

# 智能结构中的光纤传感系统研究\*

韩 雷

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

Voloshin A S

(Department of Mechanical Engineering and Mechanics,  
Lehigh University, Bethlehem, PA 18015, USA)

**摘 要** 以电流变材料制作的结构构型及特性可随外界因素而变, 当具备一定的感知功能后即成为智能结构。光纤传感器具有抗电磁干扰、高灵敏度、高频响、可挠曲铺设等特点, 故成为传感系统的首选技术。

**关键词** 电流变材料, 智能结构, 光纤传感器。

## 1 引 言

智能结构是近年来各领域专家高度重视的研究热点。以电流变(ER)材料为代表的各种智能材料所组成的结构, 将对机械、汽车、船舶、航天器、机器人等领域技术、装备水平的提高, 产生重大影响<sup>[1-3]</sup>。

电流变材料中悬浮于非极性流体中的电介质颗粒, 可在外电场下迅速有序链化, 使电流变材料由牛顿流体变为粘弹性固体。链化所致电流变材料的改性, 即是构成结构的调节能力(见图 1)。显然, 在电流变构件的性能测试和应用研究中, 必须使用不受电场干扰的传感器, 故耐腐蚀、可延展铺设嵌入的光纤传感器成为研究与实用中的首选传感器。

光纤作为智能结构的传感系统, 除了与一般传感器应用中共同具有的灵敏度、漂移、频率响应、工艺和技术等问题之外, 还有分布参量测试、传感与结构一体设计、多通道实时处理、特征与故障识别等方面的不少细节问题尚待解决。必须指出, 只有智能材料的功能性综合性构造(而非简单组合), 才能形成实用的智能结构, 其中传感系统的理论、技术与实验研究, 占有相当的地位。

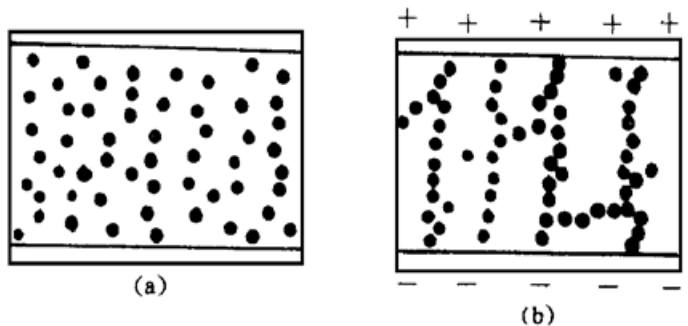


Fig. 1 The pattern structure of ER material under electrical field

\* 国家教委留学回国人员科研启动费和福建省自然科学基金资助。

### 2 偏振光纤测量电流变构件的动态特性

作为传感光纤主要发展方向的偏振光纤，灵敏度适中且适于纵向待测量的相位检测，如粘结嵌入于电流变结构的内外表面，可用于提取表面平均应变信息。设偏振光纤长度为  $L$ ，承受纵向平均应变为  $\epsilon$ ，则产生的两个等幅正交偏振分量的相位差可表示为

$$\varphi = (2n\pi + \varphi_0) + \Delta\varphi = KL + KL\epsilon \tag{1}$$

式中  $\varphi_0$ 、 $\Delta\varphi$  为初始相位和待测相位差， $K$  为相位灵敏度。由实际待测  $\epsilon$  的范围选取合适的  $L$  和  $K$ ，用试凑法获得合适的  $\varphi_0$  值，而整数  $n$  是由于光学检测表现为  $\varphi$  的正弦或余弦函数所致。

为处理传感光纤的扭曲，用圆偏振光路(图 2)检测  $\varphi$ 。光纤快轴( $f$ )与两 1/4 波片  $Q_1$ 、 $Q_2$  的第 1 轴的夹角记为  $\theta_1$  和  $\theta_2$  ( $-\pi/4 \leq \theta_1, \theta_2 \leq \pi/4$ )，每个光学元件对两偏振分量的总体效应，可表示为琼斯(Jones)矩阵的连乘，即自  $Q_2$  出射的光振动在  $Q_2$  的第 1、2 轴上的分量为

$$\begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{a_0}{\sqrt{2}} \exp(i\omega t) \tag{2}$$

式中  $a_0$ 、 $\omega$  为探测光的振幅和频率。这样，检偏器 A 出射的合成光振动为

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} a_0 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \exp[i(\theta_1 + \theta_2)] \exp(i\omega t) [1 + \exp(i\varphi)]$$

光电探头的接收光强为

$$I = |u_1|^2 + |u_2|^2 = a_0^2(1 + \cos \varphi)/2 \tag{3}$$

可见  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的影响已被消除。

在实测对象为电流变筒支梁构件、所用领结型偏振光纤 ( $K = 8.5 \times 10^{-4} / \mu\epsilon \cdot \text{cm}$ ) 传感系统的输出信号功率谱中，出现了对应于结构不同而不同的共振频率的峰状图案。图 3 是场强为 0 和 400 V/mm 情况下的数据<sup>[4, 5]</sup>。电流变结构的刚性随外加电场的增强而增加，与理论分析和其他方法实测的结果吻合。而且，电流变结构外层铝板要施加高达 2500 V 以上高压，除本方案外尚无较好的内禀式测量技术。

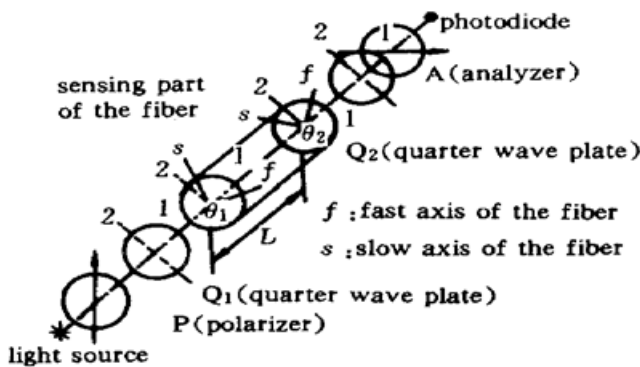


Fig. 2 Circular polarimetric arrangement for fiber optic sensor

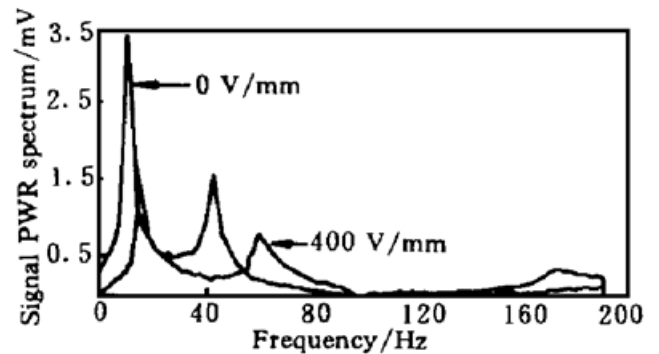


Fig. 3 Magnitude of spectrum signals from FOS (0 and 400 V/mm applied)

### 3 工作点的漂移与宽带信号处理

理论上具有极高灵敏度的干涉式光纤传感器，测试臂与参考臂的相对光程变化差动干涉，更适于提取局部应变，更利于形成补偿式测量。但是，灵敏度高，同时也放大了作用于光

纤系统的噪声,使实测十分困难。

长度为  $L$ 、折射率为  $n$  的单模光纤轴对称时纵向、径向应变  $\epsilon_l$ 、 $\epsilon_r$  均对光纤的相位差

$$\Delta\varphi = (2\pi nL/\lambda) \{1 - n^2[(p_{12} + p_{11})\epsilon_r/\epsilon_l + p_{12}]/2\} \epsilon_l \quad (4)$$

有影响, ( $p_{ij}$  是纤芯光弹效应参数), 但一般认为上式中中括号内的因子可作为常数看待。对于迈克尔逊干涉仪布置, 并取  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ , 半个波长的伸缩可产生  $2\pi$  的位相差, 按(1)式定义可认为相位灵敏度  $K$  约为  $0.2/\mu\epsilon \cdot \text{cm}$ , 则相当于(4)式中中括号内数值约为 1.36。另外, 温度变化  $\Delta t$  在同一光纤中引起的相位差为

$$\Delta\varphi = (2\pi nL/\lambda) [(1/n) dn/dt + (1/L) dL/dt] \Delta t \quad (5)$$

而由单模光纤的物理参数得到(5)式中圆括号内因子数值约为  $7.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。这就是说,  $1.35^\circ\text{C}$  温度变化和  $10 \mu\epsilon$  应变变化基本等效。

可以认为, 要提高信噪比, 要求尽量减小  $\Delta\varphi$  或增加光纤敏感部分长度与光纤全长之比, 这对于干涉式光纤系统难以做到; 温度和应变的  $1.35^\circ\text{C}$  等效  $10 \mu\epsilon$  关系也发生在诸如康铜丝电阻应变传感器情况, 均证实了温度效应是高灵敏干涉式光纤系统的主要噪声来源。

实测表明, 噪声虽是一平稳随机量, 但往往呈低频“直线型”漂移, 如果信号项为  $\Delta\varphi = KL\epsilon_0 \sin(\omega t)$ , 则噪声项为  $\Delta\varphi = \omega_b t$ , 这里  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_c$  为待测应变幅度和频率,  $\omega_b$  为噪声频率, 且一般  $\omega_b \ll \omega_c$ 。从而, 干涉式光纤传感器输出

$$\begin{aligned} I &= I_0 + B \cos(\Delta\varphi + d\varphi) \\ \Delta I &= B \cos[KL\epsilon_0 \sin(\omega t) + \omega_b t] = \\ &= B \sum_{n=1}^{\infty} \{J_n(KL\epsilon_0) [\cos(\omega_b + n\omega_c)t + \\ &(-1)^n \cos(\omega_b - n\omega_c)t]\} + BJ_0(KL\epsilon_0) \cos \omega_b t \end{aligned} \quad (6)$$

即输出信号的频谱应为等间隔分立峰状, 峰间隔对应于待测微小应变的频率。有关实验证明了这一分析的正确性, 用带通滤波器消除  $\omega_b$  和倍频分量后, 不难从信噪比很小的实际信号输出中得到关于智能结构的外部激励的频率<sup>[6, 7]</sup>。

以上作法虽然简明实用, 但对应于待测频率下限过低时难以预设带通滤波的截止限。对此, 小波分析理论和技术可用在后继的信号处理中。将非平稳的光纤传感器输出信号分解到不同层次不同频道的序列后, 噪声特征通过一定时间的训练即可归纳。有关工作虽然尚未做到实时处理, 但显示了较大的适用性和实际应用前景。

## 4 光纤传感系统的分布式测量

延展铺设或固结于电流变结构的光纤的应变不可能分布均匀, 故相位差应为

$$\Delta\varphi = K \int_{x_1}^{x_2} \epsilon(x, t) dx \quad (7)$$

并由此产生了信号的平滑和分布效应。

前者如图 4 所示, 在同一电流变构件上两类不同的光纤传感器探测到的频率曲线有着明显的差别<sup>[8]</sup>, 分布式光纤传感器的信噪比与逐点光纤传感器相比, 提高了约两个数量级。

后者则使光纤分布路径与待测振型联系起来。如弹性梁谐振动时挠度为

$$y(x, t) = y(x) \cos(\omega t + \theta_0)$$

欧拉方程为

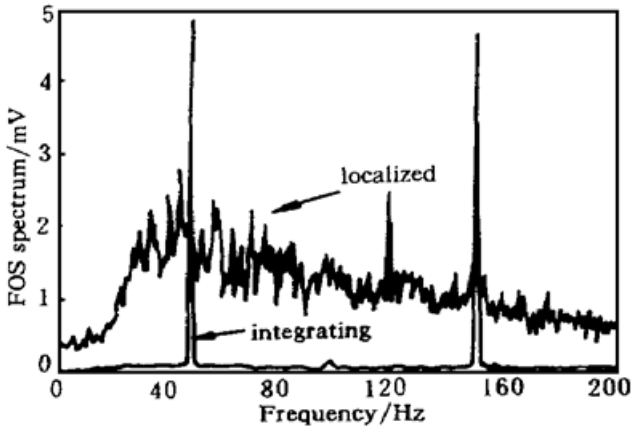


Fig. 4 Power spectrum of integrating and localized FOS (50 Hz excitation)

$$d^4y(x)/dx^4 - \beta^4y(x) = 0 \quad (8)$$

将简支梁的边界条件代入(8)式通解,最后可得各阶主振型对应的中性层曲率分布

$$\rho(x) = y''(x)/[1 + y'^2(x)]^{3/2} = -dL\beta^2 \sin \beta x / [1 + (dL\beta \cos \beta x)^2]^{3/2}$$

式中  $L$  为梁长度,  $d$  和  $\beta$  为对应于频率方程  $\sin \beta L = 0$ , 及各阶主振型  $y(x) = dL \sin \beta x$ , 的有关参数。由(7)式,经推导可得从  $x_1 = 0$  到  $x_2 = \xi L$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ) 段光纤输出信号为

$$\Delta\varphi = \alpha K dL\beta [\cos \beta \xi L / \sqrt{1 + (dL\beta \cos \beta \xi L)^2} - 1 / \sqrt{1 + (dL\beta)^2}]$$

它与结构尺寸和性质  $\alpha$  有关,与实际约束条件  $\alpha$ 、光纤参数  $K$ 、主振型  $m = \frac{\beta L}{\pi}$ 、及光纤分布长度  $\xi$  有关。

Hough 变换使平面上直线与特征平面上的点建立了一一对应关系,由此可用于中心对称电流变结构主振型识别的建模。 $(x, y)$  平面内的任意直线  $L$  均可按点向式变换为  $(\rho, \theta)$  平面上的点,故当最低阶主振型时,  $(\rho, \theta)$  平面上所有点,即所有光纤传感器的输出必与  $\theta$  无关,不难与其他阶振型分开。

### 5 光纤传感系统与中央控制单元

智能结构是传感系统、中央控制单元、功能调节系统的有机结合。因而,设计光纤传感系统时,须考虑与智能结构其他部分的连接。

光纤传感系统的多层化,首先,目的是将结构的感知与主动响应分离。因为两者在空间和时间上的区别,有必要在结构的某些部位设置专门提取外界变化或调节效果信息的传感器,这些部位或是敏感于外界或是敏感于调节。其次,光纤传感系统的工作范围应能复盖结构的弹性应变、塑性大变形乃至损伤或破坏。线性、精度、频响等方面对单个传感器提出的要求,将被宽测量范围、耦合方式、嵌埋工艺技术、集束处理等对传感系统提出的要求所冲淡。

中央控制单元将实际智能结构的构型空间、外界状态空间与决策空间连为整体。文献 [6] 以查找表方式工作的中央控制单元用 486 微机实现。先由电磁激励扫频和光纤传感系统的检测,得到了状态和决策之间的初始映射关系。“自学”完成后,结构的刚度会自动改变以避开共振峰。从辅助电磁位移传感器对该电流变结构的监测可知,并没有对整个结构进行物理/力学耦合的、非线性、非保守的分析,却达到了某些频率振幅降低一个数量级以上的效果。

**结 论** 使用光纤传感系统在电流变智能结构中的检测,方案可行,结果可靠,是模型研究进入实际应用前的重要途径之一。

## 参 考 文 献

- [1] Whittle M, Bullough W M. The structure of smart fluids. *Nature*, 1992, **358**(6385) : 373~ 375
- [2] Coulter J P, Weiss K D, Carlson J D *et al.*. Engineering applications of electrorheological materials. *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, **4**(2) : 248~ 259
- [3] 朱克勤, Tao R. 电流变液和电流变效应. *力学进展*, 1994, **24**(2) : 154~ 161
- [4] Han L, Voloshin A, Coulter J. Vibration sensing in electrorheological controllable structure by embedded polarimetric fiber optic sensors. *Proc. of 1993 ASME Annual Meeting*, New Orleans: 1993, 297~ 302
- [5] 韩 雷, Voloshin A, Coulter J. 嵌入式偏振光纤传感器用于电流变材料可控结构的振动测试. *厦门大学学报*, 1996, **35**(6) : 867~ 871
- [6] Han L, Voloshin A, Yalcintas M *et al.*. Electrorheological adaptive structures with embedded sensing and control. *Proc. SPIE*, 1994, **2190** : 2~ 16
- [7] 韩 雷, Voloshin A, Coulter J. 电流变材料构件的频率检测与响应控制. *光子学报*, 1997, **26**(5) : 444 ~ 448
- [8] Han L, Voloshin A, Yalcintas M *et al.*. Application of the integrating fiber optic sensor for vibration sensing. *Smart Material and Structure*, 1995, **5**(4) : 100~ 105
- [9] Han L, Voloshin A, Coulter J *et al.*. Spatially integrating fiber optic strain sensor for vibration monitoring in smart structure. *Proc. 1997 Asia-Pacific Symposium on Instrumentation*, Huangshan: 1997, 100~ 105

## Studies on Fiber Optic Sensory Network in Smart Structures

Han Lei

*(Department of Mechanical/Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)*

Voloshin A S

*Department of Mechanical Engineering and Mechanics, Lehigh University, Bethlehem, PA 18015, USA**(Received 14 July 1997; revised 4 May 1998)*

**Abstract** A smart structure is defined as an electrorheological material based structural system whose geometric configuration or inherent characteristics can be modified in response to environmental changes. When a tunable product with sensory and control capabilities is implemented, a smart structure is approached. Fiber optic sensors have certain advantages such as electro-magnetic environment insensitivity, high response bandwidth and structural flexibility, so they can be used as an optimal sensing network/system.

**Key words** electrorheological material, smart structure, fiber optic sensor (FOS).