

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107963

## 雷达发射机测试性验证试验方案样本量优化\*

董正琼<sup>1</sup> 袁 顺<sup>1</sup> 刘 佳<sup>2</sup> 周向东<sup>1</sup> 聂 磊<sup>1</sup> 范宜艳<sup>1</sup>

(1.湖北工业大学湖北省现代制造质量工程重点实验室 武汉 430068; 2.91776部队 北京 100841)

**摘要:** 随着装备系统测试性验证的开展,雷达发射机系统中存在着故障样本数量庞大、试验周期长、试验成本高的问题,提出一种基于改进信息熵和 Bayes 后验风险准则的方法,对故障样本量进行优化。首先以雷达发射机系统子部件的虚拟试验数据为基础,采用改进信息熵的方法,通过折合系统子部件的虚拟先验信息,得到其系统级试验数据,确定先验分布;再通过 Bayes 后验风险准则方法,确定试验样本总量与最大允许失败次数,即确定试验方案。以雷达发射机系统的故障检测率为例,在保证双方指标要求的前提下,采用所提方法获得的测试性试验故障样本量为 165,与经典抽样和序贯概率比检验方法相比,故障样本量分别减少了 64.97% 和 51.18%,在一定程度上验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 测试性验证;故障样本量;改进信息熵;Bayes 后验风险准则;试验方案

**中图分类号:** TN955;TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Sample size optimization of test scheme in radar transmitter  
testability verificationDong Zhengqiong<sup>1</sup> Yuan Shun<sup>1</sup> Liu Jia<sup>2</sup> Zhou Xiangdong<sup>1</sup> Nie Lei<sup>1</sup> Fan Yiyan<sup>1</sup>(1. Hubei Key Laboratory of Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;  
2. Unit 91776, Beijing 100841, China)

**Abstract:** With the development of the testing verification of the equipment system, there are a huge number of fault samples, long test cycle and high cost in the radar transmitter system. A method based on improving the information entropy and Bayes posterior risk criterion is proposed to optimize the fault sample size. Based on the virtual test data of radar transmitter subsystem, using the method of improving information entropy, obtain the system-level test data by converting the system subsystem, and then determine the total test samples and the maximum number of failures, which determine the test scheme. Taking the fault detection rate of the radar transmitter system, the test fault sample size of the proposed method is 165, reducing the fault sample size by 64.97% and 51.18% compared with the classical sampling and sequential probability ratio test methods, respectively, verifying the effectiveness of the proposed method to some extent.

**Keywords:** test verification; failure sample size; improve the information entropy; Bayes retest risk guidelines; testing program

## 0 引 言

随着雷达发射机装备的测试性工作开展,其测试性验证工作对于保证和检验雷达发射机装备的测试性水平有着重要的意义<sup>[1-4]</sup>。测试性验证是将故障注入雷达发射机设备后,按照测试性设计中规定的方法对故障进行检测和隔离,并根据检测结果对发射机系统的测试性水平进行评估,判断是否满足规定的要求,决定是否接受或拒绝<sup>[5-6]</sup>。其

中,故障样本量的确定成为雷达发射机测试性验证工作中需要重点解决的首要环节。试验数量的多少直接关系到试验验证工作的效率,以及试验结果的精确度,是测试性验证试验设计的重要要素<sup>[7]</sup>。试验方案中的故障样本量确定,即在承制方与订购方要求值、以及双方风险的约束下,能够找出试验次数和其允许产生的最大失败次数的组合<sup>[8]</sup>。

目前,在测试性验证领域中,有许多学者研究了确定故障样本量大小的方法。例如,杨金鹏等<sup>[9]</sup>提出了一种基于

收稿日期:2021-09-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(51975191)、现代制造工程湖北省重点实验室开放基金(KFJJ-2020004,KFJJ-2020012)项目资助

双方风险值的故障样本量确定方法,该方法的特点是风险值较低时,对应的故障样本量通常很大。胡宏昌等<sup>[10]</sup>给出了一种基于序贯概率比检验(sequential probability ratio test, SPRT)的平均样本容量计算方法,比固定样本容量的最优检验所得样本量少35%~50%,但是该方法具有不稳定性,使得实际试验次数在某些情况下会超过单次抽样试验方案的样本量。文献[11-12]提出了基于先验信息的Bayes理论试验方案,通过融合不同来源的先验信息,生成试验方案,这种方法过于依赖验前信息,会使测试性指标的可信度不高。文献[13-15]是基于分系统先验信息确定故障样本量的方法,通过分系统试验数据计算系统先验信息,求取故障检测率(fault detection rate, FDR)先验分布参数,该方法仅仅分析了分系统级信息,但是对系统级先验信息的利用不足。

鉴于此,本文针对雷达发射机测试性验证系统提出一种基于改进信息熵和Bayes后验风险准则的故障样本量优化方法。对雷达发射机设备测试性验证中故障样本量的确定进行了分析与研究,为使系统级数据可信度更高,增加了标准化系数,并计算了子部件虚拟测试信息的可信度,再采用Bayes后验风险准则的方法,计算故障样本量和试验失败数,从而确定雷达发射机系统测试性验证的测试方案。

## 1 经典抽样模型

采用统计试验方法验证产品的FDR,要有足够的故障样本量。对于注入的故障,系统能够检测到或者检测失败。FDR为成功或失败的概率,试验方法有如下3种:成败型试验法、最低可接受值试验法和成败型截尾序贯法<sup>[16-17]</sup>。考虑双方风险值的成败型试验法是二项分布中经典的抽样检验法。

典型的检验方案<sup>[18]</sup>为:对于雷达发射机装备系统,进行随机的抽取 $n$ 个故障样本进行试验,其中 $c$ 为允许的最大故障检测失败次数。假设雷达发射机系统的FDR为 $p$ ,在 $n$ 次故障检测试验中,出现 $f$ 次检测失败的概率:

$$P(n, f | p) = C_n^f (1-p)^f p^{n-f} \quad (1)$$

雷达发射机被接受的概率为 $f$ 不大于 $c$ 的概率,也即是 $f$ 为 $1, 2, 3, \dots, c$ 的概率总和,抽样函数为:

$$L(n, f | p) = P(f \leq c) = \sum_{d=0}^c (1-p)^d p^{n-d} \quad (2)$$

在进行验证试验期间<sup>[19]</sup>,双方要求规定FDR的设计要求值 $p_0$ (规定值)和最低接收值 $p_1$ (极限值)且满足 $p_0 > p_1$ 。低于 $p_1$ 的系统不接收,当 $p = p_1$ 时,测试系统被使用方接收的概率称作“使用方风险”记 $\beta$ ,对应的 $L(n, c | p_1) = \beta$ ,在 $p = p_0$ 的情况下,被拒收的概率称作承制方风险,通常记为 $\alpha$ ,对应的 $L(n, c | p_0) = 1 - \alpha$ ,即大概率接收。一般的, $\alpha = \beta$ 在试验初期由使用方和承制方面而定。

当 $p_0, p_1$ 以及 $\alpha, \beta$ 确定以后,通过式(3)对计算 $n$ 和 $c$ 的值,也就是测试性验证试验方案 $(n, c)$ 。

$$\begin{cases} 1 - \sum_{d=0}^c C_n^d (1-p_0)^d p_0^{n-d} \leq \alpha \\ \sum_{d=0}^c C_n^d (1-p_1)^d p_1^{n-d} \leq \beta \end{cases} \quad (3)$$

对于雷达发射机等一些大型的设备系统,由于双方的要求值较高,即 $p_0$ 和 $p_1$ ,且所需风险较小,通过式(3)计算的试验样本数量较大。例如规定 $p_0 = 0.98, p_1 = 0.96, \alpha = \beta = 0.1$ ,通过传统的方法确定的试验方案为(471, 13),将471个失效样本注入雷达发射机设备中进行测试,若故障检测失败次数 $f \leq 13$ ,则装备的FDR指标合格,予以接受,否则拒收。

实际应用中这样的试验方案对雷达发射机装备是很难实现的。如果降低试验方案到(200, 8),则会使承制方风险增加到59.3%,不接受。所以,测试性试验方案亟待解决的问题是,通过对测试方案的优化,有效地减少试验样本数量,降低双方风险值。

## 2 改进信息熵的先验数据分析

### 2.1 信息熵

假如某个信息源为离散型的信息源,它所对应产生的信号为 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,对应概率为 $\{P(c_1), P(c_2), \dots, P(c_n)\}$ ,当函数以10为底的时候, $c_i$ 相对应的自信息量为 $I(c_i) = -\ln P(c_i)$ , $I(c_i)$ 是随机变量,不可以作为信息测度,信息源的平均自信息量叫做信息熵<sup>[20]</sup>,由式(4)的数学期望获得。

$$H = E(I(c_i)) = E[-\ln P(c_i)] = -\sum_{i=1}^n P(c_i) \ln P(c_i) \quad (4)$$

### 2.2 基于改进信息熵的先验数据融合

在雷达发射机系统中,每个子部件的试验结果都是独立分布的。雷达发射机装备系统是由 $m$ 个子部件组成,通过信息熵理论可知,系统中每个子部件可以看成一个信息源。第 $i$ 个子部件的试验次数和失败次数分别为 $n_i$ 和 $f_i$ ,在其中一次试验中成功概率为 $p_i$ ,失败为 $1 - p_i$ <sup>[21]</sup>。

即由信息熵可知,第 $i$ 个系统的子部件在一次的测试性验证试验中的平均信息量为 $H_i$ ,在 $n_i$ 次试验中的总信息量为 $n_i H_i$ ,则系统总信息量 $I$ 为 $m$ 个子部件各自的信息量相加的值。

$$H_i = -k [p_i \ln p_i + (1-p_i) \ln(1-p_i)] \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (6)$$

其中, $k$ 为标准化系数, $k > 0$ 。

$$I = \sum_{i=1}^m n_i H_i \quad (7)$$

直接运用装备系统测试性虚拟试验数据,会影响测试性验证试验的可信度,在将虚拟试验数据折合成实物试验数据时,必须考虑其是否可信。在经过一系列等效折合后,

测试的试验次数和失败次数为  $n$  和  $f$ , 其中成功概率  $p$ , 失败概率  $1-p$ , 系统试验过程中的信息量为  $I_1$ , 根据信息量等效原则,  $I = I_1$ 。

$$I_1 = -n[p \ln p + (1-p) \ln(1-p)] \quad (8)$$

即:

$$\sum_{i=1}^m n_i H_i = -n[p \ln p + (1-p) \ln(1-p)] \quad (9)$$

对于折合前后的成功概率取极大似然数, 即  $p_i = \hat{p}_i = (n_i - f_i) \div n_i$ , 对于系统装备, 取  $p = \hat{p} = (n - f) \div n$ , 对于得到的试验数据进行其可信度计算  $r_i$ , 再利用可信度加权, 经式(11)确定第  $i$  个子部件的权重为  $\omega_i$ , 再求取最大似然值  $\hat{p}_i$ , 经式(12)可以计算出系统的测试性指标  $p$ 。最终可得虚拟数据折合公式为:

$$r_i = 1 - H_i \quad (10)$$

$$\omega_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (11)$$

$$p = \sum_{i=1}^N \omega_i \hat{p}_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} n = \frac{\sum_{i=1}^m r_i [(n_i - f_i) \ln(n_i - f_i) + f_i \ln f_i - n_i \ln n_i]}{(\ln m) p \ln p + (1-p) \ln(1-p)} \\ f = n(1-p) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)确定试验次数和失败次数的组合  $(n, f)$ 。按照传统贝叶斯方法进行装备系统的验证试验方案设计, 求出其测试性指标  $p$  的先验分布  $\pi(p)$ 。

$$\pi(p) = \frac{\Gamma(n)}{\Gamma(n-f)\Gamma(f)} p^{n-f-1} (1-p)^{f-1} \quad (14)$$

### 3 基于 Bayes 后验风险准则的试验方案

#### 3.1 Bayes 后验风险准则的样本量确定

对于产品的抽样检验, 测试性检验的后验风险是双方都非常关注的问题。Bayes 后验风险准则的样本量确定方法与传统的双方风险方法不同, Bayes 后验风险准则的样本量确定方法如下。

1) 当产品测试性水平通过试验时, 保证失败次数不大于  $c$ , 测试性水平低于  $p_1$  的概率不超过  $\beta$ , 即后验使用方风险  $R_{PC}$ 。

2) 测试性水平未通过试验时, 失败次数大于  $c$ , 测试性水平高于  $p_0$  的概率不超过  $\alpha$ , 即后验承制方风险  $R_{PP}$ 。

$$R_{PP} = P(p \geq p_0 | \text{拒收}) = \int_{p_0}^1 P(p | f > c) dp = \frac{\int_{p_0}^1 (1-L(p))\pi(p) dp}{\int_0^1 (1-L(p))\pi(p) dp} = \frac{\int_{p_0}^1 (1 - \sum_{f=0}^c C_n^f (1-p)^f p^{n-f}) \pi(p) dp}{1 - \int_0^1 (\sum_{f=0}^c C_n^f (1-p)^f p^{n-f}) \pi(p) dp} \quad (15)$$

$$R_{PC} = P(p \leq p_1 | \text{接收}) = \int_0^{p_1} P(p | f \leq c) dp =$$

$$\frac{\int_0^{p_1} L(p)\pi(p) dp}{\int_0^1 L(p)\pi(p) dp} = \frac{\int_0^{p_1} (\sum_{f=0}^c C_n^f (1-p)^f p^{n-f}) \pi(p) dp}{\int_0^1 (\sum_{f=0}^c C_n^f (1-p)^f p^{n-f}) \pi(p) dp} \quad (16)$$

根据后验风险准则的试验方案  $(n, c) (0 \leq c \leq n)$  的约束条件为:

$$\begin{cases} R_{PP} \leq \alpha \\ R_{PC} \leq \beta \end{cases} \quad (17)$$

#### 3.2 试验方案基本流程

图 1 为基于 Bayes 后验风险准则方法的试验方案基本流程, 整个试验方案流程如下。

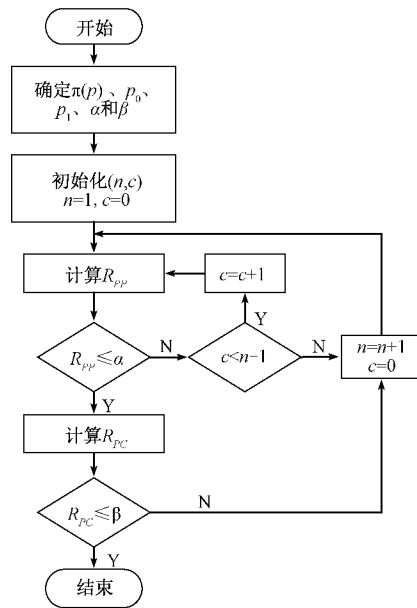


图 1 试验方案流程

1) 制定出承制方与使用方的约束参数、先验分布  $(\pi(p), p_0, p_1)$  以及  $\alpha$  和  $\beta$ 。

2) 其次进行初始化设置, 设  $n = 1, c = 0$ 。

3) 计算当前的后验承制方风险  $R_{PP}$ 。

4) 若满足  $R_{PP} \leq \alpha$ , 则计算当前的后验订购方风险  $R_{PC}$ , 若满足  $R_{PC} \leq \beta$ , 则满足双方风险的测试性指标评估要求, 即结束流程, 若  $R_{PC} > \beta$ , 则  $n = n + 1, c = 0$ , 继续计算  $R_{PP}$ 。

5) 当  $R_{PP} > \alpha$  时, 若  $c < n - 1$ , 则  $c = c + 1$ , 继续计算  $R_{PP}$ ; 否则  $n = n + 1, c = 0$ , 继续计算  $R_{PP}$ 。

### 4 实例分析

#### 4.1 雷达发射机实例验证

在雷达发射机系统测试中, 把 FDR 指标作为试验对象, 由使用方和承制方双方确定约束参数: 承制方和使用方规定值分别为  $p_0 = 0.98, p_1 = 0.96$ , 双方风险为  $\alpha = \beta =$

0.1, 经典抽样方法确定的试验方案为(471,13)。对发射机进行系统级 FDR 验证试验之前,每个子部件的虚拟试验数据可作为先验数据分析。再使用改进信息熵方法将子部件的虚拟试验数据折合为系统级试验数据,通过一系列约束参数,根据 Bayes 后验风险准则方法进行雷达发射机系统测试性验证试验方案的制定。

以某型雷达发射机系统的 FDR 指标为例,对上述分析的方法进行计算验证,某型雷达发射机系统结构如图 2 所示。其虚拟试验数据信息如表 1 所示。

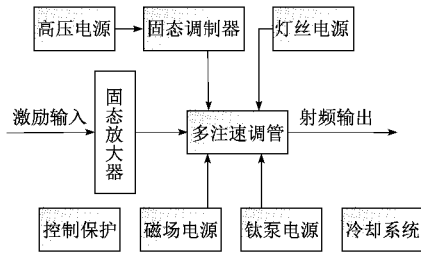


图 2 系统结构

表 1 某型雷达发射机装备系统子部件虚拟试验数据信息

子部件	故障注入数	检测失败数	数据可信度
高压电源	25	2	0.873
固态调制器	75	3	0.924
灯丝电源	27	2	0.880
固态放大器	85	5	0.898
多注速调管	120	9	0.879
控制保护	69	3	0.919
磁场电源	33	1	0.938
钛泵电源	19	1	0.906
冷却系统	56	2	0.930

将各子部件的虚拟试验数据代入式(5)、(6)和(10)可得各子部件的数据可信度。再经过改进信息熵方法的公式计算出信息融合后雷达发射机系统的 FDR 指标为 0.945 99, 试验数据为  $(n, f) = (208.493\ 898\ 3, 11.260\ 673\ 34)$ , 其先验分布为:

$$\pi(p) = \frac{\Gamma(208.493\ 898\ 3)}{\Gamma(197.233\ 224\ 9)\Gamma(11.260\ 673\ 34)} \times p^{196.233\ 224\ 9} (1-p)^{10.260\ 673\ 34} \quad (18)$$

经过计算式(18)可以得到的试验方案为(165,7),且满足双方风险的测试性指标评估。

#### 4.2 对比分析

从表 1 中可以看出,虚拟试验数据在一定程度上反映了雷达发射机系统的测试性指标水平,在虚拟试验数据可信度的基础上,对信息熵方法进行改进,使得折合后的试验数据具有较高的可信度,能更好地反映系统 FDR 的水平,可使数据更靠近测试性验证过程中的实际试验水平。图 3 为 3 种测试性验证试验方案的平均抽样次数图。

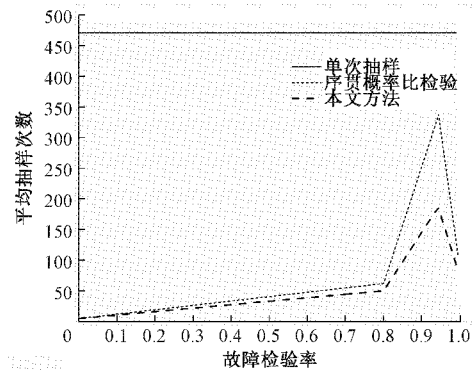


图 3 平均抽样次数图

经过计算,由表 2 可以看出,与经典抽样验证和 SPRT 方案相比,采用改进信息熵和 Bayes 后验风险准则的方案进行抽样的故障样本量分别减少了 64.97% 和 51.18%。在保证双方指标要求的前提下,本文所提方法能使系统级试验数据可信度更高,并且能够达到有效减少试验所需故障样本量。

表 2 验证试验方案的相对故障样本量

方案类型	试验方案	相对样本量	最大允许失败次数
经典抽样验证方案	(471,13)	471	13
SPRT 验证方案	(338,10)	338	10
本文验证方案	(165,5)	165	5

## 5 结 论

本文采用了改进的信息熵与 Bayes 后验风险准则的方法,解决雷达发射机系统中测试性验证试验方案的确定问题。基于雷达发射机系统子部件的虚拟试验数据,对试验过程中子部件的先验信息,通过改进信息熵的方法进行信息融合。该改进信息熵方法通过引入可信度,使得折合后的先验信息能够与工程实际中的测试性过程中可信度增加。得到雷达发射机系统级试验数据,确定其先验分布。再采用 Bayes 后验风险准则的方法,根据双方约束参数,计算试验样本总量与最大允许失败次数,确定试验方案。与经典抽样方案和 SPRT 方案相比,本文方法降低故障样本量的同时具有较高的可信度。

## 参考文献

- [1] 宫海波,徐茜,彭瑞元. 雷达综合试验台仿真设计[J]. 电子测量技术,2017,40(5):1-4.
- [2] 翟桂全,尹波,王艳萌. 一种机载雷达便携式维修辅助系统设计[J]. 电子测量技术,2017,40(8):94-97.
- [3] WU Q, XU Y C, WANG C W, et al. Research on testability design and evaluation method for ship electromechanical equipment[J]. Journal of Physics;

- Conference Series, 2020, 1650(2):022105.
- [4] ZHANG Y, WANG C, LIN X, et al. A censored sequential posterior odd test method in testability demonstration test planning [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2020, 234(4):579-587.
- [5] 赵晨旭. 测试性虚拟验证技术及其在直升机航向姿态系统中的应用研究[D]. 长沙:防科学技术大学, 2011.
- [6] 闵庭荫, 万会兵. 基于 FMECA 的测试性验证分析[J]. 航空电子技术, 2015, 46(1):52-56.
- [7] 田树新, 李祖勤, 刁宏伟, 等. 基于测试性设计特性的样本量确定方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(10):143-145, 151.
- [8] 王超. 虚实结合的测试性试验与综合评估技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
- [9] 杨金鹏, 连光耀, 邱文昊, 等. 基于二项分布的装备测试性综合验证方案[J]. 中国测试, 2018, 44(5):12-16, 23.
- [10] 胡宏昌, 王婧. 半正态分布参数的序贯概率比检验[J]. 大学数学, 2021, 37(3):93-98.
- [11] 邓露, 许爱强, 李文海, 等. 基于 Bayesian 理论的测试性验证试验方案[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(6):775-780.
- [12] 张西山, 黄考利, 闫鹏程, 等. 基于验前信息的测试性验证试验方案确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8):1505-1512.
- [13] 王敏, 杨江平, 卢雷, 等. 利用分系统数据制定整机测试性验证试验方案[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5):213-217.
- [14] 张西山, 黄考利, 闫鹏程, 等. 小子样复杂装备系统测试性评估中的验前参数值确定方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(8):1968-1973.
- [15] 赵学远, 王康, 秦亮, 等. 基于仿真数据的测试性验证序贯设计方案[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(1):146-150, 168.
- [16] MION Y F, WANG G P, RUI X T, et al. An innovative Bayesian sequential censored sampling inspection method and application to test design[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 76(C):867-882.
- [17] 陈然, 连光耀, 张西山, 等. 基于故障注入的测试性验证试验样本量确定方法[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12):3994-3997.
- [18] 李天梅, 邱静, 刘冠军. 利用研制阶段试验数据制定测试性验证试验方案新方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8):52-57.
- [19] LIU G, LI F. A new sample selection method for testability verification experiment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3343(607):95-98.
- [20] 王超. 虚实结合的测试性试验与综合评估技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
- [21] 周奎, 孙世岩, 严平. 基于后验风险确定故障样本量的 Bayes 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7):1672-1676.

### 作者简介

董正琼, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为光学散射测量研究。

刘佳(通信作者), 工学博士, 主要研究方向为装备综合保障研究。

E-mail: janejialiu@outlook.com