

基于 BP 神经网络的混流式水轮机裂纹声发射源定位方法

毛汉颖¹, 毛汉领², 周洁³, 黄振峰³

(1. 广西工学院 汽车系, 柳州 542506; 2. 广西广播电视大学, 南宁 530022;
3. 广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

摘要:提出使用基于 BP 神经网络的智能定位方法, 用于混流式水轮机的裂纹声发射源定位。理论和实验证明, 该方法较好地解决了声发射源定位问题, 为进行混流式水轮机裂纹在线监测提供依据。

关键词:声发射检测; 源定位; 混流式水轮机转轮; 裂纹; 神经网络

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2008)07-0426-04

Acoustic Emission Source Location for the Crack of Francis Turbine Runner Based on BP Neural Network

MAO Han-Ying¹, MAO Han-Ling², ZHOU Jie³, HUANG Zhen-Feng³

(1. Automotors Department of Guangxi University of Technology, Liuzhou 542506, China;
2. Guangxi Radio & TV University, Nanning 530022, China;
3. Mechanical Engineering School of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Intelligent location model based on BP neural network was proposed, which could serve in AE source location of the crack of francis turbine. Testing proved, theoretically and practically, that it could locate AE source efficiently, and could be used for the on-line monitoring crack of francis turbine runner.

Keywords: Acoustic emission testing; Source location; Francis turbine runner; Crack; Neural networks

混流式水轮机效率高, 是水电站普遍采用的机型, 但其转轮叶片在运行中经常出现大量裂纹, 严重危及水电站运转安全^[1]。声发射(简称 AE)是材料或结构内部局部区域在外力、内力或温度的影响下, 产生塑性变形或有裂纹形成和扩展时, 伴随能量迅速释放而产生的瞬态弹性波现象^[2]。水轮机在复杂的受力状态下产生裂纹时, 往往伴随有声发射现象的出现。采用声发射技术对转轮叶片裂纹的产生和发展进行在线动态监测, 其目的之一就是要确定裂纹产生的声发射源的部位。

目前, 声发射源的定位方法很多, 主要有时差定

位和区域定位^[2]。时差定位法是根据同一声发射源所发出的声发射信号到达不同传感器的时间差, 经波速、传感器间距等参数的测量和算法运算, 确定声源的精确位置的定位方法, 可分为线定位、面定位及三维定位。区域定位是根据声发射信号的传感器个数和相对时差时序来判定声发射源所处的区域, 是一种快速、简便但粗略的定位方法。人工神经网络用于声发射源定位极具潜力, 特别适用于材料各项异性及结构复杂的情况^[3]。

笔者结合混流式水轮机的结构及裂纹产生的部位, 采用 BP 神经网络对裂纹产生的声发射源进行智能定位, 并通过现场实验验证了该定位方法的可行性。

1 混流式水轮机结构及裂纹产生部位

混流式机组转轮由上冠、下环及叶片组成。上

收稿日期: 2007-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50465002); 广西自然科学基金资助项目(桂科基 0448014)。

作者简介: 毛汉颖(1968—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为故障诊断和交通管理。

冠与下环的几何形状规则,呈轴对称形。叶片形状复杂,既弯又扭,断面形状为翼形,13个叶片均匀排列,并与上冠、下环连接在一起(图1)。裂纹产生在叶片与上冠、下环交接处、叶片进水边靠下环急流转弯处和叶片背面中部,多是疲劳所致裂纹^[4]。

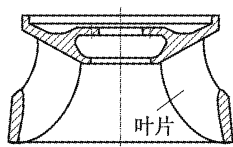


图1 混流式水轮机结构示意图

2 基于 BP 神经网络的智能定位

BP 神经网络(即误差反向传播神经网络)是神经网络模型中使用最广泛的一类,它由输入层、中间层和输出层组成(图2)。中间层(隐含层)可以是一层或多层。其学习过程由两部分构成:正向传播和反向传播。当正向传播时,输入信息从输入层经隐含层处理后传向输出层,每一层神经元的状态只影响下一层的神经元状态。如果在输出层得不到希望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的神经元连接通路返回。返回过程中,逐一修改各神经元连接的权值。这种过程不断迭代,最后使得信号误差达到允许的范围。采用 BP 神经网络实现智能定位流程如3图所示。

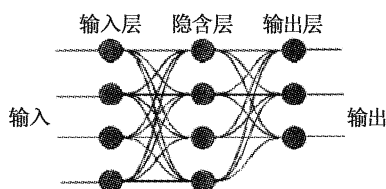


图2 神经网络模型图

3 智能定位方案的实验验证

3.1 实验方案

实验在广西岩滩水电站退役的转轮上进行。针对混流式水轮机转轮叶片裂纹的产生部位,为便于实验过程中测量尺寸,折断 $\phi 0.5$ mm HB 型铅芯,在两个叶片上模拟裂纹声发射源。根据水轮机裂纹产生的部位,决定具体的断铅位置为(图4):

(1) 出水边与上冠交接处(距离叶片与上冠交接处 59 cm 平行划线,距离叶片边缘以 20 cm 为单位依次确定 3 个断铅位置),以下简称叶片上部。

(2) 叶片背面中部(距离叶片与上环交接处 158 cm 平行划线,距离叶片边缘以 20 cm 为单位依次确定 3 个断铅位置),以下简称叶片中部。

(3) 进水边靠近下环转弯处(距离叶片与上环

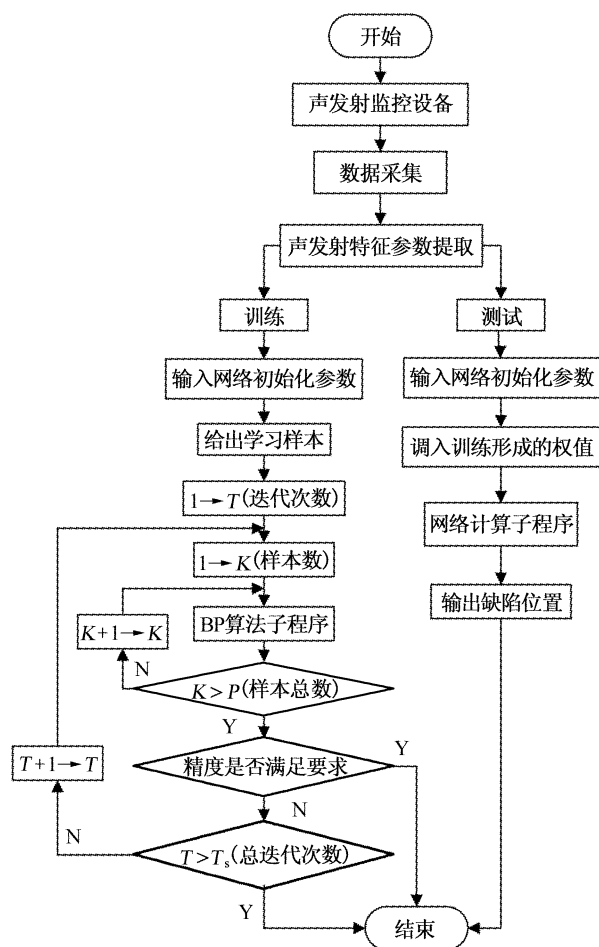


图3 智能定位法流程图

交接处 216 cm 平行划线,距离叶片边缘以 20 cm 为单位依次确定 3 个断铅位置),以下简称叶片下部。

四个传感器布置在上冠的上法兰盘面上(图5)。采用美国 PAC 公司的声发射仪采集声发射信号,表1是在叶片1的上部、中部和下部四个传感器采集到的声发射信号的部分参数。

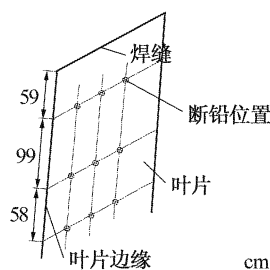


图4 断铅位置示意图

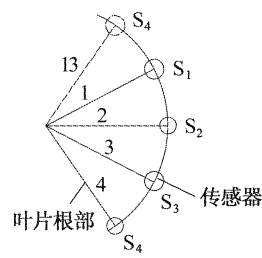


图5 传感器在上法兰盘位置示意图

3.2 BP 神经网络设计分析

3.2.1 输入层的确定

输入参数选择的好坏直接影响输出层的结果。由于声发射的特征参数很多,合理有效地选择声发

表 1 智能定位神经网络的输入样本

位置	相对幅值				上升时间/s				持续时间/s				相对信号强度			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 上	0.545 5	0.823 5	0.333 3	0.500 0	0.322 7	0.410 7	0.520 7	0.236 5	0.252 2	0.779 9	0.103 9	0.265 4	0.143 8	0.639 8	0.283 8	0.203 0
	0.545 5	1.000 0	0.666 7	0.625 0	0.249 6	0.232 6	0.570 7	0.182 2	0.373 0	0.897 2	0.377 6	0.420 8	0.448 2	1.000 0	0.738 9	0.392 1
	0.454 5	0.882 4	0.500 0	0.500 0	0.300 4	0.398 8	0.525 6	0.224 4	0.362 7	0.861 0	0.144 7	0.399 0	0.340 8	0.920 0	0.609 8	0.339 1
1 中	0.272 7	0.647 1	0.083 3	0	0.382 9	0.450 1	0.367 4	0.031 6	0	0.572 2	0	0.000 2	0.003 8	0.436 8	0.118 3	0
	0.272 7	0.705 9	0.416 7	0.437 5	0.540 1	1.000 0	0.362 1	0.150 0	0.086 7	0.793 3	0.322 8	0.347 6	0.154 7	0.686 7	0.401 5	0.226 5
	0.181 8	0.647 1	0.250 0	0	0.572 1	0.833 3	0.896 9	0	0.095 2	0.557 6	0.179 3	0	0.082 7	0.490 0	0.244 8	0.004 0
1 下	0.181 8	0.588 2	0.250 0	0.312 5	0.852 4	0.281 7	0.749 5	0.264 6	0.112 1	0.715 6	0.200 5	0.253 3	0.125 2	0.567 2	0.279 7	0.153 1
	0.181 8	0.882 4	0.500 0	0.625 0	0.164 1	0.244 2	0.899 4	0.782 3	0.039 8	0.842 4	0.393 5	0.401 8	0.054 4	0.817 6	0.470 7	0.327 1
	0.272 7	0.823 5	0.666 7	0.562 5	0.364 9	0.741 3	0.662 8	0.780 4	0.020 7	0.819 0	0.455 4	0.409 9	0.142 1	0.929 1	0.714 7	0.355 8
2 上	0.727 3	0.588 2	0.666 7	0.750 0	0.313 1	0.151 9	0.156 3	0.145 0	0.197 0	0.092 9	0.076 6	0.480 9	0.330 4	0.134 8	0.360 9	0.444 4
	1.000 0	0.705 9	1.000 0	0.875 0	0.094 3	0	0.128 3	0.590 2	0.358 1	0.199 0	0.204 1	0.629 1	0.816 4	0.198 1	0.746 1	0.800 7
	0.818 2	0.529 4	0.583 3	0.875 0	0.450 0	0.085 8	0.143 4	0.087 0	0.304 2	0.067 6	0.150 2	0.548 6	0.566 3	0.094 0	0.490 0	0.598 7
2 中	0.818 2	0.294 1	0.833 3	0.812 5	0.608 5	0.330 0	0.714 1	0.648 0	0.805 7	0.625 0	0.669 2	0.996 0	0.746 1	0.183 7	0.679 0	0.852 2
	0	0.117 6	0.083 3	0.250 0	0.532 3	0.280 7	0.256 6	1.000 0	0.420 7	0.335 5	0.334 1	0.607 0	0.043 0	0.047 1	0.069 7	0.268 9
	0.272 7	0	0	0.187 5	0	0.536 1	0	0.176 1	0.365 9	0	0.259 9	0.441 6	0	0	0	0.177 3
2 下	0.727 3	0.470 6	0.666 7	0.937 5	1.000 0	0.898 1	0.480 8	0.944 0	0.933 9	1.000 0	0.925 0	0.944 2	0.809 1	0.374 0	0.850 9	0.873 6
	1.000 0	0.588 2	0.833 3	1.000 0	0.300 2	0.157 9	1.000 0	0.235 2	1.000 0	0.766 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.353 3	1.000 0	1.000 0
	0.272 7	0.294 1	0.166 7	0.437 5	0.799 1	0.270 2	0.352 3	0.383 8	0.600 7	0.551 7	0.825 2	0.964 3	0.602 4	0.478 8	0.676 9	0.816 7

射特征参数,对于优化和改善网络结构都很有用。由文献[5]可知,声发射参数中的幅值、上升时间、持续时间和信号强度四个参数组合的相关性最好。因此在智能定位中分别选取四个声发射传感器的四个特征参数,故网络输入的神经元个数为 16 个。由于原始数据相差比较悬殊,如果直接投入使用,测量值大的波动就垄断了神经网络的学习过程,使其不能反映小的变化值的变化,因此需要进行归一化处理。这里将其变化在[0,1]的范围内,归一化处理以后的输入样本如表 1 所示。

3.2.2 隐含层的确定

选取多少个隐含节点才合适,这在理论上没有一个明确的规定。这里采取通过增加隐含层神经元个数,探讨它们误差的变化,来确定隐含层神经元的个数。文中输入层神经元个数为 16 个,输出层神经元的个数为 6 个。根据经验公式计算出,隐元数的取值范围为 5~20。笔者设计一个隐含层神经元数目可变的 BP 网络,通过误差对比,确定最佳的隐含层神经元个数,并检验隐含层神经元个数对网络性能的影响。以网络训练的均方根误差作为考察指标,当隐含层个数为 17 时,网络的误差最小为 0.642 5,因此确定隐含层单元数为 17 个(图 6)。

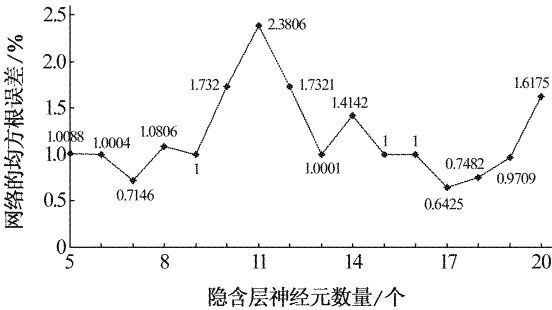


图 6 不同隐含层对应网络的训练误差

3.2.3 输出层的确定

从便于对水轮机叶片裂纹定位的角度出发,将定位分为叶片与上冠交接处、叶片背面中部和叶片出水边外缘三个部位。试验有两个叶片的模拟声发射源,故共有 6 个网络的输出向量,如表 2 所示。

表 2 神经网络的期望输出

声发射源的位置	网络的期望输出					
叶片 1 与上冠交接处	1	0	0	0	0	0
叶片 1 背面中部	0	1	0	0	0	0
叶片 1 出水边外缘下部	0	0	1	0	0	0
叶片 2 与上冠交接处	0	0	0	1	0	0
叶片 2 背面中部	0	0	0	0	1	0
叶片 2 出水边外缘下部	0	0	0	0	0	1

表 3 神经网络的测试样本

位置	测试样本的输入特性数据															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 上	0.545 5	1.000 0	0.500 0	0.500 0	0.276 0	0.406 6	0.547 6	0.208 9	0.280 6	0.823 4	0.102 1	0.383 0	0.398 0	0.950 3	0.097 9	0.323 4
1 中	0.272 7	0.647 1	0.250 0	0.312 5	0.472 0	0.997 5	0.352 3	0.042 5	0.061 1	0.569 8	0.161 1	0.000 7	0.034 4	0.500 9	1.000 0	0.000 7
1 下	0.181 8	0.823 5	0.500 0	0.625 0	0.309 2	0.714 8	0.614 8	0.768 4	0.009 5	0.747 7	0.248 2	0.397 9	0.121 9	0.746 2	0.070 0	0.342 5
2 上	0.727 3	0.529 4	0.583 3	0.812 5	0.325 6	0.131 2	0.152 3	0.092 6	0.346 9	0.199 2	0.205 6	0.639 9	0.589 7	0.190 8	0.116 8	0.800 7
2 中	0.636 4	0.176 5	0.666 7	0.687 5	0.574 5	0.291 0	0.669 7	0.616 7	0.730 0	0.586 0	0.540 3	0.948 4	0.686 9	0.174 0	0.096 9	0.674 2
2 下	0.545 5	0.352 9	0.500 0	0.812 5	0.972 9	0.807 4	0.347 6	0.778 7	0.864 3	0.925 1	0.859 3	0.901 3	0.704 2	0.316 8	0.116 1	0.739 8

3.2.4 网络的训练与测试

采用 Matlab 7.0 神经网络工具箱对网络进行设计与训练^[7]。由于网络的输入向量的范围为 [0,1],网络的隐含层神经元的传递函数采用 S 型正切函数 tansig,输出层神经元的传递函数采用 S 型对数函数 logsig,这是由于输出模型为 0~1,正好满足网络的输出要求。

训练函数采用收敛速度快的算法 Levenberg-Marquadt 反传算法,学习函数采用梯度下降动量学习算法,采用均方误差函数计算网络的误差,网络的学习速率为 0.1。在经过 2 000 次训练后 BP 对函数的逼近效果最好,网络的误差最小,而且网络经过 11 次训练就达到了目标误差 0.001,训练误差曲线如图 7 所示。

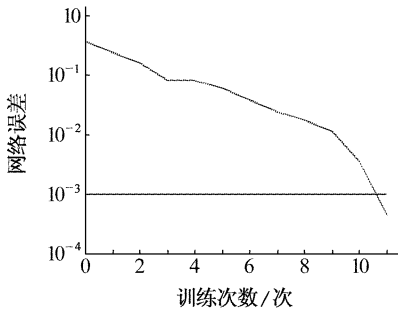


图 7 网络的训练误差曲线

网络训练完成后,输入如表 3 所示的测试样本,得到的神经网络的实际输出如表 4 所示。与网络的

表 4 神经网络的实际输出样本

测试样本输出						声发射源的位置
1	2	3	4	5	6	
0.941 4	0.000 0	0.096 3	0.003 2	0.000 0	0.000 1	叶片 1 与上冠交接处
0.639 2	0.999 2	0.000 5	0.003 5	0.006 3	0.018 9	叶片 1 背面中部
0.000 9	0.111 7	0.730 0	0.000 1	0.001 0	0.000 2	叶片 1 出水边外缘下部
0.000 1	0.006 8	0.000 2	0.849 1	0.002 5	0.000 1	叶片 2 与上冠交接处
0.000 7	0.001 5	0.041 8	0.220 5	0.978 5	0.317 3	叶片 2 背面中部

期望输出比较,按照欧式范数理论,这 6 次测试的误差分别为:0.058 6,0.000 8,0.270 0,0.150 9,0.021 5 和 0.243 3,可见误差很小,基于 BP 网络的智能定位方法完全可以满足水轮机叶片裂纹定位的要求。

4 结论

结合混流式水轮机的结构及裂纹产生部位,提出了基于 BP 神经网络的裂纹声发射源定位方法,实现从声发射参数到裂纹部位的非线性映射,并通过实验验证了该方法的可行性,为进一步深入研究混流式水轮机裂纹的在线监测技术提供了依据。对于水轮机在实际工作环境中,裂纹声发射源信号的提取和识别,有待进一步的实验研究。

参考文献:

[1] 黄文,吴彤峰,毛汉颖. 水轮机转轮叶片应力分布及其裂纹成因[J]. 实用测试技术,1999,(3):33—34.
[2] 沈功田,耿荣生,刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测,2002,24(3):114—117.
[3] 易若翔,刘时风,耿荣生,等. 人工神经网络在声发射检测中的应用[J]. 无损检测,2002,24(11):488—496.
[4] 覃大清,刘光宁,陶星明. 混流式水轮机转轮叶片裂纹问题[J]. 大电机技术,2005,(4):39—44.
[5] 李东生,黄新明,欧进萍. 改进的神经网络技术在声发射定位中的应用[J]. 无损检测,2006,28(6):288—29.
[6] Wang J H, Chang C. Identification of the number and location of acoustic sources[J]. Journal of Sound and Vibration,2005,28(4):393—420.
[7] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 Matlab7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
[8] Marwala T. Damage identification using committee of natual network [J]. ASCE Journal of Engineering Mechani-cs,2001,126(1):163—168.