

引用格式:吴世浩,孟亚峰.非线性模拟电路测试激励的智能优化设计[J].电光与控制,2018,26(1):17-20. WU S H, MENG Y F. Intelligent optimization design for test stimulus of nonlinear analog circuits[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 26(1):17-20.

非线性模拟电路测试激励的智能优化设计

吴世浩^{1,2}, 孟亚峰¹

(1. 陆军工程大学, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军63850部队, 吉林 白城 137000)

摘要: 在基于频率响应的非线性模拟电路故障诊断中,为了克服现有方法的不足,更好地选择测试激励信号,利用Volterra级数进行建模,提出了频率基搜索和遗传算法相结合的测试激励智能优化设计方法。先通过全局搜索得到使各阶核输出频率不重合的频点集,再以各故障状态特征向量之间的欧氏距离之和为目标函数对频率基进行筛选,得到最优测试激励信号,并以一非线性电路验证了该方法的有效性。

关键词: 模拟电路; 故障诊断; Volterra级数; 非线性; 激励优化

中图分类号: V271.4; TP206.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.004

Intelligent Optimization Design for Test Stimulus of Nonlinear Analog Circuits

WU Shi-hao^{1,2}, MENG Ya-feng¹

(1. The Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 63850 Unit of PLA, Baicheng 137000, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the current methods in the nonlinear analog circuit fault diagnosis based on frequency response, and select a better test stimulus signal, we used Volterra series for modeling, and proposed a method for intelligent optimization of test stimulus by using the frequency basis search together with the genetic algorithm. Firstly, the comprehensive searching technique was adopted to search the best frequency point sets, which make the output frequency point sets of each kernel not coincident with each other. Then, the frequency basis was filtered by taking the sum of the Euclidean distances between the characteristic vectors of the fault status as the objective function. Thereby the optimal test excitation signal was obtained. A nonlinear circuit was used for verification.

Key words: analog circuit; fault diagnosis; Volterra series; nonlinearity; stimulus optimizing

0 引言

非线性、软故障等问题的存在一直制约着模拟电路故障诊断的发展,Volterra级数可以很好地描述非线性系统的本质特征,近些年在故障诊断中得到广泛应用,成为解决非线性模拟电路故障诊断的有力工具^[1-2]。

优选测试激励信号,可以降低各故障间的模糊性,提高故障诊断的效率和精度,一直是研究的热点^[3-4]。在基于频率响应法的故障诊断中,测试激励信号的选择尤为重要,利用Volterra级数进行诊断,首先考虑如何优选信号从而实现有效建模,即保证Volterra核辨识精度的问题,同时也要考虑如何使提取到的故障特征

区分明显,达到故障诊断率高的目的。

文献[5]提出了一种频率筛选方法,但在高阶核中仍存在频率重合的现象,对测量准确度产生影响;文献[6]提出了基于退火遗传混合算法的激励优化方法,对电路有效频段直接进行搜索,得到可使电路故障可辨识性最大的多音信号,但这种全频搜索方法搜到的频点不固定,诊断效果不稳定;文献[7]采用了智能算法对测试激励进行优化,并通过设计软硬件实现了测试激励优化系统,但没有解决Volterra频域核辨识准确度的问题;文献[8]提出以各阶核频率分量互不重合为目标进行搜索,得到频率基,并验证了该方法精确度较高,可以有效进行系统辨识。

本文结合文献[8],提出一种基于频率基搜索和遗传算法相结合的测试激励智能优化设计方法。先对诊断电路进行扫频分析确定频率范围,搜索得到互不重合的频点,以搜索得到的频率基为初始群,利用遗传

收稿日期:2017-08-07 修回日期:2017-09-03

基金项目:国家自然科学基金(61372039)

作者简介:吴世浩(1993—),男,河南焦作人,硕士生,研究方向为电子装备测试与故障诊断。

算法,以各故障特征之间的欧氏距离之和为适应度函数,对激励信号的频率、幅值进行搜索,从而得到使各故障特征分离最大的一组多音信号。最后通过实例验证该方法的有效性。

1 基于频率响应法的故障特征提取

在非线性模拟电路中,当电路出现故障时,系统响应也发生改变,利用 Volterra 级数建模,分离出各阶核频率响应,以各种状态下的各阶核响应作为故障特征,可以进行有效诊断^[9]。

Volterra 级数对任意连续的时不变非线性动态系统可以描述为

$$y_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t) \quad (1)$$

其中

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i \quad (2)$$

式中: $y_n(t)$ 为系统的第 n 阶输出响应,称为第 n 阶 Volterra 时域核,或者第 n 阶广义脉冲响应函数; $u(t)$ 选取为多音信号,表达式为

$$u(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(\omega_k t + \theta_k) = \sum_{k=-K}^K \frac{A_k}{2} e^{j\omega_k t} e^{j\theta_k} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$y_n(t) = \sum_{l_1=-K}^K \sum_{l_2=-K}^K \cdots \sum_{l_n=-K}^K \frac{1}{2^n} A_{l_1} A_{l_2} \cdots A_{l_n} \cdot H_n(j\omega_1, j\omega_2, \cdots, j\omega_n) e^{j\omega_M t} \quad (4)$$

式中: $\omega_M = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \cdots + \omega_n$; $H_n(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$ 是 $h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n)$ 的多维傅里叶变换,称为非线性系统的第 n 阶 Volterra 频域核,或第 n 阶广义频域响应函数(GFRF)。

进而得到 n 阶输出频率响应幅值为

$$|Y_n(j\omega_M)| = \frac{n!}{2^{n-1}} \left(\prod_{i=-K}^K \frac{|A_i|^{m_i}}{m_i} \right) \cdot |H_n(j\omega_1, j\omega_2, \cdots, j\omega_n)| \quad (5)$$

式中, $\omega_M = \sum_{i=-K}^K m_i \omega_i$,且满足 $\sum_{i=-K}^K m_i = n$ 。可以看出,每一阶输出频率响应的幅值与输入激励信号的幅值和 Volterra 频域核有关,其对应的频率成分由输入激励信号的频率成分组合而成。

针对诊断电路,设置不同故障状态,通常采用 Vandermonde 法^[10]分离出各阶输出响应,计算得到发生各种故障状态时的 $H_n(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$ 。在进行故障诊断时,可以利用式(5)得到各阶输出频率响应的幅值,即获得故障特征。

2 多音信号频率基搜索方法

由第1章分析可知,选取不同的频率基,可得到相应的输出频率响应的频点集,以三音信号前3阶的频点集为例,各阶频域核的输出频率成分见表1。

表1 三音激励下前3阶 Volterra 频域核对应的频率成分
Table 1 The frequency components of Volterra kernels stimulated by 3-tone signal

阶核	输出的频率成分
第1阶核	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$
第2阶核	$\omega_1 + \omega_1, \omega_2 + \omega_2, \omega_3 + \omega_3, \omega_1 + \omega_2, \omega_1 + \omega_3, \omega_2 + \omega_3, \omega_1 - \omega_2 , \omega_1 - \omega_3 , \omega_2 - \omega_3 , \omega_1, \omega_2, \omega_3, 3\omega_1, 3\omega_2, 3\omega_3, \omega_3 - \omega_2 - \omega_1 , \omega_3 - \omega_2 + \omega_1 , \omega_3 + \omega_2 - \omega_1 , \omega_3 + \omega_2 + \omega_1 $
第3阶核	$ 2\omega_1 - \omega_2 , 2\omega_2 - \omega_1 , 2\omega_1 + \omega_2 , 2\omega_2 + \omega_3 , 2\omega_2 - \omega_3 , 2\omega_3 - \omega_2 , 2\omega_2 + \omega_3 , 2\omega_3 + \omega_2 , 2\omega_1 - \omega_3 , 2\omega_3 - \omega_1 , 2\omega_1 + \omega_3 , 2\omega_3 + \omega_1 $

可以看到,如果激励信号的频率选取不当,各阶频域核就可能出现频率重合。

这将影响系统辨识的精度,在基于频率响应的故障诊断中,尽量避免各阶核的频率成分重合,可以更好地区分各种状态下的故障特征。本文采用文献[8]中提到的搜索算法进行搜索,主要流程如图1所示。

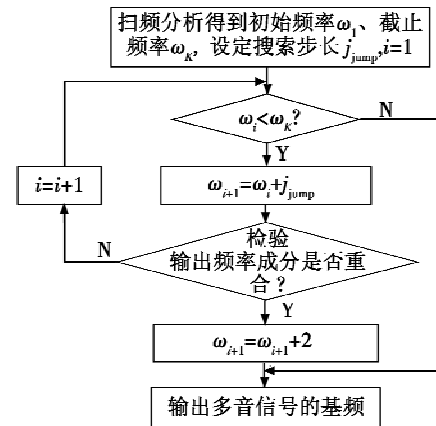


图1 多音信号频率基搜索算法

Fig. 1 Search algorithm of frequency basis for the multi-tone signal

按照此流程,筛选出一组使输出频率响应频点不重合的频率基,本文将频率基搜索和遗传算法结合,从筛选出的频率基中进一步优选频率。

3 基于频率基搜索和遗传算法的最优激励搜索方法

不同故障对应的各阶输出频率响应不同,相同激励信号下,各故障特征之间的欧氏距离越大,越有利于故障辨识^[11]。因此本文在搜索到的频率基的基础上,采用遗传算法,以各故障特征欧氏距离之和为适应度

函数,对激励信号进行优化。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种成熟的算法,易于计算机进行分析处理,在工程实践中已经得到广泛应用^[12]。本文针对激励搜索过程,对初始种群、适应度函数、交叉率、变异率等进行设计,将遗传算法应用于基于 Volterra 级数频域核建模的激励优化,流程如下所述。

1) 对诊断电路可能出现的故障进行分类编码,对电路进行激励,采用 Vandermonde 法分离出各状态下的各阶输出响应,得到 Volterra 频域核,建立系统模型。

2) 对激励信号编码。其中频率成分选择范围为第 2 章方法搜索得到的频率基,采用遗传算法搜索过程中,频率成分只进行交叉,不进行变异;幅值范围通过对电路参数扫描确定;本文以各阶核的输出频率响应的幅值为故障特征,此过程与相位无关,不予考虑。

3) 适应度函数设计。对文献[6]的适应度函数进行改进,设电路有 N 种故障状态,则每个输入信号对各种状态下电路进行激励产生 N 个输出响应,即 N 个故障状态矢量,以各状态矢量之间的欧氏距离总和作为适应度函数,来对激励信号进行优选。适应度函数表达式为

$$D = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=j}^N \|Y_j - Y_i\| \quad (6)$$

式中: D 表示电路适应度函数, D 越大,则各故障状态的区分度越强,故障辨识精度越高; Y_j 和 Y_i 为某激励下的各故障状态响应, $\|Y_j - Y_i\|$ 表示各故障状态矢量之间的欧氏距离。本文中适应度值函数考虑了各故障特征相互之间的距离,区分度更加明显,有利于故障辨识。

4) 选择、交叉、变异操作。本文通过轮盘赌选择函数对每个个体进行选择;采用单点交叉,交叉概率记为 p_x ;只针对激励幅值进行变异操作,变异概率记为 p_m 。

5) 终止操作。达到给定进化代数或满足给定的适应度值,则输出最优的频率组合、最优幅度值及最佳适应度值,否则,转至 4)。

4 应用实例

本文以一例简单的非线性电路验证上述方法的有效性,电路如图 2 所示。

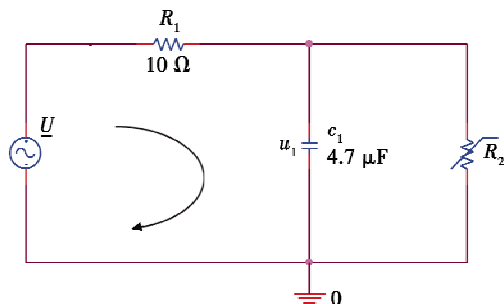


图 2 非线性模拟电路

Fig.2 Nonlinear analog circuit

图 2 中:电源 U 为可编辑激励信号源; C_1 和 R_2 两端的电压同为 u_1 , u_1 为系统电压输出值,通过 R_1 和 R_2 的电流分别为 i_1 和 i_2 。非线性电阻 R_2 的伏安特性表示为: $i_2 = 0.001 \times (u_1 + 5u_1^2)$ 。设激励信号为 $u(t) = a(\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t) + \cos(2\pi f_3 t))$,在 PSpice 环境下扫频及参数扫描分析得到有效频率范围为 $0 \sim 3.4$ kHz,取 a 范围为 $0 \sim 4$ V。

由于硬故障的特征明显,易于诊断,本文只对软故障的情况进行分析。将电路设置 6 种待诊断故障状态,如表 2 所示。

表 2 6 种故障诊断状态

Table 2 Six kinds of diagnostic status

故障序号	故障元件
F0	无
F1	$R_1 = 12 \Omega$
F2	$R_1 = 8 \Omega$
F3	$C_1 = 4.9 \mu\text{F}$
F4	$C_1 = 4.5 \mu\text{F}$
F5	$i_2 = 0.002u_2 + 0.004u_1^2$

针对上述 6 种电路状态,每种状态取前 3 阶 Volterra 频域核进行表征,用各故障状态向量的欧氏距离之和作为优化目标函数。先采用频率基搜索方法得到一组频率基为 $\{11, 511, 1013, 1517, 2025, 2553, 3093\}$ (单位,Hz),其中起始频率为 11 Hz,搜索步长为 500 Hz。再采用遗传算法对激励信号进一步搜索,交叉率设为 0.7,变异率设为 0.01,为增强搜索速度,设置代沟为 0.95。进化过程如图 3 所示。

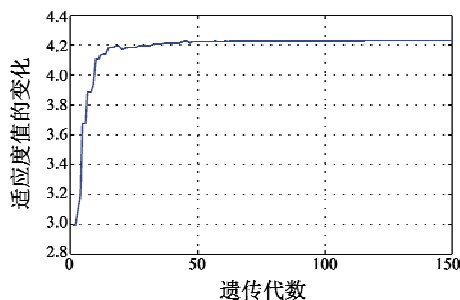


图 3 进化曲线

Table 3 The evolution curve

可以看到,只需要进化 40 代,就搜索到了适应度值最大的值,搜索到的频率点分别为 $\{2025, 2553, 3093\}$ (单位,Hz),幅值分别为 3.9752 V,而采用全频域范围搜索的方法进行寻优,每次搜索的值可能不同,随着进化代数的增多频点也不断变化,频点不稳定,而且在高阶核中可能会出现频率重合现象,如进化代数为 100 时,二阶核中频率 $\Delta f_1 = (3389 - 3376)$ Hz 和 $\Delta f_2 = (3392 - 3379)$ Hz (Δf_1 与 Δf_2 均为 13 Hz) 出现重合,这对故障辨识是不利的。方法对比如表 3 所示。

表 3 方法对比

Table 3 Comparison of the two methods

	进化代数	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	$a/\sqrt{2}$
本文方法	40	2025	2553	3093	3.975 2
	100	2025	2553	3093	3.987 1
	150	2025	2553	3093	3.990 3
全频域搜索方法	40	3157	3369	3387	3.970 1
	40	3186	3327	3369	3.985 3
	40	3169	3381	3385	3.982 6
	100	3376	3389	3392	3.990 2
	150	3384	3395	3398	3.989 5

5 总结

本文在文献[8]的基础上,提出了基于频率基搜索和遗传算法相结合的测试激励智能优化算法,并通过实验对该方法进行验证,本文提出的方法主要具有以下优点:1)先从电路有效频段中筛选一组频率基,避免了高阶输出频率响应的频点重合,保证了故障特征的有效性;2)利用遗传算法,从频率基中进一步优选频点,得到使各故障特征区分度最大的激励信号,可提高故障辨识精度。

参 考 文 献

- [1] 邓勇,张禾. 基于 Volterra 核二次型分布的非线性模拟电路软故障诊断[J]. 控制与决策,2015,30(7):1340-1344.
- [2] 王旭婧,陈长兴,任晓岳. 基于沃尔特拉级数的模拟电路组合故障诊断法[J]. 计算机工程与科学,2015,37(3):446-451.
- [3] 罗慧,王佑仁,林华,等. 任意周期激励函数的模拟电路测试激励优化设计[J]. 电子学报,2011,38(8):1950-1954.
- [4] 陈圣俭,魏子杰,周校晨,等. 一种基于马氏距离的测试激励优选方法[J]. 微电子学,2016,46(6):845-848.
- [5] EVANS C, REES D, JONES I, et al. Periodic signals for measuring nonlinear Volterra kernels[J]. IEEE Transactions and Measurement, 1996, 45(2):362-371.
- [6] 林海军,张礼勇,顾耕,等. 基于退火遗传混合算法的模拟电路诊断激励优化[J]. 电测与仪表,2009,46(12):17-19.
- [7] 王其高. 基于 Volterra 核模拟电路故障诊断的测试激励优化及实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
- [8] 韩海涛,马红光,韩琨,等. 关于 Volterra 频域核辨识的多音激励信号设计[J]. 工程设计学报,2012,19(2):123-127.
- [9] 曹建福,韩崇昭,方洋旺. 非线性系统理论及应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2006.
- [10] HAN H T, MA H G, TAN L N, et al. Non-parametric identification method of Volterra kernels for nonlinear systems excited by multi-tone signal[J]. Asian Journal of Control, 2013, 16(2):519-529.
- [11] 殷时蓉. 基于 Volterra 级数和神经网络的非线性电路故障诊断研究[D]. 成都:电子科技大学,2007.
- [12] 李丹阳,孟亚峰,朱赛,等. 用改进遗传算法优选测试节点[J]. 电光与控制,2013,20(4):63-67.

订 正

2018 年第 25 卷第 12 期第 24 页左栏 3.1 节第 2 段第 7 行中,“X,Y 方向速度误差”更改为“东、北向速度误差”。



请扫描二维码关注我刊