

doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2013.05.020

# 机载航电系统射频信道健康表征及影响评估<sup>\*</sup>

黄 鹤<sup>\*\*</sup>, 陈文豪, 张 弋

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘 要:**提出了基于失效模式影响及危害性分析(FMECA)、故障树分析(FTA)和历史案例的健康表征参数选取原则和方法,探讨了基于隐马尔可夫模型(HMM)和贝叶斯的健康表征方法及其应用。结合机载航电系统综合化射频信道架构,通过建立的模型对射频信道的健康影响进行了初步分析,得到了射频信道健康表征的优先参量。基于射频信道的健康表征参量和影响评估方法的研究对促进开展先进战斗机健康管理技术研究具有重要意义。

**关键词:**先进战斗机;航空电子系统;射频信道;健康管理;表征参数

**中图分类号:**V243      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2013)05-0628-06

## Health Characterization and Effect Evaluation of RF Channel in Airborne Avionics System

HUANG He, CHEN Wen-hao, ZHANG Yi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:**This paper proposes the principles and methods for selecting the health characterization parameters based on Failure Mode, Effects and Criticality Analysis(FMECA), Fault Tree Analysis(FTA) and historical cases. At the same time, it discusses the method and application of the health characterization parameters based on Hidden Markov Model(HMM) and Bayes. Considering the integrated RF channel architecture in airborne avionic system, this paper analyzes the health influence on RF channel by means of the built model and selected characterization parameters. The results are important for the technology research of advanced fighter health management.

**Key words:**advanced fighter; avionics system; RF channel; health management; characterization parameter

### 1 引 言

航电系统是战斗机的一个重要组成部分,现代战斗机的作战性能很大程度上与航空电子系统密切相关。近年来,随着航电系统的复杂度、功能和性能的提高,对其任务完成率和战备完好性要求也逐步增加,因此航电系统的自主保障维护需求也日益凸显,而健康管理技术是其自主保障维护的基础<sup>[1-5]</sup>。通过航电系统健康管理能够进一步提高系统的自主维护、保障决策和任务完成能力。

国外先进战斗机已经实现了航电系统的自主保障与维护,健康管理技术也已经在美军先进联合攻击战斗机中得到了验证和应用,通过该技术的应用进一步提升了维护和保障性能<sup>[6-9]</sup>。国内战斗机航电系统健康管理技术与国外相比存在巨大差距,对健康管理技术的研究还处在起步阶段,缺乏对航电系统健康表征方法、健康影响评估分析、健康管理系统设计以及相关验证与应用技术的研究。本文以航电系统中典型的射频信道为对象,研究健康表征和影响评估等方法,为实现飞机航电系统的健康管理奠定基础。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-03-02;修回日期:2013-04-25      Received date:2013-03-02;Revised date:2013-04-25

<sup>\*\*</sup> 通讯作者:hh2013hh@126.com      Corresponding author:hh2013hh@126.com

中国知网 <https://www.cnki.net>

• 628 •

射频信道的健康状况是指射频信道完成信号收发、通道切换、变频处理和预处理等所有功能的能力。完好的射频信道能够完成任务系统下达的所有既定功能, 并满足各项战术指标要求, 具有完整的系统功能。其次, 完好的射频信道还具时间持续性, 即在整个任务周期内能够完成各作战阶段的任务要求, 能够持续工作。由于战斗机执行的任务的环境具有情况变化大、机动性能高和任务突发等特点, 其航电系统可能经受高海拔高温差、高电磁干扰和强振动等因素的影响, 完好的射频信道需要在上述环境条件下正常工作, 且满足各项性能指标要求。

射频信道的健康表征是指通过对射频信道实时参数、历史数据、调试及实验过程等各个阶段收集的数据进行转化、融合和推理对射频信道的功能能力进行评估的方法。射频信道健康表征的基本原则是表征参量和方法能够准确、有效和全面的表征系统完成任务的能力, 主要可从功能完整性、时间持续性和环境适应性的反映三个方面进行评价。

## 2 表征参数选取

典型射频信道具有多参量、多类型等特点, 因此, 对射频信道的健康表征研究首先需要确定和分析表征参数集范围, 优化选择灵敏表征参量, 研究表征参数选取原则和方法; 其次, 根据优化的表征参量列表, 以及参量在系统功能和性能方面的重要性影响, 对表征参量的重要性或敏感性进行研究。

### 2.1 基于 FMECA 的选取方法

失效模式影响及危害性分析(FMECA)是系统可靠性分析的一个重要工作, 也是开展维修性、安全性、测试性和保障性分析的基础<sup>[10]</sup>。通过对系统在寿命周期各阶段的 FMECA 分析, 能够从不同角度发现系统存在的各种缺陷和薄弱环节。同时, 通过对这些薄弱环节的确定也可以更具针对性地选取相关检测参数, 作为系统健康评估的依据。

射频信道 FMECA 分析的主要信息来源是技术规范与研制方案中产品性能、环境条件、结构组成要求, 以及可靠性设计分析及试验阶段中的实验数据和使用维修中获取的故障模式、故障原理、故障机理、故障频度以及影响等。通过对各模块主要的故障模式和机理分析能够进一步确定相关健康的表征参量。

### 2.2 基于 FTA 的选取方法

故障树分析(FTA)又称失效树分析, 是一种对

复杂性系统进行可靠性、安全性分析的方法。通过采用图形演绎, 对可能造成功能故障的模块硬件、环境或人为因素进行分析, 把系统故障与导致该故障的各种因素形象地绘成故障图表, 直观地反映故障、元部件、系统及因素、原因之间的相互关系, 通过对系统故障的各种直接和间接原因(事件)分析, 把系统失效的各种因素与监测的表征参量联系起来。在系统使用阶段, 通过分析参量变化情况与故障树分析结果的逻辑对应关系, 可以帮助进行故障表征参数的优化选择和对系统的失效诊断, 为预测和评估系统的可靠性提供有益的数据。

FTA 还可以与 FMECA 相结合, 对系统进行更深入的分析。通过故障树分析定位故障模块, 同时可以对定位到模块的故障率进行计算分析, 在此基础上可选取有效的健康表征参数。

### 2.3 基于历史案例的选取方法

历史案例方法通过对系统历史实验数据、日常使用和维修维护数据的收集与积累, 进行基于案例的失效统计分析, 确定相关关键易损组部件和对应的表征参量。

#### 第一步: 关键元件的识别

根据历史案例和经验, 基于高失效率的失效率分析表可应用于关键元件的识别, 该表会列出各个器件的失效概率, 以划分器件的失效率等级。在大多数情况下, 基于历史数据就可以识别关键元件。同时, 也可在应力环境下根据加速寿命试验的结果进行识别。

#### 第二步: 失效模式和机理分析

导致故障的关键元件通常位于最底层, 一个元件的失效可能导致整个系统的功能故障。FMECA 是在第一步识别关键元件的基础上分析识别潜在的失效模式, 确定它们在系统运行中的作用。根据故障的模式、故障影响、严酷度和检测方法等分析, 找出高概率的故障模式和原因, 从而定位监测模块和对应表征参数。通过失效模式与机理的分析可进一步研究射频信道各模块的关键元件参量与失效原因之间的关系。

#### 第三步: 主要失效模式确定

根据可靠性数据, 可以进一步深入研究各失效模式在总失效中所占的比例, 对模块失效率进行初步排序。分析系统失效对任务完成率或功能性能的影响, 结合失效率数据确定系统各模块的主要失效模式和重要性, 分析各模块的故障敏感参数, 分析参数漂移对系统的影响, 确定出对退化敏感的电路特

性。通过对模块历史数据的分析,确定关键参数退化对系统健康的敏感程度。

### 3 表征参量的健康影响评估方法

射频信道主要是由大量的射频模拟电路和数字电路混合构成,基于表征参数的健康评估是一个十分复杂的问题,尤其是射频信道电路各模块状态参数的监测更是一个难题。另外,射频信道各功能模块电路中还存在大量的反馈回路和各元件的正常容差范围,这都大大增加了参数监测与健康评估的难度。但随着未来对先进战斗机综合性能要求的日益提高,射频信道的数模混合电路或射频模拟电路的诊断评估研究也显得日益迫切和重要。

#### 3.1 基于隐马尔科夫模型(HMM)的射频信道健康表征应用

采用 HMM 实现对射频系统基于表征参数的健康评估,HMM 的健康评估过程如图 1 所示。

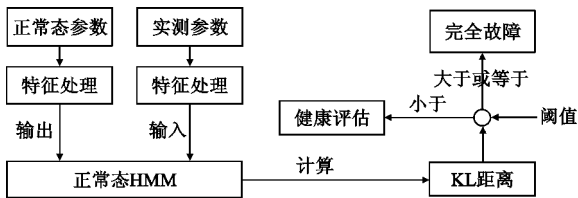


图 1 基于 HMM 的健康评估系统框图

Fig. 1 The structure of HMM-based health evaluation system

在进行 HMM 的健康评估前,先定义 KL (Kullback-Leibler)距离:设  $p$  是问题域  $U$  上的一个概率密度函数,另一个概率密度函数为  $q$ , $q$  是  $p$  的近似,则  $q$  和  $p$  之间的距离定义为

$$d_{KL}(p \parallel q) = \sum_{x \in U} p(x) \lg \frac{p(x)}{q(x)}$$

KL 距离的大小表示  $p$  和  $q$  之间的接近程度,若 KL 距离越小,表示  $p$  越近似于  $q$ ,当且仅当  $p = q$  时,KL 距离为 0,即当被测参数越接近于正常状态时 KL 距离值越小,反之 KL 距离值越大<sup>[11-12]</sup>。

射频信道的 HMM 健康评估即是通过表征参量的计算分析 KL 距离的一个过程。评估分析首先对组成各功能模块进行划分并对其进行建模与仿真,对模块参数的容差范围进行分析。健康评估前需要训练一个 HMM 来代表正常状态,其余各中间状态所对应的观测序列送入模型,由此计算出似然概率并获得相应的 KL 距离值,把微弱变化的早期故障过程转换为明显变化的 KL 距离来反映系统偏离正常态的程度,并与给定的阈值比较,从而估计系统的

健康状况。

##### 3.1.1 参数特征提取

在模块尚未完全失效的情况下对射频信道的状态监测并对特征参数值的提取是基于 HMM 评估的关键。由敏感性原则选取表征参量,通过建立的模型研究所选表征参量对射频信道性能参数的影响变化,例如,开关矩阵导通阻抗对信号的影响、变频模块参数漂移对信号频率变化的影响等。通过影响分析可选定相关参数进行健康评估,其具体思路如下:

- (1) 设选定参数为某一模块的电学参量  $v_1$ , 且其正常容差为  $\pm 1\%$ ;
- (2) 当  $v_1 \in [0.99X_n \sim 1.01X_n]$ ,  $X_n$  为其标称值,  $v_1$  在正常的容差变化范围内,健康指数为 1;
- (3) 当  $v_1 \in [1.011X_n \sim 1.015X_n]$ ,  $v_1$  值出现微弱偏离,健康指数为 0.9;
- (4) 当  $v_1 \in [1.016X_n \sim 1.02X_n]$ ,  $v_1$  值逐渐偏离正常态,健康指数为 0.8;
- (5) 以此类推,当  $v_1 \in [1.056X_n \sim 1.06X_n]$ ,  $v_1$  值极大偏离正常值,系统完全故障,健康指数为 0。

状态监测就是依据射频信道各模块的健康指数,根据实际需要决定其替换与否。状态监测与健康评估就是对表征参数在整个范围内(如  $v_1 \in [1.011X_n \sim 1.06X_n]$ )的变化进行研究,计算模块参数在各范围内所对应的 KL 距离,从而给出电路健康状况的准确估计。

##### 3.1.2 表征参数监测与健康评估设计

电路的早期故障可能会导致表征参数的微弱变化,直接根据此参数的变化很难估计系统的健康状况,并且仅用一次的状态观测值来估计电路的健康状况也是不准确的,故选择处理后的  $L$  个特征向量构成一组观测序列。利用正常时的特征来训练 HMM 并利用该模型对电路未知状态进行健康估计,将计算出的 KL 距离与阈值比较,以此判断射频信道偏离正常态的程度。

参数监测与健康评估的过程如下:在已知射频信道输入的情况下,将该电路系统工作在各种状态下的历史数据(可通过仿真、实验、外场等方式获取)经线性辨别分析(LDA)映射,并保留其中的降维映射矩阵,选择其中正常态的降维特征构造成观测序列来训练 HMM 并获得  $P(O_{\text{normal}} | \lambda)$ 。采样工作在相同输入情况下的同类射频系统的当前状态特征经降维映射矩阵映射后,输入已训练的 HMM 得到对应的  $P(O_{\text{unknown}} | \lambda)$ ,由  $[P(O_{\text{unknown}} | \lambda), P(O_{\text{normal}} | \lambda)]$ 就可计算出 KL 距离,根据其值大小

就可估计当前射频信道偏离正常态的程度;若 KL 很小说明系统状态越接近正常,随着 KL 的增大表明射频系统的健康逐渐恶化,若 KL 大于预定阈值则电路功能已完全失效,从而实现对射频系统的参数监测与健康评估。阈值依实际情况选取,若对电路系统性能要求越高则阈值就越小。

参数训练过程与健康监测评估流程如图 2 和图 3 所示。

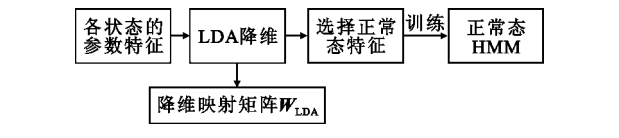


图 2 训练过程  
Fig. 2 Training process

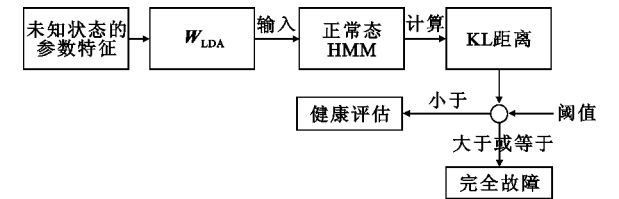


图 3 参数监测与健康评估过程

Fig. 3 Parameters monitor and health evaluation process

### 3.2 基于贝叶斯网络的射频信道故障建模与健康评估

#### 3.2.1 贝叶斯网络故障建模

贝叶斯网络的结构学习过程即属于故障建模过程,用于健康评估的贝叶斯网络各节点有明确的含义,它通常包含两类节点:具体故障节点和故障征兆节点。节点间的有向连接弧表示故障类型和征兆之间的因果关系,是故障诊断的定性描述。每个节点的参数值表示给定父节点状态时的该节点的条件概率,表征了故障类型与故障征兆之间的概率依赖关系,是故障诊断的定量描述。贝叶斯网络的图形化结构更加清晰地得知专家对系统故障状态的认知。设  $F$  表示整个故障集,则  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ ,  $m$  为故障样本集中的故障类型数。对于每类故障的数据,通过各测点数据并通过适当的特征提取,从而组成故障征兆样本集。设  $T$  表示整个故障征兆样本集,则  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,  $n$  为故障征兆样本集中元素的个数。由  $F$  和  $T$  就可以建立贝叶斯网络诊断模型<sup>[13-15]</sup>。

以典型射频信道为例简单介绍贝叶斯网络诊断模型的建模过程。射频信道由天线接口单元、开关矩阵模块、变频模块、预处理模块和电源模块组成,每个模块假设设置一个测点且测试相关表征参数

$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ , 可以获得其因果关系,见图 5。

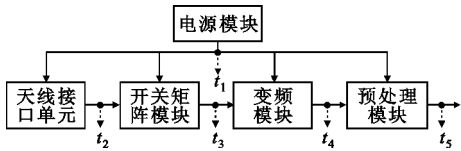


图 4 射频信道因果关系图

Fig. 4 The relation of each module in RF channel

该电路故障集  $F = \{\text{电源模块, 天线接口单元, 开关矩阵模块, 变频模块, 预处理模块}\}$ , 其故障征兆样本集  $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ , 其值设为正常、中等偏离及较大偏离 4 类。由图 4 建立起射频系统的贝叶斯网络模型的结构如图 5 所示,电源模块与节点参数  $t_1$  之间的有向弧表示电源模块一旦出现故障则会导致节点参数  $t_1$  (故障征兆) 的变化,其余有向弧含义类似。从该图可知任意子模块的故障均会导致射频信道的故障。只要获得 5 个测点的参数值,经贝叶斯网络推理即可推知故障模块的类型。整个射频系统由于各子模块和测点较多,故障类型与故障征兆之间关系错综复杂,依专家经验很难建立准确的贝叶斯网络诊断模型的结构,因此实际应用中需要利用各节点的实测数据,通过结构学习算法与专家经验相结合来获取网络结构。

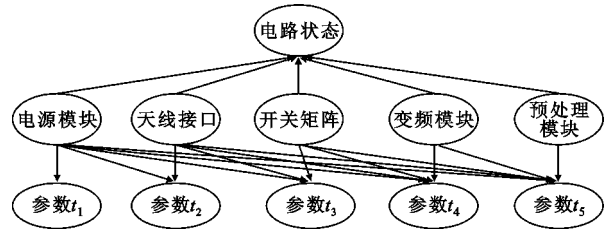


图 5 射频信道贝叶斯网络模型

Fig. 5 Bayes net model of RF channel

#### 3.2.2 贝叶斯网络的诊断步骤

射频信道基于贝叶斯网络的健康评估同样首先要获取射频信道正常态时的运行数据,更要有其出现早期故障时的数据,并应该已知故障类别。这样,由已知故障类别、故障发生时的运行参数、历史记录组成的数据库便构成训练、学习样本库。数据挖掘的任务就是从这些海量的杂乱无章的样本库中找出隐藏在其中的内在规律,提取出不同故障的各自特征,挖掘出有价值的信息,应用于健康评估。

通过确定网络结构,各故障样本集和各征兆样本集,初始化网络参数,给出各故障发生的先验概率,进行网络的推理、运算,最终得到射频信道发生各种故障的可能性大小,进而对系统健康状态进行

评估,具体步骤设计如下:

(1)依据电子系统的历史记录数据,区分开正常态和异常态的运行数据。对异常态数据又分为不同故障类型的数据,根据系统运行的历史记录,记下各故障类型;

(2)故障样本集和故障征兆样本集组成用于网络模型学习的故障样本库。对于具有完整数据的故障样本数据库,贝叶斯网络采用最大后验估计方法来更新贝叶斯网络的各故障征兆节点变量的条件概率值;对于具有丢失数据的故障样本库,贝叶斯网络采用其他相关算法来更新贝叶斯网络的各故障征兆节点变量的条件概率值。增加学习样本的数量,会使各故障征兆节点变量的条件概率值更合理;

(3)采集射频信道当前运行的数据并适当的特征提取,获得一个测试样本;

(4)根据各故障征兆节点所对应变量的取值规则,就可得到符合各故障征兆节点所对应变量的取值要求的数据,并输入系统处理,贝叶斯网络就会采取一定的推论法则,计算出射频信道发生各类故障的可能性大小,进而对健康状态进行评估。

5 典型射频系统健康表征影响分析

对射频信道的健康表征影响分析采用的技术方案如图 6 所示。

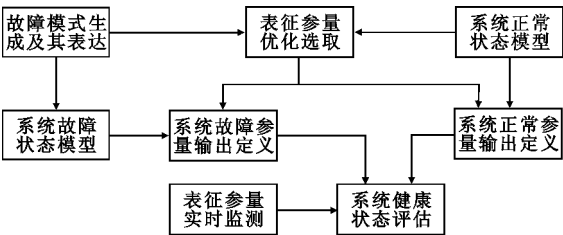


图 6 射频信道的健康表征影响分析方案  
Fig.6 The scheme of RF channel health analysis

通过对典型射频信道失效模式的分析可以得到主要模块的失效影响、失效形式表征,以及能够反映系统故障状况的健康表征参数。射频信道各模块参数类型和数量较多,在实际的表征应用中需要按照表征参数优化选取原则和方法进行优选。通过参数的筛选和添加形成最终的优化表征参数。

射频信道故障模式确定方法主要采用 FMECA 和历史案例方法,同时辅助结合 FTA 以及专家意见确定各模块功能的主要失效模式。基于参数的选取原则和重要度对表征参量进行优化选择,经过对上述参数的初步优选到的典型射频健康表征主要参数

如表 1 所示。

| 表 1 射频信道模块初步优选表征参数   |  |   |
|--|--|---|
| Table 1 Selected characterization parameters of RF channel |  |   |
| 模块类型   | 典型故障模式   | 可用表征参数  |
| 电源模块   | 转换功能失效;<br>过压、欠压;<br>开路、短路   | 电流、电压、效率                                      |
| 天线接口   | 天线支路信号放大分配选择功能失效;输出功率超出合理范围;<br>接口故障;电平转换电路故障;晶振故障;<br>内部电源转换故障;过压、欠压、过流、过热      | 功放模块发射功率;<br>功放模块驻波比;<br>功放模块电压、电流;<br>温度     |
| 开关模块   | 宽带激励选择功能失效;<br>功分器故障;<br>隔离器故障;<br>开关切换错误;<br>接口故障;<br>供电不稳                      | 模拟通道输出端电压;<br>模拟电源输入电流、电压;<br>开关通道隔离度         |
| 变频模块   | 控制接口功能失效;电平转换电路故障;晶振故障;<br>本振故障;本振失锁、频率偏移;<br>内部电源转换故障;过压、欠压、过流、过热               | 本振信号频率、相位、幅度;<br>本振锁相环锁定参数;<br>模拟电源输入电流、电压;温度 |
| 预处理模块  | 通道串并/并串转换电路故障;<br>通道 FPGA 故障;<br>通道 DSP 故障;<br>时钟源故障;<br>程序加载管理电路故障;<br>电源转换电路故障 | 电压、电流;<br>JTAG 参数;<br>温度                      |
| 射频信道   | 接收、发射功能失效;<br>上、下变频功能失效;<br>预处理功能失效;<br>电源电压变化功能失效                               | 接收增益;<br>灵敏度;<br>发射功率;<br>驻波                  |

系统健康状态的评估方法采用前面叙述的 HMM 和贝叶斯网络方法,同时根据实际系统分析、实验或验证效果再优选或研究可行的健康评估理论原理。根据健康评估输入要求,对系统状态的表征参量进行定义,最终依据实际表征参量的测试完成系统健康状态的评估。

5 结束语

本文主要针对战斗机航电系统典型射频信道健康表征等基础性问题进行探讨,研究了典型射频信道用于健康表征的参量选取方法和步骤。同时,对基于 HMM 和贝叶斯网络的射频信道健康表征算法方法进行了理论研究。通过表征参量选取和健康评估研究得到了射频信道的初步优选表征参量,为深入研究电子系统表征参数的特征提取、健康状态评

估、性能趋势预测和系统重构方法奠定基础。典型射频信道健康表征参量和影响评估方法的研究对促进开展先进战斗机故障预测与健康管理工作具有重要意义, 其有助于在航空电子系统缩短与军事强国间的差距, 提高战斗机的任务完成率和战备完好性, 增强战斗机航电系统的后勤保障和维护能力。

## 参考文献:

- [1] 郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 等. 故障预测与健康管理工作综述[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1213—1219.  
GUO Yang-ming, CAI Xiao-bin, ZHANG Bao-zhen, et al. Review of Prognostics and Health Management Technology [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(9): 1213—1219. (in Chinese)
- [2] 曾声奎, Pecht M G, 吴际. 故障预测与健康管理工作(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 627—632.  
ZENG Sheng-kui, Pecht M G, WU Ji. Status and Perspectives of Prognostic and Health Management Technologies [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 627—632. (in Chinese)
- [3] 张嘉钟, 张利国. 航空设备故障预测与健康管理工作设备[J]. 航空制造技术, 2008, 33(2): 40—43.  
ZHANG Jia-zhong, ZHANG Li-guo. Aviation Equipment Faults Prognostic and Health Management Equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 33(2): 40—43. (in Chinese)
- [4] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理工作系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1762—1767.  
SUN Bo, KANG Rui, XIE Jin-song. Research and application of the prognostic and health management system [J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(10): 1762—1767. (in Chinese)
- [5] 梁旭, 李行善, 张磊, 等. 支持视情维修的故障预测技术研究[J]. 测控技术, 2007, 26(6): 5—8.  
LIANG Xu, LI Xing-shan, ZHANG Lei, et al. Survey of Fault Prognostics Supporting Condition Based Maintenance [J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(6): 5—8. (in Chinese)
- [6] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: potential impact on aging aircraft problems [C]//Proceedings of 2002 IEEE Aerospace Conference: Big Sky, MT; IEEE, 2002: 3021—3026.
- [7] 张秋菊, 张冬梅. 电子系统故障预测与健康管理工作技术研究[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 19—24.  
ZHANG Qiu-ju, ZHANG Dong-mei. Study on Prognostic and Health Management of Electronic System [J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 27(1): 19—24. (in Chinese)
- [8] Biagetti T, Sciubba E. Automatic diagnostics and prognostics of energy conversion processes via knowledge-based systems [J]. Energy, 2004, 29(12): 2553—2572.
- [9] Ponci F, Cristaldi L, Faifer M, et al. Innovative approach to early fault detection for induction motors [C]//Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Cracow; IEEE, 2007: 283—288.
- [10] 石君友, 纪超. 扩展 FMECA 方法应用研究[J]. 测控技术, 2011, 30(5): 110—114.  
SHI Jun-you, JI Chao. Study on Enhanced FMECA Method Application [J]. Test and Control Technology, 2011, 30(5): 110—114. (in Chinese)
- [11] 钱彦岭. 测试性建模技术及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002: 2—13.  
QIAN Yan-ling. Testability Modeling Technology and Its Application Research [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002: 2—13. (in Chinese)
- [12] 许丽佳, 龙兵, 王厚军. 混合训练的 DHMM 及其在发射机状态检测中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1661—1665.  
XU Li-jia, LONG Bing, WANG Hou-jun. Hybrid Training DHMM and Its Application to Check Transmitter Power [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(7): 1661—1665. (in Chinese)
- [13] 周韶园. 基于 HMM 的统计过程监控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 14—16.  
ZHOU Shao-yuan. Statistical Process Monitoring Via Hidden Markov Model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 14—16. (in Chinese)
- [14] 慕春棣, 戴剑彬, 叶俊. 用于数据挖掘的贝叶斯网络[J]. 软件学报, 2000, 11(5): 660—666.  
MU Chun-di, DAI Jian-bin, YE Jun. Bayesian Network for Data Mining [J]. Journal of Software, 2000, 11(5): 660—666. (in Chinese)
- [15] 许丽佳, 王厚军, 龙兵. 贝叶斯网络在电子系统故障诊断中的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(8): 194—197.  
XU Li-jia, WANG Hou-jun, LONG Bing. Study on fault diagnosis of electronic system using Bayesian network [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(8): 194—197. (in Chinese)
- [16] 王承. 基于神经网络的模拟电路故障诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.  
WANG Cheng. Study on Fault Diagnosis in Analog Circuits Based on Neural Networks [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. (in Chinese)

## 作者简介:

**黄鹤** (1970—), 男, 四川巴中人, 高级工程师, 主要研究方向为机载航电射频总体;

HUANG He was born in Bazhong, Sichuan Province, in 1970. He is now a senior engineer. His research concerns the integration of airborne avionics RF system.

Email: Hh2013hh@126.com

**陈文豪** (1983—), 男, 四川遂宁人, 2002 年于西安电子科技大学获博士学位, 主要从事机载航电射频故障征兆及健康管理研究;

CHEN Wen-hao was born in Suining, Sichuan Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2002. His research concerns fault prognostic and health management of airborne avionics RF system.

**张戈** (1983—), 男, 四川成都人, 工程师, 主要从事机载航电射频测试性和健康管理研究。

ZHANG Yi was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1983. He is now an engineer. His research concerns testability and health management of airborne avionics RF system.