

# 分布式光纤温度压力传感器设计

徐宁<sup>1,2\*</sup>, 戴明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了实现油田井下温度压力的全分布式测量, 提出了一种基于光纤散射原理的分布式温度压力测量方法。该方法通过对普通光纤进行封装设计, 制作成传感光纤。由于光纤传感器周围流体的温度和压力会对传感光纤内的散射光产生调制作用, 通过光纤解调仪解调出光纤拉曼散射参数和布里渊散射频移就能够实现温度和压力的实时在线测量。实验结果表明: 设计的分布式光纤温度压力传感器可以实现的温度测量分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 压力测量分辨率为 $0.07\text{ MPa}$ 。基本满足油田井下温度压力测量的全分布式、实时在线、可靠性高、精度高、抗干扰能力强等要求。

**关键词:** 光纤传感; 温度测量; 压力测量; 拉曼散射; 布里渊散射

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20150804.0629

## Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement

XU Ning<sup>1,2\*</sup>, DAI Ming<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: xuninghit@163.com*

**Abstract:** In order to realize fully distributed measurement for temperature and pressure in an oil well, a measurement method of distributed temperature and pressure based on scattering theory of optical fiber is established. The method makes the common optical fiber into the sensing fiber through package design. Since the scattered light in the sensor fiber is modulated by the temperature and pressure of the fluid surrounding the optical fiber sensor, the real-time on-line measurement of the temperature and pressure is accomplished through the demodulation of the parameters of Raman scattering and Brillouin scattering frequency shift within the optical fiber by the optical fiber demodulator. Experimental results indicate that the distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement can realize that the temperature resolution is  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  and pressure resolution is  $0.07\text{ MPa}$ . It can satisfy the requirements of fully distributed, real-time, on-line, higher

reliability, higher precision and strong anti-jamming for the measurement of temperature and pressure in an oil well.

**Key words:** optical fiber sensor; temperature measurement; pressure measurement; Raman scattering; Brillouin scattering

## 1 引言

在油田的生产开发过程中,油田井下参数的测量对于了解井下流体状态特性、优化生产、提高原油采收率、降低采油成本有着重要的作用,在井下诸多参数的测量中,尤其以温度和压力参数的测量最为重要。对于油田井下温度的测量,国内外一直采用红外热像仪和热成像仪。随着油田对井下温度测量精度、测量范围的要求越来越高,以及新型传感器的迅速发展,人们研制出越来越多的新型温度传感器,例如基于激光和超声波原理的井下温度测量传感器。对于油田井下压力的测量,常采用通过钢丝绳将测量装置下到井下某一深度,进行单点压力测量。根据测量原理,油田井下压力测量装置可以分为机械式和电子式,尽管机械式压力测量装置具有防震、抗电磁干扰、易维修等优点,但是其致命缺陷为必须停止生产才能测量,严重影响油田的生产效率;电子式压力测量装置具有寿命长、精度高等优点,但是容易受井下潮湿、电磁等环境的干扰,测量和传输过程易产生误差。

由以上分析可知,目前应用于油田井下温度压力测量的传统装置和仪器具有以下缺陷:(1)传统的测量装置为单点测量装置,随着测点的增多,测量系统将变得繁杂,并且增加测量成本;(2)由于油井具有大量腐蚀性液体,常规测量装置很难长期置于井下,不能实现油田井下温度和压力的实时在线测量;(3)传统测量装置需要油井停产才能测量,影响油田的生产效率,并且其测量数据不能反映生产过程中真实参数;(4)目前测量装置需要电信号来传递测量数据,由于井下电磁环境的干扰,数据测量有误差。

近年来,随着光纤通信技术的发展,基于光纤的传感技术逐步发展起来,并得到了广泛的应用,

其技术原理是光脉冲在光线中传输时,其散射光的相位、频率等参数会受到周围环境温度和压力的调制作用而发生变化,测量端通过解调设备解析出散射光的各种参量变化,就能间接计算出要监测点的温度和压力。由于光纤传感器具有精度高、体积小、抗电磁干扰和腐蚀性等优点,光纤传感器被应用于医疗、建筑、航天等领域<sup>[1-5]</sup>,同时也有多种类型的光纤传感器被提出并应用于油田井下的测量,其中光纤光栅传感器<sup>[6-8]</sup>应用最为广泛,但是光纤光栅传感器只能实现单点测量。本文提出的基于拉曼和布里渊散射原理设计的光纤传感器,除了具备光纤传感器的所有优点外,集传感和信号传输于一体,可实现远距离全分布式实时在线测量与监控。

## 2 光纤传感器测量原理

### 2.1 温度测量原理

光脉冲在光纤中传输时,会产生两种拉曼散射:斯托克斯散射和反斯托克斯散射<sup>[9]</sup>。

距离测量端  $L$  的斯托克斯光子数表达式为:

$$N_s = K_s v_s^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T), \quad (1)$$

距离测量端  $L$  的反斯托克斯光子数表达式为:

$$N_a = K_a S v_a^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T), \quad (2)$$

式中:  $v_s$  和  $v_a$  分别为斯托克斯频率和反斯托克斯频率,  $K_s$  和  $K_a$  分别为与斯托克斯和反斯托克斯散射截面有关的系数,  $\alpha_0$  为入射光传输损耗,  $\alpha_s$  和  $\alpha_a$  分别为斯托克斯和反斯托克斯光传输损耗,  $L$  为光纤距离,  $R_s(T)$  和  $R_a(T)$  分别为与光纤低能级和高能级布局数有关的系数<sup>[10-12]</sup>。

其中,  $R_s(T)$  和  $R_a(T)$  与光纤局部温度有关,

$$R_s(T) = [1 - \exp(h\Delta v/kT)]^{-1}, \quad (3)$$

$$R_a(T) = [\exp(h\Delta v/kT) - 1]^{-1}, \quad (4)$$

式中:  $h$  为普朗克常数;  $k$  为玻尔兹曼常数。

用式(1)除以式(2),并且带入式(3)和式(4)得到:

$$\frac{N_a(T)}{N_s(T)} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^4 \cdot \exp\left(-\frac{h\Delta v}{kT}\right) \exp[-(\alpha_s - \alpha_a)] \quad (5)$$

假设初始温度  $T = T_0$ , 则有:

$$\frac{N_a(T_0)}{N_s(T_0)} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^4 \cdot \exp\left(-\frac{h\Delta v}{kT_0}\right) \exp[-(\alpha_s - \alpha_a)L] \quad (6)$$

用式(5)除以式(6),经过整理有:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta v} \left[ \ln \frac{N_a(T)N_s(T_0)}{N_a(T_0)N_s(T)} \right] \quad (7)$$

测量端解调设备接收到  $L$  处的拉曼散射后,能够对其光学参数进行解调,进而通过式(7)就能计算得出  $L$  处光纤周围环境的温度值<sup>[13]</sup>。

## 2.2 压力测量原理

当光脉冲在光纤中传输时会产生布里渊散射,散射光的频率相对于入射光的频率会发生多普勒频移,称为布里渊散射频移,其表达式为<sup>[14]</sup>:

$$v_B = \frac{2v_0 n}{c} \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}} \quad (8)$$

式中: $v_B$  为布里渊散射频移, $n$  为光纤折射率, $c$  为真空中的光速, $\mu$  为光纤泊松比, $\rho$  为光纤密度, $E$  为光纤弹性模量。

光纤材料的折射率、泊松比、密度和弹性模量会受到周围环境温度和应力的调制作用而发生变化,因此  $v_B$  可以表示为:

$$v_B(T, \varepsilon) = \frac{2v_0 n(T, \varepsilon)}{c} \times \sqrt{\frac{E(T, \varepsilon)[1-\mu(T, \varepsilon)]}{[1+\mu(T, \varepsilon)][1-2\mu(T, \varepsilon)]\rho(T, \varepsilon)}} \quad (9)$$

由上式可知,光纤中布里渊散射频移为温度和应变的函数,为了进行压力测量,假设  $L$  处的温度为常数  $T_0$ , 式(9)可改写为:

$$v_B(T_0, \varepsilon) = \frac{2v_0 n(T_0, \varepsilon)}{c} \times \sqrt{\frac{E(T_0, \varepsilon)[1-\mu(T_0, \varepsilon)]}{[1+\mu(T_0, \varepsilon)][1-2\mu(T_0, \varepsilon)]\rho(T_0, \varepsilon)}} \quad (10)$$

由于光纤材料具有较大的弹性模量,因此其应变  $\varepsilon$  极小,将式(10)在  $\varepsilon = 0$  处进行泰勒展开,并且保留一次项,得到:

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) \left\{ 1 + \frac{n'}{n(0)}\varepsilon + \frac{E'}{2E(0)}\varepsilon - \frac{\rho'}{2\rho(0)}\varepsilon + \frac{\mu'\mu(0)[2-\mu(0)]}{[1-\mu^2(0)][1-2\mu(0)]}\varepsilon \right\} \quad (11)$$

令  $\Delta\mu = \frac{\mu'\mu(0)[2-\mu(0)]}{[1-\mu^2(0)][1-2\mu(0)]}$ ,  $\Delta E = \frac{E'}{2E(0)}$ ,  $\Delta n = \frac{n'}{n(0)}$ ,  $\Delta\rho = \frac{\rho'}{2\rho(0)}$ , 整理式(11)得到:

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) [1 + (\Delta\mu + \Delta E + \Delta n + \Delta\rho)\varepsilon] \quad (12)$$

对于同一种光纤,  $\Delta\mu$ 、 $\Delta E$ 、 $\Delta n$ 、 $\Delta\rho$  为与光纤折射率、弹性模量和密度有关的常数,因此在  $L$  处温度已知的情况下,通过输入端测量设备解调  $L$  处的布里渊散射频移,就可以计算出  $L$  位置处的应变值,进而通过转换,就可得到测量位置的压力值。

## 3 光纤传感器结构设计和灵敏度分析

### 3.1 光纤传感器的结构设计

由以上光纤温度压力测量原理可知,本文设计的传感器需要两根光纤进行温度和压力双参数的解调。由于拉曼散射信号在多模光纤中更为明显,因此选用 G651 多模光纤作为温度测量传感器;布里渊散射信号在单模光纤中传输的更远,因此选用 G652D 单模光纤作为压力测量传感器。

为了保护纤细易碎的裸光纤,同时应对油田井下高温、高压、腐蚀等严苛环境,本文将玻璃纤维增强树脂(GFRP)材料与光纤相结合,设计了高强度光纤传感器。具体制作过程为:将玻璃纤维纱浸润在树脂中,然后通过合束盘的作用,将两根光纤包裹在玻璃纤维纱的中心成为一束,接下来在加热炉中将玻璃纤维纱熔化,最后通过模具将其拉挤出来,经过冷却,便得到了 GFRP 材料与光纤固化一体的光纤传感器,其制作过程如图 1 所示。

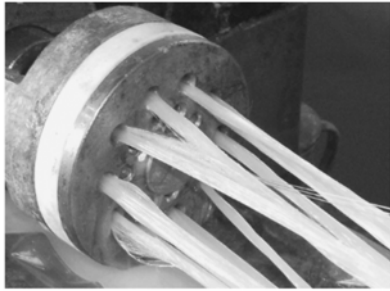


图1 光纤传感器制作过程

Fig.1 Manufacturing process of optical fiber sensor

3.2 温度测量灵敏度分析

截取长为  $l$  的光纤传感器进行分析,其简化结构为多层圆筒壁结构,如图2,由外到内分别为GFRP层、光纤涂覆层和传感光纤。图中  $\lambda_1$  为光纤涂覆层的导热系数,  $\lambda_1 = 0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_2$  为GFRP材料的导热系数,  $\lambda_2 = 2.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $R_1$  为内部传感光纤半径,  $R_1 = 62.5 \mu\text{m}$ ;  $R_2$  为光纤涂覆层外径,  $R_2 = 0.49 \text{ mm}$ ;  $R_3$  为GFRP层外径,  $R_3 = 3.5 \text{ mm}$ ;  $T_1$  为内部传感光纤测量温度;  $T_2$  为光纤涂覆层外表面的温度;  $T_3$  为GFRP层外表面温度。

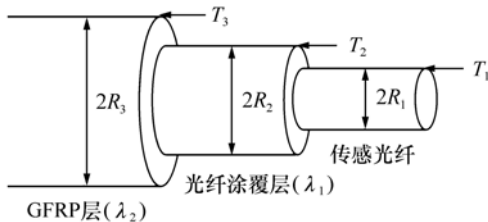


图2 光纤传感器温度传递模型

Fig.2 Temperature transfer model of optical fiber sensor

由传热学原理可知,对于稳态导热,圆筒壁径向热流量  $\Phi_s$  为:

$$\Phi_s = 2\pi r l \lambda \frac{dT}{dr}. \quad (13)$$

将上式在光纤传感器各传热界面进行积分,便得出封装后光纤传感器外表面温度  $T_3$  与内部传感光纤测量温度  $T_1$  之间的关系:

$$T_3 = T_1 + \frac{\Phi_s}{2\pi l} \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2} \right). \quad (14)$$

显然,由式(14)就得到传感器总传热系数:

$$U_z = \left( \frac{R_3}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)^{-1}. \quad (15)$$

将光纤传感器各层参数带入式(15),经过计算得出总传热系数  $U_z = 82.1978 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,可以看出,经过封装的光纤传感器依然具有很高的导热系数,其温度测量延迟很小,具有较高的灵敏度,完全能够满足油田井下温度测量的要求。

3.3 压力测量灵敏度分析

由于内部传感光纤直径相比光纤涂覆层非常小,现将光纤传感器压力传递模型简化为两层圆筒壁结构(图3),分别为GFRP层和光纤涂覆层。图中  $R_1$  为光纤涂覆层半径,  $R_1 = 0.49 \text{ mm}$ ;  $R_2$  为GFRP层外径,  $R_2 = 3.5 \text{ mm}$ ;  $E_1$  为光纤涂覆层弹性模量,  $E_1 = 4 \text{ GPa}$ ;  $E_2$  为GFRP层弹性模量,  $E_2 = 60 \text{ GPa}$ ;  $\mu_1$  为光纤涂覆层泊松比,  $\mu_1 = 0.5$ ;  $\mu_2$  为GFRP层泊松比,  $\mu_2 = 0.17$ ;  $P_1$  为光纤涂覆层外表面所受均布压力;  $P_2$  为光纤GFRP层外表面所受均布压力。

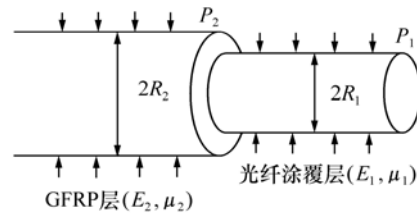


图3 光纤传感器压力传递模型

Fig.3 Pressure transfer model of optical fiber sensor

由广义胡克定律,受到压力  $P_1$  后,光纤涂覆层外表面的径向变形为:

$$\Delta R_1 = (1 - \mu_1) \frac{P_1}{E_1} R_1. \quad (16)$$

由弹性力学中的拉梅公式可得出GFRP层内壁表面位移:

$$\Delta R_2 = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{(R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2) R_1}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{(P_1 - P_2) R_1 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (17)$$

并且由位移边界条件可知  $\Delta R_2 = -\Delta R_1$ :

$$\frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{(R_1^2 P_1 - R_2^2 P_2) R_1}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{(P_1 - P_2) R_1 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} =$$

$$(1 - \mu_1) \frac{P_1}{E_1} R_1. \quad (18)$$

整理上式得到:

$$P_1 = P_2/K$$

$$K = \frac{1}{2} \left\{ (1 - \mu_2) \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 + (1 + \mu_2) + (1 - \mu_1) \frac{E_2}{E_1} \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] \right\}. \quad (19)$$

带入传感器材料各层参数得出,  $K = 0.65433$ , 即,  $P_1 = 1.1930P_2$ , 由此可以看出, 经过封装设计的光纤传感器对外部压力有放大作用, 具有较高的压力测量灵敏度, 能够满足油田井下压力的测量。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 温度测量实验

为了标定本文设计的光纤传感器的温度测量性能, 将传感器置于恒温箱内, 恒温箱温度范围设置为  $15 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ , 采用美国 MOI 公司的 DTS5100 拉曼光纤解调仪对测量的光学信号进行解调, 然后根据本文提出的基于拉曼散射原理的温度测量方法计算得出测量温度值。实验过程中间隔  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  进行一次数据采样, 并且进行升温与降温两个循环, 因此共取得 44 组数据, 最后将实验测量获得的数据结果绘制曲线图, 横坐标为恒温箱环境温度值, 纵坐标为用本文设计的光纤传感器结合拉曼光纤解调仪测量计算的出的恒温箱中的温度值, 如图 4 所示。

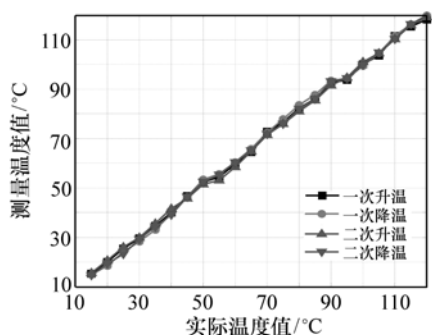


图4 光纤传感器温度测量实验结果

Fig. 4 Temperature measuring result of optical fiber sensor

由于光纤传感器置于恒温箱内, 随着恒温箱温度的变化, 周围热量通过光纤传感器的 GFRP 保护层传递到内部传感光纤。由 2.1 节可知, 光纤材料的  $R_s(T)$  和  $R_a(T)$  参数受到周围温度的调制作用, 从而使得其斯托克斯光子数  $N_s$  和反斯托克斯光子数  $N_a$  根据周围温度的变化而变化。在测量端首先使用拉曼光纤解调仪测量初始标定温度的斯托克斯和反斯托克斯光子数; 然后测量各个监测时刻的托克斯和反斯托克斯光子数, 并且与初始测量时的光子数进行比对; 最后通过式 (7) 就能够计算得出测量的环境温度值。由上图测量结果可以看出, 测量曲线线性度良好, 说明本文设计的 GFRP 封装光纤传感器具有较高的温度测量精度。

对测量数据进行处理, 得出了标定之后光纤传感器温度测量的各项性能指标, 如表 1 所示, 由表 1 可以看出, 本文设计的光纤传感器各项指标均能满足油田井下温度测量的要求。

表 1 光纤传感器温度标定结果

Tab.1 Measuring results of system temperature calibration

性能	指标
空间分辨率/m	1
温度分辨率/ $^\circ\text{C}$	0.1
灵敏度/GHz/MPa	1.011 4
线性度	0.029 2
迟滞	0.028 3

### 4.2 压力测量实验

为了标定 GFRP 封装光纤传感器的压力测量性能指标, 对其进行了压力测量实验。将光纤传感器置于充满机油的自制液压缸内, 然后将光纤传感器从液压缸密封接口引出, 连接到 AQ8603 布里渊光纤解调仪上, 进行布里渊散射信号的解调, 进而通过上文提出的压力测量原理计算液压缸内周围液体的静压力值。实验过程中, 维持环境温度恒定值, 对液压缸在  $0 \sim 20 \text{ MPa}$  范围内逐级进行加压和泄压, 压力变化  $2 \text{ MPa}$  进行一次数据采样, 共进行两个升降压力循环, 获得压力测量实验数据。以液压缸内压力为横坐标轴, 光纤

解调仪采样得出的布里渊频移为纵坐标,绘制了测量实验结果,如图5所示。

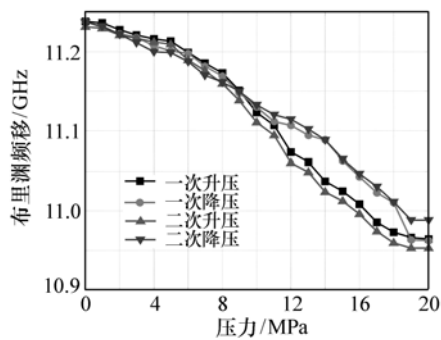


图5 光纤传感器压力测量实验结果

Fig.5 Pressure measuring result of optical fiber sensor

由于液压缸内的光纤传感器受到周围液体压力的作用,光纤材料的折射率、泊松比、密度和弹性模量会发生变化,由2.2节可知,其布里渊散射频移相应地就会受到压力和温度的调制作用而发生变化,因此由式(12)就可以对光纤周围压力进行测量。由图5测量结果可以看出,光纤传感器测量的压力值与布里渊频移近似呈线性关系,符合上文提出的基于布里渊散射理论进行压力测量的原理方法,用最小二乘法对以上测量数据进行线性拟合,得出布里渊散射频移与测量压力的线性关系为:

$$v_B = -0.0148P + 11.2650. \quad (20)$$

由于实验过程中,光纤解调仪的采样频率设置为1 MHz,因此根据式(20)可以得出此光纤传感器的压力测量分辨率为0.0676 MPa,对以上数据进行处理,就得到了光纤传感器压力测量标定

的各项性能指标,如表2所示。由表2可以看出,本文设计的光纤传感器各项指标均满足油田井下压力测量的要求。

表2 光纤传感器压力标定结果

Tab.2 Measuring results of pressure calibration

性能	指标
空间分辨率/m	0.5
压力分辨率/MPa	0.07
灵敏度/GHz · MPa <sup>-1</sup>	0.0148
线性度	0.0033
迟滞	0.0058

## 5 结论

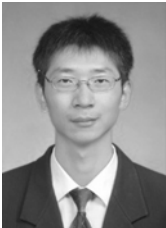
本文基于光纤拉曼散射和布里渊散射理论,提出了采用光纤传感器进行温度和压力分布式测量的方法。为了提高光纤传感器的实用性,本文确定了采用GFRP材料进行光纤传感器的封装结构设计,并且对封装之后的光纤传感器的温度压力测量灵敏度进行了分析,确定了传感器结构设计的合理性。最后,为了标定本文设计的分布式光纤温度压力传感器,分别进行了温度标定测量实验和压力标定测量实验,由实验结果可以看出,本文设计的全分布式光纤温度压力传感器温度测量分辨率为0.1℃,压力测量分辨率为0.07 MPa,满足油田井下温度压力参数的要求,具有较高的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学,2013,6(3):306-317.  
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Opt.*, 2013, 6(3):306-317. (in Chinese)
- [2] 赵明富,韩汐,王博思,等. 长周期光纤光栅的折射率梯度相应特性[J]. 光学精密工程,2013,21(2):316-322.  
ZHAO M F, HAN X, WANG B S, et al. . Response characteristics of refractive-index gradient based long-period fiber gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):316-322. (in Chinese)
- [3] 张帆,李秋顺,姚卫国,等. 覆膜长周期光纤光栅在生化分析中的应用及研究进展[J]. 中国光学,2014,7(1):57-67.  
ZHAO F, LI Q SH, YAO W G, et al. . Applications and progress of nanofilm-modified long period fiber grating in biological and chemical analysis[J]. *Chinese Opt.*, 2014, 7(1):57-67. (in Chinese)
- [4] 赵明富,王念,罗彬彬,等. 可同时测量蔗糖浓度和温度的组合光纤光栅传感器[J]. 中国光学,2014,7(3):476-482.

- ZHAO M F, WANG N, LUO B B, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and concentration of sugar solution based on hybrid fiber grating sensor[J]. *Chinese Opt.*, 2014, 7(3):476-482. (in Chinese)
- [5] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. *中国光学*, 2014, 7(4):519-531.
- WU J, WU H P, HUANG J B. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Opt.*, 2014, 7(4):519-531. (in Chinese)
- [6] WOSNIOKA A, NÖTHERA N, KREBBER K. Distributed fiber optic sensor system for temperature and strain monitoring based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis[J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1:397-400.
- [7] AMINOSADATI S M, MOHAMMED N M, SHEMSHAD J. Distributed temperature measurements using optical fiber technology in an underground mine environment[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25:220-229.
- [8] CHEN J H, HUANG X G, HE W X, *et al.*. A Parallel-multipoint fiber-optic temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011:1-3.
- [9] 徐宁. 基于光纤传感的二氧化碳驱井下相态分布研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- XU N. Study of downhole phase state distribution for carbon dioxide flooding based on fibre sensing[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] LI X R, GONG H P. Research on Raman amplification of pulse light Brillouin scattering signal[J]. *SPIE*, 2011, 8332:256-263.
- [11] KAURA J, SIERRA J. Successful field application in continuous DTS monitoring under harsh environment of SAGD wells using improved optical fibre technology[J]. *International Thermal Operations and Heavy Oil symposium*, 2008, 1:19-29.
- [12] KLUTH R. Fibre-optic DTS flow profiling installed in advanced MRC well[J]. *J. Petroleum Technology*, 2009:30-32.
- [13] GLASBERGEN G, GUALTIERI D, DOMELEN M, *et al.*. Real-time fluid distribution determination in matrix treatments using DTS[J]. *SPE Production and Operations*, 2009, 24(1):135-146.
- [14] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, DIATZIKIS, *et al.*. Simultaneous optical fibre distributed measurement of pressure and temperature using noise-initiated Brillouin scattering[J]. *SPIE*, 2000, 4185:772-775.

#### 作者简介:



徐 宁(1987—),男,山东莱阳人,博士研究生,研究实习员,2013年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光电探测成像结构设计和优化分析方面的研究。E-mail:xuninghit@163.com



戴明(1965—),男,湖北潜江人,博士生导师,研究员,1993年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail:daim@vip.sina.com