

$$\lambda^2 = \frac{2G_a}{E_c r_c^2 \ln \frac{r_h}{r_c}} \quad (5-69)$$

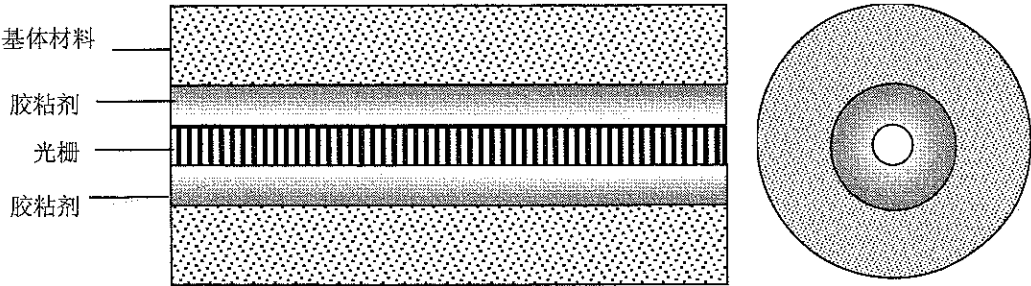


图 5-11 裸光纤光栅通过胶粘剂埋入结构  
Figure 5-11 Bare FBG directly embedded in structure with glue

2) 管式封装光纤光栅埋入基体结构 图 5-12 为管式封装光纤光栅埋入基体结构示意图。

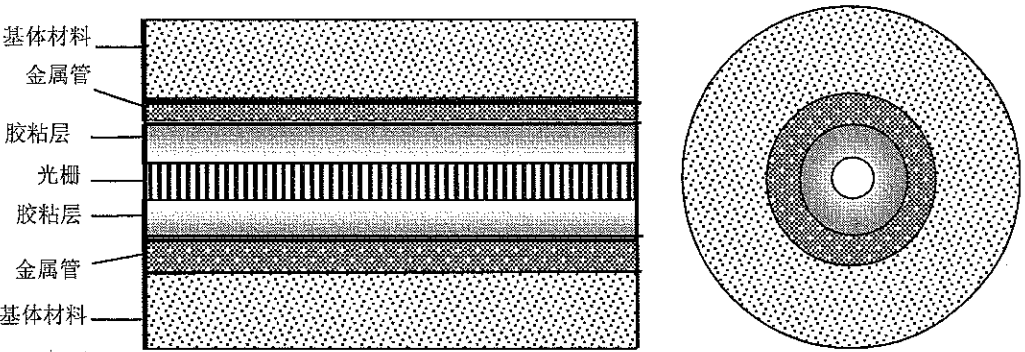


图 5-12 管式封装光纤光栅埋入结构示意图  
Figure 5-12 Tube-packaged FBG embedded in structure

埋入结构的管式封装光纤光栅可以视为把 5.2.1 节中的“保护层”换成粘贴层，而“粘贴层”换成“金属管”的情况。于是，5.2.1 节中的公式下标作如下轮换：p→a，a→m。则式(5-3)变为

$$u_h(\bar{x}) = \Delta_m + \Delta_a(\bar{x}) + u_c(\bar{x})$$

从而方程(5-20)为

$$\left[ \frac{1}{G_m} \ln \frac{r_h}{r_{ma}} + \frac{1}{G_a} \ln \frac{r_{ma}}{r_c} \right] \frac{\partial \tau_{ma}^2(r_{ma}, \bar{x})}{\partial^2 \bar{x}} - \frac{2}{E_c r_c^2} \tau_{ma}(r_{ma}, \bar{x}) = 0$$

其中,  $G_m$  为金属管剪切模量,  $r_{ma}$  为金属管内径, 此方程解的形式和前面相同,  $\lambda$  取值为

$$\lambda^2 = \frac{2}{E_c r_c^2 \left[ \frac{1}{G_m} \ln \frac{r_h}{r_{ma}} + \frac{1}{G_a} \ln \frac{r_{ma}}{r_c} \right]} \quad (5-70)$$

### 5.3.2 表面粘贴式光纤光栅应变传感的界面传递特性

1) 裸光栅直接粘贴于结构表面 图 5-13 所示粘贴于结构表面的裸光纤光栅可以视为 5.2.2 节中将模型去掉粘贴层的情形, 将保护层视作胶粘层。因此, 推导基本相同, 只需将公式的下标做如下轮换: 当下标  $p$  前面没有  $a$  时  $p \rightarrow a$ , 有  $a$  时  $p \rightarrow h$ ; 有独立下标  $a$  的项去掉。于是, 位移关系式(5-49)变为

$$u_h = u_c + \Delta_{ad}$$

方程(5-58)变为

$$\frac{(3h_a - 2r_c)(h_a + 2r_c)}{8G_a} \frac{\partial^2 \tau_{ah}}{\partial \bar{x}^2} - \frac{1}{E_c} \tau_{ah} = 0$$

同时有

$$\lambda^2 = \frac{8G_a}{E_c (3h_a - 2r_c)(h_a + 2r_c)} \quad (5-71)$$

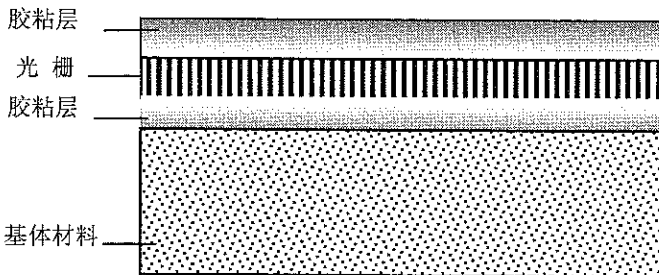


图 5-13 裸光纤光栅直接粘贴于结构表面

Figure 5-13 Bare FBG directly bonded on structural surface

2) 片式封装光纤光栅粘贴于结构表面 考虑金属基片式封装的主要应用对象是钢结构, 其布设工艺通常采用焊点法, 即金属基与结构充分粘合, 不存在

应变传递问题。图 5-14 所示粘贴于结构表面的片式封装光纤光栅的受力特点与基本变形形式与裸光栅直接粘贴类似，因此其分析方法和基本方程与裸光栅完全相同，其结果与粘贴于结构表面的裸光栅也一致。因此其应变传感的界面传递特征值与裸光栅的一致。

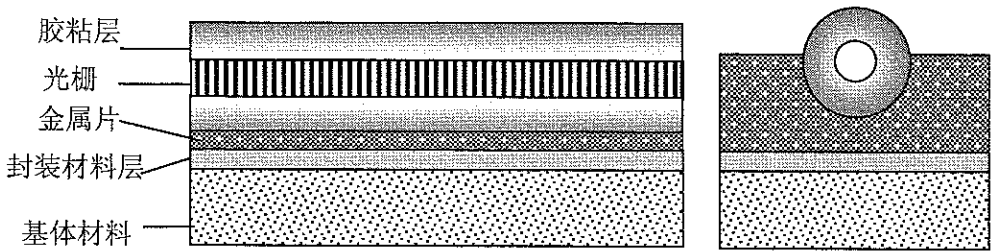


图 5-14 片式封装光纤光栅粘贴于结构的示意图

Figure 5-14 Slice-packaged FBG bonded on structure surface

**3) 管式封装光纤光栅粘贴于结构表面** 图 5-15 所示的粘贴于结构表面的管式封装光纤光栅应变传感的分析方法与片式封装光纤光栅粘贴结构表面类似，只是多出一层金属管层。

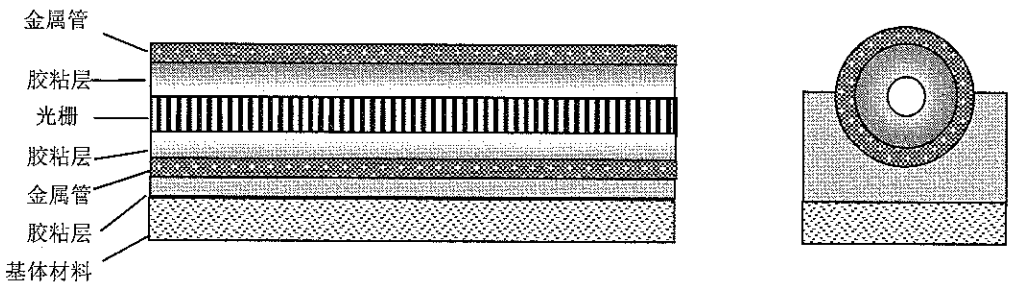


图 5-15 管式封装光纤光栅粘贴于结构示意图

Figure 5-15 Tube-packaged FBG bonded on structural surface

### 5.3.3 FRP-OFBG 传感器埋入基体结构的应变传感界面传递特性

FRP-OFBG 传感器埋入基体结构的示意图如图 5-12 所示。FRP-OFBG 作为应变传感器通常取得较短，因此埋入基体结构的 FRP-OFBG 传感器可以视为 5.2.1 节中光纤传感器较短的情况。将 5.2.1 节中轮换“保护层”→“FRP”，

去掉“粘贴层”。同时,将式(5-21)中的  $r_{ap} \rightarrow r_c$ ,  $G_a \rightarrow G_{FRP}$  (FRP 剪切模量), 从而有

$$\lambda^2 = \frac{2G_{FRP}}{E_c r_c^2 \ln \frac{r_h}{r_c}} \quad (5-72)$$

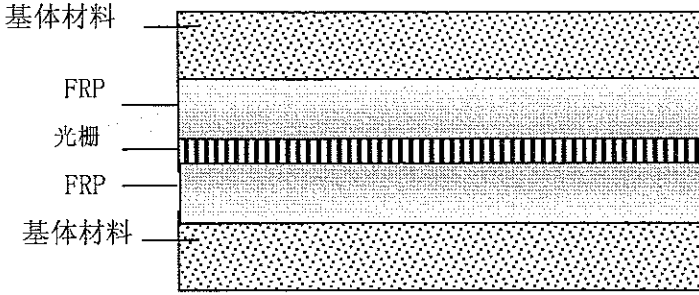


图 5-16 FRP-OFBG 传感器埋入结构示意图  
Figure 5-16 FRP-OFBG embedded in structure

#### 5.4 光纤光栅应变传感界面传递的平均应变分析

由式(5-36)可知,  $\varepsilon_c(\bar{x})$  与待测点处的应变  $\varepsilon_h(0)$  有一定的差别, 当且仅当  $\bar{x}=0$  时,  $\varepsilon_c(0)=\varepsilon_h(0)$ 。监测时, 我们不可能得到每一个  $\bar{x}$  的应变值。为了能够估计光纤监测应变与测点实际应变的误差, 对监测值进行误差修正, 进而优化光纤光栅传感器的设计, 我们定义光纤光栅平均观测应变:

$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{\int_0^{l_f} \varepsilon_c(\bar{x}) d\bar{x}}{l_f} \quad (5-73)$$

同样, 定义基底材料平均应变:

$$\bar{\varepsilon}_h = \frac{\int_0^{l_f} \varepsilon_h(\bar{x}) d\bar{x}}{l_f} \quad (5-74)$$

并且认为  $\bar{\varepsilon}_h = \varepsilon_h(0)$ , 考虑式(5-36), 则平均应变的比值可写为

$$\frac{\bar{\varepsilon}_c}{\bar{\varepsilon}_h} = \frac{\lambda_f \operatorname{sh}(\lambda_f) - \operatorname{ch}(\lambda_f) + 1}{\lambda_f \operatorname{sh}(\lambda_f)} = 1 - \frac{\operatorname{ch}(\lambda_f) - 1}{\lambda_f \operatorname{sh}(\lambda_f)} \quad (5-75)$$

上式为光纤光栅应变传感界面传递的平均应变表达式, 其中  $\lambda$  随光纤光栅

应变传感器的结构形式和布设方式不同而取不同的值。由该式可以清楚地看出光纤光栅应变传感的界面传递误差率 ( $\eta$ ) 和修正系数 ( $k$ ) 分别为:

$$\eta = \frac{\text{ch}(\lambda_f) - 1}{\lambda_f \text{sh}(\lambda_f)} \quad (5-76)$$

$$k = \frac{1}{1 - \eta} \quad (5-77)$$

## 5.5 光纤光栅应变传感的误差分析与修正

由光纤光栅应变传感界面传递的基本表达式可以看出, 光纤光栅应变传感器实际工程应用时是必定存在误差的。准确判定光纤光栅应变传感器的测试误差, 并对其进行有效地修正, 是正确应用已有光纤传感器和开发新式传感器的基础。下面对自行研究开发的 FRP-OFBG 应变传感器、光纤光栅管式封装应变传感器和光纤光栅片式封装应变传感器在具体应用时的界面传递误差与修正进行分析研究, 给出传感器的几何尺寸和材料物理特性对应变界面传递误差的影响, 并对误差进行修正。

### 5.5.1 FRP-OFBG 应变传感器埋入结构

从式(5-72)可知, FRP-OFBG 埋入结构的应变传感界面传递特性的特征值为

$$\lambda^2 = \frac{2G_{\text{FRP}}}{E_c r_c^2 \ln \frac{r_h}{r_c}}$$

从该式可以清楚看出, 由于光纤光栅的弹性模量 ( $E_c$ ) 和光栅的半径 ( $r_c$ ) 为常数, 所以, 影响界面传递特性的因素只有 FRP 筋的剪切模量 ( $G_{\text{FRP}}$ ) 和 FRP 筋的半径 ( $r_h$ )。

对于 GFRP-OFBG 而言, GFRP 的剪切模量的变化范围约为 3~9GPa, 作为工程应用的筋通常为  $\Phi 2 \sim 20\text{mm}$ 。考虑光纤光栅的弹性模量为  $E_c = 70\text{GPa}$ , 半径为  $r_c = 6.25 \times 10^{-2}\text{mm}$ , 长度  $l_f = 10\text{mm}$ 。考虑式(5-76), 取 GFRP 的剪切模量变化范围为 1~10GPa, GFRP 的半径为 1mm, 2mm, 3mm, 5mm 和 10mm 等 5 种工况, 我们得到 GFRP 剪切模量与误差率关系的数值计算结果, 如图 5-17 所示。同样利用式(5-76), 取 GFRP 的半径变化范围为 1~10mm, GFRP 的剪切模量为 10GPa, 8GPa, 4.9GPa, 和 3GPa 等 4 种工况, 得到 GFRP 半径与误差率关系的数值计算结果, 如图 5-18 所示。从图 5-17 和 5-18 我们可以看出, 应变传感界面传递的误差率 ( $\eta$ ) 随 GFRP 剪切模量的增大而减小, 而随 GFRP 半

径的增大而增大。在通常的 GFRP 剪切模量变化范围 4~9GPa 和直径在 $\Phi 6\sim 12\text{mm}$  的范围内, GFRP-OFBG 的应变传感界面传递误差率小于 4%。由应变传感界面传递误差率的数值结果, 根据式(5-77), 我们可以方便得到给定剪切模量和外径的 GFRP-OFBG 应变传感的误差修正系数。

我们自行开发的 GFRP-OFBG 智能复合筋的剪切模量为 4.9GPa, 而外径分别为 $\Phi 4\text{mm}$ ,  $\Phi 6\text{mm}$ ,  $\Phi 10\text{mm}$ , 其误差率分别为 3.11%, 3.29%和 3.5%, 误差修正系数分别为 1.032, 1.034 和 1.036。

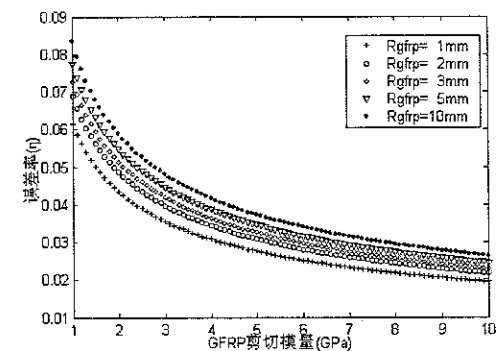


图 5-17 GFRP 剪切模量对误差率的影响

Figure 5-17 Affection of GFRP shear module on strain transfer error coefficient

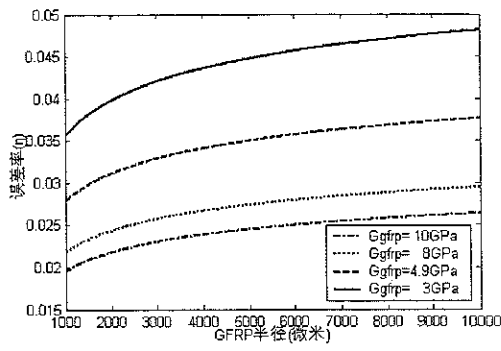


图 5-18 GFRP 半径对误差率的影响

Figure 5-18 Affection of GFRP semi-radius on strain transfer error coefficient

对于 CFRP-OFBG 而言, CFRP 的剪切模量的变化范围约为 12~26GPa, 作为工程应用的筋通常为 $\Phi 2\sim 20\text{mm}$ 。考虑式(5-76), 取 CFRP 的剪切模量变化范围为 10~30GPa, GFRP 的半径为 1mm, 2mm, 3mm, 5mm 和 10mm 等 5 种工况, 我们得到 GFRP 剪切模量与误差率关系的数值计算结果, 如图 5-19 所示。取 CFRP 的半径变化范围为 1~10mm, CFRP 的剪切模量为 30GPa, 20GPa, 415GPa 和 12.8GPa 等 4 种工况, 得到 CFRP 的半径与误差率关系的数值计算结果, 如图 5-20 所示。从图 5-19 和 5-20 我们可以看出, 应变传感界面传递的误差率 ( $\eta$ ) 随 CFRP 剪切模量的增大而减小, 而随 CFRP 半径的增大而增大。在通常的 CFRP 剪切模量变化范围 12~26GPa 和直径在 $\Phi 6\sim 12\text{mm}$  的范围内, CFRP-OFBG 的应变传感界面传递误差率小于 2.5%。由应变传感界面传递误差率的数值结果, 根据式(5-77), 我们可以方便得到给定剪切模量和外径的 CFRP-OFBG 应变传感的误差修正系数。

对于我们自行开发的 CFRP-OFBG 智能复合筋, 其剪切模量为 12.8GPa, 而

外径分别为 $\Phi 4\text{mm}$ 、 $\Phi 6\text{mm}$ 、 $\Phi 10\text{mm}$ ，其误差率分别为 1.92%、2.03%和 2.16%，误差修正系数分别为 1.02、1.021 和 1.022。

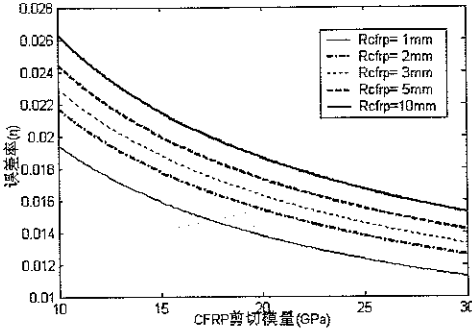


图 5-19 CFRP 剪切模量对误差率的影响

Figure 5-19 Affection of CFRP shear module on strain transfer error coefficient

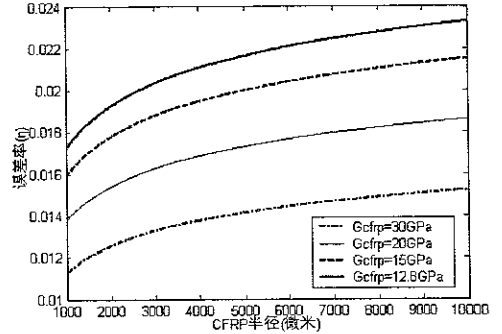


图 5-20 CFRP 半径对误差率的影响

Figure 5-20 Affection of CFRP semi-radius on strain transfer error coefficient

从 GFRP-OFBG 和 CFRP-OFBG 的应变传感界面传递误差来看，它们的误差都很小，均小于 4%，而 CFRP-OFBG 的误差更小，究其原因，是由于 CFRP 的剪切模量较大的缘故。工程应用时，4%在允许误差范围内，可以不予修正。

从结构形式上来看，裸光栅通过胶粘剂埋入结构内部的应变传感界面传递误差与修正方法与上述方法完全一样，只是将 FRP 层换成胶粘剂层即可。这里不再赘述。

### 5.5.2 光纤光栅管式封装埋入结构

由式 (5-70) 可知，管式封装光纤光栅埋入结构的特征值  $\lambda$  表达式为

$$\lambda^2 = \frac{2}{E_c r_c^2 \left[ \frac{1}{G_m} \ln \frac{r_h}{r_{ma}} + \frac{1}{G_a} \ln \frac{r_{ma}}{r_c} \right]}$$

从该式可以清楚看出，由于光纤光栅的弹性模量 ( $E_c$ ) 和光栅的半径 ( $r_c$ ) 为常数，所以，影响应变传感误差的变量为金属管剪切模量 ( $G_m$ )、金属管外径 ( $r_h$ )、管内径  $r_{ma}$  (即胶粘层厚度)。

由式 (5-76) 可以看出应变传递误差与特征值  $\lambda$  是减函数关系，因此误差与剪切模量是减函数关系。从特征值  $\lambda$  的分母可以看出，金属管对应变传递误差的影响 (第一项) 比胶粘层 (第二项) 的影响小得多。因此，我们在选定钢管作为封装材料时，主要研究胶粘层的剪切模量和厚度对应变传递误差影响。

我们选用的金属钢管剪切模量为 80GPa，外径为 1.2mm。取胶粘剂的剪切模量为 20~1000MPa，内管径（胶粘层）取 0.2mm，0.4mm，0.6mm 和 0.8mm 四种工况，利用式（5-76）得到胶粘剂剪切模量对应变传递误差率的影响数值结果，如图 5-21 所示。取管内半径为 0.0625mm~1.2mm，胶粘剂取 30MPa，50MPa，100MPa，300MPa 和 1000MPa 等五种工况，得到金属管内径对应变传递的误差率数值结果，如图 5-22 所示。

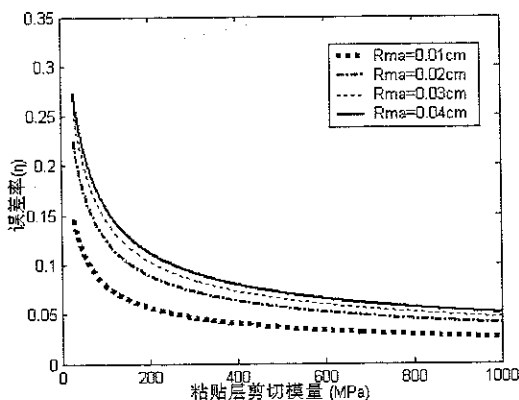


图 5-21 胶粘剂剪切模量对误差率的影响

Figure 5-21 Affection of adherer shear module on strain transfer error coefficient

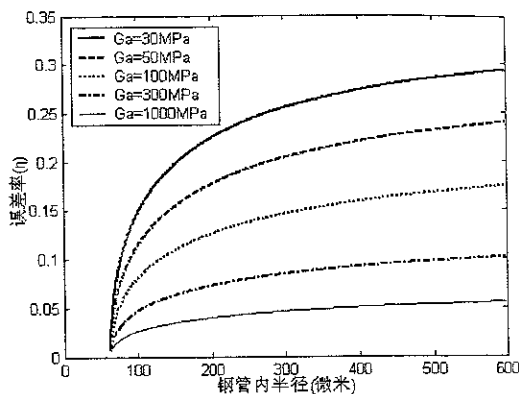


图 5-22 管半径对误差率的影响

Figure 5-22 Affection of tube semi-radius on strain transfer error coefficient

从图 5-21 和 5-22 可以看出，管式封装应变传感器的应变传递误差随胶粘剂剪切模量的增加而减小，随管内径的减小而减小。对于胶粘剂剪切强度在 30~200MPa 和管内半径在 200 微米以内，误差约为 5~10%，因此工程应用时必须考虑误差修正。

对于我们采用的管式封装应变传感器，胶粘剂的剪切模量为 39MPa，内径为 77.5 微米，其应变传递误差率为 9.92%，误差修正系数为 1.098。

### 5.5.3 光纤光栅片式封装粘贴结构表面

由式（5-71）可知，由光纤光栅片式封装粘贴结构表面的特征值为

$$\lambda^2 = \frac{8G_a}{E_c(3h_a - 2r_c)(h_a + 2r_c)}$$

从该式可以清楚看出，由于光纤光栅的弹性模量 ( $E_c$ ) 和光栅的半径 ( $r_c$ ) 为常数，所以，影响应变传感误差的变量为胶粘剂剪切模量 ( $G_a$ ) 和胶粘层厚度 ( $h_a$ )。

我们取胶粘剂的剪切模量范围 30~1000MPa，胶粘层厚度取 0.06mm，

0.08mm, 0.045mm, 0.05mm, 和 0.1mm 等五种工况, 利用式 (5-76) 得到胶粘剂剪切模量对应变传递误差率的影响数值结果, 如图 5-23 所示。胶粘层厚度取 4~100 微米, 剪切模量取 30MPa, 50MPa, 100MPa, 300MPa, 和 1000MPa 等五种工况, 得到胶粘层厚度对应变传递误差率的影响数值结果, 如图 5-24 所示。

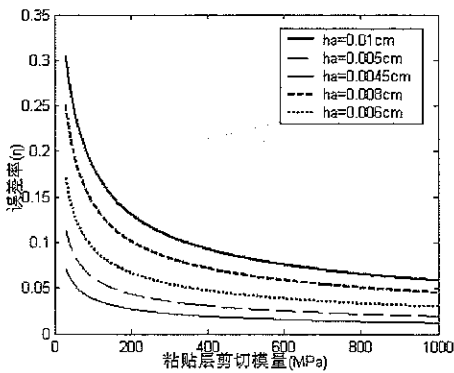


图 5-23 胶粘剂剪切模量对误差率的影响  
Figure 5-23 Affection of adherer shear module on strain transfer error coefficient

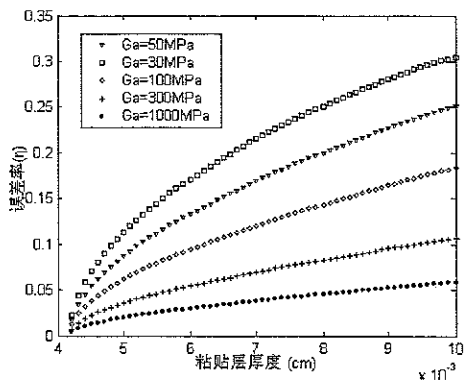


图 5-24 胶粘剂厚度对误差率的影响  
Figure 5-24 Affection of adherer thickness on strain transfer error coefficient

从图 5-23 和 5-24 可以看出, 片式封装应变传感器的应变传递误差随胶粘剂剪切模量的增加而减小, 随胶粘层厚度的减小而减小。对于胶粘剂剪切强度在 30~200MPa 范围和胶粘层厚度在 4~60 微米, 误差约为 5~10%, 因此工程应用时必须考虑误差修正。

对于我们采用的光纤光栅片式封装应变传感器, 胶粘剂的剪切模量为 38MPa, 胶粘层厚度取 50 微米, 其应变传递误差数值计算结果为 9.91%, 误差修正系数为 1.1。

#### 5.5.4 试验结果误差修正实例

为了说明上述分析的准确性, 同时说明光纤光栅应变传感器实际工程应用时误差修正的必要性, 我们对第 4 章 FRP 混凝土梁上同一位置布设毛细钢管管式封装光纤光栅传感器和有肋 GFRP-OFBG 传感器的试验结果, 即图 4-51 的结果进行分析。采用上述介绍的方法将试验结果进行修正, 其结果如图 5-25 所示。我们可以看出, 没有修正前, 它们差距很大, 而修正后吻合很好。这充分说明了 FBG 传感器实际工程应用时误差修正的必要性。

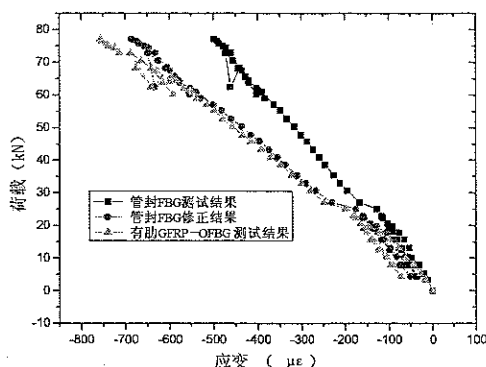


图 5-25 试验数据误差修正结果与原始数据对比

Figure 5-25 Comparison between the results  
from error modification and the original

## 5.6 本章小结

本章首先针对光纤传感的一般情况，即有保护层光纤通过胶粘剂埋入结构或粘贴于结构表面的应变传感问题进行分析，得到了应变传感界面传递公式；然后考虑多层应变传感的界面传递情况，给出通用公式；针对光纤光栅在结构中的实际应用情况，如裸光栅直接粘贴于结构表面或埋入结构内部、管式封装光纤光栅埋入或粘贴于结构、片式封装粘贴于结构表面、FRP-OFBG 传感器等逐一展开讨论，得到其应变传感的界面传递特性分析结果。最后针对自行研究开发的三种光纤光栅封装传感器进行了误差分析与修正，给出了比较的数值分析结果。研究表明：

- 1) 光纤光栅实际工程应用时，必须考虑应变传感的界面传递误差问题；
- 2) 光纤光栅应变传感的界面传递误差分析与修正结果是正确使用光纤光栅应变传感器的监测结果和研究开发适于结构工程的高质量光纤传感器的依据。
- 3) 自行研制开发的 CFRP-OFBG 智能复合筋的应变传感误差为 2% 左右，修正系数分别为 1.02 左右；自行研制开发的 GFRP-OFBG 智能复合筋的应变传感误差为 3% 左右，修正系数分别为 1.03 左右；自行研制开发的光纤光栅管式封装应变传感器和片式封装应变传感器的应变传感差约 10% 左右，修正系数为 1.1 左右。

## 第 6 章 水泥净浆的光纤光栅固化监测试验

### 6.1 引言

混凝土是现代结构工程的主要材料,尤其是在我国这样的发展中国家更显得格外重要。它能根据土建工程师的设计,在施工现场浇注、形成任何特定形状的建筑结构。但在混凝土浇注后的一段时期内,它存在一个由半流体的凝胶状态向高强度的固态转化的固化过程。在此过程中,水化作用产生大量的热量使结构的温度升高导致体积膨胀,同时由于材料中的水分挥发而收缩致密,因而混凝土的固化过程伴随着明显温度变化和材料膨胀、收缩变形。在其固化过程中,构件表面与内部水分挥发及温度散失存在明显差异,使得其内外部的固化速度亦存在显著差异,这必然导致其内外材料的收缩变形不一致,从而产生应力集中。当应力集中超过混凝土的抗拉强度时,将在结构内产生裂纹,严重时甚至会危及整个结构的安全。固化期的不均匀收缩应变是混凝土结构裂纹产生的主要原因。这种问题在大体积混凝土结构中特别突出,如重力坝、大型桥墩等。在混凝土结构进行改造或局部修复与补强时,由于新混凝土材料要收缩,而老混凝土材料要阻止其收缩,这也会产生类似问题。虽然目前已有一些收缩应变的理论计算模型<sup>[152~154]</sup>,但由于混凝土的收缩应变与其配比、浇注时的施工条件、固化养护环境、构件的形状大小等都密切相关,理论计算的精确性难以保证。在现行混凝土结构施工过程中,普遍采用温度监测来间接估算结构内部收缩应变的分布状况,但这种方法的可靠性同样难以保证。虽然已有成熟的传感器,如引伸计、振弦传感器、电阻应变片等,而刚浇注的混凝土具有高湿度、强碱性、大水化热、强腐蚀性和收缩量大等特点,此外,早期的固化过程(0~12 小时左右)混凝土尚处于凝胶体状态,传感器无法安装,而固化开始后,传感器又无法布设到混凝土的内部,这样使得这些传感器难以胜任混凝土的收缩应变监测。因此研究开发一种能够适应上述恶劣环境,并能同时监测混凝土固化过程的温度与应变的新型传感技术,对于揭示混凝土结构固化期内收缩应变的内在规律、改善其固化养护工艺、减少结构内部危险裂纹的产生、保证其最终施工质量乃至结构整个服役期的安全都是十分必要的。

目前,已有一些专家学者尝试开发混凝土固化监测的新型传感器。Glisic<sup>[155]</sup>

等人用迈克尔逊 (Michelson) 光纤干涉型传感器对混凝土的早期固化变形进行了监测, 但是没有考虑将温度和变形分开, 得到的混凝土变形量没有实际意义。朱永<sup>[156]</sup>等人用珐珀 (Fabry-Perrot) 干涉传感器对混凝土固化期的应变收缩监测进行了探索, 但是温度问题没有圆满解决。由于裸光纤光栅特别纤细 (约为  $125\mu\text{m}$ ), 不会改变结构的基本物理力学特性, 同时对石英光纤光栅而言, 其主要成分是  $\text{SiO}_2$ , 与水泥浆 (主要成分为硅酸盐) 有天然的相容性, 因此光纤光栅是水泥净浆固化监测的理想选择。Slowik<sup>[157]</sup>等人用光纤光栅对水泥浆的固化过程进行了研究尝试, 遗憾的是仅采用单点光栅, 还是没有将应变与温度同时监测, 并有效分离开来。

鉴于混凝土结构的重要成分—沙石对混凝土的固化过程基本不影响这一事实<sup>[158]</sup>, 即混凝土的固化过程取决于水泥自身的固化过程, 本章将发展基于光纤光栅的水泥净浆固化监测技术, 该技术同样可以适于与混凝土的固化过程监测。此外, 利用光纤光栅耐久性好的优点, 埋入混凝土的光纤光栅可以作为构件变形的监测元件, 这样就可以方便实现构件的长期健康监测。

## 6.2 水泥净浆中光纤光栅的布设工艺

裸光纤光栅的芯径约为  $125\mu\text{m}$ , 虽然纵向抗拉强度较高, 但是抗剪切的能力很弱, 因此它无法满足诸如浇注、振捣等施工过程, 而采用封装措施会由于应变传递的原因减小它的灵敏度。因此, 如何简单而有效地在水泥净浆中埋入光纤光栅是实现固化过程监测的首要问题。

目前针对光纤传感器在混凝土结构内部变形监测中应用埋设方法已有以下可行方法<sup>[159]</sup>:

1) 抽管法 光纤传感器套上大小合适、强度很高的金属导管, 将光纤与导管一起埋入混凝土结构的待测部位, 导管口伸出混凝土表面一定长度。混凝土经捣实以后, 在混凝土还没有固结前, 再将金属导管小心取出。

2) 套管法 光纤传感器的外面封装一条与混凝土膨胀系数较一致的金属管, 并保证光纤传感器对混凝土结构的变形敏感, 外部的荷载通过金属导管传递到光纤上。

3) 粘贴钢筋法 将光纤传感器直接粘贴于钢筋上, 在弹性阶段, 即在钢筋与混凝土协同变形的情况下, 钢筋的应力、应变也足以反映混凝土结构的内部状态。

4) 埋入小试件法 事先将光纤传感器直接埋入与基体材料物理特性一致的

小型预制构件中，然后把小型预制构件作为大型构件的一部分埋入待测点。如果小型试件足够小，即不影响结构局部性态的情况下，小型构件的变形反映了待测点的情况。

综合比较以上方法，考虑水泥浆的流动性较好，同时为了保证水泥浆与光纤光栅完好接触，避免相对滑移，这里采用第一种方法，即抽管法。抽管法可能出现的问题有三个：一是可能在振捣过程中造成金属导管变形，导致光纤光栅偏离预先设定的位置，甚至折断；二是金属导管抽出后，水泥浆在回填过程中出现离析现象，导致只有水流入孔内，无法保证光纤光栅与水泥浆的协同变形，即出现滑移现象；三是金属导管的内外表面必须很光滑，否则无法对传感器定位，甚至在抽管过程中将传感器带出构件。因此，要想避免以上问题，金属导管材料的选择与加工很重要，必须保证 1) 材料具有足够的刚度；2) 尺寸在满足光纤光栅穿过的条件下，尽量小；3) 在保证加工精度的条件下，涂上少量的润滑油。考虑以上问题，本文采用的金属导管为西北有色研究院研制的高强度毛细钛管，尺寸为 $\phi 2 \times 0.2$ ，即外径为 3mm，壁厚为 0.2mm；润滑油采用高质量机油。光纤光栅埋设工艺过程如图 6-1 所示。

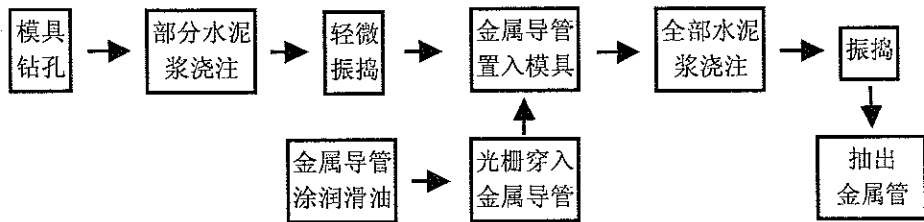


图 6-1 光纤光栅埋入水泥净浆的工艺工程

Figure 6-1 Technics of FBG embedded in cement paste

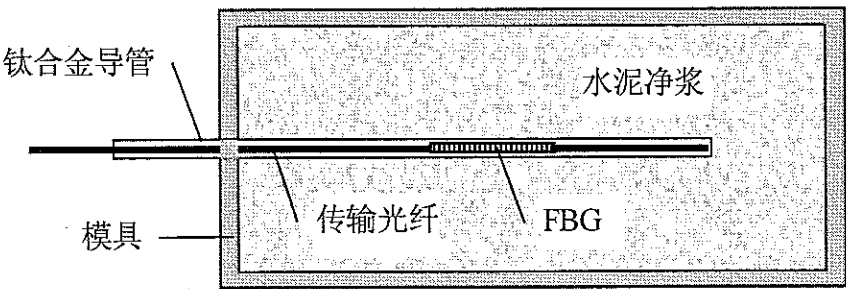


图 6-2 抽管法光纤光栅埋入水泥净浆示意图

Figure 6-2 Method of Tube-pulling for FBG embedded in cement paste

通过该工艺，我们可以方便地将光纤光栅在水泥净浆浇注过程中布设到预

期的监测部位。光纤光栅一埋入,马上就可以开始监测,可以实现固化早期(0~12 小时)的温度变化、温度造成的膨胀和收缩应变,成功地解决了传统传感元件难以布设的难题。采用本工艺埋入的光纤光栅没有出现任何问题,充分说明了该工艺的有效性,同样,该工艺也适于光纤光栅在混凝土结构的埋入过程。

光纤光栅能否监测到水泥净浆的内部应变取决于它与水泥浆的界面粘结情况。为此,我们对布置有光纤的水泥浆进行取样,通过 SEM 分析其界面粘结情况,结果如图 6-3 所示。从光纤与水泥浆的界面 SEM 图上没有发现诸如离析、夹杂、气孔等现象,说明其界面粘合很好,因此光纤光栅能够很好地感应水泥浆的内部应变。

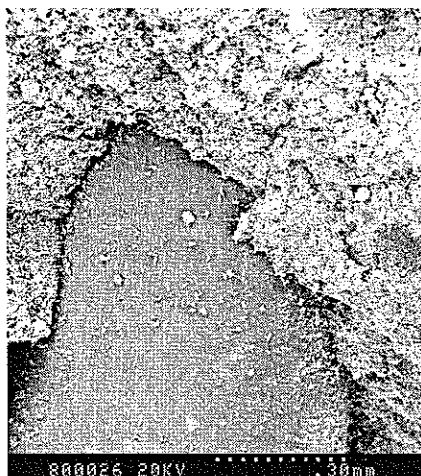


图 6-3 光纤光栅与水泥浆的界面 SEM 扫描照片

Figure 6-3 SEM of the interface for FBG and cement paste

### 6.3 水泥净浆固化监测的应变与温度同时监测方法

由于水泥净浆在固化过程中同时存在温度变化和变形两个过程(所有的固化过程都存在这种现象),采用性能单一的传感元件不可能真正揭示其内在规律的全貌,这就是采用传统手段没有完全把握水泥浆固化过程机理的原因。光纤光栅具有同时感应应变与温度的能力,利用这一特性,我们可以方便实现水泥净浆的固化全过程监测,同时获取固化过程的应变与温度信息。

由于光纤光栅对温度与应变变化同时敏感,我们无法用单一光栅同时分辨出应变与温度信息,鉴于此,本文采用准分布式双光栅法实现温度与应变双参量同时监测,具体的做法如下:将两光纤光栅尽可能紧密地串连在一起,将尾

部的光栅封装在毛细金属针管内，并使其处于悬臂状态，这样它只能感应温度信息，而与净浆完全胶合的光栅同时感应应变与温度信息。这里必须保证毛细针管的尺寸很小，并将两头完全密封。我们采用外径为 0.5mm 的不锈钢针管，并用防水性能很好的 J133 胶密封。然后采用上述的抽管法布设工艺将双光栅埋入水泥净浆试件的待测部位，埋入后如图 6-3 所示。

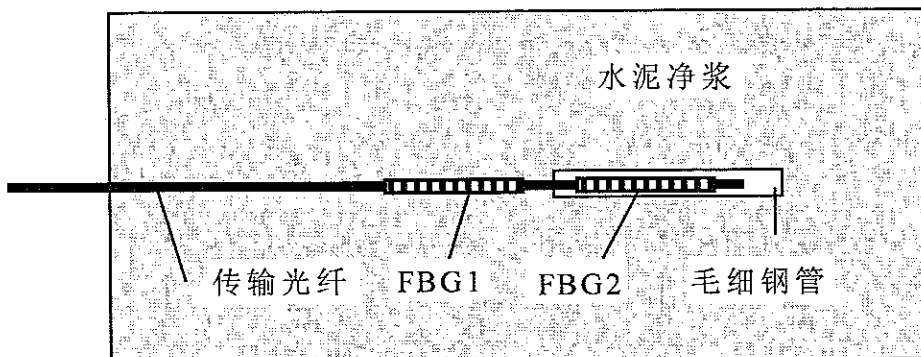


图 6-4 双光栅在水泥净浆试件中的示意图

Figure 6-4 Profile of dual FBGs embedded in cement paste

由于布设的光纤光栅很接近，它们可以视为处于同一温度场，因此它们的传感特性可以分别表示为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = K_{\epsilon 1}\epsilon + K_{T1}\Delta T \quad (6-1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = K_{T2}\Delta T \quad (6-2)$$

由第 2.3.5 节的分析与讨论可知，FBG1 和 FBG1 的温度传感特性系数分别为

$$K_{T1} = \alpha_{\text{水泥浆}} + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta \quad (6-3)$$

$$K_{T2} = \alpha_{\text{光栅}} + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta \quad (6-4)$$

由第二章分析可知，对于裸光纤光栅而言，热敏系数 $\alpha_{\text{光栅}}$ 仅占光栅整个温度效应 $K_{T2}$ 的 7%（很多文献指出为 5%），几乎可以忽略，而水泥浆的主要化学成分（ $\text{SiO}_2$ ）与石英光纤光栅基本一致，其热膨胀系数 $\alpha_{\text{水泥浆}}$ 与光栅的热敏系数比较接近，因此在采用一样的光纤光栅情况下，两个光栅的温度传感特性必

定比较一致。基于这种考虑,我们在这里可以认为  $K_{T1} = K_{T2}$ 。

联立式 (6-1) 和 (6-2), 令  $\gamma = K_{T1} / K_{T2} = 1$ , 我们可以得到

$$\varepsilon = (\Delta\lambda_{B1} / \lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} / \lambda_{B2}) / K_{\varepsilon 1} \quad (6-5)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2} K_{T2}} \quad (6-6)$$

上面两式为任意不同中心波长的光纤光栅应变与温度双参量同时监测的数学表达式。只要知道光栅的传感特性,由式 (6-5) 和 (6-6) 可以方便得到待测点的应变与温度变化。鉴于我们采用的光栅为同批,且中心波长在 1550nm 附近,由本文 2.3.4 灵敏度误差分析可知,光栅传感可以采用更简单的数学表达式:

$$\Delta\lambda_{B1} = \alpha_{\varepsilon 1} \varepsilon + \alpha_{T1} \Delta T \quad (6-7)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \alpha_{T2} \Delta T \quad (6-8)$$

联立式 (6-5) 和 (6-6) 式, 令  $\psi = \alpha_{T1} / \alpha_{T2} = 1$ , 得

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\alpha_{\varepsilon 1}} \quad (6-9)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\alpha_{T2}} \quad (6-10)$$

由式 (6-9) 和 (6-10) 我们可以方便得到固化监测的应变与温度变化值。

## 6.4 水泥净浆的固化监测试验

### 6.4.1 试验准备

本试验采用的水泥是黑龙江省哈尔滨水泥厂生产的 PO32.5R 型水泥。水泥的化学成分指标和基本性能分别见表 6-1 和表 6-2。水泥净浆试件浇注模具采用 100×100×400mm 可拆卸钢模。采用的光纤光栅为合作单位上海紫栅光电公司基于相位掩模技术生产的光纤布拉格光栅,其应变与温度传感特性分别为 1.2pm/ $\mu\varepsilon$  与 9.35pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。采用的光纤布拉格光栅解调器为美国 MOI (Micronoptics Inc.) 公司生产的 FBG-SLI 型解调器,其技术指标如表 6-3 所示。由于光栅解调器的分辨率为 1pm,根据标定的灵敏度系数可知,我们可以获得 1 $\mu\varepsilon$  的应变与 0.1 $^{\circ}\text{C}$  的温度分辨率。

表 6-1 PO32.5R 水泥化学成分

Table 6-1 Chemical composition of PO32.5R cement

| 化学成分 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> O | 烧失量  |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|------|
| 百分含量 | 21.08            | 5.47                           | 3.96                           | 62.28 | 1.73 | 2.63            | 0.50             | 1.61 |

表 6-2 PO32.5R 水泥基本性能指标

Table 6-2 Basic properties of PO32.5R cement

| 细度(0.080mm 筛余) | 凝结时间 (min) |     | 安定性<br>(沸煮法) | 3d 抗折强度<br>(MPa) | 3d 抗压强度<br>(MPa) |
|----------------|------------|-----|--------------|------------------|------------------|
|                | 初凝         | 终凝  |              | 4.4              | 24.3             |
| 4.0            | 125        | 189 | 合格           |                  |                  |

表 6-3 FBG-SLI 解调器基本技术指标

Table 6-3 Basic properties index for FBG-SLI system

| 技术特征 | 波长范围        | 波长分辨率 | 扫描频率  | 通道数 | 每通道串连光栅数 |
|------|-------------|-------|-------|-----|----------|
| 指标   | 1525~1570nm | 1pm   | 108Hz | 4   | 64       |

6. 4. 2 试验过程与结果分析

本试验采用的水泥净浆试件尺寸为 100×100×400mm,水灰比为  $w/c=0.28$ 。考虑试验结果对比与验证光纤光栅在水泥试件中的受压特性,我们共采用 4 根同批光栅制作了 3 个试件,其中双光栅一个,用于应变与温度双参量同时监测;单光栅两个,主要用于轴向受压试验。

为了保证光纤光栅准确又安全地埋入水泥净浆试件,整个布设过程严格按照前述的埋入工艺。整个布设过程分为以下步骤,1) 首先在模具的一侧挡板中部开一个直径为 3 mm 的孔;2) 模具内侧涂上润滑油后,用一张较大的塑料薄膜铺盖整个模具,并抚平;3) 将光栅置入涂有润滑油的高强度钛管中备用;4) 将按水灰比为 0.28 的水泥净浆搅拌好后,迅速浇筑到模具中,约为模具容量的一半时,利用振动台将其捣实、振平;5) 将装有光纤光栅的毛细钛管置于水泥浆表面,同时从预留的小孔中伸出抽出一段,约 3-4 cm;6) 浇注水泥浆的另一半,并将其振平。振捣过程中,用手按住钛管,不让它移动;7) 振捣成型之后,迅速将导管抽。抽管时注意用力均匀,避免将光纤拉断。这样就将光纤光栅方便地埋入到水泥净浆中了。为了防止水分过快挥发,用已经铺好的塑料薄膜将整个试件包裹起来,并送至温度恒定为 22℃ 的空调房进行养护,同时开始采集光纤光栅的波长信息。本试验的四个光栅全部成活,并稳定地工作,表明该布设工艺是非常有效的。

试件制作一完成,我们就将试件转移到空调房中进行养护,并同时开始对光纤光栅的波长数据进行采集,采样频率为 108Hz。经过 7 的养护,我们得到了

埋入双光栅的水泥净浆固化监测数据，采用前述的应变与温度同时监测技术，我们可以方便地获得水泥净浆固化过程的应变与温度时程。其以小时为单位等间隔抽取数据，7 天的温度和应变监测处理结果分别如图 6-5 和 6-6 所示。为了便于准确分析，我们将前 13 小时数据以分钟为单位抽取，分别得到图 6-7 和 6-8 的图示结果。

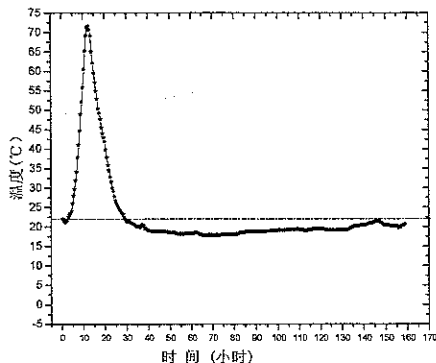


图 6-5 水泥浆固化内部温度变化(7 天)

Figure 6-5 Inner temperature-time relationship for curing cement paste(7days)

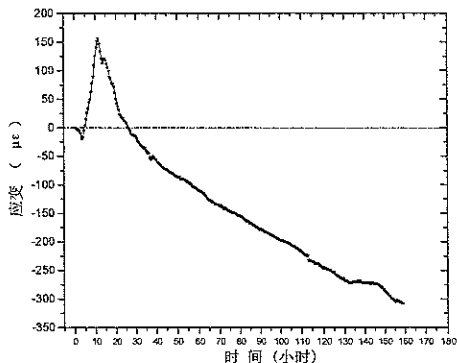


图 6-6 水泥净浆固化过程内部应变 (7 天)

Figure 6-6 Inner strain-time relationship for curing cement paste(7days)

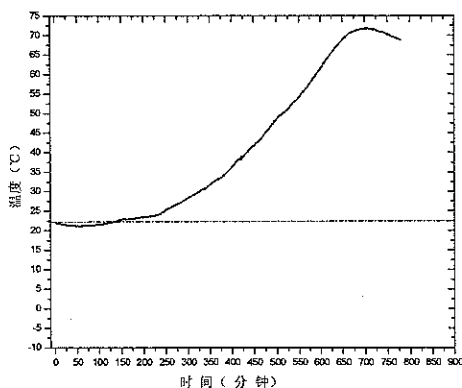


图 6-7 水泥浆固化内部温度变化(前 13 小时)

Figure 6-7 Inner temperature-time relationship for curing cement paste (first 13 hours)

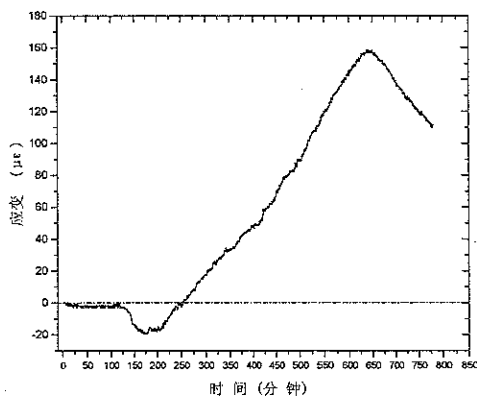


图 6-8 水泥净浆固化内部应变 (前 13 小时)

Figure 6-8 Inner strain-time relationship for curing cement paste (first 13 hours)

图 6-5 和 6-7 可以看出，初始阶段，试件的内部温度稍有降低，说明开始的水化反应是一个吸热反应，温度降低  $1.5^{\circ}\text{C}$  左右，随后温度升高，此时进入放热阶段，约 700 分钟左右温度达到最高值，温度变化约  $50^{\circ}\text{C}$ 。这表明此段时间是

水泥水化的一个高峰期。随后，试件内部的温度逐渐降低，表明水泥水化速度降低。30 小时后，试件内部的温度趋于稳定，表明水泥净浆的水化反应过程基本趋于稳定。

图 6-6 和 6-8 可以看出，初始时可能由于水泥浆处于液胶状态，光栅不能很好地感应变，即它们不能协同工作，所以基本保持不变。随后由于浆体的温度降低，内部出现一定的收缩应变，约  $18\mu\epsilon$  左右。随着温度的升高，水泥浆出现一定的热膨胀，因此出现拉应变，达  $150\mu\epsilon$  左右。随后，由于水化过程结束，温度降低，拉应变向收缩应变变化，在 168 小时左右，收缩应变达到  $310\mu\epsilon$ ，并具有继续收缩的明显趋势。在前 30 小时，应变的变化趋势与温度变化大致相同，这主要是因为，此时的试件受温度的影响比较大，试件内部温度的上升使得试件自身产生热膨胀，对光纤光栅产生拉应力。而从 30 小时起，试件内部的温度已基本无变化，这时的应变主要就是由水泥净浆试件自身的收缩应变引起的。

为了说明 FBG 应变长期监测温度补偿的必要性，我们给出没有温度补偿的水泥净浆内部的应变监测结果，如图 6-9 所示。从图中可以看出，如果没有温度补偿，其监测的最大拉伸应变达  $540\mu\epsilon$ ，这是不可能的，因为水泥砂浆的抗拉应变为  $200\sim 300\mu\epsilon$  左右。因此，我们利用光栅进行长期应变监测时，必须考虑温度补偿措施。

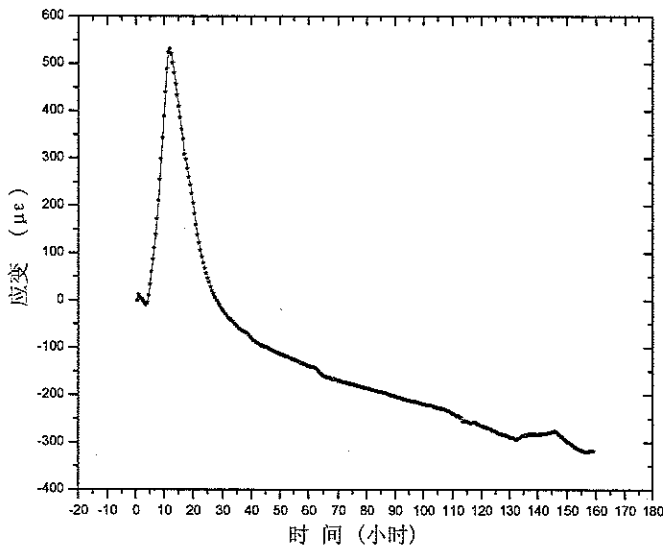


图 6-9 不考虑温度补偿的水泥浆应变监测值

Figure 6-9 Cement paste inner strain monitored by FBG without temperature compensation

特定配比的混凝土服役力学性能取决于早期的固化过程,尤其是早期的净浆凝固收缩过程。如果不能很好地把握混凝土净浆的固化规律,我们难以确定合理的浇注工艺与采取合理的改进措施,保证混凝土的浇注质量,尤其是大体积混凝土结构常因固化过程中内外温度的差异产生裂缝。上述试验表明利用光纤光栅可以方便地同时监测水泥净浆的内部应变与温度特性,这些数据是揭示混凝土净浆固化机理的可靠依据。同样该技术适于一般材料的固化监测过程,如混凝土结构、树脂、复合材料等。

## 6.5 埋入光栅固化后的水泥净浆试件受压变形试验

为了验证埋入水泥净浆的光纤光栅能否很好地感应外部荷载下的变形,利用水泥净浆固化监测试验制作的2个试件在材料试验机下作受压试验,如图6-10所示。为了对比,在其中1个试件上贴有电阻应变片。试验结果如图6-11和6-12

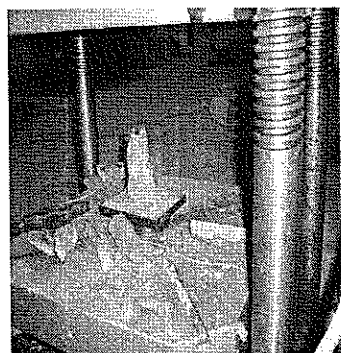
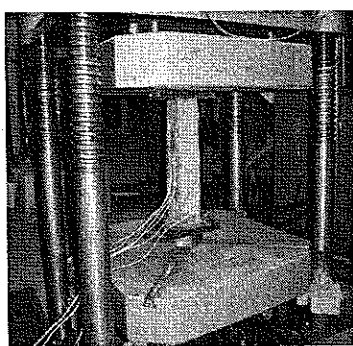


图 6-10 试件压缩与破坏形式照片

Figure 6-10 Picture of specimen under pressure and breakage

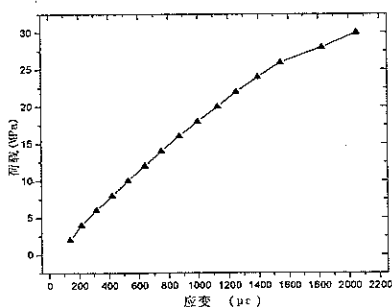


图 6-11 试件 1 试验结果

Figure 6-11 Experimental result from 1#

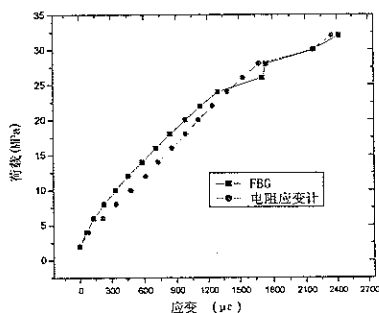


图 6-12 试件 2 试验结果

Figure 6-12 Experimental result from 2#

从图 6-11 可以看出, 埋入水泥净浆的光纤光栅能够很好地感应试件的受压变形, 并监测到了  $2050\mu\epsilon$  的变形量。图 6-12 可以看出, 埋入水泥净浆内部的光纤光栅与水泥净浆表面的电阻应变计变化趋势完全一样, 它们的差异可能来自试件的偏心或试件内部与表面的变形差异, 其中的光栅监测到了  $2430\mu\epsilon$ 。

该试验表明光纤光栅是监测水泥内部变形的可靠手段, 这是传统电阻应变计不可比拟的。

## 6.6 本章小结

本章在充分认识混凝土固化监测的必要性与目前国内外尚缺乏固化监测可靠手段的基础上, 研究了光纤光栅在水泥净浆中的埋设工艺, 提出并实现了水泥净浆早期固化过程的应变与温度双参量同时监测技术。为了验证这些工艺与技术, 进行了基于光纤光栅的水泥砂浆固化监测试验, 并对埋入光纤光栅的水泥净浆试件进行了压力试验。通过这些研究表明:

- 1) 抽管法是实现光纤光栅在水泥净浆和混凝土结构中埋入的可靠方法;
- 2) 不受力光栅温度补偿法是实现应变与温度同时监测的简单可靠方法;
- 3) 基于光纤光栅的水泥净浆固化监测可以方便地获得早期固化的全部变形与温度数据, 是一种简单可靠的监测技术。
- 4) 埋入水泥净浆的光纤光栅可以方便地作为试件(构件)受力变形的监测传感元件。

## 第7章 FBG 智能监测系统及其在桥梁结构中的应用

### 7.1 引言

光纤光栅传感器目前已经基本成熟,但是,将其成功地用于结构健康监测还必须解决两个问题:一是光纤光栅传感器在具体结构中的布设工艺;二是光纤光栅监测系统的构建。对于第一个问题,我们可以采用对比试验、并参考其他类似传感器成熟的布设工艺,针对不同的结构对象分别实现其特有的布设工艺,而光纤光栅智能监测系统的构建是制约光纤光栅能否实现工程化应用的关键。通常而言,光纤光栅智能监测系统必须由光纤光栅传感器、光纤光栅信号解调仪、光开关或光合波器、光纤跳线、光纤适配器、传输光缆、系统软件等部分组成,其中光纤光栅信号解调仪、光开关(合波器)与系统软件是核心部分。虽然光谱仪(OSA)可以视为一种解调器,可以方便用于光纤光栅传感器的性能研究,但它不能作为光纤光栅监测系统的解调仪,因为它无论在通道数还是信号处理上都不满足需要。目前商业化的光纤光栅信号解调仪主要有美国 MOI 公司基于扫描 F-P 干涉滤波器开发的 FBG-IS、FBG-SLI 和 HR-SLI 三种型号的解调仪,以及美国 Blue Road 公司基于时(空)域零差干涉滤波器开发的光纤光栅解调器。针对土木工程结构的长期健康监测而言,目前的解调器在通道数和采样频率上离工程应用还有一定的差距。综合比较解调器的性能以及成本指标,我们认为 MOI 公司的 FBG-SLI 是比较合适的解调器。光开关目前虽然已经比较成熟,但是也存在通道数量少和使用寿命短等问题。对解调器而言,系统软件是很好的,但是考虑信号的预处理以及与结构健康监测整体系统的信号采集、传输等实际问题,系统软件尚不完全满足需要,必须进行二次开发,加入用户需要的功能模块。针对这些实际问题,开发多通道、长寿命的光开关以及基于光纤光栅解调仪和光开关的监测软件和接口是目前完成光纤光栅智能监测系统的核心工作。

就目前的结构健康监测系统的成本而言,结构健康监测普及一般结构尚有较大距离,只能在一些重要结构和基础设施上有针对性地应用,如大型桥梁结构、海洋平台结构、大型水坝、核电站、生命线工程等重要的关系国计民生的结构或基础设施。

随着桥梁服役时间的增长,由于气候、环境等自然因素的作用和日益增长的交通量及重车、超重车过桥数量的不断增加,桥梁结构的抗力不断衰减与退化。随着我国经济迅速发展,对于交通运输能力的要求也在不断提高,但不少桥梁的老化和功能退化已呈现加速的趋势。为了确保大型桥梁结构的使用安全性和耐久性,减少和避免国家和人民生命财产的重大损失,进行大型桥梁结构工作状态和结构特性参数的监测和评估工作已迫在眉睫。因此,在桥梁结构上设置运营健康监测系统,全天候地监测桥梁结构的工作性态变化的程度,把握结构损伤累积和安全度下降的状况,对于大型桥梁这样的重大工程结构的检测、维修与控制的科学决策,保证结构安全运行具有重要的实际意义。

随着各种新型桥梁结构的出现和先进施工技术的采用,桥梁结构的施工过程本身就是一个变结构体系,具有明显的时变力学特征,其不确定性问题显得非常突出。此外,桥梁结构的冗余自由度相对较少,施工过程一旦失控,后果难以想象。国内发生了多起桥梁施工过程的倒塌事故,如 1998 年 9 月 24 日,宁波大桥在即将合拢之际发生桥体断裂,损失达到 4 亿元。因此,采用新的监测技术对桥梁施工过程监控具有重要的实际意义。

随着桥梁检测手段和监测技术的不断发展以及人们对于桥梁安全性和耐久性重视程度的提高,许多大型桥梁上已配备安装了各种各样的检测工具和监测设备。如:美国威期康辛州一座已有 65 年历史的提升式桥 Michigan Street Bridge 桥上,安装了世界上第一套全桥远程监测系统,以监测已达到设计寿命的该桥梁裂缝扩展情况和桥梁其他状态的变化。英国在 80 年代后期,对北爱尔兰的 Foyle 桥,安装了监测仪器和设备,试图探索一套有效的、可广泛应用于类似结构的监测系统。该系统的主要监测项目有:桥梁主跨挠度、气象数据、温度、应变等。美国佛罗里达的 Sunshine Skyway 桥上安装的检测设备,用来测量在桥梁建设过程中和建成后桥梁的温度、应变及位移。香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥上安装了目前世界上规模最大的安全监测系统。然而,遗憾的是这些健康监测系统的局部监测部分,如应变、裂纹等直接表现桥梁结构性态的物理量的监测手段还没有很好解决。

针对土木工程结构局部监测的多传感器需要,本章对光纤光栅智能监测系统构建,并开发  $1 \times 24$  光开关。利用美国 MOI 公司的 FBG-SLI 系统开发适于结构监测需要的光纤光栅智能监测软件。为了验证光纤光栅传感器在结构健康监测中的有效性,研究光纤光栅现场布设工艺,将光纤光栅传感器在施工过程中分别布设到黑龙江呼兰河大桥和黑大公路牛头山大桥上,监测黑龙江呼兰河大桥预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程、箱形梁静载试验的钢筋应变增

量与分布, 以及黑大公路大桥的箱形梁施工监测。利用布设的光纤光栅应变和温度传感器对呼兰河大桥进行运营监测, 监测车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程。最后, 针对“黑龙江松花江大桥结构健康监测系统”的局部监测系统, 提出能够进行多点同时监测的“光纤光栅智能局部监测系统”方案, 并进行功能设计。

## 7.2 光纤光栅智能监测系统研究与开发

考虑研究与开发光纤光栅智能传感器以及实现光纤光栅传感器在实际结构工程中应用的需要, 通过对目前国际上的光纤光栅解调仪进行了认真调研和性价比的对比, 我们从美国 MICRON OPTICS INC. 公司引进了先进的光纤光栅解调仪 FBG-SLI 系统。该仪器基于 F-P (Fabry-Perrot) 干涉原理对布拉格反射谱中心波长进行解调, 具有很高的波长分辨率, 其主要技术指标为: 波长范围为 1525—1565nm; 波长分辨率为 1pm; 扫描频率为 108Hz; 最多光栅数为四通道 256 个等。基于该解调仪, 考虑结构健康监测系统的多通道需要, 构建了适于结构健康监测的光纤光栅智能监测系统, 并完成了可控光开关和光纤光栅监测软件的开发, 实现了光纤光栅智能监测系统所需要的基本功能。该系统将用于胜利油田的一座海洋平台、滨州黄河公路大桥、黑龙江松花江公路大桥和湖南茅草街公路大桥等重大结构的健康监测中。

### 7.2.1 光纤光栅智能监测系统构建

我们构建的光纤光栅智能监测系统结构和实物图分别如图 7-1 和 7-2 所示。

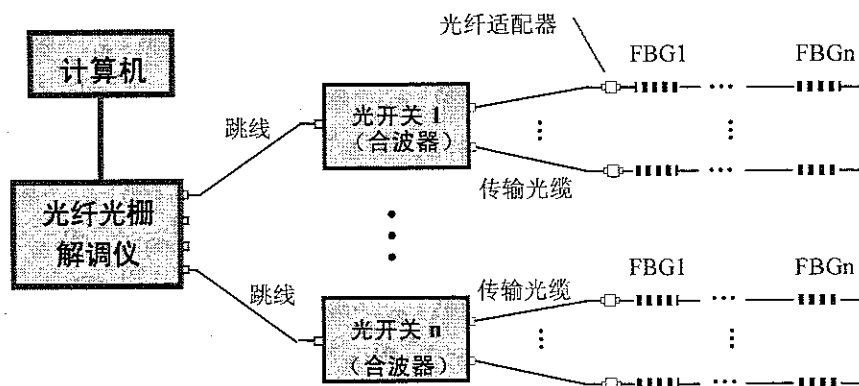


图 7-1 光纤光栅智能监测系统结构图

Figure 7-1 Structure of intelligent monitoring system based on FBG

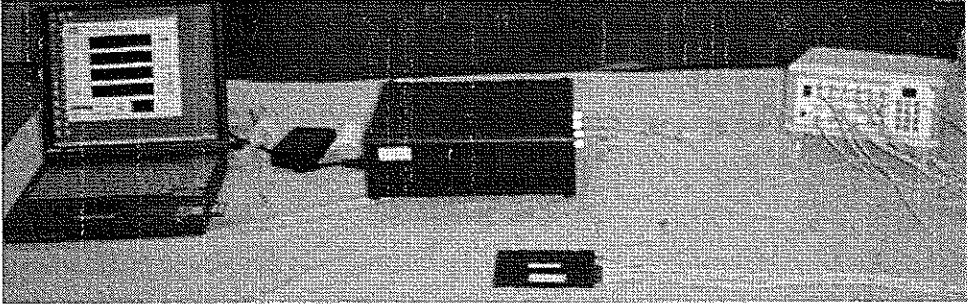


图 7-2 光纤光栅智能监测系统实物照片

Figure 7-2 Picture of smart monitoring system based on FBG

该系统由光纤光栅传感器、光纤光栅信号解调仪、光开关或光合波器、光纤跳线、光纤适配器、传输光缆、系统软件等部分组成，其中光纤光栅信号解调仪、光开关（合波器）与系统软件是核心部分。下面分别介绍各组成部分的功能。

光纤光栅传感器是系统的传感部分，其主要作用是将外界力或变形以及温度作用调制为光栅的波长变化信息。

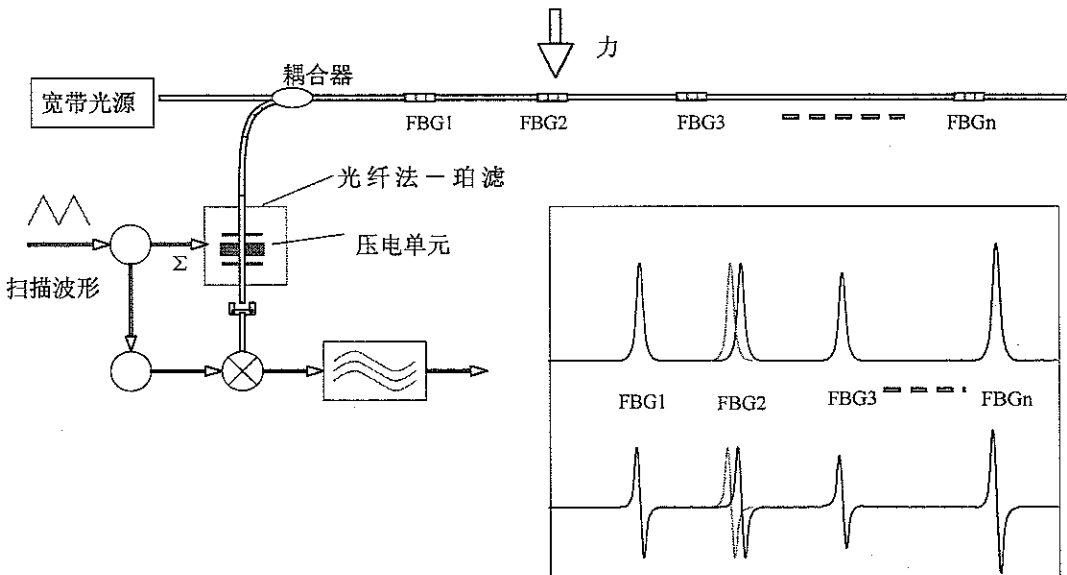


图 7-3 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调仪原理图

Figure 7-3 Principle of FBG interrogator based on F-P filter

光纤光栅解调仪的主要功能是将光纤光栅的中心波长解调出来。光纤光栅解调器的机理有多种，这里介绍我们采用的基于 F-P（光纤法一珀腔）滤波器的

解调原理,如图 7-3 所示,其他的基本类似。光纤光栅将宽带光源传输过来的满足布拉格条件的光波反射回来,通过耦合器进入可调谐带通滤波器——压电驱动器控制的光纤法—珀腔。通过调节压电驱动单元,光栅反射回来的光波与扫描光波发生干涉,这样相当于将光栅反射波进行了放大。干涉光经过光电转换装置调制成电信号,通过微电子测试装置得到干涉光的强度,然后与经过标定的光波信号对比,就可获得布拉格反射光的精确波长信息。而外界的影响,如力或温度,会改变光栅中心波长,通过光栅中心波长的变化就可以获得外界的影响信息。

光开关或光合波器的主要功能是将多路光信号分别或一起进入光纤光栅解调器,可以弥补解调器通道数满足不了工程应用的缺点。

光纤跳线的主要作用是连接光开关(合波器)与解调器,保证光信号以很低的损耗进入解调器。当然,它也可以直接用于光纤光栅传感器与解调器的连接。

光纤适配器的主要作用是以很低损耗的方式连接光缆,避免工程现场的光纤熔接。当然,用光纤熔接法连接光纤损耗会更低。

传输光缆的主要作用是以低损耗方式远距离传输光信号。

系统软件包括光纤光栅信号解调仪的相关软件、光开关控制软件、与结构健康监测大系统的接口软件、数据库软件以及信号处理的所有相关软件等部分,其核心软件为光纤光栅信号解调的相关软件与监测系统的接口软件。

### 7.2.2 可控光开关的研究与开发

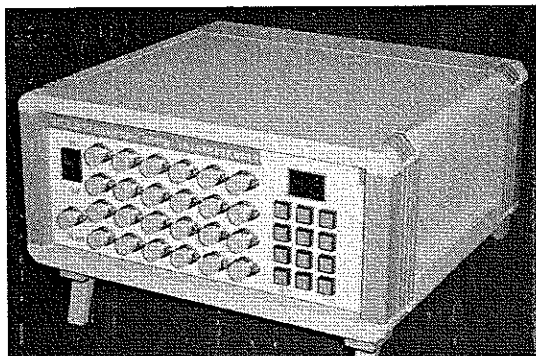
光开关是一种切换光路的功能器件。光开关在光通信领域应用很广,主要应用于光传输系统中的多路光监控、局域网、多光源/探测器换接和光测试系统的光纤、光器件、网络和野外工程光缆测试等。

目前通信市场上提供的光开关通常为  $1 \times 2$  或  $1 \times 4$ ,无法满足结构健康监测的多通道要求。鉴于构建光纤光栅监测系统的需要,我们与桂林光隆光电科技有限公司联合开发了可编程控制的  $1 \times 24$  光开关,其技术指标和结构照片分别如表 7-1 和图 7-4 所示。

表 7-1 可控  $1 \times 24$  光开关技术指标

Table 7-1 Specifications of  $1 \times 24$  programmable optical switch

|       |               |      |                              |
|-------|---------------|------|------------------------------|
| 波 长   | 1550 nm       | 转换时间 | 相邻通道约 12ms                   |
| 插入损耗  | $\leq 1.0$ dB | 工作温度 | $0 \sim +50^{\circ}\text{C}$ |
| 重 复 性 | $\leq 1.0$ dB | 相对湿度 | $0 \sim 95\%$ 不结露            |

图 7-4 可编程控制的  $1 \times 24$  关开关照片Figure 7-4 Picture of  $1 \times 24$  programmable optical switch

该仪器可以通过前面板上的按键进行手动控制，也可以通过后面板的 RS-232 接口由计算机来控制开关的选通和循环扫描。

### 7.2.3 光纤光栅监测系统软件开发

光纤光栅智能监测系统的核心软件为光纤光栅信号解调仪的相关软件，主要为经过光电转换后的数字信号处理软件。当然光纤光栅解调仪的控制软件与结构整体监测系统的接口软件也是核心软件之一，但是不同的监测系统对接口软件的要求各不一样，因此本文的工作集中在数据采集卡传送过来的数字信号处理上。

我们购买的 FBG—SLI 光纤光栅解调器的控制软件是基于美国 NI (National Instruments) 公司的 LabVIEW 平台开发的，已经具有光纤光栅波长动态显示、通道动态以及数据存储等基本功能。但是它给出的只是光栅解调的原始信息，所有的测试结果来自监测数据的二次处理，我们无法根据显示内容、甚至存储结果判断监测所测量的大小，即使我们对光纤光栅传感器的性能很清楚，这样导致用户使用起来非常不方便，尤其对于那些没用使用经验的用户。为此，我们购买了 NI 公司的 LabVIEW 正版软件，保留了解调器控制软件已有的基本功能，对光纤光栅解调仪数据采集卡传送过来的数字信号进行处理，添加了传感器监测结果功能模块，实现了从原始光纤光栅的波长信息到直接监测结果的转变，可以方便地用于结构测试或实际工程健康监测。

开发出的光纤光栅智能监测软件如图 7-5 所示。软件开发的基本思路为：首先充分利用 LabVIEW 自身的丰富函数库，编制信号采集与处理 subVI，然后利用正版的 LabVIEW 开发平台将 FBG—SLI 光纤光栅解调器的控制软件源代码打开，找到数据流中的原始波长信息模块，将其嵌入自行开发的数据处理模块，

并将其相应的数据显示、存贮模块作相应的格式改变,最后将调通的软件打包即可。

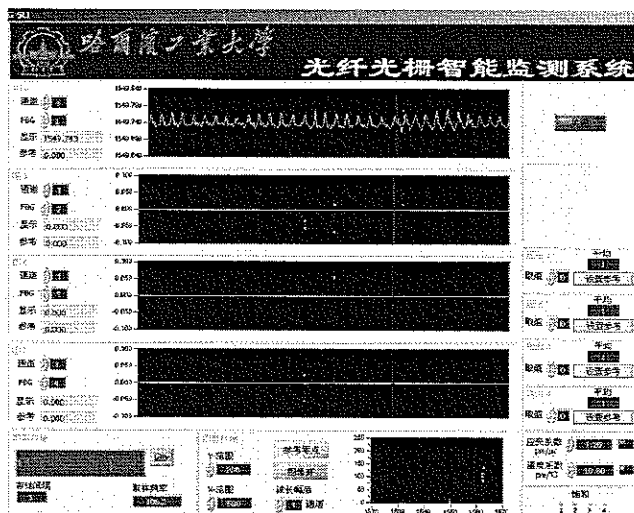


图 7-5 光纤光栅智能监测软件

Figure 7-5 Software of FBG intelligent monitoring system

我们开发的光纤光栅智能监测软件具有以下特点:

- 1) 动态设置坐标范围和设置存储监测数据, 并支持多通道并行采集;
- 2) 适应多种操作平台 Windows98、Windows95、WindowsNT、Windows2000;
- 3) 根据需要任意设定传感器的类型, 只需输入传感器标定灵敏度即可得到该传感器的测试结果;
- 4) 程序稳定好;
- 5) 操作极其方便简单, 只需设置监测的卡号和通道, 然后设置监测传感器的灵敏度, 运行软件即可。

### 7.3 呼兰河大桥的光纤光栅智能监测

呼兰河大桥位于黑龙江省呼兰县的呼兰河上, 它是连接哈尔滨与肇兴的交通枢纽, 于 2002 年建成并投入使用。它全长 420 米, 最大的跨度为 42 米, 是目前国内较大的预应力钢筋混凝土箱形梁桥。箱形梁采用后张预应力结构形式, 预应力材料采用  $\Phi 15.24\text{mm}$  钢绞线, 箱梁每侧肋板布置 5 束。由于呼兰河长期泥沙淤积、软土覆盖层很厚以及施工条件恶劣等原因, 呼兰河大桥的下部均采用钻孔灌注桩基础、柱式桥墩与肋式桥台。鉴于该桥施工复杂、工期短、跨度

较大、交通流量较大和冬夏温差很大等原因，对其进行健康监测具有重要的实际意义。

在黑龙江省交通厅的支持下，我们于 2001 年 5 月至 10 月将 15 个光纤光栅传感器在大桥施工过程中布设到第二跨预应力箱形梁上，目的是在施工阶段监测箱形梁的受力与安全状况，在大桥服役阶段监测通车流量和桥梁的疲劳损伤状态。布设的光纤光栅传感器监测了预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程，以及箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布。大桥建成后，利用埋入的光纤光栅传感器监测了大桥在车辆荷载下的动态变形和温度变化，得到了一些有益的经验与令人鼓舞的测试结果。

### 7.3.1 光纤光栅传感器布设工艺

考虑监测结果的代表性，我们选定呼兰河大桥的 42 米大跨，即第二跨的第 2 根与第 5 根箱形梁底部正中的钢筋肋槽里分别布设了 5 根光纤光栅应变传感器，布设位置如图 7-6 和图 7-7 所示。在铺设桥面板时，我们在同跨梁上的面板钢筋上布设了 7 根光纤光栅应变传感器和 3 个无增敏封装的温度传感器，如图 7-8。其中，光纤光栅应变传感器布设工艺是一样的，而温度传感器直接置于应变传感器的相同位置。

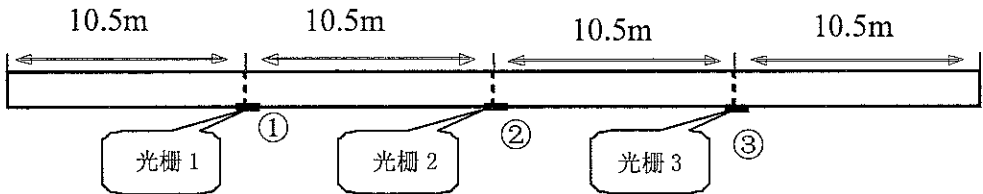


图 7-6 光纤光栅沿箱形梁纵向布设

Figure 7-6 FBG laid along the longitudinal direction of box girder

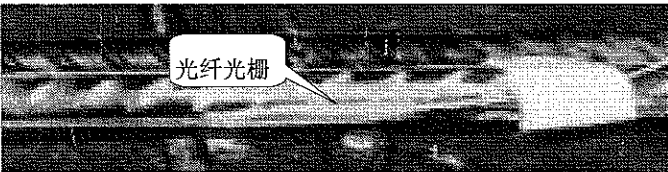


图 7-7 光纤光栅粘贴钢筋照片

Figure 7-7 Picture of FBG bonded on rebar



图 7-8 光纤光栅传感器在桥面板上的布设照片

Figure 7-8 Picture of FBG sensors installed in the panel of bridge

光纤光栅的外径约为 125 微米，主要成分是  $\text{SiO}_2$ ，因此特别脆弱，尤其是抗剪能力很差。为了避免光纤光栅在箱形梁的浇筑、振捣与压模等施工过程的冲击，防止光纤光栅信号传输线在吊装、铺设桥面板和人行护栏等施工过程的破坏，我们研究了光纤光栅的布设工艺措施，具体过程如下：

(1) 打磨 为了保证光纤光栅与钢筋的充分接触，避免应变传递导致的测试误差，我们首先用打磨机对待测钢筋进行抛光，然后用砂纸打磨，使钢筋肋槽的表面平整光滑。

(2) 清洗 为了防止打磨的屑末、油污等污染物质的影响，用脱脂棉球沾丙酮将打磨处擦洗干净。

(3) 粘贴 利用变形钢筋本身的肋槽，将光纤光栅沿着钢筋的纵向布置。考虑目前市场提供的胶粘剂性能，以及粘贴电阻应变片的经验，通过对比丙烯酸脂系列 502 胶与 J39 胶对光纤光栅的粘接能力试验结果，J39 较脆，因此我们直接采用单组分的 502 胶粘贴光纤光栅与钢筋。为了对比，我们在每个光纤光栅的相应位置布设 2 片高精度电阻应变片。

(4) 光栅保护 钢筋混凝土箱形梁的施工过程属于典型的粗放式作业，如何很好地保护光纤光栅与应变片以免浇注、振捣和压模等过程导致的冲击损坏是光纤光栅成功应用于钢筋混凝土结构的关键。

(5) 光纤与接头保护 为了避免传输光纤直接受到混凝土浇注、振捣与内模的冲击，我们将其置于一根直径为 16mm 的铝芯塑料套管内，再将塑料套管固定在箱形梁肋板的构造钢筋上，传输光纤直接伸到箱形梁的顶部，待上部混凝土浇注后，用一木箱保护。这样成功地解决了传输光纤的保护问题。

考虑传感器的缓冲与防潮问题，我们采用了图 7-9 的保护工艺，图 7-10 为

光纤光栅保护后的照片。

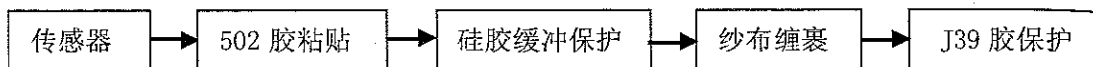


图 7-9 光纤光栅保护工艺  
Figure 7-9 Technique of FBG protection



图 7-10 传感器保护照片  
Figure 7-10 Picture of sensors protection

桥面板上光纤光栅传感器的布设工艺基本与上述方法一致，但是一个重要的问题是如何防止施工车辆对传输光纤的压迫，我们采用预先铺设混凝土对光纤进行保护的方法方便地解决这个难题。

采用上述的布设工艺，箱形梁施工过程结束后，及时检查光纤光栅与应变片的存活情况，布设在两根箱形梁上和桥面板上的光纤光栅传感器全部成活，由此说明该工艺过程很适于光纤光栅的保护；而布设箱形梁上的应变片只有 3 个存活，其余应变片的初始电阻漂移很大，表明它们已经受潮或损坏。

### 7.3.2 预应力箱形梁光纤光栅施工监测

(1) 箱形梁预应力张拉过程监测 预应力箱形梁张拉过程可能出现预应力松弛、张拉力过大、反拱等现象，张拉性能是影响箱形梁质量的重要因素。鉴于此，我们对箱形梁的张拉过程进行了监测。布设光纤光栅与电阻应变片的钢筋混凝土箱形梁经过 10 天养护后，开始张拉。我们对布设的传感器进行了检查，遗憾的是因为现场工程师指挥不当，误毁了一箱形梁上的已经存活的两根光纤光栅。电阻应变片只剩下一个读数稳定，充分说明电阻应变片的耐久性与稳定性根本无法满足工程实际的需要。

我们用保留下来的 3 根光纤光栅与电阻应变片对箱形梁的预应力张拉过程进行了监测。在应力—应变双控下用油泵千斤顶在大梁两端同时进行张拉。张拉过程为从下到上，左右交叉进行。我们记录每次加载后的电阻应变和光纤光栅的应变值，得到图 7-11 和 7-12 的监测数据。由于张拉过程时间短，温度变化小，我们没有考虑温度变化的影响。当然，以后的实时监测必须考虑温度的补偿问题。

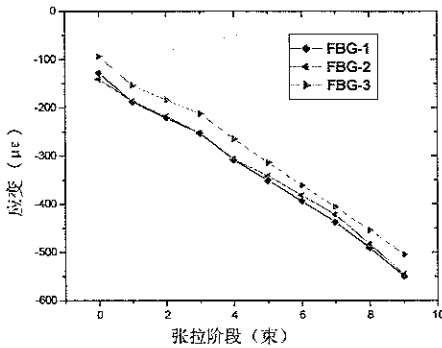


图 7-11 三个光纤光栅的监测结果

Figure 7-11 Measurement results of 3 FBGs

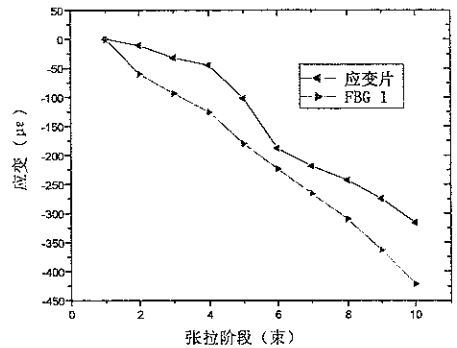


图 7-12 同一位置光栅与应变片监测比较

Figure 9 Comparison of electric stain gauge and FBG at the same position

从测试结果可以看出，光纤光栅的监测数据稳定可靠，都很好地反映了箱形梁预应力的张拉过程，没有发现异常，符合实际情况。从同一测点光纤光栅与电阻应变片的测试数据比较图来看，电阻应变片具有明显的漂移不稳现象，从而说明光纤光栅在实际工程的长期监测中有着电阻应变片无法比拟的优势。

**(2) 预应力箱形梁静载监测试验** 箱形梁经过一个月养护后，箱形梁上的三个光纤光栅仍然完好，而其上的唯一一个电阻应变片已经不稳定。为了探讨光纤光栅在桥梁竣工后的监测能力，我们充分利用施工现场条件，用龙门吊车将已经预制完成的长为 19.96 米、重达 62 吨的短跨箱形梁吊至已布设光纤光栅的大跨箱形梁上，进行静载试验。加载从 FBG 1 的一端开始，加载示意图与实测结果如图 7-13 与表 7-2 所示。

由于光纤光栅的分辨率可达  $1\text{pm}$ ，也就是说可以识别  $1\mu\epsilon$  以上的应变值，因此从静载试验的结果可以看出，1 吨的重量可以使箱形梁产生  $1\mu\epsilon$  以上的应变值。因此，桥梁竣工后利用光纤光栅的监测结果可以统计汽车（1 吨以上）的流量以及评价由此可能产生的疲劳损伤情况。因此，利用光纤光栅获得的长期监测数据可以判断桥梁的健康状况，从而可以对它进行全寿命监测，这就是在桥

梁上布设光纤光栅的根本意义。

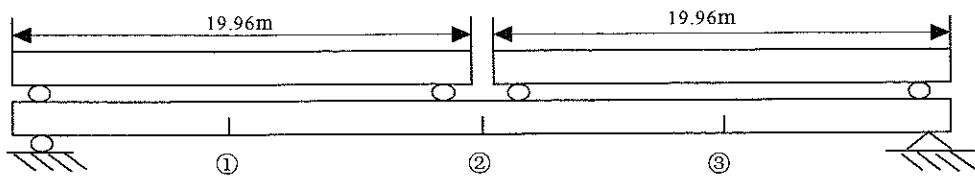


图 7-13 箱形梁加载示意图  
Figure 7-13 Sketch of dead load on box girder

表 7-2 箱形梁静载试验光纤光栅测试结果  
Table 7-2 Results of FBG when box girder under dead load

| 加载     | FBG1 | FBG2 | FBG3 |
|--------|------|------|------|
| 62 吨   | 69   | 108  | 45   |
| 2×62 吨 | 112  | 213  | 100  |

7.3.3 呼兰河大桥的光纤光栅运营监测

一年后，大桥建成通车。光纤光栅传感器经受住了考验，存活良好，只有个别传感器信号不稳，可能由于施工过程中工人不小心造成传输光纤微弯曲率过大，导致传输光信号过弱。而电阻应变计只有桥面板上的个别存活。由此说明光纤光栅传感器更适于结构的长期健康监测。

我们利用光纤光栅传感器监测了大桥在服役状态下的变形与温度过程，如图 7-14 所示。从光纤光栅智能监测系统直接显示的结果可以看出：箱形梁中离中心轴同一高度位置的光栅监测的应变基本相等，而上下沿中心轴对称分布的光栅监测的应变基本上是大小相等，方向相反。这是由于箱形梁可是视为简支梁，从平截面假定可以知道，箱形梁上下离中心轴同一高度位置的应变相等，而方向相反。

当大桥在随机车辆荷载下，我们可以方便地获得桥梁变形的应变时程，如图 7-15 所示。图 7-15 的应变时程峰值与间隔清楚显示了车辆的流量，即载重与速度。基于这些监测数据，我们可以分析结构的累积损伤，判断结构的整体安全性。

图 7-16 显示监测时间为中午 1 点到 2 点的一段桥面板内部的温度变化历程数据。

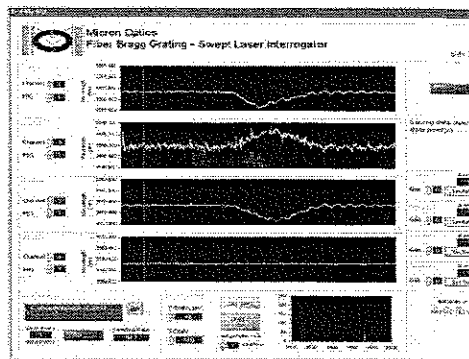
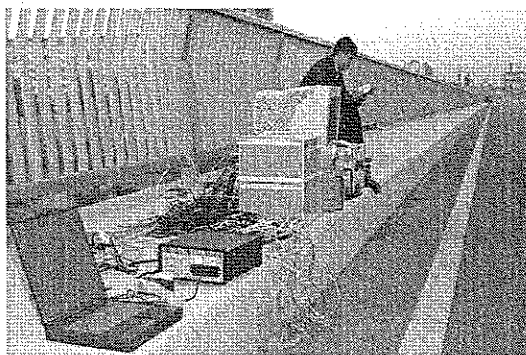


图 7-14 呼兰河大桥服役过程光纤光栅应变与温度监测  
Figure 7-14 Strain and temperature monitoring by FBGs  
when Hulan River Bridge in service

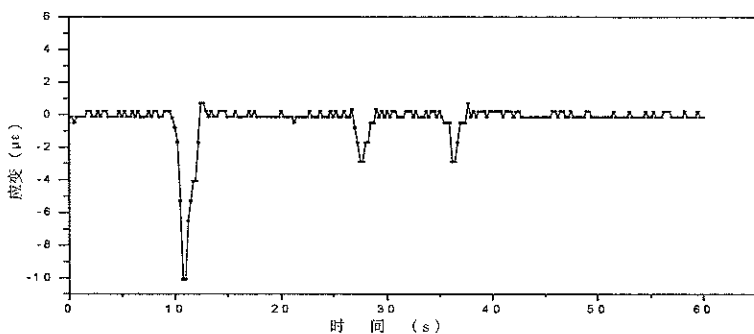


图 7-15 光纤光栅传感器监测车辆荷载下的应变时程  
Figure 7-15 Strain course induced by traffic load monitored by embedded FBG strain sensor

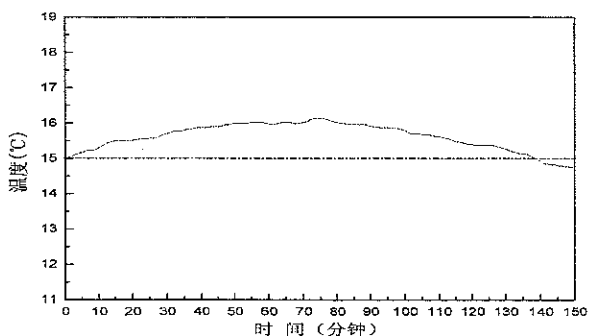


图 7-16 埋入光纤光栅传感器监测桥梁温度时程  
Figure 7-16 Bridge's temperature-time relationship  
monitored by the embedded FBG

从上面的介绍可以看出，光纤光栅在稳定性与耐久性上远远优于传统的电

阻应变片；光纤光栅可以有效地监测结构的施工变形，是一种有效的施工控制手段；光纤光栅传感器可以方便有效地长期监测结构的变形与温度变化过程，因此可以说光纤光栅是一种有效的结构健康监测技术。

## 7.4 黑大公路牛头山大桥光纤光栅施工监测

黑大公路（黑龙江—大连）牛头山大桥位于黑龙江省五常县，桥长 520m，由 13 跨 40 米长的预应力混凝土箱形梁组成。该桥将于 2003 年建成。为了节省支架、模具与劳动力，该桥的施工过程采用了一项新技术，即箱形梁预制过程中为简支梁，而在安装过程中使其成为连续梁。由于缺乏应用这项技术的经验和完好的理论支持，对其进行施工过程监测，具有重要的实际意义。

混凝土内部变形的测试手段目前工程上主要采用两种：一是振弦传感器；一种是电阻应变砖。振弦传感器已经比较成熟，但是其昂贵的价格让工程师们望而却步，因此他们都偏向于电阻应变砖，可是对其耐久性没有信心。当然，振弦传感器在耐久性上也存在问题，其寿命一般不过 2~3 年。为此，考虑采用目前已经逐步走向成熟的光纤光栅传感器是一种明智的选择。本项目采用光纤光栅传感技术的主要目的是研究简支转连续梁后的变形能力，对其进行施工过程监测，同时验证光纤光栅管式封装应变传感器在实际工程中监测混凝土内部应变的有效性，并进行该桥服役后的运营监测。为此，我们在一预应力混凝土箱形梁的施工过程中安装了 5 个管式封装光纤光栅应变传感器和 5 个裸光纤光栅，并对箱形梁的变形进行了试验，下一步的工作是监测箱形梁简支转连续梁后的协同变形、预应力损失和承载能力和运营监测。

### 7.4.1 传感器布设

考虑到箱形梁结构的对称性，我们在箱形梁跨中沿梁高度方向在一侧面布设了 5 个毛细钢管封装的光纤光栅应变传感器，命名为 FBG—C1~5，用来监测混凝土的内部变形；在侧面加强筋上布设了 3 个裸光纤光栅，命名为 FBG—R1~3，用来监测钢筋的变形；在纵向预应力筋上布设了 2 个裸光栅，分别命名为 FBG—B1~B2，用来监测预应力损失。同时，为了验证监测结果，我们在管式封装光纤光栅应变传感器的相同位置布设了测试混凝土内部应变的电阻应变砖。根据管式封装光纤光栅相同的命名顺序，布设的电阻应变砖命名为 ES1~ES5。传感器的布设位置如图 7-17（a）和（b）所示。在这里，裸光栅的布设工艺然采用第 7.3.1 节的布设工艺，而管式封装光纤光栅直接用细钢丝绑于待测点

的钢筋上，并将传输光缆用一钢管保护起来伸出梁的上表面即可，这种布设方法操作起来十分方便，大大降低了布设费用，这就是光纤光栅必须采用封装手段保护的主要原因。

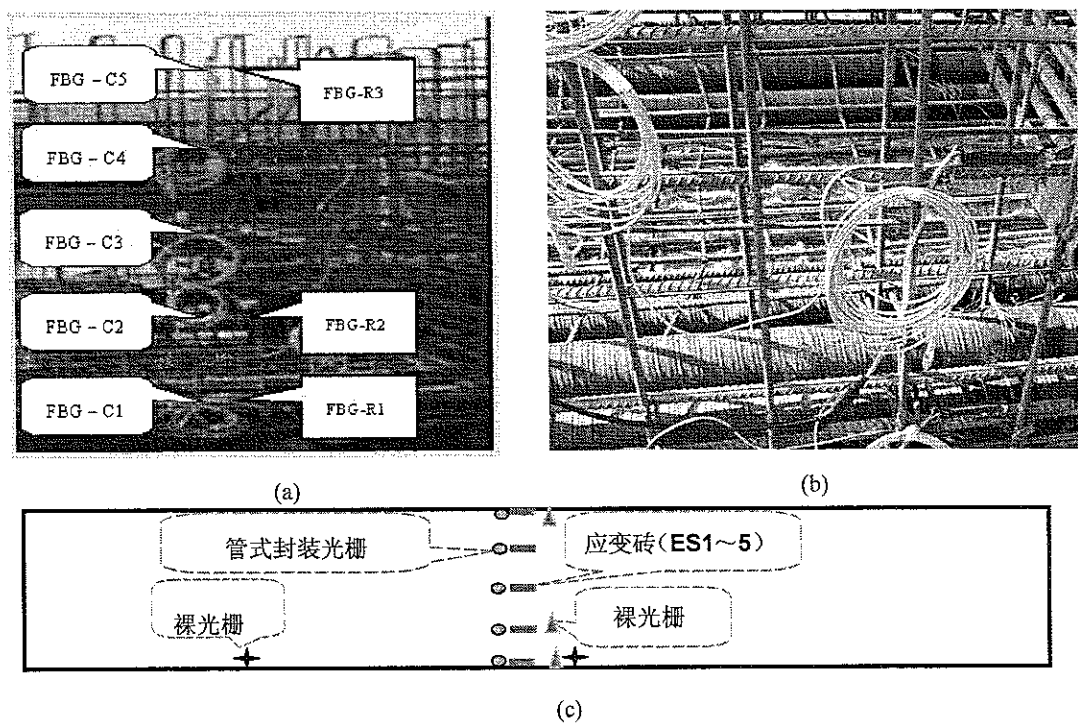


图 7-17 应变传感器在箱形梁上沿轴向的布置情况

Figure 7-17 Strain sensors location in the box girder along the longitudinal direction

### 7.4.2 监测试验与结果分析

箱形梁浇注完成后，我们发现只有电阻应变砖 ES4 信号不稳，其余的传感器都存活良好。箱形梁养护 20 天后，我们用龙门吊车将其两端置于圆木上，构成简支梁形式，然后将成卷钢材加到梁上，同时监测光栅与电阻应变砖的变形，如图 7-18 所示。

对监测结果进行处理得到图 7-19~23 的结果。从图 7-19 可以看出，梁中部的封装光纤光栅应变传感器基本不变，而上下对称布置的封装光纤光栅应变传感器监测结果正好在数值上基本相等，而符号相反。这说明该梁设计合理，完全满足平截面的假设，破坏形式避免了特殊性，能充分发挥材料的力学性能。上下对称布置的裸光栅的监测结果也很好地说明了这种情况，如图 7-20 所示。该图中梁中部的光栅测试到了应变，这是由于它布设的位置不是正中，而是在

其附近的钢筋上。图 7-21 的电阻应变砖监测结果也很好地说明了上述分析结果。

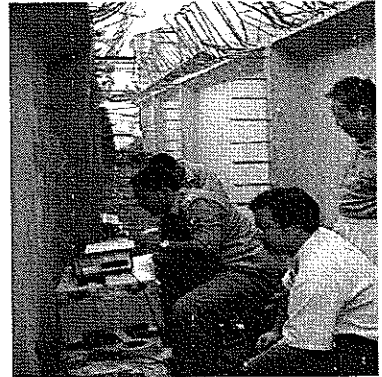
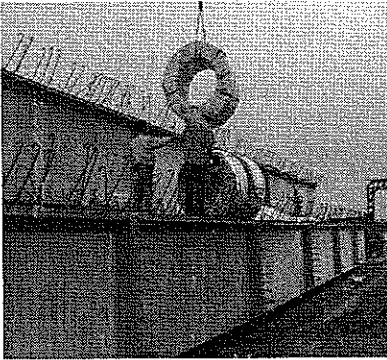


图 7-18 箱形梁静载试验照片

Figure 7-18 Picture of experiment of box girder under dead load

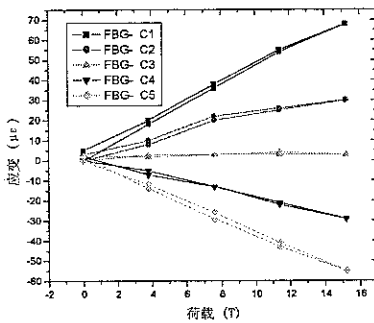


图 7-19 封装光栅应变监测结果

Figure 7-19 Strains monitored from packaged FBGs

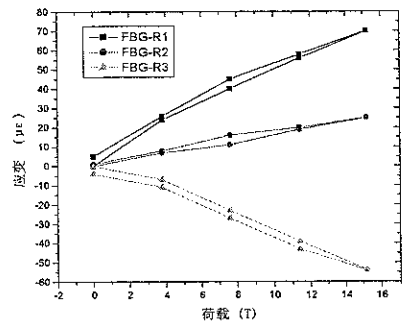


图 7-20 裸光栅监测结果

Figure 7-20 Strains monitored from bonded FBGs

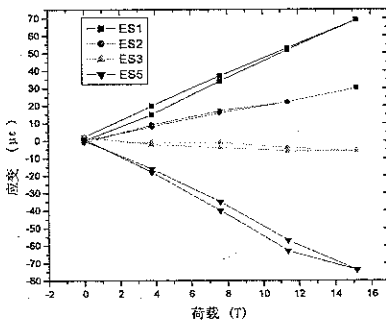


图 7-21 电阻应变砖监测结果

Figure 7-21 Strains from electric strain gauges

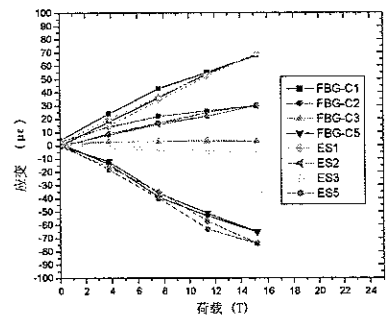


图 7-22 封装光栅与应变砖监测结果对比

Figure 7-22 Comparison of results from packaged FBGs and strain gauge

图 7-22 为管式封装光栅与电阻应变的监测结果比较图,它显示出两者监测结果基本吻合,中间点的差别来于位置的相对不同。相同位置的管式封装光纤光栅与裸光栅监测结果吻合很好,如图 7-23 所示,表明相同部位的混凝土与钢筋协同工作很好。

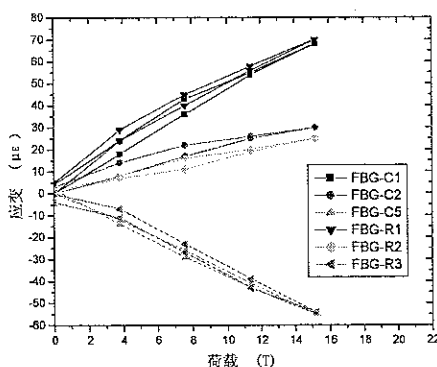


图 7-23 相同位置的封装光纤光栅  
与裸光纤光栅的测试结果比较

Figure 7-23 Comparison of results from encapsulated  
FBGs and bare FBGs on rebars

待桥建成后,我们还将在该梁上,以及相邻梁体和搭接部位布置光纤光栅传感器。利用成功埋设的光纤光栅传感器我们可以监测交通流量和结构的动态变形,监测可能产生的疲劳损伤,并对其服役安全状况进行评估。

## 7.5 松花江大桥的光纤光栅智能局部监测系统方案

### 7.5.1 结构背景与有限元分析

(1) 结构背景 松花江公路斜拉桥是黑龙江省哈尔滨市环城过境高速公路的一座特大型桥梁,是黑龙江省“OK”型公路网的重要组成部分,也是哈尔滨市“三环”及“四环”城市快速道路过江的唯一通道。

松花江公路大桥采用双塔双索面半漂浮结合梁斜拉桥体系,引桥采用预应力混凝土连续箱梁结构。桥梁全长 1268.86m,主桥长 696m,引桥长 572.86m。桥跨布置方案为:6×40m(南引桥)+44m(边渡跨)+136m(边跨)+336m(主跨)+136m(边跨)+44m(边渡跨)+8×40m(北引桥)。索塔为六边形门式塔,桥面以上设一道钢梁,桥面以下设牛腿。南塔和北塔高分别为 110.80m 和 106.10m(塔座以上),桥面以上高度均为 88.56m。主梁截面以两道工字边梁肋,横梁

及中间小纵梁，与混凝土桥面结合形成组合截面。全桥共计 52 对斜索。拉索索面为空间扇形，自上向下向桥外侧倾斜。主桥全宽 33.2 m，双向共四车道。

松花江斜拉桥地处我国东北，一年当中的温度极差接近  $100^{\circ}\text{C}$ 。由于日照的原因，桥梁主跨、索塔在向阳与背阳的两面可能存在较大的温差，温度应力是该桥的重要荷载效应，因此，监测桥梁和索塔的温度场及其变化，对于把握桥梁的实际应力状态并评价桥梁的运行安全状况具有重要的实际意义。

为此，黑龙江省交通厅特别立项，针对松花江斜拉桥，研制开发桥梁结构运营健康监测系统，通过在桥梁施工期间在结构上设置整体加速度传感器、局部光栅应变传感器、光栅温度传感器和风速仪等，监测桥梁结构的整体和局部响应，并评定结构的运营安全状况；同时，利用布设的整体与局部传感器，进行结构成桥的静、动力试验，为桥梁的安全可靠运营提供保障，并为结构维修控制决策提供依据。本文只介绍大桥局部健康监测，包括应变和温度，的光纤光栅智能监测系统部分。

(2) 大桥结构有限元分析 为了充分把握大桥的受力和变形特征，确定受力最不利截面和变形较大位置，为传感器的布设方案提供指导，课题组用 ANSYS 5.7 建立了空间有限元分析模型，并进行了主要运营荷载作用下的受力分析，其分析模型如图 7-24 所示。

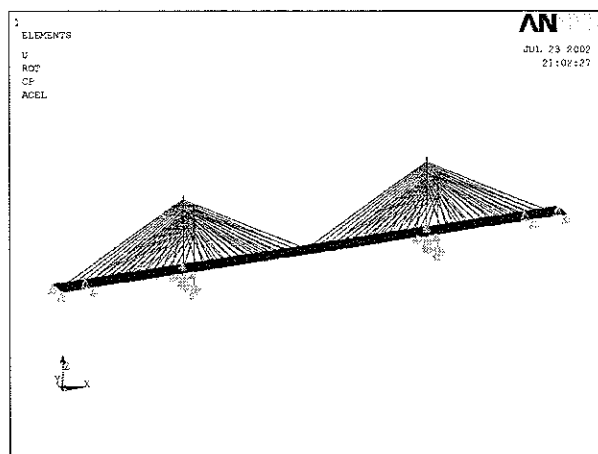


图 7-24 有限元分析模型

Figure 7-24 FEM analysis model

#### a. 桥梁空间模态分析结果

松花江大桥的结构固有频率如表 7-25 所示。从结构固有频率来看，松花江大桥的第一阶频率为小于 1Hz，我们采用的光纤光栅信号解调仪采样频率为

108Hz，根据采样定理，完全满足需要。

表 7-3 松花江大桥前 3 阶固有频率(Hz)

Table 7-3 The top 3 inherent frequency for Songhua River Bridge

| 方向  | 纵向     | 横向     | 竖向     | 扭转     |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 1 阶 | 0.1341 | 0.2312 | 0.4097 | 0.6172 |
| 2 阶 | -      | 0.4005 | 0.4903 | 0.7053 |
| 3 阶 | -      | 0.4006 | 0.8231 | 0.8321 |

b. 结构自重受力分析

结构自重下的大桥受力和变形分析结果如图 7-25 所示。从图上可以看出，自重下，主梁上最大的变形为边跨跨中，主梁最大的压应力在桥过渡墩处，最大的拉应力在桥边墩处，主梁大部分处于受压状态。最大索力为边索。

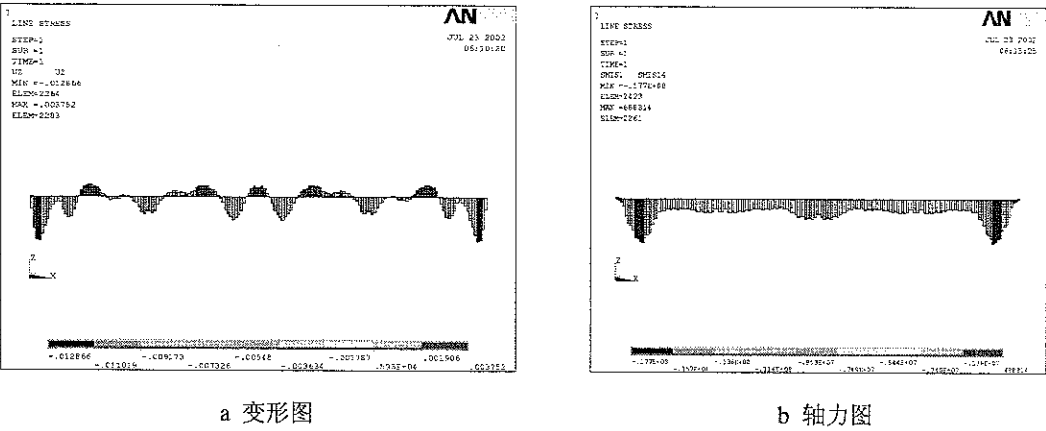


图 7-25 大桥自重下主梁变形和轴力图

Figure 7-25 Deformation and axial stress of main beam when the bridge under self weight

c. 车辆活荷载受力分析

车辆荷载下，大桥的主梁位移与轴力如图 7-26 所示。图中可以看出跨中变形最大，而两端受力最大。

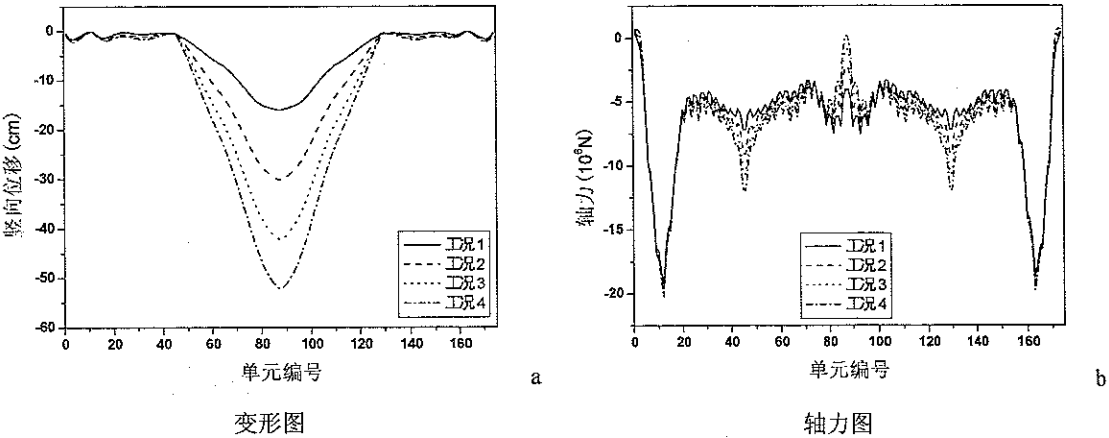


图 7-26 车辆活载下主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-26 Deformation and axial stress of main beam  
under traffic load

d. 季节温度变化下大桥受力分析

哈尔滨冬季室外温度可能达到 $-50^{\circ}\text{C}$ ，而夏天可以达到 $40^{\circ}\text{C}$ ，因此，本项目计算的温度范围是 $-50^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。从季节温度变化下的大桥受力分析图 7-27 和 7-28 可以看出，主梁的变形在跨中最大，其次是引桥中部，而轴力最大在引桥的索锚固区。季节温差引起的变形正好反向，这样会导致结构处于张拉两种状态，容易产生疲劳效应，由此说明了温度监测的必要性。

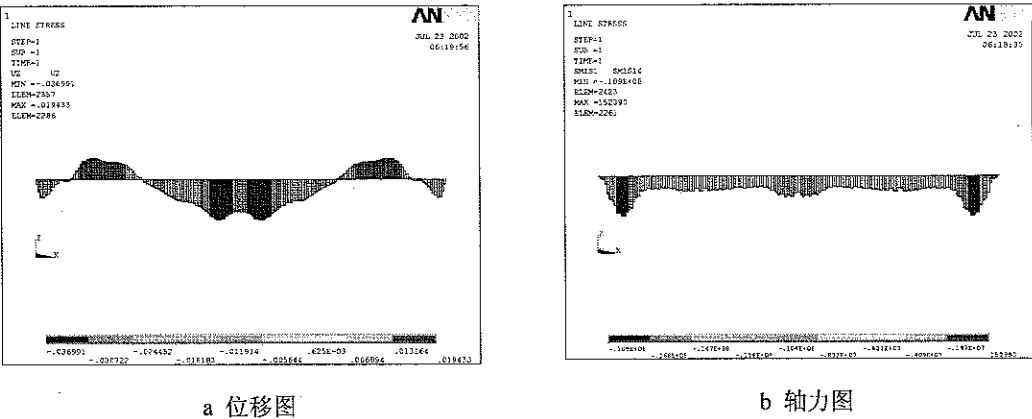


图 7-27 温度变化 ( $20^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) 下主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-27 Deformation and axial stress of main beam  
when temperature from  $20^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$

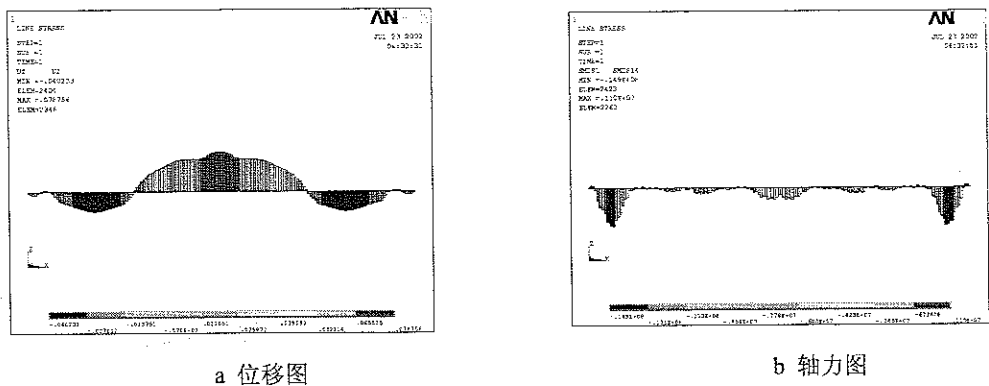


图 7-28 温度变化 ( $20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ ) 下主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-28 Deformation and axial stress of main beam  
when temperature from  $20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$

e. 日照温差下大桥受力分析

考虑环境温度为  $20^{\circ}\text{C}$  和主梁上下日照产生的温差为  $15^{\circ}\text{C}$ ，进行受力分析，其结果为图 7-29。其最大变形为跨中，最大受力为索锚固处的引桥上。

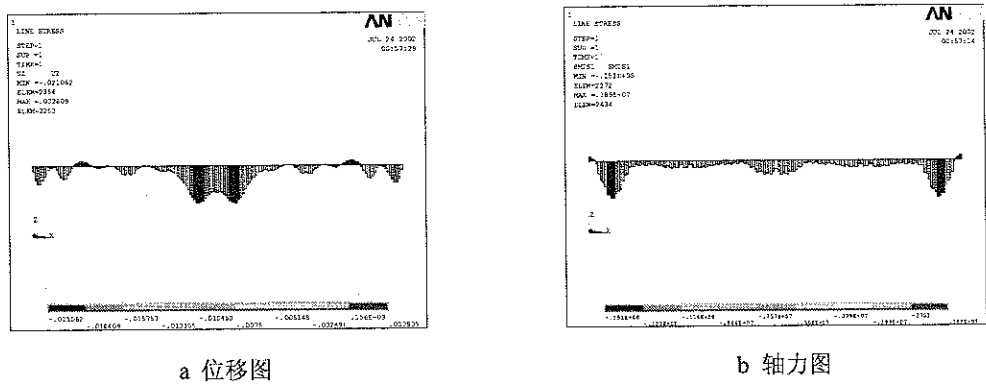


图 7-29 日照温差导致的主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-29 Deformation and axial stress of main beam  
when temperature changes due to sunlight

f. 风荷载下受力分析

图 7-30 和 7-31 为仅考虑静风荷载下的大桥主梁竖向位移和轴力图。从图可以看出，在横向静风作用下，主梁的变形和受力变化不大，在竖向静风作用下，

主梁跨中的变形较大，最大位移为 12cm。

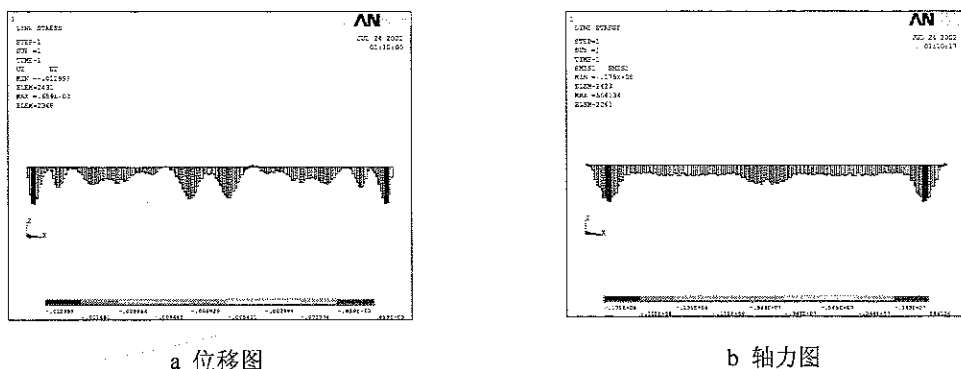


图 7-30 横向静风荷载下的主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-30 Deformation and axial stress of main beam  
when the bridge under transverse wind load

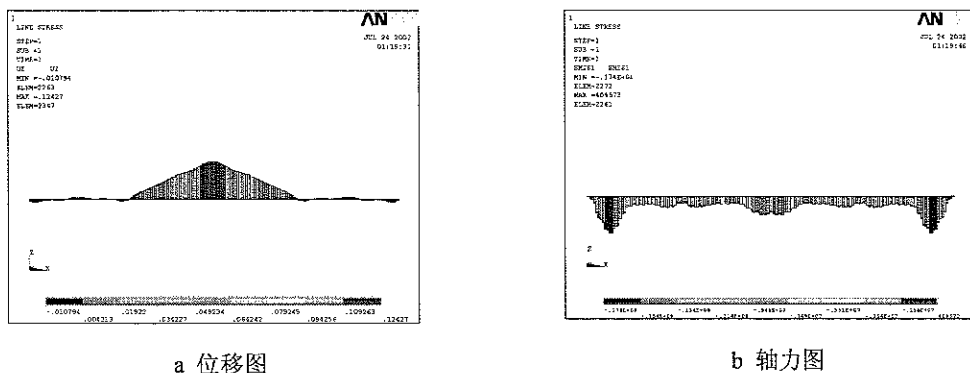


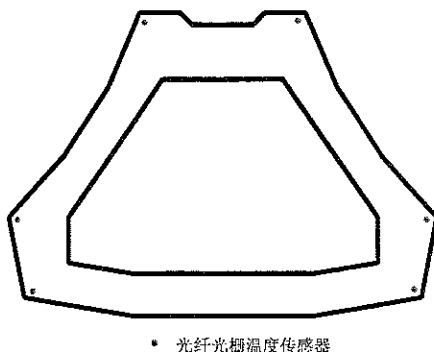
图 7-31 竖向静风荷载下的主梁竖向位移和轴力图  
Figure 7-31 Deformation and axial stress of main beam  
when the bridge under vertical wind load

## 7.5.2 光纤光栅传感器布设

松花江大桥的结构有限元分析结果清楚地给出了结构的关键控制部位，为局部应变传感器的布设提供了指导。由于日照的原因，桥梁主跨、索塔在向阳与背阳的两面可能存在较大的温差，温度应力是桥梁的重要荷载效应，因此，必须监测桥梁和索塔的温度场。为了兼顾大桥的整体安全性，我们还必须监测塔、索和与塔紧靠的梁端的变形与受力情况。

1) 光纤光栅温度传感器布设 考虑引起桥梁应力的温度作用主要为季节温

度变化和日照引起的桥梁不同部位的温度差,但沿桥梁纵向方向的温度变化不大,因此,本项目将在以下部位设置光纤温度传感器:在南边索塔单支的上横梁附近设置如图 7-32 所示的 6 个光纤光栅温度传感器,这样布置可以兼顾整个日照方向,同时满足监测要求;在距离南边索塔最近的桥梁预应力预制板结合处设置如图 7-33 所示的 8 个光纤光栅温度传感器。光纤光栅温度传感器采用管式封装型式。



7-32 索塔光纤光栅温度传感器布置示意图

Figure 7-32 Sketch of FBG temperature sensors installed on the tower

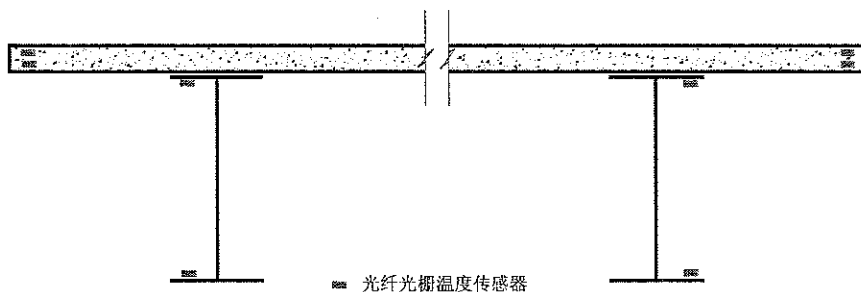


图 7-33 桥梁断面光纤光栅温度传感器布置示意图

Figure 7-33 Sketch of FBG temperature sensors installed on /in the girder

2) 光纤光栅应变传感器的布设 监测桥梁关键部位的应变,是评定桥梁安全性的直接手段,也能用以验证结构设计验证。松花江斜拉桥是复杂的结构体系,对其受力较大部位和易产生损伤部位的应力进行监测,是准确实现松花江斜拉桥安全预警的重要保障。综合考虑结构各种荷载工况下的轴力图 and 变形图,主梁的应力控制部位为跨中、桥墩附近以及桥梁外索锚固区附近的预应力梁处。考虑桥梁结构的对称性,我们拟在桥跨一侧,即跨中、桥墩两侧以及外索预应力梁位置各对称布置 16 个光纤光栅应变传感器,以获得结构的关键点的应变时程。每个截面一侧的布置情况如下,即桥面 1 个,钢筋混凝土板下侧正中钢筋

1 个，以及工字钢梁上下翼缘 2 个，如图 7-34 所示。

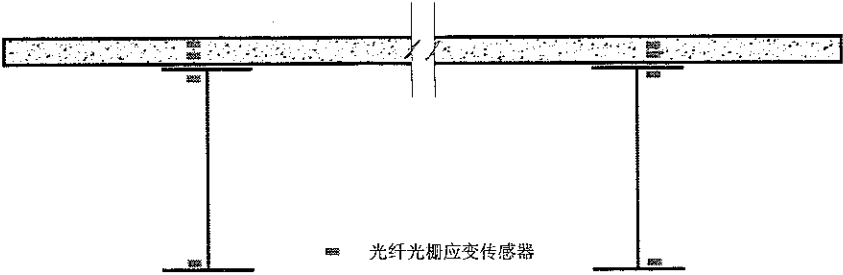


图 7-34 光纤光栅应变传感器在主梁截面上的布置示意图

Figure 7-34 Sketch of FBG strain sensors installed on /in the girder

考虑桥长方向有可能发生应变突变，采用准分布式传感技术布置两条光纤，各含 10 个光栅，共 20 个光栅。其布设位置为主梁跨中桥面板上。

考虑索受力变形情况，选定有代表性的 4 根外索，各布置 2 个光纤光栅应变传感器，共 8 个。由于索可以视为拉力构件，考虑布设工艺的方便性，于紧靠桥面的位置布置光纤光栅应变传感器。

为了监测索塔由于两侧的索力不均所导致的结构弯曲变形，沿索面塔高方向每个索塔上各布置 5 个光纤光栅应变传感器，共 20 个。

这些光纤光栅应变传感我们分别采用以下类型：混凝土中采用光纤光栅管式封装应变传感器和 GFRP-OFBG 传感器；钢筋上直接采用裸光栅；工字钢上采用片式封装应变传感器；桥面板上采用管式封装应变传感器；塔上采用管式封装应变传感器；索上直接采用裸光栅。

统计我们即将布设的光纤光栅传感器如表 7-4 所示。布设时必须考虑温度补偿，因此实际光栅数多于测点数。

表 7-4 松花江大桥布设的光纤光栅传感器

Table7-4 FBG sensor installed on the Songhua river bridge

| 温度传感器 | 位 置    | 数 量     | 目 的            |
|-------|--------|---------|----------------|
|       | 塔      | 6       | 监测日照和季节温差      |
| 应变传感器 | 主梁截面   | 8       | 监测日照和季节温差      |
|       | 跨中     | 16×2    | 监测混凝土、钢筋和工字钢应变 |
|       | 桥墩两侧   | 16×2    | 监测混凝土、钢筋和工字钢应变 |
|       | 外索预应力梁 | 16×2    | 监测混凝土、钢筋和工字钢应变 |
|       | 桥面板    | 20+2    | 监测变形突变         |
|       | 索      | 8+4     | 监测索变形          |
|       | 索塔     | 20+2    | 监测塔变形          |
| 合 计   |        | 166 (个) |                |

将上述各个光纤光栅传感器通过光缆接入桥梁专门监测室在每次定期监测时，分别将上述传感器通过光开关与光纤光栅解调仪接，进行数据采集。

### 7.5.3 光纤光栅局部智能监测系统

由于松花江大桥结构健康监测系统中的局部监测一应变和温度监测采用的光纤光栅传感器数量达 166 个，如果考虑传感器布设的冗余度，光纤光栅的用量可能超过 200 个。一个光纤光栅解调仪是无法满足需要的。为此，我们采用光开关来实现多点的同时测量。由于光纤光栅是绝对测量，因此即便数据采集具有一定的时间不连续性，长期静态监测时，没有影响。如果是动态监测，我们将按感兴趣的区域将光纤光栅传感器分成等级，逐片监测。

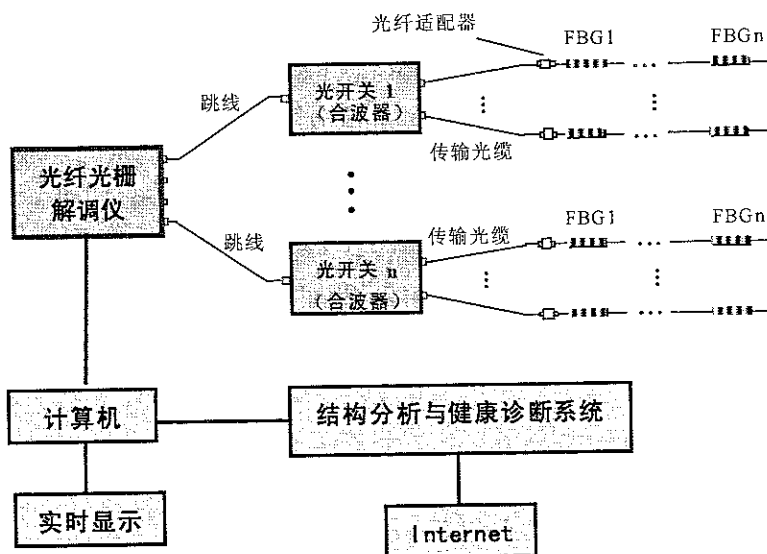


图 7-35 松花江大桥光纤光栅局部智能监测系统

Figure 7-35 Intelligent FBG local monitoring system of Songhua River Bridge

我们构建的松花江大桥光纤光栅局部智能监测系统如图 7-35 所示。该系统由光纤光栅传感器、光纤适配器、光开关、传输光缆、跳线、光栅解调仪、计算机等组成。该系统具有以下功能：

- 1) 将采样来的光纤光栅波长信息实时地转换成应变或温度信息，存入预先开发的数据库中，作为大桥健康监测的历史数据；
- 2) 将待测点的应变或温度数据直接或通过局域网示给用户；
- 3) 采集来的应变和温度数据经过预处理后，传给大桥的“结构健康监测系

统”中的“结构分析与健康诊断”功能模块，作为结构重分析和健康诊断的局部信息来源；

4) 在预先设定的预警门槛值下，直接利用局部应变信息预报结构的局部安全状态。

## 7.6 本章小结

针对土木工程结构局部监测的多传感器需要，对光纤光栅智能监测系统进行了构建，并开发了  $1 \times 24$  光开关；利用美国 MOI 公司的 FBG-SLI 开发了适于结构监测需要的光纤光栅智能监测软件。为了验证光纤光栅传感器在结构健康监测中的有效性，在充分研究光纤光栅现场布设工艺的基础上，成功地将 27 个光纤光栅传感器在施工过程中分别布设到黑龙江呼兰河大桥（15 个）和黑大公路牛头山大桥（12 个）上，并监测了黑龙江呼兰河大桥预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程、箱形梁静载试验的钢筋应变增量与分布，以及黑大公路大桥的箱形梁施工监测。呼兰河大桥建成后，利用布设的光纤光栅应变和温度传感器对大桥进行了运营监测，监测了车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程。最后，针对“黑龙江松花江大桥结构健康监测系统”的局部监测系统，提出能够进行多点同时监测的“光纤光栅智能局部监测系统”方案，并进行了功能设计。该方案已被黑龙江省交通厅采纳，正在具体的实施过程中。这些研究工作表明：

1) 光纤光栅传感器的稳定性与耐久性满足桥梁结构施工监测与长期健康监测的要求，性能明显优于传统的电阻应变片，是解决结构局部监测的首选智能传感元件。

2) 管式封装光纤光栅应变传感器是解决混凝土内部应变长期监测的有效手段。

3) 光开关是解决光纤光栅解调仪通道数满足不了实际需要的有效方法；

4) 光纤光栅智能局部监测系统是结构健康监测系统的重要组成部分，它是结构重分析和安全诊断的直接数据来源，同时也是评定结构安全性的直接手段。

结构健康监测系统的核心问题是局部监测系统的稳定性和耐久性，光纤光栅智能局部监测系统的研究与发展为“结构健康监测”研究的发展提供了有力的支持。

## 结 论

针对大型土木工程结构长期健康监测, 本文对光纤光栅应变和温度传感特性、温度补偿方法、新型封装传感器研制开发、应变传感的多层界面传递和误差修正、大规模监测系统及其工程应用进行了比较系统的理论与试验研究, 主要研究成果和结论如下:

1. 推证了光纤光栅布拉格方程的基本表达式, 在此基础上, 分析了光纤光栅应变与温度传感及其特性, 以及光栅中心波长变化对传感灵敏度系数的影响, 提出了光纤光栅应变传感的温度补偿原理和方法, 并通过材料试验和等强度梁试验以及温度标定试验研究了光纤光栅的应变与温度传感特性。研究表明: 光纤光栅传感试验结果与理论分析吻合很好; 中心波长变化不大时, 不考虑光栅中心波长对传感灵敏度系数的影响满足结构健康监测的需要; 光纤光栅只对轴向应力敏感, 而对横向应力不敏感; 光纤光栅在实际结构应变监测时必须考虑温度补偿。

2. 针对土木工程结构长期监测的需要, 从结构形式、材料选择、封装工艺等角度对光纤光栅封装传感器进行了研究。研制开发出了光纤光栅毛细金属管式封装应变传感器、光纤光栅片式封装应变传感器和光纤光栅封装温度传感器, 并对其传感特性进行了试验研究, 还将其用于结构试验进行了验证。结果表明它们是对混凝土内部应变监测、结构表面应变监测和温度监测等性能优良的传感器。

3. 研制开发出 FRP-OFBG 复合智能筋。FRP-OFBG 筋中的光纤光栅与 FRP 结合很好, 其力学特性与不含光纤光栅的 FRP 筋基本一致。FRP-OFBG 筋的应变传感灵敏度与裸光纤光栅基本一致, 但温度传感特性变化较大, GFRP-OFBG 的温度传感灵敏度系数是裸光栅的 1.84 倍; CFRP-OFBG 的温度传感灵敏度系数是裸光栅的 0.89 倍。FRP-OFBG 加筋混凝土梁全过程静载试验表明: FRP-OFBG 筋可以监测 FRP 筋和结构的变形全过程, 可以监测出 FRP 和混凝土的滑移以及 FRP 梁的应变分布; 加肋 FRP-OFBG 传感器可以监测混凝土的变形。FRP-OFBG 筋克服了光纤光栅脆弱、布设困难的缺点, 在结构健康监测领域具有广泛的应用前景。

4. 针对监测对象的实际应变与光纤传感应变之间不可避免地存在界面层

(如光纤保护层、粘贴胶层和封装层等)影响的情况,建立了实际应变和光纤传感应变间多层界面应变传递的统一模型,推导出了可以考虑界面层数、厚度、剪切模量等参数影响的界面层应变传递统一公式,可以用于光纤应变传感的误差修正。针对自行研究开发的三种光纤光栅封装传感器进行了应变传递误差分析与修正,给出了不同参数影响的数值分析结果。研究表明:光纤光栅实际工程应用时,必须考虑应变传感的界面传递误差;研制开发的 CFRP-OFBG 智能复合筋的应变传递误差约为 2%,相应的修正系数即为 1.02;研制开发的 GFRP-OFBG 智能复合筋的应变传感误差约为 3%,相应的修正系数即为 1.03;研制开发的光纤光栅管式封装应变传感器和片式封装应变传感器的应变传感误差约为 10%;相应的修正系数即为 1.1。

5. 提出了水泥净浆固化的光纤光栅监测方法,实现了水泥净浆中埋设光纤光栅的抽管法工艺;实现了水泥净浆早期固化过程的应变与温度双参量同时监测技术;进行了水泥净浆的光纤光栅固化监测试验,并对埋入光栅固化后的水泥净浆试件进行了压力试验。结果表明:光纤光栅是一种简单可靠的水泥净浆早期固化监测技术,埋入水泥净浆的光纤光栅可以方便地作为浆体固化后试件(构件)受力变形的监测传感元件。

6. 建立了包括传感器、光开关、解调器、数据采集和控制软件在内的大规模、分布式的光纤光栅智能监测系统。研究了光纤光栅现场布设工艺,成功地将 27 个光纤光栅传感器在桥梁施工过程中分别布设到黑龙江呼兰河大桥和黑大公路牛头山大桥上;监测了预应力箱形梁张拉过程的钢筋应变历程和箱形梁静载试验的混凝土和钢筋应变增量与分布;呼兰河大桥建成后,对其阶段性运营监测,监测了车辆荷载下的应变时间历程和大桥温度变化过程,监测结果表明,光纤光栅传感器的稳定性与耐久性满足桥梁结构施工监测与长期健康监测的要求,性能明显优于传统的电阻应变片。最后,针对“黑龙江松花江大桥结构健康监测系统”的局部监测系统需要,完成了能够多点同时监测的“光纤光栅智能局部监测系统”方案和功能设计。

本文虽然对光纤光栅智能传感技术进行了较系统的研究,并取得了一些研究成果,但是要想实现光纤光栅智能传感技术完全满足“结构健康监测”局部监测的需要,作者认为以下 4 个问题是进一步发展的重要内容:

1. 研究开发满足结构长期健康监测需要的胶粘剂,并对其耐久性进行充分的试验研究;
2. 根据 FBG 传感器在结构上的不同监测要求,对光纤光栅传感机理进行充

分的解析和数值分析，研究其应变与温度的耦合效应，把握光纤光栅应变传感的有效性与必要的补偿措施。

3. 研究开发基于光纤光栅传感机理的可靠的间接传感器，如冰压力传感器、腐蚀化学传感器、剪应变传感器、扭矩传感器、曲率传感器等。

4. 研究开发多点、同步、高频数据采集的光纤光栅智能监测系统。

## 参考文献

- 1 黄聪, 李启明, 申立银. 中国建设推动力的计量模型与分析研究. 东南大学学报(自然科学版). 2000, 30(4):112~118
- 2 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定. 走向 21 世纪的中国力学——中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179~189
- 3 G. W. Housner. Structure Control: Past, Present, and Future[R]. Journal of Engineering Mechanics. 1997, 123 (9): 897~899
- 4 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997:124~181
- 5 魏中国, 杨大智. 智能材料及自适应结构. 高技术通讯. 1993, 3(6):37~39
- 6 杨大智. 智能材料与智能系统. 天津大学出版社. 2000:1~5
- 7 黄尚廉. 智能结构—工程学科萌生的一场革命. 压电与声光. 1993, 15(1):13~15
- 8 欧进萍, 关新春. 土木工程智能结构体系的研究与发展. 地震工程与工程振动, 1999, 19 (2): 21~28
- 9 J.E.T. Penny, et al.. The Automatic Choice of Measurement Locations for Dynamic Testing. Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. Union College Press. Schenectady, NY, 1992: 30~36
- 10 M. Paradopoulos, et al. Sensor Placement Methodologies for Dynamic Testing. AAIA. 1998, 36(2):256~263
- 11 D.C. Kammer. Sensor Placement for On-orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures. Journal of guide, Control and Dynamics. 1991, 14(9):251~259
- 12 A. Richardson, et al. Sensor/Actuators Placement on Civil Structures Using a Real Coded Genetic Algorithm. Smart structures and materials. San Diego, 2002:4696~5030
- 13 G.W. Ng, K.H. Ng. Sensor Management-What, Why and How. Information Fusion. 2000 (1): 67-75
- 14 张启伟. 桥梁结构模型修正与损伤识别. 同济大学博士论文. 1999: 9~15
- 15 P.L. Fuhr, et al.. Embedded Sensors Results from the Winooski one

- Hydroelectric Dam. SPIE, 1994, (2191): 446~456
- 16 H. Iwaki, et al. Structural Health Monitoring System Using FBG-Based Sensors for a Damage Tolerant Building. Smart Structures and Materials, San Diego, 2002: 4696~5009
  - 17 D. Inaudi, et al.. Monitoring of a Concrete Arch Bridge during Construction. Smart Structures and Materials, San Diego, 2002: 4696~5017
  - 18 Z.X. Li, T.H.T. Chan, and J.M. Ko. Health Monitoring and Fatigue Damage Assessment of Bridge-deck Sections. SPIE, 2000, 3995: 346~356
  - 19 Z.X. Li, T.H.T. Chan, and J.M. Ko. Fatigue Analysis and Life Prediction of Bridges with Structural Health Monitoring Data-Part I: Methodology and Strategy. International Journal of Fatigue, 2001, (23): 45~53
  - 20 Z.X. Li, T.H.T. Chan, and J.M. Ko. Fatigue Analysis and Life Prediction of Bridges with Structural Health Monitoring Data-Part II: Application. International Journal of Fatigue, 2001, (23): 55~64
  - 21 A.R. Flint, A.N. Mcfadyen, C.K. Lau, et al.. Wind and Structure Health Monitoring System for Lantau Fixed Crossing. Part 2: Performance Requirements for the Bridge Instrumentation System. Proceeding Of Bridge into the 21st Century, Hongkong, 1995
  - 22 欧进萍, 肖仪清, 黄虎杰等. 海洋平台结构实时安全监测系统. 海洋工程, 2001, 19(2): 1~6
  - 23 张博明. 埋多功能光纤传感器智能材料与结构研究. 哈尔滨工业大学博士论文. 1998: 10~11
  - 24 Z. Q. LI. Resistance Changement of Compression Sensible Cement Specimen under Different Stresses. J. Wuhan University of Technology. 1996, 11(3): pp41~45
  - 25 K.Y. Christopher Leung, Niell Elvin, Noah Olson, et al. Optical Fiber Crack Sensor for Concrete Structures. SPIE , 1997, (3042): 283~292
  - 26 T. Kurashima, T. Usu, K. Tanaka, et al. Application of Fiber Optic Distributed Sensor for Strain Measurement in Civil Engineering. SPIE, 1997, (3241): 247~258
  - 27 P. Kronenberg, N. Casaletta , D. Inaudi, et al. Dam Monitoring with Fiber Optics Deformation Sensors. SPIE, 1997, (3043): 2~7
  - 28 S. Vurpillot, N. Casanova, D. Inaudi, et al.. Bridge Spatial Displacement with

- 100 Fiber Optic Sensors Deformations: Sensors Network and Preliminary Results. SPIE, 1997,(3043): 51~57
- 29 D. Inaudi, N. Casanova, P. Kronenberg, et al.. Railway Bridge Monitoring during Construction and Sliding. SPIE, 1997, (3043): 58~64
- 30 P. Choquet, F. Juneau, and F. Dadoun. New Generation of Fiber-Optic Sensors for Dam Monitoring. Proceeding of the '99 International Conference on Dam Safety and Monitoring, Three Gorge Project Site, Yichang. Hubei, China, 1999
- 31 A.T. Alavie, et al.. Application and Characterization of Intracore Grating Sensors in CFRP Prestressed Concrete Girder . SPIE, 1994, (2191): 103~110
- 32 W.W. Morey, G.A. Ball, and H. Singh. Applications of Fiber Grating Sensors. SPIE, 1996, (2839):2~7.
- 33 K.O. Hill, Y. Fuji, D.C Jonson and B.S. Kawasaki. Photosensitivity in Optical Fiber Wave Guides: Application to Reflection Filter Fabrication. App. Phys. lett., 1978, (32): 647~649
- 34 G. Meltz, W.W. Morey and H.Glenn. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method. Opt. Lett., 1989, (14): 823~825
- 35 K. O. Hill, et al.. Bragg Grating Fabricated in Monomode Photosensitive Optical Fiber by UV Exposure through a Phase Mask. Appl. Phys. Lett., 1993, (62): 1035~1037
- 36 P.J. Lemaire, R.M. Atkins, V. Mizrahi, et al.. High Pressure H<sub>2</sub> Loading as a Technique for Achieving Ultrahigh UV Photosensitivity and Thermal Sensitivity in GeO<sub>2</sub> Doped Optical Fibers. Electron. Lett., 1993, (29): 1191:1195
- 37 W. W.Morey, G. Meltz, and W.H.Glenn. Fibre Optic Bragg Grating Sensors. SPIE, 1989, (1169): 98~107.
- 38 C. D. Butter. Appl. Opt. 1978, 17 (18):2867~2869
- 39 T. Iwashima , et al.. Temperature Compensation Technique for Fiber Bragg Grating Using Liquid Crystalline Polymer Tubes. Electronics letters, 1997, 33(5): 417~419
- 40 M.G. Xu , et al.. Thermally-compensated Banding Gauge Using Surface Mounted Fiber Gratings. International Journal of Optoelectronics, 1994, (9): 281~283
- 41 M. G. Xu, et al.. "Temperate-independent Strain Sensor Using a Chirped Bragg Grating in a Tapered Optical Fiber", Electronics Letters, 1995,(31): 823~825

- 42 G.W. Yoffe, P.A. Krug, F. Quellet, et al.. Passive Temperature Compensating Package for Optical Fiber Gratings. *Applied optics*, 1995, 34(30): 6859~6861
- 43 T. Iwashima, et al.. Temperature Compensation Technique for Fiber Bragg Grating Using Liquid Crystalline Polymer Tubes. *Electronics letters*, 1997, 33(5): 417~419
- 44 M.G. Xu, J.L. Archambault, L. Reekie, et al.. Discrimination between Strain and Temperature Effects Using dual-wave Length Fiber Grating Sensors. *Electronics letters*, 1994, 30(13): 1085~1087
- 45 S.W. James, M.L. Dockney, and R.P. Tuta, Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurement Using in-fiber Bragg Grating Sensors. *Electronics Letters*, 1996, 32(12): 1133~1134
- 46 P. Sivanesan, J. Sirkis, and H. Singh. Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using a Single Bragg Grating. *SPIE*, 1999, (3670): 92~103
- 47 V. Bhatia, D. Campbell, and R.O. Claus. Simultaneous Strain and Temperature Measurement with Long-Period Gratings. *Optics letters*, 1997, 22(9): 648~650
- 48 S.E. Kanellopoulos, V.A. Handerek, and A.J. Rogers. Simultaneous Strain and Temperature Sensing with Photo generated in-fiber Gratings. *optics letters*, 1995, 20(3): 333~335
- 49 C.M. Lawrence, D.V. Nelson, and Eric Udd. Multi-parameter Sensing with Fiber Bragg Grating. *SPIE*. 1996, (2872): 24~31
- 50 Y.J. Rao, A.B. Lobo Ribeiro, D.A. Jackson. Simultaneously Spatial Time and Wavelength Division Multiplexed in Fiber Bragg Grating Sensor Network. *SPIE*, 1996, (2838): 23~30
- 51 M.A. Davis, D.G. Bellemore, M.A. Putnam et al.. High Strain Monitoring in Composite wrapped Concrete Cylinders Using Embedded Fiber Bragg grating Arrays. *SPIE*, 1996, (2721): 149~154
- 52 John P. Dakin, Timothy SP Awtin, Peter J. Gregson, et al.. Miniature, Multiplexed Fiber-Grating-Array Sensor for the Interrogation of Localized Strain Patterns during Crack Growth Studies upon Hybrid Laminate Panel. *SPIE* 1999, Vol.354: 263~270
- 53 Peter K. C. Chan, W. Jin K.T. Lau, et al.. Strain Monitoring of Composite-boned

- Concrete Specimen Measurements by use of a FMCW Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor Array. SPIE 2000, (4077): 56~59
- 54 Eric Udd. Three Axis Strain and Temperature Fiber Optic Grating Sensor. SPIE, 1996, (2718): 104~108
- 55 Eric Udd, Whitten Schulz, J. Seim, et al.. Multidimensional Strain Field Measurements Using Fiber Optic Grating Sensors. SPIE, 2000, (3986): 254~262
- 56 Eric. Udd, W. L. Schulz, and J.M. Seim. Measurement of Multidimensional Strain Fields Using Fiber Grating Sensors for Structural Monitoring. SPIE, 1999, (3860): 24~34
- 57 C M Lawrence, D.V. Nelson, and E. Udd. Multi-parameter Sensing with Fiber Bragg Grating, SPIE, 1996, (2872): 24~31
- 58 W.L. Schulz, E. Udd, J.M. Seim, et al.. Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges. SPIE, 1998, (3325): 212~221
- 59 W. L. Schulz, E. Udd, M. Morrel, et al.. Health Monitoring of an Adhesive Joint Using a Multi-axis Fiber Grating Strain Sensor System. SPIE, 1999, (3586): 41~52
- 60 W.L. Schulz, Eric Udd, J.m. Seim, et al.. Progress on Monitoring of Adhesive Joints Using Multi-axis Fiber-grating Sensors. SPIE, 2000, (3991): 52~60
- 61 M. Willsch, P. Krammer, N.M. Thevne, et al.. Highly Sensitive Micro Mechanical Fiber Bragg Grating Acceleration Sensor Combined with a New Multiplexable Interrogation Principle. SPIE, 2000, (4074): 46~53
- 62 A.V. Kouloxouzidis, U.C. Robert, and M.J. Holmes. Development of a Fiber Bragg Grating Sensor for in -shoe Shear Stress Measurement: Design and Preliminary Results. SPIE , 2000, (4074):79~88
- 63 S.A. Greene, M.E. Jones, D.G. Duncan et al. Grating-based Optical Fiber Corrosion Sensors. SPIE, 1997, (3042): 260~266
- 64 X. Tian, and T. Torsion. Measurement by Using FBG Sensor, SPIE, 2000, (4077):154~164
- 65 L.Q. Hang, J. Wei, C.G. Xiang. The Application of Fiber Gratings in Measuring the Material Characteristic Parameters. SPIE, 2000, (4077): 179~181
- 66 张颖. 布拉格光纤光栅传感技术研究. 南开大学博士学位论文, 2001: 47~61
- 67 C. Schmidt-Hattenberger, G. Born, and F. Amberg. Bragg Grating Seismic

- Monitoring System. SPIE 1999, (3860): 417~424
- 68 A.D. Kersey, T.A. Berkoff, and W.W. Morey. Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain Sensor System with a Fiber Fabry-perot Wavelength Filter. Optics letter, 1993, 18(16): 1370~1372
- 69 S.H. Yun, D.J. Richardson, and B.Y. Kim. Interrogation of Fiber Grating Sensor Arrays with a Wavelength-swept Fiber Laser. Optics letters, 1998, 23(11): 843~845
- 70 M.A. Davis, and A.D. Kersey. Application of a Fiber Fourier Transform Spectrometer to the Detection at Wavelength Encoded Signals Form Bragg grating sensors. IEEE, Journal of Lightwave Technology, 1995, (13): 1289~1295
- 71 Y. Hu, S. Chen, L. zhang, et al.. Multiplexing Bragg Grating Using Combined Wavelength and Optical Division Techniques with Digital Resolution Enhancement Electronic letters, 1997, 33(23): 1973~1975
- 72 J. Seim, W. Schulz, E. Udd, et al.. High Speed Demodulation of Fiber Grating Sensors, SPIE, 1999, (3670): 8~14
- 73 Y.J. Rao. Recent Progress in Applications of in Fiber Bragg Grating Sensors, Optics and Lasers in Engineering 1999, (31): 297~324
- 74 C.I. Merzbacher, A.D. Kersey, and E.J. Friebele. Fiber Optic Sensors in Concrete Structures: a Review, Optical Fiber Sensor Technology. Academic Publishers, London, 1998 (3):12~27
- 75 R.C. Tennyson, T. Coroy , G. Duck et al.. Fiber Optic Sensors in Civil Engineering Structures. J. Civ. Eng. 2000: 880~889
- 76 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况. 光电子激光. 2002, 13(4): 420~430
- 77 李宏男, 李东升, 赵柏东. 光纤健康监测方法在土木工程中的研究与应用进展. 地震工程与工程振动. 2002, 22(6): 76~83
- 78 P. Friebele, et al.. Fibre Bragg Grating Strain Sensors: Present and Future Applications in Smart Structures. Optics and Photonics News. 1998, 9: 33-37.
- 79 V. Slowik, et al. Fibre Bragg Grating Sensors in Concrete Technology. Laser, 1998(3): 109~119.
- 80 P.M. Nellen , P. Anderegg, R.B. Bronnimann, et al.. Application of Fiber Optical and Resistance Strain Gauges for Long-term Surveillance of Civil Engineering

- Structures, SPIE, 1997, (3043): 77~86
- 81 P.M. Nellen, R. Bronnimann, and A. Frank. Structurally Embedded Fiber Bragg gratings: Civil Engineering Applications. SPIE, 1999,(3860): 44~54
- 82 P. L. Fuhr, and S. Spammer. Fiber Optic Sensors in the Waterbury Bridge. SPIE, 1998, (3489): 124~129
- 83 J. Sein, E. Udd, and W. Schulz. Health Monitoring of an Oregon Historical Bridge with Fiber Grating Strain sensors. SPIE 1999, (3671): 128~134
- 84 P. Ferdinand, et al.. Mine Operating Accurate Stability Control with Optical Fibre Sensing and Bragg Grating Technology. J. Lightwave Tech., 1995, 13(1): 303~313.
- 85 P. Ferdinand, et al.. Applications of Bragg Gating Sensors in Europe. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997: 14~19.
- 86 P.D. Foote. Fiber Bragg Grating Strain Sensors for Aerospace Smart Structure. SPIE. 1994, (2361): 162~166.
- 87 L. Zhang, et al.. Spatial and Wavelength Multiplexing Architectures for Extreme Strain Monitoring System Using Identical-chirped Grating Interrogation Technique. Proc. of the Optical Fiber Sensors. 1997: 425~455.
- 88 D.R. Hjelm, et al.. Application of Bragg Grating Sensors in the Characterization of Scaled Marine Vehicle Models. Applied Optics. 1997, 36: 328~336.
- 89 G. Wang, et al.. Digital Demodulation and Signal Processing Applied to Fibre Bragg Grating Strain Sensor Arrays in Monitoring Transient Loading Effects on Ship hulls. Proc. Of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997: 612~615.
- 90 P.J. Henderson. Current Metering Using Fibre-grating Based Interrogation of a Conventional Current Trans-former. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf.. Williamsburg, VA, USA, 1997: 186~189.
- 91 Y.J. Rao et al.. Wavelength-division-multiplexed in-fibre Bragg Grating Fabry-Perot Sensor System for Quasi-distributed Current Measurement. proc. Of the Ann. Conf. On Applied Optics and Opto Electronics. Brighton, 1998: 99~104.
- 92 T.E. Hammon, et al.. Optical Fibre Bragg Grating Temperature Sensor Measurements in an Electrical Power Transformer Using a Temperature

- Compensated Fibre Bragg Grating As a reference. Proc. Of the 11th International Conf. On Optical Fibre Sensors. Sapporo, Japan, 1996: 566~569.
- 93 N.M. Theune, et al.. Applications of Fiber Optical Sensors in Power Generators: Current and Temperature Sensors. Proc. of Opto2000 Conf. 2000: 22~25.
- 94 Y. Ogawa, et al.. A multiplexing Load Monitoring System for Power Transmission Lines Using Fibre Bragg Grating. Proc. Of the Optical Fibre Sensors Conf.. Williamsburg, VA, USA, 1997: 468~471.
- 95 W. Weis, et al.. MWD Telemetry System for Coil-tubing Drilling Using Optical Fiber Grating Modulators Down-hole. Proc. Of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997: 416~419.
- 96 V.V. Spirin, et al.. Fiber Bragg Grating Sensor for Petroleum Hydro Carbon Leak Detection. Optics and Laser in Engineering, 2000, 32: 497~503
- 97 G. Meltz, et al.. Fibre Grating Evanescent-wave Sensors. Proc. SPIE. 1996, (2836): 342~350.
- 98 W. Ecke, et al.. Chemical Bragg Grating Sensor Network Based On side-polished Optical Fibre. Proc. SPIE, 1998, (3555): 457~466.
- 99 Y.T. Peng, et al.. The Characterization of Hydrogen Sensor Based on Palladium Electro Plated Fiber Bragg Gratings. Proc. SPIE.1999, (3670): 42~53.
- 100 Z. Zhang, and J.S. Sirkis. Temperature Compensated Long-period Grating Chemical Sensor. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997: 294~297.
- 101 R. Falciai, et al. Optical Fiber Long Period Gratings for the Refractometry of a Queous Solution. Proc. SPIE.1998, 3555: 447~450.
- 102 A.I. Gusarov, et al.. High Total Dose Radiation Effecton Temperature Sensing Fiber Bragg Gratings. IEEE Photonics Technology Letters, 1999,11(9): 1159~1161.
- 103 Y.J. Rao, et al.. In-fibre Bragg Grating Temperature Sensor System for Medical Application. Light wave Technology, 1997, 15: 779~785.
- 104 Y.J. Rao, et al.. In-situ Temperature Monitoring in NMR Machines with a Prototype in-fibre Bragg Grating Sensor System. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997: 646~649.
- 105 N.E. Fisher, et al.. Response of In-fibre Bragg Grating Stofocused Ultrasound Fields. Proc. of the Optical Fiber Sensors Conf. Williamsburg, VA, USA, 1997:

190~193

- 106 杨朝晖, 刘浩吾. F-P 光纤应变传感器混凝土实验研究. 实验力学, 1998, 13 (1): 41~46
- 107 杨建良, 向清, 黄德修. 城墙型光纤应变传感器. 电子学报, 1997, (8): 100~103
- 108 赵延超, 黄尚廉, 陈伟民. 机敏土建结构中光纤传感技术的研究综述. 重庆大学学报, 1997, 20(5): 104~109
- 109 蔡德所. 大坝裂缝光纤监测技术研究及坝基稳定性分析. 哈尔滨建筑大学博士后研究报告, 哈尔滨, 1998, 10
- 110 廖延彪. 光纤光学. 北京, 清华大学出版社. 2000: 1~5, 199~205
- 111 孙圣和, 王延云, 徐影. 光纤测量与传感技术. 哈尔滨工业大学出版社. 2000: 1~10
- 112 王惠文. 光纤传感技术与应用. 国防工业出版社. 2001: 1~4
- 113 D. Z. Anderson, et al.. Production of In-fiber Gratings Using a Diffractive Optical Element. Electron letter. 1993, 29: 566~568
- 114 S. Mihailov, and M. Gower. Recording of Efficient High-order Bragg Reflectors in Optical Fibers by Mask Image Projection and Single Pulse Exposure with an Excimer laser. Electronics letters, 1994, 30 (9): 707~709
- 115 B. Malo, et al.. Point by Point Fabrication of Micro-Bragg Gratings in Photosensitive Fiber Using Single Excimer Pulse Refractive Index Modification Technique. Electronics letters. 1993, 29: 1668~1669
- 116 G. Meltz, W. W. Morey, and H. Glenn. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method. Optical letters. 1989, 14: 823~825
- 117 C.G. Atkins, et al.. Stepped Wavelength Optical Fiber Bragg Gratings Arrays Fabricated in Line on a Draw Tower. Optical letters 1994, 19(2): 147~149
- 118 贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究. 中国科学院西安光学精密精密机械研究所博士论文. 2000: 12~20
- 119 廖帮全. 光纤光栅理论、传感应用及全光纤声光调制研究. 南开大学博士论文. 2002: 22~35
- 120 梁龙彬. 光纤光栅应变传感在建筑结构中的应用研究. 北京工业大学硕士学位论文. 2001: 1~17
- 121 余有龙. 光纤光栅及其在传感领域中的应用研究. 南开大学博士学位论文. 1999: 34~40

- 122 马库塞 介质光波导理论.刘弘度 译. 北京, 人民邮电出版社, 1982: 104~108
- 123 D. Marcuse. Theory of Dielectric Optical Waveguides. New York, Academic Press. 1974
- 124 周树同. 光纤理论与测量. 上海, 复旦大学出版社. 1988: 6~14
- 125 M.G. Xu, H. Geiger, and J.P. Dakin. Fiber Grating Pressure Sensor with Enhanced Sensitivity Using a Glass-tube Housing. Electric Lett. 1999, 332(2): 128~129
- 126 刘云启, 郭转运, 刘志国等. 光纤光栅的压力传感特性研究. 光子学报. 1999, 28(5): 443~445
- 127 张伟刚, 周广, 梁龙彬等. 混合聚合物光纤光栅封装元件的温敏试验. 光子学报. 2001, 30(8): 1003~1005
- 128 董新永, 温午麒, 魏玉花等. 光纤布拉格光栅的金属管封装与电调谐. 光子学报. 2001, 30(4): 422~424
- 129 宁提纲, 简水生, 魏淮等. 封装对长周期光纤光栅的影响. 半导体光电. 2002, 23(1): 37~39
- 130 ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars. American Concrete Institute, 2001: 1~10
- 131 B. Benmokrane, O. Chaallal, and R. Masmoudi. Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars. ACI Structural Journal. 1996, 93(1): 46~55
- 132 王勃, 何政, 张新越, 欧进萍. 纤维聚合物筋在土木工程中的应用. 建筑技术. 2003, 34(2): 134~136
- 133 张新越. FRP 筋及其混凝土构件的力学性能与感知特性. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2002: 1~17
- 134 C. W. Dolan. FRP Prestressing in U. S. A.. Concrete International Design and Construction. 1999, 21 (10): 21~24.
- 135 S. Rizkalla, and P. Labossiere. Structural Engineering with FRP – in Canada. Concrete International Design and Construction. 1999, 21(10): 25~28
- 136 H. Fukuyama. FRP Composite in Japan. Concrete International Design and Construction, 1999, 21(10): 29~32.
- 137 L.R. Taerwe, and S. Matthys. FRP for Concrete Construction Activities in Europe. Concrete International Design and Construction. 1999, 21(10): 33~36.

- 138 L.J. Malvar. Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*. 1995, 92(3): 276~285.
- 139 薛伟辰. 纤维塑料筋在混凝土结构中的应用. *工业建筑*. 1999, 29(2): 19~28
- 140 A.G. Razaqpur, D. Svecova, and M.S. Cheung. Rational Method for Calculating Deflection of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Beams. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(1): 175~184
- 141 A. Katz, N. Berman. Modeling the Effect of High Temperature on the Bond of FRP Reinforcing Bars to Concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2000, (22): 433~443.
- 142 S.H. Alsayed. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. *Cement & Concrete Composites*. 1998, (20): 1~11
- 143 J. P. Ou, B. Wang, Z. He, et al.. Mechanical and Sensing Properties of FRP Bars for Concrete Structures . *Pacific Science Review*. 2002, 3
- 144 C.E. Bakis, A. Nanni, J.A. Terosky, et al. Self-monitoring, Pseudo-ductile, Hybrid FRP Reinforced Rod for Concrete Applications. *Composite Science and Technology*. 2001, 61: 815~823.
- 145 A.L. Kalamkarov, D.O. MacDonald, S.B. Fitzgerald, et al.. Reliability Assessment of Pultruded FRP Reinforcements with Embedded Fiber Optic Sensors. *Composite structures*. 2000, (50): 69~78
- 146 A.L. Kalamkarov, S.B. Fitzgerald, D.O. MacDonald, et al.. The Mechanical Performance of Pultruded Composite Rods with Embedded Fiber Optics Sensors. *Composite Science and Technology*. 2000, (60): 1161~1169
- 147 A. Nanni, C.C. Yang, K. Pan, et al.. Fiber-optic sensors for concrete Strain/Stress Measurement. *ACI materials Journal*. 1991, 88(3): 257~264
- 148 F. Ansari, and L. Yuan. Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fibre Sensors. *J Eng Mech*, 1998, 124(4): 385~394
- 149 G. Duck, G. Renaund, and M. Measures. The Mechanical Load Transfer into a Distributed Optical Fibre Sensor due to a Linear Strain Gradient: Embedded and Surface Bonded Case. *J Smart Mater Structures*. 1999; (8): 175~181
- 150 K.T. Lau, L.B Yuan, L.M. Zhou, et al. Strain Monitoring in FRP Laminates and Concrete Beams Using FBG Sensors. *Composite Structures* 2001, (51): 9~20
- 151 T.C. Triantafillou. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-bonded FRP Composites. *J ACI Structure*. 1998; 95(2): 107~115