

基于故障仿真和粗糙集的复杂电路板测试性分析

王成刚, 周晓东, 王学伟
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 针对关联模型在复杂电路板测试性分析中对不确定问题描述与分析的缺陷, 提出了基于故障仿真和粗糙集的测试性分析方法. 通过故障仿真生成条件属性集, 利用粗糙集将其约简, 最终形成分辨矩阵, 从而评价电路的测试性水平. 最后通过实例分析验证了方法的有效性.

关键词: 测试性分析; 故障仿真; 粗糙集

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)01-0131-04

Testability Analysis for Complex Circuit Board Based on Fault Simulation and Rough Set

WANG Cheng-gang, ZHOU Xiao-dong, WANG Xue-wei

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the limitation of dependency model in description and analysis of uncertain problem for testability analysis of complex circuit board, a testability analysis method is put forward based on fault simulation and rough set. Firstly, condition attributes are generated through fault simulation. Then, discernibility matrix is provided by rough set reduction. And moreover, the fault detection rate and fault isolation rate of circuit board can be calculated based on the matrix. Finally, an example proves that our method is feasible and effective.

Key words: testability analysis; fault simulation; rough set

1 引言

关联模型也称为推理模型, 表示的是部件之间的因果关系, 是目前测试性分析中普遍采用的一种建模技术, 也是当前国内外测试性的研究热点. 而对于电路板级的测试性分析, 由于其内部的关联关系不易确定, 因此关联模型的建模难度较大. 故障和测试的关联关系需要借助 FMECA、FTA 等分析方法得到, 缺乏对于不确定知识的表述与推理功能. 尤其是对于电路的软故障, 在关联模型中很难分辨. 因此, 对于不确定问题描述与分析的缺陷制约了关联模型在复杂电路板测试性分析方面的应用.

基于故障仿真的测试信息生成技术虽然计算量大, 但建模过程中采用离线仿真, 且由于计算机存储

量和运算速度的迅速提高, 故不再受其局限. 其故障覆盖率高, 可控性强, 因此基于仿真的测试性信息更加完备. 故障仿真生成的测试性信息由粗糙集约简, 最终形成分辨矩阵, 不仅能客观评价电路的测试性水平, 还可以为电路的测试维修提供依据.

2 基于故障仿真的测试性信息生成

2.1 基于 SPICE 的故障仿真

通用电路仿真软件 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 得到了广泛应用, 被公认为集成电子电路设计的工业标准, 而且其源码已公开, 便于进行二次开发. 因此, 在 SPICE 3f5 源程序的基础上, 进行必要的扩展, 将其仿真模块作为电路的仿真内核. 由于 SPICE 的器件库中只有无

故障元件的仿真模型,而没有故障元件的模型库,因此在注入故障进行故障状态仿真时需要故障元件进行故障建模,通过直接修改输入的电路板网表文件(网表文件描述了电路的构成,包括电路的连接方式、元件类型、器件模型等)实现故障注入,运行测试向量,利用 SPICE 故障引擎的仿真结果评估模拟电路板测试向量。

对于基本元件考虑三种故障模型:开路、短路、参数漂移。集成器件的故障模式主要有四种:开路、短路、输出失效和性能退化。在故障对象的网表中,

用一个阻值很大的电阻代替原来的元件表示开路故障,用一个阻值很小的电阻代替原来的元件表示短路故障,修改元件参数表示参数漂移故障。由于参漂故障建模工作量大,因此仅考虑对系统影响较大的典型故障值进行仿真分析。对于除二极管以外的模型元件,根据其类型分别处理^[1-2]。子电路元件通常是结构和功能都比较复杂的多引脚元件,可以在子电路模型库中针对特定的故障进行建模。表 1 列出了部分故障模式的 SPICE 3 语法。

表 1 部分故障模式的 SPICE 3 语法

故障	故障注入前	故障注入后
电阻开路	R9 4 5 30K	R9 4 5 100 MEG
电阻短路	R9 4 5 30K	R9 4 5 .1
电容开路	C1 11 12 10U	R_ C1 11 12 100MEG
电容短路	C1 11 12 10U	R_ C1 11 12 .1
电感开路	L1 20 21 10M	R_ L1 20 21 100 MEG
电感短路	L1 20 21 10M	R_ L1 20 21 .1
基极发射极短路	Q1 12 19 24 2N1893	Q1 12 19 24 2N1893 Rshort_ 19 19 24 .1
β 参数故障(低)	Q1 12 19 24 QN2222 .MODEL QN2222 NPN AF=1 BF=105 BR=4 CJC=15.2P CJE=29.5P ...	Q1 12 19 24 Q1_Fail .MODEL Q1_Fail NPN AF=1 BF=10 BR=4 CJC=15.2P CJE=29.5P ...
电阻固定故障 (低于电源电压 2V)	R1 6 0 1K	R1 6 0 1K Rstuck_ 6 6 _ Stuck 6 10.00000 Bstuck_ 6 6 _ Stuck 0 V= Vcc-2

2.2 测试性信息提取

将每次故障仿真得出的各测试点数据看作一个向量,其主要特点有^[3]:

- (1) 向量中的每个分量表示的特征和量纲都不同,不能归一化到空间超球面来处理;
 - (2) 集中分布的向量数量不定,可能很大,也可能很小;
 - (3) 可能存在较多重复或可归类向量,但是类中心随机,也可能存在较多在空间分布稀疏、自成一系列的向量;
 - (4) 可能获取类形状的先验知识,但是无法获取类心分布的先验知识;
 - (5) 可能某维上的数据十分接近,甚至完全相同;
 - (6) 存在获得的数据量少,待分类数多的情况。
- 此时分类的目的是标识出有样本分布空间区域的位置,以便于提取典型的数据以及孤立点进行分

析。可以看出,采用的分类方法必须有模式搜索的能力,有较大的伸缩性,对于孤立点和噪声不敏感。针对以上问题,文中提出利用粗糙集实现仿真信息分类,进行测试性分析与评估。

3 粗糙集理论

粗糙集理论是波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的^[4]。粗糙集理论的主要思想是利用已知的知识库,将不精确或不确定的知识用已知的知识库中的知识来(近似)刻画。该理论与其他处理不确定和不精确问题理论的最显著的区别是它无需提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,所以对问题的不确定性的描述或处理可以说是比较客观的。

3.1 信息系统

一个信息系统 S 是一个四元组:

$$S = \langle U, A, V, f \rangle \tag{1}$$

其中, U 就是一组论域, 设 U 有 n 个对象, 则 U 可表示为 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. A 是有限个属性的有限集合, 设有 m 个属性, 则其可表示为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. A 又可进一步划分为两个不相交的集合: 条件属性集 C 和决策属性集 D , C 和 D 满足 $A = C \cup D$ 且 $C \cap D = \Phi$, D 一般只有一个属性. V 是属性的值域集, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$, 其中 V_i 是属性 A_i 的值域. f 是信息函数, $f: U \times A \rightarrow V$, $f(x_i, a_j) \in V_j$.

3.2 不可分辨关系

一个知识库就是一个关系系统 $K = (U, R)$, 其中 U 为非空有限集, 称为论域, R 是 U 上的一族等价关系.

若 $P \subseteq R$, 且 $P \neq \Phi$, 则 $\cap P$ (P 中所有等价关系的交集) 也是一个等价关系, 称为 P 上的不可区分关系, 记为 $\text{ind}(P)$, 且有

$$[x]_{\text{ind}(P)} = \bigcap_{R \in P} [x]_R \quad (2)$$

$U/\text{ind}(P)$ (即等价关系 $\text{ind}(P)$ 的所有等价类) 表示与等价关系族 P 相关的知识, 称为 K 中关于 U 的 P 基本知识. 为简便起见, 经常用 U/P 代替 $U/\text{ind}(P)$.

粗糙集的不可分辨关系能描述依赖矩阵中的模糊组, 每一个等价类就是一个模糊组.

3.3 上下近似集

给定知识库 $K = (U, R)$, 对于每个子集 $X \subseteq U$ 和一个等价关系 $R \in \text{ind}(K)$, 定义两个子集:

$$\underline{RX} = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\} \quad (3)$$

$$\overline{RX} = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \Phi\} \quad (4)$$

分别称为 X 的 R 下近似集和 R 的上近似集.

集合 $bn_R(X) = \overline{RX} - \underline{RX}$ 称为 X 的 R 边界域; $pos_R = \underline{RX}$ 称为 X 的 R 正域; $neg_R(X) = U - \overline{RX}$ 称为 X 的 R 负域.

4 基于粗糙集的测试性分析

故障仿真中各故障模式对应生成的信息即为信息系统 S 的论域, 各测试信号为 C 中的条件属性. 基于粗糙集的测试性分析本质上就是利用粗糙集方法的属性约简与分类问题.

4.1 属性值离散化

对连续属性的离散化过程, 本质是用断点对属性空间进行划分的过程. 主要有等距离划分法、等频率划分法、Navie Scaler、SemiNavie Scaler、逻辑推理和启发式等算法.

文中采用了一种有约束的启发式离散算法, 其过程分三步:

(1) 以断点集的最小区间不小于测试信号的最小分辨距离作为约束条件, 计算用于对各连续属性进行离散化的候选断点集合;

(2) 通过一定的启发式方法度量候选断点的重要性, 并根据度量结果从候选断点集合中选取一个尽可能小的子集, 将其作为离散化过程实际采用的断点集合, 即计算结果断点集合;

(3) 将结果断点集合应用于决策表, 对信息系统进行实际的离散化.

4.2 基于粗糙集的测试信号约简

利用粗糙集对系统进行测试性评估, 选取的信号越多, 评估也就越准确. 但是, 如果利用过多的信号, 将占用大量的存储空间和机器处理时间, 并且选取的测试信号可能是冗余的, 这就需要去掉描述系统的重复或相关信号. 对于决策表来说, 其实质就是选择有效的信号集来正确地区分各种故障, 以便进行评估. 故障仿真测试信号约简的过程就是选择合理的条件属性, 使之可以对决策属性 D 进行最佳描述. 文中以自然数分别代表测试信号约简后的分段.

4.3 分辨矩阵

$|U| = n$, 信息系统 S 的分辨矩阵是一个 $n \times n$ 矩阵. 矩阵中的元素为:

$$a(x, y) = \{a \in A \mid f(x, a) \neq f(y, a)\} \quad (5)$$

其中, a 是区别对象 x 和 y 的所有属性的集合.

根据离散化的决策表首先求取决策表的分辨矩阵并根据分辨函数 f 的定义对分辨矩阵进行约简计算, 即计算分辨函数 f 的最小析取范式. 分辨矩阵 K 中用符号代表各个离散条件属性 (即测试信号) 的分段值^[5-6], 阵中行代表对象集, 列表示条件属性.

5 实例分析

文中利用 Rosetta 实验系统, 在 RS 理论的基础上, 对故障仿真数据进行处理, 实现复杂电路的测试性分析.

5.1 粗糙集软件 Rosetta

Rosetta 是由挪威科技大学计算机与信息科学系和波兰华沙大学数学研究所合作开发的一个基于粗糙集理论框架的表格逻辑数据工具 (Rough Set Toolkit for Analysis of Data). 它的主要特点是集成了多种数据预处理算法, 还提供了粗集中常见的约简和规则的获取算法, 如 Genetic Algorithm、Manual

Reduce 等. 因此它支持从数据预处理到预测和分析规则的全过程. Rosetta 的优点是以通用的 C++ 语言开发, 并且其内核源程序完全公开. 开放式的接口设计使其在每个计算步骤都能与 Matlab、Excel 和 ODBC 等软件实现数据的导入与导出. 这样, 用户就可以针对其中的任何步骤修改源算法程序或者自己

独立开发算法.

5.2 基于 Rosetta 的测试性分析

图 1 所示为某脉冲峰值检波电路, 选取输入端, U_1 的 2、6 端, U_2 的 6 端、 U_3 的 3、6 端为测试端, 对电阻、电容、二极管、三极管和运放的 39 个硬故障和 15 个典型软故障, 共 54 个故障进行故障仿真.

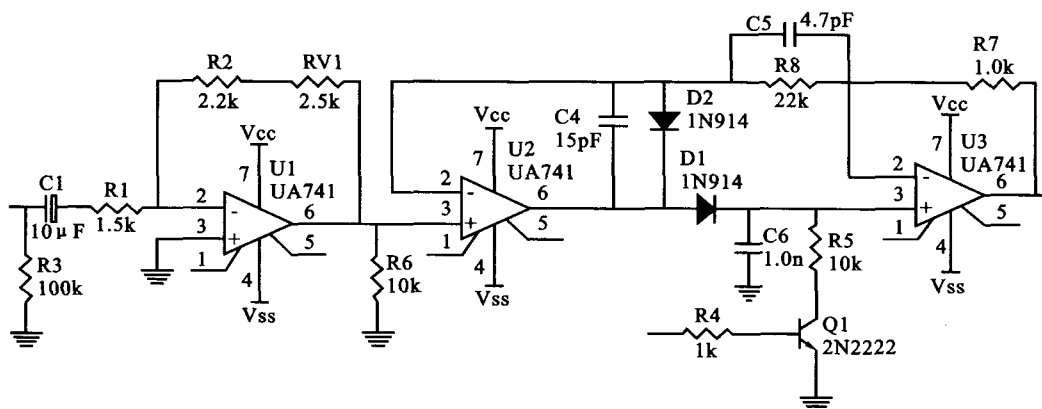


图 1 某脉冲峰值检波电路

利用 Rosetta 对故障仿真结果进行信号约简、生成分辨矩阵. 其中, 行为某故障模式下各测试点的测量值(以自然数代表测试信号的分段), 列为某测试信号在各故障模式下的测量值. 等故障概率条件下, 得出电路的故障检测率为 85%, 模糊组小于 3 的故障隔离率为 87%, 具体计算过程不再赘述, 参阅文献[7]. 利用粗糙集分辨矩阵生成的 if-then 规则可形成故障诊断策略, 用于电路的故障检测与隔离.

6 结束语

文中针对关联模型在复杂电路板测试性分析中对不确定问题描述与分析的缺陷, 提出了基于故障仿真和粗糙集的测试性分析方法. 基于仿真的故障注入方法故障覆盖率高, 可控性强, 得到的测试性信息更加完备. 故障仿真生成的测试性信息由粗糙集约简, 最终形成分辨矩阵, 从而客观评价电路的测试性水平. 最后利用粗糙集软件 Rosetta, 通过实例分析验证了方法的有效性.

该项研究成果不仅可以改善装备的测试性设计, 还能为装备的维修保障提供依据. 下一步研究的重点是数据离散化算法、信号约简算法的改进及故障仿真和粗糙集软件的集成.

参考文献:

- [1] 赵广燕, 孙宇峰, 康锐, 等. 电路故障仿真中的故障建模、注入及判定方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 143-146.
- [2] 卢建林, 杨士元, 王红, 等. 基于 PSPICE 进行模拟电路故障建模的方法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(7): 17-19.
- [3] 段敏, 张锡恩. 基于仿真的模拟电路故障知识获取新方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 802-808.
- [4] Zdzislaw Pawlak. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [5] 王庆, 巴德纯, 王晓冬. 智能故障诊断的粗糙决策模型[J]. 东北大学学报, 2006, 26(1): 284-287.
- [6] 谭天乐. 基于粗糙集的过程建模控制与故障诊断[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [7] 王成刚, 周晓东, 王学伟. 面向 ATE 的电路板测试性分析及评估方法研究[J]. 电子器件, 2008, 31(5): 1599-1602.

作者简介:

王成刚 男, (1976-), 博士研究生, 工程师. 研究方向为智能制导、测试性分析与评估.

周晓东 男, (1940-), 教授, 博士生导师.

王学伟 男, (1973-), 副教授.