

# 基于全局灵敏度的电路系统激励与测点优选

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:** 针对模拟电路系统级故障诊断问题, 提出一种基于全局灵敏度的测试点与测试频率优选方法; 利用 Pspice 软件进行参数分析, 避免了电路的拓扑分析和冗繁的计算过程, 节省了时间开销, 综合考虑元件参数变化影响, 定义了网络全局灵敏度的概念, 并以此为依据比较不同频率下测点的故障诊断能力, 实现测点与测试频率的优选; 通过实验仿真验证了方法的有效性, 结果表明新方法提高了对系统的故障识别率。

**关键词:** 电路系统; 测试点; 测试频率; 全局灵敏度

## An Optimal Method of Selecting Test Point and Test Frequency Based on Global Sensitivity for System Fault Diagnosis

Wei Zijie, Chen Shengjian, Zhou Xiaochen

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

**Abstract:** An optimal method of selecting test point and test frequency based on global sensitivity is proposed to overcome the problems of sub-network fault diagnosis for analog circuit. Parametric plotter is used with Pspice to avoid circuit topology analysis and tedious calculation process with time saving. Considering the parameters influencing element, the concept of global sensitivity of the network is defined, and as a basis to compare fault diagnosis capabilities of test points in different frequencies, optimal test point and test frequency is selected. Finally, an example is given to show efficiency of the method. Experimental results show that the new method improve the efficiency of diagnosis identify.

**Keywords:** circuit system; test point; test frequency; global sensitivity

### 0 引言

测试点和激励信号的优选是模拟电路故障诊断的重要环节, 会直接影响最终诊断的测试成本和测试效率。整数编码法<sup>[1-4]</sup>是比较流行的测试点优选方法但该方法主要针对电路的硬故障, 涉及软故障问题时, 工作量和模糊度都将极大增高, 效果较差。近年研究多将各种智能优化算法应用到整数编码法中<sup>[5-7]</sup>, 但其精度仍受制于整数编码表。灵敏度矩阵分析法<sup>[8-10]</sup>多通过分析电路拓扑结构, 建立电路方程求解灵敏度矩阵。对于复杂电路, 数学建模与计算过程极为冗繁, 方程过多会造成数值求解时误差增加, 限制了方法的应用。且传统的灵敏度分析方法主要基于微分灵敏度概念, 适用于元件参数变化微小的场合, 当参数改变较大时, 会影响分析结果的准确率。

对于同一电路故障, 在不同频率激励下, 测点的响应也不尽相同, 导致对电路故障的诊断能力也响应发生变化, 因此在进行测点优选时, 还需对测点和测试频率进行综合分析, 优选故障分辨率最高的测点与激励组合。

现有的优选方案多是针对元件级故障诊断, 对于系统级诊断问题考虑较少。而随着模拟电路的规模和复杂度不断增加, 将目标电路划分为子系统进行分级诊断的策略的实用性不断增强。相应的测点与激励频率优选工作必要性也不断提高。

针对系统级电路诊断问题, 本文提出了一种基于全局灵敏度的测试点与测试频率优选方法。方法利用 Pspice 软件仿真,

避免了电路的拓扑分析和冗繁的计算过程, 节省了时间开销; 通过交流小信号分析, 优选频率区间, 结合参数扫描分析获取测试数据, 提高了测试频率优选速率; 综合考虑元件参数变化影响, 定义了网络全局灵敏度的概念, 并以此为依据比较不同频率下测点的故障诊断能力, 实现测点与测试频率的优选。

### 1 基于全局灵敏度的测点优选

测试节点的选择是电路故障诊断中的一个重要环节。通过测试点优选能敏化故障信息、降低故障模糊度, 提高诊断效率。由于诊断目标不同, 电路元件级与子网络级故障诊断测点选取方法还是存在一定区别。元件级的故障诊断目标是定位故障元件。而系统级故障诊断的目标是将故障定位到电路的子模块。所以在进行系统级诊断时, 只需分辨电路系统故障和无故障两种状态, 不用考虑各类元件故障模糊情况。系统级测点优选的基本准则有三点: 1、测试点信息能敏化目标子网络所有元件的故障; 2、在保证 1 的前提下, 测试点数目应取最小值; 3、在同等条件下选取故障区分能力最大的一组。根据上述原则, 以灵敏度分析为基础, 本文提出“节点网络全局灵敏度”的概念表征测试点对故障的区分能力, 优选测试点。

灵敏度是指测试量发生偏移时, 相对被测量而产生的位移变化率。它是电路性能的重要评价指标之一, 反应了电路响应相对参数变化的敏感程度, 通常可分为微分灵敏度和增量灵敏度。

电路输出响应  $T$  相对于元件参数  $x$  的相对变化量的归一化微分灵敏度定义为:

$$S_x^T = \frac{x}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

当  $x$  产生较大偏移时,  $T$  相对于  $x$  的增量灵敏度为:

$$p_x^T = \frac{x}{T} \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

传统的灵敏度分析法多以求解电路诊断方程为基础, 根据电路拓扑结构, 列写传递函数, 通过方程求解来选择测试点和

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2016-01-29。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179001)。

作者简介: 魏子杰(1982-), 男, 河北唐山山人, 博士研究生, 主要从事电路故障诊断、可测试性设计方向的研究。

陈圣俭(1964-), 男, 山东省青岛市人, 教授, 博士生导师, 主要从事可测试性设计技术、边界扫描测试技术方向的研究。

测试频率。而随着电路复杂程度的提高, 输出方程和灵敏度矩阵的求解难度增高, 计算的数据量和复杂度也随之加大, 这些都限制了方法的实用性。且灵敏度分析法多采用微分灵敏度的概念进行电路分析, 而微分灵敏度可看成电路输出响应与元件参数函数关系的一个一阶泰勒级数近似展开式, 适用于元件参数有微小变化的场合, 当元件参数有较大改变时, 误差较大, 导致灵敏度分析结果不够准确。而采用增量灵敏度只反应电路响应对元件特定偏差的敏感程度, 不能反应全局状况。

针对上述问题, 本文结合增量灵敏度, 提出全局灵敏度的概念, 以此作为电路的可测试度指标, 进行测试点和测试激励的优选设在待测网络  $F$  中,  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$  为可及测试点集合,  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  为电路元件集合, 测试点响应参数为  $T_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ), 电路元件参数为  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ), 则  $T_j$  相对于  $x_i$  的全局灵敏度定义为:

$$S_{x_i}^{T_j} = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^g p(k) \frac{T_j}{x_i^k} = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^g \left( \frac{x_i}{T_j} \frac{T_j^k}{x_i^k} \right) \quad (3)$$

式中,  $g$  为元件值变化的采样量,  $x_i^k$  表示第  $k$  次采样时的元件  $X_i$  的参数取值,  $T_j^k$  为元件  $X_i$  取值  $x_i^k$  时测试点  $N_j$  的响应参数。全局灵敏度的实质是对元件发生不同偏差时的增量灵敏度求取均值, 反应了测试点对元件的整体敏感程度。

网络  $F$  的全局灵敏度矩阵为:

$$S_F = \begin{bmatrix} S_{x_1}^{T_1} & \dots & S_{x_n}^{T_1} \\ \dots & \ddots & \dots \\ S_{x_1}^{T_m} & \dots & S_{x_n}^{T_m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

测试点  $N_i$  相对网络  $F$  的网络全局灵敏度可表示为:

$$S_{N_i} = \sum_{j=1}^m \omega_j S_{x_i}^{T_j} \quad (5)$$

式中,  $\omega_j$  为元件的权值, 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元件赋予较高的权值, 而对故障概率较低的元件则赋予较低的权值。

根据全局灵敏度矩阵, 选取能敏化目标子网络所有元件故障 (即矩阵中元素值全不为零的行向量) 的测试点, 作为待选测试点。当不存在能单独敏化所有元件的测试点时, 可考虑选取多个测试点, 构成待选测试点集。再通过比较各待选测试点 (集) 的网络全局灵敏度 (测试点集的网络灵敏度为各测试点网络灵敏度之和), 优选出故障区分能力最强的测试点。

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。此时可考虑将测试点每种故障特征的全局灵敏度加权相加, 构成测试点的全局灵敏度

## 2 激励信号的选取

在电路网络中, 由于存在电路特性与频率有关的各种元件, 如电容、电感等, 当激励信号频率发生改变时, 必然在测试点的频率响应特性上有所反应, 测试点的元件灵敏度也会发生相应变化。因此, 本文采用 Pspice 软件对测点响应进行扫频分析, 优选使测试点网络全局灵敏度最高的测试频率。

扫频分析前, 需设置采样频点。为使选择更有针对性, 先对测试点进行交流小信号分析, 根据所得幅频特性曲线确定输出参数相对频率变化比较敏感的范围作为待选区间  $[f_s, f_e]$ , 再从待选区间内按某种规则进行频点采样。本文采用十倍频程分析的采样方法, 在 Pspice 软件中设置频率扫描类型 decade, 倍频点数为 Pts, 扫描起始频率为  $f_s$ , 终止频率为  $f_e$ , 则第  $k$

+1 个扫描频点的频率可表示为

$$f_{k+1} = f_k \times 10^{1/Pts} (f_1 = f_s) \quad (6)$$

利用 Pspice 进行扫频分析, 可一次性获得全部所选频率的仿真数据, 节省了时间开销, 提高了测试频率优选速率。

值得注意的是, 还可根据转折频率的概念对频率采样做进一步优化: 根据电路传递函数或仿真波特图, 获得转折频率, 再以转折频率为端点, 划分频率子区间, 最后在每个子区间内进行频率扫描分析。此方法虽然在一定程度上加大了工作量, 但避免采样时跳过某个频率段, 提高了频率采样的针对性

本文提出的测试点与激励优选算法描述如下

1) 在 PSPICE 软件中搭建待测电路, 对备选测点进行交流小信号分析, 根据电路幅频特性曲线优选输出参数相对频率变化比较敏感的范围作为待选区间, 在该区间内进行十倍频采样, 获得电路中正常状态下, 电路测点响应 ( $N_f \times N_d$  组测试数据)。

2) 以元件参数为变量, 进行  $N$  次参数扫描分析, 获得  $N_f \times N_p \times N \times N_d$  组测试数据 ( $N_f$  为采样频点数,  $N_p$  为备选测试点数,  $N$  为电路网络中可诊断元件数,  $N_d$  为元件采样数)。

3) 利用 matlab 程序对测试数据进行处理, 分析获得可敏化全部元件的最小测试点集, 作为备选组。根据式 (5), 计算比较各备选组在不同频率下的的网络灵敏度值, 优选最佳测试频率与测试点。

## 3 应用实例

以图 1 所示 BPSVF (Band Pass State Variable Filter) 电路为例, 介绍基于全局灵敏度的电路系统测点与频率优选方法在电路测试中的应用, 各元件标称值如图所示, 容差为 5%。

首先, 在 PSPICE 软件中搭建待测电路, 通过对各测点进行交流小信号分析, 可得幅频特性曲线如图 2 所示。

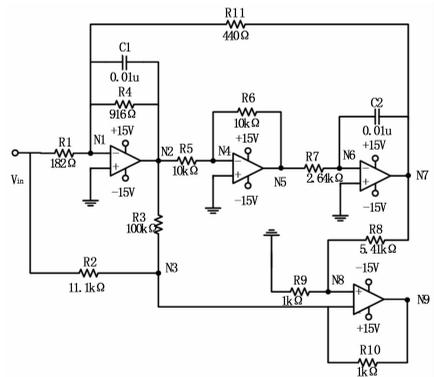


图 1 Band Pass State Variable Filter 电路

根据图示结果, 设置频率变化区间为  $[10 \text{ KHz}, 1 \text{ MHz}]$ , 扫描类型 decade, 倍频点数 10; 元件参数变化范围  $[0.1X, 2X]$ , 扫描类型为线性扫描, 增量为  $0.1X$  ( $X$  为元件参数标称值), 由于开路和短路是电路常见故障, 所以另外添加 0 和  $\infty$  两个扫描状态 (在 Pspice 中分别以元件值极小化和极大化来表示)。进行  $N$  次参数扫描分析, 共得到  $N_f \times N_p \times N \times N_d$  组测试数据。

利用 matlab 程序对测试数据进行优化处理, 获得各测点对元件的灵敏度矩阵, 通过分析设 1~9 为备选测点。设所有元件权值均为 1, 根据式 (5) 可得测试点的网络灵敏度如表 1 所示, 结果显示, 在  $f=398107 \text{ Hz}$  时, 测点 P8 的网络全局灵敏度达到最大值。

表 1 测点全局灵敏度

Frequency	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9
10 000 Hz	1.163	2.834	1.385	1.391	1.390	1.390	1.390	3.435	1.395
12 589 Hz	1.169	2.819	1.390	1.396	1.395	1.395	1.395	3.440	1.399
15 848 Hz	1.177	2.797	1.397	1.403	1.402	1.401	1.401	3.446	1.406
19 952 Hz	1.190	2.763	1.408	1.413	1.412	1.412	1.412	3.457	1.416
25 118 Hz	1.209	2.714	1.424	1.429	1.428	1.428	1.428	3.473	1.432
31 622 Hz	1.239	2.641	1.448	1.453	1.452	1.452	1.452	3.496	1.456
39 810 Hz	1.281	2.547	1.483	1.488	1.487	1.487	1.487	3.530	1.490
50 118 Hz	1.342	2.420	1.532	1.536	1.535	1.535	1.535	3.577	1.537
63 095 Hz	1.424	2.247	1.597	1.601	1.599	1.599	1.599	3.640	1.601
79 432 Hz	1.532	2.043	1.679	1.682	1.681	1.681	1.681	3.720	1.683
100 000 Hz	1.669	1.825	1.778	1.781	1.780	1.780	1.780	3.816	1.781
125 892 Hz	1.835	1.713	1.890	1.892	1.891	1.891	1.891	3.924	1.892
158 489 Hz	2.032	1.783	2.008	2.010	2.009	2.009	2.009	4.039	2.009
199 526 Hz	2.262	1.908	2.121	2.123	2.122	2.122	2.122	4.148	2.122
251 188 Hz	2.527	2.002	2.215	2.216	2.215	2.215	2.215	4.238	2.215
316 227 Hz	2.830	2.065	2.273	2.274	2.273	2.274	2.274	4.291	2.273
398 107 Hz	3.166	2.097	2.283	2.283	2.283	2.283	2.283	4.294	2.283
501 187 Hz	3.503	2.104	2.238	2.239	2.238	2.238	2.238	4.243	2.238
630 957 Hz	3.803	2.090	2.147	2.148	2.147	2.147	2.147	4.145	2.147
794 328 Hz	3.901	2.065	2.027	2.028	2.027	2.028	2.028	4.018	2.028
1 000 000 Hz	3.708	2.035	1.903	1.903	1.903	1.903	1.903	3.888	1.903

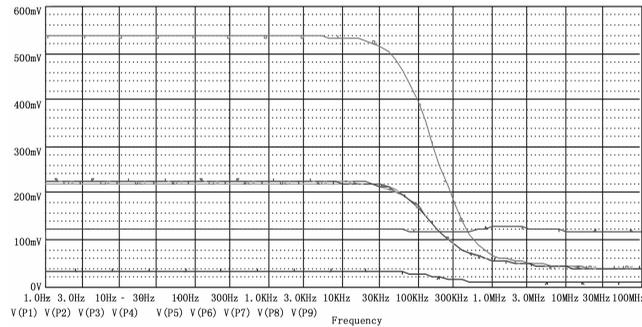


图 2 电路幅频特性图

为了进一步评估优选测点与频率的故障诊断能力，采用支持向量机 (SVM) 对各频率下各测点的故障诊断效率进行比较分析。在容差范围内对无故障电路进行 300 次 monte-carlo 分析，提取测点响应作为训练样本。设置系统发生各元件开、短路的硬故障和标称值变化 10%，20%，50%，150%，200%，500% 的软故障，提取测点响应作为测试样本。在所选测点和频率下，系统故障识别率能达到 98.68%，高于其它频率、测点的诊断率。

#### 4 结束语

本文针对系统级电路故障诊断问题，提出了一种基于全局灵敏度的测试点与测试频率优选方法。该方法通过对测试点进行幅频特性仿真，确定测试信号频率优化范围。利用 Pspice 软件进行参数扫描分析，获取测试数据，避免了电路的拓扑分析和冗繁的计算过程。以网络全局灵敏度为指标实现测试频率与测点的优选，与传统的微分灵敏度方法相比，综合考虑了元件参数变化量的影响，提高了分析结果的准确率。仿真结果表明本文方法优选的测试点与测试激励能找到最好的测点与激励组合，提升了故障诊断效率。

#### 参考文献:

- [1] Prasad V C, Babu N S C. Selection of test nodes for analog fault diagnosis in dictionary approach [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49 (6): 1289 - 1297.
- [2] Starzyk J A, Liu Dong, Liu Zhihong, et al Entropy-based optimum test points selection for analog fault dictionary techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53 (3): 754 - 761.
- [3] Abu Ei-Yazeed M F. M minimum measurements at minimum set of test nodes for analog circuit fault diagnosis [A]. Electro technical Conference (MELECON 2002) [C]. Cairo, Egypt, 2002.
- [4] Yang C L, Tian S L, Long B. Test points selection for analog fault dictionary techniques. J. Electron. Test., 2009, 25 (2): 157 - 168
- [5] Golonek T, Rutkowski J. Genetic algorithm based method for optimal analog test points selection [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs, 2007, 54 (2): 117 - 121.
- [6] 刘琦, 赵红东, 周锦妹等. 基于云模糊组的模拟电路故障字典测点选择 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2908 - 2911.
- [7] 张超杰, 贺国, 梁述海等. 基于改进粒子群算法的模拟电路测试点选择 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (11): 31 - 34.
- [8] ALIPPI C, CATELANIM, FORTA, et al. Automated selection of test frequencies for fault diagnosis in analog electronic circuits [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (3): 1033 - 1044.
- [9] GRASSO F, LUCHETTA A, MANETTI S, et al. A method for the automatic selection of test frequencies in analog fault diagnosis [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2007, 56 (6): 2322 - 2329.
- [10] 宋国明, 雷霖, 王厚军等. 灵敏度矩阵分析的模拟电路故障诊断方法 [J]. 测控技术, 2009, 28 (11): 68 - 72.