

复杂模拟电路知识表示的关键技术研究

陈冰¹, 鲁刚², 冯建呈³, 王宏伟³

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 海军装备部, 北京 100055;

3. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 在装备中应用复杂模拟和数模混合电路, 可大幅度提升装备性能, 但同时电路故障诊断提出了更高的要求; 研究故障特征优选、测试节点优化等关键技术, 实现了最优测试点集构造和基于故障特征提取的知识表示自动生成功能, 可有效解决当前模拟和数模电路故障诊断存在的问题, 提高故障诊断效率; 采用典型装备电路的试验验证, 实现了多类型知识表示的生成, 并且所构造最优测试点集数量为全部测试点的 32%, 试验表明, 所述技术具有很好的实用与推广价值。

关键词: 故障仿真; 特征提取; 最优测试点集

Research on Key Technology of Complex Analog Circuit Knowledge Representation

Chen Bing¹, Lu Gang², Feng Jiancheng³, Wang Hongwei³

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Equipment Department of Navy, Beijing 100055, China;

3. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp. Ltd, Beijing 100041, China)

Abstract: Application of complex analog and mixed signal circuit can greatly improve the equipment performance, but at the same time puts forward higher requirements for circuit fault diagnosis. To effectively improve the efficiency of fault diagnosis and solve the existing analog and mixed signal circuit fault diagnosis problems, we made scientific researches on the key technology such as fault feature selection, test node optimization, to implement construction of optimal test point set and automatic generation of knowledge representation based on fault feature extraction. According to the results of verification test based on typical equipment circuits, gets knowledge representation automatically and reduces the test points to 32% of total. The verification test indicates that the technique presented in this paper has good practicability and popularization value.

Keywords: fault simulation; feature extraction; optimal test point set

0 引言

装备电路特别是模拟电路在非线性、模糊性、复杂化、高性能要求等方面的特点, 对及时、快速修复复杂模拟电路提出了严峻的技术挑战, 对测试诊断程序、设备和维修保障技术人员的水平等方面都提出了更高的要求。针对装备维修保障的需要, 电路测试与故障诊断技术一直是研究的热点。模拟电路特别是复杂模拟电路, 由于其特殊性依然存在许多技术难点^[1-2]。当前已取得的研究成果中, 最为有效的方法是测前仿真故障诊断技术^[3]。当前对模拟电路故障诊断的研究, 多集中在故障模式及其相应的特征提取技术方面, 而对知识表示的故障特征优选、测试节点优化等研究少, 导致知识表示生成过程繁琐、研究成果的实用化程度有限等问题。

针对研究现状并结合实际需求, 分析并重点研究了模拟电路知识表示生成中的关键技术, 为模拟电路知识表示的标准

化、实用化奠定了良好基础。本文将重点介绍模拟电路知识表示生成中涉及的关键技术。

1 知识表示关键技术分析

模拟电路知识表示的完备性和实用性在于其所包含的故障诊断信息的丰富程度, 而获取足够的故障诊断信息的途径主要是试验、维修经验和故障仿真; 通过试验或维修经验获取信息的速度慢、工作量大, 对技术人员的经验和技术水平依赖性强, 而通过故障仿真获取诊断数据信息是快速高效的方式。以仿真技术为基础, 构建如图 1 所示的模拟电路知识表示生成体系结构。

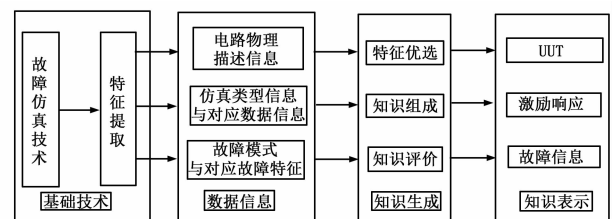


图 1 模拟电路知识表示生成体系结构

收稿日期: 2014-02-18; 修回日期: 2014-04-13。

基金项目: 国家部委基金资助项目(A0420110301)。

作者简介: 陈冰(1979-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事信号处理方向的研究。

通过研究电路故障仿真技术，实现电路故障仿真并输出相关数据；通过特征提取技术实现对仿真输出数据的处理，得到构建知识表示所需的数据信息；研究并定义知识表示的格式规范，将知识按照格式规范的要求进行分类存储，最终生成知识表示。因此在该体系结构中，电路故障仿真技术、特征优选技术、最优测试点构造技术是实现知识表示生成的关键技术。

2 故障特征优选技术研究

故障特征是知识表示中故障信息的重要组成部分，关系到对不同故障类型的区分程度和测试诊断的效率等。仿真后，每个测试点对应若干组故障数据，每一组都包含该测试点在 F_0, F_1, \dots, F_n 各不同故障下的响应。对于各个测试点所得的故障波形序列，通过计算得到不同的特征。

诊断特征选择对于诊断知识的最优表示起到至关重要的作用，采用多元统计分析方法实现故障特征优选技术。多元统计方法在不需要精确的数学模型的条件下能将多变量高维数据空间投影到相对独立的低维空间，从中获取重要信息，以降低分析难度。

下面以一个故障下各测试点的特征优选为例，说明故障特征优选技术。设故障数据经过采样后形成的故障数据矩阵为 $X = |x|_{n \times m}$ ，其中 n 为采样节拍个数， m 为电路板测试点个数。为消除由于量纲不同可能带来的影响， X 的各个变量需分别减去均值再除以各自的标准差进行标准化处理。

根据多元统计分析有关定理及算法，可利用 X 的协方差矩阵 $X^T X$ 通过非线性迭代部分最小二乘算法 (NIPALS: Non-linear Iterative Partial Least Squares) 进行向量分析，计算出矩阵得分向量 (Score Vector) 和负荷向量 (Loading Vector)，从而将 X 表示成如下所示 m 个向量的外积之和：

$$X \approx t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + \dots + t_m p_m^T$$

其中 $t_i \in R^n$ 且两两线性不相关， $p_i \in R^m$ 为负荷向量。如果将得分向量按其长度做以下排列：

$$\|t_1\| > \|t_2\| > \dots > \|t_m\|$$

那么负荷向量 P_1 将代表数据 X 变化最大的方向， P_2 与 P_1 垂直并代表数据 X 变化的第二大方向， P_m 将代表数据 X 变化最小的方向。当矩阵 X 中的变量间存在一定程度的线性相关时，数据 X 的变化将主要体现在最前面的几个负荷向量方向上，数据矩阵 X 在最后面的几个负荷向量上的投影将会很小，主要是由测量噪声引起。这样就可将矩阵 X 进行主元分解后写成下式：

$$X = t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + \dots + t_k p_k^T + E$$

式中，残差矩阵 E 代表 X 在 P_{k+1} 到 P_m 等负荷向量方向上的变化，前面的 k 项称为主元空间。在实际应用中， k 往往要比 m 小得多。由于残差矩阵 E 主要是由于测量噪声引起的，将 E 忽略掉会起到清除测量噪声的效果，不会引起数据中有效信息的明显损失。

主元空间的主元体现了数据变化的主要信息，残差空间主要体现测量误差和噪声的影响，因而数据 X 可以近似地表

示为：

$$X \approx t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + \dots + t_k p_k^T$$

主元个数可以通过累积方差贡献率 (CPV : Cumulative Percent variance)、对主元空间和残差空间中临界故障幅值的分析等技术进行确定。主元个数确定后就得到了以 X 的得分向量 (也叫 X 的主元) 为代表的由采样数据的原始特征线性组合成的二次特征。由于 k 往往要比 m 小得多，因此通过各种改进的主元分析法就能计算出采样数据的抽象特征，从而生成该测试点下的最优故障特征。

经过统计分析、量化评价与综合提取之后，将同一故障下不同测试点的最优故障特征按照测试点顺序进行组合，从而得到该故障的最优特征集合。

3 最优测试点集构造技术研究

构造最优测试点集的目的是使用尽可能小的测试代价完成故障分离。在剔除难以测量的测试点的前提下，测试节点优化的核心问题在于如何综合评价各测试点对故障集的检测能力和隔离能力等指标。根据评价排序，优先选择蕴含故障信息多的节点。最优测试点集构造过程示意图如图 2 所示。

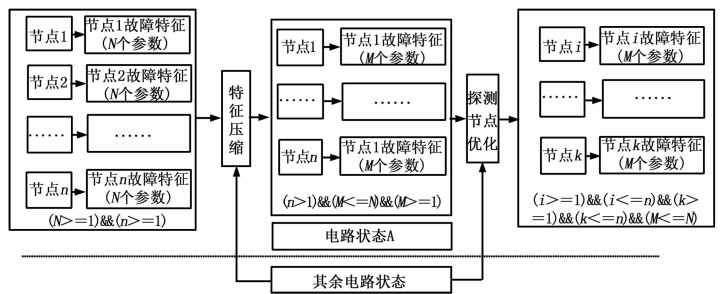


图 2 最优测试点集构造过程示意图

测试点集优选算法的关键是构造测试点检测能力相对合理的评价指标，在兼顾计算量的基础上，将尽可能多的指标融合到评价体系中去。研究并定义故障区别度、隔离度、节点测试代价评价和故障概率因子。

1) 故障区别度定义：将各故障模式看作故障类，各类别可以区分开是因为故障类位于不同的响应区域。某个测试点对应的各类故障模式下的特征样本，如果对同一类的平均类内距离越小，不同类的平均类间距离越大，则该测试点对故障的区分性越强。样本中最小类间距离大而最大类内距离小的样本，对应的测试点对故障的区别能力强（也可称为对故障灵敏），即故障区别度大。

2) 故障隔离度定义：故障隔离度表征测试点对故障的区分能力，是重排序后的测试节点入选最优测试点集合的一个重要判断条件。利用 K 最近邻 (K-nearest-neighbor, KNN) 可计算所有测试点的故障隔离度。

3) 测试点检测代价：测试时间是构成测试费用的重要组成部分。一个测试点代表着实际设备一组接口通道的测试，接口通道越复杂，所用的测试时间就会越长，相应的测试代价也就越高。对于电路板内部的结点，测试也会更加复杂。

因此，在选择测试点时，该合理地测试代价进行权衡也

表 1 基于神经网络的模拟电路测试数据序号

序号	故障名	编码	D6.2	D8.1	D9.2	Q2.B	Q2.E
1	NORMAL [1]	000000	0.493 736	0.688 029	0.161 023	-1.380 78	-1.641 65
2	NORMAL [2]	000001	0.493 736	0.684 311	0.242 243	-1.395 56	-1.792 99
3	NORMAL [3]	000010	0.493 736	0.679 950	0.395 271	-1.465 10	-1.494 31
4	Q2BCSH [1]	000011	0.493 736	0.716 087	0.532 042	-0.897 90	-1.724 44
5	Q2BCSH [2]	000100	0.493 736	0.714 248	0.503 941	-0.862 54	-1.699 18
6	Q2BCSH [3]	000101	0.493 736	0.688 248	0.534 498	-0.948 24	-1.726 72
7	Q2COPN [1]	000110	0.515 067	0.664 647	0.458 740	-1.765 01	-1.701 28
8	Q2COPN [2]	000111	0.515 067	0.700 115	0.455 511	-1.730 88	-1.733 47
9	Q2COPN [3]	001000	0.515 067	0.481 287	0.535 953	-1.808 84	-1.795 86
10	Q2EOPN [1]	001001	0.493 736	0.718 762	0.522 059	-1.465 10	-1.758 85
11	Q2EOPN [2]	001010	0.493 736	0.728 672	0.349 613	-1.491 47	-2.034 85
12	Q2EOPN [3]	001011	0.493 736	0.724 875	0.549 899	-1.338 45	-1.867 87

很重要。实际电路板测试中,可以根据电路板的特点,确定系统各个测试点的测试费用集合 $C = \{C_0, C_1, \dots, C_{N-1}\}$ 。

4) 故障概率因子:实际电路板测试中,故障集中各类故障出现的概率是不同的,考虑不同故障出现的概率对于实际电路板故障诊断的综合代价最小很有帮助。通过各种方法可得出故障集合 $F = \{F_0, F_1, \dots, F_{M-1}\}$ 各故障出现的概率: $P = \{P_0, P_1, \dots, P_{M-1}\}$ 。

5) 优化的主要步骤:

(1) 计算各待选测试点区别度因子,并依据其值按从大到小顺序将测试点进行重新排序;

(2) 初始化最优测试点集 N^* 为空,并标记重排序后的待选测试节点的集合为 $P = \{P_0, P_1, \dots, P_{M-1}\}$,初始化 $i = 1, i = 1, \dots, K$;

(3) 选择测试点 P_i ,利用 KNN 对该测试点故障特征数据集进行故障归类计算。根据所有测试样本的计算结果,计算该测试点故障隔离组 IG^{P_i} 和故障隔离度 ID^{P_i} 。

(4) 验证集合 N^* 与测试点 P_i 故障隔离组的并集隔离度 $ID^{N^* \cup P_i} = M$ 是否成立,如果等式满足,则将 P_i 添加至 N^* ,转至 (5);如果 $ID^{P_i} \subseteq IG^{N^*}$,舍弃 P_i ($i = i + 1$),转至 (3);否则,将 P_i 添加至 N^* ,转至 (3);

(5) 测试点可以隔离所有故障,算法结束。

通过上述算法,可将故障区别度、故障隔离度、测试点检测代价综合在一起,并且综合了故障出现概率等因素,实现了测试点选择的综合优化技术。

4 基于典型电路的知识表示关键技术验证

4.1 基于故障特征优选的知识表示生成技术验证

针对某型雷达调平控制分机中的控制与驱动电路,进行电路功能和故障仿真后得到 30 余种状态数据,基于上述数据,进行了基于小波分析的电路特征提取验证;在故障特征优选的基础上,完成了 BPN、SVM 和 AIS 的诊断知识训练,生成了故障知识表示。其中,基于神经网络的模拟电路部分测试数据

如表 1。

4.2 基于典型电路的最优测试点集构造技术验证

采用某型机载装备发控设备中的与或逻辑输出控制电路,开展最优测试点集构造技术验证。根据电路的工作原理和常见故障类型,在电路板中选择 25 个采样节点。验证试验共注入 38 个电路故障,试验时,对每个故障状态下的 25 个采样节点分别采集 3 次数据。对每种状态的每个测点对应的电压数据,采用 5 层 Haar 小波提取特征值,并计算敏感度因子,实现对 25 个节点的敏感度排序,所得到的敏感度因子范围介于 0.673832 和 278.2 之间。将排完序的 25 个节点用 KNN 算法计算,计算出每个测点可以隔离出的故障,并统计可以隔离故障的个数,求交集化简得到的最终优化测点集合为 $p = \{D9.2, Q2.C, U23.3, Q3.C, U23.2, U26.2, Q2.B, Q3.E\}$,集合 p 中所包含的测试节点数占全部测试节点数量的 32%,将极大地减少实际测试的工作量,达到了预期目的。

5 结论

随着国防事业的快速发展,未来装备上的模拟电路将会越来越复杂,使得装备电路板的测试与维修越来越困难。本文针对模拟电路测试诊断最有效的方法—知识表示法所做的研究,有效解决了知识表示的生成问题,为知识表示的规范化、实用化奠定了良好基础,具有较大的实用与推广价值。

参考文献:

- [1] 冯建呈,王彤威,王启宁,等.基于仿真的模拟电路故障诊断系统有研究与设计 [A].第二十届全国测试与故障诊断技术研讨会论文集 [C],2011.
- [2] 杜占龙,谭业双,甘 彤.基于可拓理论的模拟电路故障诊断方法 [J].计算机测量与控制,2011,19(12):2908-2911.
- [3] 胡 梅,王红,杨士元.基于测前迭代仿真的模拟电路故障诊断方法 [J].计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(6):914-920.