

Study on the Reliability Predicting of the Missile Test Equipment Based on the Parameter Drift

Tao Li^{1*}, Shenliang Zhao², Zhuo Zhang³

¹Security Department of Air Ammunition, Air Force Service College, Xuzhou Jiangsu

²Empty Tender Center, Beijing

³Troop 93685, Zhangjiakou Hebei

Email: jiangnanlt@sina.com

Received: Mar. 26th, 2020; accepted: Apr. 8th, 2020; published: Apr. 15th, 2020

Abstract

Along with the work time increasing and the work condition changing, the signal parameter gets moving with standard condition in the missile test equipment and it impacts the reliability. The statistics rule about drift amount of the parameter is analyzed, and the relation between the drift amount $X(t)$ and the system reliability is studied. The drift amount of the parameter affecting the equipment function at a moment is used to forecast the reliability, and the method of predicting the whole equipment reliability is set up. The sample $X(t)$ is used to estimated $R(t)$. The method is validated by the missile test equipment.

Keywords

Parameter Drift, Test Equipment, Reliability, Airborne Missile, Calculate

基于参数漂移的导弹测试设备可靠度预计研究

李涛^{1*}, 赵慎良², 张卓³

¹空军勤务学院航空弹药保障系, 江苏 徐州

²空装招标中心, 北京

³93685部队, 河北 张家口

Email: jiangnanlt@sina.com

收稿日期: 2020年3月26日; 录用日期: 2020年4月8日; 发布日期: 2020年4月15日

*第一作者。

摘要

本文针对导弹测试设备随着工作时间的增加以及工作条件的变化,某些测试信号参数在其标准状态的附近左右摆动影响测试设备可靠度的问题,分析了参数漂移量的统计规律以及参数的漂移量 $X(t)$ 与系统可靠度 $R(t)$ 的关系,提出了根据影响导弹测试设备性能的参数在某一时刻的漂移量来预测这个参数在该时刻的可靠度,在此基础上预计出整个机载制导导弹测试设备的可靠度的方法,建立了利用 $X(t)$ 的样本来估计 $R(t)$ 的数学模型,并以某机载制导导弹测试设备为例进行了验证。

关键词

参数漂移, 测试设备, 可靠度, 机载导弹, 预测

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航空制导弹药的日益复杂,航空弹药装备的零备件多达到成千上万,给故障定位越来越困难,目前常用的智能故障定位方法有故障树、基于案例的故障定位等方法,但它们在应用中都存在一定的缺陷[1] [2]。故障树的树结点只有真与假两种状态,只适用于航空弹药装备处于好与坏两种状态的情况,由于航空弹药装备故障的复杂性,在使用故障树进行故障定位时,求顶事件发生的最小割集,在实践中也是一件非常困难的事情。基于案例的故障定位方法虽然使用简便,但它要受案例数量的限制,如果没有案例及大量的经验数据信息则推理失败[3]。

贝叶斯网络是一种智能推理工具,适合处理概率性事件,它可以根据航空弹药装备的故障信息,快速、准确的进行推理,逐步判断航空弹药装备故障的根源及故障部位[4] [5]。贝叶斯网络用于航空弹药装备故障定位可以在航空弹药装备故障信息不充足或不完整时[6],对航空弹药装备的故障原因及故障部位做出相对准确、快速的分析判断。贝叶斯网络中各结点都可包含多种故障状态,可以通过结点间的有向弧表达航空弹药装备各功能单位之间的影响关系,当故障信息加入到贝叶斯网络后,可以快速更新网络中各结点的状态,确定故障原因及部位[7] [8]。贝叶斯网络具有双向推理功能,它不仅可以由上向下推理,由航空弹药装备的某故障事件推导出引起该故障的原因及故障部位,而且可以由下向上推理,由某故障事件推导出该故障事件对整个系统功能的影响,进而判断故障等级及其发生的概率,从而可以确定航空弹药装备是否可以继续使用,还是需要维修后使用或是报废[9]。

2. 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络的数学描述[2] [10]

机载制导导弹测试设备发生故障后再进行诊断或检测来排除故障,虽然可以恢复性能,但并不是积极的诊断方法。战时,即使是很小的故障也可能延误工机。所以,在导弹测试设备测试导弹中不仅要求检测系统要能够检测到已有的故障,更应该能随时评估出测试设备的整体性能和工作完好程度,预计出测试设备的可靠度,同时为可能的故障隐患进行定位与隔离,提前消除隐患,保证导弹测试设备的最佳性能[1] [2] [3]。

通常,在故障诊断过程中,常需要测试某些关键信号的状态,与标准的状态相比较,以判断和定位故障。当测量值的漂移超出了某个范围时,电路的特性就会有比较明显的变化,并表现为某些故障现象。在实际上,当系统参数发生漂移时,系统的可靠度已经发生变化。当漂移足够大时,其可靠度将下降到最低,直至系统故障[4]。可见,所测信号的状态偏离其标准状态的大小不同,可以反映不同工作状况。

导弹测试设备中有许多影响设备性能的测试数据,而且测试参数值经常变化,但这些参数可以检测和调整;当导弹测试设备工作时,参数值 $Y(t)$ 将可能发生漂移而偏离其额定值;如果偏差 $X(t) = Y(t) - a$ 在允许的范围 (l_1, l_2) 内 $(l_1 < l_2)$, 则不妨碍测试设备正常工作。在实际中,我们关心是测试参数 $Y(t)$ 在时刻 t 的可靠度[5] [6] [7]:

$$R(t) = P\{l_1 < X(t) \leq l_2\}, t > 0 \quad (2-1)$$

若假定:不考虑插件板的耗损,参数在一经调整后测试设备即可恢复到标准工作状态。在此条件下,给出可靠度 $R(t)$ 和漂移量 $X(t)$ 的测试值 $X_1(t), \dots, X_n(t)$ 之间的关系函数,利用可测的 $X(t)$ 的样本来推导出 $R(t)$ 的表达式。然后通过 $R(t)$ 估算出任意 t 时刻该测试参数的可靠度。

3. 参数漂移量的规律统计

3.1. 产生漂移的假定条件[8] [9]

1) 假定测试参数数据发生漂移的原因是由于有关备件受到振动强度 $\lambda t (\lambda > 0, t > 0)$ 的冲击,从而可知,参数在 $(0, t)$ 时间内受到冲击的次数 $N(t)$ 具有分布率:

$$p_i(t) = P\{N(t) = i\} = \exp(-\lambda t) \cdot (\lambda t)^i / i!, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3-1)$$

2) 假定第 i 次冲击使测试参数值发生漂移的改变量为 X_i , 且 X_1, X_2, X_3, \dots 是独立同分布的, $X_i \sim N(\mu, \sigma^2)$, 各 X_i 与 $N(t)$ 独立; 记 $X_0 \equiv 0$, 从而有漂移量 $X(t)$:

$$X(t) = \sum_{i=0}^{N(t)} X_i \quad (3-2)$$

显然: $X(t) \sim N(\mu N(t), \sigma^2 N(t))$

3.2. 漂移量的概率分布[10] [11] [12]

定理 1. 我们假设 $X(t)$ 由(3-2)式定义, $N(t)$ 的分布由(3-1)式给出, 则 $X(t)$ 的分布函数为:

$$F(x) = P\{X(t) \leq x\} = \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(x), \quad -\infty < x < \infty \quad (3-3)$$

其中, $F_0(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$, $F_i(x) = \Phi\left[\frac{(x - i\mu)}{\sqrt{i}\sigma}\right]$, $i = 1, 2$, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, 下同。

$p_i(t)$ 由(3-1)式给出。

$$F(x) = P\{(0, t) \text{ 时间内总的漂移量} \leq x\} = P\{X(t) \leq x\}$$

$$= P\left\{\sum_{i=0}^{N(t)} X_i \leq x\right\} = P\left\{\underbrace{x_1 + x_2 + \dots + x_{N(t)}}_{N(t)} \leq x\right\}$$

证明:

$$= \sum_{i=0}^{\infty} \{(\text{共出现 } i \text{ 次冲击的概率}) \cdot (\text{这 } i \text{ 次冲击的漂移量})\}$$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} P\{\text{出现 } i \text{ 次冲击且总漂移量} \leq x\} = \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(x)$$

其中, $F_0(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$, $F_i(x) = \Phi\left[\frac{(x-i\mu)}{(\sqrt{i}\sigma)}\right]$, $i=1,2,\dots$ 。

p_i 由(3-1)式给出。

4. 参数可靠度与漂移量的关系

每一个测试参数就像一个子系统, 都存在可靠性问题。当其寿命分布未知时, 我们采用(2-1)式定义参数的可靠度 $R(t)$, 当寿命分布已知时, $R(t)$ 也可以计算求值。在日常导弹测试中, 导弹测试参数的漂移量容易采集, 而测试参数的寿命则不容易得知, 因此采用(2-1)式定义 $R(t)$ 的优越性是明显的。下面我们给出 $R(t)$ 的表达式。

定理 2. 假设导弹测试参数的漂移量 $X(t)$ 由(3-2)式定义, $X(t)$ 的分布由(3-3)式确定, 则测试参数可靠度函数 $R(t)$ 可以用下面形式表示:

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i p_i(t), \quad t \geq 0 \quad (4-1)$$

其中, $a_0 = \begin{cases} 1, & l_1 < 0 \leq l_2 \\ 0, & l_1 < l_2 < 0 \text{ 或 } 0 \leq l_1 < l_2 \end{cases}$, $a_i = \Phi(b_i) - \Phi(c_i)$, $i=1,2,\dots$, $b_i = (l_2 - i\mu)/\sqrt{i}\sigma$, $c_i = (l_1 - i\mu)/\sqrt{i}\sigma$ 。

p_i 由(3-1)式给出。

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{l_1 < X(t) \leq l_2\} \\ &= P\{X(t) \leq l_2\} - P\{X(t) \leq l_1\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{证明:} \quad &= \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(l_2) - \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(l_1) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) \{F_i(l_2) - F_i(l_1)\} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) a_i \end{aligned}$$

其中, $a_0 = \begin{cases} 1, & l_1 < 0 \leq l_2 \\ 0, & l_1 < l_2 < 0 \text{ 或 } 0 \leq l_1 < l_2 \end{cases}$, $a_i = \Phi(b_i) - \Phi(c_i)$, $i=1,2,\dots$, $b_i = (l_2 - i\mu)/\sqrt{i}\sigma$, $c_i = (l_1 - i\mu)/\sqrt{i}\sigma$ 。

p_i 由(3-1)式给出。

推论: 在定理 2 的条件下, 参数可靠度 $R(t)$ 有近似计算式:

$$R(t) \approx \tilde{R}(t) = \Phi((l_2 - \mu\lambda t)/d) - \Phi((l_1 - \mu\lambda t)/d), \quad t > 0 \quad (4-2)$$

其中, $d^2 = (\mu^2 + \sigma^2)\lambda t$, $d > 0$ 。

(4-1)式和(4-2)式表达了 $R(t)$ 与 $X(t)$ 的统计关系。

证明: $X(t)$ 的分布函数由(3-3)式确定, 则 $X(t)$ 的:

$$\text{数学期望 } E(X(t)) = \mu\lambda t;$$

$$\text{方差 } D(X(t)) = (\mu^2 + \sigma^2)\lambda t;$$

$$\text{特征函数 } \psi(s) = E\{\exp(jsX(t))\} = \exp\left\{\lambda t \left[\exp(js\mu - s^2\sigma^2/2) - 1\right]\right\}。$$

可见:

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $Z(t) = \frac{X(t) - \mu\lambda t}{\sqrt{(\mu^2 + \sigma^2)\lambda t}}$ 的特征函数为 $\exp(-s^2/2)$, 即 $Z(t)$ 渐近的服从标准正态分布。

即当 t 充分大时, $X(t)$ 服从 $E(X(t)) = \mu\lambda t$, $D(X(t)) = (\mu^2 + \sigma^2)\lambda t$ 的正态分布。

则由定理 2 有:

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{l_1 < X(t) \leq l_2\} \\ &= P\{X(t) \leq l_2\} - P\{X(t) \leq l_1\} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(l_2) - \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) F_i(l_1) \end{aligned}$$

即:

$$R(t) \approx \tilde{R}(t) = \Phi((l_2 - \mu\lambda t)/d) - \Phi((l_1 - \mu\lambda t)/d), \quad t > 0$$

其中, $d^2 = (\mu^2 + \sigma^2)\lambda t$, $d > 0$ 。

5. 参数可靠度的计算

在实际应用中, 当 l_1 和 l_2 的值给定时, 如果常数 λ, μ, σ 已知, 则对任意给定的 t 可由(4-1)或(4-2)式求得 $R(t)$ 。而当 λ, μ, σ 未知时, 应当先求出它们的估计值, 然后代入(4-1)或(4-2)式, 即可求得 $R(t)$ 的估计式。

5.1. $R(t)$ 参数的估计[13]

假设 $X_1(t), \dots, X_n(t)$ 是 $X(t)$ 的一个容量为 n 的随机样本; k 为 $X_1(t), \dots, X_n(t)$ 的 n 个测试值中取不同量的个数; 则有:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(t), \quad S^2(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i(t) - \bar{X}(t))^2 \quad (5-1)$$

令 $b = \mu\lambda$, $C^2 = (\mu^2 + \sigma^2)\lambda$, $C > 0$, 则有:

$$EX(t) = bt, \quad DX(t) = C^2t$$

当 t 已知时, 由此易得 b 、 c 的矩估计如下:

$$\hat{b} = \bar{X}(t)/t, \quad \hat{C}^2 = S^2(t)/t \quad (5-2)$$

5.2. $R(t)$ 的实际求法[14] [15]

已知 l_1, l_2, τ 和 $X_1(\tau), \dots, X_n(\tau)$ 的观测值, 可用下式求出 $R(t)$ 的估计值:

$$\hat{R}(t) = \Phi(u(t)) - \Phi(v(t)), \quad t > 0 \quad (5-3)$$

其中 $u(t) = (l_2 - \hat{b}t) / (\hat{C}\sqrt{t})$

$v(t) = (l_1 - \hat{b}t) / (\hat{C}\sqrt{t})$

$\hat{b} = \bar{X}(\tau) / \tau$

$\hat{C} = \sqrt{S^2(\tau) / \tau}$

$\bar{X}(\tau), S^2(\tau)$ 由(5-1)式计算。

说明: l_1 、 l_2 分别为参数漂移量的下限和上限, 通常 $l_1 < l_2$ 。

$R(t)$ 的意义为: 在经过检查调整后的 t 时刻, 参数的可靠度预计值。

6. 实例应用研究

6.1. 理论验证

某导弹测试设备的电压参数是一个较为重要的测试参数，我们规定 $-I_1 = I_2 = 2.5$ 伏； $\tau = T = 30$ 天；每 30 天检查调整一次，每次定期检查时先记下漂移后参数值 $y(\tau)$ ，再按规定将参数值调整到额定值 a ，算出漂移量 $x(\tau) = y(\tau) - a$ ，就得到 $X(\tau)$ 的一个观测值。表 1 给出了 $X(\tau)$ 的一个容量 $n = 180$ 的观测值的取值情况[16]。

Table 1. Experiment data
表 1. 实验数据

漂移量	出现次数	漂移量	出现次数
-2.0	1	0.0	70
-1.5	4	0.1	10
-1.3	1	0.2	5
-1.0	3	0.3	1
-0.8	3	0.5	17
-0.5	22	0.7	1
-0.4	2	1.0	12
-0.3	2	1.3	1
-0.2	7	1.5	4
-0.1	9	2.0	3

将表 1 中的数据代入到(5-1)和(5-3)式中，有：

$$u(t) = (250 - 0.187t) / (\sqrt{555t}), \quad v(t) = -(250 + 0.187t) / (\sqrt{555t})$$

由 $\hat{R}(t) = \Phi(u(t)) - \Phi(v(t))$ 可得仿真计算结果(如图 1 所示)。

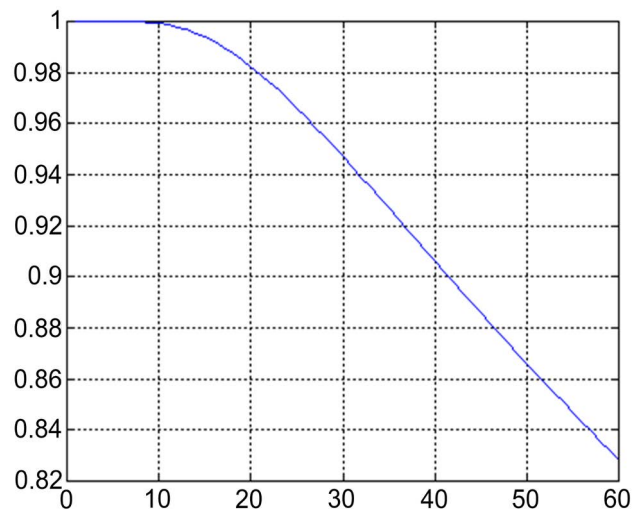


Figure 1. Simulation result
图 1. 仿真结果

可以看到:

$$\hat{R}(30) = 0.99983, \quad \hat{R}(60) = 0.99641$$

讨论:

1) 当 $T = 30$ 天时, 参数的可靠度很高(0.99983), 这个结果与实际测试相符。事实上, 表 1 中的 180 个数据全部在允许的范围(-2.5, 2.5)内。

2) 参数调整后, 第 30 天的可靠度为 0.99983, 第 60 天的可靠度为 0.99641。可见, 如果将参 $R(i-1)$ 数的调整周期延长到 60 天, 也能保证参数的可靠度不低于 99%。甚至将参数的调整周期延为 90 天, 可靠度也在 98% 以上。

6.2. 应用实例

以上提到的可靠度预计方法在机载制导导弹通用测试设备检测中作为一个子系统得到了实现, 并根据初步的实验数据验证了理论的正确性。这里给出应用的两个主要模块: 模型建立模块和可靠度预计模块。

模型训练模块: 模型建立主要是根据输入的测试参数进行计算, 然后自动建立模型。其界面如图 2。

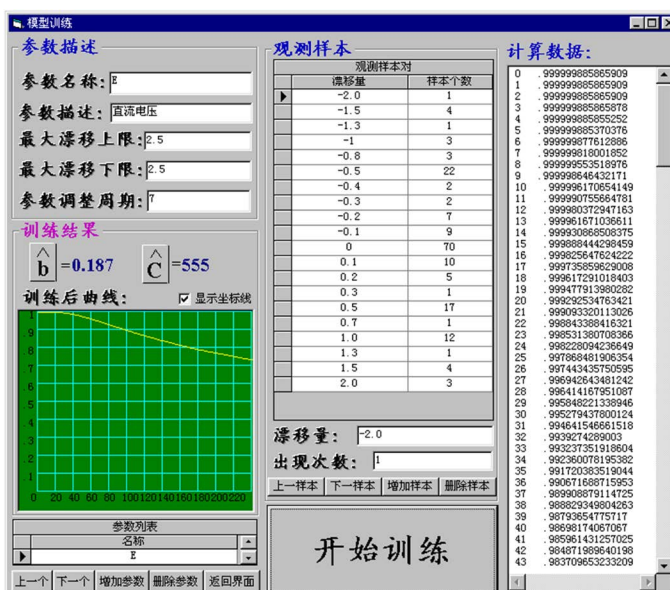


Figure 2. Training interface

图 2. 训练界面

可靠度预计模块: 对已经建立了模型的参数可以用于可靠度的预计, 输入上次调整的日期和今天调整的日期就可以让系统报告出当前该参数的可靠度情况并提出是否要进行维修的建议。系统还可以根据用户提供的可靠度保证前提自动形成该参数的近期维修调整建议报告[17]。

7. 结论

本文阐述了机载制导导弹测试设备参数漂移量的统计规律, 分析了参数产生漂移的条件以及参数可靠度与漂移量的关系, 提出了根据影响测试设备性能的参数在某一时刻的漂移量来预测这个参数在该时刻的可靠度, 在此基础上预计出机载制导导弹测试设备的可靠度的方法。分析了参数的漂移量 $X(t)$ 与系统可靠度 $R(t)$ 的关系, 建立了利用 $X(t)$ 的样本来估计 $R(t)$ 的数学模型, 并以某导弹测试设备为例进行了验证利用 $X(t)$ 的样本来估计 $R(t)$ 的数学模型正确性。

基金项目

制导弹药维护周期优化研究, 182KJ35003。

参考文献

- [1] 廖贵敏, 等. 基于参数漂移量统计分析的电路可靠度预计[C]//第十五届电路与系统学术年会. 广州: 电路与系统学报, 1999: 283-285.
- [2] 闻新, 等. 控制系统的故障诊断与容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 曾天翔, 等. 电子设备测试性及诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [4] 王茜, 等. 机载制导弹药测试设备[M]. 北京: 蓝天出版社, 2017.
- [5] Feng, Y.C. and Wei, G. (2016) The Application of Robust Adaptive Cubature Particle Filter Algorithm in Initial Alignment of SINS. *ICMA Conference*, Harbin, 1344-1349.
- [6] 田中大, 高宪文, 李琨. 基于 KPCA 与 LSSVM 的网络控制系统时延预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1281-1285.
- [7] 李玲玲, 马东娟, 李志刚. 基于状态监测数据的电器电接触性能评估[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 198-203.
- [8] 任风云. 多机种航空弹药保障探讨[J]. 空军后勤研究, 2017(3): 35-36.
- [9] 谢祖辉, 杨功流, 于东康. 基于粒子群参数辨识法的杂陨晕杂初始对准方法[J]. 航空兵器, 2018(3): 19-23.
- [10] 王永川, 蔡金燕. 一种基于模糊可靠度确定雷达故障检测间隔期的方法[J]. 军械工程学院学报, 2001, 13(4): 4-7.
- [11] 洪厚胜. 装备参数漂移量与其可靠度的关系[J]. 军械工程学院学报, 1994(1): 39-41.
- [12] 胡传炎. 抓紧建设空军多机种综合保障基地[J]. 后勤, 2015(6): 27-28.
- [13] 沙起才. 航空地面装备配备量模型试验[J]. 外国空军后勤, 2015(4): 35-36.
- [14] 宋太亮. 装备保障性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [15] 陈鹏, 袁雅婧, 桑红石, 等. 一种可扩展的并行处理器模型设计及性能评估[J]. 航空兵器, 2011(5): 56-61.
- [16] 程海彬, 江云, 鲁浩, 等. 基于 DGPS 的弹载捷联惯导系统性能评估技术研究[J]. 航空兵器, 2015(3): 23-26.
- [17] 范志锋, 崔平, 文健, 吕静. 基于退化敏感参数的弹药控制系统储存寿命评估[J]. 火箭与制导学报, 2017, 33(10): 109-111.