

文章编号: 0258-7025(2002)09-0813-04

宽量程反射式光纤位移传感器的研究

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 分析了反射式光纤位移传感器的输出特性, 设计了一种新的宽量程反射式光纤位移传感器。以传感器的输出及其相对应的实际位移训练神经网络, 建立基于神经网络的传感器逆模型, 将其用于传感器输出信号的处理, 扩大了测量范围和提高了测量精度。

关键词 光纤传感器, 位移测量, 神经网络, 非线性校正

中图分类号 TP 212.14; TN 253 **文献标识码** A

Study on Reflective Fiber Optic Sensor for Displacement Measurement over a Wide Measuring Range

WANG Xiao-dong, YE Mei-ying

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

Abstract The output characteristic of reflective fiber optic displacement sensor was analyzed. A novel reflective fiber optic sensor for displacement measurement over a wide measuring range was designed. An inverse model of the sensor was obtained based on neural network trained by the sensor's output and the actual sensed displacement. The neural network was used to process the sensor's output signal, which could largely widen the measuring range and enhance the measuring accuracy.

Key words fiber optic sensor, displacement measurement, neural network, nonlinear calibration

1 引 言

反射式光纤位移传感器是人们最早提出并研究的一种光纤传感器, 具有结构简单、设计灵活、性能可靠、造价低廉等优点, 而且只要作适当改进很容易实现对应变、压力、振动、温度以及表面粗糙度等多种物理量的测量。因而这类传感器在光纤传感技术领域占有十分重要的地位。Cook 和 Hamm 早就对其进行了详细的研究^[1]。

传感器的输出特性是其设计的依据, 分析反射式光纤位移传感器输出特性对于这类传感器的设计至关重要。反射式光纤位移传感器的典型输出特性如图 1 所示。从图中可以看出, 其输出电压随被测位移的增大而上升, 当位移达到某一点时, 传感器输出电压达到最大值, 再继续增大位移时, 输出电压将

随之下降。即输出特性由前坡、峰顶、后坡组成, 是双值函数。因此, 设计这类传感器时, 往往将测量范围局限于其单值部分, 即前坡或后坡, 大大缩小了测

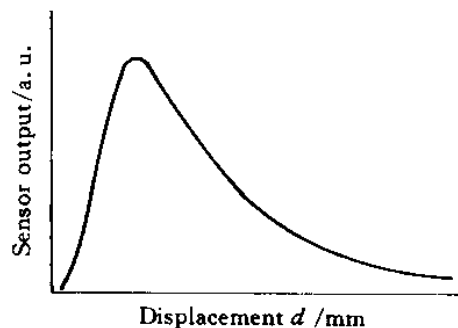


图 1 反射式光纤位移传感器的典型输出特性
Fig.1 Typical output characteristic of reflective fiber optic displacement sensor

收稿日期 2001-07-12; 收到修改稿日期 2001-10-08

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、智能信息处理方面的研究。E-mail: jh-xdwang@163.net

量范围。此外,无论是传感器输出特性的前坡还是后坡都呈现一定的非线性,这同样会影响测量范围的扩展与测量精度的提高。在输出特性的峰顶附近,还存在传感器灵敏度低的问题。为了解决上述问题,有些研究者提出了改进方法^[2-4],但这些方法有的测量范围扩展有限,有的因需通过开关切换而影响输出特性,并且往往无法消除传感器输出特性的非线性的影响。

本文提出了一种新的扩展反射式光纤位移传感器量程的方法。用该方法设计的传感器有一个随机型和同心圆型相组合排列的光纤测量探头,其关键技术是采用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)处理传感器的输出信号,使测量范围扩展到包括前坡、峰顶、后坡在内的传感器整个输出特性,并且在扩展测量范围的同时能校正传感器输出特性的非线性。

2 工作原理

在反射式光纤位移传感器中,光电探测器检测到的光强大小与探头光纤束中的发送光纤和接收光纤的排列方式有关。常用的排列方式有随机型、半圆型及同心圆型等几种。

宽量程反射式激光光纤位移传感器的示意图如图2所示。传感器的测量探头 P_m 采用的是将随机型和同心圆型相互组合的排列方式,其结构如图2(b)所示。其中的发送光纤与接收光纤1以随机型排列,而发送光纤与接收光纤2则类似于同心圆型排列。在测量探头的后部,光纤被分为三束,一束用于光的发送,另两束用于光的接收。为了消除反射面表面粗糙度、材料因子及激光器输出光强对位移测量的影响,在测量探头旁增设了一随机型排列的参考探头 P_r ,该探头与反射面之间的距离保持不变。

在图2(a)中,来自激光器的光强为 I_0 的光束,由随机型排列的光纤束将光束分成两路。其中一路作为测量光送到测量探头的发送光纤,投射到反射面上,被测量参数调制反射后,被测量探头中接收光纤1组成的光纤束与接收光纤2组成的光纤束接收,其光强分别为 I_{m1} 和 I_{m2} 。另一路作为参考光送到参考探头的发送光纤,投射到反射面上,被参考探头的接收光纤束接收,其光强为 I_r 。上述测量光 I_{m1} 、 I_{m2} 和参考光 I_r 经光电转换、放大、模数转换后,产生相应的信号 V_{m1} 、 V_{m2} 及 V_r ,可分别表示为

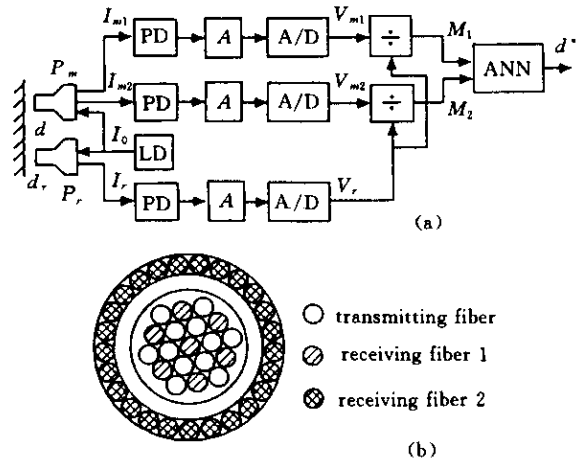


图2 反射式光纤位移传感器的示意图(a)及测量探头的结构(b)

LD: 激光二极管; P_m : 测量探头; P_r : 参考探头; PD: 光电二极管; A: 放大器; A/D: 模数转换器; ANN: 人工神经网络 Fig. 2 Schematic configuration of reflective fiber optic displacement sensor (a) and structure of measure probe (b)

LD: laser diode; P_m : measure probe; P_r : reference probe; PD: photodiode; A: amplifier; A/D: analog/digital converter; ANN: artificial neural network

$$V_{m1} = D_{m1} A_{m1} C_{m1} I_{m1} \quad (1)$$

$$V_{m2} = D_{m2} A_{m2} C_{m2} I_{m2} \quad (2)$$

$$V_r = D_r A_r C_r I_r \quad (3)$$

其中 D_{m1} 、 D_{m2} 、 A_{m1} 、 A_{m2} 、 C_{m1} 、 C_{m2} 分别是与两个测量通道有关的光电转换、放大器以及模数转换的增益系数。 D_r 、 A_r 、 C_r 则分别是与参考通道有关的光电转换、放大器以及模数转换的增益系数。

对于激光器输出的光束,设送到测量探头的光强与送到参考探头的光强之比为 C_1/C_2 ,则式(1)~(3)中的 I_{m1} 、 I_{m2} 和 I_r 可表示如下

$$I_{m1} = I_0 C_1 C_{01} R F_m(d) \quad (4)$$

$$I_{m2} = I_0 C_1 C_{02} R F_m(d) \quad (5)$$

$$I_r = I_0 C_2 R F_r(d_r) \quad (6)$$

其中 C_{01} 和 C_{02} 是与传感器特性有关的转换系数, R 表示与反射面表面粗糙度、材料因子等表面参数有关的系数, $F_m(d)$ 是反映测量探头和反射面之间位移 d 的函数, $F_r(d_r)$ 则是反映参考探头和反射面之间位移 d_r 的函数。把式(4)~(6)代入式(1)~(3),可得

$$V_{m1} = I_0 D_{m1} A_{m1} C_{m1} C_1 C_{01} R F_m(d) \quad (7)$$

$$V_{m2} = I_0 D_{m2} A_{m2} C_{m2} C_1 C_{02} R F_m(d) \quad (8)$$

$V_r = I_0 D_r A_r C_r$ 传感器的神经网络逆向模型。其原理如图 3 所示(即

若将 V_{m1}, V_{m2} 与 V_r 相除, 同时考虑到测量时参考探头与测量探头是相互分离的, 只要参考探头与反射面之间的位移保持不变, 则 $F_r(d_r)$ 为一定值。因此, 根据式(7)~(9)可将传感器的输出特性表示为

$$M_1 = \frac{V_{m1}}{V_r} = f_1(d) \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{V_{m2}}{V_r} = f_2(d) \quad (11)$$

可见, 由于引入了参考信号 V_r 进行补偿, 使传感器的输出与反射面表面粗糙度、材料因子等表面参数及激光光强无关。但 $f_1(d)$ 与 $f_2(d)$ 仍然是双值函数, 若传感器仅利用其中之一, 则测量范围不能包括整个输出特性的前坡、峰顶和后坡。

值得注意的是, 由于测量探头采用图 2(b) 所示的结构, $f_1(d)$ 和 $f_2(d)$ 出现峰顶的位置是不相同的, 并有一交叉点(见图 3)。如果同时利用 $f_1(d)$ 和 $f_2(d)$ 作为输出信息, 则输出与输入之间是一一对应的。因为, 在位移小于两输出特性的交叉点处的位移时 $f_1(d) > f_2(d)$, 不同位移处有唯一的一组 $f_1(d)$ 和 $f_2(d)$ 的值相对应; 在位移等于两输出特性的交叉点处的位移时 $f_1(d) = f_2(d)$; 在位移大于两输出特性的交叉点处的位移时 $f_1(d) < f_2(d)$, 不同位移处也只有唯一的一组 $f_1(d)$ 和 $f_2(d)$ 的值相对应。总之, 在传感器的整个输出特性上, 若同时利用 $f_1(d)$ 和 $f_2(d)$ 作为输出信息, 则输出到输入是一一对应的。此时, 有

$$d = g(M_1, M_2) \quad (12)$$

式(12)实际上是传感器的逆向模型, 显然, 它是一非线性函数, 且不能用数学模型精确表达。

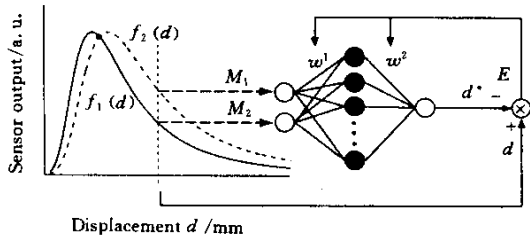


图 3 反射式光纤位移传感器输出信号的人工神经网络处理示意图

Fig.3 Signal processing of reflective fiber optic displacement sensor using artificial neural network

前向神经网络有很强的非线性映射能力, 已经证明一个三层前向神经网络可以实现以任意精度逼近任何连续函数^[5]。因此, 可以利用神经网络的这一特点, 用误差反向传播算法训练神经网络, 建立传

先通过标定实验得到训练神经网络的样本数据, 训练神经网络时, 以样本数据中的传感器输出 M_1, M_2 作为输入模式, 输入神经网络, 在神经网络的输出端产生一输出 d^* , 将这一输出与预先通过标定实验得到的作为输出模式的实际位移 d 进行比较, 得到一误差 E , 用该误差反过来调整神经网络内部各层间的连接权 w^1, w^2 , 以减小误差。该过程反复进行, 直到训练神经网络的目标函数——误差平方和

$$F_{\text{obj}} = \sum_{i=1}^m [d(i) - d^*(i)]^2 \quad (13)$$

趋于零。式(13)中, m 为样本数据的总数。误差平方和越小, 则 d^* 越接近 d 。一旦误差平方和足够小, 则可认为神经网络内部实际上已隐含了式(12)给出的传感器的神经网络逆向模型, 即

$$d^* \approx d = g(M_1, M_2) \quad (14)$$

所以, 将训练后的神经网络用于测量时, 把 M_1, M_2 输入到训练后的神经网络, 在图 2(b) 中的神经网络输出端将获得一充分接近实际位移 d 的输出 d^* , 使测量范围扩展到包括前坡、峰顶、后坡在内的传感器整个输出特性, 并且同时还校正了传感器输出特性的非线性。

传感器信号处理部分的除法运算及神经网络用软件实现。另外, 图 2(a) 中的模数转换器可共用一个, 各通道信号通过数据选择器切换。

3 应用

实验装置如图 2 所示, 其中激光器 LD 作为光源, 采用光电二极管 PD 实现光电转换, 三个放大器 A 均由自调零高精度运算放大器 5G7650 组成, 三路放大后的信号送到一块多通道 12 位 A/D 数据采集板进行模拟/数字转换, 最后由一台 Pentium III/500MHz 64MB 内存的个人计算机完成传感器的信号处理, 即用软件实现图 2(a) 中的神经网络 ANN 及除法运算。

为了建立传感器的神经网络逆向模型, 需通过下述标定实验获取训练神经网络的样本数据: 保持参考探头与反射面之间的距离不变(这里取 1 mm), 同时在其有效测量范围内, 移动测量探头, 并用千分尺测量, 取不同的位移值 d , 由计算机获取相应的采集板输出并进行除法运算后的 M_1 及 M_2 数据。将标定结果 d, M_1 及 M_2 的数值存储在计算机中, 作为以后训练神经网络和检验神经网络的推广能力之用。

根据样本数据作出的反射式光纤位移传感器的输出特性如图 4 所示。从该图可以看出,由于传感器的输出特性是双值函数,采用任一测量通道信号,测量范围都较小。以图 4 中的 M_2 为例,若仅利用前坡,则测量范围大约为 0.15 ~ 1.30 mm,若仅利用后坡,测量范围大约也只有 1.50 ~ 4.00 mm,并且无论是前坡,还是后坡,输出特性在测量范围内都呈现一定的非线性。现同时利用两个测量通道信号,并用神经网络处理该传感器的输出信号。

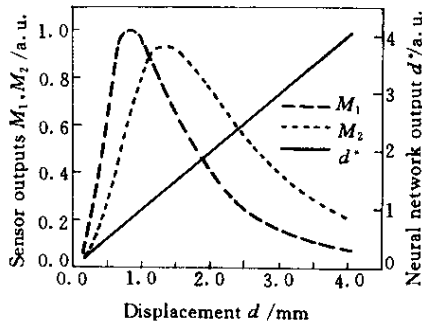


图 4 传感器输出 M_1 、 M_2 及神经网络输出 d^* 与实际位移 d 之间的关系

Fig. 4 Variation of sensor outputs M_1 , M_2 and neural network output d^* vs displacement d

本例所用的神经网络拓扑结构为 2—6—1。输入层将 2 个输入端的信息传递到隐层,隐层仅由 6 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,结构简单,运算量小。因此,尽管实验时是用个人计算机实现神经网络的,但实际应用时,完全可以将训练后的网络参数固化到程序存储器中,用单片机实现。

将样本数据中的 155 组数据训练神经网络,采用以 Levenberg-Marquardt 优化方法调整权值的改进误差反向传播算法训练神经网络,这种算法可以大大缩短训练时间并易于收敛。用样本数据对神经网络进行了 900 次循环训练,训练结束时,式(13)表示的误差平方和指标为 1.81×10^{-6} 。

训练后的神经网络必须以训练时未用过的样本数据检验,证明其确实有良好的推广能力之后,才能投入使用。检验时,参考探头与反射面之间也应保持标定实验所取的距离不变。在本例中,检验结果的神经网络的输出 d^* 与实际测量的位移 d 之间的关系如图 4 所示,实验测量的部分数据列于表 1,可见前坡和后坡之间能平滑地过渡,在 0.15 ~ 4.00 mm 范围内(包括传感器输出特性的前坡、峰顶及后坡)都有较高的精度,并且传感器的输出与输入之间呈线性关系。

表 1 反射式光纤位移传感器的检验结果

Table 1 Test values of reflective fiber optic displacement sensor

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sensor output M_1	0.1083	0.8256	0.9707	0.7218	0.4872	0.3185	0.2270	0.1616	0.1184	0.0889
Sensor output M_2	0.0581	0.3689	0.8005	0.9371	0.8353	0.6677	0.5139	0.3927	0.3120	0.2349
Displacement d /mm	0.200	0.600	1.000	1.400	1.800	2.200	2.600	3.000	3.400	3.800
Neural network output d^*	0.200	0.600	1.001	1.400	1.799	2.199	2.599	3.001	3.399	3.802

4 结 论

提出了一种新的扩展反射式光纤位移传感器量程的方法。该方法采用神经网络处理由一随机型和同心圆型相组合的光纤探头的传感器输出信号,突破了传统反射式光纤位移传感器只能利用传感器输出特性的前坡或后坡进行测量的局限性,使光纤位移传感器有较大的测量范围,在测量区间有较高的精度,并且传感器的输出与输入之间呈线性关系。

参 考 文 献

1 R. O. Cook, C. W. Hamm. Fiber optic lever displacement

transducer [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(19) 3230 ~ 3241

- 2 Wang Qisheng, Chen Jianyuan. Bi-drum optical fibre bundle displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1993, **14**(2):184 ~ 188 (in Chinese)
- 3 Ma Jianjun, Zhang Liming, Tang Weizhong. The reference scheme of optic fiber displacement sensor: analysis and design [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 1996, **17**(4):197 ~ 200 (in Chinese)
- 4 Zhang Huaiyu, Li Xuejin. Design of electronic circuit for the linearity compensation of a reflective type fiber-optic displacement sensor [J]. *Journal of Transducer Technology* (传感器技术), 1999, **18**(1):19 ~ 22 (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