

文章编号:1000-582X(2001)06-0071-04

# 基于BP神经网络的水轮机调速系统故障诊断

余晓晖<sup>1</sup>,杜林<sup>1</sup>,陈明英<sup>1</sup>,蔡虹<sup>2</sup>,廖瑞金<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400044; 2. 西北电业职工大学 计算机系,西安 710054)

**摘要:**调速系统在发电机及电力系统中有着举足轻重的地位,能迅速地找出调速系统故障并及时地排除故障,对电力系统的安全运行具有重大意义。文中通过对葛洲坝水力发电厂二江电厂调速系统大量故障现象、故障原因、故障样本的收集、分析和整理,利用BP神经网络建立了水轮发电机调速系统智能诊断模型。该网络采用了三层结构、17个输入量、13个输出量的故障诊断系统,较完善地反映了调速系统的故障类型。经故障诊断实例检验,该系统诊断结果正确,有良好的实用价值。

**关键词:**调速系统;故障诊断;神经网络

**中图分类号:**TM 41

**文献标识码:**A

随着系统向大机组大电网的发展,对电站运行的自动化和可靠性提出了更高的要求。调速系统是水轮同步发电机的重要组成部分,目前,国内外专家对调速系统的自动化、智能化控制进行了大量卓有成效的工作<sup>[1]</sup>,而调速系统自身故障引起的停机、事故等问题,若不及时排除也必然影响电网运行的稳定性和可靠性,因此对水轮机调速系统进行以BP神经网络为基础的故障诊断技术研究具有重要意义。笔者以葛洲坝水力发电厂二江电厂水轮机调速系统为模型,进行了调速系统故障智能诊断技术的研究,建立了智能诊断系统,对提高二江电厂的稳定运行水平发挥了积极作用。

## 1 调速系统故障诊断的BP神经网络模型

### 1.1 BP神经网络理论

由于BP神经网络特有的优点<sup>[2,3]</sup>,文中采用BP神经网络模型及算法。

设网络共有 $L+1$ 层,第 $L+1$ 层为输出层,用字母 $b$ 表示网络层数,则 $b=1\sim L+1$ ,且 $b=2\sim L$ 皆为隐含层。设第 $b$ 层的神经元个数为 $N_b$ ,第 $b$ 层第 $j$ 个神经元的输出为 $o_j^b$ ,由第 $b$ 层第 $j$ 个神经元到第 $b+1$ 层的第 $i$ 个神经元的权系数为 $w_{ij}^b$ ,第 $b$ 层第 $j$ 个神经元的输入为 $I_j^b$ ,第 $b+1$ 层的第 $i$ 个神经元的阈值为 $\theta_i^{b+1}$ ,则各层神经元的输入输出存在如下关系:

$$O_i^{(b+1)} = f_s(I_i^{(b+1)}) \quad (1)$$

$$I_i^{(b+1)} = \sum_{j=1}^{N_b} w_{ij}^{(b)} o_j^{(b)} - \theta_i^{(b+1)} \quad (2)$$

其中 $b=1,2,\dots,L$ ,对于输入层,第 $b+1$ 层 $O_i^b$ 即为输入变量 $x_i$ ,对于输出层, $O_i^{(L+1)}$ 即为输出变量 $y_i$ 。由于sigmoid函数对线性和非线性问题都能很好地适应,故选用其作为网络节点函数<sup>[2]</sup>。

BP算法的学习过程由正向传播过程和反向传播过程组成。在正向传播过程中,输入样本由输入层经隐含层后到达输出层。如果在输出层得不到期望的输出,则转入反向传播过程,即将误差信号沿原连接通路返回。在返回过程中,不断地修改连接各层神经元之间的权值。设输出层神经元个数为 $N_{L+1}$ ,第 $i$ 个神经元的期望输出为 $d_i$ ,实际输出为 $y_i$ ,误差 $E$ 为各神经元期望输出与实际输出之间差值的平方和,即

$$E = 1/2 \sum_{i=1}^{N_{L+1}} (d_i - y_i)^2 \quad (3)$$

现在希望通过改变网络各层神经元之间的权函数 $w_{ij}^b$ ,以使得 $E$ 尽可能减小,亦即使实际输出值尽可能地逼近期望输出值。

$$\Delta w_{ij}^b = \alpha \delta_i^b o_j^b \quad (4)$$

$$w_{ij}^b(t+1) = w_{ij}^b(t) + \Delta w_{ij}^b(t+1) \quad (5)$$

其中, $\alpha$ 为学习步幅,随学习过程而相应发生变化。 $o_j^b$

· 收稿日期:2001-06-20

作者简介:余晓晖(1972-),女,湖北汉川人,重庆大学硕士研究生,现在葛洲坝水力发电厂工作,从事电气设备故障诊断研究。

在正向传播过程中计算得到,根据最速下降法的原则和 sigmoid 函数的性质可得以下求取  $\delta_i^b$  的推算公式:

1) 对于输出层  $O_i^{(b+1)} = y_i$ , 则

$$\delta_i^b = \frac{\epsilon_i y_i (1 - y_i)}{I_0} \quad (6)$$

其中,

$$\partial E / \partial y_i = -(d_i - y_i) = \epsilon_i \quad (7)$$

2) 对于其他中间隐含层 ( $b = 1, 2, \dots, L$ ), 有

$$\delta_i^b = \sum_{k=1}^{n_{(b+2)}} \delta_k^{(b+1)} w_{ki}^{(b+1)} \frac{O_i^{(b+1)} (1 - O_i^{(b+1)})}{I_0} \quad (8)$$

由此可见,计算本层的  $\delta^b$  必须用到后一层的  $\delta^{(b+1)}$ 。因此误差函数的求取是一个始于输出层的反向传播递归过程,即通过误差函数反向传播来修正权系数。

从 BP 理论可知,用三层具有 sigmoid 神经元非线性的网络可以任意精度逼近任何连续函数<sup>[2]</sup>。因此本 BP 网络采用三层结构,即输入层,一个隐含层和输出层。对故障诊断而言,神经网络的运算过程实际就是一种输入层的现象到输出层的结论的一种映射,输入层的每个节点对应一种现象,输出层的每个节点对应一个结论,网络内部的推理就是根据给出的现象得到正确的结论。

### 1.2 调速系统故障诊断的 BP 模型设计

设计一个神经网络首先涉及到输入、输出及隐含层的网络结构和输入、输出特征向量的选择。本网络采用的神经网络节点函数为 sigmoid 函数,其函数输出值在 (0, 1) 范围内<sup>[2]</sup>,而输入值太大或太小时,都会使函数趋于饱和,故应对输入量进行处理,使之取值在 (0, 1) 之间,而不至于接近两端。这种处理方法称为导入导出规则。又因为输入量包括模拟量和开关量,故其处理方法也略有不同。

笔者从大量反映调速系统状态的向量中选取了 17 项作为本网络输入特征向量,它们是:

1) 6 个模拟量:① 机组频率  $f_g$ ; ② 系统频率  $f_s$ ; ③ 导叶开度  $D$ ; ④ 轮叶开度  $L$ ; ⑤ 有功功率  $P$ ; ⑥ 水头  $H$ 。

以导叶开度  $D$ 、轮叶开度  $L$  的处理为例,这两个值是 0 ~ 1 的值,但往往有时非常接近两端。文中采用以下方法处理这两个量:

$$a^* = \frac{a + 0.2}{1.5} \times 100\% \quad (9)$$

$$b^* = \frac{b + 0.2}{1.5} \times 100\% \quad (10)$$

其中  $a^*$ 、 $b^*$  为处理后的导、轮叶开度百分比,  $a$ 、 $b$  为实际百分比。其它模拟量的处理类似。

2) 11 个状态开关量:① 主开关位置,  $k_1$ ; ② 导叶开

度是否 > 3%,  $k_2$ ; ③ 转速是否 > 95%,  $k_3$ ; ④ 停机令是否复归,  $k_4$ ; ⑤ 油压是否过低,  $k_5$ ; ⑥ 机频信号是否断线,  $k_6$ ; ⑦ 网频信号是否断线,  $k_7$ ; ⑧ 输出驱动电源是否消失,  $k_8$ ; ⑨ 行程测量电源是否消失,  $k_9$ ; ⑩ 风机是否停转,  $k_{10}$ ; ⑪ 隔离变是否过热,  $k_{11}$ 。

对开关量的处理则较为容易,因为开关量输入值不是 0 就是 1,故采用如下处理方法:

$$I = \frac{I_i + 0.2}{2.0} \times 100\% \quad (11)$$

其中,  $I$  为处理后的值,  $I_i$  为输入值。这样当  $I_i$  等于 0 时,  $I$  不等于 0, 当  $I_i$  等于 1 时,  $I$  为一个小于 1 的数,避免了网络函数工作在饱和区。

这 6 个模拟量和 11 个开关量都与调速系统密切相关,若再增加其它模拟量,所获得的信息量不会有太大的变化,而系统的诊断速度将会受到影响。

输出层每一个神经元,其输出应该对应于一类故障类型或故障性质。通过对二江电厂调速系统各种故障的分析和总结,归纳了以下 13 种故障:

① 导叶电液转换器零点漂移过大; ② 轮叶电液转换器零点漂移过大; ③ 导叶电液转换器卡阻; ④ 轮叶电液转换器卡阻; ⑤ 导轮叶协联不好; ⑥ 导叶主配发卡; ⑦ 导叶接力器有较大间隙; ⑧ 导叶行程故障; ⑨ 轮叶行程故障; ⑩ 输出电源故障; ⑪ 机频测量故障; ⑫ 管路漏油; ⑬ A/D 转换故障。

在选定这 17 个参量作为输入量, 13 个参量作为输出量的基础上,以一个三层结构的神经网络建立了故障诊断模型,然后以 150 个故障样本对网络进行了训练,使网络具有了故障识别能力,从而建立起了以 BP 神经网络为基础的水轮机调速系统故障诊断系统。

## 2 诊断实例

在对网络的训练完成后,笔者另选 10 例近期发生的故障实例,对网络进行检验,诊断结果完全正确。现将诊断的情况举例如下。

例 1: 葛洲坝二江电厂 3# 机组, 开机增速过程中导叶抽动, 无其它任何故障现象。记录故障时的各特征量如下:

1) 模拟量: ① 机组频率 = 40.1 Hz; ② 系统频率 = 50.1 Hz; ③ 导叶开度 = 0.42; ④ 轮叶开度 = 0.28; ⑤ 有功功率 = 0 kW; ⑥ 水头 = 18.2 m。

2) 开关量: ① 主开关位置在分,  $k_1 = 0$ ; ② 导叶开度 > 3%,  $k_2 = 1$ ; ③ 转速 ≤ 95%,  $k_3 = 0$ ; ④ 停机令复归,  $k_4 = 1$ ; ⑤ 油压不过低,  $k_5 = 0$ ; ⑥ 机频信号未断

线,  $k_6 = 0$ ; ⑦ 网频信号未断线,  $k_7 = 0$ ; ⑧ 输出驱动电源未消失,  $k_8 = 0$ ; ⑨ 行程测量电源未消失,  $k_9 = 0$ ; ⑩ 风机停转,  $k_{10} = 1$ ; ⑪ 隔离变过热,  $k_{11} = 1$ 。

以下是将特征量输入诊断系统后, 得到的一组数据, 每一数据代表一种故障发生的可能性:

- ① 导叶电液转换器零点漂移过大 0.02
- ② 轮叶电液转换器零点漂移过大 0.00
- ③ 导叶电液转换器卡阻 0.00
- ④ 轮叶电液转换器卡阻 0.00
- ⑤ 导轮叶协联不好 0.00
- ⑥ 导叶主配发卡 0.00
- ⑦ 导叶接力器有较大间隙 0.00
- ⑧ 导叶行程故障 0.00
- ⑨ 轮叶行程故障 0.06
- ⑩ 输出电源故障 0.00
- ⑪ 机频测量故障 0.00
- ⑫ 管路漏油 0.00
- ⑬ A/D 转换故障 0.92

显然, 诊断结论为“A/D 转换故障”, 据此对 A/D 转换板进行检查, 发现确有元件损坏, 经更换处理, 导叶抽动消失。由于有了正确的诊断结果, 处理该缺陷, 仅用了不足 1 h 的时间, 大大减小了负荷损失, 此例诊断正确。

例 2: 葛洲坝二江电厂 5# 机组在运行中突然进相, 无其它任何故障信号。记录故障时的各个特征量值如下:

- 1) 模拟量: ① 机组频率 = 50.0 Hz; ② 系统频率 = 50.0 Hz; ③ 导叶开度 = 0.24; ④ 轮叶开度 = 0.05; ⑤ 有功功率 = -60 kW; ⑥ 水头 = 17.8 m。

- 2) 开关量: ① 主开关位置在合,  $k_1 = 1$ ; ② 导叶开度 > 3%,  $k_2 = 1$ ; ③ 转速 > 95%,  $k_3 = 1$ ; ④ 停机令复归,  $k_4 = 1$ ; ⑤ 油压不过低,  $k_5 = 0$ ; ⑥ 机频信号未断线,  $k_6 = 0$ ; ⑦ 网频信号未断线,  $k_7 = 0$ ; ⑧ 输出驱动电源未消失,  $k_8 = 0$ ; ⑨ 行程测量电源未消失,  $k_9 = 0$ ; ⑩ 风机未停转,  $k_{10} = 0$ ; ⑪ 隔离变不过热,  $k_{11} = 0$ 。

以下是将特征量输入诊断系统后, 得到的一组数据, 每一数据代表一种故障发生的可能性:

- ① 导叶电液转换器零点漂移过大 0.00
- ② 轮叶电液转换器零点漂移过大 0.00
- ③ 导叶电液转换器卡阻 0.00
- ④ 轮叶电液转换器卡阻 0.00
- ⑤ 导轮叶协联不好 0.00
- ⑥ 导叶主配发卡 0.00

- ⑦ 导叶接力器有较大间隙 0.00
- ⑧ 导叶行程故障 0.00
- ⑨ 轮叶行程故障 0.00
- ⑩ 输出电源故障 0.00
- ⑪ 机频测量故障 0.95
- ⑫ 管路漏油 0.00
- ⑬ A/D 转换故障 0.06

显然, 诊断结果为“机频测量故障”。机频测量故障的原因可能有: 机频电压互感器故障, 测频板故障, 信号传送故障。分别检查这些部件, 发现测频板上的一个计数元件损坏。经更换该元件后, 故障消失, 负荷根据 AGC 的调节重新恢复至 121 kW。此例诊断正确。

10 个诊断实例(含已举例子 2 个)的诊断情况见表 1。

表 1 故障诊断实例一览表

序号	故障现象	网络诊断结论	实际故障类型	评价
1	负荷进相	机频测量故障	机频测量故障	正确
2	导叶抽动	A/D 转换故障	A/D 转换故障	正确
3	开机拒动	导叶主配发卡	导叶主配发卡	正确
4	轮叶不能开在启动角	轮叶行程故障	导叶行程故障	正确
5	溜负荷	导叶零点漂移	导叶零点漂移	正确
6	负荷调不动	输出电源故障	输出电源故障	正确
7	负荷波动较大	导轮协联故障	导轮协联故障	正确
8	导叶抽动	导叶零漂过大	导叶零漂过大	正确
9	轮叶不能开在启动角	轮叶电转卡阻	轮叶电转卡阻	正确
10	超速停机	导叶主配发卡	导叶主配发卡	正确

从这 10 个故障实例的诊断可知, 本系统的诊断结果正确, 说明所选取的结构参数是可行的, 系统具有良好的实用价值。

### 3 结论

1) 以 BP 神经网络为基础, 建立起了水轮发电机调速系统故障诊断系统, 经故障实例的检验, 证实了该系统的有效性, 诊断结果完全正确, 具有良好的应用价值。

2) 本文以调速系统故障现象作为输入(6 个模拟量, 11 个开关量), 以故障类型作为输出(13 个输出量), 并利用导入导出规则对输入输出量进行处理的方法所建立的水轮发电机调速系统 BP 神经网络诊断模型是正确的。

#### 参考文献:

[1] 陈仲华. 论水轮机调速器模式选择[J]. 电力系统自动

化,1999,23(2):20-23.

[2] 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1993.

[3] 刘曙光. 前馈神经网络中的反向传播算法及其改进、进展与展望[J]. 计算机科学,1996,23(3):36-39.

## Fault Diagnosis in Hydraulic Turbine Governor Based on BP Artificial Neural Network

YU Xiao-hui<sup>1</sup>, DU Lin<sup>1</sup>, CHEN Ming-ying<sup>1</sup>, CAI Hong<sup>2</sup>, LIAO Rui-jing<sup>1</sup>

- (1. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Computer Department, North-west power employee-college, Xian 710054, China)

**Abstract:** The governing system of hydraulic turbine generator plays an important role in power system. It is significant to find out the faults of governing system and remove them quickly. This paper sets up a new fault diagnosis model of the hydraulic turbine generator governing system with the advanced ANN (artificial neural net). This 17-in-13-out model consists of three layers. It is proved that this model can find the fault accurately.

**Key words:** governing system; fault diagnosis; artificial neural network

(责任编辑 李胜春)

(上接第55页)

## Intelligent Agricultural Information Network and Service System

HE Li-qing, HUANG Xi-yue, CHAI Yi, TU Yun-hua, WANG Dong-hui

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The scheme and practice for construct of intelligent agricultural information network are described. With Internet form, we set up the computer network of Intelligent Information Technology of Agriculture in Demonstration Section of Chongqing, discussed the design method of expert system in agriculture, and studied 5 expert systems based on vegetable growth, such as tomato and so on. Some software modules are studied, such as the soil information systems on the network, expert system in the vegetable plant diseases and insect pests diagnostician and network on line selling and so on. The structure, function and work flow of information service system based network are introduced.

**Key words:** computer network; expert system; information technology; software engineering.

(责任编辑 吕赛英)