

文章编号: 1005-5630(2015)02-0103-04

基于管壁振动频率特性的光纤流量监测系统

刘小会¹, 刘素香², 尚 盈¹, 王 昌¹

(1. 山东省科学院激光研究所 山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014;
2. 山东省科学院, 山东 济南 250014)

摘要: 为提高石油生产中原油采收率, 需对原油采集时的流量进行实时监测。提出一种基于管壁振动频率的光纤流量监测系统, 通过对缠绕在油管外壁的传感光纤感应流体经过管壁时由湍流产生的振动, 从而实现流量监测。通过实验总结出管壁的振动频率特性, 并在此频率特性范围内确定出平均流量与管壁振动加速度脉动值的标准方差的量化关系, 求解出相应的流量。

关键词: 石油生产; 流量; 光纤; 湍流; 振动

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.003

Study of optical fiber fluid flow monitoring system using pipe vibration frequency characteristic

LIU Xiaohui¹, LIU Suxiang², SHANG Ying¹, WANG Chang¹

(1. Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province,
Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China;
2. Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: Fluid flow is an extremely important parameter in the oil production field. Real-time monitoring of fluid flow parameter provides a scientific basis for increasing reservoir recovery. An optical fiber fluid flow monitoring system based on pipe vibration frequency characteristic is proposed. The vibration of the pipe is induced by turbulent flow when fluid flow passes through the pipe. The fiber optic sensors wrapped around the pipe outside the wall are used to detect the vibration information. The frequency characteristics of the vibration of the pipe are summarized. Then the relationship between mean flow rate and standard deviation of the vibration of the pipe induced by turbulence is determined.

Keywords: oil production; fluid flow; fiber optic; turbulent flow; vibration

引 言

石油生产中, 流量是油气井下的重要物理量, 实时流量监测能够为提高原油采收率提供可靠的科学依据。石油工业中被测流体的成分复杂, 流态多种多样, 工作现场的条件十分恶劣, 传统电子传感器在井下恶劣环境诸如高压、高温、腐蚀、电磁干扰下无法正常工作。与传统电子传感器比较, 光纤流量传感器具有如下优点: (1) 灵敏度高, 动态范围广, 准确性高; (2) 易于远距离测量; (3) 耐高压高温, 电气绝缘性好, 抗电磁干扰, 安全可靠; (4) 体积小, 质量轻, 集传感与传输于一体^[1-5]。

收稿日期: 2014-07-25

基金项目: 山东省自主创新成果转化重大专项项目(2011ZHZX1A0107); 山东省博士基金(2009BSC01028)

作者简介: 刘小会(1976—), 男, 助理研究员, 主要从事光纤传感设计以及检测仪器的研究。E-mail: windnuua@126.com

本文利用湍流诱发振动特性以及光的相位特性,提出了一种光纤流量监测系统,该系统的光信号在光纤传输的过程中会受到管壁振动信号调制,采用相位载波(phase generated carrier,PGC)调制解调技术完成流量信号的提取。光纤作为感知流量信号的传感器,结构简单可靠,灵敏度高,在石油测试仪器中具有广阔的应用前景。

1 光纤流量监测系统原理

1.1 管壁振动测试原理

研究表明,流体分子到达管壁时具有的动能有 90% 以上转化为压力的形式,故压力是流体与管壁传递能量的主要形式^[6]。

关于圆管湍流的研究表明,压力脉动和流速脉动成正比^[7],即

$$p \propto \bar{u}\bar{v} \quad (1)$$

式中: \bar{u} 为轴向平均速度; \bar{v} 为径向平均速度。充满液体的油管可以简化为一维梁,具有关系

$$p'(x) = \frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dV}{dx} \quad (2)$$

式中: V 为剪切力; M 为弯矩; x 为轴向位移; $p'(x)$ 为单位长度载荷函数。

由工程力学可知

$$p'(x) = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (3)$$

式中: y 为径向位移; EI 为抗弯强度。由梁的振动式可以得出

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{g}{A\gamma} EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (4)$$

式中: t 为时间; g 为重力加速度; A 为截面积; γ 为比重。结合式(3)和式(4)得出

$$p'(x) \propto \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

式(5)表明管壁振动的加速度和压力脉动成正比。

根据文献[8]中湍流强度的推导可以得出

$$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [u_i(t) - \bar{u}]^2} \propto \bar{u} \quad (6)$$

式中 N 为采样点数。由式(6)可以看出管道振动的标准方差和平均流速成正比。由于平均流量和平均流速成正比,故管道振动的标准方差和平均流量成正比。

由以上公式的推导可以得出平均流量与振动加速度标准方差有定量关系,这是光纤流量测量系统的理论基础。

1.2 光纤相位调制原理

光相位信息由光纤波导的总物理长度、折射率及其分布、光纤波导的横向几何尺寸决定。假定光纤波导折射率分布保持恒定,并已知施加在光纤上的扰动(外界信号),光通过长度为 L 的光纤后,出射光波相位延迟为^[9]

$$\varphi = \frac{2\pi nL\nu}{c} \quad (7)$$

式中: n 为光纤纤芯折射率; c 为真空中光速; ν 为光频。由此得出光相位的变化式为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nL\nu}{c} \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta\nu}{\nu} \right) \quad (8)$$

引起相位变化的因素可分为温度效应和应力应变效应。温度效应所引起的相位变化较为缓慢,可采用信号处理的办法消除其引起的相位变化,因此本文的光纤流量监测系统主要采用应力应变效应。光纤流量传感单元如图 1 所示,在油管外壁选择流量监测点,在流量监测点处缠绕特定长度的高灵敏传感光

纤,并在传感光纤末端焊接光纤光栅组成光纤流量传感单元。当流体经过油管时,光纤流量传感单元感应湍流引起的压力脉动,经过 PGC 技术解调出相应的流量信息。

1.3 相位载波调制解调原理

迈克尔逊干涉仪干涉信号可表示为

$$I = A + B\cos\Phi(t) \quad (9)$$

式中: A 为平均光功率; $B=\kappa A$, $\kappa\leq 1$ 为干涉条纹可见度; $\Phi(t)$ 为干涉仪的相位差。设 $\Phi(t)=C\cos(\omega_0 t)+\varphi(t)$,则式(9)可写为^[10]

$$I = A + B\cos[C\cos(\omega_0 t) + \varphi(t)] \quad (10)$$

式中: C 为调制深度; ω_0 为相位载波角频率; $\varphi(t)=D\cos(\omega_s t)+\Psi(t)$,其中, D 为传感器信号幅值, ω_s 为传感器信号的角频率, $\Psi(t)$ 是扰动信号等引起初始相位的缓慢变化。

根据 Bessel 函数,式(10)可表示为

$$I = A + B \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos(2k\omega_0 t) \right] \cos\varphi(t) - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos((2k+1)\omega_0 t) \right] \sin\varphi(t) \right\} \quad (11)$$

图 2 是 PGC 解调原理图,迈克尔逊干涉仪的输出信号 I 分别与二倍频、基频相乘,为了克服信号畸变和消隐现象,分别对两路相乘后的信号进行了微分交叉相乘(DCM),微分交叉相乘后的信号经过差分放大、积分运算后变换为信号 S_1 ,即

$$S_1 = B^2GHJ_1(C)J_2(C)\varphi(t) \quad (12)$$

式中: G 为基频系数; H 为倍频系数。将 $\varphi(t)=D\cos(\omega_s t)+\Psi(t)$ 代入式(12)可以得出信号 S_2 ,即

$$S_2 = B^2GHJ_1(C)J_2(C)[D\cos(\omega_s t) + \Psi(t)] \quad (13)$$

由式(13)可以看出,积分后得到的信号包含传感信号 $D\cos(\omega_s t)$ 和外部干扰信号,后者通常是慢变信号,通过高通滤波器(HPF)消除外部干扰信号,光纤流量监测系统的最后输出信号 S 为

$$S = B^2GHJ_1(C)J_2(C)D\cos(\omega_s t) \quad (14)$$

2 新型光纤干涉流量计实验系统

2.1 光路设计

连续稳定的激光被声波调制器调制为重复频率为 100 Hz、脉宽为 1 μ s 的脉冲激光,脉冲激光信号在经过马赫-曾德尔干涉仪后形成两个脉冲激光信号,如图 3 所示,两个脉冲激光信号依次注入光纤流量传感器,经过一系列光纤光栅反射,在接收端信号形成含有传感信号的脉冲序列。

2.2 实验系统设计

液体循环系统如图 4 所示,系统主要由油管、阀门、注水口、出水口、水泵、光纤流量传感器以及电磁流量计组成。首先通过注水口往油管内注入液体,使得液体充满整个循环系统,然后开动水泵,使得液体在油管内循环流动起来,通过调节阀门 A 和阀门 B 控制流过光纤流量传感器的流量,在光纤流量传感器附近安装一个电磁式流量计用于标定光纤流量传感器。

本系统为了能够检测到 0~40 kHz 的传感信号,在实验中采用了频率为 80 kHz 的载波频率。通过分析解调油管中传感信号的频率特性,确定流体振动信号频率范围主要集中于 10~30 kHz,实验结果如图 5 所示,在此频率范围内光纤流量监测系统能较好地完成流量监测。

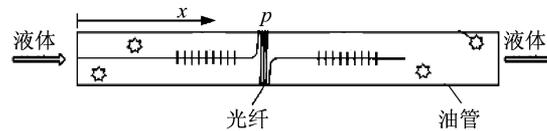


图 1 光纤流量传感单元
Fig. 1 Optical flow sensing unit

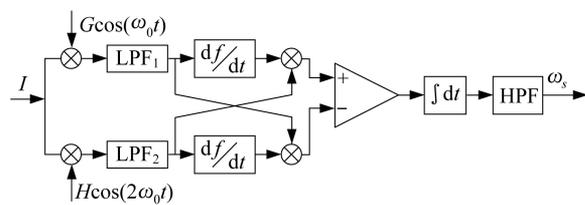


图 2 PGC 解调原理图
Fig. 2 Diagram of PGC

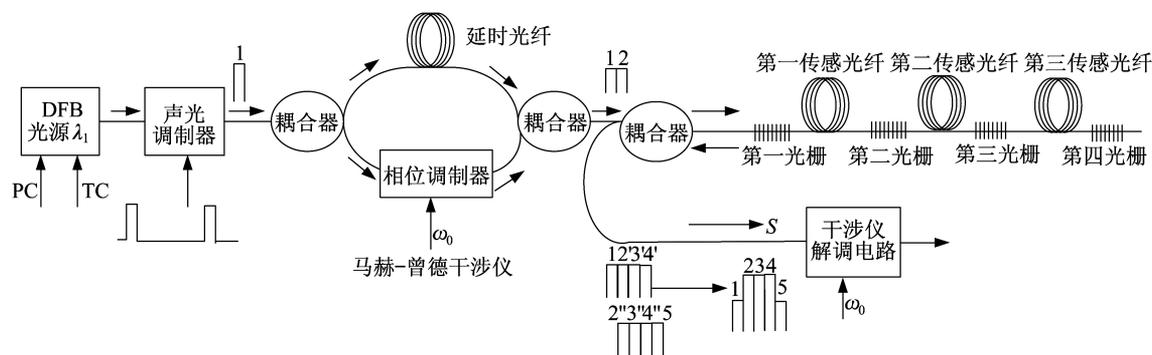


图 3 光纤流量监测系统光路图

Fig. 3 Schematic diagram of the fluid flow monitoring system

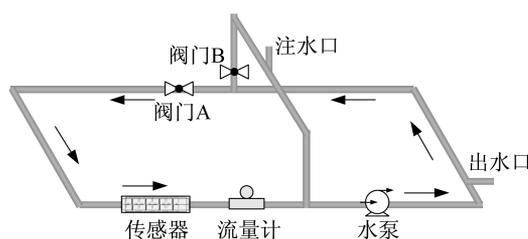


图 4 流量测试实验系统

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system

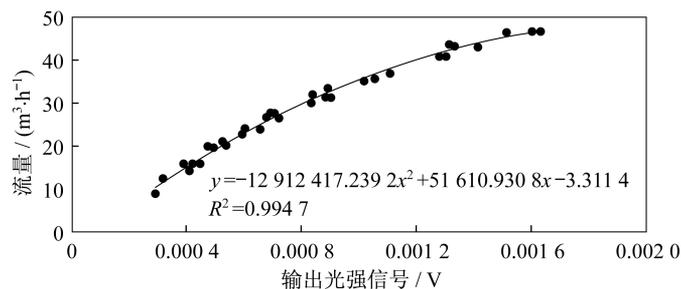


图 5 频率范围 10~30 kHz 下的光强与流量关系图

Fig. 5 Relationship between light intensity and flow in the frequency range between 10 kHz and 30 kHz

3 结 论

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量的二次曲线关系。通过研究流体流过管道时湍流引起的振动信号的频率特性,提出了一种光纤流量监测系统,成功实现了非浸入式测量范围为 5~50 m³/h 流量的在线测量。通过实验发现,在大流量的情况下测量精度较高,测量精度为±5%,为进一步实施油井实地实验提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨斌,田杰,江健武,等. 分布式光纤载流量/温度安全监测系统的研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(1): 75-79.
- [2] 吴红艳,肖倩,吴媛,等. 基于载波调制的光纤振动传感复用系统[J]. 光学仪器, 2014, 36(1): 40-45.
- [3] 周正仙,段绍辉,田杰,等. 分布式光纤振动传感器及振动信号模式识别技术研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(6): 11-15.
- [4] 胡玉瑞,唐源宏,李川. 光纤 Bragg 光栅流量传感器[J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 472-474.
- [5] 唐璜,缪璇,赵栋. 基于微分干涉原理的全光纤水下侦听技术[J]. 光学仪器, 2014, 36(2): 107-110.
- [6] EVANS R P, BLOTTER J D, STEPHENS A G. Flow rate measurements using flow induced pipe vibration[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(2): 280-285.
- [7] 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.
- [8] PITTARD M T, EVANS R P, MAYNES R D, et al. Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(7): 2393-2041.
- [9] WU X Q, TAO R, ZHANG Q F, et al. Eliminating additional laser intensity modulation with an analog divider for fiber-optic interferometers[J]. Optics Communications, 2012, 285(5): 738-741.
- [10] 赵智亮,夏伯才,陈立华,等. 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.

(编辑:刘铁英)