  $n_{x_H} = 2303, n_{x_L} = 22, \hat{R}_{x_H} = 0.999993$  代入公式(5), 求得  $x_L$  处的可靠度估计值  $\hat{R}_{x_L} = 0.99931$ 。再按公式(7)求得  $x_L$  的对数值  $y_L = 1.51$ , 再根据公式(10), 可求得试验刺激量  $x_L = 4.5\text{cm}$ 。

③ 在  $x_L = 4.5\text{cm}$  处试验产品 22 发, 结果为全部发火。可判定该产品达到了置信水平  $\gamma = 0.90$ , 可靠度为  $R = 0.999$  的可靠性指标。

##### 3.1.2 用大样本方法验证评估结果

由于步进法试验数量较大, 参数估计较为稳定。本研究用 1800 发步进法试验数据验证小样本方法评估结果的正确性。步进法试验数据见表 4。

表 4 54 号针刺雷管步进法试验数据

Table 4 Run-down method test data of No. 54 stab detonator

stress level/cm	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
test number	400	200	200	200	200	200	200	200
fire number	0	24	89	138	184	191	199	200
fire ratio	0	0.12	0.445	0.69	0.92	0.955	0.995	1

表 4 中试验刺激量个数为 8, 发火率为  $r_1 < r_2 \leq r_3 \dots \leq r_{k-1} < r_k = 1$ , 满足 GJB/Z377A 中规定的步进法试验完成的条件。

采用极大似然原理对感度分布的参数进行了估计, 得到对应可靠性指标刺激量的区间估计的上限为:

$$\hat{x}_{0.999U} = 5.12\text{cm}$$

$\hat{x}_{0.999U} < x_H = 6\text{cm}$ , 则可判断该产品发火可靠度达到了  $\gamma = 0.90, R = 0.999$  的可靠性指标, 与本文设计方法的评估试验结果一致, 验证了本文提出的小样本试验设计方法的可行性。

## 4 结 论

基于试验信息熵原理,通过数学计算,给出了减少火工品高可靠性评估试验样本量的设计方法,该方法可解决高可靠性要求的火工品评定中所需样本量大,试验周期长,耗费高的难题。用该方法已在国内数个型号火工品可靠性评估中应用,可行、准确。其试验思路方法亦可推广到类似高可靠性要求的其他产品的可靠性评估中。

### 参考文献:

- [1] 徐维新,秦英孝. 可靠性工程[M]. 北京:电子工业出版社,1988.  
XU Wei-xin, QIN Ying-xiao. Reliability engineering[M]. Beijing: Press of electronic industry,1988.
- [2] 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.  
GJB1307A-2004. General criterion of initiating explosive devices of spaceflight[S]. Committee of industry of science and technology for national defense, 2004.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李荣,王惠频,蔡洪. 最大熵方法在系统可靠性 Bayes 评估中的应用[J]. 航天控制,1999(1): 75-80.  
LI Rong, WANG Hui-pin, CAI Hong. Application of the maximum entropy method in Bayesian evaluation of system reliability[J]. *Aerospace Control*, 1999(1): 75-80.
- [6] GJB376-87. 火工品可靠性评估方法[S]. 国防科学技术工业委员会,1988.  
GJB376-87. Assessment method of reliability of initiating devices [S]. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1988.
- [7] 刘宝光. 敏感度数据分析与可靠性评定[M]. 北京:国防工业出版社,1995.  
LIU Bao-guang. Sensitivity data analysis and reliability assessment [M]. Beijing: Press of Industry for national defense,1995.
- [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. 北京:国防工业出版社,2006,7.  
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, 2006,7.
- [9] 蔡瑞娇,董海平,温玉全,等. 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. 北京:国防工业出版社,2006,7.  
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, 2006,7.
- [10] 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(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(1): 79-82.
- [11] GJB/Z 377A-94. 敏感度试验用数理统计方法[S]. 北京:国防工业出版社,1995.  
GJB/Z377A-94. Sensitivity tests, statistical methods for[S]. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1995.

## New Test Design Method with Small Samples for Reliability Assessment of Initiating Explosive Devices

DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao

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

**Abstract:** To assess the high reliability of initiating explosive device with small samples, the test design plan with small samples for initiating explosive devices was studied. Based on test information entropy, a new test design method was put forward. With this method, reliability of No. 54 stab detonator which is used in head kindling organ of H/DR131 fuze was assessed. Twenty-two products were tested on the stress level of 4.5 cm and all fire. The assessment result is in agreement with the test result with 1800 samples. The product meets the reliability requirements with reliability of 0.999 at the confidence level of 0.90.

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