

基于信息融合的系统可靠性优化 试验设计模型

张安扬, 刘琦

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 分析了现今可靠性试验设计的不足,考虑两类风险(弃真风险、采伪风险)建立了基于信息融合的可靠性优化试验设计模型(ORTIF, optimization reliability test design modeling based on information fusion). 分析了可靠性试验设计的需求、约束条件,基于子系统和系统验前分布是 Beta 分布,提出了可靠性系统中子系统层与系统层之间的信息融合技术. 根据验后风险准则,给出弃真和采伪风险的定义. 基于 Matlab 软件给出了最优试验方案数值计算的求解步骤. 最后以液态火箭发动机为例,求解出满足约束条件的最优试验方案为(9,5,10,6,1),对应的最小试验费用为 3326.9,并得出权值方案对试验方案的确定影响较大的结论.

关 键 词: 可靠性试验设计; 信息融合; Bayes 方法; 验后风险准则; 风险计算
中图分类号: V231.9; TP114 **文献标志码:** A

Optimization reliability test design modeling based on information fusion

ZHANG An-yang, LIU Qi

(College of Information System and Management,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The current lack of reliability test design was analyzed by considering two types of risk (producer's risk and consumer's risk), and the optimization reliability test design modeling based on information fusion (ORTIF) was constructed. Also, the requirements and constraint conditions of reliability test design were analyzed, the information fusion technology between subsystems and systems was presented on the basis that the prior distributions were Beta distribution. According to posteriori risk criteria, the definition of producer's risk and consumer's risk were given. The solution steps of optimum test plan were given by Matlab software. At last, an example of liquid rocket engine was given. The optimum test plan (9, 5, 10, 6, 1) and its cost of 3326.9 were obtained respectively, and it was also concluded that the weight plan has a great influence on the optimum test plan.

Key words: reliability test design; information fusion; Bayes method; posteriori risk criteria; risk calculation

随着系统复杂化与集成化的发展,系统试验周期越来越长,尤其是对军事装备而言.复杂装备系统试验可提供的现场试验样本量越来越小,甚至出现极小子样的情况(如神舟飞船的交会对接试验).相对于系统层试验数据少的不足,子系统存在着大量的相关的试验数据,如子系统试验数

据、仿真试验数据等。并且,子系统的试验相对容易进行,而且试验的费用需求少,在试验中存在的风险小。此时,如何利用合理方法,对系统的试验进行规划,对试验数据进行融合分析,从而弥补系统层试验数据少的不足,是进行系统优化试验设计的一个可行的研究方向。

从国内外研究现状来看,仅利用研究对象为系统层的试验信息的可靠性验证试验设计方法已经非常成熟。在 Bayes 模型方面,丁贝^[1]引入 Bayes 方法对雷达系统进行可靠性分析,建立了雷达系统可靠性评估模型;冯文哲等^[2]在考虑试验费用损失的条件下,对成败型产品可靠性验证试验设计的方法进行了研究,构建了试验损失模型;尹宗润等^[3]采用 Bayes 方法建立了单元级可靠性模型,再用 GO(graph-oriented)方法综合单元级可靠性行参数获得系统可靠性模型;刘解放等^[4]根据 Laplace 检验,基于 DGM(1,1)(discrete grey forecasting model)提出一种可靠性增长的 Bayes 评定模型;邢云燕等^[5]利用离散 AMSAA (army material systems analysis activity)可靠性增长模型对产品可靠性的变化规律进行描述,提出了一种变总体 Bayes 序贯检验方法。在信息融合方面,胡俊梅等^[6]基于 ML-II (the second kind of the maximum likelihood)信息融合方法对先验分布进行融合;范英等^[7]引入支持向量机并结合 Bayes 方法,提出了一种新的信息融合思路;李豪亮等^[8]给出一种基于 D-S(Dempster-Shafer)证据理论的多源总体验前分布的融合方法,并通过实例说明了该方法在 Bayes 先验信息融合中的应用;冯静等^[9]引入模糊逻辑算子这一非线性模型对多源可靠性验前信息进行融合,并给出了其参数估计得第 2 类极大似然估计方法。

从国内外现有的研究情况看,虽然对于系统的可靠性验证试验设计已进行了大量的研究,出现了大量的研究成果。然而,随着系统复杂化、体系化的发展,现有的试验设计方法仅考虑了两类风险要求^[10-11],并没有考虑验前信息和总试验费用,从而使得仅使用现场试验信息进行决策,这就需要较大的试验样本量、花费较长的试验时间和较多的试验费用。在可靠性试验设计与分析中, Bayes 方法已被证明是一种经济、有效的方法^[12],但当前的可靠性验证试验设计方法并没有综合考虑子系统和系统的试验费用,没有对系统、子系统的试验进行总体规划。

本文正是基于上述问题,以成败型系统(试验

中只有成功或者失败两种可能的系统)为例,对基于信息融合的可靠性优化试验设计进行研究,综合考虑弃真和采伪风险以及总体试验费用,建立了基于信息融合的可靠性优化试验设计模型(ORTIF, optimization reliability test design modeling based on information fusion),并通过示例分析说明了该模型的有效性。

1 基本假设

为了更好地建立模型,在以下 5 个方面对模型作出假设。

1) 模型假设

系统由 m 个子系统构成,各子系统的可靠性分别为 $R_1, R_2, \dots, R_m$, 系统的可靠性为 R_{m+1} , 其中 $R_1, R_2, \dots, R_m, R_{m+1}$ 未知。在本文中下标为 $m+1$ 的变量都是针对系统而言的。

系统的可靠性结构函数为

$$R_{m+1} = g(R_1, R_2, \dots, R_m) \tag{1}$$

对于给定的系统,可靠性结构函数(式(1))通常是已知的。如串联系统的可靠性结构函数为

$$R_{m+1} = R_1 R_2 \cdots R_m \tag{2}$$

并联系统的可靠性结构函数为

$$R_{m+1} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \cdots (1 - R_m) \tag{3}$$

2) 验前信息假设

验前信息反映了试验之前对未知参数的认识,来源是多方面的。本文选用 Beta 分布作为子系统、系统的验前分布, Beta 分布具有两个参数 a_i 和 b_i , 均值和方差都可以用这两个参数表示。设各子系统的验前分布分别为 $\pi(R_1), \pi(R_2), \dots, \pi(R_m)$, 系统本身的验前分布为 $\pi^{(2)}(R_{m+1})$, 系统本身的验前分布是指由系统自身历史信息、仿真信息等验前信息得到的分布。

3) 费用假设

假设在可靠性试验中,子系统和系统的试验方案为 $(n_1, \dots, n_{m+1}, r_{m+1})$, 现场试验数据为 $(n_i, y_i) (i=1, \dots, m+1)$, 其中 n_i 为抽样试验的样本量, r_{m+1} 为系统在抽样试验中最大可接受失效次数, y_i 为子系统或系统在抽样试验中实际失效数。考虑试验样本量带来的试验费用,本文构建如下形式的试验费用函数:

$$\begin{aligned} f(n_1, \dots, n_{m+1}) = & C_0 + C_1 \cdot n_1 + \cdots + \\ & C_{m+1} \cdot n_{m+1} + C_a \cdot \alpha(n_{m+1}, r_{m+1}) + \\ & C_\beta \cdot \beta(n_{m+1}, r_{m+1}) \end{aligned} \tag{4}$$

式中 $f(n_1, \dots, n_{m+1})$ 表示系统以及子系统试验方

案所造成的总体费用,包括试验初始费用和抽样试验费用; C_0 表示试验的初始费用; $C_i(i=1,\cdots,m+1)$ 表示系统以及子系统的单位试验样本量所需要的费用; C_a 表示产生弃真风险从而造成的生产方损失; C_β 表示产生采伪风险从而造成的使用方损失; $\alpha(n_{m+1},r_{m+1})$ 表示以试验方案 (n_{m+1},r_{m+1}) 时系统的生产方风险; $\beta(n_{m+1},r_{m+1})$ 表示以试验方案 (n_{m+1},r_{m+1}) 时系统的使用方风险。

在本文研究中,系统以及子系统的单位试验样本量的费用是固定值,即试验费用与试验样本量是线性关系。

4) 可靠性参数检验假设

在装备可靠性分析中,生产方和使用方关注的是系统的可靠性是否达到研制合同要求.记 R_0 为合同给定的可靠性的期望值, R_a 为合同规定的可靠性的最低可接受值, $R_0 \geq R_a$.对系统可靠性的假设检验为

$$H_0: R_{m+1} \geq R_0, \quad H_1: R_{m+1} < R_a \quad (5)$$

5) 风险假设

$$\alpha(n_{m+1},r_{m+1}) = \frac{\int_{\Theta_0} P(y_{m+1} > r_{m+1} | R_{m+1}) \pi(R_{m+1} | a_{m+1}, b_{m+1}) dR_{m+1}}{\int_{\Theta} P(y_{m+1} > r_{m+1} | R_{m+1}) \pi(R_{m+1} | a_{m+1}, b_{m+1}) dR_{m+1}} \quad (6)$$

$$\beta(n_{m+1},r_{m+1}) = \frac{\int_{\Theta_1} P(y_{m+1} \leq r_{m+1} | R_{m+1}) \pi(R_{m+1} | a_{m+1}, b_{m+1}) dR_{m+1}}{\int_{\Theta} P(y_{m+1} \leq r_{m+1} | R_{m+1}) \pi(R_{m+1} | a_{m+1}, b_{m+1}) dR_{m+1}} \quad (7)$$

其中 Θ_0 表示可靠性参数 R_{m+1} 满足要求时的取值范围, Θ_1 表示可靠性参数 R_{m+1} 不满足要求时的取值范围, $\Theta_0 \cup \Theta_1 = \Theta$.

2 信息融合技术

对于系统信息融合类型包括两类:一类是子系统信息向系统信息的融合,另一类是同一层次内部(如子系统层和系统层)验前信息和现场信息的融合.下面分别给出这两类信息融合的研究方案.

1) 子系统层向系统层的信息融合

串联结构和并联结构是最基本也是最常见的系统结构,下面主要以串联和并联为例来探讨第1类信息融合问题.

对于服从Beta分布的随机变量 X 和 Y ,陈伟志等^[14]通过数值计算以及计算机拟合方法证明了两个参数区间相同的独立Beta分布随机变量的乘积仍然服从Beta分布,即 XY 也服从Beta分布,并运用统计检验等方法检验了该结论的正

根据抽样检验的结果对系统的可靠性进行统计验证,必然存在两类风险:弃真风险(producer's risk)和采伪风险(consumer's risk).

决策准则可分为经典风险准则、平均风险准则和验后风险准则.验后风险准确地定义了试验者的需求:若试验通过,使用方要求得到拒绝原假设的最大可接受概率 β ,即采伪风险;若试验未通过,生产方要求得到接受原假设的最大可接受概率 α ,即弃真风险.在一定程度上验后风险准则是完全Bayes的,是对参数的主观概率的说明^[13].本文采用的决策准则是验后风险准则.在验后风险准则下,弃真风险的定义为:在拒绝原假设的条件下,系统可靠性参数的验后分布满足要求的概率;采伪风险的定义为:在接受原假设的条件下,系统可靠性参数的验后分布不满足要求的概率.

根据基本假设,可以推出系统可靠性抽样检验基于验后风险准则的弃真风险和采伪风险分别为

确性.

利用上述结论,由式(2)和式(3)可知,对于子系统可靠性服从Beta分布的串联系统和并联系统,其系统可靠性也服从Beta分布.

本文通过计算机模拟的方法求解系统可靠性分布的参数.具体方法:对所有已知分布的子系统,随机产生10000组Beta分布随机数,计算对应的10000个乘积数据,利用Beta分布均值公式和方差公式可得系统Beta分布的两个参数.由此便得到系统的一个验前分布 $\pi^{(1)}(R_{m+1})$.

2) 同一层次的验前信息融合

子系统层验前信息的融合过程主要依据Bayes公式($i=1,\cdots,m$)

$$\pi[R_i | (n_i, y_i)] = \frac{\pi(R_i | a_i, b_i) L(R_i | n_i, y_i)}{\int_{\Theta} \pi(R_i | a_i, b_i) L(R_i | n_i, y_i) dR_i} \quad (8)$$

其中 $\pi(R_i | a_i, b_i)$ 是子系统可靠性参数 R_i 的验前分布, $L(R_i | n_i, y_i)$ 是现场试验数据得到的似然函

数, $\pi(R_i | (n_i, y_i))$ 是验后分布. 再根据 1) 的融合方法得到系统其一验前分布 $\pi^{(1)}(R_{m+1})$.

系统层可靠性参数的信息主要来源于两个方面, 一是由子系统信息融合得到的系统可靠性参数的验前分布, 一是由系统本身的历史试验数据、仿真数据等得出的可靠性参数的验前分布. 对这两种信息的融合可采用 Bayes 方法中基于加权融合的验前分布融合方法, 得到系统可靠性参数的验前分布 $\pi(R_{m+1})$, 表达式如下:

$$\pi(R_{m+1}) = W_1 \cdot \pi^{(1)}(R_{m+1}) + W_2 \cdot \pi^{(2)}(R_{m+1}) \tag{9}$$

式中 $\pi^{(1)}(R_{m+1})$ 表示由子系统信息融合得到的系统可靠性参数的验前分布; $\pi^{(2)}(R_{m+1})$ 表示由系统本身的历史试验数据、仿真数据等得出的可靠

性参数的验前分布; W_1 表示 $\pi^{(1)}(R_{m+1})$ 的权值; W_2 表示 $\pi^{(2)}(R_{m+1})$ 的权值.

权值的确定需要通过对验前分布的来源、验前分布的准确性等因素的分析^[15-18], 本文不作重点研究.

得到系统验前分布 $\pi(R_{m+1})$ 后, 类似于式 (8), 系统的验后分布的表达式为

$$\pi(R_{m+1} | (n_{m+1}, y_{m+1})) = \frac{\pi(R_{m+1})L(R_{m+1} | n_{m+1}, y_{m+1})}{\int_{\Theta} \pi(R_{m+1})L(R_{m+1} | n_{m+1}, y_{m+1})dR_{m+1}} \tag{10}$$

3 ORTIF 模型的建立与求解

基于信息融合技术和费用假设, 以总体费用最小为目标, 建立 ORTIF

$$\min[f(n_1, \dots, n_{m+1})] = \min[C_0 + C_1 \cdot n_1 + \dots + C_{m+1} \cdot n_{m+1} + C_a \cdot \alpha(n_{m+1}, r_{m+1}) + C_\beta \cdot \beta(n_{m+1}, r_{m+1})] \tag{11}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \alpha_0 \geq \alpha(n_{m+1}, r_{m+1}), \beta_0 \geq \beta(n_{m+1}, r_{m+1}) \\ C_i > 0, i = 0, 1, \dots, m+1, \alpha, \beta \\ L_i \leq n_i \leq U_i, i = 1, \dots, m+1 \\ 0 \leq r_{m+1} \leq r_{\max} \end{cases} \tag{12}$$

上述费用模型中, 约束条件 $\alpha_0 \geq \alpha(n_{m+1}, r_{m+1}), \beta_0 \geq \beta(n_{m+1}, r_{m+1})$ 表示系统试验方案带来的风险必须满足合同给定的两类风险的上限要求; L_i 表示对子系统和系统的每次试验为了确保将来产品可以安全、可靠地运行, 而需要的最小试验样本量; U_i 表示由于资源、经费等限制, 对子系统和系统的每次试验可承受的最大试验样本量; $r_{\max}$ 表示最大可接受的 r_{m+1} 值. 下面探讨如何求解 ORTIF.

目前多数系统、子系统的可靠性较高, 在现试验中出现失效的情况较少, 因此为了减少求解变量的个数, 对失效次数 $y_i (i = 1, \dots, m+1)$ 进行限制, 分别取典型的 0 和 1 进行研究, 即对系统、子系统分为在试验中不允许失效和仅出现一次失效的情况进行研究. 根据风险假设, 将 $r_{m+1} = 0$ 和 $r_{m+1} = 1$ 代入式 (6) 和式 (7) 可得两类风险的具体算式. 下面给出 $r_{\max} = 1$ 情况下的两类风险的表达式:

$$\alpha(n_{m+1}, 1) = \frac{\int_{R_0}^1 \sum_{y_{m+1}=2}^{n_{m+1}} \binom{n_{m+1}}{y_{m+1}} (1 - R_{m+1})^{y_{m+1} + b_{m+1} - 1} R_{m+1}^{a_{m+1} + n_{m+1} - y_{m+1} - 1} dR_{m+1}}{\int_0^1 \sum_{y_{m+1}=2}^{n_{m+1}} \binom{n_{m+1}}{y_{m+1}} (1 - R_{m+1})^{y_{m+1} + b_{m+1} - 1} R_{m+1}^{a_{m+1} + n_{m+1} - y_{m+1} - 1} dR_{m+1}} \tag{13}$$

$$\beta(n_{m+1}, 1) = \frac{\int_0^{R_a} \sum_{y_{m+1}=0}^1 \binom{n_{m+1}}{y_{m+1}} (1 - R_{m+1})^{y_{m+1} + b_{m+1} - 1} R_{m+1}^{a_{m+1} + n_{m+1} - y_{m+1} - 1} dR_{m+1}}{\int_0^1 \sum_{y_{m+1}=0}^1 \binom{n_{m+1}}{y_{m+1}} (1 - R_{m+1})^{y_{m+1} + b_{m+1} - 1} R_{m+1}^{a_{m+1} + n_{m+1} - y_{m+1} - 1} dR_{m+1}} \tag{14}$$

由于 Bayes 方法引入验前分布, 对 $\alpha(n_{m+1}, r_{m+1}), \beta(n_{m+1}, r_{m+1})$ 的计算涉及积分运算, 难以用解析方法进行, 但 Matlab 软件具备强大的计算功

能, 能进行复杂的积分运算. 因此, 在试验样本量不大的条件下, 可采用 Matlab 软件进行枚举计算. 算法流程图如图 1 所示.

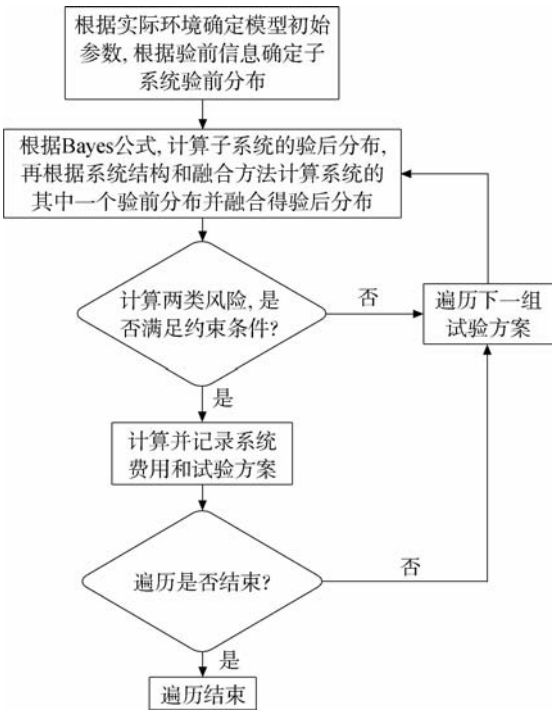


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow diagram

4 示例分析

例 1 某型液态火箭发动机的系统结构如图 2 所示,液体燃油和氧化剂一起输入燃烧室,在燃烧室迅速产生反应后经过推力喷管释放能量,该系统结构可以简化为如图 3 所示的逻辑结构框图.

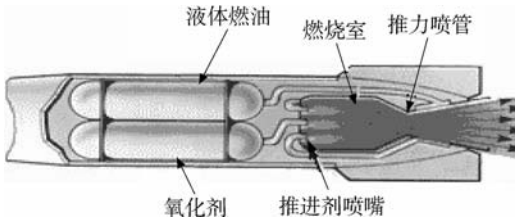


图 2 液态火箭发动机系统结构图

Fig. 2 Liquid rocket engine system structure diagram

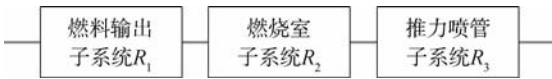


图 3 液态火箭发动机逻辑结构框图

Fig. 3 Liquid rocket engine logic structure diagram

经过对实际环境以及验前信息的分析,确定以下参数,如表 1 所示.

表 1 参数赋值说明
Table 1 Parameter value assignment

参数	数值
$\pi(R_1)$	$B(201,29)$
$\pi(R_2)$	$B(217,16)$
$\pi(R_3)$	$B(248,22)$
$\pi^{(2)}(R_4)$	$B(186,68)$
(R_0,R_a)	$(0.90,0.70)$
(α_0,β_0)	$(0.05,0.05)$
(W_1,W_2)	$(0.5,0.5)$
(C_0,C_1,C_2,C_3,C_4)	$(0,100,25,40,120)$
(C_a,C_β)	$(10\,000,100\,000)$
(L_1,L_2,L_3,L_4)	$(9,3,7,2)$
(U_1,U_2,U_3,U_4)	$(30,30,30,7)$

根据第 3 节的算法流程,部分计算结果如表 2 所示.

表 2 部分计算结果
Table 2 Parts of the calculation results

(n_1,n_2,n_3,n_4,r_4)	$\alpha/10^{-27}$	β	f
(9,5,9,6,1)	15.4	0.013 2	3 426.5
(9,5,9,7,1)	29.5	0.014 1	3 633.5
(9,5,10,2,1)	1.17	0.020 9	3 750.3
(9,5,10,3,1)	7.16	0.020 9	3 879.4
(9,5,10,4,1)	1.83	0.017 8	3 688.5
(9,5,10,5,1)	6.43	0.015 6	3 587.3
(9,5,10,6,1)	3.50	0.011 8	3 326.9
(9,5,10,7,1)	4.38	0.012 3	3 490.4
(9,5,11,2,1)	5.59	0.019 7	3 677.8
(9,5,11,3,1)	5.10	0.017 4	3 560.3

按遍历顺序画出部分满足约束条件的试验方案对应的试验总费用变化图,如图 4.

从 Matlab 的计算结果可得最优的试验方案为(9,5,10,6,1),试验费用为 3 326.9. 不同的系数取值得出的试验方案结果肯定是不同的,这就要求在做系统的可靠性试验设计时根据现场环境以及待试装备的实际情况,慎重地选择系数方案,从而得到满足合同要求的最优试验方案. 下面通过改变权值 W_1,W_2 (其他参数不变),研究该型液态火箭发动机总体试验费用与两类验前信息的

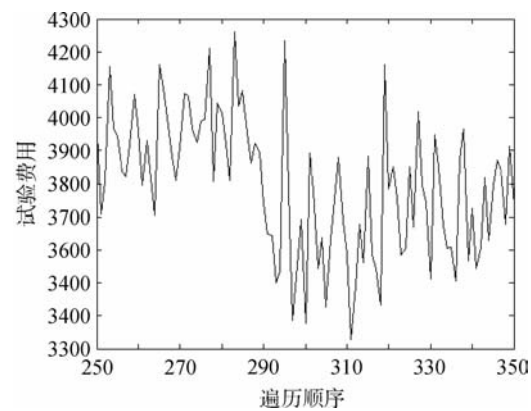


图 4 试验总费用变化图

Fig. 4 Variation diagram of the test of the total cost

关系。

1) 权值方案 1: $W_1=0.2, W_2=0.8$ 。

2) 权值方案 2: $W_1=0.8, W_2=0.2$ 。

由第 3 节的算法流程可得如表 3 结果。

表 3 不同权值方案的最优试验方案

Table 3 Optimal test plan in different weighting plans

(W_1, W_2)	试验费用最小值	最优试验方案
(0.2, 0.8)	5824.2	(9, 17, 7, 7, 1)
(0.8, 0.2)	3268.7	(9, 12, 7, 7, 1)

与例 1 中 $W_1=0.5, W_2=0.5$ 的结果相比较可见,不同的权值方案对应的最优试验方案是不同的,总体试验费用也不一样.这就要求在进行可靠性试验前要根据实际情况慎重选择权值方案.当选择 $W_1>W_2$ 时,说明试验者更看重由子系统得到系统验前信息;当选择 $W_1<W_2$ 时,说明试验者更看重系统自身的验前信息;当选择 W_1 与 W_2 近似相等时,说明两类系统验前信息对于试验者来说近乎同等重要。

5 结 论

本文依据 Bayes 理论,在两类风险的约束下,对基于信息融合的系统可靠性试验设计技术进行了研究,考虑样本量带来的试验成本,建立了 ORTIF;对于给定的系统结构,根据 Bayes 理论和数理统计知识,给出了两类信息融合的计算方法;根据验后风险准则和抽样检验理论,推导出了试验方案对应的两类风险的计算方法,并且运用 Matlab 软件进行了算法实现;最后用示例展现求解过程,并进行了分析,说明这种方法可以很好地解决基于信息融合的可靠性试验设计问题;并通过改变权值对比试验结果,分析了系统试验结果

与权值的关系。

1) 对于更看重(或更相信)系统层自身验前信息的可靠性优化试验,应选择 $W_1<W_2$ 的权值方案。

2) 对于更看重(或更相信)子系统层试验信息的可靠性优化试验,应选择 $W_1>W_2$ 的权值方案。

3) 对于子系统层和系统层信息同等重要的可靠性优化试验,应选择 $W_1\approx W_2$ 的权值方案。

从分析的过程来看,ORTIF 能在给定的系统结构和约束条件下,计算得出使得系统试验费用最小的最优可靠性验证试验设计方案,这对较为复杂的、又不易做试验的系统要求降低风险、减少试验费用具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

参考文献:

[1] 丁贝. 基于 Bayes 方法的雷达系统可靠性评估[J]. 机械管理开发, 2013, 20(3): 77-78.

DING Bei. Reliability evaluation of rader system based on Bayes method[J]. Mechanical Management and Development, 2013, 20(3): 77-78. (in Chinese)

[2] 冯文哲, 刘琦. 成败型产品的 Bayes 可靠性验证试验设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 110-117.

FENG Wenzhe, LIU Qi. Bayesian reliability demonstration test design for binomial distributed product[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 110-117. (in Chinese)

[3] 尹宗润, 李俊山, 苏东, 等. 基于 Bayes-GO 的复杂系统可靠性评估模型[J]. 计算机工程, 2013, 39(11): 276-279.

YIN Zongrun, LI Junshan, SU Dong, et al. Reliability assessment model of complex system based on Bayes-GO [J]. Computer Engineering, 2013, 39 (11): 276-279. (in Chinese)

[4] 刘解放, 刘思峰, 方志耕. 基于 DGM(1,1) 的成败型系统可靠性增长 Bayes 评价模型[J]. 中国机械工程, 2014, 25 (8): 1092-1095.

LIU Jiefang, LIU Sifeng, FANG Zhigeng. Reliability growth evaluation model of binomial system based on DGM(1,1)[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25 (8): 1092-1095. (in Chinese)

[5] 邢云燕, 武小悦. 可靠性增长下的 Bayes 序贯检验方法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2201-2205.

XING Yunyan, WU Xiaoyue. Bayesian sequential testing in reliability growth case[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2201-2205. (in Chinese)

[6] 胡俊梅, 师义民. 多源验前信息下 k/N(G) 系统可靠性指标的 Bayes 估计[J]. 科技通报, 2013, 29(1): 5-8.

HU Junmei, SHI Yimin. Bayes reliability assessment for k/N(G) system in multi-sources of prior information[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(1): 5-8. (in

Chinese)

[7] 范英,田志成. 基于 Bayes 方法的小子样可靠性分析[J]. 机械强度,2012,34(2):274-277.

FAN Ying,TIAN Zhicheng. Reliability analysis onsmall sample based on Bayes[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012,34(2):274-277. (in Chinese)

[8] 李豪亮,师义民,陈华. 基于 D-S 证据理论的 Bayes 信息融合[J]. 模糊系统与数学,2009,23(1):46-51.

LI Haoliang,SHI Yimin,CHEN Hua. Fusion of information of Bayes Based on D-S evidence theory[J]. Fuzzy Systems and Mathematics,2009,23(1):46-51. (in Chinese)

[9] 冯静,周经伦. 基于 Bayes 模糊逻辑算子的小子样可靠性信息融合方法[J]. 航空动力学报,2008,23(9):1633-1636.

FENG Jing,ZHOU Jinglun. Small-sample reliability information fusion approach based on Bayes-fuzzy logistic operator[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(9):1633-1636. (in Chinese)

[10] Dekking F M,Kraaikamp C,Lopuhhaa H P,et al. A modern introduction to probability and statistics: understanding why and how[M]. London:Springer London,2005.

[11] Koch K R. Introduction to Bayesian statistics[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

[12] 郭波,武小悦. 系统可靠性分析[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,2002.

[13] Hamada S M,Alyson G W,Shane R C. Bayesian reliability [M]. New York:Springer,2008.

[14] 陈伟志,米顺强,魏振军. 一种判定两个随机变量的乘积(和)服从何种分布的方法[R]. 郑州:中国现场统计研究会,2003.

[15] 武小悦,刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[16] 刘琦,冯静,周经伦. 基于专家信息的先验分布融合方法[J]. 中国空间科学技术,2004,24(3):68-71.

LIU Qi,FENG Jing,ZHOU Jinglun. The fusion method for prior distribution based on expert's information[J]. Chinese Space Science and Technology,2004,24(3):68-71. (in Chinese)

[17] 吴琳丽,潘光. 小子样复杂产品可靠性试验评定专家信息融合方法[J]. 机械与电子,2014(11):3-6.

WU Linli,PAN Guang. Fusion of expert information in reliability test and evaluation of small sample complex products[J]. Machinery and Electronics,2014(11):3-6. (in Chinese)

[18] 杨军,于清津,秦润东,等. 可靠性试验评定中相关专家信息融合[J]. 航空计算技术,2008,38(5):37-40.

YANG Jun,YU Qingjin,QIN Rundong,et al. Aggregation of dependent expert opinions in reliability test and estimation[J]. Aeronautical Computing Technique,2008,38(5):37-40. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)