

文章编号: 1006-9941(2008)01-0086-04

## 炸药感度测试兰利法与升降法比较研究

袁俊明<sup>1,2</sup>, 张庆明<sup>1</sup>, 刘彦<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中北大学化工与环境学院, 山西太原 030051)

**摘要:** 对兰利法与升降法的测试原理、设计程序及数据分析方面进行了分析和比较, 在对某级炸药 HMX 的撞击感度试验的基础上, 对比了两种方法的试验结果, 发现兰利法对感度初始估值不敏感, 升降法受初始估值的影响很大。另外, 根据试验数据, 计算了同一刺激量下两种方法得到的试验样品发火率, 经过数据拟合得到了感度分布曲线。结果表明, 在以计数法为标准进行评价炸药安全性与可靠性时, 兰利法估计值的相对误差值比升降法大。当评估 0.001 响应点时, 兰利法比升降法大 16% 左右; 在评估 0.999 响应点时, 兰利法比升降法大 21% 左右。

**关键词:** 爆炸力学; 感度测试; 可靠性; 安全性; 升降法; 兰利法

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

为研究炸药在生产、加工、运输和使用过程中的安全性, 已建立了多种感度试验方法。不同试验方法所用试验装置、样本量、试样状态不同, 所得结果也不同, 因此评价炸药的感度就成为一个较复杂的问题<sup>[1]</sup>。我国从 20 世纪 70 年代初就在炸药领域开展了发火感度试验的研究工作, 1987 年将升降法列入国家军用标准<sup>[2]</sup>, 1990 年将步进法列入部标准<sup>[3]</sup>, 1994 年将兰利法、升降法、完全步进法、概率单位法和最大似然估计法列入国家军用标准<sup>[4]</sup>。以上统计方法虽各有优缺点<sup>[5]</sup>, 但目前而言, 确定感度特性的方法中, 使用较多的主要还是 Bruceton 升降法<sup>[6]</sup>。虽然兰利法的使用不如升降法广泛, 但兰利法实质上就是一种变步长的升降法, 由于其步长是变动的, 致使刺激水平能很快收敛于均值或者某较高(或较低)发火点附近获得更多的数据, 使外推距离缩短, 一般而言用于评估安全性和可靠性更可信。本课题组对某级 HMX 炸药分别采用兰利法和升降法进行了撞击感度试验, 对两种方法的可靠性评定进行了比较。

### 2 试验方法比较

#### 2.1 升降法

升降法是火炸药和火工品领域中应用最广泛的序

贯试验程序。它适合用于求 50% 发火点  $x_{50}$ , 同时也可对标准差、发火上下限做出估计。文献中称为 Bruceton 或 Up-and-Down Procedure。

##### 2.1.1 升降法试验设计程序<sup>[2]</sup>

确定一个升降法试验方案需要选择 3 个初始参数: 步长  $d$  (cm)、试验量  $N$  和第一刺激量  $x_0$  (cm)。试验从  $x_1 = x_0$  开始, 下一个刺激量的选择按如下升降规则确定: 如果试验不发火, 记  $n_i = 0$ , 则  $x_{i+1} = x_{i+d}$ ; 如果试验发火, 记  $n_i = 1$ , 则  $x_{i+1} = x_{i-d}$ 。直到完成预定样本量的次试验。试验要求试样的临界刺激量服从正态分布, 推荐初始参数方案选择为  $x_i \approx \mu$ ,  $d \approx \sigma$ , 升降步台阶总数为 4~7 个。小于 4 时, 对标准差估计偏差大, 大于 7 时样本量将显著增大。升降法的升降规则使得试验刺激量集中在平均值附近进行, 并在均值两边取值的概率各为 50%。

##### 2.1.2 升降法数据分析

升降法估计量公式为一种近似的最大似然估计<sup>[7]</sup>, 公式如下:

$$\mu = x_0 + \left( \frac{A}{n} \pm \frac{1}{2} \right) d \quad (1)$$

$$\sigma = 1.620(M + 0.029)d \quad (2)$$

式中,  $A = \sum_{i=1}^k i n'_i$ ;  $B = \sum_{i=1}^k i^2 n'_i$ ;  $m_i$  为不发火数;  $M = (nB - A^2)/n^2$ ;  $n'_i$  为名义发火数;  $k$  为升降步台阶总数; 当  $n = \sum_i^k n_i$  时, 式(1)取负号, 当  $n = \sum_i^k m_i$  时, 式(1)取正号。

#### 2.2 兰利法

兰利法在文献中称为 One-Shot 或 Langlie Procedure,

收稿日期: 2007-04-26; 修回日期: 2007-06-25

作者简介: 袁俊明(1979-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为火炸药安全性及可靠性研究。e-mail: yjmchinaren@bit.edu.cn

它同样适用于升降法的应用领域。兰利法已被美军标 MIL-STD-331A(1976)、MIL-STD-331B(1989) 引入,作为推荐性试验方法。我国自 90 年代开始在相关领域引起重视。兰利法是一种变步长的序贯试验,由于刺激量步长在试验进程中随时得到调整,可以使试验刺激量很快收敛于感度分布的均值附近,所以兰利法更有利于获得均值的样本信息,参数估值应该比升降法更稳定。

### 2.2.1 兰利法试验设计程序<sup>[8-9]</sup>

制定一个兰利法的试验方案需要确定 3 个参数:样本量  $N$ 、全响应上限  $x_U$  和全不响应下限  $x_L$ 。记响应结果为 1,不响应结果为 0。第一个试验点取  $x_1 = (x_L + x_U)/2$ 。下一个试验点选择的一般规则是取  $x_i$  和  $x_j$  的平均值,其中  $j$  是自当前试验刺激量  $x_i$  往回数包含于  $x_i$  和  $x_j$  之间的响应结果为 1 和 0 的个数第 1 次出现相等时的那个刺激量数据。如果不存在这样的  $j$ ,则当  $x_i$  是不响应时取  $x_i$  与  $x_U$  平均值,是响应时与  $x_L$  平均。兰利法下一个试验点估计量公式为:

$$x_{i+1} = (x_i + x_j)/2 = x_i - (x_i - x_j)/2 \quad (3)$$

兰利法试验的终止准则是完成预定试验刺激量数或预定 0、1 结果转换次数,并同时要求感度数据应含有混合结果区间,其中是感度试验中出现响应的最小刺激量,是最大不响应刺激量。如果没有出现混合结果区间,则应继续增加试验,直到出现的结果为止。兰利法的试验规则规定了响应为 1 和 0 的个数相等,这与升降法相似,因此也可保证试验点分布在均值两边的概率各为 50%。

### 2.2.2 兰利法数据分析

兰利法的数据分析是采用数值算法直接求似然方程组的极大似然估计。文献<sup>[7,9]</sup>给出了求解似然方程组的两种数值算法,即 Newton 法和变尺度法。

## 3 试验过程

本试验采用产品为某级炸药 HMX。试验设备为:12 型工具;试验时用落锤重 2.5 kg;炸药质量为  $(35 \pm 1)$  mg,应用计数法在  $k = 10$  个不同的测试水平下做撞击感度试验, $x_i$  为试验落高, $y = \log x_i$  为试验落高对数值,取一个刺激量试验的样品单元数  $N' = 25$ , $x_0 = 21$  cm,步长  $d = 3$  cm。以发火为响应,按 GJB772A-97 中方法 601.1 共做了 10 个点,样本量共 250 发。对该级炸药 HMX 试验,并用 Origin 软件对数据结果进行处理,得到本次试验的感度曲线,其发火概率为 0.1%、50% 和 99.9% 的感度值分别为 10.00,18.65,34.15 cm,作为试

验样品感度值的标准值,即真值。通过试验数据对产品进行感度分布模型假设检验,通过  $\chi^2$  法<sup>[7]</sup> 检验得到其感度分布符合对数正态分布。因此,试验认为该级 HMX 炸药物质的撞击感度数据对数服从正态分布。本文中每种方法试验分两组,一组为初始估值较准确,试验样本量为 20 发;另一组初始估值不够准确,试验样本量为 30 发。

### 3.1 升降法

第一组试验样本量为 20 发,估值较准确,取试验落高对数值  $y_0 = 1.30$  ( $x_0 = 20$  cm), $d = 0.05$  (1.12 cm),第二组试验样本量为 30 发,估值不够准确,取  $y_0 = 1.40$  ( $x_0 = 25.12$  cm), $d = 0.08$  (1.2 cm),进行升降法试验。升降法对应的发火概率为  $P$  的响应点估计公式为:

$$\hat{x}_p = 10^{\hat{y}} \quad (4)$$

$$\hat{y}_p = \hat{\mu} + \mu_p \hat{\sigma} \quad (5)$$

根据标准<sup>[4]</sup> 计算得到两组升降法试验的 50% 发火点参量分别为 (1)  $\mu_1 = 19.28$  cm,  $\sigma_1 = 1.20$ ; (2)  $\mu_2 = 26.49$  cm,  $\sigma_2 = 1.26$ 。对应的 0.1% 发火点的感度值分别为 10.89 cm,12.97 cm,且对应的 99.9% 发火点感度值分别为 34.12 cm,54.08 cm。

### 3.2 兰利法

兰利法试验分两组进行。第一组兰利法对总体中临界刺激量的取值范围做出预估。预估的刺激量下限  $x_L = 4$  cm,上限  $x_U = 36$ 。第一次刺激-响应试验的刺激量取作  $x_1 = (x_L + x_U)/2 = 20$  cm,相应的  $y_L = \log x_L = 0.60$ , $y_U = \log x_U = 1.556$ 。

第二组试验预估的刺激量下限  $x_L = 5$  cm,上限  $x_U = 55$ 。第一次刺激-响应试验的刺激量取作  $x_1 = (x_L + x_U)/2 = 30$  cm,相应的  $y_L = \log x_L = 0.699$ , $y_U = \log x_U = 1.740$ 。

兰利法对应的  $P$  响应点估计公式与升降法的式 (4) 和 (5) 相同。

同理可得到两组兰利法试验参量分别为 (1)  $\mu_1 = 18.32$  cm,  $\sigma_1 = 1.13$ ; (2)  $\mu_2 = 18.16$  cm,  $\sigma_2 = 1.04$ 。对应的 0.1% 发火点的感度值分别为 12.56,15.96 cm,且对应的 99.9% 发火点感度值分别为 20.73,20.65 cm。

### 3.3 兰利法与升降法 $P$ 的响应点值的比较

为比较在相同刺激量下的发火概率曲线,本文以升降法刺激量变化为基准,即  $i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ,以获得相同刺激量下各自的分位数  $\mu_p$ ,并通过正态分位数表<sup>[10]</sup> 查找到对应的响应率。第一、二组试验对应的数值见表 1、2。以变换刺激量  $y$  为横坐标,发火率  $P$  为纵坐标,经过拟合得到了感度分布曲线(见图 1、2)。

表1 第一组升降法与兰利法发火率比较

Table 1 The fire probability comparison with up-and-down method and Langlie method at first set

i	stimulus x/cm	transform stimulus y	Bruceton $\mu_p$	Langlie $\mu_p$	fire probability	
					Bruceton	Langlie
+5	35.48	1.55	3.3125	5.4151	0.9990	1.0000
+4	31.62	1.50	2.6875	4.4717	0.9964	0.9999
+3	28.18	1.45	2.0625	3.5283	0.9807	0.9997
+2	25.11	1.40	1.4375	2.5849	0.9251	0.9948
1	22.39	1.35	0.8125	1.6415	0.7920	0.9495
0	19.95	1.30	0.1875	0.6981	0.5753	0.7560
-1	17.78	1.25	-0.4375	-0.2452	0.3330	0.4020
-2	15.85	1.20	-1.0625	-1.1887	0.1446	0.1171
-3	14.13	1.15	-1.6875	-2.1321	0.0456	0.0176
-4	12.59	1.10	-2.3125	-3.0755	0.0105	0.0011
-5	11.22	1.05	-2.9375	-4.0189	0.0017	0.0001

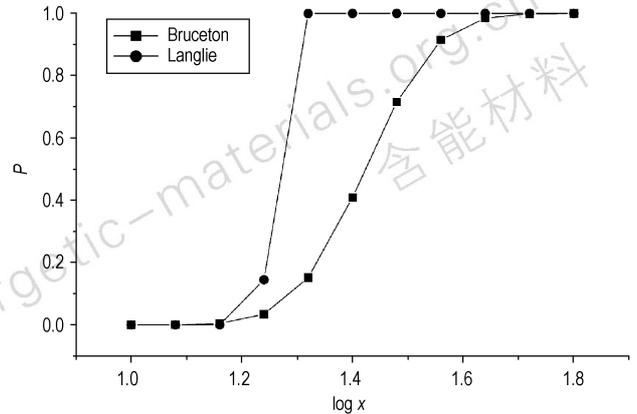


图2 第二组升降法与兰利法的发火率曲线

Fig. 2 The fire probability curves of up-and-down method and Langlie method at second set

表2 第二组升降法与兰利法发火率比较

Table 2 The fire probability comparison with up-and-down method and Langlie method at second set

i	stimulus x/cm	transform stimulus y	Bruceton $\mu_p$	Langlie $\mu_p$	fire probability	
					Bruceton	Langlie
+5	63.10	1.80	3.7700	30.0556	0.9999	1.0000
+4	52.48	1.72	2.9700	25.6111	0.9985	1.0000
+3	43.65	1.64	2.1700	21.1667	0.9850	1.0000
+2	36.31	1.56	1.3700	16.7222	0.9147	1.0000
+1	30.20	1.48	0.5700	12.2778	0.7157	1.0000
0	25.12	1.40	-0.2300	7.8333	0.4090	1.0000
-1	20.89	1.32	-1.0300	3.3889	0.1516	0.9997
-2	17.38	1.24	-1.8300	-1.0556	0.0337	0.1446
-3	14.45	1.16	-2.6300	-5.5000	0.0043	0.0000
-4	12.02	1.08	-3.4300	-9.9444	0.0004	0.0000
-5	10.00	1.00	-4.2300	-14.3889	0.9999	0.0000

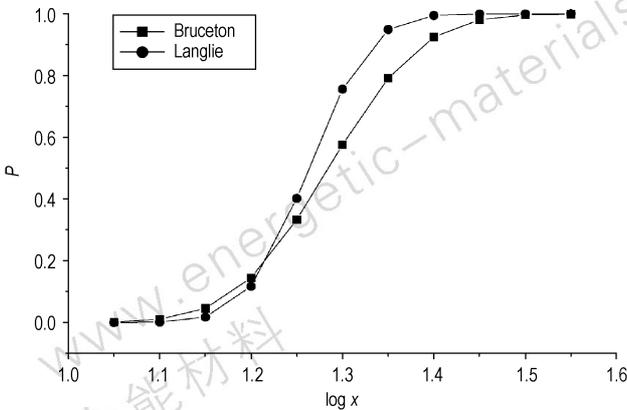


图1 第一组升降法与兰利法的发火率曲线

Fig. 1 The fire probability curves of up-and-down method and Langlie method at first set

由上述两组试验的发火率对比表和数据拟合结果可以看出：(1) 由于第二组试验初始估值不准确，升降法得到的感度均值偏离标准值太远，而且偏高，同时刺激量又随升降法的变化为基准，因此在图2中，在相同刺激量下，兰利法的数据集中在曲线两端。(2) 在低发火端，即表示安全性端，对于同样大小的刺激量，兰利法估计值的相对误差值比升降法大，用兰利法计算的发火率估计值比升降法的低，即对于安全性估计来说，兰利法评定的结果更不易起爆；在高发火端，既表示可靠性的一端，对于同样大小的刺激量，用兰利法计算的发火率估计值比升降法的高，兰利法估计值的相对误差值也比升降法大，即对于可靠性估计来说，兰利法评定的结果易于起爆。

本文以计数法所得数据  $x$  为标准值，即真值；升降法和兰利法分别所得数据  $x_1, x_2$  为测量值。则误差  $\alpha = x_i - x, i = 1, 2$ ，相对误差  $\alpha' = \frac{\alpha}{x} \times 100\%$ ，结果见表3。

表3 以计数法为标准时升降法和兰利法所对应的刺激量误差及其相对误差

Table 3 The corresponding stimulus error and relative error of up-and-down method and Langlie method on the basis of counting process method

method	sensitivity	mean	safety ( $p=0.001$ )	reliability ( $p=0.999$ )		
counting process	$x/cm$	18.65	10.00	34.15		
Bruceton	$x_1/cm$	19.28	26.49	10.89	12.97	34.12 54.08
Langlie	$x_2/cm$	18.32	18.16	12.56	15.96	26.73 20.65
error/cm	Bruceton	0.63	7.84	0.89	2.97	-0.03 19.93
	Langlie	-0.33	-0.49	2.56	5.96	-7.42 -13.5
relative error	Bruceton	3.38	42.04	8.9	29.7	0.09 58.36
	Langlie	-1.77	-2.63	25.6	59.6	-21.73 -39.53
		/%				

由表 3 可知,虽然两种方法要求试验者预先估计临界刺激量的上下限,但从试验结果看,当试验初始估值较准确时,升降法和兰利法所得均值与计数法相比的相对误差都不大,但当试验初始估值不太准确时,兰利法对计数法的相对误差仅为 2.63%,而升降法的相对误差则达 42.04%,这表明数据不可信。由此证明,兰利法对试验初值的选择不敏感,而试验初值对升降法影响则很大,甚至得出错误的试验结果。另外,对两种方法评估可靠性和安全性方面进行了比较。从比较的结果可以看出,当评估 0.1% 不发火安全性时,兰利法所得到的结果是更不易起爆,两者的相对误差之差值大约为 16%;当评估 99.9% 发火可靠性时,兰利法所得的结果更易起爆,两者的相对误差之差值大约为 21% (评估安全性和可靠性时,这里不考虑初始估值不准确导致的错误试验数据)。

#### 4 结 论

综上所述可知,一方面,兰利法受初始估值的影响很小。从试验结果的比较来看,升降法受初始估值的影响很大。另一方面,兰利法和升降法在评定安全性和可靠性时,对于高发火率一端,相同刺激量情况下,兰利法估计的发火率比升降法偏高,其估计值的相对误差比升降法大 21% 左右,即对于可靠性估计来说,用兰利法的评定结果更易于起爆;而对于低发火率端,兰利法估计的发火率偏低,其估计值的相对误差

比升降法大 16% 左右,即对于安全性来说,用兰利法评定的结果更不易起爆。

#### 参考文献:

- [1] 胡庆贤. 炸药感度评价方法的探讨[J]. 含能材料, 2000(3): 127-129.  
HU Qing-xian. An investigation of evaluation method on explosives sensitivity [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000(3): 127-129.
- [2] GJB377-87. 感度试验用升降法[S].
- [3] WJ1975-90. 火工品感度试验用步进法[S].
- [4] GJB/Z377A-94. 感度试验用数理统计方法[S].
- [5] 花成,张盛国,汤业朋. 炸药作用可靠度估计与研究[J]. 含能材料, 2004(增刊): 548-550.  
HUA Cheng, ZHANG Sheng-guo, TANG Ye-peng. Study on the reliability estimates of explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(Supplement): 548-550.
- [6] 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.  
LIU Bao-guang, ZHOU Rui-zhen. Investigation on the use of sensitivity test for initiating device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1992, (4): 31-33.
- [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.  
LIU Bao-guang. Reliability Assessment and Analysis of Sensitive Data [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
- [8] Langlie H J. A Reliability Test Method for One-shot Item[M]. Aeronutronic publication, U-1792, 1962.
- [9] MIL-STD-331A. Environmental and performance test for fuze and fuze components[S]. 1976.
- [10] 李国新,程国元,焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.

## Comparison Study on Langlie Method and Up-and-down Method for Sensitivity Test of Explosive

YUAN Jun-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-ming<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The test theory, design procedure and data analysis of Langlie method and up-and-down method were analyzed, and the experimental results of impact sensitivity of certain explosive HMX were compared. The results show that Langlie method is almost insensitive to the initial estimate, while up-and-down method is sensitive to that. In addition, according to the experimental data, the fire probability of samples was attained at the same stimulus with two different methods. The sensitivity distribution curves were obtained from fitting the experimental data. When the safety and reliability of explosive is calculated on the basis of counting process method, the estimate value of Langlie method is more optimistic than that of up-and-down method. When the 0.001 responses is evaluated, the stimulus relative error of Langlie method is about 16% higher than that of up-and-down method, when the 0.999 responses is evaluated, the stimulus relative error of Langlie method is about 21% lower than that of up-and-down method.

**Key words:** explosion mechanics; sensitivity test; reliability; safety; up-and-down method; Langlie method