

自适应学习率的 BP 网络算法及其在汽轮发电机组故障模糊诊断中的应用

李 勇 李洪源 叶荣学
(东北电力学院)

曹祖庆
(东南大学)

[摘要] 针对 BP 网络的不足, 提出了自适应学习率的 BP 网络算法, 从根本上解决了 BP 网络学习率的取值问题和收敛速度慢的问题, 并有效地克服了 BP 网络易陷入局部最小点的缺点, 采用这种改进算法成功地实现了对汽轮发电机组故障的模糊诊断。

关键词 神经网络 BP 算法 汽轮发电机组 模糊诊断

分类号 TP39

1 前言

近几年来, 神经网络以其独到的联想、记忆、储存和学习功能在机械设备的故障诊断领域受到了广泛的关注。其中 BP 网络是最成熟, 应用最广泛的一种神经网络。基于 BP 网络的故障诊断方法不必事先给出各故障模式的判别函数或故障隶属函数, 它借助于其本身所具有的学习能力, 自动形成故障类型与故障征兆间的非线性映射关系, 为故障诊断提供了方便。

但 BP 网络在实际应用中存在如下的不足, 如: 学习率的取值需凭经验或试算选取; 网络学习收敛速度慢以及易陷入局部最小点等。本文就 BP 网络的上述不足, 提出了一种自适应学习率的 BP 网络算法, 并尝试用该改进算法对汽轮发电机组的故障进行模糊诊断。

2 BP 网络的拓扑结构及批处理算法

图 1 是一个典型的三层 BP 网络拓扑结构图。

对于给定的训练样本集 $(x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pN}) \rightarrow$

$(t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pL}), P = 1, 2, \dots, P$ 为样本序号, N, L 分别为网络的输入和输出层节点数。网络的训练结果与目标输出间的平方误差为:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^L (t_{pi} - y_{pi})^2 \quad (1)$$

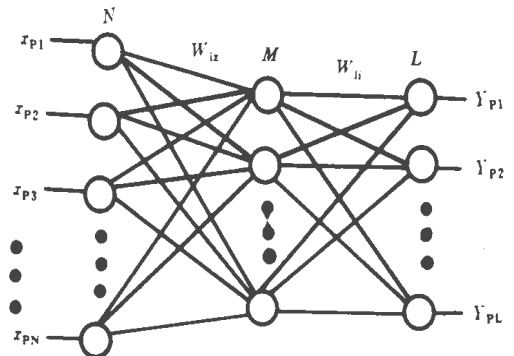


图 1 三层 BP 网络的拓扑结构

系统误差为:

$$E = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P E_p \quad (2)$$

文献 [1] 提出按照网络的系统误差 E 下降的方式来改变连接权及阈值的方法, 即: 对于输出层

收稿日期 1995-05-02 修改稿 1997-07-15

本文联系人 李勇 1964年生 博士生 吉林市东北电力学院动力系 132012

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

与隐层间的连接权及阈值，有

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij} &= -Z \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \sum_{p=1}^P (-Z \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}}) \\ &= \sum_{p=1}^P \Delta_p w_{ij} = Z \sum_{p=1}^P W_{ij} O_{pi} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta b_i &= -Z \frac{\partial E}{\partial b_i} = \sum_{p=1}^P (-Z \frac{\partial E_p}{\partial b_i}) \\ &= \sum_{p=1}^P \Delta_p b_i = Z \sum_{p=1}^P \delta_{pi} \end{aligned} \quad (4)$$

同样对于隐层与输入层间的连接权及阈值，亦有

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij} &= -Z \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \sum_{p=1}^P (-Z \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}}) \\ &= \sum_{p=1}^P \Delta_p w_{ij} = Z \sum_{p=1}^P \delta_{pi} \tilde{q}_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta b_i &= -Z \frac{\partial E}{\partial b_i} = \sum_{p=1}^P (-Z \frac{\partial E_p}{\partial b_i}) \\ &= \sum_{p=1}^P \Delta_p b_i = Z \sum_{p=1}^P W_{pi} \end{aligned} \quad (6)$$

当激励函数取 Sigmoid 函数，即

$$f(x) = 1 / [1 + \exp(-x)]$$

时，有

$$W_{pi} = (t_{pi} - y_{pi}) y_{pi} (1 - y_{pi})$$

$$W_{ij} = o_{ji} (1 - \theta_{pi}) \sum_{l=1}^L w_{il} W_{li}$$

上述诸式中， t_{pi} 、 y_{pi} 分别为输出层节点的目标输出和实际输出； $\Delta_p b$ 和 $\Delta_p w$ 分别为对应样本 p 的连接权和阈值改变量； Z 为学习率。

据文献 [1]报道，上述这种批处理方式比常规的分别处理方式收敛速度有所提高。

$$Z = \frac{E}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\sum_{p=1}^P \delta_{pi} o_{ij})^2 + \sum_{i=1}^M (\sum_{p=1}^P \delta_{pi})^2 + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M (\sum_{p=1}^P \delta_{pi} o_{ij})^2 + \sum_{i=1}^L (\sum_{p=1}^P \delta_{pi})^2} \quad (9)$$

这样，学习率 Z 完全由网络当时的系统误差 E 、学习误差 W 和各节点的输出值决定。实际训练中，网络将根据当时的运行参数自动改变学习率，而无需人为作任何调整，实现了学习率的真正自适应，而且使网络的学习收敛速度大大提高。

4 基于自适应学习率的 BP网络算法对汽轮发电机组故障的模糊诊断

4.1 汽轮发电机组常见故障及其征兆样本

汽轮发电机组的故障，往往是通过故障信号的

3 具有自适应学习率的 BP网络算法

在 BP网络算法中，决定网络学习训练收敛速度的学习率值取多大合适，目前还没有任何理论依据可循，许多文献仅给出 $0 < Z < 1$ 的条件。实际训练中，通常凭经验或试算选取。 Z 取得大，虽然可提高学习率，但易使网络的学习过程振荡，使收敛速度变慢； Z 取得小，则由于学习率小，同样要使收敛速度降下来。

众所周知，BP网络的学习过程实质上就是通过不断地调整网络内部的连接权和阈值使网络系统误差 E 达到给定的精度。当网络的拓扑结构及训练输入样本和目标输出值一定时，系统误差 E 仅是网络内部连接权和阈值的函数，即

$$E = f(w_{ij}, b_i, w_{ij}, b_j) \quad (7)$$

网络对样本集中的每个样本各学习一次后，由连接权及阈值改变引起的系统误差 E 的改变量为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \Delta w_{ij} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial E}{\partial b_i} \Delta b_i \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \Delta w_{ij} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial E}{\partial b_i} \Delta b_i \end{aligned} \quad (8)$$

将式 (3) ~ (6) 代入式 (8)，并取 $\Delta E = 0 - E = -E$ ，即得到了计算 BP网络学习率的理论公式

多项特征值反映出来的。本文就汽轮发电机组中常见的 14种典型故障利用振动信号中 9个不同频段上的振幅比值作为特征量。表 1所示为用于 BP网络学习的、分别对应 14种典型故障的征兆集。采用本文提出的自适应学习率的 BP网络算法对网络进行训练。其中各征兆相对于 14种故障的隶属函数(网络的目标输出)取为

$$t_{pi} = \begin{cases} 1, & p = 1 \\ 0, & p \neq 1 \end{cases}$$

4.2 自适应学习率的 BP网络算法的训练过程及隶属函数的形成

本文采用三层 BP 网络, 它可以逼近任何连续函数, 故采用该 BP 网络可形成汽轮发电机组故障的隶属函数。输入层节点数对应于 9 个故障特征量, 即 $N=9$; 输出层节点数对应 14 种故障类别数, 即 $L=14$; 隐层节点数按 $M= \sqrt{N+L+1}$ 来选取, 其

中 $a=1\sim 10$, 本文中取 $M=10$, 样本数 $P=14$, 网络的系统误差取 $E \leq 0.009$ 图 2 所示为采用本文提出的自适应学习率的 BP 网络算法对网络进行训练过程中系统误差 E 及学习率 Z 随迭代次数 k 的变化过程。为便于比较, 将采用常规的定学习率 $Z=0.85$

表 1 BP 网络训练输入样本^{a)}

故障类别	特征代号 ^{b)}								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. 不平衡					0.9	0.05	0.05		
2. 汽封碰摩	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
3. 轴向碰摩	0.1	0.05	0.05	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
4. 不对中					0.4	0.5	0.1		
5. 偏心					0.3	0.2			
6. 轴裂纹					0.4	0.2	0.2		0.2
7. 过盈不足	0.4	0.4		0.1				0.1	
8. 松动		0.7	0.2				0.1		
9. 联轴器不精确	0.1	0.2		0.1	0.2	0.3	0.1		
10. 间隙引起振动					0.4	0.2	0.2	0.2	
11. 亚谐共振				1.0					
12. 油膜振荡		1.0							
13. 蒸汽涡动		0.3	0.1	0.6					
14. 轴承刚度不均						0.8	0.2		

注: a) 空格表示值为 0;

b) 1. (0.01~ 0.39) f 2. (0.40~ 0.49) f 3. 0.5 f 4. (0.51~ 0.99) f 5. f 6. 2 f 7. (3~ 5) f 8. 奇数倍 f 9. 高倍 f

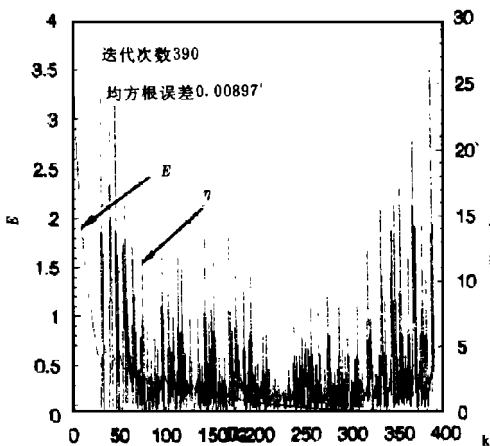


图 2 具有自适应学习率 BP 网络学习过程

时网络收敛到 $E=0.07928$ 时的学习过程也一并列出, 见图 3

对比图 2 和图 3 可以发现, 本文提出的具有自适应学习率的 BP 网络算法收敛速度极快, 其收敛到 $E=0.00897$ 的迭代次数 390 仅是采用常规的定学习率 $Z=0.85$ 收敛到 $E=0.007928$ 的迭代次数 2056 的 19%, 从而证明本文提出的 BP 网络改进算法的有效性。

另外, 由于自适应学习率取决于网络当时的运行参数, 当网络陷入局部最小时, 网络系统将自动改变学习率, 从而“跳”出局部最小点, 达到全局最小。

由上述的训练过程还可以看出, BP 网络及本文提出的改进算法能很好地实现表 1 中的故障征兆与故障隶属度之间的非线性映射, 从而实现了汽轮发电机组故障隶

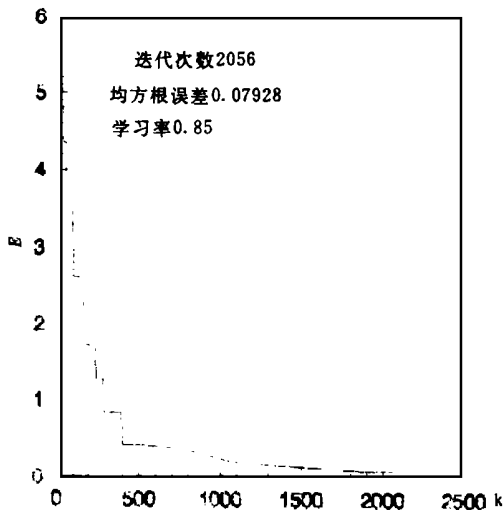


图 3 常规 BP网络学习过程

属函数的 BP网络表示。当然,这种隶属函数不是显式的,而是隐含在已训练好的网络内部参数中,而且由于这种隶属函数是通过网络对样本的多次迭代学习计算得到的,所以其精度要比通常凭经验或统计得到的隶属函数高。实际诊断时,只要将机组的振动信号进行频谱分析,然后将机组振动信号的 9个不同频段上的振幅比值作为故障征兆输入网络,网络即可很快地输出该征兆相对于各故障的隶属度,根据最大隶属度的原则,便可诊断出汽轮发电机组存在的故障。

4.3 汽轮发电机组故障模糊诊断实例

某机组 3 轴承的振动信号经 FFT 变换后对其各频率段上的振幅进行归一化处理,得其故障征兆为 [0, 0, 0, 0, 0, 0.574, 0.346, 0.08, 0, 0], 将其输入上述已训练好的 BP网络中,网络即输出该征兆相对于各故障的隶属度,见表 2。根据最大隶属度的原则,即可诊断出该机组的故障是序号 4和 5,即“不对中”和“轴承与轴颈偏心”,该结论已被实际检修所证实。

表 2 BP网络的诊断结果 (征兆相对于各故障的隶属度)

不平衡	汽封碰磨	轴向碰磨	不对中	偏心	轴裂纹	过盈不足
0.0	0.0	0.00485	0.85097	0.69617	0.05449	0.00128
松动	联轴器不精确	间隙引起振动	亚谐共振	油膜振荡	蒸汽汽动	轴承刚度不均
0.0	0.01162	0.05140	0.00122	0.0	0.0	0.0004

5 结论

(1)本文提出了一种计算 BP网络学习率的理论公式,当网络拓扑结构及训练输入样本和目标输出值一定时,学习率将完全适应于网络当时的运行参数而自动变化,无需人为作任何调整,从而克服了 BP网络算法中学习率靠人为试算选取所带来的问题。另外,这种改进算法还有助于提高网络的训练收敛速度及避免网络训练陷入局部最小点。

(2)基于 BP网络及本文提出的具有自适应学

习率的 BP网络算法对汽轮发电机组故障的模糊诊断精度高,而且不必事先通过经验或统计人为给定隶属函数,因此更适用于对汽轮发电机组的故障诊断。

参考文献

1 张立明. 人工神经网络理论及应用. 上海: 复旦大学出版社, 1993年

(渠源 编辑)

ignition the above-cited burner can enhance the stability of combustion at boiler low loads. In connection with the use experience of such burners at Shandong Electric Grid this paper presents the test results and key points in the burner design. **Key words** boiler, pulverized coal concentration, dense-dilute separation, burners, development and application

辐射屏法用于高温输热管网隔热保温的实验与工程应用 = **Experimental and Engineering Application of Radiation Screen Method for the Thermal Insulation of High-temperature Heating Pipe Network** [刊, 中] / Li Yefa, Zhang Xuesheng, et al (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 452~ 454

Based on the principle of the absence of natural convection in a rectangular air-tight space under certain conditions the engineering application of radiation screen method for thermal insulation has finally been made possible through theoretical calculations, simulation tests and intermediary experiments. As a result, excellent energy-saving results and economic benefits were attained. **Key words** radiation screen, air-tight space, effective thermal conductivity, thermal emissivity

自适应学习率的 BP网络算法及其在汽轮发电机组故障模糊诊断中的应用 = **BP Network Algorithm with Self-adaptive Learning Rate and Its Use in the Fuzzy Diagnosis of Turbogenerator Failures** [刊, 中] / Li Yong, Li Hongyuan, et al (Northeast Electric Power Institute), // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 455~ 458

To overcome the shortcomings of a BP network, this paper proposes a BP algorithm with self-adaptive learning rate, thus once for all overcoming the demerits of BP networks, i. e., slow convergency and inability to determine the value of learning rate. In addition, the disadvantage of BP network liable to fall into a local minimum point can also be effectively eliminated. Through the use of such an improved algorithm successfully realized is the fuzzy diagnosis of turbogenerator failures. **Key words** neural network, BP algorithm, turbogenerator, fuzzy diagnosis

国内外循环流化床锅炉的设计改进 = **Design Improvements of Circulating Fluidized Bed Boilers at Home and Abroad** [刊, 中] / Yao Huizhen (Northwest Electric Power Construction General Co.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 459~ 461

Based on the analysis of the operation conditions of many circulating fluidized bed boilers of various types and in the light of experiences gained in the improvement of the start-up and commissioning tests of such boilers the present paper discusses the design development tendency of their air distribution device and ignition mode, and proposes a new design philosophy concerning the ash and slag discharge control and the monitoring of fluidized bed temperature. **Key words** circulating fluidized bed boiler, air distribution, ignition, operation, analysis

无上排气芯管旋风分离器的性能预测 = **Performance Prediction of a Cyclone Separator without an Upper Exhaust Core Pipe** [刊, 中] / Lin Wei, Wang Naining (East China Polytechnical University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 462~ 465

A performance prediction is conducted of a cyclone separator without an upper exhaust core pipe. Under a non-orthogonal adhesion body coordinate system a numerical simulation of an internal gas phase field has been performed with the help of a non-intersecting SIMPLE algorithm. Under a Lagrange coordinate system