

## 强度型光纤传感检测中的强度补偿技术\*

吕海宝 冯勤群 周卫红 罗武胜 杨华勇

(国防科技大学机械电子工程与仪器系,长沙,410073)

摘要: 介绍了强度型光纤传感检测中实用的强度补偿技术,重点描述了双光路补偿和单光路补偿的基本原理、系统结构和性能特点,并分析了这两种方法的区别及联系。

关键词: 强度型光纤 传感检测 双光路 单光路 强度补偿技术

### Intensity compensation techniques for sensing measuring using intensity type optical fiber

L Haibao, Feng Qinqun, Zhou Weihong, Luo Wusheng, Yang Huayong

(Department of Mechanics Engineering and Instrument, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract:** In this paper, some main intensity compensation techniques for sensing measuring using intensity fiber as optical sensor are presented. Especially, the fundamental principles, system configurations, functions and properties of the double path compensation techniques and single path compensation techniques are described in detail. The differences and relation of the double path compensation and single path compensation techniques are also analyzed.

**Key words:** intensity type optical fiber sensing and measuring double path single path compensating techniques for the intensity

## 引 言

在光纤传感中,激光光强检测作为一种常用的检测手段,具有结构简单、成本低廉、非接触等优点,但是,若不加调制和补偿,光源光强的波动和环境的干扰将严重影响其检测精度。环境光干扰的问题一般通过调制入射光即可克服,而要消除光源光强波动的影响,则要相对困难些,主要是采用强度补偿技术。近几年来,强度补偿技术发展很快,出现了一些比较实用的方法,根据原理结构不同可分为两种模式:(1)双光路补偿;(2)单光路补偿。

### 1 双光路补偿

根据分光方式的不同,双光路补偿可分为三类:(1)分振幅型;(2)多光纤型;(3)分波阵面型。

根据信号处理方式的不同,双光路补偿又可分为两类:双通道信号处理型和单通道信号处理型。

#### 1.1 分振幅型双光路补偿

图 1 给出了一个用于光纤传感器测量系统的分振幅型双光路补偿方案的原理框图<sup>[1~3]</sup>。

\* 国防科研试验技术经费资助。

激光束经分光比为  $R_t/R_r$  的分光器 B 后形成双光路。 $I_0$  是激光器的输出光强;  $I_t$  和  $I_r$  分别是透射光强和反射光强,  $I_t$  入射到光纤传感器,  $I_r$  则用作参考光强;  $I_m$  是光纤传感器的输出光强, 则有

$$I_t = R_t I_0 \tag{1}$$

$$I_r = R_r I_0 \tag{2}$$

$$I_m = C_0 F(d, R, \alpha) I_t \tag{3}$$

$$V_m = C_m D_m A_m R_t I_0 C_0 F(d, R, \alpha) \tag{4}$$

$$V_r = C_r D_r A_r R_r I_0 \tag{5}$$

式中,  $D_m$ ,  $A_m$  和  $C_m$  分别是与测试通道的光电转换、放大电路以及 A/D 转换等增益有关的系数;  $D_r$ ,  $A_r$  和  $C_r$  分别是与参考通道的光电转换、放大电路以及 A/D 转换等增益有关的系数;  $F(d, R, \alpha)$  是光纤传感器的有效反射接收系数, 它取决于传感器测头和反射面的距离  $d$ 、被测物体的表面粗糙度  $R$  以及反射面材料因子  $\alpha$ , 对于恒定的反射面而言, 可认为它仅与  $d$  有关;  $C_0$  是一个与传感器特性有关的转换系数。令

$$A = (C_m D_m A_m C_0 R_t) / (C_r D_r A_r R_r) \tag{6}$$

由(4)式和(5)式可得到

$$D = V_m / V_r = [C_m D_m A_m R_t C_0 F(d, R)] / (C_r D_r A_r R_r) = AF(d, R, \alpha) \tag{7}$$

由此可知,  $D$  是一个无量纲数, 它只是被测参数的函数, 与激光光强无关。

当采用 8 位 A/D 时, 本方案的补偿范围为总光强的 20% ~ 40%<sup>[4]</sup>。如果提高 A/D 的转换精度及电路特性, 还可进一步提高补偿精度。

不过, 由(7)式可知, 测试结果不仅与被测量  $d$  有关, 而且还与被测物体的表面粗糙度  $R$ 、材料因子  $\alpha$  等因素有关, 当被测物体的  $R$ 、 $\alpha$  变化时, 测试结果将受到影响。为了消除这些因素的影响, 提出了多光纤型双光路补偿方法。

### 1.2 多光纤型双光路补偿

在多光纤型双光路补偿方案中, 最常见的是由三组光纤构成的光纤传感器<sup>[5~7]</sup>。其中包含一组发送光纤和两组接收光纤, 其系统原理框图如图 2 所示。假设两路接收光的光强分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 且

$$I_1 = I_0 R(1 - Ad) \tag{8}$$

$$I_2 = I_0 R(1 + Bd) \tag{9}$$

(8) 式和(9)式相除并取对数可得到

$$\ln(I_2/I_1) = \ln[(1 + Bd)/(1 - Ad)] = \ln(1 + Bd) - \ln(1 - Ad) \approx (A + B)d \tag{10}$$

式中,  $I_0$  是激光的输出光强;  $R$  是与被测物表面粗糙度、加工方法及材料等因素有关的系数;  $A$ ,  $B$  分别为与两接收光纤的芯径、数值孔径、包层直径及光纤在端面内分布有关的系数<sup>[6]</sup>。

可见, 两组接收光强  $I_1$ ,  $I_2$  分别是被测量、激光输出光强、光传输损耗等因素的函数。补偿后测试结果与激光光强、被测物体材料及表面粗糙度等各种因素无关, 且与被测量在一定的范围内成线性关系。采用微机对两路信号进行处理, 并进行非线性校正之后, 系统在 0~3mm 的量程范围内测试精度可达 0.15%, 分辨率可达  $2\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>。

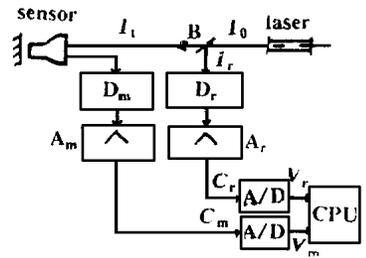


Fig. 1 Schematic block diagram of double light-path compensation by amplitude splitting

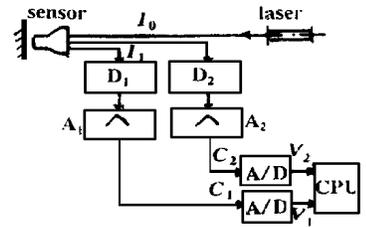


Fig. 2 Schematic block diagram of double light-path compensation by multi-branch

### 1.3 分波阵面型双光路补偿

前两种补偿方法是以两路激光光强同步波动为前提的,但事实上,当采用普通内腔式 He-Ne 激光器作光源时,分光后两路光强因偏振效应会出现此起彼伏、反向涨落的现象<sup>[8]</sup>,这将从根本上破坏补偿条件。为了克服这一影响,特地设计了分波阵面型双光路补偿系统。系统的原理框图如图 3 所示。图 3 中  $D_r$  是一个分光探测器,它将入射激光束的波阵面一分为二,一部分用作光纤传感器的入射光;另一部分作为参考光由  $D_r$  自身探测。

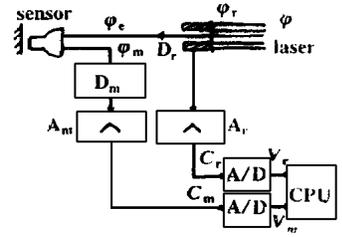


Fig. 3 Schematic block diagram of double-light-path compensation by wave front splitting

激光器的输出光通量可写成  $\Phi = \Phi_s + \Delta \Phi_s(t)$  (11)

式中,  $\Phi_s$  是理想的光通量;  $\Delta \Phi_s(t)$  是光源波动引起的光通量的变化量。

发射光纤出射到被测物体的光通量为  $\Phi_e = m \cdot \Phi = m[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]$  (12)

式中,  $m$  是由分波阵面探测器孔径决定的常数。分波阵面探测器接收的光通量为

$$\Phi_r = (1 - m)[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)] \quad (13)$$

探测器  $D_m$  接收的光通量为  $\Phi_m = F(d, R, \alpha) \cdot \Phi_e = F(d, R, \alpha) m[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]$  (14)

则  $V_r = D_r C_r A_r (1 - m)[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]$  (15)

$$V_m = D_m C_m A_m d m[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)] \quad (16)$$

$$M = \frac{V_m}{V_r} = \frac{D_m C_m A_m d m[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]}{D_r C_r A_r (1 - m)[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]} = A d \quad (17)$$

$$A = \frac{D_m C_m A_m \cdot m[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]}{D_r C_r A_r (1 - m)[\Phi_s + \Delta \Phi_s(t)]} \quad (18)$$

从(17)式可见,  $M$  是一个与光通量无关的无量纲数,只与被测参数有关,这种方法已经被用来测试位移量并取得了较高的精度。

### 1.4 单通道信号处理型双光路补偿

以上介绍的三种双光路补偿法都采用了双通道信号处理的方式。这三种方法虽然能够有效地补偿激光器光强不稳定的影响,但由于信号处理是双通道的,两个通道的不对称性不可避免地会带来误差。显然,如果能够消除这种不利因素,系统的测试精度可提高到一个新的水平。为此,又提出了用模拟开关切换的单通道信号处理型双光路补偿方

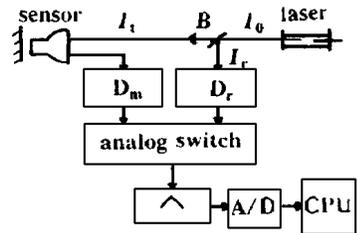


Fig. 4 Schematic block diagram of single-channel and double-light-path compensation

案。参考信号与测量信号通过一个模拟开关切换,从而有效地避免了两通道电路不对称带来的影响。这种系统的原理框图如图 4 所示。同样,也可以将多光纤型和分波阵面型双通道信号处理改为单通道信号处理的形式。

## 2 单光路补偿

虽然单通道信号处理型双光路补偿方法能有效地克服信号处理通道不对称的影响,但双光路光电转换单元

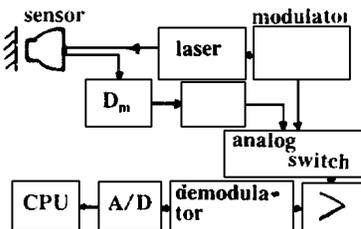


Fig. 5 Schematic block diagram of single-light-path compensation

漂移的不对称性对整个测试系统产生的误差仍不可避免。为消除此项误差,可将双光路改成单光路,并综合采用多种技术,构成新的补偿方案,其原理框图参见图5。下面分述其补偿原理。

### 2.1 激光调制

对激光进行调制,调制频率一般在5~10kHz,这样可以避免低频段杂散光对系统的干扰,提高系统的抗干扰能力。

### 2.2 跟踪补偿<sup>[9]</sup>

为了消除激光功率波动的影响,可在光电转换单元里运用跟踪补偿技术,其原理框图如图6所示。在光电探测和I/V转换部分,系统加入了一个反馈跟踪环节,此举不仅可有效地消除激光功率波动对测量精度的影响,而且可为光电探测器提供反偏压,扩大光电探测器的线性输出范围,同时还可消除光电探测器及后续电路的直流漂移和低频干扰。与双光路补偿技术相比,该技术具有信噪比高、稳定性好、结构简单、成本低廉等显著优点。

### 2.3 调制幅值补偿

调制器工作的不稳定会造成调制幅值的波动,这同样影响测试结果。消除这一影响的方法是直接对调制信号取样用作参考信号,然后对参考信号与测试信号进行除法处理。这种幅值补偿系统也可采用单通道信号处理的形式。

应当指出的是,单光路补偿法必须协调好模拟开关切换速度与解调速度之间的关系。

## 3 结 语

由于强度型光纤传感检测的应用范围越来越广泛,强度补偿技术也显得越来越重要。凡采用了补偿技术的测试系统,测试精度都会有不同程度的提高。但是,双光路补偿因两光路的不对称仍然会带来误差。而在采用单光路补偿技术的系统中,当传感器探头与被测物体的相对位置发生变化时,光程差也会发生相应的变化,从而使该技术的应用范围受到一定的限制。因此,怎样提高各种补偿技术的精度及应用范围仍是以后研究的主要内容。应当指出,我们所介绍的某些强度补偿技术不仅仅可用于光纤传感检测,而且也可用于其它光电传感检测。

### 参 考 文 献

- 1 吕海宝,邹定海,漆新民. 仪器仪表学报,1990;11(4):441~445
- 2 Zou D H, L H B, Yang Sh H. Measurement, 1991;9(4):172~175
- 3 L H B, Zou D H, Qi X M. Approach for a surface roughness measurement equipment with fiber optic sensor. Proceedings of The International Conference on Advanced Mechatronics, May 21~24, Tokyo Japan, 1989:463~466
- 4 邹定海,吕海宝,漆新民. 光电工程,1991;18(5):31~35
- 5 郑竖立,钱浚霖. 传感器技术学报,1993;(3):24~26
- 6 Cuomo F W. SPIE, 1984;478:28~32
- 7 Inasaki L Precision Engineering, 1985;7(2):4~7
- 8 吕海宝,邹定海,漆新民. 光学仪器,1994;16(1):12~16
- 9 L H B, Chen T Zh. SPIE, 1996;2899:304~310

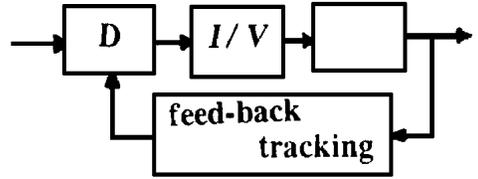


Fig. 6 Schematic block diagram of tracking compensation

作者简介:吕海宝,男,1941年8月出生。教授,博士生导师。现从事激光光电检测与精密仪器方面的教学与科研工作。