

Research on Electromagnetic NDE Inspection Method for Broken Wire of PCCP

Haiming Qi¹, Jianguo Song², Youguo Cui²

¹Beihang University, Beijing

²Hebei Hengrun Group Co. Ltd., Hengshui Hebei

Email: qhm0318@126.com

Received: Nov. 13th, 2017; accepted: Nov. 23rd, 2017; published: Nov. 30th, 2017

Abstract

Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP), as a new type of pipeline for water delivery, has been widely used in water conservancy projects. During the operation of PCCP, environmental corrosion or improper operation will lead to corrosion or fracture of high-strength steel wire in the pipe, resulting in leakage, explosion and other accidents. Currently some nondestructive methods, such as electromagnetic eddy current inspection method, are widely used to test the broken wire and assess the health PCCP, and equipped with a counting-wheel or other tools to achieve the localization of broken wires. This paper presents a simple model of two famous electromagnetic detection technologies for PCCP broken wire, *i.e.* the remote field eddy current testing method and orthogonal electromagnetic detection method. Also the equivalent AC circuit is given. By simulation analysis the simple model is verified. The selection principle of electromagnetic detection frequency is analyzed, and 23 Hz is selected as the detection frequency. The design and implementation of the electromagnetic detection system are given, and the fault characteristics are effectively extracted through the broken wire tests.

Keywords

Broken Wire of PCCP, Remote Field Eddy Current Testing, Orthogonal Electromagnetic Detection, Modeling, Electromagnetic Frequency of Inspection

PCCP断丝的电磁无损检测技术研究

齐海铭¹, 宋建国², 崔友国²

¹北京航空航天大学, 北京

²河北恒润集团有限公司, 河北 衡水

Email: qhm0318@126.com

收稿日期：2017年11月13日；录用日期：2017年11月23日；发布日期：2017年11月30日

摘要

预应力钢管混凝土管(Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)作为一种新型的输水管材,被广泛应用于水利工程。在PCCP运行过程中,环境腐蚀或操作不当会导致管内高强钢丝的腐蚀或断裂,进而导致泄漏、爆管等事故。目前国内外普遍采用电磁涡流检测技术,对PCCP的断丝与金属管壁健康状态进行无损检测,检测系统在管内运行并配合计程轮等工具实现断丝位置的定位。本文针对国内外两种常用的PCCP断丝电磁检测技术,即远场涡流检测方法和正交电磁检测方法,建立了简化分析模型,并给出了等效交流电路,通过仿真分析验证了模型的正确性。分析了电磁检测频率的选取原则,建议选取23 Hz作为检测频率。给出了电磁检测系统的设计与实现,并经过了管道断丝试验验证,有效提取了故障特征。

关键词

PCCP断丝, 远场涡流检测, 正交电磁检测, 建模, 检测频率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

预应力钢管混凝土管(Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe, PCCP)是指在带钢筒的混凝土管芯上螺旋均匀缠绕预应力高强钢丝,并覆盖砂浆保护层而制成的管材,具有寿命长、抗震好、防渗漏等优点,广泛应用于给排水工程。PCCP的强度取决于高强钢丝,钢丝在管芯上产生均匀的预应力,能够抵偿由内压和外荷载产生的拉应力。但在生产、施工及运行过程中,多种原因会造成钢丝的损伤或腐蚀,进而出现钢丝断裂,引起管道强度下降,随着局部断丝数量的增加导致PCCP管壁屈服,最终引起泄漏、爆管等事故发生[1],断丝现象如图1所示。

目前国内外的水利工程普遍采用断丝检测、在线监测等方法,定期或实时对PCCP的健康状态进行评估,包括敲击回声检测法、远场涡流等电磁检测法、光纤传感器监测法、水听器监测法、超声及X光检测法等;检测形式分为管道内检测法、外检测法;按照不同管径及操作规程分为人工携带仪器检测法、管内浮游机器人自主检测法等[2]-[9]。

国外最著名的当属加拿大Pure公司开发的P-Wave电磁检测技术与Sound-Print光纤连续传感器声监测技术,已经在多个国家的水利项目中进行了工程验证,例如2000年至2008年成功应用于利比亚大人工河工程1655 km管道检测,共探测出6960节管道缺陷等[4]。

国内PCCP电磁无损检测的研究也取得了很多成果,例如苏州混凝土水泥制品研究院有限公司与信息产业部电子第二十二研究所利用远场涡流变压器耦合技术对PCCP断丝的无损检测进行研究,提取了PCCP断丝情况的识别特征,并进行了病态管道的模式标定工作[5]。

2. PCCP断丝的电磁检测方法

调查表明,目前研究与应用最多的还是PCCP断丝的管内电磁检测法,根据激励线圈与检测线圈的相对位置不同,检测方法主要分为两种:

1) 远场涡流检测法[5] [9], 激励线圈与检测线圈轴线平行于管道, 间隔 2~3 倍管径 D , 检测线圈工作于激励磁场的“远场区”, 探测激励磁场能量穿出管壁与钢丝耦合后又再次进入管壁的场量信息, 来判断传输路径上钢丝的损伤情况, 如图 2 所示。此外, 为避免检测设备长度过大而不利于转弯, 可采取铜、铁等金属做成屏蔽壳置于激励线圈与检测线圈之间, 由此可以缩短“远场区”的距离与检测设备的长度。此方法一般适用于小管径的 PCCP, 由管道机器人自主进行断丝检测行。

2) 正交电磁检测法[4] [5], 激励线圈轴垂直于管道, 检测线圈轴线平行于管道, 二者沿管道径向正交放置, 将直接耦合路径彻底切断, 检测线圈感应的全部是钢丝产生涡流二次场的间接耦合路径场量, 从而判断是否发生断丝情况, 如图 3 所示。此方法检测设备规模较小, 管内通过性更好, 适用于各类管径的 PCCP。

目前, 国内外针对 PCCP 断丝电磁检测技术取得的成果, 大多是基于有限元数值仿真分析与工程试验研究, 很少给出电磁检测的理论分析方法, 而传统麦克斯韦方程组给出的微积分形式解析解同样不便于工程计算应用。本文提出了一种 PCCP 断丝检测的简化分析模型, 并给出了等效的分析电路, 同时针对激励频率的选择也给出了定量分析。

3. 断丝电磁检测的建模分析

如前文所述, PCCP 断丝的电磁检测技术可归结为应用交变激励磁场作用于预应力钢丝, 检测并评估钢丝对接收场量影响的问题。为便于分析电磁检测方法, 提出以下假设条件:

- 1) 发射线圈的电流及电磁场量随时间均按正弦规律变化;
- 2) 忽略检测线圈与发射线圈的运动对磁场和涡流的影响, 即按似稳场量进行分析;
- 3) PCCP 模型中各参数均为各向同性且常量;

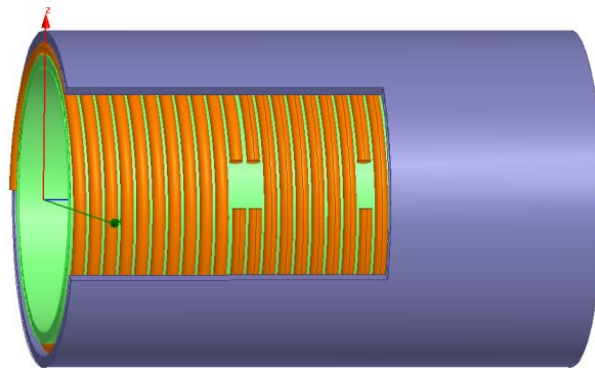


Figure 1. Broken wire of PCCP

图 1. PCCP 断丝现象

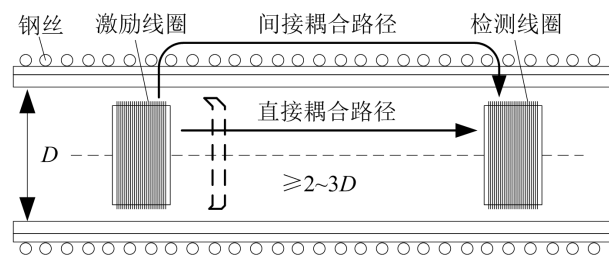


Figure 2. Method of remote field eddy current inspection for broken wire of PCCP

图 2. PCCP 断丝远场涡流检测方法

4) PCCP 钢筒等效为集肤效应的指数衰减模型;

5) PCCP 钢丝等效为轴向螺线管, 与发射线圈的激励源串联共同产生管内的电磁场量。

正常情况, PCCP 缠绕钢丝通过两端蘑菇头与钢筒焊点构成闭合回路, 在发射线圈的交变激励磁场作用下感应出二次场量 B_1 , 与激励场量 B_0 叠加后沿磁通回路穿透 PCCP 管壁后进入管内, 被检测线圈感应转化为电压信号; 断丝发生情况, 钢丝断口位置通过掺杂湿润的混凝土管芯构成回路, 等效线圈匝数与阻抗突变导致钢丝中感应电流突变, 产生的二次感应磁场 B_1 也骤变, 激励磁场 B_0 的磁通回路介质参数也产生变化, 最终体现在检测线圈中磁通量变化, 即接收信号幅度产生畸变。

由此, 图 2 所描述的远场涡流检测法可以简化为图 4 所示的模型 I, 图 3 所描述的正交电磁检测法可以简化为图 5 所示的模型 II。

针对这两个模型的电磁场计算分析, 可以进一步简化为一个普通的交流电路, 如图 6 所示, 其中 R_s 为激励源阻抗、 U_s 为激励源且频率为 ω 、 L_s 为激励线圈感抗、 L_r 为检测线圈感抗、 R_r 为检测线圈阻抗、 M_0 为激励与接收等效互感抗, Z_w 为钢丝的等效阻抗且随断丝发生而变化。

对应等效交流电路, 建立回路方程组:

$$\begin{cases} (R_s + j\omega L_s + Z_w)I_1 + j\omega M_0 I_2 = U_s \\ j\omega M_0 I_1 + (R_r + j\omega L_r)I_2 \end{cases} \quad (1)$$

求解方程组可以得到:

$$U_r = I_2 R_r = \frac{j\omega M_0 U_s R_r}{j\omega M_0 - (R_r + j\omega L_r)(R_s + j\omega L_s + Z_w)} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 钢丝等效阻抗 Z_w 的突变会导致检测线圈输出信号幅度和相位的阶跃变化。此外, 除了断丝会影响 Z_w 的突变, PCCP 两节之间的承插口位置预应力钢丝不连续, 也会导致 Z_w 参数的突变。

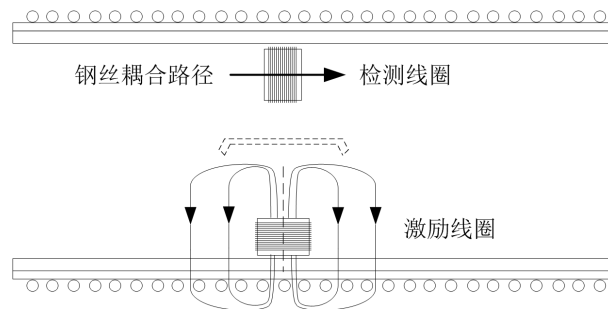


Figure 3. Orthogonal electromagnetic inspection for broken wire of PCCP

图 3. PCCP 断丝正交电磁检测方法

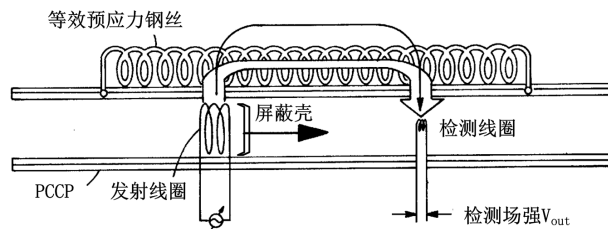


Figure 4. Simple model I of remote field eddy current inspection for broken wire of PCCP

图 4. PCCP 断丝远场涡流检测简化模型 I

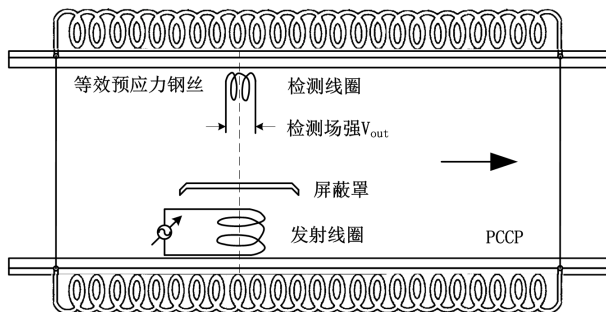


Figure 5. Simple model II of remote field eddy current inspection for broken wire of PCCP

图 5. PCCP 断丝远场涡流检测简化模型 II

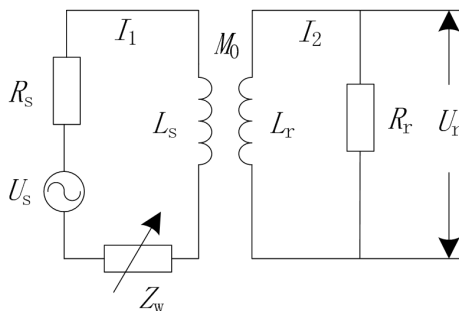


Figure 6. Simple mathematic model of remote field eddy current inspection for broken wire

图 6. 断丝远场涡流检测简化数学模型

Table 1. Parameters of PCCP

表 1. PCCP 的性能参数

介质	相对介电常数	电导率 S/m	相对磁导率
钢筒	≈1	10 ⁶ ~10 ⁷	80~100
钢丝	≈1	10 ⁶ ~10 ⁷	80~100
管芯	10~20	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	≈1

选取实际 PCCP 管道进行仿真分析，管道直径 1 m，单节长度 3 m，钢筒壁厚 2 mm，钢丝直径 7 mm，钢丝缠绕间隔 12 mm，混凝土管芯厚度 140 mm，外保护层厚度 24 mm，其它电性能如表 1 所示。仿真分析结果如图 7 所示，断丝位置及管道承插口位置的信号幅值及相位产生了畸变，可以验证建立的简化模型有效。

4. 电磁检测频率的选取原则

PCCP 管壁除了预应力钢丝，还有一层大约 1.5~2 mm 厚的防水钢筒和几十厘米厚的混凝土管芯，会对管内电磁信号产生较强的屏蔽衰减效应。要想提高接收线圈对钢丝间接耦合路径的感应强度，即提高检测系统的灵敏度，最佳检测频率的选择至关重要。

前文提到假设电磁信号在钢筒及管芯中等效为集肤效应的指数衰减模型，即：

$$\dot{B}_{out} = \dot{B}_{in} e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} l} \tag{3}$$

式中， B_{out} 为管外磁感应强度、 B_{in} 为管内磁感应强度、 f 为激励频率、 μ 为管壁的磁导率、 σ 为管壁的电导率、 l 为相对距离。可见发射频率越低，电磁场量的穿透性能越好。

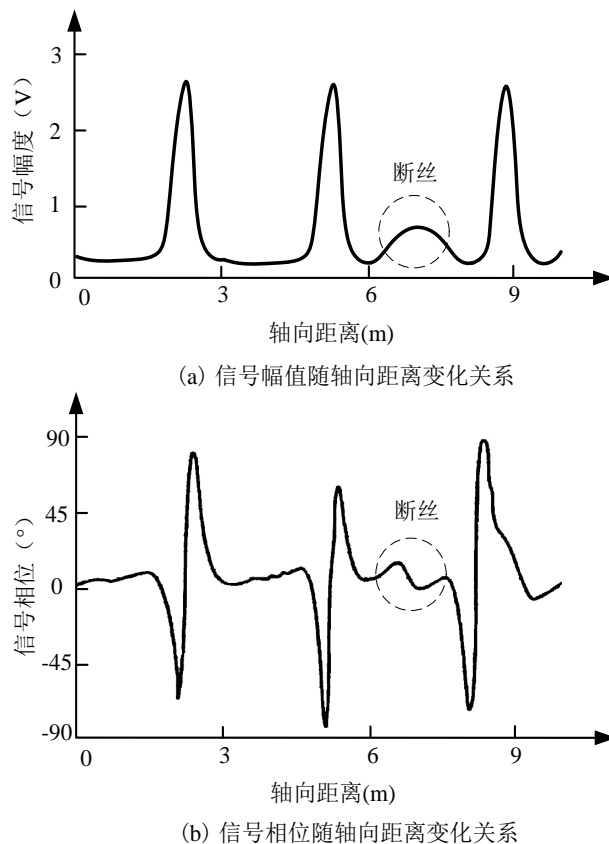


Figure 7. Simulation of PCCP broken wire
图 7. PCCP 断丝仿真分析

根据电磁感应定律，检测线圈的输出电压可以表述为：

$$|U_s| = \left| -\frac{\partial NS\dot{B}_m e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} l}}{\partial t} \right| = 2\pi fNS |\dot{B}_m| e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} l} \quad (4)$$

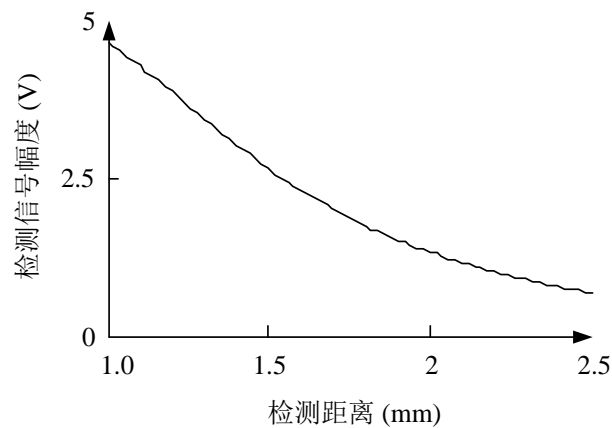
式中， N 为检测线圈匝数、 S 为检测线圈截面积。检测线圈一般采用漆包线绕制，线包半径 25 cm，匝数 500 匝。选取 PCCP 实际埋藏环境参数进行仿真分析，得到检测信号幅度随距离 l 和信号频率的变化关系，如图 8 所示。

由图 8 可知，随检测距离增加信号随指数规律衰减；检测频率在 20~40 Hz 范围内，既有利于信号穿透管壁，又有利于提高检测线圈的灵敏度。同时考虑到工业环境中工频信号 50 Hz 及其谐波的影响，建议选取 23 Hz 作为检测频率。

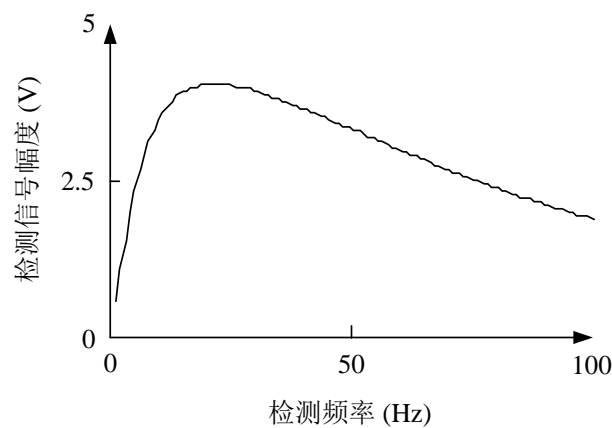
5. 检测系统研制及试验应用

如前文所述，PCCP 断丝检测系统主要是由发射器及接收器组成。图 9 给出了发射器的设计原理，由低频正弦信号生成器、信号放大器、发射线圈、合金磁芯及锂电池组成，峰值发射功率约为 500 mW。图 10 给出了接收器的设计原理，由感应线圈、标定线圈、合金磁芯、骨架及屏蔽线等组成。

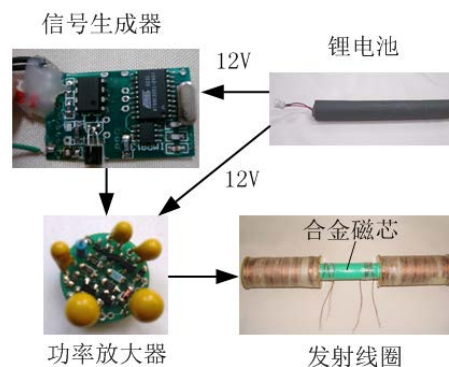
在河北恒润集团的 PCCP 生产工厂进行了 PCCP 检测系统的试验验证，管道直径 1.8 m，单节长度 5 m，钢筒壁厚 2 mm，钢丝直径 6.5 mm，钢丝缠绕间隔 11 mm。人工破坏预应力钢丝并把断口焊接导线引出接插件，分别验证钢丝接通与断开情况的管内磁场量探测情况，断丝位置在管道 1.75 m 位置，断丝数



(a) 检测距离因素的影响



(b) 检测频率因素的影响

Figure 8. Simulation of PCCP broken wire**图 8.** 仿真分析结果**Figure 9.** Principle of emitter**图 9.** 发射器的原理图

量 5 根，采用本文所研制的发射器与接收器，为避免直接耦合作用，采取 2 个接收线圈进行查分取样，试验条件如图 11 所示。

试验结果如图 12 所示，可见在 1.75 m 位置检测信号出现了幅度畸变，验证了断丝电磁检测系统的有效性。

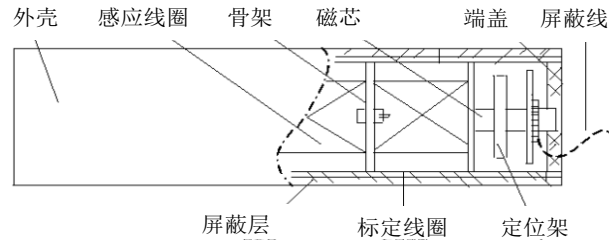


Figure 10. Principle of receiver

图 10. 接收器的原理图



Figure 11. Experimental PCCP and inspection instruments

图 11. PCCP 试验管道与检测仪器

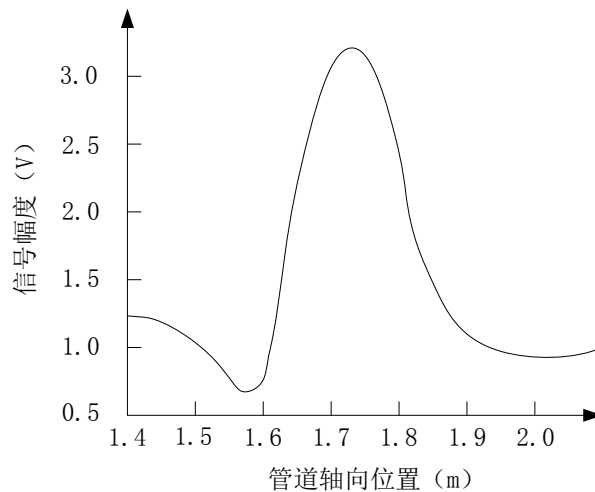


Figure 12. Experimental result of PCCP

图 12. PCCP 检测试验结果

6. 结论

本文提出了 PCCP 断丝电磁检测技术的简化模型并给出了等效交流电路，通过仿真分析验证了模型的正确性。分析了电磁检测频率的选取原则，建议选取 23 Hz 作为检测频率。给出了电磁检测系统的设计与实现，并经过了管道断丝试验验证，有效提取了故障特征。

基金项目

河北省科技计划项目“PCCP 智能监测、检测及缺陷定位技术研究”(项目编号: 162176224D)。

参考文献 (References)

- [1] 窦铁生, 燕家琪. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2014, 1(1): 29-33.

-
- [2] 李田, 郑瑞东, 朱军. 排水管道检测技术的发展现状[J]. 中国给水排水, 2006, 22(12): 11-13.
- [3] 董亮, 阿里木江. 某供水工程倒虹吸 PCCP 状态评估、风险评价及运行管理[J]. 特种结构, 2014, 31(1): 100-103.
- [4] 王五平, Elliott, J. 大口径输水管道自由浮游检漏系统[J]. 给水排水, 2009, 1(7): 114-116.
- [5] 徐进, 田华. 远场涡流技术在 PCCP 断丝检测中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2014, 1(12): 33-34.
- [6] Kong, X.J., *et al.* 自由游动检测仪对大口径 PCCP 管的现场检测[J]. 非开挖技术, 2011, 1(2): 134-138.
- [7] Biggar, A. (2014) Detecting Wire Breaks from the Outside of PCCP. *Pipelines*, **1**, 611-619.
- [8] Wang, W.P., Boon, J. and Kong, X.J. (2012) Condition Assessment of Live PCCP Line with Free-Swimming Electromagnetic Inspection System. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*, Wuhan, 19-22 October 2012, 1-7.
- [9] Mergelas, B.J., Atherton, D.L. and Kong, X.J. (2014) NDE Inspection of PCCP Using Remote Field Eddy Current Transformer Coupling. *Pipeline Division Specialty Conference*, Portland, 3-6 August 2014, 1-7.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org