

一种高精度补偿式双折射型光纤 温度传感系统

金晓丹 廖延彪 赖淑蓉 赵华凤

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 提出一种新型的偏振调制光纤传感器的补偿技术,用于双折射型光纤温度传感器系统,传感探头使用同一偏振分光棱镜既作为起偏器,又作为检偏器,采用反射式光路,使系统具有简单、可靠、实用的特点。实验结果表明:采用这种补偿技术的光纤传感器具有较好的测量精度和长期稳定性。

关键词 补偿技术, 光纤温度传感器

1 引言

在强电磁场和高电压系统中,温度是需要测量和控制的重要物理量之一^[1],传统的电测技术如热电偶等由于具有电磁噪声和产生短路引起爆炸等危险而无法使用。光纤温度传感器具有电绝缘性能好、抗强电磁干扰、使用安全可靠、体积小、重量轻,特别适用于强电磁场、高电压以及有毒有害、易燃易爆等恶劣环境下使用,有着广阔的应用前景。

目前研制的光纤温度传感器不少存在着测量精度低和长期稳定性差等缺点,因此难于实用化。本文利用双折射晶体的温度效应,从而实现了对温度的测量,并提出一种偏振调制型光纤传感器的补偿技术,从原理上消除了光源功率的波动、光纤传输损耗的变化、光纤耦合器耦合比的变化以及光电转换效率的漂移等因素对于测量结果的不利影响,使传感器系统具有较好的测量精度和稳定性^[2]。

2 补偿原理

光纤传感器系统由光发射—接收机及信号处理系统与光纤传感探头两部分组成,如图 1 所示。光发射—接收机中采用单光源 S 通过光开关 OS 实现两路光交替分时发光、双探测器 D_1 和 D_2 同时探测的工作方式,这样可避免双光源特性不一致给系统带来的不利影响。为了减小温度传感探头的体积,采用反射式结构,使用同一偏振分光棱镜既作为起偏器,又作为检偏器,同时将来自单光源的两束入射光分光及合束。

光纤温度传感探头由三个自聚焦透镜 G_1, G_2 和 G_3 、全反镜 M 和偏振分光棱镜 $P.S.$ 构成一

个反射式光路,光源 S 发出的光经光开关 OS 转换为交替发光的两路光信号 S_1 和 S_2 。当只有 S_1 工作时,光通过光纤耦合器 Y 由光纤 1 传至传感头,由 G_1 准直为平行光,通过棱镜 P 、 S 起偏后,经过双折射晶体 C 、全反镜 M 反射后,沿入射光路返回,载有被测温度的信息,由 P 、 S 分成透射光和反射光,透射光由 G_1 会聚到光纤 1,传输通过 Y 至 D_1 ,反射光由 G_3 会聚到光纤 3,传输至探测器 D_2 ,从而两个探测器同时接收得到两个光信号 I_{11} 和 I_{12} ;当只有 S_2 工作时,光由光纤 2 传至传感头,由 G_2 准直为平行光,直接由棱镜分为两束光,两个探测器同时接收得到两个光信号 I_{21} 和 I_{22} ,它不载有被测温度的信息,作为参考光路来补偿光纤传输损耗的变化和光电转换效率的漂移等不利因素的影响。

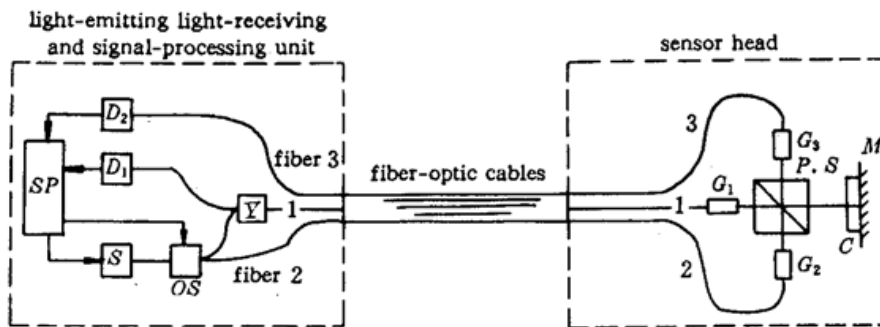


Fig. 1 Schematic configuration of the fiber-optic temperature sensor

令 I_{01} 和 I_{02} 是两路光信号 S_1 和 S_2 的光功率; C_Y 和 $C_{Y'}$ 分别为光从光源通过光纤耦合器 Y 以及反向通过的传输系数; F_1 , F_2 和 F_3 分别为三根传输光纤的传输系数; R_1 和 R_2 分别为两路探测器的光电转换效率,则:

$$I_{11} = \frac{1}{2} I_{01} C_Y F_1^2 C_{Y'} R_1 (1 - \cos\delta) \quad (1)$$

$$I_{12} = \frac{1}{2} I_{01} C_Y F_1 F_3 R_2 (1 + \cos\delta) \quad (2)$$

$$I_{21} = \frac{1}{2} I_{02} F_1 F_2 C_{Y'} R_1 \quad (3)$$

$$I_{22} = \frac{1}{2} I_{02} F_2 F_3 R_2 \quad (4)$$

信号处理系统对(1)~(4)式所示的四个信号进行如下的运算,得到补偿信号输出为

$$V = \frac{I_{11}/I_{21} - I_{12}/I_{22}}{I_{11}/I_{21} + I_{12}/I_{22}} = -\cos\delta \quad (5)$$

式中 δ 是只与被测温度有关的两线偏振光的相位差。

可见,补偿信号输出 V 和光源的输出功率、光纤的传输损耗、光纤耦合器的耦合比以及光电探测器的转换效率无关,达到补偿的目的。

3 传感探头的设计

3.1 原理

一束单色平行光通过一单轴晶体时,由于双折射效应分解为振动方向互相垂直的两束线偏振光,若晶体光轴与晶面平行,光垂直入射,则经过厚度为 d 的晶片后,两偏振光之间的相位

差 δ 为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d (n_e - n_o) \quad (6)$$

式中, n_e 和 n_o 分别为晶片的 e 光和 o 光的折射率, λ 为光的波长。

由于温度变化引起的相位变化可由下式表示

$$\Delta\delta = \delta \left(\alpha + \frac{\Delta n_e - \Delta n_o}{n_e - n_o} \right) \quad (7)$$

式中, $\alpha = \Delta d/d$ 是晶体的线膨胀系数。

对于石英晶体^[3], 垂直于光轴的线膨胀系数为 $\alpha = 13.37 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 对于 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 的光, $\Delta n_e = -0.651 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\Delta n_o = -0.541 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $n_e - n_o = 0.00908$, 由此得

$$\Delta\delta = -1.014 \times 10^{-4} \delta / ^\circ\text{C} \quad (8)$$

可见, 利用单轴晶体的双折射效应可以制成光纤温度传感器, 其灵敏度与光源波长和晶片厚度有关。

3.2 探头结构设计

为制成简单、可靠、实用的光纤温度传感器, 探头结构设计时主要应考虑以下几个问题:

- (1) 晶片厚度的选择: 应根据所要求的测温范围和测量精度确定晶片厚度。
- (2) 传输光纤和探头以及各个光学元件间的耦合, 既便于装调, 又应具有较高的耦合效率。
- (3) 结构紧凑, 机械性能及热稳定性好。
- (4) 便于联网。

4 温度传感器的实验及结果

4.1 温度灵敏度

由式(7)计算得单位厚度晶片的相位灵敏度为

$$|\Delta\delta| = 0.5^\circ / \text{mm} \cdot ^\circ\text{C}$$

若系统能检测的最小相位差为 0.2° , 则温度灵敏度为

$$|\Delta T| = \frac{0.2^\circ}{d |\Delta\delta|} = \frac{0.4}{d} \quad (9)$$

实验中选用 $d = 7 \text{ mm}$ 厚度的晶片, 计算得温度灵敏度为 $\Delta T = 0.06^\circ\text{C}$ 。

由实验数据所得图 4 曲线, 在线性工作区域可得温度灵敏度为 0.1°C , 与理论计算结果比较一致, 可见温度灵敏度与晶片的厚度成反比。

4.2 响应时间

由于传感头热容量较大, 则响应时间较长, 根据传感头的具体结构, 利用传热学原理进行了计算, 其响应时间为 10 s 数量级, 为此将传感探头和热敏电阻置于管式炉中同一位置, 通过升温到温度稳定两测温探头温度变化的滞后关系, 计算出传感探头的响应时间, 经过多次反复实验后, 估计温度探头的响应时间为 20 s 。

4.3 补偿效果

为了验证上述偏振调制光纤传感器补偿技术的补偿效果, 利用双折射晶体的温度效应, 采用这种补偿技术构成图 1 所示的光纤温度传感器。7 mm 厚的石英晶体作为传感材料, 光纤为 $100/140 \mu\text{m}$ 和 0.2 N.A 的多模光纤, 自聚焦透镜为直径 2.0 mm 和 0.32 N.A , 光纤耦合器为

3 dB 多模熔结型耦合器,采用中心波长 633 nm 的 He-Ne 激光器作为光源。

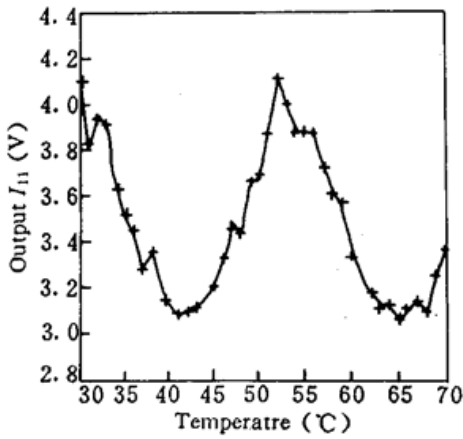


Fig. 2 Uncompensated signal I_{11} as output as a function of temperature

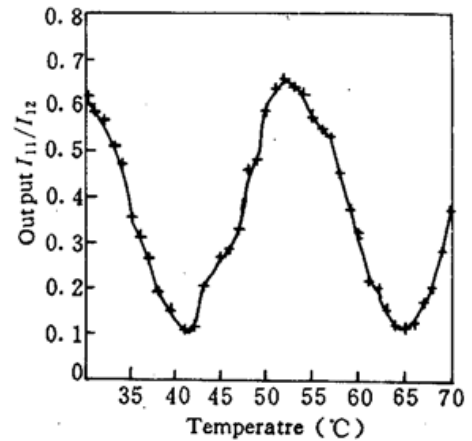


Fig. 3 Signal I_{11}/I_{21} as a function of temperature

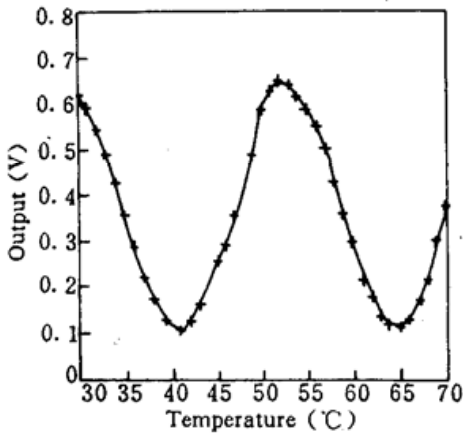


Fig. 4 Compensated signal V as output as a function of temperature

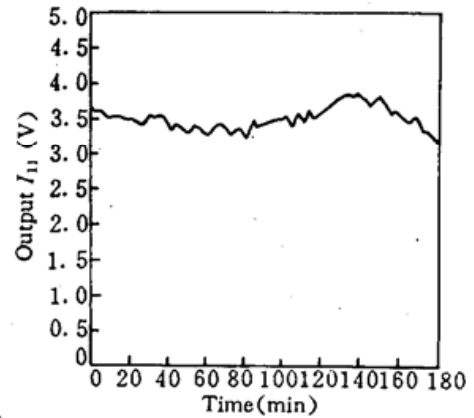


Fig. 5 Uncompensated signal I_{11} as a function of time

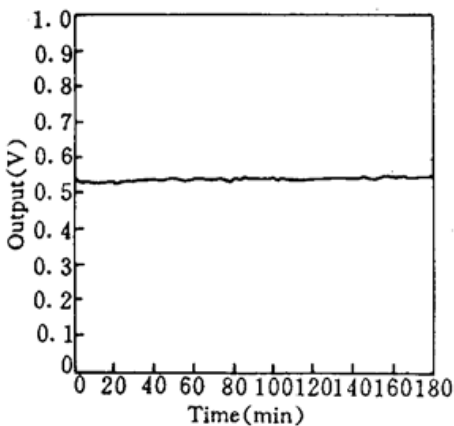


Fig. 6 Compensated signal V as a function of time

图 2 为未补偿信号 I_{11} 随温度变化的曲线,图 3 为比值输出 I_{11}/I_{21} 随温度变化的曲线,它可对光源输出功率波动和输入光纤损耗变化进行补偿,图 4 为补偿信号输出 V 随温度变化的曲线,可见补偿效果是很明显的。

为了进一步验证补偿效果,可通过未补偿和补偿信号长期漂移特性的对照,如图 5 和图 6 所示,在某一恒温 $T = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时在三个小时内的信号漂移情况,可以看出未补偿信号 I_{11} 相对漂移对应温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化,而补偿信号 V 相对漂移对应温度只有 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化,测量精度和稳定性提高了一个数量级。

5 结论

本文研制成功一种高精度补偿式双折射型光纤温度传感系统,提出一种偏振调制型光纤传感器补偿技术,消除了光源发光功率的波动、光纤的传输损耗的变化、光纤耦合器的耦合比

变化以及光电转换效率漂移等因素对测量结果的不利影响。传感探头采用反射式光路,使系统具有简单、可靠、实用的特点,根据所需测量温度的范围和测量精度,通过选择双折射晶体的厚度可得到最佳的输出信号随温度的单值函数,但如果晶体太薄会使温度传感器的灵敏度下降。并通过测温实验验证,结果表明:采用这种反射式补偿结构构成的光纤传感器具有较好的测量精度和长期稳定性。

上述补偿结构不仅适用于基于双折射效应的光纤温度传感器,而且适用于其它物理量测量的偏振调制型光纤传感器,对偏振调制型光纤传感器存在的测量精度低、长期稳定性差等问题的解决具有普遍意义。

参 考 文 献

- 1 A. J. Rogers. Optical temperature sensor for high voltage application. *Appl. Opt.*, 1982, 21(5): 882~885.
- 2 A. B. Wang, X. J. Fang, X. D. Jin *et al.*. Optical fiber pressure sensor based on photoelasticity and its application. *J. of Lightwave Technology*, 1992, 10(10): 1464~1472
- 3 李景镇 主编. 光学手册. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986

An Optical Fiber Temperature Sensor System Based on the Birefringent Effect with High Accuracy and Compensation Function

Jin Xiaodan Liao Yanbiao Lai Shurong Zhao Huafeng

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

Abstract A novel compensation technique for polarization-modulated optical fiber sensors is proposed, and an optical fiber temperature sensor system is constructed. In the sensor head, a polarization beam splitter is used not only as a polarizer, but also as an analyzer, and the reflective structure is used so that the sensor head is simple, reliable and practical. The experimental results show that this compensation technique can stabilize the sensor output with a high accuracy and better long-term stability.

Key words compensation technique, optical fiber temperature sensor