

文章编号: 1006-9941(2008)02-0212-04

## 机械类火工品感度变差系数统计分析

穆慧娜, 焦清介, 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:** 变差系数是进行火工品可靠性设计的重要参数之一。运用直方图法和柯尔莫哥洛夫检验法, 得出 D6-乙炮底火感度变差系数服从正态分布和机械类火工品感度变差系数服从正态分布。通过利用机械类火工品感度变差系数的分布上限值, 对某火工品进行了感度均值的设计, 表明了本方法在火工品可靠性设计中的可行性。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 火工品; 感度分布; 变差系数; 可靠性设计

**中图分类号:** TJ450; O213

**文献标识码:** A

### 1 引言

变差系数是一种反映随机变量取值相对离散程度的系数, 也称变异系数, 一般定义为随机变量标准差与均值之比<sup>[1]</sup>。这是一个无量纲的变量, 与标准差相比, 它可用来比较量纲不同或其均值的数量级不同的两组数据的离散程度。火工品每个个体均存在一个临界刺激量<sup>[2]</sup>, 当外界施加的刺激大于临界刺激量时, 火工品“响应”; 反之, 则“不响应”。由于生产工艺和原材料等随机因素的影响, 导致临界刺激量是一个随机变量。产品临界刺激量的分布称为感度分布。不同类型的火工品其感度的分散程度不一样。变差系数可用来表示其感度的相对分散程度, 变差系数大, 产品感度分散性大; 变差系数小, 产品感度分散性小。实际工程中, 如果产品感度分散性小, 产品较易满足可靠性指标; 反之, 则不然。因此, 变差系数的取值是影响产品可靠性设计的一个重要因素。

影响变差系数的因素有原材料、生产工艺等, 这些因素具有随机性, 在实际工程中很难直接获得变差系数的有关数据, 这也是目前为止关于变差系数的研究和分析较少的原因之一。本文收集了 205 批 D6-乙炮底火和 18 种机械类火工品感度试验数据, 求取了不同批感度数据对应的变差系数值, 并运用直方图法和柯尔莫哥洛夫检验法对其变差系数服从的分布类型进行了检验。

### 2 火工品感度分布变差系数统计分析

#### 2.1 205 批 D6-乙炮底火变差系数的计算

D6-乙炮底火是通用性的撞击式底火, 至今已生

产了几百个批次, 从积累的数据看, 其感度分布稳定。本文收集了某厂从 1997 年至 2006 年连续生产的 234 批产品升降法试验<sup>[3]</sup>数据, 试验过程中落锤重 307 g, 每组试验 30 发。升降法的主要试验过程就是先根据经验确定一个初值和步长, 根据前一发产品的试验结果来决定下一发产品的试验刺激量点, 如前一发产品发火, 则下一个刺激量即在原刺激量上减一个步长, 若不发火, 则加一个步长。在对参数进行估计时应用的是极大似然原理。在这 234 组数据中, 除去不符合升降法试验要求和记录错误的数, 最后得到有效数据 205 组, 如表 1 所示, 其中响应数即为发火数, 不响应即为不发火数。

根据文献[4]提出的利用升降法试验数据进行感度分布检验的方法, 可以得出 D6-乙炮底火感度最接近对数正态分布。文献[5]曾做了一条 11450 发 D6-乙大样本感度曲线, 通过  $\chi^2$  检验法也得出其最接近服从对数正态分布。对于感度  $X$  服从对数正态分布  $LN(\mu_L^*, \sigma_L^*)$  的产品, 其中  $\mu_L^*$  和  $\sigma_L^*$  分别是  $X$  的对数均值和对数标准差, 经推导可得  $X$  的均值和方差分别为  $\mu = e^{(\mu_L^* + \frac{1}{2}\sigma_L^{*2})}$ ,  $\sigma^2 = e^{(2\mu_L^* + \sigma_L^{*2})} (e^{\sigma_L^{*2}} - 1)$ <sup>[6]</sup>, 则变差系数为:

$$k = \sigma/\mu = \sqrt{e^{\sigma_L^{*2}} - 1}, (\sigma_L^* \text{ 与 } \mu, \sigma \text{ 有关}) \quad (1)$$

对于机械类火工品, 将对数等步长条件下的刺激量进行反对数变换后, 相隔两个刺激量的间隔比较小, 在工程上比较难以操作, 且试验结果的误差较大, 因此, 实际中, 升降法试验一般都是以服从正态分布来进行, 但在数据处理中要先进行刺激量对数变换。表 1 中的升降法试验数据就属于这种情况。运用极大似然估计原理求出表 1 中每组升降法试验的参数估计值(对数单位)  $(\hat{\mu}_{L_i}, \hat{\sigma}_{L_i})$ ,  $i = 1, 2, \dots, 205$ 。按文献[7]的纠偏系数对标准差估计值  $\hat{\sigma}_{L_i}$  进行纠偏, 得到  $\hat{\sigma}_{L_i}^*$ 。由公式(1), 根据每组升降法数据计算的感度变差系数值见表 2。

收稿日期: 2007-08-16; 修回日期: 2007-10-30

作者简介: 穆慧娜(1981-), 女, 在读博士研究生, 主要从事火工品可靠性设计研究。e-mail: muhuina@bit.edu.cn

表 1 205 批 D6-乙炮弹底火升降法试验数据

Table 1 Up-down method test data for D6-2 artillery primer of 205 batches

No.	batch number	s/cm	f	nf	s/cm	f	nf	s/cm	f	nf	s/cm	f	nf	s/cm	f	nf	s/cm	f	nf
1	03/97	2	0	3	2.5	3	6	3	6	6	3.5	6	0						
2	08/97	1.5	0	4	2	4	9	2.5	9	2	3	2	0						
3	17/98	1.5	0	2	2	2	8	2.5	8	3	3	3	2	3.5	2	0			
4	32/98	1.5	0	2	2	2	9	2.5	9	3	3	3	1	3.5	1	0			
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	7/99	1.5	0	6	2	6	7	2.5	7	2	3	2	0						
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	6/00	1.5	0	1	2	1	5	2.5	4	3	3	2	6	3.5	6	1	4	1	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
200	2/01	1.5	0	4	2	4	6	2.5	6	3	3	3	2	3.5	2	0			
201	20/02	1.5	0	4	2	4	7	2.5	7	4	3	4	0						
202	17/03	1	0	1	1.5	1	5	2	5	7	2.5	7	2	3	2	0			
203	13/04	1	0	1	1.5	1	5	2	5	8	2.5	8	1	3	1	0			
204	03/05	1	0	1	1.5	1	7	2	6	7	2.5	6	1	3	1	0			
205	04/06	1.5	0	6	2	6	8	2.5	7	2	3	1	0						

Note: s, stimulate level; f, fire; nf, no fire.

表 2 205 批 D6-乙炮弹底火感度变差系数计算结果

Table 2 Statistic result of sensitivity coefficient of variation for D6-2 artillery primer of 205 batches

year (number of patches)	coefficient of variation
1997 (27 batches)	0.16942, 0.23908, 0.24002, 0.32226, 0.32574, 0.34381, .....
1998 (34 batches)	0.16828, 0.17994, 0.20749, 0.22139, 0.33317, 0.45168, .....
1999 (23 batches)	0.18646, 0.27634, 0.35668, 0.36519, 0.43729, 0.46403, .....
2000 (21 batches)	0.17476, 0.2343, 0.26673, 0.3953, 0.30381, 0.533190, .....
2001 (23 batches)	0.21234, 0.23212, 0.38483, 0.39235, 0.44213, 0.44337, .....
2002 (23 batches)	0.18993, 0.20845, 0.21593, 0.36886, 0.36886, 0.38483, .....
2003 (22 batches)	0.23908, 0.23908, 0.332293, 0.34393, 0.34809, 0.4208, .....
2004 (17 batches)	0.20271, 0.23908, 0.31175, 0.32325, 0.37897, 0.420809, .....
2005 (8 batches)	0.26918, 0.27523, 0.36793, 0.41334, 0.439823, 0.51266, .....
2006 (7 batches)	0.28877, 0.29738, 0.34006, 0.34626, 0.39201, 0.48047, .....

以变差系数  $k$  为横坐标, 每个区间的频率 (频数/205) 为纵坐标, 绘制直方图如图 1 所示。

通过该直方图可以看出其分布近似为正态分布, 再进行柯尔莫哥洛夫法检验。

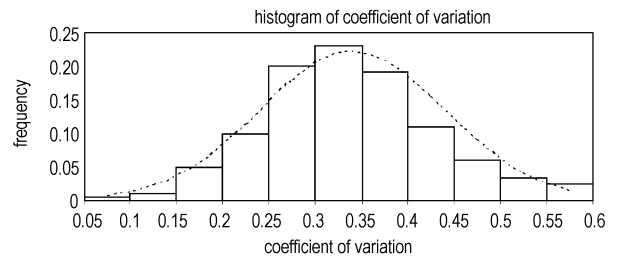


图 1 D6-乙炮弹底火感度变差系数直方图

Fig. 1 Histogram of sensitivity coefficient of variation for D6-2 artillery primer

2.1.1 直方图检验

对表 2 中变差系数值进行统计分析, 首先对表 2 中的变差系数进行分区, 并统计各区间的频数, 见表 3。

表 3 205 批 D6-乙炮弹底火感度变差系数分区及各区间频数

Table 3 Districted and various sectors frequency of sensitivity coefficient of variation for D6-2 artillery primer of 205 batches

sectors	frequence	sectors	frequence	sectors	frequence
0.05 - 0.1	1	0.25 - 0.3	41	0.45 - 0.5	12
0.1 - 0.15	2	0.3 - 0.35	47	0.5 - 0.55	7
0.15 - 0.2	10	0.35 - 0.4	38	0.55 - 0.6	5
0.2 - 0.25	20	0.4 - 0.45	22		

2.1.2 柯尔莫哥洛夫检验

柯尔莫哥洛夫检验<sup>[8]</sup> 样本分布类型的思想为: 从样本总体中任取  $n$  个样本做试验, 其子样  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  的次序统计量记为:

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$$

假设样本值服从正态分布, 根据此假设可从理论上计算出总体分布的累积积分函数值:

$$F(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) = \Phi(u_i)$$

而样本经验分布的累积积分值可由下式计算:

$$F_n(x_i) = \frac{\text{样本中} \leq x_i \text{测定值的个数}}{\text{样本容量}} = \frac{i}{n}$$

如果样本服从正态分布, 理论假设与实际样本值的分布是一致的, 即  $F(x_i)$  与  $F_n(x_i)$  应是接近的。因

此柯尔莫哥洛夫检验在比较  $(F(x_i)$  与  $F_n(x_i)$  二者的差异程度时,使用的统计量为:

$$D_n = \text{Max} \{ | F_n(x_i) - F(x_i) | , | F_n(x_{i-1}) - F(x_i) | \}$$

若  $D_n$  值小于相应的显著性水平  $\alpha$  和样本容量下的临界值  $D_{n,\alpha}$ , 可以认为样本符合正态分布; 如果  $D_n > D_{n,\alpha}$ , 不能认为样本来自正态分布。

针对以上数据进行柯尔莫哥洛夫检验。这里  $n = 205$ , 样本均值  $\bar{X} = 0.337871$ , 样本方差  $S = 0.092755$ , 相关计算结果如表 4 所示。

表 4 D6-乙底火感度变差系数的柯尔莫哥洛夫检验  
Table 4 Kolmogorov test for sensitivity coefficient of variation for D6-2 artillery primer

sectors	frequence	$D_n$
0.05 - 0.1	1	0.0037
0.1 - 0.15	2	0.0111
0.15 - 0.2	10	0.0112
0.2 - 0.25	20	0.0215
0.25 - 0.3	41	0.0397
0.3 - 0.35	47	0.0426
0.35 - 0.4	38	0.0520
0.4 - 0.45	22	0.0315
0.45 - 0.5	12	0.0128
0.5 - 0.55	7	0.0228
0.55 - 0.6	5	0.0136

查柯尔莫哥洛夫检验的临界值 ( $D_{n,\alpha}$ ) 表<sup>[9]</sup>, 可以得到当样本量  $n = 205$  时, 无论显著性水平  $\alpha$  取何值, 其差异度均大于表 4 中的最大差值 (0.0520), 因此假设成立, 即 D6-乙炮弹底火感度变差系数可以认为服从正态分布  $N(0.34, 0.1^2)$ 。

2.2 18 种机械类火工品的感度变差系数统计分析

统计了 18 种机械类火工品感度试验数据, 先通过极大似然估计得出感度试验数据的参数估计值 ( $\hat{\mu}_L, \hat{\sigma}_L$ ) (对数单位), 然后按公式 (1) 计算变差系数见表 5。

对表 5 数据进行分区, 并对其服从的分布进行直方图检验和柯尔莫哥洛夫检验。以变差系数  $k$  为横坐标, 每个区间的频率 (频数/18) 为纵坐标, 绘制直方图如图 2 所示。

从直方图上可以看出机械类火工品的感度变差系数近似为正态分布, 再对其进行柯尔莫哥洛夫检验。

查柯尔莫哥洛夫检验的临界值 ( $D_{n,\alpha}$ ) 表, 可以得到当样本量  $n = 18$  时, 无论显著性水平  $\alpha$  取何值, 其差异度均大于表 6 中的最大差值 (0.1086), 因此假设成立, 即机械类火工品感度变差系数服从正态分布  $N(0.30, 0.1^2)$ 。

表 5 18 种机械类火工品感度变差系数  
Table 5 Sensitivity coefficient of variation for 18 kinds of mechanical explosive devices

product	logarithmic mean	logarithmic deviation	standard coefficient of variation
520 primer	3.29	0.115	0.115
3#-1 percussion primer	1.575	0.165	0.166
2#-5 stab primer	0.649	0.183	0.185
D6-2 artillery primer	0.612	0.322	0.330
51# stab detonator	1.093	0.248	0.252
37# percussion primer	1.192	0.246	0.250
76# stab detonator	1.137	0.254	0.258
4# stab detonator	0.733	0.339	0.350
7# stab primer	0.465	0.226	0.229
76A stab detonator	0.816	0.252	0.256
51A stab detonator	0.861	0.258	0.262
18# stab primer	0.854	0.272	0.278
54# stab detonator	0.747	0.272	0.277
26# heat-resistance of stab primer	0.973	0.222	0.225
38# percussion primer	1.275	0.312	0.320
3#-2 stab primer	0.624	0.333	0.343
38#-1 percussion primer	1.277	0.360	0.373
8#-1 stab primer	0.321	0.420	0.440

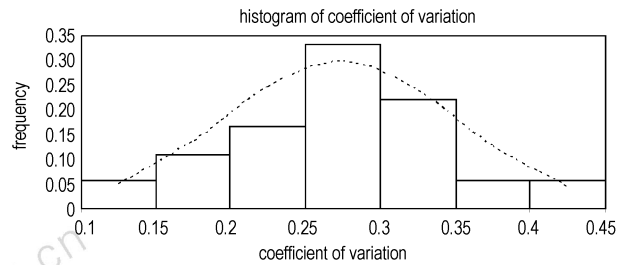


图 2 机械类火工品感度变差系数直方图  
Fig.2 Histogram of sensitivity coefficient of variation for mechanical explosive device

表 6 机械类火工品感度变差系数的分区及柯尔莫哥洛夫检验  
Table 6 Districted and Kolmogorov test for sensitivity coefficient of variation for mechanical explosive devices

sectors	frequence	$D_n$
0.1 - 0.15	1	0.0337
0.15 - 0.2	2	0.0359
0.2 - 0.25	3	0.0678
0.25 - 0.3	6	0.1086
0.3 - 0.35	4	0.0603
0.35 - 0.4	1	0.0450
0.4 - 0.45	1	0.0393

3 感度变差系数在火工品可靠性设计中的应用

目前火工品研制中仍普遍采用“画、加、打”的经

验方法,很少进行理论计算,对其可靠性水平预先估计更是缺乏一个定量认识,只能在产品研制出来后的大量试验验证,因此常造成研制周期延长,成本增加。由于火工品的发火可靠性主要由产品的感度决定。对于机械类火工品,有了本文的变差系数以后,可以通过火工品可靠性要求与感度分布之间的关系,预先得到感度分布参数的理论值,在火工品设计时,选定材料和结构参数后,在加工和试验之间可以先通过理论计算,其感度分布参数计算值是否符合理论值,如不符合,可以调节所选的参数,达到优化火工品设计的目的,这样可以减少设计的盲目性,使设计更科学。

例:要求设计某机械类火工品,可靠性指标为  $\gamma = 0.9$ ,  $R = 0.999$ ,发火条件为:锤重  $(307 \pm 1)$  g,落高为 8 cm。

根据经验,机械类火工品感度一般服从对数正态分布。由本文统计分析得到,机械类火工品感度变差系数服从参数为  $N(0.3, 0.1^2)$  的正态分布,为保守起见,取其 0.9 对应的分位数作为变差系数上限值进行设计,则  $k = 0.43$ 。由公式(1),可求得其感度对数标准差  $\sigma_L = 0.412$ 。

按照产品的感度服从对数正态分布  $LN(\mu, 0.412^2)$ ,刺激量服从正态分布  $N(8, 0.8^2)$ ,通过干涉理论设计方法<sup>[10]</sup>得出其产品的感度设计均值为 0.71(对数值),实际的感度均值为  $\mu = 2.21$ 。理论计算的发火可靠度 0.999 对应的刺激量:  $X_{0.999} = \exp[0.71 + \Phi(0.999) * 0.412] = 7.3$ 。  $X_{0.999} = 7.3 < 8$ ,产品满足可靠性指标。因此,只要使实际的感度均值小于 2.21,就能保证产品满足可靠性指标。在对感度均值进行设计时,选取同类产品中较大的变差系数值作为参数进行设计,也就是说对于在生产过程中可能产生的误差已经做了最大程度的考虑。

## 4 结 论

分析得出 D6-乙炮弹底火感度变差系数服从参数为  $N(0.34, 0.1^2)$  的正态分布,机械类火工品感度变差

系数服从参数为  $N(0.3, 0.1^2)$  的正态分布。在对机械类火工品进行可靠性设计需要对变差系数的值进行设定时,可以利用已有相似产品的变差系数统计分析值,也可以根据本文提供的机械类火工品感度变差系数的分布函数确定变差系数的值,通过实例表明利用本文确定的变差系数进行火工品可靠性设计是可行的。

## 参考文献:

- [1] 陈应舒,孙伏. 结构可靠性设计中尺寸变差系数的确定方法[J]. 陕西工学院学报,2004,20(1): 1-2.  
CHEN Ying-shu, SUN Fu. A method of deciding size coefficient of variation in structural reliability design [J]. *Journal of Shaanxi Institute of Technology*, 2004, 20(1): 1-2.
- [2] 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: 1-5.
- [3] 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.
- [4] 翟志强,蔡瑞娇,董海平,等. 利用升降法试验数据进行感度分布检验方法研究[J]. 火工品,2006(3): 1-4.  
ZHAI Zhi-qiang, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, et al. Study on test method of sensitivity distribution method with up-down method test data [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006(3): 1-4.
- [5] 严楠. 感度试验设计方法的若干研究[D]. 北京: 北京理工大学,1996.
- [6] 林金官. 对数正态分布和 Weibull 分布变差系数的抽样验证方案[J]. 工科数学,1998,14(3): 35-39.  
LIN Jin-guan. Sampling inspection plan of variation coefficient about logarithmic normal and Weibull distribution [J]. *Journal of Mathematics for Technology*, 1998, 14(3): 35-39.
- [7] 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] //王自力. 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,昆明. 北京: 国防工业出版社,2006. 259-263.
- [8] 张训诰,肖德辉. 可靠性及其应用[M]. 北京: 兵器工业出版社,1991.
- [9] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,1993.
- [10] CAO Jian-hua, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping. Study on firing reliability design of initiating explosive devices with stochastic stress [C] // *Theory and Practice of Energetic Materials*. Beijing/New York: Science Press, 2003. Vol. V: 738-743.

## Statistical Analysis of Sensitivity Coefficient of Variation for Mechanical Explosive Devices

MU Hui-na, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan

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

**Abstract:** Through the histogram method and Kolmogorov test, it was obtained that the sensitivity coefficient of variation for D6-2 artillery primer and mechanical explosive devices approximated the normal distribution of  $(0.34, 0.1^2)$ ,  $(0.3, 0.1^2)$ , respectively. Using the upper limit of coefficient of variation for mechanical explosive devices, the reliability design for initiating explosive device was developed. Results indicate that the coefficient of variation determined is practical for the reliability design.

**Key words:** military chemistry and technique of pyrotechnics; initiating explosive device; sensitivity distribution; coefficient of variation; reliability design