

# 温度场中应变光纤测试方法

邵立国 冯 健\* 杨照东 董存祥\*\* 秦玉文

(天津大学力学系,天津 300072)

\* (中国建筑科学研究院,北京 100013)

\*\* (天津市证券公司,天津 300040)

**摘要** 研究温度变化时光纤应变测试系统中的传输光纤和感应光纤产生附加相位的问题. 推导出附加相位与温度变化的关系式, 提出消除附加相位的补偿法. 通过实验分析证明了补偿法对消除附加相位是行之有效的, 提高了测试精度.

**关键词** 光纤传感, 应变, 光纤应变测量

## 引 言

1978 年 Butter<sup>[1]</sup>首次将光纤传感技术引入应变测量以来, 由于其独特的优点(结构简单、体积小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰等), 受到各国的重视. 在光纤应变测试方法的研究中, 人们发现温度变化对测量产生干扰, 如 1990 年 Farahi<sup>[2]</sup>注意到光纤对应变和温度都具有敏感性; 1991 年 Hogg<sup>[3]</sup>对光纤应变测试中的温度虚假应变进行了初步的理论探讨和实验分析. 同时人们为降低温度的干扰也进行了研究, 1990 年 Vengsarkar<sup>[4]</sup>采用双模椭圆芯光纤可使应变、温度参数分离达到消除干扰的目的. 本文研究温度变化时采用单模光纤进行应变测量时所遇到的问题, 通过理论分析, 提出补偿法消除温度虚假应变, 提高了精度.

## 1 光纤应变测试方法的原理

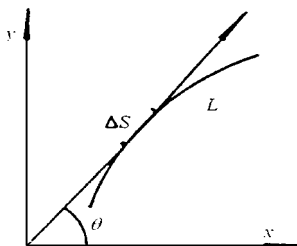


图 1 光纤微段的参数

Fig. 1 Parameter of a fiber path

不考虑外界干扰的前提下, 粘贴在物体表面的光纤  $L$ , 取一微段  $S$  (图 1). 光波导理论指出, 当光纤与物体一起变形时,  $S$  两端面光相位差的变化为

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n \Delta L + L \Delta n) \quad (1)$$

式中  $\lambda = \lambda_0/n$ , 为光的波长,  $n$  为纤芯的折射率. 根据应变的定义及纤芯折射率的变化与应变和纤芯光弹系数的关系, 得光纤应变测量的基本公式

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} n^2 (1 - \mu) L (\epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \epsilon_{xy} \sin \theta \cos \theta) \quad (2)$$

式中  $c = n^2 [(1 - \mu) P_{12} - P_{11}] / 2$ ,  $\mu$  为光纤的泊松比,  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  为纤芯的光弹系数.

1996-07-20 收到第一稿, 1997-03-16 收到修改稿.

### 2 温度场中光纤应变测量方法的分析

光纤对温度变化是十分敏感的,以激光  $\lambda = 0.6382 \mu\text{m}$  为例,长 1 m 的光纤温度每改变 1 °C,干涉条纹移动 17 个条纹数<sup>[5]</sup>. 温度场中的传输光纤可以自由伸缩,则

$$\phi = 2\pi \left[ n_x L + L \frac{\partial n}{\partial T} T \right] \quad (3)$$

这里  $\alpha_x$  为光纤的热胀系数,  $T$  为温度变化量. 式(3)说明温度变化使测试系统产生附加相位,由此计算的应变为虚假应变. 设信号和参考光纤产生的附加相位分别为  $\phi_{21}$  和  $\phi_{22}$ , 则消除附加相位的条件是

$$\left[ n_{11} L_1 + L_1 \frac{\partial n_1}{\partial T_1} T_1 \right] - \left[ n_{22} L_2 + L_2 \frac{\partial n_2}{\partial T_2} T_2 \right] = 0 \quad (4)$$

由此可知,信号传输光纤和参考传输光纤在温度场中的几何长度必须相等,对应点的温度变化相同,而且两光纤具有完全相同的性质.

由于物体刚度远大于光纤刚度,因此,物体热胀产生的变形决定了光纤的变形. 设物体的热胀系数为  $\alpha_w$ , 如图 2, 感应光纤总的伸长量为  $L_2$ , 其中  $L_1$  是温度引起的光纤变形,  $L_3$  是物体热胀由于应力作用产生的变形,所以,当温度变化时感应光纤受到温度效应和应变效应的共同作用. 则有

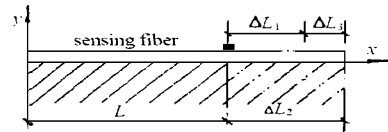


图 2 受时光纤和物体产生不同的伸长  
Fig. 2 Result of different dilation when they are heated

$$\phi_3 = 2\pi \left[ L (n_{11} + n_{33}) + n_x (L_1 + L_3) \right] \quad (5)$$

式中  $n_{11}$  是热胀时纤芯折射率的变化,  $n_{33}$  为应力作用纤芯折射率的变化. 根据热胀原理、应变关系及折射率椭球常数与光弹系数的关系,由式(5)得

$$\phi_3 = 2\pi L T \left( n_x + \frac{\partial n}{\partial T} - c_1 \right) \quad (6)$$

式中  $c_1 = n^3 (\alpha_w - \alpha_x) [(1 - \mu) P_{12} - \mu P_{11}] / 2$ . 在参考光纤中设置补偿感应光纤,将其粘贴在与被测物相同材质的补偿块上,补偿块不受外载荷作用,仅感受温度的影响. 设测量感应光纤和补偿感应光纤产生的附加相位分别为  $\phi_{31}$  和  $\phi_{32}$ , 则消除附加相位的条件是  $\phi_{31} - \phi_{32} = 0$ , 即

$$L_1 T_1 \left[ (n_{11} + n_{31}) + \frac{\partial n_1}{\partial T_1} T_1 - c_{b1} \right] = L_2 T_2 \left[ n_{22} + \frac{\partial n_2}{\partial T_2} T_2 - c_{12} \right] \quad (7)$$

可知,补偿感应光纤满足下列条件才能消除附加相位对测量的干扰:用相同的光纤制作测量感应光纤和补偿感应光纤,两者长度必须相等,在同一温度场中.

### 3 带有补偿功能的全光纤 Mach-Zehnder 干涉应变测试系统和实验研究

具有补偿功能的光纤 Mach-Zehnder 干涉应变测量系统如图 3. 激光器射出的激光经耦合器

分束后分别射入两传输光纤,又经各自的感应光纤后至另一耦合器产生干涉,经脱模器滤掉纤芯外的杂波后,仅纤芯内的干涉波射向探测器。当加载时物体变形,信号光路和参考光路产生的相位变化分别为  $\phi_x$  和  $\phi_c$ , 则

$$\left. \begin{aligned} \phi_x &= \phi_{11} + \phi_{21} + \phi_{31} + \phi_{r1} \\ \phi_c &= \phi_{22} + \phi_{32} + \phi_{r2} \end{aligned} \right\} \text{位,}$$

www.cnki.net

Fig.4 Experimental install

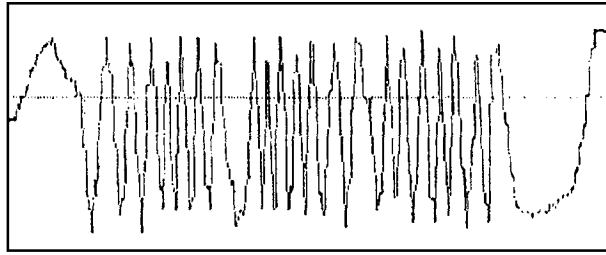


图 5 相位波形图

Fig. 5 Oscilloscope trace of interferometric light when a beam is transmuted

## 4 结 论

本文对温度变化时的光纤应变测试原理进行了理论分析和实验研究,为温度场中消除附加相位的影响,提高测试精度给予理论依据.在此基础上提出了运用补偿的方法,也就是采用补偿感应光纤和补偿块技术,信号传输光纤和参考传输光纤平行粘接成一体简单处理方案,解决了温度变化对测量干扰的问题,同时排除微弯等因素的影响.为了改善输出波形图的质量,采用了脱模技术和在光路中设置了匹配液.本文的研究为光纤应变测试技术向实用化迈进了一步.

## 参 考 文 献

- 1 Butter CD, Hocker GB. Fiber optic strain gauge. *Appl Opt*, 1978, 17(18): 2867 ~ 2869
- 2 Farahi F, Webb DJ, Jackson DA. Simultaneous measurement of temperature and strain cross - sensitivity considerations. *J Light-wave Tech*, 1990, 8(2): 138 ~ 142
- 3 Hogg D, Janzen Doug, Valis T, Measures RM. Development of a fiber fabry-perot strain gauge. *SPIE*, 1991, 1558: 300 ~ 307
- 4 Vengsarkar AM, Michie WC, Clans RO. Fiber optic sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *SPIE*, 1990, 1367: 249 ~ 260
- 5 徐予生等译. 光纤传感器技术手册(第四章). 北京:电子工业出版社, 1987
- 6 Narendran N. Optical - fiber strain sensor using combined interference and polarimetric technique. *Optics and Lasers in Eng.* 1993, 18: 121 ~ 133
- 7 Sirkis JS, Mathews CT. Experimental investigation of phase-strain-temperature models for structurally embedded interferometric fiber optic sensors. *Exp Mech*, 1993, 33(3): 26 ~ 31
- 8 董存祥. 光纤应变测试方法的研究. 天津大学硕士学位论文, 1995
- 9 姚启钧著. 华东师大《光学》教程编写组改编. 光学教程. 北京:高等教育出版社, 1981

## AN OPTICAL FIBER STRAIN SENSOR METHOD IN VARYING TEMPERATURE ENVIRONMENT

Shao Liguo   Feng Jian \*   Yang Zhaodong   DongCunxiang \* \*   Qin Yuwen

( *Tianjin University, Tianjin 300072, Chinarm* )

\* ( *Beijing Architectonic Science Research Institute, Beijing 100013, Chinarm* )

\* \* ( *Tianjin Securities Exchange Center, Tianjin 300040, Chinarm* )

**Abstract** The principle of the additional phase produced by transmissive light in conducting and sensory optical fibers is studied in this paper when variation of temperature is present. Formula of additional phase with temperature changes were given in theoretical analysis. A new compensatory method of eliminating the effect of additional phase is also presented. The strain of a cantilever beam is measured to make use of all-fiber Mach-Zehnder interferometric sensor with compensative function. It is verified that the compensatory method is effective. A high precision of measuring is obtained.

**Key words** fiber sensor , strain , optical fiber strain sensor