

动态系统间歇故障诊断技术综述

周东华^{1,2} 史建涛¹ 何潇¹

摘要 介绍了间歇故障的概念,对间歇故障的背景和产生原因以及间歇故障诊断问题的研究意义进行了分析,以间歇故障的成因、幅值特性和不同时刻发生故障之间的相关性等为依据,对间歇故障进行了分类.然后对间歇故障诊断的研究现状进行了概述,把目前间歇故障诊断的方法大体分为定性分析和定量分析两大类,并对每一类现有的方法进行细分,对每种方法的基本思想、优劣特点和适用条件进行了概述和讨论.最后探讨了间歇故障诊断研究中亟待解决的问题.

关键词 间歇故障,故障检测,故障诊断,定性分析,定量分析

引用格式 周东华,史建涛,何潇.动态系统间歇故障诊断技术综述.自动化学报,2014,40(2):161–171

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00161

Review of Intermittent Fault Diagnosis Techniques for Dynamic Systems

ZHOU Dong-Hua^{1,2} SHI Jian-Tao¹ HE Xiao¹

Abstract The concept of intermittent faults is introduced and the background, cause, as well as research significance of the fault diagnosis problem for intermittent faults are analyzed. Classifications for intermittent faults are provided according to their characteristics such as cause, amplitude and correlations with different time instants. The research status of fault diagnosis for intermittent faults is reviewed in two categories, i.e., qualitative analysis and quantitative analysis methods. The basic ideas, advantages, disadvantages, as well as application conditions of each category are highlighted and discussed. Finally, some open problems of the research on fault diagnosis for intermittent faults are pointed out.

Key words Intermittent faults, fault detection, fault diagnosis, qualitative analysis, quantitative analysis

Citation Zhou Dong-Hua, Shi Jian-Tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(2): 161–171

现代工业系统规模越来越大,投资成本不断增加,一旦发生事故极易造成巨大的财产损失和人员伤亡.因此,提高复杂系统的可靠性和安全性至关重要.故障诊断(Fault diagnosis)技术是提高系统可靠性和安全性的重要手段^[1].经过几十年的发展,该领域涌现出了丰硕的研究成果^[2–8].然而,目前故障诊断研究大都针对永久故障(Permanent fault)和瞬态故障(Transient fault)^[9].永久故障是指导致系统性能持续恶化,进行维修之前不会消失的持续性故障;瞬态故障是指随机出现且不具有重复性的短时故障.

随着电子和计算机技术的发展,一种不同于永

久故障和瞬态故障的特殊故障——间歇故障(Intermittent fault)逐渐引起人们的兴趣.间歇故障是一类持续时间短、可反复出现、未经处理可自行消失的非永久故障^[9–11].作为一类特殊的故障形式,间歇故障具有不同于永久故障和瞬态故障的特点.与永久故障相比,间歇故障的发生具有随机(周期)性、间歇性和反复性;与瞬态故障相比,间歇故障可在同一部件反复出现,且更换部件后不再出现,而瞬态故障的出现与否完全随机,不具有反复性,即使更换部件,仍然可能再次出现.另外,间歇故障具有累积效应,系统发生间歇故障的频率会逐渐增加,最终演变成永久故障,从而导致整个系统的失效^[9].

因此,由于间歇故障的特殊性,现有的故障诊断方法难以适用^[12].而随着电子和计算机技术的发展,间歇故障诊断已经成为亟待解决的问题.早在上个世纪60年代,就有学者开始关注数字电路的间歇故障检测问题^[13].然而,目前间歇故障诊断主要集中于数字电路、配电系统和机电设备等特殊系统的定性分析和实验研究方面,缺乏系统性理论成果;并且已有的间歇故障诊断研究具有很大的局限性,研究对象基本都是一些特殊的间歇故障,采用的技术手段大都是传统的故障诊断方法,研究过程中未考虑

收稿日期 2013-03-14 录用日期 2013-06-26
Manuscript received March 14, 2013; accepted June 26, 2013
国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB731800, 2009CB320602),国家自然科学基金(61210012, 61290324, 61074084)资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB731800, 2009CB320602) and National Natural Science Foundation of China (61210012, 61290324, 61074084)
本文责任编辑 姜斌
Recommended by Associate Editor JIANG Bin
1. 清华大学自动化系 北京 100084 2. 清华大学信息科学与技术国家实验室 北京 100084
1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 2. National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

间歇故障的特殊性,没有提出专门针对间歇故障特点的诊断方法.另外,截止到目前尚未出现对已有间歇故障诊断方法进行分类和评析的综述性文献.

本文首先分析了间歇故障的产生原因和研究意义,并给出其分类方法,然后对间歇故障诊断的研究现状进行概述,按照定性分析和定量分析的思想对目前的研究方法进行分类,按照所使用的理论和技术手段对每种方法进行具体分析,同时分别归纳和评析其研究现状、优势和不足等.最后,探讨了间歇故障诊断研究中亟待解决的问题.

1 间歇故障概述

1.1 间歇故障的产生原因

系统中产生间歇故障的原因多种多样.机电系统中轴承和连杆机构的不均匀磨损、裂隙;齿轮装置中部分轮齿断裂、磨损;液压设备中阀门和汽缸的密闭性不严等均会导致间歇故障^[14].在输配电系统中,开关和继电器的开合操作,机械应力、化学腐蚀和人为破坏导致的绝缘层损坏会使得不同电缆之间以及电缆与大地间出现间歇电弧故障^[15].在电子设备尤其是大规模集成电路中,由于制造工艺不佳和不规范使用等导致的芯片管脚和连线松动,以及环境中不同器件之间的电磁辐射和干扰等均会导致间歇故障的发生^[13,15].在计算机系统中,接口不牢、电磁干扰和软件缺陷也会导致系统间歇故障^[16].对于通信系统和传感器网络,信道带宽约束、量化误差、网络拥塞和节点竞争等也会使信息传输过程出现间歇故障^[17].另外,设备运行过程中温度、湿度和机械应力等环境条件的变化也会导致间歇故障的发生.

1.2 间歇故障的研究意义

间歇故障现象在生产和生活中十分普遍,对系统性能和设备安全构成了巨大的威胁.在机电系统中,机内测试(Built-in test, BIT)系统是保证系统可靠性、提高可维护性和降低维修成本的重要装置,而间歇故障是导致BIT系统出现虚警和影响设备可靠运行的主要原因^[18-20].在机电动力装置中经常出现的故障行为也大都为间歇性故障^[19],例如牵引机车的电机系统就经常出现间歇故障^[21];另外,现代工业生产中感应电机的应用非常普遍,消耗了85%左右的工业电力资源^[22],而间歇故障是其主要的故障形式^[23].另外,输配电系统中的电弧放电现象^[24]、集成电路中电信号不规则波动等均是常见的间歇故障^[25],严重影响设备的正常运行.

在电子电路系统中,间歇故障严重影响设备性能.例如,数字电子设备功能紊乱主要由间歇故障引起,而异常表现通常会在系统重启后消失,给故障检测带来困难^[26].混合电路中间歇故障发生频率

是永久故障的10~30倍,是造成系统失效的主要原因^[27].数字电路系统中间歇故障占所有可能发生故障的90%,消耗了大部分维修费用,文献[15]指出:随着技术和检修手段的进步,针对数字电路系统永久故障的检测和维修费用不断降低,但针对间歇故障的检测和维修费用却变化不大.文献[28]通过实验表明:在大规模集成电路中,平均每7700小时发生一次永久故障,而平均每100小时就会发生一次间歇故障.在通信系统中,间歇故障也非常普遍,是影响通信质量和缩短设备寿命的重要因素^[17].来自美军装备和电子工业的统计数据表明,在战场维修中,非永久故障(主要是间歇故障)占有故障的50%以上^[29-30],是造成电子设备暂时失效的重要原因,导致了不必要的维修、过早的设备更换等,造成了巨大的资源浪费^[31].

除了传统的机械和电子设备之外,在现代尖端科技领域中间歇故障也时有发生,对设备的可靠运行造成严重影响.例如,在航天器系统中,间歇故障在控制器中时有发生,严重影响容错控制系统的正常工作,甚至导致航天器失稳^[32];在高铁系统的牵引电机、配电设施和传感器系统中间歇故障也经常出现,对列车安全行驶构成严重威胁^[21].

因此,对间歇故障的机理和特性进行深入分析,探索针对间歇故障特点的故障诊断方法对于提高系统的可靠性与安全性、降低维修成本具有重要意义.

1.3 间歇故障的分类方法

根据上述对间歇故障发生机理和表现形式的分析,在此对间歇故障进行分类:按照故障重复出现的方式可以分为周期间歇故障和非周期间歇故障;按照故障幅值特点可以分为固定幅值间歇故障和时变幅值间歇故障;按照不同时刻故障之间的相关性可以分为独立间歇故障和相关间歇故障.例如,在机械系统中,间歇故障主要由轴承、齿轮等的磨损和裂隙等诱发;而轴承和齿轮装置是在电机带动下进行周期性旋转运动,因此此类间歇故障大都具有周期性;同时考虑到轴承、齿轮等的磨损及裂隙的产生和加剧一般都需要较长的时间,在对机械系统进行故障诊断的较短时间内可以认为设备的磨损和裂隙程度是不变的,所以此类间歇故障的幅值常常是恒定的;另外,考虑到机械系统中间歇故障的累积效应,最终将导致永久故障的出现,因此从设备整个寿命周期来看,此类系统中不同时刻的间歇故障之间存在着相关性.在电子设备和输电系统中,间歇故障主要由电磁辐射和电弧放电等引起,受到电压和电流的幅值、频率以及其他器件和所处环境中的电磁干扰等因素的影响,考虑到系统中电信号的不稳定性和电磁扰动的随机性,此类间歇故障一般具有非周期、时

变幅值和不同时刻的故障相互独立等特点。

下面对间歇故障诊断的研究现状进行概述, 对已有的研究方法进行分类。需要指出的是, 目前尚未出现针对间歇故障特点的专门故障诊断方法, 所采用的方法大都是传统故障诊断方法的改进, 因此仍然按照传统的故障诊断分类方法进行分析和概述。

2 间歇故障诊断研究现状

2.1 定性分析的方法

基于定性分析的故障诊断主要依赖对系统运行机理、故障特性以及故障行为与成因之间因果关系等先验信息的分析, 利用逻辑推理的方法检测和分离故障。目前, 基于定性分析的间歇故障诊断方法可以分为基于图论的方法、基于 Petri 网的方法、基于离散事件系统的方法等, 另外还有少数从定性分析的角度对间歇故障的可诊断性进行描述的文献。

2.1.1 基于图论的方法

基于图论的间歇故障诊断方法包括故障树(表)分析法和符号有向图法。基于此类方法的故障诊断是一个由果及因的分析过程, 从故障状态出发, 逐级分析推理, 直到确定故障发生的概率以及故障和原因之间的因果关系, 并结合一定的搜索策略来确定故障的传播路径。

文献 [33] 利用定性推理方法研究了组合电路间歇故障检测问题, 提出了故障表的概念, 对每次检测的结果进行归类 and 比较以检测出间歇故障。文献 [34] 把上述结果进行了推广, 进一步研究了数字电路间歇故障的诊断问题, 把系统分割为多个最小子单元, 每个子单元可以定位一次随机发生的故障, 基于此构建了故障诊断树, 然后用定性推理方法得到了间歇故障可诊断系统允许发生故障的单元数上界。

在通信系统中, 间歇连通是影响网络可靠性和通信质量的重要因素, 但是目前此方面的研究很少。文献 [35] 基于间歇连通诱导出现的不同的设备网(Device net) 故障模态, 提出了一种新的基于有向图的定位辨识方法, 该方法综合考虑数据链路层和物理层的故障源特性, 用于再现网络中的间歇连通故障模态。与已有的方法相比, 该文献采用了一种混合模拟数字域分析方法来定位故障节点, 故障诊断的精度大大提高, 同时其抗干扰的能力也有所增强。

基于图论的方法无需对象的定量信息, 推理清晰、逻辑性强。但图的规模与系统复杂度有关。考虑到故障可能的随机性和反复性, 通常需要构造的节点和支路数量巨大, 逻辑关系也极为复杂, 导致图论建模的难度大大增加; 同时, 因为间歇故障极易被扰动和噪声的影响所掩盖, 使得故障诊断实时性变差、准确率降低。另外, 上述文献是在传统的故障诊断方

法中加入系统间歇故障的先验信息, 实现间歇故障的检测; 而考虑到间歇故障的随机性特点, 一般很难获取足够的先验信息, 从而限制了此类方法的应用。

2.1.2 基于 Petri 网的方法

Petri 网是对离散并行系统的数学表示, 既有严格的数学表述方式, 又有直观的图形表达方式, 是一种有效的系统描述手段和系统行为分析工具。文献 [32] 基于 Petri 网理论提出了一种检测电子设备间歇故障的方法, 但文中仅仅考虑了单个电子设备的情况。文献 [13] 研究了组合电路中永久故障和间歇故障的影响。文献 [36] 进一步研究了数字系统中间歇故障的最优检测策略。分别针对理想检测(间歇故障发生时, 一定能够检测) 和非理想检测(间歇故障发生时, 以一定的概率检测出故障) 得到了检测出间歇故障所需的平均检测次数和检测时间, 并进一步讨论了确定最优检测周期的方法。文献 [12] 考虑了计算机系统的一类间歇故障(接口故障), 利用 Petri 网来对故障发生过程进行定性建模, 通过对模型的分析确定影响故障检测概率的过程参数。

基于 Petri 网的方法, 主要利用对故障行为的分析来检测故障, 具有算法简单、易于操作的优点, 基于间歇故障的先验信息可以实现间歇故障的诊断, 但该方法难以有效区分外界扰动对系统行为的影响, 对间歇故障的诊断误报率较高。

2.1.3 基于离散事件系统的方法

文献 [37] 首次在离散事件系统的框架下研究了间歇故障的诊断问题, 并通过水泵和阀门系统的故障诊断实验验证了所提出的方法。但文中仅仅把系统状态划分为正常态和故障态, 且没有提出故障诊断定性推理的具体策略。基于这些考虑, 文献 [38] 研究了基于离散事件系统规则库的系统执行器和传感器卡死故障的诊断问题, 主要贡献在于把研究对象从 0-1 系统扩展到了更为一般的动态系统。但扩展的方法只是对故障幅值的分段处理, 可推广性不强。文献 [39] 提出了一种新的基于有色 Petri 网(Colored Petri nets) 的间歇故障诊断方法, 克服了有限状态机(Finite state machine) 方法组合状态爆炸问题, 可同时诊断永久故障和间歇故障。

基于离散事件系统的故障诊断方法可靠性好, 可以有效消除扰动和噪声对间歇故障诊断效果的影响, 同时算法简单、计算量小, 是一种很有前途的故障诊断方法, 对间歇故障具有良好的适用性; 但应用过程中需注意离散事件的选取要能充分体现原系统的特点和性能, 避免因事件划分过细带来的计算繁琐和因事件划分粗糙引起的有效信息丢失的问题。

2.1.4 其他

模糊逻辑是一种典型的定性故障诊断方法. 文献 [40] 研究了中压输电线路间歇性接地故障的检测问题, 提出了基于模糊逻辑理论的间歇故障检测方法, 并通过实验验证了传统的故障检测方法对间歇性接地故障是无效的. 文献 [41] 考虑了间歇故障的重复性, 提出了三种间歇故障可诊断性的概念: K -diagnosability (K 个故障可以诊断)、 $[1, K]$ -diagnosability (从 1 到 K 个故障可以诊断) 和 $[1, \infty]$ -diagnosability (从 1 到无穷多个故障可以诊断), 在此基础上得到了间歇故障的多项式检验策略. 文献 [42] 在实验的基础上进一步提出了瞬态故障密度 (Temporal failure density) 和伪周期 (Pseudoperiod) 的概念, 分别用于描述间歇故障持续时间占时间窗的比例和故障发生的平均时间间隔, 并进一步提出了新的间歇故障可诊断性的概念.

基于定性分析的故障诊断方法适用范围广、形式灵活、推理清晰, 目前此类间歇故障诊断研究的创新之处体现在学习和推理过程中加入了间歇故障的先验信息, 从而对已有方法进行改进, 实现间歇故障的检测与分离. 但是因为间歇故障复杂的动态特性, 通常情况下很难获取其精确的先验信息, 这也是此类间歇故障诊断方法的难点, 需要继续深入研究.

2.2 定量分析的方法

基于定量分析的故障诊断方法通过对研究对象构建数学模型或者利用系统运行过程的各种测量数据, 得到能够表征故障对系统性能影响程度的残差信息, 然后对残差进行相应的分析以达到故障诊断的目的. 目前基于定量分析的间歇故障诊断方法可以分为基于模型的方法和基于数据的方法两大类, 其中基于模型的方法包括基于解析模型的方法和基于统计模型的方法; 基于数据的方法可以分为基于特征分析的方法和基于决策优化的方法等. 除此之外, 还有部分基于实验方法的间歇故障诊断研究成果也值得关注.

2.2.1 基于解析模型的方法

解析模型是对被监控系统过程机理和特性的定量描述, 根据解析模型可以获得系统运行的状态信息, 甚至可以预测系统未来的动态特性. 构建精确的解析模型可使得故障诊断问题大大简化, 同时又可以显著提高故障诊断的精度.

在电力机车的牵引电机中, 由于振动、高温和强电磁干扰的影响, 传感器极易发生故障, 而传感器信号的间歇丢失会给控制回路造成严重的瞬态误差, 目前的应对措施是: 对控制系统信号进行滤波处理以达到减小误差的效果. 利用基尔霍夫定律构造等价方程是一种简单有效的诊断传感器故障的方法,

然而此方法仅适用于线性系统的情况. 基于此考虑, 文献 [43] 指出, 基于模型的方法是一种更好的实现可靠故障检测与分离的方法. 然而, 感应电机的动态具有严重的双线性特点, 传统的观测器方法不再适用, 该文提出了一种新的基于速度反馈的时变线性观测器设计方法, 可以有效检测和分离传感器间歇故障. 同样是针对列车牵引系统, 文献 [44] 研究了存在间歇性传感器故障时牵引电机输出转矩的估计问题, 提出了一种奉献观测器的方法来检测间歇故障, 但是, 此方法没有考虑间歇故障的持续时间和间隔时间对可检测性的影响, 当故障间隔时间较短时不再适用.

上述两篇文献主要研究了传感器间歇故障诊断问题, 对传统的基于观测器的故障诊断方法进行改进, 在测量信息精确、无扰动情况下, 可以实现间歇故障的准确检测. 然而该方法条件苛刻, 不易实现, 且只能处理单个传感器发生故障的情况.

文献 [45] 研究了执行器具有间歇性故障的时滞系统容错控制问题, 通过假设执行器故障的发生满足 Bernoulli 分布, 且发生的故障服从某种概率分布, 建立了一般性的执行器故障模型, 运用 Lyapunov 理论和随机方法, 利用线性矩阵不等式方法给出了故障分布依赖的容错控制器解的存在条件.

文献 [32] 利用随机切换系统模型来描述带有控制器间歇故障的航天器姿态控制系统, 每个切换模态代表一个正常或故障状态, 模型切换用马尔科夫过程表示. 该方法充分考虑了故障导致的瞬态行为, 把容错控制问题转化为带有不稳定模态的随机切换系统的稳定性问题, 以便利用成熟的切换系统方法进行处理. 文中还提出了全局耗散度的概念, 从能量耗散的角度来确定随机切换系统达到稳定性的条件.

与上述研究成果不同, 文献 [46] 考虑了连续时间系统的间歇故障检测问题, 在统计框架下设计了一种基于观测器的截断残差生成器, 将残差视为统计变量, 提出了截断窗口概念, 最后利用两个假设检验分别检测间歇故障的发生时间和结束时间. 创新之处还在于研究了间歇故障的可检测性, 得到了间歇故障可检测的充分必要条件. 该文献首次对间歇故障的特点进行分析并提出了对应的故障检测方法; 然而, 提出的间歇故障可检测条件与系统故障特性以及预定的故障检测误报率和漏报率有关, 条件过于苛刻; 同时算法过程繁琐, 有待进一步改进.

上述基于解析模型的间歇故障诊断的研究中, 文献 [32, 45] 充分考虑了间歇故障的随机特性, 把间歇故障作为随机扰动进行处理, 利用鲁棒控制的思想进行容错处理, 简便易行, 具有重要的实用价值; 不足之处在于缺乏对间歇故障特性的深入理论分析, 并未解决间歇故障诊断的核心问题, 只是对间歇故

障进行特殊化处理后直接应用传统方法进行研究, 没有提出针对间歇故障特点的诊断方法。

2.2.2 基于统计模型的方法

基于统计模型的间歇故障诊断方法, 不需要对故障特性的深入分析, 只要能获取系统正常运行和故障状态下的数据, 从概率统计角度进行研究, 通过对系统建立概率统计模型, 根据系统状态的概率、状态之间的转移概率、间歇故障的发生概率以及检测到故障的概率等, 运用一定的测试策略来估计系统状态的转移方向, 并确定系统当前的状态, 从而达到检测间歇故障的目的。

文献 [47] 最早利用统计模型方法研究了数字电路的间歇故障诊断问题, 用两态马尔科夫模型来描述间歇故障的动态特性, 研究了故障重复检测率与检测精度之间的关系。但是文中假设间歇故障的发生与否和系统中信号值大小无关, 另外还要求间歇故障的出现和检测动作同步。考虑到间歇故障与系统运行状态密切相关, 且具有高度的随机性, 上述假设很难满足。在上述文献的基础上, 文献 [48] 针对两态马尔科夫模型不能准确描述间歇故障特性的不足, 提出了一种三态马尔科夫模型用于描述计算机系统的间歇故障, 把间歇故障视为一个独立的状态, 研究结果表明该模型可显著提高故障检测精度。

考虑到间歇故障的随机性(周期性)、反复性和间歇性的特点, 利用贝叶斯理论进行参数估计的方法逐渐引起人们的关注。文献 [49] 提出了描述间歇故障行为的统计模型, 引入一个用于描述系统部件正常运行概率的参数, 此方法在打印机软件系统的间歇故障诊断中得到了很好的应用。但该方法基于近似处理, 参数估计的精度不高。文献 [50] 把传统的永久故障诊断方法进行扩展, 提出了估计参数的新的贝叶斯方法, 用于获得间歇故障发生的后验概率。与以往方法相比, 基于该方法的参数估计值是精确的极大似然值, 而不是近似值。文献 [51] 也进行了类似的研究, 通过引入启发式的最小压缩集算法, 进一步提高了参数估计的精度。

在流程工业中网络的可靠性非常重要。在影响网络可靠性的因素中, 间歇连接, 即通信线路的短时随机中断是经常发生和难以检测的问题。间歇连接可以发生在多个部位, 系统停机后需要大量的时间来检测和定位间歇故障, 因此在问题出现之前, 精确和有效检测间歇连接问题变得至关重要。文献 [52] 通过分析总线的信号, 得到了表示传输数据丢失概率界限的可靠性参数, 从控制的视角分别分析了以太网、控制器局域网 (Controller area network, CAN) 和设备网的动态特性。文献 [53] 提出了一系列故障定位的方法来分析受到间歇故障影响下的通

信总线的可靠性。但是上述文献并未提出 CAN 网络的间歇故障检测建模和故障定位的有效方法。

近年来, 无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 在目标检测和信息采集等领域得到了广泛的应用。然而, 由于传感器自身性能的限制和所处的恶劣环境, WSN 中的节点和通信链路故障时有发生, 尤其是节点的间歇故障, 已经成为影响 WSN 可靠性的重要因素^[54]。目前, 对有线传感器网络的故障诊断已经出现了一系列研究成果, 但大都需要网络连通的条件和可靠的中心处理节点。考虑到 WSN 的随机拓扑特性和缺乏中心处理节点, 现有的有线传感器网络的故障诊断方法不再适用。文献 [55] 提出了一种概率方法来诊断 WSN 中的节点间歇故障, 通过比较每个节点估计和获取的邻居节点能量值得到一组差值序列, 重复多次检测, 基于对所有次循环检测得到的差值序列进行统计分析, 确定发生间歇故障的传感器节点。但该算法需要满足同步通信的条件, 且未考虑干扰和噪声的影响, 因此尚需进一步的完善。

基于统计模型的间歇故障诊断方法简单易行, 能有效诊断间歇故障; 但需要已知各种概率信息, 应用条件苛刻, 实际可操作性差; 另外需要对系统运行状态进行多次测试, 影响了故障诊断的实时性。从本质上分析, 该方法是在传统方法的基础上引入间歇故障的已知概率统计特性信息解决间歇故障诊断问题, 并不是针对间歇故障自身特点的特有诊断方法。

总体看来, 目前基于模型的间歇故障诊断研究还很不充分, 基于解析模型的研究更少, 已有的少数基于模型的文献大都是利用系统处于正常和故障状态的概率以及不同状态间的转移概率信息来构造统计模型, 这显然没有解决间歇故障诊断的本质问题。究其原因, 主要是因为间歇故障复杂的动态特性, 如随机性、反复性和间歇性等, 以及间歇故障对系统动态特性影响的复杂性, 难以构造能够准确描述间歇故障系统的解析模型; 而基于统计模型的方法, 需要已知多种概率信息, 而这些信息通常是很难获取的。

2.2.3 基于特征分析的方法

此类方法的基本思想是: 对测量到的信号和数据进行分析处理, 提取故障信号特征, 以达到检测和分离系统中间歇故障的目的。主要有小波变换、傅里叶变换、时频分析和经验模式分解法等。

文献 [56] 利用连续小波变换与希尔伯特谱分析相结合的方法分析了间歇故障下采集信号的变化特征, 基于多尺度形态谱曲线特征分析和支持向量机方法对故障进行分离。文献 [57] 研究了永磁交流电机中的电气间歇故障和机械间歇故障, 基于非抽取离散小波变换对定子电流进行分析, 获取故障特征

信息,最后,分别利用能量阈值和线性判别分析方法进行间歇故障检测和分离。

文献 [14] 利用对交流电机磁场定向电流进行快速傅里叶变换和小波变换的方法实现了对间歇故障的检测,而对间歇故障的分离则是采用了基于变换系数的线性判别方法。然而本算法主要是离线情况进行设计的,难以在线实时检测和诊断间歇故障。文献 [58] 是 [14] 的拓展,提出了四种检测电气设备间歇故障的方法:短时傅里叶变换、非抽取小波分析、Wigner 分布和 Choi-Williams 分布的方法。在故障的分类阶段,采用了线性判别式法和 K 均值聚类法。但该方法仍然只能对间歇故障进行离线检测和诊断。

在交流电路系统中,常用的故障诊断方法是利用电流的基频信号,通过计算电路阻抗的方法定位故障,但是此类方法只能定位永久故障和线性故障。电弧故障是一类常见的间歇故障,其持续时间为交流电固有周期的 $1/4$,如此短的时间内很难利用基于基频的故障定位方法。文献 [59] 充分考虑到电弧故障的短时特点,提出了一种新的基于时间描述的电弧故障定位的方法,并且通过 PSCAD-EMTDC 系统环境进行了实验验证。文献 [60] 提出了一种数值谱域算法,该方法中电弧电压的幅值和故障距离利用终端电压和电流向量的基波和三次谐波来计算,得到的电压幅值用于确定故障的类别。文献 [61] 研究了地下输电系统的瞬态/间歇故障检测问题,提出了一种基于希尔伯特变换的新方法,对电信号进行希尔伯特变换得到瞬时功率,然后由瞬时功率中提取出故障信息。该算法可以有效降低噪声对故障检测效果的影响,同时可以提高间歇故障的诊断精度。

航空器配电系统由于所处的恶劣环境,发生间歇故障的概率比地面系统大大增加,因此对航空器配电系统进行故障诊断的研究很有必要。文献 [62] 提出了一种新的基于负载电路模型系数和使用电流频率信息进行参数估计的间歇故障的检测方法,与以往基于微分方程的方法相比,该方法降低了运算的复杂性,并且提高了故障检测的精度。

近年来,利用经验模式分解法 (Empirical mode decomposition, EMD) 诊断间歇故障逐渐引起人们的兴趣,其基本思想是:认为任何信号都是由表示信号内在特征振动形式的线性或非线性本征模式函数 (Intrinsic mode function, IMF) 组成,其本质是通过特征时间尺度获得信号的本征振动模式,对信号进行不断的筛选,从而诊断出故障^[63],该方法对处理和分析非线性和非平稳信号效果良好。文献 [64] 研究了风力涡轮机变速箱的间歇故障诊断问题,利用 EMD 方法对获取的非线性非平稳的设备运行数据进行分析,对两类间歇故障——周期性轮齿故障和间歇性轮齿故障都具有很好的诊断效果。但是,单纯

的 EMD 方法只适用于不同的 IMF 所占原始信号能量比例差别较大的情况,故障诊断虚警率高。为了解决此问题,文献 [65] 提出了一种基于经验模式分解 (EMD) 和多重支持向量机 (Multiple support vector machine, MSVM) 相结合的间歇故障诊断方法,研究表明此方法可以有效降低间歇故障对 BIT 系统造成的虚警。但是,EMD 方法只能获取故障发生时刻的特征信息,不能体现不同时刻故障之间的相互影响,而隐马尔科夫模型 (Hidden Markov model, HMM)^[66] 是一种动态时间序列模式识别工具,不仅可以利用故障发生前后的信息,识别出故障的类型,而且可以揭示系统潜在的变化特征,对设备状态进行观测、评估,发现故障早期发展的迹象。文献 [67] 提出了一种基于 EMD 和 HMM 的间歇故障诊断方法。首先对原始信号进行 EMD 分解,选择能量最大的几个 IMF 进行特征提取,作为系统状态的观测值;然后将观测值输入到训练好的 HMM 中进行决策,求取最大似然概率值作为识别结果。理论分析和仿真实验验证了 HMM 能够通过训练获取知识,并具有对未知系统状态进行识别和分类的能力,在学习样本有限的情况下,其自学习能力和诊断故障的效果均优于神经网络方法。

2.2.4 基于决策优化的方法

基于决策优化的间歇故障诊断方法的基本思想是:利用获取的含有间歇故障特征信息的数据构造适当的代价函数或性能指标,然后用优化分析的方法获得使得代价函数或性能指标达到最大或最小值的条件,并以此来确定检测间歇故障的最优阈值。

组合电路中间歇故障检测的难点在于进行测试时间间歇故障不一定发生,需要进行多次重复测试;因此,在总的测试时间固定的前提下,如何确定单次测试的时长便成了关键问题。为此,文献 [54] 利用间歇故障检测率提出了一种置信度的概念,得到了需要进行重复试验的最大次数;但文中并未给出具体的决策准则。文献 [68] 提出了确定检测次数的两种决策准则:1) 间歇故障发生的后验概率下降到某个值以下则停止检测;2) 当似然比小于某个阈值时则停止检测。文中还把该结果推广到了更加一般的情况,考虑间歇故障集合和检测集合,得到了一种故障矩阵,利用该矩阵和一种适当的决策准则,最后通过动态规划的方法解决了此优化问题。文献 [69] 考虑了非冗余组合电路的间歇故障检测问题,提出了一种逃逸概率 (Escape probability) 的概念来描述系统间歇故障的漏报率,利用一种非线性优化方法使检测到故障的概率达到最大、逃逸概率达到最小。

文献 [40] 设计了检测间歇故障的周期测试方法,利用测试代价成本和故障检测率构造代价函数,得

到了检测到故障的平均测试次数和测试时间. 文献 [20, 35] 把系统运行的状态划分为故障态、准故障态和健康态三种, 通过设计高低双阈值的方法来检测任何时刻系统所处的状态, 其中较低的阈值用于判断间歇故障, 较高的阈值用于判断永久故障; 而高低阈值的确定是通过对由故障检测率和虚警率构成的目标函数进行优化处理后得到的. 与两态故障诊断模型和单阈值检测方法相比, 该方法可以有效提高故障检测率和降低虚警率.

基于决策优化的间歇故障诊断方法, 充分利用优化的思想和动态规划的思路, 故障检测率高; 但代价函数的设计比较困难, 且只能解决某些特殊的故障检测问题, 同时决策寻优过程比较慢且可能出现无法达到全局最优点的问题.

总体来看, 基于数据的方法无需研究间歇故障系统复杂的动态特性, 只需对系统运行中各种测量数据进行分析 and 处理即可实现故障诊断. 此类方法已经成为目前诊断间歇故障的主流方法. 其中基于特征分析的方法通过提取系统运行数据中的有关特征信息来检测和分离间歇故障, 简便易行, 结果准确, 抗干扰能力强. 基于决策优化的方法, 把优化的思想引入到间歇故障的诊断中, 可以根据预设的性能指标灵活设计代价函数, 同时兼顾诊断结果的精度和运算的复杂性.

基于数据的间歇故障诊断需要获取足够的系统运行数据, 其中包括间歇故障状态下数据. 而考虑到间歇故障的随机性和间歇性, 常规的数据测量方法很难获取间歇故障发生时的相关数据, 从而导致间歇故障诊断无法进行. 另外, 目前此类间歇故障诊断方法基本都是已有的故障诊断方法的改进, 并未提出针对间歇故障特点的新的故障诊断方法, 考虑到间歇故障的特殊性和复杂性, 传统的基于数据的故障诊断方法在应用中势必存在诸多问题. 因此, 把基于数据和基于模型的方法相结合, 研究新的针对间歇故障特性的故障诊断方法值得关注.

2.2.5 基于实验研究的方法

人们对间歇故障的认识主要来源于计算机、电子设备、输电线路和机械系统中经常出现的随机重复的间歇不良响应. 在间歇故障理论研究尚未成熟的情况下, 利用实验方法对间歇故障进行诊断很久以来一直受到了广泛的关注.

文献 [70] 通过实验的方法研究了间歇电弧故障的检测问题. 利用传感器、光敏晶体管和环形天线搭建了基于数字信号处理器 (Digital signal processor, DSP) 的数据采集系统来测量电弧故障引起的声信号、红外和电磁辐射, 利用人工神经网络对数据进行分析 and 处理, 以达到检测间歇电弧故障的目的. 在上

述研究的基础上, 文献 [71] 进一步提出了一种低压电弧故障的检测方法, 利用便携式天线来检测低压电弧辐射的能量, 根据能量的突变来确定间歇故障的发生. 这种实验原理简单、易于实现, 但故障检测的阈值如何确定是需要重点考虑的问题.

文献 [72] 对汽车变速箱中的齿轮裂纹故障进行了仿真和实验研究, 通过对不同裂纹程度时的齿轮振动曲线分析, 给出了基于统计指标的间歇故障估计方法. 齿轮箱的间歇故障具有典型的周期性特征, 对系统的影响则主要表现为周期性的脉冲干扰.

为了研究航空电路系统的间歇故障诊断问题, 文献 [73] 设计了一套模拟航空电路系统的装置, 主要包括用于模拟飞行状态的环境室和间歇故障检测单元, 实验表明, 该方法可以有效地检测航电系统的间歇故障. 文献 [74] 通过实验研究了间歇故障对超大规模集成电路的影响, 利用基于硬件描述语言 (Very high speed integrated hardware description language, VHDL) 的故障注入技术, 向微处理器总线注入了不同的间歇故障.

基于实验研究的方法物理意义明确、结论可信度高. 但是, 实验研究具有很大的局限性, 首先, 只能为相对简单的系统搭建实验装置, 而对于复杂的大系统, 如航天器、核反应堆等很难进行相关的实验; 其次, 实验过程有时难以保证精确复现研究对象的运行过程; 另外, 出于对成本和人员安全性的考虑, 很多实验是无法进行的.

3 亟待解决的问题

目前, 对间歇故障诊断的研究还很不充分, 理论研究尚处于探索阶段, 缺乏系统性的研究成果; 尚未提出针对间歇故障特点的专门故障诊断方法. 在对间歇故障的研究中, 存在着一些亟待解决的问题:

1) 间歇故障的严格定义和衡量指标问题. 目前对于间歇故障只有定性的描述, 一般把随机发生、时有时无、可自行消失的故障称为间歇故障, 缺乏统一明确的严格定义和衡量指标.

2) 间歇故障特点对故障诊断效能的影响问题. 目前的研究大都未考虑间歇故障的可检测性条件, 对间歇故障在什么条件可检测没有给出定量的评价指标; 另外, 现有的成果在间歇故障的随机性、间歇性等对故障检测速度和检测率等的影响方面也缺乏系统性的理论分析.

3) 间歇故障检测阈值的选取问题. 不同于永久故障的检测, 因为间歇故障时有时无的特点, 其检测阈值的设定非常困难. 目前尚未见到关于如何设计间歇故障检测阈值的研究结果. 在后续研究中, 可以考虑自适应阈值和基于能量的阈值设计方法.

4) 强干扰条件下间歇故障的诊断. 间歇故障对

系统状态的影响与外界扰动和噪声对系统的影响极为相似, 很容易被掩盖, 从而导致诊断的失败. 目前的研究主要利用概率分析的方法来区分外界扰动和间歇故障对系统性能的影响, 但需要已知间歇故障发生的概率, 这在很多情况下是不可能的.

5) 闭环系统中间歇故障的诊断. 目前对间歇故障诊断的研究大都是在开环系统的框架下进行的. 而在闭环系统中, 由于反馈的补偿作用, 使得系统对故障具有一定的天然容错能力, 因此闭环系统的故障诊断成为故障诊断领域的研究难点, 而间歇故障因为闭环系统自身的容错能力而更加难以诊断.

6) 微小间歇故障的诊断. 目前对间歇故障诊断的研究大都是基于故障幅值或能量在一定界限之上的假定. 然而, 间歇故障在发生初期, 其幅值和能量很小, 此时可以称其为微小间歇故障, 既具有间歇性、随机性(周期性)和反复性的特点, 又受到幅值低、能量小的限制, 其检测和诊断更加困难. 然而, 微小间歇故障的准确诊断可以有效提高系统的可靠性与安全性, 对实际工业过程具有重要意义.

虽然目前有少数间歇故障诊断的文献对上述部分问题有所涉及^[28, 46, 58], 但是研究的不够深入, 具有很大的局限性, 基本都是从定性分析的角度进行讨论, 或者利用间歇故障先验概率信息进行讨论, 并未进行严格的理论分析; 所采用的方法大都是传统的故障诊断方法, 不同之处仅在于加入了间歇故障的统计信息或者把间歇故障视为随机扰动等, 没有提出专门针对间歇故障的诊断方法. 同时这些研究主要针对几类特殊类型的间歇故障, 普适性不强. 因此, 对上述问题进行深入分析并提出对应的解决方法是未来间歇故障诊断研究领域值得关注的方向.

4 总结

本文对间歇故障诊断的研究现状进行了概述, 对相关的研究成果进行了分类和评析. 总体来讲, 与永久故障诊断的研究情况相比, 目前间歇故障诊断技术的研究成果还很少, 而且已有的成果也大都按照传统的故障诊断思路进行研究, 仅仅是在传统的故障诊断方法中加入间歇故障的先验信息; 或者把间歇故障简单地视为系统的随机扰动进行处理; 或者只考虑间隔时间较长的间歇故障, 而回避了强随机性、短间歇性等间歇故障诊断的本质难点. 截至目前, 尚没有专门的间歇故障诊断方法被提出, 同时针对间歇故障特点进行研究的系统性理论成果也未见报道; 另外, 目前的研究主要针对一些特定的对象, 如数字电路、计算机、配电系统以及电动机和齿轮箱等, 缺乏普适性的研究成果.

因此, 深入分析间歇故障的动态特性, 研究针对间歇故障特点的故障诊断方法极有可能成为未来动

态系统故障诊断领域一个重要的研究方向. 深入分析间歇故障可检测性条件以及间歇故障特性对故障诊断效能的影响, 利用间歇故障的重复性特征设计可以利用历史信息的递推故障检测算法, 根据间歇故障随机性和间歇性特点设计自适应故障检测阈值等是间歇故障诊断研究中值得深入考虑的思路.

References

- Zhou Dong-Hua, Hu Yan-Yan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 748–758
(周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 748–758)
- Beard R V. Failure Accommodation in Linear Systems through Self-reorganization [Ph.D. dissertation], Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, USA, 1971
- Mehra R K, Peschon J. An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems. *Automatica*, 1971, **7**(5): 637–640
- Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, 1990, **26**(3): 459–474
- Zhou Dong-Hua, Ye Hao, Wang Gui-Zeng, Ding Xian-Chun. Discussion of some important issues of observer based fault diagnosis technique. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(3): 338–344
(周东华, 叶昊, 王桂增, Ding Xian-Chun. 基于观测器方法的故障诊断技术若干重要问题的探讨. *自动化学报*, 1998, **24**(3): 338–344)
- Patton R J, Frank P M, Clark R N. *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. London: Springer-Verlag, 2000
- Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000
(周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000)
- Zhou Dong-Hua, Li Gang, Li Yuan. *Fault Diagnosis Technology of Data-driven for Industrial Processes — Approaches Based on Principal Component Analysis and Partial Least Square*. Beijing: Science Press, 2011
(周东华, 李钢, 李元. 数据驱动的工业过程故障诊断技术 — 基于主元分析与偏最小二乘的方法. 北京: 科学出版社, 2011)
- Correcher A, Garcia E, Morant F, Quiles E, Rodriguez L. Intermittent failure dynamics characterization. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, **61**(3): 649–658
- The Authoritative Dictionary, IEEE Standard 100, 2000
- Liu J X, Zhang X. Detection method of intermittent faults in electronic systems based on Markov model. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou, China: IEEE, 2011. 216–219
- Li Shun-Ming, Chu Xiang-Lei. New three-state partition of fault classification method and its threshold confirmation. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, **40**(3): 292–296
(李舜酩, 楚向磊. 新三态故障分类模型及其阈值确定. *南京航空航天大学学报*, 2008, **40**(3): 292–296)

- 13 Ball M, Hardy F. Effects and detection of intermittent failures in digital systems. In: Proceedings of the 1969 Fall Joint Computer Conference. Las Vegas, USA: AFIPS, 1969. 329–335
- 14 Zanardelli W G, Strangas E G, Aviyente S. Identification of intermittent electrical and mechanical faults in permanent-magnet AC drives based on time-frequency analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**(4): 971–980
- 15 McConnel S, Siewiorek D P. C.vmp: the implementation, performance, and reliability of a fault tolerant multiprocessor. In: Proceedings of the 3rd USA-Japan Computer Conference. San Francisco, USA: AFIPS, 1978. 325–330
- 16 Krasnobaev V A, Krasnobaev L A. Application of Petri nets for the modeling of detection and location of intermittent faults in computers. *Automation and Remote Control*, 1989, **49**(9): 1198–1204
- 17 Blom M, Lippolt B. Diagnosing intermittent faults in telecommunication networks. In: Proceedings of the 1992 IEEE Global Telecommunications Conference. Orlando, USA: IEEE, 1992. 544–548
- 18 Liu Xin-Min, Wen Xi-Sen, Qiu Jing, Liu Guan-Jun. False alarm filter of mechatronics built-in test based on the hidden Markov model. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(3): 387–391 (柳新民, 温熙森, 邱静, 刘冠军. 基于隐马尔可夫模型的机电系统机内测试虚警抑制. 兵工学报, 2005, **26**(3): 387–391)
- 19 Zeng Tian-Xiang. *Electronic Equipment Testability and Diagnostic Technology*. Beijing: Aviation Industry Press, 1995 (曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术. 北京: 航空工业出版社, 1995)
- 20 Liu Xin-Min, Qiu Jing, Liu Guan-Jun, Qian Yan-Ling. Diagnosing intermittent faults to reduce BIT false alarms. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(4): 369–372 (柳新民, 邱静, 刘冠军, 钱彦岭. 诊断间歇故障降低 BIT 虚警. 测试技术学报, 2004, **18**(4): 369–372)
- 21 Patton R J, Chen J, Lopez-Toribio C J. Fuzzy observers for non-linear dynamic systems fault diagnosis. In: Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control. Tampa, USA: IEEE, 1998. 84–89
- 22 Millan-Almaraz J R, Romero-Troncoso R J, Contreras-Medina L M, Garcia-Perez A. Embedded FPGA based induction motor monitoring system with speed drive fed using multiple wavelet analysis. In: Proceedings of the 2008 International Symposium on Industrial Embedded Systems. Le Grande Motte, France: IEEE, 2008. 215–220
- 23 Wadhvani S, Gupta S P, Kumar V. Fault classification for rolling element bearing in electric machines. *IETE Journal of Research*, 2008, **54**(4): 264–275
- 24 Alamuti M M, Nouri H, Ciric R M, Terzija V. Intermittent fault location in distribution feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, **27**(1): 96–103
- 25 Gracia J, Saiz L, Baraza J C, Gil D, Gil P. Analysis of the influence of intermittent faults in a microcontroller. In: Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems. Bratislava, Slovakia: IEEE, 2008. 227–232
- 26 Prasad V B. Markovian model for the evaluation of reliability of computer networks with intermittent faults. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Singapore: IEEE, 1991. 2084–2087
- 27 Ismaeel A A, Bhatnagar R. Test for detection and location of intermittent faults in combinational circuits. *IEEE Transactions on Reliability*, 1997, **46**(2): 269–274
- 28 Malaiya Y K, Su S Y H. A survey of methods for intermittent fault analysis. In: Proceedings of the 1979 National Computer Conference. New York, USA: AFIPS, 1979. 577–585
- 29 Lin T H, Shin K G. An optimal retry policy based on fault classification. *IEEE Transactions on Computers*, 1994, **43**(9): 1014–1025
- 30 Bondavalli A, Chiaradonna S, di Giandomenico F, Grandoni F. Discriminating fault rate and persistency to improve fault treatment. In: Proceedings of the 27th IEEE International Symposium on Fault Tolerant Computing. Seattle, USA: IEEE, 1997. 354–362
- 31 Sorensen B A, Kelly G, Sajecki A, Sorensen P W. An analyzer for detecting intermittent faults in electronic devices. In: Proceedings of the 1994 IEEE Systems Readiness Technology Conference AUTOTESTCON. Anaheim, USA: IEEE, 1994. 417–421
- 32 Yang H, Jiang B, Zhang Y M. Tolerance of intermittent faults in spacecraft attitude control: switched system approach. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(13): 2049–2056
- 33 Kamal S. An approach to the diagnosis of intermittent faults. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, **C-24**(5): 461–467
- 34 Mallela S, Masson G M. Diagnosable systems for intermittent faults. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, **C-27**(6): 560–566
- 35 Lei Y, Djurdjanovic D. Diagnosis of intermittent connections for DeviceNet. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **23**(5): 606–612
- 36 Nakagawa T, Yasui K. Optimal testing-policies for intermittent faults. *IEEE Transactions on Reliability*, 1989, **38**(5): 577–580
- 37 Correcher A, Garcia E, Morant F, Quiles E, Blasco-Gimenez R. Intermittent failure diagnosis in industrial processes. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, USA: IEEE, 2003. 723–728
- 38 Huang Z, Chandra V, Jiang S, Kumar R. Modeling discrete event systems with faults using a rules-based modeling formalism. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2003, **9**(3): 233–254
- 39 Garcia E, Rodriguez L, Morant F, Correcher A, Quiles E. Latent nestling method: a new fault diagnosis methodology for complex systems. In: Proceedings of the 34th Annual Conference on Industrial Electronics. Piscataway, USA: IEEE, 2008. 253–258

- 40 Musierowicz K, Lorenc J, Marcinkowski Z, Kwapisz A. A fuzzy logic-based algorithm for discrimination of damaged line during intermittent earth faults. In: Proceedings of the 2005 IEEE Russia Power Tech. Petersburg, Russia: IEEE, 2005. 963–967
- 41 Jiang S B, Kumar R, Garcia H E. Diagnosis of repeated/intermittent failures in discrete event systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**(2): 310–323
- 42 Correcher A, Garcia E, Morant F, Blasco-Gimenez R, Quiles E. Diagnosis of intermittent fault dynamics. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Hamburg, Germany: IEEE, 2008. 559–566
- 43 Bennett S M, Patton R J, Daley S, Newton D A. Model based intermittent fault tolerance in an induction motor drive. In: Proceedings of the 1996 Symposium on Control, Optimization and Supervision. Lille, France: CESA, 1996. 678–683
- 44 Bennett S M, Patton R J, Daley S, Newton D A. Torque and flux estimation for a rail traction system in the presence of intermittent sensor faults. In: Proceedings of the 1996 International Conference on Control. Exeter, UK: UKACC, 1996. 72–77
- 45 Gu Zhou, Zhang Jian-Hua, Du Li-Long. Fault tolerant control for a class of time-delay systems with intermittent actuators failure. *Control and Decision*, 2011, **26**(12): 1829–1834
(顾洲, 张建华, 杜黎龙. 一类具有间歇性执行器故障的时滞系统的容错控制. *控制与决策*, 2011, **26**(12): 1829–1834)
- 46 Xu Gui-Bin. Researches on Fault Diagnosis and Prediction in Dynamic Systems [Master dissertation], Tsinghua University, China, 2011
(徐贵斌. 动态系统故障诊断及预测研究 [硕士学位论文], 清华大学, 中国, 2011)
- 47 Breuer M A. Testing for intermittent faults in digital circuits. *IEEE Transactions on Computers*, 1973, **C-22**(3): 241–246
- 48 Hsu Y T, Hsu C F. Novel model of intermittent faults for reliability and safety measures in long-life computer systems. *International Journal of Electronics*, 1991, **71**(6): 917–937
- 49 Contant O, Lafortune S, Teneketzis D. Diagnosis of intermittent faults. *Discrete Event Dynamic Systems — Theory and Applications*, 2004, **14**(2): 171–202
- 50 Abreu R, Zoetewij P, Van Gemund A J C. A new Bayesian approach to multiple intermittent fault diagnosis. In: Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence. Pasadena, Canada: IJCAI, 2009. 653–658
- 51 Abreu R, Van Gemund A J C. Diagnosing multiple intermittent failures using maximum likelihood estimation. *Artificial Intelligence*, 2010, **174**(18): 1481–1497
- 52 Hanson H A, Nolte T, Norstrom C, Punnekkat S. Integrating reliability and timing analysis of CAN-based systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, **49**(6): 1240–1250
- 53 Li J, Tsung F, Lei Y, Djurdjanovic D, Ni J. DeviceNet reliability assessment using physical and data link layer parameters. *Quality and Reliability Engineering International*, 2010, **26**(7): 703–715
- 54 Luo X W, Dong M, Huang Y L. On distributed fault-tolerant detection in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, **55**(1): 58–70
- 55 Sun Y Q, Feng H L. Intermittent fault diagnosis in wireless sensor networks. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **160**(1): 318–322
- 56 Hao Ru-Jiang. Application of Acoustic Emission and Morphologic Methods in Fault Diagnostics of Rolling Bearing [Ph. D. dissertation], Tsinghua University, China, 2008
(郝如江. 声发射和形态学方法在滚动轴承故障诊断中的应用 [博士学位论文]. 清华大学, 中国, 2008)
- 57 Zanardelli W G, Strangas E G. Methods to identify intermittent electrical and mechanical faults in permanent magnet AC drives based on wavelet analysis. In: Proceedings of the 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago, USA: IEEE, 2005. 154–160
- 58 Strangas E G, Aviyente S, Zaidi S S H. Time-frequency analysis for efficient fault diagnosis and failure prognosis for interior permanent-magnet AC motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(12): 4191–4199
- 59 Alamuti M M, Nouri H, Montakhab M, Polycarpou A. Single end low voltage arcing fault location using time based formulation. In: Proceedings of the 45th International Universities Power Engineering Conference. Cardiff, UK: IEEE, 2010. 5–10
- 60 Radojevic Z M, Terzija V V. Fault distance calculation and arcing faults detection on overhead lines using single end data. In: Proceedings of the 9th International Conference on Developments in Power System Protection. Glasgow, UK: IET, 2008. 638–643
- 61 Cui T, Dong X Z, Bo Z Q, Juszczak A. Hilbert-transform based transient/intermittent earth fault detection in non-effectively grounded distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(1): 143–151
- 62 Yaramasu A, Cao Y, Liu G, Wu B. Intermittent wiring fault detection and diagnosis for SSPC based aircraft power distribution system. In: Proceedings of the 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kachsiung, Taiwan, China: IEEE, 2012. 1117–1122
- 63 Xie Jing-Xin, Cheng Chun-Tian, Zhou Gui-Hong, Sun Yu-Mei. A new direct multi-step ahead prediction model based on EMD and chaos analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(6): 684–689
(谢景新, 程春田, 周桂红, 孙玉梅. 基于经验模式分解与混沌分析的直接多步预测模型. *自动化学报*, 2008, **34**(6): 684–689)
- 64 Antoniadou I, Manson G, Staszewski W J. Damage detection in gearboxes considering intermittent faults and time-varying loads. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Diagnostics of Structures. Cracow, Poland: IEEE, 2011. 14–16
- 65 Guo M W, Ni S H, Zhu J H. Diagnosing intermittent faults to restrain BIT false alarm based on EMD-MSVM. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **105–107**(1): 729–732
- 66 Wang Tian-Shu, Zheng Nan-Ning, Yuan Ze-Jian. Statistical learning in machine intelligence and pattern recognition. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(S1): 103–116
(王天树, 郑南宁, 袁泽剑. 机器智能与模式识别研究中的统计学习方法. *自动化学报*, 2002, **28**(S1): 103–116)

- 67 Guo Ming-Wei, Ni Shi-Hong, Zhu Jia-Hai. Intermittent fault diagnosis for built-in test system based on EMD and HMM. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2012, **32**(3): 467–470
(郭明威, 倪世宏, 朱家海. 基于 EMD-HMM 的 BIT 间歇故障识别. 振动、测试与诊断, 2012, **32**(3): 467–470)
- 68 Kamal S, Page C V. Intermittent faults: a model and a detection procedure. *IEEE Transactions on Computers*, 1974, **23**(7): 713–719
- 69 Savir J. Optimal random testing of single intermittent failures in combinational circuits. In: Proceedings of the 7th Annual International Conference on Fault-Tolerant Computing. Los Angeles, USA: IEEE, 1977. 180–185
- 70 Sidhu T S, Singh G, Sachdev M S. Arcing fault detection using artificial neural networks. *Neurocomputing*, 1998, **23**(1–3): 225–241
- 71 Kim C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, **24**(1): 416–423
- 72 Wu S Y, Zuo M J, Parey A. Simulation of spur gear dynamics and estimation of fault growth. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, **317**(3–5): 608–624
- 73 Steadman B, Berghout F, Olsen N, Sorensen B. Intermittent fault detection and isolation system. In: Proceedings of the 43rd Annual IEEE AUTOTESTCON Conference. Salt Lake City, USA: IEEE, 2008. 37–40
- 74 Gracia-Morán J, Gil-Tomás D, Baraza J C, Saiz-Adalid L J, Gil-Vicente P J. Searching representative and low cost fault models for intermittent faults in microcontrollers: a case study. In: Proceedings of the 16th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. Tokyo, Japan: IEEE, 2010. 11–18



周东华 清华大学自动化系教授. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 预测维护. 本文通信作者.

E-mail: zdh@mail.tsinghua.edu.cn

(**ZHOU Dong-Hua** Professor in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, and predictive maintenance. Corresponding author of this paper.)



史建涛 清华大学自动化系博士研究生. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 分布式多智能体系统.

E-mail: shijt11@mails.tsinghua.edu.cn

(**SHI Jian-Tao** Ph.D. candidate in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, and distributed multi-agent systems.)



何潇 清华大学自动化系讲师. 主要研究方向为网络化系统的状态估计、故障诊断与容错控制, 无人机的智能自主控制. E-mail: hexiao@tsinghua.edu.cn

(**HE Xiao** Lecturer in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers state estimation, fault diagnosis and tolerant control of networked systems, and intelligent autonomous control of unmanned aerial vehicles.)