第 30 卷 第 7 期
2010 年 7 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 30, No. 7
July, 2010

文章编号： 0253-2239(2010)07-1965-06

简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程

吴永红[1] 邵长江[1] 屈文俊[1] 周 巍[1] 蔡海文[2]

([1] 同济大学土木工程学院，上海 200092；[2] 中国科学院上海光学精密机械研究所，上海 201800)

摘要 基于光纤光栅应变传感的基本原理以及粘弹性力学的基本理论，建立了一种简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程。方程的建立忽略封装基体和纤芯的粘弹性力学行为，同时综合考虑观测环境-封装基体-粘结层(或涂层)-光纤纤芯之间的弹性和粘弹性力学耦合机制。所建立的方程既包含了传感器的所有几何特征参数和力学特征参数，又可大为简化光-力转换的时变分析过程，从而为光纤光栅应变传感应用于大型工程结构健康监测的长期性能评估(包括参数标定、信号校正、精度分析及误差估算)提供较为可靠、实用、简便的理论分析工具。

关键词 光纤光学；光-力转换；光纤布拉格光栅传感器；时变效应

中图分类号 TP125 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS20103007.1965

Simplified Time-Dependant Optical-Mechanical Transformation Equation for FBG Strain Sensors

Wu Yonghong[1] Shao Changjiang[1] Qu Wenjun[1] Zhou Wei[1] Cai Haiweng[2]

([1] *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*
[2] *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201800, *China*)

Abstract Based on the basic principle of fiber optical Bragg grating (FBG) strain sensing and the basic theory of viscoelastic mechanics, a simplified time-dependant optical-mechanical transformation equation for FBG sensors is established. With the viscoelastic mechanic behavior of encapsulation matrix and optical fiber core being neglected and the elastic-viscoelastic mechanic coupling mechanism among environment-encapsulation matrix-adhesion layer-optical fiber core being taken into account, the equation hereby established contains all the characteristic geometric and mechanical parameters of a sensor, and can greatly simplify the process of optical-mechanical transformation analysis, thereby more reliable and less complicated for long-term performance analysis of FBG sensors when applied to health monitoring of large project.

Key words fibre optics; optical-mechanical transformation; fiber Bragg grating sensors; time-dependent effect

1 引 言

受工程结构健康监测骤然兴起以及光通讯技术成熟发展的内外驱动，光纤传感因其具有耐腐蚀、体积小巧、抗电磁干扰以及可进行分布式检测等众多优势，成为近年来发展迅猛、引人注目的新兴检测技术。其中又以对光纤(光栅)应变传感的应用研究最为活跃，广泛应用于航天、交通、土木、化工、电力和医学等各领域，用于检测结构应变，或通过应变这一基本参量转换而来的结构位移、变形、渗透、振动和损伤等多种力学特征参量[1~4]。光纤光栅应变传感技术的出现及其在关键技术上的不断突破，为推动整个光纤技术逾越式发展的主导力量。

光纤光栅应变传感的光-力转换关系，是指待观测的环境应变与光纤光栅中心反射波长之间的关系。这一转换关系，是传感器优化设计、信号分析、参数标定、精度分析或误差估算的基本理论依据。光纤光栅传感器因灵敏度高、结构简单可靠、可复用，因而特别适于大型工程结构的健康监测。大型

收稿日期： 2009-08-24；**收到修改稿日期：** 2009-09-28

基金项目： 国家自然科学基金(50878152)和中国博士后基金(20080440651)资助课题。

作者简介： 吴永红(1966—)男，博士，副研究员，主要从事结构健康监测与工程抗震等方面的研究。

E-mail：wuyonghonghao@yahoo.com.cn

工程结构的使用寿命一般较长。杭州湾跨海大桥的设计使用年限达一百年以上[5]，三峡工程则为千年之计[6]。另一方面，光纤光栅传感器的封装连接材料，目前普遍为聚合物。或整个封装结构完全由聚合物基复合材料构成。而聚合物显著特点之一，是其力学性能与荷载历程有关，即会随时间而发生改变[7,8]，从而产生光纤应变传感光-力转换的时变效应。因此，当光纤光栅应变传感应用于大型工程结构时，应考虑这种效应的出现。

文献[9,10]分别采用基于布里渊散射的分布式光纤应变传感实验，以及白光干涉光纤应变传感实验，证实了光纤聚合物保护层时变效应的存在。文献[11]基于 Ansari[12]光纤应变传递分析模型，并试图视整个传感器各组成结构均为粘弹性体，建立了光纤光栅应变传递的时变模型。结构粘弹性问题的求解，通常要涉及到拉普拉斯变换及反其变换，求解过程一般比较复杂。同时，材料粘弹性参数的可靠测试亦非常困难。而实际上，封装基体和光纤纤芯分别为金属和无机材料，两者弹性模量与粘结层或光纤涂层存在数量级之差。因此，实际分析时可忽略这两者的粘弹性力学行为，仅考虑粘结层或光纤涂层的时变特性，由此可大大简化时变参数的测试以及光-力转换的分析过程。另外，Ansarii[12]应变传递模型不考虑基体与光纤之间的力学耦合机制。依据力学的基本认识，任何可靠、实用的力学模型的建立，均应反映分析结构内部及其与环境之间相互作用的力学机制。据此建立的力学模型，应包括结构的主要力学特征参数和几何特征参数[13]。本文基于光纤光栅应变传感的基本原理以及粘弹性力学的基本理论，综合考虑观测环境-封装基体-粘结层(或涂层)-光纤纤芯之间的弹性和粘弹性力学耦合机制，同时忽略封装基体和纤芯的粘弹性力学行为，建立一种简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程，为光纤光栅应变传感应用于大型工程结构健康监测的长期性能评估(包括参数标定、信号校正、精度分析及误差估算)提供较为可靠、实用、简便的理论分析工具。

2 光-力转换的时变方程

2.1 分析模型与本构关系

分析模型的内容包括：传感器的结构、结构的力学状态以及力学行为特性。传感器的基本结构同文献[13]所示结构的力学状态，仍假定为封装基体-粘结层(或光纤涂层)-光纤纤芯紧密结合、变形协调，如图 1 所示。

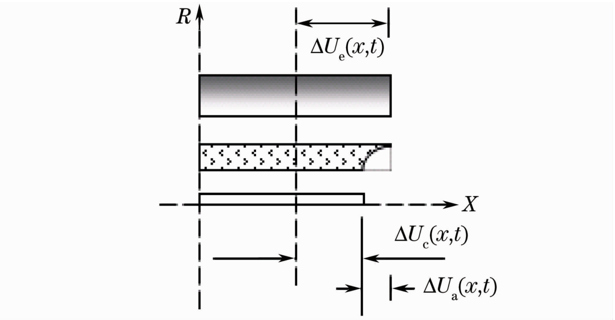

图 1 传感器变形位移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deformed displacement of sensor

图 1 中，$\Delta U_e(x,t)$，$\Delta U_c(x,t)$和 $\Delta U_a(x,t)$，分别表示某时刻 t 封装壳、纤芯的位移及两者的位移差，三者满足

$$\Delta U_a(x,t)=\Delta U_e(x,t)-\Delta U_c(x,t). \quad (1)$$

在外力作用下，传感器各组成结构的力学行为特性分别表现为：封装基体与纤芯为弹性，粘结层(或光纤涂层)为粘弹性。各部分的力学行为分别遵从下列本构关系：

$$\sigma_e(x,t)=E_e\varepsilon_e(x,t), \quad (2)$$

$$\sigma_c(x,t)=E_c\varepsilon_c(x,t), \quad (3)$$

$$\gamma_a(x,r,t)=J_a(t)*\mathrm{d}\tau_a(x,r,t)=$$
$$J_a(t)\tau_a(x,0)+\int_0^t J_a(\tau-\sigma)\frac{\partial\tau_e(\tau,\sigma)}{\partial\sigma}\mathrm{d}\tau. \quad (4)$$

(2)～(4)式中 $\sigma_e(x,t)$和 $\varepsilon_e(x,t)$分别表示封装基体的应力和应变，$\sigma_c(x,t)$和 $\varepsilon_c(x,t)$分别表示纤芯的应力和应变，$\tau_a(x,r,t)$，$\gamma_a(x,r,t)$和 $J_a(t)$为粘接层的剪应力、剪应变和蠕变柔量，$*$ 为卷积。

2.2 应变传递时变耦合方程

$\Delta U_e(x,t)$，$\Delta U_c(x,t)$和 $\Delta U_a(x,t)$分别等于

$$\Delta U_e(x,t)=\int_0^x\varepsilon_e(\xi,t)\mathrm{d}\xi=\int_0^x\frac{\sigma_e(\xi,t)}{E_e}\mathrm{d}\xi, \quad (5)$$

$$\Delta U_c(x,t)=\int_0^x\varepsilon_c(\xi,t)\mathrm{d}\xi=\int_0^x\frac{\sigma_c(\xi,t)}{E_c}\mathrm{d}\xi, \quad (6)$$

$$\Delta U_a(x,t)=\int_{r_c}^{r_a}\gamma_a(x,r,t)\mathrm{d}r. \quad (7)$$

将(4)式代入(7)式有

$$\Delta U_a(x,t)=\int_{r_c}^{r_a}[J_a(t)*\mathrm{d}\tau_a(x,r,t)]\mathrm{d}r=$$
$$J_a(t)*\mathrm{d}\int_{r_c}^{r_a}[\tau_a(x,r,t)]\mathrm{d}r. \quad (8)$$

将(5)，(6)，(8)式代入(1)式，并对 x 求导可得

$$\varepsilon_{e}(x,t)-\varepsilon_{c}(x,t)=J_{a}(t)*\mathrm{d}\int_{r_c}^{r_a}\frac{\partial\tau_{a}(x,r,t)}{\partial x}\mathrm{d}r. \tag{9}$$

在轴向 x 处，在纤芯和封装壳中各取一微元体，如图 2 所示。根据微元体轴向力的平衡，则有

$$t_{e}\frac{\partial\sigma_{e}(x,t)}{\partial x}=\tau(x,r_{a},t), \tag{10}$$

$$r_{c}\frac{\partial\sigma_{c}(x,t)}{\partial x}=-2\tau(x,r_{c},t). \tag{11}$$

(10)式和(11)式反映了纤芯和封装基体之间的时变应力耦合，式中 $t_{e}=(r_{e}^{2}-r_{a}^{2})/2r_{a}$，$\tau(x,r_{c},t)$ 和 $\tau(x,r_{a},t)$ 分别表示粘接层与纤芯、封装壳两组界面处的剪应力。

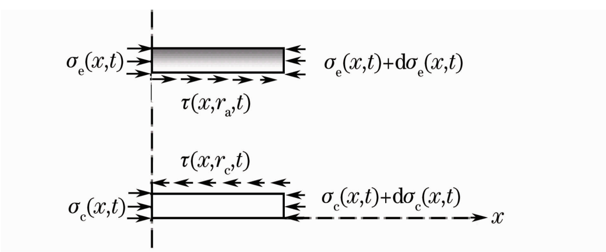

图 2　封装壳和纤芯微元体示意图

Fig. 2　Encapssulation shell and fiber core infinitesimal element

在粘接层中任取一微元体，采取与文献[12]中同样的假定和分析方法可得

$$r\tau(x,r,t)=r_{c}\tau(x,r_{c},t), \tag{12}$$

根据(9)，(2)，(3)式，以及(10)～(12)式，得应变传递耦合时变方程

$$J_{a}(t)*d\left[\frac{\partial^{3}\varepsilon_{c}(x,t)}{\partial x^{3}}\right]-\lambda^{2}\frac{\partial\varepsilon_{c}(x,t)}{\partial x}=0, \tag{13}$$

$$J_{a}(t)*d\left[\frac{\partial^{3}\varepsilon_{e}(x,t)}{\partial x^{3}}\right]-\lambda^{2}\frac{\partial\varepsilon_{e}(x,t)}{\partial x}=0, \tag{14}$$

在(13)式和(14)式中

$$\lambda=\sqrt{\frac{2}{(\ln r_{a}-\ln r_{c})}\left(\frac{1}{r_{c}^{2}E_{c}}+\frac{1}{2r_{a}t_{e}E_{e}}\right)}. \tag{15}$$

2.3　时变耦合方程的求解

对(13)式和(14)式进行拉氏变换得

$$\frac{\partial^{3}\varepsilon_{c}(x,s)}{\partial x^{3}}-\bar{k}^{2}\frac{\partial\varepsilon_{c}(x,s)}{\partial x}=0, \tag{16}$$

$$\frac{\partial^{3}\varepsilon_{e}(x,s)}{\partial x^{3}}-\bar{k}^{2}\frac{\partial\varepsilon_{e}(x,s)}{\partial x}=0, \tag{17}$$

在(16)式和(17)式中，

$$\bar{k}=\sqrt{\frac{2}{(\ln r_{a}-\ln r_{c})sJ_{a}(s)}\left(\frac{1}{r_{c}^{2}E_{c}}+\frac{1}{2r_{a}t_{e}E_{e}}\right)}. \tag{18}$$

方程(16)及(17)的通解为

$$\varepsilon_{c}(x,s)=A_{1}(s)+A_{2}(s)\sinh(\bar{k}x)+A_{3}(s)\cosh(\bar{k}x), \tag{19}$$

$$\varepsilon_{e}(x,s)=B_{1}(s)+B_{2}(s)\sinh(\bar{k}x)+B_{3}(s)\cosh(\bar{k}x). \tag{20}$$

由(2)～(3)式，(10)～(12)式，进一步有

$$\varepsilon_{e}(x)=B_{1}(s)+\alpha[A_{2}(s)\sinh(\bar{k}x)+A_{3}(s)\cosh(\bar{k}x)]. \tag{21}$$

根据模型的对称性、应变传递协调方程的特征，考虑传感器与环境的协同作用，在任意环境应力作用下，存在下述边界条件及变形协调条件

$$\varepsilon_{c}(l_{s},t)=0,\quad \dot{\varepsilon}_{c}(0,t)=0, \tag{22}$$

$$\varepsilon_{c}(0,t)=\varepsilon_{e}(0,t),\quad \sigma_{e}(l_{s},t)=\sigma_{m}(t). \tag{23}$$

在(22)式和(23)式中，l_s 为传感器长度之半，$\sigma_m(\mathrm{t})$ 为传感器两端所受外部应力。对(22)式和(23)式进行拉氏变换得

$$\varepsilon_{c}(l_{s},s)=0,\quad \dot{\varepsilon}_{c}(0,s)=0, \tag{24}$$

$$\varepsilon_{c}(0,s)=\varepsilon_{e}(0,s),\quad \sigma_{e}(l_{s},s)=\sigma_{m}(s), \tag{25}$$

另有

$$\sigma_{e}(l_{s},t)=E_{e}\varepsilon_{e}(l_{s},t), \tag{26}$$

$$\varepsilon_{m}(t)=E_{e}\sigma_{m}(t), \tag{27}$$

$$\sigma_{e}(l_{s},s)=E_{e}\varepsilon_{e}(l_{s},s), \tag{28}$$

$$\sigma_{m}(s)=E_{e}\varepsilon_{m}(s). \tag{29}$$

将(19)式和(21)式分别代入到(24)～(25)式，并利用(28)式和(29)式可得

$$A_{1}(s)=\bar{\beta}\cosh(\bar{k}l_{s})\varepsilon_{m}(s),\quad A_{2}(s)=0, \tag{30}$$

$$A_{3}(s)=-\bar{\beta}\varepsilon_{m}(s), \tag{31}$$

$$B_{1}(s)=\bar{\beta}[\alpha+\cosh(\bar{k}l_{s})-1]\varepsilon_{m}(s), \tag{32}$$

在(30)～(32)式中

$$\bar{\beta}=-\frac{1}{(1-\alpha)[1-\cosh(\bar{k}l_{s})]}. \tag{33}$$

将 $A_1(s)$，$A_2(s)$，$A_3(s)$，$B_1(s)$ 分别代入(19)式和(21)式得

$$\varepsilon_{c}(x,s)=\bar{\beta}[\cosh(\bar{k}x)-\cosh(\bar{k}l_{s})]\varepsilon_{m}(s), \tag{34}$$

$$\varepsilon_{e}(x,s)=\bar{\beta}[\alpha\cosh(\bar{k}x)+1-\alpha-\cosh(\bar{k}l_{s})]\varepsilon_{m}(s). \tag{35}$$

对(34)式和(35)进行拉氏反变换(L^{-})，得光纤纤芯和封装基材各点的应变分布

$$\varepsilon_{c}(x,t)=-L^{-}\{\bar{\beta}[\cosh(\bar{k}x)-\cosh(\bar{k}l_{s})]\varepsilon_{m}(s)\}, \tag{36}$$

$$\varepsilon_{e}(x,s)=-L^{-}\{\bar{\beta}[\alpha\cosh(\bar{k}x)+1-\alpha-\cosh(\bar{k}l_{s})]\varepsilon_{m}(s)\}, \tag{37}$$

纤芯平均应变 $\bar{\varepsilon}_c(x,t)$ 为

$$\bar{\varepsilon}_c(x,t)=\frac{\int_0^{l_s}\varepsilon_c(x,t)\mathrm{d}x}{l_s}=-L^{-}\left\{\frac{\bar{\beta}[\sinh(\bar{k}l_s)-\bar{k}l_s\cosh(\bar{k}l_s)]}{\bar{k}l_s}\varepsilon_m(s)\right\}.\quad(38)$$

根据(29)式及(34)式、(35)式可得

$$\varepsilon_c(x,t)=J_d(x,t)*\mathrm{d}\sigma_m(t),\quad(39)$$

$$\varepsilon_e(x,t)=J_d(x,t)*\mathrm{d}\sigma_m(t),\quad(40)$$

在(39)式和(40)式中

$$J_d(x,t)=L^{-1}\bar{J}_d(x,s),\quad(41)$$

$$J_d(x,t)=L^{-1}\bar{J}_d(x,s),\quad(42)$$

在(41)式和(42)式中

$$\bar{J}_d(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\cosh(\bar{k}x)-\cosh(\bar{k}l_s)]}{sE_e},\quad(43)$$

$$\bar{J}_d(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\alpha\cosh(\bar{k}x)+1-\alpha-\cosh(\bar{k}l_s)]}{sE_e}.\quad(44)$$

在外界应力一定的情况下，光纤纤芯及封装基体应变随时间的变化，是由于粘接层或光纤涂层粘弹性行为导致的时变力学耦合引起，故定义 $J_d(x,t)$ 为传感器结构系统分布式耦合蠕变柔量。

同样，根据(29)式和(38)式可得

$$\bar{\varepsilon}_c(x,t)=J_o(t)*\mathrm{d}\sigma_m(t),\quad(45)$$

并有

$$J_o(t)=L^{-}\bar{J}_o(s),\quad(46)$$

$$\bar{J}_o(s)=-\frac{\bar{\beta}[\sinh(\bar{k}l_s)-\bar{k}l_s\cosh(\bar{k}l_s)]}{s\bar{k}l_sE_e},\quad(47)$$

相似地，定义 $J_o(x,t)$ 为系统平均耦合蠕变柔量。

若传感器所受环境应力 $\sigma_m(t)$ 为

$$\sigma_m(t)=\sigma_m,t\geqslant 0\quad(48)$$

则有

$$\sigma_m(s)=L\sigma_m(t)=\frac{\sigma_m}{s},\quad(49)$$

$$\varepsilon_m(s)=\frac{\sigma_m}{sE_e}.\quad(50)$$

根据(38)式有

$$\bar{\varepsilon}_c(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\sinh(\bar{k}l_s)-\bar{k}l_s\cosh(\bar{k}l_s)]\varepsilon_m(s)}{\bar{k}l_s},\quad(51)$$

式中 $\bar{\varepsilon}_c(x,s)$ 为 $\varepsilon_c(x,s)$ 在传感器长度范围的均值。

将(50)式代入(34),(35),(51)式有

$$\varepsilon_c(x,s)=\frac{\bar{\beta}[\cosh(\bar{k}x)-\cosh(\bar{k}l_s)]\sigma_m}{sE_e},\quad(52)$$

$$\varepsilon_e(x,s)=\frac{\bar{\beta}[\alpha\cosh(\bar{k}x)+1-\alpha-\cosh(\bar{k}l_s)]\sigma_m}{sE_e},\quad(53)$$

$$\bar{\varepsilon}_c(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\sinh(\bar{k}l_s)-\bar{k}l_s\cosh(\bar{k}l_s)]\sigma_m(s)}{\bar{k}l_sE_e}.\quad(54)$$

根据拉氏变换的终值定理，以及材料粘弹性力学行为的特性，存在

$$J_a(0)=\lim_{t\to 0}J_a(t)=\lim_{s\to\infty}s\bar{J}_a(s)=\frac{1}{G_a},\quad(55)$$

$$J_a(\infty)=\lim_{t\to\infty}J_a(t)=\lim_{s\to 0}s\bar{J}_a(s)=\frac{1}{G_a^{\infty}}.\quad(56)$$

由(54)～(56)式有

$$\bar{\varepsilon}_c(x,0)=\lim_{t\to 0}\bar{\varepsilon}_c(x,t)=\lim_{s\to\infty}s\bar{\varepsilon}_c(x,s)=-\frac{\lim\limits_{s\to\infty}\bar{\beta}_p[\sinh(\lim\limits_{s\to\infty}\bar{k}l_s)-\lim\limits_{s\to\infty}\bar{k}l_s\cosh(\lim\limits_{s\to\infty}\bar{k}l_s)]\varepsilon_m}{\lim\limits_{s\to\infty}\bar{k}l_s},\quad(57)$$

$$\lim_{s\to\infty}\bar{k}=\sqrt{\frac{2G_a}{(\ln r_a-\ln r_c)}\left[\frac{1}{r_c^2E_c}+\frac{1}{2r_at_eE_e}\right]}=k,\quad(58)$$

$$\lim_{\lim s\to\beta}\bar{\beta}=\frac{1}{(\alpha-1)[1-\cosh(kl_s)]}=\beta,\quad(59)$$

$$\varepsilon_m=\frac{\sigma_m}{E_e},\quad(60)$$

$$\bar{\varepsilon}_c(x,\infty)=\lim_{t\to\infty}\bar{\varepsilon}_c(x,t)=\lim_{s\to 0}s\bar{\varepsilon}_c(x,s)=-\frac{\lim\limits_{s\to 0}\bar{\beta}[\sinh(\lim\limits_{s\to 0}\bar{k}l_s)-\lim\limits_{s\to 0}\bar{k}l_s\cosh(\lim\limits_{s\to 0}\bar{k}l_s)]\varepsilon_m}{\lim\limits_{s\to 0}\bar{k}l_s},\quad(61)$$

$$\lim_{s\to 0}\bar{k}=\sqrt{\frac{2G_a^{\infty}}{(\ln r_a-\ln r_c)}\left[\frac{1}{r_c^2E_c}+\frac{1}{2r_at_eE_e}\right]}=k_{\infty},\quad(62)$$

$$\lim_{\lim s\to 0}\bar{\beta}=\frac{1}{(\alpha-1)[1-\cosh(k_{\infty}l_s)]}=\beta_{\infty}.\quad(63)$$

将(58)～(59)式、(62)～(63)式，分别代入式(57)，(61)式得

$$\bar{\varepsilon}_c(x,0)=-\frac{\beta[\sinh(kl_s)-kl_s\cosh(kl_s)]\varepsilon_m}{kl_s},\quad(64)$$

$$\bar{\varepsilon}_c(x,\infty)=-\frac{\beta_{\infty}[\sinh(k_{\infty}l_s)-kl_s\cosh(k_{\infty}l_s)]\varepsilon_m}{k_{\infty}l_s}.\quad(65)$$

根据(52)式和(53)式，当 $\sigma_m(t)=\sigma_m(t\geqslant 0)$ 时，有

$$\sigma_c(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\cosh(\bar{k}x)-\cosh(\bar{\varepsilon}l_s)]E_c\sigma_m}{sE_e},\quad(66)$$

$$\sigma_e(x,s)=-\frac{\bar{\beta}[\alpha\cosh(\bar{\varepsilon}x)+1-\alpha-\cosh(\bar{\varepsilon}l_s)]\sigma_m}{s}.\quad(67)$$

(66)式和(67)式表明，即使施加于传感器的应力恒

定不变，但传感器系统各组成结构的应力，会随时间而改变。但传感器各部分结构应力的时变机制不同。对于粘接层，纯粹为其粘弹性力学行为的表现，而对于封装基体和光纤纤芯，则是它们与粘接层粘弹性行为力学耦合的结果。

2.4　光-力转换的时变关系

在光纤为匀质、各向同性，且仅受轴向和径向荷载作用时，光纤光栅中心反射波长 λ_B 与光纤纤芯轴向应变 ε 之间的关系为[14]

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\varepsilon, \tag{68}$$

式中 λ_B 为光纤光栅中心反射波长，$\Delta\lambda_B$ 为在光纤轴向应变为 ε 时 λ_B 的移动值，P_e 为

$$P_e = (n^2/2)[P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})], \tag{69}$$

在(69)式中，P_{11} 和 P_{12} 为纤芯的弹光系数，μ 为泊松比。将(38)式、(64)式与(65)式分别代入上式，并引入时间变量得

$$\Delta\lambda_B(t) = (1 - P_e) \times L^{-}\left\{\frac{\bar{\beta}[\sinh(\bar{k}l_s) - \bar{k}l_s\cosh(\bar{k}l_s)]}{\bar{k}l_s}\varepsilon_m(s)\right\}\lambda_B, \tag{70}$$

$$\Delta\lambda_B(0) = \lim_{t\to 0}\Delta\lambda_B(t) = (1 - P_e)\frac{\beta[\sinh(kl_s) - kl_s\cosh(kl_s)]\varepsilon_m}{kl_s}\lambda_B, \tag{71}$$

$$\Delta\lambda_B(\infty) = \lim_{t\to 0}\Delta\lambda_B(t) = (1 - P_e)\frac{\beta_\infty[\sinh(k_\infty l_s) - kl_s\cosh(k_\infty l_s)]\varepsilon_m}{k_\infty l_s}\lambda_B. \tag{72}$$

(70)式～(72)式分别为光纤光栅应变传感器光-力转换时变关系的任意解、瞬态解和稳态解。

2.5　光-力转换的时变分析及其可靠性

光-力转换的分析内容，包括互逆的两个方面，即：已知传感器所在的环境应变 $\varepsilon_m(t)$，确定光纤光栅光中心反射波长随时间的变化 $\Delta\lambda_B(t)$，这首要是为分析光-力转换方程的可靠性，进而分析光纤应变传感器光-力转换的时变效应；反之，作为传感器观测信号的分析、标定或精度分析、误差估算，则是根据观测到的光中心反射波长的移动量 $\Delta\lambda_B(t)$，推算观测应变的大小 $\varepsilon_m(t)$，此过程亦可称之为传感器所在环境应变的光时变反演。

光力转换分析结果的可靠性，取决于(70)～(72)式中各参数的可靠性，包括传感器粘结材料粘弹性模型的可靠性，以及应变传递关系瞬态解、即弹性解的可靠性。

3　结　　论

基于光纤光栅应变传感的基本原理及粘弹性力学的基本理论，建立了一种简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程。方程的建立忽略封装基体和纤芯的粘弹性力学行为，同时综合考虑观测环境-封装基体-粘结层（或涂层）-光纤纤芯之间的弹性和粘弹性力学耦合机制，使得建立的方程既包含了传感器的所有几何特征参数和力学特征参数，又可大大简化光-力转换的时变分析过程。解析了光-力转换的时变机制，给出光-力转换时变关系的任意解、瞬态解及稳态解，并对光-力转换方程的可靠性进行了分析。

参　考　文　献

1 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min *et al*.. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 497～498
朱浩瀚，秦海琨，张　敏 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法 [J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 497～498

2 Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al*.. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208～212
李鸿强，于晓刚，苗长云 等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 208～212

3 Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Aichun *et al*.. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249～251
李　阔，周振安，刘爱春 等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 249～251

4 Wu Yonghong. Structural analysis and test of FBG hydraulic engineering seepage sensor enca-apsulation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003
吴永红. 光纤光栅水工渗压传感器封装的结构分析与实验 [D]. 成都：四川大学, 2003

5 Wang Rengui. General design of Hangzhou Bay sea-crossing bridge [J]. *Highway*, 2009, (5): 11～18
王仁贵. 杭州湾大桥总体设计 [J]. 公路, 2009, (5): 11～18

6 Lu Youmei. Practice of engineering construction and management-taking the three Gorges project as an example [J]. *Engineering Science*, 2008, **10**(12): 17～23
陆佑楣. 工程建设管理的实践——以三峡工程为例 [J]. 中国工程科学, 2008, **10**(12)17～23

7 Wang Gongshan, Zhang Zhizhong. Polymer Material Science [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995
王公善，张智中. 高分子材料学 [M]. 上海：同济大学出版社, 1995

8 Yang Tingqing. Viscoelastc Mechanics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990
杨挺青. 粘弹性力学 [M]. 武汉：华中科技大学出版社, 1990

9 Ding Y., Shi B., Bao X. *et al*.. A study on the jacket effect of fiber optic sensor [C]. *SPIE*, 2004, **5579**: 43～50

10 Xu Zhiong, Farhad Ansari. Measurement of creep of optical fiber by a low coherent white light double interferometer system [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(3): 647～650

11 Li Jiong, Zhou Zhi, Ou Jinping. Interface transferring mechanism and error modification of em-bedded FBG strain sensor

based on creep part I: Linear viscoelasticity [C]. *SPIE*, 2005, **5765** 1061～1072

12 Ansari, Yuan Libao. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *J. Engineering Mechanics*, 1998, **124**(4): 385～394

13 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (8): 2067～2071
吴永红，屈文俊，邵长江 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程 [J]. 光学学报，2009，**29**(8)：2067～2071

14 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263～1276

2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选

为了提高中国光学期刊的学术水平和质量，吸引和催生优秀稿件，鼓励和培育优秀作者，促进中国光学科技事业发展，在中国杰出的战略科学家、中国近代光学与光学工程的奠基人与组织领导者、中国光学学会的创始人王大珩先生的支持下，中国光学学会决定组织学会主办的 10 种期刊并邀请中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)所有入网期刊参加 2010 年度“大珩杯”中国光学期刊优秀论文奖评选活动。

从发表在《光学学报》、《中国激光》等共计 39 种期刊(包括增刊)2007，2008，2009 年的学术论文中评选出优秀论文 40 篇(简讯、消息、综述类论文和上一届已经获奖的论文不再参评)。

评选程序及日程

1) 论文作者 2010 年 5 月 30 日前提交申请材料(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明)；

2) 6 月 10 日前各编辑部组织汇总各项统计信息，经评选推荐交中国光学学会，同时提交推荐评选成员名单；

3) 6 月 15 日学会公布经遴选组成的评选委员会名单，并开始以网络通信方式组织网络投票评审；

4) 7 月 15 日前评选结束，确定初步评选结果，并在中国光学学会网站(www.cncos.org.cn)以及中国光学期刊网站(www.opticsjournal.net)上公示名单；公示期 2 周，接受异议投诉。如无论文抄袭、剽窃等学术不端行为等举报或投诉，论文获奖生效。

5) 8 月 10 日在中国光学学会网站、中国光学期刊网和各相关期刊及网站上公布获奖名单。8 月下旬在天津举办的中国光学学会 2010 年学术年会上，举行颁奖仪式。

联系方式

网址：中国光学学会 http://www.cncos.org
　　　中国光学期刊网 http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm

联系人：段家喜，庞　立

电　话：021-69918426 010-82616604