

现代模拟电路故障诊断技术发展综述

李光升, 欧博, 石海滨

(陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072)

摘要: 模拟电路的故障率长期以来居高不下, 但模拟电路由于其客观世界信号本质无法完全被数字电路取代, 模拟电路的可靠性也成为制约电路系统可靠性的关键因素; 主要针对模拟电路的软故障诊断方法进行了研究, 分析了模拟电路在故障诊断中的难点, 分别对传统和智能化的故障诊断发展和研究现状进行了综述, 展望了未来模拟电路故障诊断的发展趋势。

关键词: 模拟电路; 软故障; 人工智能

Summary of Development of Modern Diagnostic Techniques of Analog Circuit Fault

Li Guangsheng, Ou Bo, Shi Haibin

(Department of Weapons and Control, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: The failure rate of analog circuits has been high for a long time, but the analog circuit cannot be completely replaced by digital circuits because of its objective world signal nature. The reliability of analog circuits has become a key factor that limits the reliability of circuit systems. This article mainly studies the soft fault diagnosis method of analog circuit, analyzes the difficulties of analog circuit in fault diagnosis, and summarizes the development and research status of traditional and intelligent fault diagnosis, and forecasts the future fault diagnosis of analog circuit and its development trend.

Keywords: analog circuit; soft fault; artificial intelligence

0 引言

电子设备中的电路主要由数字电路和模拟电路两部分组成, 数字电路发展到今天, 其技术和功能已经十分完善, 但客观世界信号的本质决定了数字电路无法完全取代模拟电路, 模拟电路仍然应用于航天、军事、通信和其他领域, 模拟电路和数模混合电路还占了较大的比重。理论分析和实验数据表明, 目前大部分电路中数字电路的部分占了80%, 模拟电路仅占20%, 但是80%的故障又都发生在模拟电路部分^[1], 模拟电路的故障率居高不下, 对整体电路的可靠性有着重要影响。

1 模拟电路故障诊断难点

模拟电路故障诊断一般是针对电路发生的软故障。软故障是指元件的参数随时间和环境条件的影响而偏离, 元件参数超出电路本身容差范围, 从而导致系统的性能异常无法完成预先设计的功能^[2], 元件软故障通常不会导致电路的网络拓扑结构改变。

模拟电路的故障诊断起步早, 但发展进程缓慢, 至今仍然没有可以被广泛应用的方法。相对于数字电路的故障

诊断来说, 模拟电路诊断主要有以下几个难点:

(1) 电路参数获取困难。模拟电路的响应一般是连续的, 电路板节点多、线路密, 而且模拟电路系统一般比较封闭, 分层多, 受电路板复杂结构的影响, 可以进行测量的端口和节点数少, 难以获取更多有用的电流电压参数。模拟电路无论哪处发生故障都会通过电流电压等电路参数体现, 获取电路参数越多, 对于故障的定位越容易, 如何获取更多的电路参数成为模拟电路故障诊断的一个难点。

(2) 故障特征提取复杂。采集到大量参数后, 需要对电路参数进行分析比对, 而实际模拟电路中的元件参数离散性较大, 模拟电路还允许电路元件的参数存在容差。容差的存在导致了模拟电路故障的模糊性, 对于含有大量容差元件的电路, 获取的大量电路参数中的故障特征是否在容差范围内^[3], 是否对电路的其他节点参数产生影响难以确定, 有时故障的特征也无法唯一确定, 难以保证诊断的准确性。

(3) 故障位置的精准定位难以实现。电路网络一般比较复杂, 有的电路板故障诊断需要丰富的经验和电路有关知识, 对专业知识和经验的要求较高。模拟电路的反馈回路和非线性特征广泛存在, 即使在线性电路中非线性问题也无法避免, 复杂的拓扑结构和非线性问题极大增加了模拟电路故障诊断的计算量, 求解比较困难, 对故障定位难以实现。

(4) 环境因素影响较大。模拟电路对环境变化比较敏

收稿日期:2018-11-05; 修回日期:2018-11-29。

作者简介:李光升(1972-),男,山东安丘人,副教授,主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

石海滨(1974-),男,河北固安人,副教授,主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

感,其输出响应不仅受电路板和电子元件的制造工艺引起的元件参数的偏差影响,而且容易受到温度、湿度、电磁干扰等外界环境因素的影响^[4]。

2 国内外研究现状

模拟电路故障诊断方法起步于 20 世纪 60 年代,由于美国军事工业领域的重视,一度掀起研究热潮。模拟电路的故障诊断发展大致可以分为传统模拟电路故障诊断方法和智能化模拟电路故障诊断方法。前者在早期对简单电路的故障诊断效率较高,使用起来相对简单,后者偏向于对大规模集成电路进行故障诊断,较为复杂。

2.1 传统模拟电路故障诊断及发展

传统模拟电路故障诊断通过在电路可测节点中测量电路信息,推断电路中故障的形式和失效元器件或线路的位置。按照对电路进行模拟分析和测量电路信息的前后顺序,可以将模拟电路故障诊断方法分为测前模拟法和测后模拟法,如图 1 所示。

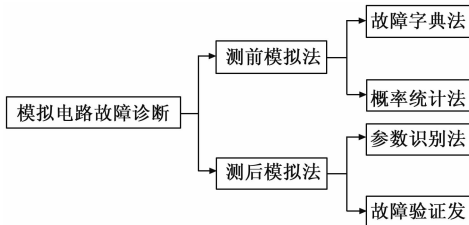


图 1 模拟电路故障诊断方法

20 世纪 60 年代,由于军事工业领域的重视,电路板的故障诊断研究兴起,接下来十几年内模拟电路故障诊断技术在全世界掀起热潮。这一时期以测前模拟法为主,测前模拟法指在测量电路信息前,对电路进行模拟分析,再通过节点参数的提取与之前进行的模拟分析进行比对,推断故障的原因。测前模拟法中主要应用的方法有故障字典法和概率统计法,但以故障字典法应用最为广泛。

故障字典法,即通过电路仿真得到各种故障状态下的特征,并将特征和故障之间的对应关系编入字典,在实际诊断过程中,只要对电路实时特性进行采集,就可以从故障字典中查找相应的故障。在故障字典法提出之后,国内外都对故障字典法进行了改进型的研究,Grzechca 等提出一种改进的故障字典法,该方法将模糊理论加入到故障诊断中,可以对具有容差的模拟电路软故障进行诊断^[5];2000 年陈圣俭等在故障字典法中运用支路屏蔽原理,实现了模拟电路的软故障诊断^[6]。故障字典法是最早提出的故障诊断方法,该方法使用简单,无需计算,适用于线性和非线性系统的诊断。但是,当测试节点和故障模式较多时,故障字典数据集将非常大,构建故障字典难度大大提高,不适合应用于大规模电路测试。而且故障字典的故障特征通常是实时的,没有考虑实际的电路容错效果,对于单故障和硬故障诊断,软故障和多故障的诊断效果是有限的。

在测后模拟法中主要有参数识别法和故障验证法。参数识别法根据网络的已知拓扑关系、输入和输出,估计或求解各分量的参数(或参数与标称值的偏差),最终确定网络中的故障参数达到每个分量的容差范围。该方法实际上是一种参数识别技术,适用于对网络中的软故障进行诊断。在参数识别法的研究和应用中,改进型的参数识别法也有很多,如采取系统辨识工具与自回归模型对电路的故障参数进行检测的方法^[7];Long 提出将改进灵敏度分析算法融入到参数识别,解决了参数识别法对可测性要求高的缺点^[8];谢仕炜等利用递推最小二乘法,能够实时辨识多端口的外网静态等值参数,提出了在外部网络信息不足情况下的参数识别新方法^[9]。但是参数识别法还存在一些不足,要对电路建立数学模型,要测得多处节点的电路参数,计算量大,对非线性电路和大规模电路来说实现困难。

到 20 世纪 80 年代,由于大规模集成电路的问世和普及,故障字典法和参数识别法已经无法满足大规模集成电路故障诊断的要求,一些研究者提出在获取“不完整”的故障信息基础上诊断,先预测网络中故障元件的集合,再利用激励信号和在可测节点取得数据,根据一定判据进行验证,即故障验证法。故障验证法也是实际情况中进行故障诊断的一般思路,在故障验证法中应用最多的是网络撕裂法,该方法主要针对大规模集成电路,主要思想是通过将大型电路网络撕裂成子网络,从而实现大规模电路的故障诊断,但该方法必须在可及节点进行撕裂,否则划分子模块将不能实现故障诊断。国外学者在使用网络撕裂法对模拟电路进行故障诊断的研究时,实现了并行稀疏矩阵求解器,用来提高电磁暂态(EMT)仿真软件的计算速度。这种新方法建立在 KLU 稀疏矩阵求解器上,适用于基于电路的仿真方法,对所有非线性模型使用完全迭代,适用于大规模网络^[10]。国内学者在复杂模拟电路的故障诊断中,基于交流置换激励,并结合灵敏度分析提出了模拟电路网络撕裂的新方法^[11]。网络撕裂法在现代。故障验证法对使用人员要求较高,需要丰富的经验和大量专业知识储备,还需了解电路的结构等,在大规模电路故障诊断中需要进行大量计算,如何减少验证计算量是故障验证法普及应用的关键。

2.2 智能化模拟电路故障诊断及发展

20 世纪 90 年代以后,随着人工智能技术的发展,对模拟电路的故障诊断研究进一步深入,基于人工智能的模拟电路故障诊断方法逐渐被发明。人工智能法不需要建立复杂的故障模型,主要包括故障样本训练和测试两个过程,可以智能的自动判断故障类型,同时适用于线性和非线性电路的故障诊断,对解决模拟电路故障诊断中的不确定性和模糊性效果较好。由于人工智能法不需要复杂的数学计算,大大提高了故障诊断的效率,而且要求获得的故障信

息较少, 适合用于可测节点少的集成电路和大规模集成电路的故障诊断, 人工智能法也成为目前重点的研究方向。人工神经网络(Artificial Neural Networks)和支持向量机(Support Vector Machine)是目前模拟电路故障诊断中应用最为广泛的两种人工智能技术。

人工神经网络是一种模仿神经网络行为特征, 进行分布式并行信息处理的算法数学模型^[12]。这种网络具有复杂的内部结构, 通过调整大量内部节点之间的互连关系, 达到处理大量信息的目的。人工神经网络有很多优点, 自组织、自学习、自适应能力强, 鲁棒性和容错性较好, 并行处理能力良好, 具备较强的非线性映射能力和分类识别能力。1990年, Starzyk对神经网络进行研究, 发现神经网络具备的辨识和推理能力非常适用于模拟电路的故障诊断^[13]。基于可测量性方法, 一种基于可测性分析的神经网络模拟电路故障诊断方法被提出, 该方法首先对电路进行可测试性分析, 然后确定可诊断组件并消除不可诊断和难以诊断的组件, 这种方法可以减小神经网络的规模并提高诊断效率^[14]。神经网络的种类很多, 各有其特点和缺陷, 为集中发挥各种神经网络的优势, 集成的神经网络方法逐渐被应用, 并在模拟电路的故障诊断应用中比单个神经网络有更好的故障诊断效果^[15]。近几年国外学者提出基于人工神经网络的三相整流器和逆变器两种电力电子电路的精确缺陷导向参数测试方法, 该算法采用离散小波分解作为特征提取的预处理器, 采用两种类型的前馈神经网络, 例如BPM-LP和PNN, 用于故障事件检测。结果发现非常有希望, 最高达99.95%^[16]。

在国外研究者对神经网络的研究如火如荼进行同时, 国内专家学者紧跟国际前沿。基于不同的算法, 人工神经网络的应用方法众多。利用改进型BP神经网络对模拟电路进行故障诊断, 能够提高网络学习速率和故障诊断效率, 但网络结构确定比较困难^[17]; 结合粒子群优化算法和小波神经网络的神经网络诊断方法, 对模拟电路故障诊断效果良好^[18]。近几年神经网络算法的研究仍是热点, 在优化的神经网络方法中, 构建了基于不同算法的改进型神经网络方法。基于狼群算法对RBF神经网络进行优化的方法被提出, 并通过实验验证了该方法的可行性^[19]; 基于核覆盖的神经网络模型, 经过仿真能有效构建三层神经网络, 对网络结构难以确定的问题提出了解决的新方法^[20]。在大规模数模混合电路中, 故障模式多而且状态复杂, 发生传播的可能性也较大, 针对故障传播的问题, 模块化BP神经网络的故障诊断方法对该问题能够有效解决^[21]。神经网络方法对模拟电路故障诊断效果显著的同时也存在了一些缺陷, 主要是网络结构确定难, 学习速度慢, 训练时间长等。

支持向量机是另一种人工智能的模拟电路故障诊断方法, 也是目前的研究热点。支持向量机是一种新的机器学习算法, 是在统计学理论的基础上, 加上出色的学习性能,

理论上可以弥补神经网络的许多缺陷, 应用前景更为广阔。Salat R和Osowski S用支持向量机作为分类器实现电路故障诊断, 在效果和性能上比起一般的分类器更好^[22]。Siwek等对支持向量机方法也进行了研究, 他采用的诊断电路是RC阶梯网络电路, 仿真结果表明诊断精度和效率都较高^[23]。Kuraku N V P研究提出了一种基于概率主成分分析和支持向量机的新型故障诊断方法, 用于单相级联H桥多电平逆变器中的受控开关, 仿真和实验结果表明, 通过使用PPCA-SVM, 可以提高故障定位的准确性, 减少CHMLI故障诊断所需的时间^[24]。国内的研究也紧随其后, 近几年基于支持向量机的故障诊断研究中, 将监督式改进K近邻并将其与改进最小二乘支持向量机结合, 是支持向量机算法的新的突破^[25]; 基于改进型果蝇算法, 针对非线性系统的故障元件定位提出优化支持向量机方法, 提高了诊断的精度和速率^[26]; 在支持向量机基础上, 基于正余弦算法优化的软故障诊断方法在容差模拟电路诊断中有较强的适应能力^[27]。

3 模拟电路故障诊断的发展趋势

模拟电路的故障诊断由于其自身结构及传递信号的性质, 实现起来有诸多困难。从20世纪60年代开始, 研究者们从未停止对模拟电路故障诊断的研究, 取得了丰硕的成果, 但模拟电路故障诊断的方法仍然较为复杂, 从目前的研究现状看, 模拟电路故障诊断方法的研究呈现出以下趋势:

(1) 增强模拟电路系统自身测试性。从模拟电路故障诊断的关键技术上来看, 无论是传统的故障诊断方法还是现代智能化的诊断方法, 都需要能对待诊断电路进行数据采集和测量, 而模拟电路尤其是大规模的集成电路可测的节点少, 对电路参数的采集带来诸多不便。在模拟电路设计之初增加可测节点将会减小获取电路的参数, 其次可以在电路中加入自检测功能, 当电路发生故障时可自动报警标识发生故障的子电路或元件。

(2) 进一步对人工智能法进行研究。人工智能方法在问世之初便以很好的学习能力和自适应能力获得故障诊断研究者的青睐, 目前人工智能方法的研究成果大多还存在很多弊端, 无法进行推广应用, 主要是需要大量的故障样本集和耗费大量系统的训练时间, 导致实际操作中比较复杂。要突破人工智能方法的这些缺陷, 还需要研究者进行后续的研究。

(3) 对模拟电路进行数字化改造。在模拟电路的故障诊断技术研究遭遇瓶颈的同时, 数字电路的故障诊断技术已经相对成熟, 也有很多专家学者转向将模拟电路改造成数字电路的研究。但是由于模拟电路和数字电路的信号本质区别, 数字电路想要完全取代模拟电路仍有难以攻克困难, 但对模拟电路进行数字化改造也必然是一种发展趋

势, 数模混合电路中数字电路部分所占比重也一定会越来越高。

4 结束语

模拟电路的可靠性是整个电路系统可靠性的重要决定因素, 电子技术和产业的快速发展对模拟电路的检测和诊断提出了更高要求。由于电路结构不断复杂化和集成程度的不断深入化, 传统的故障诊断方法不能满足现大规模集成模拟电路的诊断要求, 迫使人们探寻更加智能化高效化的方法, 现代信息处理技术和机器学习理论为智能化的模拟电路故障诊断方法研究提供了理论支持, 为模拟电路故障诊断技术的进一步发展提供了重要契机。

文中指出了模拟电路故障诊断的难点, 在国内外研究现状部分分别对传统方法和智能化方法的发展和研究现状进行了较为全面的综述, 并对未来模拟电路的故障诊断发展趋势进行了展望。当前, 模拟电路的故障诊断已经取得了大量成果, 但在理论和应用方面还存在许多需要解决的问题, 对单一故障诊断的方法研究较多, 多故障的故障诊断涉及较少。单一的诊断方法应用到实际中效果并不够理想, 因此多种诊断方法的结合提高对系统的故障诊断能力也是很有前景的研究方向。

参考文献:

[1] 章玉珠. PCB 电路故障预测与诊断方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

[2] 郭珂, 伞冶, 朱奕. 现代模拟电路智能故障诊断方法研究与发展 [J]. 电子设计工程, 2012 (2): 177-180.

[3] 叶笠, 王厚军, 田书林, 叶芄. 容差模拟电路软故障诊断的一种方法 [J]. 电工技术学报, 2011 (5): 119-125.

[4] 郭珂. 核方法研究及在模拟电路故障诊断中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[5] Grzechca D, Golonek T and Rutkowski J. Analog fault AC dictionary creation—the fuzzy set approach [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Island of Kos, Greece, 2006: 5744-5747.

[6] 陈圣俭, 洪炳熔, 王月芳, 等. 可诊断容差模拟电路软故障的新故障字典法 [J]. 电子学报, 2000 (2): 127-129.

[7] Guo Z, Savir J. Coefficient-based test of parametric faults in analog circuits [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55 (1): 150-157.

[8] Long T, H. Wang J and Long B. A classical parameter identification method and a modern test generation algorithm [J]. Circuits System Signal Process, 2011, 30: 391-412.

[9] 谢仕炜, 胡志坚, 吴方劼, 等. 基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (3): 26-34.

[10] Abusalah A, Saad O, Mahseredjian J, et al. CPU based parallel computation of electromagnetic transients for large power

grids [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 162: 57-63.

[11] 宝石, 许军. 基于交流置换激励的模拟电路网络撕裂法 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31 (3): 69-74.

[12] 孙朝云. 基于人工神经网络的预测模型 [J]. 福建电脑, 2011 (7): 20-38.

[13] Starzyk J A, EI-Gamal M A. Artificial neural network for testing analog circuits [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. 1990: 1851-1854.

[14] Cannas B, Fanni A, Manetti S, et al. Neural network-based analog fault diagnosis using testability analysis [J]. Neural Computing & Applications, 2004, 13 (4): 288-298.

[15] Gamal M, Mohamed M. Ensembles of neural networks for fault diagnosis in analog circuits [J]. Journal of Electronic Testing, 2007, 23 (4): 323-339.

[16] Khan D, Saha S, Saha S, et al. Defect Detection in Power Electronic Circuits by Artificial Neural Network Using Discrete Wavelet Analysis [M] //Advances in Power Systems and Energy Management. Springer, Singapore, 2018: 477-485.

[17] 何怡刚, 梁戈超. 模拟电路故障诊断的 BP 神经网络方法 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2003 (5): 35-39.

[18] 左磊, 侯立刚, 高大明, 等. 基于粒子群—小波神经网络的模拟电路故障诊断 [J]. 北京工业大学学报, 2010 (3): 306-309.

[19] 颜学龙, 丁鹏, 马峻. 基于狼群算法的 RBF 神经网络模拟电路故障诊断 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (19): 152-156.

[20] 陆晶, 李志华. 基于核覆盖的模拟电路软故障诊断方法 [J]. 信息技术, 2016 (1): 162-166.

[21] 何春, 李琦, 吴让好, 等. 基于故障传播的模块化 BP 神经网络电路故障诊断 [J]. 计算机应用, 2018, 38 (2): 602-609.

[22] Salat R, Osowski S. Support vector machine for soft fault location in electrical circuits [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 22 (1): 21-31.

[23] Siwek K, Osowski S and Markiewicz T. Support vector machine for fault diagnosis in electrical circuits [A]. 2006 7 th Nordic Signal Processing Symposium [C]. 2006: 342-345.

[24] Kuraku N V P, He Y, Ali M. Probabilistic PCA - Support Vector Machine Based Fault Diagnosis of Single Phase 5-Level Cascaded H-Bridge MLI [A]. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC - Niigata 2018 - ECCE Asia) [C]. IEEE, 2018: 2317-2323.

[25] 陈晨. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断研究 [D]. 锦州: 渤海大学, 2016.

[26] 邵新添, 李志华, 王震. 基于改进果蝇算法的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机与现代化, 2018 (1): 40-43.

[27] 朱静, 何玉珠, 崔唯佳. 正弦余弦算法优化的 SVM 模拟电路故障诊断 [J]. 导航与控制, 2018 (4).