DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210049

基于地电流的重力流排水管道泄漏检测

杨东馥[1],封 皓[1],齐敦哲[2],杜立普[2],沙 洲[1]
(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 宁夏回族自治区水利工程建设中心 银川 750002)

摘 要:重力流排水管道的泄漏会带来诸多不良后果,但由于重力流排水管道的特殊性,导致许多现有的管道泄漏检测方法难以适用。针对这一问题,提出了一种基于地电流的检测方法,该方法利用泄漏孔联通管道内外,通过测量在管道内移动的电极和固定在地面电极之间电流来确定泄漏,阐述了该方法的基本工作原理,基于该方法设计了检测系统,搭建了实验平台测试了检测效果。检测 10 m 长的埋地管道时,最大定位误差约 0.4 m,表明该检测系统能较准确地定位泄漏位置,若配合更好的探头定位方法,误差将进一步减小。根据测得的尖峰电流值,能明显分辨 9 个直径梯度为 0.5 mm 的圆形泄漏孔,使用测得的 9 组数据训练神经网络模型,大致得到了尖峰电流值与泄漏孔大小的映射关系,表明根据检测结果能大致估计泄漏孔的大小。

关键词: 重力流管道;排水管道;地电流;管道泄漏
中图分类号: TH86 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.8040

Leakage detection of gravity flow drainage pipeline based on geo-electrical current

Yang Dongfu[1], Feng Hao[1], Qi Dunzhe[2], Du Lipu[2], Sha Zhou[1]
(*1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*;
2. Water Conservancy Engineering Construction Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The leakage of gravity flow drainage pipeline will bring many adverse consequences. But, due to the particularity of gravity flow drainage pipeline, many existing pipeline leakage detection methods are difficult to be applied. To solve this problem, this article proposes a detection method based on the geo-electrical current, which uses leakage holes to connect the inside and outside of the pipeline, and determines the leakage by measuring the current between the electrode moving in the pipeline and the electrode fixed on the ground. The basic working principle of the method is described in this article, and the detection system is designed based on the method above, and the experimental platform is established to test the detection effectiveness of the proposed method. When detecting a 10 m long buried pipeline, the maximum location error is about 0.4 m, which indicate that this detection system can accurately locate the leakage location, and with better probe positioning method, the error will be futher reduced. According to the measured spike current value, 9 circular leakage holes with the diameter gradient of 0.5 mm can be clearly distinguished. Nine groups of measured data are used to train the neural network, the mapping relationship between the spike current value and the leakage hole size is roughly obtained, which shows that the leakage hole size can be roughly estimated according to the detection results.

Keywords: gravity flow pipeline; drainage pipeline; geo-electrical current; pipeline leakage

0 引 言

随着经济社会的发展,生产生活用水量越来越大,绝大多数的用水都通过管道进行运输,管道如果发生泄漏,将会造成经济损失、环境污染等多方面的严重后果,因此需及时检出并修复泄漏管道。目前已有许多方法应用到了管道泄漏检测中,常见的如声学方法、负压波方法、流动模型方法、光纤方法、磁学方法等。声学方法主要利用泄漏处特有的声信号来检测泄漏[1-3],负压波方法主要利

收稿日期:2022-07-01 Received Date: 2022-07-01

用泄漏时管道内外压差流失所产生的负压波来检测泄漏[4-6],流动模型方法主要依靠比较管内流动参数在管道不同节点的理论值和实测值来检测泄漏[7-9],光纤方法主要利用光纤的散射特征会随外部温度应变等的变化而变化来检测泄漏[10-12],磁学方法主要利用缺陷部位在管道磁化后的磁感线异常分布来检测泄漏[13-15]。

虽然目前对管道泄漏的检测已经有了大量研究,但是对重力流管道的泄漏检测却少有涉及。重力流管道内的流体仅依靠自身重力流动,只能从高往低运输,在排水管道中应用广泛。重力流排水管道有其自身的特殊性,往往长度较短、内径较小,但数量庞大,难以大规模埋设光纤,工作时不需加压,泄漏处的声信号和负压波信号十分微弱,难以探测,所输送的污水往往也具有一定的腐蚀性,管道材质通常选用耐腐蚀的塑料,无法磁化,管内的水也无特定流动规律,难以建立模型,这都导致传统的泄漏检测方法难以适用于此类管道。为解决这一问题,提出了一种基于地电流的检测方法,介绍了方法的基本原理,分析了方法的物理模型,设计了检测系统,并通过现场试验验证了检测方法和检测系统的可行性。

1　检测方法

1.1　检测原理

如图 1 所示,在阀门处通过绝缘电缆向管道内放入一电极作为管内电极,在地面上放置另一电极作为地面电极,将两电极连接到直流电源两端后,观察电路中的电流情况。如果管道不存在泄漏,则管道内外相互隔绝不能导通,回路无法形成,电流计检测不到电流信号。如果管道存在泄漏,管道内充满水后,水将从泄漏孔溢出,浸湿附近土壤,水和大地均是良导体,管道内外得以导通,两电极之间也得以导通,电流回路得以形成,电流计将检测到电流信号。

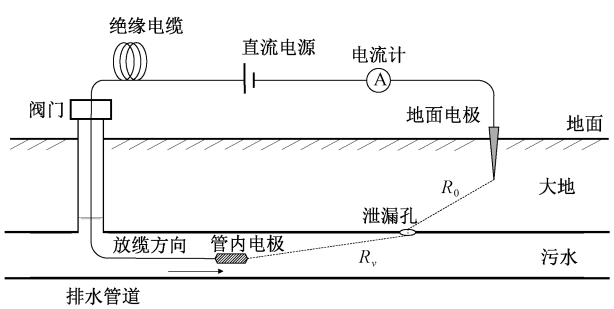


图 1　检测原理

Fig. 1　Principle of the detection

整个回路的电阻主要来自两部分,分别是管内电极与泄漏孔之间水的电阻 R_v 和泄漏孔与地面电极之间地大地电阻 R_0,除此之外,其余部分的总电阻 r 相对较小且稳定,根据欧姆定律,回路中的电流约为:

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R_v + r} \tag{1}$$

式中:U_s 为电源电压,检测过程中 I 的大小变化主要取决于 R_0 和 R_v 的变化。在检测过程中地面电极和泄漏孔的位置均不会发生变化,因此 R_0 几乎不会发生变化。随着管内电极进入管道并向前移动经过泄漏孔,管内电极与泄漏孔之间的距离先减小后增大,R_v 也先减小后增大,在泄漏孔处达到最小,电流 I 则会先增大后减小,在泄漏孔处达到最大,形成一个明显的尖峰。

基于本原理,通过是否检测到电流即可判断是否存在泄漏孔,通过电流的变化情况则可以确定泄漏孔的位置。能在管道正常运行时检测,通过电流的时域信号即可得出结果,数据处理简单快速,且只要存在泄漏孔就会形成一条联通内外的通路,不会出现遗漏或误判。

1.2　模型分析

需要关注的导电物理模型主要有大地电阻 R_0 和管内电阻 R_v。

1)大地电阻 R_0

该部分的导电介质是大地,大地往往密度、湿度等物理性质分布不均匀,导致电阻率分布也不均匀,使得模型十分复杂。为简化模型,先进行一次图 2 所示的等效[16-17],设在非均匀的大地中,地面电极与泄漏点距离较远,设其间的电阻为 R_0,若保持地面电极与泄漏点相对位置不变,将大地换成电阻率为 ρ_0 的均匀导体后,其间的电阻仍为 R_0,则可将此处的大地等效为电阻率为 ρ_0 的均匀导体。土质类似的大地,各个微小土壤颗粒的电阻率虽然不相等,但大多会分布在某一确定值附近,因此当地面电极与泄漏点距离较远时,无数个微小土壤颗粒叠加后,大地的等效电阻率 ρ_0 将趋于稳定,不会因地面电极与泄漏点的相对位置变化而发生较大变化。一般情况下地面电极会远离管道,离泄漏点则更远,因此可以将这种情况下的大地等效为电阻率为 ρ_0 的均匀导体,且即使地面电极和泄漏点的位置变化,等效电阻率 ρ_0 也不会发生较大变化。

如图 2 等效后的模型,再将地面电极和泄漏孔均简化为平面圆形电极,半径分别为 r_1、r_2,距离为 l,设大小为 I 的电流从一极流入,另一极流出。

根据叠加原理,首先只考虑电流流入的电极,设距该电极中心 $r(r>r_1,\ r_2)$ 处的电流分布情况为 $j(r)$,根据电荷守恒定理,稳态下,在以该电极中心为球心,半径为 r 的半球面上,有:

$$I = 2\pi r^2 j(r) \tag{2}$$

根据欧姆定律,某处的电流密度正比于该处的电场强度,比例系数为电阻率的倒数,则可得出半球面上的电

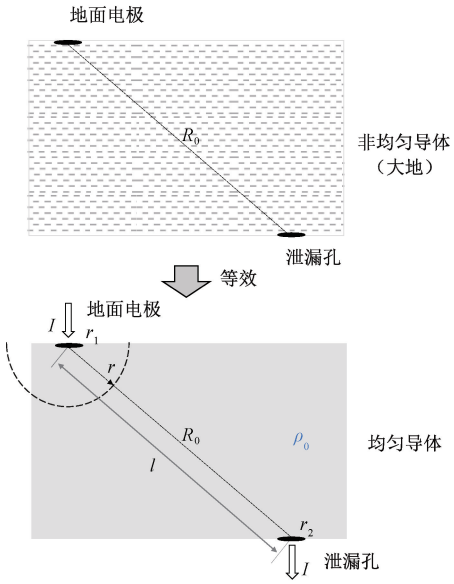


图 2 大地等效模型

Fig. 2 Geodetic equivalent model

场强度：

$$E(r)=\rho_0 j(r)=\rho_0\frac{I}{2\pi r^2} \tag{3}$$

因此由电流流入的电极产生的两极间的电势差为：

$$U_1=\int_{r_1}^{l-r_1}E(r)\,\mathrm{d}r=\rho_0\frac{I}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{l-r_1}\right) \tag{4}$$

同理可得由电流流出的电极产生的两极间的电势差：

$$U_2=\rho_0\frac{I}{2\pi}\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{l-r_2}\right) \tag{5}$$

因此两极间的电阻为：

$$R_0=\frac{U_1+U_2}{I}=\frac{\rho_0}{\pi}\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{l-r_1}\right)+\frac{\rho_0}{\pi}\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{l-r_2}\right) \tag{6}$$

由式(6)可知大地电阻 R_0 与大地等效电阻率 ρ_0 成正比，与泄漏孔大小 r_2 负相关，当地面电极和泄漏孔之间的距离 l 很大时，其相对位置变化对大地电阻 R_0 影响很小。

使用有限元仿真建立大地等效模型进行验证，模型厚度、面积足够大，电阻率分布均匀，取黄土常见的 250 Ω·m[18]。在内径为 20 cm 的管道上设置直径为 3.5 mm 的圆形区域模拟泄漏孔。在大地表面放置一个半径 2 cm，高 10 cm 的圆锥模拟地面电极。管道埋设深度为 20 cm，地面电极与泄漏孔之间的横向距离为 20 cm，使 1 A 的电流从泄漏孔流入，地面电极流出，取十分远的地方的电势为 0，考察大地中的电势变化，结果如图 3 所示。无论是地面电极还是泄漏孔，电势都只在其附近区域有明显变化，而在较远的区域几乎没有变化，大地电阻 R_0 主要来自地面电极与泄漏孔之间附近区域，而与较远的区域关系不大，即使地面电极和泄漏孔的相对位置变化，R_0 仍不会发生较大变化。

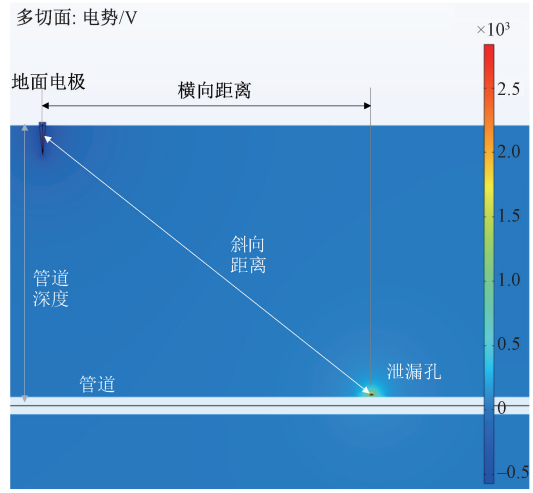


图 3 大地等效模型有限元仿真结果

Fig. 3 Simulation result of the equivalent geodetic model

在模型中改变地面电极与泄漏孔之间的斜向距离，即横向距离与管道深度同时同幅变化，结果如图 4 所示，随斜向距离变化，大地电阻 R_0 并未明显变化，因此当地面电极与泄漏孔距离较远时，二者之间的距离以及管道的深度均对大地电阻 R_0 影响很小，与式(6)的分析结果一致。

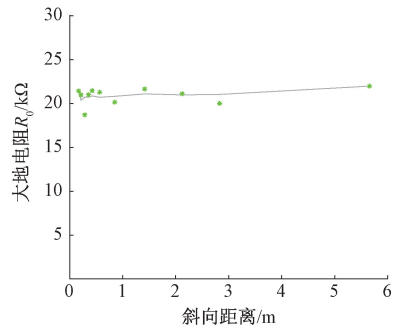


图 4 斜向距离对大地电阻 R_0 的影响

Fig. 4 Influence of the oblique distance on the R_0

为了研究泄漏孔大小对大地电阻 R_0 的影响，改变圆形泄漏孔直径，结果如图 5 所示，大地电阻 R_0 随泄漏孔直径的增大而减小，与式(6)的分析结果一致，大地电阻 R_0 与泄漏孔直径之间存在一定的关系。同理除了泄漏孔大小外，地面电极的大小也会影响大地电阻 R_0 的大小。

为了研究大地的等效电阻率对大地电阻 R_0 的影响，改变大地的等效电阻率，结果如图 6 所示，大地电阻 R_0 与大地的等效电阻率 ρ_0 几乎成正比关系，与式(6)的分

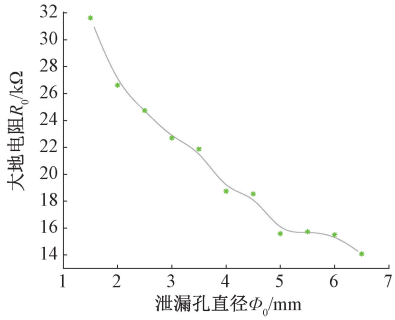


图 5　大地电阻 R_0 随泄漏孔直径的变化

Fig. 5　Variation of R_0 with the diameter of leakage hole

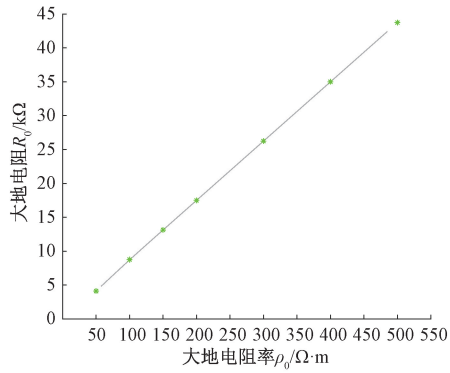


图 6　大地电阻 R_0 随大地电阻率 ρ_0 的变化

Fig. 6　Variation of the R_0 with the ρ_0

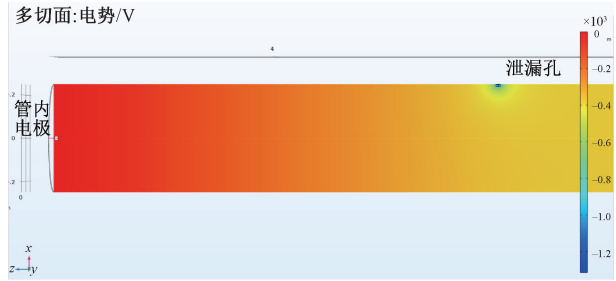


图 7　管道模型有限元仿真结果

Fig. 7　Simulation result of pipeline model

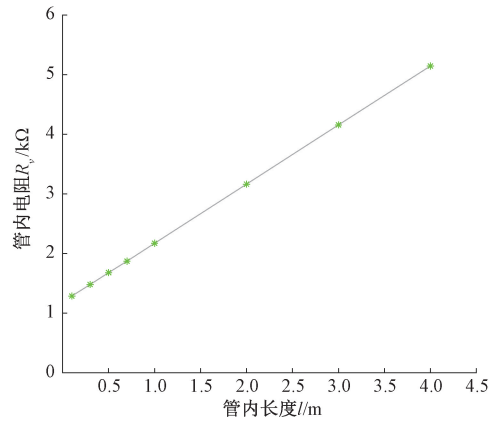


图 8　R_v 随距离的变化

Fig. 8　Variation of R_v with distance

析结果一致,除了泄漏孔大小之外,大地的等效电阻率也会直接影响大地电阻 R_0 的大小。

2)管内电阻 R_v

该部分导电介质主要是水,由于管道形状规则且横截面积十分有限,因此导电模型相对简单,使用有限元仿真建立管内导电模型,管道内径取 20 cm,水的电阻率取默认值 268 Ω·m,管内电极为半径 9 mm、高 18 mm 的圆柱体的侧面,泄漏孔为管道上半径为 3.5 mm 的圆形区域,大小为 1 A 的电流从管内电极流入,泄漏孔流出,考察管道内的电势变化,结果如图 7 所示。电流在管内电极附近逐渐向外发散,覆盖整个管道截面,然后沿管道流至泄漏孔附近,在泄漏孔附近逐渐收缩流入泄漏孔,除了在管内电极和泄漏孔附近较小的区域外,电势大致沿着管道均匀变化,因此可大致将充满水的管道视为的长圆柱形均匀导体,其长度为管内电极与泄漏孔之间的距离。

在模型中改变管内电极和泄漏孔之间的距离,通过电势变化求取管内电阻 R_v,结果如图 8 所示,随着管内电极接近或远离泄漏孔,管内电阻 R_v 线性减小或增大,至泄漏孔处时,管内电阻 R_v 达到最小。因此,管内电极经过泄漏孔附近后,电流信号的时域图像会存在一个尖峰,且根据式(1),电源电压 U_s 越大,电流信号的尖峰效果越明显,但受制于实际情况,电源电压 U_s 不能过大,可在显示结果时对电流信号进行适当的放大。

2　检测系统

2.1　检测装置

为了将上述原理应用于实际的检测中,设计了如图 9 所示的检测装置。用地钉和探头分别作为地面电极和管内电极。放出的电缆在驱使探头向前移动的同时也会带动编码器的轴转动,从而记录电缆放出的长度,对探头进行定位。

转换电路的电源电压为 12 V,电阻 R_1 起保护作用,防止回路的电流过大。外部回路的两端连接管内电极和地面电极。跨阻放大器 U_1 将实现电流至电压的转化,转换的倍数即为滑动变阻器 R_2 的阻值,反相器 U_2 将电压信号转换为正值后传送给核心板。

核心板主控选用 STM32 单片机,对编码器产生的脉冲信号进行计数,当达到一定数量,即管内电极移动了一定距离时,产生一次中断,中断产生后对来自转换电路的

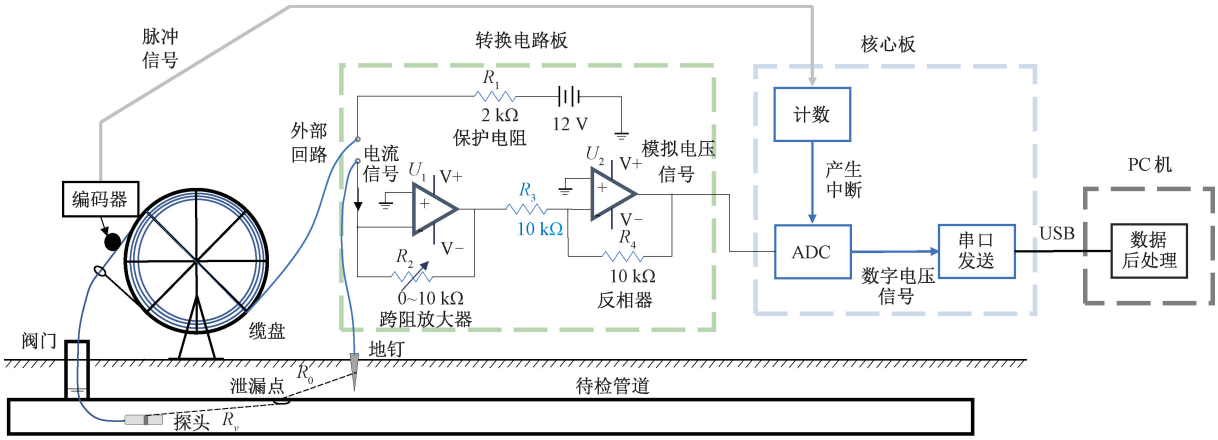


图 9 检测装置

Fig. 9 Detection device

电压信号进行一次采样,使得采样点大致沿管道均匀分布。将 AD 采样后的数字信号换算成电流值后发送至 PC 机等待进一步的数据处理。

2.2 数据后处理

1)降噪

由于大地内本身存在许多复杂的电场,电路元器件也会产生一定的波动,采样也存在一定的误差,最终所得到的原始信号会存在一定的噪声,可能会干扰结果的判定,因此需对原始信号进行降噪处理。此处的噪声近似白噪声,处于十分高的频段,而有效信号处于较低的频段,采用小波阈值降噪可在去除噪声的同时很好地保存所需重点关注的尖峰信息,分解层数选用 3 层既可使有效信号和噪声明显分离,又能尽量避免尖峰信息的丢失,硬阈值处理又具有很好的逼近性,使得误差减小,获得的尖峰值更准确。

2)估计

为了实现对泄漏孔大小的估计,需建立尖峰电流值与泄漏孔直径之间的映射关系。根据第 1.2 节中的讨论,在土质状况确定的情况下,尖峰电流值主要受泄漏孔直径影响,但由于导电模型十分复杂,难以推导得出其之间存在的数学关系。

BP 神经网络简单高效,无需提前确定输入输出的数学关系,通过学习理论上可有效拟合任意非线性映射。对于本应用场景,具体过程如图 10 所示,输入为尖峰电流值,输出为泄漏孔直径,通过实验采集样本数据后,训练网络建立二者之间的映射关系,使得在实测中由尖峰电流值即可大致估计泄漏孔的大小。由于本网络仅需单个输入和输出神经元,且泄漏孔大小通常有限,因此样本量不大,仅需单隐藏层及 4 个隐藏神经元即可。

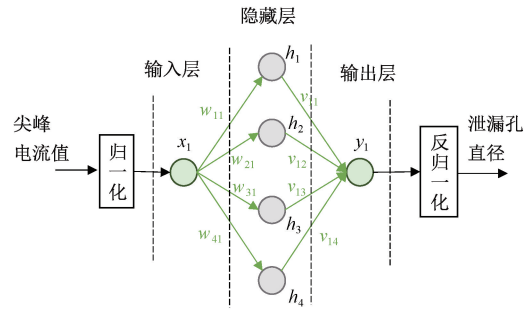


图 10 映射关系建立过程

Fig. 10 Mapping establishment process

3 实验结果分析

为了验证本检测系统的效果,进行了现场试验(图 11)。如图 12 所示,试验地土质为较为均匀的黄土;管道材质为绝缘的聚氯乙烯(PVC),长为 10 m,内径为 10 cm,埋设深度约为 20 cm,管道中充满水,设其一端坐标为 0 m,另一端坐标为 10 m;9 个圆形泄漏孔均匀分布在管道上,其直径 Ø 从 1.5 mm 以 0.5 mm 为步长增加至

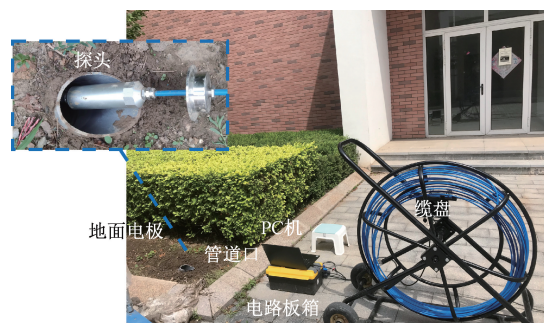


图 11 现场试验

Fig. 11 Field experiment

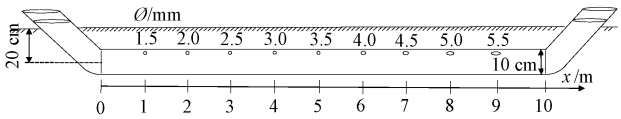
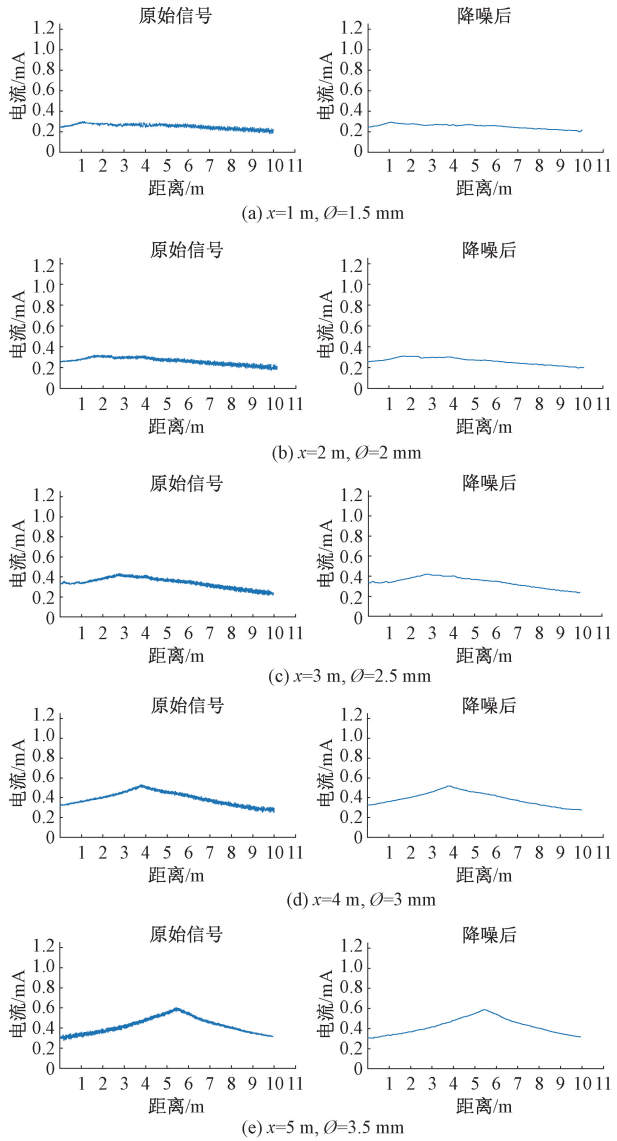


图 12　被检管道泄漏孔分布图

Fig. 12　Leakage distribution of the inspected pipeline

5.5 mm;地面电极大致为圆锥形,半径约 2 cm,任意放置在一处离管道较远的地方,入地深度约 10 cm。

使用本检测系统对该管道进行检测,每次检测只考察一个泄漏孔,即在检测时打开一个泄漏孔而堵住其他泄漏孔,结果分别如图 13(a)~(i) 所示。对比各次检测所得的原始信号与降噪后的信号,可见原始信号存在较大的噪声,小波阈值降噪可有效消除噪声,减小噪声对结果判定的干扰。



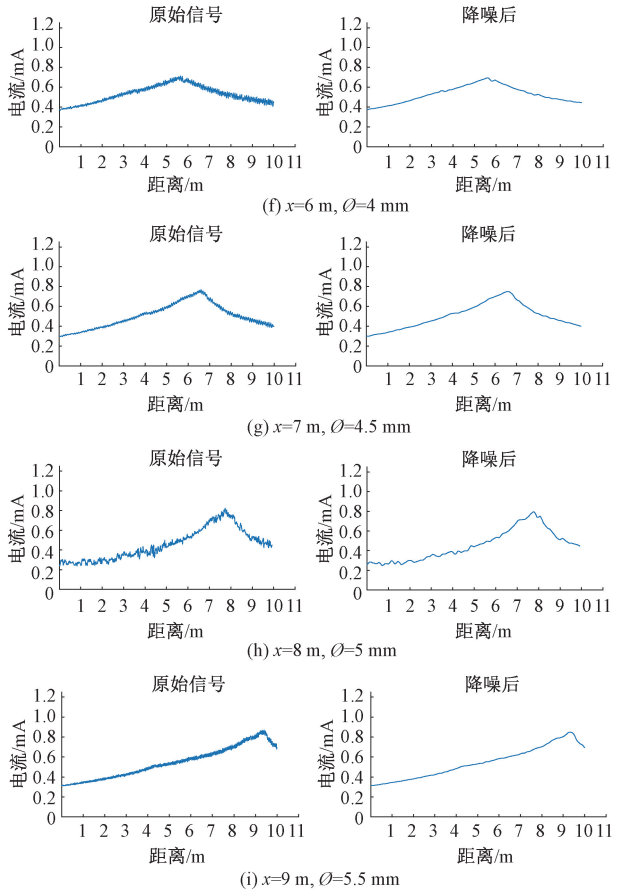
(a) x=1 m, $Ø$=1.5 mm

(b) x=2 m, $Ø$=2 mm

(c) x=3 m, $Ø$=2.5 mm

(d) x=4 m, $Ø$=3 mm

(e) x=5 m, $Ø$=3.5 mm



(f) x=6 m, $Ø$=4 mm

(g) x=7 m, $Ø$=4.5 mm

(h) x=8 m, $Ø$=5 mm

(i) x=9 m, $Ø$=5.5 mm

图 13　不同泄漏孔的检测结果

Fig. 13　Test results of different leakage holes

3.1　定位准确度

统计各次检测所得的泄漏孔位置,与实际位置对比,结果如图 14 所示。多次检测均存在一定的误差,最大约为 0.4 m。从原理上分析,本检测系统具有十分高的准确度,但实际操作中由于电缆在管道内会存在一定的弯曲,且经编码器送出的电缆并不能全部及时推动管内电极移动等原因,造成了编码器所记录的放缆长度与管内电极实际移动距离并不完全一致,若实现对管内电极的准确定位,误差可以降到很低。

3.2　地面电极位置的影响

为了研究地面电极的位置对结果的影响,记地面电极原位置为位置 1,远离位置 1 任取两处新位置,记为位置 2 和 3,先后将地面电极以相同方式放置在上述 3 个位置,对管道上 5 m 处直径为 3.5 mm 的泄漏孔进行检测。将 3 次降噪后的结果进行比较,如图 15 所示,地面电极位置虽变化,但相同位置、相同大小的泄漏孔对应的结果图像仍大致重合,尖峰电流值相差不大,即管内电极在泄漏孔处与地面电极之间的总电阻(主要为 1.2 节所讨论的大地电阻 R_0)相差不大,与图 4 的分析结果一致,验证

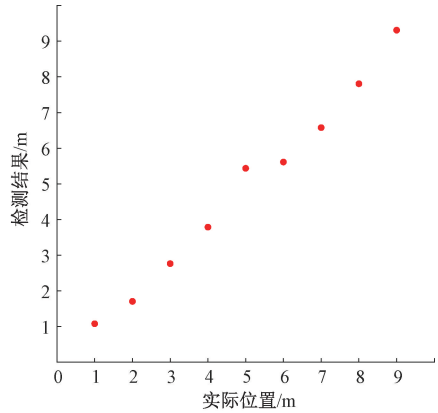


图 14 不同位置的泄漏孔的检测结果

Fig. 14 Detection result of leakage holes at different locations

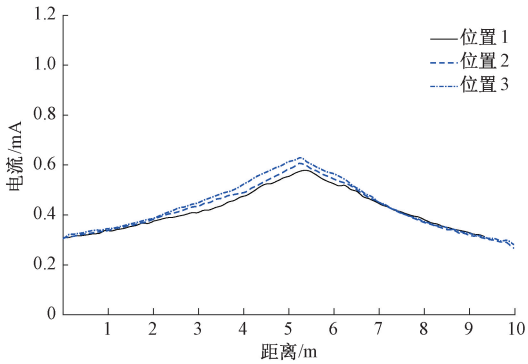


图 15 地面电极变换位置的检测结果

Fig. 15 Detection results of ground electrode change position

了当地面电极距离管道较远时,地面电极的位置对检测结果影响不大。

3.3 泄漏孔大小的估计

对比图 13 中各次检测的结果图,随着圆形泄漏孔直径的不断增大,尖峰电流值也不断增大。为了研究尖峰电流值和泄漏孔直径之间的关系,统计各次检测所得的尖峰电流值,如图 16 所示,尖峰电流值随泄漏孔直径单调变化,将尖峰电流值换算为管内电极在泄漏孔处与地面电极之间的总电阻(主要为 1.2 节所讨论的大地电阻 R_0),其随泄漏孔直径的变化如图 17 所示,与图 5 中由仿真分析所得的大地电阻 R_0 随泄漏孔直径的变化趋势大致相同。

为通过尖峰电流值估计圆形泄漏孔的大小,建立 BP 神经网络模型,输入为尖峰电流值,输出为泄漏孔直径,该网络包含 1 个隐藏层,内含 4 个神经元。将检测所得的 9 组尖峰电流值与泄漏孔直径之间的映射关系作为学习样本训练模型,使用训练后的模型,以 0.1 μA 为步长,估计 0.1~1 mA 的尖峰电流值所对应的泄漏孔直径,拟合所得的映射关系图像如图 18 所示,与样本点对比,拟合图像没有产生较大的误差,若以更多、更精确的样本数据对模型进行训练,得出的结果会更加准确。

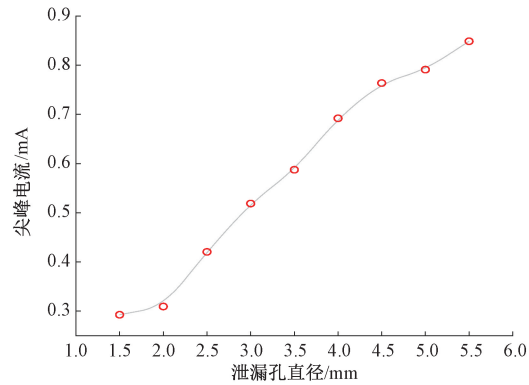


图 16 尖峰电流值随泄漏孔直径的变化

Fig. 16 Variation of spike current with diameter of leakage hole

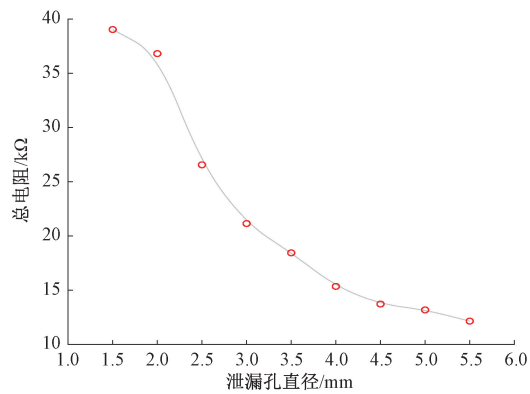


图 17 总电阻随泄漏孔直径的变化

Fig. 17 Variation of total resistance with diam of leakage hole

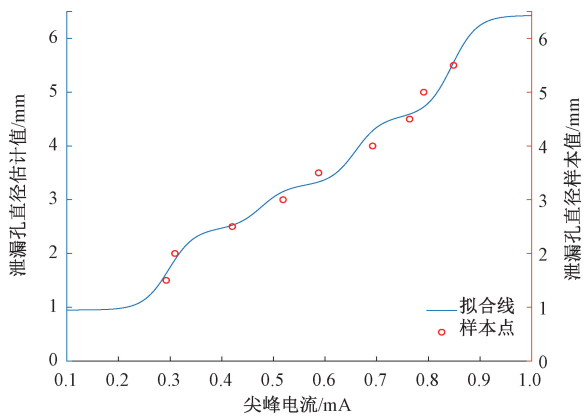


图 18 泄漏孔大小估计结果

Fig. 18 Estimation results of leakage hole size

因此只要预先采集足够的样本训练模型,在实测中得到某处的尖峰电流值后,即可快速地对该处泄漏孔的大小进行估计。值得注意的是,根据 1.2 节的讨论,在不同的土质状况(即大地的等效电阻率)下,尖峰电流值与泄漏孔直径会有不同的映射关系,需根据实际的土质状况确定模型,同时地面电极使用方式(包括形状大小、入地深度等)也会影响映射关系,映射关系确定后应尽量保持地面电极的使用方式不变。

4 结　论

提出了一种检测重力流排水管道泄漏的方法,从理论角度对检测原理和检测过程进行了分析,并通过有限元仿真对理论分析进行了验证,基于该方法设计了一套可用于实际检测的检测系统,搭建了实验平台,对检测系统的效果进行了验证,结果表明:

1)通过电流信号尖峰位置可有效定位泄漏孔,理论上具有十分高的准确度,但由于实际操作的原因,准确度会有所降低,实测 10 m 长的埋地管道,最大定位误差约 0.4 m,若配合更加准确的管内电极定位方法,误差会更小。

2)泄漏孔处的尖峰电流值随泄漏孔直径大小变化明显,根据实测所得的尖峰电流值,可以很明显地分辨 9 个直径梯度为 0.5 mm 的泄漏孔。在某种特定情况下(主要为土质状况等地面电极使用方式),预先实验采集大量样本训练神经网络模型,可大致拟合该种情况下尖峰电流值与泄漏孔直径之间的映射关系,实现根据检测结果快速估计泄漏孔大小,使用实测所得的 9 组数据为样本训练模型即可拟合出映射关系,若样本的数量更多、数值更准确,拟合效果也会更好。

参考文献

[1] BYKERK L, VALLS MIRO J. Vibro-acoustic distributed sensing for large-scale data-driven leak detection on urban distribution mains[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6897.

[2] HUANG X, LI Z, LI J, et al. Acoustic investigation of high-sensitivity spherical leak detector for liquid-filled pipelines[J]. Applied Acoustics, 2021, 174: 107790.

[3] 郑晓亮,谢晓贤,王强. 基于灰狼优化的埋地管道泄漏双波谱定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(8): 204-214.
ZHENG X L, XIE X X, WANG Q. Grey wolf optimization based buried pipe leak localization using dual-wave spectrum[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(8): 204-214.

[4] LANG X. Leak localization method for pipeline based on fusion signal[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(3): 3271-3277.

[5] HU X, ZHANG H, MA D, et al. Small leak location for intelligent pipeline system via action-dependent heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022,69(11):11723-11732.

[6] 石光辉,齐卫雪,陈鹏,等. 负压波与小波分析定位供热管道泄漏[J]. 振动与冲击,2021,40(14):212-218, 286.
SHI G H, QI W X, CHEN P, et al. Experimental study of leakage location in a heating pipeline based on the negative pressure wave and wavelet analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(14):212-218, 286.

[7] 贺宁,陈奕昕,贺利乐,等. 基于粒子滤波与压缩感知的管道泄漏定位[J]. 仪器仪表学报,2019,40(12): 36-46.
HE N, CHEN Y X, HE L L, et al. Pipeline leak location based on particle filter and compressed sensing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12):36-46.

[8] FU H, LING K, PU H. Identifying two-point leakages in parallel pipelines based on flow parameter analysis[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2022: 100052.

[9] ANFINSEN H, AAMO O M. Leak detection, size estimation and localization in branched pipe flows[J]. Automatica, 2022, 140: 110213.

[10] JIANG T, ZHU J, SHI Y. Detection of pipeline deformation induced by frost heave using OFDR technology[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 684954.

[11] SHA Z, FENG H, RUI X, et al. PIG tracking utilizing fiber optic distributed vibration sensor and YOLO[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4535-4541.

[12] SUN Q, SHA Z, CHEN L. Research on signal propagation model of buried pipe fiber vibration

monitoring system[J]. Optik, 2022, 250: 168365.

[13] HUANG X, LI Z, ZHANG Y, et al. Analyses and verifications of magnetic shielding of long pipelines aiming for pipeline orientation measurements[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 517: 167369.

[14] 石明江,陈瑞,冯林. 基于磁记忆的金属管道缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(1):44-53.
SHI M J, CHEN R, FENG L. Mental pipeline defect detection method based on magnetic memory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1):44-53.

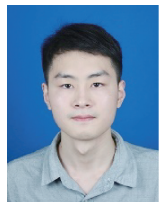
[15] 杨晓惠,蒲海峰,陈龙,等. 基于扩展磁荷模型的埋地管道弱磁检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):218-226.
YANG X H, PU H F, CHEN L, et al. Weak magnetic detection method on the buried pipeline based on the extended magnetic charge model[J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):218-226.

[16] 郑智慧,滕芸,童雪芳,等. 直流电流下土壤电阻率的变化规律及仿真研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2020, 53(1): 49-53.
ZHENG ZH H, TENG Y, TONG X F, et al. Variation and simulation of soil resistivity under DC current[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(1): 49-53.

[17] PARAMO R, FALEIRO E, ASENSIO G, et al. Functionally graded multilayered soil models, an alternative to modeling the soil electrical resistivity for computing the grounding resistance[J]. IEEE Access, 2021, 9: 55364-55372.

[18] DUAN Z, YAN X, SUN Q, et al. Effects of water content and salt content on electrical resistivity of loess[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(14): 1-15.

作者简介



杨东馥,2019 年于天津大学获得学士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生,主要研究方向为管道泄漏检测技术。
E-mail: yangdongfu1234@163.com

Yang Dongfu received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2019. He is currently a master student in the School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering at Tianjin University. His main research interest is pipeline leakage detection technology.

封皓(通信作者),2006 年于天津大学获得学士学位, 2011 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学副教授,主要研究方向为光纤传感技术、管道智能检测技术。
E-mail: fenghao@tju.edu.cn

Feng Hao (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2006, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 2011. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include optical fiber sensing technology, pipeline intelligent detection technology.