

模拟测试交换格式的研究与实现

王月海¹, 张宏斌¹, 徐梦寒¹, 潘国庆², 冯建呈²

(1. 北方工业大学 信息工程学院, 北京 100144; 2. 北京航天测控技术开发公司, 北京 100037)

摘要: 为提高自动测试系统对模拟电路故障诊断的效率和水平, 研究定义一种模拟电路测试交换机制, 为基于模拟仿真测试程序集 (TPS) 开发和数据的传递提供信息和数据格式; 通过 Spice 对电路进行仿真, 将仿真数据进行小波分析提取特征, 并由 BPN、SVM、AIS 进行知识生成与评价, 最终实现 ATIF 文件自动生成; 实验将 ATIF 文件解析导入到后处理环境中由测试程序执行检测故障, 验证了测试格式的有效性。

关键词: 模拟测试交换格式; 仿真数据; 后处理; 故障检测

Research and Implementation for Analog Test Interchange Format

Wang Yuehai¹, Zhang Hongbin¹, Xu Menghan¹, PanGuoqing², FengJiancheng²

(1. College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Crop, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and level of automatic testing systems in analog circuit fault diagnosis, study and defines an analog circuit testing exchange mechanism for Simulation-based test program set development and data transmission provide information and data formats. By Pspice simulation of the circuit and using wavelet analysis to extract features, by BPN, SVM, AIS for knowledge generation and evaluation and ultimately ATIF file is automatically generated. In the experiment ATIF file will be parsed into the post-processing environment, fault detection performed by the TP and reasoning to verify the validity of the test format.

Keywords: analog test interchange format; simulation data; post-processing; fault detection

0 引言

随着电子技术的飞速发展, 电路系统的不断更新, 其结构也越来越复杂化, 这给电路测试带来了更大的困难。目前数字电路发展较快在电子系统所占的比重越来越大, 数字电路的仿真系统也得到了飞速的发展测试格式已经相当成熟, 其中美国 TERANDYNE 公司的数字故障仿真软件 LA-SAR 采用数字测试交换格式 (DTIF) 已经成为 IEEE std 1445-1998^[1] 国际标准。然而模拟电路由于自身输入和响应信号的连续性、不可穷举性, 故障模型比较复杂, 所以故障诊断一直发展很缓慢, 模拟测试交换格式 (ATIF) 至今也没有一个标准。

为了提高自动测试设备对模拟电路的测试效率, 本文提出了一种模拟测试交换格式 (ATIF), 介绍了数据的训练流程、故障特征的提取, 电路测试与诊断以及故障判定方法。应用 ATIF 数据对一个模拟电路实例进行故障诊断, 实现了模拟电路的自动测试。结果证明, 模拟测试交换格式明显提高了系统测试能力和水平。

1 模拟电路故障诊断接口关系

模拟电路故障诊断诊断主要包括电路仿真和后处理两大部分。电路仿真部分主要完成模拟电路功能仿真与故障仿真、数据结果采集、知识处理等, 后处理主要完成电路智能诊断和 TPS 测试, 其中仿真与后处理由 ATIF 标准进行交互传递。

2 ATIF 组成说明

2.1 数据包

模拟电路测试交换格式 (ATIF) 是模拟电路自动化测试程序生成仪和测试系统的模拟测试数据交换的一种标准交换机制。ATIF 为基于模拟测试程序集 (TPS) 的开发和数据的传递提供了一个中立的数据库, 也就是为仿真和后处理提供数据接口。ATIF 数据包括被测单元 (UUT) 的模型, 激励和响应, 故障字典数据知识库, 探针部分, 具体组成如图 1 所示。

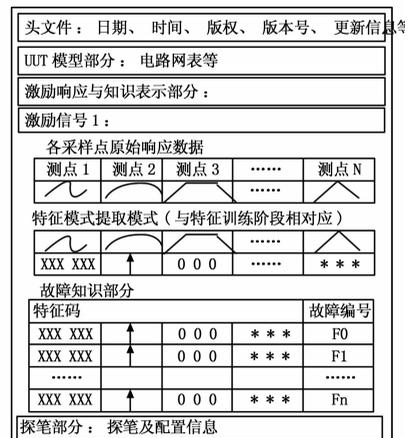


图 1 ATIF 组成架构示意图

2.1.1 UUT 模型组

UUT 电路图模型拓扑结构由 5 个数据文件组成。它们反映了 UUT 上所有的设施引脚以及 ATE 接口引脚, 定义了设备和设备上输入和输出之间的依赖结构和相互连接关系, 识别

收稿日期:2014-03-17; 修回日期:2014-04-10。

作者简介:王月海(1975-),男,山东莒南人,博士,副教授,计算机学会会员,主要从事计算智能和智能机器人方向的研究。

信号输入的驱动源和它们的输出端。同时还定义了输出管脚和输入管脚之间的功能结构依赖关系。

2.1.2 激励和响应组

激励和响应组一共包含 5 个文件。这些文件的数据被用来定义应用激励的取值和观察更好的电路响应。它们确定激励的参数设置和有效的响应输出。激励和响应组文件还有一个功能是在相同的激励下识别 UUT 组的引脚和和响应特征。

2.1.3 故障字典组

故障字典组包含 4 个文件。个别文件还有相关的子文件。其中包含了 UUT 所有可能发生的故障数据。这些文件数据是用在 ATE 上结合故障字典技术来诊断 UUT 故障。ATE 从 UUT 上捕获的故障响应与存储在 ATE 寄存器中的故障仿真及处理后的故障字典数据信号进行比较判断。故障字典组定义了所有的故障和每组的等效故障，为所有可检测的故障生成故障特征，所有故障组都有特定的故障集。

2.1.4 探笔部分

探笔部分包含了探测诊断的所有必需信息，探测步骤、配置信息和一些诊断结果记录信息。ATIF 具体数据文件如图 2 所示。

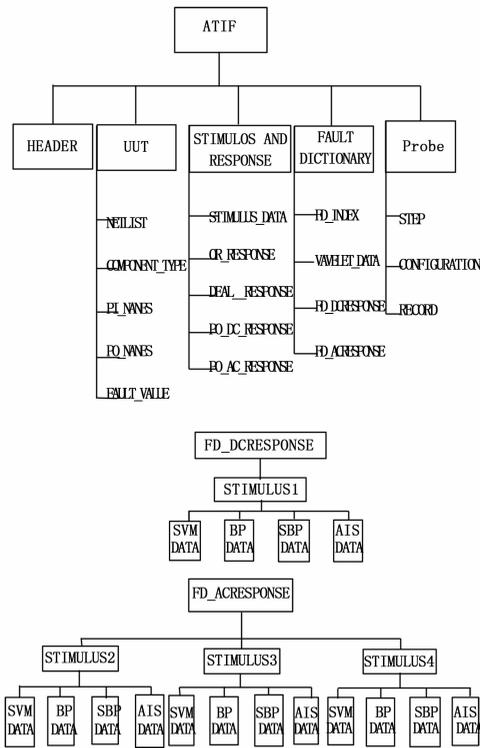


图 2 ATIF 数据文件示意图

2.2 数据接口

ATIF 数据采集与存储接口采用自己编写的“系统文件“I/O”和“ODBC”数据库通用访问接口。当需要进行数据交互时，调用二者将仿真模块产生的电路原理图、网表文件、仿真设置、激励和响应信息、故障字典数据、探笔设置等信息，将数据输出到工程对应的 ATIF 数据包中。

2.3 功能接口

ATIF 功能接口主要完成数据库数据与智能诊断模块、TPS 测试模块之间的数据传递。由相关接口函数通过“OD-

BC”访问 SQL Server 数据库相关数据进行智能诊断和 TPS 测试，来完成电路的正常仿真工作和故障诊断测试工作。并将得到的结果记录信息再保存到 ATIF 数据库中。

2.4 版本管理

ATIF 需要在不同的阶段逐步补充，并可能多次更新完善，需要实施版本管理。每一次更新和完善都要对数据库头文件进行更新说明，遇到不能诊断的新故障，更新程序完成 ATIF 数据更新并升级版本号。

3 功能模块介绍

3.1 数据采集

为了进行模拟电路的故障诊断，首先必须要获得电路的元件结构、参数设置等信息的电路描述文件，对电路的正常状态以及各故障模式进行仿真，得到正常状态和各故障模式下的信号数据。这里使用基于 SPICE 3F5 仿真引擎的二次开发的电路仿真软件，对实际电路进行绘图并仿真。为了确保信息的正确性与诊断的效率，需要加入多个激励（如：正弦波，三角波，方波，直流信号等），并且要考虑元器件的容差，所以对每种故障模式和正常模式进行多次蒙特卡洛分析、直流工作点分析、傅里叶分析或瞬态分析等，输出的节点数要尽量覆盖整个电路。其具体过程如图 3 所示。

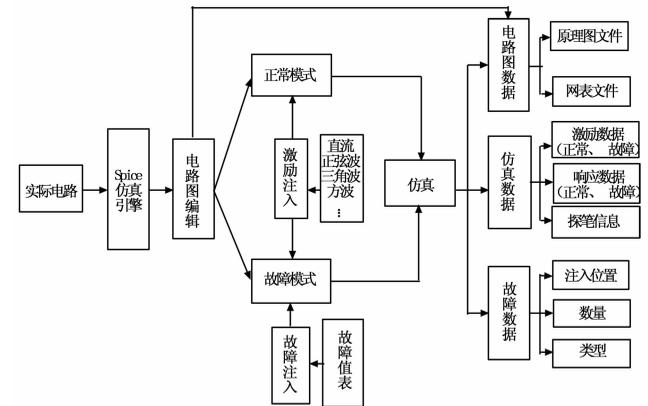


图 3 数据获取

3.2 特征提取

对仿真数据进行提取，转化格式然后进行小波处理。但是处理后的数据仍然数据量很大没有达到降维的目的，所以要提取包含有用信息的离散数据特征，考虑到既要表示很好的故障模式，又要计算量少和运行时间短，故选择能量分布特征提取法进行特征向量的计算，并对特征向量进行简化和归一化处理。

选取 Harr 小波函数对仿真数据进行多层小波分解^[3]，得到小波各层高频系数和低频系数，各层高频系数/低频系数构成各频带信号的能量值。取每层低频系数序列能量组合作为特征向量然后将特征向量进行归一化处理，提取出信号特征。

3.3 知识表示

知识表示主要是指将小波分析且归一化后的明显特征数据应用模式识别的智能算法进行训练分类生成对应的知识表示最后进行知识评价选取最优的表示方式。为保证知识库的完整性和表示数据的有效性，在知识表示的过程中主要用到了神经网络 (BP)^[4]、支持向量机 (SVM)^[5]、人工免疫 (AIS) 训练算

法^[3], 最后再进行知识评价从中选择一种最优的知识表示。提取特征与训练与评价过程具体过程如图 4 所示。

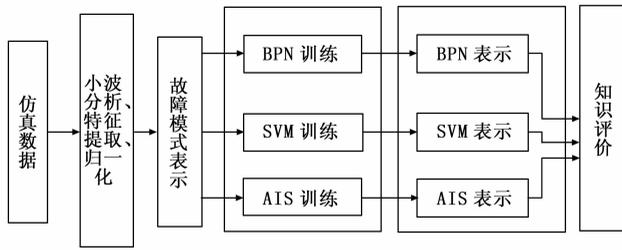


图 4 知识表示与评价过程

3.4 故障字典生成

知识表示与评价之后便可以进行故障字典的生成。故障字典是一个故障电路是否能够诊断成功的关键, 它包含了诊断故障所需的所有数据。主要由数据获取中的故障信息数据、仿真故障数据、特征提取后的故障数据、故障知识表示与评价后的编码数据以及故障索引文件组成。故障响应编码数据与故障特征必须相对应, 而且每个电路的故障集要全面, 这样才能保证故障字典的完整性和充分性, 保证测试的有效性。

4 ATIF 生成

模拟电路测试格式 (ATIF) 生成是建立在电路仿真、特征提取、知识评价的基础上的。ATIF 数据包含了被测电路的所有信息, 不仅保留了原始的数据信息, 同时也对所有数据信息进行提取转换, 为快速进行信息查询提供了方便, 能有效的测试电路故障测试以及进行数据的优化更新。

4.1 ATIF 数据存储设计

ATIF 采用独立数据库文件和文本文件存储; 每一块电路板对应一个独立的 SQL Server 数据库文件和必要的文本文件; ATIF 的每一部分都采用单独的数据表存储, 如文件头数据表、模型表、激励信号表、正常状态响应数据表、各类故障状态响应数据表、故障特征数据表、故障字典数据表、测试程序数据表等, 每个表除了包含各自的仿真或知识表示数据, 同时也记录了原始信息的路径, 以便更好地查找和管理原始信息, 部分表具体设计见表 1~6。

表 1 工程信息表

字段				
工程号	工程名	创建者	创建时间	保存路径

表 2 头文件数据表

字段				
编号	文件名	版本号	日期	时间
版权	更新信息			

表 3 NETLIST 表

字段			
编号	网表名	保存路径	说明

表 4 COMPONENT 表

字段			
编号	组件名	保存路径	说明

表 5 STIMULUS 表

字段		
编号	激励信号	参考设置

表 6 WAVELET_DATA 表

字段		
激励号	编号	小波分析文件名

说明: 一个工程号对应多个激励相, 因为有层次性, 所以需要表与表之间的衔接。考虑到工程的需要将必要的文本格式的原始数据进行路径保存。

4.2 ATIF 数据生成模块

ATIF 数据的具体生成过程如图 5 所示。建立一个工程, 编辑电路图并生成网表, 将数据保存并输出到 ATIF 数据包中, 在工程中加入多个激励, 激励信号主要分为一个直流和 3 个交流信号 (正弦波、三角波、方波), 根据故障表所列的故障值给电路进行故障注入, 仿真系统调用故障模型进行故障仿真并输出数据, 将仿真输出的数据进行格式转换之后用知识表示评价模块进行特征提取与数据训练生成特征表示。在仿真、处理、输出的过程中将所有数据按照模拟电路测试交换格式 (ATIF) 来将数据提取转换并保存, 最终生成 ATIF 数据。

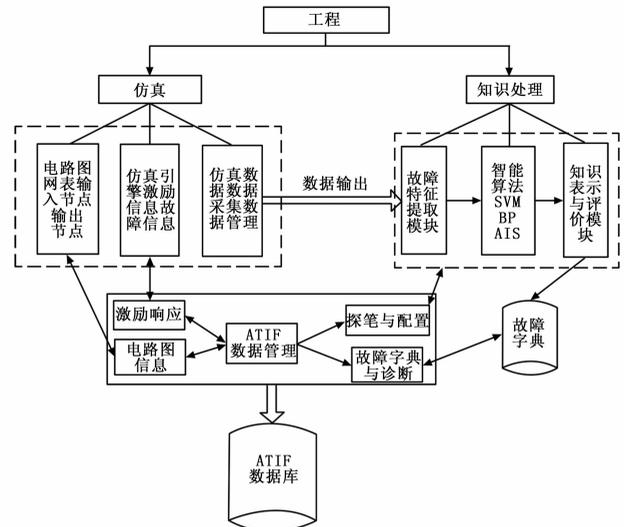


图 5 ATIF 生成过程

5 ATIF 数据应用

5.1 ATIF 功能测试

功能测试时解析调用激励响应组文件, 根据正常响应数据的处理流程, 控制 ATE 实现激励加载, 自动采集数据并进行知识表示模块处理, 得到数据特征与 AITF 数据库响应特征进行对比的出结论。

5.2 ATIF 故障诊断

当电路进行正常测试时，发现故障时则调用故障诊断功能。根据探测组探测步骤及配置信息调用故障字典特征数据中的处理流程记录，解析激励响应文件，控制 ATE 实现激励加载，采集响应数据并进行知识表示处理，并与故障字典的数据进行对比诊断，如果诊断出故障则程序结束。否则进行下一种知识训练并诊断。当加载所有激励后任然诊断不出结果，则选则人工免疫进行知识优化更新，继续进行诊断，具体过程见图 6。

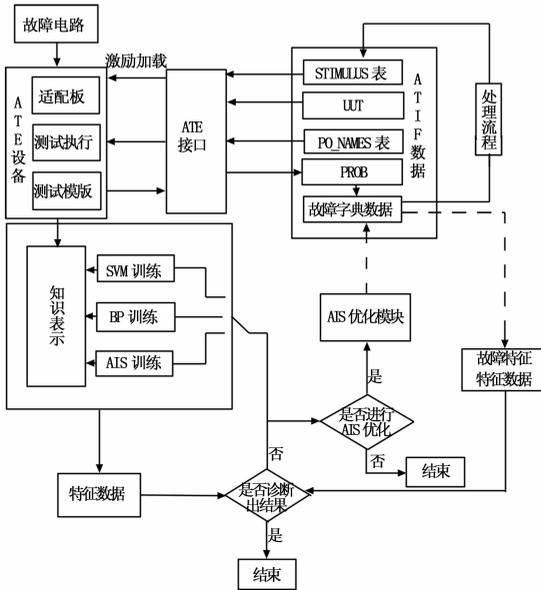


图 6 ATIF 故障诊断流程

6 实验

6.1 实验电路

实验电路采用四运放高通滤波器电路作为诊断电路如图 7 所示。图 7 中所有电容的容差为 10%，所有电阻容差为 5%。

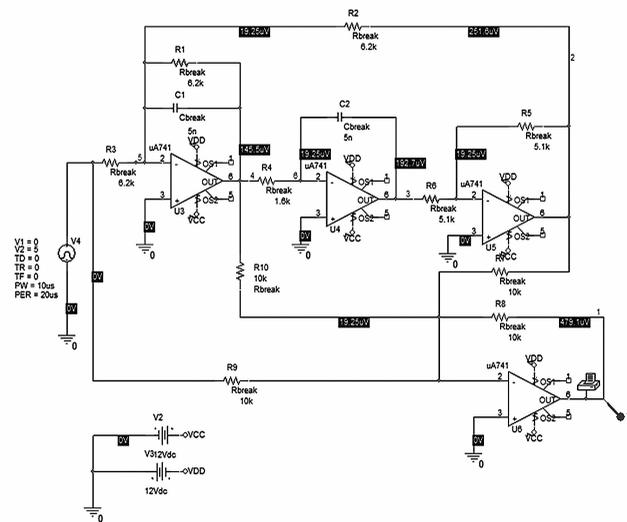


图 7 四运放高通滤波器

采取的激励信号依次为直流信号：幅度为 5 Vdc；正弦信号：偏置值 $V_{OFF} = 0$ ，峰值振幅为 $V_{AMPL} = 5$ V，频率 $F_{REQ} = 50$ kHz；方波信号：脉动值 $V_2 = 5$ V，脉冲宽度 $P_w = 10$ us，脉冲周期 $PER = 20$ us，其他值为 0；三角波信号采用周期性折

线源：时间基准值 $T_{SF} = 6 \mu s$ ，转折点的坐标对为 $FIRST_NPAINRS = (0, 0)$ ， $FIRST_NPAINRS = (1, -1)$ ， $THIRD_NPAIR = (3, 1)$ ，其他参数为缺省值。

6.2 实验结果

采用四运放电路由 ATIF 自动生成系统得到工程信息表、头文件数据表、故障值数据表、激励响应数据表、故障数据表等所有 ATIF 数据，并应用 ATIF 数据进行诊断测试，如图 8 部分 AIS 数据与测试结果所示，成功验证了系统的可靠性与实验结果的正确性。

行号	数据
1	55(0)11
2	3482.825901 3910.407506 4078.203459 4142.079071 4161.194872 17260.822259 18850.646498 1971
3	890.026865 999.294171 1042.174068 1058.497370 1063.282312 14622.416235 15184.485656 15838
4	0.149887 0.149887 0.149886 0.149888 0.149886 0.180403 0.159900 0.165871 0.166356 0.1664
5	0.186540 0.186540 0.186534 0.186533 0.186536 0.176242 0.155542 0.161559 0.162059 0.1621
6	0.186518 0.186520 0.186513 0.186513 0.186516 0.335717 0.367466 0.376679 0.376935 0.3770
7	0.185755 0.185767 0.185763 0.185763 0.185767 0.740990 1.107310 1.325050 1.379690 1.398457
8	0.188917 0.188917 0.188912 0.188912 0.188913 0.933018 0.977654 0.977654 0.978481 0.9794
9	0.170697 0.170705 0.170713 0.170714 0.170715 3.769320 3.584475 3.443814 3.404008 3.389753
10	1.048962 1.048960 1.048961 1.048961 1.048961 0.217482 0.270245 0.280852 0.281606 0.28173
11	-3.913169 -3.913169 -3.913169 -3.913169 -3.913169 0.959732 0.963771 0.964072 0.967000 0.9
12	0.185139 0.185140 0.185133 0.185132 0.185136 0.374075 0.442281 0.465945 0.470654 0.4716
13	0.191808 0.191807 0.191803 0.191803 0.191805 0.178199 0.157542 0.163518 0.164003 0.1640
14	0.188119 0.188114 0.188112 0.188114 0.188114 0.216081 0.263109 0.288593 0.295766 0.2968
15	0.184709 0.184709 0.184704 0.184703 0.184705 0.311242 0.336513 0.345453 0.345688 0.3457



图 8 ATIF 测试结果

7 结束语

本文基于 Spice 仿真软件，对实际电路板进行画图仿真、信号采样、知识处理，按照设计格式生成 ATIF 数据包。并在实际电路上提取数据进行测试，证明了 ATIF 的便利性，提高了测试效率，大大提高了模拟设备的测试程序的开发，为电路板故障检测人员提供了方便和参考。

参考文献：

- [1] IEEE Standard for Digital Test Interchange Format (DTIF) [S]. IEEE Std1445 - 1998.
- [2] 王月海, 程 冉, 蒋爱民, 等. 模拟电路故障特征提取的小波基选取方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1329 - 1330+1334.
- [3] 王月海, 王勤勇. 基于小波分析的最优故障特征提取研究 [A]. 全国容错计算学术会议 [C]. 2013.
- [4] 王月海, 蒋爱民, 程 冉, 等. 模拟电路故障诊断的约束类集成 BP 网络算法 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1592 - 1595.
- [5] 马 稳, 郭成安. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [6] 成伟兰, 刘坚强, 贺 喆. 基于 DTIF 的数据结构的探讨 [J]. 测控技术, 2003, (11): 16 - 18.
- [7] 贺 喆, 林文志, 李 杨. 数字测试交换格式数据的应用与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (9): 1153 - 1155.
- [8] 林志文, 刘松风. 数字电路板故障诊断测试数据自动生成 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 10 (12): 917 - 919.