

文章编号: 0258-7025(2002)07-0600-05

光纤电压传感器的温度跟踪补偿

汪晓东, 叶美盈

(浙江师范大学数理与信息科学学院, 浙江金华 321004)

提要 分析了光纤电压传感器的温度特性, 表明测量范围较宽时, 传感器的输出易受环境温度的影响, 并且呈非线性。提出一种基于人工神经网络的光纤电压传感器温度跟踪补偿方法。利用神经网络具有逼近任意非线性函数的特点, 通过训练使神经网络建立在不同环境温度下传感器输出与其实际感受的电压值之间的非线性映射关系, 实现光纤电压传感器温度全程跟踪补偿。计算机仿真表明, 该方法不仅能有效地消除温度的影响, 而且能在神经网络的输出端得到期望的线性输出。

关键词 光纤传感器, 电压, 温度, 非线性, 神经网络, 补偿

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Temperature Tracking Compensation of Fiber Optic Voltage Sensor

WANG Xiao-dong, YE Mei-ying

(College of Mathematics, Physics and Information Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Abstract The output characteristic of fiber optic voltage sensor is analyzed. It is found that the response of the voltage sensor is nonlinear and the sensor suffers from the influence of temperature over a wide measuring range. A method for temperature tracking compensation of fiber optic voltage sensor based on artificial neural network is presented in this paper. In order to realize temperature tracking compensation over a full range, the neural network is trained to properly represent the nonlinear mapping between the sensor reading and their represented output accurately at different environmental temperature. It is revealed from the computer simulation result that not only the influence of temperature fluctuation can be eliminated effectively, but also a desired linear relationship between the sensor input and the neural network output can be obtained.

Key words fiber optic sensor, voltage, temperature, nonlinear, neural network, compensation

1 引言

光纤电压传感器利用光纤完成信号的传输, 利用晶体的特定物理效应来感应电压, 具有抗电磁干扰、电绝缘性能好、体积小、重量轻及测量精度高, 并可以同光纤传输网联网, 实现系统的遥测及监控等一系列传统电磁互感器所不具备的优点, 特别适合于电力系统的测控^[1]。作为近年来发展起来的一种新型电压测量设备, 光纤电压传感器将在电力系统中获得广泛的应用。

近年来, 用于电力系统测量高电压的光纤电压互感器的实用化研究已取得了很大进展^[2]。但仍存在着长期稳定性问题, 例如测量结果受环境因素(主

要是温度)的干扰而波动, 这是光纤电压传感器走向实用化必须解决的关键问题。如何解决这些问题已成为目前研究该类传感器的主攻方向。虽然一些研究者对光纤电压传感器的温度特性进行了研究^[3, 4], 但这些研究是在假定待测电压和环境温度的变化不太大的条件下进行的。本文在这些研究的基础上, 分析了待测电压和环境温度在较大范围变化时光纤电压传感器的温度特性, 指出在这种情况下传感器的输出特性是非线性的, 并且环境温度的影响不易用传统方法消除。

随着人工智能技术尤其是人工神经网络的发展, 为传感器的信号处理提供了新的有效手段, 可在降低对传感器敏感材料性能的要求下, 提高传感

收稿日期 2001-06-04; 收到修改稿日期 2001-08-13

作者简介 汪晓东(1958—), 男, 浙江师范大学数理与信息科学学院副教授, 主要从事光电子技术和传感器技术的研究。

E-mail: jh-xdwang@163.net

器的检测性能。本文提出用人工神经网络实现光纤电压传感器温度全程跟踪补偿,并同时实现传感器输出特性的非线性校正的方法。计算机仿真表明该方法是有利的。

2 工作原理

2.1 光纤电压传感器的输出特性

光纤电压传感器的传感头结构如图1所示。中心波长为 λ 的光线沿 z 方向传输,起偏器、检偏器及 $\lambda/4$ 波片的快轴与 x 轴的夹角分别为 η 、 θ 及 $-\pi/4$ 。检偏器输出的两个正交偏振态分别与 x 和 y 方向平行。

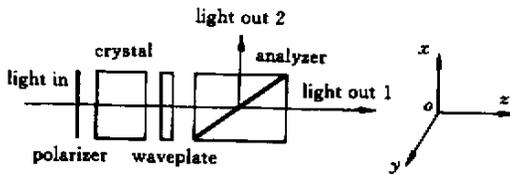


图1 传感头的结构

Fig.1 Configuration of the sensing head

设通过起偏器后的入射光电矢量为 E_{in} ,若石英晶体, $\lambda/4$ 波片及检偏器的琼斯(Jones)矩阵分别为 J_c 、 J_{wp} 及 J_A ,则输出光的电矢量为

$$E_{out} = J_A J_{wp} J_c E_{in} \quad (1)$$

设输出光1和输出光2两个方向检测到的光强分别为 P_A 和 $P_{A'}$,为了消除光功率变化等因素的影响,两个信号经光电变换后作如下处理,则有^[4]

$$S = (P_A - P_{A'}) / (P_A + P_{A'}) = \cos K \sin 2\theta \sin 2\eta - (4\rho\beta/K^2) \sin^2(K/2) \cos 2\theta \cos 2\eta - (\beta/K) \sin K \cos 2\theta \sin 2\eta + (2\rho/K) \sin K \sin 2\theta \cos 2\eta \quad (2)$$

根据式(4)和式(5)及 β 、 ρ 与 V 、 t 的关系, S_1 和

其中石英晶体总的相位延迟

$$K = \sqrt{\beta^2 + (2\rho)^2} \quad (3)$$

式(3)中, $\beta = \pi V/V_\pi$ 表示因外加电压由晶体普克尔效应引起的相位延迟, V 为待测电压, V_π 为晶体的半波电压。如检测出 β ,则可求出待测电压 V 。 ρ 表示温度变化时,由晶体旋光效应产生的相移,为了表示其受温度的影响,可将其改写为 $[\rho(1 + (\partial\rho/\partial t)\Delta t)]$

若起偏器位置 $\eta = 0$,检偏器位置 $\theta = 0$,则根据式(2)及式(3),并将 S 记为 S_1 ,可得

$$S_1 = -\frac{4\rho\beta}{\beta^2 + (2\rho)^2} \sin^2 \frac{\sqrt{\beta^2 + (2\rho)^2}}{2} \quad (4)$$

同理,若起偏器位置 $\eta = 0$,检偏器位置 $\theta = \pi/4$,将 S 记为 S_2 ,可得

$$S_2 = \frac{2\rho}{\sqrt{\beta^2 + (2\rho)^2}} \sin \sqrt{\beta^2 + (2\rho)^2} \quad (5)$$

当作用于晶体的待测电压和环境温度发生变化时, β 及 ρ 将改变, S_1 和 S_2 也随之而变。即 S_1 不仅受待测电压 V 的影响,同时还受环境温度 t 的影响, S_2 也同样。并且 S_1 和 S_2 是非线性函数。因此,当测量范围较大且环境温度变化大时,无论是 S_1 还是 S_2 均不能直接作为测量输出。

2.2 光纤电压传感器温度跟踪补偿与非线性校正的神经网络方法

光纤电压传感器的温度跟踪补偿与非线性校正原理如图2所示。图中 P 为起偏器,NPS为消偏振的半透半反分束镜,WP为 $\lambda/4$ 波片(λ 为光源的波长), A_1 和 A_2 为棱镜检偏器,其中 A_1 的两个正交偏振态中的一个与外界场平行, A_2 的两个正交偏振态与相应的 A_1 的两个正交偏振态分别成 $\pi/4$ 夹角, $D_1 \sim D_4$ 为光电探测器。两个方向检测到的光强信号预处理后送神经网络进行补偿。 S_2 可描述为

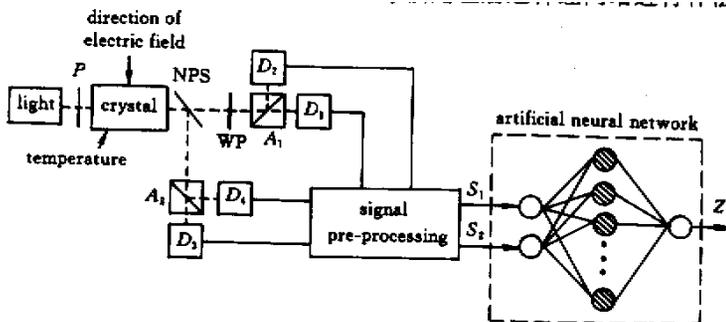


图2 光纤电压传感器的温度跟踪补偿原理

Fig.2 Schematic diagram of temperature tracking compensation of fiber optic voltage sensor

$$\begin{cases} S_1 = f_1(V, t) \\ S_2 = f_2(V, t) \end{cases} \quad (6)$$

$f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 均为非线性函数,不能直接根据式(6)求解 V 和 t 。但如果在待测电压和环境温度变化的范围内, V, t 与 S_1, S_2 是一一对应的,则由式(6)可得

$$V = g(S_1, S_2) \quad (7)$$

虽然 $g(\cdot)$ 仍是非线性函数,并且根据式(4)和式(5)可知,不能用解析式显式表示,但可利用前向神经网络能够以任意精度逼近非线性函数^[5]的特点实现

$$Z = cV = cg(S_1, S_2) \quad (8)$$

其中, c 为常数。这样只要把传感器的输出 S_1 和 S_2 加在前向神经网络的输入端,在神经网络的输出端就可得到与待测电压 V 成理想线性关系且与环境温度 t 无关的输出 Z 。

2.3 神经网络训练样本的获取及网络结构参数和训练算法的选择

为了实现光纤电压传感器的温度跟踪补偿,必须先选择神经网络结构,并用合适的样本数据按一定的训练算法对神经网络进行训练。由于神经网络的结构、训练神经网络的样本数据及训练算法是影响光纤电压传感器的温度跟踪补偿效果的重要因素,因此下面将对这些计算参数的选取原则进行说明。

对于神经网络的结构,我们希望在能实现有效补偿的情况下,采用尽可能简单的结构。这里需要确定的是网络隐层的层数以及网络各层的神经元数量。如图3所示,由于神经网络要接收两个由传感器送来的信号 S_1 和 S_2 ,并要求输出一个与温度无关的信号 Z ,因此输入层和输出层的神经元数量分别取2和1。已经证明有一个隐层的前向神经网络可以实现任意非线性映射^[5],故采用包含一个隐层的三层神经网络。隐层神经元数量的选择至今尚无明确的理论指导,但已知若隐层神经元数量过少会影响网络的非线性映射性能,过多则会增加计算复杂度,同时使网络的推广性能下降。在实际使用中,隐层神经元数量通常通过试验决定,本文隐层取40个神经元可以得到较好的补偿效果。

训练神经网络的样本数据可由传感器的数学模型计算得到,即给定 V 和 t ,利用式(4)和(5)算出

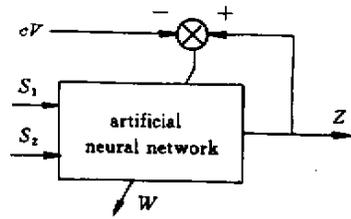


图3 神经网络的训练

Fig.3 Training the neural network

S_1, S_2 得到一组离散的反映 V 与 S_1, S_2 之间关系的训练样本。样本数据也可直接通过实验取得,即实验时取不同的待测电压 V 和环境温度 t ,然后测得相对应的 S_1, S_2 ,同样可以得到上述训练样本。训练样本应覆盖整个测量空间,即 V 和 t 的选取应覆盖待测电压和环境温度可能的变化范围。并且训练样本之间的间隔不能太大,否则影响网络的推广性。

因训练前向神经网络的标准BP算法收敛速度慢,且在训练过程中易陷入局部最小点,故在训练神经网络时采用易收敛的改进的BP算法,即以Levenberg-Marquardt优化方法^[6]调整权值,缩短训练时间。训练方法如图3所示。以上述样本数据中的 S_1, S_2 作为神经网络的输入,并以 cV 作为神经网络的期望输出,对神经网络进行训练。训练时神经网络的实际输出 Z 与期望输出不断地进行比较,并根据两者之差,应用神经网络训练算法调整网络的权值,使不断逼近 cV ,直到误差平方和满足

$$\sum_{i=1}^m [Z(i) - cV(i)]^2 \leq \epsilon \quad (9)$$

或训练达到预先给定的循环次数。式(9)中, m 为训练样本数, ϵ 为一预先设定的小正数。训练结束时,神经网络内的权值上,实际已分布存储了传感器的温度补偿及线性化信息。

3 计算机仿真及结果

利用MATLAB软件,用程序模拟前向神经网络模型及式(4)和式(5)所描述的传感器模型,对本文提出的方法进行仿真实验。

石英晶体电光系数小,半波电压高,在高电压场合下具有实用价值,因此本文以石英晶体为敏感材料进行仿真。设光源波长为632.8 nm,电光晶体为16 mm × 16 mm × 16 mm的石英晶体,其半波电压 V_π 约为180 kV,旋光角度 ρ 为303°, $\partial\rho/\partial t = 1.4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。考虑到希望光纤电压传感器电压测量范

围宽及对环境温度变化适应性强,并在不使用分压器情况下即可测量很高的电压,以减少系统的复杂性和提高系统的可靠性,故设待测电压 V 和环境温度 t 分别在 $0 \sim 130$ kV 及 $-50 \sim 150$ °C 范围内变化。样本数据 V 和 t 在上述区间上等间隔选取 26×26 个数据点,利用式(4)和式(5),计算出相应的 S_1, S_2 , 得到 V 与 S_1, S_2 之间关系的样本数据。

神经网络采用 2—40—1 结构,即输入层将 2 个输入端的信息传递到隐层,隐层由 40 个双曲正切激活函数的神经元构成,而输出层则由 1 个线性激活函数的神经元构成。取式(8)中的 c 值为 1,此时神经网络的输出 Z 就等于待测电压 V 。用上述样本数据对神经网络进行 800 次循环训练,误差平方和为 0.014。若要求更高的精度,可以增加训练次数,但要注意用样本数据之外的测试数据对训练后的神经网络进行测试,以免因训练过度而影响网络的推广性。

利用前面确定的具体参数,通过计算式(4)及式

(5)可得图 4(a)和(b)所示的补偿前传感器输出 S_1 及 S_2 与待测电压 V 和环境温度 t 之间的关系。再将上述 S_1 及 S_2 送入训练后的神经网络,则可得图 4(c)所示补偿后的神经网络输出 Z 与待测电压 V 和环境温度 t 之间的关系。在表 1 中给出了一组用人工神经网络补偿后的传感器测试结果。

从图 4(a)和(b)可以看出,在用神经网络补偿前,光纤电压传感器的输出 S_1, S_2 均受环境温度的影响,并且呈明显的非线性,由此引起的误差在要求测量精度较高的场合是不容忽视的。由表 1 和图 4(c)可以看出,经神经网络补偿后,当测量范围较宽时,在神经网络的输出端也能得到一个与环境温度变化无关的且与待测电压呈理想线性关系的输出信号。

经测试数据检验,用上述方法训练后的神经网络有很好的推广能力,即使将不属于样本数据的待测电压值和环境温度值作为传感器的输入,在神经网络的输出端也能得到一个合适的输出。

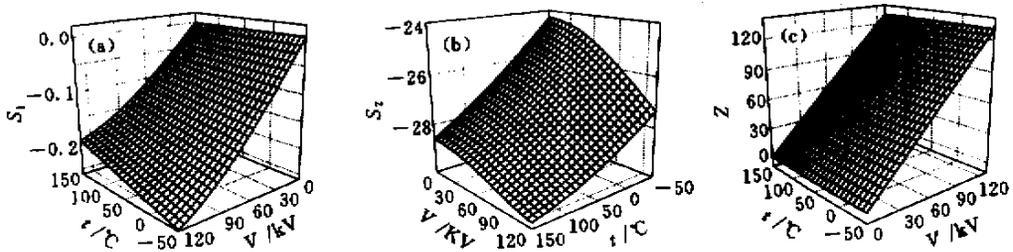


图 4 传感器输出 S_1 (a)和 S_2 (b)及神经网络输出 Z (c)

Fig.4 Sensor's output S_1 (a) and S_2 (b), neural network output Z (c)

表 1 计算机仿真结果

Table 1 Computer simulation results

V /kV	$t = -50$ °C	$t = -10$ °C	$t = 30$ °C	$t = 70$ °C	$t = 110$ °C	$t = 150$ °C
0	-0.0024	-0.0017	-0.0043	0.0022	0.0040	0.0030
26	25.9924	25.9990	26.0009	25.9999	26.0013	26.0006
52	52.0052	51.9974	51.9996	52.0007	52.0002	51.9981
78	77.9973	78.0000	78.0005	77.9969	77.9998	77.9974
104	104.0018	104.0015	103.9995	104.0044	103.9968	103.9989
130	130.0000	130.0009	130.0030	130.0044	129.9985	129.9815

4 结 论

应用本文提出的基于神经网络的光纤电压传感器温度全程跟踪补偿方法,不仅能有效地消除环境

温度的影响,而且能在神经网络的输出端得到期望的线性输出。经神经网络补偿后的光纤电压传感器由于测量范围宽,无需使用分压器即可测量很高的电压,这样既减少了系统的复杂性,又提高了系统的

可靠性。此外,该方法还有很强的适用性,当无法建立传感器的精确数学模型时,训练神经网络的样本数据也可直接通过实验取得。该方法可推广到其他受环境参数影响的传感器,也可用于受多个环境参数影响的传感器的补偿,只要增加神经网络输入层的神经元数量并把多个环境参数同时输入神经网络即可。

参 考 文 献

1 T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami *et al.*. Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, **2**(1) 87 ~ 93

2 L. H. Christensen. Design, construction, and test of a passive

optical prototype high voltage instrument transformer [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, **10**(3) :1332 ~ 1337

3 Zheng Xiaoping, Liao Yanbiao. Temperature characteristic of high voltage fiber optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(12) :1684 ~ 1687 (in Chinese)

4 Zheng Xiaoping, Liao Yanbiao. A novel fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of voltage and temperature [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(11) 997 ~ 1002 (in Chinese)

5 J. R. Noriega, H. Wang. A direct adaptive neural network control for unknown nonlinear systems and its application [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1998, **9**(1) 27 ~ 34

6 M. T. Hagan, M. B. Menhaj. Training feedforward networks with the marquardt algorithm [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, **5**(6) 989 ~ 993



瓦量级全光纤掺 Yb 双包层光纤激光器*

近年来,由于包层抽运技术的应用,光纤激光器的能量转换效率和输出功率都有了质的飞跃。连续输出功率高达几十瓦、乃至几百瓦的双包层光纤激光器已经问世。然而,在这些高功率的光纤激光器中一般仍采用二色镜等传统的体器件构成谐振腔,未能实现全光纤化,这不仅极大地限制了光纤激光器的结构紧凑性和工作可靠性,也增加了抽运光的耦合难度,同时不利于光纤激光器与后续光纤光学系统的匹配兼容。为解决上述问题,我们采用光纤 Bragg 光栅(FBG)作为腔镜,研制成功全光纤掺 Yb 双包层光纤激光器,获得了大于 1W 的连续激光输出。

实验装置采用了典型的 F-P 腔结构。掺 Yb 双包层光纤的内包层截面为方形,尺寸为 125 μm \times 125 μm ,数值孔径约为 0.38。单模纤芯的模场半径为 7 μm ,数值孔径为 0.11。纤芯中掺杂有较高浓度的 Yb 离子,对 976 nm 抽运光的吸收损耗约为 1.7 dB/m。为了保证抽运光被充分吸收,实验中选用的光纤长度为 20 m。在双包层光纤两端分别熔接上一

个中心反射波长为 1060 nm 的 FBG 作为选频反馈腔镜,相应的峰值反射率分别为 99% 和 5%。抽运源为一台带有输出尾纤的半导体激光器(LD),激光辐射中心波长为 976 nm。LD 与光纤激光器之间的耦合由 Taper 型光纤完成。

实验表明,该光纤激光器的振荡阈值为 0.3 W,斜率转化效率达 68%。当入纤的抽运光功率为 2.3 W 时,获得了 1060 nm,1.18 W 的激光输出,相应的光-光转换效率为 51.3%。如果能够进一步提高抽运源 LD 尾纤与 Taper 光纤之间的耦合效率,该光纤激光器的输出功率还可以大幅度提高。这种输出功率达到瓦量级的全光纤双包层光纤激光器集小体积、高效率、高功率和高稳定性等优良性能于一身,在光通信、光传感、光谱学、工业加工和激光医学等诸多领域极具应用价值。

(南开大学物理科学学院,天津 300071)
吕可诚,苏红新,李乙钢,
闫培光,吕福云,董孝义
收稿日期 2002-05-29

* 国家自然科学基金重点基金资助项目(60137010)和国家自然科学基金资助项目(69877006)。