

光纤电压传感器温度特性的研究

郑小平 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 以半波电压较高的石英晶体为敏感材料, 分析了光纤电压传感器全量程的温度特性, 发现其与传感器所测电压值相关: 随着待测电压的从小往大增加, 其输出温度变化的灵敏度逐渐由小变大。为了实现电压传感器全量程的温度补偿, 必须获取两个关键的参数: 一为电压传感器在无外加电压作用下的温度输出响应参数; 二为敏感材料在电压作用下的温度响应参数。

关键词 光纤传感器, 电压, 温度。

1 引 言

光纤电压传感器具有电绝缘性能好、抗电磁干扰能力强等优点, 特别适合于电力系统的测控^[1]。阻碍光纤电压传感器应用的一个主要原因是其长期稳定性比较差, 不能满足计量要求。为解决这个问题, 提出了多种方案^[2-4]。这些方案中, 以半波电压较低的 BGO 晶体或 BSO 晶体为敏感材料的传感器比较适合于低电压场合下的电压测控。

石英晶体电光系数比较小, 通过调整晶体尺寸, 其半波电压可以从数万伏变化到数十万伏, 甚至更高。因而在高电压场合下具有实用价值。本文以石英晶体为敏感材料, 分析了高电压传感器全量程的温度特性。分析表明, 为了能够实现电压传感器全量程的温度补偿, 必须获取电压传感器在无外加电压作用下的温度输出响应参数和敏感材料在电压作用下的温度响应参数。

2 原 理

光纤电压传感器传感头结构如图 1 所示。光线沿 z 方向传输, 与石英晶体的光轴平行。起偏器的偏振方向与 x 方向平行, 玻片的慢轴与 x 轴成 45° , 检偏器输出的两个正交偏振态分别平行于 x 、 y 方向。因此, 入射光的电矢量为:

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

波片、晶体、检偏器的琼斯矩阵分别为^[5]:

$$\mathbf{J}_{wp} = \begin{bmatrix} \cos(\sigma/2) & i \sin(\sigma/2) \\ i \sin(\sigma/2) & \cos(\sigma/2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

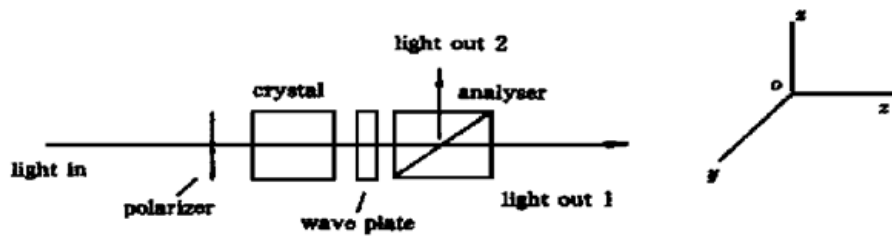


Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic sensing head for voltage

$$J_c = \begin{bmatrix} \cos \varphi + (i\phi/2\varphi) \sin \varphi & -(\rho/\varphi) \sin \varphi \\ (\rho/\varphi) \sin \varphi & \cos \varphi - (i\phi/2\varphi) \sin \varphi \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$J_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{或 } J'_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

式中, φ 为石英晶体总的相位延迟,

$$2\varphi = \sqrt{\phi^2 + (2\rho)^2}, \quad \phi = V\pi/V_\pi, \tag{5}$$

ϕ 为外加电压引起的相位延迟, V_π 为晶体的半波电压, ρ 为石英晶体的旋光效应引起的相移, σ 为波片的相位延迟。则偏振分光棱镜出射光 1 与出射光 2 的电矢量分别为:

$$\begin{aligned} E_{out1} = J_a J_{wp} J_c E_{in} &= \begin{bmatrix} \cos \frac{\sigma}{2} \cos \varphi + i \left(\frac{\phi}{2\varphi} \cos \frac{\sigma}{2} \sin \varphi + \frac{\rho}{\varphi} \sin \frac{\sigma}{2} \sin \varphi \right) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ E_{out2} = J'_a J_{wp} J_c E_{in} &= \begin{bmatrix} \frac{\rho}{\varphi} \cos \frac{\sigma}{2} \sin \varphi - \frac{\phi}{2\varphi} \sin \frac{\sigma}{2} \sin \varphi + i \sin \frac{\sigma}{2} \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{6}$$

其光强分别为:

$$\begin{aligned} I_1 = E_{out1}^* E_{out1} &= \cos^2 \frac{\sigma}{2} \cos^2 \varphi + \frac{\phi^2}{4\varphi^2} \sin^2 \varphi \cos^2 \frac{\sigma}{2} + \\ &\quad \frac{\rho^2}{\varphi^2} \sin^2 \frac{\sigma}{2} \sin^2 \varphi + \frac{\phi\rho}{2\varphi^2} \sin^2 \varphi \sin \sigma, \\ I_2 = E_{out2}^* E_{out2} &= \sin^2 \frac{\sigma}{2} \cos^2 \varphi + \frac{\phi^2}{4\varphi^2} \sin^2 \varphi \sin^2 \frac{\sigma}{2} + \\ &\quad \frac{\rho^2}{\varphi^2} \cos^2 \frac{\sigma}{2} \sin^2 \varphi - \frac{\phi\rho}{2\varphi^2} \sin^2 \varphi \sin \sigma \end{aligned} \tag{7}$$

对这两个信号作如下处理, 得传感器的输出信号为:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \cos \sigma - \frac{2\rho^2 \sin^2 \varphi \cos \sigma}{\varphi^2} + \frac{\rho\phi}{\varphi^2} \sin^2 \varphi \sin \sigma. \tag{8}$$

3 分 析

分析中假设相位延迟器为石英材料制成的零级四分之一波片, $\sigma = \sigma_0(1 + \gamma T)$ 。 σ_0 为相位延迟器在常温下的相位延迟, 取值为 $\pi/2$ 。 γ 为相位延迟器的相对温度系数, 取值为 $-1.1 \times 10^{-4}/K$ 。电光晶体为 $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的石英晶体, 其半波电压约为 180 kV , 其旋光角度为 303° , $\partial\rho/\rho\partial T = 1.4 \times 10^{-4}/K$ 。计算结果如图 2 所示。图中曲线 a~ f 分别对应不同电压情况下, 电压传感器输出因环境温度变化而产生的相对误差。图中所标的弧度数表示待测电压引起的相移值, 即(5)式中的 ϕ 。0.6 rad 的相移对应着约 34 kV 的外加电压。

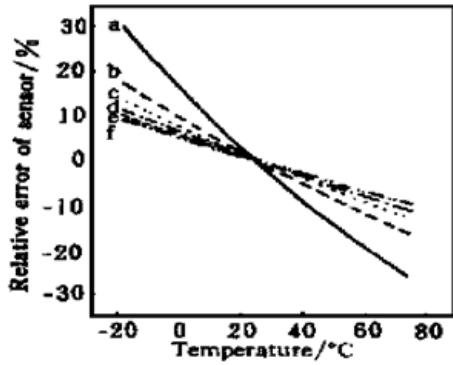


Fig. 2 Temperature characteristic of voltage sensor. Phase modulated by voltage (rad.).
a: 0. 1, b: 0. 2, c: 0. 3, d: 0.4, e: 0. 5, f: 0. 6

从图 2 中可以看到: 1) 传感器在固定电压作用下, 其输出随环境温度的变化可很好地近似为温度的线性函数。这已被实验证明, 同时也是目前对电压传感器进行固定电压测量时, 温度补偿的基础⁴¹。2) 这种线性函数的斜率与外加电压的大小密切相关, 随着待测电压的从小往大增加, 线性函数的斜率逐渐由小变大。外加电压为 5 kV 左右时, 斜率为 $-5.896 \times 10^{-3}/\text{K}$; 而当外加电压约 34 kV 时, 斜率为 $-1.947 \times 10^{-3}/\text{K}$, 斜率变化了 3 倍。传感器的这种温度特性给其全量程的温度补偿带来了困难。目前还没有见到传感器全量程温度补偿方案的报道。

4 全量程温度补偿方法

光沿 z 向传输时, 有 $\phi \ll \rho$ 。(8) 式可写成:

$$S = \cos\sigma_0(1 + \gamma\Delta T) - 2\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T)\cos\sigma_0(1 + \gamma\Delta T) + \frac{\phi}{\rho[1 + (\partial\rho/\partial T)\Delta T]}\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T)\sin\sigma_0(1 + \gamma\Delta T), \quad (9)$$

式中 ΔT 为温度的变化量。考虑到 $\sigma_0 = \pi/2$, (9) 式可简化为:

$$S = -\sin\gamma\Delta T[1 - 2\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T)] + \frac{\phi}{\rho[1 + (\partial\rho/\partial T)\Delta T]}\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T)\cos\gamma\Delta T. \quad (10)$$

由于 $\gamma\Delta T \ll 1$, $\sin\gamma\Delta T \approx \gamma\Delta T$, $\cos\gamma\Delta T \approx 1$, (10) 式可再次改写成:

$$S = \gamma\Delta T[1 - 2\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T)] + \frac{\phi}{\rho[1 + (\partial\rho/\partial T)\Delta T]}\sin^2\rho(1 + \frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T). \quad (11)$$

由(11)式可以看到, 电压传感器的输出由两个部分组成, 一为外加电压为零时传感器的输出, 二为相位延迟器温度变化为零时传感器的输出。由此可以得到光纤电压传感器全量程温度补偿方案:

- 1) 由实验定出无外加电压作用下, 电压传感器的温度输出响应 $S_1(t)$;
- 2) 由实验定出敏感材料在电压作用下的温度响应 $S_2(t)$ 。

则有:

$$S(t) = S_1(t) + S_2(t) \quad (12)$$

在获知传感器所处环境的温度后, 就可以很方便地对传感器进行全量程的温度补偿。采用这种方法, 实现了电压量程 0~ 10 kV、温度 0~ 70 °C 范围内误差 $\pm 0.4\%$ 的温度补偿。具体实验结果将另文报道。

结 论 光纤电压传感器的温度特性与外加电压有关, 外加电压不同, 其温度特性曲线的斜率也不同。这时, 为了能够实现电压传感器全量程的温度补偿, 必须获取两个关键的参数: 一为电压传感器在无外加电压作用下的温度输出响应参数; 二为敏感材料在电压作用下的温度响应参数。

参 考 文 献

- [1] Mitsui T, Hosoe K, Usami H *et al.* . Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, **2**(1): 87~ 93
- [2] Lee K S. New compensation method for bulk optical sensors with multiple birefringence. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(11): 2001~ 2011
- [3] Lee K S. Electrooptic voltage sensor: Birefringence effects and compensation methods. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(30): 4453~ 4461
- [4] Niewisch J, Menke P, Krammer P *et al.* . Temperature compensation of a potential transformer using a BSO pockels cell. *Proc. of OFS-11: Eleventh International conference on Optical Fiber Sensor—Advanced Sensing Photonics*, Edited by Ohtsuka Y and Yoshino T. May 21~ 24, 1996. Japan, Publisher: JSAP, IEICE, IEEj and SICE: 152~ 155
- [5] Tabor W J, Chen F S. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence: Experiments with ytterbium orthoferite. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(7): 2760~ 2765

Temperature Characteristic of High Voltage Fiber Optic Sensor

Zheng Xiaoping Liao Yanbiao

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

(Received 11 March 1999; revised 3 August 1999)

Abstract The temperature characteristic of fiber optic sensor for high voltage within full range is analyzed. It is found that the sensitivity of the sensor to temperature depend on the magnitudes of voltage applied to the sensor. To realize temperature compensation over full range of the sensor, two key parameters must be acquired. One is the response of the sensor to temperature when voltage is zero; another is the response of the sensing material to temperature when voltage is applied.

Key words fiber optic sensor, voltage, temperature.