

便携式人工神经网络及其在砼疲劳寿命预测中的应用

肖建清^{1,3}, 丁德馨², 徐 根³, 蒋复量²

(1. 南华大学 数理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 核资源与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;
3. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要:基于快速人工神经网络,探讨了利用线性函数对数据进行归一化的方法,结合数据归一化后的值域范围以及用于确定隐含层神经元数目的经验公式,依据网络均方差最小化原则,得到了人工神经网络的结构参数,然后将疲劳实验数据作为训练数据,建立了混凝土疲劳寿命预测的人工神经网络模型,并将其导出为一个独立的便携式模型文件。计算结果表明,该模型计算精确度高,可以方便地嵌入到各种工程软件中,能够解决混凝土疲劳寿命预测模型的准确性和实用性两大难题。

关键词:人工神经网络;混凝土;疲劳寿命;数据归一化

中图分类号:TU528.01 **文献标识码:**B

Implication of Portable Artificial Neural Network and its Practice on Fatigue Life Estimation of Concrete

XIAO Jian-qing^{1,3}, DING De-xin², XU Gen³, JIANG Fu-liang²

(1. School of math and physics, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2 School of Nuclear Resources and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Resources and Safety Engineering College, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Three linear functions are used to normalize testing results based on Fast Artificial Neural Network. Considering the range of normalized testing results and the number of neurons in hided layer determinted by empirical formula, key parameters of artificial neural network are obtained according to the principle of mean square deviation minimization. Then, an artificial neural network model for estimation of concrete fatigue life is established when testing results are studied as training data and is exported into a portable file. The calculated results have a good agreement with the testing data, and this model can be embedded into engineering software conveniently. Therefore, it can provide higher accuracy and better practicability than general one.

收稿日期:2008-12-20

基金项目:湖南省教育厅基金资助项目(07C652;08C764);湖南省安监局基金资助项目(07-17;07-29)

作者简介:肖建清(1978-),男,江西宜春人,南华大学数理学院讲师。主要研究方向:岩石力学与工程。

Key words: artificial neural network; concrete; fatigue life; data normalization

在土木工程中,大部分混凝土结构的破坏是由疲劳失效所引发的.影响混凝土疲劳寿命的因素很多,它们与疲劳寿命之间存在着非常复杂的非线性映射关系,如何简单、精确地描述这样一种关系一直是学术界和工程界的难点及热点.传统的做法^[1-4]是通过疲劳试验数据回归得到S-N曲线(wohler曲线),然后,由该曲线确定混凝土的疲劳寿命.由于只考虑到应力水平的影响,S-N曲线法计算简单,但准确度得不到很好的保证,工程应用中误差较大.后来也有一些学者^[5-9]考虑了应力水平、应力比、加载频率、加载波形以及失效概率的影响,计算精度有了一定的提高,但是由于模型复杂,不利于工程应用,而没有得到进一步的推广.

人工神经网络具有很强的非线性映射能力,可以用来解决混凝土疲劳寿命预测中的精度问题,但是,MATLAB人工神经网络工具箱不能脱离MATLAB环境,很难用于开发具有自主知识产权的应用系统,而自主开发一个人工神经网络又必须精通人工神经网络的理论知识,费时费力.FANN(Fast Artificial Neural Network Library)是一个免费的开源神经网络代码库,它使用C语言实现了多层全连接或部分连接人工神经网络,支持定长和浮点数据类型,能够跨平台运行.FANN是一个典型的BP神经网络,其丰富的激励函数,完善的结构参数,规范的数据集处理操作,使用起来十分方便.而且,基于FANN的人工神经网络可以集成到各种工程计算软件(如有限元计算软件)中,解决材料的非线性问题以及数值计算的精度问题;也可以直接应用于工程实际(例如混凝土疲劳寿命预测)中,由于训练数据来源于工程测量,因此可以减少经典理论由于模型的抽象简化而带来的误差.

基于Microsoft Visual C++ 6.0开发平台,利用FANN丰富的函数库,建立了混凝土疲劳寿命预测的便携式人工神经网络PANN(Portable Artificial Neural Network)模型.

1 PANN的实现

1.1 数据的归一化及反归一化处理

由于采集的各数据单位不一致,因而须对数据进行归一化处理.归一化处理的方法很多,如线性函数转换,对数函数转换,反余切函数转换等

等.文章采用线性函数对数据进行归一化处理,归一化函数为

$$p_n = (b - a) \times \frac{p - \min p}{\max p - \min p} + a \quad (1)$$

反归一化函数为

$$p = \frac{(p_n - a)(\max p - \min p)}{(b - a)} + \min p \quad (2)$$

其中, p 为实验数据, $\max p$ 和 $\min p$ 为实验数据中的最大和最小值, p_n 为归一化数据, b 和 a 为目标区间的上下限,例如,当 $a = 0$, $b = 1$ 时,归一化后数据就分布在区间 $[0, 1]$.

1.2 PANN的建立

训练数据归一化处理之后,首先我们要确定整个BP网络的框架.对于BP神经网络,有一个非常重要的定理,即对于任何在闭区间内的一个连续函数都可以用单隐层的BP神经网络逼近,因而一个三层BP网络就可以完成任意的 n 维到 m 维的映射.所以本文采用单隐层的BP神经网络,输入/输出层的维数根据工程实例而定,在训练数据中就得以体现.确定BP网络的整体框架后,便携式人工神经网络具体的实现步骤如图1所示:

1) 根据训练数据,优化神经网络的结构参数.具体包括:

①根据经验公式确定隐含层神经元的范围.隐含层神经元数目的选择是一个十分复杂的问题,神经元数目与问题的要求、输入/输出层维数都有着直接关系,往往需要根据经验和多次实验来确定.具体应用中可以根据以下两个公式先确定隐含层神经元数目的大概范围,

$I n_1 = \sqrt{n + m} + a$ 其中, m 为输出神经元数, n 为输入单元数, a 为 $[1, 10]$ 之间的常数.

$II n_1 = \log_2^n$ 其中, n 为输入单元数.

②确定隐含层神经元的数目.根据上一步确定的隐含层神经元的范围,以训练数据进行试算,整个神经网络均方差最小时隐含层神经元的个数为初始最优解.再考虑到网络的复杂程度,如果网络均方差变化很小,可以取隐含层单元个数的最小值作为最优解.

③确定训练函数及学习率.FANN提供了四种训练函数,用训练数据试算四种函数下网络的均方差,取均方差最小值对应下的训练函数作为最终的训练函数.FANN默认的学习率为0.7,对

网络采用 $[0.3, 0.9]$ 之间的学习率进行试算,以均方差最小化原则确定最优学习率。

④确定激励函数及斜率. FANN 中激励函数多达 13 个,运用时应该根据输入/输出层的域值选择适当的激励函数. 比如,输出层的值域为 $[0, 1]$ 时,可以选择 Sigmoid、Gaussian、Fast 以及

Bounded linear 激励函数;值域为 $[-1, 1]$ 时可以选择对称型的激励函数. 而斜率影响着网络的训练速度,也是神经网络中一个重要参数,应用时必须要在速度与精度之间寻找一个平衡点. 参照前面的方法,以均方差最小化原则确定好网络的激励函数以及斜率。

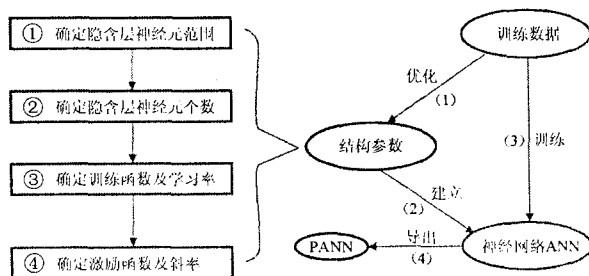


图1 PANN的建立

Fig.1 PANN's creation procedure schematics

2)根据优化后的结构参数建立人工神经网络. 我们可以创建全连接神经网络,也可以建立稀疏神经网络,遵循的原则一般是先创建全连接神经网络,计算网络的性能,再建立稀疏神经网络并计算其性能,如果两者性能差异在许可范围内,我们就可以用形式相对简单的稀疏网络代替全连接网络. 当然,稀疏网络的简化程度取决于连接率,因此,必须通过反复地实验才能最终确定稀疏网络模型。

3)以训练数据训练神经网络,得到输入/输出之间的映射关系. 人工神经网络建立后,下一步工作是用训练数据训练网络,网络通过不断的学习修正,建立起输入与输出之间的映射关系。

4)将训练好的神经网络输出为一个模型文件. FANN 提供了文件输入/输出函数,可以将训练好的网络存入到一个外部文件(例如:fatigue.net)中,这个文件包含了神经网络的所有参数,能够方便地嵌入到其他软件中。

1.3 PANN 的运用

PANN 的使用非常简单,在应用程序中导入 PANN 模型文件建立一个神经网络,输入仿真数据,网络便会给出相应的仿真结果(如图2所示). 值得一提的是,仿真数据以及仿真结果必须进行归一化及反归一化处理,因为建立网络时用的是归一化后的数据,如果仿真数据没有进行

归一化处理,网络对超越训练数据值域外的奇异样本将会因缺乏映射能力而引起较大的误差。

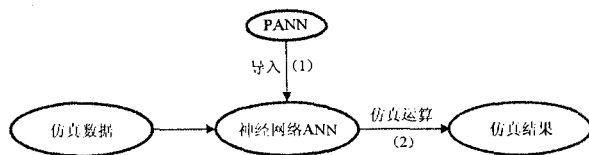


图2 PANN的应用

Fig.2 PANN's application procedure schematics

2 PANN 在砼疲劳寿命预测中的应用

2.1 输入输出模式的确定

影响混凝土疲劳寿命的因素很多,总的可分为三个方面:混凝土组构,加载条件以及环境因素. 混凝土组构指的是混凝土本身的组成及构造,这是影响混凝土力学性能最根本的原因,包括组料的属性及配比. 文章将这些影响因素归纳在混凝土的单轴抗压强度中. 加载条件包括应力水平、应力比、加载频率、加载波形等荷载作用形式,当混凝土的组构一定时,这些因素成了影响混凝土疲劳寿命的主要因素,本文将侧重于加载条件的分析. 环境因素包括水流、腐蚀、电场、磁场等,外界环境的变化将引进混凝土疲劳寿命的变化,环

境因素一般视混凝土的工程应用情况而定,理论及实验研究都具有较高的难度,本文忽略环境因素的影响.经综合分析后,确定以影响混凝土疲劳寿命的应力水平、应力比两个因素作为 PANN 网络的输入,以疲劳寿命作为网络的输出,建立一个简单的混凝土疲劳寿命预测模型.

2.2 混凝土疲劳寿命预测 PANN 模型

为了验证 PANN 的准确性和可靠性,本文引入文献[9]中的疲劳试验结果,实验数据如表 1 所示,参照文献[10]的方法,先将疲劳寿命的实验数据进行非线性变换——取自然对数,以增强数据的规律性.

表 1 疲劳试验数据
Table 1 The results of fatigue tests

应力比 R	应力水平 S	疲劳寿命 N	$\ln N$	应力比 R	应力水平 S	疲劳寿命 N	$\ln N$
0.08	0.9	9	2.197 2	0.8	0.6	883 301	13.691 4
0.08	0.85	49	3.891 8	0.8	0.6	1 956 530	14.486 7
0.08	0.85	73	4.290 5	0.8	0.6	2 032 902	14.525 0
0.08	0.85	76	4.330 7	0.8	0.6	2 672 740	14.798 6
0.08	0.85	150	5.010 6	0.8	0.55	6 437 888	15.677 7
0.08	0.85	160	5.075 2	0.8	0.55	6 652 243	15.710 5
0.08	0.85	230	5.438 1	0.2	0.9	77	4.3438
0.08	0.85	402	5.996 5	0.2	0.8	1 398	7.242 8
0.08	0.7	10 184	9.228 6	0.2	0.8	4 829	8.482 4
0.08	0.7	11 808	9.376 5	0.2	0.8	6 400	8.764 1
0.08	0.7	21 684	9.984 3	0.2	0.8	9 059	9.111 5
0.08	0.7	21 747	9.987 2	0.2	0.75	22 611	10.026 2
0.08	0.7	43 683	10.684 7	0.2	0.75	34 206	10.440 2
0.08	0.7	49 392	10.807 5	0.2	0.7	41 730	10.639 0
0.08	0.7	50 997	10.839 5	0.2	0.7	177 807	12.088 5
0.08	0.7	70 937	11.169 5	0.2	0.65	375 170	12.835 1
0.08	0.7	72 266	11.188 1	0.2	0.65	566 140	13.246 6
0.08	0.7	77 122	11.253 1	0.2	0.65	618 936	13.335 8
0.08	0.7	79 778	11.287 0	0.2	0.65	2 011 017	14.514 2
0.08	0.7	82 905	11.325 5	0.2	0.65	2 434 133	14.705 1
0.08	0.7	100 411	11.517 0	0.5	0.9	172	5.147 5
0.08	0.7	101 918	11.531 9	0.5	0.9	500	6.214 6
0.08	0.65	46 836	10.754 4	0.5	0.9	655	6.484 6
0.08	0.65	125 943	11.743 6	0.5	0.9	1600	7.377 8
0.08	0.65	129 009	11.767 6	0.5	0.9	1963	7.582 2
0.08	0.65	150 331	11.920 6	0.5	0.85	1 938	7.569 4
0.08	0.65	159 033	11.976 9	0.5	0.85	3 811	8.245 6
0.08	0.65	164 795	12.012 5	0.5	0.85	4 640	8.442 5
0.08	0.65	166 287	12.021 5	0.5	0.85	33 496	10.419 2
0.08	0.65	170 426	12.046 1	0.5	0.8	66 982	11.112 2
0.08	0.65	191 828	12.164 4	0.5	0.8	101 180	11.524 7
0.08	0.65	202 916	12.220 5	0.5	0.8	130 087	11.776 0
0.08	0.6	206 479	12.238 0	0.5	0.8	881 677	13.689 6
0.08	0.6	346 074	12.754 4	0.5	0.8	882 121	13.690 1
0.08	0.6	436 123	12.985 7	0.5	0.75	3 021 765	14.921 4
0.08	0.6	628 962	13.351 8	0.5	0.75	5 276 917	15.478 9
0.08	0.6	694 263	13.450 6				

将试验数据(剔除了 8 组仿真数据)作为训练数据,建立了一个 PANN 混凝土疲劳寿命预测模型,人工神经网络的关键参数如表 2 所示.

表2 混凝土疲劳寿命人工神经网络预测模型关键参数

Table 2 Key parameters of the ANN modal of concrete fatigue life prediction

输入层神经元	隐含层神经元	输出层神经元	训练函数	学习率	激励函数	斜率
2	11	1	INCREMENTAL	0.9	LINEAR	0.3

2.3 混凝土疲劳寿命的预测

利用8组仿真数据,由PANN仿真计算后的结果如表3所示.表中得出是最小相对误差,从表

中可以看出,模拟仿真值与试验值基本吻合,相对误差一般不超过10%,因此,基于PANN的混凝土疲劳寿命预测模型可以满足工程要求.

表3 疲劳寿命的试验值与模型估算值对比

Table 3 The comparison between tests and simulation results of fatigue life

编号	应力比 R	应力水平 S	模拟值 $\ln N$	试验值 $\ln N$	相对误差/%
1	0.08	0.85	4.428 763	4.330 7	2.26
2	0.08	0.7	10.664 92	10.684 7	0.19
3	0.08	0.65	12.743 64	12.220 5	4.28
4	0.08	0.6	14.822 36	14.798 6	0.16
5	0.2	0.8	8.352 106	8.482 4	1.54
6	0.2	0.65	14.588 27	14.514 2	0.51
7	0.5	0.9	8.206 225	7.582 2	8.23

3 结束语

在工程实际应用中,循环荷载作用下混凝土结构的疲劳失效是结构破坏的主要形式之一.影响混凝土疲劳寿命的因素很多,如应力水平、应力比、加载频率、加载波形等等,建立它们与疲劳寿命之间的显式数学关系式非常困难.考虑的因素越多,模型越复杂,虽然精确度有一定的提高,但不利于工程应用.因此,如何相对准确地描述出各影响因素与疲劳寿命之间的关系,同时保证模型的简单易用性是学术界和工程界一直追求的目标.本文利用人工神经网络超强的非线性映射能力,基于快速人工神经网络健壮的应用程序接口,探讨了建立便携式、自适应性人工神经网络的一般方法,并将这一方法应用于混凝土疲劳寿命预测中,形成了便携式预测模型,仿真计算结果表明,该模型的精度完全可以满足工程的要求,而且其方便易用的特性也有利于模型的推广应用.

参考文献:

- [1] Nieto A J, Chicharro J M, Pintado P. An approximated methodology for fatigue tests and fatigue monitoring of concrete specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(8): 835 - 842.
- [2] Lee M K, Barr B I G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforce concrete[J]. Cement &

Concrete Composites, 2006, 26(4): 299 - 305.

- [3] Abdenour Alliche. Damage model for fatigue loading of concrete[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(9): 915 - 921.
- [4] Singh S P, Kaushik S K. Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(7): 779 - 786.
- [5] Zhang B, Phillips D V, Wu K. Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48(177): 361 - 375.
- [6] Bagde M N, Petros V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(3): 169 - 196.
- [7] Bagde M N, Petros V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005, 42(2): 237 - 250.
- [8] P · r Johannesson, Thomas Svensson, Jacques de Maré. Fatigue life prediction based on variable amplitude tests—specific applications[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 966 - 973.
- [9] 石小平, 姚祖康, 李 华, 等. 水泥混凝土的弯曲疲劳特性[J]. 土木工程学报, 1990, 23(3): 11 - 22.
- [10] 吕培印, 宋玉普. 基于人工神经网络的混凝土疲劳寿命估算[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 72 - 76.