

文章编号: 1001-3806(2002)06-0453-05

强度型光纤传感器补偿技术的研究综述*

杨华勇 吕海宝 徐涛 罗武胜

(国防科技大学理学院,长沙,410073)

摘要: 介绍了强度型光纤传感器中常见的十几种补偿技术的原理及应用现状,比较了它们的优缺点,并展望了补偿技术的发展趋势。

关键词: 光纤传感器;强度调制;补偿技术

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

An overview on the compensation techniques of intensity modulated fiber optic sensor

Yang Huayong, Lü Haibao, Xu Tao, Luo Wusheng

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The main factors affecting the measuring accuracy and stability of intensity modulated fiber optic sensor are put forward. In order to improve the performance of this kind sensor, compensation technique should be adopted to eliminate the influence induced by the external disturbance. More than ten kinds of compensation methods are described and compared in detail.

Key words: intensity modulation; fiber optic sensor; intensity compensation

引言

与其它类型的光纤传感器相比,强度调制型光纤传感器具有成本低、结构简单、设计灵活等优点,但是,同时也存在一个致命的缺点,即由于它采用光强作为信息的载体,所以,不可避免地要受光源功率波动、光纤传输损耗变化、光电探测器的特性漂移等因素的影响,而光源的功率波动是导致测量精度降低的主要原因。所以,要想获得高精度和高稳定性的测量,必须采取有效措施克服这种影响。因此,对于强度调制型光纤传感器的补偿技术的研究,在国内外学术界一直非常活跃,从 20 世纪 80 年代伊始,就有许多学者将研究的重点放在了消除光源功率波动以及其它外界扰动因素对传感器的影响^[1~19]。在此,就常见的十几种补偿技术做一次综述性地比较。

1 补偿方法

强度型光纤传感器的各种补偿技术可以根据补偿原理进行适当的分类。需要说明的是,以下的分类方法并不是唯一的,而且补偿方法还有其它许多种,因篇幅关系并未作一一介绍。

1.1 光源负反馈稳定法

光源的不稳定将直接导致传感器输出的不稳定。过去,人们往往采用稳定光源电压或电流的方法,这就要有结构复杂、价格昂贵的温度稳定装置和功率稳定装置,而且这种方法对由环境温度变化和光源老化所导致的光强变化稳定效果欠佳。为解决这个问题,王其生等人介绍了一种采用光源负反馈环路来稳定光源的一种方法^[8]。如图 1 所示,光源 S 输出的光经过耦合器 C,其中一部分经发送光纤 TF 到反射面,再由接收光纤 RF 接收并被探测器 D₂ 转换作为测量信号;另一部分光输入至反馈光纤 FF 后直接照射到 D₁ 上,经放大后与

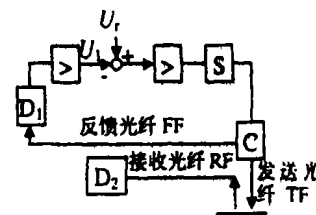


图 1 负反馈光强稳定装置

* 湖南省科技厅工业科技计划项目。

作者简介:杨华勇,男,1974 年 1 月出生。博士研究生。主要从事激光检测、光纤传感的研究。

收稿日期:2001-08-24;收到修改稿日期:2002-04-08

基准电压 U_r 相比较,相减后的电压放大后加到光源 S 上。上述反馈过程的简要分析如下:

光源功率 P () 反馈回路输出 U_1 () ——
 P () 光源驱动电压 $U_r - U_1 = U$ ()

此方法的关键是要获得一个很稳定的参考电压 U_r 以及选择对称的放大器和探测器的参数^[13]。

1.2 分光参考补偿法

分光参考补偿法的基本思路是利用某种光学元件形成测量光和参考光,由于测量光和参考光受到相同的光源波动、光纤损耗等因素的影响,而被测参数只对测量光进行调制,通过较为简单的信号处理,便可达到补偿的目的。这种补偿方法又可以分3类:分振幅型、分波阵面型和取样电流法。

1.2.1 分振幅型 如图 2a 所示,来自激光器的光强被分光镜 B 分成两路,一路为测量光进入发送光纤束,另一路为参考光进入参考光纤束,分别由探测器 D_1 和 D_2 变换为电信号 V_1 和 V_2 。最后输出结果为^[9,11,19]: $R = V_1 / V_2 = k \cdot f(d)$ (1)

式中, $f(d)$ 是反映光纤束光强调制特性的函数, d 是光纤束端面到反射面的距离, k 为与光纤束及后续数据处理单元有关但与光强无关的系数。由此可见,最后的结果 R 是一个与激光光强无关的值,也就是说,光源的功率波动对测量的影响被克服了。但是,由于透射光强和反射光强会随着激光强度起伏和偏振方向变化而不确定的变化,甚至可能出现反向涨落的现象,使光强补偿失效,必须在光路中插入偏振片以改善激光束的偏振特性,或采用带布儒斯特窗的线偏振激光器^[11,12]。

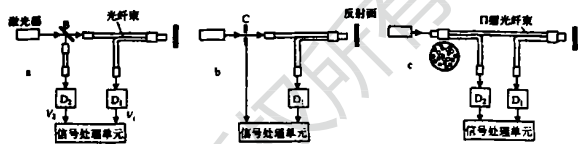


图2 采用分光器件分光设置参考光路的光强补偿法示意图

1.2.2 分波振面型——中孔(半圆)光电池分光参考补偿法 如图 2b 所示^[9,19],光束的一部分通过中孔光电池的中心孔 C(或半圆光电池的空半圆)进入光纤束为测量光,其余部分被光电池接收面挡住并接收作为参考信号,它与采用分光镜设置参考光路的补偿原理基本相同。但是它须保证激光束通过光电池的空间位置保持不变,易受光束方向漂移及外界机械震动的影响^[19]。

1.2.3 分波振面型——型光纤束分光参考补偿法 如图 2c 所示,它将参考光纤束和发送光纤束在靠近光源的一端做成一定比例的随机型排列起分

光作用。光经过分光端分光后,一部分作为测量光经反射面后被接收光纤接收,另一部分作为参考光进入参考光路。这种补偿结构省去了象分光镜、中孔光电池这样的光学器件,光源发出的光直接进入光纤束,因光源功率波动引起的参考光和测量光的波动是同步的。显然,采用这种型光纤束利用比值法进行补偿时,可以较好地消除光源功率波动带来的影响。并且这种光纤束既不存在参考光和测量光随光强的起伏和偏振方向变化而出现反向涨落的现象,也可以克服用电池分光对光束方向漂移和装置的机械稳定性的要求,实验表明强度补偿效果较好^[19]。当然,这种结构的光纤束制作相对复杂。

1.2.4 半导体激光器取样电流补偿法 从半导体激光器引出一个参考端,这个参考端是反映激光光源功率波动的电流信号。将这个电流信号直接取样作为参考信号与测量信号相除,就可以消除功率波动的影响。吕海宝等人就是采用这样的补偿方法达到了光强补偿的目的^[20]。

1.3 双路接收型光纤探头补偿法

这种补偿法又称多光纤补偿法,基本思想是用两根(或两组)光纤分别接收带有测量信息的光,利用两组信息的相关性与差异性进行处理以达到补偿的目的。常见的方法有三光纤补偿法和组合型光纤探头补偿法。

1.3.1 三光纤补偿法 在众多光强补偿方法中,应用比较频繁的方法是增加一根参考接收光纤的方法,令其中一根接收光纤工作在位移特性曲线的前坡,另一根工作在

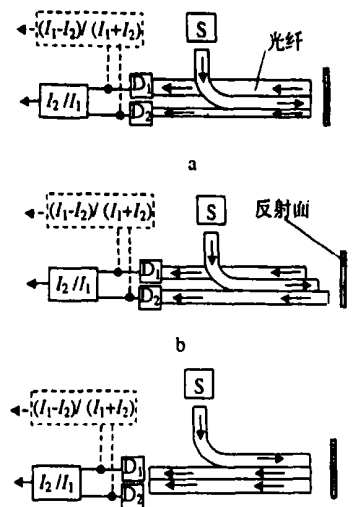


图3 三种采用双接收光纤的补偿法示意图

后坡,用两根光纤的输出之比或和差比作为结果,不但可以消除光源功率波动的影响,对反射率的变化不敏感,同时还能扩大动态范围、改善线性。Cuomo^[3]提出了一种芯径不等的三光纤补偿结构(如图 3a 所示),实现了光强和反射率的补偿。Zheng^[4]也提出了一种类似的芯径不等的三光纤结构,并从理论上分析其强度补偿

机理,进行了反射率补偿实验,结果表明,即使反射率变化了 50%,最后的补偿输出也仅变化 0.3%。肖平等^[14]研究了一种阶梯反射式光纤传感探头(如图 3b),实验表明当输入光强变化约 10 倍时,补偿输出值仅变化 3%左右。

1.3.2 组合型光纤探头补偿法

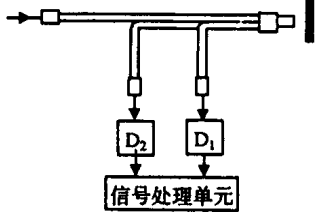


图 4 采用组合型光纤束的补偿法示意图

这种带补偿功能的组合型光纤束由一组发送光纤和两组接收光纤组成,并在公共端可形成多种排列方式(如图 5 所示),由于两组接收光纤束分别具有不同的位移特性,因此,采用比值法或差动法可以实现光强和反射率的补偿,同时,还可以改善传感器的位移特性。徐育等^[22]研究了一种半圆随机型光纤束传感器,采用和差比值作为输出的结果,不但消除了光源强度变化的影响,而且可以消除被侧面反射率变化影响。

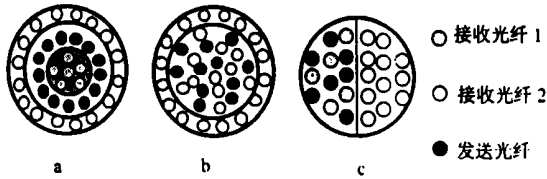


图 5 补偿型祝贺光纤束的 3 种典型结构

1.4 双波长补偿法

如图 6 所示。双波长补偿法采用具有不同波长(λ_1 和 λ_2)的两个光源

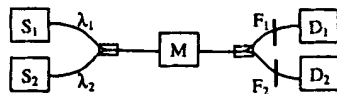


图 6 双波长补偿法示意图

(S_1 和 S_2),这两个波长不同的光信号在传感区域 M 中受到不同的调制,对调制信号滤波(滤波器 F_1 的通带中心为 λ_1 , F_2 的通带中心为 λ_2)、数据处理,便可以达到补偿的目的。双波长补偿法所需要的两个波长可以用两个独立的具有不同峰值波长的光源产生,也可以使用宽频光源(如 LED),然后将其分割成两个半宽带光源或用色散元件产生。不过这种补偿方法结构复杂,由于双波长光在光纤中的传输差异,因此,这种方法并不适用于远程测量^[1]。

1.5 网络补偿法

网络补偿法的基本原理是来自不同光源的两束光分别经过光纤网络后,对输出的信号进行相应的数据处理以达到消除因光源波动、耦合系数变化、传输特性变化以及光电器件特性漂移等因素的影响。

代表性的补偿网络有 Culshaw 网络(或称光平衡桥)、Beheim 网络、四端网络及其改进型等。

1.5.1 Culshaw 网络法(光桥平衡补偿法)

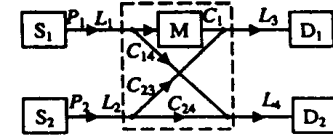


图 7 Culshaw 网络补偿法示意图

所示^[1],它由两个光源(S_1 和 S_2)、两个探测器(D_1 和 D_2)和一个光纤四端网络构成。两光源轮流发光,两探测器均可探测每个光源发出的光脉冲。设,当光源 S_1 发光时,两探测器测出的光强分别是 I_{11} 和 I_{12} ,而当光源 S_2 发光时,两探测器测出的光强分别是 I_{21} 和 I_{22} 。它们的表达式分别为:

$$I_{11} = P_1 L_1 M C_{13} L_3 D_1, I_{12} = P_1 L_1 C_{14} L_4 D_2,$$

$$I_{21} = P_2 L_2 C_{23} L_3 D_1, I_{22} = P_2 L_2 C_{24} L_4 D_2 \quad (2)$$

式中, P_i 表示光源输出的光功率; L_i 表示光纤透过率; C_{ij} 表示光纤耦合器的耦合效率; M 为强度调制系数; D_i 为光电探测器的响应度。补偿后的输出为:

$$R = \frac{I_{11}}{I_{12}} \cdot \frac{I_{22}}{I_{21}} = \frac{C_{13} C_{24}}{C_{14} C_{23}} \cdot M \quad (3)$$

显然,补偿后的输出消除了光源输出功率 P 波动、探测器响应度 D 变化以及光纤传输损耗 $(1 - L)$ 的变化对系统的影响。但是关键在于耦合效率 C_{13} , C_{14} , C_{23} 和 C_{24} 能否保持长期稳定。而实际上光纤耦合器的耦合效率直接受到入射光功率的模式分布随机变化、光波长以及环境温度变化的影响,因此,这种补偿结构很难实现长期稳定的要求。虽然,目前单模光纤耦合器的制作技术及工艺已成熟,但是多模光纤耦合器的稳定性问题却较难解决。在此基础上,金晓丹等人给出了采用对光模式不敏感、分光比比较稳定的偏振立方体分光棱镜实现分光的改进型透射式和反射式补偿结构^[16]。

1.5.2 Beheim 网络法

这是由美国航空航天管理局的 Beheim^[21]等人提出的,并用它进行了微位移测量,取得了较好的效果。如图 8 所示,光源 S_1 和 S_2 发出的光通过光纤、光纤分光/耦合器,分别由探测器 D_1 和 D_2 接收。经过信号分离得到 I_{13} , I_{14} , I_{23} 和 I_{24} ,图中 C_{ij} 为光纤耦合器的耦合效率, M 为强度调制系数。最后的输出结果为:

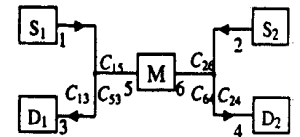


图 8 Beheim 网络补偿法示意图

$$R = \sqrt{\frac{I_{14}}{I_{13}} \cdot \frac{I_{23}}{I_{24}}} = \sqrt{\frac{C_{15} C_{64} C_{53} C_{26}}{C_{13} C_{24}}} \cdot M \quad (4)$$

该网络设计思想优于 Culshaw 网络,在一定的条件

下可以达到相当高的精度,但实现起来比Culshaw网络要复杂得多,并且同样受到光纤耦合器的稳定性影响。

1.5.3 四端网络补偿法

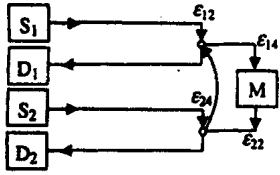


图9 四端网络补偿法示意图

图9所示的四端网络补偿法是由重庆大学光电精密机械研究所提出来的^[15]。设是图中个段相应光纤在传输过程中引起的光损耗系数,并假设各节点具有相同的损耗 k 和传输率 L 。最后的结果为:

$$R = (kL)^2 \epsilon_{12} \epsilon_{14} \epsilon_{24} \epsilon_{22} M \quad (5)$$

表明四端网络的输出与光源功率波动和光电器件特性变化等因素无关。但其缺点是网络约束条件多,要达到高精度存在一定的困难。为了克服这个矛盾,提出了一个优化的全光纤三节点补偿网络结构^[15]。

1.6 神经网络补偿法

神经网络补偿法是随着近年来神经网络的研究进展而逐渐被一些学者运用于光纤传感信号处理的一种新方法。实际上神经网络补偿的原理框图就是将图2中的数据处理的硬件单元替换为神经网络补偿算法软件单元即可。

如果要测量某个物理量 X ,如反射面的位移 d (或反射面的表面粗糙度 R_a),对于一个确定的反射面(或确定的光纤到端面的距离),图10中的测量信号 V_1 仅与被测量 X 及光源强度 I_0 有关,而参考信号 V_2 仅与 I_0 有关,即:

$$V_1 = f_1(I_0, X), V_2 = f_2(I_0) \quad (6)$$

表1 强度型光纤传感器补偿方法的对比

补偿方法		优点	缺点
光源负反馈稳定法		结构比较简单,对抑制光源功率波动比较有效	无法补偿光源以外的因素的影响
分光 参考 补偿 法	分振幅型 分光镜分光补偿	结构简单,有一定的光强补偿精度	受光源的偏振特性变化的影响较大
	分波振面型 中孔光电池(或半圆光电池)分光补偿	结构简单,有一定的光强补偿精度	受装置的机械稳定性的影响及光束方向漂移的影响较大
	型光纤束分光补偿	结构简单,有较高的光强补偿精度	制作工艺稍复杂
取样电流法	半导体激光取样电流补偿	结构简单	补偿精度不太高
双路接收光纤 探头补偿法	三光纤补偿 组合型光纤探头补偿	能够同时补偿光强、反射率变化及机械扰动的 影响、改善线性性	光纤制作工艺稍复杂
光桥(网络)补偿法	Calshaw 网络 贝海姆网络 四端网络补偿	可同时消除光强波动、耦合系数变化、传输特 性变化及光电器件漂移的影响	结构复杂,约束多,稳定性难以保 证

由于函数 f_1 和 f_2 并不是显式,而且 V_1 和 V_2 均受光源波动的影响。因此,可以用一个神经网络补偿算法根据 V_1 和 V_2 来得到被测量的实测值 X_a ,即:

$$X_a = NN(V_1, V_2) \quad (7)$$

式中, $NN(\cdot)$ 表示一个神经网络。为实现上式,必须先对神经网络进行训练。

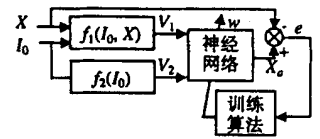


图10 神经网络的训练示意图

如图10所示,首先改变图2所示的激光器的输出光强 I_0 及被测量 X ,得到一组 V_1 和 V_2 的样本集,并以这组样本集的 V_1 和 V_2 作为训练神经网络的输入,被测量 X 作为期望输出。训练时不断比较神经网络的输出与被测量之差 e ,同时不断调整网络的权值 w ,使得 e 小于一个预先设定的值。训练结束后,实际测量时只需要把测量信号 V_1 和参考信号 V_2 加到神经网络的输入端,则神经网络的输出便是最后的测量结果。

Zhang等^[6]采用BP网对所采集到的数据进行处理,提高了光纤表面粗糙度及位移测量的精度。王毅等也采用了神经网络对光纤粗糙度传感器进行信号处理^[17],从而大大减小了光源功率波动以及被测反射面反射特性变化对测量精度的影响。朱庆保介绍采用差动电路解决漂移问题^[18],利用BP网的泛化能力实现无级查表功能,改善了反射式光纤位移传感器的前坡线性。

2 结束语

表1将这些补偿方法做了一个比较。

续表

双波长补偿法	精度较高,能够同时补偿光强变化及机械扰动的影响	结构复杂,不适于远程测量
神经网络法	可进行光强补偿,改善线性,并且无须额外的硬件,应用灵活	实时性不强,精度不很高

强度型光纤传感补偿技术是提高这类传感器精度和稳定性的关键,其研究仍然比较活跃,并呈现出许多新特点,如:(1)补偿结构与光纤强度传感结构的一体化使得其结构变得紧凑,受外界干扰更少;(2)高精度、高稳定性、能同时对多种外界干扰的补偿方法是目前乃至今后的研究重点;(3)采用神经网络的补偿法是一种不增加硬件成本、不引入新的干扰因素的软件补偿方法,并有望通过设计优化的网络来实现其它补偿方法无法实现的功能。

参 考 文 献

- [1] Culshaw B, Giles I P. SPIE, 1984, 514: 117 ~ 120.
- [2] Beheim G. Appl Opt, 1987, 26(3): 452 ~ 455.
- [3] Cuomo F W. SPIE, 1984, 478: 28 ~ 32.
- [4] Zheng J L. Opt Engng, 1999, 38(2): 227 ~ 232.
- [5] Sun Sh H, Zheng W M, Li J G. IEICE Trans Electron, 2001, E84-C(4): 427 ~ 432.

- [6] Zhang K W, Butler C, Yang Q P. IEEE Trans Instrum & Measur, 1997, 46(4): 899 ~ 902.
- [7] Yuan L B, Pan J, Yang T *et al.* Sensors and Actuators, 1993, 36(3): 177 ~ 182.
- [8] 王其生, 陈建元. 仪器仪表学报, 1987, 8(3): 287 ~ 289.
- [9] 吕海宝, 冯勤群, 周卫红 *et al.* 激光技术, 1999, 23(2): 91 ~ 94.
- [10] 徐 育, 金泰义, 李胜利 *et al.* 仪器仪表学报, 1996, 17(4): 405 ~ 408.
- [11] 邹定海, 吕海宝, 漆新民 *et al.* 光电工程, 1991, 18(5): 31.
- [12] 杨华勇, 吕海宝, 徐 涛 *et al.* 光电工程, 2001, 28(6): 44 ~ 47.
- [13] 苑立波. 光通信技术, 1995, 19(1): 56 ~ 82.
- [14] 肖 平, 卢文全. 传感器世界, 1997, (2): 11 ~ 13.
- [15] 刘桂雄, 钟先信. 压电与声光, 1993, 15(2): 19 ~ 22.
- [16] 金晓丹, 廖延彪. 光学学报, 1996, 16(7): 1002 ~ 1005.
- [17] 王 毅, 陈 荣, 陈光辉 *et al.* 光子学报, 2000, 29(6): 543.
- [18] 朱庆保. 自动化仪表, 2001, 22(1): 20 ~ 22.
- [19] 杨华勇, 吕海宝, 徐 涛 *et al.* 仪表技术与传感器, 2001(5): 4.
- [20] 吕海宝, 杨华勇, 徐 涛 *et al.* 基础自动化, 2000, 7(4): 55.

(上接第 452 页)

In both of the specimens, the self-frequency-doubling laser can be observed. But because of the limitation of the output energy, the variety of E_{out}^2 of specimen 2 vs E_{in} can not be plotted, while that of E_{out}^2 of specimen 1 vs E_{in} can. According to theoretical calculation, the type phase matching effective nonlinear coefficients of GdCOB crystal in the first and second quadrant are 0.463pm/V and 0.642pm/V respectively. That is to say, the effective nonlinear coefficient of specimen 1 (the second quadrant) are much larger than that of specimen 2 (the first quadrant). Then the frequency-doubling efficiency of specimen 1 is much larger than that of specimen 2. So the experimental results prove the rightness of theoretical calculation.

3 Conclusion

According to nonlinear theory, the phase matching angles of Nd GdCOB crystal at 1331.0nm in the first quadrant and the second quadrant are calculated. Two crystal specimens are cut at two optimal phase matching angle respectively. When using

595.0nm dye laser as pump source, the threshold energy of specimen 1 is 14.2mJ; the output 665.5nm laser is 0.62mJ; the corresponding conversion efficiency is 2.5%. Although self-frequency-doubling red laser of specimen 2 can be observed, its output energy is too small to be measured. These experimental results are well consistent with theoretical calculation. If the pump energy is increased, and the two faces of crystal are AR-coated at 1331.0nm and 665.5nm, we predicate that the threshold pump energy can be decreased and the conversion efficiency of self-frequency-doubling laser can be increased. This work is in progress in our group.

References

- [1] Viven D, Mougél F, Aka G *et al.* Laser Physics, 1998, 8(3): 759 ~ 763.
- [2] Aka G, Kahr Harari A, Mougél F *et al.* J O S A, 1997, B14(9): 2238 ~ 2247.
- [3] Auge F, Aka G, Kahr Harari A, *et al.* Appl Phys, 1998, B(67): 533 ~ 535.
- [4] Mougél F, Aka G, Kahr Harari A *et al.* Opt Materials, 1997, 8(9): 161 ~ 173.
- [5] Hobden M V. J A P, 1967, 38(11): 4365 ~ 4372.
- [6] Hou X Y, Sun Y M, Li Y F *et al.* Opt & laser Technol, 2000, 32(2): 135 ~ 138.