

文章编号 1004-924X(2014)08-2001-06

## 光纤流量非浸入式测试系统

尚盈\*, 刘小会, 王昌, 赵文安

(山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014)

**摘要:**提出了一种基于湍流振动原理的非浸入式流量测量方法。该方法通过在油管外壁缠绕特定长度的传感光纤,并在传感光纤两端焊接光纤光栅组成光纤流量传感单元。由于流体流过管壁时湍流产生动态压力,动态压力会导致缠绕在管壁上的传感光纤相位发生变化;通过光纤干涉仪技术、时分复用技术及相位载波调制解调技术解调出相位信息,即可实现流量的在线监测。实验数据分析显示,得到的相位变化与流速呈二次曲线关系,设计的实验系统可实现 $5\sim 50\text{ m}^3/\text{h}$ 流量的实时在线测量。由于采用光纤作为传感器感知流量信号,该方法结构简单可靠,灵敏度高,避免了传感光纤流量计需要浸入流场的缺陷,是井下流量测试的理想方法。

**关键词:**光纤传感;光纤干涉仪;光纤光栅;流量测量;湍流振动;动态压力

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2001

## Non-intrusive optical fiber flow measuring system

SHANG Ying\*, LIU Xiao-hui, WANG Chang, ZHAO Wen-an

(Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

\* Corresponding author, E-mail: sy81012607@163.com

**Abstract:** A non-intrusive flow test method based on turbulent vibration principle is proposed. The method wounds a specific length of sensing fiber tightly around the outer wall of a pipe and connects the optical fiber gratings at both ends, then the sensing fiber and the optical fiber gratings compose a flow sensing unit. When the fluid flows through the pipe, the dynamic pressure is generated by the turbulence, and the dynamic pressure causes the light phase shift of the sensing fiber to change. The phase information is demodulated by the fiber optic interferometer technology, time division multiplexing technology and phase generated carrier modulation and demodulation techniques, and the flow was detected in line. The experiments show the relationship between phase change and flow rate is a quadratic curve and the fluid flow monitoring range of the experimental system is from  $5\text{ m}^3/\text{h}$  to  $50\text{ m}^3/\text{h}$ . As the optical fiber is to be a flow sensing signal, the method is characterized by a simpler structure, higher sensitivity. It overcomes the shortcoming of an optical fiber sensing flowmeter in intrusive flow, and is an idea real-time monitoring method of flow for oil well logging.

**Key words:** optical fiber sensing; optical fiber interferometer; optical fiber grating; flow measurement; turbulent vibration; dynamic pressure

收稿日期:2013-08-29;修订日期:2013-10-07.

基金项目:山东省自主创新成果转化重大专项资助项目(No. 2011ZHZX1A0107);山东省博士基金资助项目(No. 2009BSC01028)

## 1 引言

在油田开发过程中,流量是石油生产和传输的关键参数。通过先进的技术手段长期地实时监测流量,可掌握油井的生产动态,从而进行产层评价和油井井下技术状况分析,为优化油气开采方案及提高原油采收率提供科学依据。油气的生产过程中存在复杂的流态变化,在井下高压条件下流体的含气量低,呈现出较好的均质流特征,基本上不存在滑脱现象,因此在井下测量流量要比在地面更加有利<sup>[1-2]</sup>。但传统的电子类传感器不能耐高温、高压,无法在高温、高压、腐蚀等恶劣的井下环境中长期工作。光纤传感器具有耐高温、高压、抗环境噪声和电磁干扰、本质安全等优点<sup>[3-6]</sup>,因而它在恶劣环境下的应用成为研究热点。

目前,在光纤流量检测研究方面,主要有涡轮式、涡街式、多普勒式等流量计<sup>[7]</sup>,但这些流量计在油井下工作时存在(涡轮式)卡堵、(涡街式和多普勒式)黏油污等问题,这些问题将导致此类流量计不能在井下长期可靠的工作。

本文提出了一种光纤非浸入式流量测试方法,利用管壁湍流振动测试原理和相位载波调制解调原理解调出缠绕在油管外壁上的传感光纤监测的相位变化,从而实现流量的在线监测。该方法结构简单可靠,灵敏度高,不直接接触流体,无污染,也不影响流体流场,可以进行长期可靠的实时监测,是井下流量测试的理想方法,在石油生产测井仪器中具有广阔的应用前景。

## 2 非浸入式光纤流量测试方法原理

非浸入式光纤流量测试方法主要是通过光纤传感技术解调出因湍流动态压力引起的光纤相位变化信息,确立相位变化与流速之间的量化关系,求解出相应的流量。

### 2.1 湍流振动测试原理

当流体分子到达管壁的时候,其 90% 以上的动能将转化为压力的形式,因此压力是流体与管壁传递能量的主要形式<sup>[8]</sup>。

流动速度<sup>[9]</sup>可表示为:

$$u = \bar{u} + u', \quad (1)$$

$$v = \bar{v} + v', \quad (2)$$

其中:速度平均值  $\bar{u} = \int_0^{T_1} u dt / T$ ,  $T_1$  是速度平均值  $\bar{u}$  稳定不变时的时长;  $u, u'$  分别是沿着主管轴方向的速度和速度瞬时脉动值,  $v, v'$  分别是垂直于主管道轴方向的速度和速度瞬时脉动值。因为在垂直于主管道轴方向没有净流体流入管道,所以在垂直方向的速度平均值为零,湍流流动速度等于瞬时脉动值。

尽管任意方向的瞬时脉动的平均值为零,但是不同方向的瞬时脉动值的乘积不为零,如  $u'v' \neq 0$ 。

设圆形管道的半径为  $r$ ,剪应力为  $\tau$ ,作用在管壁上的压力为  $p$ ,他们之间的关系为:

$$\frac{dp}{dx} = p' = -\frac{2}{r}\tau, \quad (3)$$

其中剪应力为:

$$\tau = -\rho \overline{u'v'}. \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可得:

$$p' \propto \overline{u'v'}. \quad (5)$$

由  $u' \propto v'$  得出:

$$p' \propto \overline{(u')^2}. \quad (6)$$

由公式(6)可以得出管壁上的动态压力  $p'$  与轴向瞬时脉冲平方值的平均值具有一定的关系。

流体运动产生的振动导致固液体之间相互作用,从而产生不断变化的流体压力,此流体的湍流强度是瞬时脉动值与平均流量的比值并且是恒定的<sup>[10]</sup>。

综上得出湍流强度为:

$$I = \frac{\overline{u'}}{u} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_i(t) - \bar{u}]^2}}{u} = C. \quad (7)$$

式(7)还可以写为:

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [u_i(t) - \bar{u}]^2 = \frac{NC}{N-1} \bar{u}^2 = s\bar{u}^2. \quad (8)$$

由式(8)可以得出湍流平均流速与湍流瞬时流速的标准方差成正比。

光纤径向应变引起的相位变化为<sup>[11-12]</sup>:

$$\Delta\varphi = 2nkl\epsilon(1 - P_e), \quad (9)$$

其中:  $n$  表示光纤纤芯的折射率,约为 1.47;  $k$  为光波在真空中的波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为激光光源的波长;  $l$  是光纤总长度,  $\epsilon$  是光纤轴向应变,  $P_e$  是

有效光弹系数。

根据机械原理,油管可以看做一个圆筒<sup>[13]</sup>,由其内压  $p$  引起的圆筒外壁圆周的应变为:

$$\epsilon = \frac{\Delta r}{r} = \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)}, \quad (10)$$

其中: $\Delta r$  为径向位移; $p$  是圆筒内压; $E$  是弹性模量; $r_1$  是圆筒内径; $r_2$  是圆筒外径; $r$  是圆筒半径( $r_1 \leq r \leq r_2$ ); $\epsilon$  是圆筒外壁的圆周应变。

将式(10)代入式(9)得出:

$$\Delta\varphi = 2nkl(1 - P_e) \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (11)$$

由式(11)可以得出油管内压  $p$  与光纤径向相位变化  $\Delta\varphi$  成正比。其中, $\Delta\varphi$  是流量实时监测过程中相位载波 (Phased Generated Carrier, PGC) 解调系统得出的测量值。

由式(6)、式(11)可以得出:

$$\Delta\varphi \propto p \propto \bar{u}^2. \quad (12)$$

由式(1)和式(8)可以得出:

$$\bar{u}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n [u_i(t) - \bar{u}]^2 = \bar{s}^2. \quad (13)$$

流量  $Q$  和流量  $u$  的关系为:

$$Q = \bar{u}E, \quad (14)$$

其中: $E$  是流体流过的横截面积。

由式(12)、式(13)和式(14)可以得出:

$$\Delta\varphi \propto Q^2. \quad (15)$$

由此可知, $\Delta\varphi$  与流量  $Q$  成二次关系。

### 2.2 相位载波调制解调原理

根据光学原理可知,光在相交区域内能够形成一组稳定的明、暗相间条纹或彩色条纹的现象称为光的干涉现象。通过干涉条纹的变化可以测定相当于光波波长数量级的距离的变化,即光的干涉测量原理,干涉仪的输出可表示为<sup>[14]</sup>:

$$I = A + B\cos[C\cos\omega_s t + \varphi_s(t)], \quad (11)$$

其中: $A, B$  为与输入光强成正比的常数, $C$  为相位调制幅度; $\omega_s = 2\pi f_c$ ,  $f_c$  为载波信号频率; $\varphi_s(t) = D\cos\omega_s t + \psi(t)$ ,  $D$  为声信号引起的相位调制幅度, $\omega_s = 2\pi f_s$ ,  $f_s$  为声信号频率, $\psi(t)$  是环境扰动等引起的初始相位的缓慢变化。

用贝塞尔函数展开式(1)得<sup>[15]</sup>:

$$I = A + B\{J_0(C) + 2\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cdot \cos 2k\omega_s t\} \cos \varphi_s(t) - 2\left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cdot \cos(2k+1)\omega_s t\right] \sin \varphi_s(t). \quad (12)$$

$\cos \varphi_s(t)$  和  $\sin \varphi_s(t)$  的贝塞尔函数展开为:

$$\begin{aligned} \cos \phi(t) &= [J_0(D) + 2\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cdot \cos 2k\omega_s t] \cos \psi(t) - 2\left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cdot \cos(2k+1)\omega_s t\right] \sin \psi(t), \\ \sin \phi(t) &= 2\left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega_s t\right] \cdot \cos \psi(t) + [J_0(D) + 2\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cdot \cos 2k\omega_s t] \sin \psi(t). \end{aligned} \quad (14)$$

PGC 解调电路如图 1 所示. 经过基频、二倍

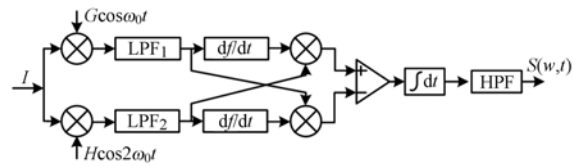


图 1 PGC 解调电路框图

Fig. 1 Block diagram of PGC

频相乘、微分交叉相乘、差分放大、积分高通滤波后,输出包含动态压力信息的  $S(\omega, t)$  为:

$$S(\omega, t) = B^2 GHJ_1(C)J_2(C)D\cos\omega_s t. \quad (15)$$

## 3 实验

### 3.1 实验光路设计

实验光路如图 2 所示,首先通过声光调制器将连续激光分为特定占空比的脉冲激光,在马赫-曾德尔干涉仪中,一臂通过相位调制器(PM)对激光进行角频率为  $\omega_0$  的正弦信号的载波调制,另一臂采用一定长度的延时光纤。脉冲激光进入马赫-曾德尔干涉仪后,一路激光经过调制,一路激光经过延时,两路激光分时进入由传感光纤和光纤光栅组成的光纤流量传感单元,如图 3 所示。经过光纤光栅的反射激光在接收端干涉形成脉冲序列如图 4 所示。经过分时采样电路分别将采样

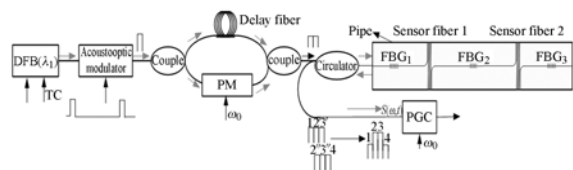


图 2 非浸入式流量实验光路示意图

Fig. 2 Optical path of non-intrusive flow experiment

脉冲 1~8 上的电压值归入到传感器 1~8 的采样队列中,然后送入 PGC 解调电路,解调出因动态压力引起的相位变化信息。如图 3 所示,在油管上布置了 8 个传感器,用以对流量进行分时采样,最后通过叠加平均提高了流量监测精度。



图 3 光纤流量传感器实物图

Fig. 3 Physical graph of fiber optic flow sensor

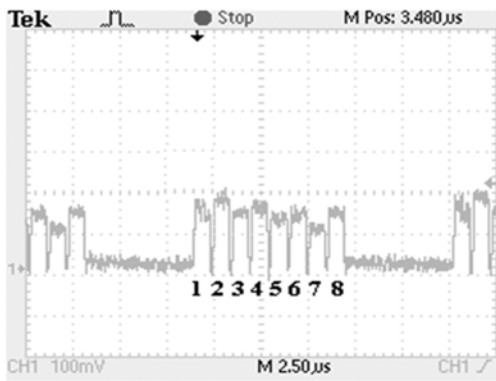


图 4 传感器干涉脉冲序列图

Fig. 4 Interference pulse sequence from fiber optic flow sensor

### 3.2 实验系统设计

实验流程如图 5 所示,通过调节水泵和调节阀实现流量控制,电磁式流量计用于标定试验中的实际流量数值。实验现场如图 6 所示,此实验系统能够把湍流振动产生的动态压力信号转变为

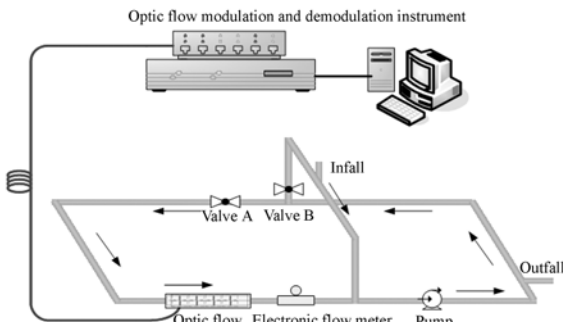


图 5 流量测试实验系统示意图

Fig. 5 Diagram of flow experimental system

光相位信号,并进行实时检测,利用 PGC 解调技术解调出反映动态压力信号的相位信息。根据 PGC 解调原理,本实验采用 80 kHz 的载波频率,可以检测到 0~40 kHz 的传感信号,图 6 是 24.7, 32.4, 40.2, 48.5 m<sup>3</sup>/h 4 种不同流速下,同一个传感器解调得到的动态压力信号频谱图。实验结果如图 7 所示,由图 7 可以看出,不同流量下其动态压力在某一些频段内存在着清晰界面,对实验数据进行逐频分析(频率步长为 1 kHz,频率为 0~40 kHz),发现在 10~12 kHz 的相位变化信号与流量信号具有良好的二次曲线关系。

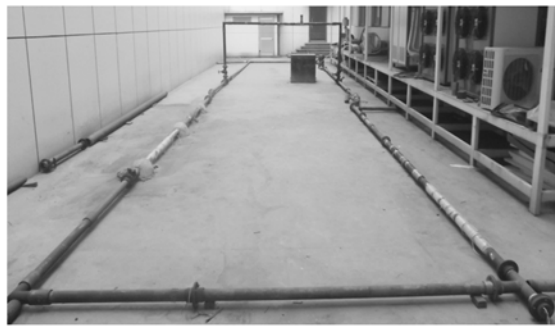


图 6 流量测试实验现场

Fig. 6 Flow experimental site

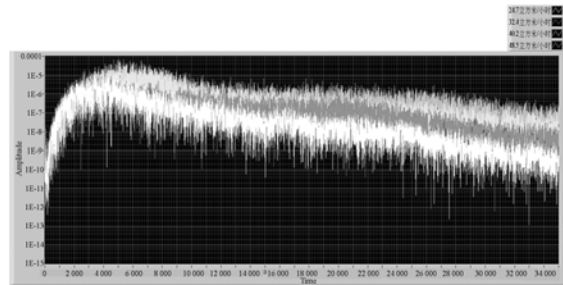


图 7 不同流量下的振动信号频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of vibration signal under different flow rates

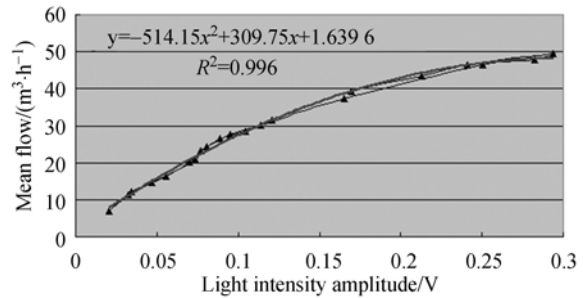


图 8 10~12 kHz 下的流量与光强关系图

Fig. 8 Relationship between flow rate and light intensity in frequency range of 10—12 kHz

表1 流量实验数据

Tab.1 Data of flow experiment

流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	光强/V	流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	光强/V
6.9	0.020 943	11.2	0.032 54
12.3	0.034 193	14.6	0.047 118
16.3	0.055 52	20.8	0.074 129
20.2	0.07	26.5	0.089 088
24.4	0.080 741	27.5	0.095 4
27.6	0.095 166	28.4	0.104 809
30.2	0.113 709	31.5	0.120 912
37.4	0.165 1	39.3	0.169 503
46.5	0.250 52	43.5	0.212 8
47.8	0.282 53	46.5	0.241 4
49.4	0.294 027		

## 参考文献:

- [1] 徐涛,周慧刚,孙新成.一种新型井下光纤多相流量计[J].石油机械,2004,32(1):52-55.  
XU T, ZHOU H G, SUN X CH. A new underground fiber optic multiphase flowmeter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2004,32(1):52-55. (in Chinese)
- [2] 张倩,乔学光,傅海威.光纤流量传感器的进展[J].光通信研究,2007,141(3):58-61.  
ZHANG Q, QIAO X G, FU H W. Advances in fiber-optic flowmeters[J]. *Study on Optical Communications*, 2007,141(3):58-61. (in Chinese)
- [3] 张旭革,高岑,王峰.应力传感光缆的应力传递特性[J].光学精密工程,2011,19(12):2891-2898.  
ZHANG X P, GAO C, WANG F. Stress transfer performance of strain sensing cable[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(12):2891-2898. (in Chinese)
- [4] 赵恩铭,雒莘梓,苑立波.光纤O<sub>2</sub>敏感探头的制备与性能测试[J].光学精密工程,2012,20(11):2412-2415.  
ZHAO E M, LUO SH ZH, YUAN L B. Preparation and performance testing of fiber-optic O<sub>2</sub> sensitive probe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2412-2415. (in Chinese)
- [5] 陶沛琳,延凤平,尹国路.双光束干涉型光纤传感器灵敏度与精度受光源谱分布特性的影响分析[J].红外与激光工程,2011,40(3):501-504.  
TAO P L, YAN F P, YIN G L. Effect of spectrum

## 4 结论

本文通过湍流振动原理实现了流量的非浸入式测量,避免了传感光纤流量计需要浸入流场的缺陷。采用光纤传感技术将湍流振动产生的动态压力信号转化为光相位信号,确立了光相位信号与流速的二次曲线关系,成功实现了非浸入式5~50 m<sup>3</sup>/h流量的实时在线测量。实验发现,在大流量的情况下测量精度较高,可达±5%;但小流量下动态压力较小,导致测量精度较低。下一步研究将围绕提高小流量情况下的非浸入式流量测试精度来展开。

- distribution of light source on sensitivity and precision of two-beam interferometric optic-fiber sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3):501-504. (in Chinese)
- [6] 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 Optics*, 2013,6(3):306-317. (in Chinese)
- [7] 李前萌,高占武,白海军.光纤流量传感器在石油领域中的进展[J].石油仪器,2004,18(4):1-3.  
LI Q M, GAO ZH W, BAI H J. Fibre-optical flowmeters in petroleum area[J]. *Petroleum Instruments*, 2004,18(4):1-3. (in Chinese)
- [8] ROBERT P, JONATHAN D, ALAN G. Flow rate measurements using flow induced pipe vibration[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004,126(3):280-285.
- [9] 李昆,汤荣铭,许宏庆.基于振动原理的无接触流量测量实验及模拟研究[J].实验流体力学,2007,21(1):77-81.  
LI K, TANG R M, XU H Q. Experimental and CFD research on non-intrusive flowrate measurement using flow-induced pipe vibration[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007,21(1): 77-81. (in Chinese)
- [10] MATTHEW T, ROBERT P R, MAYEIS D. Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow

- [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75 (7):2393-2041.
- [11] WU X Q, TAO R, ZHANG Q F. Eliminating additional laser intensity modulation with an analog divider for fiber-optic interferometers [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(5):738-741.
- [12] LIU Y L, ZHANG W T. Fiber laser sensing system and its applications [J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1):43-53.
- [13] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.  
Mechanical Design Manual Editorial Board. *Mechanical Design Manual* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 赵智亮, 夏伯才, 陈立华. 相移干涉测量中相移误差的自修正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1116-1121.  
ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1116-1121. (in Chinese)
- [15] 马明祥, 胡正良, 徐攀. 基于干涉仪动态相移的光纤激光器跳模检测方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6):0602013.  
MA M X, HU ZH L, XU P. Mode hopping detection for fiber laser based on dynamic phase changes in interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(6):0602013. (in Chinese)

#### 作者简介:



尚 盈(1981—),男,山东泰安人,硕士,助理研究员,2008年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光纤传感技术、光电检测技术的研究。E-mail: sy81012607@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)