

# BP神经网络在油浸式变压器过热性故障诊断中的应用

曾成碧<sup>1</sup>, 蒲维<sup>2</sup>, 曾先锋<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力科学研究所, 四川 成都 610072;  
3. 西昌电业局, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 针对充油变压器绝缘故障诊断的三比值法的局限性, 建立以变压器油中溶解气体含量为样本数据, 对不同的隐含层数目进行仿真分析, 通过比较确定了适用于变压器绝缘故障诊断的BP神经网络模型。研究表明, 这种方法提高了神经网络的收敛速度, 符合电力变压器故障诊断系统的实际情况, 准确率高。

**关键词:** 油浸式变压器; 过热性故障; 油中溶解气体分析; 神经网络

**Abstract:** BP neural network model for transformer insulation fault diagnosis is established, according to the limitations of three-ratio method used for the insulation fault diagnosis of oil-immersed transformer. The model is based on the sample data of the content of dissolved gas in transformer oil, and the analysis is based on the number of hidden layers. The results shows that the proposed method can improve the convergence rate of neural network with higher accuracy, which accords with the actual situation of the fault diagnosis system of power transformer.

**Key words:** oil-immersed transformer; overheating fault; dissolved gas analysis; neural network

中图分类号: TM406 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0060-04

中国电力变压器绝缘故障诊断仍采用传统的故障诊断方法<sup>[1]</sup>, 其中三比值法应用效果较好<sup>[2-3]</sup>, 解决了不少实际问题, 但是电力变压器故障现象本身是复杂的非线性的关系, 因变压器的电压等级、运行环境、绝缘结构以及所处的系统不一样等众多因素, 使得三比值法判断出故障类型的准确性受到很大影响, 其准确率在80%以下。近年来许多智能方法用于电力变压器绝缘诊断中, 取得较好的效果<sup>[4-6]</sup>。但仍然存在一些缺点, 比如训练时间长、收敛速度慢等。根据BP神经网络的特点<sup>[7]</sup>, 建立以变压器油中溶解气体组分含量为样本数据, 对不同的隐含层数目进行了仿真分析, 通过比较确定了适用于变压器绝缘故障诊断的BP神经网络模型。通过研究表明, 这种方法提高了神经网络的收敛速度, 符合电力变压器故障诊断系统的实际情况, 准确率高。

## 1 基于BP神经网络的变压器故障诊断模型

### 1.1 建立模型

电力变压器故障诊断技术是实现从故障征兆到故障空间的映射, 从而实现从故障的识别和诊断。利用变压器油中溶解气体分析法的检测数据对油浸

变压器进行故障诊断, 实际上是完成气体组分到故障类型的一个复杂的非线性映射。BP神经网络诊断变压器故障就是根据变压器油中气体的成分含量来进行的, 变压器的过热和放电故障将引起油中气体含量的变化, 通过分析特征气体的成分, 实现对变压器故障性质的判断。

在故障诊断中, 将已知的故障现象及其结论确定为训练学习的样本空间, 输入可由  $I = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  表示, 表示各种故障现象; 输出可由  $O = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  表示,  $c_i \in [0, 1]$  表示属于不同故障的隶属度(概率)。选择样本经过训练学习, 确定网络结构, 然后就可以根据训练样本以外的故障现象诊断出故障状况, 这就是人工神经网络诊断变压器故障原理。

必须指出的是, 传统BP算法的误差减小时, 极易陷入局部最小点。一旦训练样本数目过多, 输入输出关系复杂, 网络的收敛速度变得缓慢, 表现为对网络的初始值要求很高, 不恰当的网络初始值会造成BP算法的收敛振荡, 甚至不收敛。由于每次训练网络初始值的给定是随机的, 因此可以通过不断的重新训练来达到要求。

### 1.2 设计BP网络模型的几个要点

#### 1.2.1 网络学习样本的选择

表 1 故障类型的学习样本数据

故障类型	输入样本原始数据 / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )			百分比数据 / %		网络期望输出
	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{O}_1 \text{O}_2 \text{O}_3 \text{O}_4 \text{O}_5 \text{O}_6 \text{O}_7 \text{O}_8$
0	45	12	5.3	3.2	0	0 0 0 0 0 0 0
正常	68.702	18.321	8.092	4.885	0	0 0 0 0 0 0 0
1	181	262	41	28	0	1 0 0 0 0 0 0
低温过热	33.352	70.703	8.008	5.469	0	1 0 0 0 0 0 0
2	41	240.5	107	297	0	0 1 0 0 0 0 0
中温过热	5.981	35.084	15.609	43.326	0	0 1 0 0 0 0 0
3	164	244	103	497	8.3	0 0 1 0 0 0 0
高温过热	16.137	2.009	10.135	48.903	0.816	0 0 1 0 0 0 0
4	980	73	58	12	0	0 0 0 1 0 0 0
局部放电	87.266	6.5	5.165	1.069	0	0 0 0 1 0 0 0
5	115.9	75	14.7	25.5	6.8	0 0 0 0 1 0 0
低能放电	48.718	31.526	6.179	10.719	2.858	0 0 0 0 1 0 0
6	188	236	18.1	237	31.8	0 0 0 0 1 0 0
低能放电兼过热	26.445	33.197	2.55	33.338	4.473	0 0 0 0 1 0 0
7	162	35	5.6	30	44	0 0 0 0 0 1 0
电弧放电	58.568	12.654	2.025	10.846	15.907	0 0 0 0 0 1 0
8	98	103	32	131.3	19.7	0 0 0 0 0 0 1
电弧放电兼过热	25.521	26.823	8.333	34.193	5.130	0 0 0 0 0 0 1

学习样本的好坏很大程度上决定着 BP 网络的训练效果。收集学习样本集时着重从以下几点考虑:集中各种故障样本的百分比应当同实际变压器故障发生的机率大致相当,如变压器高温过热故障较多,样本中就多包含一些高温过热故障的样本;考虑到变压器运行中各种因素的影响,收集了具有代表性的变压器油中溶解气体分析样本 95 例,分别来自不同电压等级的变压器,具有较好的广泛性。经过反复调试和比较,最终从中挑选的学习样本举例见表 1 所示。

### 1.2.2 输入量和输出量的确定

对反映变压器内部故障最优价值的油中溶解特征气体主要有  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ 。 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  虽然对分析固体绝缘很有价值,但对故障类别判断的影响不大,当输入向维数过多时,会导致神经网络过于复杂,会出现对学习样本要求苛刻、网络训练次数增加、分类能力显著下降的问题;另外,为了避免神经网络的饱和,输入量不宜过大,不宜直接采用气体含量作为输入,可采用百分比或各种归一化处理。因此,这里采用 5 种气体组比值作为输入,即  $\text{H}_2 / \Sigma$ 、 $\text{CH}_4 / \Sigma$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6 / \Sigma$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4 / \Sigma$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2 / \Sigma$  作为输入矢量(其中  $\Sigma$  为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{H}_2$  5 种气体含量的总和),进行神经网络诊断研究。

DL/T 722 - 2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》将变压器故障类型分为 9 种,即低温过

热(低于 150 °C)、低温过热(150 ~ 300 °C)、中温过热(300 ~ 700 °C)、高温过热(高于 700 °C)、局部放电、低能放电、低能放电兼过热、电弧放电、电弧放电兼过热,这里将故障类型定为 8 类,即输出层采用 8 个输出神经元,分别对应  $\text{O}_1$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{O}_4$ 、 $\text{O}_5$ 、 $\text{O}_6$ 、 $\text{O}_7$ 、 $\text{O}_8$ 。输出值最大为 1,表示属于此类故障,数值越大表明属于该类型故障的可能性越大;数值越小表明属于该类型故障的可能性越小,输出值最小为 0,表示完全不属于此类故障。

### 1.2.3 不同隐含层神经元数目对 BP 网络收敛性能的影响

当网络确定为选择隐含层时,隐含层神经元数目便成为决定网络结构的主要因素,选择最佳网络结构不仅能改善网络收敛性能,也有利于增强网络的泛化推广能力。只要选择合适的隐含层神经元数目,构建三层 BP 神经网络就可以进行故障诊断。

针对隐含层神经元数目尚无可靠的确定规则,需要根据实际情况和经验反复比较来确定。下面采用 L - M 算法,期望误差设为 0.01 时,使用不同隐含层神经元数目对 60 组学习样本进行训练,训练结果如图 1 ~ 图 3 所示。

从图中可以看出,当隐含层神经元数目较少时,网络不能很好地学习,训练次数明显增加,当神经元

表2 测试样本的BP网络诊断结果(μL/L)

测试样本	H <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	改良三比值法 编码/诊断结果	实际故障	BP网络 诊断结果
1	50 90 260 18 5.9	120/8 ×	3	3
2	200 700 250 740 1	021/2 ×	3	4 ×
3	650 53 34 20 0	010/4	4	4
4	106 24 4 28 37	102/7	7	7
5	181 262 210 528 0	021/2	2	2
6	160 130 33 96 0	001/1	1	1
7	220 340 42 480 14	022/3	3	3
8	335 67 18 143 170	102/7	7	7
9	115.9 75 14.7 25.5 6.8	101/7 ×	6	1 ×
10	206 198.9 74 612.7 15.1	002/3	3	3
11	27 90 42 63 0.2	021/2	2	2
12	220 340 42 480 14	022/3	3	3
13	14 29 18 174 0	022/3	3	3
14	170 320 53 520 3.2	022/3	3	3
15	200 48 14 117 131	102/7	7	7
16	31 23 10.6 7.1 0.4	000/无编码	0	0
17	78 56 18 21 0	001/1	1	1
18	345 112.2 27.5 51.5 58.8	101/7	7	7
19	86 110 18 92 7.4	022/8	8	8
20	176 205.9 47.7 75.7 68.7	121/8 ×	5	0 ×
21	56 61 75 32 31	120/8 ×	7	7
22	12 23 9 98 0	022/3	3	3
23	180 175 75 50 4	000/0 ×	1	1
24	582 53 34 47 0	011/无法判断 ×	4	4
25	217.5 40 4.9 51.8 67.5	102/7	7	7
26	188 236 18.1 237 31.8	122/8	8	8
27	20.6 19.9 7.4 61.3 1.5	002/3	3	3
28	70.4 68.5 28.9 241 10.4	002/3	3	3
29	97.9 103 31.6 131.3 19.7	122/8	8	8
30	18 3 1 3.4 4.3	102/7	7	7
31	30 7.4 8.5 1.8 19	210/5	5	5
32	54 29 9 51 1.5	002/3 ×	7	3
33	97.8 15.8 2.7 7.9 24.3	202/5	5	5
34	120 120 33 84 0.55	021/1	1	1
35	49.2 33.2 15 49.9 1.4	002/3 ×	2	2

注:表中×号表示判断错误

故障类型代号表示:0为无故障,1为低温过热(包括低于150℃的低温过热和介于150℃与300℃之间的低温过热两种类型)2为中温过热,3为高温过热,4为局部放电,5为低能放电,6为低能放电兼过热,7为电弧放电,8为电弧放电兼过热

数目进一步减少时,网络训练误差将不能收敛,以适应,陷入局部最小的可能性较大。隐层神经元如图3所示,可见,太少的隐层神经元数会使网络难太多,使学习能力增强,能够确保网络收敛,但同时

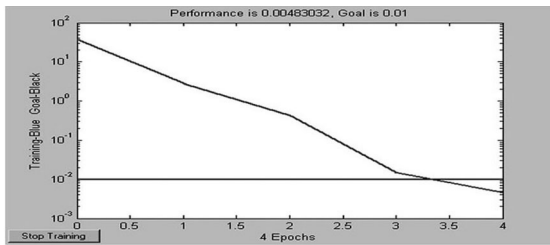


图 1 隐含层 30 个神经元的计算结果

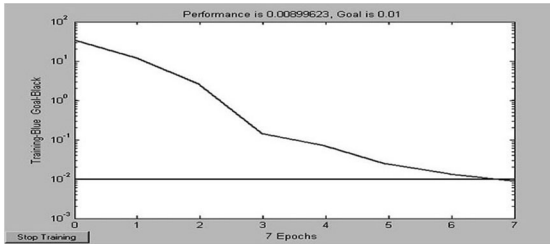


图 2 隐含层 20 个神经元的计算结果

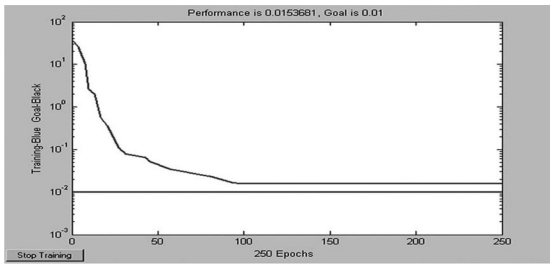


图 3 隐含层 5 个神经元的计算结果

也使得网络过于复杂,导致训练时间显著增加。图 1 示出了隐节点数为 30 个时的训练误差曲线,虽然网络显示了很高的学习能力,只用了 4 轮循环迭代就使网络误差减小至期望误差之下,但其花费的训练时间比 20 个隐节点的 3 倍还要多。理论分析表明,太多的隐节点数能够加速网络学习能力,但其泛化能力明显减弱。针对网络模型这里选择 10~18 个隐含层神经元数都是可行的,为了适当加快训练过程中误差的下降速度,最终将隐含层神经元数目确定为 16 个。

## 2 BP 神经网络故障诊断计算过程及诊断结果

将 BP 神经网络学习算法转化为实际的学习过程,其原理如下。令输入层故障诊断向量为  $I = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $O = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  为输出故障诊断向量,隐含层神经元数为  $H = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,  $V = V_{n \times p}$  与  $W = W_{p \times q}$  为各层之间连接权值,  $m$  为给定的样本数。先给出输入层与隐含层单元之间、隐含层与输出层单元之间的连接权以及隐含层单元阈值  $\theta_i$ , 输出层单元阈值  $\gamma_i$ , 赋以  $[-1, 1]$  之间的随机值。根据 BP 算法的推导过程,则每个模式对  $(A^k, T^k)$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) 经过学

习后, BP 神经网络输入故障征兆向量  $I$  后,其实际输出  $O$  与期望输出  $T^k$  在允许误差下是近似相等的。因此, BP 神经网络的输出  $O$  就是实际故障模式的近似,从而获得故障问题的近似诊断解。

用 65 组样本数据对 BP 网络进行训练,然后用训练好的网络模型对 30 组测试样本进行检验,测试样本进行变压器故障诊断的结果如表 2 所示。

从诊断结果看出, BP 神经网络诊断模型能够较为准确地判断出变压器故障类型,其准确率达到了 88.57%,比传统的三比值法高出 14 个百分点,可见,所提出的基于 L-M 改进算法建立的 BP 网络故障诊断模型具有快速的收敛速度和较好的诊断能力,在变压器故障诊断中应用效果好于三比值法。

## 3 结 语

依据变压器故障气体和故障类型的特点,设计了基于油中溶解气体特征量的 BP 神经网络模型,针对 BP 网络隐含层最佳结构难以确定的问题,设计了针对不同隐含层神经元数目的仿真。仿真表明,对变压器绝缘故障来说,隐含层神经元数目的多少也有一定的规律可循,解决前面诊断算例的隐含层神经元数目在 10~18 之间都是可行的。训练和诊断结果表明,所建立的 BP 神经网络诊断模型具有较高的诊断准确度,效果优于改良三比值法。

### 参考文献

- [1] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [2] 杨振勇. 《变压器油中溶解气体分析与判断导则》判断变压器故障的探讨[J]. 变压器, 2008, 45(10): 24-26.
- [3] 徐桂敏, 杨正祥. 概率神经网络在油浸式变压器故障诊断中的应用[J]. 科技咨询, 2011(9): 143.
- [4] 周天春, 杨丽君, 廖瑞金, 等. 基于局部放电因子向量和 BP 神经网络的油纸绝缘老化状况诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 18-23.
- [5] E. A. Mohamed, A. YAbdelaziz. A Neural Network-based Scheme for Fault Diagnosis of Power Transformer[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 75(2): 29-39.
- [6] 汪晓明, 何萍, 吴花, 等. CP 组合神经网络在基于 DGA 的变压器绝缘故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 543-547.
- [7] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (收稿日期:2012-03-27)