

强度调制型光纤传感器的补偿技术

金晓丹 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 采用光桥平衡技术可实现对强度调制型光纤传感器系统不稳定因素的补偿。文中给出透射式和反射式两种改进方案, 对其进行了较详细地分析, 提出的反射式光桥补偿结构具有简单、可靠、实用的特点。实验结果与理论分析相一致, 取得较好的补偿效果。

关键词 光桥平衡补偿技术, 光纤传感器。

1 引 言

自1977年美国海军研究所开始执行光纤传感器系统计划以来, 在短短十几年发展过程中, 各种类型的光纤传感器已达百余种, 用于测量温度、压力、位移、速度、磁场、电场、流量等多种物理量^[1~3]。强度调制型光纤传感器是光纤传感器最早发展也是目前使用最广泛的一种调制方式, 它具有结构简单、成本低、性能稳定、采用多模光纤实现光纤传感等优点。但由于它是直接利用被探测的光强与被测参量之间的关系实现的, 传感器系统的稳定性易受各种因素的影响, 因此要想实现高精度测量, 必须采取适当的稳定性补偿措施。国内外学者为了寻求各种实用的补偿方法, 做了大量的研究工作^[4,5], 综合起来主要有五种补偿方法: 光桥平衡法、时分信号接收法、光信号分支法、旁路光纤监测法和双波长补偿法。光桥平衡法是得到很好补偿效果的方法之一。本文在对平衡补偿法进行较详细地分析的基础上, 提出了两种改进方案: 透射式和反射式光桥补偿结构, 并给出了理论分析和实验结果。

2 光桥平衡补偿方法的原理

光桥平衡法是基于具有两个输入和两个输出的四端网络传感头结构, 两个输入分别接两个相同的发光二极管光源, 两个输出端分别接两个相同的光电探测器, 两个发光二极管光源采用时分调制或频率划分调制工作方式。1985年由英国Culshaw首先提出的光桥补偿结构如图1所示^[6]。

两个光源 S_1 和 S_2 通过两根入射光纤 L_1 和 L_2 与光桥的两个输入端相连; 两个光电探测器 D_1 和 D_2 通过两根出射光纤 L_3 和 L_4 与光桥的两个输出端相连; C_{ij} 表示从第 i 个光源发出的光耦合进第 j 个光电探测器的传输函数; 每个元件的标号 S 、 L 、 M 、 D 分别为每个元件相应的传输函数。两个光源采用时分调制方式交替发光、两个探测器同时探测, 得到四个信号:

$$\left. \begin{aligned} I_{11} &= S_1 L_1 M L_3 D_1 & I_{12} &= S_1 L_1 C_{12} L_4 D_2 \\ I_{21} &= S_2 L_2 C_{21} L_3 D_1 & I_{22} &= S_2 L_2 C_{22} L_4 D_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

进行如下的运算，得到相应的输出为：

$$Q = (I_{11} I_{22}) / (I_{12} I_{21}) = [C_{22} / (C_{12} C_{21})] M \quad (2)$$

可见， Q 值仅与被测量和各个耦合器的耦合比有关。而实际上耦合器的耦合比明显地依赖于入射光功率模式分布和光波长以及环境温度的变化。虽然目前单模光纤耦合器的制作技术已趋于成熟，但多模光纤耦合器的稳定性问题却很难解决，国内较好的多模光纤耦合器稳定性也只有 10%，这远远满足不了系统精度和稳定性要求。这种方法的另一个缺点是结构比较复杂，为此，有必要寻求一种新型、高精度、高稳定度的补偿方法。

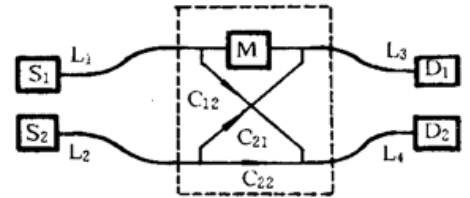


Fig. 1 Basic optical bridge balancing configuration

3 改进方案

目前，强度调制型光纤传感器在稳定性补偿多采用光纤耦合器作为分光与合光元件，由于这种耦合器件很难实现稳定分光，传感器系统的测量精度和稳定性均较差。因此，对高精度光纤传感器，采用对光模式不敏感，分光比较稳定的立方棱镜分光结构不失为一种很好的解决方法。1983 年 Spillman 在他改进的光纤压力传感器中^[7]使用了棱镜偏振分光的方法，将通过传感头的入射光分成两束差动光，实现了对光源光功率和入射光纤损耗的补偿。但由于两根接收光纤和探测器的影响尚未消除，致使系统仍不能长期稳定地工作。

3.1 透射式光桥补偿结构

作者在前人工作的基础上，采用分光棱镜耦合的方法，将一束通过传感头的入射光分成两束差动光，实现对光源光功率和入射光纤损耗的补偿；将另一束光耦合进两根接收光纤，实现对两根接收光纤损耗和探测器响应度的补偿，成功地设计出一种双光路、双探测器的新型光桥补偿结构，达到较好的补偿效果。

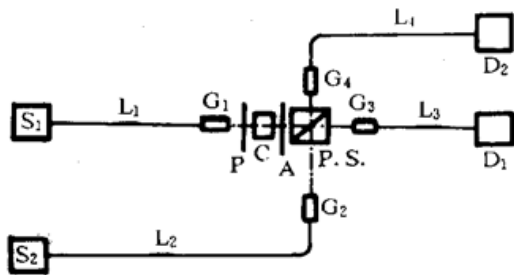


Fig. 2 Transmissive optical bridge balancing configuration

图 2 所示的透射式光桥补偿结构，采用双光源交替发光、双探测器同时探测的工作方式。光源 S_1 发出的光经传感材料，带有被测参量的信息，由偏振分光棱镜 P.S 分成两束偏振光，由 D_1 和 D_2 同时探测；光源 S_2 发出的光不经传感材料，不带有被测量的信息，直接由 P.S 分成两束光，由 D_1 和 D_2 同时探测，从而得到四个信号：

$$\left. \begin{aligned} I_{11} &= (1/2) S_1 L_1 M_1 L_3 D_1 & I_{12} &= (1/2) S_1 L_1 M_2 L_4 D_2 \\ I_{21} &= (1/2) S_2 L_2 L_3 D_1 & I_{22} &= (1/2) S_2 L_2 L_4 D_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中元件标号 S 、 L 、 D 为每个元件相应的传输函数， M_1 和 M_2 为两束偏振光的调制函数， $M_1 = \cos^2(\delta/2)$ ， $M_2 = \sin^2(\delta/2)$ ， δ 为传感材料在被测参量作用下引入的位相差，仅与被测参量有关。进行如下的运算，得到相应的输出为：

$$Q = (I_{11}/I_{21} - I_{12}/I_{22}) / (I_{11}/I_{21} + I_{12}/I_{22}) = M_1 - M_2 \quad (4)$$

可见 Q 值与两个光源发光功率、两根输入光纤损耗、两根输出光纤的损耗以及探测器响应度无关，达到对这些不利因素的补偿。采用这种补偿结构(基于光弹效应)的光纤压力传感器系

统^[8], 已成功地应用于石油化工企业的油罐计量中, 并获得较好的测试结果, 基本满足现场要求, 测量精度和长期稳定性可达到±0.2%。

上述运算是假设两个发光二极管光源完全相同、偏振分光棱镜看作理想偏振分光元件的情况下得到的理论结果。在实际应用时, 由于发光二极管光源中心波长随环境温度发生改变, 约为 0.3 nm/°C, 所以两个发光二极管光源中心波长和光谱特性都不可能一致, 这就引起光纤传输特性和探测器响应度不一致。另外, 偏振分光棱镜分光比也随环境温度变化和光源中心波长的漂移而变化, 这些给系统带来一定的误差。

3.2 反射式光桥补偿结构

为了进一步提高系统的稳定性, 简化系统的结构, 减小传感头的体积, 降低造价, 使系统更趋于实用化, 又设计了一种反射式光桥补偿结构。

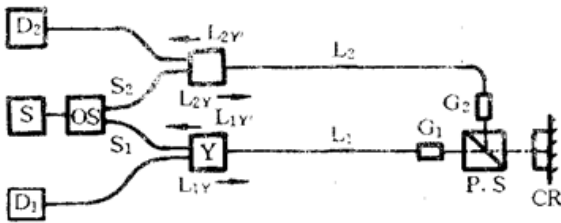


Fig. 3 Reflective optical bridge balancing configuration

图 3 示出反射式光桥补偿结构。采用单光源通过光开关实现交替分时发光、双探测器同时探测的工作方式, 这样可避免双发光二极管光源特性不一致给系统带来的不利影响。使用同一偏振分光棱镜既作为偏振器, 又作为检偏器, 同时将来自单光源的两束入射光分光及合光, 得到四个信号:

$$\begin{aligned}
 I_{11} &= S_1 L_{1Y} L_1^2 K^2 L'_{1Y} D_1 M_1 & I_{12} &= S_1 L_{1Y} L_1 K L_2 L'_{2Y} D_2 M_2 \\
 I_{21} &= S_2 L_{2Y} L_2 K L_1 L'_{1Y} D_1 M_2 & I_{22} &= S_2 L_{2Y} L_2^2 L'_{2Y} D_2 M_1
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中元件标号 S 、 L 、 L_Y 、 D 为每个元件相应的传输函数, M_1 和 M_2 为两束偏振光的调制函数, $M_1 = \cos^2(\delta/2)$, $M_2 = \sin^2(\delta/2)$, δ 为传感材料在被测量作用下引入的位相差, 仅与被测量有关, K 为偏振分光棱镜透反分光比。

进行如下的运算, 得到相应的输出为:

$$Q = (I_{11} I_{22}) / (I_{12} I_{21}) = M_1^2 / M_2^2
 \tag{6}$$

可见 Q 值不仅与光源发光功率、光纤传输损耗和探测器的响应度无关, 而且与分光棱镜的分光比无关, 达到了补偿目的。

在实验室对采用这种补偿结构(基于双折射温度效应)和未采用补偿结构的光纤温度传感器系统, 进行测量精度和长期稳定性测试, 结果如图 4 和图 5 所示, 采用补偿结构的测量精度和长期稳定性均可达到 0.1°C。

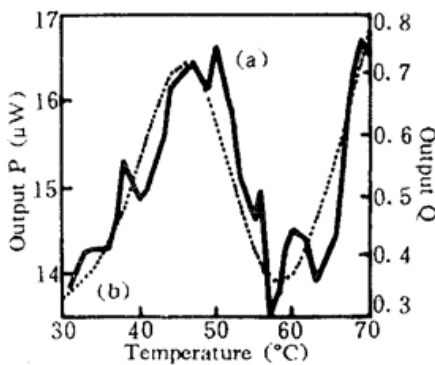


Fig. 4 Measured curve of output Q as temperature (a) not compensated (b) compensated

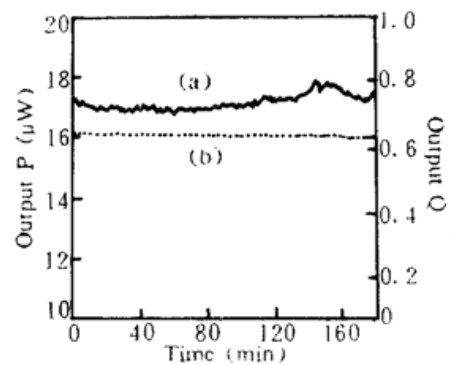


Fig. 5 Measured curve of output Q as time when a definite temperature (a) not compensated (b) compensated

结 论 光桥平衡补偿法是保证强度调制型光纤传感系统稳定可靠工作的有效途径之一。本文对其进行了较详细的分析,设计了透射式和反射式两种光桥补偿结构。反射式光桥补偿结构的突出优点在于:一是采用单光源分时发光的工作方式,弥补了双光源发光特性不一致造成的不利影响;二是传感探头采用反射式补偿光路,不仅结构简单、紧凑,而且使传感系统的灵敏度提高了一倍;三是分时工作的两路光都通过传感探头部分,从而系统输出不仅对光源发光功率的波动、光纤传输损耗的变化和光电探测器响应度漂移因素进行了补偿,同时对传感探头分光棱镜分光比、光学元件传输损耗的变化也进行了补偿。实验结果表明:采用这种反射式补偿结构构成的光纤传感器系统具有较好的测量精度的长期稳定性。

由前面的分析计算可以看出,这种补偿方法不仅适用于基于光弹效应、双折射效应的非功能型光纤传感器,而且还适用于诸如普克尔电光效应、法拉第磁光效应等物理现象构成的非功能型光纤传感器的补偿,对强度调制型光纤传感器系统存在的测量精度低、长期稳定性差问题的解决具有普遍意义。

参 考 文 献

- [1] T. G. Giallorenzi, G. H. Sigel, Optical fiber sensor technology. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(4): 626~665
- [2] B. E. Jones, Optical fiber sensors and systems for industry. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1985, **18**(9): 770~781
- [3] D. A. Krohn, Intensity modulated fiber optic sensors overview. *Fiber Optic and Laser Sensors IV, Proc. SPIE*, 1986, **718**: 2~11
- [4] A. B. Wang, X. J. Fang, X. D. Jin *et al.*, Optical fiber pressure sensor based on photoelasticity and its application. *J. Lightwave Technology*, 1992, **10**(10): 1464~1472
- [5] G. Murtaza, J. M. Senior, Referencing strategies for intensity modulated optical fibre sensors; a review. *Optics & Laser Technology*, 1993, **25**(4): 235~245
- [6] B. Culshaw, I. P. Giles, A balancing technique for optical fiber intensity modulated transducers. *Optical Fiber Sensor' 85, Proc. SPIE*, 1985: 117~120
- [7] W. B. Spillman, Jr, D. H. McMahon, Multimode fiber optic sensor. *Proc. Conf. Opt. Fiber Sensors OFS' 83* (London), 1983: 160~163
- [8] X. D. Jin, J. X. Lin, A fiber-optic pressure sensor with an optical bridge compensation technique. *Laser und Optoelektronik*, Oktober, 1991: 70~73

Compensation Technique of Intensity Modulated Optical Fiber Sensor

Jin Xiaodan Liao Yanbiao

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

(Received 11 June 1995; revised 30 August 1995)

Abstract Optical bridge balancing technique is used to compensate for unstable factors of the intensity modulated optical fiber sensor systems. Both transmissive and reflective methods are given and analyzed in detail. The reflective optical bridge balancing method is simple, reliable and practical. The experiment results shows its consistent with the theoretical analyses and better compensation effect is obtained.

Key words optical bridge balancing technique, optical fiber sensors.