

可靠性增长技术发展动态诠释

郭建英, 孙永全, 于晓洋

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 可靠性增长技术是研制阶段提高系统可靠性的有效手段, 作为可靠性工程的重要研究方向, 倍受学术界和工程界关注. 为推进我国的可靠性事业, 对国内外可靠性增长技术研究动态进行了梳理和归纳, 论述了相关的理论和方法, 结合工程实践探讨性地提出了进一步拓展研究的切入点, 以供从事可靠性工程的科技人员参考和借鉴.

关键词: 可靠性增长; 可靠性预测; 即时纠正; 延缓纠正; 全寿命期

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2011)02-0001-11

Annotation of Reliability Growth Technology Development Trends

GUO Jian-ying, SUN Yong-quan, YU Xiaoyang

(School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract Reliability growth technology is an effective means to improve system reliability during development stage. It is an important research direction and concerned much by academic and engineering circles. In order to promote development of reliability engineering, reliability growth technology at home and abroad is analyzed and summarized. Relevant theories and methods are discussed, and breakthrough points for further research are proposed according to engineering practice, which could be referenced by scientific personnel engaging in reliability engineering.

Key words reliability growth; reliability prediction; instant fix mode; delayed fix mode; life cycle

0 引 言

研制阶段的可靠性增长技术 (reliability growth technology) 一直是可靠性工程中非常活跃的研究方向, 通过“试验—暴露故障—纠正—再试验”的循环过程, 可以有效地排除缺陷和故障隐患, 在保证和提高产品可靠性方面发挥了重要作用. 20世纪 50年代, H. K. Weiss^[1]首先发表了一篇可靠性增长学术论文. 60—70年代 Duane J T, Grow L H等学者提

出了 Duane 和美国陆军装备系统分析中心 (army materiel system analysis activity AMSAA) 可靠性增长模型, 成为可靠性增长技术发展史上重要的里程碑. 1969年美国国防部 (department of defense) 颁发军用标准 MIL-STD-785A《系统、设备研制与生产的可靠性大纲》, 率先将可靠性增长技术纳入可靠性工作计划^[2]. 1981年美国颁发军用手册 MIL-HDBK-189^[3]《可靠性增长管理》, 给出了十七个可靠性增长模型, 先用在军品, 后推广到民品, 并被许多国家引用. 1989年, 国际电工委员会 (international electror

收稿日期: 2011-01-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863项目) (2009AA042407); 国家自然科学基金 (60072002)

作者简介: 郭建英 (1943—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guoj@hrbust.edu.cn

孙永全 (1982—), 男, 博士研究生;

于晓洋 (1963—), 男, 教授, 博士生导师。

technical commission EC) 颁发国际标准 EC61014^[4]《可靠性增长大纲》1995 年又颁发了国际标准 EC61164^[5]《可靠性增长—统计试验与评估方法》, 采纳了 Duane 和 AMSAA 两类可靠性增长模型为主的多个模型. 进入新世纪, 可靠性增长技术在工程需求的推动下得到快速发展. 2005 年美国国防部制定《实现可靠性、可用性和维修性指南》^[6], 在附录 C 中详细介绍了有关可靠性增长的相关解析方法. 2007 年美国陆军军部 (Department of the Army) 在《武器系统可靠性》^[7]中强调将可靠性设计和可靠性增长相结合. 2008 年美国国防科学委员会 (defense science board) 在《研制试验和评估报告》^[8]中指出, 由于系统可靠性、可用性、维修性在设计阶段缺少连续的设计改进, 使得系统初始 MTBF 和可靠性增长潜力较低, 强调通过模拟实际运行环境有效地提高系统可靠性. 同年美国国防部在《可靠性、可用性和维修性政策》^[9]中将可靠性增长技术作为设计和研制阶段的主要内容.

我国的可靠性研究工作起步较晚, 1963 年钱学森提出了要搞可靠性, 之后又分别于 1975 年、1977 年和 1981 年先后提出了“变动统计学”, “小子样统计推断”和“系统可靠性综合”三个重要的研究方向, 可靠性增长技术含在其中. 从上世纪 80 年代伊始, 我国学者开始引入 Duane 模型和 AMSAA 模型. 1992 年, 航空航天工业部颁发航空工业标准 HB/Z214^[10]《航空产品可靠性增长》1995 年国防科工委参考美国军用手册 MIL-HDBK-189 颁发了国家军用标准 GJB/Z77^[11]《可靠性增长管理手册》近年来, 我国学者在可靠性增长技术应用研究方面做了大量的工作, 并取得了丰硕的成果.

经历了半个世纪, 可靠性增长技术在提升产品及系统的可靠性方面发挥了重要作用, 备受工程界和学术界关注, 已成为可靠性工程中的热门研究方向, 许多学者正在深入地开展创新性探索.

1 可靠性增长技术研究动态

1.1 采取即时纠正的系统可靠性增长

在可靠性增长试验中, 尽管对暴露出来的故障采取即时纠正是一种理想状况, 但却构成了可靠性增长技术的基础. 1956 年 H. K. Weiss 在研究制导导弹系统可靠性时提出了第一个可靠性增长模型^[1]

$$\lambda_i = \frac{(\beta + i)}{\alpha i} \quad (1)$$

式中: λ_i 为采取 $i-1$ 个纠正措施后系统的故障率; β, α 为模型参数; i 为暴露的故障次数.

该模型是可靠性增长技术的雏形, 并在 Operations Research 上发表《Estimation of reliability growth in a complex system with Poisson-Type failure》学术论文.

1964 年美国通用电气公司的工程师 J. T. Duane 在撰写的《Technical Information Series Report》中, 提出了具有广泛应用价值的 Duane 模型^[12]

$$\lambda(t) = a(1-m)t^{-m} \quad 0 < a, 0 < m < 1 \quad (2)$$

式中: $\lambda(t)$ 为 t 时刻系统故障率; a 为 Duane 模型尺度参数, 代表系统初始可靠性水平; m 为增长率, 表示系统可靠性增长的速率.

该模型是在分析两种液压装置及三种飞机发动机将近 600 万小时的故障数据后, 发现这些设备的累积故障率和累积故障时间在双对数坐标纸上呈现良好的线性关系的基础上建立的. 给出了采取即时纠正方式的可靠性增长试验的定量评估方法.

1966 年 D. R. Cox 和 P. A. Lewis 假设系统故障次数是具有指数幂律强度函数的非齐次 Poisson 过程 (non-homogeneous poisson process NHPP), 提出了 Cox-Lewis 模型^[13]

$$\lambda(t) = \exp[\alpha \cdot t + \beta] \quad (3)$$

式中: $\lambda(t)$ 为过程强度函数; α, β 为模型参数.

该模型首次将 NHPP 应用于可靠性增长分析. 当 $\alpha = 0$ 时, NHPP 退化为 HPP, 且当 $\alpha < 0$ 时, 系统存在可靠性增长.

不久之后, P. A. Lewis 和 G. Shedler 扩展了 Cox-Lewis 模型, 把 Cox-Lewis 模型的指数幂扩展为 10 次多项式^[14]

$$\lambda(t) = \exp[\alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_{10} t^{10}] \quad (4)$$

式中: $\lambda(t)$ 为过程强度函数; $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{10}$ 为模型参数.

利用式 (4), 有效地提高了拟合精确度.

1968 年 E. P. Virene 利用生物学中反映细胞繁殖增长规律的 Gompertz 模型来描述系统可靠性增长的规律^[15]

$$R(t) = a \cdot b^{c^t} \quad b, c \in (0, 1) \quad (5)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻系统可靠度; a, b, c 为模型参数; a 代表当 $t \rightarrow \infty$ 时系统可靠性极限.

该模型的特点是可靠性开始增长较慢, 然后逐渐加快, 达到某点后增长速度又减慢, 许多系统在研制阶段和制造初期的可靠性符合这种规律.

1974 年美国陆军装备系统分析中心的 L. H.

Crow 给出了 Duane 模型的概率解释, 基于 NHPP 提出了 AM SAA 模型^[16]

$$\lambda(t) = \lambda \cdot t^{\beta-1} \quad (6)$$

式中: $\lambda(t)$ 为 t 时刻系统故障率; λ 为模型尺度参数, 代表系统初始故障率; β 为模型形状参数, 表示系统增长情况

该模型又可称为 Weibull 过程模型. 文献中给出了系统可靠性增长严谨的概率统计分析方法. 随后作者又给出了待估参数及 MTBF 的极大似然估计 (maximum likelihood estimation, MLE)、无偏估计^[17]和置信区间估计^[18-19], 拟合优度检验、分组数据的分析方法及丢失数据时的处理方法^[20], 系统地解决了 AM SAA 模型的统计推断问题^[21]. 但 AM SAA 模型局限性在于: ①对系统每次故障都及时纠正, 不能描述延缓纠正的可靠性增长过程; ②在理论上当 $t \rightarrow 0$ 和 $t \rightarrow \infty$ 时, 产品的瞬时 MTBF 趋向于零和无穷大, 与实际工程不符. 尽管有许多不足, AM SAA 模型仍然是可靠性增长技术的一个标志性成果.

1983 年 L. H. Crow 将 Duane 模型的时间变量用离散型系统的试验次数替换, 建立了基于 NHPP 离散的 AM SAA 模型^[22]

$$R_k = 1 - \lambda \cdot \frac{(N_k^\beta - N_{k-1}^\beta)}{n_k} \quad (7)$$

式中: R_k 为第 k 个试验阶段末系统可靠性; λ 为模型参数, 代表系统初始可靠性水平; β 为模型参数, $0 < \beta < 1$ 系统可靠性具有增长趋势; n_k 为第 k 个试验阶段故障数观测值; N_k 为第 k 个试验阶段投试样容量.

该模型给出了待估参数和可靠性测度的点估计、置信区间和拟合优度检验. 同年 J. M. Finkelstein^[23]进一步给出了离散 AM SAA 模型参数的连续类比估计. 1991 年 G. K. Bhattacharyya 和 J. K. Ghosh 证明了离散 AM SAA 模型参数的 MLE 和连续类比估计具有渐进一致性^[24].

1993 年 A. Fries 针对昂贵产品的破坏性试验, 提出新的离散模型 Fries 模型^[25-26], 给出了模型参数的 MLE

$$R_i = 1 - \lambda' \cdot [i^{\beta'} - (i-1)^{\beta'}]^{-1} \quad (8)$$

式中: R_i 为第 i 次试验后系统可靠性; λ' 为模型参数, $\lambda' = \lambda^{\frac{1}{\beta}}$; β' 为模型参数, $\beta' = \beta^{-1}$, λ, β 参见式 (7).

该模型适用于研制阶段系统可靠性具有单调增长的情况. 1996 年他又发表论文详细总结了几十种离散型可靠性增长模型, 重点强调了不同模型之间

的关系^[27].

1994 年, D. Kececioglu S 和 Jiang P. Vassiliou 分析了具有 S 形增长趋势的系统可靠性增长拟合, 指出了利用 Gompertz 模型来描述精度较差, 甚至出现不合理的评估结果, 提出了改进的 Gompertz 模型^[28]

$$R(t) = d + ab^c t^c, \quad 0 < t < \infty, \quad 0 < b < 1, \quad 0 < c < 1 \quad (9)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻系统可靠性; a, b, c, d 为模型参数, c 反映可靠性增长速度.

该模型考虑了垂直轴上的位移, 引入新参数 d 可以精确评估具有 S 型增长趋势的系统可靠性增长. $d + a$ 表示可靠性增长上限, $d + ab$ 表示系统初始可靠性水平.

2002 年, R. Hodge 和 J. Quigley 等人提出了一种可靠性增长决策方法^[29]. 该方法包括在设计阶段评估系统可靠性增长, 利用可靠性增长模型在系统全寿命周期内跟踪其可靠性变化, 给出了模型参数和系统可靠性特征量的点估计和置信区间. 2003 年 T. Gurunatha 和 R. P. Siegel 将 12 步的 6- sigma 管理过程应用于 Xerox 公司某型产品的可靠性增长^[30], 实践证明, 该型产品的可靠性增长效果显著.

2005 年 L. Wallis J. Quigley 和 M. Krasich J. Quigley 给出了修正的逆幂率模型和修正的 IBM 模型, 并将它们应用于设计阶段可靠性增长分析^[31-32]. 并指出修正的逆幂率模型适用于设计较成熟的产品, 而修正的 IBM 适用于不确定因素较多的产品.

修正后的逆幂律模型:

$$R^T(t) = \exp \left\{ \ln R_0^T \left[\frac{b + \left(\frac{\ln R_c^T}{\ln R_0^T} \right)^{\frac{-1}{\alpha_d}}}{b} - 1 \right]^{-\alpha_d} \right\} \quad (10)$$

式中: $R^T(t)$ 为系统经过 t 时间的可靠性增长后, 在寿命 T 时刻所具有的可靠度; R_0^T 为可靠性增长之初, 系统在寿命 T 时刻所具有的可靠度; R_c^T 为系统在寿命 T 时刻所具有的可靠度目标值; b 为设计阶段历经时间; α_d 为增长率.

修正后的 IBM 模型:

$$R_1^T(t) = \exp \left[\lambda_{ws} T + \sum_{k=1}^K \eta_k e^{-\alpha_d t} (1 - e^{-\lambda_k^T}) \right] \quad (11)$$

式中: $R_1^T(t)$ 为系统经过 t 时间的可靠性增长后, 在寿命 T 时刻所具有的可靠度; λ_{ws} 为非系统性故障引起的系统故障率; η_k 为第 k 类系统性故障所引起的系统故障次数的期望值; T 为运行时间; α_d 为增长率.

20 世纪 80 年代我国学者开始引入 Duane 模型和 AMSAA 模型开展可靠性增长工程研究工作. 1987 年北京环境与强度研究所的周源泉开展了卓有成效的研究工作, 他在 AMSAA 模型的基础上, 提出更具普遍意义的 AMSAA-BISE 模型, 解决了多台产品同步可靠性增长分析的问题^[33], 梅文华曾对 AMSAA-BISE 模型提出异议^[34]. 1992 年, 1997 年周源泉出版了两本可靠性增长理论专著《可靠性增长》《质量可靠性增长与评定方法》, 全面总结阐述了可靠性增长试验的相关理论和方法, 成为本领域有重要影响的著作.

1.2 含延缓纠正的系统可靠性增长

对于可靠性增长试验过程中出现的故障, 既可以采取阶段验后集中纠正的方式, 也可采取即时纠正和延缓纠正并举的方式. 针对前一种方式, W. Wolman 于 1963 年提出了集中验后纠正的离散型系统可靠性增长模型, 即 Wolman 模型^[35]

$$R_k = 1 - q_0 - (M + 1 - k)q \quad 1 \leq k \leq M + 1 \equiv K \quad (12)$$
式中: R_k 为系统可靠性; q_0 为固有故障出现的概率; q 为每个可归因故障出现概率的均值; M 为潜在的可归因故障总数.

该模型首次提出了可归因故障和固有故障的概念, 假设原有的可消除的故障数是已知的, 并假设一旦其中一种故障模式引起故障, 就从系统中永远的消除此故障模式.

1964 年 W. J. Corcoran 和 H. Weingarten 等人提出了 Corcoran-Weingarten 模型^[36]

$$R(N | p_i) = R_i + \sum_{i=1}^k (1 - d_i) \times p_i [1 - (1 - p_i)^N] \quad (13)$$

式中: $R(N | p_i)$ 为当前试验阶段末系统可靠性; R_i 为系统初始可靠性; N 为系统总故障数; p_i 为第 i 种故障模式出现的概率; d_i 为第 i 种故障模式的纠正有效性系数.

该模型研究了纠正措施的有效性, 给出了待估参数和可靠性测度的估计方法, 但只适用于单阶段延缓纠正. 继而, D. E. Olsen 将 Corcoran-Weingarten 模型推广到多阶段可靠性增长的情况^[37].

1966 年 R. E. Barlow 和 E. M. Scheuer 扩展了 Wolman 模型, 提出 Barlow-Scheuer 模型^[38]

$$R_k = 1 - q_0 - q_k \quad (14)$$

式中: R_k 为第 k 试验阶段末系统可靠性; q_0 为固有故障出现的概率, 常数; q_k 为第 k 个阶段可归因故障出现的概率.

该模型延续了 Wolman 模型的故障分类方法, 将增长分为多个试验阶段, 给出了模型参数的 MLE 和系统最后阶段可靠性的保守近似置信限.

在 Barlow-Scheuer 基础上, 1977 年 A. F. M. Smith 引入 Bayes 推理, 针对离散系统可靠性增长, 给出了 Smith 模型^[39]

$$f(R_k) = \frac{\sum_{h_1=1}^{g_1} \sum_{h_2=1}^{g_2} \cdots \sum_{h_{m-1}=1}^{g_{m-1}} w(h_1, h_2, \dots, h_{m-1})}{\sum_{h_1=s_1+1}^{g_1} \sum_{h_2=s_2+1}^{g_2} \cdots \sum_{h_{m-1}=s_{m-1}+1}^{g_{m-1}} w(h_1, h_2, \dots, h_{m-1})} \times \beta(\theta_m | s_m + h_{m-1}, s_{(m+1)} + f_{(m)} - h_{m-1} - m + 1) \quad (15)$$

式中: $s_i \equiv r_i + 1$, $f_i \equiv n_i - r_i + 1$, $s_{(i)} \equiv s_1 + \cdots + s_i$, $f_{(i)} \equiv f_1 + \cdots + f_i$, $g_{(i)} \equiv s_{(i)} + f_{(i)} - i$, $w(h_1, \dots, h_{m-1}) = \prod_{j=1}^m B(s_j + h_{j-1}, s_{(j-1)} + f_{(j)} - h_{j-1} - j + 1) \binom{g_j + 1}{h_j} \times B(s_m + h_{m-1}, s_{(m-1)} + f_{(m)} - h_{m-1} - m + 1)$; n_i 为试验样本容量, r_i 为故障次数观测值.

该模型假设纠正措施有效, 且各阶段间系统可靠性具有逐步提高的顺序约束, 深入研究了无信息先验下 Bayes 推理在可靠性增长分析中的应用. 给出了阶段可靠性的 Bayes 点估计和置信下限. 1978 年 D. E. Olsen 给出了 Barlow-Scheuer 模型的置信区间^[40].

1978 年, N. D. Singpurwalla 针对成败型系统可靠性增长试验, 利用时间序列方法提出了离散型系统可靠性增长 Singpurwalla 模型^[41], 给出了每试验阶段系统初始可靠度

$$p_i = \frac{\left[\sum_i s_i + \beta \right]}{\left[\sum_i n_i + \alpha + \beta \right]} \quad (16)$$

式中: p_i 为第 i 个试验阶段系统初始可靠度; α, β 为 R_i 的先验 Beta 分布参数; s_i 为第 i 个试验阶段试验成功次数; n_i 为第 i 个试验阶段总试验次数.

该模型认为伴随设计改进, 系统二项分布参数不断发生变化, 给出当前各阶段可靠度估计, 并可预测未来各阶段可靠度. 此方法的优点是: 不需要预先选择模型; 缺点是: 应用该方法需要多个阶段的数据才能得出有意义的结论.

1987 年 N. S. Fard 和 D. L. Dietrich 考虑到阶段间可靠度的顺序约束关系, 纠正了 Smith 模型中的计算错误, 建立了 Fard-Dietrich 模型^[42], 与 Smith 模型的不同之处在于

$$w(h_1, h_2, \dots, h_{m-1}) = \prod_{j=1}^m B(s_j + h_{j-1}, s_{(j-1)} + f_{(j)} - h_{j-1} - j + 1) \left(\frac{g_j}{h_j} \right) \cdot B(s_m + h_{m-1}, s_{(m-1)} + f_{(m)} - h_{m-1} - m + 1) \quad (17)$$

该模型利用仿真方法比较了均匀先验下的 Bayes 模型、Barlow-Scheuer 模型和 Smith 模型, 认为后两种模型评估结果保守. 1989 年 Robinson David 和 Dietrich Duane 将 Bayes 方法推广到指数型系统可靠性增长分析^[43].

1991 年 T. A. Mazzuchi 和 R. A. Soyer 认为 Smith 模型没有形成融合先验信息的方法, 无法预测系统可靠性, 给出了基于 Dirichlet 先验分布的可靠性增长 Bayes 估计^[44-46], Dirichlet 先验分布为

$$\pi(F | \beta, \alpha) = \frac{\Gamma(\beta)}{\prod_{j=1}^m \Gamma(\beta_{\alpha_j})} \prod_{j=1}^{m+1} \Gamma(F_{j-1} - F_j)^{\beta_{\alpha_j}-1} \quad (18)$$

式中: F 为系统故障概率; α, β 为先验分布参数.

该模型利用 Dirichlet 分布的边缘分布和联合分布融合专家意见和同类产品的试验信息, 修正了 Smith 模型, 可以预测系统的可靠性, 但是该模型验后密度计算复杂.

2008 年 J. B. Hall 和 Ali Mosleh 扩展了基于 Stein 因子的可靠性增长模型, 提出了新的离散型系统可靠性增长 Hall Mosleh 模型^[47]

$$r(T) = \prod_{i \in obs} [1 - (1 - d_i)p'_i] \cdot \prod_{j \in obs} [1 - p'_j] \quad (19)$$

式中: $r(T)$ 为试验阶段末采取纠正后系统可靠性; obs 为观测到的故障模式集合; p'_i, p'_j 为第 i, j 种故障模式出现的概率, 且有

$$p'_i = \theta \cdot \hat{p}_i + (1 - \theta) \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \hat{p}_i}{k}; \quad (\theta \text{ 为 Stein 因子};$$

k 为潜在总故障次数.)

该模型假设在试验阶段末对暴露的故障模式采取集中纠正措施, 认为试验次数服从二项分布, 每次试验失败的概率为来自一组独立同分布 (Beta 分布) 的随机变量, 给出了待估参数和可靠性测度的矩估计和 MLE, 进而又给出了 Bayes 解析^[48], 并用 Monte-Carlo 模拟验证了方法的有效性.

国内学者在多阶段延缓纠正的可靠性增长方面也做了大量研究. 1983 年陈世基^[49], 1985 年叶尔骅^[50]在取 Beta 先验和均匀先验情况下, 采用 Bayes 方法修正了 Barlow-Scheuer 模型. 1990 年田国梁引入增长折合因子, 研究了定时、定数截尾条件下

Poisson 过程可靠性增长的经典和 Bayes 解析方法^[51-52]. 2004 年张金槐^[53-54]、2006 年周源泉^[55]研究了系统可靠性增长先验信息的融合方法, 探讨了指数分布和二项分布下利用增长因子传递阶段间的试验信息, 进而获取先验分布的方法. 随后许多学者研究了增长因子的不同获取方法^[56-57].

1.3 可靠性增长预测

研制阶段的可靠性增长分析应归属于事前分析, 具有明显的应用价值. 若能进一步根据当前的故障数据预测出服从某个概率分布 (或随机过程) 的未来观测值及其统计量, 则更具有研究意义和工程应用前景. 对于可靠性增长试验来说, 其单样预测 (One-Sample Prediction) 是根据已发生的各故障的累计时间来预测未来第 k 次故障的累计时间, 对于可靠性增长规划的制定具有指导意义; 而双样预测 (Two-Sample Prediction), 同样可以根据当前样本预测同一随机过程的产品下一个故障到来的时间, 其最小寿命下限适用于质量保证工程. 首先开展这方面研究的是美国的 N. R. Mann 等学者于 1974 年著文提出了产品可靠性预测问题; 1982 年 W. B. Nelson 著书专题讨论可靠性预测理论及发展趋势.

到目前为止, 可靠性增长预测问题的研究还是基于先验和当前样本的统计推断, 没有考虑未来观测值的概率分布或随机过程. 其预测属于 Projection

1983 年 L. H. Crow 提出了带延缓修正的 AM SAA 预测模型^[58-59] (AM SAA projection model, APM)

$$E[\lambda(t)] = \lambda_0 + \sum_{i=1}^m (1 - d_i) \lambda_i + \bar{d} \cdot h(T) \quad (20)$$

式中: λ_0 为 A 类故障引起的故障率; d_i 为第 i 种 B 类故障模式的纠正有效性系数; λ_i 为第 i 种 B 类故障模式引起的故障率; $h(T)$ 为新的 B 类故障在 T 时刻出现的强度; $\bar{d}$ 为纠正有效性系数平均值.

该模型将系统故障分为两种类型, A 类故障和 B 类故障, 对 B 类故障在试验阶段结束后采取集中纠正, 引入纠正有效性系数 (fix effectiveness factor), 预测系统将达到的可靠性水平. 由于引入纠正有效性系数人为主观性增加, 使得该模型的求解结果不确定性增大. 另外该模型只能用于单阶段预测, 不能对可靠性增长的全过程预测.

1995 年 P. M. Elher 扩展了 L. H. Crow 提出的 APM 模型, 将其应用于含延缓纠正的系统可靠性增长, 提出了成熟度预测模型^[60] (AM SAA maturity projection model, AMPM)

$$\theta(t) = 1 - (1 - \beta t)^{-(\alpha+2)} \quad (21)$$

式中: $\theta(t)$ 为系统 MTBF; α, β 为伽玛分布参数。

该模型假设系统首次出现故障时间服从指数分布, 故障率是一组来自独立同分布 (伽玛分布) 的随机变量, 建立了似然方程, 给出了待估参数和可靠性测度的 MLE, 但未能给出预测区间。由于系统 MTBF 和纠正措施及其有效性相互独立, 因此称此模型为成熟度预测模型。

2004 年 L. H. Crow 同样针对 APM 模型不能对含延缓纠正的可靠性增长进行预测的局限性, 提出了扩展的 APM 模型^[61] (extended AM SAA projection model), 解决了含延缓纠正的可靠性增长预测问题。

$$\lambda_{EM} = \lambda_{EA} - \lambda_{BD} + \sum_{i=1}^K (1 - d_i) \lambda_i + dh(T | BD) \quad (22)$$

式中: λ_{EA} 为试验阶段末, 采取纠正措施前系统故障率, 可利用 AM SAA 模型得到; λ_{EA} 为由延缓纠正故障引起的系统故障率; λ_i 为第 i 种 B 类故障引起的系统故障率; d_i 为第 i 种 B 类故障模式纠正有效性系数; $h(T)$ 为新的 BD 类故障在 T 时刻出现的强度。

该模型通过对故障数据分类, 仅是对 AM SAA 模型和 APM 模型应用的一种简单扩展。其扩展的 APM 模型仍然建立在故障暴露过程服从 NHPP 的假设上。

在 Crow 提出的 APM 模型的基础上, 2005 年 P. M. Elher 和 J. B. Hall 利用 Stein 因子重新描述各故障模式引起的故障率, 建立了针对连续性系统的基于 Stein 因子的可靠性增长预测模型^[62] (AM SAA projection model stein APM-Stein)

$$\rho_s(T) = \sum_{k=obs} (1 - d_i^*) \lambda_i' + \left[1 - \frac{m}{k} \right] (1 - \theta_s) \left(\frac{N}{T} \right) \quad (23)$$

式中: $\rho_s(T)$ 为 T 时刻系统故障率; θ_s 为 Stein 因子; m 为观测到的故障次数; k 为潜在的故障次数; λ_i' 为第 i 种故障模式引起故障率的点估计。

该模型引入的 Stein 因子是否合理, 有待验证。

针对 2008 年美国国防部要求可靠性增长要尽可能的模仿系统实际运行的任务剖面的建议, 2010 年 L. H. Crow 提出了连续扩展的 APM 模型^[63] (extended continuous AM SAA projection model), 可靠性增长潜力如下式所示。

$$\lambda_{NGP} = \lambda_D - \lambda_{BDD} + \lambda_{NGPfactor} + d_N ph(T) - d_N h(T) \quad (24)$$

式中: λ_D 为试验末未采取纠正前系统故障率; λ_{BDD} 为 BDD 类故障所引起的系统故障率; $\lambda_{NGPfactor}$ 为采取纠正措施后 BDD 类故障的残余故障率; d_N 为纠

正有效性平均值; p 为 BDD 类故障数除以 BDC 和 BDD 类故障数之和; $h(T)$ 为新的 BDD 类故障在 T 时刻出现的强度。

该模型分析了模仿任务运行剖面开展可靠性增长所出现的新特征, 指出人为因素导致系统故障的现象普遍存在, 可靠性增长不能仅重视硬件设计、软件设计和制造引起的系统故障, 更要延伸到操作错误和运行维护引起的系统故障, 最终结合数值例给出了预测结果, 验证了有效性。

从目前检索到的文献, 真正属于增长 Prediction 模型的还少见。仅有 M. Engelhardt 和 L. J. Brain^[64]; L. Lee 和 S. K. Lee^[65] 于 1978 年在 AM SAA 模型的基础上, 研究了 Weibull 过程的预测问题。他们通过构造枢轴量和 Monte-Carlo 模拟, 给出了 Weibull 过程下连续型系统未来第 v 次故障时间的预测区间为

$$\begin{cases} t_{(n+v),L} = t_n \exp \left[\frac{(n-2)y_1}{n(n-1)\bar{\beta}} \right] \\ t_{(n+v),U} = t_n \exp \left[\frac{(n-2)y_2}{n(n-1)\bar{\beta}} \right] \end{cases} \quad (25)$$

式中: $t_{(n+v),L}$, $t_{(n+v),U}$ 为未来第 v 次故障时间的预测下限和上限; t_n 为系统第 n 次故障时间; $\bar{\beta}$ 为 AM-SAA 模型形状参数的无偏估计; y_1 , y_2 可以通过查表获得, 参见文 [64]。

由于该模型采用近似计算, 计算过程复杂, 且预测精度不高。

我国在可靠性增长预测方面的研究起步较晚, 但也取得了一些有价值的研究成果。陈胜军对机器人系统, 探讨了可靠性增长和预测问题^[66]; 梅文华利用可靠性增长回归曲线的外推预测系统未来故障时间^[67], 指出了预测精度的不确定性问题。刘飞、王中伟等借鉴 Mazzuchi-Soyer 模型, 利用次序 Dirichlet 先验分布建立了指数型系统可靠性增长模型^[68]。闫志强、蒋英杰利用 Dirichlet 分布分布作为先验分布, 建立了多阶段含延缓纠正的可靠性增长预测模型^[69]。此外, 文 [70] 针对多台同步增长的 AMSAA 模型, 给出了可靠性增长的瞬时平均无故障间隔时间 MTBF(t) 和瞬时故障强度 $\lambda(t)$ 的极大似然估计, 但没有给出概率区间估计。文 [71] 分析了利用次序 Dirichlet 先验分布描述工程实际的局限性, 以条件分布的形式构造了新的 Dirichlet 先验分布类, 改进了 Mazzuchi-Soyer 模型。涉及增长 Prediction 理论的文献仅有周源泉、李宝盛, 研究了故障终止时齐次 Poisson 过程的未来时间段的故障次数预测问题^[72]。文 [73] 给出了当前样本下未来故障发生时

间的条件分布及其联合概率密度函数,讨论了在增长试验终止后的未来故障时间的预测问题。

2 可靠性增长技术发展趋势

2.1 小子样系统的可靠性增长分析

小子样统计推断问题是可靠性工程无奈的选择,其原因也在于“数据匮乏”。对单元或系统进行可靠性评定是研究产品可靠性的基础工作,作为统计学的三大学派:经典方法、Bayes方法、Fiducial方法,都在小子样统计方面做了大量的研究工作。其中 Bayes方法因其能够充分地利用事前的产品全寿命周期的各种试验信息,可以加快产品的评估和定型,这在一定程度上缩短了产品的研制周期,进而保证了产品的技术优势和竞争力。为此,美军早在 1984 年就提出,对昂贵的武器系统进行破坏性试验时,必须采用序贯分析方法 (sequential analysis method) 和 Bayes估计方法。并应用 Bayes方法对“潘兴 II”导弹进行了可靠性评估,取得了很好的评估效果和经济效益。

Bayes公式最初是由英国牧师 Bayes在 18 世纪提出来的,后由法国数学家 Laplace进行了改进,形成了广为应用的 Bayes定理。作为一般形式

$$f(\theta|x) = \frac{f_0(\theta)L(x|\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} f_0(\theta)L(x|\theta)d\theta} \quad (26)$$

式中: $L(x|\theta)$ 为给定参数 θ 时,试验结果为 x 的似然函数; $f_0(\theta)$ 为先验密度; $f(\theta|x)$ 为后验密度。

利用先验信息,它不仅扩充了统计推断的子样容量,而且也使待估参数的 Bayes置信限缩窄。如何获知先验分布及其参数,并在 Bayes定理中可解,正是 Bayes方法的核心问题。从理论研究上,偏于采用无信息先验分布和共轭先验分布,但有很大的局限性。从工程实际出发,一切工作均有其延续性,往往可以根据历史的经验或经过验证的理论进行粗略的预计和推算。把以往的经验 and 当前试验数据相结合所进行的统计推断,被称作经验 Bayes方法。M. E. Pate-Comell N. D. Singpurwalla 和 M. J. Newby 等研究了先验知识的收集、整理和合理利用的方案^[74-76]。P. Ertq R. Calabria 和 G. Pulcini 等通过确定先验信息类型,分别对指数分布和 Weibull 分布等做了 Bayes统计分析^[77-78]。为减少 Bayes方法中引入过多主观因素, H. Robbins^[79] 和 H. F. Martz^[80] 分别提出了经验 Bayes思想。但经验 Bayes方法必

须遵守以下二个原则:一是保证经验样本来自相同的试验条件;二是经验样本来自同一母体。据此又使扩充信息量受到限制,必须考虑历史数据和现场试验数据的可融合问题。因此,利用信息融合技术处理 Bayes先验信息,已成为当前热门的研究命题。除此之外,利用计算机仿真获取先验信息,凭藉专家经验确定先验信息等方法也受到学界的关注。尽管基于历史经验的 Bayes方法有效地解决了实际问题,却往往伴生出难以令人信服的疑惑。因此,研究 Bayes先验信息的准确性,分析 Bayes估计的精度和可信性,也是 Bayes方法必须解决的问题。值得强调的是,对于过小子样的 Bayes统计推断,需要做先验分布和后验分布的拟合优度检验,有时还需要对先验分布的参数取值进行检验,以保证所用 Bayes方法的合理性和科学性。

随着研究不确定量的模糊理论、最大熵理论、灰度理论、证据理论等的发展,为进一步研究 Bayes验前信息融合问题提供了更多的理论支持和手段。

2.2 加速可靠性增长试验

伴随社会经济和科学技术的发展,产品更新换代的周期在缩短,减少试验时间已经势在必行。1995 年 A. A. Feinberg 将加速试验与可靠性增长试验相结合,研究了在恒定应力和步进应力下的加速可靠性增长问题^[81]。2007 年 K rasich 在振动、高温保持、温度冲击和湿度四种加速应力下,将产品的故障数据转换为正常应力下的寿命数据,进而利用 AMSAA 模型进行可靠性增长分析^[82]。

$$R(t_0) = R_U(t_0) \cdot \prod_i R_{e_i}(t_0) \prod_j R_{o_i}(t_0) \quad (27)$$

式中: $R_{e_i}(t_0)$ 为关于环境应力的系统可靠度; $R_{o_i}(t_0)$ 为关于工作应力的系统可靠度; $R_U(t_0)$ 表示多种应力的叠加效应。

该模型可谓之加速可靠性增长试验及统计分析的范例,并已引起学界和工程界的关注,但研究进展缓慢,可供借鉴的文献不多。国内学者周源泉、朱新伟曾在 2000 年至 2003 年间,系列地发表了“论加速可靠性增长试验”的论文,如文 [83-84] 等,探讨了加速可靠性增长的相关理论和方法问题。黄宝胜、于丹等研究了阿伦尼斯 (Arrhenius) 加速可靠性增长分析方法^[85],给出了不同应力下设备可靠度的置信下限。文 [86] 讨论了故障分类和强化试验的环境因子问题,给出了可靠度的二项、指数近似限。

尽管加速可靠性增长试验有明显的 application 前景,但仍有诸多问题束缚着它的发展。主要问题是:

1) 实施加速可靠性增长试验, 同样应保证产品的故障机理不发生质的改变, 因此多适用于基础器件、部件类产品, 对于整机或系统而言还存在诸多问题;

2) 为了确保增长分析的准确性和可信性; 在加速可靠性增长试验中必须对已暴露的故障进行严格的故障机理分析;

3) 试验过程中的加速因子、应力水平和数量应与加速模型相匹配, 还要考虑纠正方式和维修措施问题。

近年来备受关注的高加速寿命试验 (highly accelerated life testing, HALT) 和高应力筛选试验 (highly accelerated stress screen, HASS), 都属于激发试验范畴。前者用于产品的设计阶段, 目的是快速暴露产品的设计缺陷, 以便及时改进设计; 后者用于产品的生产阶段, 目的是快速暴露产品的制造缺陷。虽然 HALT 和 HASS 有助于提高产品可靠性, 但是还停留定性分析阶段。因此, 研究 HALT 和 HASS 的定量解析问题是关键。如果应用阶段验证后纠正的可靠性增长模型, 并实施加速试验, 则可以把 HALT、HASS 与可靠性增长试验结合起来, 有助于推进加速可靠性增长技术的发展。

2.3 全寿命期的可靠性增长预测问题

2010 年 Jin Tongdan 认为分布式生产模式虽然降低了成本, 但系统可靠性也增加了不确定因素。为此他建议在电子产品设计、制造、装配和现场运行的整个生命周期实施可靠性增长, 并在分析纠正措施有效性函数的基础上, 提出了可靠性增长预测模型^[87]

$$\mu_A(t) = \sum_{i=1}^n \{ [1 - f_i(x_i)] \lambda_i \} + \sum_{i=n+1}^m \{ [1 - f_i(x_i)] \alpha_i \beta_i t^{1-f_i(x_i)\beta_i-1} \} \quad (28)$$

式中: $\mu_A(t)$ 为系统故障率函数; $f_i(x_i)$ 为第 i 种故障模式纠正有效性函数; λ_i 为第 i 种故障模式引起的故障率; α_i 、 β_i 为 AMSAA 模型参数。

利用该模型可以从纠正措施、可靠性预测和资源优化配置 3 个方面管理可靠性增长和进行成本优化分析。

产品或系统的可靠性增长是按照“试验—暴露故障—纠正—再试验”的循环过程逐步实现的, 多用于新品研制阶段。但是在小批试生产阶段、批产品正式投产阶段、产品装配调试阶段或现场安装试运行阶段、用户使用阶段, 也伴随有“暴露故障—纠正

和改进”的经历。采取的纠正和改进措施, 同样可以实现可靠性增长。可以认为, 可靠性增长过程应该从研制阶段扩展并贯穿到全寿命期。研究全寿命期的可靠性增长, 有益于排除一切不可靠因素和故障隐患, 能够从根本上提高和保证产品可靠性的宗旨, 符合系统工程的思想。解决这一问题的关键, 在于从研制阶段开始必须跟踪、收集、挖掘各类相关的可靠性数据信息, 利用数据挖掘和信息融合技术, 开展全寿命期的可靠性增长分析和预测。这一研究命题无论从理论层面还是工程实践都有很大难度, 但思路不容置疑。

2.4 故障解析与可靠性统计相结合解决预测问题

可靠性增长技术与预测理论是密切相关的, 增长过程中的可靠性预测问题目前形成了 2 个方向, 一个是基于故障物理的寿命预测, 例如由微观裂纹扩展、磨损、腐蚀过程预测结构件寿命, 由真空泄漏、电压击穿预测部件寿命等。这方面的研究主要是针对材料、基础元器件、典型结构件等受各种应力作用而导致故障的过程。此类研究已在材料学、电子学、机械学、物理学等多个学科中展开, 其研究成果颇多, 但尚未延伸到解决系统或整机的寿命预测问题。另一个是基于统计学的可靠性预测, 已成为可靠性统计的一个别开生面的重要研究方向与补充。目前, 单样预测和双样预测已应用于到串联系统、并联系统及表决系统中。但统计预测同样面临着“数据匮乏”的困扰, 也需要引入数据挖掘和信息融合技术, 才能够解决这一瓶颈问题。此类问题的研究, 国内外仅有一些相近的文献报道, 如文 [88–89] 介绍了数据挖掘技术在可靠性评价中的应用; 文 [90] 讨论了全寿命期的数据共享问题; 文 [91] 和文 [92] 把数据挖掘技术应用于故障诊断。可以断言, 故障物理分析法与统计学方法相结合的寿命预测研究具有深远的发展前景。

3 结 语

可靠性工程作为一门多学科交叉又相互渗透的新型边缘学科, 已取得了长足的发展。如何借鉴国外的经验, 加强可靠性理论和应用研究, 从根本上提升“中国制造”的水平和声誉, 是我国从经济大国向经济强国转变的必经之路; 是落实科学发展观、致力长远发展的重要举措。当前, 我国制造业的可靠性工作还难以适应日益激烈的国际贸易竞争形势。为此, 必须从产品设计、研制伊始, 高度重视产品的可靠性,

并贯穿于产品生产、装配、检验、管理及售后服务的全过程中. 经验已证明, 可靠性增长技术是提高产品或系统可靠性的有效手段, 但是国内的可靠性增长技术研究尚与国外存在较大差距. 现实与发展需求的矛盾, 必须引起国人的重视. “劣质廉价”、“消耗资源”、“恶化环境”、“使用廉价劳动力”、“高能耗”... 绝不是我们所能认可的“中国制造”的特色, 不能再把发达国家不愿意生产的产品冠上“中国制造”的标签. 只有从根本上提高“中国制造”的质量与可靠性, 才能代表一个制造大国应该具备的中国特色.

参 考 文 献:

- [1] WEISS H K. Estimation of Reliability Growth in a Complex System with Poisson-Type Failure [J]. *Operations Research*, 1956, 4 (5): 532–545.
- [2] MIL-STD-785A. Reliability Program for System and Equipment Development and Production [S]. U. S. Department of Defense, 1969.
- [3] MIL-HDBK-189. Reliability Growth Management [S]. U. S. Department of Defense, 1981.
- [4] IEC 61014. Program for Reliability Growth [S]. International Electrotechnical Commission, 1989.
- [5] IEC 61114. Reliability Growth-statistical Test and Estimation Methods [S]. International Electrotechnical Commission, 1995.
- [6] Department of Defense. DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability [R]. Washington DC: Government Printing Office, 2005.
- [7] Department of the Army. Reliability of Army Material Systems [R]. Washington DC: Department of Army, 2007.
- [8] Defense Science Board Task Force. Developmental Test & Evaluation [R]. Washington, DC: Government Printing Office, 2008.
- [9] Department of Defense. Reliability, Availability and Maintainability Policy [R]. Washington, DC: Department of Defense, 2008.
- [10] HB/Z214–1992. 航空产品可靠性增长 [S]. 1992.
- [11] GJB/Z77–1995. 可靠性增长管理手册 [S]. 1995.
- [12] DUANE J T. Learning Curve Approach to Reliability Monitoring [J]. *IEEE Transactions on Aerospace*, 1964, 2: 563–566.
- [13] CHANDR, LEWIS P A. The Statistical Analysis of Series of Events [M]. New York: John Wiley and Sons, 1966.
- [14] LEWIS P, SHEDLER G. Statistical Analysis of Non-stationary Series of Events [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1976, 20: 465–482.
- [15] VIRENE E P. Reliability Growth and its Upper Limits [C] // *Proc of Annual Symposium on Reliability*, 1968: 265–270.
- [16] CROW L H. Reliability Analysis for Complex Repairable Systems [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1974.
- [17] CROW L H. Reliability Growth Estimation From Failure and Time Truncated Testing [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1974.
- [18] CROW L H. On Reliability Growth Tracking [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1974.
- [19] CROW L H. Confidence Interval Procedures for Reliability Growth Analysis [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1977.
- [20] CROW L H. Reliability Growth Estimation With Missing Data-II [C] // *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1988: 248–253.
- [21] CROW L H. Reliability Analysis of Complex Repairable Systems [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1975.
- [22] CROW L H. AMSAA Discrete Reliability Growth Model [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: AMSAA, 1983.
- [23] FNKELSTEN J M. A Logarithmic Reliability-growth Model for Single Mission Systems [J]. *IEEE Transactions Reliability*, 1983, R-32(4): 508–511.
- [24] BHATTACHARYYA G K, GHOSH J K. Estimation Parameters in a Discrete Reliability Growth Model [J]. *Journal for Statistics Planning and Inference*, 1991, 29: 43–53.
- [25] FRIES A. Discrete Reliability-growth Models on Learning-curve Property [J]. *IEEE Transactions Reliability*, 1993, 42(2): 303–306.
- [26] FRIES A. Correction discrete Reliability Growth Models Based on a Learning-curve Property [J]. *IEEE Transactions Reliability*, 1994, 43(3): 475–482.
- [27] FRIES A, SEN A. A Survey of Discrete Reliability Growth Models [J]. *IEEE Transactions Reliability*, 1996, R-45(4): 582–604.
- [28] KECEC DOG U D, JIANG S, VASSILOU P. The Modified-gompertz Reliability Growth Model [J]. *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1994: 160–165.
- [29] HODGE R, QUIGLEY J, JAMES I et al. Integrating Reliability Improvement Modeling into Practice-Challenges and Pitfalls [C] // *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2002: 158–164.
- [30] GURUNATHA T, SEGEL R P. Applying Quality Tools to Reliability: a 12-step Six-sigma Process to Accelerate Reliability Growth in Product Design [C] // *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2003: 562–567.
- [31] WALLS L, QUIGLEY J, KRASICH M. Comparison of Two Models for Managing Reliability Growth during Product Design [J]. *IMA Journal Management Mathematics*, 2005, 16(1): 12–22.
- [32] KRASICH M, QUIGLEY J. Modeling Reliability Growth in the Product Design Process [C] // *IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2004: 424–430.
- [33] 周源泉. AMSAA-BISE 模型 [J]. *强度与环境*, 1987, 2: 31–40.
- [34] 梅文华. 利用 AMSAA 模型预测产品可靠性增长 [J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2003, 4(2): 81–83.
- [35] WOLMAN W. Problems in System Reliability Analysis: Statistical Theory of Reliability [M]. Madison, WI: Univ of Wisconsin Press, 1963: 149–160.
- [36] CORCORAN W J, WENGARTEN H, ZEHNA P W. Estimating Reliability after Corrective Action [J]. *Management Science*, 1964, 10(4): 786–798.
- [37] OLSEN D E. Estimating Reliability Growth [J]. *IEEE Transactions*

- Reliability, 1977, R - 26(1): 50 - 53
- [38] BARLOW R E, SCHEUER E M. Reliability Growth During a Development Testing Program [J]. Technometrics, 1966, 8 (1): 53- 60
- [39] SMITH A F M. A Bayesian Note on Reliability Growth during a Development Testing Program [J]. IEEE Trans Reliability, 1977, 26: 346- 347
- [40] OLSEN D E. A Confidence Interval for the Barlow-Scheuer Reliability Growth Model [J]. IEEE Trans Reliability, 1978, R - 27(4): 308- 310.
- [41] SINGPURWALLA N D. Estimating Reliability Growth (or deterioration) Using Time Series Analysis [J]. IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1978: 111 - 114
- [42] FARD N S, DIETRICH D L. A Bayes Reliability Growth Model for a Development Testing Program [J]. IEEE Trans Reliability, 1987, 36(5): 568- 572
- [43] ROBINSON David, Dietrich Duane. Nonparametric Bayes Reliability Growth Model [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1989, 38(5): 591- 598
- [44] MAZZUCHI T A, SOYER R A. Bayes Attribute Reliability Growth Model [C] //Proc of Annual Reliability & Maintainability Symposium, 1991: 322- 325.
- [45] MAZZUCHI T A, SOYER R A. Reliability Assessing and Prediction during Product Development [C] //Proc of Annual Reliability & Maintainability Symposium, 1992: 468- 474.
- [46] MAZZUCHI T A, SOYER R A. Bayes Method for Assessing Product Reliability During Development Testing [J]. IEEE Trans Reliability, 1993, 42(3): 503- 510
- [47] HALL J B, ALI M osleh. A Reliability Growth Projection Model for One-shot Systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(1): 174- 181
- [48] HALL J B, ALI M osleh. Bayesian Methods for Evaluating Discrete Reliability Growth [C] //Proceeding of Reliability and Maintainability Symposium, 2009: 383- 388
- [49] 陈世基. 具有可靠性增长的二、三项分布概型参数 Bayes 估计的注记 [J]. 福建师范大学学报, 1983, 1: 11- 16
- [50] 叶尔骅. 具有可靠性增长的三项分布概型随机参量的贝叶斯估计 [J]. 宇航学报, 1985, 4: 31- 35.
- [51] 田国梁. Poisson 过程的可靠性增长模型 (I) [J]. 系统工程与电子技术, 1990, 6: 62- 68
- [52] 田国梁. Poisson 过程的可靠性增长模型 (II) [J]. 系统工程与电子技术, 1990, 7: 72- 78
- [53] 张金槐. Bayes 可靠性增长分析中验前分布的不确定方法及其剖析 [J]. 质量与可靠性, 2004, 112(4): 10- 13.
- [54] 张金槐. Bayes 可靠性增长分析中验前分布的不确定方法及其剖析续 [J]. 质量与可靠性, 2004, 113(5): 18- 22
- [55] 周源泉, 刘振德, 陈宝延, 等. 指数分布阶段可靠性增长模型的 Bayes 融合 [J]. 质量与可靠性, 2006, 122(2): 14- 19.
- [56] 杨华波, 张士峰, 蔡洪. 指数分布可靠性增长分析的 Bayes 整体推断方法 [J]. 强度与环境, 2007, 34(2): 12- 16
- [57] 宫二玲, 谢红卫, 李鹏波, 等. 指数寿命可靠性增长评估中增长因子的确定方法 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 53- 56.
- [58] GROW L H. Reliability Growth Projection from Delayed Fixed [C] //Proc of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1983: 84- 89
- [59] CORW L H. Methods for Assessing Reliability Growth Potential [C] //IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1984: 484- 489
- [60] ELLNER P M, WALD L C. AMSAA Maturity Projection Model [J]. Proc of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1995: 174- 181
- [61] CROW L H. An Extended Reliability Growth Model for Managing and Assessing Corrective Actions [C] //Proc of the Annual RAM Symposium, Los Angeles, 2004: 73- 80
- [62] ELLNER P M, HALL J B. AMSAA Maturity Projection Model based on Stein Estimation [C]. IEEE Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005: 271- 277
- [63] CROW L H. The Extended Continuous Evaluation Reliability Growth Model [C] //Proceedings of the 2010 Annual Reliability and Maintainability Symposium, January, 2010: 978- 986
- [64] ENGELHARDT M, BRAUN L J. Prediction Intervals for the Weibull Process [J]. Technometrics, 1978, 20(2): 167- 169
- [65] LEE L, LEE S K. Some Results on Inference for the Weibull Process [J]. Technometrics, 1978, 20(1): 41- 45
- [66] 陈胜军. 机器人系统的可靠性预测理论研究 [J]. 机器人, 2003, 25(7): 648- 651.
- [67] 梅文华. 利用 AMSAA 模型预测产品可靠性增长 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(2): 81- 83
- [68] 刘飞, 王中伟, 张为华. 指数寿命产品可靠性增长试验的 Bayes 分析 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 129 - 132
- [69] 闫志强, 蒋英杰, 谢红卫. 多阶段含延缓纠正可靠性增长的 MS2NHPP 模型及其 Bayes 分析 [J]. 航空学报, 2010, 31(4): 785- 790.
- [70] YU J W, TIAN G L, TANG M L. Statistical Inference and Prediction for the Weibull Process with Incomplete Observations [J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2008, 52(3): 1587 - 1603.
- [71] 明志茂, 张云安, 陶俊勇, 等. 研制阶段系统可靠性增长的 Bayesian 评估与预测 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 150 - 156
- [72] 周源泉, 李宝盛. 故障终止时, HPP 故障数的多样和多样预测 [J]. 强度与环境, 2008, 35(5): 49- 54.
- [73] 孙永全, 郭建英, 陈洪科, 等. 基于广义伽马分布的系统可靠性增长预测 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(9): 1131 - 1134.
- [74] Paté-Cornell M E. Uncertainties in Risk Analysis: Six Levels of Treatment [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 54: 2- 3.
- [75] SINGPURWALLA N D, SONG M S. Reliability Analysis Using Weibull Lifetime Data and Expert Opinion [J]. IEEE Trans Reliability, 1988, 37(3): 340- 347

[76] COOLEN F P A, NEWBY M J. Bayesian Reliability Analysis with Imprecise Prior Probabilities [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 43: 75– 85

[77] ERTO P. New Practical Bayes Estimators for the 2Weibull Distribution [J]. Microelectronics Reliability, 1994, 34(5): 789– 802

[78] CALABRIA R, PULCINIG. An Engineering Approach to Bayes Estimation for the Weibull Distribution [J]. Microelectron Reliab, 1994, 34(5): 789– 802

[79] ROBBINS H. The Empirical Bayes Approach to Statistical Decision Problems [J]. Annual Mathematics Statistics, 1964, 35: 1– 20

[80] MARTZ H F, KVAUM P H, ABRAMSON L R. Empirical Bayes Estimation of the Reliability of Nuclear Power Plant Emergency Diesel Generators [J]. Technometrics, 1996, 38(1): 11– 17

[81] FENBERG A A. Accelerated Reliability Growth Models [J]. Journal of the IES, 1994, 37(1): 17– 23.

[82] KRASICH M ilena. Accelerated Reliability Growth Testing and Data Analysis Method [J]. Journal of the IEST, 2007, 50(2): 98– 117.

[83] 周源泉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验 () 单独故障时间数据的统计方法 [J]. 推进技术, 2001, 4: 265– 269

[84] 周源泉, 朱新伟. 论加速可靠性增长试验 () 步进应力试验方案的统计分析 [J]. 推进技术, 2003, 5: 393– 397

[85] 黄宝胜, 于丹, 李国英. 阿伦尼斯模型下可靠性增长数据的统计分析 [J]. 工程数学学报, 2005, 22(5): 808– 812

[86] 郭建英, 孙永全, 王铭义, 等. 故障分类时环境强化试验的可靠度近似置信限 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2648– 2653.

[87] JIN Tongdan, DENG Yi. Lifecycle Based Reliability Growth Management for Electric Design [J]. Proc. of IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology, 2010, 512– 517

[88] SAITTA S, RAPHAEL B, SMITH F C. Data Mining Techniques for Improving the Reliability of System Identification [J]. Advanced Engineering Informatics: Computing in Civil Engineering, 2005, 19(4): 289– 298

[89] KARACALSYU X D. Data Stream Mining for Machine Reliability [C]. //Proceeding of 2006 IEEE Annual Conference and Exposition, Orlando, FL, United States, May, 2006

[90] FANG X F, ZHAO L C, SU S J. Studying on the Life Cycle Information Share and Discovery for Complicated Products Based on Data Mining and Data Grid Technology [J]. Materials Science Forum, 2007, 532– 533, 1120– 1123.

[91] GORODETSKI VLADIMIR I, POPYACCK LEONARD J. Data Mining Technology for Failure Prognostic of Avionics [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 388– 403.

[92] BOSE R P J C, SRINIVASAN S H. Data Mining Approaches to Software Fault Diagnosis [C]. //15th International Workshop on Research Issues in Data Engineering: Stream Data Mining and Applications, 2005: 45– 52

(编辑: 王 萍)