

# 双弹簧管光纤差压传感器\*

佟成国 杨军 刘志海 苑立波\*\*

(哈尔滨工程大学理学院光电科学系, 哈尔滨 150001)

**摘要** 设计了一种利用对称反转连接的双弹簧管作为差动压力传感元件, 进行差动压力测量的光纤传感器. 这种光纤传感器是在通用光纤传感设计实验系统的基础上, 利用三光纤反射调制技术, 实现光源强度的变化和光纤中光功率损耗的变化以及反射率的变化自动补偿的. 理论上, 分析了这种反转对称差压传感弹性元件在使用过程的优点, 给出了三光纤补偿理论分析方法. 实验上, 获得了该光纤差压传感器的线性输出测试结果.

**关键词** 光纤传感器; 差压传感器; C型弹簧管; 三光纤补偿技术

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤传感器具有体积小, 抗电磁干扰等特点. 适用于在各种危险和存在强电磁场的环境中以及医用场合下使用. 具有许多普通传感器所无法比拟的优点. 因此, 在各种领域得到了广泛的应用<sup>[1-9]</sup>.

C型弹簧管(波登管)式压力表被广泛的用来测量压力. 将工业上大量使用的C型弹簧管式压力表与光纤传感技术相结合, 业已研制出光纤复合压力计<sup>[10]</sup>. 为进一步提高这种光纤压力表的性能, 本文采用两个C型弹簧管对称反转焊接, 形成一种两端固定的双弹簧管差压弹性元件作为光学位移敏

感元件, 大大改进了该弹性元件的线性特性, 消除或减小了环境温度对系统测量结果的影响. 此外, 该传感器的全反射光纤探头采用了双光纤接收方式<sup>[11,12]</sup>, 实现了对光源强度起伏和光纤中光功率损耗变化以及反射率变化的自动补偿.

## 1 传感器设计

借助于C形弹簧管, 设计了一种双C型弹簧管式光纤差压传感器, 它采用两个C型弹簧管进行组合, 将其自由端反转对称焊接为一体, 形成一个反“S”形状, 作为差动压力的转换器件, 来实现差压与位移的转换, 如图1所示.

通过在焊接点处固接一个光学反射器, 来实现

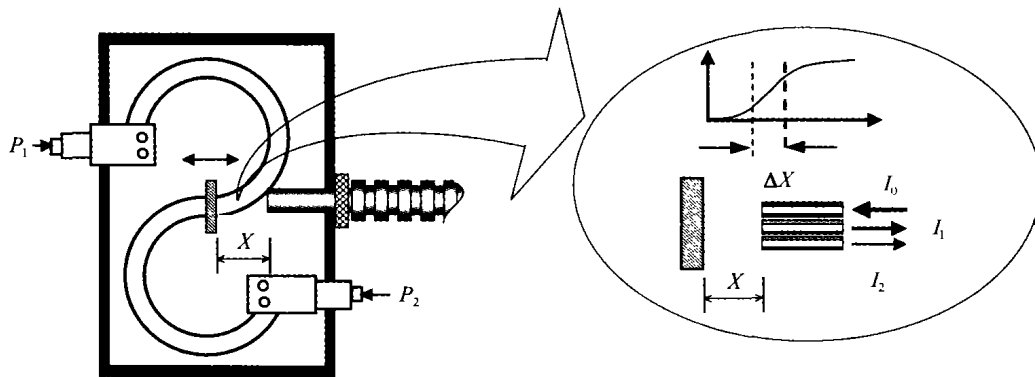


图1 双弹簧管式光纤差压传感器结构示意图

Fig. 1 Configuration of twin-elastic Borden tube fiber optic pressure sensor

反射式光纤差动压力的测量. 这种两端固定的反转对称S型结构具有一系列优点. 首先, 与单自由端C形弹簧管相比, 由于双端固定, 大大降低了环境振动对系统的影响, 提高了信号输出的可靠性. 其次, 由于两个C形弹簧管的机械温度特性完全相同, 因而可以自动抵消环境气压和温度的变化对测量结果的影响, 具有自动补偿功能. 最后, 由于系统的特殊

结构改变了其原有的刚性, 使得相同压力下的机械变形减小, 因而有助于改善系统由于机械形变带来的分子内摩擦导致的机械迟滞性.

为了实现反射式光纤传感, 我们在两个C型弹簧管对称中心连接处, 焊接一个金属托架, 并将一个反射率为91%的全反射器固定在该托架上, 构成了对差压引起的微位移进行变送的转换器.

## 2 组合式弹性元件的特性分析

C型弹簧管是机械压力表中压力与弹性位移的转换元件, 与其它弹性敏感元件一样, 也存在着机械

\*教育部“高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划”资助项目

\*\*Tel: 0451-82519758 Email: lbyuan@vip.sina.com

收稿日期: 2003-10-08

结构固有的一些缺点. 将两个相同的弹簧管的两个自由端反转对称焊成一体, 作为光纤压力表的差压一位移的转换器, 可实现被测差压与位移量之间的转换. 这种差动式传感器不仅可以有效地抑制环境震动的干扰, 而且由于元器件的对称性及其差动工作方式, 可以消除偶次非线性项, 从而使传感器的线性度得到改善. 如果不考虑迟滞、蠕变等效应的影响, 不失一般性, 我们可设处于此状态下的 S 型弹簧管对称点的准静态输入-输出特性可由下列多项式表示

$$P = C_0 + C_1(\Delta X) + C_2(\Delta X)^2 + C_3(\Delta X)^3 + \dots + C_n(\Delta X)^n \quad (1)$$

式中  $P$  为输入压力;  $\Delta X$  为两 C 形弹簧管焊接处的位移.  $C_0$  为零位输出;  $C_1$  为传感器线性灵敏度;  $C_2, C_3, \dots, C_n$  为非线性常数.

当两 C 型弹簧管顶端对称反转焊接后, 由于两弹簧管的压力接口均刚性固接于壳体上, 此时弹簧管的顶端由自由状态变为约束状态. 假设两同材料同规格 C 形弹簧管的机械特性相同. 对于该压力转换系统, 若元件 1 端的输入压力为  $P_1$ , 元件 2 端的输入压力为  $P_2$ , 则相对于元件 1 的输出位移为  $\Delta X$ , 考虑到对称性, 元件 2 端的等大反向输出位移为  $-\Delta X$ , 两弹性元件的输出分别为

$$P_1 = C'_0 + C'_1(\Delta X) + C'_2(\Delta X)^2 + C'_3(\Delta X)^3 + \dots + C'_n(\Delta X)^n \quad (2)$$

和

$$P_2 = C'_0 + C'_1(-\Delta X) + C'_2(-\Delta X)^2 + C'_3(-\Delta X)^3 + \dots + C'_n(-\Delta X)^n \quad (3)$$

式中  $C'_0$  为零位输出;  $C'_1$  为传感器线性灵敏度;  $C'_2, C'_3, \dots, C'_n$  为非线性常数. 式(2)、(3)中的系数  $C'_i$  之所以有别于式(1)中的  $C_i$ , 是因为此时弹簧管所处的力学状态不同所致. 方程(2)与(3)的差动结果, 给出系统总输出为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2C'_1(\Delta X) + 2C'_3(\Delta X)^3 + \dots \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 系统以差动方式工作时,  $\Delta X$  的偶次方项消失了, 只剩下  $\Delta X$  的奇次方项. 由于  $\Delta X$  通常很小, 因而  $\Delta X^3$  以上均可视为高阶小量, 取线性近似时, 对系统的影响远较平方项的影响要小的多. 因此, 差动工作方式可改进系统的线性特性.

当这种双 C 型弹簧管的两个压力接口固定, 且受到差动压力  $P_1, P_2$  作用时, 将会发生弹性形变, 在对称焊接中点处产生弹性位移量, 这一位移量是被测压力  $\Delta P$  所产生的张力与弹簧管本身的弹性应力共同作用的结果. 所以, 双 C 型弹簧管是一种两个弹性元件级联后构成的一个差动弹性敏感元件.

除了上述优点外, 双 C 型弹簧管转换元件还具有温度自动补偿的优点. 弹簧管、波纹管、膜片、膜

盒等是在工程技术中常见的弹性敏感元件, 但这些弹性敏感元件都存在一个热膨胀特性. 采用这些弹性敏感元件制做的仪表, 在检测工作中, 当环境温度发生变化时, 金属结构热胀冷缩的缺点就会显现, 给检测的结果和准确度带来影响. 而双 C 型弹簧管的对称反转差动结构能有效地克服这一缺点, 在环境温度发生变化时, 由于两个弹簧管热膨胀变化的方向和应力大小恰好相反, 互相抵消, 起到了温度补偿的作用, 实现温度自动补偿功能.

### 3 补偿式光纤传感原理

为了减少光强起伏, 光纤微弯损耗以及反射面反射率变化所带来的影响, 我们设计了一种依赖于双接收光纤的相对光强, 而不是单一光纤绝对光强的压力传感器. 在该设计中, 采用了 3 根大芯径光纤, 光通过中间的光纤照射到反射面上. 从反射面反射回来的光由分布在照明光纤一侧的两接收光纤所接收, 这样, 反射目标的位移就由接收光纤所接收到的光强之比来确定. 由于这是一个比的过程, 因此这种传感器技术就是自动补偿了光源强度的变化, 输入光纤损耗的变化以及反射面反射率的变化.

就反射式光纤传感器而言, 其光强响应特性曲线是这类传感器的设计依据. 该特性调制函数可借助于光纤端出射光场的场强分布函数给出<sup>[13]</sup>

$$\phi(r, x) = \frac{I_0}{\pi\sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}]^2} \exp \left\{ -\frac{r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}]^2} \right\} \quad (5)$$

式中  $I_0$  为由光源耦合入发送光纤中的光强;  $\phi(r, x)$  为纤端光场中位置  $(r, x)$  处的光通量密度;  $\sigma$  为一表征光纤折射率分布的相关参数, 对于阶跃折射率光纤,  $\sigma = 1$ ;  $a_0$  为光纤芯半径;  $\xi$  为与光源种类、光纤的数值孔径及光源与光纤耦合情况有关的综合调制参数.

如果将同种光纤置于发送光纤纤端出射光场中作为探测接收器时, 所接收到的光强可表示为

$$I(r, x) = \iint_S \phi(r, x) ds = \iint_S \frac{I_0}{\pi\omega^2(x)} \exp \left\{ -\frac{r^2}{\omega^2(x)} \right\} ds \quad (6)$$

式中

$$\omega(x) = \sigma a_0 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}] \quad (7)$$

这里,  $S$  为接收光面, 即纤芯面.

在纤端出射光场的远场区, 为简便起见, 可用接收光纤端面中心点处的光强来作为整个纤芯面上的平均光强, 在这种近似下, 得到在接收光纤终端所探测到的光强公式为<sup>[14]</sup>

$$I(r, x) = \frac{SI_0}{\pi\omega^2(x)} \exp \left\{ -\frac{r^2}{\omega^2(x)} \right\} \quad (8)$$

为了给出反射接收特性函数,我们采用等效分析的方法. 首先,给出接收光纤关于反射体的镜像,并求出相应镜像坐标值. 然后利用光纤接收公式(8)直接计算出该镜像接收光纤在光源光纤纤端光场中所接收到的光强值. 最后,将该值乘以反射体的反射率  $R$ ,作为实际系统的等效结果. 如图 2 所示.

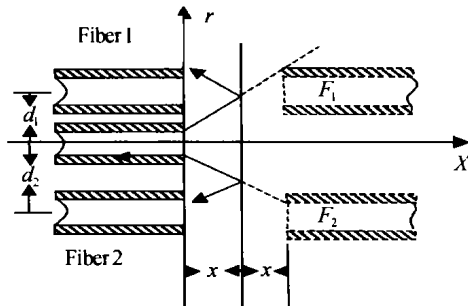


图 2 双光纤接收补偿式传感原理等效坐标分析图  
Fig. 2 The coordinate system of the equivalent twin-receiving fiber optic sensing principle with compensation

### 4 光学输出特性

考虑平行放置的 3 根光纤与反射面垂直的情况,前面的光纤与反射面之间的距离为  $x$ ,光源光纤传出的光射向反射面,接收光纤所接收到的由反射面反射回来的光强可表示为

$$I_1(d_1, 2x) = \frac{SRI_0}{\pi\omega^2(2x)} \exp\left\{-\frac{d_1^2}{\omega^2(2x)}\right\} \quad (9)$$

及

$$I_2(d_2, 2x) = \frac{SRI_0}{\pi\omega^2(2x)} \exp\left\{-\frac{d_2^2}{\omega^2(2x)}\right\} \quad (10)$$

式中,  $I_1$  和  $I_2$  分别近邻接收光纤和次近邻光纤所接收到的光强,  $d_1$  和  $d_2$  分别为两光纤到发射光纤轴心间的距离;  $x$  是三光纤与反射面之间的距离;  $I_1(d_1, 2x)$  及  $I_2(d_2, 2x)$  为两接收光纤输出的特性调制函数,它与光纤芯径、光纤数值孔径及出射光的分布模式有关.  $S$  表示光纤接收光面;  $R$  为反射面的反射系数.  $I_0$  为光源耦合到光纤中的光强. 于是两接收光强之比为

$$\frac{I_2}{I_1} \exp\left[-\frac{(d_2^2 - d_1^2)}{\omega^2(2x)}\right] \quad (11)$$

上式中  $d_1$  和  $d_2$  均为固定的常数. 这表明,比值  $I_2/I_1$  仅是光纤与反射面之间的距离  $x$  的函数,而与光源的性质,反射体的反射率等因素无关<sup>[5]</sup>.

### 5 实验结果

实验中,该设计使用了 3 根大芯径光纤,每根光纤的芯径为 700  $\mu\text{m}$ ,折射率为 1.624,包层厚度为 25  $\mu\text{m}$ ,折射率为  $n = 1.521$ . 光源采用波长 0.6328  $\mu\text{m}$  的 LED 光源,驱动电流为 30 mA,图 3 给出了近邻

和次近邻光纤输出的位移——光强特性曲线. 两接收光强的比值输出特性曲线由图 4 给出. 我们看到,在横坐标 1.6 ~ 2.6 mm 之间,  $x$  本身变化范围约为 1 mm,在此小区域范围内,位移  $\Delta x$  与比值  $I_2/I_1$  之关系为线性.

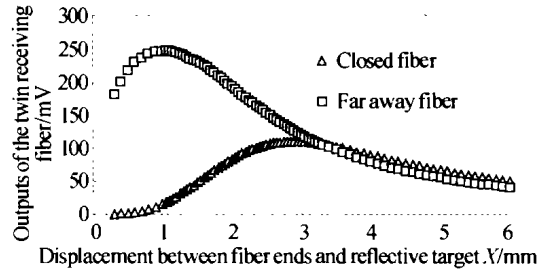


图 3 两接收光纤输出的位移光强特性曲线  
Fig. 3 Displacement  $X$  vs. the output intensity signals

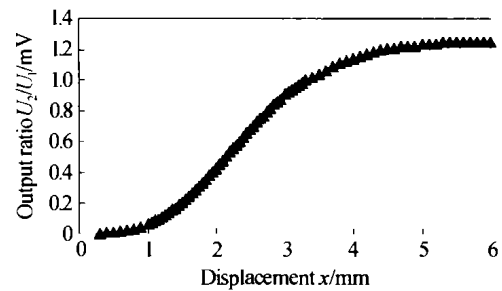


图 4 位移与两接收光纤输出光强比值的特性曲线  
Fig. 4 Characteristics curve between displacement  $X$  and the output ratio  $U_2/U_1$

我们选择图 4 所给出的线性区与所测压力动态范围相对应. 实验中,在光源驱动电流为 30 mA 和 60 mA 时,分别进行了压力值的标定测量实验. 实验结果表明,在光强由 30 mA 增大到 60 mA 时,系统的光纤传感部分由光源光强变化导致的系统误差并不大于 3.2%. 也就是说,即便在光源强度变化 100% 的情况下,系统输出比值的变化仍然很小,表明了光源起伏补偿的有效性.

该光纤差压传感器的压力标定曲线由图 5 给

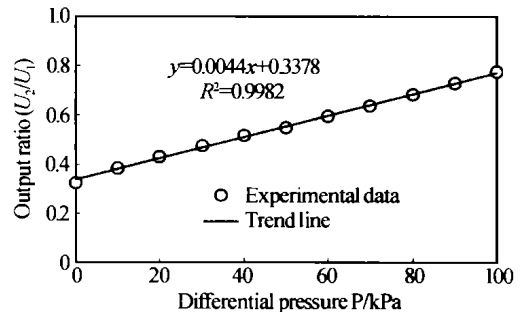


图 5 双 C 形弹簧管式光纤压力传感器压力标定测试实验结果  
Fig. 5 Calibration results of the twin C type Borden elastic tube fiber optic pressure sensor

出,驱动电流  $I_0 = 30$  mA,线性拟合函数为

$$(\Delta P) = 228.76 \left(\frac{U_2}{U_1}\right) + 77.18 \quad (12)$$

线性相关度为:  $R^2 = 0.998$ . 由此可以看出,系统测量的差压值与光强比值  $U_2/U_1$  具有良好的线

性关系.

## 6 结论

利用双 C 形弹簧管(波登管)反转对称焊接,实现了差动压力传感测量. 所设计的差动压力传感器样机可以用来测量流体的差动压力或用于液位测量. 系统采用了三光纤反射式光纤传感方式和双接收光纤技术,因而消除了输出信号对光源的依赖性,从而自动补偿了光源强度的变化,反射器反射率的变化. 进一步,若两接收光纤所出的环境条件相同,那么同光纤微弯损耗有关的噪声也被消除了. 该传感系统中所采用的双波登管反转对称的差动工作方式,可以消除环境温度对机械弹性转换元件所带来的影响,并减小了系统的机械迟滞. 最后,这种压力传感器能以线性形式工作. 这种传感器技术应用范围相当广泛,其灵敏度和测量范围取决于波登管的各参数. 因而很容易通过选用不同规格的波登管来实现各种量程的差动压力测量.

### 参考文献

- 1 Lindstrom H. Miniaturized pressure transducer intended for intravascular use. *IEEE Trans Biomed Erg.*, 1970, **BME-17**: 207 ~ 219
- 2 Powell J A. Optical zero-differential pressure switch and its evaluation in a multiple-pressure measuring system. NASA Tech Memo NASA TMX-3571, National Technical Information Service, Springfield, VA, 1977
- 3 Spillman Jr W B, McMahon D H. Schlieren multimode fiber-optic hydrophone. *Appl Phys Lett*, 1980, **37**:145 ~ 147
- 4 Scott T A. Non-contacting optical sensor. Conf: Sensors and Actuators, Chicago, IL., U. SsQ., June 1982. 8 ~ 10
- 5 Fields J N, Asawa C K, Ramer O G, et al. Fiber-optic pressure sensor, 1. *Acoust Sot Am*, 1980, **67**:816 ~ 821
- 6 Fields J N, Cole J H. Fiber microbend acoustic sensor. *Appl Opt*, 1980, **19**:3265 ~ 3270
- 7 Hansen T E. A fiber-optic micro-tip pressure transducer for medical applications. *Sensors and Actuators*, 1983, **4**:545 ~ 55
- 8 袁野,曹钟慧,包俊峰,等. 一种 MEMS 可调光衰减器性能测试及动态响应分析. *光子学报*, 2004, **33**(4):439 ~ 442  
Yuan Y, Cao Z H, Bao J F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):439 ~ 442
- 9 周望,陈林森,叶燕. 共焦光学传感头用于红外上转换油墨的微弱光检测. *光子学报*, 2004, **33**(7):814 ~ 817  
Zhou W, Chen L S, Ye Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):814 ~ 817
- 10 苑立波,阮顺龄,张衍阁. 光纤复合压力计. *光通信技术*, 1991, **16**(1):52 ~ 56  
Yuan L B, Ruan S L, Zhang Y G. *Optical Fiber Communication Technology*, 1991, **16**(1):52 ~ 56
- 11 Cook R O, Hamm C W. Fiber optic lever displacement transducer. *Appl Opt*, 1979, **18**: 3230 ~ 3241
- 12 苑立波. 非功能式光纤传感器设计基础(一):光源与纤端光场. *光通信技术*, 1994, **18**(1):54 ~ 64  
Yuna L B. *Optical Fiber Communication Technology*, 1994, **18**(1): 54 ~ 64
- 13 苑立波. 非功能式光纤传感器设计基础(二):调制方式及其理论分析方法. *光通信技术*, 1994, **18**(2):143 ~ 165  
Yuna L B. *Optical Fiber Communication Technology*, 1994, **18**(2): 143 ~ 165
- 14 苑立波. 非功能式光纤传感器设计基础(三):补偿技术及其机理分析. *光通信技术*, 1995, **19**(1): 56 ~ 82  
Yuna L B. *Optical Fiber Communication Technology*, 1995, **19**(1): 56 ~ 82

## Fiber Optic Differential Pressure Sensor with Twin Borden Tubes

Tong Chengguo, Yang Jun, Liu Zhihai, Yuan Libo

Department of Physics, School of Sciences, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date:2003-10-08

**Abstract** A fiber optic differential pressure sensor based on a pair of Borden tubes pressure transformer has been proposed and demonstrated. The twin Borden tubes have been welded in the anti-symmetry manner and working in the way of differential pressure. The fiber optic sensing designing experiments system was used in the sensor design. The intensity type reflective modulation technique is utilized and the variations caused by the fluctuation of light source and the reflectivity change of reflective surface is automatically compensated as a three-fiber reflective modulation technique was utilized in the sensor design. Theoretically, the fiber optic sensor input and output characteristics and the advantages of the anti-symmetry Borden tubes elastic device are analyzed. Experimentally, the linear input-output results are also given and discussed.

**Keywords** Fiber optic sensor; Differential pressure sensor; Borden elastic tube; Compensation technique of three fiber probe

**Tong Chengguo** was born in 1976. He works in the Department of Physics, School of Sciences, Harbin Engineering University from 1998. His interesting is mechanical design and fiber optic sensor. Several research papers have been published.

