

模拟电路网络撕裂法的子网络划分方案优选

魏子杰, 陈圣俭, 周校晨

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 针对模拟电路网络撕裂方法, 研究子网络划分问题, 总结了子网络划分时应遵循的基本原则, 在此基础上提出了“最大化诊断效率, 最小化测试消耗”的子网络划分思想, 并从置换激励源, 元件、测试点、故障特征灵敏度四方面对子网络划分方案的选择做进一步量化分析, 提出了优选标准和具体实施步骤, 通过仿真实验, 验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 网络撕裂; 子网络划分; 故障特征灵敏度

A Sub-network Optimal Decision Method in Network Decomposition Approach of Analog Circuit

Wei Zijie, Chen Shengjian, Zhou Xiaochen

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: The problem of sub-network optimal decision in sub-networks tearing diagnosis method is studied. The basic principles of selecting the tearing networks when building the sub-networks are summarized. A strategy based on the thought of “maximize efficiency, minimize consumption” is proposed. the standard and implementation procedures is given based on further quantitative analysis of four areas replacement: excitation source, components, test point, fault feature sensitivity. The feasibility and effectiveness of the method is verified by simulation and the results.

Keywords: network tear; sub-network division; fault characteristic sensitivity

0 引言

随着电子技术的迅速发展, 模拟电路的规模和复杂度不断增加, 基于网络撕裂思想的模拟电路故障诊断方法, 越来越受到科研人员的重视, 并取得了一系列的研究成果^[1-11]。传统的网络撕裂法多采用测后模拟的方式, 在撕裂点建立电路方程, 通过计算值和测量值的相互校验来判断故障网络, 实时性差, 计算量高, 工程实现难度大。而单纯采用模式识别思想进行故障定位, 也面临故障种类众多不易区识别, 需要大量训练样本, 对于大规模电路分类准确率低等问题^[9-11]。针对上述问题, 文献 [12] 提出一种基于置换定理的诊断方法, 通过施加置换电压, 实现网络“撕裂”, 进而识别故障子网络。该方法工作多集中于侧前, 计算量小, 易于实现, 同时相对于单纯采用模式识别的网络撕裂法, 排除级联电路间影响, 降低诊断复杂度, 可用于工程实践。

对于网络撕裂法来说, 子网络的划分是其中的一个关键问题, 对后续的电路故障诊断有着十分重要的影响。但在以往的研究中, 科研工作者多侧重于可撕裂条件的判定和子网络搜索算法的研究, 在子网络的划分, 多是对撕裂后子网络应满足条

件做原则上的定性阐述^[12-14]。在实际诊断过程中, 符合条件的子网络组合可能有多个, 而不同子网络组合对故障诊断过程的复杂程度和测试结果的准确度都有不同程度的影响, 从而进一步影响大规模电路的诊断效率。因此, 对不同撕裂组合进行具体量化分析, 优选最佳撕裂子网络是提高网络撕裂法诊断效率的重要途径。本文针对网络撕裂法进行故障诊断时的子网络划分问题进行研究, 结合网络撕裂基本原则, 在激励源, 测试点, 元件数量, 故障敏化能力四方面对不同划分方法做定量分析, 优选最佳划分方案, 最后通过实验仿真, 对方法的可行性进行了分析验证。

1 网络撕裂基本原则

任何一种故障诊断方法都有其适用条件和范围, 网络撕裂法也不例外。文献 [9, 12-15] 中, 对子网络的划分时的注意事项都有相应阐述, 总体来说, 针对模拟电路, 在进行网络撕裂时应遵循如下原则:

1) 撕裂点应为可及节点。

2) 除撕裂点外, 撕裂后的子网络间不存在其它的公共节点和支路; 撕裂后各子网络不应存在参数耦合现象, 对于含有受控源的电路, 进行撕裂时, 控制源和被控对象应被划分在同一子网络中。

3) 撕裂时应考虑尽量保持各子网络电路结构和功能的完整性, 同一元件的各部分不能撕裂, 电路内的特殊结构不能拆开。

4) 在撕裂点施加的置换激励要保证电路在正常范围内工作, 不能造成电路元件的不可逆损伤。

收稿日期: 2015-11-26; 修回日期: 2015-12-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179001)。

作者简介: 魏子杰(1988-), 男, 河北唐山人, 博士, 主要从事电路故障诊断、边界扫描测试技术方向的研究。

陈圣俭(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事可测试性设计技术、故障诊断等方向的研究。

5) 撕裂后, 各子网络中应含有可及的测试点, 且从测试点提取的故障信息应能敏化子网络的所有故障 (若不存在能单独敏化子网络故障信息的测试点, 可通过优选测试点组, 予以保证)。

2 子网络划分方案优选

上文已对子网络的划分方法做了原则上的定性分析, 但在实际诊断过程中, 可能存在多种符合条件的子网络划分方案, 因此, 还需对其优化选择作进一步的量化分析。通过对模拟电路网络撕裂方法的深入研究, 可以发现子网络划分的核心思想是在保证目标电路元件故障全部可诊断的前提下, 最大化诊断效率, 最小化测试消耗。根据这一核心思想, 分析研究影响因素, 从而寻求最优划分方案。

针对子网络划分需求, 可从以下几个方面进行考虑:

1) 激励源。基于置换定理的网络撕裂法的基本思想是通过施加置换激励, 实现电路子网络的隔离。激励源的数量影响着测试的资源消耗和复杂程度, 尤其是在将该方法应用于 BIT 时, 更为明显。

2) 撕裂后各子网络元件数。要尽量保证撕裂后各子网络所含元件数相近, 避免某个子网络所含元件过多或过少, 以提高诊断效率, 利于进一步的撕裂诊断。

3) 撕裂后各子网络测试点数。进行故障诊断时, 需根据测试点提取的响应信息提取故障特征, 识别判断网路故障情况。测试点数影响各子网络的故障诊断能力, 在进行子网络划分时, 应以保证各子网络测试点数相近为宜。

4) 撕裂后网络敏化自身故障能力。在保障目标电路元件故障全部可诊断的前提下, 寻求网络故障敏化程度最高的电路撕裂方案。

针对激励源影响, 可直接比较各方案的激励源数量。对于元件和测试点影响, 可以以各子网络所含元件和测试点数为样本, 求取标准差, 表征子网络间差异程度。标准差越小, 说明撕裂后各子网络元件和测试点数越接近, 也就越符合撕裂要求。

为建立子网络划分优选数学模型, 首先做如下假设: 模拟电路网络 N 满足可撕裂及可诊断要求, 根据网络撕裂基本原则, 通过在 g 个撕裂点上施加电压为 V_l ($l=1, 2, \dots, g$) 的置换激励, 将待测电路网络 N 划分为 n 子电路网络 N_1, N_2, \dots, N_n , 每个子网络所含元件数为 x_i , 含可及测试点数为 y_i ($i=1, 2, \dots, n$)。子网络划分方案的元件标准差为 σ_e , 测试点标准差为 σ_p , 如下式所示:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

最后, 针对撕裂后电路网络敏化自身故障能力, 可以结合灵敏度的相关概念, 予以进一步分析。模拟电路中, 微分灵敏度又称为归一化灵敏度, 反映了电路响应相对于元件参数的灵敏程度。对于不同子网络划分方案, 由于激励施加点不同, 测试点响应相对于元件参数的灵敏度也会随之变化。根据这一特性, 先做如下定义:

在待测电路网络 N 中, $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 为电路元件集合, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_s\}$ 为可及测试点响应故障特征集合, 则网络 N 的灵敏度矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} S_1^1 & \cdots & S_1^s \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_m^1 & \cdots & S_m^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

电路网络 N 的故障特征灵敏度可表示为所有故障特征灵敏度的加权和, 如下式所示

$$S_N = \sum_{i=1}^m (\omega_i \sum_{j=1}^s S_j^i) \quad (4)$$

式中, S_j^i 为测试点 i 相对元件 j 的故障特征灵敏度, 其值越高, 说明故障特征对元件参数变化的响应越剧烈, 越符合诊断要求。 ω_i 为元件的权值系数, 在对实际电路分析时, 可根据电路中元件的重要程度和故障概率对其赋予不同的权值, 对故障发生概率较高或者需要重点测试的支路赋予较高的权值, 而对故障概率较低的支路则赋予较低的权值。

需要指出的是, 在进行故障特征提取时, 可能存在为提高故障诊断准确率, 而选用多种故障特征, 组成多维诊断向量的情况。此时可考虑将每种故障特征的灵敏度加权相加, 组成测试点故障特征灵敏度。

在进行子网络划分方案分析时, 只需通过比较各划分方案施加激励后的网络故障特征灵敏度, 即得到该网络敏化自身故障能力具体量化值。网络灵敏度越高, 撕裂效果越好

根据上述分析, 基于故障特征灵敏度的子网络划分方法基本步骤如下:

首先分析被测电路, 根据电路的拓扑结构和网络撕裂基本原则, 获取满足条件的子网络划分组合, 作为备选组。

通过仿真分析, 计算各个子网络组合的相关参数, 即激励源数, 测试点标准差、元件标准差和故障特征灵敏度。

根据实际诊断要求, 分析各子网络组合的相关参数, 优选最优撕裂组。

3 实例分析

图 1 所示为一简单电阻电容电路, 节点 1~13 为可及节点, 元件参数如图所示, 现以该电路为例, 对撕裂方案的优选步骤进行说明。

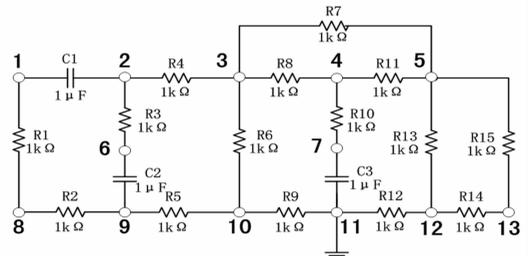


图 1 测试电路图

首先对被测电路进行分析, 根据网络撕裂基本原则, 获取满足条件的撕裂组合有 6 种, 如图 2 所示。

假设各元件之间均为等权值, 即 $\omega_i = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 根据已知条件和公式 (1) ~ (4) 计算所有子网络划分方案的优选参数, 如表 1 所示。

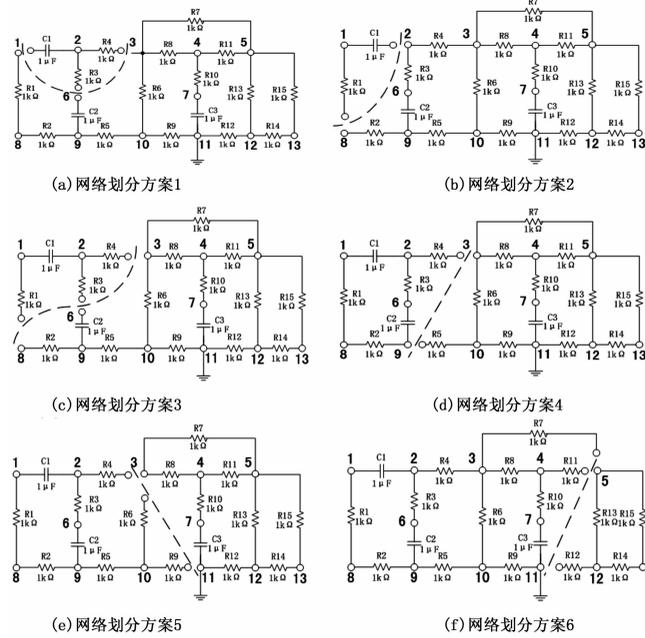


图 2 撕裂网络组合图

根据表 1 所列的计算结果, 网络划分方案 5 中各项参数均为最优, 因此方案 5 为该电路的最优子网络划分组合。

表 1 撕裂组合优选参数表

网络划分方案	撕裂结点	激励源数 g	元件标准差 σ_e	测试点标准差 σ_p	网络故障特征灵敏度 S
1	1, 3, 6	3	6	3. 5	119.2 m
2	2, 8	2	7	4	211.4 m
3	3, 6, 8	3	5	2. 5	177.3 m
4	3, 9	2	3	1	188.2 m
5	3, 11	1	0	1	243.9 m
6	5, 11	1	5	3	239.3 m

在采用子网络撕裂法^[8,12-13]进行实测诊断时, 可先根据本文方法对待诊断电路进行分析, 优选最佳撕裂方案, 再通过施加外部激励, 实现网络“撕裂”, 通过计算至和测量值的相互校验判定故障子网络。

需要注意的是进行网络撕裂的前提是保障目标电路元件故障全部可诊断, 图 1 中如果按测试点 3、10 进行子网络划分, 则会导致元件 R6 无法诊断, 因此类似的换分方案都应尽量避免。此外, 电路网络中可能存在不可撕裂结点, 在进行方案优选时就需避开这些节点, 选择最划分方案。假设图 1 电路网络中结点 3 为不可及结点, 则可选方案将只有 2 和 6, 通过比较优选方案 6 为最优撕裂方案。

4 结束语

针对模拟电路网络撕裂法的子网络划分问题, 首先分析了网络撕裂的基本撕裂原则, 之后在定性分析的基础上结合子网络划分的核心思想从置换激励源, 元件、测试点、故障特征灵敏度四方面进行具体量化研究, 给出了各撕裂组合的对比优选方法。最后通过仿真实验, 验证了方法的可行性和有效性。该方法进一步加强了子网络撕裂故障诊断法的诊断效率, 减小了测试消耗, 提高了其工程应用价值。

参考文献:

[1] Lee S H, Park W J, Jung D Y. Similarity measure design and similarity computation for discrete fuzzy data [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18 (5): 1602 - 1608.

[2] Alexios D S, Michael G D, Alkis A H. Wavelet analysis for the detection of parametric and catastrophic faults in mixed - signal circuits [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2011, 60 (6): 2025 - 2037.

[3] 潘强, 杨超. 基于多测试点多特征信息的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2931 - 2934.

[4] 祝文姬, 何怡刚. 基于遗传 BP 网络的模拟电路故障诊断方法及其应用 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21 (9): 1283 - 1289.

[5] 左磊, 侯立刚, 张旺. 基于粒子群 - 支持向量机的模拟电路故障诊断 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32 (7): 1554 - 1556.

[6] 刘明刚, 施建礼, 吴中川. 大规模模拟电路故障诊断方法研究 [J]. 仪表技术, 2010 (3): 39 - 41.

[7] 齐蓓, 何怡刚, 方葛丰, 等. 一种大规模模拟电路快速故障诊断新方法 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (11).

[8] 罗克龙, 何怡刚, 祝文姬, 等. 大规模直流模拟电路软故障区间诊断方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24 (2): 271 - 278.

[9] 唐圣学, 蔡红军, 李志刚. 基于小波与神经网络的模拟电路故障诊断融合方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (1): 128 - 134.

[10] 崔江, 王友仁. 基于支持向量机与最近邻分类器的模拟电路故障诊断新策略 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (1): 45 - 50.

[11] 孙永奎. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[12] 陈圣俭, 黄允华, 蔡金燕. 模拟电路子网络级故障诊断的新方法 [J]. 火力指挥与控制, 1997, 22 (1): 64 - 67.

[13] 陈圣俭, 黄允华, 蔡金燕. 容差模拟电路子网络级故障诊断的新方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 1998, 12 (2): 61 - 65.

[14] 王凯, 刘岩, 刘利强, 等. 基于子网络撕裂的非线性电路可测性分析 [J]. 电子科技, 2011, 24 (9): 125 - 126.

[15] 陈圣俭, 朱晓兵, 李广进, 等. 基于增益分析的撕裂点优选方法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49 (S3): 114 - 117.

(上接第 157 页)

[4] 邬冬临, 刘宏立, 刘述钢. 基于子空间跟踪的盲自适应多用户检测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (09): 1701 - 1704.

[5] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Networks (Elsevier), 2005, 3: 257 - 279.

[6] Kapoor S, Gollamudi S, Nagaraj S, et al. Adaptive multiuser detection and beamforming for interference suppression in CDMA mobile radio systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 5 (5 - 48): 1341 - 1355.

[7] Haykin S. Adaptive filter theory [M]. 5th Edition, Prentice Hall, 2013.