

文章编号: 1006-9941(2008)05-0535-04

## 基于 Bootstrap 方法的火工品可靠性评估

温玉全<sup>1</sup>, 洪东跑<sup>2</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. 北京航空航天大学工程系统工程系, 北京 100083)

**摘要:** 为了在较小样本下较精确地评估火工品的可靠性, 研究了升降法试验对火工品感度分布参数估计的影响, 提出了应用变差系数的升降法试验方案和相应的刻度参数修正估计, 数值模拟表明该估计具有较优的统计性质且受试验方案影响较小。结合升降法试验的特点, 给出了基于 Bootstrap 方法的火工品可靠性评估小样本方法, 并通过数值模拟与验证试验和传统的方法进行了比较。采用此方法评估可靠性指标为  $\gamma = 0.90, R \geq 0.999$  的某撞击火帽的可靠性下限为 0.99997, 此结果与大样本步进法评估结果 0.99998 基本一致。

**关键词:** 系统工程; 可靠性评估; 火工品; 变差系数; Bootstrap 方法

**中图分类号:** TJ45; O213.2

**文献标识码:** A

### 1 引言

目前, 国内外最常用的火工品可靠性评估方法主要有: ① 利用升降法试验数据, 估计感度分布中的未知参数, 求得分布函数某分位点估计或某刺激量处的可靠度估计<sup>[1-2]</sup>。② 在工作刺激量处做成败型试验, 应用二项分布模型评估产品的可靠性。第一种方法由于感度分布中参数的估计值可能有较大的误差, 从而导致分位点估计或可靠度估计结果误差较大, 对高可靠度产品, 这种偏差有时会达到难以容忍的程度<sup>[3]</sup>。第二种方法需要的样本量太大, 如火工品在置信度 0.90 或 0.95 下, 可靠度达到 0.999 时需要在工作刺激量处试验 2303 发或 2996 发, 且无一发失效。这种试验不仅工作量大而且试验费用昂贵, 研制方和使用方都难以接受<sup>[4]</sup>。故给出适合工程应用背景、基于小样本的火工品可靠性评估方法十分必要。

本文结合升降法试验的特点, 研究了升降法试验方案对参数估计的影响, 提出了利用变差系数确定升降法试验方案, 给出了升降法试验方案下刻度参数的修正方法, 在此基础上给出了基于 Bootstrap 小样本的可靠性评估方法。应用该方法对某撞击火帽的可靠性进行了评估, 并将评估结果与与大样本步进法进行了对比。

### 2 升降法试验方案

升降法的试验方案包括三个因素: 试验量  $n$ 、初始刺激量  $x_0$  和步长  $d$ 。 $x_0$  和  $d$  选定后, 用  $x_0$  作第一次刺激-响应试验; 第二次及以后每次试验所用刺激量的取法如下: 如前一次试探的反应结果为“响应”, 则本次试探用刺激量为  $x_{i+1} = x_i - d$ ; 如为“不响应”, 则为  $x_{i+1} = x_i + d$ 。如此循环试验, 至完成预定试验量  $n$  为止。由升降法试验数据可以得火工品感度分布参数  $(\mu, \sigma)$  的极大似然估计  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ , 当数据存在“混合区”即最大不响应刺激量要大于最小响应刺激量时, 极大似然估计值唯一<sup>[5]</sup>。在实际应用中, 一般认为只有数据存在“混合区”且试验刺激量的个数  $k$  满足  $4 \leq k \leq 7$  时才认为试验有效, 否则, 需要重新进行升降法试验。

研究<sup>[6]</sup>表明, 试验方案对  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  的影响较大, 其中试验步长  $d$  的影响最大,  $\hat{\mu}$  是  $\mu$  的无偏估计,  $\hat{\sigma}$  不是  $\sigma$  的无偏估计。为了进一步研究  $d, n$  对参数估计量的期望和方差的影响, 利用蒙特卡罗方法进行了模拟试验。模拟结果<sup>[7]</sup>表明: 试验方案对  $\hat{\mu}$  的影响较小, 对  $\hat{\sigma}$  的影响较大, 其中步长  $d$  对试验的成功率及参数估计的精确性有较大的影响。通过对不同的试验方案模拟比较表明, 当样本量相同时试验方案  $x_0 = \mu, d = \sigma$  较为理想, 故在确定试验方案应该尽可能获得  $(\mu, \sigma)$  比较精确的预估。为此本文研究了火工品的变差系数, 利用变差系数来确定试验步长。

变差系数是一个应用较广的参数, 由于这一参数能很好反映总体的分散程度, 它是衡量产品质量稳定性的一个重要的可靠性指标。假设随机变量  $T$  服从某分布,  $T$

收稿日期: 2008-04-24; 修回日期: 2008-07-24

基金项目: 总装预研基金(51305010303)

作者简介: 温玉全(1965-), 男, 副教授, 从事火工系统设计与可靠性技术研究。e-mail: wyquan@bit.edu.cn

的期望和方差分别为  $E_T, D_T$ , 则该分布的变差系数为:

$$C_v = \sqrt{DT}/ET \quad (1)$$

研究<sup>[8]</sup>表明,感度分布相同的火工品的变差系数近似相等,特别是结构和工艺相近的火工品。故当对新产品的了解较少时,可以通过相似产品确定近似变差系数  $C_v$ , 并利用  $C_v$  获得  $\sigma$  的初步估计,用于确定升降法试验步长  $d$ 。下文以正态分布为  $N(\mu, \sigma^2)$  例,介绍升降法试验方案的设计步骤:

① 初始刺激量  $x_0$  的确定: 取  $x_0 = \mu$  最佳,但在实际应用  $\mu$  中往往是未知的。由于  $\mu$  的估计受试验方案的影响较小,可以做一组样本量较小的升降法试验获得  $\tilde{\mu}$ , 取  $x_0 = \tilde{\mu}$ 。

② 试验样本量  $n$  的确定: 试验样本量越大,对产品的了解越多,参数估计越精确,但同时试验费用就越高。

③ 试验步长  $d$  的确定: 由感度分布相同且结构和工艺相似的产品,获得近似变差系数  $C_v$ , 取  $\mu = \tilde{\mu}$ , 由式(1)可得  $\sigma$  的近似值  $\tilde{\sigma} = C_v \tilde{\mu}$ , 取  $d = \tilde{\sigma}$ 。

### 3 参数的修正估计

由于  $\sigma$  的极大似然估计  $\hat{\sigma}$  不是无偏的,为此对其进行修正。以正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$  为例,  $\sigma$  的修正估计步骤如下:

① 根据 2 节设计试验方案  $(x_0, n, d)$ , 随机抽取产品进行升降法试验,由试验数据得分布参数的极大似然估计  $\hat{\mu}$  和  $\hat{\sigma}$ 。

② 对于总体  $N(\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2)$ , 按试验方案  $(\hat{\mu}, n, \hat{\sigma})$  进行模拟试验,同样可得分布参数的极大似然估计  $\hat{\mu}^*$  和  $\hat{\sigma}^*$ 。

③ 重复②  $k$  次,得到  $\hat{\sigma}$  的  $k$  个估计值  $\hat{\sigma}_1^*, \hat{\sigma}_2^*, \dots, \hat{\sigma}_k^*$ , 由此给出  $\sigma$  的修正估计  $\hat{\sigma}^* = \hat{\sigma}^2 / \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{\sigma}_i^*$ 。当  $k \geq 2000$  时,  $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{\sigma}_i^*$  收敛于  $E\hat{\sigma}$ , 一般取  $k = 3000$  就具有较好的收敛效果。

④ 由此可得产品的分布参数  $(\mu, \sigma)$  的估计值  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma}^*)$ , 其中称  $\hat{\sigma}^*$  为  $\sigma$  的修正估计,并基于此分布参数的估计值对产品进行统计推断。

利用蒙特卡罗方法模拟升降法,对  $\sigma$  的估计值进行修正。选择感度为正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 取  $N(10, 1)$ ,  $x_0 = 10$ , 步长  $d = h\sigma$ , 选择不同的试验方案  $(h, n)$  不同进行模拟试验,直到各自有效的试验次数为 10000。由于进行有效试验的成功率与试验方案相关,有研究<sup>[7]</sup>表明,当  $h$  越偏离 1 时,按试验方案  $(x_0 = \mu, d = h\sigma, n)$

进行有效的试验,试验成功率越低,故本文取  $h = \{0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4\}$ , 进行不同样本量  $n = \{30, 40, 50, 60\}$  的模拟试验,并对参数  $\sigma$  进行修正。记参数  $\sigma$  的估计为  $\hat{\sigma}$ , 计算其期望  $E(\hat{\sigma})$  和均方差  $MSE(\hat{\sigma})$ , 模拟结果见表 1。记参数  $\sigma$  的修正估计为  $\hat{\sigma}^*$ , 计算其期望  $E(\hat{\sigma}^*)$  和均方差  $MSE(\hat{\sigma}^*)$ , 模拟结果见表 2。

表 1 参数未修正模拟结果

Table 1 The simulation results of the parameters without revision

$h$	$n$	$E(\hat{\sigma})$	$ E(\hat{\sigma}) - \sigma $	$MSE(\hat{\sigma})$	$h$	$n$	$E(\hat{\sigma})$	$ E(\hat{\sigma}) - \sigma $	$MSE(\hat{\sigma})$
0.6	30	0.8610	0.1390	0.1486	0.6	50	0.8959	0.1041	0.0964
0.8	30	0.9056	0.0944	0.1201	0.8	50	0.9307	0.0693	0.0795
1.0	30	0.9372	0.0628	0.1034	1.0	50	0.9483	0.0517	0.0706
1.2	30	0.9818	0.0182	0.0858	1.2	50	0.9634	0.0366	0.0598
1.4	30	1.0449	0.0449	0.0721	1.4	50	0.9935	0.0065	0.0460
0.6	40	0.8900	0.1100	0.1214	0.6	60	0.9191	0.0809	0.0846
0.8	40	0.9136	0.0864	0.0954	0.8	60	0.9445	0.0555	0.0664
1.0	40	0.9467	0.0533	0.0870	1.0	60	0.9462	0.0538	0.0649
1.2	40	0.9663	0.0337	0.0700	1.2	60	0.9646	0.0354	0.0535
1.4	40	1.0096	0.0096	0.0578	1.4	60	0.9795	0.0205	0.0421

表 2 参数修正模拟结果

Table 2 The simulation results of the parameters with revision

$h$	$n$	$E(\hat{\sigma}^*)$	$ E(\hat{\sigma}^*) - \sigma $	$MSE(\hat{\sigma}^*)$	$h$	$n$	$E(\hat{\sigma}^*)$	$ E(\hat{\sigma}^*) - \sigma $	$MSE(\hat{\sigma}^*)$
0.6	30	0.9957	0.0043	0.1736	0.6	50	1.0034	0.0034	0.1056
0.8	30	1.0049	0.0049	0.1381	0.8	50	1.0049	0.0049	0.0898
1.0	30	1.0004	0.0004	0.1150	1.0	50	1.0048	0.0048	0.0771
1.2	30	0.9938	0.0062	0.0896	1.2	50	1.0035	0.0035	0.0641
1.4	30	1.0013	0.0013	0.0658	1.4	50	1.0049	0.0049	0.0473
0.6	40	1.0033	0.0033	0.1436	0.6	60	1.0082	0.0082	0.0951
0.8	40	1.0059	0.0059	0.1069	0.8	60	0.9932	0.0062	0.0706
1.0	40	1.0060	0.0060	0.0961	1.0	60	1.0038	0.0038	0.0606
1.2	40	0.9935	0.0065	0.0737	1.2	60	1.0018	0.0018	0.0573
1.4	40	0.9951	0.0049	0.0576	1.4	60	0.9917	0.0083	0.0438

结合升降法试验的特点,对表 1 和表 2 中的数据进行分析可得:

① 由表 1 可知,当样本量  $n$  固定时,  $E(\hat{\sigma})$  随  $h$  递增且  $|E(\hat{\sigma}) - \sigma|$  随  $h$  先递减后递增,  $MSE(\hat{\sigma})$  随  $h$  递减; 当  $h$  固定时,  $E(\hat{\sigma})$  随  $n$  变化较大但没有单调性,  $MSE(\hat{\sigma})$  随样本量  $n$  单调递减。由此可知  $E(\hat{\sigma})$  依赖于试验方案  $(h, n)$ , 而且估计量  $\hat{\sigma}$  具有相合性。

② 由表 2 可知,当样本量  $n$  固定时,  $E(\hat{\sigma}^*)$  随  $h$  没有明显的变化, 且  $|E(\hat{\sigma}^*) - \sigma|$  较小, 同时  $MSE(\hat{\sigma}^*)$  随  $h$  递减; 当  $h$  固定时,  $E(\hat{\sigma}^*)$  随  $n$  没有明显的变化, 同时  $MSE(\hat{\sigma}^*)$  随样本量  $n$  单调递减。由此可知,  $E(\hat{\sigma}^*)$  并不依赖于试验方案, 其略有变化可能是模拟时产生的伪随机数所造成的, 而且估计量

$\hat{\sigma}^*$  也具有相合性。

③ 对表 1 与表 2 的数据进行对比分析可知,在相同的试验方案下,虽然  $MSE(\hat{\sigma}^*)$  略大于  $MSE(\hat{\sigma})$ ,但  $|E(\hat{\sigma}^*) - \sigma| < |E(\hat{\sigma}) - \sigma|$ ,  $|E(\hat{\sigma}^*) - \sigma|$  基本上不受试验方案的影响,而  $|E(\hat{\sigma}) - \sigma|$  受试验方案的影响较大。

综上可知,当样本量  $n \geq 30$  时,修正估计量  $\hat{\sigma}^*$  总体上优于  $\hat{\sigma}$ ,且受试验方案影响较小。在进行火工品升降法感度实验时,试验前很难对参数进行较精确的估计,用于确定较好的试验方案,故选择一个受试验方案影响相对较小的估计  $\hat{\sigma}^*$  是合理的。

#### 4 基于 Bootstrap 方法的可靠性评估

Bootstrap 方法最早是由 Efron<sup>[9]</sup> 提出的一种新的增广样本统计方法,该方法通过对样本的经验分布进行随机再抽样,得到 Bootstrap 子样本,然后再进行统计量的估计。假设  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  为来自总体  $F(x, \theta)$  的独立样本,其中  $\theta$  为总体参数,可得基于样本  $X$  的经验分布函数  $F_n(x, \hat{\theta})$ 。Bootstrap 方法基于  $F_n(x, \hat{\theta})$  所得的随机样本进行统计推断,如果  $\hat{\theta}$  是  $\theta$  的一个好估计,则统计结果较准确。

假设某火工品感度分布为  $N(\mu, \sigma^2)$ ,其工作刺激量点为  $U$ ,置信水平为  $\gamma$ 。根据 Bootstrap 方法的原理,结合火工品升降法试验的特点,得评估步骤如下:

① 根据第 2 节确定试验方案  $(x_0, n, d)$ ,随机抽取产品进行升降法试验,由试验数据得分布参数的极大似然估计  $\hat{\mu}$  和修正估计  $\hat{\sigma}$ 。

② 对于总体  $N(\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2)$ ,按试验方案  $(\hat{\mu}, n, \hat{\sigma})$  进行模拟试验,同样可得分布参数的极大似然估计值  $\hat{\mu}^*$  和修正估计值  $\hat{\sigma}^*$ ,由此可得产品工作刺激量点的可靠度  $R^* = \Phi\left(\frac{U - \hat{\mu}^*}{\hat{\sigma}^*}\right)$ 。

③ 重复②  $S$  次,得到  $S$  个  $R^*$ ,并将其由小到大排序,得  $R_1^* \leq R_2^* \leq \dots \leq R_k^* \leq \dots \leq R_s^*$ ,其中  $K = S(1 - \gamma)$  (选择合适的  $S$  使  $K$  为自然数,一般要求  $S \geq 2000$ ),取  $R_k^*$  作为  $R^*$  的置信水平为  $\gamma$  的置信下限。

由于 Bootstrap 方法实际上是一种再次抽样过程,本文以感度分布服从  $N(\mu, \sigma^2)$  为例,通过模拟计算,证明基于 Bootstrap 的火工品可靠性评估方法的合理性,并与统计容许限法<sup>[10]</sup> 进行比较。为了方便模拟计算,本文假设  $X \sim N(10, 1)$ ,工作刺激量点  $U = 15$ 。取  $\gamma = 0.90, x_0 = 10, d = 1$ ,选择样本量  $n = \{30, 40, 50, 60\}$ ,分别模拟 5000 次。记  $R_1$  为基于 Bootstrap 方法的可靠性下限,  $R_2$  为容许限法的下限,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为

Bootstrap 方法和容许限法的可靠度置信区间的覆盖率 (指可靠性下限小于真值的次数与总模拟次数之比)。

由于模拟抽样次数较大,根据大数定律可知,可靠度置信区间覆盖率  $\lambda$  可以近似为置信水平  $\gamma$ 。由表 3 可知,当时  $n = \{30, 40, 50, 60\}$ ,  $\lambda_2$  远低于置信水平  $\gamma = 0.9$ ,即容许限法过于冒进,故不计算  $\text{var}(R_2)$ ; 而  $\lambda_1$  略大于 0.9,即基于 Bootstrap 方法的可靠性下限略为保守,同时  $\text{var}(R_1)$  随样本量递减。故本文方法是合理的,且优于容许限法。

表 3 模拟计算数据

Table 3 Data of simulated calculation

sample	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\text{var}(R_1)$
30	0.90	0.59	0.0028
40	0.91	0.69	0.0014
50	0.92	0.61	0.0011
60	0.92	0.55	0.0007

#### 5 实例

某撞击火帽要求可靠性指标为  $\gamma = 0.90, R \geq 0.999$ ,发火刺激量为:落锤重量  $(388 \pm 1)$  g,落高 100 mm。

根据火工品感度分布模型研究结果,其感度分布服从对数正态分布,把对数正态分布变换为正态分布,因其感度分布参数未知,故选一组样本量较小的升降法试验,确定初始刺激量;由相似产品的变差系数确定试验步长,取试验样本量为  $n = 50$ ,进行升降法试验,结果见表 4。

表 4 撞击火帽升降法试验数据

Table 4 Sensitivity test for a primer cap by up-and-down method

stimulus/cm	fire number	failure number
3.5	0	1
4.0	1	3
4.5	3	10
5	10	11
5.5	11	0

对升降法试验数据进行统计分析可得分布参数的极大似然估计  $\hat{\mu} = 1.580, \hat{\sigma} = 0.124$  和  $\sigma$  的修正估计值  $\hat{\sigma}^* = 0.132$ 。由于产品可靠度过高,利用容许限法计算其可靠度下限时,无法通过容许限系数查表计算,本文利用容许限系数给出基于经典二阶近似方法<sup>[10]</sup> 的可靠性下限  $R_{1L} = 0.9999998$ ; 同时计算得基于本文方法的可靠性下限  $R_{2L} = 0.99997$ 。

由于步进法试验样本量较大,其参数估计较为稳定。所研究的某撞击火帽的步进法试验数据见表 5。

对试验数据进行统计分析得  $\hat{\mu} = 1.575$ ,  $\hat{\sigma} = 0.165$ , 可靠性下限  $R_{3L} = 0.99998$ 。比较  $R_{1L}$ 、 $R_{2L}$  和  $R_{3L}$ , 可知  $R_{1L}$  远大于  $R_{2L}$  和  $R_{3L}$ , 即容许限法过于冒进, 而  $R_{2L}$  和  $R_{3L}$  基本一致, 即本文的方法与步进法的评估结果基本相同, 故本文方法是可行的, 且优于容许限法。

表 5 撞击火帽步进法试验数据

Table 5 Sensitivity test for a primer cap by run-down method

stimulus/cm	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
total number	400	200	200	200	200	200	200	200	200	400
fire number	1	4	34	59	103	166	185	192	198	397
fire percent	0.0025	0.02	0.17	0.245	0.515	0.83	0.925	0.96	0.99	0.9925

## 6 结 论

(1) 本文结合升降法试验数据及其参数估计的特点, 给出了对刻度参数的估计进行修正的方法, 数值模拟表明, 利用该方法得到的修正估计具有较优的统计性质, 且受试验方案的影响较小。

(2) 结合 Bootstrap 方法与升降法试验的特点, 给出了火工品可靠性评估的小样本方法, 通过与容许限法进行对比模拟计算, 可知该方法克服了容许限法的冒进, 具有较高的精度, 能够满足火工品的可靠性评估要求。

(3) 以某撞击火工品为例, 将本方法与容许限法、大样本步进法进行了对比验证试验, 试验结果表明该方法克服了在小样本评估条件下容许限法过于冒进的缺点, 与大样本步进法评估结果基本相同, 且略为保守, 可以实现对高可靠性产品的可靠性评估。

### 参考文献:

- [1] MIL-STD-331B. Environmental and performance test for fuze components, 1989.
- [2] Dixon W J, Mood H M. A method for obtaining and analyzing sensitivity

data[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1984, 43: 109 - 126.

- [3] 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.
- [4] 董海平, 蔡瑞娇. 火工品可靠性评估小样本试验设计方法[J]. *含能材料*, 2008, 15(6): 608 - 611.  
DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao. New test design method with small samples for reliability assessment of initiating explosive devices[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 608 - 611.
- [5] Jeff Wu. Efficient sequential designs with binary data[J]. *Journal of American Statistical Association*, 1985, 8: 074 - 984.
- [6] Wetherill G B. On the existence of maximum likelihood estimators for the binomial response models[J]. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1981, 43: 310 - 313.
- [7] 洪东跑. 火工品可靠性试验方法的若干研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.  
HONG Dong-pao. Study on reliability tests of initiating devices[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007.
- [8] 穆慧娜, 焦清介, 温玉全. 机械类火工品感度变差系数统计分析[J]. *含能材料*, 2008, 16(2): 212 - 215.  
MU Hui-na, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Statistical analysis of sensitivity coefficient of variation for mechanical explosive devices[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 212 - 215.
- [9] Efron B. Better bootstrap confidence interval[J]. *Amer Statist Assor*, 1987, 82: 171 - 200.
- [10] 洪东跑, 温玉全. 火工品双边可靠性近似计算方法[J]. *含能材料*, 2008, 16(2): 216 - 218.  
HONG Dong-pao, WEN Yu-quan. Approximate lower limit of bilateral reliability of initiating explosive devices[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 216 - 218.

## Reliability Assessment for Initiating Devices Based on Bootstrap

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

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

2. Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To assess the reliability of initiating devices accurately with small samples, the influence of up-down test on the scale parameter was studied. The experiment scheme was designed with coefficient of variation. Based on the up-down test data, the revised method of the scale parameter was given. The results of simulation calculation show that the revised parameter has better statistical characteristics and related to the test itself little. The reliability assessment method for initiating devices with small samples based on the bootstrap was proposed, and the estimation of the scale parameter was revised, with that the accuracy of assessment was proved by simulation calculation and test. The method was used to assess the reliability of one initiating device, with  $\gamma = 0.90$  and  $R \geq 0.999$ , the result is that the lower limit reliability is 0.99997, similar to 0.99998 got by the run-down method.

**Key words:** system engineering; reliability assessment; initiating device; coefficient of variation; bootstrap method