

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.001

新型弹药可靠性评估方法

刘江, 姚安东, 王攀, 郭宏

(中国人民解放军 78618 部队, 成都 610100)

摘要: 为了研究新型弹药可靠性评估方法, 采用混合贝塔分布为先验分布的贝叶斯方法对某新型弹药进行可靠性评估。分析贝叶斯方法的适用条件, 并将之推广到多先验情况。通过实例比较该方法与经典方法和使用贝塔分布为先验分布的贝叶斯方法的差异。结果表明: 该方法能更为合理地用于新型弹药可靠度评定, 充分利用产品先验信息, 有效降低现场试验所需的样本量, 很好地避免由于小样本数据被大量先验信息“吃掉”而导致评定结果的“冒进”现象。

关键词: 新型弹药; 贝叶斯方法; 可靠性评估; 混合贝塔分布

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Reliability Evaluation Method of New Ammunition

Liu Jiang, Yao Andong, Wang Pan, Guo Hong

(No. 78618 Unit of PLA, Chengdu 610100, China)

Abstract: For researching new ammunition reliability evaluation method, use mixed Beta distribution as prior distribution Bayesian method to carry out reliability evaluation method for new ammunition. Analyze the application condition of Bayesian method, and use it to multi-prior condition. Compare the method with the classical method, and Bayesian method with Beta distribution by example. The results show that the method can be more effectively in new ammunition reliability evaluation, make full use of product prior information, reduces sample quantity in test. Therefore avoid small sample data are eaten large quantity of prior information and cause “premature advance” of evaluation.

Keywords: new ammunition; Bayesian method; reliability evaluation; mixed Beta distribution

0 引言

新型弹药具有结构复杂、高价值和高可靠度等特点, 而且是一次消耗性产品, 其可靠性试验是破坏性的, 每次试验只能抽取少量的样品。目前, 计数法是众多军工产品可靠性评估方法中用得最多的^[1], 该方法简单、直观, 对于一些价值相对较低而且生产量很大的弹药产品非常适用, 但计数法的缺点很明显, 其一所需试验的样本量很大, 不适用小批量、价值较高和结构相对复杂的弹药; 其二是计数法的评估结果比较保守。例如, 某新型多管远程火箭炮弹药, 每一发的生产成本在百万元之上, 要求其设计要求置信水平 0.9, 可靠度下限为 0.9, 如果用计数法进行可靠度评估, 那么需要 22 发做无失效试验, 如果试验中一发失效, 那么试验数量要增加为 38 发^[1]。计数法在鉴定试验或者批验收试验中所需大样本产生高额的费用是厂家无法接受的。在产品的鉴定试验中, 为了避免大样本量产生的昂贵费用, 现在绝大多数厂家往往降低可靠性指标进行验收, 再在产品的生产和使用过程中来验证产品的可靠度是否达到设计要求。厂家现行的做法存在

着巨大风险, 致使产品的可靠度要么冒进, 要么保守, 给新型装备的研制和生产带来一定影响。

贝叶斯 (Bayes) 方法的优点在于充分利用了产品的验前信息和试验信息, 在对产品可靠性评估中, 就不需要大量的试验样本量, 很好地节约了产品成本。近年来, 随着 Bayes 方法技术的日益成熟和挖掘, 该技术被广泛应用于武器装备的可靠性评定中。鉴于 Bayes 方法技术的优点, 笔者采用混合贝塔分布作为 Bayes 方法的先验分布, 对某新型弹药定型阶段鉴定试验进行可靠性评定。

1 贝叶斯方法

先验分布的确定是 Bayes 方法在可靠性评定中能够成功运用实施的前提和关键。先验分布的确定需要获取产品大量可信的验前信息, 并对其进行科学、合理的处理。先验分布确定后, 可以求出其后验分布, 判定产品可靠性。对于成败性试验样品, 先验分布通常使用 Beta($R|a, b$) 分布, 其密度函数为

$$\pi(R) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} R^{a-1} (1-R)^{b-1} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-04-18

作者简介: 刘江(1978—), 男, 四川人, 工程师, 硕士, 从事弹药处废和机械可靠性优化设计研究。

式 (1) 中 $0 < R < 1$, a 和 b 为先验分布的超函数。

很多专家学者给出了确定超参数的方法, 例如: 矩拟合法^[2]、分位数法^[3]和经验贝叶斯法^[4]等。这些方法大部分都是基于产品以前的历史数据, 但产品在定型前几个阶段, 产品参数是不断改进的; 因此, 历史样本与现场样本一般来说是来自不同总体的。

确定了先验分布后, 再假设试验样本数据为 (n, x) , n 为试验数, x 为成功数, 依据 Bayes 方法, 得到后验分布 $\text{Beta}(R|a+x, b+f)$, $f=n-x$, f 为失败数, 后验分布的密度函数为

$$\pi(R|x, f) = \frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(a+x)\Gamma(b+f)} R^{a+x-1}(1-R)^{b+f-1} \quad (2)$$

式 (2) 中 $0 < R < 1$ 。

对产品总体进行可靠性估计、判定等, Bayes 方法是基于其后验分布的。在可靠性评估中, 给定置信度, 则可靠度的下限就可通过式 (3) 解出:

$$\int_0^{R_0} \pi(R|x, f) dR = 1 - \gamma \quad (3)$$

当现场样本和历史样本不是来自于一个总体时, 用式 (3) 对产品进行可靠度评估所得结果的可行性非常差, 文献[5-6]分别就总体为正态和二项分布情况分析了这一原因。当产品的试验样本量较小, 而其历史经验数据丰富, 可靠度的先期欲望值很高时, 这样常出现的情况是少量的现场数据被大量的历史数据“吃掉”。一般来说, 在假设检验中, 即使两组数据通过了一致性检验, 也不能就认定它们来自同一总体, 仍需以某种恰当的形式“融合”^[7]。

2 数据融合方法

2.1 混合 Beta 分布

混合先验^[6-7]方法既充分利用历史样本中的信息, 又减少了历史样本与样本异总体对可靠性评估的影响。对于成败型总体, 其混合先验为

$$\pi_p(R) = \rho \text{Beta}(R|a, b) + (1 - \rho) \quad (4)$$

其中 $0 \leq \rho \leq 1$, ρ 为继承因子。

在文献[4]中, 利用两样本的卡方拟合优度检验, 给出了确定继承因子的方法。显然, 混合先验是由基于历史样本所得的 $\text{Beta}(R|a, b)$ 和基于 Bayes 假设在 $[0, 1]$ 上的均匀分布 $\text{Beta}(R|1, 1)$ 的进行加权和得出的。继承因子反映历史样本与现场样本的相似程度。 $0 < \rho < 1$ 则是介于两样本总体完全相同和完全不同的情形, 即两总体是相似(或者说是相近)的,

此时部分使用了历史样本中的信息。所以, 使用混合先验 $\pi_p(R)$ 比共轭先验 $\text{Beta}(R|a, b)$ 更加合理。

2.2 多源先验的情况

产品在研制阶段, 要经过不同阶段的试验。部件和子系统等各种验前试验可以获得多组可以利用的先验信息。假设有 k 组有用的先验信息 $(n_1, s_1), (n_2, s_2), \dots, (n_k, s_k)$, 他们分别来自总体 Y_1, Y_2, \dots, Y_k , 而样本 (n, s) 来自总体 X 。此时需将 Bayes 方法推广到多源先验的情况。

运用拟合优度分别对 $(n_i, s_i), i=1, 2, \dots, k$ 与 (n, s) 求取继承因子 ρ_i , 进而可以得到多源混合先验:

$$\pi_i(R) = \rho_i \text{Beta}(R|a_i, b_i) + (1 - \rho_i) \quad (5)$$

那么, 先验分布可以取为

$$\pi(R) = \sum c_i \text{Beta}(R|a_i, b_i) + (1 - c) \quad (6)$$

其中 $c_i = \rho_i/k, c = \sum_{i=1}^k c_i$ 。

运用 Bayes 公式可导出后验分布为:

$$\pi(R|s, f) = \frac{1}{Q} \left\{ \sum_{i=1}^k N_i \text{Beta}(R|a_i + s, b_i + f) + M \text{Beta}(R|1 + s, 1 + f) \right\} \quad (7)$$

式中: $f = n - s$; $N_i = c_i B(a_i + s, b_i + f) / B(a_i, b_i)$; $M = (1 - c) B(s + 1, f + 1)$; $Q = \sum_{i=1}^k N_i + M$; B 是贝塔函数, 超参数 (a_i, b_i) 可由历史样本得到。

3 新型弹药可靠性评估

为了使新型弹药获得较高的储存可靠性和任务可靠性, 将可靠性预计和评估技术贯穿于产品设计、研制和生产等整个寿命过程。在整个寿命过程中, 各阶段对产品可靠性预计或评估的目的不同, 每一阶段产品所面临的自然和试验环境条件也不同, 这就导致产品在各阶段可靠性预计或评估使用的方法也应不同。由于篇幅有限, 本节利用前文提出的方法对新型弹药在定型阶段的可靠性评估进行讨论。鉴定试验中可靠性评估步骤为:

1) 先验信息的收集和确定。一种新型弹药产品到定型装备, 要经过设计、研制、生产和鉴定试验阶段。在这些阶段中能获得的大量的产品数据信息, 其中主要包括产品初样试验数据、产品正样试验数据、产品单元试验数据和产品单元构成的子系统试验数据等, 这些试验数据基本都是成败型数据,

单元和子系统中部分试验数据除外，它们属于计量型，来自正态分布总体。然而，Bayes 方法处理的数据要求是同类型的数据；因此，需要将单元和子系统中属于计量型的数据“折合”为等效的成败型数据。然后根据系统可靠性结构(串、并联等)计算得出“虚拟”的系统试验数据。新型弹药产品的可靠性结构一般为串联形式，笔者直接使用文献[8]中论述的“虚拟系统法”和 CMSR 方法对数据和先验信息进行处理。

2) 制定试验方案。新型弹药产品可靠度要求高，要避免产生昂贵费用，只有减少试验样本量，这就要求试验方案中的允许失败数不能太大。给定某种新型弹药可靠性指标：置信度为 γ 时， $R \geq R_L$ ，分别取失败数 $f=0,1,2$ 。对每一个 f ，通过试算可以得到一个满足可靠性指标要求的最小的 n_f 。综合考虑新型弹药产品的可靠性指标要求及其产品造价以及生产情况等因素，从试验方案 (f, n_f) ， $f=0,1,2$ 中，选择一个适合的方案，记为 (f, n) 。

3) 可靠度达标要求判定。根据试验方案 (f, n) ，进行实弹射击试验 n 发，如果产品试验失败数不超过规定的 f ，那么判定该新型弹药产品的可靠性达到指标要求；相反，失败数超过规定的 f ，那么判定产品的可靠性未达到指标要求。根据具体的失败数，利用公式 (3) 便可得到相应的可靠度下限 R_L 。

4 实例分析

某型号新型弹药产品，设计要求可靠性指标为：置信度为 0.9， $R \geq 0.9$ 。到鉴定试验阶段，收集确定的先验信息包括：初样试验数据(12, 6, 6)，即射击试验 12 发，6 发成功，6 发失败；正样试验数据(14, 13, 1)，即：射击试验 14 发，13 发成功，1 发失败；各子系统的试验数据见表 1。

表 1 某新型弹药子系统先验信息数据统计

子系统编号	试验数据		
	试验数 n	成功数 s	失败数 f
1	24	24	0
2	24	24	0
3	24	24	0
4	60	59	1
5	128	126	2

运用 CMSR 方法^[8]，将表 1 新型弹药子系统试验数据折合成系统的“虚拟”试验数据，通过计算 $(n, s, f)=(41.530\ 8, 38.435\ 4, 1.595\ 3)$ ，按第 3 节中论述方法可得此型弹药的 3 种试验方案，见表 2。

表 2 中， ρ_1 为正样数据试验继承因子， ρ_2 为系

统“虚拟”试验数据继承因子。综合考虑此新型弹药的生产成本和生产过程中的各种情况，0 失败数和 1 失败数的试验方案是可行的。采用 3 种方法(方法 1：射击试验靶场数据；方法 2：历史数据；方法 3：笔者提出方法)进行数据融合后的贝叶斯方法计算出可靠度下限的结果见表 3。

表 2 某新型弹药试验方案

失败数 f	试验数 n	成功数 s	继承因子 ρ_1	继承因子 ρ_2	可靠度下限 R_L
0	9	9	0.882 4	0.542 1	0.906 4
1	22	21	0.753 5	0.663 8	0.900 7
2	36	34	0.730 6	0.953 2	0.906 9

表 3 3 种方法所得结果比较

失败数 f	试验数据		可靠度下限 R_L		
	试验数 n	成功数 s	方法 1	方法 2	方法 3
0	9	9	0.774 1	0.940 8	0.906 4
1	22	21	0.837 6	0.930 1	0.900 7
2	36	34	0.861 6	0.925 7	0.906 9

分析表 3 可以看出：方法 1 所计算的可靠度下限数据相比较小，最为保守；方法 2 所计算的可靠度下限数据相比较，评定结果“冒进”所产生的风险较大；方法 3 计算出的可靠度下限位于方法 1 和方法 3 结果之间。

5 结束语

从评定结果来看，笔者所提出的方法充分地利用了产品先验信息，有效地降低了现场试验所需的样本量，很好地避免了由于小样本数据被大量先验信息“吃掉”而导致评定结果的“冒进”现象，能够更为合理地用于新型弹药可靠度评定。

参考文献：

- [1] 邵德生. 装备研制与生产可靠性大纲[S]. 北京：国防科学技术工业委员会，1988：17-18.
- [2] 宋保维，石秀华. 复杂产品可靠性评定中的矩拟合法[J]. 西北工业大学学报，2012，50(6)：34-38.
- [3] 王桂胜. 2008 中国数量经济学会年会论文[C]. 北京：中国社会科学出版社，2008：204-209.
- [4] Kleyner A. Bayesian techniques to reduce the sample size in auto-motive electronics attribute testing[J]. Microelectronics Reliability, 1997, 37(6): 879-883.
- [5] 张金槐，张士峰. 验前大容量仿真信息“淹没”现场小子样试验信息问题[J]. 飞行器测控学报，2003，22(3)：1-6.
- [6] 王伟，周海云，尹国举. 使用混合 Beta 分布的 Bayes 方法[J]. 系统工程理论与实践，2005，25(9)：142-144.
- [7] 唐雪梅，张金槐. 武器装备小子样试验分析与评估[M]. 北京：国防工业出版社，2001：11-19.
- [8] 肖刚. 基于折合信息的固体火箭发动机可靠性综合评估[J]. 西安交通大学学报，1999，33(7)：33-38.