

基于小波神经网络的模拟电路故障诊断 方法及 LabVIEW 实现

彭良玉, 王恒华

(湖南师范大学 物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘 要: 采用虚拟仪器开发平台实现了基于小波神经网络的故障诊断系统, 以蔡氏电路为例进行故障诊断, 通过采用不同的数据处理方法以及不同的神经网络模型, 验证了文中所提方法的可行性. 人性化的交互界面, 可以方便的从虚拟仪器前面板中得到故障的类型和故障的位置. 由此可以看出基于虚拟仪器的故障诊断技术具有很强的实用价值.

关键词: 模拟电路; 故障诊断; 小波分析; LabVIEW

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0072-04

Method and Realization for Fault Diagnosis of Analog Circuits Based on Wavelet Neural Network

PENG Liang-yu, WANG Heng-hua

(College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: The fault diagnosis system based on wavelet neural network is implemented in the virtual instrument development platform. Chua's circuit is diagnosed as an example to demonstrate the effectiveness of the proposed method by making use of the different kinds of data processing methods and different neural network models. It is very convenient to get the fault type and the fault location from virtual instrument front panels through human interface. From this we can see the fault diagnosis technology based on virtual instrument has a strong practical value.

Key words: analog circuit; fault diagnosis; wavelet analysis; LabVIEW

1 引言

模拟电路故障诊断是近代电路理论的一个前沿领域, 现已发展成为网络理论中公认的第三个分支. 由于模拟电路中的输入输出响应都是连续量, 电路元器件参数具有很大的离散性, 即具有容错性, 以及模拟电路中广泛存在的非线性等原因, 给故障诊断带来了很大的困难. 虚拟仪器是现代计算机技术和仪器技术深层次结合的产物^[1-2]. 在虚拟仪器 LabVIEW 中调用 Matlab 脚本节点, 用户可以很方便地通过它在 LabVIEW 应用程序中使用 Matlab, 包括执行 Matlab 命令、使用功能丰富的

各种工具箱, 如神经网络工具箱. 本文针对当前模拟电路故障方法存在的问题, 将小波变换的时频局部化特性及神经网络的非线性映射与学习推理特性结合起来, 提出基于小波神经网络的模拟电路故障诊断方法.

2 小波神经网络的算法

小波神经网络^[3-5]的隐层神经元的激活函数采用小波基函数(Morlet)进行非线性映射, 信号通路只进行前向传递, 待分类信号进行前向传递的同时, 误差信号进行反向传递. 输出层的传递函数为 S 函数, 小波网络的拓扑结构图如图 1 所示.

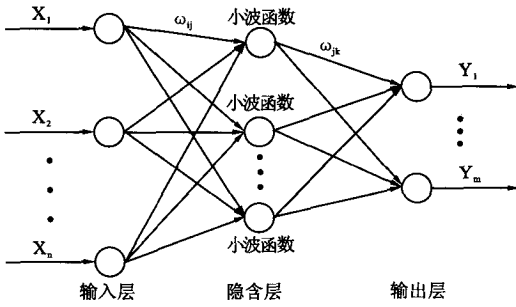


图1 小波神经网络拓扑结构

小波神经网络参数的修正方法采用沿梯度的负方向,即沿着误差函数下降最快的方向,使小波网络的输出逐步逼近期望输出,这是小波神经网络算法的主要思想^[6-7].小波神经网络参数在迭代过程中的修正公式:

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial \omega} + mc * \Delta \omega \quad (1)$$

$$a(k+1) = a(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial a} + mc * \Delta a \quad (2)$$

$$b(k+1) = b(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial b} + mc * \Delta b \quad (3)$$

误差函数:

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (y_m^n - yt_m^n)^2 \quad (4)$$

其中, ω 是小波神经网络的权值, a 、 b 是小波神经网络的伸缩因子和平移因子, $\Delta \omega$ 、 Δa 、 Δb 分别是 ω 、 a 、 b 的改变量。 η 是学习率, mc 是动量因子, y_m^n 、 yt_m^n 是 m 样本于第 n 个节点的实际输出和理想输出。

2.1 基于小波分析的多分辨分析算法及 LABVIEW 实现

模拟电路故障一般都是软故障,利用小波变换来提取各频带的故障信息,分解过程用 Mallat 算法实现,而软故障信号的变化是比较微小的,可以用高频分解的部分来反映信号的变化,故可以将故障信号的各层小波分解系数序列进行绝对值求和,并按尺度顺序排列,作为模拟电路的故障特征向量^[7].具体步骤如下:

(1)对信号进行 N 层 Mallat 分解,得到 m 个小波分解系数序列: $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$;

(2)对各层系数序列求绝对值之和,则有 $D_j = \sum_{i=1}^m |d_i^j|$.其中, m 为序列 d^j 中分量的个数; j 为分解层数。

(3)特征向量构成,按尺度顺序,以各层小波分解系数序列的绝对值之和为元素作为特征向量:

$$\{D_n, \dots, D_3, D_2, D_1\};$$

(4)作为特征的各种参数,其物理意义各不相同,且幅值大小很不一致,有时甚至相差几个数量级,因而在特征向量融合前进行归一化处理.本文将系数序列求绝对值之和归一化到 $[0, 1]$,数据归一化

$$\text{按照 } D_j = D_j / \sqrt{\sum_{j=1}^n D_j^2} \text{ 进行处理.}$$

2.2 基于小波包分析的算法

从滤波角度看,正交小波分解信号是通过一个低通滤波器和一个高通滤波器来进行滤波,实现概貌与细节信号的提取.即如果信号的频率为 f ,则一层小波分解后就得到两个频带的信号: $(0 \sim 0.5)f$ 和 $(0.5 \sim 1)f$.同样的,经过多层小波分解后,就可以得到各个频带的小波系数,各层小波系数就构成了频带信号的能量^[8-9],基于小波分解的能量故障特征提取步骤如下:

(1)首先对信号进行小波分解和信号重构,设 S_j^i 是原始信号 S 经过小波分解后第 i 层的第 j 个节点的小波分解系数,则总信号 $S = \sum_{j=1}^n S_j^i$.

(2)设 S_j^i 对应的能量为 E_j^i ,则有 $E = [E_n^i, \dots, E_2^i, E_1^i]$, $E_j^i = \sum_{k=1}^n (d_k^i)^2$.其中, d_k^i [$k = 1, 2, \dots, n$], $n = 2^i$]表示重构信号 S_j^i 的离散点的幅值。

(3)故障特征向量为 E , $E = [E_n^i, \dots, E_2^i, E_1^i]$.

(4)将各频段的能量值归一化到 $[-1, 1]$,数据归一化按照 $E'_j = \frac{2E_j - E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}}$ 进行处理.其中,

$$E_{\max} = \max(E); E_{\min} = \min(E).$$

2.3 特征向量的融合

特征信息在送入到神经网络进行处理前,为了充分利用故障特征信息,提高故障诊断准确率,对特征向量进行融合处理,将多分辨分析以及能量分析提取的特征向量以线性插值的方式进行相互间隔、相互交叉、相互融合成新的特征向量,作为神经网络的样本集.其融合后的特征向量集为:

$$P = [ca_n, E_{an}, d_n, E_{dn}, d_{n-1}, E_{d(n-1)}, \dots, d_1, E_{d1}]$$

其中, ca_n 是信号分解第 n 层的低频系数, E_{an} 是信号分解第 n 层低频信号的能量, $d_n, d_{n-1}, \dots, d_1$ 为信号分解对应分解尺度的高频系数, $E_{dn}, E_{d(n-1)}, \dots, E_{d1}$ 为信号分解对应分解尺度的高频信号的能量。

3 故障诊断实例

以蔡氏混沌电路为故障诊断实例,图 2 为蔡氏电路的实现电路图.

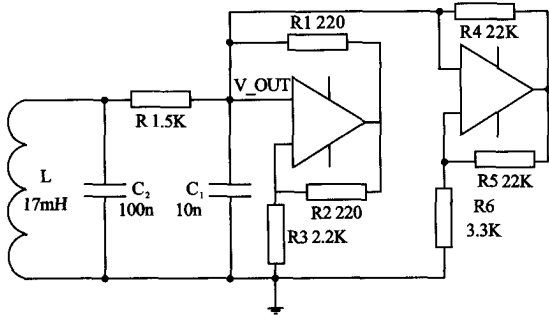


图 2 蔡氏电路的实现电路图

电阻容差为 1%,电容容差为 10%,参数在容差范围内变化时,视为正常状态的响应,否则作为故障状态的响应.文中考虑元件值偏离标称值 30%的单软故障,MC 仿真参数.电阻 R 的仿真模型:model R1 RES (R=1 DEV 1%);电容 C 的仿真模型:model C1 RES (C=1 DEV 20%).仿真次数为 50 次,起始

时间是 2ms,终止时间是 5ms,最大时间间隔是 1us,以节点 V_OUT 的电压为仿真输出.对电路的每种故障状态进行 50 次 Monte-Carlo 分析,每组信号采集 3000 个数据点,共得到 550 组数据.共取 11 种故障模式,分别是 F1(0001):C1 ↓,F2(0010):C1 ↑,F3(0011):C2 ↓,F4(0100):C2 ↑,F5(0101):R ↓,F6(0110):R ↑,F7(0111):R1 ↓,F8(1000):R1 ↑,F9(1001):R4 ↓,F10(1010):R4 ↑,再加上无故故障模式 F0(000),获取电路各种工作状态下的数据样本集,进行故障状态的分类和识别.输入向量为 16 维向量,所以输入节点数为 16,网络输出层的节点数为 4,是因为 11 种故障模式采用的二进制编码最小位数是 4 位,网络隐层节点数是根据公式 $n = \sqrt{n_1 + n_2} + a$ 来确定节点数目的大概范围(式中 n 为隐层节点数; n_1 为输入节点数; n_2 为输出节点数; a 为 1~10 之间的常数),然后采用逐步试探法找出最佳的节点数,最终确定隐层节点数为 15.实验结果如表 1 所示.

表 1 神经网络的实际输出

故障模式	小波网络				T	多分辨分析 (%)	能量分析 (%)	特征融合 (%)
F0(正常)	0.0029	0.01112	0.0102	0.0015	0000	93.6	84.4	98.4
F1(C1 ↓)	-0.0127	0.00154	-0.0136	1.0142	0001	91.2	88.8	96.8
F2(C1 ↑)	-0.0433	0.0027	1.1325	0.0036	0010	95.2	94.8	98.5
F3(C2 ↓)	0.0115	0.0133	1.0137	1.1253	0011	94.8	98.4	94.8
F4(C2 ↑)	0.1055	1.0231	0.0027	0.0049	0100	90.2	92.4	93.6
F5(R ↓)	0.0973	1.1315	-0.0053	1.0549	0101	91.6	92	93.6
F6(R ↑)	0.1031	1.0027	1.1030	0.0061	0110	91	90.4	98.6
F7(R1 ↓)	0.2133	0.9976	0.9993	1.0117	0111	92.4	89.6	97.5
F8(R1 ↑)	0.9998	-0.0063	0.2068	0.1577	1000	93.2	85.7	96
F9(R4 ↓)	1.0097	0.1137	0.0957	0.9935	1001	94.4	92.8	92.7
F10(R4 ↑)	1.0086	0.0922	0.9991	0.0107	1010	95.6	98	96.8

4 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断方法的 LABVIEW 实现

小波神经网络的故障诊断系统以小波神经网络为核心,包括数据输入子 VI、数据处理子 VI、诊断结果输出子 VI,其中小波神经网络是采用 MATLAB 脚本来实现的,小波神经网络的故障诊断系统的实现流程图如图 3 所示.

输入样本集是指从待诊断电路的测试点上采集到的信号,信号中含有丰富的故障信息,本文是采用电路仿真软件来采集待诊断电路的信息.数据输入子 VI 的作用就是读取文本文件中的信号并送到 LABVIEW 的工作空间,为数据处理提供数据.从

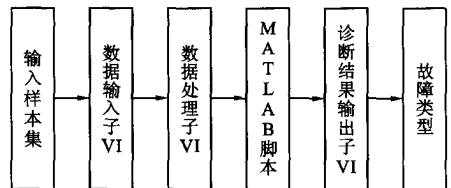


图 3 故障诊断系统实现流程图

文本文件中读入的数据被当成字符,因此只有将字符转换成数组后,才能进行数值数据的进一步处理.数据处理子 VI 主要包括基于小波理论的多分辨分析子 VI、能量分析子 VI,进一步提取信号中的故障特征.其中,多分辨分析子 VI 主要是提取信号局部细微的变化,也就是将信号经小波分解后的高频系数作为故障特征,小波包能量分析提供比多分辨分

析更加细微的分解,能够提取信号局部更加精细的变化,能量分析子 VI 主要是采用小波包分解后,提取信号的能量作为故障特征。基于小波神经网络的

模拟电路故障诊断系统的 LABVIEW 实现框图如图 4 所示。

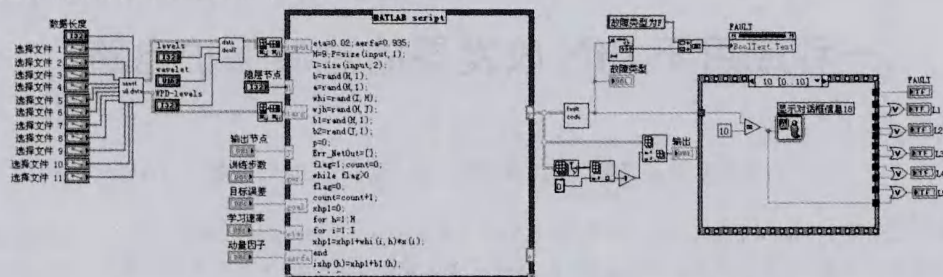


图 4 基于小波神经网络的故障诊断系统程序框图

采用基于小波神经网络的故障诊断系统对蔡氏混沌电路进行诊断,图 5 为故障诊断系统的前面板图。其中灯亮为红色代表电路发生了故障,显示电路所处的故障状态,同时会弹出提示信息,直观表明故障类型。

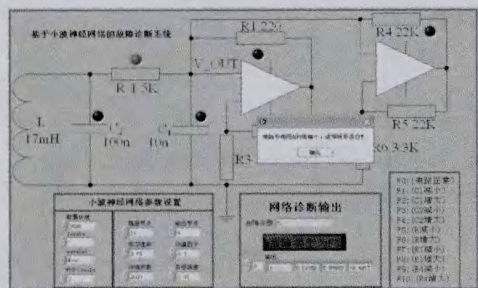


图 5 蔡氏电路故障诊断的前面板图

5 结束语

在 LabVIEW 虚拟仪器平台上实现了基于小波神经网络的故障诊断系统,采用该系统对蔡氏电路进行故障诊断,能从虚拟仪器的前面板上直观的得到电路故障的具体信息,提示用户诊断电路的工作状态、故障类型、故障元件的具体位置。以小波神经网络作为智能分类器,对蔡氏电路的单软故障进行分类,通过采用不同的数据提取方法来提取电路的故障信息,实验结果表明:故障特征融合的方法包含丰富的故障信息,能有效提高电路故障诊断的准确率。

参考文献:

- [1] National Instruments Corporation, LabVIEW Advanced I: Large Application Development Course Manual, 2008.
- [2] Peter A Blume, The LabVIEW Style book[M], Boston: Prentice Hall, 2007.
- [3] Aminian M, Aminian F. A modular fault-diagnostic system for analog electronic circuits using neural net-

works with wavelet transform as a preprocessor[J]. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1546—1554.

- [4] Catelani M, Fort A. Soft fault detection and isolation in analog circuits: some results and a comparison between a fuzzy approach and radial Basis function networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 196—202.
- [5] Aminian F, Aminian M, Collins H W. Analog fault diagnosis of actual circuits using neural networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 544—550.
- [6] 唐静远, 师奕兵. 模拟电路故障诊断的特征提取及支持向量机集成方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [7] 周龙甫, 师奕兵. 模拟电路软故障的智能优化诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [8] 何怡刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 163—170.
- [9] 宋国明, 王厚军. 基于提升小波及 SVM 优化的模拟电路智能故障诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

作者简介:



彭良玉 女, (1965—), 博士后, 教授, 硕士研究生导师。研究方向为信号处理和有源滤波器设计。

王恒华 (1984—), 硕士研究生。研究方向为模拟电路故障诊断。