

文章编号: 0253-2239(2001)01-0093-04

一种双参量偏振调制光纤传感器

郑小平 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种双参量偏振调制光纤传感器结构。在理论上分析了从一个敏感晶体上分离出两种信息的可能性: 通过合理安排传感头中各部件, 使得传感器同时输出反映两种信息的两路信号。在实验上获得了理论所预期的结果: 只使用一个传感头就可以同时测量电压与温度、力与温度。实验室条件下, 温度传感的精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。在工作温度 $20\sim 110^\circ\text{C}$ 范围内, 电压传感的温度稳定性在 $0\sim 10\text{ kV}$ 量程内为 $\pm 0.5\%$; 而力传感的温度稳定性在 $0\sim 80\text{ N}$ 量程内可达 $\pm 0.1\%$ 。

关键词: 双参量; 光纤; 传感器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

晶体材料在偏振调制光纤传感器中扮演着重要的角色^[1~3]。电流、电压、温度、力等传感器都可选它作敏感材料。然而正是由于晶体材料对诸多参数的敏感性, 使得用它来测量某一参量时, 不可避免地受到其它因素, 特别是温度的干扰, 造成传感器输出随使用环境温度的变化而起伏。这阻碍了该类传感器的实用。解决问题的一个有效方法, 是在测量电流、电压或力的同时测量出传感器所处的温度, 然后进行温度补偿。同时在许多实用场合(如油罐群、气体绝缘电站)下, 温度也是一个重要的参量, 需要测控。

目前通常的方法是采用两个传感器: 一个用来测量电流、电压或力, 另一个用来测量温度。这不仅增加了成本, 增大了传感器的体积, 同时由于温度的测量与其他参数的测量不共光路, 测量补偿的效果也会降低。为此 Tatam^[4] 提出一种温度磁场同时测量的技术: 利用温度对干涉仪的相位响应来反映传感材料的温度变化, 利用磁场对干涉条纹可见度的作用来测量磁场大小(这种方法的优点是温度的测量与磁场的测量共一条光路。缺点是系统复杂, 本身的稳定性差, 离实用的要求还差得很远)。

本文提出一种光纤传感器结构, 只需一个传感头就可以同时测量两个物理量。它利用了晶体在多重效应下的光学特性。通过合理安排传感头中各部件, 使得传感器同时输出包含两种信息的两路信号。

理论与实验两方面都证明了该结构的可行性。

2 原 理

光纤双参量传感器传感头的结构如图 1 所示。中心波长为 λ 的光沿 z 向传输, 起偏器 P、检偏器 A 及波片的快轴与 x 轴的夹角分别为 η 、 θ 与 $-\pi/4$ 。设通过起偏器后, 入射光的电场矢量为

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} \cos \eta \\ \sin \eta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

则检偏器出射光的光场为 $\mathbf{E}_{out} = \mathbf{J}_A \mathbf{J}_{WP} \mathbf{J}_c \mathbf{E}_i$, 其中 \mathbf{J}_A 、 \mathbf{J}_{WP} 、 \mathbf{J}_c 分别为检偏器、 $M/4$ 波片、石英晶体的琼斯(Jones)矩阵。若在偏振态相互垂直的两个方向(A 与 A')上检测到的光强分别为 P_A 、 $P_{A'}$, 则

$$\begin{aligned} P_A &= |\mathbf{E}_{out}|^2 = \cos^2 \varphi \cos^2(\theta - \eta) + \\ &\sin^2 \varphi \left[\frac{\rho}{\varphi} \sin(\theta - \eta) - \frac{\phi}{2\varphi} \sin(\theta - \eta + 2\vartheta) \right]^2 + \\ &\cos^2 \varphi \sin^2(\theta + \eta) + \\ &\sin^2 \varphi \left[\frac{\rho}{\varphi} \cos(\theta + \eta) + \frac{\phi}{2\varphi} \cos(\theta + \eta - 2\vartheta) \right]^2 + \\ &\left[\frac{\rho}{\varphi} \sin 2(\theta - \eta) - \frac{\phi}{2\varphi} \sin(\theta - \eta + 2\vartheta) \cos(\theta - \eta) \right] \sin 2\varphi + \\ &\left[\frac{\rho}{\varphi} \sin 2(\theta + \eta) + \frac{\phi}{2\varphi} \cos(\theta + \eta - 2\vartheta) \sin(\theta + \eta) \right] \sin 2\varphi, \quad (2) \\ P_{A'} &= |\mathbf{E}'_{out}|^2 = \cos^2 \varphi \sin^2(\theta - \eta) + \\ &\sin^2 \varphi \left[\frac{\rho}{\varphi} \cos(\theta - \eta) + \frac{\phi}{2\varphi} \cos(\theta - \eta + 2\vartheta) \right]^2 + \\ &\cos^2 \varphi \cos^2(\theta + \eta) + \end{aligned}$$

$$\sin^2 \varphi \left[\frac{\rho}{\varphi} \sin(\theta + \eta) + \frac{\phi}{2\varphi} \sin(\theta + \eta - 2\vartheta) \right]^2 +$$

$$\left[-\frac{\rho}{\varphi} \sin 2(\theta - \eta) + \frac{\phi}{2\varphi} \cos(\theta - \eta + 2\vartheta) \sin(\theta - \eta) \right] \sin 2\varphi +$$

$$\left[-\frac{\rho}{\varphi} \sin 2(\theta + \eta) - \frac{\phi}{2\varphi} \sin(\theta + \eta - 2\vartheta) \cos(\theta + \eta) \right] \sin 2\varphi, \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{\phi^2 + (2\rho)^2}}{2},$$

$$\phi = \frac{\pi L n_0^3 \sqrt{(\Delta\beta_2 - \Delta\beta_1)^2 + 4(\Delta\beta_6)^2}}{\lambda} = \sqrt{\phi_1^2 + (2\phi_2)^2},$$

$$\phi_1 = \frac{\pi L n_0^3 (\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2)}{\lambda}, \quad \phi_2 = \frac{\pi L n_0^3 \Delta\beta_6}{\lambda}, \quad \rho = \frac{\pi w}{\lambda},$$

$$\tan(2\vartheta) = \frac{2\Delta\beta_6}{\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2},$$

其中, L 为晶体的长度; n_0 为晶体中寻常光折射率; \bar{n} 为平均折射率; $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 、 $\Delta\beta_6$ 为晶体在外界作用下其逆介电张量的变化量; w 为晶体与磁光或旋光

效应有关的系数, 因而 ρ 为线偏振光通过晶体时 ($\phi = 0$) 偏振态的旋转角度。

对这两个信号作如下运算: 令

$$S = (P_A - P_{A'}) / (P_A + P_{A'}), \quad (4)$$

可得

$$S = \cos^2 \varphi \sin 2\theta \sin 2\eta - \left[\frac{\rho}{\varphi} \right]^2 \sin^2 \varphi \sin 2\theta \sin 2\eta -$$

$$\left[\frac{\phi}{2\varphi} \right]^2 \sin^2 \varphi \sin 2\theta \sin 2(\eta - 2\vartheta) +$$

$$\frac{\rho\phi}{2\varphi^2} \sin^2 \varphi \cos 2\theta \cos 2(\eta - 2\vartheta) -$$

$$\frac{\rho}{\varphi} \sin 2\varphi \sin 2\theta \cos 2\eta +$$

$$\frac{\phi}{2\varphi} \sin 2\varphi \cos 2\theta \sin 2(\eta - \vartheta). \quad (5)$$

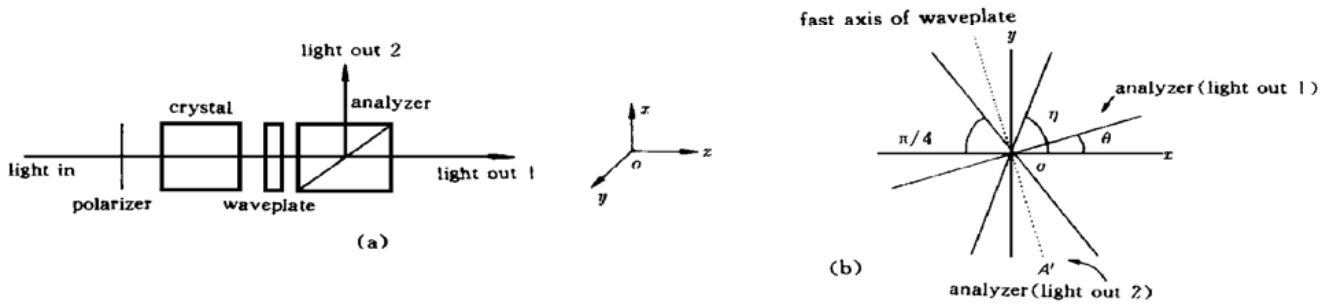


Fig. 1 Diagram of fiber optic sensing head for two-parameter simultaneous measurement. (a) Configuration of the sensing head; (b) Sense of optical components

3 理论分析

起偏器的位置 $\eta = 0$ 时, 由式(5)可知: 当检偏器的位置 $\theta = 0$ 时, 有:

$$S = \frac{\rho\phi}{2\varphi^2} \sin^2 \varphi \cos 4\vartheta - \frac{\phi}{2\varphi} \sin 2\varphi \sin 2\vartheta; \quad (6)$$

而当检偏器的位置 $\theta = \pi/4$ 时, 有:

$$S = (\phi/2\varphi)^2 \sin^2 \varphi \sin 4\vartheta - (\rho/\varphi) \sin 2\varphi. \quad (7)$$

若把式(6)、(7)式的 S 分别记为 S_1 和 S_2 , 则有

1) 若在两个物理量同时作用下, 敏感晶体恒有 $\vartheta = 0$, 即: $\phi_2 = 0$, $\phi = \phi_1$. 这时有

$$S_1 = (\rho\phi/2\varphi^2) \sin^2 \varphi, \quad S_2 = -(\rho/\varphi) \sin 2\varphi. \quad (8)$$

若一个物理量引起 φ 变化(如力、电压), 另一物理量(如温度、电流、磁场)改变 ρ . 则通过合理设计传感元件的参数, (8) 式在一级近似下, 可以写成如下形式:

$$S_1 = s_{11}x + s_{12}y, \quad S_2 = s_{21}x + s_{22}y. \quad (9)$$

(9) 式中, x 为一个物理对传感器的影响, y 为另一

个物理量对传感的影响。通过求解该方程组, 就可以获知两个物理的大小。

2) 若在两个物理量作用下, 敏感晶体恒有 $\vartheta = \pi/4$, 即: $\phi_1 = 0$, $\phi = \phi_2$. 这时有

$$S_1 = -(\rho\phi/2\varphi^2) \sin^2 \varphi - (\phi/2\varphi) \sin 2\varphi,$$

$$S_2 = -(\rho/\varphi) \sin 2\varphi. \quad (10)$$

显然 S_1 、 S_2 同样也可有如下形式:

$$S_1 = s_{11}x + s_{12}y, \quad S_2 = s_{21}x + s_{22}y. \quad (11)$$

3) 若一个物理量使 $\vartheta = \pi/4$, 即 $\phi_1 = 0$, 而另一个物理量使 $\phi_1 \neq 0$, (6)、(7) 式可改写成

$$S_1 = -\frac{\rho(\phi_1^2 - 4\phi_2^2)}{2\varphi^2\phi} \sin^2 \varphi - \frac{\phi_2}{2\varphi} \sin 2\varphi, \quad (12)$$

$$S_2 = \frac{\phi_1\phi_2}{\varphi^2} \sin^2 \varphi - \frac{\rho}{\varphi} \sin 2\varphi, \quad (13)$$

则一般情况下 S_1 、 S_2 为非线性, 但仍为单值。要实现双参量的测量, 可采取查表方法。但是如果系统的设计满足一定的条件, 比如: $\sin \varphi \approx 0$, $\rho \gg \varphi$, 则在二级近似条件下, 有

$$S_1 = -\frac{\phi_2}{2\rho} \sin 2\rho, \quad S_2 = -\sin 2\rho. \quad (14)$$

显然, 这时 S_2 波动反映了系统对一个物理量的变化, 通过 S_2 可以获得系统对另一个物理量的响应。

4) 若敏感晶体在一个物理量作用下有 $\theta = 0$, 即 $\phi_2 = 0$, 而另一个物理量使得 $\phi_2 \neq 0$, (6)、(7) 式同样可改写为式(13)、(14)。一般情况下 S_1 、 S_2 也为非线性, 要实现双参量的测量, 仍可采取查表方法。但是如果系统满足一定的条件, 比如: 小信号前提下 $\rho = 0$, 则有

$$S_1 = -\phi_2, \quad S_2 = \phi_1 \phi_2. \quad (15)$$

则可以方便地实现双参量的测量。

4 实验与结果分析

晶体的种类很多, 本文选择石英晶体作为敏感晶体, 验证上述理论。选择石英晶体的主要原因为其取材方便且应用面广。如其半波电压可以高达几十万伏, 在高压系统应用中, 无需使用分压器, 这样既减少了系统的复杂性, 又提高了系统的可靠性。同时, 石英晶体属于 32 点群, 其结构复杂, 在单轴晶体中比较具有代表性。

进行了两个实验: 一个为电压与温度的同时测量, 一个为力与温度的同时测量。所采用的实验装置如图 2 所示。光源为波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$ 的半导体激光器, P 为起偏器, NPS 为消偏振的半透半反分束镜; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为光电探测器; WP 是 $\lambda/4$ 波片 ($\lambda = 650 \text{ nm}$); A_1 与 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 两个正交偏振态分别成 45° 夹角。晶体的温度由 BIGE 智能型温度控制仪控制, 精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

电压或力的施加方向如图 2 所示。实验中电压值由 Q3-V 型高压计给出, 而力值则为标准砝码的大小。

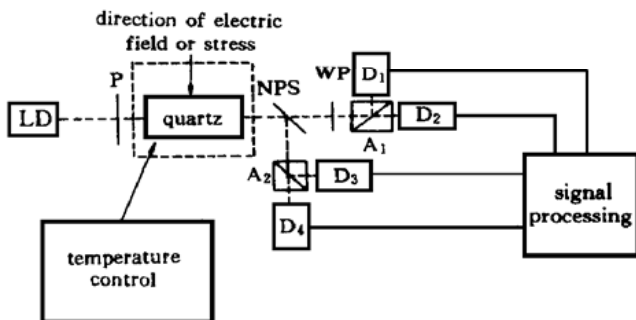


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

实验结果如图 3 所示, 图 3(a) 为保持压电值

(或压力值) 恒定时传感器的温度输出响应, 图 3(b) 为保持温度恒定时传感器电压响应, 图 3(c) 为温度恒定时传感器的力响应。

可以看到, 电压、力、温度的输出信号都具有良好的线性, 因而该结构可以实现温度与电压或力与温度的同时测量。初步的实验结果就显示温度的精度可达 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与前面的理论预测相符, 证明了双参量传感器的正确性。

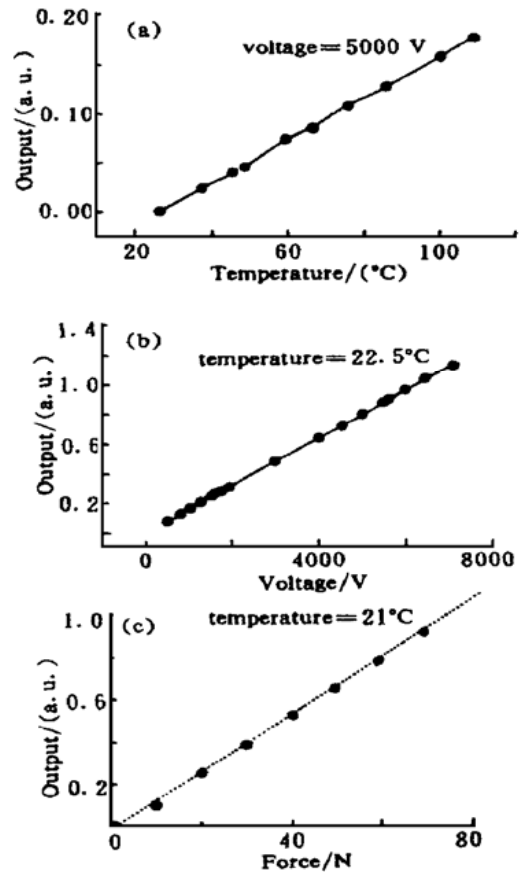


Fig. 3 Experimental results. (a) Response curve of the sensor to the temperature; (b) Response curve of the sensor to high voltage; (c) Response curve of the sensor to force.

进一步的实验表明, 双参量的温度输出几乎不受外加电压/力的影响, 这与石英晶体旋光效应有关: 在这种情况下, 圆双折射抑制了线双折射。而电压/力随温度的变化虽然表现为线性, 但是这个线性斜率却与晶体所处的外界场的大小有关。如当外加电压为 5 kV 时, 电压传感在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 其输出值的相对变化可达 $\pm 20\%$ 以上; 而当电压为 34 kV 时, 在相同的温度变化范围内, 电压传感输出的变化为 $\pm 7.5\%$ 左右。对于力传感来说, 也有类似的结果。

进一步的分析表明, 在适当的模型下, 传感器的电压/力温度特性就可以表示成

$$S(\Delta t) = \alpha_1 \Delta t + s_0(1 + \alpha_2 \Delta t), \quad (16)$$

式中, α_1 为传感头在没有外界场作用下的温度特性, α_2 为传感材料本身的电压/力的温度特性, s_0 为传感器的标准输出, $S(\Delta t)$ 为环境温度偏离 Δt 时, 传感器的输出。由于 α_1 和 α_2 不随外界场的改变而变化, 因而当温度信息获知后, 就可以比较方便地从传感器的输出中提取出 $s_0^{[4]}$, 从而实现双参量的同时测量。利用这种方法, 在工作温度 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 110\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 实验室条件下, 电压传感的温度稳定性在 $0 \sim 10\text{ kV}$ 量程内为 $\pm 0.5\%$; 而力传感的温度稳定性在 $0 \sim 80\text{ N}$ 量程内可达 $\pm 0.1\%$ 。证明了从一个敏感晶体上分离出两种信息的可能性: 通过合理安排传感头中各部件, 使得传感器同时输出反映两种信息的两种信号。在实验上获得了电压与温度, 力与温度同时测量的结果。

参 考 文 献

- [1] Katsukawa H, Ishikawa H, Okajima H *et al.*. Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1996, **11**(2): 702~ 707
- [2] Niewisch J, Menke P, Krammer P *et al.*. (Edited by Ohtsuka Y and Yoshino T). Temperature compensation of a potential transformer using a BSO Pockels cell. *Proceedings of OFS-11: Eleventh International Conference on Optical Fiber Sensors — Advanced Sensing Photonics*, May 21~ 24, 1996, Japan, Publisher: JSAP, IEICE, IEEJ and SICE, 1996: 152~ 155
- [3] Martens G. Fiber optic photoelastic sensors. *Int. J. Photoelectron.*, 1992, **7**(2): 385~ 407
- [4] Zaidi H, Tatam P. Faraday-effect magnetometer: Compensation for the temperature-dependent Verdet constant. *Meas. Sci. Technol.*, 1994, **5**(5): 1471~ 1479
- [5] 郑小平, 廖延彪. 光纤电压传感器温度特性的研究. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1684~ 1687

A Polarization-Modulated Fiber-Optic Sensor for Simultaneous Measurement of Two Parameters

Zheng Xiaoping Liao Yanbiao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received May 24, 1999; revised 23 July 1999)

Abstract: A polarization-modulated fiber-optic sensor with a single sensing head for the simultaneous measurement of two parameters is presented. The possibility of the separation of two parameters from a sensing head is analyzed theoretically. Through optical components arranged properly, the sensing head can simultaneously output two signals which can represent two different physics parameters. The experimental results verify predictions and show that voltage and temperature, or force and temperature can be simultaneously measured by using only one of this kind of sensing head. Under lab condition, when the temperature changes from $20\text{ }^\circ\text{C}$ to $110\text{ }^\circ\text{C}$, the force output with the temperature stability of $\pm 0.1\%$ within the range of $0 \sim 80\text{ N}$ and the voltage output with temperature stability of $\pm 0.5\%$ within the range of $0 \sim 10\text{ kV}$ can be obtained, while the accuracy of the temperature detection is $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: two parameters; optical fiber; sensor