

基于小波和主元分析的容差电路的故障诊断方法

孟凡斌,唐圣学,谭子尤

(吉首大学 物理科学与信息工程学院,湖南 吉首 416000)

摘 要: 提出了结合小波分析与主元分析的容差模拟电路故障诊断的系统方法.利用小波变换作为工具,对信号进行消噪和用小波系数提取能量信息.主元分析具有数据压缩及特征提取的特性,对提取的能量信息进行主元分析,能有效的减少特征向量的维数,简化分类器的结构.电路仿真结果表明:该方法能够实现快速容差电路故障检测与定位,具有准确率高的特点.

关键词: 故障诊断;模拟电路;主元分析;小波变换

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)11-0135-04

Tolerance Circuits Fault Diagnosis Using Wavelet Transform and PCA

MENG Fan-bin, TANG Sheng-xue, TAN Zi-you

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: A systematic fault diagnosis method for tolerance circuits based on the combination of wavelet Transform (WT) and principal component analysis (PCA) is presented in the paper. The WT is used as a de-noise and feature extraction tool. The PCA is used to compress the feature data, and results in less feature vector dimension and simplifier classifiers. Practical diagnosis example is described, and results show that diagnosing and locating faults are quick and exact.

Key words: fault diagnosis; analogue circuits; PCA; wavelet transform

1 引言

小波分析已广泛应用于信号处理、图像处理、模式识别、地震预报等领域中,但是,在模拟电路的故障诊断中的应用还不多见,还在进一步的研究中^[1].文献[2-3]将小波变换作为预处理器,结合神经网络电路故障进行诊断.不足是直接将信号的高频成分作为噪声成分舍弃,可能导致信号有效成分的损失.文献[4]提出了一种小波神经网络的模拟电路故障诊断方法,故障特征的成分多,网络结构和训练困难.主成分分析(PCA)具有数据压缩及特征提取的特性,是一种有效的降低数据维数的方法,已成功应用到统计分析、模式识别、通讯技术和图像处理中.

文中首先采用灵敏度方法分析电路的可测性参数,建立电路可测参数的故障模型.以电路输出节点的采样序列作为原始信号,经过小波变换提取各频带内信号的能量作为故障的特征,并利用 PCA 分析方法实现特征维数的降低,最后以神经网络实现故障的分类与诊断目的.本方法与文献[2-3]相比,可有效地缩短测试时间和降低测试成本,并且具有故障分辨率高的特点.

2 灵敏度分析

灵敏度是指电路中元件参数偏离其标称值对电路特性产生影响程度的大小.它是衡量电路性能的重要指标之一,可分为微分灵敏度和增量灵敏度.一个网络函数或者特性参数 N 对一个电路参数 x 的灵

收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2009-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(60702076);湖南省自然科学基金项目(07JJ6109);湖南省高等学校科研项目(05C141)

敏度或相对灵敏度(S_x^N) 定义为:

$$S_x^N \triangleq \frac{\partial(\ln N)}{\partial(\ln x)} = \frac{\partial N/N}{\partial x/x} \quad (1)$$

这是归一化的微分灵敏度,它与参数标定无关.

而归一化的增量灵敏度定义为:

$$S_x^N \triangleq \frac{\Delta N/N}{\Delta x/x} \quad (2)$$

式中 Δx 为元件参数的偏移量, ΔN 为电路特性参数的偏移量. 增量灵敏度是指当元件参数 x 具有较大的偏移量时, 电路特征 N 的相对变化情况. 如果电路中有 m 个元件参数同时改变时, 那么电路特性参数的相对偏移量为:

$$\frac{\Delta N}{N} = S_{x_1}^N \frac{\Delta x_1}{x_1} + S_{x_2}^N \frac{\Delta x_2}{x_2} + \cdots + S_{x_m}^N \frac{\Delta x_m}{x_m} \quad (3)$$

电路的故障诊断^[5-6] 是由测试的特性参数来诊断电路元件参数的故障, 也就是定位参数故障的电路元件. 文中根据输出响应的采样序列进行故障诊断, 并不是所有的元件故障都能检测出来的. 因为有些元件参数大小的变化对输出响应并不大, 所以在故障诊断前需要根据式(3) 分析灵敏度, 用于区分能够诊断的元件和不能够诊断的元件.

3 小波能量特性提取

文中采用电路输出响应的采样序列作为原始信号, 由于电路内部噪声及测试过程中的噪声和误差, 输出响应总包含着噪声, 因此, 在特征提取之前要进行去噪处理. 对响应输出采样序列, 为了利用 Matlab 快速算法和具有良好的重构精度, 实际应用中常采用二进制小波变换. 此时, 离散化小波族为:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - k), j, k \in Z \quad (4)$$

采样序列响应信号 $f(t)$ 的小波系数为:

$$c_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt \quad (5)$$

从信号的角度来看, 二进制小波分解是将待分析信号通过一个高通和低通两组滤波器进行滤波, 得到信号的平滑版本和细节版本; 同时, 通过对低频信号(轮廓像) 的进一步分解, 可以得到下一尺度函数上的低频信号及高频信号, 且长度均为原信号长度的一半, 即在滤波后进行了下采样, 分解结果既不冗余, 也不损失原信号的任何信息, 如图 1 所示.

从信号能量的角度来看, 同样不会有任何能量的损失. 设有限长度的采样序列点数为 N , 它的能量为: $E_T = \sum_{n=1}^N f^2(nT)$, T 为采样周期. 经过第一层

分解后, 其能量关系有:

$$E_T = \sum_{n=1}^{N/2} a_{1,n}^2 + \sum_{n=1}^{N/2} d_{1,n}^2 \quad (6)$$

经过 J 层分解其能量关系有:

$$\sum_{n=1}^{N/2^{J-1}} a_{j-1,n}^2 = \sum_{n=1}^{N/2^j} a_{j,n}^2 + \sum_{n=1}^{N/2^j} d_{j,n}^2 \quad (7)$$

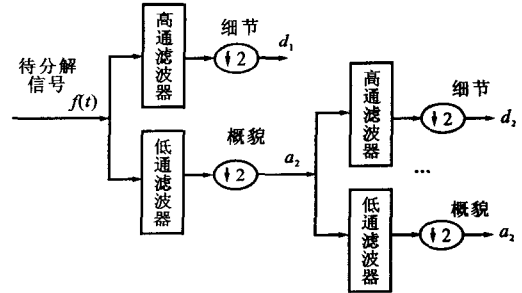


图 1 小波分解示意图

采样序列经过小波变换之后, 各层高频系数能量与第 J 层低频系数能量之和等于原始信号的能量, 使得分解之后的能量保持不变. 因而, 采用能量分布信息作为原始信号的特征是可行的, 也是可靠的.

电路的内部噪声和测试误差噪声主要是高频信号, 包含在小波的细节中, 可以通过中值方式或者自适应阈值滤除, 而在能量特征提取中, 最简单的办法是连同高频细节一起去除. 当系统发生故障时, 会对各频带内的采样点能量有较大的影响, 故以能量为元素可以构成特征向量, 具体操作是以小波分解后各层子频带内信号能量, 按分解顺序排列成的向量为特征向量 E .

考虑 L 类故障识别问题, 设采样序列样本 J 层小波分解的低频能量值为: $E = [E_0, E_1, E_2, \dots]$, $E_{\max} = \max\{E\}$, $E_{\min} = \min\{E\}$, 则

$$\bar{E}_k = \frac{2E_k - E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

则规范化的能量特征向量为:

$$\bar{E} = [\bar{E}_0, \bar{E}_1, \bar{E}_2, \dots] \quad (9)$$

4 特征向量的主元分析

小波能量特征向量维数高, 如果采样神经网络等智能方法分类, 会导致结构复杂, 训练和分类时间长等不理想效果. 主元分析(PCA) 是统计学中分析数据的一种有效方法, 能将特征数据从原来的高维空间映射到一个低维向量空间, 同时降维后保存了数据的主要信息, 从而使数据更易于处理. 假设采样序列经过小波能量特征提取后, 各类故障和正常参

数的训练样本集为: $\bar{E}_{m \times n}$, 其中 m 为样本数目, n 为能量特征的维数. 主元分析降维数据压缩步骤如下:

(1) 计算样本的相关矩阵, 矩阵特征值和特征向量. 相关矩阵计算公式为:

$$R = \frac{1}{m-1} \cdot \bar{E} \bar{E}^T \quad (10)$$

通过解 $\lambda V = RV$ 方程得到相关矩阵 R 的 n 个特征值 λ_i 和特征向量 $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

(2) 按主元对总方差的贡献率大小选取主元. 计算第 i 个主元对总方差的贡献率, 即方差贡献率为 $|\lambda_i| / \sum_{i=1}^n |\lambda_i| \times 100\%$. 按贡献率由大到小的顺序对 n 个主元进行排序, 贡献率最大的主元称为第一主元, 其次称为第二主元, 以此类推. 选取主元是为了降维, 其个数取决于主元累计方差贡献率, 当 $l (l < n)$ 主元使累计方差贡献率超过一定的指标后 (一般大于 85% 就足够), 认为已求的主元个数 l 包含了 n 个原始变量所能提供的绝大部分信息.

(3) 计算样本特征向量的主元值. 计算主元成分值的公式为:

$$P_i = \sum_{j=1}^n a_j x_j \quad (11)$$

计算出所需要的各主元值, 形成新的训练样本集和测试样本集, 从而消除了模拟电路原始故障特征值之间的相关性^[7], 有效的降低了输入特征向量的维数.

5 容差电路的能量特征分布

设元件参数服从正态分布, 各个参数不相关. 响应采样序列 y 的均值和方差可以表示为:

$$\begin{aligned} \mu_y &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sigma_y &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - y_0)(y_j - \mu_y) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 y_j 是输出 y 的第 j 次采样值, N 是随机分析的采样总次数, y_0 是电路的标称响应值. y_j 是电路中元件参数的函数, 即: $y_j = g(X)$, $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. 将输出 y 进行小波分解, 小波分解系数为 $c(y) = \{\varphi_{a,b}(t), y\}$, $\varphi_{a,b}(t)$ 为小波, 因此, 可以得到小波分解系数与元件参数的非线性关系为:

$$c(X) = \{\varphi_{a,b}(t), y(X)\} = F(X) \quad (13)$$

将 $F(X)$ 在其均值 X_0 附近进行泰勒展开, 有:

$$F(X) = F(X_0) + a_1(x_1 - x_{1,0}) + a_2(x_2 - x_{2,0}) + \dots + a_m(x_m - x_{m,0}) + b_1(x_1 - x_{1,0})^2 + b_2(x_1 - x_{1,0})(x_2 - x_{2,0}) + \dots \quad (14)$$

其中 $a_1, a_1, \dots, a_m, b_1, \dots$ 均值 X_0 附近的泰勒展开系数. 由于元件的容差很小, 对单故障诊断只须取一阶近似即可, 即 $b = 0$. 此时小波分解系数的均值和方差简化为 $\mu_c = F(X_0)$, $\sigma_c^2 = a^2 \sigma_X^2$, 故容差电路的小波包分解可行域即为中心点位于 $F(X_0)$ 附近、方差为 σ_c^2 的噪声信号. 对于多故障, 则因近似到二阶以上.

6 诊断实例

诊断实例电路如图 2 所示. 一个中心频率为 25kHz Sallen-Key 带通滤波器, 电阻元件的容差为 5%, 电容元件容差为 10%. 用 Spice 进行电路仿真, 在输入端加入一个 0.1V 的阶跃电压信号, 以输出端口阶跃响应电压在 250μs 仿真时间内的等间隔采样序列进行故障诊断, 采样时间为 1μs. 因为有些元器件参数的变化对输出信号的影响不大, 所以并不是模拟电路中所有的故障元器件都能被诊断出来. 因此, 在诊断前需要根据前面的介绍计算电路的灵敏度. 对图 2 所示的带通滤波器, 可以被诊断的元器件是 C1、C2、R2、R3. 如果元件值高于或者低于标称值的 50% 则产生故障, 这样故障电路有 8 种, 即 C1 ↑、C1 ↓、C2 ↑、C2 ↓、R2 ↑、R2 ↓、R3 ↑、R3 ↓, 符号 ↑ 表示高于 50%, 符号 ↓ 表示低于 50%. 加上电路正常的电路状态, 那么整个电路状态有 9 种.

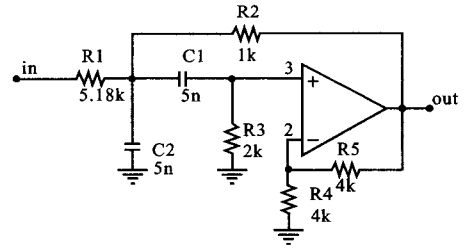


图 2 中心频率为 25kHz Sallen-Key 带通滤波器

小波分解^[8]采用 db1 小波 (Haar 小波), 如图 3 所示, 效果比其他 db 小波要好^[2]. 经过图 4 所示的小波分解后得到一个 10 维的能量特征向量. 为了构造样本集 (故障字典): 学习样本和测试样本. 对每一故障和正常状态进行 15 次 Monte-Carlo 分析, 其中 10 次为学习样本, 5 次为测试样本, 则总共有 90 个学习样本, 45 个测试样本. 以学习样本进行小波分解后得到的能量特征向量组成的训练样本集为 $E_{90 \times 10}$. 然后进行主元分析, 得到训练样本集 $E_{90 \times 10}$ 的相关矩阵 R 的特征值向量.

实验在 MATLAB 工具箱进行, 结果表明故障诊断率达 97.68%. 但是, 研究中发现, 对于容差边

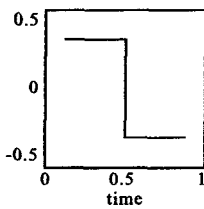


图3 Haar 母小波

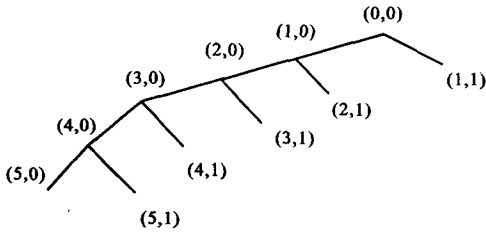


图4 小波分解树

缘故障,即当容差很大(如接近或超过 10%)时,由于故障特征向量出现重叠而难以做出诊断。

7 结束语

文中提出基于小波去噪、小波能量特征的主元分析方法对模拟电路故障进行了诊断。采样序列信号经过这种预处理后,剔除了信号中的冗余信号,能够有效减少特征向量的维数,从而降低计算的复杂度。仿真实验表明该方法能够对模拟电路的故障进行有效诊断和定位。

参考文献:

[1] 杨士元. 模拟系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京:

清华大学出版社,1993.

- [2] Aminian M, Aminian F. Neural-network based analog-circuit fault diagnosis using wavelet transform as preprocessor[J]. IEEE Trans. Circuits. Syst. - II, 2000, 44(3): 151-156.
- [3] Aminian F, Aminian M, Collins H W. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas(S0018-9456), 2002, 51(3):544-550.
- [4] He Y, Tan Y, Sun Y. Wavelet neural network approach for fault diagnosis of analogue circuits[J]. IEE Proc. - Circuits Devices Syst, 2004, 151(4):379-384.
- [5] 许军,吕强,张耀辉. 模拟电路故障诊断的结点电压灵敏度比值法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(1):52-57.
- [6] 王军锋,张维强,宋国乡. 模拟电路故障诊断的多小波神经网络算法[J]. 电工技术学报, 2006, 26(1):33-36.
- [7] 禹旺兵,彭良玉,禹恒州. 基于小波分析和神经网络的模拟电路故障诊断方法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(7):43-46.
- [8] 王淑娟,陈博,赵国良. 基于小波包变换预处理的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4):118-122.

作者简介:

孟凡斌 男, (1964-), 副教授. 研究方向为计算机应用及集成电路设计与测试.

唐圣学 男, (1976-), 博士, 讲师. 研究方向为混合信号集成电路设计与测试.

谭子尤 男, (1976-), 硕士, 讲师. 研究方向为集成电路设计.

(上接第 134 页)

hoc 网络进行研究, 以使相应的 Ad hoc 网络选择合适的路由协议。

参考文献:

- [1] 王婷, 史杏荣. Ad hoc 路由协议性能评价[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(4):112-115.
- [2] IETF MANET Working Group. The dynamic source routing protocol for mobile Ad Hoc networks(DSR)[DB/OL]. [2003-04-15]. Draft-ietf-manet-dsr.09.txt.
- [3] IETF MANET Working Group. Ad Hoc on-demand distance vector(AODV)routing[DB/OL]. [2003-02-17].

Draft-ietf-manet-aodv-13.txt.

- [4] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] 李士宁, 张琪, 于超. 基于 Ad Hoc 网络路由协议的控制开销研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(7): 108-111.
- [6] 赵瑞琴, 杨君刚, 刘增基. 无线移动自组织网路由协议性能研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(7):55-57.

作者简介:

盘莉莉 女, (1964-), 副教授. 研究方向为计算机网络和数据库技术.