

# 小子样产品可靠性评定技术

西北工业大学航海工程学院□梁庆卫 宋保维 邵成 李正

**摘要** 可靠性评定是可靠性技术发展的重要研究方向之一,小子样产品可靠性评定技术由于信息量少,一些成熟的统计学方法并不适用于小子样情况。文章评述了国内外在小子样产品可靠性评定方面的研究现状,给出了工程上常用的可靠性评定 Bayes 方法、信息熵法、近似正态法、矩估计法的数学模型和计算方法,讨论了小子样产品可靠性评定急需解决的主要问题,并对其今后的发展方向做了展望。

**关键词** 可靠性评定 模糊性 灰色性 小子样

## Small-Scale Reliability Assessment Method

College of Marine, Northwestern Polytechnical University□LIANG Qing-wei, SONG bao-wei,SHAO cheng, LI zheng

**Abstract:** Reliability assessment is one of the important research directions of reliability technique. Some ripe statistics methods are not suitable for small-scale reliability assessment because less of information. This article evaluates the present situation of small-scale reliability assessment research, reviews the model of Bayes method, Information entropy method, Similar normal state method, Moment conversion method, and discusses the subject matters in the field, looks forward to its developing directions in the future.

**Key words:** reliability assessment; fuzzy character; gray character; small-scale

### 1 引言

对于结构复杂和成本高昂的产品来说,在确定产品可靠度时,选择很多的样品来做可靠性试验是不可能的,因此提出了可靠性评定问题。先进而科学的可靠性评定方法,为充分利用各种试验信息奠定了理论基础。这对减少试验经费,缩短研制周期,合理安排试验项目,协调系统中各单元的试验量等有重要作用。

小子样产品可靠性评定的特点是信息量少,样本少,一些成熟的统计学方法并不适用于小子样情况,这给可靠性评定工作带来

了很大的困难。目前,小子样产品可靠性评定的方法很多,本文在总结国内外小子样产品可靠性评定方法的基础上给出了工程上常用四种方法的数学模型和计算方法,讨论了小子样产品可靠性评定急需解决的问题,对其今后的发展方向做了展望。

### 2 国内外研究现状

从 70 年代开始,系统小子样可靠性评定方法受到国内外普遍关注,新方法不断涌现,且各具特色。下面对这些方法作简单的介绍。

#### (1) 金字塔式方法

国外在 20 世纪 50 年代的中、后期总结

出了金字塔式方法,即对较“低级”的产品进行大量模拟试验以发现问题,并改进设计与工艺,为较“高级”产品的高可靠性奠定基础,“级”越高,则试验量越少。这种方法可以充分利用各级产品的模拟试验数据。

#### (2) 置信区间方法

置信区间方法又称经典方法,它认为被估参数是固定的,而置信区间是随机的,其优点是,在理论上它可完全纳入 Kolmogorov 公理体系之下的概率论格局内,实用上则可允许作一种频率解释。这种方法现在已很少采用。

#### (3) Bayes 方法

二十多年来, Bayes 方法已广泛用于可靠性分析,介绍用 Bayes 方法分析可靠性问题的文献大量涌现,这是因为 Bayes 方法便于利用先验信息,能节省时间和经费,效果好,而且分析方法程式化,易于工程人员掌握。 Bayes 方法的关键是选择先验分布。目前,应用较多的有以下四类:无信息先验分布 (noninformative prior distribution),共轭型先验分布 (conjugated prior distribution),用经验 Bayes 方法确定先验分布,以及由专家经验确定先验分布。 Bayes 方法是目前应用最广泛的一种方法。

#### (4) Fiducial 方法

Fiducial 方法不涉及参数的先验分布,它根据观测样本确定参数的分布,该分布有概率分布的一切性质,但这个分布并非因参数具有随机变量的特征而带来,而仅表示由于所得样本的信息、参数落在种种范围内的“可信程度”,故称之为 Fiducial 分布, Fiducial 区间不允许作任何频率解释。

#### (5) 近似正态法

近似正态法是一种基于数理统计理论中的中心极限定理,适用于系统可靠性评定的方法。该方法通过将子系统或部件试验数据进行有效的分析处理,使之近似地服从正态

分布规律,从而由标准正态分布给出在不同置信度条件下的系统可靠性下限。它不受子系统或部件实验数据分布的影响,避免了由于不能准确地确定子系统或部件试验数据的分布而使评定结果出现误差,从而提高了对系统可靠性评定的精度。

#### (6) 信息熵法

信息熵法是根据数理统计原理和系统信息熵理论,认为成败型系统的信息熵来自于各组成部件的信息熵之和,将部件的实验数据折合成系统的实验数据,作为系统实验的验前信息。由于该方法不是简单的逼近,因此,信息无折合损失。

#### (7) 矩拟合法

矩拟合法是根据数理统计原理,将部件和分系统的试验信息折合为系统的试验信息,这种方法对于复杂产品和系统具有很好的适应性,充分利用了各个环节的试验信息,较为全面的考虑系统上、下级和同级间的联系,“金字塔”式的逐级折合,而且由于充分照顾了各环节、环境的试验信息,使计算结果变化缓慢且光滑。

#### (8) 自助估计法

这是一种近年来被采用的方法,这个方法的特点是充分利用子样自身的信息,子样容量较小,而不考虑其他验前信息。因此对于使用验前信息引起争论时,它是常被采用的方法。

#### (9) 信息融合估计法

信息融合估计法充分利用各种时空条件下多种信息源的信息,进行关连、处理和综合,以获得关于系统可靠性的更完整和更准确的判断信息,从而进一步形成对系统可靠性的可靠估计或预测。

#### (10) Monte-Carlo (Bootstrap) 方法

Monte-Carlo 方法是一种仿真方法,它经常能解决系统十分复杂而用解析方法难以处理的问题。



此外, 还有 CMSR 法、Lindstrom-Maddens(L-M)方法和 Buehler 精确置信下限法、基于失效率非常数模型方法等等。CMSR 法偏于保守; Lindstrom- Maddens(L-M)方法随着部件的最小子样尺寸的减少不断恶化; Buehler 精确置信下限法计算量巨大; 基于失效率非常数模型方法适用于部件的失效率不为常数的情况。

虽然小子样可靠性评定的方法很多, 但由于有些方法计算量太大, 建模困难, 或者丢失信息, 并不适合于工程应用。工程上常用的方法有 Bayes 方法、信息熵法、近似正态法、矩估计法。

### 3 工程上常用的可靠性评定方法

#### (1) Bayes 方法

在小子样可靠性评定中, 常采用 Bayes 方法的近似限通式, 并将成败型分系统的验前分布取作  $B(1/2, 1/2)$  [1]。

设系统有  $l$  个相互独立的成败型分系统, 其串联可靠度函数  $R = \prod_{i=1}^l R_i$ , 在验前分布为  $B(1/2, 1/2)$  的条件下, 可得 Bayes 方法修正公式:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{N} &= \left( 1 - \prod_{i=1}^l \frac{s_i + 1.5}{n_i + 2} \right) / \left( \prod_{i=1}^l \frac{s_i + 1.5}{n_i + 2} - \prod_{i=1}^l \frac{s_i + 0.5}{n_i + 1} \right) \\ \hat{F} &= \hat{N} \left( 1 - \prod_{i=1}^l \frac{s_i + 0.5}{n_i + 1} \right) \\ \hat{S} &= \hat{N} - \hat{F} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中,  $\hat{N}$  为折合到系统的等效试验次数;  $\hat{S}$  为折合到系统的等效成功次数;  $\hat{F}$  为折合到系统的等效失败次数;  $n_i$  为分系统试验次数,  $s_i$  为分系统试验成功次数, 下同。

对于系统可靠度近似下限  $R_L$  的求法, 可以根据公式得出 [2]:

$$\sum_{r=0}^{\hat{F}} \binom{\hat{N}}{r} R_L^{\hat{N}-r} (1-R_L)^r = 1-\gamma \quad (2)$$

#### (2) 信息熵法 [3]

信息熵法是利用信息熵守恒原理, 将部件的试验信息, 折合成系统试验次数和失败次数。

设系统折合的试验次数为  $\hat{N}$ , 失败次数为  $\hat{F}$ , 成功次数为  $\hat{S}$  ( $\hat{S} = \hat{N} - \hat{F}$ ); 系统在其每次折合试验中出现成功信息的概率均为  $p$ , 出现失败信息的概率均为  $q$  ( $q = 1 - p$ )。假设系统由  $i$  个相互独立的成败型单元按一定的可靠性结构所组成:

成败型单元的系统等效试验次数与等效失败次数为:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{N} &= \frac{\sum_{i=1}^l n_i (p_i \ln p_i + q_i \ln q_i)}{p \ln p + q \ln q} \\ \hat{F} &= \hat{N} (1 - p) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中,  $p_i$  为第  $i$  个单元在其每次试验中出现成功信息的概率为  $p_i$ ;  $q_i$  为第  $i$  个单元在其每次试验中出现失败信息的概率为  $q_i$  ( $q_i = 1 - p_i$ )。

对于成败型单元的成功率  $p_i$  的点估计为

$$p_i = \hat{p}_i = \begin{cases} 1 - \frac{f_i}{n_i} & (n_i \geq 30) \\ \frac{(n_i - f_i) + 1/n_i}{n_i + 2/n_i} & (n_i < 30) \end{cases} \quad (4)$$

另外, 在求得  $\hat{N}$ 、 $\hat{F}$  与  $\hat{S}$  后, 可以采用式(2)求得系统可靠度下限  $R_L$ 。

#### (3) 近似正态法 [4]

若系统由串联部件和子系统组成, 并设子系统或部件的可靠度为  $R_i$ , 那么系统的可靠度  $R$  为  $R = \prod_{i=1}^n R_i$ , 即:

$$\ln R = \sum_{i=1}^n \ln R_i \quad (5)$$

因为各部件或子系统相互独立, 因此,  $\ln R_i$  ( $i=1 \sim n$ ) 也相互独立, 并且具有有限的期望和方差。则  $\ln R = \sum_{i=1}^n \ln R_i$  近似服从正

态分布。于是,  $R$  近似服从对数正态分布。

设  $z_{1-\alpha}$  为标准正态分布的  $1-\alpha$  分位点, 系统的可靠度在置信度为  $\alpha$  条件下的下限  $R_L$  为

$$R_L = \left[ \frac{E(R)^2}{\sqrt{M}} \right] \cdot \exp \left[ \sqrt{\ln \left( \frac{M}{[E(R)]^2} \right)} \cdot z_{1-\alpha} \right] \quad (6)$$

这里,  $E(R)$  和  $M$  可以根据试验结果, 由极大似然估计求得:

$$\begin{cases} E(R) \approx \prod_{i=1}^n \hat{R}_i \\ M = E(R^2) \approx \prod_{i=1}^n E(\hat{R}_i^2) = \prod_{i=1}^n (D(\hat{R}_i^2) + \hat{R}_i^2) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\hat{R}_i$  和  $D(\hat{R}_i)$  分别为子系统或部件可靠度和可靠度方差的点估计, 它们可根据试验数据求得。公式见式 (8) (9)。

#### (4) 矩拟合法<sup>[5]</sup>

一般情况下产品主要是由成败型部件或分系统组成。对于成败型部件或分系统, 其第  $i$  个成败件或分系统试验  $n_i$  次, 失败  $f_i$  次, 记做  $(n_i, f_i)$ , 其可靠度和可靠度方差的点估计为:

$$\hat{R}_i = \begin{cases} 1 - \frac{f_i}{n_i} & (n_i \geq 30) \\ \frac{[(n_i - f_i) + \frac{1}{n_i}]}{n_i + \frac{2}{n_i}} & (n_i < 30) \end{cases} \quad (8)$$

$$D(\hat{R}_i) = \hat{R}_i \times (1 - \hat{R}_i) / n_i \quad (9)$$

若系统由串联部件或分系统组成, 则其可靠度的极大似然估计为:

$$\hat{R} = \prod_{i=1}^l \hat{R}_i, \quad D(\hat{R}) = \sum_{i=1}^l \left( \frac{\partial R}{\partial \hat{R}_i} \right)^2 D(\hat{R}_i) \quad (10)$$

则折和系统试验数为:

$$N_{\text{折}} = \left( \frac{1}{\hat{R}} - 1 \right) \left( \sum_{i=1}^{l+m} \frac{D(\hat{R}_i)}{\hat{R}_i^2} \right) \quad (11)$$

折和系统试验的失败数为:

$$F_{\text{折}} = N_{\text{折}} (1 - \hat{R}) \quad (12)$$

矩拟合法遵循“金字塔”试验程序, 首先对分系统以下所属部件的试验数据进行拟合, 折合成分系统的实验数据, 称作“第一级横向综合”; 其次再综合分系统一级本身的试验数据, 即“纵向综合”, 成为下一级“横向综合”的基础。如此交替进行, 即先横向后纵向, 逐级综合。

在上述由部件数据向分系统数据拟合, 再由分系统数据向系统数据拟合的过程中, 若存在部件与分系统, 分系统与系统的环境不同时, 要考虑环境因素的影响, 对部件数据和分系统数据进行修正。

成败型产品试验结果是服从二项分布的, 在给定置信度  $\alpha$  的条件下, 复杂产品的可靠度下限  $R_L$  可由 (3) 式求得。

## 4 急需解决的主要问题和发展方向

### (1) 考虑模糊性问题

可靠性评定中存在的确定因素, 除了随机不确定性, 还有模糊不确定性。传统的可靠性评定主要考虑随机性的影响, 建立在二值逻辑基础之上, 它反映了人类的精确思维方式, 然而随着研究的深入, 人们逐渐认识到模糊因素也是影响可靠性的重要因素。实践中由于存在大量模糊因素, 致使很多问题不能用明确的概念去描述, 采用一刀切的, 没有过渡状态的标准是不科学的。

传统的可靠性评定主要考虑随机性影响的原因在于常规可靠性理论包含着两个基本假设: 一是离散有限状态假设。在离散逻辑基础上, 将系统指标的取值范围划分为若干部分, 每一部分标志系统的不同性能水平,



即系统的不同状态。例如在二值逻辑中，系统就只有两种状态，要么完全正常，要么完全故障。二是概率假设。系统可靠性行为可以完全用概率方式予以刻画。

为了更客观地进行可靠性评定，必须借助新的工具，建立新的可靠性评定观念和方法以摆脱目前的困境。为此，模糊数学不可避免地进入可靠性评定领域，而可靠性理论研究不可避免地发展到一个新的阶段——模糊可靠性理论的创立。

(2) 考虑灰色性问题

可靠性评定是一个工程问题，需要考虑的因素很多都是不确定因素（尤其是在系统的早期设计阶段），很难用确切的数学语言来描述，即在系统的可靠性评定方面，我们所获得的各分系统、各部件的有关信息是不完全的，不确切的，也就是说，这些信息是“灰色的”。

另外，由于概率和统计，需要大量数据，不仅计算工作量大，而且要求线性典型分布，数据量少难以找到统计规律，甚至有可能出现反常的情况。但灰色系统本身需要少量数据，就可避免这些弊病和不足。

因此，灰色系统理论与可靠性理论融成一体，以解决可靠性分析和设计中存在的问题，即灰色可靠性分析法，成为可靠性评定的又一个新的方向。

(3) 模糊性和灰色性同时考虑

模糊数学方法的原理认为描述系统的不确定性在于本身与外界之间的界限不清楚，弥补了统计学描述客观世界的不足。灰色系统方法则认为事物的不确定性是对于信息的缺乏。由于在可靠性评定中这两种不确定性都存在，那么，将模糊性和灰色性同时考虑是合理的，比起只考虑模糊性问题或只考虑灰色性问题更能反映客观实际。因此可靠性评定与模糊性和灰色性同时联系起来。

5 实例

某水下航行器各分系统及整机试验数据如表 1 所示。

表 1

序号	组件名称	$n_i$	$s_i$
1	分离铝头罩	10	9
2	出水传感器	43	43
3	水密设定电缆	41	40
4	控制系统	44	40
5	水平舵机构	43	40
6	垂直舵机构	39	35
7	距离解锁机构	40	40
8	电缆拔脱机构	25	24
9	尾锥	34	34
10	内测系统	34	34
11	尾翼及同步机构	8	8
	整机试验	44	40

在考虑环境因子的情况下，可得该产品对应不同置信度下的工作可靠度下限  $R_L$  如图 1 所示。

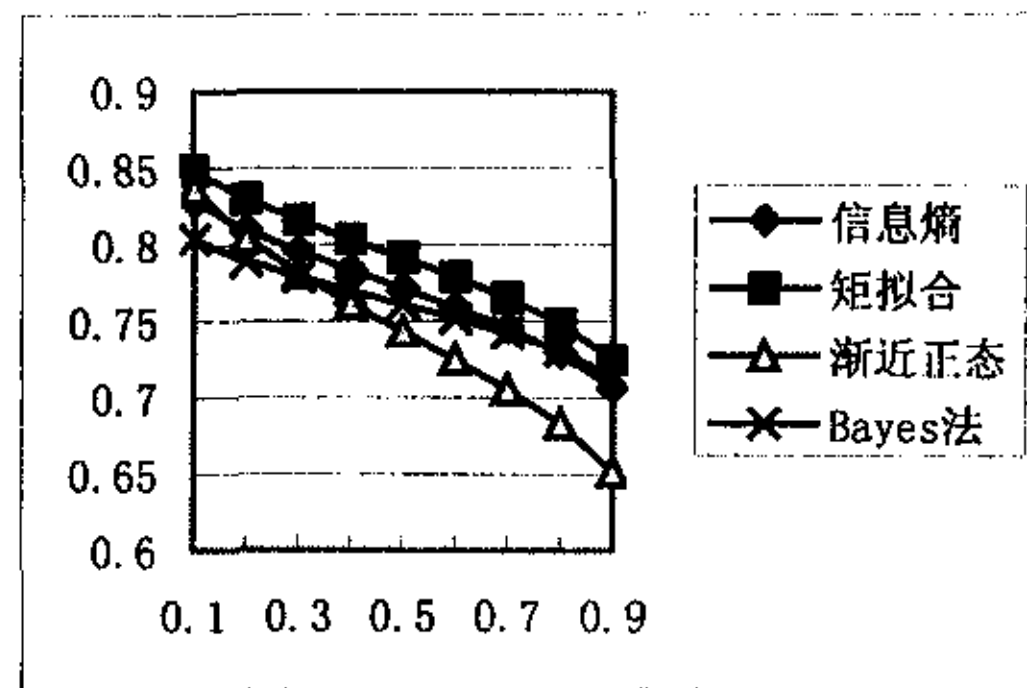


图 1 工作可靠度下限  $R_L$

可以看出，几种方法得出的结论很相近。Bayes 法是一个半经验方法，结果显示验前分布取  $A(1/2, 1/2)$  是合理的。信息熵法和矩拟合法变化趋势非常相似。由于部件数量和试验信息量小，用渐近正态法结果偏于保守。

6 结论

可靠性评定对于系统的研制具有重要意义，作为可靠性研究的一项重要内容而受到

广泛的关注, 可靠性评定方法是进行可靠性评定工作的必要工具, 可靠性评定的方法也在不断地涌现。工程上常用的可靠性评定方法有 Bayes 方法、信息熵法、近似正态法、矩估计法等。

模糊性和灰色性弥补了传统可靠性评定方法描述客观世界的不足, 是可靠性评定急需解决的主要问题, 也是其发展的方向。虽然可靠性评定中仍然存在一些问题, 但是随着研究的深入, 相信这些问题一定会得到解决。

### 参考文献

- [1] 宋保维, 秦英孝. 小子样产品的可靠性 Bayes 评定方法. 弹箭与制导学报, 1999 (2)
- [2] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定. 北京: 科学出版社, 1991
- [3] 宋保维, 秦英孝. 复杂机械系统可靠性评估中的信息熵法. 箭弹与制导学报, 1995 (2)
- [4] 宋保维, 徐德民, 潘光. 系统可靠性评定中的近似正态. 机械科学与技术, 1996 (5)
- [5] 宋保维, 石秀华. 复杂产品可靠性评定中的矩拟合法. 西北工业大学学报, 1995 (4)
- [6] 汤礼东. 基于模糊数学的小子样产品抽检分析. 西北工业大学学士学位论文, 2002
- [7] 罗吉庭, 罗强. 串联系统可靠性评估方法的综合述评. 宇航学报, 1996 (4)
- [8] 李廷杰, 高和. 模糊可靠性初探. 系统工程与电子技术, 1988 (10)
- [9] 唐五湘. 系统可靠性指标的灰色评估分配法. 系统工程理论与实践, 1994 (12)
- [10] 宋保维, 王晓娟. 系统可靠性设计与分析. 西安: 西北工业大学出版社, 2000
- [11] 胡宽, 张永敬, 常新龙. 考虑模糊因素的缺陷安全可靠性评定. 上海航天, 2001 (1)
- [12] 张爱林, 赵国潘, 王光远. 现役结构可靠性评定研究述评. 北京工业大学学报, 1998 (6)
- [13] 刘军, 王士俊. 串联系统的可靠性下限评估方法研究. 系统工程与电子技术, 1998 (4)
- [14] 施军. 系统可靠性评定的熵(法)近似限. 航空学报, 1996 (5)
- [15] Jeff Jones, Member, Estimation of System Reliability Using a "Non-Constant Rate" Model, IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL.50,NO.3, SEPTEMBER 2001
- [16] Kaplan, S.; Cunha, G.D.M.; Dykes, A.A.; Shaver, D.; A Bayesian methodology for assessing reliability during product development. Reliability and Maintainability Symposium, 1990. Proceedings, Annual, 23-25 Jan 1990
- [17] Richard K L. Application of Bayesian Reliability Concepts to Cruise Missile Electronic Components. ADA216208, 1989
- [18] S.Kaplan;Pickard,Lowe&Garrick; A Bayesian Methodology for Assessing Reliability during Development. PROCEEDINGS Annual RELIABILITY AND MAINTAINABILITY Symposium, 1990

### 作者简介

梁庆卫, 女, 1970.5  
职称: 博士  
联系地址: 西安市西北工业大学66号信箱, 710072  
电话: 13892827150  
E-mail: [liangqingwei@sina.com.cn](mailto:liangqingwei@sina.com.cn)