

综合航空电子系统故障预测问题研究

丛伟, 景博

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 航空电子系统正在向综合化方向发展,对故障预测技术提出了新的挑战。剖析了航空电子系统的综合化特征,综述航空电子产品故障预测结构,包括基于模型结构、数据驱动结构和综合预测结构,并讨论了这些结构的共性特征及其在航空领域的典型应用。在此基础上,依据综合化特征需求和航空电子产品故障预测结构的适用性,分析了综合航空电子系统故障预测面临的问题,并提出了初步解决思路。

关键词: 综合航空电子系统; 故障预测; 失效分析; 剩余使用寿命

中图分类号: V24; TP206.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)05-0053-05

Failure Prediction of Integrated Avionic System

CONG Wei, JING Bo

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The avionic system is developing towards integration, which brings a new challenge to failure prediction technology. Integration features of the avionic system were analyzed and structures for failure prediction of avionic products were presented, including model-based structure, data driven structure and integrated prediction structure. Common features of these structures and their typical application in the field of aviation were discussed. On the basis of which, and according to requirement of integration features and the applicability of structures for failure prediction of avionic products, some problems facing the failure prediction of integrated avionic system were analyzed, and preliminary solutions were proposed.

Key words: integrated avionic system; failure prediction; failure analysis; remaining service life

0 引言

综合航空电子系统(简称综合航电系统)是现代战机的“中枢神经”,承载着通信导航识别、目标探测及电子战等大部分任务功能。同时,综合航电系统也是电子产品密集型系统,任务功能由电子产品支持实现。战斗机在复杂的条件下飞行,使其呈现复杂的不确定性,导致综合航电系统的工作品质恶化,特别当航空电子产品出现突发性故障或失效时,往往造成严重的安全事故。

因此,在通常的避错和被动式容错等技术手段上,大力发展和应用自主式故障预测技术,设计实时鲁棒的故障预测系统,一方面使飞行员准确地预知各种可能发生的故障,采取必要措施避免事故的发生;另一

方面辅助地勤人员在准确的时间实施准确的维护策略,增强飞机的生存能力。

本文概述综合航电系统含义和4个方面综合化特征,总结电子产品的故障预测结构,对比分析基于模型、数据驱动及综合预测3种结构的应用领域及共性特征,针对“综合化”本质特征需求,探讨综合航电系统的故障预测结构面临的挑战。本文研究的目的在于为我国综合航电的故障预测技术进行初步的探索。

1 综合航电系统含义及综合化特征概述

1.1 综合航电系统含义

尽管综合航电系统是个随处可见的高频用词,但至今仍然没有一个普遍认可的严格定义。人们往往出于各种不同的研究目的和表述需求,将其或抽象、或具体、或宽泛、或窄化地应用于各类场合。在故障预测领域,文献[1-3]认为,综合航电系统是军机上所有电子设备的总称,该定义强调了单一的航空电子设备,而非系统层面的内涵。为此,本文引用文献[4]的定义,综合航电系统是飞机电子系统有效综合的技术,以信息理论及先

收稿日期:2012-05-09 修回日期:2012-07-12

基金项目:国防预研基金项目(9140A17020307JB3201)

作者简介:丛伟(1973-),女,辽宁铁岭人,博士生,讲师,研究方向为综合航电、检测技术与自动化装置。

进电子技术为基础,采用系统工程的方法,在飞机物理结构空间中,将探测、通信、电子战等功能及相应的电子设备,通过机载网络和软件等技术组合成为一个有机整体,以达到系统资源高度共享和整体性能大幅度提高的目的。

该定义强调,综合航电系统^[5](如图1所示)是具有“功能-组成-结构”的统一实体,功能体现在存储管理、外挂管理、通信导航识别以及目标探测等作战任务,组成表现为雷达、电子战、操控设备、射频设备以及综合核心处理机(ICP)等物理实体,结构上,一方面内化为物理实体间的相互联系和相互制约关系,另一方面外显为各组成部分的综合和资源共享受。

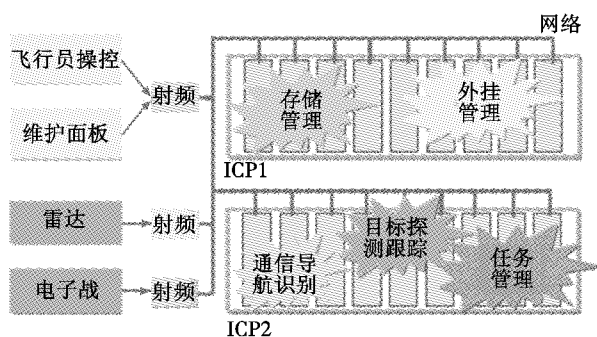


图1 综合航空电子系统结构

Fig. 1 Integrated avionic system architecture

1.2 综合化特征

1) 传感器信息综合。

综合航电系统传感器高度综合(如:F-35^[6]只保留了13根射频天线),形成由射频传感器、综合射频孔径和综合光电等系统构成的射频传感器网络,为CNI、电子战和雷达共用,主要采集射频、光电以及机外信息,用于通信导航、电子战、目标探测识别与跟踪等。

2) 传输通道统一化。

全系统打破了联合式航电结构中多种数据总线(如ARINC429、MIL-STD-1553B、PI、TM等)并存的格局,采用统一的航电网络,实现信息的传输和交互。航电网络利用多个逻辑链路使各个分区共享一个物理链路,并保证关键逻辑链路的带宽和实时性不受其他逻辑链路影响。

3) 信息处理通用化。

硬件方面将联合式航电系统中子系统的处理能力综合为以ICP^[7-8]为核心的综合处理单元,包括数据处理模块(DPM)、图形处理模块(GPM)、信号处理模块(SPM)、网络支持模块(NSM)、电源模块(PPM)和大容量存储器模块(MMM)。软件方面则外化为数据、信号、图像等处理算法和灵活的调度算法,主要用于处理执行传感器信号处理和数据处理,包括传感器融合、态势评估、进攻作战和防御响应管理等功能。

4) 显示控制综合化。

信息显示控制主要表征为人机接口,一方面为飞行员提供信息综合处理结果,包括传感器、武器、导航、战术态势等信息,另一方面按照飞行员的指令统一调度系统资源,实现任务功能。

2 故障预测结构现状及适用性分析

2.1 故障预测结构现状分析

目前对电子产品故障预测问题的研究存在3种主要的求解思路:基于模型的结构、数据驱动结构和综合结构。

2.1.1 基于模型的结构

基于模型的结构(Structure Based on Model, SBM)采用数学方法建立电子产品的降级过程与物理失效模型,通过分析系统寿命周期载荷,评估产品损伤程度和剩余寿命。根据模型粒度不同,分为系统模型和失效物理模型(PoF)两类。

1) 系统模型。

典型的系统模型结构^[9-10]如图2所示。

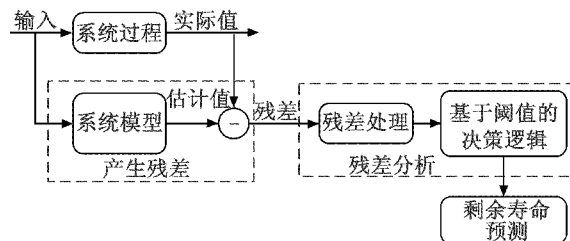


图2 系统模型预测结构

Fig. 2 System model prognostic structure

利用数学方法构造系统模型,输入载荷的同时作用于系统模型和真实的系统过程,通过分析观测值与估计值的残差,利用基于阈值的决策逻辑预测剩余寿命。文献[10]认为,多数产品物理失效和性能失效都发生在性能首次超过失效阈值时,即一旦产品的劣化过程 $Y(t)$ 达到某个特定的水平 ξ 时,产品失效,因而,系统模型法的失效检测可定义为产品性能退化的样本路径 $Y(t)$ 超过 ξ ,即

$$T = \inf\{Y(t) \geq \xi\} = \{t | Y(t) \geq \xi\} \quad (1)$$

式中, $Y(s) \leq \xi, 0 \leq s \leq t$ 。

2) 失效物理模型。

失效物理(PoF)模型^[11]利用系统生命周期载荷条件、产品的几何属性以及历史维护记录等数据确定失效模式,建立产品失效模型,评估产品性能退化趋势。PoF模型包括故障模式、机制及影响分析(FMMEA)、特征提取和RUL估计等过程,如图3所示。

为建立PoF模型,需要在电子产品中嵌入一个或多个传感器来检测外部载荷。电子产品载荷包括温度、湿度、振动、电磁辐射等多方面,详见文献[12]。

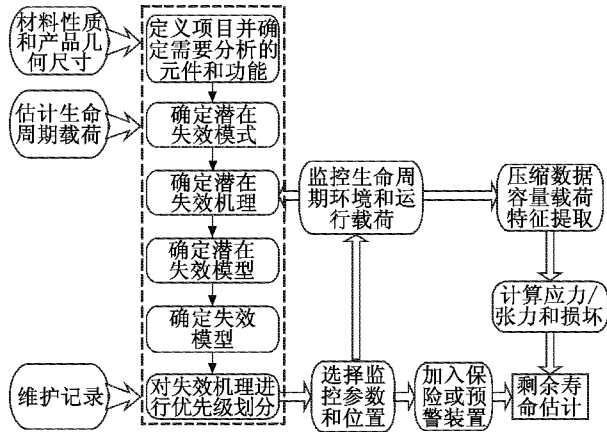


图 3 失效物理模型预测结构

Fig. 3 Prognostic structure of failure model physics

PoF 模型的另一实现方法是在产品中安装预警装置^[13-14]。预警装置可对特定故障机制导致的故障提供预警,预警装置的无故障工作时间(MTTF)可根据实际产品的 MTTF 进行校准。预警装置安装在实际产品中,与实际产品承受相同的应力,如电压、电流、温度、湿度和辐射等,但是预警装置的故障早于实际产品故障发生,从而实现预警目的。

2.1.2 数据驱动结构

数据驱动结构^[15-16](Structure of Data Drive, SDD)通过将传感器嵌入到电子产品中,搜集、监测并提取反映产品降级状态的特征参数,利用预测算法估计系统降级趋势。通常包括特征参数选取、特征参数监测和处理、特征参数趋势预测和故障识别以及状态评估与寿命预测 4 部分,如图 4 所示。

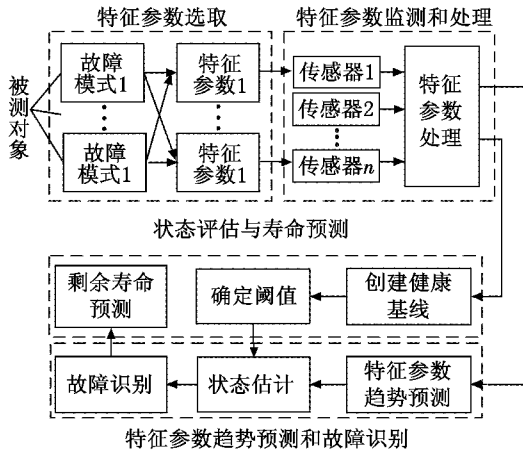


图 4 数据驱动预测结构图

Fig. 4 Prognostic structure of data driving

特征参数是指表征产品健康/故障状态的性能参数,与待测对象的故障模式一致,并正确反映待测对象的各种故障情况;特征参数监测和处理就是采用传感器对特征参数进行连续测量,并进行滤波及变换等预处理,从传感器数据中提取特征参数值;特征参数趋势预测和故障识别则采用 ARMA 时间序列、灰色预测等

相关技术,依据 t 时刻特征参数的变化预测 $t+n$ 时刻的特征参数值;状态评估与寿命预测是根据 $t+n$ 时刻的特征参数值,采用如特征参数阈值、主元分析等方法^[17-21]确定特征参数变化趋势。

2.1.3 综合结构

如图 5 所示,综合结构^[22](Integrated Structure, IS)综合运用 SBM 和 SDD,采用 SDD 提取特征参数,利用模型分析特征参数的变化趋势,推断产品未来状态。

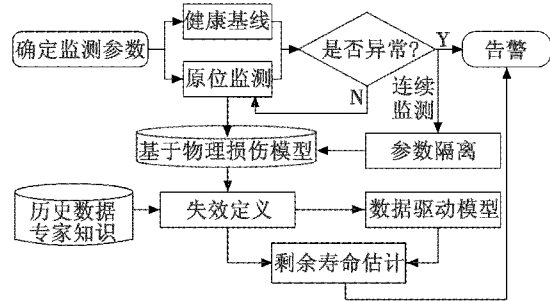


图 5 综合的预测结构

Fig. 5 Integrated prognostic structure

确定监测参数:不仅要确定表征系统健康状态的特征参数(如工作和环境载荷及性能参数等),也要确定健康基线数据集,基线数据不能包括任何异常,否则会影响健康的系统行为定义,导致错误告警。

异常探测:利用异常探测技术分析监测数据,与健康基线比较发现异常。

故障参数隔离:隔离造成异常的关键参数,隔离的参数作为物理模型的输入,由物理模型进一步分析失效原因、确定失效类型。

RUL 预测:利用失效模型知识提取失效阈值等信息,分析关键参数随时间变化趋势,并估计关键参数到达失效阈值的时间。

2.2 应用领域及共性特征分析

2.2.1 应用领域

不同的故障预测结构以其各自优势广泛应用在航空、航天、核电站等领域,航空方面的典型应用^[5-22]详见表 1。

表 1 故障预测结构典型应用实例

Table 1 Typical application cases of prognostic structures

研发机构	方法	应用实例
BAE 系统公司	利用震动特征和引擎速度变化作为失效征兆	飞机引擎
波音公司	利用历史趋势和结果数据及实时飞行数据,内嵌决策支持工具	战斗机、直升机、商用飞机、飞机布线系统
霍尼韦尔	利用引擎性能参数的衰退趋势,实现失效的早期预警	喷气式飞机引擎,直升机,飞机和空间站
Impact 技术公司	使用寿命消耗监测法,将失效过程和物理损失模型相关联	航空电子产品, GPS 系统,飞机传动装置

续表

研发机构	方法	应用实例
洛克希德 马丁	未公开	JSF 飞机、雷达系统、飞机传动装置
史密斯航宇 公司	利用奇异值分解、主元分析和神经网络技术用于非线性多元分析和异常探测	航空电子系统,直升机引擎和传动装置等
GMA 公司	利用嵌入式自诊断综合电路板,监测电压、电流等电参数,显示潜在失效	航空电子产品的电路板
艾默生公司	使用 I ² C 总线监测电压、电流和温度,当特征参数超过安全工作范围时停止输出	AC/DC 供电系统
诺斯洛普格 拉曼公司	未公开	JSF 飞机、直升机传动装置、空间站
锐拓集团	使用内嵌的预警单元作为电路板失效早期预警	变压器(MOS-FETS),半导体

2.2.2 共性特征分析

1) 故障预测粒度为航空电子产品分级。

文献[19-21]将航空电子产品故障预测粒度分为元器件级、模块级和系统级3级。目前已有的故障预测结构,仅适用元件级和部件级的故障预测,不能满足系统级故障预测研究。

2) 依赖失效数据和先验知识。

上述结构对产品健康数据、失效数据、工况数据、几何属性以及维护记录的依赖性较强,具体表现为:建模时依赖产品/系统知识和运行至失效的全部数据建立产品/系统模型,正确反映故障趋势。SDD 依靠历史数据确定特征参数关系、评价特征参数变化。

3) 针对特定故障机制建模。

SBM 依据产品特定故障机制建模,反映单一载荷强度与产品损伤状态间的关系。同样,特征参数仅限于电子产品在某一应力(如时间)条件下的故障状态。如果多载荷存在耦合关系,而且系统/产品损伤程度不是单一载荷损伤程度的简单叠加时,损伤模型的建立及特征参数提取将变得非常复杂。

4) 不确定性表征不完整。

电子产品故障预测的不确定性因素如图6所示。

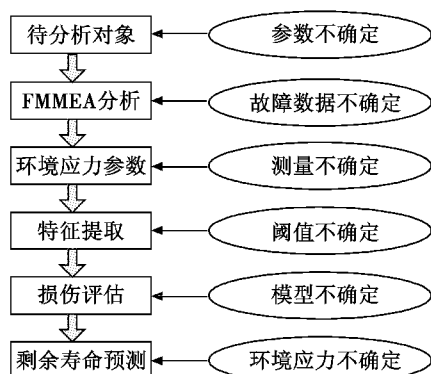


图6 电子产品故障预测的不确定因素

Fig.6 Prognostic uncertainties of electronic product

已有3种结构将不确定性因素看作随机干扰,或

混杂在输入参数中,或作为随机变量进行分析,这种方法对模型和测量引起的随机干扰有效,但不适用于参数、失效标准及未来应力中存在的 uncertainty。

3 面临的问题与挑战

引言部分已经指出,综合航电系统既是一个安全性关键系统,也是一个电子产品密集型系统。由此,开展综合航电系统故障预测结构和方法研究,航空电子产品出现故障或失效不影响综合航电系统乃至整个飞机的安全性。

本文谨慎认为,航电系统综合化的本质特征使现有故障预测结构和方法研究面临的挑战,可归纳为以下5个方面。

1) 综合航电系统的复杂性加大了故障预测结构的研究力度。

尽管层次化结构、开放式特征^[23]等在一定程度上降低了综合航电系统的复杂性,但由于硬件高度综合共享,应用软件只要获取相应的配置就可在任意处理模块上运行,综合区域^[5]的形成是动态的,并且综合区域利用的资源可能相互交错,因而一旦系统出现故障甚至失效,就难以界定出是哪个硬件还是软件出现了故障,甚至可能软硬件都没有出现故障,而是二者在特定环境下的交互作用引发了系统失效。因此,进行故障或失效研究的对象将是整个综合航电系统,这个粒度较粗,可想而知研究的难度也将非常大。

2) 故障源凸显分布式趋势。

综合航电系统是一个典型的分布式网络,DPM、GPM 和 SPM 等节点都具有自主的信息处理能力。在分布式环境中,故障预测信息主要有3类:一是本机射频传感器网络信息,包括 CNI、EW 等信息;二是通过数据链得到的地面指挥、战场态势信息;三是飞行员的操控信息。从逻辑上看,这些信息为整个系统共有,但物理上分散存储在多个节点(如 DPM、GPM、NPM),即存在多个副本。因此,在故障预测信息表述方面,不仅要着重解决同一数据对象副本的空间一致性问题,更要解决因网络传输、节点处理时间延迟等原因造成的数据时间不一致性问题,向故障预测结构提供统一的数据视图。

3) 故障传播路径多维化。

系统综合化和资源共享使综合航电系统的各模块、传感器、显示控制以及飞行员间构成闭环结构,在这种结构中,系统的异常状态通常并非都是在发生故障的设备处被检测出来,它可能会导致其他模块出现故障,这种行为称为故障传播^[24]。例如,多模块共享射频信息,若一个射频设备出现故障,则会影响到利用该射频信息的其他模块的信息处理结果。多分区共享处

理器时间,若一个分区恶意占用处理器时间,则会导致其他分区崩溃。

在现有技术,综合描述信息的时间应力模型和空间传播模型,确定系统的故障传播关系、分析输入系统中发生的故障在传播过程中的危害程度、故障传播结果拟合等问题,实现故障对多角度、多参数预测,也是航电系统预测结构要解决的主要问题。

4) 失效数据表现不完整性。

对失效数据、工况数据及历史数据的依赖制约了现有预测结构在综合航电系统中的应用,部分原因是:对于综合航电系统这样的复杂工程系统,进行故障实验的代价高、危险性大。一般情况下只能得到系统在正常运行时的状态数据,但无法得到系统故障运行时的状态数据;或者仅能得到系统发生某些故障时的状态数据,但无法得到系统发生所有故障的状态数据。

一方面要研究在没有系统故障数据情况下,如何判别是否有故障发生;另一方面在系统故障数据不完整时,如何判别发生的是已知故障还是未知故障。此外,电子产品故障预测的现状往往是系统有数学模型但不精确或者有先验知识但不充分,基于已有技术研究综合航电系统的预测结构,也是要进一步研究的问题。

5) 工作环境呈现不确定性。

综合航电系统工作环境的复杂性往往使产品的结构和性能特征参数发生改变,这就要求故障预测方法必须适应环境变化,提高预测结果的准确度。虽然已有方法均不同程度地考虑了不确定性问题,但在实施过程中仍面临着两方面挑战^[20-21]:一是缺少不确定模型,用于分析不确定因素的影响,尤其是分析训练数据的数量和质量对不确定性的影响程度;二是预测结果的优化,预测结果是维修决策的依据,如果预测结果指出某产品将在未来的10~100 h内失效,很难依据这样的结果制定维修决策。因此,要考虑不确定结果的优化问题,为维修决策提供支持。

4 结束语

综合航空电子系统是目前机载航空电子系统发展的最高阶段,其特征和优势已经在美国四代机上得到充分展现和发挥,也为我国四代机综合航电的研制工作提供了参考依据。故障预测技术是四代机PHM体系结构的重要组成部分,也是保护航电系统乃至战机安全性、生存性等多方面因素的重要技术之一。

文献[25]强调,综合航电系统应采用系统论方法构建,故障预测技术也应在此框架下采用自顶向下策略统筹规划。本文仅从综合化和资源共享方面试探地提出了在综合航电系统中实施故障预测面临的挑战,

今后要着重研究这些问题的求解方法,此外,故障预测体系结构也是要关注的问题。

参考文献

- [1] 景博,黄以锋,张建业. 航空电子系统故障预测与健康管理技术现状与发展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(6):1-6.
- [2] 赵宁社,翟正军,王国庆. 新一代航空电子综合化及预测与健康管理技术[J]. 测控技术,2011,30(1):1-5,9.
- [3] XU Jiuping, XU Lei. Health management based on fusion prognostics for avionics systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3):428-436.
- [4] 熊华钢,王中华. 先进航空电子综合技术研究[M]. 北京:国防工业出版社,2009:1-2.
- [5] NATO. STANAG 4626-2005 modular and open avionics architecture (Part VI: System management) [S]. North Atlantic Treaty Organization, 2005:25-34.
- [6] MOIR I, SEABRIDGE A. Military avionics systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2006:120-122.
- [7] 霍曼,邓中卫. 国外军用飞机航空电子系统发展趋势[J]. 航空电子技术,2004,35(4):5-10.
- [8] NATO. STANAG 4626-2005 modular and open avionics architecture (Part I: Architecture) [S]. North Atlantic Treaty Organization, 2005:18-15.
- [9] VACHTSEVANOS G, LEWIS F L, ROEMER M, et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems [M]. New York: John Wiley & sons, Inc., 2006:45-51.
- [10] LIU Jianbo, DJURDJANOVIC D, MARKO K A, et al. A divide and conquer approach to anomaly detection, localization and diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(8):2488-2499.
- [11] Time-dependent dielectric breakdown (TDDB) prognostic BIST cell[S]. Ridgetop Group Inc., 2006:123-136.
- [12] SAHA B, GOEBEL K, POLL S, et al. Prognostics methods for battery health monitoring using a Bayesian framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(2):291-296.
- [13] MATHEW S, DAS D, OSTERMAN M, et al. Virtual remaining life assessment of electronic hardware subjected to shock and random vibration life cycle loads[J]. Journal of the IEST, 2007, 50(1):86-97.
- [14] KALGREW P W, BYINGTON C S, ROEMER M J. Defining PHM, a lexical evolution of maintenance and logistics [C]//IEEE Autotestcon, 2006:353-358.
- [15] CHANDOLA V, BANERJEE A, KUMAR V. Anomaly detection: A survey [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2009, 41(3):34-38.

5 结论

本文针对航空电子光纤通道网络,给出了硬实时偶发、硬实时周期通信任务的端到端延迟保证路径分配方法。该方法采用共轭网络演算方法分析各数据流最坏情况下端到端的延迟上限,解级联服务曲线问题仅需要在共轭变换域中进行“乘法”(相当于常规的加法),方便了寻找最优路径算法中路径“长度”的计算。通过实例仿真表明,采用上述方法得到的路径分配方案有利于保证高优先级任务的时延上限。此方法可用于航空电子光纤通道的网络设计。

参考文献

- [1] 熊华钢,王中华. 现代航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] CRUZ R L. A calculus for network delay, Part I: Network elements in isolation[C]//IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):114-131.
- [3] LE BOUDEC J Y, THIRAN P. Network calculus: A theory of deterministic queuing systems for the Internet [M].

(上接第 14 页)

- [6] 黄仁全,靳聪,贺筱军,等. 自适应局部增强微分进化改进算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011, 12(3):84-89.
- [7] WESTMARK V R. A definition for information system survivability [C]//Proceeding of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Science, Hawaii, USA, 2004:428-437.
- [8] 孙敏. 网络安全宏观态势评估与预测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [9] ZHANG Qinghua, BENVENISTE A. Wavelet networks[J].

(上接第 57 页)

- [16] CHANDOLA V, MITHAL V, KUMAR V. Comparative evaluation of anomaly detection techniques for sequence data [C]//The 8th IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008:743-748.
- [17] 张德利. 基于贝叶斯网络的故障智能诊断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [18] 王巍,崔海英,黄文虎. 基于故障树最小割集和最小路集的诊断方法研究[J]. 数据采集与处理,1999, 14(1):26-29.
- [19] 谭天乐,宋执环,李平. 基于粗糙集和故障诊断方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(1):47-50.
- [20] 吴希军. 基于主元分析方法的空调系统传感器故障诊断研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

Berlin: Springer-Verlag, 2001.

- [4] HISAKADO T, OKUMURA K, VUKADINVIC V, et al. Characterization of a simple communication network using Legendre transform[C]//IEEE Int. Symp. Circuit and Systems, Bangkok, Thailand, 2003:25-28.
- [5] FIDLER M, Recker S. Conjugate network calculus: A dual approach applying the Legendre transform [J]. Computer Networks, 2006, 50(8):1026-1039.
- [6] 林强,熊华钢,张其善. 强实时约束下光纤通道交换网络消息集优化[J]. 电子学报,2006,34(2):344-347.
- [7] 赵长啸,屠晓杰,丁凡,等. 光线通道网络实时性能分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,31(10):1202-1206.
- [8] 王景存,张晓彤,陈彬,等. 一种基于 Dijkstra 算法的启发式最优路径搜索算法[J]. 北京科技大学学报, 2007,29(3):346-350.
- [9] 蔡凯,管明露,张天明,等. 使用 Dijkstra 算法的攻击机初始航迹研究[J]. 电光与控制,2008,15(11):22-25.
- [10] GLOVER F. Tabu search: Part I [J]. ORSA Journal on Computing, 1989, 1(3):190-206.
- [11] GLOVER F. Tabu search: Part II [J]. ORSA Journal on Computing, 1990, 2(1):4-32.

IEEE Transaction on Neural Networks, 1992, 3(6):889-898.

- [10] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 潘泉,张磊,孟晋丽,等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [12] 阳明盛,罗长童. 最优化原理、方法及求解软件[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [13] 冯登超. 蚁群算法与小波网络在复杂性科学中的应用研究[D]. 天津:天津大学,2008.
- [14] PROJEC H. Know your enemy: Statistics[EB/OL]. <http://www.Honeynet.org/papers/stars/>, 2002.

- [21] ORSAGH R, BROWN D, ROEMER M, et al. Prognostic health management for avionics system power supplies [C]//IEEE of Aerospace Conference, 2005:3585-3591.

- [22] CHENG Shunfeng, PECHT M. A fusion prognostics method for remaining useful life prediction of electronic products [C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, San Francisco, 2009:102-107.
- [23] 张凤鸣,褚文奎,樊晓光,等. 综合模块化航空电子体系结构研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):47-51.
- [24] 周福娜,文成林,冷元宝,等. 一种数据驱动的故障传播分析方法[J]. 化工学报,2010,61(8):1993-2001.
- [25] ARP4754-1996. Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems[S]. Society of Automotive Engineers Inc, 1996:45-53.