

文章编号:1671-251X(2021)01-0055-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020080024

基于瞬态模型的井下抽采主管道泄漏定位方法研究

张逸斌^{1,2}, 张浪^{1,2}, 张慧杰^{1,2}, 李伟^{1,2}, 刘彦青^{1,2}, 桑聪^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;
2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

扫码移动阅读

摘要:针对现有煤矿井下瓦斯抽采主管道漏点定位大多采用单一定位方法,存在适用性差、效率低、易受环境影响等问题,结合流量平衡法、负压波法和小波降噪原理,提出了一种基于瞬态模型的井下抽采主管道泄漏定位方法。首先分析了管道首末两端流量变化规律及差值大小,排除干扰信号,利用流量平衡法对管道泄漏状态进行定性分析,判断管道是否泄漏;比较正常运行及发生泄漏情况下的流量变化,当管道首末两端流量差大于管道流量差阈值时,即为工况改变或发生泄漏;然后根据负压波在管道内的传播机理,采用小波降噪技术对压力信号进行消噪处理,结合邻域差值法寻求信号突变点;最后通过泄漏定位公式计算漏点位置,从而实现对管道漏点位置的有效定位。仿真分析结果验证了该方法的准确性。

关键词:瓦斯抽采;管道泄漏;泄漏定位;流量平衡法;负压波;小波变换;瞬态模型

中图分类号:TD712 文献标志码:A

Research on leakage positioning method of underground gas extraction
main pipeline based on transient model

ZHANG Yibin^{1,2}, ZHANG Lang^{1,2}, ZHANG Huijie^{1,2}, LI Wei^{1,2},
LIU Yanqing^{1,2}, SANG Cong^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: At present, most of the existing positioning methods of underground gas extraction main pipeline leakage in coal mines use single positioning method. The problems of these methods include poor applicability, low efficiency and susceptibility to environmental impact. In order to solve the above issues, this paper proposes a leakage positioning method of underground gas extraction main pipeline based on transient model by combining flow balance method, negative pressure wave method and wavelet noise reduction principle. Firstly, the method analyzes the flow change law and the difference of the both ends of the pipeline, eliminate the interference signal, use the flow balance method to identify the pipeline leakage state and determine whether the pipeline is leaking. The method compares the flow changes under normal operation and leakage. When the difference between the both ends of the pipeline flow is greater than the threshold value of the pipeline flow difference, it means that the working conditions have changed or leakage occurs. Secondly, according to the propagation mechanism of negative pressure waves in the pipeline, wavelet noise reduction technique is used to denoise the pressure signal. The neighborhood interpolation method is applied to seek the signal mutation point. Finally, the leak location formula is used

收稿日期:2020-08-06;修回日期:2020-12-19;责任编辑:张强。

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067-004,2016ZX05067-001);中国煤炭科工集团科技创新基金项目(2018-TD-ZD002);煤炭科学技术研究院技术创新基金项目(2020CX-II-21)。

作者简介:张逸斌(1993—),男,河北唐山人,研究实习员,硕士,主要从事煤矿瓦斯灾害防治与安全监测预警等方面的研究工作,E-mail: zhangyibin93@163.com。

引用格式:张逸斌,张浪,张慧杰,等. 基于瞬态模型的井下抽采主管道泄漏定位方法研究[J]. 工矿自动化,2021,47(1):55-60.

ZHANG Yibin,ZHANG Lang,ZHANG Huijie,et al. Research on leakage positioning method of underground gas extraction main pipeline based on transient model[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(1):55-60.

to calculate the leak position so as to obtain the leak position of the pipeline effectively. The simulation analysis results verify the accuracy of the method.

Key words: gas extraction; pipeline leakage; leakage positioning; flow balance method; negative pressure wave; wavelet transform; transient model

0 引言

近年来管道发生泄漏的情况屡见不鲜,对工业安全生产构成了重大威胁^[1]。在我国部分矿井,瓦斯抽采管道常铺设在环境恶劣的巷道中,容易造成老化生锈以致外部气体渗入其中,从而降低瓦斯抽采浓度,存在瓦斯爆炸的风险。目前我国煤矿对于地下抽采管道的泄漏定位大多尚处于人工巡检阶段,存在定位时间长、耗费人力多、效率低等现实问题,无法满足当今煤矿智能化、无人化开采的需求^[2-3]。煤矿井下瓦斯抽采管道泄漏定位技术已经成为避免事故发生、提高瓦斯抽采效率、促进煤矿绿色开采的关键。

我国专家学者陆续开展了针对流体管道检测方面的研究。唐秀家等^[4]建立了针对管道运行状况分类的神经网络模型,以检测管道泄漏故障,但该模型训练成本较高,需要采集大量的学习样本以提升算法可靠性。余小广等^[5]提出了针对泄漏状态和严重程度的管道故障判别模型,但该模型仅以流量设定报警阈值,且该阈值设定标准缺乏理论支撑。熊伟^[6]基于超声波检测技术、多元高斯声束模型研发了便携式管道泄漏检测仪器,虽提升了检测精度,但仍需人工手持进行检测。雷柏伟等^[7]提出了一种基于压力测量的瓦斯抽采管路运行状态诊断方法,验证了利用管道压力平方下降曲线斜率对抽采管道故障状态进行判识的可行性,但该方法仅能判断管道故障区间,无法确定具体位置。刘翠伟等^[8]采用声学与数值模拟相结合的方法对天然气管道内泄漏声源特性进行了研究,但该方法没有考虑管道阀门开闭对检测结果的影响。赵林等^[9]基于光纤传感技术及负压波信号检测原理设计了一种煤矿管道泄漏监测系统,但该系统采用单一技术进行检测,具有一定的局限性。综上可知,上述研究大多采用单一的管道泄漏定位方法,存在适用性差、定位效率低、易受环境影响等问题。

针对上述问题,本文基于管道泄漏瞬态模型,采用流量平衡法与负压波法相结合的方式,提出了一种基于瞬态模型的井下抽采主管道泄漏定位方法。首先分析了管道首末端流量变化规律及差值大小,排除干扰信号,利用流量平衡法对管道泄漏状态进行定性分析;然后根据负压波在管道内的传播机

理,采用小波降噪技术对压力信号进行消噪处理,结合邻域差值法寻求信号突变点;最后通过泄漏定位公式计算漏点位置,定量分析管道泄漏位置,从而实现对管道漏点位置的有效定位。仿真分析结果验证了该方法的准确性。该方法可为后续管道泄漏定位系统开发与设备研制提供理论基础。

1 流量平衡法管道泄漏判断原理

采用单一方法对管道泄漏位置进行定位,存在自身局限性。管道在现场实际中容易受到调泵、开关阀门等操作的干扰,导致泄漏信号误报的情况发生。为了解决此问题,基于管道瞬态模型,利用流量平衡法对抽采管道泄漏状态进行判断,从而提升定位准确性,降低误报率。流量平衡法原理:比较正常运行及发生泄漏情况下的流量变化,当管道首末两端流量差大于管道流量差阈值时,即可判定管道状况发生变化或发生泄漏;同时对调泵、开关阀门等在实际应用中可能存在的情况进行提前分析并找到相应规律,从而提高管道泄漏定位的准确性及鲁棒性。

正常情况下,管道内流量基本保持稳定,但因实际情况下流体的特殊性质,当管道未泄漏时,管道首末两端的流量也会存在极其微小的差值,计算公式为

$$Q_1(t) - Q_0(t) = \Delta Q(t) \quad (1)$$

式中: $Q_1(t)$ 为管道首端流量, m^3/s ; $Q_0(t)$ 为管道末端流量, m^3/s ; $\Delta Q(t)$ 为管道首末两端流量差, m^3/s ; t 为压力信号采集时间, s 。

管道正常运行情况下,首末两端流量差绝对值的最大值即为管道流量差阈值 ϵ :

$$\epsilon = \max |\Delta Q(t)| \quad (2)$$

在抽采管道正常运行的情况下, $\Delta Q(t)$ 的值极小,当管道发生泄漏时, $\Delta Q(t)$ 的值就会增大。当 $\Delta Q(t)$ 大于管道流量差阈值 ϵ 时,即为工况改变或发生泄漏,判断流程如图 1 所示。通过分析煤矿井下瓦斯抽采管道实际运行状态,对不同工况下的压力、流量变化规律进行统计,见表 1。根据这些规律可以判断管道的流量状态。

2 基于瞬态模型的管道泄漏定位原理

2.1 负压波法管道泄漏定位原理

根据管道内任一点的流动参数与该点的位置及

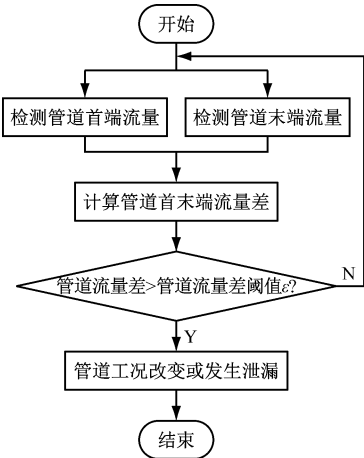


图1 流量平衡法判断流程

Fig.1 Flow balance method judgment process

表1 不同工况下抽采管道压力流量分析

Table 1 Pressure and flow analysis of extraction pipeline under different conditions

工况	首端压力	末端压力	首端流量	末端流量
正常运行	微小波动	微小波动	微小波动	微小波动
泄漏	上升较大	上升较小	上升较小	上升较大
停泵	缓慢上升	突然上升	缓慢下降	突然下降
开泵	缓慢下降	突然下降	缓慢上升	突然上升
阀门开大	随后下降	首先下降	随后上升	首先上升
阀门开小	随后上升	首先上升	随后下降	首先下降

时间相关的特征,基于时间和空间双重因素建立管道泄漏瞬态模型,如图2所示。采用负压波法针对管道漏点位置进行定位^[10]。根据波源传导效应,当泄漏突发时管道内外压力差作用产生的负压波会传递到管道首末两端的压力传感器,通过传感器采集到的瞬态压力突变时间差计算波源位置,从而实现对管道漏点位置的有效定位。

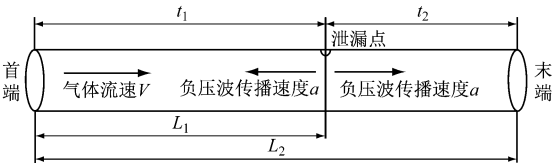


图2 管道泄漏瞬态模型

Fig.2 Transient model of pipeline leakage

管道泄漏位置距管道首端距离为 L_1 时,泄漏点负压波传递到首末两端的时间分别为 t_1, t_2 ,存在如下方程:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{L_1}{a - V} - \frac{L_2 - L_1}{a + V} \tag{3}$$

$$L_1 = \frac{1}{2a} [L_2(a - V) + \Delta t(a^2 - V^2)] \tag{4}$$

式中: Δt 为管道首末端接收负压波时差,s; L_2 为管道长度,m; a 为管道内负压波传播速度(一般情况下可视为声速),m/s; V 为管道内气体流速,m/s。

2.2 基于小波变换的降噪原理分析

负压波法定位抽采管道泄漏位置的关键在于找到压力信号突变点,压力信号突变越明显,定位精度越高。但由于压力信号存在大量的噪声和干扰,以至于压力信号的有效突变点难以准确定位,为此引进小波分析方法对压力原始信号进行降噪处理,以提取准确的信号。

小波变换降噪原理是将信号通过低频滤波器及高频滤波器将原始信号分解成低频信号和高频信号2个部分。实际工程中有效信号一般为低频信号或平稳信号,噪声一般为高频信号^[11],但是现场采集的压力信号包含有效信号及噪声信号,无法直接用于计算。小波变换具有多分辨率特性,能够从含有噪声的信号中剥离出原有真实信号。小波变换多分辨率分析如图3所示, S 为待分解信号, $A_i (i=1, 2, 3)$ 表示对信号 S 的第 i 层低频分解, D_i 表示对信号 S 的第 i 层高频分解。

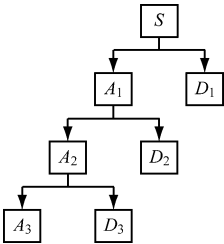


图3 小波变换多分辨率分析

Fig.3 Multi-resolution analysis of wavelet transform

多分辨率分析是对信号的低频部分进行层层分解,逐渐剥离信号的高频部分,可得到信号间的关系式为

$$S = A_3 + D_3 + D_2 + D_1 \tag{5}$$

2.3 小波降噪步骤

小波降噪主要分为如下3个步骤^[12]:

- (1) 确定小波分解层数 N ,对采集的管道首末两端的原始信号进行 N 层小波分解。
- (2) 对第 $1 \sim N$ 层的每一层高频系数选择一个合理阈值进行量化分析处理。
- (3) 针对小波分解量化处理后的第 $1 \sim N$ 层高频系数及第 N 层低频系数进行一维信号小波重构。

以上3步中量化选取合理阈值对于信号降噪的质量十分关键,阈值过小则会造成过滤效果不明显,阈值过大则会遗失有效信号,进而影响定位精度。

针对管道泄漏时采集的现场压力信号,采用 Matlab 小波工具箱中的 wden 降噪函数进行降噪处理。其中 wden 降噪指令为

$$XD = \text{wden}(X, \text{TPTR}, \text{SORH}, \text{SCAL}, N, 'Wname') \tag{6}$$

式中: XD 为降噪后的信号; X 为原始采集信号;

TPTR 为阈值选取规则;SORH 为软、硬阈值选取;SCAL 为是否重新调整定义所乘阈值;Wname 为选择的正次小波名。

2.4 压力信号奇异点筛选

奇异点是指数学上函数存在间断点或某点导数不连续的点,信号的奇异点能够清楚地表述信号的细节特征^[13]。小波变换具有在时间、频率上突出信号局部特征的能力,采用邻域差值法搜寻压力信号奇异点,能够快速、精准地对压力突变点进行定位,从而计算泄漏位置。邻域差值法是根据管道首末两端降噪压力曲线计算相邻时间范围内的压力差值,以分辨出压力信号变化极值,从而得到压力信号奇异点。邻域差值法推导公式为

$$y(t) = x(t) - x(t - 1) \tag{7}$$

式中: $y(t)$ 为降噪前后管道压力差值,Pa; $x(t)$ 为降噪后管道压力,Pa。

在井下现场应用过程中首先对采集到的抽采管道首末两端的压力信号进行小波降噪处理,以得到滤噪信号,然后采用邻域差值法进行二次处理,寻求压力突变奇异点,最终根据负压波法泄漏定位公式计算出管道泄漏位置。

3 管道泄漏定位精度分析

3.1 管道泄漏压力信号仿真加噪模拟

为验证用负压波法进行管道泄漏定位的精度,对抽采管道泄漏时产生的压力信号进行仿真模拟,采用 Gambit 前处理软件建立总长为 1 000 m、管道直径为 0.8 m 的二维管道模型,管道首端压力设为 -38 944 Pa,管道末端压力设为 -40 000 Pa,温度设为 288.16 K。分别在管道首末两端设置压力瞬态监测点,监测时间步长设为 0.01 s,即压力采样频率为 100 Hz,采样总时长为 80 s。模拟抽采管道漏点位于管道中点 500 m 处、泄漏孔半径为 0.05 m 状态下的管道泄漏情况,并对首末两端的压力信号进行采集与分析,验证利用负压波法对管道泄漏进行定位的准确性。

基于上述条件,采用 Fluent 软件模拟出理论情况下漏点附近管道内的气压场分布、风速场分布、管内流场分布,如图 4—图 6 所示。

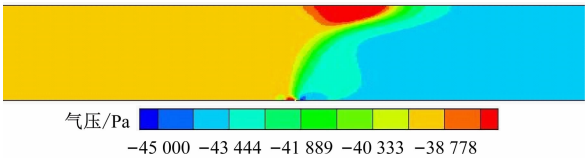


图 4 漏点附近管道内气压场分布
Fig. 4 Distribution of pressure field in pipeline near leakage point

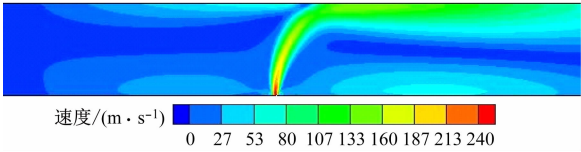


图 5 漏点附近管道内风速场分布
Fig. 5 Distribution of wind velocity field in pipeline near leakage point



图 6 漏点附近管道内流场分布
Fig. 6 Distribution of flow field in pipeline near leakage point

管道未发生泄漏时,管道内压力由于摩擦阻力的影响均匀降低,流量保持恒定。从图 4 可看出,漏点位置由于管道内外压差作用,外部气体急速流入,漏点处压力迅速升高,管道内压力场产生明显突变。从图 5、图 6 可看出,管道泄漏处有大量外部气体涌入,致使管内原有的稳定流场被打破,漏点处产生明显湍流现象且速度显著提升。基于管内压力场、流场变化规律,结合表 1 不同工况下抽采管道压力流量规律分析,可直观判断管道状态,与负压波法判断结果互相验证。

管道入口、出口瞬态压力曲线如图 7、图 8 所示。从图 7、图 8 可看出,管道首末端压力瞬态监测曲线均存在压力突变现象,说明泄漏发生后由于负压波的传播,管道首末端监测到了负压波的波动。

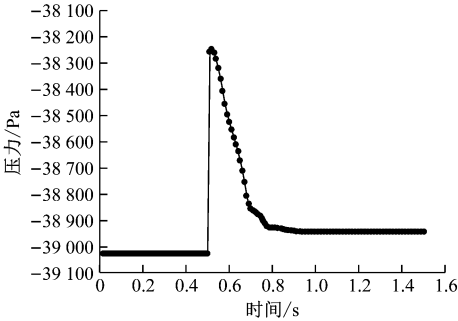


图 7 管道入口瞬态压力曲线
Fig. 7 Transient pressure curve at pipeline entrance

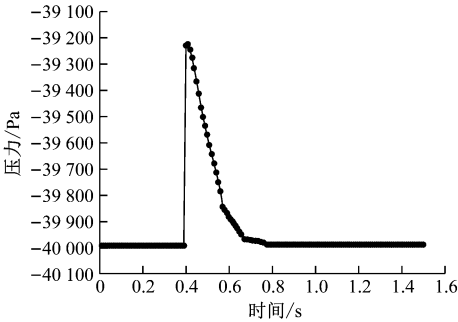


图 8 管道出口瞬态压力曲线
Fig. 8 Transient pressure curve at pipeline exit

上述监测数据仅为数值模拟情况下导出的理论数据,现场实际情况存在大量干扰噪声。为了更贴合现场井下实际情况,对上述模拟结果进行仿真加噪处理,随机添加 100 Pa 以内压力值,以求出更符合现场规律的压力波形,具体含噪效果如图 9、图 10 所示。

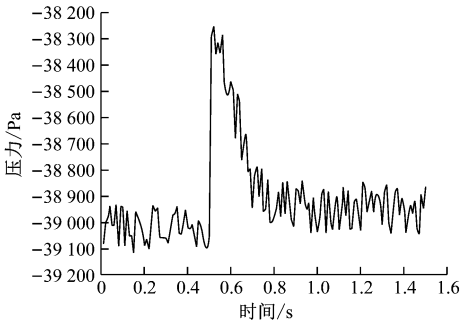


图 9 管道入口含噪压力曲线

Fig. 9 Noise pressure curve at pipeline entrance

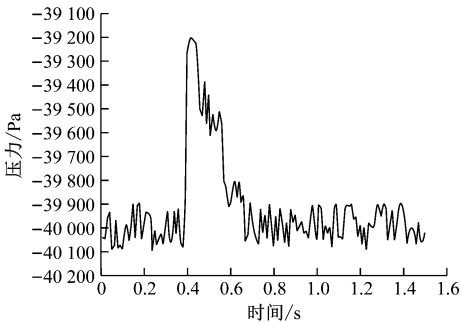


图 10 管道出口含噪压力曲线

Fig. 10 Noise pressure curve at pipeline exit

3.2 压力信号降噪处理分析

采用 Matlab 小波降噪后的管道入口、出口压力瞬态曲线如图 11、图 12 所示。从图 11、图 12 可看出,降噪后的压力图形尚保持了原有规律且压力波形突变较为明显。

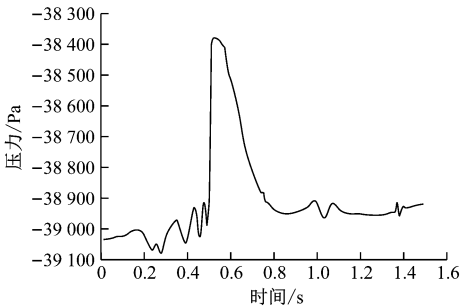


图 11 管道入口降噪压力曲线

Fig. 11 Noise reduction pressure curve at pipeline entrance

为了准确找到波形突变的具体时间,采用邻域差值法对降噪后的信号进行二次处理,处理结果如图 13、图 14 所示。从图 13、图 14 可明显分辨出压力信号变化的最大值,易于判断负压波分别传播到管道首末端的时间。管道入口、出口采集到的压力

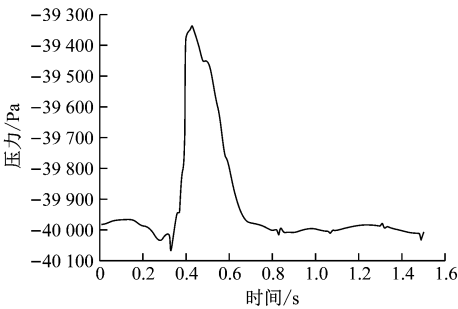


图 12 管道出口降噪压力曲线

Fig. 12 Noise reduction pressure curve at pipeline exit

突变时间分别为 0.50,0.39 s。将采集到的入口、出口压力突变时间代入负压波法漏点定位公式(式(4))进行计算,计算结果见表 2。从表 2 可看出,定位误差较小,证明此方法适用于负压管道的泄漏定位且具有较高的可靠性及准确性。现实情况中可采取适量添加传感器数量或选用高精度传感器的方法进一步提升检测精度,保障漏点定位准确性。

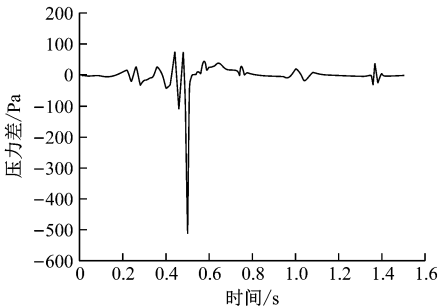


图 13 邻域差值法处理后的管道入口降噪压力曲线

Fig. 13 Noise reduction pressure curve at pipeline entrance by neighborhood interpolation method

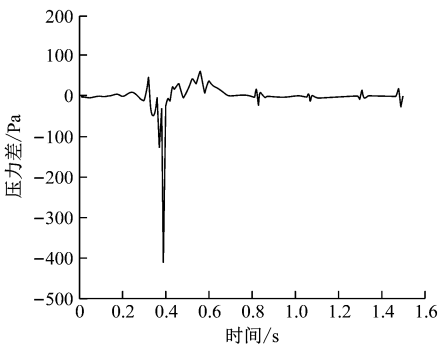


图 14 邻域差值法处理后的管道出口降噪压力曲线

Fig. 14 Noise reduction pressure curve at pipeline exit by neighborhood interpolation method

表 2 负压波法处理结果及定位误差

Table 2 Processing results and positioning errors of

negative pressure wave method

管道 总长/m	泄漏 位置/m	泄漏孔 半径/m	泄漏 定位/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
1 000	500	0.05	497.86	2.14	0.43

4 结论

(1) 结合流量平衡法、负压波法、小波降噪原理,提出了一种基于瞬态模型的管道泄漏定位方法,用于对煤矿井下瓦斯抽采主管道泄漏位置进行定位,有效提高了漏点定位的准确性,降低了误报率。

(2) 针对模拟得到的管道首末端压力信号进行现场仿真加噪,利用 Matlab 小波降噪指令对采集到的管道压力信号进行降噪处理,采用邻域差值法得到管道入口、出口压力突变时间分别为 0.50, 0.39 s,根据负压波法泄漏定位公式计算出漏点位置,绝对误差为 2.14 m,相对误差为 0.43%,验证了所提方法的准确性,为后续管道泄漏定位系统开发及设备研制提供了理论支持。

参考文献 (References):

[1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J].仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.

[2] 王国法,杜毅博.煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J].煤炭科学技术,2020,48(1):1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 1-9.

[3] 徐源,邢兰昌,张树立.基于多通道声发射检测系统的管道气体泄漏位置定位方法研究[J].计算机测量与控制,2020,28(4):36-40.
XU Yuan, XING Lanchang, ZHANG Shuli. Study on the location method of gas leakage on pipeline based on a multi-channel acoustic emission detection system [J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(4): 36-40.

[4] 唐秀家,颜大椿.基于神经网络的管道泄漏检测方法及其仪器[J].北京大学学报(自然科学版),1997,33(3):319-327.
TANG Xiujia, YAN Dachun. Pipeline leak detection method and instrument based on neural networks[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(3): 319-327.

[5] 余小广,周厚权,杨利平.煤矿井下瓦斯抽采管网泄漏检测技术[J].煤矿安全,2013,44(10):75-77.
SHE Xiaoguang, ZHOU Houquan, YANG Liping. Leak detection technology in underground gas extraction pipe network[J]. Safety in Coal Mines,

2013, 44(10): 75-77.

[6] 熊伟.煤矿瓦斯抽采管网系统自更新检漏技术研究[J].工矿自动化,2020,46(9):33-37.
XIONG Wei. Research on self-renewing leakage detection technology of coal mine gas drainage pipe network system[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 33-37.

[7] 雷柏伟,吴兵,李旭,等.基于压力测量的瓦斯抽采管路运行状态诊断方法研究[J].矿业安全与环保,2017,44(1):32-35.
LEI Baiwei, WU Bing, LI Xu, et al. Research on diagnosis method for gas drainage pipeline network running state based on pressure measurement [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(1): 32-35.

[8] 刘翠伟,李玉星,王武昌,等.输气管道声波法泄漏检测技术的理论与实验研究[J].声学学报,2013,38(3):373-381.
LIU Cuiwei, LI Yuxing, WANG Wuchang, et al. Theoretical study and experimental study on leak detection for natural gas pipelines based on acoustic method[J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 373-381.

[9] 赵林,王纪强,侯墨语.煤矿管道泄漏监测系统设计[J].工矿自动化,2016,42(10):12-15.
ZHAO Lin, WANG Jiqiang, HOU Moyu. Design of pipeline leakage monitoring system for coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(10): 12-15.

[10] 王立坤.原油管道泄漏检测若干关键技术研究[D].天津:天津大学,2002.
WANG Likun. Study on key technique of crude oil transport pipeline leak detection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.

[11] 孙兆林. MATLAB 6. X 图像处理[M].北京:清华大学出版社,2002.
SUN Zhaolin. MATLAB 6. X image processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[12] 陈浩.流体运输管道泄漏负压波模拟与信号处理研究[D].大庆:东北石油大学,2012.
CHEN Hao. Research on negative pressure wave simulation and signal processing of fluid-conveying pipeline leak [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.

[13] 刘世丹,郭谋发,郭文坚.谐振接地系统小波包多判据接地选线研究[J].电工电气,2012(11):15-19.
LIU Shidan, GUO Moufa, GUO Wenjian. Study on wavelet packet multiple criterion earth fault line selection of resonant grounding system [J]. Electrotechnics Electric, 2012(11): 15-19.