

弯扭条件下缺口参数对圆轴疲劳寿命的影响

段红燕, 芮执元, 李有堂, 何贵平, 宋 鸣

(兰州理工大学 数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 提出一种基于 Matlab 的 BP 神经网络的多因素疲劳寿命预测方法, 建立了缺口轴(缺口半径、缺口张开角和缺口深度)的神经网络疲劳寿命估算模型, 模型的预测结果与试验结果吻合较好, 表明: 这种预测方法具有较高的精度、良好的自适应和自学习的智能化特征等优点, 克服了传统计算方法计算量大, 要依赖于数学模型的缺点。

关键词: 低周疲劳; 缺口轴; 弯扭; 寿命预测

中图分类号: O346.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2013)S2-549-04

机械零件和工程构件的破坏形式大多数属于疲劳破坏。这些破坏通常是由于构件中存在缺口^[1]或缺陷, 在交变载荷的作用下引起了裂纹的萌生、扩展、最后导致断裂。轴类零件应用广泛, 转轴作为轴的一种普遍形式, 它既承受弯矩又承受扭矩, 在弯扭复合循环变应力作用下工作。交变应力^[2]的作用会导致轴的疲劳失效, 成为转轴的主要失效形式, 占轴失效的 80%左右^[3]。在工程中, 只受单向应力状态的情况是极少见的。即使外部只受单向应力状态, 在缺口处也往往是处于多轴应力状态, 因此研究多轴情况下转轴的疲劳寿命具有十分重要的意义。

轴向疲劳载荷下的断裂问题与载荷形式、切口几何参数、加载频率和断裂循环周次有关^[4]。美国学者 T. Todd Pleune^[5]运用神经网络预测低合金钢的疲劳寿命。用 1036 个疲劳试验数据训练神经网络, 从而得到最优的神经网络结构, 再用这个最优的网络预测低合金钢的疲劳寿命。此方法的优点在于: 此训练模型是基于数值的, 而不是基于网络感知器的, 即使在不知道试验数据的情况下, 优化后的神经网络模型根据训练的趋势和结构, 可以外推、扩展, 从而得到预测寿命的目的。北爱尔兰学者 S. Malinov^[6]采用多层前向反馈神经网络的方法预测钛合金的热处理参数和机械性能之间的联系, 用 MATLAB5.3 设计和训练样本。该方法的优点在于, 该网络结构具有纠错功能, 输入变量和输出变量全部标准化, 但误差仍在 10%以上。Yousef Al-Assaf^[7]用神经网络和多项分类器研究复合材料寿命预测。Cheng^[8]等人建立了一个三层 BP 神经网络模型, 在训练过程中还提出新陈代谢模型, 预测结果和试验结果有

着很好的匹配。西北工业大学的易当祥和吕国志^[9]用遗传算法优化后的三层 BP 神经网络来描述疲劳损伤的复杂关系, 对调质 45 号钢在随机载荷和两级载荷作用下, 进行疲劳寿命可靠性仿真。西南交通北京机械结构强度研究中心的张鑫和阎楚良^[10]用神经网络的方法对 45#钢缺口试样的疲劳寿命进行了仿真, 取得较好的结果。任如飞和赵明^[11]在同时考虑材料性能、几何参数和载荷随机性基础上, 以遗传算法优化后的三层 BP 神经网络模拟非线性接触部位应变幅分布, 建立应变-寿命分布模型, 用蒙特卡洛法模拟随机化的 Manson-Conffin 公式, 得出相应可靠性下的疲劳寿命。

本实验提出应用 BP 神经网络估算疲劳寿命的原理, 利用 Matlab7.0 软件, 建立圆柱轴的神经网络模型, 训练求解, 得到弯、扭变形条件下不同直径 D 、缺口张开角 α 和圆角直径 r 条件下该轴的疲劳裂纹的萌生寿命, 仿真结果与实验结果基本一致。

1 实验

45#钢作为优质碳素结构钢, 调质处理后零件具有良好的综合机械性能, 广泛应用于各种重要的结构零件, 特别是那些在交变负荷下工作的连杆、螺栓、齿轮、活塞销及轴类等, 其工艺简单, 且成本低廉, 所以应用较为普遍, 用量也较大。实现 45#钢轴类零件的疲劳寿命估算, 将具有很高的工程价值, 故试验材料选用 45#钢材料。

样本的几何形状如图 1 所示。直径: $d=16\ 18\ 20$ mm; 切口张开角: $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$; 切深: $t=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ mm; 圆角半径: $\rho=0.05\sim 1.4$ mm。

收稿日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(51065014); 甘肃省自然科学基金资助(1112RJZA004)

作者简介: 段红燕, 女, 1977 年生, 博士, 副教授, 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973566, E-mail: duanhy1634@yahoo.cn

针对疲劳试验需要专用夹具的问题，作者设计了专用夹具，如图 2 所示。工作时，底盘安装在试验台上，通过施力杆把液压驱动力 P 加载到试件上。

2 结果

在悬臂弯扭疲劳实验中可以获得，施加载荷、缺口应变幅和缺口轴断裂周次。不同载荷下的悬臂纯弯疲劳试验得到的应变-寿命曲线如图 3 所示（缺口深度 $t=2\text{mm}$ ）。由图 3 可以看出：随着疲劳寿命的增加，寿命-应变曲线越来越低。缺口半径越大，应变幅度也越来越大。

3 人工神经网络模型

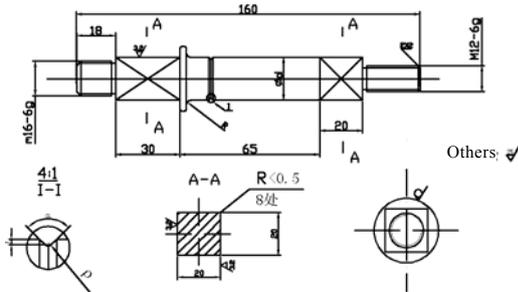


图 1 缺口轴工程图样

Fig.1 Engineering drawings of Gap axis

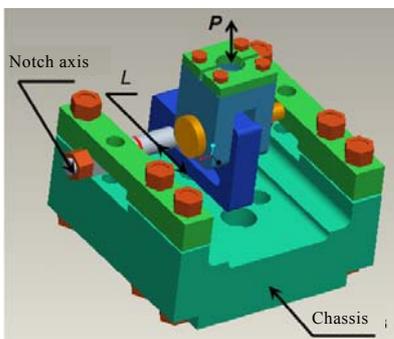


图 2 专用夹具

Fig.2 Experiment jig

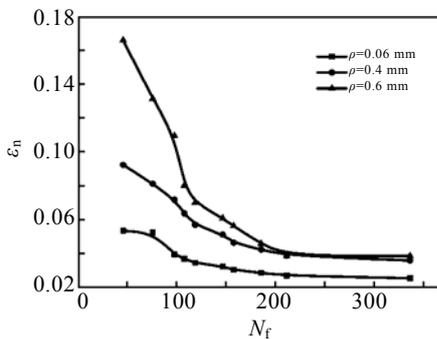


图 3 不同缺口半径弯曲试验寿命-应变曲线

Fig.3 N_f - ϵ_n curve in blank and tear load

与传统的预测模型相比，人工神经网络 (ANNS) 优点在于，它是基于现有数据库的数据或基于实时数据的，而不是基于感性认识。它属于并行结构，并行结构对于大规模、多目标非线性问题求解较容易获得精确解。再有，人工神经网络还具有概括、外推、趋势和模式的能力。预测缺口轴疲劳寿命的神经网络模型如图 4 所示。

在网络模型中，每一个输入和输出点都是 5 个样本测试数据的平均值，输出层的逻辑激励函数如下：

$$f = 1 / \{1 + \exp(-x)\} \tag{1}$$

$$n_i = \frac{1}{2}(\text{输入参数个数} + \text{输出参数个数}) + \sqrt{\text{样本个数}} \tag{2}$$

为了达到较好的预测效果，中间层采用高斯函数、高斯拓展函数以及 Tanh 函数的组合，具体公式如下：

高斯函数：
 $f = \exp(-x^2)$ (3)

高斯拓展函数：
 $f = 1 - \exp(-x^2)$ (4)

Tanh 函数：
 $f = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}$ (5)

4 讨论

4.1 弯扭载荷下缺口半径对缺口轴疲劳寿命的影响

45#钢在弯扭复合载荷作用下，缺口半径对缺口轴疲劳寿命影响的仿真结果如图 5 所示。其中 5a~5d 分别表示缺口半径 ρ 为 0.06、0.8、1.0、1.4 mm 时，缺口半径对缺口轴疲劳寿命关系的仿真结果与实验结果对照图。与实验结果比较可以看出，曲线的走势没有发生改变，随着 a/b 的逐渐增大，缺口轴的疲劳寿

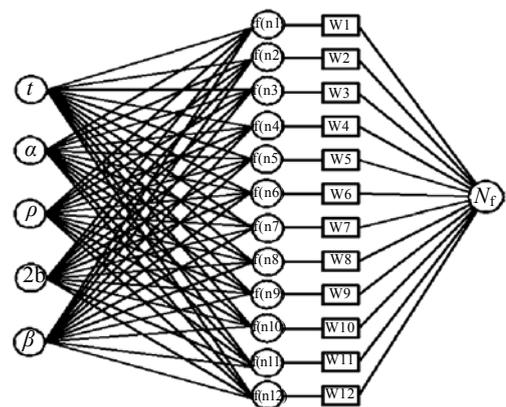


图 4 预测缺口轴疲劳寿命的神经网络模型

Fig.4 Neural network model for predicting fatigue life of notch shaft

命依旧呈现增的趋势。所不同的是，在数值上二者不等，仿真结果比实验结果偏大，但两者相差较小，在误差允许范围之内。这说明 BP 网络是预测非线性系统的良好特性，是一种较好的仿真手段。

4.2 弯扭载荷下缺口角度对缺口轴疲劳寿命的影响

45#钢在弯扭载荷作用下，缺口张开角与缺口轴疲劳寿命关系的仿真结果如图 6 所示。

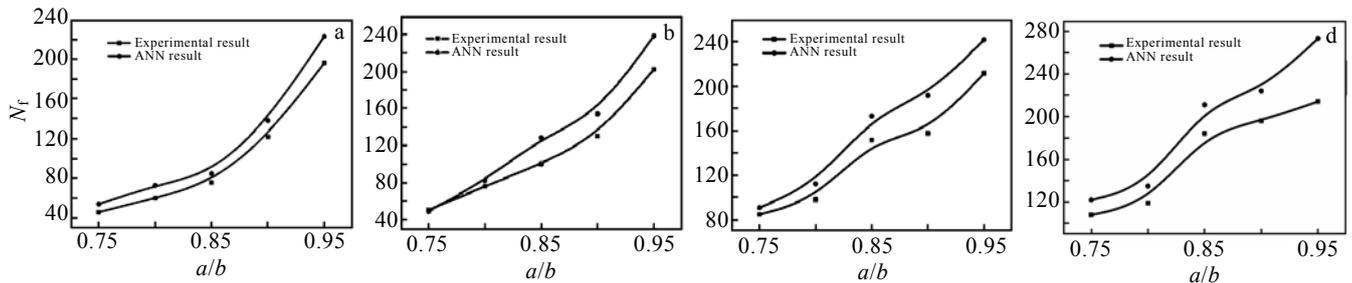


图 5 弯扭载荷下缺口半径与缺口轴疲劳寿命关系

Fig.5 cycle times vs notch tip radius in blank tear load: (a) $\rho=0.06$ mm, (b) $\rho=0.8$ mm, (c) $\rho=1.0$ mm, and (d) $\rho=1.4$ mm,

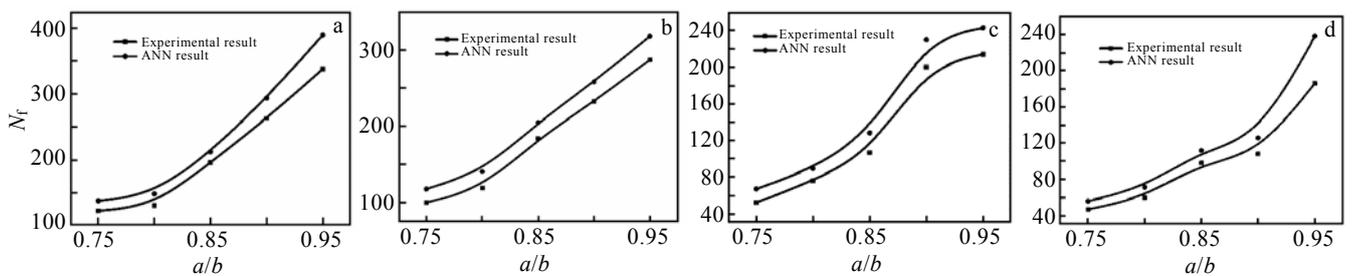


图 6 弯扭载荷下缺口张开角与缺口轴疲劳寿命关系

Fig.6 Cycle times vs notch open angle in blank tear load: (a) $\alpha=30^\circ$, (b) $\alpha=45^\circ$, (c) $\alpha=60^\circ$, and (d) $\alpha=75^\circ$

图 6a~6d 和分别表示缺口角度 α 为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 时，缺口张开角对缺口轴疲劳寿命关系的仿真结果与试验结果对照图。很显然，从图 6 可以看出，随着 a/b 的逐渐增大，缺口轴的疲劳寿命仍旧呈上升的趋势，而且两条曲线基本呈等距发展。纵观图 6 可以看到，随着缺口张开角度的增加，仿真结果越来越接近试验结果。说明 BP 网络可以较好地预测非线性系统，是一种较好的仿真手段。

4.3 BP 神经网络模型系统性能

弯扭载荷下网络训练系统的平方根误差、均方误差、绝对误差最小值和绝对误差最大值如表 1 所示。平方根误差比较接近 1，说明网络预测结果与实验结果比较吻合。

表 1 网络系统性能

Table 1 Network system performance

	Predicted value
R squared	0.9979
Mean squared error	0.014
Minimum absolute error	0.003
Maximum absolute error	0.180

参考文献 References

- [1] Wei Qingtong(魏庆同), Lang Fuyuan(郎福元). *Journal of Gansu University of Technology*(甘肃工业大学学报)[J], 1982, 7(1): 87
- [2] Su Yilin(苏翼林). *Mechanics of Materials*(材料力学)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1988: 78
- [3] Zhang Xiaosu(张晓苏). *A Science and Technology*(一拖科技)[J], 1990, 23(2): 23
- [4] Chen Chuanyao(陈传尧). *Fatigue and Fracture*(疲劳与断裂)[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 70
- [5] Todd Pleune T, Omesh K Chopra. *Nucl Eng Des*[J], 2000, 197(1-2): 1
- [6] Malinov S, Sha W, McKeown J J. *Comp Mater Sci*[J], 2001, 21(3): 375
- [7] Yousef Al-Assaf, Hany El Kadi. *Compos Struct*[J], 2007, 77(4): 561
- [8] Cheng Y, Huang W L, Zhou C Y. *Int Press Vess Piping*[J], 1999, 76(2): 113
- [9] Yi Dangxiang(易当祥), Lv Guozhi(吕国志). *China Offshore*

- Platform*(中国海洋平台)[J], 2004, 16(4): 7
- [10] Zhang Xin(张鑫), Yan Chuliang(阎楚良). *Computer Simulation*(计算机仿真)[J], 2002, 19(6): 42
- [11] Ren Rufei(任如飞), Yan Chuliang(赵明), Duan Lihui(段丽慧). *Computer Simulation*(机械科学与技术)[J], 2007, 26(5): 58

Effect of Notch Parameters on Shaft Fatigue Life in Bending and Torsion Loads

Duan Hongyan, Rui Zhiyuan, Li Youtang, He Guiping, Song Ming

(Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A kind of fatigue life prediction method was proposed based on the Matlab BP artificial neural networks. The fatigue life prediction model of gap axis has been established, about gap radius, gap depth and gap opening angle. The simulation results show that this method indicater the advantage of high precision, good adaptive and self-learning intelligent characteristics to predict the gap shaft fatigue life on gap parameters (gap radius, gap depth and gap opening angle). The calculation method overcomes the traditional shortcomings that rely on the mathematical model and a large quantity of calculation.

Key words: low cycle fatigue; gap axis; bending and torsion loads; life prediction

Corresponding author: Duan Hongyan, Ph. D., Associate Professor, College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973566, E-mail: duanhyl634@yahoo.cn