

基于复互小波分析的模拟电路故障诊断方法

马 岚, 王厚军

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】针对模拟电路故障诊断研究中故障特征提取的难题,提出基于复互小波变换的相对幅度-相对相位协同分析的新方法,并根据复互小波变换的特点构建了故障敏感信息提取算法。使用复互小波变换能同时提取模拟电路在不同频率和时间尺度上的故障特征,并且相对幅度和相对相位信息分别从信号“能量”和“时间延迟”两个不同角度表征模拟电路的故障信息。该方法同时使用了蒙特卡洛方法构建正常电路元器件的容差范围,仿真实验结果表明该方法可以有效地解决模拟电路中灾难型和参数型故障诊断问题。

关键词 模拟电路; 灾难型故障; 参数型故障; 相对幅度; 相对相位

中图分类号 TM93

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.012

Faults Diagnosis Approach for Analog Circuit Based on Complex Cross-Wavelet Transform

MA Lan and WANG Hou-jun

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract A new method for fault feature extraction problem in analog circuit diagnosis is presented using collaborative analysis of relative amplitude and phase based on complex cross-wavelet transform, and the sensitive information extraction algorithm is built according to the characteristics of the wavelet transform. Using complex cross-wavelet transform, fault signature can be effectively extracted at different frequency and time scales. The relative amplitude and the relative phase are used to characterize analog circuit faults in signal energy and signal delay, respectively. Due to the influence of component tolerance, Monte-Carlo simulation is used to analyze the normal circuit. The result of simulation shows that the catastrophic and parametric fault diagnosis problem can be effectively solved through the proposed method.

Key words analog circuit; catastrophic faults; parametric faults; relative amplitude; relative phase

随着当今科学技术的发展,电路设计越来越复杂,而其制造成本要求越来越低,这使得电路故障检测成为一个相对昂贵的任务^[1]。模拟电路的故障检测比较复杂,主要由故障模型少、元器件存在容差和电路非线性特性等原因造成^[2]。模拟电路中故障类型可以分为灾难型故障和参数型故障。灾难型故障发生在模拟电路中元件出现短路、断路等情况,此时电路会严重偏离正常工作状态。参数型故障发生在模拟中时, R 、 L 、 C 等元件随着工作状态的改变出现偏离正常值的情况。灾难型故障一般会导致系统性能严重改变,此时电路输出特性改变很明显,以此作为故障判据可以很好地检测故障。而参数型故障则要求测试方法足够敏感,能够检测到由元件参数改变而引起的系统性能变化。

文献[3]利用频域特征参数带宽、截止频率、幅度峰值、频率峰值等作为故障检测判据。文献[4]利用时域特征参数过冲、上升时间、下降时间作为故障检测判据。传统的模拟电路故障检测方法只是在单一的频域或者时域进行,利用小波变换可以把电路采样序列扩展至时频域进行分析^[5]。小波分析主要包含连续小波变换和离散小波变换。离散小波变换主要有3个方面的缺点:偏移不敏感、缺乏方向性和相位信息,这些缺点导致离散小波变换不适合提取采样序列的故障特征^[6]。文献[7]中讨论的连续小波变换更适用于故障检测中,但为了提取采样序列中的相位信息,仅使用复连续小波变换。

本文对被测电路和正常电路的输出响应信号 V_{OUT} 进行复互小波变换,提出了利用相对幅度-相

收稿日期: 2012-12-21; 修回日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(60934002)

作者简介: 马岚(1980-),女,博士生,主要从事模拟和混合电路故障诊断、信号处理方法等方面的研究。

位分析检测模拟电路灾难型和参数型故障的新方法。

1 基本理论

1.1 复连续小波变换和复互小波变换

一个电路的采样序列为 $X(n)$, 其连续小波变换可定义为 $X(n)$ 和母小波 $\psi(t)$ 的卷积, *为复共轭, Δt 表示采样间隔, s 为频率尺度, n 为时间位移。复连续小波变换要求 $\psi(t)$ 为复母小波:

$$W_n^X(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \sqrt{\frac{\Delta t}{s}} \psi^* \left(\frac{(n'-n)\Delta t}{s} \right) \quad (1)$$

本文采用两种不同的母小波: Morlet母小波和Paul母小波^[8]。采样序列 X 和 Y 的复互小波变换可以定义为:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^Y(s)^* \quad (2)$$

式中, 相对幅度 $|W_n^{XY}(s)|$ 为序列 X 和 Y 在某一频率尺度 s 和时间位移 n 的相对幅度; $\arg(W_n^{XY}(s))$ 为序列 X 和 Y 在某一频率尺度 s 和时间位移 n 的相对相位。在这里, 信号序列的相对幅度表现为信号间能量的变化, 相对相位为信号间的时间延迟。模拟电路灾难型和参数型故障表现在电路故障采样序列和电路正常采样序列之间的能量变化和相对时间延迟。

1.2 敏感信息提取方法

在模拟电路故障诊断中, 电路输入通常为一个正弦波, 电路输出响应通常局限于频率响应范围 F 之内^[9-10]。根据小波分析中小波尺度与等效傅里叶频率的关系, 可以得到与频率响应 F 相对应的小波分析尺度 SF ^[11]。

$W_n^{V-FaultV-Normal}(s)$ 表示电路正常序列和故障序列在不同尺度 s 和时间 n 上的相对幅度和相位值。由于电路输出响应通常集中于小波尺度 SF , 那么可以从 $W_n^{V-FaultV-Normal}(s)$ 提取信息:

$$SE(W_n^{V-FaultV-Normal}) = W_n^{V-FaultV-Normal} \Big|_{s=Sf} \quad (3)$$

为了克服小波变换带来的边缘效应^[12], 只计算影响锥(COI)范围外的相对幅度和相位值。则提取公式可以表示为:

$$SEST(W_n^{V-FaultV-Normal}) = SE(W_n^{V-FaultV-Normal}) \Big|_{outside \rightarrow COI} \quad (4)$$

2 相对幅度-相位测试方法

电路测试通常包括3个阶段: 电路仿真、响应测量和结果分析。在电路仿真阶段, 利用Monte-Carlo仿真得到正常电路响应的相对幅度和相位的范围。为了建立电路无故障行为, 根据文献^[13]建议, 标准差 σ 作为可接受的元器件参数变化量。在响应测量阶段, 对电路进行故障注入, 同时获得故障电路相对幅

度和相位值。在结果分析阶段, 如果被测电路的相对幅度和相位值都在无故障电路响应边界内, 则认为被测电路无故障, 否则有故障。

详细的测试算法介绍如下。

1) 电路仿真阶段。

① 在HSPICE中构建仿真被测电路, 电路中所有元器件为其正常值。电路输入为正弦波, 电路输出为 $V-Normal$ 。 $V-Normal$ 序列是复互小波变换的基准。

② 利用Monte-Carlo仿真确定正常电路输出范围。电路元件参数符合高斯分布, 其标准差为1 sigma。电路一共进行 M 次Monte-Carlo仿真, 其中 $V-Monte(i)$ 表示第 i 次仿真电路输出响应。

③ 将复互小波变换用于 $V-Normal$ 和 $V-Monte$ 序列:

$$W_n^{V-NormalV-Normal}(s) = W_n^{V-Normal}(s)W_n^{V-Normal}(s)^*$$

$$W_n^{V-Monte(i)V-Normal}(s) = W_n^{V-Monte(i)}(s)W_n^{V-Normal}(s)^*$$

④ 利用1.2节中的敏感信息提取方法:

$$AMP_{reference} = SEST(|W_n^{V-NormalV-Normal}(s)|)$$

$$ARG_{reference} = SEST(\arg(W_n^{V-NormalV-Normal}(s)))$$

$$AMP_{monte}(i) = SEST(|W_n^{V-Monte(i)V-Normal}(s)|)$$

$$ARG_{monte}(i) = SEST(\arg(W_n^{V-Monte(i)V-Normal}(s)))$$

⑤ 利用以下公式对结果进行归一化处理:

$$AMP_{REF}(i) =$$

$$\text{sig} \left(\sum_{k=1}^N (AMP_{monte}(i) - AMP_{reference}) \right) \times$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (AMP_{monte}(i) - AMP_{reference})^2}{N}}$$

$$ARG_{REF}(i) =$$

$$\text{sig} \left(\sum_{k=1}^N (ARG_{monte}(i) - ARG_{reference}) \right) \times$$

$$\frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (ARG_{monte}(i) - ARG_{reference})^2}{N}}$$

$$\text{其中, } \text{sig}(x) = \begin{cases} 1 & X \geq 0 \\ -1 & X < 0 \end{cases} \circ$$

那么正常电路输出响应的相对幅度范围为:

$$[\min(AMP_{REF}).. \max(AMP_{REF})]$$

正常电路输出响应的相对相位范围为:

$$[\min(ARG_{REF}).. \max(ARG_{REF})]$$

2) 响应测量阶段。

将故障注入到电路中并且获得对应的故障序列 $V-Fault(i)$ 。利用复互小波变换提取其相关幅度和相

位信息。详细步骤如下：

```

for each fault circuit  $i=1, 2, \dots, n$  do begin
 $W_n^{V-Fault(i)V-Normal}(s) = W_n^{V-Fault(i)}(s)W_n^{V-Normal}(s)^*$ 
 $AMP_{fault}(i) = SEST(|W_n^{V-Fault(i)V-Normal}(s)|)$ 
 $ARG_{fault}(i) = SEST(\arg(W_n^{V-Fault(i)V-Normal}(s)))$ 
 $amp_{fault}(i) =$ 
 $\text{sig}(\sum_{k=1}^N (AMP_{fault}(i) - AMP_{reference})) \times$ 
 $\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (AMP_{fault}(i) - AMP_{reference})^2}{N}}$ 
 $arg_{fault}(i) =$ 
 $\text{sig}(\sum_{k=1}^N (ARG_{fault}(i) - ARG_{reference})) \times$ 
 $\frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (ARG_{fault}(i) - ARG_{reference})^2}{N}}$ 
end
    
```

3) 结果分析阶段。

详细分析过程如下：

```

for each fault circuit  $i=1, 2, \dots, n$  do begin
    if  $amp_{fault}(i) < \min(AMP_{REF}(i))$  or
        $amp_{fault}(i) > \max(AMP_{REF}(i))$ 
    then 电路发生相对幅度故障;
    if  $arg_{fault}(i) < \min(ARG_{REF}(i))$  or
        $arg_{fault}(i) > \max(ARG_{REF}(i))$ 
    then 电路发生相对相位故障;
end
    
```

3 试验结果与分析

3.1 跳蛙基准电路

跳蛙电路如图1所示，输入 V_{IN} 为振幅为3 V的1 kHz正弦波，输出 V_{OUT} 在100 KSPS下进行采样，每次存储2 048个点。正常电路输出响应的相对幅度和相位范围由2 000次Monte-Carlo仿真确定。相对幅度和相对相位正常响应范围如表1所示。

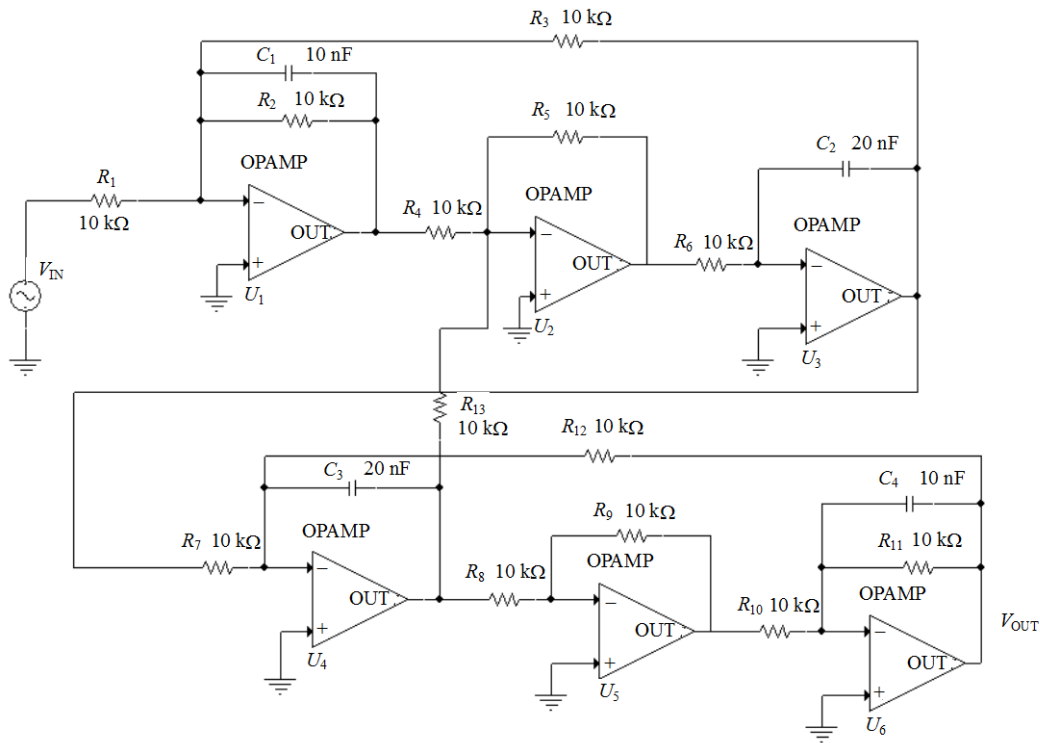


图1 跳蛙基准电路

表1 跳蛙电路正常响应相对幅度和相位边界范围

故障响应范围	Min	Max
AMP(Morlet)	-13.498 259	12.343 993
ARG(Morlet)	-8.895 469	9.295 972
AMP(PAUL)	-4.740 685	4.336 003
ARG (PAUL)	-8.885 899	9.293 368

当采用Morlet母小波时，正常电路的相对幅度范围绝对值约为25.8，而采用Paul母小波时，相对幅度范围约为9.0，因而可以得出采用Morlet母小波比采用Paul小波在相对幅度分析中有更好的故障分辨率。而对于相对相位分析而言，其正常响应范围绝

对值都约为18.2, 母小波的不同对相对相位分析几乎没有影响。

3.2 跳蛙基准电路灾难型故障

跳蛙电路典型灾难型故障如表2所示。 C_4 -Open为元件 C_4 出现断路现象, C_4 -Short为元件 C_4 出现短路现象。AMP(Morlet)表示在Morlet母小波下对应故障的相对幅度值, ARG(Morlet)表示在Morlet母小波下对应故障的相对相位值, OBS(Morlet)表示采用相对幅度或者相对分析下可以将该故障检测出来。

表2 跳蛙电路典型灾难型故障

故障类型	AMP (Morlet)	ARG (Morlet)	OBS (Morlet)
C_4 -Open	-5.564 325	20.756 591	ARG
C_4 -Short	-89.552 249	175.289 6	AMP/ARG
C_1 -Open	-3.431 679	20.231 621	ARG
C_1 -Short	-89.700 316	176.244 9	AMP/ARG
R_{10} -Open	127.722 0	6.4201 94	AMP
R_{10} -Short	-89.552 249	175.289 6	AMP/ARG
R_{12} -Open	46.794 620	-37.583 982	AMP/ARG
R_{12} -Short	-90.983 061	-77.910 403	AMP/ARG
R_{11} -Open	-91.069 483	-153.535 8	AMP/ARG
R_{11} -Short	65.089 914	43.329 670	AMP/ARG

对于 C_4 -Open故障, 采用相对相位分析可以很好地将该故障检测出来, 其表现为故障电路采样序列与正常电路采样序列有一个明显的时间延迟。 R_{10} -Open故障对相对幅度分析敏感, 而对相对相位分析不敏感, 表现为故障电路采样序列相对于正常电路采样序列能量有明显变化。

C_4 -Short、 R_{10} -Short和 R_{12} -Short等故障, 用相对幅度和相对相位分析均可以检测出来, 其故障不仅表现在采样序列之间能量的变化, 同时具有一个明显的相对时间延迟。灾难型故障通常表现在电路输出响应能量变化相对较大, 如 R_{12} -Short、 R_{11} -Open故障的采样序列在时域上表现为采样输出信号幅度几乎为零。 C_4 -Open、 C_1 -Open故障的采样序列在时域上能量几乎和正常电路输出一样, 但是在故障电路与正常电路输出有一个明显的时间延迟。

3.3 跳蛙基准电路参数型故障

当 C_1 减少6 sigma时, 相对幅度值超过正常范围上边界值12.343 993, 因此 C_1 -6sigma故障可以用相对幅度分析检测。当 C_3 增加6 sigma时, 相对相位值超过正常范围下边界值-8.895 469, 因此 C_3 +6sigma故障可以用相对相位分析检测。 C_2 +6sigma和 C_3 -6sigma故障可以同时被Morlet母小波和Paul母小波检测出来, 母小波选择的影响主要表现在故障分

辨率方面。

对于 C_1 -6sigma, R_1 -6sigma和 R_2 -6sigma故障, 其对相对幅度分析比相对相位分析更为敏感。同时, C_3 +6sigma、 C_4 +6sigma和 R_6 -6sigma故障对相对幅度分析不敏感, 用相对相位分析可以检测出此类故障。 C_2 +6sigma和 R_7 -6sigma故障都可以被相对幅度和相对相位分析检测到, 其中 C_2 +6sigma故障对相对相位分析更为敏感, R_7 -6sigma故障对相对幅度分析更为敏感。

表3 跳蛙电路典型参数型故障

故障类型	AMP (Morlet)	ARG (Morlet)	AMP (Paul)	ARG (Paul)
C_1 -6sigma	13.958 415	9.011 746	4.900 607	9.008554
C_2 +6sigma	-13.877 721	-16.330 899	-4.866 104	-16.316 846
C_3 -6sigma	15.073 037	11.909 609	5.290 877	11.907 371
C_3 +6sigma	-13.169 358	-16.475 253	-4.617 859	-16.460 244
C_4 +6sigma	-8.451 804	-13.481 419	-2.964 703	-13.469 648
R_1 -6sigma	27.594 231	7.361 955	9.691 423	7.358 166
R_2 -6sigma	-17.605 256	-8.142 736	-6.180 655	-8.134 594
R_4 +6sigma	-14.410 381	-11.733 123	-5.057 628	-11.722 722
R_6 -6sigma	8.148 630	14.872 265	2.856 833	14.872 338
R_7 -6sigma	18.719 950	10.882 445	6.572 799	10.879 110
R_8 +6sigma	-14.687 502	-11.018 723	-5.156 037	-11.006 162
R_{10} -6sigma	-14.949 012	-8.906 898	-5.248 075	-8.896 500
R_{11} -6sigma	20.360 584	9.384 644	7.148 972	9.382 565
R_{11} +6sigma	-14.032 108	-13.088 741	-4.923 924	-13.075 026

5 结束语

测试结果显示利用相对幅度-相位分析方法可以有效解决模拟电路灾难型和参数型故障检测问题。本文提出的故障检测方法要求故障序列和无故障序列需要在同一触发采样时间进行采样, 才能用于提取采样序列间的能量变化和时间延迟。现今数据采集器具有触发和定时功能, 可以很好地完成这项任务。

参 考 文 献

- [1] CZAJA Z. A diagnosis method of analog parts of mixed-signal systems controlled by microcontrollers[J]. Meas, 2007, 40(2): 158-170.
- [2] BANDLER J W, SALAMA A E. Fault diagnosis of analog circuits[J]. Proceedings of IEEE, 1985, 73(8): 1279-1325.
- [3] KAVITHAMANI A, MANIKANDAN V, DEVARAJAN N. Analog circuit fault diagnosis based on bandwidth and fuzzy classifier[C]//Proceedings of International Conference, IEEE -TENCON 2009. Singapore: IEEE, 2009: 1-6.
- [4] JANTOS P, GRZECHCA D. The influence of global parametric faults on analogue electronic circuits time

- domain response features[C]//Proceedings of the IEEE-DDECS'2008. Slovakia: IEEE, 2008: 1-5.
- [5] STRANG G. Wavelets and dilation equations: a brief introduction[J]. SIAM Rev, 1989, 31(4): 614-627.
- [6] BURNS T, ROGERS S, RUCK D, et al. Discrete, spatiotemporal, wavelet multiresolution analysis method for computing optical flow[J]. Opt Eng, 1994, 33(7): 2236-2247.
- [7] GROSSMAN A, KRONLAND-MARTINET R, MORLET J. Reading and understanding continuous wavelet transforms in wavelets time-frequency methods and phase space[J]. Springer-Verlag, 1989, 14(18): 2-20.
- [8] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998(79): 61-78.
- [9] AMINIAN M, AMINIAN F. A modular fault diagnostic system for analog electronic circuits using neural networks with wavelet transform as a preprocessor[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2007(56): 1546-1554.
- [10] SPYRONASIOS A D, DIMOPOULOS M G. Wavelet analysis for the detection of parametric and catastrophic faults in mixed-signal circuits[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2011, 60(6): 2025-2038.
- [11] DIMOPOULOS M G, SPYRONASIOS A D, PAPAKOSTAS D K, et al. Wavelet energy-based testing using supply current measurements[J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2010, 4(2): 76-85.
- [12] LIU Jie, Wang W, GOLNARAGHI F. An extended wavelet spectrum for bearing fault diagnostics[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2008, 57(12): 2801-2812.
- [13] KONDAGUNTURI R, BRADLEY E, MAGGARD K, et al. Benchmark circuits for analog and mixed-signal testing [C]//Proceedings of the IEEE Southeastcon Conference. Lexington: IEEE, 1999.

编辑 漆蓉