



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103064010 A

(43) 申请公布日 2013.04.24

(21) 申请号 201310006850.8

(22) 申请日 2013.01.08

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路
866 号

(72) 发明人 徐正国 马翔楠 王文海 孙优贤
肖海生 程崇峰

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公
司 33200

代理人 周烽

(51) Int. Cl.

G01R 31/316(2006.01)

权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件
参数估计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法。本发明的前提是已经定位单个故障元件,给待测电路施加一个正弦激励信号,以电路的输出端作为测试点;首先通过计算机仿真得到元件参数和相应输出信号的 Hilbert 边际谱总能量的关系,并拟合出关系曲线方程,补偿误差后可得到实际电路中故障元件的参数估计方程。将实际测量得到的测试点信号经希尔伯特-黄变换分析计算,得到相应的 Hilbert 边际谱总能量值,代入参数估计方程并求解即可得到参数值。本方法简单有效,对于线性模拟电路和非线性模拟电路均适用,故障参数估计精度可达 95% 以上,且只需要一个可及测试节点,适合于实际工程应用。

1. 一种基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法,其步骤如下:

(1) 定位发生参数漂移型故障的元件。

(2) 根据待测电路拓扑结构建立被测电路的仿真模型。在计算机仿真环境下,给被测电路仿真模型提供一个正弦激励信号。对各个元件分别进行参数扫描分析并采集各个测试点的电压信号,对应的测试点电压信号经希尔伯特-黄变换分析处理,得到元件参数 R 和 Hilbert 边际谱总能量 $ES_{\text{仿真}}$ 的关系,并拟合出关系曲线方程 $ES_{\text{仿真}} = f(R)$ 。

式中, $ES_{\text{仿真}}$ 为 Hilbert 边际谱总能量; R 为电路元件的参数值。

所述的待测电路的输出端为唯一的可及测试点,测试节点采集的是电压信号。

仿真环境中元件参数的扫描范围为标称值的 $\pm 50\%$ 。

(3) 给标称值状态下的被测电路仿真模型施加激励信号,在测试节点采集电压信号并经希尔伯特-黄变换分析处理,得到相应的 Hilbert 边际谱总能量,记为 ES_0 ;给标称值状态下的实际电路施加和仿真平台同样的激励信号,多次采集测试节点的电压信号,分别对这些电压信号进行希尔伯特-黄变换分析,可得到多个标称值状态下的 Hilbert 边际谱总能量值,求其平均值,记为 $\overline{ES_0}$,则实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差可近似为 $\Delta ES = \overline{ES_0} - ES_0$,给步骤(2)中的 $ES_{\text{仿真}}$ 补偿系统及测试误差,得到实际待测电路中各个元件的参数估计方程:

$$ES_{\text{实际电路}} = ES_{\text{仿真}} + \Delta ES = f(R) + \Delta ES。$$

式中, $ES_{\text{实际电路}}$ 为实际待测电路输出信号的 Hilbert 边际谱总能量值; ΔES 为实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差。

所述激励信号为一个正弦波信号,且给电路仿真模型和实际待测电路施加的激励信号为相同的正弦信号。

(4) 给实际电路施加和仿真环境相同的正弦激励信号并采集测试节点的电压信号,经希尔伯特-黄变换分析计算后得到相应的 Hilbert 边际谱总能量值 $ES_{\text{实际电路}}$,代入参数估计方程并求解,即可得到元件参数值。

2. 根据权利要求 1 所述的基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法,其特征在于,所述参数漂移型故障是指电路元件的参数偏离标称值,但尚未引起电路系统发生功能性故障的故障。

3. 根据权利要求 1 所述的基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法,其特征在于,所述元件的参数在其标称值 $\pm 50\%$ 范围发生漂移时不会导致系统发生功能性故障。

4. 根据权利要求 1 所述的基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法,其特征在于,为了保证测试精度和诊断精度,对实际待测电路的测试应在尽量优良的测试环境中进行,测试环境要满足以下标准:温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$;相对湿度: $\leq 75\%$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的基于希尔伯特-黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法,其特征在于,在实际测试时,为了提高诊断精度,对实际电路的每项测试采用“多次测量取均值法”,将多次采集的电压信号经希尔伯特-黄变换分析处理之后求 Hilbert 边际谱总能量的平均值,然后再代入参数估计方程进行计算。

基于希尔伯特 - 黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于信号处理和模拟电路故障诊断研究领域,涉及一种模拟电路故障参数估计方法,特别涉及一种基于希尔伯特 - 黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)的模拟电路故障参数估计方法。

背景技术

[0002] 在模拟电路故障诊断研究领域,故障检测与定位的研究相对比较成熟,提出了很多行之有效的方法,这些方法或者单独使用,或者交叉融合,不仅能够准确定位单故障,并且对多故障也能较准确地定位,比如故障字典法、概率统计法、故障验证法、专家系统法、神经网络法、模糊理论法、小波变换法、支持向量机法,等等。但是,模拟电路故障诊断的目的不仅仅是故障隔离,能否进一步精确估计故障元件的参数则是对故障诊断方法提出的更高要求。目前,有关模拟电路故障参数估计的研究也取得了一定的成果,比如求解节点电压增量方程法;多频传递函数法;数学规划法;测前迭代仿真法;基于线性规划的两级诊断算法,等等。整体来看,现有的模拟电路故障元件的参数估计方法通常是在获取足够多的数据信息后,根据模拟电路的拓扑结构估计或求解元件参数,这往往需要比故障定位更多的诊断信息,但实际应用环境往往不能提供足够多的诊断信息,诊断方程的求解也比较困难,加之电路网络拓扑结构日益复杂、模拟电路元件容差的影响以及环境中测试噪声干扰的存在,故障参数估计方法的发展远未成熟,估计精度也不够理想。

[0003] 有关模拟电路故障元件参数估计方法的研究进展缓慢,原因主要有:实际应用环境不能提供足够多的诊断信息,诊断方程的求解比较困难,电路网络拓扑结构日益复杂、模拟电路元件容差的影响以及环境中存在测试噪声干扰,等等,导致故障参数估计方法的发展远未成熟,估计精度也不够理想。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于针对现有技术的不足,提供一种基于希尔伯特 - 黄变换的模拟电路故障元件参数估计方法。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案来实现的:一种基于希尔伯特 - 黄变换的模拟电路故障参数估计方法,步骤如下:

[0006] 1、定位发生参数漂移型故障的元件。

[0007] 定位故障元件可采用基于小波变换和 BP 神经网络的模拟电路故障定位方法,用小波变换分析待测电路测试点信号并提取故障特征,提取出的故障特征作为训练样本训练 BP 神经网络,借助训练好的 BP 神经网络即可实现故障元件的定位。也可以采用基于小波变换和支持向量机的模拟电路故障定位方法。2、根据待测电路拓扑结构建立被测电路的仿真模型。在计算机仿真环境下,给被测电路仿真模型提供一个正弦激励信号。对各个元件分别进行参数扫描分析并采集各个测试点的电压信号,对应的测试点电压信号经希尔伯特 - 黄变换分析处理,得到元件参数 R 和 Hilbert 边际谱总能量 $ES_{\text{仿真}}$ 的关系,并拟合出关系曲线

方程 $ES_{\text{仿真}} = f(R)$ 。

[0008] 式中, $ES_{\text{仿真}}$ 为 Hilbert 边际谱总能量; R 为电路元件的参数值。

[0009] 根据待测电路拓扑结构建立待测电路的仿真模型、对元件进行参数扫描分析以及采集待测电路仿真模型的测试点电压信号均可通过 Multisim11.0 软件实现。

[0010] 所述的待测电路的输出端为唯一的可及测试点, 测试节点采集的是电压信号。

[0011] 仿真环境中元件参数的扫描范围为标称值的 $\pm 50\%$ 。

[0012] 3、给标称值状态下的被测电路仿真模型施加激励信号, 在测试节点采集电压信号并经希尔伯特 - 黄变换分析处理, 得到相应的 Hilbert 边际谱总能量, 记为 ES_0 ; 给标称值状态下的实际电路施加和仿真平台同样的激励信号, 多次采集测试节点的电压信号, 分别对这些电压信号进行希尔伯特 - 黄变换分析, 可得到多个标称值状态下的 Hilbert 边际谱总能量值, 求其平均值, 记为 $\overline{ES_0}$, 则实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差可近似为 $\Delta ES = \overline{ES_0} - ES_0$, 给步骤(2)中的 $ES_{\text{仿真}}$ 补偿系统及测试误差, 得到实际待测电路中各个元件的参数估计方程:

[0013] $ES_{\text{实际电路}} = ES_{\text{仿真}} + \Delta ES = f(R) + \Delta ES$ 。

[0014] 式中, $ES_{\text{实际电路}}$ 为实际待测电路输出信号的 Hilbert 边际谱总能量值; ΔES 为实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差。

[0015] 所述激励信号为一个正弦波信号, 且给电路仿真模型和实际待测电路施加的激励信号为相同的正弦信号。

[0016] 所述的系统及测试误差包括: 测试仪器的固有系统误差和测试环境存在干扰所引起的环境误差。

[0017] 4、给实际电路施加和仿真环境相同的正弦激励信号并采集测试节点的电压信号, 经希尔伯特 - 黄变换分析计算后得到相应的 Hilbert 边际谱总能量值 $ES_{\text{实际电路}}$, 代入参数估计方程并求解, 即可得到元件参数值。

[0018] 参数估计方程的解为一解集, 舍去复数解、负数解和不在参数标称值的 $\pm 50\%$ 范围内的解, 余下的唯一解为所估计的故障参数值。

[0019] 本发明适用于电路中只有单个故障元件的情况, 且发生故障的元件已经被定位。

[0020] 本发明针对的是元件参数漂移型故障。所述参数漂移型故障是指电路元件的参数偏离标称值, 但尚未引起电路系统发生功能性故障的故障。

[0021] 本发明中各个元件的参数在其标称值 $\pm 50\%$ 范围发生漂移时不会导致系统发生功能性故障。

[0022] 本发明中希尔伯特 - 黄变换算法、关系曲线拟合以及参数估计方程求解均可通过 Matlab7.11.0 软件实现。

[0023] 为了保证测试精度和诊断精度, 对实际待测电路的测试应在尽量优良的测试环境中进行, 测试环境要满足以下标准: 温度: $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$; 相对湿度: $\leq 75\%$ 。

[0024] 在实际测试时, 为了提高诊断精度, 对实际电路的每项测试采用“多次测量取均值法”, 将多次采集的电压信号经希尔伯特 - 黄变换分析处理之后求 Hilbert 边际谱总能量的平均值, 然后再代入参数估计方程进行计算。

[0025] 本发明的有益效果在于: 本发明对于线性模拟电路和非线性模拟电路均适用。对于相对测试节点灵敏度较高的元件, 本发明的估计精度较高, 平均误差不超过 5%, 当故障参

数接近标称值的 $\pm 50\%$ 时,估计精度相对稍低。对于相对测试节点灵敏度较低的元件,本发明的估计精度略有下降,个别误差可达到 10% 以上,适合于实际工程应用。

附图说明

- [0026] 图 1 是基于希尔伯特 - 黄变换的模拟电路故障参数估计方法的流程图 ;
[0027] 图 2 是负反馈两级阻容耦合放大电路的电路原理图 ;
[0028] 图 3 是希尔伯特 - 黄变换的经验模态分解算法流程图 ;
[0029] 图 4 是希尔伯特 - 黄变换的 Hilbert 能量谱算法流程图。

具体实施方式

[0030] 本发明基于信号处理理论,将希尔伯特 - 黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)应用于模拟电路故障诊断领域,提出一种新颖的模拟电路元件故障参数估计方法。希尔伯特 - 黄变换是一种全新的信号分析技术,是一种新的处理非线性非平稳信号的方法。它是由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 变换两部分组成,是根据数据本身的时间尺度特性来进行分解,是最新的信号分析方法之一。通过仿真得到元件参数和相应输出信号的 Hilbert 边际谱总能量的关系曲线方程,补偿误差后得到实际电路中故障元件的参数估计方程,将实际测得的信号经希尔伯特 - 黄变换分析计算,得到对应的 Hilbert 边际谱总能量值,代入参数估计方程并求解即可得到故障元件的参数值。

[0031] 下面结合附图和实施例,对本发明做进一步说明。

[0032] 本发明基于希尔伯特 - 黄变换的模拟电路故障参数估计方法,步骤如图 1 所示 :

[0033] 1、定位发生参数漂移型故障的元件。

[0034] 定位故障元件可采用基于小波变换和 BP 神经网络的模拟电路故障定位方法,用小波变换分析待测电路测试点信号并提取故障特征,提取出的故障特征作为训练样本训练 BP 神经网络,借助训练好的 BP 神经网络即可实现故障元件的定位。也可以采用基于小波变换和支持向量机的模拟电路故障定位方法。2、根据待测电路拓扑结构建立被测电路的仿真模型。在计算机仿真环境下,给被测电路仿真模型提供一个正弦激励信号。对各个元件分别进行参数扫描分析并采集各个测试点的电压信号,对应的测试点电压信号经希尔伯特 - 黄变换分析处理,得到元件参数 R 和 Hilbert 边际谱总能量 $ES_{\text{仿真}}$ 的关系,并拟合出关系曲线方程 $ES_{\text{仿真}} = f(R)$ 。

[0035] 式中, $ES_{\text{仿真}}$ 为 Hilbert 边际谱总能量 ; R 为电路元件的参数值。

[0036] 根据待测电路拓扑结构建立待测电路的仿真模型、对元件进行参数扫描分析以及采集待测电路仿真模型的测试点电压信号均可通过 Multisim11.0 软件实现。

[0037] 所述的待测电路的输出端为唯一的可及测试点,测试节点采集的是电压信号。

[0038] 仿真环境中元件参数的扫描范围为标称值的 $\pm 50\%$ 。

[0039] 希尔伯特 - 黄变换方法流程如图 3 和图 4 所示。

[0040] 3、给标称值状态下的被测电路仿真模型施加激励信号,在测试节点采集电压信号并经希尔伯特 - 黄变换分析处理,得到相应的 Hilbert 边际谱总能量,记为 ES_0 ;给标称值状态下的实际电路施加和仿真平台同样的激励信号,多次采集测试节点的电压信号,分别对这些电压信号进行希尔伯特 - 黄变换分析,可得到多个标称值状态下的 Hilbert 边际谱

总能量值,求其平均值,记为 $\overline{ES_0'}$,则实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差可近似为 $\Delta ES = \overline{ES_0'} - ES_0$,给步骤(2)中的 $ES_{\text{仿真}}$ 补偿系统及测试误差,得到实际待测电路中各个元件的参数估计方程:

[0041] $ES_{\text{实际电路}} = ES_{\text{仿真}} + \Delta ES = f(R) + \Delta ES$ 。

[0042] 式中, $ES_{\text{实际电路}}$ 为实际待测电路输出信号的 Hilbert 边际谱总能量值; ΔES 为实际测试环境和仿真环境的系统及测试误差。

[0043] 所述激励信号为一个正弦波信号,且给电路仿真模型和实际待测电路施加的激励信号为相同的正弦信号。

[0044] 所述的系统及测试误差包括:测试仪器的固有系统误差和测试环境存在干扰所引起的环境误差。

[0045] 4、给实际电路施加和仿真环境相同的正弦激励信号并采集测试节点的电压信号,经希尔伯特-黄变换分析计算后得到相应的 Hilbert 边际谱总能量值 $ES_{\text{实际电路}}$,代入参数估计方程并求解,即可得到元件参数值。

[0046] 参数估计方程的解为一解集,舍去复数解、负数解和不在参数标称值的 $\pm 50\%$ 范围内的解,余下的唯一解为所估计的故障参数值。

[0047] 本发明适用于电路中只有单个故障元件的情况,且发生故障的元件已经被定位。

[0048] 本发明针对的是元件参数漂移型故障。所述参数漂移型故障是指电路元件的参数偏离标称值,但尚未引起电路系统发生功能性故障的故障。

[0049] 本发明中各个元件的参数在其标称值 $\pm 50\%$ 范围发生漂移时不会导致系统发生功能性故障。

[0050] 本发明中希尔伯特-黄变换算法、关系曲线拟合以及参数估计方程求解均可通过 Matlab7.11.0 软件实现。

[0051] 为了保证测试精度和诊断精度,对实际待测电路的测试应在尽量优良的测试环境中进行,测试环境要满足以下标准:温度: $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$;相对湿度: $\leq 75\%$ 。

[0052] 在实际测试时,为了提高诊断精度,对实际电路的每项测试采用“多次测量取均值法”,将多次采集的电压信号经希尔伯特-黄变换分析处理之后求 Hilbert 边际谱总能量的平均值,然后再代入参数估计方程进行计算。

[0053] 实施例

[0054] 其具体过程如下:

[0055] (1)如图2所示,选取负反馈两级阻容耦合放大电路验证本发明中的故障元件参数估计方法。负反馈两级阻容耦合放大电路的各元件参数的标称值如图所示,各个元件参数的容差均为5%,节点 out 为唯一测试节点,给仿真电路和实际电路提供的激励信号均为幅值100mV,频率1KHZ的正弦信号。实际测试环境为:温度: 21.5°C ;相对湿度:65%。仿真平台为 Multisim11.0 和 Matlab7.11.0。

[0056] (2)假设电路中只有单故障发生,已定位故障元件为 R4。

[0057] (3)在计算机仿真环境下,给被测电路提供激励信号,对各个元件进行标称值 $\pm 50\%$ 内的参数扫描分析,对应的输出信号经希尔伯特-黄变换分析处理,得到元件参数 $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 Hilbert 边际谱总能量 $ES_{R_i}^{\text{仿真}}$ 的关系,其中 n 为电路元件个数,拟合出关系曲线 $ES_{R_i}^{\text{仿真}} = f(R_i)$,且标称值状态下的 Hilbert 边际谱总能量 $ES_0 = 276.4478$ 。其中,元件

R4 的参数和对应的 Hilbert 边际谱总能量 $ES_{R_4}^{仿真}$ 的关系曲线为：

[0058]

$$ES_{R_4}^{仿真} = -4.768e-008 \times R_4^3 + 0.0003649 \times R_4^2 - 1.021 \times R_4 + 1230$$

[0059] (4) 给图 2 所对应的实际电路施加激励信号, 当前测试环境的无源干扰的频率为 1GHZ, 最大幅值为 1.8mV。在输出节点采集 10 次电压信号, 分别通过希尔伯特 - 黄变换分析计算, 得到 10 个 Hilbert 边际谱总能量值, 求其平均值 $\overline{ES_0^1} = 304.3247$, 则系统及测试误差近似为 $\Delta ES = \overline{ES_0^1} - ES_0 = 304.3247 -$

[0060] 276.4478 = 27.8769。

[0061] (5) 得到实际待测电路的参数估计方程为：

[0062]

$$ES_{实际电路} = ES_{R_4}^{仿真} + \Delta ES$$

[0063] $= -4.768e-008 \times R_4^3 + 0.0003649 \times R_4^2 - 1.021 \times R_4 + 1230 + 27.8769$

[0064] (6) 在 R4 标称值 $\pm 50\%$ 范围之内设置若干故障参数, 采集每种故障状态下的输出电压信号, 经希尔伯特 - 黄变换分析计算后得到相应的 $ES_{实际电路}$ 值, 代入参数估计方程并求解, 舍去复数解, 即可得到故障参数估计值。

[0065] 参数估计详细结果见表 1。

[0066] 表 1 : 故障参数实际值和估计值的结果对比

[0067]

R4 实际值/KΩ	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
ES _{实际电路}	569.3667	481.2653	418.8825	372.3265	333.2490	304.3247	282.7173	261.4002	234.5948	217.4175	204.5020
R4 估计值/KΩ	0.967	1.189	1.387	1.574	1.777	1.975	2.169	2.416	2.779	2.984	3.112
相对误差	3.30%	0.92%	0.93%	1.63%	1.28%	1.25%	1.41%	0.67%	6.88%	6.57%	3.73%

[0068] 由上表可见, 本方法的故障元件参数估计的平均相对误差为 2.6%, 估计精度比较理想。

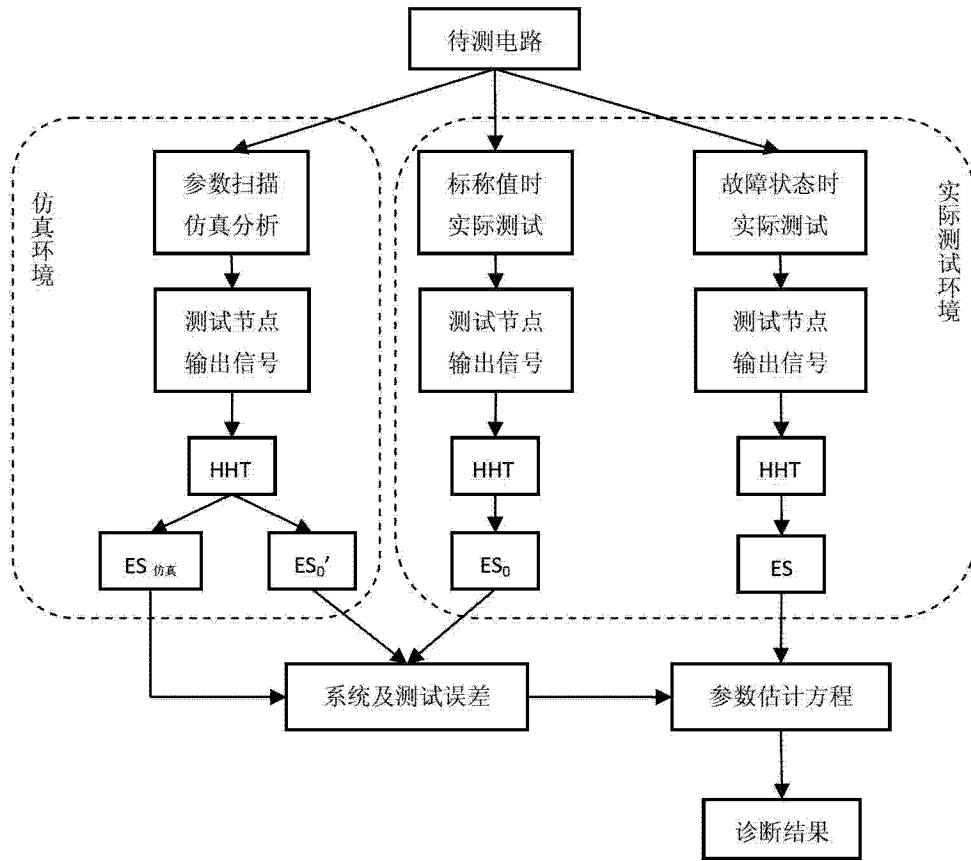


图 1

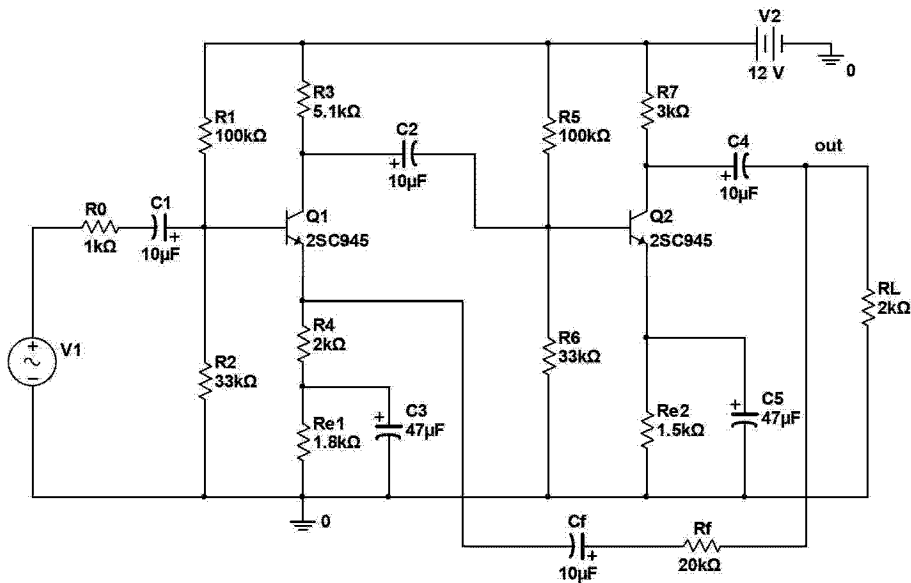


图 2

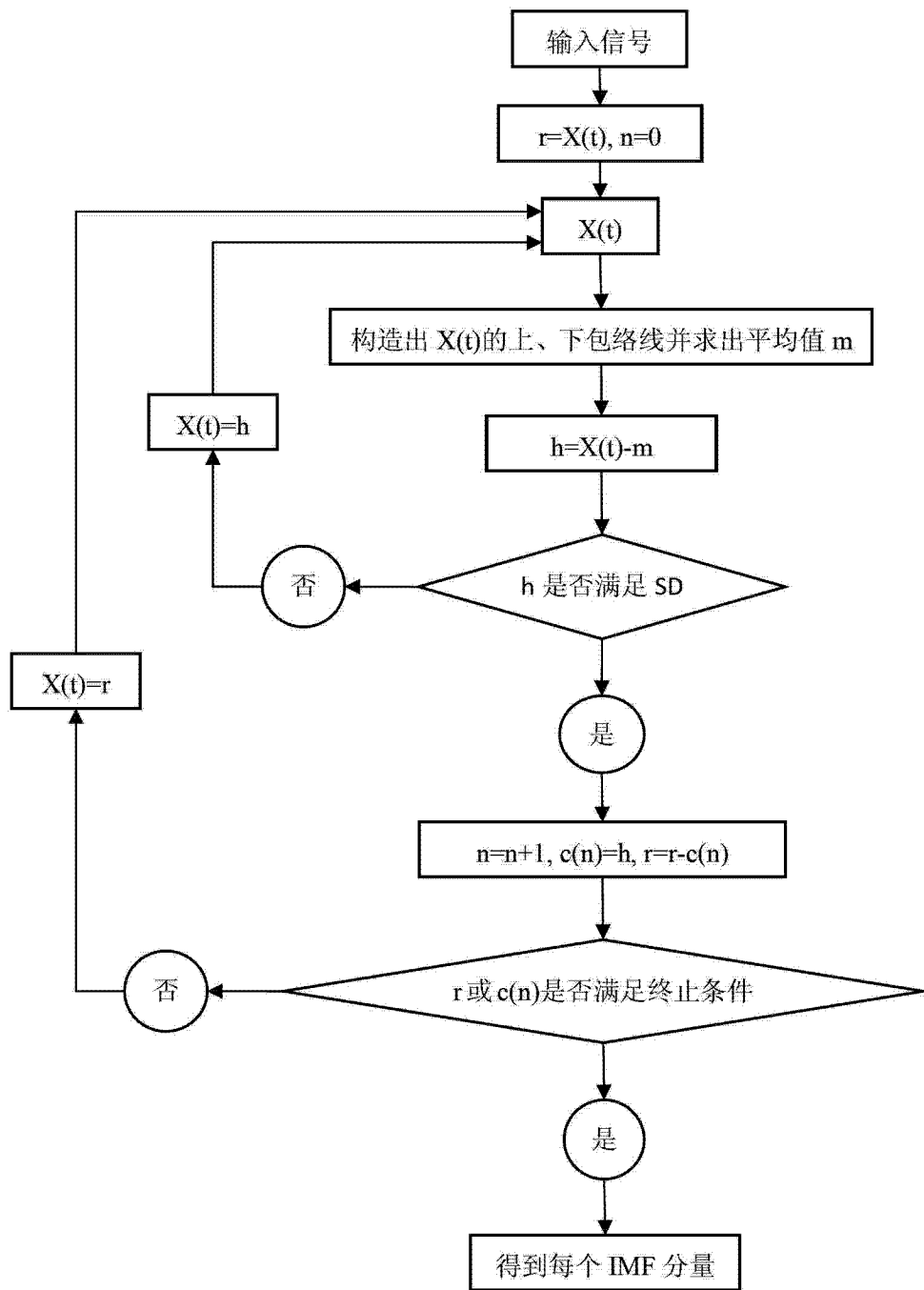


图 3

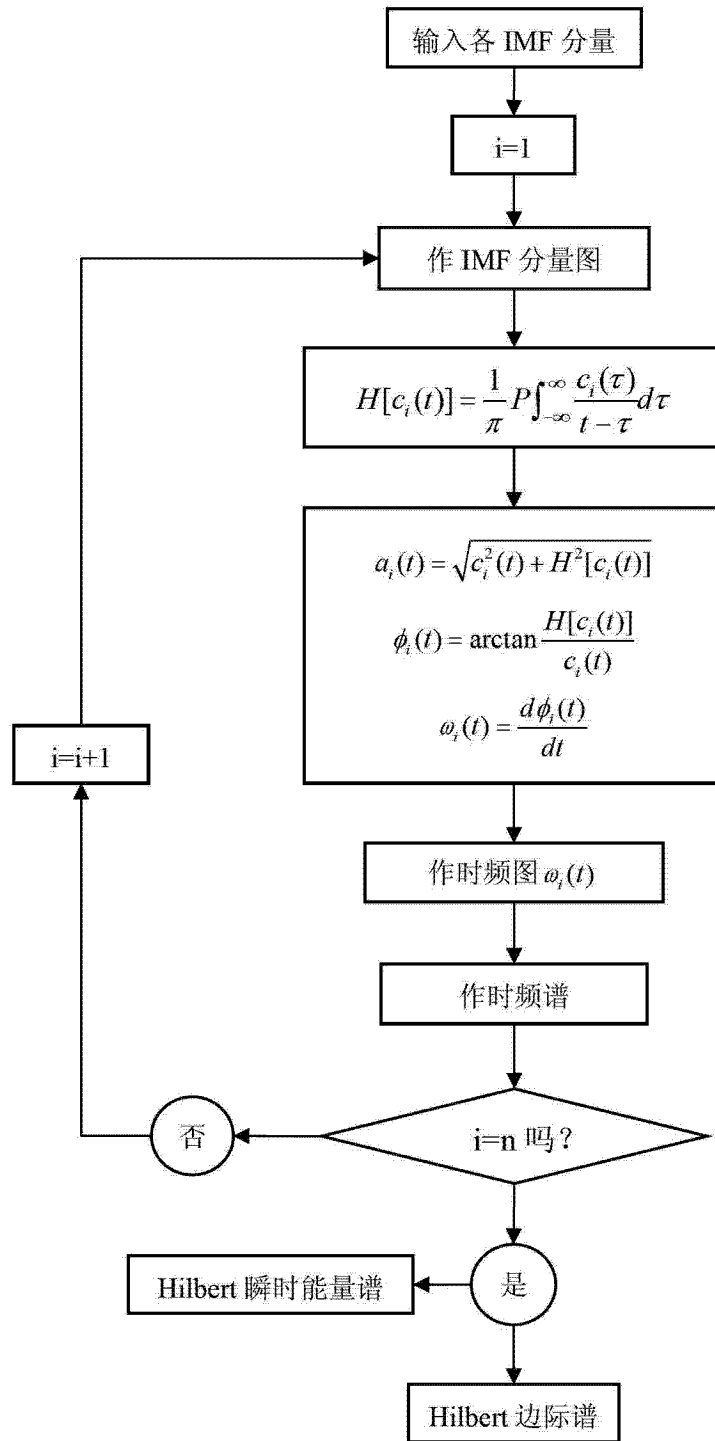


图 4