

# 战斗部飞行可靠性评估方法研究

董军超, 朱重阳, 陈津虎

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 解决高可靠、小子样战斗部飞行可靠性评估时样本量不满足标准要求的问题。**方法** 通过对战斗部结构功能分析, 建立包含壳体强度、主装药安定性及主装药正常起爆等单元的可靠性框图, 并利用L-M法对战斗部系统进行可靠性评估。首先利用基准设计许用值的安全系数法将应力强度干涉模型与安全系数法进行结合, 对壳体强度可靠性进行评估; 然后结合战斗部试验数据, 利用最大熵试验法, 在小样本下评估战斗部主装药安定性及正常起爆的可靠性; 最后, 将各单元的可靠性数据转化为成败型数据进行分析, 利用L-M法, 结合战斗部整机试验数据, 开展战斗部飞行可靠度评估。**结果** 分别计算了小子样下战斗部壳体和装药安定性及正常起爆的可靠度, 并将其转换为等效成功数和等效失败数, 结合战斗部试验打靶等可靠性信息, 综合评估了战斗部飞行可靠度。**结论** 充分利用战斗部在研制阶段的试验信息进行评估, 减少了样本量, 解决了战斗部可靠性高、样本量小的评估难题。

**关键词:** 小子样; 战斗部; 可靠性评估; L-M法; 安全系数法; 最大熵试验法

**中图分类号:** TJ450      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2022)05-0073-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.05.009

## Reliability Assessment Method of the Flight Warhead

DONG Jun-chao, ZHU Chong-yang, CHEN Jin-hu

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT:** A reliability assessment method of the flight warhead is proposed under the limitation of the high reliability and small sample in this paper. The structural function of the warhead is analyzed, the reliability block is established with the shell strength, the stability and normal explosion of the main charge. The reliability of the warhead system is assessed by utilizing the L-M method. Firstly, the safety factor method through the allowable value of the standard design is applied, the stress interfere model and the safety factor is integrated. The reliability assessment of the shell strength is carried out. Secondly, the experiment data of the warhead is applied, the stability and normal explosion of the main charge is assessed through the maximum entropy experiment. Finally, the reliability data of the units are turned into the success or failure data, the reliability assessment of the warhead is carried out with the L-M method. The reliability of the shell strength, the stability and normal explosion of the main charge is computed under the situation of small sample. The equivalent success number and failure number is obtained, and the flight reliability of the warhead is assessed with the experiment data. The experiment data of the development stage is fully considered, the reliability assessment of the warhead with the limitation of the high reliability and small sample is carried out effec-

收稿日期: 2021-09-05; 修订日期: 2021-10-19

**Received:** 2021-09-05; **Revised:** 2021-10-19

**作者简介:** 董军超(1990—), 男, 博士, 主要研究方向为可靠性评估、加速贮存。

**Biography:** DONG Jun-chao (1990—), Male, Doctor, Research focus: reliability assessment, accelerated storage.

**引文格式:** 董军超, 朱重阳, 陈津虎. 战斗部飞行可靠性评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 073-078.

DONG Jun-chao, ZHU Chong-yang, CHEN Jin-hu. Reliability Assessment Method of the Flight Warhead[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 073-078.

tively.

**KEY WORDS:** small sample; warhead; reliability assessment; L-M method; safety factor method; maximum entropy experiment

战斗部作为导弹最重要的有效载荷,承担着毁伤目标的重要任务,准确评估弹上战斗部的可靠度,对掌握弹上战斗部可靠性水平和全弹可靠性评估起着至关重要的作用。对于产品的可靠性评估,最直接准确的评估方法是成败型的二项分布法,但对于高可靠性的产品,该方法要求样本数量较大。在置信度不小于90%的前提下,要验证产品的可靠度达到0.999,需要2000多发产品进行试验,且无一发失效。对于拔销器等结构简单、数量大的典型火工品,可依据GJB 376—87《火工品可靠性评估方法》中基于二项分布的计数法对火工品可靠性进行评估<sup>[1-6]</sup>。战斗部不同于火工品,是典型的高可靠、小子样含能产品。由于工程中受到成本、研制进度、安全等因素制约,战斗部在研制及定型阶段的试验样本量小,并且用于可靠性评估的参数很难获取,所以战斗部的小子样问题尤其突出。

针对战斗部飞行可靠性评估方法尚处于起步阶段,在工程中主要是利用安全系数等设计信息,结合工程经验得到战斗部飞行可靠性大于指标要求的结论。在理论研究中,也较少有学者对战斗部的可靠性评估方法进行系统的研究<sup>[7-8]</sup>。为了解决高可靠、小子样弹上战斗部可靠性评估难题,本文通过对战斗部的可测量试验数据进行分析,结合评估方法的特点,提出一种弹上战斗部飞行可靠度评估方法。

本文结合试验数据特点,对基准设计许用值的安全系数法<sup>[9-12]</sup>、最大熵试验法<sup>[13-17]</sup>和L-M法<sup>[18-21]</sup>进行深入研究。首先根据战斗部结构功能特点,建立可靠性模型,它包含了壳体强度、主装药安定性及主装药正常起爆3个可靠性单元。通过基准设计许用值的安全系数法对壳体强度的可靠性进行评估,利用最大熵试验法,基于可靠性信息等值原理<sup>[22-24]</sup>,评估主装药安定和主装药正常起爆的可靠性。最后,将各单元可靠性数据转化为成败型数据,通过L-M法对战斗部系统进行可靠性综合评估。

## 1 战斗部可靠性模型构建

针对战斗部的结构和功能特点进行分析,可靠性框图应包含以下几方面:战斗部侵彻目标过程中,壳体结构强度不足,导致壳体主体结构破坏;战斗部侵彻目标过程中,主装药发生不安定现象,导致早炸;战斗部侵彻进入目标后,主装药未正常起爆。通过上述分析,战斗部的可靠性主要由壳体强度、主装药安定、主装药正常起爆3个部分决定。故战斗部可靠性

框图主要由壳体强度可靠性 $R_1$ 、主装药安定可靠性 $R_2$ 和主装药正常起爆可靠性 $R_3$ 决定。在逻辑功能上构成了串联系统,如图1所示。

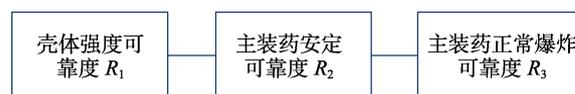


图1 战斗部可靠性框图  
Fig.1 Reliability block diagram of warhead

## 2 战斗部可靠性单元飞行可靠性评估方法

对战斗部的3个可靠性单元分别进行评估,利用基于安全系数法的应力强度模型评估壳体强度的可靠度,利用最大熵法评估主装药安定性和正常起爆2个单元的可靠度。

### 2.1 战斗部壳体

战斗部壳体强度能否满足要求主要体现在高速侵彻目标过程中结构是否发生破坏。在试验过程中,很难测量到战斗部壳体在侵彻目标过程中所受到的最大应力,因此需要通过仿真来获取应力值。壳体的强度通过静爆试验获得,一般在研制阶段会对少量的壳体进行静爆试验,获取的结构强度值为小子样数据。通过获取的应力、强度数据,利用基准设计许用值的安全系数法评估战斗部壳体强度。首先需要对应力强度干涉模型进行分析,然后评估模型中的未知参数,最后结合安全系数对模型进行变换,进而评估壳体强度的可靠性。

根据应力强度干涉模型推导出的结构可靠性系数 $u_0$ 表示为:

$$u_0 = \frac{\mu_s - \mu_L}{\sqrt{C_{vs}^2 \mu_s^2 + C_{vL}^2 \mu_L^2}} \quad (1)$$

式中: $\mu_s$ 为强度的母体均值; $\mu_L$ 为应力的母体均值; $C_{vs}$ 为强度的变差系数; $C_{vL}$ 为应力的变差系数。通过对式(1)中未知参数的求解,得到结构可靠性系数 $u_0$ 的值,通过查表或MATLAB进行计算得到结构可靠度<sup>[25-26]</sup>。

1) 强度的母体均值 $\mu_s$ 。在典型应力强度干涉模型中,对样本数需求很大。对于弹上战斗部,其样本数一般很少,属于典型的小子样问题。通过对小子样的样本均值公式进行变换,可将其作为母体均值使用。战斗部性能参数的样本强度均值 $\bar{s}$ ,通过正态分

布的参数区间估计可得母体均值的下限估计值  $\mu_{sL}$ , 见式 (2)。

$$\mu_{sL} = \frac{\bar{S}}{1 + u_\gamma \frac{C_{vs}}{\sqrt{n}}} \quad (2)$$

式中:  $n$  为样本数。在小样本情况下, 可以用强度的下限估计值  $\mu_{sL}$  代替强度的母体均值  $\mu_s$  使用。

2) 应力的母体均值  $\mu_L$ 。一般情况下, 在设计时已了解战斗部在使用过程中所受应力情况。从保守的角度, 可以将真实工况中最大应力量级作为应力母体均值使用。最大使用应力  $L_{SY}$  作为 99% 应力分布单边允许应力上限值。

$$\mu_L = \frac{L_{SY}}{1 + 2.33C_{vL}} \quad (3)$$

按照式 (3) 计算的  $\mu_L$  实际上是应力均值的上限估计值。

结合安全系数评估战斗部壳体强度可靠性。基准设计许用值的安全系数  $K$  是强度与最大使用应力的比值:

$$K = \frac{\bar{S}}{L_{SY}} \quad (4)$$

可靠性置信下限  $R_L$  由式 (5) 计算。

$$R_L = \Phi \left( \frac{\mu_s - \mu_L}{\sqrt{C_{vs}^2 \mu_s^2 + C_{vL}^2 \mu_L^2}} \right) = \Phi \left( \frac{\mu_s / \mu_L - 1}{\sqrt{\left( C_{vs} \frac{\mu_s}{\mu_L} \right)^2 + C_{vL}^2}} \right) \quad (5)$$

在小样本量的情况下, 母体均值  $\mu_s$  由下限估计值  $\mu_{sL}$  代入,  $\mu_L$  值由上限估计值代入, 则:

$$\frac{\mu_s}{\mu_L} = \frac{\mu_{sL}}{\mu_L} = K \frac{1 + 2.33C_{vL}}{1 + u_\gamma C_{vs}} \quad (6)$$

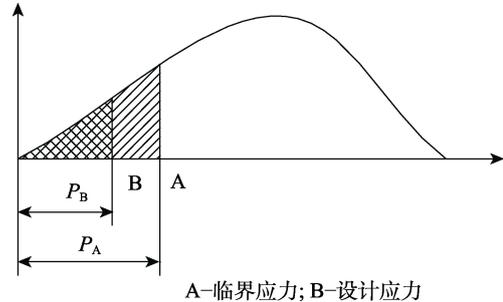
## 2.2 主装药安定性和正常起爆

主装药安定性是考核战斗部在侵彻目标过程中主装药是否提前发生反应, 以往的评估方法是从材料的角度, 根据主装药的应力及强度值采用应力强度模型进行评估。但生产过程中会出现主装药有缺陷的情况, 因此本文采用实际打靶过程中的试验数据进行评估。在打靶过程中, 为了更好地考核产品性能, 对战斗部打靶速度进行加严考核, 试验结果为成败型数据。

对正常起爆性能的考核同样利用加严试验进行, 通常会采用四倍间隙试验法, 试验结果为成败型数据。以往是利用定性的评估方法对可靠性进行考核, 即认为试验成功, 可靠性满足要求。本文通过最大熵试验法对可靠性进行定量评估。

最大熵试验法同样是基于成败型数据进行评估的方法, 二项分布法可以认为是最大熵试验法的一种特殊形式。其基本原理见图 2, B 点为设计应力 (即

应力强度模型中应力), A 点为临界应力 (即应力强度模型中强度)。用  $M=P_A/P_B$  ( $P$  为产品的失效概率) 表示功能裕度系数。功能裕度系数  $M$  越大, 产品的可靠性越高。选取的应力值介于 A 和 B 之间。



A-临界应力; B-设计应力

图 2 最大熵试验法功能裕度系数

Fig.2 Schematic diagram of functional margin coefficient of maximum entropy test method

通过图 2 可以看出, 设计应力点 B 距离临界应力点 A 越远, 可靠性  $R_B$  越高。当置信度  $\gamma$  一定时, 其需要的无失效子样数  $n_B$  越多。可靠性信息等值方程见式 (7)。

$$n_A (-\ln R_A) = n_B (-\ln R_B) = -\ln(1 - \gamma) \quad (7)$$

根据可靠性信息量等值原理, 为了降低样本量, 可在设计应力点 B 和临界应力点 A 之间选择一个应力点 S, 把  $K=P_S/P_B$  叫作熵强化系数,  $1 \leq K \leq M$ , 其试验样本量就会比设计应力点 B 的降低很多。试验点 S 越靠近临界应力点 A, 试验样本量越少。

假定战斗部某可靠性性能参数为  $X$ , 服从正态分布, 设计值为  $X_B$ , 临界值为  $X_A$ 。选取  $X_S$  ( $X_S > X_B$ ) 作为试验点, 试验的样本量为  $n_S$ , 试验中  $F$  个试验件失效, 则产品可靠性评估公式为:

$$R_{L_B} = 1 - \Phi \left( \frac{X_B + C \cdot X_B \cdot \Phi^{-1}(1 - R_{L_S}) - X_S}{C \cdot X_S} \right) \quad (8)$$

式中:  $R_{L_B}$  为实际产品可靠性置信下限;  $C$  为临界值  $X_A$  的变差系数, 它反映的是产品的质量水平, 是正态分布中标准差与均值的比值, 一般  $C$  值的范围为 0.03~0.15, 没有数据可以参考的情况下, 也可通过摸底试验确定该值;  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布  $N(0,1)$  的分布函数;  $\Phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布  $N(0,1)$  分布函数的逆函数;  $R_{L_S}$  为试验中可靠性置信下限。

在无失效的情况下, 即  $F=0$ , 产品可靠性评估公式 (8) 可转换为:

$$R_{L_B} = 1 - \Phi \left( \frac{X_B + C \cdot X_B \cdot \Phi^{-1}(1 - (1 - \gamma)^{1/n_S}) - X_S}{C \cdot X_S} \right) \quad (9)$$

当正式试验中失效试验件数量  $F=0$  时, 可靠性指标为  $R_0$ , 试验所需小样本量  $n_S$  的计算公式为:

$$n_s = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln\left\{1 - \Phi\left[\frac{X_S}{C \cdot X_B} + \frac{X_S \cdot \Phi^{-1}(1-R_0)}{X_B} - \frac{1}{C}\right]\right\}} \quad (10)$$

### 3 战斗部系统飞行可靠性评估方法

战斗部系统可靠性评估采用 L-M 法。若可靠性单元的数据为成败型数据, 则统计其成功数  $S_i^*$  和试验数  $n_i^*$ ; 若为非成败型数据, 应将其计算结果转化为成败型数据, 再应用 L-M (Lindstorm-Maddan) 方法。

通过各可靠性单元的原始试验数据得到其可靠性点估计  $\hat{R}_i$  与可靠性置信下限  $R_{L}(\gamma)$ , 据此可将非成败型数据转化为成败型数据  $(n_i^*, s_i^*)$ ,  $(n_i^*, s_i^*)$  即为第  $i$  个单元转化后的试验数与成功数, 它由方程组 (11)、(12) 解得。

$$s_i^* = n_i^* \hat{R}_i \quad (11)$$

$$\frac{\int_0^{R_{L}(\gamma)} R^{s_i^*-1} (1-R)^{n_i^*-s_i^*} dR}{\int_0^1 R^{s_i^*-1} (1-R)^{n_i^*-s_i^*} dR} = 1-\gamma \quad (12)$$

式中:  $\hat{R}_i$  为置信度为 0.5 时可靠性单元的可靠性置信下限代替;  $S_i^*$  为等效成功数;  $n_i^*$  为等效试验数;  $R_{L}(\gamma)$  为置信度为  $\gamma$  时可靠性单元的可靠性置信下限。

若各可靠性单元均为成败型可靠性单元, 且为串联系统, 则采用 L-M 方法进行可靠性综合计算。若第  $i$  个可靠性单元的成功数为  $S_i^*$ , 试验数为  $n_i^*$ , 则第  $i$  个可靠性单元的等效失败数为  $F_i^* = n_i^* - S_i^*$ 。系统可靠性最大似然估计为:

$$\hat{R} = \prod_{i=1}^k \frac{S_i^*}{n_i^*} \quad (13)$$

按式 (14) 计算的等效试验数  $N^*$ 。

$$N^* = \min\{n_1^*, n_2^*, \dots, n_m^*\} \quad (14)$$

式中:  $N^*$  为等效试验数;  $n_i$  为第  $i$  个可靠性单元的试验数或等效试验数,  $i=1, \dots, m$ ;  $m$  为可靠性单元个数。

按式 (15) 计算等效失败数  $F^*$ 。

$$F^* = N^* \left(1 - \prod_{i=1}^m \frac{S_i^*}{n_i^*}\right) \quad (15)$$

已知试验数为  $N$ , 等效成功数为  $S$ , 等效失败数为  $F$ , 则分布为  $\beta(R|S, F)$ 。在给定置信度时, 则经典置信下限  $R_L$  由式 (16) 确定。

$$I_{R_{LC}}(S, F+1) = 1-\gamma \quad (16)$$

最后, 可得系统可靠性置信下限的近似值  $R_L$ 。

## 4 案例分析

战斗部的飞行可靠性由壳体强度可靠性  $R_1$ 、主装药安定可靠性  $R_2$  决定。对于壳体强度可靠性  $R_1$  采用基准设计许用值的安全系数法进行评估; 主装药安定可靠性  $R_2$  利用最大熵试验法进行评估; 主装药正常起爆可靠性  $R_3$  利用最大熵试验法进行评估; 战斗部整体可靠性利用 L-M 方法进行综合评估。

### 4.1 战斗部壳体可靠性评估结果

根据产品特点及置信度要求, 计算时,  $C_{VS}$  取 0.1,  $C_{VL}$  取 0.1,  $\gamma$  取 0.8。通过计算正态分布的单侧分位值,  $\mu_\gamma = 0.842$ 。

结构强度的母体均值  $\mu_s$  为:

$$\mu_{sc\gamma} = \frac{\bar{S}}{1 + u_\gamma \frac{C_{VS}}{\sqrt{n}}} = \frac{\bar{S}}{1 + 0.842 \times 0.1} \quad (17)$$

应力的母体均值  $\mu_L$  为:

$$\mu_L = \frac{L_{SY}}{1 + 3.72 C_{VL}} = \frac{L_{SY}}{1 + 3.72 \times 0.1} \quad (18)$$

最大使用应力通过仿真与试验计算得到, 通过式 (4) 得出安全系数为 1.25。

战斗部壳体结构强度可靠度为:

$$R_L = \Phi\left(\frac{\mu_s - \mu_L}{\sqrt{C_{VS}^2 \mu_s^2 + C_{VL}^2 \mu_L^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_s / \mu_L - 1}{\sqrt{\left(C_{VS} \frac{\mu_s}{\mu_L}\right)^2 + C_{VL}^2}}\right) = 0.999 \quad (19)$$

采用安全系数法计算得出战斗部壳体结构强度可靠性为  $R_1 = 0.999$ 。

### 4.2 主装药安定性可靠性评估结果

主装药安定性可通过战斗部高速侵彻目标时是否安定为考核标准。在试验中战斗部飞行速度来分析研制过程中的试验数据, 共进行 6 次靶标试验, 产品工作正常。

根据样本计算样本均值  $\bar{X}$  和样本标准差  $S$ , 结合飞行速度要求, 获取了试验点和要求值的速度, 利用最大熵试验法进行计算。

当  $\gamma = 0.8$ ,  $C = 0.1$  时, 在无失效的情况下, 试验点  $S$  的可靠性置信下限为:  $R_{L_s} = (1-\gamma)^{1/n_s} = 0.7647$ 。

采用最大熵试验法计算得出战斗部主装药安定可靠性为  $R_2 = 0.998$ 。

### 4.3 主装药正常起爆可靠性评估结果

基于最大熵试验法, 利用标准中规定的四倍间隙试验法开展主装药正常起爆试验数据, 对其爆轰可靠性进行评估。

利用四倍间隙试验法共进行了 8 发试验, 均正常起爆。当  $\gamma=0.8$ ,  $C=0.1$  时,  $n_s=8$ ,  $X_S=4X_B$ 。在无失效的情况下, 四倍间隙试验点  $S$  的可靠性置信下限  $R_{L_S}=0.8178$ , 实际产品可靠性置信下限  $R_{L_B}=0.999\ 999\ 999\ 999\ 995\approx 1$

采用最大熵试验法计算得出战斗部主装药安定可靠性为  $R_3=0.999\ 999\ 999\ 999\ 995$ , 可以认为可靠度为 1。

### 4.4 战斗部可靠性评估结果

战斗部的飞行可靠性主要由壳体强度可靠性  $R_1$ 、主装药安定可靠性  $R_2$  和主装药正常起爆可靠性  $R_3$  决定。

1) 壳体强度可靠性信息转换。由于壳体强度数据为非成败型数据, 需要将其转化为成败型数据  $(n_i^*, s_i^*)$ 。 $\gamma=0.5$  时, 壳体强度可靠度为 0.999 842, 当  $\gamma=0.8$  时, 壳体强度可靠度为 0.999。利用 L-M 法通过转化法计算得到等效试验数为 2 259.1, 等效成功数为 2 258.74, 等效失败数为 0.357。

2) 主装药安定可靠度。当  $\gamma=0.5$  时, 在无失效的情况下, 实际产品可靠性置信下限为 0.999 45。由于主装药安定数据为非成败型数据, 需要将其转化为成败型数据  $(n_i^*, s_i^*)$ 。当  $\gamma=0.5$  时, 主装药安定可靠度为 0.999 45, 当  $\gamma=0.8$  时, 壳体强度可靠度为 0.998。利用 L-M 法, 通过转化法计算得到等效试验数为 1 269.2, 等效成功数为 1 268.5, 等效失败数为 0.698。

3) 主装药正常起爆可靠度。由于主装药正常起爆的可靠度趋近于 1, 认为主装药正常起爆不会发生失效, 因此不影响战斗部可靠度计算。

4) 战斗部飞行可靠度评估。在第 3 节得到壳体强度及主装药安定单元的等效成功数和等效失败数, 由于各单元为串联系统, 采用 L-M 方法进行可靠性综合计算。系统可靠性最大似然估计  $\hat{R}=0.999\ 29$ , 等效试验数  $N^*=1\ 269.2$ , 等效失败数  $F^*=0.899$ 。

已知试验数为  $N$ , 等效成功数为  $S$ , 等效失败数为  $F$ , 则分布为  $\beta(R|S, F)$ , 在给定置信度时, 则经典置信下限  $R_L$  由式 (16) 确定, 得到战斗部飞行可靠度  $R_L=0.997\ 5$ 。

## 5 结论

基准设计许用值的安全系数法、最大熵试验法和 L-M 法均可充分利用研制阶段的可靠性数据, 综合应用上述的 3 种方法可解决战斗部小子样飞行可靠性

评估问题。

### 参考文献:

- [1] GJB 376—1987, 火工品可靠性评估方法[S]. GJB 376—1987, Assessment Method of Reliability of Initiating Devices[S].
- [2] GJB 6478—2008, 火工品可靠性计量计数综合评估方法[S]. GJB 6478—2008, Variables-Attributes Synthetic Assessment Method of Reliability of Initiating Devices[S].
- [3] 蔡瑞娇, 董海平. 一种火工品可靠性评估的新方法——浅释 GJB6478—2008[J]. 航空兵器, 2009, 16(1): 46-49. CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping. A New Method for Assessing Reliability of Initiating Explosive Devices[J]. Aero Weaponry, 2009, 16(1): 46-49.
- [4] 董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜. 火工品可靠性计量-计数评估方法的有效性研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 553-555. DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao, MU Hui-na. Validity of Variables-Attributes Assessment Method for Reliability of Initiating Explosive Devices[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 553-555.
- [5] 田玉斌. 敏感性产品的可靠性评估方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2000. TIAN Yu-bin. Studies on Reliability Estimation for Sensitivity Products[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000.
- [6] 张强. 火工品可靠性评定方法的分析与研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(5): 92-94. ZHANG Qiang. Analysis and Study on Reliability Assessment Method of Initiating Devices[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(5): 92-94.
- [7] 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, 2007, 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, 2007, 15(6): 608-611.
- [8] 洪东跑, 赵宇, 温玉全. 基于虚拟样本的火工品可靠性评估[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(6): 669-672. HONG Dong-pao, ZHAO Yu, WEN Yu-quan. Reliability Assessment for Explosive Initiator Using Virtual Samples[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(6): 669-672.
- [9] 周福生. 飞航导弹结构强度可靠性评估[J]. 战术导弹技术, 1994(4): 59-64. ZHOU Fu-sheng. Evaluation of Structural Reliability for Cruise Missile[J]. Tactical Missile Technology, 1994(4): 59-64.
- [10] 荣吉利, 宋乾强, 杨国孝, 等. 正态应力-正态强度下可靠度精确置信下限[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 332-336. RONG Ji-li, SONG Qian-qiang, YANG Guo-xiao, et al.

- The Exact Lower Confidence Limit of Reliability for Normal Stress and Normal Strength[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(2): 332-336.
- [11] 刘志全, 孙国鹏, 宫颖. 载人飞船某连接分离机构的可靠性验证试验方法[J]. *中国空间科学技术*, 2011, 31(1): 56-61.  
LIU Zhi-quan, SUN Guo-peng, GONG Ying. Reliability Verification Test Methods of a Connecting/Separating Mechanism for Manned Spacecraft[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2011, 31(1): 56-61.
- [12] 伊泉剑, 董海平, 翟志强, 等. 基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(10): 1007-1011.  
YI Xiao-jian, DONG Hai-ping, ZHAI Zhi-qiang, et al. Reliability Design for Initiating Devices Based on Stress-Strength Interference Model[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(10): 1007-1011.
- [13] 李荣, 王慧频, 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, 17(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, 17(1): 75-80.
- [14] 刘炳章, 丁同才. 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, DING Tong-cai. Assessment Method of High Reliability with Small Samples and Its Application[J]. *Quality and Reliability*, 2004(1): 19-22.
- [15] 刘炳章. 航天火工装置可靠性优化试验方法: 最大熵试验法[J]. *导弹与火工技术*, 2001(1): 23-28.  
LIU Bing-zhang. The Maximum Entropy Test Method—The Optimized Test Method for Reliability of Initiating Devices of Spaceflight[J]. *Technology of Missile and Pyrotechnic*, 2001(1): 23-28.
- [16] 包堂堂, 周强强, 张志超, 等. 非能动核电厂爆破阀可靠性评估方法研究[J]. *阀门*, 2016(3): 29-32.  
BAO Tang-tang, ZHOU Qiang-qiang, ZHANG Zhi-chao, et al. Study on the Evaluation Method of Squib Valve Reliability in Passive Nuclear Power Plant[J]. *Valve*, 2016(3): 29-32.
- [17] 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.
- [18] 甄昕, 刘孟凯, 王森. 可靠性数据综合常用方法研究[J]. *战术导弹技术*, 2005(1): 15-19.  
ZHEN Xin, LIU Meng-kai, WANG Miao. Study on General Combining Methods of Reliability Data[J]. *Tactical Missile Technology*, 2005(1): 15-19.
- [19] 叶豪杰, 熊乾坤, 王栋. 几种常用的成败型系统可靠性综合方法之比较[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(1): 154-157.  
YE Hao-jie, XIONG Qian-kun, WANG Dong. Comparison of Several Common Reliability Synthesis Method of Pass-Fail System[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(1): 154-157.
- [20] 刘文一, 李玉杰, 朱良明. 基于金字塔模型和L-M法的某固体发动机可靠性评定方法[J]. *海军航空工程学院学报*, 2019, 34(1): 121-125.  
LIU Wen-yi, LI Yu-jie, ZHU Liang-ming. Reliability Evaluation Method of a Solid Rock Motor with L-M Method Based on Pyramid Model[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2019, 34(1): 121-125.
- [21] 南骅, 叶存奉, 闵小龙. 基于L-M法的火箭弹存储可靠性分析[J]. *水雷战与舰船防护*, 2011, 19(4): 38-41.  
NAN Hua, YE Cun-feng, MIN Xiao-long. Reliability Analysis of Rocket Storage Based on L-M Method[J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2011, 19(4): 38-41.
- [22] 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, 15(1): 79-82.  
CAI Rui-jiao, ZHAI Zhi-qiang, DONG Hai-ping, et al. Assessment Method for Reliability of Initiating Devices Based on Test Information Entropy Equivalence[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(1): 79-82.
- [23] 王耀华, 王亮, 王云峰, 等. 基于信息量等值原理的火工品小样本试验方法[J]. *探测与控制学报*, 2011, 33(2): 5-8.  
WANG Yao-hua, WANG Liang, WANG Yun-feng, et al. Small Sample Method for Reliability Test of Initiating Explosive Devices Based on Information Capacity Equal Principle[J]. *Journal of Detection & Control*, 2011, 33(2): 5-8.
- [24] 董海平, 赵霞, 蔡瑞娇. 基于信息量等值的火工品可靠性评估小样本方法[J]. *兵工学报*, 2011, 32(5): 554-558.  
DONG Hai-ping, ZHAO Xia, CAI Rui-jiao. An Assessment Method of Reliability of Initiating Devices Based on Information Measure Equivalency[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(5): 554-558.
- [25] 刘小会. 正态分布积分的高精度算法[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(3): 179-181.  
LIU Xiao-hui. A High Precision Algorithm for the Normal Distribution Integral[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 34(3): 179-181.
- [26] GB/T 4885—2009, 正态分布完全样本可靠度置信下限[S].  
GB/T 4885—2009, Lower Confidence Limit of Reliability for Omplete Sample from Normal Distribution[S].

责任编辑: 刘世忠