

计数法和计量法的发展历程

郑航, 蔡瑞娇, 董海平, 曹建华

(北京理工大学机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 回顾了火工品领域中可靠性评定的两大方法体系: 计数法和计量法, 详细叙述了各自的特点及其发展历程, 并给出了近年来发展的新方向。

关键词: 火工品; 可靠性评定; 计数法; 计量法

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

The Development of Attribute Sampling Plan and Variable Sampling Plan

ZHENG Hang, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, CAO Jian-hua

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: The paper reviews the development of attribute sampling plan and variable sampling plan, which are the two kinds methods for estimating the reliability of pyrotechnics. The characteristics of them are introduced in detail and the development trend is put forward.

Key words: Initiating explosive devices; Reliability assessment; Attribute sampling plan; Variable sampling plan

火工品是武器、弹药及其它燃烧、爆炸系统的首发元件, 无论是使用还是贮藏的情况下, 对火工品可靠性要求都比较高。火工品的可靠性由设计决定、由生产实现。对于生产出的火工品, 评估它的可靠性, 从而反馈给设计和生产, 这是一个相对独立的过程, 主要采用数理统计理论、方法进行评估。几十年来, 国内外在火工品可靠性评估领域中发展了不少方法, 可以分为两大类: 计数法和计量法。

1 计数法

计数法是评估火工品可靠性的最传统的方法, 它是将产品确认为成败型, 依据批量条件和取样试验过程的不同, 分别采用二项分布模型、超几何分布模型或者负二项分布模型, 做出相应的评定^[1]。

以 Buehler 二项分布模型的经典方法^[2]为例, 如果要得到置信水平 γ 为 95%、可靠度不低于 99% ($R_L=0.99$) 的结果, 按 GJB376-87^[3]或 1950 年 Mood 给出的算法^[4]算出全发火火工品的试验个数是 298 发。

由 $0.99^n=0.95$, 可解得 $n=5$, 即从理论上说, 只要在该点试验 5 发, 5 发全发火, 就能推断出该产品满足可靠度为 0.99, 置信度为 0.95 的指标, 实际用计数法时却要求试验 298 发全发火; 而根据 $p^{298}=0.95$, 可解得产品的实际发火概率可达 0.999 828, 实际却评估为 0.99。由此可见计数法是很保守的。

然而计数法的统计分析简单, 试验过程也很直接。只需确定一个刺激量 x 并给出要求的可靠性指标, 也就是可靠度下限和置信水平, 然后就可以在

收稿日期: 2003-04-23

作者简介: 郑航 (1978-), 女, 硕士研究生, 从事火工品可靠性研究工作。

该刺激量下进行一定发数的试验。如果全发火,表明火工品在该刺激量下达到了要求的可靠度,否则表明没有达到。正是由于计数法的简单直接,至今仍广泛应用在廉价、可靠度相对较低的产品的可靠性评估中。

随着高科技军事的迅猛发展,对火工品的可靠性要求也在不断提高,许多航空、航天、导弹用火工品的可靠性要求已达到了 99.9% 的标准(置信水平均为 95%),甚至达到了 99.99%。用上面的方法可以算出置信水平为 95%、可靠度不低于 99.9% 的全发火火工品的试验个数是 2 996 发,这样花费的人力、物力令人无法承受。

2 计量法

由于计数法的诸多不适于现实要求的弱点,人们开始转向计量法,或称变量法。临界刺激量概念及与敏感性数据相关联的统计方法,为火工品的可靠性评估的计量法奠定了基础。

计量法与计数法的根本区别就在于计量法以感度分布为基础,而计数法不考虑感度分布,二者采用的统计模型不同。在计量法中又根据刺激量以及各刺激量下试验量是否已知,分为序贯性(Sequential)计量法及非序贯性(Non-sequential)计量法。

2.1 非序贯性计量法

在非序贯性计量法中,各刺激量以及各刺激量下试验量是预先确定的。代表性的有:单点法、两点法、极端发火点法、Behrens 法、Probit 法、Karber 法、步进法等^[5]。

单点法又称百分比法,在一个刺激量下试验 N 件火工品,已知感度分布为正态分布及已知正态分布的两个参数之一的情况下,计算另一个参数的点估计和区间估计。

两点法是在两个刺激量 x_1 、 x_2 下分别试验 N_1 、 N_2 件火工品,在已知感度分布为正态的情况下,计算两个参数的点估计和区间估计。

极端发火点法是在一系列等距离刺激量下各试验一件样品,然后用中位数法做 50% 百分点的估计。该方法只适用于对称型的感度分布模型。

Behrens 法是在一系列等距离刺激量下各试验 N_i 件样品,然后用线性拟合的响应函数和不响应函数的等值点作为 50% 百分点的估计。此法是极端发

火点法的改进。

Probit 法是 Bliss 于 1934 年提出的,适用于推断感度分布^[6]。例如在感度分布为正态分布的假设下,用百分位数 $u_i = \Phi^{-1}(p_i)$ 作为另一个变量,其中 p_i 是响应率。用 u 对 x 做线性回归,如果存在直线关系 $u = \alpha + \beta x$ 则认为该假设正确,其中 $\mu = -\alpha/\beta$, $\sigma = 1/\beta$ 。

1908 年英国 Spearman^[7] 和 1931 年德国 Karber^[8] 各自独立提出了不依赖分布模型的剂量响应曲线的均值和标准偏差估计法,被称为 Spearman-Karber 法或 Karber 法。这种方法是对感度数据虚拟一个计量数据样本,然后用矩估计法算出均值和标准偏差。步进法是 Karber 法在等刺激量间隔、等试验量下的特例,具有规范化和程序化的试验过程,可用于对感度分布模型假设进行多种检验。目前,我国火工品界使用最多的非序贯性计量法就是步进法,已经列在 GJB/Z377A-94^[9] 中。1999 年,田玉斌用鞍点逼近^[10] 技术代替传统的渐进正态性考虑极大似然估计的渐进性质,使渐进误差限从 $O(n^{-1/2})$ 到 $O(n^{-3/2})$,且大大减少了步进法的试验量,从 GJB/Z377A-94 中推荐的每个刺激量下的样本量 $n=50$ 或 40,减少为 $n=20$ ^[4]。

非序贯性计量法的最大优点是试验程序确定,同时这也是它的最大缺点。因为一旦确定了试验程序就不能再根据实际需要进行调整,因此导致样本的利用率偏低,试验量相应较大。

2.2 序贯性计量法

序贯性计量法是在 20 世纪 40 年代开始出现并发展起来的,旨在克服非序贯性计量法的弱点。这类方法先确定初始刺激量 x_i ,第 i ($i \geq 2$) 个刺激量 x_i 的选择由前 $i-1$ 个刺激量以及这些刺激量下的试验结果确定,因此是灵活而不确定的。其优点是能够把更多的样品集中在待估分位点附近,使得样本的利用率及估值的精度均高于非序贯性计量法。

序贯性计量法可以分为两大系列:升降法系列和 RM 法系列。

2.2.1 升降法系列

1948 年 Dixon 和 Mood 提出的升降法^[11] 用于估计 50% 分位点。预先选定初始刺激水平、步长和样本量,按照当前刺激水平处试样响应与否进行升步或降步。20 世纪 90 年代刘宝光提出了调整型升降法、小样本升降法和成组升降法^[1],我国国军标 GJB377-87^[12] 是升降法的专用军标。升降法具有规

范化和程序化的试验过程, 使用简单方便, 是目前我国火工品界使用最多的一种序贯性计量法。

1963 年 Langlie 提出了兰利法^[1]。兰利法是一种变步长的升降法, 其步长随试验调整, 从而使刺激量收敛于均值的速度更快, 估值效果更精确。

1974 年 Einbinder 提出了 OSTR 法^[1]。这种方法是将 Wethrill 的变换响应思想^[13]与兰利法相结合, 可以得到以 p 概率响应点为中值的估计, 与升降法、兰利法相比, 估计 x_p 的效果更好。1984 年美军标 MIL-STD-322B 和 1989 年美军标 MIL-STD-331B 推荐使用这两种方法。兰利法和 OSTR 法在 1997 年列于我国国军标 GJB/Z377A-94 中。

1999 年田玉斌对 3 种序贯性计量法: 升降法、兰利法和 OSTR 法进行了非条件参数推断研究, 得出的结论是条件推断与非条件推断所得参数估计近似, 因此可以不必进行复杂的非条件推断, 而采用简易的条件推断^[4]。

2.2.2 RM 法系列

1951 年 Robbins 和 Monro 提出的随机逼近法, 也称 RM 法^[14], 是利用 Newton-Raphson 方法^[15], 通过切线逼近求解方程 $F(x) - p = 0$, 估计 x_p 。

1964 年 Cochran 和 Davis 提出了延迟型 RM 法^[16]。这种方法记第 i 个刺激水平为 x_i , 试验结果是 y_i ($y_i=1$ 代表响应, $y_i=0$ 代表不响应), 则第 $i+1$ 个刺激水平由 $x_{i+1}=x_i-c(y_i-p)$ 确定, 其中 c 为根据总体方差选择的一个步长调整参数。这种延迟型 RM 法解决了小样本下收敛速度过于迅速的问题。

20 世纪 80 年代 Wu C F J. 提出 Wu 法^[17], 实际也是一种改进型的 RM 法。第 $i+1$ 个刺激水平由 $x_{i+1}=x_i-(d^*/i)(y_i-p)$ 确定, 其中 d^* 是截断常数, 由下式确定 $d^*= \max[\min(d_i, d), \delta]$,

$$d_i = \sum_j^i (x_j, x_i)^2 / \sum_j^i (x_j, \bar{x}_i), \quad \bar{x}_i = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i x_j, \quad d$$

是一个大于 4 的常数, δ 是步长。Wu 法在确定下一个试验点时比传统 RM 法利用了更多的已有数据信息, 提高了估值精度。

2001 年严楠总结了序贯性计量法, 得出了这类方法的设计原理具有与代数方程求根相似的特点^[18]。

3 计数法与计量法的新发展

计量法与计数法相比, 大大减少了试验量, 然而在评估可靠性时, 主要是利用外推的方法, 刻度参数普遍偏小, 导致可靠度误差较大, 可信度较低。为了克服这一缺点, 两种方法又有了新的发展。

3.1 计数法与计量法的结合

1999 年田玉斌提出了评估可靠性的综合评估法^[4], 把计数法与计量法结合起来, 不仅提高了评估的精度, 且大大减少了样本量。在稍许外推的情况下, 仅用 55 发产品, 其中 50 发用计量法, 5 发用计数法, 就可以得到置信水平 95% 下的可靠度估计为 99%。

3.2 计量法的非参数统计推断

在预测响应概率时, 大多采用参数统计推断, 也就是先假设感度分布类型, 然后求出未知的分布参数, 最后外推得到响应概率。计量法的各类经典方法都是采用参数统计推断, 如步进法、升降法、RM 法等。近年来国外开始尝试非参数统计推断预测响应概率, 以避免实际总体与假设总体有差距时的较大误差。这方面的研究国内尚未见报道。

非参数统计推断的方法很多, 诸如 Kernel 回归^[19]、局部线性回归^[20]等。Kernel 回归在临近数据点处的拟合不够精确, 局部线性回归则在拟合来自曲线函数的点时过于直线化, 导致精确度不高。2001 年 Nottingham、Birch 和 Bodt 提出了一种新的非参数统计推断技术, 称为局部 logistic 回归^[21], 避免了上述两种回归方法的缺点, 提高了拟合精度。

4 结束语

综上所述, 评估火工品的可靠性经历了两大方法体系的发展, 从最初不考虑感度分布的计数法到以感度分布为基础的计量法, 从参数统计推断的普遍应用到非参数统计推断的初步尝试, 发展最为成熟的、使用最多的仍然是参数统计推断。同时两大方法也逐步走向融合, 不断适应着现代军事对火工品可靠性评定的精度高、代价小的要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Robert J. Buehler. Confidence intervals for the product of two binomial parameters [J]. American Statistical Ass-

- ociation Journal, 1957, (12).
- [3] GJB376-87. 火工品可靠性评估方法 [S], 1987.
- [4] Mood, A. M. Introduction to the theory of statistics [M]. New York: McGraw-Hill, 1950.
- [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] Bliss, C. I. The method of probit [J]. Science, 1934a (79): 38~39.
- [7] Spearman, C. The method of right and wrong case (constant) without Gauss's fomula [J]. British Journal of Psychology, 1908, (2): 242~277 .
- [8] Karber, G.. Beitrag zur kollektiven behandlung pharma-kologischer reihenversuchc [J]. Arch. Exp. Path. Pharm-ak., 1931, (162): 480~487.
- [9] GJB/Z377A-94. 感度试验用数理统计方法 [S], 1995.
- [10] Reid N. Saddlepoint methods and statistical inference [J]. Statistical science, 1988, (3): 213~238.
- [11] Dixon, W. J. & Mood, A. M.. A method for obtaining and analyzing sensitivity data [J]. Journal of American Ass-ociation, 1948, (43): 109~126.
- [12] GJB377-87. 感度试验用升降法[S], 1987.
- [13] Wetherill G.B. Sequential estimation of quantal response curves [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Ser B, 1963, 25: 1~48.
- [14] Robbins H., Monro S.. A stochastic approximation method [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1951, (22): 400~407.
- [15] 薛毅. 最优化原理与方法 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [16] Cochran W G, Davis M. Stochastic approximation to the median effective dose in bioassay. In: J Garlalld ed. Stochastic models and biology [M]. Madison: University of Wisconsin Press, 1964: 281~300.
- [17] Wu C F J. Efficient sequential designs with binary data [J]. Journal of the American Statistical Association, 1985, (8): 974~984.
- [18] 严楠, 蔡瑞娇. 序贯感度试验的设计原理 [J]. 火工品, 2001, (2).
- [19] Haerdle, Wolfgang. Nonparametric sequential estimation of zeros and extrema of regression functions [R]. ADA 169958, 1986.
- [20] R. H. Randles & D. A. Wolfe. Introduction to the theory of nonparametric statistics [M]. New York: Wiley & Sons, New York, 1979.
- [21] Nottingham, G. J., Birch, J. B., Bodt, B. A. Modeling nonmonotonic dose-response curves [R]. ADA386837, 2001.

2004 安全科学与技术国际会议 (2004 ISSST) 论文征集通知

在 1998 年 10 月 7~10 日、2000 年 8 月 10~13 日和 2002 年 10 月 10~13 日, 相继成功举办了 3 届“安全科学与技术国际会议”, 会议论文集论文被 EI、ISTP 收录。为了进一步推动我国安全科学技术的发展, 扩大国际间的学术交流, 提高学术交流水平, 拟于 2004 年 10 月 25~28 日在上海市千鹤宾馆举办“2004 安全科学与技术国际会议”。现征集论文。

会议主题: 安全科学与技术的发展与未来

会议及论文内容

1) 安全科学理论与体系探讨; 安全科学与技术发展的过去、现在与未来; 2) 产业安全(地质勘探、矿业石油、化工、军工、航空航天、机械、电子、建筑、交通铁路、核工业等); 3) 安全管理学、安全行为学、安全心理学、安全经济学、安全人机学、安全法学、安全设备工程学等; 4) 安全性评价及方法、重大危险源评估与控制方法、安全数值模拟与仿真; 5) 安全工程教育、培训、安全文化建设; 6) 防潮、防尘、防毒、防腐、防火、防爆等; 7) 安全检测与监测技术、工程系统安全控制技术; 8) 计算机技术和人工智能技术在安全系统工程中的应用; 9) 安全科学与劳动、环境、减灾、资源安全与可持续发展等的交叉与综合; 10) 安全领域高科产品展示。

论文及会议语种: 英文

稿件截止日期: 2004 年 3 月 31 日前提供论文全文(另页附中文题名、作者、单位、摘要、关键词)。

论文格式及其他要求详见会议网站 www.issst.com.cn 上的中文通知。

联系人: 冯长根教授, 黄平副教授, 王亚军博士, 李生才副教授, 钱新明教授

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 5 号 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室

邮编: 100081

电 话: 010-68913997, 68910564, 68912764

传 真: 010-68911849

网 站: <http://www.issst.com.cn>

E-mail: cgfeng@issst.com.cn