

# 利用人工神经网络实现光纤布拉格光栅传感器 对温度和应变同时测量

李靖<sup>1</sup> 刘微<sup>2</sup> 刘佳<sup>1</sup> 赵玉菊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041; <sup>2</sup> 河北化工医药职业技术学院, 河北 石家庄 050031)

**摘要** 外界温度变化与光纤应变都会导致光纤布拉格光栅(FBG)的中心波长发生偏移,由此引起 FBG 传感器在测量时的温度与应变交叉敏感问题。运用人工神经网络理论,建立 FBG 测量系统的 BP 神经网络模型,利用 Matlab 的神经网络工具箱,采取含动量项的梯度下降算法对网络进行训练,结果表明收敛速度较快。对训练后的网络进行验证,温度误差最大不超过 2%,应变误差最大不超过 5%,很好地实现了温度与应变的同时测量。

**关键词** 光纤布拉格光栅; 人工神经网络; 温度; 应变

**中图分类号** TP212.12

**OCIS** 280.4788 060.2300

**文献标识码** A

## Simultaneous Measurement of Strain and Temperature with Fiber Bragg Grating Sensor Based on Artificial Neural Network

Li Jing<sup>1</sup> Liu Wei<sup>2</sup> Liu Jia<sup>1</sup> Zhao Yuju<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050041, China  
<sup>2</sup> Hebei Vocational College of Chemical and Pharmaceutical Technology, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

**Abstract** Outside temperature variation and fiber strain can raise center wavelength excursion of fiber Bragg grating (FBG), which will cause temperature and strain crossing susceptibility when measuring with FBG. A FBG system of BP neural network with artificial neural network theory is setup by using Matlab neural network toolbox, the network in gradient descent algorithm with momentum term is trained, and the results show convergence is faster. Temperature error of the network after training is less 2%, and strain error is less 5%, which prove the realization of simultaneous measurement of temperature and strain.

**Key words** fiber Bragg grating; artificial neural network; temperature; strain

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)利用反射光中心波长作为敏感量,与光源强度、光源起伏、光纤弯曲损耗和光纤连接损耗等无关,而且有抗电磁干扰,并可在高温、腐蚀性环境中使用等优点,比传统传感器拥有更大的优势。然而温度和应变都可以改变 FBG 的中心波长。解决测量时的温度与应变交叉敏感问题,就成了 FBG 传感器研究的一个重点。近几年来,国内外学者提出了许多采用 FBG 传感器同时测量温度和应变的方案<sup>[1~6]</sup>,为 FBG 多参量同时测量奠定了基础,其中最具有代表性的有双波长矩阵运算法,包括双光栅叠加、利用 FBG 的一、二阶衍射效应等;双参量矩阵运算法,包括长周期光栅(LPG)与 FBG 混合法、利用超结构 FBG 等;应变(温度)补偿法,包括不同包层直径光纤熔接法、预应变方法等。人工神经网络具有很强的非线性逼近能力,本文将 BP 神经网络用于 FBG 传感系统中,实现了温度和应变的同时辨识。

## 2 光纤布拉格光栅传感原理

FBG 以反射光中心波长值作为变化对象,外界对光纤的应变与温度变化都会引起 FBG 中心反射波长

收稿日期: 2009-06-16; 收到修改稿日期: 2009-09-03

基金项目: 河北省教育厅自然科学基金项目(Z2009460, Z2008459)资助课题。

作者简介: 李靖(1981-),男,硕士,讲师,主要从事光纤传感与检测等方面的研究。E-mail: jinghuyue1981@163.com

的漂移。由耦合模理论<sup>[7]</sup>分析可知,它们的关系可表示为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon\lambda_B + (\alpha + \zeta)\Delta T\lambda_B, \quad (1)$$

式中  $\Delta\lambda_B$  为反射光中心波长变化量,  $\epsilon$  为应变变量,  $\Delta T$  为温度变化量,  $P_e$  为光纤有效弹光系数,  $\alpha$  和  $\zeta$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。测量出中心波长的变化量,也就间接地知道了温度和应变的情况。

### 3 BP神经网络原理

采用BP算法的多层感知器,即BP神经网络具有很强的非线性映射能力、很好的泛化能力和较高的容错能力,是神经网络在各个领域中应用最广泛的一类网络<sup>[8,9]</sup>。BP神经网络分为3层,分别为输入层、隐层和输出层,如图1所示。图中  $w_{ij}$  为输入层第  $i$  个神经元与隐层第  $j$  个神经元之间的连接权值,  $w_{jk}$  为中间层第  $j$  个神经元与输出层第  $k$  个神经元之间的连接权值,  $x_{pi}$  为输入层第  $i$  个神经元的输入,  $c_{pk}$  为输出层第  $k$  个神经元的输出,  $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,l; k=1,2,\dots,m; n, l, m$  分别为输入层、隐层和输出层的神经元数量,  $p=1,2,\dots,P, P$  为样本总数。

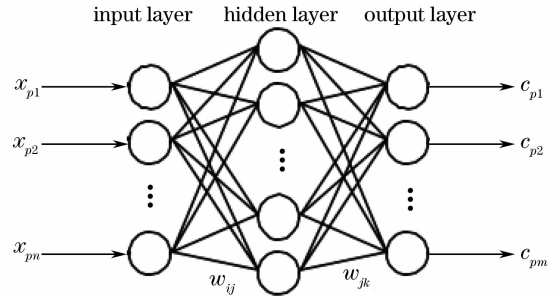


图1 BP神经网络的结构

Fig. 1 Structure of BP neural network

$$s_{pj} = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_{pi} - \theta_j, \quad b_{pj} = f(s_{pj}), \quad t_{pk} = \sum_{j=1}^l w_{jk}b_{pj} - \gamma_k, \quad c_{pk} = g(t_{pk}), \quad (2)$$

式中  $\theta_j$  为中间层第  $j$  个神经元的阈值,  $\gamma_k$  为输出层第  $k$  个神经元的阈值,  $s_{pj}, b_{pj}, t_{pk}$  分别为输入层神经元的输出, 隐层神经元的输出和输出层神经元的输出,  $f(x)$  和  $g(x)$  为神经元的激励函数。如果期望输出信号为  $y_{pk}$ , 则误差函数和权值调节公式为

$$E_p = \sum_{k=1}^m \frac{(y_{pk} - c_{pk})^2}{2}, \quad w_{ik}(t+1) = w_{ik}(t) - \beta \frac{\partial E_p}{\partial w_{ik}(t)}, \quad w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) - \beta \frac{\partial E_p}{\partial w_{jk}(t)}, \quad (3)$$

式中  $\beta$  为学习率,  $w_{ik}(t+1)$  和  $w_{jk}(t+1)$  分别为输入层到隐层和隐层到输出层第  $(t+1)$  次的权值, 神经网络的学习是通过正向计算与误差反向调整来完成的。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 数据采集

实验选取的两支FBG的中心波长分别是  $\lambda_1 = 1550.492$  nm 和  $\lambda_2 = 1549.521$  nm, 基准温度为  $25^\circ\text{C}$ 。将两支FBG并行靠在一起,并用环氧树脂粘在试棒上,可以认定两支FBG在同一时刻受到的温度和应变是相同的。分别改变外界温度和FBG的轴向应变,利用光谱仪得到不同温度和应变下FBG放射光的中心波长变化量,如表1和表2所示。

表1 FBG  $\lambda_1$  在不同温度改变和应变下的中心波长变化量

Table 1 Variation of center wavelength about FBG  $\lambda_1$  with temperature and strain

$\epsilon$	$\Delta\lambda_1 / \text{nm}$							
	$\Delta T=0^\circ\text{C}$	$\Delta T=5^\circ\text{C}$	$\Delta T=10^\circ\text{C}$	$\Delta T=15^\circ\text{C}$	$\Delta T=20^\circ\text{C}$	$\Delta T=25^\circ\text{C}$	$\Delta T=30^\circ\text{C}$	$\Delta T=35^\circ\text{C}$
0	0.00000	0.05814	0.11629	0.17443	0.23257	0.29072	0.34886	0.40700
0.0012	1.45126	1.50940	1.56755	1.62569	1.68383	1.74198	1.80012	1.85826
0.0013	1.57220	1.63034	1.68849	1.74663	1.80477	1.86292	1.92106	1.97920
0.0014	1.69314	1.75128	1.80942	1.86757	1.92571	1.98385	2.04200	2.10014
0.0015	1.81408	1.87222	1.93036	1.98851	2.04665	2.10479	2.16294	2.22108
0.0016	1.93501	1.99316	2.05130	2.10944	2.16759	2.22573	2.28387	2.34202

表2 FBG  $\lambda_2$  在不同温度改变和应变下的中心波长变化量Table 2 Variation of center wavelength about FBG  $\lambda_2$  with temperature and strain

$\epsilon$	$\Delta\lambda_2/\text{nm}$							
	$\Delta T=0\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=5\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=10\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=15\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=20\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=25\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=30\text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T=35\text{ }^\circ\text{C}$
0	0.00000	0.05501	0.11002	0.16502	0.22003	0.27504	0.33005	0.38506
0.0012	1.42866	1.48367	1.53867	1.59368	1.64869	1.70370	1.75871	1.81371
0.0013	1.57220	1.63034	1.68849	1.74663	1.80477	1.86292	1.92106	1.97920
0.0014	1.66574	1.72074	1.77575	1.83076	1.88577	1.94078	1.99578	2.05079
0.0015	1.78505	1.84006	1.89506	1.95007	2.00508	2.06009	2.11510	2.17010
0.0016	1.90436	1.95937	2.01438	2.06939	2.12439	2.17940	2.23441	2.28942

## 4.2 网络训练

实验选取的 BP 神经网络采用 3 层结构,输入层、隐层和传输层的神经元个数分别为 2,8,2,输入层含 2 个神经元,分别输入 2 支 FBG 传感器的反射光中心波长变化量,输出层含有 2 个神经元,输出温度变化量和应变变量。FBG 的有效弹光系数  $P_e$ ,热膨胀系数  $\alpha$  和热光系数  $\zeta$  是一定的,利用实验测取若干组 FBG 中心波长变化量以及相应的温度变化量和应变变量,将中心波长变化量作为输入值,经过网络运算后可以得到 1 对输出值,即温度变化量和应变变量,将网络输出值与实际值相比较,计算均方误差,当误差小于 0.01 时,认定网络收敛,此时网络训练完毕。输入层到隐层以及隐层到输出层的权值调整采用含动量项的梯度下降法,即

$$\Delta W(t) = \eta \delta \mathbf{X} + \Omega \Delta W(t-1), \quad (4)$$

式中  $\Omega$  为动量系数, $\Delta W(t)$  为本次权值调整量, $\Delta W(t-1)$  为前一次权值调整量, $\eta$  为学习步长, $\mathbf{X}$  为输入向量, $\delta$  为连续感知器学习规则。

全部训练的实现过程运用 Matlab 的神经网络工具箱来实现。隐层的传递函数选择 s 型的对数函数  $\text{logsig}(x)$ ,传输层的传递函数选择线形函数  $\text{purelin}(x)$ ,性能函数选择均方误差函数  $\text{mse}(x)$ ,学习函数选择含动量项梯度下降函数  $\text{learngdm}(x)$ 。由工具箱生成的神经网络如图 2 所示。利用 Matlab 工具箱进行神经网络的训练,结果如图 3 所示,100 步后其均方误差为 0.00747,达到了理想的收敛效果。

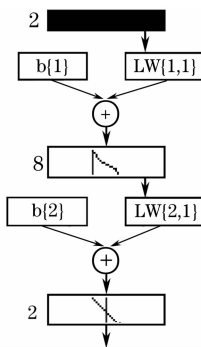


图 2 Matlab 工具箱生成的神经网络

Fig. 2 Neural network by Matlab toolbox

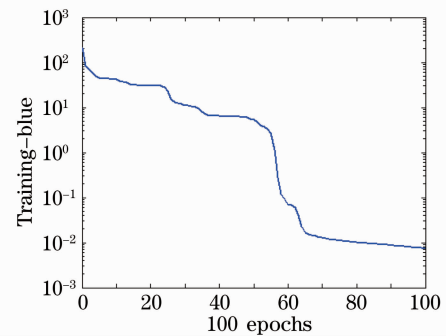


图 3 BP 神经网络训练结果

Fig. 3 Result after training by BP neural network

此时,任取  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2$  的 3 组值作为输入,记为  $P=[1.6319\ 1.69\ 1.7482; 1.5937\ 1.6487\ 1.7037]$ ,对应的温度与应变的真实值为  $O=[15\ 20\ 25; 0.0012\ 0.0012\ 0.0012]$ 。将  $P$  代入训练好的网络进行模拟验证,输出结果为  $V_o=[14.9841\ 20.0076\ 25.0581; 0.0012\ 0.0012\ 0.0012]$ ,并与  $O$  进行比较计算误差,结果为  $V_E=[0.015925\ -0.0075749\ -0.058127; -9.6928 \times 10^{-17}\ -9.6928 \times 10^{-17}\ -9.6928 \times 10^{-17}]$ 。可以看出,训练后的神经网络可以很好地进行温度与应变的同时辨识。

## 4.3 网络效果验证

为了验证 BP 神经网络的学习效果,选用训练值之外的不同温度变化和应变下得到的中心波长值作为检验样本,将样本数据导入网络进行检验,得到温度变化量和应变变量的训练值与真实值相比较,部分数据如表 3 所示。其中温度误差最大不超过 2%,应变误差最大不超过 5%,可见人工神经网络对于温度和应变的同时辨识具有较好的效果。

表3 部分神经网络输出值与真实值

Table 3 Part outputs of neural network and true value

Variation of center wavelength /nm		Temperature /°C	Strain	Error	
				Temperature /°C	Strain /10 <sup>-5</sup>
$\Delta\lambda_1=1.49235$	True value	3	0.0012	-0.049125	
$\Delta\lambda_2=1.46166$	Output of network	3.0491	0.0012554		-5.5379
$\Delta\lambda_1=1.70554$	True value	12	0.0013	-0.0053815	
$\Delta\lambda_2=1.71174$	Output of network	12.0054	0.0012507		4.93489
$\Delta\lambda_1=1.88772$	True value	17	0.0014	0.038363	
$\Delta\lambda_2=1.85276$	Output of network	16.9616	0.0013958		4.2152
$\Delta\lambda_1=2.01564$	True value	28	0.0014	0.0005401	
$\Delta\lambda_2=1.97378$	Output of network	27.9995	0.0013621		0.03792

## 5 结 论

利用 BP 神经网络解决了 FBG 传感中温度与应变交叉敏感的问题,经过 BP 神经网络的处理,可以很好地实现了温度和应变的同时测量,温度误差最大不超过 2%,应变误差最大不超过 5%,可见,使用 BP 神经网络对 FBG 传感器进行数据处理是可行的,并具有一定的实用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 867~869  
王目光,魏 淮,童 治 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 867~869
- 2 He Meng, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. A wide range fiber Bragg grating demodulation method based on thin film filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 53~57  
何 萌,刘铁根,江俊峰 等. 基于薄膜滤波器技术的大量程光纤布拉格光栅解调方法[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(5): 53~57
- 3 Rong Min, Zhang Lianshui. Liquid content measurement with fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(5): 65~68  
荣 民,张连水. 光纤光栅传感器检测液体浓度[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(5): 65~68
- 4 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235  
黄 锐,蔡海文,瞿荣辉 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2005, **32**(2): 232~235
- 5 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Displacement and temperature simultaneous measurement with single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Senser Actuators*, 2005, **18**(2): 358~362  
尉 婷,乔学光,贾振安 等. 单光纤光栅实现位移、温度同时区分测量[J]. 传感技术学报, 2005, **18**(2): 358~362
- 6 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1401~1405  
郭 团,乔学光,贾振安 等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1401~1405
- 7 Liao Yanbiao. *Fiber Optics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 8 Han Liqun. *Theory, Design and Application of Artificial Neural Network*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007  
韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- 9 Shao Jun, Liu Junhua, Qiao Xueguang *et al.*. Study on increasing selectivity of fiber Bragg grating pressure sensor with BP neural network[J]. *Chinese J. Senser Actuators*, 2007, **20**(7): 1531~1534  
邵 军,刘君华,乔学光 等. 利用 BP 神经网络提高光纤光栅压力传感器的选择性[J]. 传感技术学报, 2007, **20**(7): 1531~1534