

电子装备故障预测参数选取与设置

方甲永¹, 肖明清¹, 黄宏伟¹, 付新华²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 桂林空军学院航空兵参谋系, 广西 桂林 541003)

摘要:电子装备的故障预测是飞机预测与健康管理系统的关键技术。针对电子装备故障预测参数选取和设置的难题,提出了一种故障预测参数选取和设置的新方法。首先基于多信号流图模型,提取反映电子装备故障状态的参数集;通过引入生物统计学中相关危险度,作为统计模型标准,采用数据驱动的方法,选取出最优故障预测参数。通过建立预测参数门限值统计模型趋势图,获得置信度为 95% 的门限估计值。实例证明通过该方法可快速有效地选取和设置预测参数,同时避免了繁琐的故障模式、故障状态和故障判据的分析,以及主观因素影响,实现预测参数选取和设置的自动化。

关键词:故障预测;相关危险度;预测度;多信号流图

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.003

中图分类号: TP206.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0011-05

飞机故障预测与健康管理系统是实现视情维修的基础,在新一代民用和军用飞机上得到广泛应用。而对航空装备实施准确的故障预测是预测与健康管理系统的关键技术。以往故障预测主要集中在机械、结构和发动机等领域^[1-4],由于电子装备自身结构的特点,对其实现故障预测难度非常大。因此,美军曾提出电子装备故障预测不可实现的论断。然而,在 2004 年美国国防部指出电子装备故障预测是实现自主后勤保障的核心技术,并依托 JSF (Joint Strike Fighter) 项目开展关于电子装备故障预测技术的研究^[5]。目前,针对电子产品与装备的故障预测方法主要分 3 种:①基于故障预测参数监测;②基于故障物理模型 (Physics of Failure, PoF);③基于内建“损伤标尺”^[6]。国外研究和应用较多的是前 2 种方法^[7-8]。基于 PoF 的方法,核心在于建立电子产品大量的失效机理及故障物理模型。国外在这方面开展工作较早,基于 PoF 的方法在某些项目中得到了初步的应用和验证^[9-10]。国内在缺乏数据的情况下,一方面可通过实验获取电子产品的失效机理和故障模型,另一方面,可开展基于故障参数监测的预测方法研究。基于故障参数监测的电子装备故障预测方法,难点是如何选取合适的预测参数,及预测参数的门限值如何设置。传统关于电子装备故障预测参数的选取和门限值的设置,都是基于专家经验。这种方法要求对装备深入的了解,具备坚实的专业知识,具有主观性大,标准模糊,可操作性差等缺点。本文主要研究电子装备故障预测参数监测方法中存在的这 2 个难点问题。

1 电子装备故障预测参数选取方法

1.1 基于多信号流图模型的故障预测参数提取

多信号流图用诊断信息流表达待诊断的问题,它通过跟踪系统每个组件影响的信号以及每个测试节点可以检测的信号的流向,在系统结构模型的基础上描述信号间的依赖关系,成功融合了结构模型和依赖模型

* 收稿日期:2010-03-16

基金项目:国防预研基金资助项目(51317030103)

作者简介:方甲永(1983-),男,河南濮阳人,博士生,主要从事装备故障诊断与预测研究;E-mail: fjllylike@sohu.com
肖明清(1963-),男,湖南常德人,教授,博士生导师,主要从事机载武器系统控制与检测研究。

的优点。本文通过多信号流图建立电子装备可更换单元与故障预测参数之间的对应关系。

以某型飞机雷达系统为例,对文中提出的故障预测参数选取方法进行讲解与验证。雷达系统由天线(c_1)、发射机(c_2)、接收机(c_3)、信/数处理机(c_4)4个LRU(Line Replaceable Unit)组成,能反映雷达系统性能和故障状态的主要参数有: $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}$ 。雷达系统各LRU对外共6个测试接口: $TP_1, TP_2, TP_3, TP_4, TP_5, TP_6$ 。根据雷达系统的工作原理,按照多信号流图模型的建立步骤,可以建立雷达系统的信号流相关模型示意图见图1。根据多信号流图模型,可得雷达系统的故障测试依赖矩阵 D 如表1所示,其元素 $d_{ij} = 1$ 表示故障组件 c_i 可通过预测参数 s_j 反映状态。关于多信号流模型详细的建模过程可参考文献[11],并可利用Qualtech公司的TEAMS软件得到。

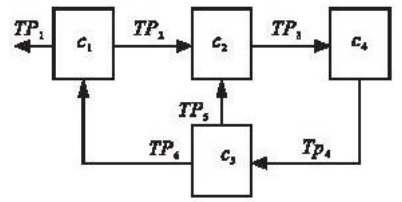


图1 雷达系统多信号流模型

Fig.1 Multi-signal flow of radar system

表1 雷达系统故障预测相关矩阵

Tab.1 Prognostics dependency matrix of radar system

故障组件	TP_1		TP_2			TP_3			TP_4		TP_5		TP_6	
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}
c_1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
c_2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
c_3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
c_4	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1

1.2 基于相关危险度的故障预测参数集选取

由于成本、安装空间及参数本身性质等的限制,不可能对所有的参数进行监测,文中采取数据驱动的方法,通过建立故障预测参数的统计标准模型,从而选取最优的故障预测参数集。数据驱动的方法需要许多训练数据,包括电子装备正常数据和失效数据,然而电子装备的失效数据非常少。如装备100台机载雷达系统,每年雷达发生故障的概率约为8次,按照飞机每天起飞2个架次,则每次起飞后雷达系统发生故障的概率约为0.01%(8%/730)。因此假设故障预测系统丢失了雷达系统的所有故障预测信息,它预测的成功率也可高达99.99%。鉴于航空电子装备正常数据和失效数据数目差距较大,必须选取合适的统计标准来选取预测参数集。

论文采用在流行病学统计学中广泛采用的相关危险度(Relative Risk,RR)作为统计模型标准,来选取最优的故障预测参数集。相对危险度RR在生物统计学中的定义为: $RR = P_1/P_0$,其中 P_1 为人群总体中暴露于某因素者的发病率; P_0 为人群总体的发病率。

对于电子装备故障预测信息系统,定义 P_1 为考虑某预测参数时装备的失效率, P_0 为电子装备总体失效率。

RR的数值通常大于1,预测参数与装备故障之间的相关性越大,则RR越大。这里以雷达系统典型的3类信号 s_1, s_4 和 s_8 为例来讲解相对危险度的求解,以及如何根据相对危险度来判断故障预测参数的取舍。

以 $m = 100$ 台雷达系统一年测试数据为统计样本。统计数据见表2。电子装备总体失效率 $p_0 = \frac{a}{mn} \times 100\%$,考虑预测参数 s_i 时装备的失效率: $p_1 = \frac{a_{s_i}}{mn_{s_i}} \times 100\%$,因此预测参数 s_i 对电子装备故障的危险度:

$$RR_{s_i} = \frac{p_1}{p_0} = \frac{a_{s_i}n}{an_{s_i}} \quad (1)$$

式中: m 为雷达系统数量; n 为雷达测试数据样本总数; a 为测试数据中故障样本数; n_{s_i} 为考虑预测参数 s_i 的样本数; a_{s_i} 为考虑预测参数 s_i 的故障样本数。

表 2 雷达系统测试数据
Tab. 2 Test data of radar system

样本总数 n	故障样本数 a	预测参数 s_i	预测参数值范围	s_i 样本数 n_{s_i}	s_i 故障样本数 a_{s_i}	s_i 相关危险度 RR_{s_i}
700	8	s_1	< 1.2	22	5	19.89
			< 2.4	23	5	19.02
			< 3.2	24	5	18.23
			< 4.0	24	5	18.23
			< 4.8	26	5	16.83
			> = 4.8	674	3	0.39
		s_4	< 14	56	2	3.5
			< 20	97	3	2.7
			< 25	133	3	1.97
			< 30	197	4	1.77
			< 34	362	5	1.21
			> = 34	338	3	0.78
		s_8	< 11	15	2	11.67
			< 12.5	47	4	7.45
			< 13	102	5	4.38
			< 13.6	197	6	2.67
			< 14.3	376	7	1.63
			> = 14.3	324	1	0.27

根据式(1)计算出预测参数 s_1, s_4 和 s_8 在每个取值区间上的相关危险度,绘制出其变化趋势图,见图 2。

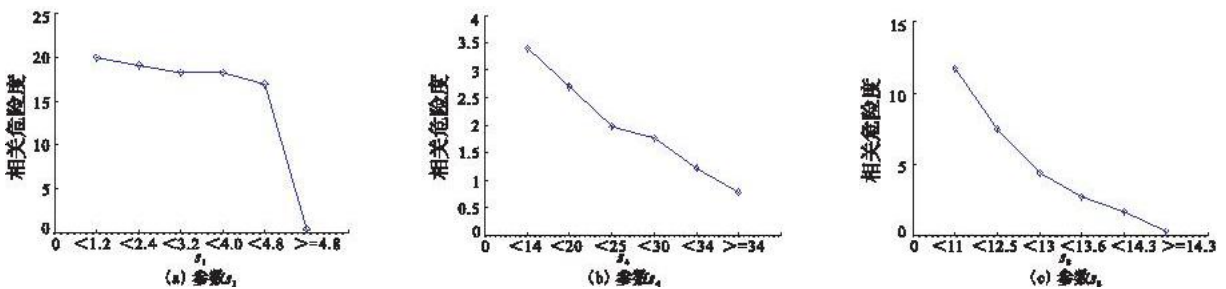


图 2 考虑不同预测参数的相关危险度

Fig. 2 Relative risk with respect to different prognostics parameters

从信号相关危险度变化趋势图可知,对于预测参数 s_1 ,其相关危险度较大,但其相关危险度变化率较小,而且在大于 4.8 的参数区间,其相对危险度急剧降低,可判断此信号为突变性信号。对于预测参数 s_4 ,其相关危险度变化率虽然较大,但其相关危险度值较小,此信号与航空电子装备的故障相关性较低。对于预测参数 s_8 ,其相关危险度数值和变化率都较大,是故障预测参数的理想选择。为反映相关危险度的大小与变化趋势,本文提出预测度的概念,定义如下:

$$F(RR_{s_i}) = E(RR_{s_i}) \times D(RR_{s_i}) \tag{2}$$

式中: $F(RR_{s_i})$ 为参数 s_i 的预测度; $E(RR_{s_i})$ 为参数 s_i 各区间相关危险度均值; $D(RR_{s_i})$ 为参数 s_i 各区间相关危险度方差; $E(RR_{s_i})$ 反映了参数 s_i 相关危险度的大小, $D(RR_{s_i})$ 反映了参数 s_i 相关危险度的变化率。按照式(2)可计算出每个参数的预测度,见表 3,此处用于计算的各参数相关危险度 RR_{s_i} 数值需做归一化处理。利用表 3 中的预测度值,结合表 1 的故障预测相关矩阵,可选取具有最大预测度,且能区别所有故障组件状态的预测参数集。

表 3 参数预测度

Tab. 3 Prognostics scale of parameters

参数特征值	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}
$E(RR_{s_i})$	0.94	0.74	0.25	0.23	0.57	0.85	0.23	0.84	0.56	0.12	0.79	0.87	0.86	0.73
$D(RR_{s_i})$	0.08	0.68	0.32	0.79	0.74	0.12	0.78	0.72	0.67	0.25	0.32	0.63	0.23	0.66
$F(RR_{s_i})$	0.075 2	0.503 2	0.08	0.181 7	0.421 8	0.102	0.179 4	0.604 8	0.375 2	0.06	0.252 8	0.548 1	0.197 8	0.481 8

对于雷达系统,经计算可得到最优故障预测参数集为 (s_2, s_8, s_{12}) 。而根据专家经验,推荐的预测参数集为 $(s_2, s_5, s_8, s_{12}, s_{14})$ ^[12]。因此,利用本文提出的方法,不仅可以选出最优的预测参数集,而且可以最少的预测参数来对设备的故障状态进行预测识别,从而降低了预测的成本和预测的复杂度。

2 电子装备故障预测参数门限值设定

利用上述方法可选取出最优的故障预测参数集,通过对故障预测参数实时监测,可以对航空电子装备进行故障预测。然而如何确定故障参数的门限值,即当信号值偏离这一门限值时,传感器报警,是另一大难题。

本文通过建立预测参数门限值统计模型,得到故障预测参数的门限估计值。在预测信号 s_i 变化区间上,假设某数值 x 为门限值,可以将样本分为信号数值小于 x 的危险样本集 $n_h = \{n | x(n) < x\}$ 和大于 x 的正常样本集 $n_l = \{n | x(n) \geq x\}$ 。分别计算出2个集合的相对危险度 RR_{s_i} 。依次取不同的数值 x 作为门限值,绘出危险样本集和正常样本集在不同门限取值时的相对危险度曲线。根据文献[13],相对危险度的置信区间如下:

$$e^{\ln RR - Z_{\alpha/2} S_{\ln RR}} < RR_{true} < e^{\ln RR + Z_{\alpha/2} S_{\ln RR}}$$
, 其中 $S_{\ln RR} = \sqrt{\frac{1 - a_{s_i/n_i}}{a_{s_i}} + \frac{1 - a/n}{a}}$, 对于 95% 的置信度, $Z_{\alpha/2} = 1.96$ 。

根据相对危险度置信区间的定义,可以计算并绘制出置信度为 95% 时,危险样本集和正常样本集在不同门限取值时,相对危险度的上限和下限曲线。危险样本集相对危险度下限与正常样本集相对危险度上限交点即为故障预测门限值。对于信号 s_8 ,依次取 $x = [11, 11.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14]$,在不同门限值时,危险样本集和正常样本集危险度变化趋势见图 3。

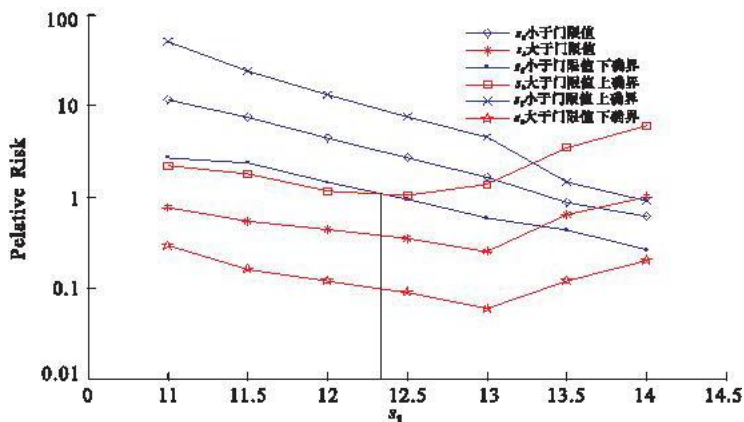


图 3 危险样本集和正常样本集不同门限值时危险度

Fig. 3 Relative risk of high - risk group vs non - high - risk group at different threshold

从图 3 可见,故障预测参数信号 s_8 取门限值 12.4 时,是区分危险样本集和正常样本集的上界。门限值越小,危险样本集和正常样本集的相关危险度差别越大,即航空电子装备发生故障的概率越大。门限值 12.4 的选取只是基于失效数据统计模型,在实际选取过程中,可以采用与产品的数学模型相结合的方法,来进一步精确门限值的选取值。

3 结论

针对目前电子装备故障预测面临的预测参数选取和门限值设定困难的问题,本文系统地论述了故障预测参数选取和门限值设置的方法和步骤。实例证明,利用该方法可选出最优的故障预测参数集和门限值,同时避免了繁琐的故障模式、故障状态和故障判据的分析,以及主观因素影响,实现了预测参数选取和设置的自动化,从而为电子装备故障预测提供了一种新的快速有效的预测参数选取和设置方法。

参考文献:

- [1] Jarrell D, Bond L. Physics - based Prognostics for Optimizing Plant Operations[J]. Sound and Vibration, 2006(2): 12 - 15.
- [2] Byington C S. Improving the Maintenance Process and Enabling Prognostics for Control Actuators using CAHM Software[C]// 2006 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2006, 8 - 10.

- [3] Kothamasu R, Huang S H, Verduin W H. System Health Monitoring and Prognostics——A Review of Current Paradigms and Practices[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(9): 1012 – 1024.
- [4] Jaw J. Recent Advancements in Aircraft Engine Health Management (EHM) Technologies and Recommendations for the Next Step[C]//Proceedings of Turbo Expo 2005. Reno – Tahoe, Nevada; 50th ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, 2005: 1 – 13.
- [5] Kirkland L, Pombo T, Nelson K, et al. Berghout Avionics Health Management; Searching for the Prognostics Grail[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Maryland; IEEE Press, 2004: 3448 – 3454.
- [6] Vichare N, Pecht M. Prognostics and Health Management of Electronics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 222 – 229.
- [7] Boodhansingh Anthony J, Kalgren Patrick W. Antonio Ginart; Power Supply Health Management — Deploying Prognostics Technology for Enhanced Weapon System Depot Support[C]//IEEE Aerospace and Electronic System Society IEEE Autotestcon Proceedings. Salt Lake City; IEEE Press, 2008: 104 – 109.
- [8] Cheng Shunfeng, Pecht Michael. A Fusion Prognostics Method for Remaining Useful Life Prediction of Electronic Products [C]//5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Bangalore, India; IEEE Press, 2009: 22 – 25.
- [10] Xie J, Pecht M. Application of In-situ Health Monitoring and Prognostic Sensors[C]// Proceedings of the 9th Pan Pacific Microelectronic Symp Exhibits Conference. Poland, Cracow: [s. n.], 2004: 1 – 6.
- [11] Deb S, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Multi-signal Flow Graphs: A Novel Approach for System Testability Analysis and Fault Diagnosis [J]. IEEE AES System Magazine, 1995(5): 14 – 25.
- [12] 许明. 某型飞机雷达自动测试系统设计及关键技术研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2008.
XU Ming. Research on Automatic Test Equipment and Key technology of Radar System [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [13] Glantz S A. Primer of Biostatistics[M]. New York: McGraw – Hill Professional, 2005.

(编辑: 徐楠楠)

Fault Prognosis Parameters Selection and Setting in Electronic Equipment

FANG Jia – yong¹, XIAO Ming – qing¹, HUANG Hong – wei¹, FU Xin – hua²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Aviation Staff Department, Guilin Air Force Academy, Guilin 541003, Guangxi, China)

Abstract: Fault prognosis is the key technique of PHM (Prognostic and Health Management). Aimed at the difficult problems of parameters selection and setting in fault prognosis of electronic equipment, the paper proposes a new method of parameters selection and setting in fault prognosis. Firstly, the parameter set which can reflect fault state of electronic equipment is extracted by using the multi-signal flow graphs model. By introducing the relative risk of biostatistics, the optimized parameters of fault prognosis are selected by using the data-driven method. The prognostic parameter threshold in the confidence level of 95% is got by building statistical model trend graph. The experiment validates that the optimized prognostic parameters can be quickly and effectively selected and set by the proposed method. Simultaneously the complicated analyses of fault mode, fault state, fault diagnosing bases and the influence of subjective factors are avoided.

Key words: fault prognosis; relative risk; prognostic scale; multi-signal flow graph