

基于光纤振动传感技术的清管器定位研究

李强林¹ 张保存² 袁洪军²

1. 山东省天然气管道有限责任公司, 山东 济南 250000;

2. 山东省国实管道天然气有限公司, 山东 济南 250000

摘要:对天然气管道清管作业存在的跟踪定位偏差问题进行分析,发现清管器运行时与管壁产生明显的摩擦振动,尤其是管道接头、焊缝和拐点处。振动作用会传导至管道同沟敷设的光纤上,当光纤某处收到振动时,该处折射率发生变化,导致该处相位改变,将两个时刻的后向瑞利散射曲线相减即可检测和定位振动信号,基于相位敏感光时域反射原理,提出了采用分布式光纤振动传感实时跟踪定位的方法。经宣宁线齐河至长清至泰安段管道清管作业实测,定位性能良好,验证了方法的有效性。分布式光纤振动传感实时跟踪定位方法可实现清管器实时跟踪定位,降低清管器丢失卡堵造成管线停输的事故风险,对清管作业顺利完成具有一定借鉴意义。

关键词:分布式光纤振动;清管器;电磁脉冲法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.017

Research on Pig Positioning Based on Optical Fiber Vibration Sensing Technology

Li Qianglin¹, Zhang Baocun², Yuan Hongjun²

1. Shandong Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China;

2. Shandong Guoshi Pipeline Natural Gas Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract: To address the issue of deviation in tracking and positioning of the pig during pigging of natural gas pipeline, an analysis was done on the obvious frictional vibration between the pig and the pipe wall, especially at the pipe joints, welds and inflection points. Such vibration will be detected by the optical fiber in the same pipe trench. When vibration is detected at a certain location of the optical fiber, the refractive index changes, resulting in a phase change at that location. The location of that external vibration can be detected by calculating the difference between the two Backward Rayleigh Scattering Curves from that two moments. Based on the principle of phase-sensitive optical time-domain reflection, a method of real-time tracking and positioning using distributed optical fiber vibration sensing is proposed. The pigging operation at Qihe-Changqing-Taian section of Xuanning line using this technology shows that the pig positioning performance is good, and hence verifies the effectiveness of the method. This method

收稿日期:2019-12-08

基金项目:山东省天然气管道有限责任公司清管内测项目

作者简介:李强林(1989-),男,山东临沂人,工程师,学士,主要从事管道保护工作。E-mail:careercun@163.com

enables the real-time tracking and positioning of the pig, thereby reduce the risk of pipeline shut-down due to blockage by or loss of the pig. This is a good reference for executing successful pigging operations.

Keywords: Distributed optical fiber vibration; Pig; Electromagnetic pulse method

0 前言

目前,清管技术已经在中国石油、中国石化、中国海洋石油以及地方近 10 万 km 的油气管道及其他介质管道中得到了广泛应用^[1],清管作业也成为了保证管道输送效率、介质质量和了解管道基本情况的重要手段。而清管器准确跟踪定位是清管作业顺利进行的保障^[2-3]。

在清管器跟踪定位方面,当前较为普遍的方法是电磁脉冲法,通过接收机在清管器附近地面上接收信号跟踪位置和定位。李博等人^[4]创新使用了一种基于 GPS 和 GSM 的清管器智能跟踪技术;王海明等人^[5]论述了基于差压法的清管器远程在线跟踪定位。目前普遍应用的电磁脉冲法可靠方便且能准确定位,但缺点是主要依靠人力、跳点跟踪,受限于信号接收距离,无法实时跟踪定位。周琰等人^[6]提出的光纤振动检测方法无论在实时跟踪和准确定位上都较其他方法具有明显的优势,但主要停留在理论实验阶段,尚需探讨广泛的适用性。

因此,在清管器跟踪定位现有方法基础上,提出了分布式光纤振动传感实现实时跟踪定位。经宣宁线齐河至长清至泰安段管道清管作业实测,定位性能良好,验证了方法的有效性。

1 光纤振动传感测量原理

分布式光纤振动传感系统(DVS)是基于相位敏感光时域反射原理开发的^[7]。相位敏感光时域反射仪

(φ -OTDR)注入到光纤的光在传播过程中保持着相同的相位差,具有相同的频率。系统输出脉冲宽度区域内探测光是光线中产生的后向瑞利散射光的干涉结果^[8]。当光纤某个部位收到扰动时,光相位的变化将引起后向瑞利散射光强度的改变,通过对携带了扰动信息的后向瑞利散射光信号进行分析处理后,即可探测和定位外界扰动^[9]。

1.1 振动传感定位

在 φ -OTDR 分布式光纤传感系统中,当光纤某处收到振动时,由于弹光效应,该处折射率发生变化,导致该处相位改变^[10],由于干涉作用,光相位的变化将导致后向瑞利散射光强度发生变化,将两个时刻的后向瑞利散射曲线相减即可定位外界扰动信号^[11-13],原理见式(1),示意图见图 1。

$$l = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

式中: t 为发出脉冲到收到瑞利曲线发生变化的时间, s ; c 为真空中光速, $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; n 为光纤纤芯折射率, $n \approx 1.5$ 。

分布式光纤振动传感系统(DVS)主要由监测主机、振动传感光缆和监测软件三部分组成。方案实施阶段,主要经历安装系统、光缆探测、光缆标定、清管实时监测、分析监测数据五个步骤。管道和光缆同沟敷设可提高定位精度,现场敷设照片见图 2。清管器运行监测系统主要功能有:清管器运行轨迹展示、实时曲线展示、清管器信息展示、曲线坐标轴设置、参数设置与回放。

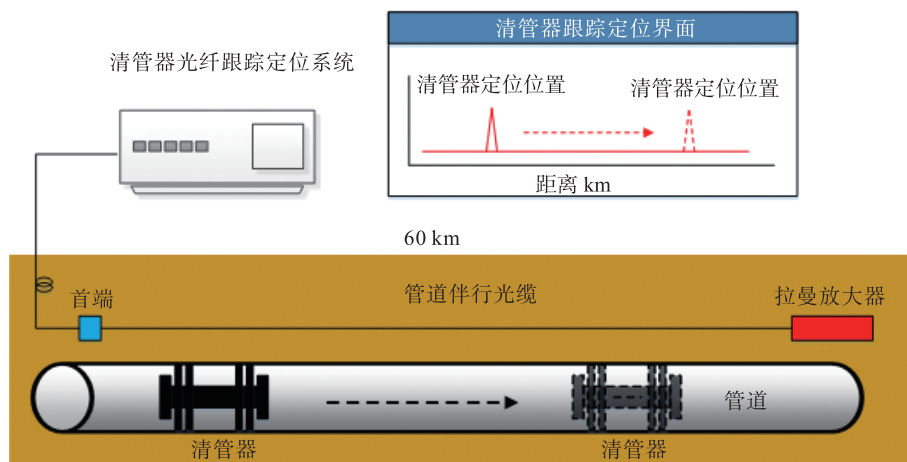


图 1 清管器振动引发激光干涉突变定位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser interferometer mutation location caused by pig vibration



图2 管道和光缆同沟敷设照片

Fig. 2 Pictures of the same trench laying of pipelines and cables

表1 长清至泰安清管跟踪记录表

Tab. 1 Tracking records of Changqing to Taian pigging

日期	时间	距长清站 /m	上一时间段速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	根据 DVS 光纤振动监测设备判断运行情况
2017-02-15	13:30	0	2.4	清管器通过长清站
	14:00	3 780	2.1	接收到连续振动信号
	14:24	6 660	2.0	接收到连续振动信号
	15:00	10 764	1.9	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	15:30	14 184	1.9	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	16:00	17 424	1.8	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	16:30	20 240	1.6	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	20:37	20 240	0	追踪到停止振动里程,配合锤击和电磁法定位
	21:00	24 656	3.2	追踪到清管器突然启动,振动信号强烈
	21:30	28 076	1.9	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	22:00	31 136	1.7	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	23:00	32 576	0.4	振动信号较弱,未能跟踪
	24:00	34 736	0.6	可追踪,创建 1 MPa 压差冲球
2017-02-16	1:00	41 216	1.8	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	1:25	42 420	0.8	可追踪到间歇前进的运动开始与结束位置
	2:10	42 420	0	追踪到停止振动里程,配合锤击和电磁法定位
	2:30	终点(泰安站)	1.5	创建 1 MPa 压差冲球,振动信号强烈

通过数据分析可得到,19.0~21.0 km 段、35.0~37.0 km 段以及 40.0~42.0 km 区间段速率接近 0,对应清管器该段运行缓慢乃至停球的位置,清管器运行速率有较大不均衡性。

长清至泰安测径清管器运行轨迹图见图 3。2 月 15 日 16:30 到 20:37,清管器第一次停滞,位置 20 240 m,停滞时长 4 h 7 min;通过数据分析,可以准确对清管器在管

2 光纤振动传感现场实验

系统安装与光缆探测,泰安站北连接长清站,将 DVS 监测系统主机安装在泰安站。其中,泰安至长清光缆长度 44.2 km,光缆 8 芯中有 4 芯已经使用,其余 4 芯光纤状况良好,无明显单点衰减,有利于实现长距离测量。通过现场对扰动信号的观察记录,发现整条线路总体噪声很少,只有极少数固定位置存在扰动,这种安静的环境非常有利于有效信号的发现,减少误判的可能。

2.1 皮碗测径清管器实时监测分析

2017 年 2 月 14 日,设备安装于泰安站,采用机械清管器进行清管作业,可有效跟踪清管器运行轨迹,并计算清管器在不同管段的运行速度。皮碗测径清管器实时跟踪监测分析记录见表 1。

道内的运行状态进行描述,为排查停球、卡堵点和管道变形提供了准确依据。为及时找到停球点,判断停球原因是管道变形卡堵还是清管自身停球^[14-15],采取了人工锤击制造较强振动信号标定位置的方法,同时利用电磁脉冲跟踪仪的定位模式,准确定位停球点^[16-17],锤击和定位标定记录见表 2。

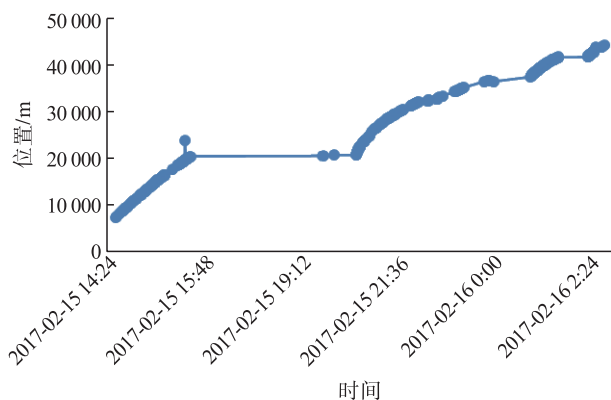


图 3 测径清管器运行轨迹图

Fig. 3 Operation track diagram of caliper pig

表 2 光纤振动标定定位记录表

Tab. 2 Optical fiber vibration calibration and positioning records

人工锤击点序号	管道实际里程 /m	标定距离(光纤标定距离)/m	与停球点偏差 /m
1	19 000	19 458	782
2	19 000 + 100	19 591	649
3	19 000 + 200	19 725	515
4	19 000 + 300	19 852	388
5	19 000 + 400	19 989	251
6	19 000 + 500	20 116	124
7	19 000 + 600	20 276	36
8	19 000 + 580	20 248	8
9	19 568(测 80 ~100)	20 240	0

通过近 10 次人工锤击地面,获取监测到的振动信号位置里程,同停球点位置里程 20 240 m 进行比对,据此找到了停球位置,开挖发现该处属于管道变形卡堵,在 4 h 内释放管道变形后,清管器顺利通过该点。利用该方法,清管过程中又相继找到了测 91 下游、测 102 下游等 5 处卡堵点。

2.2 适用效果分析

光纤振动监测手段用于清管器运动轨迹监测能够实时准确定位清管器运行情况,更关键的是能够第一时间发现清管器卡堵位置,借助该技术成功找到了宣宁线测 80-100 管道变形、测 91 下游、测 102 下游等 5 处卡堵点。停球卡堵点现场照片见图 4。



图 4 停球卡堵点现场照片

Fig. 4 Picture of stoppage jam

在宣宁线第一次漏磁检测作业中,全程运行中呈现出极低速运行的特征,传统通过监听坑来判定设备位置的方法的盲区时间会大大增加^[18]。而分布式光纤传感在线监测技术即使在极低速率下仍可实现监视,体现了光纤传感在实时监测和定位方面的优势,为清管作业的顺利开展带来了很大的方便^[19-20]。

3 结论

提出一套更加可靠、准确、实时的清管器跟踪定位组合方案,可以实现全程跟踪监测清管器运行状态的目标,清管作业完成后,利用智能清管器数据记录分析清管器整个运行状态和管道特征点,可以对特征点二次验证。下一步,借助搭载在智能清管器(PDL)的定位芯片和采集到的流速、压力分布数据,开展仿真和实验验证,以期提高定位精度。

参考文献:

- [1] 王沙汀,李晓莉. 天然气长输管道内检测技术[J]. 工程技术(文摘版). 建筑, 2016, 37(6): 328-329.
Wang Shating, Li Xiaoli. Internal Detection Technology of Natural Gas Long-Distance Pipeline [J]. Engineering Technology (Abstract Edition). Architecture, 2016, 37(6): 328-329.
- [2] 刘明,范楠楠. 输气管道清管问题探究[J]. 化学工程与装备, 2016(2): 123-124.
Liu Ming, Fan Nannan. Research on Pigging of Gas Transmission Pipeline [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016(2): 123-124.
- [3] 王会坤,罗京新,戚菁菁. 川气东送管道干线清管实践[J]. 油气储运, 2015, 34(4): 408-412.
Wang Huikun, Luo Jingxin, Qi Jingjing. Pigging Operation of the Sichuan-East Gas Transmission Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(4): 408-412.
- [4] 李博,张琳,赵晓利,等. 基于 GPS 和 GSM 的清管器智能跟踪系统[J]. 管道技术与设备, 2017(3): 46-49.
Li Bo, Zhang Lin, Zhao Xiaoli, et al. Pig Intelligent Tracing System Based on GPS and GSM [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(3): 46-49.
- [5] 王海明,刘博,邱红辉,等. 基于差压法的清管器远程在线跟踪定位[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 755-758.
Wang Haiming, Liu Bo, Qiu Honghui, et al. Remote On-line Tracking and Positioning of Pigs Based on Differential-Pressure Method [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 755-758.
- [6] 周球,田孝忠,谭东杰,等. 基于相干瑞利散射的多路振动检测方法及其检测系统: CN 201410437497.3[P]. 2014

-12-10.

Zhou Yan, Tian Xiaozhong, Tan Dongjie, et al. Multi-Channel Vibration Detection Method and Detection System Based on Coherent Rayleigh Scattering: CN201410437497.3 [P]. 2014-12-10.

- [7] 代晓东,刘江波,党 丽,等.国内外油气管道清管技术现状[J].石油工程建设,2017,43(1):1-5.

Dai Xiaodong, Liu Jiangbo, Dang Li, et al. An Overview on Current Status of Oil and Gas Pipeline Pigging Technology at Home and Abroad [J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43 (1): 1-5.

- [8] 刘建新,王玉亮,朱玉杰.含大量黑色粉末长输天然气管道的内检测前清管实践[J].油气田地面工程,2016,35(3):68-71.

Liu Jianxin, Wang Yuliang, Zhu Yujie. Pigging Operation Before Inner Examination of Natural Gas Pipeline with a lot of Black Powder [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2016, 35 (3): 68-71.

- [9] 牛生辉.天然气长输管道清管器定位研究[J].化工管理,2019(21):211-212.

Niu Shenghui. Research on Pig Positioning of Long-Distance Natural Gas Pipeline [J]. Chemical Enterprise Management, 2019 (21): 211-212.

- [10] 任帅民,张永盛,祖宏波,等.输油气管道清管器跟踪定位方法及跟球选址技巧[J].管道技术与设备,2014(1):54-55.

Ren Shuaimin, Zhang Yongsheng, Zu Hongbo, et al. Methods of Tracking the Location of the Pig for Petroleum Pipeline and the Techniques of Ball Location [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2014 (1): 54-55.

- [11] 黄崇舜,朱宁宁.加纳国家天然气公司海底管道投产方案优化[J].天然气与石油,2016,34(2):12-17.

Huang Chongshun, Zhu Ningning. Optimization of Startup Scheme for Submarine Gas Pipeline of Ghana National Gas Company [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34 (2): 12-17.

- [12] 邱红辉,王海明,孙 巍,等.清管器跟踪定位技术发展现状与趋势[J].油气储运,2015,34(10):1-5.

Qiu Honghui, Wang Haiming, Sun Wei, et al. Present and Future Development of Pig Tracing and Positioning Techniques [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34 (10): 1-5.

- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家

标准化管理委员会.油气输送管道完整性管理规范:GB 32167-2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Oil and Gas Pipeline Integrity Management Specification: GB 32167-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

- [14] 郭 磊,郭 杰,韩昌柴,等.基于漏磁内检测的输气管道金属损失缺陷适用性评价[J].石油规划设计,2017,28(4):12-14.

Guo Lei, Guo Jie, Han Changchai, et al. Applicability Evaluation of Gas Pipeline with Metal Loss Defects Based on Magnetic Flux Leakage Inspection [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2017, 28 (4): 12-14.

- [15] 国家能源局.钢质管道管体腐蚀损伤评价方法:SY/T 6151-2009[S].北京:石油工业出版社,2009.

National Energy Administration. Assessment of Corroded Steel Pipelines: SY/T 6151-2009 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.

- [16] API RP. Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines: 1160-2013 [S]. New York: API Standards, 2013.

- [17] ASME. Managing System Integrity of Gas Pipeline: ASME B 31.8 S-2014 [S]. New York: ASME, 2014.

- [18] 田 野.基于次声波的清管器在线跟踪定位系统[J].油气田地面工程,2018,37(5):70-73.

Tian Ye. Online Tracking and Positioning System of the Pipeline Pig Based on Infrasound [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37 (5): 70-73.

- [19] 罗 丹,李银燕,关贵兴,等.油气管道清管作业安全技术[J].当代化工,2014,43(9):1813-1815.

Luo Dan, Li Yinyan, Guan Guixing, et al. Safety Technology of Pigging Operation for Oil and Gas Pipelines [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43 (9): 1813-1815.

- [20] 赵小川,管志伟,南宇峰.西气东输二线干线西段清管作业研究与实践[J].天然气与石油,2012,30(2):17-22.

Zhao Xiaochuan, Guan Zhiwei, Nan Yufeng. Research and Practice of Pigging Operation in Western Section of West-East Gas Pipeline 2 [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (2): 17-22.