

# 偏振调制的光纤温度传感器补偿结构的进一步分析

王 勇 廖延彪 赵华凤 赖淑蓉  
(清华大学电子工程系 北京 100084)

辛 军 冯其波 林铁生  
(北方交通大学物理系 北京 100044)

**提要** 对原提出的偏振调制的光纤温度传感器补偿结构作了改进。进一步分析了这一结构的补偿效果,并设计了相应的实验进行验证。证明了这一补偿结构可以提高测量的精度和长期稳定性。

**关键词** 偏振调制, 补偿结构, 双折射, 光纤温度传感器

## 1 引 言

偏振调制的光纤温度传感器可以用来测量温度、压力、加速度、电压和电流等<sup>[1-5]</sup>。对于模拟量测量,要求输出信号仅与被测量有关,然而实际的输出信号会受到光源波动、光纤传输损耗的变化、探测器老化等诸多因素的影响。近年来光纤传感器补偿技术有了很大的发展,如 Spillman<sup>[6]</sup>提出在传感头上采用一个偏振分光棱镜以获得两个成比例的信号,可以消除光源的功率波动和两根输入光纤损耗的变化。但是两根输出光纤的损耗变化以及探测器的老化却不能补偿。Culshaw<sup>[7]</sup>提出了一种光桥结构,采用四个耦合器形成一个四端口的传感结构,其中包括两根输入光纤、两根输出光纤和两个不同的探测器。从理论上讲所有的干扰都可以消除,但它对耦合器模式分布的变化引起的误差不可能除去,同时这一结构也较复杂。王安波<sup>[8]</sup>采用一个对模式分布不敏感的偏振分光棱镜,再引入一个参考光,消除了压力传感器中光纤损耗和探测器的影响。

我们曾提出了两种光纤温度传感器的补偿结构,并给出了初步的实验结果<sup>[9,10]</sup>。本文中对前述结构进行了改进,采用波长为  $1.31\ \mu\text{m}$ , 功率为  $2\ \text{mW}$  的 LD 替换了原结构中波长为  $0.85\ \mu\text{m}$ , 功率为  $0.1\ \text{mW}$  的 LED 光源,并将用于测温的石英晶体的厚度由  $7\ \text{mm}$  减至  $0.9\ \text{mm}$ ,不但可保证在测量范围  $0\sim 150^\circ\text{C}$  内输出信号的单值性,而且提高了温度响应的速度。另外,前文中并未定量分析系统的补偿性能,为此,本文对改进结构的补偿性能给出了进一步的分析和实验结果。

## 2 补偿的基本原理

图 1 所示是偏振调制的光纤温度传感器补偿结构。应用一斩波器实现单一光源分时发光

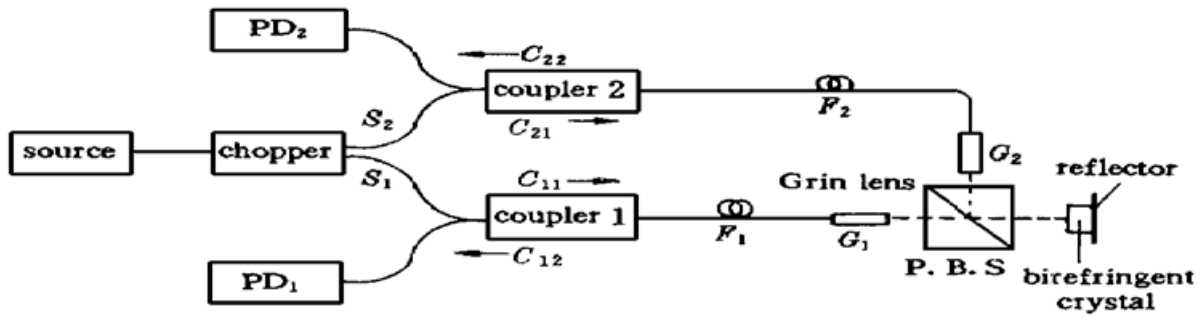


图 1 偏振调制的光纤温度传感器补偿结构

Fig. 1 Compensation configuration for the polarization-modulated fiber-optic temperature sensor

注入系统。偏振分光棱镜 P. B. S 的偏振方向与石英光轴方向差  $45^\circ$ 。只有  $S_1$  发光时, 两个探测器的输出分别为

$$\begin{aligned} I_{11} &= I_{S_1} C_{11} F_1^2 K^2 C_{12} D_1 M_1 \\ I_{12} &= I_{S_1} C_{11} F_1 K C_{22} D_2 M_2 \end{aligned} \quad (1)$$

只有  $S_2$  发光时, 两探测器的输出分别为

$$\begin{aligned} I_{21} &= I_{S_2} C_{21} F_2 K F_1 C_{12} D_1 M_2 \\ I_{22} &= I_{S_2} C_{21} F_2^2 K C_{22} D_2 M_1 \end{aligned} \quad (2)$$

这里  $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$  表示图 1 中定向耦合器的传输系数,  $K$  为 P. B. S 的分光比,  $D_1, D_2$  为两探测器的响应率,  $M_1, M_2$  为反射光的调制函数

$$\begin{aligned} M_1 &= \cos^2(\delta/2) \\ M_2 &= \sin^2(\delta/2) \end{aligned} \quad (3)$$

这里,  $\delta$  表示  $o$  光和  $e$  光在石英晶体中的相位差,  $\delta = 4\pi l(T) \Delta n(\lambda, T) / \lambda$ , 其中  $\Delta n$  表示  $o$  光与  $e$  光的折射率差, 它是温度和波长的函数, 晶体长度  $l$  仅是温度的函数。补偿信号为

$$V = \sqrt{\frac{I_{12} \cdot I_{21}}{I_{11} \cdot I_{22}}} = \frac{M_2}{M_1} = \text{tg}^2(\delta/2) \quad (4)$$

由式(4)可见, 补偿信号  $V$  与光源功率、传输损耗、探测器、耦合器以及 P. B. S 的分光比无关。因此这一结构可望消除外界干扰, 达到较高的测量精度和长期稳定性。

### 3 实际系统补偿性能的研究

实际上, 公式(1)~(4)是一种简化的表示, 存在如下三个方面的缺陷: (1) 没有考虑光源光谱的影响, 一方面使理论曲线产生误差, 另一方面使得式(4)的分子、分母中与波长有关的因子不能直接约去; (2) 由于光源分时发光, 造成  $I_{11}, I_{12}$  和  $I_{21}, I_{22}$  的探测存在时间差, 故分子、分母中变化较快的因子不能直接约去; (3) 未考虑多模光纤中模式噪声的影响, 不同模式的传输特性不同, 外界干扰对其影响也不同, 故分子、分母中与模式传输有关的因子不能直接约去。

由于光源的波动及外界的干扰在式(4)中不能完全消除, 造成实际系统的补偿性能低于理想情况。为获知本系统的实际补偿效果, 我们在补偿信号的修正、光源波动的补偿及传输光纤的抗干扰性能方面进行了数值计算和实验。

### 3.1 补偿信号的修正

考虑光源的光谱分布后,式(4)更改为

$$V = \left[ \frac{\int_{\delta\lambda} P(\lambda) C_{11} F_1 K C_{22} D_2 M_2 d\lambda \cdot \int_{\delta\lambda} P(\lambda) C_{21} F_1 K C_{12} D_1 M_2 d\lambda}{\int_{\delta\lambda} P(\lambda) C_{11} F_1^2 K^2 C_{12} D_1 M_1 d\lambda \cdot \int_{\delta\lambda} P(\lambda) C_{21} F_2^2 K^2 C_{22} D_2 M_1 d\lambda} \right]^{1/2} \quad (5)$$

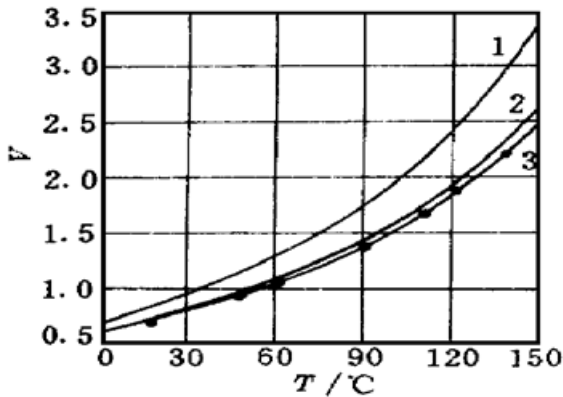


图2 数值计算得到的输出信号  $V$  与实验结果的比较

曲线1: 光谱  $P(\lambda)$  为 Gauss 分布; 曲线2: 光谱  $P(\lambda)$  为多纵模分布; 曲线3: 由实验值拟合得到

Fig. 2 Compensation signal  $V$  versus temperature curve 1:  $P(\lambda)$  is a Gaussian distribution; curve 2:  $P(\lambda)$  is a multi-longitudinal mode distribution; curve 3: experiment

这里  $P(\lambda)$  为光源的光谱分布函数,  $\delta\lambda$  为其谱宽。在式(5)中代入光谱分布函数,并利用数值积分方法可以得到在  $0 \sim 150^\circ\text{C}$  范围内的补偿信号  $V$  如图2所示。图中曲线1和2是数值计算的结果,曲线3为实验值拟合曲线。这里曲线1假设光源光谱  $P(\lambda)$  为高斯分布,其中心波长为  $1.31 \mu\text{m}$ ,谱宽为  $1 \text{ nm}$ 。曲线2是代入实际使用的多纵模 LD 光谱拟合曲线后的结果。对比三条曲线可见,光源光谱分布对于补偿信号是有影响的,分布函数  $P(\lambda)$  与实际光谱越接近,式(5)的误差越小。另外随着温度的升高,理论值与实验值的差别也随之增加,这主要来源于计算所用  $\Delta n$  的温度系数与实际值的差别。

### 3.2 光源波动的补偿

光源波动包括中心波长的漂移、功率的波动、谱宽及谱形的变化,主要来自于激光器本身温度和驱动电流的变化,光源波动是我们要补偿的一个主要

因素。

首先研究这一补偿结构对于光源功率随时间变化的补偿效果。我们制作的光学斩波器使得  $S_1, S_2$  交替发光频率为  $400 \sim 500 \text{ Hz}$ ,造成两组探测信号  $I_{11}, I_{12}$  和  $I_{21}, I_{22}$  的采样时间相差  $1.25 \sim 1 \text{ ms}$ 。因而当光源功率波动频率较高时,可能出现较大的测量误差。我们对 LD 光源进行  $5\%$  的功率调制,研究系统对于光功率波动的补偿能力。探头恒温于  $25^\circ\text{C}$ ,由于驱动电流调制所形成的输出波长调制小于  $0.01 \text{ nm}$ ,后面会看到这一影响可以忽略。当对光源进行不同频率的调制时,测得输出的补偿信号相对波动  $\Delta V/V$  如图3所示,而此时各单路信号  $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$  的波动超过  $5\%$ 。我们称补偿前后  $V$  值相对波动的比值为补偿系数。在图3中,当调制频率为  $50 \text{ Hz}$  时,补偿系数达到  $25 \text{ dB}$ ;  $100 \text{ Hz}$  时补偿系数为  $18 \text{ dB}$ ,由图2可知,相当于测温误差小于  $0.01^\circ\text{C}$ 。在实际系统中应尽可能减小功率波动的频率和幅度。

同时我们研究了测量系统对光源中心波长漂移的补偿效果。对于 LD 光源,其波长随温度的漂移系数约为  $0.1 \sim 0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由式(5)知,光源中心波长的漂移是不能完全补偿的,采用数值计算的方法得到当中心波长漂移  $\Delta\lambda$  时补偿信号  $V$  的变化如图4所示。当波长漂移  $0.1 \text{ nm}$  时,  $V$  变化了  $0.005$ ,由图2可知,相当于测温误差为  $0.05^\circ\text{C}$  (探头温度  $0^\circ\text{C}$  时) 和  $0.12^\circ\text{C}$  (探头温度  $150^\circ\text{C}$  时)。因此为减小波长漂移所产生的测温误差,对 LD 的温度波动应控制在  $0.5^\circ\text{C}$  以内,这是容易实现的。

### 3.3 对传输光纤的补偿

由于在实验系统中采用了多模光纤传输信号,当传输光纤受到外界干扰(如温度变化、振

动、弯曲等)时, 光纤传输损耗的变化和模式噪声将引起输出信号  $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$  的波动。光纤传输损耗的变化一般较为缓慢, 由式(4)可知, 它易于消除。而模式噪声源于光纤中多个模式的干涉, 不同模式在光纤中的传输特性不同, 外界扰动将造成模式功率分布的改变, 因此式(4)不能完全消除模式噪声所引起的输出波动。为检验测量系统对于外界扰动的补偿效果, 即抗干扰性能, 设计了相应的实验。采用扰动器对传输光纤  $F_1$  和  $F_2$  施加连续的低频扰动(20~ 30 Hz), 并保持探头的温度不变, 此时各路信号  $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$  的波动约为 4~ 15%, 而补偿信号随时间的相对波动  $\Delta V/V$  小于 0.8%, 如图 5 所示, 相当于测温误差为 0.08℃。此时补偿系数为 17 dB。

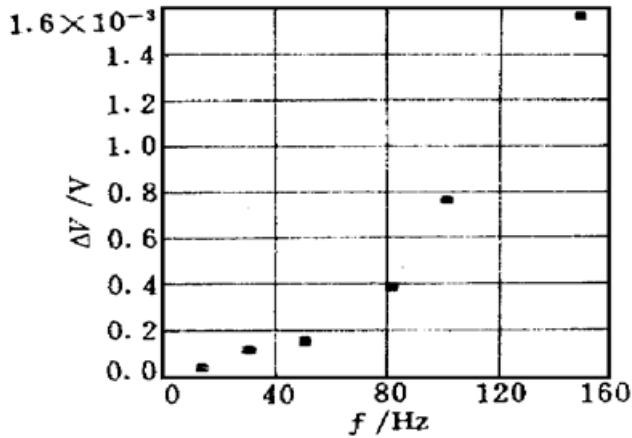


图 3 输出的相对变化与光源调制频率的关系  
Fig. 3 Relative variation  $\Delta V/V$  as a function of the source modulation frequency  $f$

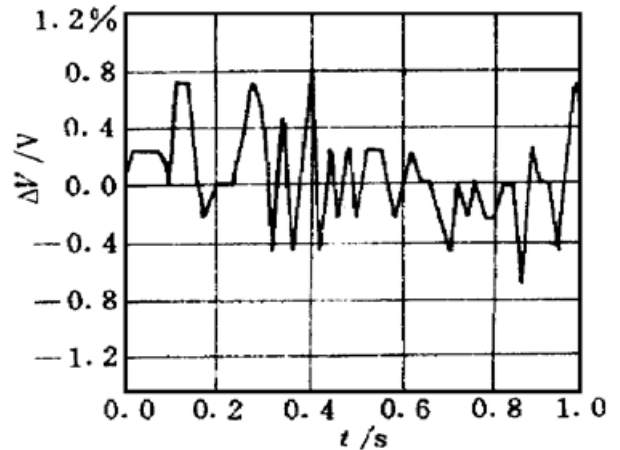


图 4 模拟的波长漂移  $\Delta\lambda$  产生的输出误差  $\Delta V$   
Fig. 4 Simulated plot of the signal error  $\Delta V$  versus the drift of the source center wavelength

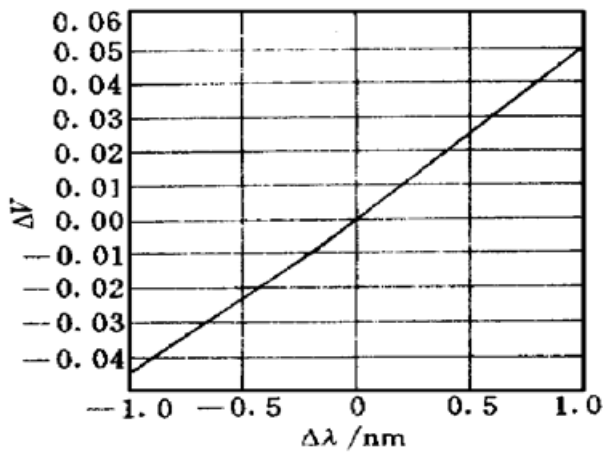


图 5 扰动光纤时, 补偿信号的相对变化  $\Delta V/V$   
Fig. 5 Relative variation  $\Delta V/V$  of the compensation signal, while fibers are disturbed

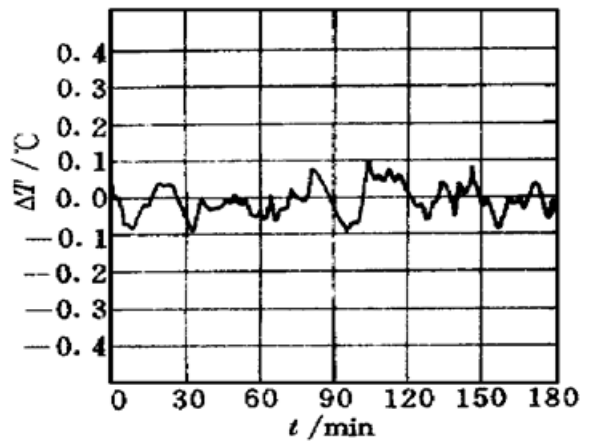


图 6 温度测量的误差随时间的变化  
Fig. 6 Temperature error  $\Delta T$  as a function of time  $t$

### 3.4 系统测量的稳定性实验

为考察系统在实际应用环境下的稳定性, 记录了实验系统在 3 h 内温度测量的波动, 如图 6 所示, 此时探头的温度变化控制在 0.1℃ 以内。在此过程中,  $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$  的波动约为 3.5%, 而补偿信号  $V$  的变化为 0.9%。由此可知, 实际系统的补偿系数超过 15 dB, 测量稳定性达到 0.1℃, 即系统的随机误差小于 0.1℃, 再通过校准消除测量的系统误差, 保证了系统的测量精度 0.1℃, 补偿效果是令人满意的。因而这种偏振调制的光纤温度传感器补偿结构的精度、稳定性

已达到了实用化的要求。

### 参 考 文 献

- 1 W. B. Spillman, Jr. . Multimode fiber-optical pressure sensor based on the photoelastic effect. *Opt. Lett.*, 1982, **7** (8): 388~ 390
- 2 A. J. Rogers. Optical temperature sensor for high voltage applications. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(5): 882~ 885
- 3 S. Tai, K. Kyuma, M. Nunoshita. Fiber-optic acceleration sensor based on the photoelastic effect. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1771~ 1774
- 4 A. Papp, H. Harms. Magneto-optical current transformer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(22): 3729~ 3745
- 5 T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami *et al.*. Development of fiber-optic voltage sensors and magnetic-field sensors. *IEEE Trans. Power Del.*, 1987, **PWRD-2**(1): 87~ 93
- 6 W. B. Spillman, D. H. McMahon. Multimode fiber optic sensor. *Proc. Conf. Opt. Fiber Sensor OFS'83 (London)*, 1983. 160~ 163
- 7 B. Culshaw, I. P. Giles. A balancing technique for optical fiber intensity modulated transducers. *Opt. Fiber Sensor '85, Proc. SPIE*, 1985. 117~ 120
- 8 Wang Anbo, He Se, Fang Xiaojan *et al.*. Optical fiber pressure sensor based on photoelasticity and its application. *J. of Lightwave Tech.*, 1992, **10**(10): 1466~ 1472
- 9 Jin Xiaodan, Liao Yanbiao, Lai Shurong *et al.*. Single-LED optical fiber sensor system using a novel polarization-modulated compensation technique. *SPIE*, 1995, **2594**: 243~ 248
- 10 Jin Xiaodan, Liao Yanbiao, Lai Shurong *et al.*. An optical fiber temperature sensor system based on the birefringent effect with high accuracy and compensation function. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(5): 465~ 469 (in Chinese)

## Analysis of a Novel Compensation Configuration of a Polarization-modulated Fiber-optic Temperature Sensor

Wang Yong Liao Yanbiao Zhao Huafeng Lai Shurong

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

Xin Jun Feng Qibo Lin Tiesheng

(Department of Physics, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract** A novel reflective bridge-shaped compensation configuration has been developed for the polarization-modulated fiber-optic temperature sensors. We study the practical compensation effects of this configuration by designing the corresponding experiments. It is proved that this system can improve the measuring accuracy and long-term stability.

**Key words** polarization-modulation, compensation configuration, birefringence, fiber optic temperature sensor