

文章编号: 1003-1480 (2004) 02-0039-04

用步进法与升降法感度试验进行火工品 安全性与可靠性验证的比较

李勤华, 周彬, 陈西武, 秦志春, 田桂蓉, 徐振相

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘要: 本文对某型针刺雷管的两个批次分别进行了完全步进法及升降法感度试验。根据试验数据, 计算同一刺激量下采用步进法与升降法得到的产品发火率, 由 Boltzmann 模型拟合得到 $p-x$ 曲线。根据曲线可知, 在评价火工品安全性与可靠性时, 升降法估计值比步进法偏乐观; 当评估 0.999 响应点时, 升降法较步进法对应的刺激量平均低约 20%。

关键词: 火工品; 可靠性; 安全性; 升降法; 步进法

中图分类号: TJ560.7 TP302.7 文献标识码: A

Comparing the Result of Complete run-down Method with that of Bruceton Up-and-Down Method Used to Evaluate Reliability and Safety of Initiating Device

LI Qin-hua, ZHOU Bin, CHEN Xi-wu, QIN Zhi-chun, TIAN Gui-rong, XU Zhen-xiang

(Department of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: Using the sensitivity test data of the stab detonator compares the complete run-down method and Bruceton up-and-down method. The results show that Bruceton up-and-down method is more optimistic than the complete run-down method when the 0.999 responses is evaluated, and the stimulated value obtained by Bruceton up-and-down method is 20% lower than that obtained by the complete run-down method.

Key words: Initiating device; Reliability; Safety; Bruceton up-and-down method; Complete run-down method

随着科学技术的发展, 产品的可靠性越来越受到重视。可靠性评定的结果是否反映产品的真实发火特性, 直接关系到炸药及火工品在生产、贮运和使用等过程中的安全性及作用可靠性^[1, 2]。可靠性评估方法主要分为计数型和计量型两种基本方法, 对于成败型试验, 一般是在计数数据估计可靠度的基础上, 再用感度试验对可靠度进行验证和外

推。目前, 确定感度特性的方法中, 使用较多的主要有完全步进法和 Bruceton 升降法^[3], 完全步进法^[4]由于其试验点较多, 试验量较大, 所以获得的信息量也相对较多; 而 Bruceton 升降法^[4]由于其使用方便, 试验量相对较小, 使用也很普遍^[5, 6]。本文通过对某型号火工品分别采用完全步进法和升降法进行了感度试验, 对两种较常用的可靠性评定方法

收稿日期: 2003-09-07

作者简介: 李勤华 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事火工品可靠性方面的研究。

基金项目: 国防十五科技预研基金课题 (41305070301)。

进行了对比分析。

1 试验

1.1 完全步进法

本试验采用产品为某型针刺雷管。试验设备为：落球式针刺感度仪（WU015）；试验时用落球重 7g；试验用 A3 钢板。调节落高作为刺激量，试验时取均值 $X_0 = 2.3\text{cm}$ ，步长 $d = 0.3\text{cm}$ 。产品为 a 批次时每点试验量为 200 发，试验数据如表 1 所示；

产品为 b 批次时每点试验量为 50 发，试验数据如表 2 所示。

1.2 Bruceton 升降法

对于 a 批次产品：以正态分布设计升降法试验，分别取：(1) $X_0 = 2.4\text{cm}$ ， $d = 0.5\text{cm}$ ；(2) $X_0 = 2.4\text{cm}$ ， $d = 0.4\text{cm}$ 进行升降法试验，每组试验样本量为 50。

对于 b 批次产品，以对数正态分布设计升降法试验：以 $Y_0 = 0.372$ ($X_0 = 2.4\text{cm}$)， $d = 0.083\text{cm}$ 进行升降法试验。

表 1 某型针刺雷管 a 批步进法试验数据

试验步长 $d = 0.3\text{cm}$ ，均值 $X_0 = 2.3\text{cm}$												
	$X_0 - 4d$	$X_0 - 3d$	$X_0 - 2d$	$X_0 - d$	X_0	$X_0 + d$	$X_0 + 2d$	$X_0 + 3d$	$X_0 + 4d$	$X_0 + 5d$	$X_0 + 6d$	$X_0 + 7d$
刺激量 /cm	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4
试验量 /发	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
发火数 /发	0	2	22	60	97	124	149	178	182	193	198	200
发火率	0	0.01	0.11	0.30	0.49	0.62	0.74	0.89	0.91	0.965	0.99	1

表 2 某型针刺雷管 b 批步进法试验数据

试验步长 $d = 0.3\text{cm}$ ，均值 $X_0 = 2.3\text{cm}$												
	$X_0 - 4d$	$X_0 - 3d$	$X_0 - 2d$	$X_0 - d$	X_0	$X_0 + d$	$X_0 + 2d$	$X_0 + 3d$	$X_0 + 4d$	$X_0 + 5d$	$X_0 + 6d$	$X_0 + 7d$
刺激量 /cm	1.1	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4
试验量 /发	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
发火数 /发	0	1	2	11	17	22	34	37	42	48	48	50
发火率	0	0.02	0.04	0.22	0.34	0.44	0.68	0.74	0.84	0.96	0.96	1

2 数据分析

2.1 步进法

通过步进法试验数据对产品进行感度分布模型假设检验，通过 Karber 法^[7]检验得到其感度分布符合对数正态分布。其对应的参数值分别为：

$$\bar{y}_a = 0.372 \quad s_a = 0.116$$

$$\bar{y}_b = 0.4114 \quad s_b = 0.118$$

因此，其 P 响应点的估计公式为：

$$a) \hat{x}_p = 10^{(0.372 + 0.116u_p)} \quad (1)$$

$$b) \hat{x}_p = 10^{(0.4114 + 0.118u_p)} \quad (2)$$

2.2 升降法

a 批次产品升降法试验数据统计如表 3、4 所示。

表 3 某型雷管 a 批次升降法感度数据统计之一

i	x_i	v_i	m_i
+1	2.9	4	-
0	2.4	16	4
-1	1.9	6	15
-2	1.4	-	5

表 4 某型雷管 a 批次升降法感度数据统计之二

i	x_i	v_i	m_i
+1	2.8	5	-
0	2.4	11	5
-1	2.0	8	10
-2	1.6	2	7
-3	1.2	-	2

b 批次产品升降法试验数据统计如表 5 所示。

升降法对应的 *P* 响应点估计公式为：

$$a \text{ 批次: } \hat{x}_p = \hat{\mu} + u_p \hat{\sigma} \quad (3)$$

$$b \text{ 批次: } \hat{x}_p = 10^{\hat{y}_p} \quad (4)$$

$$\text{式中: } \hat{y}_p = \hat{\mu} + u_p \hat{\sigma} \quad (5)$$

根据标准^[4]计算得：*a* 批次升降法试验 1~2 组的参量分别为：(1) $\hat{\mu} = 2.129$ ， $\hat{\sigma} = 0.326$ (2)

表 5 某型雷管 *b* 批次升降法感度数据统计

<i>i</i>	<i>x_i</i>	<i>y_i</i>	<i>v_i</i>	<i>m_i</i>
+2	3.5	0.538	8	-
+1	2.9	0.455	11	9
0	2.4	0.372	5	12
-1	1.9	0.289	-	5

$\hat{\mu} = 2.100$ ， $\hat{\sigma} = 0.518$ ；*b* 批次升降法的参量为： $\hat{\mu} = 0.424$ ， $\hat{\sigma} = 0.075$ 。

2.3 步进法与升降法的 *P* 响应点值的比较

式(3)和(5)中，当取 $u_p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时，既构造了 $x_p = \mu \pm n\sigma$ 的形式。由升降法所取的对应的 u_p 值，由文献^[8]求得对应的刺激量 x_p ，再由式(1)求得步进法对应的 u'_p ，从而得到相同刺激量 x 下，分别由步进法和升降法求得的对应的响应率。*a* 批次 1、2 组对应的数值如表 6、7 所示，*b* 批次对应的数值如表 8 所示。

由表 6~8，以刺激量 x 为横坐标，发火率 p 为纵坐标，并经 Boltzmann 模型拟合得到 $p-x$ 曲线，如图 1~3 所示。

表 6 *a* 批次步进法与升降法发火率对比之一

<i>u_p</i>	刺激量 <i>x</i>	<i>u'_p</i>	发火率 <i>p</i>	
			升降法	步进法
-5	0.499	-5.80 948	0.000 000	0.000 000
-4	0.825	-3.92 712	0.000 032	0.000 043
-3	1.151	-2.68 039	0.001 350	0.003 677
-2	1.477	-1.74 672	0.022 750	0.040 343
-1	1.803	-1.00 004	0.158 655	0.158 646
0	2.129	-0.37 780	0.500 000	0.352 790
1	2.455	0.155 62	0.841 345	0.561 834
2	2.781	0.622 42	0.977 250	0.733 167
3	3.107	1.037 42	0.998 650	0.850 230
4	3.433	1.410 98	0.999 968	0.920 875
5	3.759	1.750 62	1.000 000	0.959 994

表 7 *a* 批次步进法与升降法发火率对比之二

<i>u_p</i>	刺激量 <i>x</i>	<i>u'_p</i>	发火率 <i>p</i>	
			升降法	步进法
-5	-	-	0.000 000	-
-4	0.028	-16.593 47	0.000 032	0.000 000
-3	0.546	-5.472 48	0.001 350	0.000 000
-2	1.064	-2.974 64	0.022 750	0.001 467
-1	1.582	-1.489 60	0.158 655	0.068 165
0	2.100	-0.429 14	0.500 000	0.333 911
1	2.618	0.396 29	0.841 345	0.654 054
2	3.136	1.072 21	0.977 250	0.858 187
3	3.654	1.644 56	0.998 650	0.949 970
4	4.172	2.140 90	0.999 968	0.983 859
5	4.690	2.579 08	1.000 000	0.995 047

表 8 *b* 批次步进法与升降法发火率对比

<i>u_p</i>	刺激量 <i>x</i>	变换刺 激量 <i>y</i>	<i>u'_p</i>	发火率 <i>p</i>	
				升降法	步进法
-5	1.119 44	0.049	-3.071 19	0.000 000	0.001 066
-4	1.330 45	0.124	-2.435 59	0.000 032	0.007 434
-3	1.581 25	0.199	-1.800 00	0.001 350	0.035 930
-2	1.879 32	0.274	-1.164 41	0.022 750	0.122 129
-1	2.233 57	0.349	-0.528 81	0.158 655	0.298 469
0	2.654 61	0.424	0.106 78	0.500 000	0.542 518
1	3.155 00	0.499	0.742 37	0.841 345	0.771 068
2	3.749 73	0.574	1.377 97	0.977 250	0.915 893
3	4.456 56	0.649	2.013 56	0.998 650	0.977 972
4	5.296 63	0.724	2.649 15	0.999 968	0.995 965
5	6.295 06	0.799	3.284 75	1.000 000	0.999 490

其中 Boltzmann 模型方程为：

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \quad (6)$$

图 1~3 中曲线是由升降法、步进法数据经 Boltzmann 模型拟合得到，其对应的拟合相关度 R^2 均为 0.999。

由上述 3 组试验拟合结果可以看出：在低发火端，既表示安全性端，对于同样大小的刺激量，用升降法计算的发火率估计值比步进法的低，既对于安全性估计来说，升降法估计值比步进法乐观；在高发火端，既表示可靠性的一端，对于同样大小

的刺激量,用升降法计算的发火率估计值比步进法的高,既对于可靠性来说,升降法估计值也比步进法的乐观。

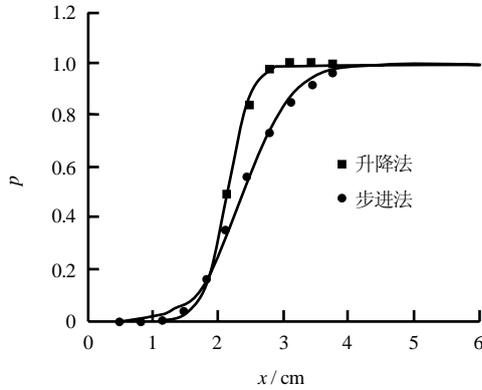


图1 a 批次步进法与升降法的 p — x 曲线之一

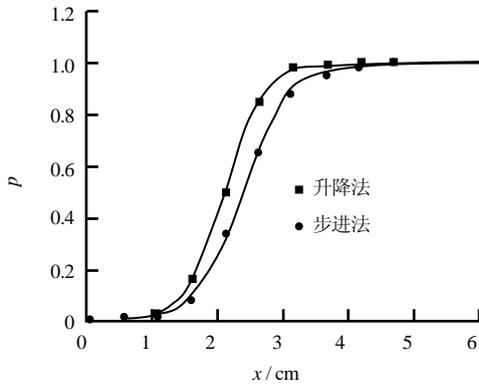


图2 a 批次步进法与升降法的 P — x 曲线之二

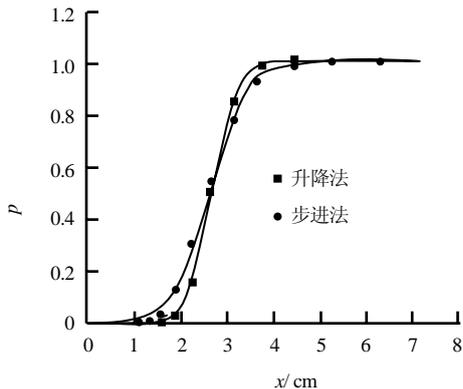


图3 b 批次步进法与升降法的 p — x 曲线

假设以完全步进法所得数据 x_2 为标准值,既真值;升降法所得数据 x_1 为测量值,则:

$$\text{误差} = x_1 - x_2$$

$$\text{相对误差} = \frac{x_1 - x_2}{x_2} \times 100\%$$

对于可靠性来说,当发火率为 99.9% 时,以步进法为标准时升降法对应的刺激量所对应的误差

及其相对误差如表 9 所示。

以上试验用的是同一类产品的不同批次产品,在假设其服从不同分布的情况下,做了升降法试验和对应的步进法试验,对常用的评估可靠性和安全性的两种方法进行了比较。从比较的结果可以看出,当评估 99.9% 发火可靠性时,升降法所得到的结果都是偏乐观,偏乐观程度大概在 20% 左右。

表9 $p=0.999$ 以步进法为标准时升降法所对应的刺激量的误差及其相对误差

	a 批次		b 批次
步进法 x_2 / cm	4.964		5.376
升降法 x_1 / cm	3.449	4.196	4.500
误差 / cm	-1.515	-0.768	-0.876
相对误差 / %	-30.5	-15.5	-16.3
平均偏差 / %	-23		-16.3

3 结论

综上所述分析可知,对于高发火率一端,相同刺激量情况下,升降法估计的发火率比步进法的偏高,既对于可靠性估计来说,用升降法的评定结果偏乐观;而对于低发火率端,升降法估计的发火率偏低,既对于安全性来,用升降法评定的结果偏乐观。其中高发火率端升降法与步进法对应的刺激量平均相差约为 20%。

参考文献:

- [1] 殷刚,傅惠民. 炸药及火工品可靠性与安全性评定方法 [J]. 中国安全科学学报, 1999, (4): 47~50.
- [2] Bement, L. J. Pyrotechnics system failures: causes and prevention [R]. NASA TM 100633, June, 1988.
- [3] 刘宝光,周瑞珍. 火工品感度试验试验方法使用情况调查 [J]. 火工品, 1992, (4): 31~33.
- [4] GJB/Z 377A - 94.感度试验用数理统计方法 [S], 1994.
- [5] M. J. Silvapulle. On the existence of maximum likelihood estimation for the binomial response models [J]. Journal of the Royal Statistical Society B, 1981, 43: 310~313.
- [6] Barry T. Neyner. A D-optimality-based sensitivity tests [J]. Technometrics, 36: 61~70.
- [7] 陆璇. 应用统计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [8] GB 4086.1-83. 统计分布数值表——正态分布 [S], 1983.