

文章编号: 1671-7449(2024)01-0066-05

某型催泪弹引信保险距离试验方法研究

蒲利森, 于立晓, 徐鹏, 赵静

(63856部队, 吉林白城 137001)

摘要: 针对某型催泪弹引信无法采用传统碰靶法对保险距离指标进行考核的试验难题, 提出了基于容许限理论保险距离试验评估方法。该方法依据相关军标科学给定了置信度和不解除保险概率, 提出在不改变引信机构动作的基础上将解除保险信号改为发火信号输出的改造方案, 测试得到引信实际解除保险距离, 运用容许限理论计算得出引信解除保险距离的上下限范围, 达到考核评估保险距离指标的试验目的。

关键词: 催泪弹; 弹道自适应引信; 保险距离; 容许限

中图分类号: TJ43

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.01.010

引用格式: 蒲利森, 于立晓, 徐鹏, 等. 某型催泪弹引信保险距离试验方法研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(1): 66-70.

PU Lisen, YU Liyao, XU Peng, et al. Study on the safe distance test method of a type of tear gas fuze[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(1): 66-70.

Study on the Safe Distance Test Method of A Type of Tear Gas Fuze

PU Lisen, YU Liyao, XU Peng, ZHAO Jing

(Unit 63856 of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: In order to solve the problem that a tear-gas fuze can not be evaluated by the traditional impact target test method, based on the allowable limit theory, a new evaluation method of the safe distance test is proposed. The method is according to the relevant military standard science for a given confidence level and the probability of fuze not arming. This paper puts forward a modification scheme to change the output of arming distance output signal to the output of ignition signal without changing the operation of the fuze mechanism, and tests the actual arming distance of the fuze. The upper and lower limits of the fuze arming distance are calculated by tolerance limit to achieve the test purpose of assessing the safety interval index of the fuze.

Key words: tear gas fuze; ballistic adaptive fuze; safety interval; tolerance limit

0 引言

引信保险距离是步兵榴弹安全性试验考核的关键指标, 一直受到靶场的高度重视。GJB102 A—1998《弹药系统术语》中给出了关于保险距离的定义: “从发射到引信完成解除保险所经历的距离”^[1]。对于碰炸引信, GJB5692—2006《榴

弹发射器弹药定型试验规程》给出了碰靶考核的试验方法, 试验时在指标规定的距离上设置25 mm厚木板靶, 观察弹丸撞击靶板时的作用情况, 以此判定引信保险距离与可靠解除保险距离是否合格^[2]。而对于无触发机构的电子引信, 可通过在引信中加装电磁感应元件, 采用遥测或其他方法实现非接触式测量^[3-4]。但是对于步兵榴弹

收稿日期: 2023-01-19

作者简介: 蒲利森(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事榴弹特种弹试验与评估研究。E-mail: 1821178155@qq.com。

来说, 由于引信口径小, 遥测设备改装所需空间较大而难以实现。近年来, 通过改装将引信解除保险后立即起爆的试验方法在实践中应用较多, 该方法主要是基于试验样本的均值和方差推断出引信的解除保险距离的区间, 通过比较 $(\chi-3\sigma, \chi+3\sigma)$ 与指标规定的保险距离和解除保险距离范围来实现试验考核的目的^[5]。但是, 受试验经费、试验周期等因素制约, 试验时样本数量一般比较有限, 仅靠样本数据无法反映试验总体的均值和标准差, 容易产生误判^[6]。

某型催泪弹配用的引信为弹道自适应电子时间引信, 其解除保险的工作原理为: 延期解保电路工作后, 启动电作动器, 通过电作动器解除电火工品的短路使得电火工品处于待工作状态。由于该引信头部为塑料件, 材料强度低, 因此采用传统的碰靶试验法不易考核引信保险距离与解除保险距离指标。为解决上述问题, 本文依据军用标准及产品研制总要求关于引信保险安全明确的防止解除隔离失效率和解除保险可靠性的规定要求, 针对采用点估计法难以考核评估的实际, 通过深入分析引信作用机理, 科学给出检验的置信度和解除与不解除保险的可靠度, 在不改变引信机构的基础上将解除保险信号改为发火信号输出, 测试得到引信实际解除保险距离, 运用容许限理论计算出距离区间的上下限范围, 达到准确考核引信保险距离的目的。

1 指标分析及改造方案

1.1 战技指标分析

该型催泪弹的研制总要求中明确提出: “引信保险距离不小于 60 m, 可靠解脱保险距离不大于 100 m”。由于弹丸头部为塑料件, 传统的碰靶法无法满足对产品战技指标考核的要求。GJB373B-2019《引信安全性设计准则》关于引信安全失效率明确规定: “……c. 从启动解除保险和解除隔离流程或身管发射弹药出膛口到安全分离: 防止引信解除隔离的失效率应不大于一千分之一”^[7]; GJB7058-2010《炮弹引信定型试验规程》关于解除保险距离试验结果评定中要求“引信作用可靠度符合规定或全部作用, 则判定解除保险距离满足战术技术指标要求”^[8]。结合产品研制总要求中关于引信作用可靠度的“在置信度为 0.90 时, 作用可靠度下限为 0.94”的规

定, 可以将指标中规定的保险距离和解除保险距离考核进一步明确为: 置信度为 0.90 时, 引信不解除保险的可靠度不小于 0.999 的距离不小于 60 m, 作用可靠度不小于 0.94 的可靠解除保险距离不大于 100 m。

1.2 引信改造方案

通过分析引信结构和 workflows 可知: 引信主要由延期保险模块、射角识别模块、顶点识别模块和执行控制模块组成。当弹丸发射后, 引信内电路开始上电工作, 系统开始计时, 当弹丸飞行时间等于 1.2 s 时, 延期解除保险模块向执行控制模块输出解除保险信号, 解除电力保险, 进入待发状态。同时, 引信射角识别模块和顶点识别模块通过涡轮发电机的频率变化, 在弹丸的上升过程中计算出顶点、射角等弹道参数, 查表得到发火点的发电机频率, 执行控制模块根据到达顶点时间计算出最大不发火时间; 在弹丸进入下降阶段后, 当涡轮电机的频率等于计算得出的发火频率时或者弹丸飞行时间大于最大不发火时间时, 输出发火信号, 执行控制模块接收到发火信号输出后, 使发火电容放电, 实现引信点火。系统工作原理见图 1, 各模块之间的关系见图 2。

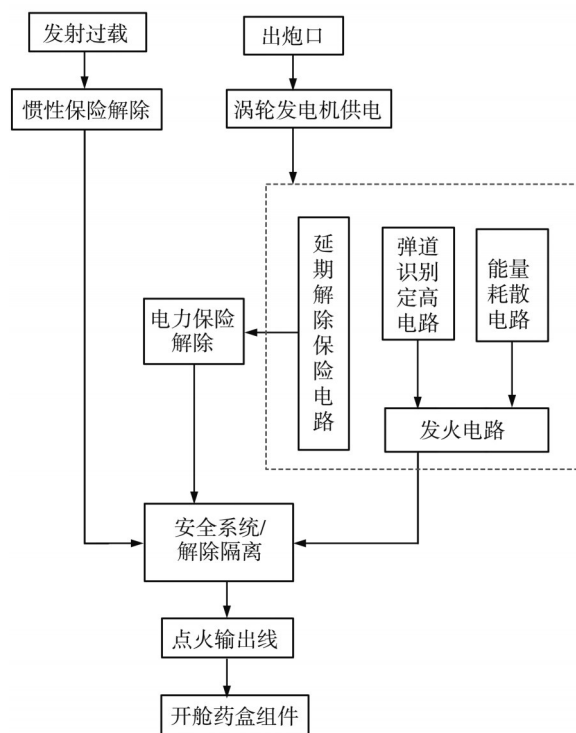


图 1 系统工作原理图

Fig. 1 System working principle diagram

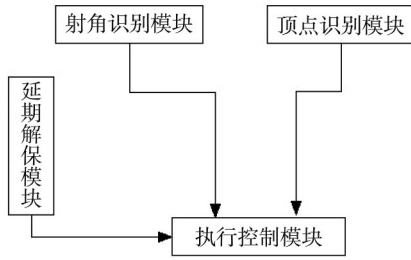


图2 各模块关系图

Fig. 2 Relationship diagram of each module

从系统工作流程可知,引信解除保险时其延期解除保险模块会向执行控制模块输出解除保险信号,而引信开舱作用时,其射角识别模块和顶点识别模块也会向执行控制模块输出发火信号,因此,试验时只要更改执行控制模块输入和输出响应信号,将引信解除保险信号代替发火信号输出,即可在不影响引信保险机构动作的前提下,通过改变发火信号响应点使引信在解除保险瞬间实现引信发火。利用步兵榴弹炸点坐标测量系统测量捕捉引信作用时的光学信号,获得空中炸点坐标,由北斗定位系统(GPS定位系统)测得炮口发射坐标后,通过空中炸点坐标和炮口坐标计算获得引信解除保险时弹丸实际飞行距离。但是,少数几发测试解除保险距离数值并不能全面反映引信的真实水平和状态,为此,引入容许限理论计算得出该产品解除保险距离的区间范围,根据计算结果判定其保险距离与解除保险距离是否满足指标要求。

2 试验数据分析

2.1 数据分析模型

设随机变量 X, Y 独立, X 服从正态分布 $X \sim N(\delta, 1)$, Y 服从自由度为 n 的 χ^2 分布 $Y \sim \chi^2$, 则随机变量 $Z = X / \sqrt{(1/n)Y}$ 的分布称为自由度为 n , 非中心参数为 δ 的 t 分布, 记为 $Z \sim t_n, \delta$; 当 $\delta = 0$ 时, 分布退化为 t 分布, 记为 $Z \sim t_n$ 。非中心 t 分布的概率密度函数和分布函数为^[9]

$$f(x|n, \delta) = \frac{n^{n/2}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \frac{\exp(-\delta^2/2)}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \Gamma\left(\frac{n+i+1}{2}\right) \frac{(\delta x)^i}{i!} \left(\frac{2}{n+x^2}\right)^{\frac{i}{2}}, \quad (1)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^0 f(t|n, \delta) dt. \quad (2)$$

但是, 采用式(1)和式(2)计算非中心 t 分布函数或分位数时, 收敛慢、运算量大。非中心 t 分布函数^[10]又可表示为

$$F(x|n, \delta) = \int_0^{\infty} \Phi(xt - \delta) \cdot g(w) \cdot dt, \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $g(w)$ 为 $W = \sqrt{(1/n)\chi_n^2(t)}$ 的概率密度函数, 根据随机变量函数的求概率密度运算法则, 有

$$g(t) = f_{\chi_n^2}(nt^2) \cdot 2nt, \quad (4)$$

式中: $f_{\chi_n^2}(nt^2)$ 为自由度为 n 的 χ^2 函数 χ_n^2 的概率密度函数, 由式(3)和式(4)得

$$F(x|n, \delta) = \int_0^{\infty} \Phi(xt - \delta) \cdot f_{\chi_n^2}(nt^2) \cdot 2nt \cdot dt. \quad (5)$$

利用式(5)可以进行非中心 t 分布函数或分位数计算。

正态分布的单侧容许限在服从正态分布的产品的可靠下限分析 χ^2 、变系数的置信上限分析、导弹的射程能力评定中有着重要应用。设正态分布总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 分布函数为 $F(x)$, X_1, X_2, \dots, X_n 为简单随机样本, 样本均值为 \bar{X} , 样本方差为 S , 存在统计量 $X_b = X_b(X_1, X_2, \dots, X_n)$, $X_j = X_j(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 满足

$$P\{F[X_b(X_1, X_2, \dots, X_n)] \leq \beta_1\} \geq 1 - \gamma, \quad (6)$$

$$P\{F[X_j(X_1, X_2, \dots, X_n)] \geq \beta_2\} \geq 1 - \gamma, \quad (7)$$

则统计量 X_b 称为总体分布的 (β_1, γ) 容许下限, 即容许下限至少以显著性水平 $1 - \gamma$, 保证 $X \geq X_b$ 的概率大于 $1 - \beta_1$; 统计量 X_j 称为总体分布的 (β_2, γ) 容许上限, 即容许上限至少以显著性水平 $1 - \gamma$ 保证 $X \leq X_j$ 的概率大于 β_2 。统计量 $X_b = \bar{X} - \bar{K} \cdot S$, 则 \bar{K} 称为正态分布单侧容许下限系数; 统计量 $X_j = \bar{X} + \bar{K} \cdot S$, 则 \bar{K} 称为正态分布单侧容许上限系数。正态分布容许限与样本容量 n 、概率 β 和 γ 有关, 采用自由度为 $n - 1$, 非中心参数为 δ 的 t 分布表示为

$$F_{t_{n-1, \delta}}(\sqrt{n} \bar{K}) = 1 - \gamma, \quad (8)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (10)$$

式中： $\delta = \sqrt{n} \mu_\beta$ 为非中心参数； μ_β 为概率 β 的上侧分位数。根据式(5)和式(8)可知

$$F(x_{1-\gamma}|n-1, \delta) = \int_0^\infty \Phi(\sqrt{n} \bar{K}t - \sqrt{n} \mu_\beta) \cdot f_{\chi^2_{n-1}}[(n-1)t^2] \cdot 2(n-1)t \cdot dt = 1 - \gamma, \quad (11)$$

式中： $x_{1-\gamma} = \sqrt{n} \bar{K}$ 为自由度为 $n-1$ ，非中心参数为 δ 的 t 分布的分位数。

给定样本容量 n ，概率 β 和 γ 时，正态分布单侧容许限系数采用式 (11) 计算，具体过程如图 3 所示。

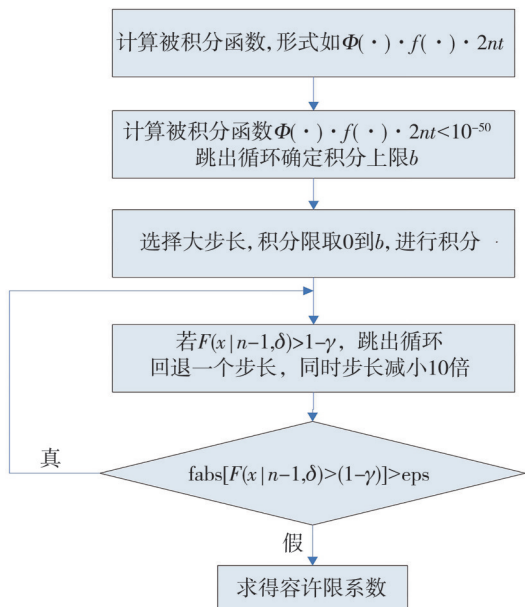


图 3 容许限计算流程

Fig. 3 Tolerance limit calculation process

通常情况下，容许限系数决定了容许上、下限的估计精度， \bar{K} 越大，容许区间覆盖范围越宽，估计精度就越低。通过运用 MTALAB 软件计算

分析，可以获得容许限系数随样本量变化曲线，见图 4。

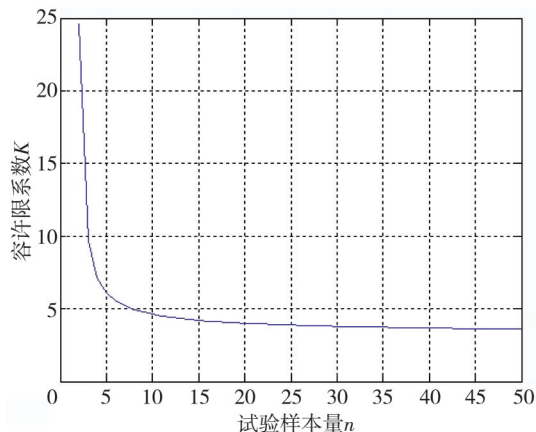


图 4 容许限系数随样本量变化曲线

Fig. 4 Tolerance limit coefficient change curve with sample size

从图 4 中可以看出，容许限的估计精度随着样本量的增加不断提高。当样本量 n 为 5 时，曲线降幅开始变缓；当样本量 n 为 10 时，曲线幅度已经基本平缓；当样本量 n 大于 30 时，曲线基本上趋于一条平行于样本量轴的直线。说明当样本量 n 大于 30 时，再增加样本量对估计精度贡献不大，反而会造成试验的极大消耗。

2.2 试验结果评估

根据上述试验方案，在靶场进行的该型催泪弹保险与解除保险距离定型试验中，采用改装引信配砂弹体进行对空射击，试验条件为射角 50° 、弹药温度为常温 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，试验数量为 30 发，利用步兵榴弹炸点坐标测量系统逐发测试催泪弹引信开舱炸点距离 X_i ，试验数据详见表 1。

表 1 靶场定型试验测试数据表
Tab. 1 Shooting range test data sheet

弹序	1	2	3	4	5	6	7	8
炸点距离/m	80.65	80.36	78.38	78.94	76.03	78.17	80.15	80.63
弹序	9	10	11	12	13	14	15	16
炸点距离/m	79.52	80.27	76.55	81.91	80.55	79.64	80.56	77.52
弹序	17	18	19	20	21	22	23	24
炸点距离/m	73.41	79.64	80.24	79.31	72.55	76.04	71.94	73.09
弹序	25	26	27	28	29	30		
炸点距离/m	74.82	74.47	73.39	70.51	72.54	76.99		

由于引信解除保险距离属于单样本范畴，可采用 SPSS 统计分析方法对试验样本是否符合正态分布进行试验，根据单样本 K-S 方法对测试数据进行检验，计算结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出，由于概率 p 值 (0.07)

大于显著性水平 (α 通常取 0.05)，不能拒绝零假设，可以认为引信解除保险距离的总体分布与正态分布无显著性差异^[11]。因此引信解除保险距离服从正态分布 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，其中 μ 为解除保险距离的数学期望， σ 为其均方差散布。

表2 单样本K-S检验计算结果
Tab.2 Calculation results of single sample K-S test

个案数	正态参数		最极端差值			价差统计	渐进显著性(双尾)
	平均值	标准偏差	绝对	正	负		
30.00	77.89	2.93	0.15	0.11	-0.15	0.15	0.07

为此,构造统计量 $X_b(X_1, X_2, \dots, X_n)$, $X_j(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 分别对应引信保险距离和解除保险距离。由于已知样本容量 n 及概率 β_1, β_2 和 γ ,可以计算得出正态分布单侧容许限系数 \bar{K}_1 和 \bar{K}_2 ;再根据测得的解除保险距离数据 X_1, X_2, \dots, X_n 计算得到 \bar{X} 和 S ,从而得到保险距离 X_b 和解除保险距离 X_j 。

$$X_b(X_1, X_2, \dots, X_n) = \bar{X} - \bar{K}_1 \cdot S, \quad (12)$$

$$X_j(X_1, X_2, \dots, X_n) = \bar{X} + \bar{K}_2 \cdot S. \quad (13)$$

将计算得到的 X_b 和 X_j 与指标规定的保险距离(下限 A_{1m})和解除保险距离(上限 A_{2m})做比较。若 $X_b \geq A_{1m}$,则判定引信保险距离满足战术技术指标要求;若 $X_j \leq A_{2m}$,则判定引信解除保险距离满足战术技术指标要求。

根据变换后的战术技术指标(置信度为0.90时,不解除保险的炮口安全距离不小于 A_{1m} ,解除保险的可靠作用距离不大于 A_{2m})可知, $\gamma=1-0.90$, $\beta_1=0.1\%$, $\beta_2=0.94$ 。经计算,保险距离下限值为64.25 m,解除保险距离上限值为84.33 m。由于计算结果 $64.25 \text{ m} > 60 \text{ m}$ 且 $84.33 \text{ m} < 100 \text{ m}$,故可以判定该电子引信的保险距离和解除保险距离均满足产品的战技指标要求。

3 结论

1)通过容许限系数随样本量变化曲线可知,容许限的估计精度随着样本量的增加不断提高,当样本量为30时,试验的费效比最好;

2)将催泪弹弹道自适应引信的解除保险信号改造为发火信号输出,通过试验测试获得样本量为30的引信实际解除保险距离的有效数据,运用容许限理论计算得出解除保险距离的区间为64.25~84.33 m,满足指标60.00~100.00 m要求,解决了非碰炸引信难以测试得难题。

参考文献:

[1]国防科学技术工业委员会.弹药系统术语:GJB102A—1998[S].北京:国防科工委军标出版发

行部,1998.

[2]中国人民解放军总装备部.榴弹发射器弹药定型试验规程:GJB5692—2006[S].北京:总装备部军标出版发行部,2006.

[3]吴晓颖,张万君,杜恩祥,等.基于电磁感应的线圈靶引信保险距离试验方法[J].探测与控制学报,2009,31(3):31-34.

WU Xiaoying, ZHANG Wanjun, DU Enxiang, et al. Fuze safety distance testing method based on electromagnetic induction of coil target[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(3): 31-34. (in Chinese)

[4]吴晓颖,张万君,杨雨迎,等.可编程电子时间引信保险距离动态试验方法的优化设计[J].制导与引信,2009,30(1):1-5.

WU Xiaoying, ZHANG Wanjun, YANG Yuying, et al. Optimization design of dynamic state test method of safety interval for programmable electron-time fuze[J]. Guidance & Fuze, 2009, 30(1): 1-5. (in Chinese)

[5]齐晓红.解除保险即起爆的炮口保险距离测试方法[J].探测与控制学报,2010,32(3):6-8.

QI Xiaohong. Muzzle safety distance testing of instant detonating fuze after arming[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(3): 6-8. (in Chinese)

[6]彭长清.误差与回归[M].北京:兵器工业出版社,1991.

[7]中国兵器工业第二一三研究所,中国兵器工业标准研究所.引信安全性设计准则:GJB373B—2019[S].北京:中央军委装备发展部,2020.

[8]中国人民解放军第一装备部.炮弹引信定型试验规程:GJB7058—2010[S].北京:总装备部军标出版发行部,1998.

[9]傅惠民.二维单侧容限系数方法[J].航空学报,1993,14(3):166-172.

FU Huimin. A method of two dimensional one sided tolerance factors[J]. Acta Aeronautica Sinica, 1993, 14(3): 166-172. (in Chinese)

[10]陈希儒.数理统计引论[M].北京:科学出版社,1981.

[11]黄中文,吴磊,聂志鹏.SPSS统计分析与应用[M].第3版.北京:电子工业出版社,2016.