

文章编号: 1001-3806(2011)03-0376-04

## 水下管道泄漏检测技术及定位方法研究

杭利军<sup>1,2</sup>, 何存富<sup>1</sup>, 吴斌<sup>1</sup>, 骆建伟<sup>1</sup>, 郑兴强<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 机电学院, 北京 100124; 2. 北京一轻研究院, 北京 101111)

**摘要:** 为了实时进行水下管道泄漏监测和定位, 采用干涉的方法, 研制了一种基于 Sagnac 干涉仪的直线型分布式光纤管道泄漏监测系统。分析了该干涉仪应用于泄漏检测的原理及其泄漏源定位方法, 并通过实验研究了管道压力对检测系统的影响。当管道压力大于 0.35MPa 时, 系统的检测效果较佳, 且定位误差小于 1.17%; 压力小于 0.35MPa 时, 无法实现泄漏点定位。结果表明, 当管道压力大于 0.35MPa 时, 研制的水下管道泄漏检测系统能有效检测管道泄漏发生, 且较准确地确定泄漏源位置。

**关键词:** 光纤光学; Sagnac 干涉仪; 分布式光纤传感器; 泄漏检测; 管道

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.023

## Detection technology of underwater pipeline leakage and its location method

HANG Li-jun<sup>1,2</sup>, HE Cun-fu<sup>1</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, LUO Jian-wei<sup>1</sup>, ZHENG Xing-qiang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Industrial Technology Research Institute, Beijing 101111, China)

**Abstract:** In order to detect underwater pipeline leakage and locate leakage points in real-time, an in-line distributed optical fiber sensor was developed based on the principle of Sagnac interferometers. The measuring principle and the leaking source location method for the detection system were analyzed. The effect of the pipeline pressure on the performance of the system was studied. The results verify that the system can obtain optimal performance when the pipeline pressure is more than 0.35MPa, and the error is less than 1.17%; the leakage points can not be located when the pressure is less than 0.35MPa. The conclusion is that the system can realize underwater pipeline leakage detection and locate leakage accurately when the pressure is more than 0.35MPa.

**Key words:** fiber optics; Sagnac interferometer; distributed optical fiber sensor; leakage detection; pipeline

## 引言

海底管道传输具有经济、高效、安全、稳定等诸多优点, 因此被广泛应用于油、汽等流体的运输。但管道常年埋于水下, 容易发生腐蚀、疲劳破坏, 或使管道内部的潜在缺陷扩展为破损而引起泄漏事故, 这不仅带来重大的经济损失而且污染海洋环境, 故研究有效的管道泄漏检测技术, 对于保证海底管道安全运输极为重要。因此, 实现长距离管道泄漏检测和定位有着极其重要的意义。近年来, 管网漏检技术的研究在国内外有了较大的发展<sup>[1]</sup>, 但对于海底长距离、小泄漏的管道检测还显得无能为力。分布式光纤传感技术是近

年来发展起来的新技术<sup>[2,4]</sup>, 具有耐腐蚀、抗干扰能力强、灵敏度高、成本低、长距离连续监测的特点, 因此, 可适合长距离海底管道泄漏检测。

本文中利用新的 Sagnac 干涉型分布式光纤传感器进行水下管道泄漏检测和定位研究, 实验结果与理论分析较吻合。

## 1 管道泄漏检测原理

作者提出了利用基于 Sagnac 干涉仪的分布式光纤传感器, 它可以实现水下管道泄漏监测与泄漏点定位。如图 1 所示, 整个系统由放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源、传感光纤、法拉第旋转镜 (Faraday rotator mirror, FRM)、光电转换器、1×2 耦合器、环行器、相位调制器、偏振控制器、延迟线圈和信号处理几部分组成。从图中可以发现, 此系统仅有一条传感光纤, 并非传统 Sagnac 干涉仪的环形结构, 但是其利用 FRM 的反射作用, 可将传输光沿传感光纤的原路径反射, 形成环形光路。另外传感光纤末端的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10572009)

作者简介: 杭利军 (1979-), 男, 博士, 主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测与健康评价、智能仪器与虚拟仪器技术等。

E-mail: hlj@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2010-07-12; 收到修改稿日期: 2010-10-29

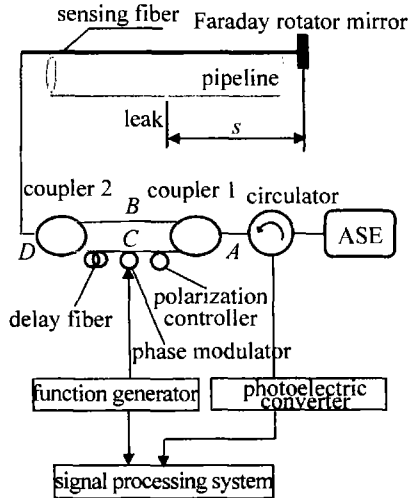


Fig. 1 Pipeline leak detection system

FRM 的磁光效应,不但可以消除传感光纤固有的圆双折射和线性双折射的影响,还可以消除温度、外界扰动等引起的互易双折射的影响<sup>[5]</sup>。系统中的光环行器,可消除反射光对光源的影响。由于系统中采用宽带光源,相干长度较短,因此干涉仪中仅有以下两个路径的光束能发生干涉:(1) A—B—D—FRM—D—C—A; (2) A—C—D—FRM—D—B—A。其它路径光由于不满足零光程差的特点,因此不会发生干涉。

利用此系统进行管道泄漏检测的原理是:当流体泄漏后,在泄漏点处由于管内外压差,使管道中的流体在泄漏处形成多相湍射流,这一射流不但使流体的正常流动发生紊乱,而且与泄漏孔壁及周围介质相互作用向外辐射能量,在管壁上激发出高频应力波<sup>[6]</sup>(即泄漏声发射信号)。该应力波携带着泄漏点信息(泄漏孔形状和大小等)沿管壁向两侧传播,由于传感光纤布放在管道上,因此应力波也将作用到光纤上,使光纤的长度和折射率都发生变化,导致光纤中传播的导光相位被调制,其表达式为:

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta \quad (1)$$

式中,  $\Delta\phi$  为光波的相位幅值,  $\beta$  为光波在光纤中的传播常数,  $L$  为受到管道泄漏噪声作用的光纤长度。

泄漏信号是宽频信号<sup>[7]</sup>,其作用到传感光纤上,对光纤中传播的光相位调制,光波经泄漏信号调制的相位变化表达式可写为<sup>[8]</sup>:

$$\theta(t) = \Delta\phi_m \sin\omega_s t \quad (2)$$

式中,  $\theta(t)$  为光波经泄漏信号调制后的相位变化量,  $\Delta\phi_m$  为光波被调制后相位变化幅值,  $\omega_s$  为泄漏信号角频率。

干涉仪中路径 1 和路径 2 传输光经泄漏信号调制后的电场表达式分别为:

$$\vec{E}_1 = E_{10} \exp[j\{\omega_c t + \theta_1(t) + \varphi_1\}] \quad (3)$$

$$\vec{E}_2 = E_{20} \exp[j\{\omega_c t + \theta_2(t) + \varphi_2\}] \quad (4)$$

式中,  $\vec{E}_1$  和  $\vec{E}_2$  分别是两束光的电场表达式;  $E_{10}$  和  $E_{20}$  分别为两束光的振幅(由于所用耦合器均为 3dB 耦合器,故  $E_{10} = E_{20}$ );  $\omega_c$  是光的频率;  $\theta_1(t)$ ,  $\theta_2(t)$  分别为两束光被泄露信号调制后的相位变化量;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为两束光的初始相位。

第 1 路径传播的光经调制的相位变化为:

$$\theta_1(t) = \Delta\phi_m \sin\omega_s(t - \tau_1) + \Delta\phi_m \sin\omega_s(t - \tau_2) \quad (5)$$

式中,  $\theta_1(t)$  为第 1 路径传播光经泄漏信号调制后的相位变化量,  $\tau_1$  是光从 A 点经 B 点, D 点第 1 次传播到泄漏点的时间,  $\tau_2$  是光从 A 点经 B 点, D 点传播到 FRM, 又经 FRM 反射后, 传播到泄漏点的时间。第 2 路径传播的光经调制的相位变化为:

$$\theta_2(t) = \Delta\phi_m \sin\omega_s(t - \tau_3) + \Delta\phi_m \sin\omega_s(t - \tau_4) \quad (6)$$

式中,  $\theta_2(t)$  为第 2 路径传播光经泄漏信号调制后的相位变化量,  $\tau_3$  是光从 A 点经 C 点, D 点第 1 次传播到泄漏点的时间,  $\tau_4$  是光从 A 点经 C 点, D 点传播到 FRM, 又经 FRM 反射后, 传播到泄漏点的时间。两束光输出的光强为:

$$I = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^* \quad (7)$$

式中,  $I$  为干涉仪输出的总光功率, 其中干涉项为:

$$I_{12} = \text{Re}(\vec{E}_1 \vec{E}_2^*) = 2E_{10}^2 \cos[\theta_1(t) - \theta_2(t) + \varphi_1 - \varphi_2] \quad (8)$$

式中,  $I_{12}$  为两束光干涉后输出的光功率。

通过信号解调技术<sup>[9-10]</sup>,可以得到由泄漏信号引起的干涉信号相位差:

$$\Delta\theta(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) = 4\Delta\phi_m \sin\omega_s(\tau_d/2) \times \cos(\omega_s \tau_p) \cos\omega_s(t - \tau_i/2) \quad (9)$$

式中,  $\Delta\theta(t)$  为泄漏信号引起的干涉信号相位差, 其包含了时间信息和泄漏声发射信号的频率信息;  $\tau_d = [(\tau_3 + \tau_4) - (\tau_1 + \tau_2)]/2$  为光传播经过延迟光纤所用时间;  $\tau_p = [(\tau_4 - \tau_3) + (\tau_2 - \tau_1)]/4 = ns/v$  为光从泄漏点传播到法拉第旋转镜所需时间( $s$  是泄漏点距法拉第旋转镜的距离,  $v$  为光在空气中的传播速度,  $n$  为光纤的折射率);  $\tau_i = \tau_2 + \tau_3 = \tau_1 + \tau_4$  是光经路径 1 或路径 2 传播所用的总时间, 因此传感器确定后, 此值为定值。令  $t' = t - \tau_i/2$ ; 则(9)式可写成:

$$\Delta\theta(t) = 4\Delta\phi_m \cos\omega_s t' \sin\omega_s(\tau_d/2) \cos(\omega_s \tau_p) \quad (10)$$

分析(10)式可知,  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  对系统的信噪比有较大影响, 当  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  的取值较小时, 信号较弱, 容易淹没于噪音中, 因此研制传感器时, 要设计合适的延迟光

纤长度,使  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  在泄漏信号的宽频范围内保持较大值,可提高系统的信噪比。

## 2 定位方法

对(10)式做傅里叶变换,由于此式为余弦函数,不满足绝对可积条件,因此,不能直接用傅里叶变换公式进行频谱分析,需在傅里叶变换时引入  $\delta$  函数(单位脉冲函数),则傅里叶变换后,其单边谱为:

$$F(\omega) = 4\Delta\phi_m \sin\omega_s(\tau_d/2) \cos(\omega_s\tau_p) \delta(f - f_s) \quad (11)$$

式中,  $F(\omega)$  为信号频谱,  $f$  为频率变量,  $f_s$  为泄漏信号频率。

分析(11)式可知,频域幅值与泄漏信号频率  $\omega_s$  以及顺逆两束光传播经过泄漏点的时间差  $\tau_s$  有关。由于  $\omega_s$  是宽频信号,并不是某单一频率成分的频谱输出,而是泄漏信号  $\omega_s$  各频率成分的输出组合。当泄漏发生后,在泄漏信号的宽频范围内会出现某些频率使  $\cos(\omega_s\tau_p) = 0$  (称为零点频率),即:

$$\omega_s\tau_p = \frac{N\pi}{2} \quad (12)$$

式中,  $N$  为奇数,可以注意到,对于确定的  $\tau_p$ ,将有一个或多个  $\omega_s$  使  $\omega_s\tau_p = N\pi/2$ ,这里取  $N = 1$ 。

由(12)式求得  $\tau_p$  后,再根据  $\tau_p = ns/v$  可得:

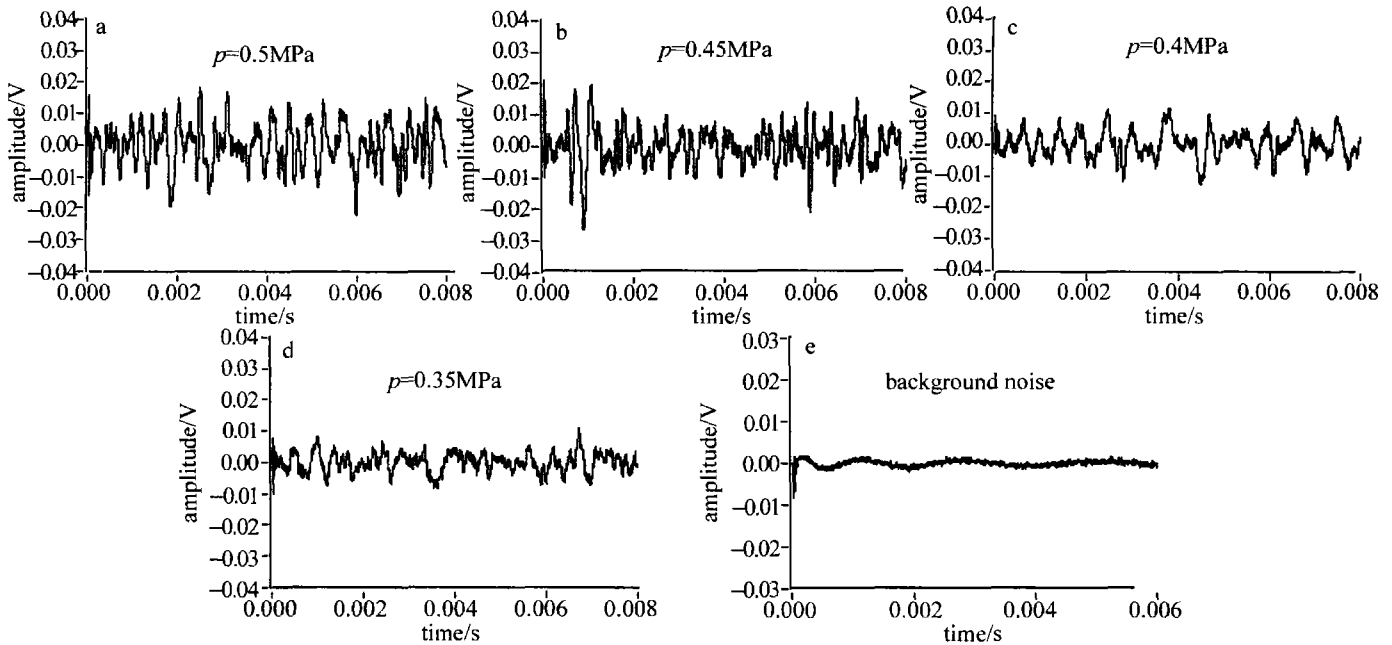


Fig. 3 Waveform and of leaking signals under different pressure

可知,当管道发生泄漏后,泄漏信号的时域波形幅值明显高于背景噪音,因此,通过时域波形可以判断是否有泄漏发生。

分析图 4 的频域信号可知,分别在 12.573kHz 和 12.451kHz 处有明显的低峰值点,此最低点即为零点频率,根据(13)式,则换算成泄漏位置为 3.9768km 和

$$s = v\tau_p/n = v/(4nf_s) \quad (13)$$

分析(13)式可知,传感光纤确定后,  $v, n$  是常数,泄漏位置到法拉第旋转镜距离  $s$  仅与零点频率  $f_s$  有关,因此确定零点频率后可得到泄漏位置。

## 3 实验研究

在实验室条件下进行了水下管道泄漏检测实验,实验装置如图 2 所示。水箱中充满水,将管道完全埋

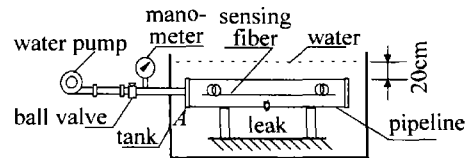


Fig. 2 The diagram of pipeline leak detection equipment

没于水箱内,水面高出管道约 20cm,并且在管道上开有一直径为 2.5mm 的泄漏孔,通过水泵给管道加入一定压力的水。

利用研制的分布式光纤管道泄漏检测系统(检测系统中使用康宁单模光纤作为传感光纤,纤芯折射率  $n = 1.5$ ),在泄漏孔  $d = 2.5\text{mm}$ 、泄漏位置为  $s = 4.024\text{km}$ 、管道压力  $p$  分别为 0.5MPa, 0.45MPa, 0.4MPa, 0.35MPa 下进行了海底管道泄漏检测实验,时域信号和频域信号分别如图 3 和图 4 所示。从图 3

4.0157km,与实际泄漏位置 4.024km 相比,最大绝对误差为 47.2m。另外分析图 4 可以发现,随着管道压力降低,定位效果越来越差,当压力降为 0.35MPa 时,零点频率图中仅有低频的扰动信号,不再有零点频率的出现。实验结果表明,基于 Sagnac 干涉仪的分布式光纤管道泄漏检测系统能够实现水下管道泄漏检测,

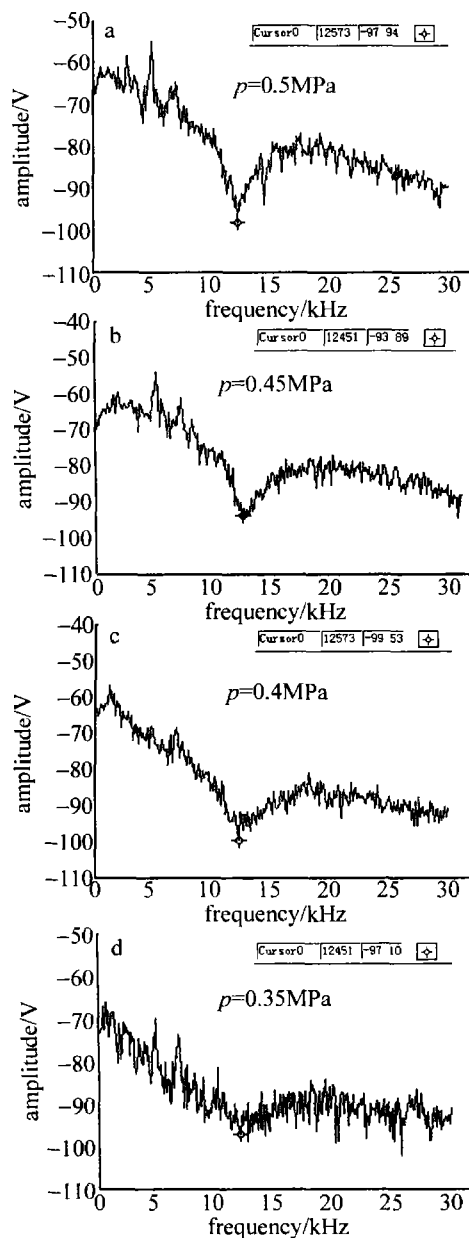


Fig. 4 Null spectrum of leaking signals under different pressure

但必须有足够高的管道压力,才能使泄漏产生的应力波有效调制传输光,从而实现泄漏点定位。

## 4 结论

研制的分布式光纤管道泄漏监测系统,能有效地实现水下管道泄漏检测,且定位误差在百米以内,因此系统的定位精度可满足实际工程需要。但此系统也存在着不足:当管道内压力较小时,该系统不能实现泄漏点的定位。对于压力较小的管道其检测灵敏度不足,将来可以通过光纤增敏或改变光纤的布放方法来改善系统对小信号的灵敏度,以便提高系统对低压力信号的检测能力。

## 参考文献

- [1] FUCHS H V, RIEHLE R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. *Applied Acoustic*, 1999, 33(1):1-19.
- [2] YU D K, QIAO X G, JIA Zh A, *et al.* The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):12-14 (in Chinese).
- [3] GAO J Zh, JIANG Zh D, ZHAO Y, *et al.* Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(11):633-635.
- [4] LIN W W. Novel distributed fiber optic leak detection system [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 278-279.
- [5] LI Zh N, SHEN L, YE X F. Study of polarization-insensitive fiber optic michelson interferometric sensors [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2002, 36(1):44-46 (in Chinese).
- [6] WANG Zh H, ZHANG L B, XIN R J, *et al.* Application of acoustic emission technique in pipeline leakage detection [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2007, 31(5):87-90 (in Chinese).
- [7] WASSEF W A, BASSIM M N, HOUSSNY-EMAM M. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. *Acoustical Society of America*, 1985, 77(3):916-923.
- [8] KURMER J P. Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1586: 117-128.
- [9] HE C F, HANG L J, WU B. Application of homodyne demodulation system for fiber optic sensors using phase generated carrier based on LabVIEW in pipeline leak detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6150:61502G1-61502G6.
- [10] KUANG W, ZHANG M, WANG L W, *et al.* Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber interferometers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(8): 1086-1090 (in Chinese).

(上接第342页)

- [20] YANG F G, YOU Z Y. End-pumped continuous-wave intracavity yellow Raman laser at 590nm with SrWO<sub>4</sub> Raman crystal [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(1): 14-16.
- [21] WANG W, GONG M L. Diode-pumped Q-switched Nd:YAG-KGW Raman laser operating in two-color modulation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2655-2661.
- [22] WANG W, GONG M L. Efficient high-output diode side-pumped electro-optical Q-switched Nd:YAG/KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Raman laser with conductive and air cooling [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(4): 294-297.
- [23] ZENDZIAN W, JABCZYNSKI J K, WACHULAK P, *et al.* High-repetition-rate, intracavity-pumped KTP OPO at 1572nm [J]. *Applied Physics*, 2004, 80(12):329-323.
- [24] ZENG Q Y, WAN Y, ZHANG B, *et al.* High-repetition-rate intra-

cavity optical parametric oscillator at 1.57 $\mu$ m [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6):673-678 (in Chinese).

- [25] LIU Z J. 2.54W 1535nm KTiOAsO<sub>4</sub> optical parametric oscillator within a diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Journal of Physics*, 2008, D41(13): 5112-5115.
- [26] DONG X L, ZHANG B T, HE J L, *et al.* High-power 1.5 and 3.4 $\mu$ m intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8):1668-1670.
- [27] KIENLE F. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8):7602-7610.
- [28] LIN S T. Fiber-laser-pumped CW OPO for red, green, blue laser generation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2361-2367.