

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.005

间歇故障诊断技术研究综述

邓冠前¹, 邱静², 李智¹, 颜宁¹

(1. 第二炮兵装备研究院第三研究所, 北京 100094; 2. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 将间歇故障误诊为永久故障会导致不必要的停机和过维修的问题, 影响战备完好性并造成维修保障资源浪费, 故提出了一种间歇故障诊断方法。分析了间歇故障对系统的影响, 剖析了间歇故障诊断面临的技术难点, 综述了国内外学者间歇故障诊断方法, 并对间歇故障失效机理与演化规律、包含间歇和永久故障的诊断模型与方法以及极端环境应力下的间歇故障诊断方法 3 个方面需要开展的进一步研究工作进行了阐述。该研究为间歇故障诊断, 尤其是极端环境应力诱发的间歇故障诊断问题提供了参考。

关键词: 间歇故障; 机内测试; 离散事件系统; 有限自动机; 环境应力

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

A Survey on Intermittent Fault Diagnosis Technology

Deng Guanqian¹, Qiu Jing², Li Zhi¹, Yan Ning¹

(1. No. 3 Institute of The Second Artillery Equipment Research Institute, Beijing 100094, China; 2. College of Mechatronic Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: If intermittent fault is determined as permanent fault will cause needless shut down and excessive maintenance, make bad influence on operational readiness and waste maintenance support resource, put forward an intermittent fault diagnosis method. Analyze the influence of intermittent fault on system and technical difficulties of intermittent fault diagnosis, and summarize experts' intermittent fault diagnosis methods at home and abroad. Then, introduce the further research of intermittent fault failure mechanism and evolution law, diagnosis models of intermittent fault and permanent fault and intermittent fault diagnosis method under extreme environment. The research provides reference for intermittent fault diagnosis, especially for intermittent fault diagnosis problem cause by extreme environment stress.

Keywords: intermittent faults; built-in test; discrete event system; finite automata; environmental stress

0 引言

机内测试(built-in test, BIT)自 20 世纪 70 年代末开始应用于航空等武器装备以来, 在提高装备测试与诊断水平、缩短战斗准备时间、提高战备完好性、降低维修保障费用等方面发挥了重要作用。目前, BIT 已作为我国导弹、卫星、空间站、临近空间飞行器等武器装备的设计与研制项目之一。然而, 虚警一直是困扰 BIT 发展与应用的突出问题之一。

统计数据与失效分析表明, 间歇故障是诱发 BIT 虚警的重要原因^[1-3]。间歇故障是指产品故障发生后, 不经修复可在有限的时间内自行恢复规定功能的故障, 通常是在温度、振动等环境应力干扰下被激发, 一旦干扰结束, 故障自动消失, 通常没有造成物理损伤^[4-12]。因此, 当出现一个故障报警, 诊断发生的是永久故障还是间歇故障非常重要。若故障诊断为间歇故障, 不必立即停机进行“故障”部件更换或维修, 而是继续监控其状态, 基于其状态采取故障处理措施, 从而避免不必要的停机和维修。基于此, 笔者对间歇故障诊断技术进行研究。

1 间歇故障对系统的影响

在实际系统中, 尤其是以电子产品为主的系统, 故障通常是间歇的。例如, 集成电路中的间歇故障通常是永久故障的 10~30 倍^[11]。来自美军装备和电子工业的数据表明, 间歇故障占整个系统故障的 70%~90%^[13-14]。

为了简化问题, 在目前的检测领域, 通常将产品划分为正常和(永久)故障(permanent faults, PFs) 2 个状态。一旦检测到故障, 通常不经分析则认为发生的是永久故障, 并对“故障”部件进行更换或修理。“故障”部件后来常被证实发生的是间歇故障^[9]。因此, 间歇故障会导致好的部件被更换或维修, 从而增加维修保障费用。

间歇故障也是导致装备故障检测率低和虚警高的重要原因。例如, 电子系统的虚警中有 30%~40% 是由间歇故障引起的^[3,6,13]。其原因分析如图 1 所示。

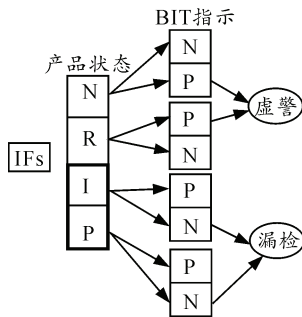
如图 1 所示, 产品实际包括正常、间歇故障和永久故障 3 个状态, 其中, 间歇故障包括间歇故障恢复和表现 2 种状态, 简称恢复和间歇故障状态。

收稿日期: 2014-08-06; 修回日期: 2014-09-22

基金项目: 由国家自然科学基金(51175502)和国防预研重点基金项目(9140A17060411KG01)资助

作者简介: 邓冠前(1983—), 男, 湖南人, 博士, 工程师, 从事故障诊断、维修性、测试性、保障性、装备维修保障研究。

在文中，分别用 N、R、I、P 表示产品的正常、恢复、间歇故障和永久故障状态。BIT 的指示分为正常和(永久)故障，分别用 N 和 P 表示。由于恢复与正常状态的表现非常相似，间歇故障与永久故障的表现也非常相似。因此，根据现有的故障诊断方法，恢复状态会被诊断为正常，间歇故障会被诊断为永久故障。根据定义，恢复状态(间歇故障的另一种形态)未被诊断故障会导致漏检；间歇故障状态被诊断为(永久)故障，由于间歇故障可恢复，事后又找不到故障，便产生了虚警。可见，间歇故障不但会引发 BIT 虚警，还会导致 BIT 漏检，即是导致 BIT 故障检测率低和虚警率高的重要原因，直接影响装备的战备完好性和任务成功率。



N 为正常；R 为间歇故障恢复状态；I 为间歇故障状态；P 为永久故障。

图 1 间歇故障诱发 BIT 漏检和虚警的原因分析

2 间歇故障诊断的技术难点

间歇故障诊断极具挑战性，一直是故障诊断领域国内外学者极力想解决的难点问题之一。间歇故障的出现可用图 2 进行定性描述。

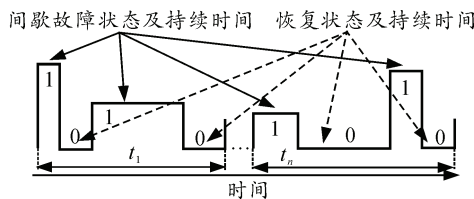


图 2 间歇故障行为的定性描述

如图 2 所示，数字“1”处表示间歇故障状态及持续时间，数字“0”表示恢复状态及持续时间。 t_1 和 t_n 分别表示第 1 次和第 n 次间歇故障爆发的时间。可见：与永久故障相比，间歇故障发生的时间、频率、概率及故障幅值或者说强度都具有一定的随机性，而且不同产品间歇故障的失效机理不尽相同，有的间歇故障是由接触不良引起，而有的则是由于单粒子翻转引发等。正是由于间歇故障的随机性，给其诊断带来了极大的困难。

3 国内外研究现状评述

自 20 世纪 70 年代以来，在航空、通信、电力

与计算机等领域，间歇故障诊断就引起了人们的广泛关注。经过几十年的研究，间歇故障诊断技术得到了迅速发展，其诊断模型与方法主要包括 4 种。

3.1 基于故障概率的间歇故障诊断方法

考虑到永久故障和间歇故障发生的概率不同(间歇故障发生的概率通常是永久故障的几倍到几十倍)，通过构建系统故障概率模型，根据检测到故障的概率与永久故障和间歇故障概率间关系等，运用一定的故障诊断策略来区分发生的是永久故障还是间歇故障^[14-17]。如，Raghavan V^[16]等重复比较被测电路和参考电路的输出，根据故障发生的次数是否超过某一阈值来区分永久故障和间歇故障，故障发生的次数和阈值等通常根据故障率等条件确定。Douglas M 等^[9]在多处理器系统中，利用多处理器相互测试，根据故障发生的概率和故障率等条件，以最少的测试次数获得最准确的诊断结果。为了诊断通信网络中的间歇故障，Marco B 等^[15]首先测试网络的状态，再根据永久故障和间歇故障发生的概率进行判断，并根据每次测试的结果调整间歇故障率估计值。为了提高诊断的效率，Chung K J^[18]等人对如何确定间歇故障的重复测试次数与测试时间进行了优化研究。

基于故障概率的间歇故障诊断方法在已知系统(永久和间歇)故障概率的条件下，具有较好的诊断效果。然而，在很多系统，尤其是新研系统，产品故障率等先验信息通常很难获取，因此，该方法具有一定的局限性。

3.2 基于随机过程的间歇故障诊断方法

有学者提出将系统状态划分为正常、间歇故障和永久故障 3 个状态，考虑系统状态概率和状态间的转移概率，建立系统三状态诊断模型，通过根据系统的状态表现来估计系统状态转移方向，从而辨识出系统当前状态。基于该思想，某些学者提出了基于随机过程的间歇故障诊断方法^[19]。其中，采用最多的是马尔可夫模型(hidden Markov models, HMM)。例如：Stephen Y H 等^[20]利用连续参数的 HMM 模型诊断间歇故障。柳新民博士^[21]等根据机电系统各种状态的表现，建立了机电系统状态的马尔可夫模型，针对间歇故障训练样本少以及样本中夹杂有异类样本等问题，分别研究了基于支持向量机(support vector machine, SVM)、基于无监督学习 SVM(1-DISVM)、基于 HMM-SVM 和基于无监督 1-DISVM 的机电系统 BIT 间歇故障诊断方法。

美国空军罗姆航空发展中心 (RADC) 和格鲁曼 (Grumman) 航空公司在 SMART BIT 研究中采用了暂存监控 BIT, 认为系统状态在向永久故障转移前, 必会经过间歇故障, 间歇故障向正常和永久故障转移是动态和随机的。一旦检测到故障, 其暂存监控器不是立即指示故障, 而是转移到中间状态实时监控被测单元并实时估计转移概率, 利用该概率作为向正常和永久故障转移的判据^[22-24]。

基于随机过程的间歇故障诊断方法明确地提出了系统三态划分法, 具有一定的先进性, 为日后间歇故障诊断研究奠定了基础。然而, 该方法需要多次测试中间状态, 诊断实时性较差, 而且没有利用系统以前的状态信息, 需要的状态转移概率等信息却很难获取。另外, 该方法没有引入动态时间特征信息, 因此, 不能很好地揭示间歇故障的演化规律。

3.3 基于离散事件系统模型的间歇故障诊断方法

现代航空、通信等大量动态系统的状态通常由某些事件在一些随机的离散时刻触发而发生转换, 由于内部转换机制比较复杂, 往往无法用常规的数学方法来描述。以诊断为目的, 连续动态系统经过抽象和离散化后, 可以用离散事件系统 (discrete-event systems, DESs) 来近似表达。由于不需要建立系统详细的模型, DESs 非常适合用来研究上述大型复杂动态系统的故障诊断^[25]。由于该诊断方法基于系统本身内部结构与行为知识进行诊断, 不依赖于专家经验, 被一些 AI 专家誉为诊断理论和技术上的革命^[26]。

目前, 基于 DESs 模型的诊断方法是国内外研究的热点。如, 美国密歇根大学 Lafortune S 教授等^[4,27-28]采用监控理论研究 DESs 的可诊断性等问题, 即故障是否能在有限时延内被诊断, 并最早提出了 DESs 诊断器的概念; 法国雷恩大学 Cordier M O 教授等研究 DESs 的在线增量诊断及可诊断性问题; 意大利布雷西亚大学 Lamperti G 教授等^[29]研究主动系统诊断问题 (后验及在线诊断); 加拿大多伦多大学 Wonham W M 教授等^[30-31]从全局一致性研究分布式诊断问题; 另外还有一些学者如 Pencolé Y 和 Grastien A 等也在研究增量诊断及可诊断性分析的新方法。然而, 上述诊断方法通常忽略间歇故障, 潜在地假设故障是永久的, 因此不能诊断间歇故障。

近年来, 基于 DESs 模型的间歇故障诊断方法逐渐引起了人们的关注。2004 年, Contantet O 等^[4]人拓展文献^[32]的方法进行间歇故障诊断, 其目的

是辨识系统当前处于何种故障状态, 即诊断当前发生的哪个故障, 哪个故障还未发生过以及哪个故障恢复了。由于 Sampath M 提出的可诊断性定义不能分析间歇故障的可诊断性, Contantet O 针对间歇故障提出了 4 类可诊断性概念。由于潜在地假设故障类型已知 (假设已知故障是间歇的), 目的是如何基于可观事件诊断系统当前处于恢复或间歇故障状态。因此, 实际上仍不能分析间歇故障的可诊断性。与此类似, Johan de K^[33-34]提出了计算间歇故障概率的统一框架。在此基础上, Abreu R^[35-36]提出了更加准确的间歇故障概率计算方法。Correcher A^[37]定义时间失效密度和伪周期的概念, 通过建立密度模型计算最佳维修和更换故障部件的时间, 进而提出了间歇故障动态诊断方法。与基于 DESs 事件的诊断方法不同, Jiang S B^[38-39]研究了基于 DESs 状态的故障建模和诊断方法研究。笔者构建了包含永久故障和间歇故障的有限自动机模型, 引入标识的概念, 研究了故障的演化规律和系统状态的转换, 研究了基于有限自动机的间歇故障诊断方法^[40-41]。并考虑故障事件出现的概率, 研究了基于随机自动机的间歇故障诊断方法^[42]。

上述基于 DESs 的间歇故障诊断方法通常假设待诊故障类型已知, 即假设故障是间歇的, 重点是研究故障的定位和隔离。由于故障事件通常是不可观的, 当发生 1 个故障, 通常很难在有限时延辨识其故障类型。也就是说, 当出现 1 个故障, 假设故障类型已知实际上是不成立的。另外, 该方法主要通过构建系统与故障模型, 基于故障演化规律并结合各种可观事件来评估系统状态和诊断故障, 不关心间歇故障的失效机理。若能结合间歇故障的失效机理, 则可进一步提高间歇故障诊断的效果。

3.4 基于环境应力的间歇故障诊断方法

早在 20 世纪 70 年代, 人们就认识到: 环境应力是导致间歇故障的重要原因之一, 关联环境应力是辅助诊断与环境应力相关故障尤其是间歇故障的重要途径^[43]。

由于当时技术的限制, 直到 20 世纪 80 年代, 测量、记录环境应力的“应力累积指示器”在 Battelle 学院才被研制出来, 该装置是后来时间应力测量装置 (time stress measurement device, TSMD) 的雏形^[44]。随着微处理器和非易失存储器的出现, 使得 TSMD 的出现成为了可能。最早最系统地对 TSMD 技术开展研究的是 RADC。自 1986 年以来, RADC

就牵头研究 TSMD, 主要用于记录机载装备所经历的各种环境应力, 如温度、振动、湿度等, 以及记录与之对应的系统时间和测量部位等信息。一旦发生故障, 调出各种环境应力与 BIT 数据进行关联分析, 从而决定引发 BIT 报警的是永久故障还是由于瞬时或短时恶劣环境应力引起的间歇故障^[45]。1987 年, RADC 和美国空军司令办公室(AFSC)开展了微型 TSMD 的研制计划。1992 年, 美国 WestingHouse 公司和 Honeywell 公司成功研制出 20 个 2×1×0.2 英寸的微型 TSMD, 并应用于 B1-B 飞机雷达系统的故障趋势分析, 同时为环境应力仿真提供数据^[46]。在此之后, 微 TSMD 得到了广泛的应用。例如, 在美国第三代航空电子装备中(如 F-16、F-22 的超高速集成电路或电子系统), 均采用 TSMD 作为其 BIT 系统的重要组成部分, 监测和识别间歇故障及虚警的发生。Unisys Corporation 基于第三代航空电子体系研发了时间应力测量模块(time stress measurement module, TSMM)^[47]。

美 RADC 和 Grumman 航空公司在 Smart BIT 研究中, 应用了 K 近邻算法和神经网络 2 种方法对间歇故障进行诊断^[48]。RADC 与 Raytheon 公司在常规 BIT 的基础上, 采用了多种神经网络技术研究了神经网络虚警过滤器(NNFAF)。根据 BIT 输出和温度、振动等环境应力信息识别系统处于何种状态以及属于该状态的概率, 通过区分系统的 3 种状态, 滤除由间歇故障引起的虚警。然而, 神经网络的诊断方法需要大量的数据训练模型, 而间歇故障样本的获取有时非常困难。再者, 神经网络的知识表达难以理解, 对诊断推理过程和诊断结果的解释能力不强。为此, 1994 年, Skormin V A 等^[46]采用 logistic regression、聚类分析和 Bayesian 方法研究了 TSMD 应用过程中各种环境应力对电子组件的故障影响。1995 年, Vincent R 等^[45]开发了自主、微型和多应用的第二代 TSMD。针对 F-16 机载雷达系统电子箱(radar system modular low power radio frequency, MLPRF)的间歇故障问题。2008 年, Universal Synaptics 公司应用神经网络技术和传感器融合技术开发了间歇故障检测器(IFD-2000), 系统包含 1 个模拟温度和振动环境的温度箱和振动台, 并能指示电路板出现间歇故障的测试通路、发生次数和故障持续时间等^[6,49]。国内方面, 吕克洪博士^[50]等开展了基于时间应力分析的故障预测和 BIT 降虚警技术研究, 分析了航空、地面背景下温度、振动和工作应力等时间应力诱发虚警的机理, 构建了时间应

力与虚警的关联关系, 提出了 BIT 虚警识别方法, 取得了较好的识别效果。

由上述分析可知: 基于环境应力的间歇故障诊断方法注重从间歇故障失效机理入手研究相应的诊断方法, 针对由环境应力引发的故障具有较好的诊断效果。然而, 该诊断方法是基于统计数据的, 需要产品的环境应力数据作为先验信息, 而且主要适合诊断由环境应力引发的故障。

4 进一步研究

间歇故障诊断是目前故障诊断领域亟待解决的难点问题, 尽管国内外学者针对间歇故障诊断技术开展了大量的研究, 目前仍缺乏完备的理论完备和能够应用于工程的支撑技术。笔者认为间歇故障诊断需要进一步研究的内容主要有以下 3 点。

4.1 间歇故障失效机理与演化规律研究

深入分析间歇故障的失效机理及演化规律是辅助诊断间歇故障的重要途径。例如, 统计数据及失效分析表明, 很多间歇故障是由环境应力诱发的。将故障与环境应力进行关联可有助于提高诊断由环境应力引发的故障的能力。然而, 环境应力包括温度、振动、湿度等, 不同产品对环境应力的敏感程度不尽相同, 间歇故障是由何种应力或是应力组合引发等方面目前尚缺乏这方面的研究。例如, Grumman 在监控某航空 PCB 的状态时, 选择监测温度和振动应力, 而失效分析表明, 出现的故障与振动有关, 与温度无关。

尽管间歇故障的发生具有动态性和随机性, 然而, 间歇故障的发生也是具有一定规律的。例如, 间歇故障事件出现后, 通常会伴随恢复事件的出现, 然后再发生间歇故障, 如此反复。而且间歇故障最终会演变为永久故障。通过监控表征间歇故障演化的可观事件可辅助诊断间歇故障。系统的各状态在事件驱动下如何转化关系及故障是如何演化的仍有待进一步的研究。

4.2 包含间歇和永久故障的诊断模型与方法研究

现有的诊断模型通常假设故障是永久的, 或假设间歇故障类型已知, 在此基础上研究故障的诊断。目前, 国内外关于包含间歇故障和永久故障的诊断模型与方法研究还很少。文献[4]构建了包含永久故障和间歇故障的有限自动机模型和随机自动机模型。然而, 如何基于上述模型开展诊断方法研究还有待深入研究。

4.3 极端环境应力下的间歇故障诊断方法

近年来，世界各国大力发展载人航天、深空探测等高科技计划。实践证明：极端环境(extreme environment, EE)是目前航天、深海探测等装备执行各种任务的巨大挑战，未来武器装备的竞争集中在极端环境理论和相关技术的竞争。与常规环境条件相比，极端环境应力更加严酷、随机性更强，装备的间歇故障问题将更为突出。

为了保证探测计划的顺利实施，目前的主要措施是提高装备极端环境防护和耐受性。然而，仍有许多关键技术尚待突破，为了保证装备在极端环境下安全、可靠地运行，亟需提高装备在极端环境下的诊断能力，尤其是间歇故障诊断能力。目前该方面的研究极少。

笔者针对由极端温度环境引发的间歇故障诊断进行了探索，针对极端温度环境诱发的间歇故障诊断问题，研究了极端温度环境下表征环境应力的特征参数选取、基于环境应力的故障事件评估方法^[51]和基于自动机模型与故障事件评估的间歇故障诊断方法^[40-41,52]，并以多芯片组和某型航空地平仪为对象进行了模型与方法验证^[53]。但还有很多问题值得研究和探索。另外，针对其他极端环境如极端振动、极端电磁等引发的间歇故障诊断问题等有待研究。

5 结束语

间歇故障诊断的研究任重而道远。笔者的工作对于研究间歇故障诊断，尤其是极端环境应力诱发的间歇故障诊断问题具有较强的参考价值。

参考文献：

- [1] Byington C S, Begin M. False Alarm Mitigation of Vibration Diagnostic Systems[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, BigSky, Montana, USA, 2008: 1-11.
- [2] Westervelt K. F/A-18D (RC) Built-in-Test False Alarms[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, BigSky, Montana, USA, 2002: 2961-2970.
- [3] Steadman B, Berghout F, Olsen N. Intermittent Fault Detection and Isolation System[C]. IEEE AUTOTESTCON Conference, Salt Lake City, UT, USA, 2008: 37-40.
- [4] Contant O, Lafortune S, Teneketzis D. Diagnosis of Intermittent Failures[J]. Discrete event dynamic systems: Theory and applications, 2004, 14(2): 171-202.
- [5] 田仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 129-200.
- [6] Sorensen B A, Kelly G, Sajecki A, et al. An Analyzer for Detecting Intermittent Faults in Electronic Devices[C]. IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2001: 1-12.
- [7] Pan S J, Hu Y, Li X W. IVF: Characterizing the Vulnerability of Microprocessor Structures to Intermittent Faults[J]. IEEE Very Large Scale Integration (VLSI) systems, 2012, 20(5): 777-790.
- [8] Kranitis N, Merentitis A, Laoutaris N, et al. Optimal Periodic Testing of Intermittent Faults in Embedded Pipelined Processor Applications[C]. Proceeding of Design, Automation and Test in Europe, 2006: 1-6.
- [9] Ismael A A, Bhanagar R. Test for Detection & Location of Intermittent Faults in Combinational Circuits[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46(2): 269-274.
- [10] Guilhemsang J, Heron O, Ventroux N, et al. Emphasis on the Existence of Intermittent Faults in Embedded Systems[C]. IEEE Workshop on Defect and Data Driven Testing, 2010: 1-6.
- [11] Constantinescu C. Intermittent Faults and Effects on Reliability of Integrated Circuits[C]. Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, NV, USA, 2008: 370-374.
- [12] Russell G, Elliott I D. Design of Highly Reliable Risc Processors Incorporating Concurrent Error Detection/Correction[C]. IEE Colloquium on RISC Architectures and Applications, 1991: 1-4.
- [13] Haiyu Q, Ganesan S, Pecht M. No-Fault-Found and Intermittent Failures in Electronic Products[J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(5): 663-674.
- [14] Bondavalli A, Chiaradonna S, Giandomenico FD, et al. Threshold-Based Mechanisms to Discriminate Transient from Intermittent Faults[J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(3): 230-245.
- [15] Blough D M, Sullivan G F, Masson G M. Intermittent Fault Diagnosis in Multiprocessor Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 1992, 41(11): 1430-1441.
- [16] Raghavan V. On Asymmetric Invalidation with Partial Test[J]. IEEE Transactions on Computers, 1993, 42(6): 764-768.
- [17] Blom M, Loppolt B. Diagnosing Intermittent Faults in Telecommunication Networks[C]. IEEE Global Telecommunications Conference on Communication for Global Users, 1992: 544-548.
- [18] Chung K J. Optimal Testing-Times for Intermittent Faults[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(4): 645-647.
- [19] Prasad V B. Markovian Model for the Evaluation of Reliability of Computer Networks with Intermittent Faults[J]. IEEE Circuits and Systems, 1991, 4(6): 2084-2087.
- [20] Stephen Y H, K. Y. A Continuous-Parameter Markov Model and Detection Procedures for Intermittent Faults[J]. IEEE transaction on computers, 1978, 27(6): 567-570.
- [21] 柳新民. 机电系统 BIT 间歇故障虚警抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学机电工程及自动化学院, 2005.
- [22] Richards D W. Smart BIT: A Plan for Intelligent Built-in

- Test[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1989, 4(1): 26-29.
- [23] John Z, Ken A. Smart BIT-2: Adding Intelligence to Built-in Test[C]. Proc of NAEC, 1989: 2035-2042.
- [24] Zourides V G. Smart Built-in-Test (BIT): An Overview[C]. IEEE AUTOTESTCON, 1989: 67-74.
- [25] Reiter R. A Theory of Diagnosis from First Principles[J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57-96.
- [26] 赵相福. 离散事件系统基于模型诊断的若干问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [27] Debouk R, Lafortune S, Teneketzis D. Coordinated Decentralized Protocols for Failure Diagnosis of Discrete Event Systems[J]. Discrete Event Dyna Syst: Theory Appl, 2000, 10: 63-79.
- [28] Lafortune S, Sengupta R, Sampath M, et al. Failure Diagnosis of Dynamic Systems an Approach Based on Discrete Event Systems[C]. Proc of the American Control Conference, Arlington, USA, 2001: 2058-2071.
- [29] Lamperti G, Zanella M. Context-Sensitive Diagnosis of Discrete-Event Systems[C]. the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, Barcelona, Catalonia, Spain, 2011: 969-975.
- [30] Shahin H Z, Raymond H K, Wonham W M. Fault Diagnosis in Discrete-Event Systems: Framework and Model Reduction[J]. IEEE Trans Automat Contr, 2003, 48(7): 1199-1212.
- [31] Su R, Wonham W M, Kurien J, et al. Distributed Diagnosis for Qualitative Systems[C]. Proceedings of International Workshop on Discrete Event Systems, 2002.
- [32] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S. Diagnosability of Discrete Event Systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(9): 1555-1575.
- [33] Johan de K. Diagnosing Multiple Persistent and Intermittent Faults[C]. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence, Pasadena, CA, USA, 2009: 733-738.
- [34] Johan de K, Bob P, Lukas K, Minh D, et al. A Framework for Continuously Estimating Persistent and Intermittent Failure Probabilities[C]. Proc 19th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-08), Blue Mountains, Australia, 2008: 1-7.
- [35] Abreu R, Zoetewij P, van Gemund AJ C. A New Bayesian Approach to Multiple Intermittent Fault Diagnosis[C]. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence, Pasadena, California, USA, 2009: 653-658.
- [36] Abreu R, Zoetewij P, van Gemund AJ C. A Bayesian Approach to Diagnose Multiple Intermittent Faults[C]. Proc of the Twentieth Internatinal Workshop on Principlesot Diagnosis, Stockholm, Sweden, 2008: 27-33.
- [37] Correcher A, Garcia E, Morant F, et al. Diagnosis of Intermittent Fault Dynamics[C]. IEEE International Coference on Emerging Technologies and Factory Automation, Hamburg, Germany, 2008: 559-566.
- [38] Jiang S B, Kumar R, Garcia H E. Diagnosis of Repeated /Intermittent Failures in Discrete Event Systems[J]. IEEE Transactions on Robotiscs and Automation, 2003, 19(2): 310-323.
- [39] Jiang S B, R K. Failure Diagnosis of Discrete Event Systems with Linear-Time Temporal Logic Fault Specifications[C]. Proc of American Control Conference, Anchorage, AK, USA, 2002: 128-133.
- [40] Deng Guanqian, Jing Qiu, Liu Guanjun, et al. A Discrete Event Systems Approach to Discriminating Intermittent from Permanent Faults[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(2): 390-396.
- [41] Deng Guanqian, Qiu Jing, Liu Guanjun, et al. A Stochastic Automaton Approach to Discriminate Intermittent from Permanent Faults[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(6): 880-888.
- [42] 邓冠前. 极端温度环境下间歇故障诊断关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [43] Dale W R, James A C. Intelligent Built-in Test and Stress Measure[C]. IEEE Automatic Testing Conference, 1989: 261-266.
- [44] Harvey G, Louis S, Buska S. Micro-Time Stress Measurement Device Development[R]. 1994.
- [45] Rouet V, Foucher B. Development and Use of a Miniaturized Health Monitoring Device[C]. IEEE Annual 42nd International Reliability Physics Symposium, 2004: 645-646.
- [46] Broadwater S P, Oblak T A, Popyack L J. Maintenance Processor/Time Stress Measurement Device (MP/TSMD) Use for Failure Trend Analysis[C]. IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1992: 228-238.
- [47] Swart P W. Rtok Elimination with Tsmm[C]. IEEE Proceedings Aerospace and Electronics Conference, 1991: 214-220.
- [48] Aylstock F, Elerin L, Hintz J. Neural Network False Alarm Filter[R]. Washington: Raytheon Company, 1994.
- [49] Steadman B, Berghout F, Olsen N. Intermittent Fault Detection and Isolation System[C]. IEEE AUTOTESTCON Conference, Salt Lake City, UT, USA, 2008: 37-40.
- [50] 吕克洪. 基于时间应力分析的 BIT 降虚警与故障预测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [51] Deng Guanqian, Qiu Jing, Liu Guanjun, et al. Environmental Stress Level Evaluation Approach Based on Physical Model and Interval Grey Association Degree[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 456-462.
- [52] Deng Guanqian, Qiu Jing, Liu Guanjun, et al. A novel fault diagnosis approach based on environmental stress level evaluation[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(5): 816-826.
- [53] Deng Guanqian, Yang Peng, Qiu Jing, et al. Transient Thermal Analysis of MCM towards Understanding Failure Mechanism of Intermittent Faults[J]. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, 2013, 33: 589-594.