

一种新型的电压温度双参量光纤传感器

郑小平 廖延彪

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 提出了一种电压温度双参量光纤传感器。在理论上分析了从一个敏感晶体上分离出温度、电压两种信息的可能性:石英晶体作为敏感元件,通过合理安排传感头中各部件,传感器同时输出两路信号:一路是包含 Pockels 效应的电压信号;一路是石英晶体旋光效应的信号,由于旋光效应与温度有关,这路信号用来反映传感头光路上的温度信息。实验获得理论所预期的结果,从而只使用一个传感头就可以同时测量电压与温度。给出了实验装置。结果显示在 90℃ 温度范围内电压的精度可达 0.5%,温度的精度为 ±1℃。

关键词 电压,温度,光纤传感器

1 引言

光纤传感器电绝缘性能好、抗电磁干扰,特别适用于电力系统的测控。光纤电压传感器普

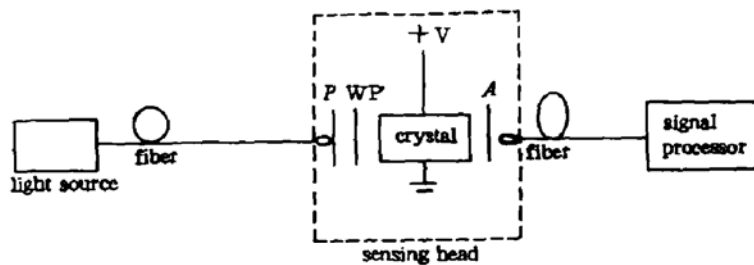


图 1 光纤电压传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical fiber voltage sensor

P: polarizer; WP: 1/4 wave plate; A: analyser

遍采用图 1 所示的结构^[1]。这时,信号处理部分接受到的光强可表示成

$$I = I_0 \left(1 + \frac{\beta}{K} \sin K \right) \quad (1)$$

式中, $\beta = \frac{V}{V_s} \pi \sin \omega t$, V_s 为晶体的半波电压; V 为待测电压; ω 为电压频率。 $K = \sqrt{\beta^2 + (2\rho)^2}$, ρ 为晶体的旋光效应。

$\omega \neq 0$, 作如下信号处理

$$S = I_0 \frac{\frac{\beta}{K} \sin K}{I_0} = \frac{\beta}{K} \sin K \quad (2)$$

当 $\rho \gg \beta$ 时, 式(2) 可简化成

$$S = \frac{\beta}{2\rho} \sin 2\rho \quad (3)$$

结果 S 与被测电压成正比。

这种传感器结构简单, 但其精度及长期稳定性却比较差, 不适合高精度测量。主要原因在于传感器的工作环境特别是温度的变化, 影响了传感器的输出特性, 使得其在工作温度范围内达不到 1% 的基本精度要求。进一步提高电压传感器的温度特性, 以满足长时间户外连续运转的要求是该类传感器的主攻方向之一^[2]。

对环境温度进行测控, 不仅是光纤电压传感器的要求, 而且也是高压电器的要求。光纤电压传感器通常被安装在 SF₆ 全封闭组合电器(GIS)中, 户外使用时, 环境温度将影响到它的额定电流大小、开关器的分、合闸速度, SF₆ 气体的性能以及电器本身的安全。为防止 GIS 可能出现的故障, 有必要对其进行温度监测^[3]。

目前对高压电器的电压、温度的监测大都采用两个独立的光纤传感器完成。这样高压电器必须为传感器留有更大的空间, 同时检测成本也高, 因而很难实现。

本文提出了一种电压温度双参量光纤传感器。石英晶体作为敏感元件, 通过合理安排传感头中各部件, 传感器同时输出两路信号: 一路是包含 Pockels 效应的电压信号; 一路是石英晶体旋光效应的信号, 由于旋光效应与温度有关, 这路信号用来反映传感头光路上的温度信息。实验获得了理论所预期的结果。

2 原 理

与图 1 相比, 图 2 所示的结构中, 四分之一波片被放置在晶体的后面。中心波长为 λ 的光沿 z 方向传输, 电压沿 x 方向施加, 起偏器 P 、检偏器 A 及波片的慢轴与 x 轴的夹角分别为 η, θ 与 $-\pi/4$ 。设通过起偏器后, 光的电场矢量为

$$\vec{E}_{in} = \begin{bmatrix} \cos \eta \\ \sin \eta \end{bmatrix} \quad (4)$$

则可以利用 Jones 矩阵法得出检偏器出射的光场^[3]

$$\vec{E}_{out} = J_A J_{wp} J_{cry} \vec{E}_{in} \quad (5)$$

式(5) 中, J_A, J_{wp}, J_{cry} 分别为检偏器、 $\lambda/4$ 波片、石英晶体的 Jones 矩阵。它们可分别表示成^[4,5]

$$J_A = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$J_{wp} = \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

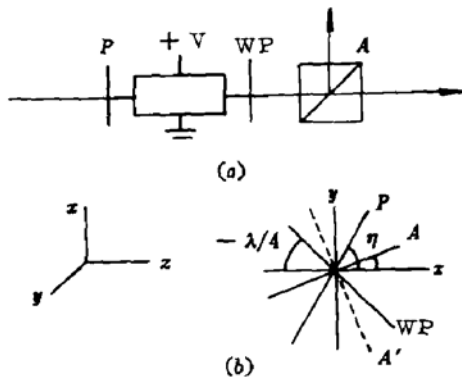


图 2 传感头原理图

(a) 传感头结构简图; (b) 元器件的方向
Fig. 2 Schematic diagram of the sensing head
(a) Configuration of the sensing head;
(b) The oritation of the parts

$$J_{\text{cry}} = \begin{bmatrix} \cos \frac{K}{2} - i \frac{\beta}{K} \sin \frac{K}{2} & -\frac{2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} \\ \frac{2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} & \cos \frac{K}{2} + i \frac{\beta}{K} \sin \frac{K}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

把式(6),(7),(8)代到(5)中,得

$$\vec{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos \frac{K}{2} \cos(\theta - \eta) + \frac{2\rho + \beta}{K} \sin \frac{K}{2} \cos\theta \sin(\theta - \eta) + \\ i \left[\cos\theta \cos \frac{K}{2} \sin(\theta + \eta) - \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} \cos\theta \cos(\theta + \eta) \right] \\ \sin\theta \cos \frac{K}{2} \cos(\theta - \eta) + \frac{2\rho + \beta}{K} \sin \frac{K}{2} \sin\theta \sin(\theta - \eta) + \\ i \left[\sin\theta \cos \frac{K}{2} \sin(\theta + \eta) - \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} \sin\theta \cos(\theta + \eta) \right] \end{bmatrix} \quad (9)$$

实际应用中,经常采用镀有介质偏振膜的分光棱镜作为检偏器,这时在垂直于 A 的方向 (A') 上,光的电场矢量为

$$\vec{E}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \sin\theta \cos \frac{K}{2} \sin(\theta - \eta) - \frac{2\rho + \beta}{K} \sin \frac{K}{2} \sin\theta \cos(\theta - \eta) - \\ i \left[\sin\theta \cos \frac{K}{2} \cos(\theta + \eta) + \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} \sin\theta \sin(\theta + \eta) \right] - \\ \cos\theta \cos \frac{K}{2} \sin(\theta - \eta) + \frac{2\rho + \beta}{K} \sin \frac{K}{2} \cos\theta \cos(\theta - \eta) + \\ i \left[\cos\theta \cos \frac{K}{2} \cos(\theta + \eta) + \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin \frac{K}{2} \cos\theta \sin(\theta + \eta) \right] \end{bmatrix} \quad (10)$$

这样,在 A 和 A' 两个方向上检测到的光强分别为

$$P_A = |\vec{E}_{\text{out}}|^2 = \cos^2 \frac{K}{2} \cos^2(\theta - \eta) + \frac{(2\rho + \beta)^2}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \sin^2(\theta - \eta) + \\ \frac{2\rho + \beta}{2K} \sin K \sin 2(\theta - \eta) + \cos^2 \frac{K}{2} \sin^2(\theta + \eta) + \\ \frac{(\beta - 2\rho)^2}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \cos^2(\theta + \eta) - \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin K \sin 2(\theta + \eta) \quad (11)$$

$$P_{A'} = |\vec{E}_{\text{out}}|^2 = \cos^2 \frac{K}{2} \sin^2(\theta - \eta) + \frac{(2\rho + \beta)^2}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \cos^2(\theta - \eta) - \\ \frac{2\rho + \beta}{2K} \sin K \sin 2(\theta - \eta) + \cos^2 \frac{K}{2} \cos^2(\theta + \eta) + \\ \frac{(\beta - 2\rho)^2}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \sin^2(\theta + \eta) + \frac{\beta - 2\rho}{K} \sin K \sin 2(\theta + \eta) \quad (12)$$

对这两个信号作如下运算

$$S = \frac{P_A - P_{A'}}{P_A + P_{A'}} = \cos K \sin 2\theta \sin 2\eta - 2 \frac{2\rho\beta}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \cos 2\theta \cos 2\eta - \\ \frac{\beta}{K} \sin K \cos 2\theta \sin 2\eta + \frac{2\rho}{K} \sin K \sin 2\theta \cos 2\eta \quad (13)$$

由式(13)可以得出如下结论

(1) $\eta = 0, \theta = 0$ 时

$$S = -2 \frac{2\rho\beta}{K^2} \sin^2 \frac{K}{2} \quad (14)$$

由于 $\beta \ll 2\rho$, 式(14) 简化为

$$S = -\frac{\beta}{\rho} \sin^2 \rho \quad (15)$$

与 β 即所测电压成正比。

(2) $\eta = 0, \theta = \pi/4$ 时

$$S = \frac{2\rho}{K} \sin K \approx \sin 2\rho \quad (16)$$

由于 ρ 随温度而变, 故式(16) 为测温原理。实验时温度的输出信号最终可表示成

$$S = \sin 2\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t\right) \quad (17)$$

式中, t 表示温度, Δt 为温度的变化。石英晶体在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 波长处, 有 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 1.4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。

需要指出的是: 如果采用图 1 结构, 通过选择检偏器 A 和 A' 的方向, 是难以分离出温度和电压信号的^[6]。

3 实验及结果

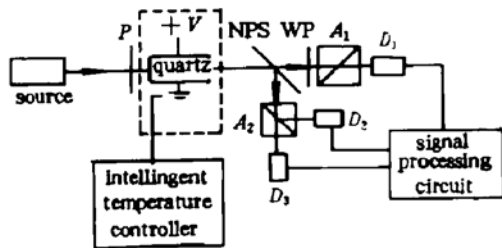


图 3 实验装置

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

实验装置如图 3 所示。光源为波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光器, P 为起偏器, NPS 为一消偏振的半透半反分束镜; D_1, D_2, D_3 为光电探测器; WP 为 $\lambda/4$ 波片 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$); A_1 与 A_2 为棱镜检偏器。实验时施加的电压为交流工频电压, 这样 D_1 检测到的信号为传感器电压输出信号; D_2, D_3 探测到的信号经式(13) 处理后, 得到传感器温度输出信号。石英晶体的尺寸为 $16 \times 16 \times 16 \text{ (mm)}$, 实验

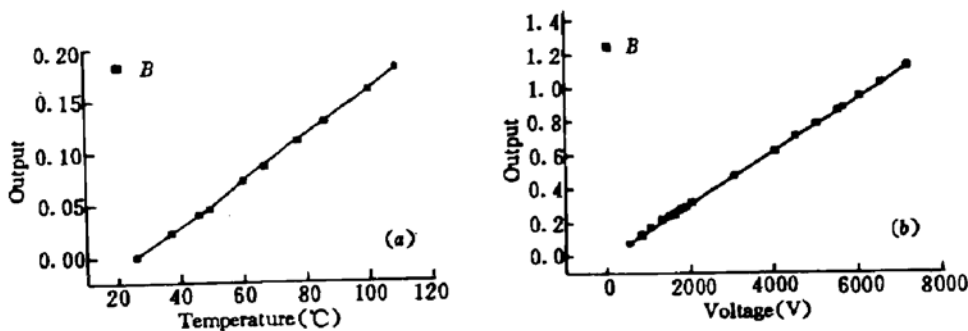


图 4 实验结果

(a) 传感器的温度响应, (b) 传感器的电压响应

Fig. 4 Experimental results

(a) the response curve of the sensor to the temperature; (b) the response curve of the sensor to the voltage

测得:对于 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\rho = 303^\circ$ 。晶体的温度由 BICE 智能型温度控制仪控制,精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。电压值由 Q3-V 型高压计给出。实验结果如图 4 所示,图 4 (a) 为传感器温度输出响应, (b) 为传感器电压响应。实验表明,温度的精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。从图可见这种传感器不仅可同时测量电压和温度值,而且电压、温度的输出信号都具有良好的线性,与理论相符。

4 讨 论

电压温度双参量光纤传感器结构很容易应用到远距离光纤电压传感器中。图 5 为一实际的电压传感器原理图。图中, G_1-G_5 为自聚焦透镜, A_1, A_2 为光学偏振分光棱镜, NPS 为消偏振分光棱镜, 这些分光棱镜都需经专门设计。OS 为光开关, 目的是使用一个光源就能实现光桥补偿。光源采用 LED, $\lambda = 820 \text{ nm}$ 。WP 为零级 $\lambda/4$ 波片。

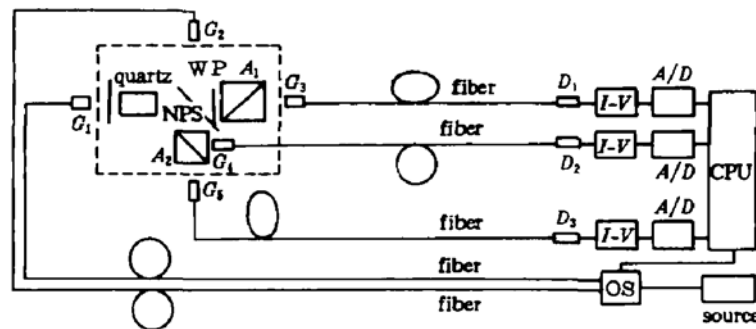


图 5 电压温度同时测量的光纤传感器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of a practical fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of the voltage and temperature

为了能够对传感器电压输出进行温度补偿,需要对传感器电压输出随温度的变化进行分析,建立合适的数学模型,并通过实验确定模型中关键参数。通过温度补偿,传感器在工作温度变化 90°C 的范围内,其精度可从 2% 提高到 0.5%, 达到实用要求。

文中温度的测量精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 这主要是受检测电路精度的限制。但 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的精度已能满足高压电器的要求。

5 结 论

在理论上分析了一种新型结构的光纤电压温度双参量传感器的可能性,在实验上获得理论所预期的结果。从而用一个传感头就可以同时测量电压和温度成为现实。有了温度信号,传感器的温度补偿成为可能。文中阐述了利用温度信息补偿传感器电压输出温度效应的方法,给出了通过温度补偿,电压输出在工作温度变化 90°C 时,其精度从 2% 提高到 0.5%, 满足了实用的要求。温度测量的精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。该传感器有着广阔的实用价值。

参 考 文 献

- 1 T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami *et al.*, Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1987, 2(1): 87~93
- 2 Kyung Shik Lee. Electrooptic voltage sensor; birefringence effect and compensation methods. *Appl. Opt.*, 1990, 29

(30) : 4453~4460

- 3 张节容, 钱家骊等. 高压电器原理和应用. 第一版. 北京: 清华大学出版社, 1989, 5
- 4 廖延彪. 物理光学. 第一版. 北京: 电子工业出版社, 1986, 216~218
- 5 W. J. Tabor, F. S. Chen. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence; experiments with Ytterbium Orthoferite. *J. of Appl. Phys.* . 1969, **40**(7) : 2760~2765
- 6 V. K. Gorchakov, V. V. Kutsaenko, V. T. Potapov. Electro-optical and magenito-optical effects in bismuth silicate crystals and optical polarization sensors using such crystals. *International Journal of Optoelectronics*. 1990, **5**(3) : 235~250
- 7 金晓丹, 廖延彪, 赖淑蓉等. 一种高精度补偿式双折射型光纤温度传感系统. *中国激光*, 1996, **A23**(5) : 465~469

A Novel Fiber-optic Sensor for the Simultaneous Measurement of Voltage and Temperature

Zheng Xiaoping Liao Yanbiao

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

Abstract A novel fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of voltage and temperature is presented. The possibility of the separation of the voltage and temperature from a sensing head is analyzed theoretically as follows; a quartz acts as a sensing element, the 1/4 wave plate is put behind the quartz, and the sensing head can simulteneously output two signals. One singnal, involving the Pockels effect, is for voltage measurement; and the another, associated with the optical rotation effect, is for the temperature measurement. The experimental results show that the voltage accuracy of 0.5% can be obtained when the temperature varies by 90°C, and the accuracy of the temperature measurement is $\pm 1^\circ\text{C}$.

Key words voltage, temperature, fiber-optic sensor