

光纤光栅应变传感器温度补偿

黄建明 张明达

(西安航天计量测试研究所 西安 710100)

摘要: 光纤光栅传感器在应变测量方面有着非常广泛的应用。但在测量过程中受温度和应变两种因素的影响,常会导致测量结果的准确度受到一定程度的影响,不能很好的满足实际需要。采用BP神经网络算法,通过实验样本训练建立神经网络结构,来降低温度对测量结果误差的影响。通过实验验证,在整个传感器温度测量范围内,使用BP神经网络可以有效的降低由温度引起的最大测量误差,使误差可以控制在一定范围内,对传感器的使用具有重要意义。

关键词: FBG;神经网络;温度补偿;应变传感器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Temperature compensation of fiber bragg grating strain sensors

Huang jianming Zhang Mingda

(Measuring and Testing Institute under Xi'an Aerospace Corporation Research Center, Xi'an 710100, China)

Abstract: Fiber bragg grating sensor has been widely used in the strain measuring at present, but because the cross influence of strain and temperature, the sensor measurement accuracy is limited certainly, and it can't meet the practical requirement of industrial. In this paper, temperature compensation of FBG sensor experimental data by BP neural network method, in order to reduce influence by temperature. in the whole temperature range, the relative maximum error of the measured can be reduced by using BP neural network method. Error is controlled in range. it has important meaning to the useful of sensor.

Keywords: FBG; neural network; temperature compensation; strain sensor

1 引言

光纤光栅在传感方面具有优越性能,使得它被广泛地应用于航空航天、船舶、石油化工、电力等多个领域^[1]。光纤光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器应变测量原理是通过波长变化反馈测量信号。FBG受应变和温度两种因素影响,应变和温度均能对光栅中心波长产生影响。所以,将FBG应用于应变测量时,环境温度的变化会对应变测量结果会产生明显影响^[2]。在进行结构的应变监测时,消除温度对测量数据影响,获得由荷载引起的结构真实应变值,是非常必要的。目前,已经有采用各种方法进行消除温度影响^[3-6]。本文提出了基于BP神经网络算法对测量结果进行温度补偿。

2 光纤光栅应变与温度测量原理

光纤光栅中波长受折射率和调制周期的影响,温度或

应变的改变会导致光栅的折射率以和调制周期的变化,从而导致光栅中波长发生变化。通过测量光纤光栅中波长变化情况,就可以通过计算获得相应的温度改变或应变的情况。如果降低或消除温度对光纤光栅中波长的影响,就可以通过光纤光栅中波长变化推算应变值,这就是通过光纤光栅测量应变值的基本原理。

当改变应变值或温度值,将导致光纤光栅波长的发生变化^[7-9],如式(1)所示。

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中: Λ 为调制周期; n_{eff} 为折射率。由式(1)可以看出,温度对 λ_B 造成的影响主要是由热光效应引起的折射率 n_{eff} 的变化或温度的变化产生导致光纤热膨胀引起的周期的改变。当应变发生波动时,会导致 λ_B 发生改变,是由光栅受应力变化会导致的 n_{eff} 的变化;光栅受应力变化,会导致质点发生位移,导致使 Λ 发生变化。

3 基于 BP 神经网络温度补偿

3.1 BP 神经网络

在神经网络模型中 BP 网络是应用最多的一种,它采用 3 层结构,第 1 层是输入层,第 2 层是隐含层最后是输出层。前一层节点数据通过变化输入下一层每个节点中去,同一层节点与节点不连接,如图 1 所示。

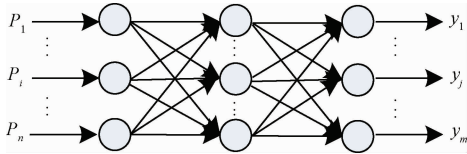


图 1 BP 神经网络结构

BP 网络运行时,信息通过正向传递、误差采用逆向传递的方式。正向传递是信息通过输入层到隐含层再到输出层,将输出层输出结果与设定期望的结果进行比较,如果没有达到期望,将误差逆向传递,使网络结构进行调整,直到输出结果达到期望。

3.2 BP 神经网络温度补偿原理

采用 BP 神经网络降低或消除温度对应变传感器的影响的方法是将传感器的输出波长和温度作为 BP 神经网络的输入,通过 BP 神经网络模型降低或消除温度变化对的结果的影响。如设温度为 t ,应变输入值为 x ,光纤光栅传感器输出波长值为 y ,BP 神经网络的输出值应变值 x' 与应变传感器输入值 x 应该能无限逼近。BP 神经网络温度补偿模型如图 2 所示。

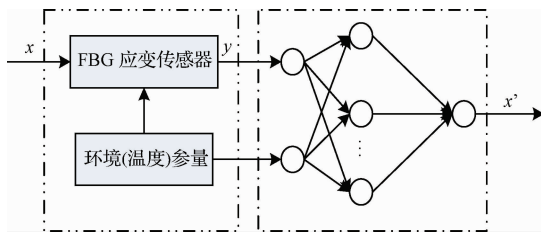


图 2 BP 神经网络补偿模型

图 2 中,光纤光栅应变传感器的测量模型,即传感器的输出输入关系表达式为:

$$y = f(x, t) \quad (2)$$

式中: x 为待测目标参量(应变); t 为非目标温度参量; y 为传感器输出量; x' 为传感器经过 BP 神经网络温度补偿后的应变值。

将 y 和 t 输入到训练好了的 BP 神经网络中处理后,神经网络的输出值 x' 即为消除了温度影响后的被测量应变值。

3.3 BP 神经网络结构的确定

构造一个 BP 神经网络,首先需要确定 BP 神经网络

的网络结构。即确定输入层、输出层和隐含层中的神经元个数。根据图 2 的补偿原理,确定本文 BP 神经网络输入层的神经元个数为 2,输出层的神经元个数为 1,因此只需要确定隐含层中的神经元个数。

BP 神经网络的泛化能力是训练好的网络对非训练样本的预测拟合能力,是构建神经网络模型性能重要指标。神经网络中增加隐含层层数能提高网络的泛化能力,但增加隐含层的层数会需要更多的训练时间,同样隐含层的神经元过多容易造成网络泛化能力降低,而隐含层的神经元过少网络收敛速度降低。因此,隐含层神经元的数量对于该 BP 神经网络的泛化能力非常重要。BP 神经网络对非线性映射具有很强的能力,所有采用 BP 神经网络能进行很好的非线性拟合是常用方法。BP 神经网络中隐含层的神经元数量的确定没有确切方法,一般采用输入层神经元数量的 2 倍作为隐含层神经元的初始数量,再根据训练的结果进行调节,本文的隐含层的神经元数设置为 5 个。因此,采用的神经网络的具体结构为输入层神经元个数为 2,隐含层神经元个数为 5,输出层神经元个数为 1。

4 试验和结果分析

4.1 试验设计

试验方案采用在 多组恒定载荷下,利用恒温装置获取不同温度环境下的传感器应变输出的方法。对试验中测试获得的温度应变数据采用 BP 神经网络进行温度补偿。

试验测试传感器为金属封装光纤应变传感器,试验平台采用等强度梁,恒温环境使用伟斯富奇环境仪器有限公司生产的 C7-340 型恒温恒湿箱。将等强度梁放置于恒温箱中,其温度通过恒温箱进行控制,通过在等强度悬臂梁悬挂的载荷产生测量应变值,同时使用应变片进行测量悬臂梁的实际应变值。

等强度悬臂梁悬挂载荷时,会随着悬臂梁载荷的改变使 FBG 的中心波长会而发生漂移。等强度梁弯曲时其表面应变 ϵ 计算公式为^[10]:

$$\epsilon = \frac{6FL}{BEh^2} \quad (3)$$

式中: F 为在悬臂梁加载的载荷; L 为悬臂梁的长度; B 为悬臂梁的宽度; h 为悬臂梁的厚度; E 为悬臂梁弹性模量,在试验中 L 、 B 、 h 、 E 取值分别为 400 mm、50 mm、3.5 mm、208 MPa。其载荷—应变关系为:

$$\epsilon = \frac{6 \times 400}{208 \times 50 \times 3.5^2} F = 0.0188383 F \quad (4)$$

采用恒定湿度 50%,在等强度悬臂梁在 1.5 kg、2.5 kg、3.5 kg、4 kg、4.5 kg 载荷下,温度设定在 0~40℃ 内,由 0℃ 开始,4℃ 步进,达到需求温度并稳定至传感器数据不再明显变化后记录数据。数据如表 1 所示。

表 1 应变传感器实验标定数据

温度/℃	1.5 kg	2.5 kg	3.5 kg	4 kg	4.5 kg
	标定值为 276.923 时的测量值/ $\mu\epsilon$	标定值为 461.538 时的测量值/ $\mu\epsilon$	标定值为 646.153 时的测量值/ $\mu\epsilon$	标定值为 738.461 时的测量值/ $\mu\epsilon$	标定值为 830.769 时的测量值/ $\mu\epsilon$
0	229.433	382.387	535.853	611.458	688.287
4	299.605	453.108	607.034	681.966	758.238
8	368.22	524.118	675.058	750.835	830.378
12	437.939	593.983	745.821	818.698	901.508
16	508.500	664.867	816.678	890.622	972.648
20	579.157	735.763	888.603	961.535	1 045.811
24	649.821	806.661	960.888	1 031.452	1 117.999
28	721.455	876.556	1 028.324	1 100.358	1 186.113
32	794.559	947.472	1 101.511	1 172.659	1 258.300
36	866.299	1 021.436	1 172.673	1 246.879	1 331.695
40	938.525	1 093.381	1 246.31	1 319.073	1 404.868

4.2 温度补偿

按照 2.3 节所述建立 BP 网络模型对试验数据进行温度补偿。BP 神经网络的具体结构为输入层神经元个数为 2, 隐含层神经元个数为 5, 输出层神经元个数为 1^[11-12]。

隐含层使用 Sigmoid 函数, 输出层的计算使用线性 Pure-line 函数; 最大迭代次数设为 1 700; 训练函数为 trainlm; 学习速率为 0.01; 学习函数为 learnngdm; 最终的 BP 网络测试结果如表 2 所示。

表 2 融合后的应变拟合值与标定值对比

温度/℃	应变/ $\mu\epsilon$				
	276.923	461.538	646.153	738.461	830.769
0	276.923	461.377	650.194	741.017	829.505
4	278.808	461.185	650.563	740.581	828.466
8	277.061	461.347	647.084	738.208	829.880
12	275.747	460.106	646.943	734.643	830.163
16	275.388	460.113	646.918	735.881	830.456
20	275.138	460.136	648.195	735.922	833.012
24	274.895	460.160	649.911	734.785	834.475
28	275.752	458.956	645.713	732.450	831.387
32	278.278	459.003	648.530	734.136	832.851
36	279.257	462.784	648.876	738.089	830.758
40	280.790	464.092	647.337	734.741	833.316

4.3 补偿效果及分析

由表 2 所示的拟合结果可看出, 经数 BP 神经网络处理后的拟合结果与实验标定值相近, 由温度引起的误差可以控制在较小范围内, 认定该模型是可靠的^[13]。

用 BP 神经网络算法处理前后的温度变化造成测量结果的最大相对误差来评价温度因素影响程度, 其计算公式为:

$$e = \frac{|\epsilon_t - \epsilon_{\text{标}}|}{\epsilon_{\text{标}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\epsilon_{\text{标}}$ 为试验标定应变值; ϵ_t 为在温度 t 和试验标定应变 $\epsilon_{\text{标}}$ 值, 对应 BP 神经网络的输出值。

由表 1 标定数据可知, 随温度升高, 输出应变值增加, 温度变化引发最大相对误差变大。其计算结果为:

$$e = \frac{938.525 - 275.388}{275.388} \times 100\% = 238.9\% \quad (6)$$

由表 2 融合处理后数据可知, 在测量温度范围内, 应变拟合值不再随温度变化而跟随上升或下降变化, 而是在标定值一定范围内随机波动。在量程为 276.923 $\mu\epsilon$ 时, 温度变化造成的相对误差最大为:

$$e' = \frac{280.79 - 276.923}{276.923} \times 100\% = 1.4\% \quad (7)$$

由以上可以看出, 利用 BP 神经网络方法融合处理后

的温度变化造成的相对误差最大值由 238.9% 降低为 1.4%，由温度因素造成的测量应变误差得到明显改善。

5 热补偿建模及仿真结果分析

通过实验可知,利用 BP 神经网络算法,在对光纤光栅传感器应变测量过程中可以有效降低温度对测量结果的影响^[14-15]。通过 BP 神经网络处理后,温度变化引起的相对误差最大值由 238.9% 降低为 1.4%，温度对测量结果造成的影响大大减弱。与其他通过改变光纤传感器硬件设计相比,利用 BP 神经网络削弱温度因素造成的测量结果误差,对传感器硬件无需改动,有助于降低生产成本。

参考文献

- [1] 吴俊,陈伟民,章鹏,等. 金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12): 2709-2713.
- [2] 杨樟成,徐汉锋,董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(5):21-28.
- [3] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用,2012,27(1): 49-53.
- [4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [5] 樊晓宇. 光纤光栅应变传感器温度补偿系统研究[J]. 光通信技术,2012,36(6):7-9.
- [6] 金秀梅. 光纤光栅应变,温度交叉敏感问题研究现状分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报,2011,10(2): 53-56.
- [7] 刘明尧,卢一帆,张志建. 基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报,2016,37(10): 2392-2398.
- [8] 魏鹏,李丽君,郭俊强,等. 光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感问题研究[J]. 应用光学,2010,29(1):105.
- [9] 缪长青,田洪金,肖迎春,等. 基于小波多分辨力的光纤应变监测信号的多尺度分析研究[J]. 计测技术,2013,33(4):15-20.
- [10] 孟展,陈瑞霞,金何,等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光,2011,22(3): 343-346.
- [11] 糜小涛,于宏柱,高键翔. 大型衍射光栅刻划机微定位系统控制器设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(2): 473-480.
- [12] 郭小辉,黄英,袁海涛. 柔性复合传感器阵列信号采集及温度补偿系统[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(11):1254-1261.
- [13] 李红,祝连庆,刘锋. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8): 1744-1750.
- [14] 马丹,葛俊锋,叶林. 光纤点式液位传感技术的研究现状[J]. 国外电子测量技术,2015,35(9):92-95.
- [15] 张东生,姚开方,罗裴,等. 一种新型的光纤光栅高频加速度传感器[J]. 仪器仪表学报,2009,30(7): 1400-1403.

作者简介

黄建明,硕士研究生,工程师,主要研究方向为计量仪器、仪表,嵌入式系统等。

张明达,硕士研究生,工程师,主要研究方向为计量仪器、仪表,嵌入式系统等。

E-mail:147557164@qq.com

(上接第 69 页)

- [5] 谭亲跃. 大容量脉冲功率系统对电能质量的影响研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [6] TANKARI M A, CAMARA M B, DAKYO B, et al. Use of ultracapacitors and batteries for efficient energy management in wind diesel hybrid system[J]. IEEE Trans. Sustainable Energy,2013,4(2):414-424.
- [7] ALESSANDROL, LUCA S, FABIO C. Adaptive direct-tuning control for variable-speed diesel electric generating units[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(5):2126-2134.
- [8] 韩航星,严豪杰,许晔,等. 脉冲负载作用下衡量电压畸变率的方法研究[J]. 现代雷达,2016,38(2):70-74.
- [9] 姜孝华,彭啸亚,肖秀春. 滑动窗 Walsh 基函数神经网络检测电能质量扰动[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(3):74-78.

作者简介

吕闯,1993 年出生,硕士研究生。研究方向为装备电力系统理论与技术。

E-mail:15638524379@163.com

解璞,1977 年出生,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为装备电力系统理论与技术。