

文章编号: 1007- 2985(2009) 03- 0062- 04

非线性模拟电路故障的 BPNN 诊断算法设计与实现*

谢 宏¹, 文志勇¹, 何怡刚¹, 井建华²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院自动化系, 湖南 长沙 410082; 2. 中南大学基础医学院, 湖南 长沙 410078)

摘 要: 提出了用 Volterra 频域核作为故障特征对弱非线性定常动态网络进行故障诊断的方法, 利用计算方法求出电路响应在各种常见故障状态下的 Volterra 级数解的各阶频域核, 将其输入给 BP 神经网络, 利用 BPNN 的分类功能建立故障字典, 对实测的故障网络各阶频域核进行测试样本分类来实现故障诊断. 通过故障诊断实例给出了各阶频域核的统一递推离散算式, 并采用了改进 BPNN 算法及其程序实现.

关键词: 故障诊断; 非线性电路; 频域核; 神经网络

中图分类号: T M 13

文献标识码: A

在模拟电路故障诊断的神经网络方法中, 最常用的 BPNN 方法是将测试点的电压信号构造成故障特征向量, 训练后生成故障字典, 训练好的 BPNN 对表征可能故障状态的测试样本分类, 实现故障^[1-2] 诊断. 从 20 世纪 80 年代开始, Volterra 核测量、Volterra 系统频域和时域辨识取得了一定的进展^[3-4]. 笔者将讨论其在非线性定常动态网络故障诊断中的应用. 理论证明^[5]: 2 个系统只有当它们的各阶 Volterra 核相等时才是彼此等效的. 因此, 笔者提出了用 Volterra 频域核(传递函数)作为故障特征对非线性定常动态网络进行故障诊断的方法, 即利用计算方法求出网络响应在各种常见故障状态下的 Volterra 级数解的各阶频域核(由于弱非线性电路的 Volterra 级数衰减快, 只需计算前三阶核即可), 作归一化处理, 产生训练样本集, 再将训练样本输入 BP 神经网络进行训练, 利用 BPNN 的分类功能建立故障字典, 对实测的故障网络各阶频域核进行测试样本分类, 从而实现故障诊断.

1 Volterra 频域核的计算

为建立故障字典, 必须预先计算在各种可能常见故障下电路的各高阶传递函数(频域核)值^[7-8]. 非线性定常动态网络一般可由如下微分方程描述:

$$\sum_{j=1}^m j x^{[j]}(t) + F(x, x, \dots, x^{[m-1]}) = u(t), \quad (1)$$

其中: j 为实常数; $x^{[j]} = \frac{d^j x}{dt^j}$; $F(\cdot)$ 为由 x, x 直到 $x^{[m-1]}$ 所构成的通常为幂级数型的本征非线性函数(又称为非线性电源); $u(t)$ 为外加激励函数; $x(t)$ 为(1)式的解, 称为网络的响应函数, 在零初始条件下, $x(t)$ 的

* 收稿日期: 2009- 03- 11

基金项目: 教育部高校博士学科点专项基金资助项目(20060532002); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ2024)

作者简介: 谢 宏(1964-), 男, 湖南大学电气与信息工程学院自动化系副教授, 博士, 主要从事电路与系统理论及故障诊断、神经网络、智能控制研究; 何怡刚(1966-), 男, 湖南大学电气与信息工程学院自动化系教授, 博士生导师, 主要从事电路与系统理论及故障诊断、神经网络、有源滤波器等研究.

Volterra 级数表示式的频域核的计算公式讨论如下^[7]:

当 $F(\cdot)$ 为代数型非线性电源, 即 $F(\cdot) = \sum_{k=1}^m b_k x^k(t)$ 时, (1) 式变为

$$\sum_{j=1}^m j x^{(j)} = u(t) - \sum_{k=2}^m b_k x^k(t), \tag{2}$$

令(2) 式左端之线性定常子系统的单位冲激响应为 $h_1(t)$, 则一阶传函(频域核) 为

$$H_1(S) = L[h_1(t)], \tag{3}$$

各高阶传函(频域核) 的递推公式为

$$H_{n+2}(S_1, \dots, S_n) = P_{n+2}(S_1, \dots, S_n) H_1(S_1 + S_2 + \dots + S_n), \tag{4}$$

其中

$$P_{n+2}(S_1, S_2, \dots, S_n) = - \sum_{k=2}^n H_{n-k+1}^{(k)}(S_1, S_2, \dots, S_n), \tag{5}$$

$H_n^{(k)}$ 的定义见文献[7]. 当 $j = S$, 可算出各阶传函(频域核) $|H_n(j_1, \dots, j_n)|$ 之值, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots$

2 计算实例

图 1 为一个非线性模拟电路, 其中 u_c 为测试电压, $u_c(0) = 0$. 非线性电阻 $R_2: i = f(u_c) = 0.1u_c + 0.001(u_c^2 + u_c^3)$. 其网络模型为

$$\frac{du_c}{dt} + a_0 u_c = g(t) - (b_2 u_c^2 + b_3 u_c^3), \tag{8}$$

其中: $a_0 = \frac{1}{CR_1} + \frac{a_1}{C}; b_2 = \frac{a_2}{CR_1}; b_3 = \frac{a_3}{C}; g(t) = \frac{1}{CR_1} u_c(t)$. 由线性子系统可得一阶频域核的计算公式为

$$H^1(j) = \frac{1}{j + a_0}, \tag{9}$$

该网络仅有代数型非线性电源 $F(\cdot) = b_2 u_c^2 + b_3 u_c^3$, 则二阶频域核的计算式为

$$H_2(j_1, j_2) = - b_2 H_1(j_1 + j_2) H_1(j_1) H_1(j_2), \tag{10}$$

三阶频域核的计算为

$$H_3(j_1, j_2, j_3) = - H_1(j_1 + j_2 + j_3) \{ 2b_2 H_2(j_1, j_2) H_1(j_3) + b_3 H_1(j_2) H_1(j_2) H_1(j_3) \}. \tag{11}$$

假设该电路有 5 种状态, 如表 1 所示.

表 1 电路故障状态

序号	状态	电阻值 /	电容值 / F
1	正常	1.0 10 ³	1.0 10 ⁻²
2	R	1.5 10 ³	1.0 10 ⁻²
3	C	1.0 10 ³	1.5 10 ⁻²
4	R	0.5 10 ³	1.0 10 ⁻²
5	C	1.0 10 ³	0.5 10 ⁻²

对非线性电路分别加入单音、双音和三音信号, 计算出一阶、二阶和三阶频域核, 经过特征数据处理, 形成的训练样本见表 2.

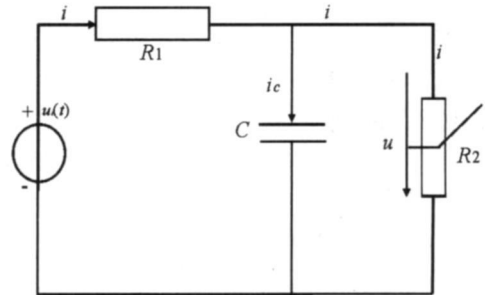


图 1 非线性模拟电路例图

表 2 基于一阶、二阶和三阶频域核的训练样本

状态 序号	状态	训练样本			诊断输出				
		H_1	H_2	H_3	Y_4	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
1	正常	0.994 9	0.702 0	0.787 1	1	0	0	0	0
2	R	0.981 0	0.500 1	0.569 0	0	1	0	0	0
3	C	1.000 0	0.313 7	0.414 6	0	0	1	0	0
4	R	0.987 0	0.559 8	0.561 2	0	0	0	1	0
5	C	0.964 7	0.988 7	0.996 9	0	0	0	0	1

3 神经网络故障诊断算法及实现

在此,笔者采用 BP 神经网络,它是一种多层映射网络,采用最小均方差的学习方式.建立 BPNN 分类器的方法^[2,9-12]:对于输入特征为 m 维向量 $X = [x_0, x_1, \dots, x_{m-1}]$,具有 n 个不同模式类,将 BPNN 训练成 R_m 到 R_n 的映射: $f: R_m \rightarrow R_n$,将 j 个模式类的 X 映射到单位矢量 $c_j = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$.这样, BPNN 的输入层有 m 个输入端,输出层有 n 个输出元.为加快 BPNN 的收敛速度,抑制局部极小,减少学习过程的振荡现象,笔者采用加入动量项的改进方法,即将上一次权值调整量的一部分迭加到本次误差计算所得的权值调整量上,作为本次实际权值调整量: $w(k+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} + \alpha w(k)$,其中 α 为动量系数,一般在 $0 \sim 0.9$ 间取值.该算法实现的 C 语言主程序如下:

```

void SimulateNet( REAL* Input, REAL* Output,
REAL* Target, BOOL Training)
{ SetInput( Input);
  PropagateNet();
  GetOutput( Output);
  ComputeOutputError( Target);
  if( Training ) { BackpropagateNet(); AdjustWeights(); }
}

void __stdcall
TrainNet1(REAL * Input, REAL * Target)
{INT i; INT count = 0; REAL TestError = 0;
  REAL * Output = (REAL *) calloc( NumNets+
1, sizeof( REAL ));;
  do {if ( count++ > TrainMaxTimes) break;
    for ( i= 0; i< NumSamples; i+ + )
      SimulateNet( Input + i* DimInput, Output,
Target + i* DimOutput, TRUE);
    TestError = 0;
    for ( i= 0; i< NumSamples; i+ + ) {
      SimulateNet( Input + i* DimInput, Output,
Target + i* DimOutput, FALSE);
      TestError + = Error; }
    } while ( TestError > TrainMinError);
}

void __stdcall
TestNet1(REAL * Input, REAL * Output)
{ SimulateNet( Input, Output, Output, FALSE); }

```

4 结语

由于网络的冲激响应是一个暂态过程,时域响应不易测量,笔者采用 Volterra 频域核作为故障特征向量,将其与神经网络结合进行故障诊断是一种新颖的方法.对于弱非线性动态电路,其高阶频域核衰减很快,故一般只要比较电路前三阶传函即可作出故障诊断结论.笔者提出的统一的高阶频域核递推计算公式易于编程实现;利用 BPNN 的分类功能对实测的故障网络的各阶频域核进行测试样本分类,从而提高了故障诊断正确率.

参考文献:

- [1] MOHAMMADI K. Fault Diagnosis of Analog Circuits with Tolerances By Using RBF and BP Neural Networks [J]. Student Conference on Research and Development Proceedings, 2002, 12(2): 317- 321.
- [2] 崔 纯. 基于模式识别原理的模拟电路故障诊断神经网络方法 [D]. 西安:西安交通大学出版社, 1996.

- [3] 方洋旺,焦李成. MIMO 非线性系统辨识: Volterra 级数法 [J]. 电路与系统学报, 2000, 5(4): 38- 42.
- [4] HAN Chong-zhao, CAO Jian-fu. Study on Stability of Nonlinear Control System Based on Generalized Frequency Response Functions [J]. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 573- 582.
- [5] 林圭年. 非线性网络与系统 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
- [6] 拉甫伦捷夫,沙巴特. 复变函数论方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1956.
- [7] 曾广达. 非线性网络 Volterra 级数解的递推分析 [J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1991(1): 50- 61.
- [8] ROBERT D, NOWAK, BARRY D, VAN VEEN. Volterra Filter Equalization: A Fixed Point Approach [J]. IEEE Tran. Signal Processing, 1997, 44: 377- 388.
- [9] 焦李成. 神经网络计算 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993: 35- 72.
- [10] MARCO GORI. On the Problem of Local Minima in Back-Propogation, IEEE T rans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(4): 76- 85.
- [11] 肖本政. 前馈网络的性能及学习算法改进的研究 [D]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [12] 彭松, 方祖祥. BP 神经网络学习算法的联合优化 [J]. 电路与系统, 2000, 5(3): 26- 30.

Algorithm and Its Realization of Fault Location for Nonlinear Analog Circuits Based on BP Neural Network

XIE Hong, WEN Zh+ yong, HE Y+ gang, JIN Jian- hua

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China; 2. Basic Medical College, Central South, University, Changsha 410078, China)

Abstract: A fault location method for nonlinear circuit by taking the cores of Volterra series in frequency domain as the fault characters is proposed. Via calculating the frequency cores of Volterra series in frequency domain for the response of usual fault states and feeding them into BPNN as the fault features, the fault dictionary is built. The fault location for nonlinear analog circuit is completed by BPNN classifying the Volterra frequency cores tested from the nonlinear network. The paper presents the unified recursive computing formulae for frequency cores, an improved BPNN algorithm and its program. At last, an example of this method is given.

Key words: fault location; nonlinear circuit; frequency core; neural network

(责任编辑 陈炳权)