

贝叶斯估值理论在小子样批次设备检测中的应用

黄智刚, 陈晓方, 柳重堪

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 本文针对机载无线电设备故障诊断定位率低的问题, 提出利用先验故障信息指导批次定检的思想. 通过研究批次定检设备的失效规律, 运用贝叶斯理论估计小子样定检设备各模块的故障概率, 并且提出了故障检测的 4 种指导方法. 仿真试验结果表明可显著提高故障的一次定位准确率, 减少故障查找时间, 提高故障诊断效率.

关键词: 贝叶斯估计; 批次定检; 故障诊断; 机载设备

中图分类号: V215.7 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2006)12A-2530-03

The Application of Bayesian Estimate Theory in the Extreme small sample Tests of Batch Equipments

HUANG Zhigang, CHEN Xiaofang, LIU Zhongkan

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To resolve the problem of low locating rate in fault diagnosis of air borne radio equipment, the idea was proposed to using preceding fault information in the tests of batch equipments. By studying the failure rules of batch equipments, the fault probability under extreme small sample conditions was estimated using Bayesian theory. Four methods were adopted to direct fault detecting. The simulation results showed that the strategy of this paper could improve the rate of locating faults correctly in one time detecting progress and reduce the fault searching time, and can enhance the efficiency of fault diagnosis.

Key words: Bayesian estimations; tests of batch equipments; fault diagnosis; air borne equipment

1 引言

传统的设备定检方法首先对被测设备整机进行测试, 若发现故障, 即设备某项功能丧失或性能下降, 则需要逐级定位故障单元; 在每一级需要通过对其所组成的各个模块单元依次检测, 直到查找到故障单元为止. 这种检测方法若针对的是数量很少(< 5 台)的设备, 则问题不大; 但对于有一定数量的批次定检设备, 尤其是同期服役的一批军用设备, 则故障查找的正确率不高, 检测周期较长、成本较高. 目前国外先进国家正在进行的视情维修方式, 可显著提高检测效率, 有效提高设备的出勤率, 并延长设备的生命周期. 传统定检方法由于没有利用设备内在的可靠性信息, 不能满足我军快速检测、快速维修、快速保障的战时目标, 不能提供“视情维修”体制所需要的信息, 制约了我国检测和维修水平的提高.

一般来说, 军用批次定检设备具有许多共性, 它们通常由一家工厂生产, 同时装备给某一部队, 其使用年限一样, 通电时数相当, 并且其所处的气候环境与工作条件基本一致. 由可靠性理论可知^[1], 这些设备的失效规律应该大致相同, 即当某个(些)设备的某个模块出现故障时, 其它设备的同一个模块也发生故障的可能性就比较大, 并且该模块的故障概率(失效率)一般会处于增大的趋势.

本文针对故障树“或”节点下模块诊断和定位存在的效率低下问题, 提出利用先验故障信息指导批次定检的思想, 通过估计或预测各模块的故障概率, 来提高故障的一次定位准确率, 实现快速定位故障单元, 缩短故障查找时间和检测周期. 文中首次采用贝叶斯方法解决批次设备故障概率估计中的小

子样问题, 针对不同情况提出 4 种快速查找故障的指导方法, 计算结果表明可以优化诊断方法, 明显提高诊断效率. 本文工作不仅可降低装备的生命周期维护成本, 而且可预报未成熟性或将要发生故障, 增加运行安全, 为装备系统健康诊断实现基于条件维护代替周期维护创造必要条件.

2 小子样故障概率的估计

图 1 为按照可靠性理论描绘的设备组成模块失效率 $\theta(t)$ 曲线示意图, 其中实线和虚线分别代表不同的模块. 由于不同模块的组成结构不同, 工作相对独立, 可靠性参数将具有明显的差异. 一般情况下, 被检测设备的各模块大多在其使用寿命之内, 失效率稳定且为较低的常数, 很少故障; 少部分模块可能接近损耗失效期, 失效率逐渐增高, 故障次数加大.

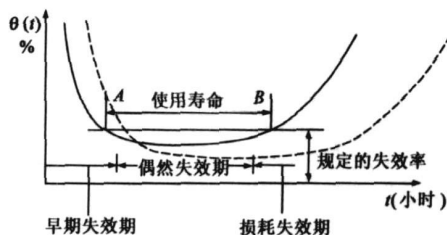


图 1 设备组成模块失效率曲线示意图

假设每个批次检测 n 台相同型号的设备, 该设备由 m 个模块组成, 用 x_i 表示, 相应的故障率为 θ_i ($i = 1, 2, \dots, m$, 下同). 由失效率曲线可知每个模块的故障率 θ_i 是变化的, 为时间的函数.

考虑单故障模式, 即假设每台设备的故障是由单个模块

故障引起的。在一个批次中, 设第 i 个模块发生故障的个数为 a_i , 未发生故障的个数为 b_i , 有 $a_i + b_i = n$ 。在一般情况下 $n < 30$, 对 θ_i 的估计属于小子样概率统计问题。

对批次设备的整个检测过程是对设备的每个模块进行无替换贝努里抽样试验。如果故障率 θ_i 的分布是已知的, 称其为验前分布, 以 $f(\theta_i)$ 来表示。在 θ_i 为参数的条件下对 n 个 x_i 模块进行检测, a_i 个模块出现故障的概率分布密度函数为 $f(a_i | \theta_i)$, 它服从以 θ_i 为参数的二项分布^[2]

$$f(a_i | \theta_i) = C_n^{a_i} \theta_i^{a_i} (1 - \theta_i)^{n - a_i}, \quad a_i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

$$\theta_i \text{ 与 } a_i \text{ 的联合分布为 } f(a_i, \theta_i) = f(a_i | \theta_i) f(\theta_i) \quad (2)$$

因此 a_i 的边缘分布为

$$f(a_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(a_i, \theta_i) d\theta_i = \int_{-\infty}^{\infty} f(a_i | \theta_i) f(\theta_i) d\theta_i \quad (3)$$

根据统计学知识, 二项分布的共轭分布为 β 分布。因此可设 θ_i 的先验密度函数为参数为 a, b 的 β 分布密度函数^[3]

$$f(\theta_i) = \beta(\theta_i, a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \theta_i^{a-1} (1 - \theta_i)^{b-1} \quad (4)$$

根据概率论中的贝叶斯定理有

$$f(\theta_i | a_i) = \frac{f(a_i, \theta_i)}{f(a_i)} \quad (5)$$

将以上表达式进行推导可得

$$f(\theta_i | a_i) = \frac{\Gamma(a+b+n)}{\Gamma(a+a_i)\Gamma(b+n-a_i)} \theta_i^{a+a_i-1} (1 - \theta_i)^{b+n-a_i-1} \quad (6)$$

即 θ_i 的验后分布是以 $a+a_i, b+n-a_i$ 为参数的 β 分布。验后均值为

$$\begin{aligned} \theta'_i &= E(\theta_i | a_i) = \frac{a+a_i}{a+a_i+b+n-a_i} \\ &= \frac{n}{n+a+b} \frac{a_i}{n} + \frac{a+b}{n+a+b} \frac{a}{b} \end{aligned} \quad (7)$$

这样就通过贝叶斯方法求得了各模块的故障率估值 θ'_i , 它等于先验分布 $\beta(a, b)$ 的均值 $a/(a+b)$ 和当前样本均值 a_i/n 的加权平均。

3 用故障率估值指导批次定检

根据各个模块发生故障的概率估值 θ_i (为简便, 下文用 θ_i 来表示故障率估值 θ'_i), 按其从大到小的顺序检测各个模块, 可以较快找到故障模块, 提高故障检测的效率。按照 θ_i 指导作用和计算方法的不同, 本文提出了纯动态、纯静态、动静态结合和在线权值调整 4 种指导批次定检的方法。

3.1 纯动态指导

当不存在或不使用以前检测得到的历史数据, 只根据当前批次中已测设备各模块的故障数据计算 θ_i , 来指导该批次中下一台设备各模块的检测顺序。设对模块 x_i 当前批次已经检测到了第 l 个, 其中有 a_{il} 个发生了故障, 得 θ_{il} 的后验分布^[4] 为以 $a+a_{il}, b+l-a_{il}$ 为参数的 β 分布。验后均值为

$$\theta_{il} = \frac{a+a_{il}}{a+b+l}$$

3.2 纯静态指导

只根据以前检测的历史数据和上一批次的数据计算 θ_i ,

来指导当前批次中设备的检测顺序。假如把 $f(\theta_i | a_i)$ 作为下一批次抽样中模块 x_i 的故障率 θ_i 的先验分布, 可以得到 θ_i 的新的贝叶斯估计。若第 k 次定检的 n 台设备中模块 x_i 的故障个数为 a_{ik} , 则有^[5]

$$f(\theta_i | a_{ik}) = \beta(a + \sum_{j=1}^k a_{ij}, b + kn - \sum_{j=1}^k a_{ij}) \quad (8)$$

因而可以得到 θ_i 的贝叶斯估计递推公式为

$$\begin{aligned} \theta_{ik} &= (a + \sum_{j=1}^k a_{ij}) / (a + b + kn) \\ &= \frac{n}{a+b+kn} \frac{a_k}{n} + \frac{a+b+(k-1)n}{a+b+kn} \theta_{i(k-1)} \\ &= \theta_{i(k-1)} + \frac{1}{a+b+kn} (a_{ik} - n\theta_{i(k-1)}) \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 动静态结合指导

把以上两种指导方法结合起来, 既利用历史数据, 也利用当前批次已测设备的数据来计算 θ_i , 来指导当前批次中下一台设备的模块检测顺序。

设第 $k-1$ 次定检的 n 台设备中模块 x_i 的故障个数为 $a_{i(k-1)}$, l 为第 k 批次中当前被检测设备的序号, c_{il} 表示第 l 个模块 x_i 是否发生故障 (c_{il} 为 1: 故障, 为 0: 未发生故障), 可得用来指导第 $l+1$ 台设备检测顺序的故障率估值 θ_{il} ($l=1, 2, 3, \dots, n-1$):

$$\theta_{il} = \frac{a + \sum_{j=1}^{k-1} a_{ij} \sum_{m=1}^l c_{im}}{a + b + (k-1)n + l} = \theta_{i(l-1)} + \frac{1}{a+b+l} (c_{il} - \theta_{i(l-1)}) \quad (10)$$

3.4 动静态结合在线权值调整指导

动静态结合指导中故障率的估值是对历史数据与当前数据的几何加权平均, 该权重没有反映这些数据真正在故障率估计中的重要性, 本文通过引入权值调节因子, 使权重值得到动态调整, 以发挥最佳调节作用, 取得更好指导效果。

对式 (10) 进行推导并分析如下:

$$\begin{aligned} \theta_{il} &= \frac{a+b+(k-1)n}{a+b+(k-1)n+l} \cdot \frac{a + \sum_{j=1}^{k-1} a_{ij}}{a+b+(k-1)n} \\ &\quad + \frac{l}{a+b+(k-1)n+l} \cdot \frac{\sum_{m=1}^l c_{im}}{l} \\ &= w_1 p_1 + w_2 p_2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中 W_1, W_2 分别反映了历史数据的检测数量和当前已测设备数量在设备总检测数量中所占的权重, 并有关系 $W_1 + W_2 = 1$ 。将式 (11) 改写成如下的形式:

$$\theta_{il} = \lambda_1 w_1 p_1 + \lambda_2 w_2 p_2 \quad (12)$$

式中的 λ_1 和 λ_2 称为权重调节因子, 将 $\lambda_1 W_1$ 和 $\lambda_2 W_2$ 作为新的权值看待, 并保证 $\lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 = 1$ 成立。本文提出 λ_2 值动态调整的规则为: 用 θ_{il} 的排序对第 $l+1$ 台设备的各个模块进行测试, 如一次测试即可查到故障模块, 则不予调整。如果测试次数大于一次, 则分别用 P_1 和 P_2 的排序查找故障模块, 若用 P_2 的排序比用 P_1 的排序先查找到故障模块, 则将 λ_2 值增强, 反之 λ_2 值将减弱。在 λ_2 值的调整过程中, λ_1 同步进行调整。

4 批次定检的仿真与结果分析

假定批次定检中, 每批检测 20 台设备, 每台设备由 5 个模块组成. 本文通过三个批次进行仿真, 分别代表历史数据批次 A、上一批次 B 和当前批次 C, 其中每批的故障数目及故障位置根据可靠性理论按失效规律用随机方法得到. 各批次的模块故障数据见表 1.

表 1 三个批次的模块故障数据

模块编号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	模块平均故障率
批次 A 故障数量	0	1	2	0	3	6%
批次 B 故障数量	1	2	1	1	2	7%
批次 C 故障数量	1	6	1	0	4	12%

表中模块 1 和 4 处于偶然失效期, 故障率很低; 模块 5 处于损耗失效期, 故障率较高; 而模块 2 处于从偶然失效期进入损耗失效期, 故障率升高; 模块 3 的情况不甚明了.

采用上节所提出的 4 种指导方法, 分别利用三个批次中的一个或几个数据, 来对批次 C 的故障查找和故障定位进行指导. 为了比较各种指导的优劣, 本文提出采用两个指标进行衡量, 其一为故障模块查找时间, 即从发现设备故障到定位故障模块单元所花费的时间, 设每个模块的平均检测时间为 T ; 其二为故障的一次定位准确率 η , 即仅通过一次检测就将故障模块正确定位的概率, 为一次检测即正确定位的模块数与总故障模块数之比. 表 2 列出了 4 种指导方法的检测结果, 为了对比, 将未进行任何指导的常规方法的指标同时给出.

表 2 5 种方法检测指标结果比较

检测方法 检测指标	常规 方法	纯动态 指导	纯静态 指导	动静态 结合指导	在线权值 调整指导
故障查找时间(T)	36	29	23	23	22
一次定位准确率 η	8.33%	16.67%	33.33%	33.33%	41.67%

通过对该表数据和仿真中的一些问题进行分析, 可以得到以下结论:

(1) 4 种指导方法都比常规方法优越, 可较大提高故障的诊断效率. 其中又以权值动态调整最优, 动静态结合和纯静态次之, 纯动态再次之.

(2) 在没有历史数据或两批次设备相关性不强时, 采用纯动态指导可以有效提高故障的一次定位准确率; 当两批次设备相关性较大时, 应考虑采用纯静态指导. 在有一定历史数据, 两批次设备又有一定相关性的情况下, 建议采用动静态结合的指导方法.

(3) 对于无法判断设备间相关性的情况, 最好采用动静态结合在线权值调整的方法, 该方法适应范围较宽, 并且可以通过改变历史和当前数据之间的权值分配来产生更好的指导效果

(4) 小子样估值和故障样本分布对诊断结果的影响. 虽然采用贝叶斯方法处理小子样问题比较适合, 但由于机载设备等批量小, 对故障率的估计有一定偏差, 会在一定程度上影响指导效果; 除纯静态外的 3 种方法均采用对故障概率在线估计、在线指导的机制, 则每一故障模块的发生几率、发生位置和区间密度等都会引起检测指标的一些差异和变化. 但总的来看, 指导比不指导要好, 复杂指导比简单指导好, 利用的信

息量越多指导效果越明显.

5 结束语

本文通过对批次定检设备的可靠性分析, 研究了机载无线电设备故障发生的规律, 提出对设备各个模块进行可靠度估计和故障率预测来提高故障检测效率的解决方案. 文中采用贝叶斯方法对小子样的各模块故障概率进行估计, 并提出了静态调整、动态调整、动静态结合调整、在线权值调整共 4 种指导方法, 通过随机抽取的故障样本进行了仿真运行, 结果表明诊断效果明显优于常规方法, 可减少故障查找时间, 提高故障一次定位准确率, 故障检测效率大大提高.

本文介绍的方法不仅适用于机载无线电设备, 对于类似的各种成败型批量产品检测都有较高应用价值, 可适用于更加广泛的设备定检领域. 本文工作为利用设备的先验信息指导故障诊断打下了理论基础, 对于我国机载设备视情维护体制的建立及可靠性信息的充分利用具有方法上的指导意义.

参考文献:

[1] 陈炳生. 电子可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
Chen Bing-sheng. Electronic Reliability Engineering[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1987. (in Chinese)

[2] James O Berger. Statistical Decision Theory[M]. Springer Verlag Inc, NY, 1995.

[3] Press S J. Bayesian Statistics: Principle, Model and Application [M]. John Willy & Sons, NY, 1989.

[4] 罗梓彬, 张世英. 事件树方法的贝叶斯分析[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(9): 78- 80.
Luo Huabin, Zhang Shi-ying. Bayesian analyze of event trees method[J]. System Engineering and Electronic Technology, 1999, 21(9): 78- 80. (in Chinese)

[5] 刘国均. 贝叶斯方法在可靠性试验中的应用[J]. 运筹与管理, 1999, 4(2): 23- 25.
Liu Guo-jun. The Applications of Bayesian Method at Reliability Test[J]. Operations and Management, 1999, 4(2): 23- 25. (in Chinese)

作者简介:



黄智刚 男, 1962 年生于河北邢台, 北京航空航天大学教授、博导, 主要从事自动测试与控制、故障诊断与识别、卫星导航、无线电导航等方面的教学和科研工作.
E-mail: baahzg@163.com

柳重堪 男, 1941 年生, 北京航空航天大学教授、博导, 主要从事应用数学、信息传输与处理、信号与系统的数学方法、信号重建、神经网络等方面的教学和科研工作. E-mail: zkliu4129@263.net