

# 基于探地雷达的长输管道泄漏位置识别方法研究

黄昕<sup>1</sup>, 王志付<sup>2</sup>

(1. 中石化皖能天然气有限公司, 安徽 合肥 230000;

2. 中油龙慧科技有限公司北京信息科技分公司, 北京 100032)

**摘要:** 为了在长输管道发生泄漏时及时准确地找到泄露位置, 研究基于探地雷达的长输管道泄露位置识别方法。分类探地雷达数据采集方式, 根据长输管道的具体位置和结构获取原始数据。建立分类集合, 以流量平衡模式估算介质传递时间。设定正演模拟参数, 在二维空间内对介质进行离散转换, 在对应相同时间步长下判断节点空间分量。通过退化函数构建最小均方差原则, 在相对均匀状态下处理数据识别长输管道泄漏位置。实验测试结果表明, 该方法应用下, 三组指标均超过98.5%, 且识别时间可控制在15 s之内, 具有应用价值。

**关键词:** 探地雷达; 长输管道; 泄漏位置识别

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0094-05

## Research on Leakage Location Identification Method of Long Distance Pipeline Based on Ground Penetrating Radar

HUANG Xin<sup>1</sup>, WANG Zhi-fu<sup>2</sup>

(1. Sinopec Wanneng Natural Gas Co., Ltd., Hefei 230000 China;

2. Beijing Information Technology Branch of PetroChina Longhui Technology Co., Ltd., Beijing 100032 China)

**Abstract:** In order to find the leakage location timely and accurately when the leakage occurs in the long distance pipeline, the method of identifying the leakage location of the long distance pipeline based on ground penetrating radar is studied. Classification of ground penetrating radar data acquisition methods, according to the specific location and structure of long distance pipeline to obtain the original data. A classification set is established to estimate the medium transfer time with the flow equilibrium model. The forward simulation parameters are set, the medium is discretized in two-dimensional space, and the node space component is judged under the corresponding time step size. The minimum mean square error principle is established by the degradation function, and the leakage location of long distance pipeline is identified by processing data in a relatively uniform state. Experimental test results show that under the application of the method in this paper, the three groups of indicators are more than 98.5%, and the recognition time can be controlled within 15 s, which has application value.

**Keywords:** ground penetrating radar; long haul pipeline; leak location identification

### 0 引言

随着输油管道的敷设距离越来越长, 管道的服役时间不断增加, 在管理应用过程中经常发生泄漏问题, 为了避免其对生产造成巨大损失、影响周边生态环境和沿线居民的身体健康, 需要及时对泄漏位置进行探测和识别<sup>[1]</sup>。徐长航<sup>[2]</sup>等人基于声发射信号提出了一种气液两相流管道泄漏识别方法, 选取0.1~0.4 MPa的气体压力, 利用小波包分解法和局部均值分解法提取主要信号, 利用BP神经网络对信号模式进行识别, 实现对气液两相流管道的泄漏检测。该方法的识别准确率得到了一定的提升, 但是仍有待进一步提高。聂维<sup>[3]</sup>等人设计了一种基于一

维卷积神经网络和长短期记忆网络的管道泄漏识别方法, 利用以上两种模型提取管道压力信号的空间特征和时间维度特征, 建立压力信号与管道状况的对应关系, 实现对管道泄漏的检测。该方法对于管道泄漏的检测精度有了明显提升, 但是仅能判定管道状态, 难以确定具体位置。林融冰<sup>[4]</sup>等人基于分布式光纤声波传感技术对管道侵入进行识别与定位, 利用长短窗比值法识别出管道沿线包括侵入事件在内的各种信号, 利用多道时差技术定位侵入位置。该方法初探了侵入事件的报警功能, 但是由于前期识别准确率不高, 导致后续的定位结果也存在一定的误差。为提高地下长输管道的识别准确性, 并及时准确地找到长输管道的泄漏位置, 本文以探地雷达技术为基础, 设计一个新的长输管道泄漏位置识别方法, 为

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0805806)

收稿日期: 2023-11-27

整合管道的空间位置信息和保证管路的运输安全提供理论支持。

## 1 探测雷达获取长输管道原始数据

探地雷达可以利用超高频脉冲的电磁波进行地下介质的探测,具有无损和高效等特征,其纵向分辨率高达 $10^{-2}$  m。由于探地雷达能够对地表或者地下的某些介质进行反射,且反射介电常数相差较大,因此在数据采集

需要通过多次波来获取资料,得到数据中多次波的类型和属性信息。

根据探地雷达中多次波的识别特征,设定长输管路原始数据的采集方式,分别剖面法、多次覆盖法以及宽角法,具体情况见图1<sup>[5]</sup>。

根据图1中内容所示, $h$ 表示发射天线, $j$ 表示接收天线,图1(a)中“虚线”表示天线的移动方向<sup>[6]</sup>。分别对不同的采集方式进行分析,具体情况见表1。

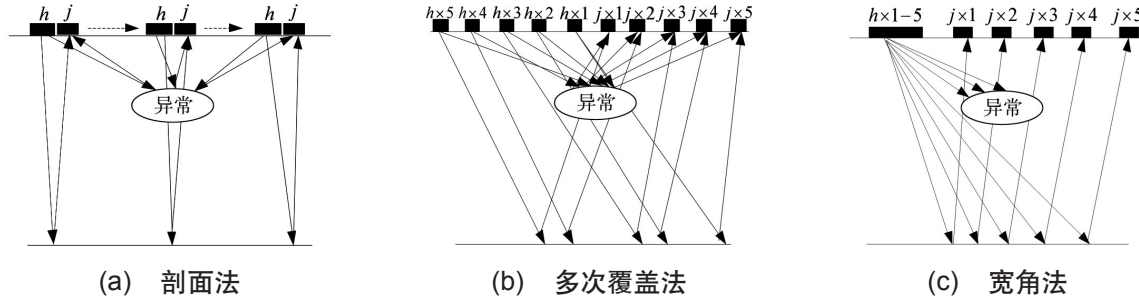


图1 探地雷达对长输管道原始数据的采集方式

表1 不同采集方式详情

采集方式	剖面法	多次覆盖法	宽角法
具体操作	1.固定间隔距离 2. $h, j$ 间隔为零采用单天线采集 3. $h, j$ 间隔大于零为双天线采集	1.设定中心固定点 2.将 $h, j$ 分布在两侧 3.反方向移动天线	1.固定 $h$ 在地面某点不动 2. $j$ 沿测线移动
优势	记录为二维剖面图像	1.测量点保持对称 2.固定步长	1.在较短时间内获取速度分布 2.天线位置可相互转化
获取内容	反射面起伏情况	中心点电磁波速度	1.介质传播速度 2.反射面深度信息

从不同的采集方式可知,对长输管道的原始数据采集,需要将天线放置于探测体表面,根据多次反射界面的不同,将多次波分类成层间多次波和自由表层波以及短程和全程多次波<sup>[7]</sup>。其中剖面法可以对大部分的管路进行采集,多次覆盖法和宽角法更偏向于需要详细解释的探测区,根据管道的实际位置和走向选择采集方式,并将获取到的数据构建为原始数据集。

## 2 确定泄漏介质传递时间

对长输管道的泄漏位置识别和定位的难度较高,一方面是由于不同管理的施工工程具有差异性,为具象化探地雷达采集到的原始数据,将上述数据构建为数据集,对管道中的压力和流量等参数进行估算,当数值偏差大于设定范围时,可以认定管路发生泄漏。

以压力梯度方式分析管道内的介质流动性质,参考流量平衡模式设定管道介质的传播方向和方式,当管路产生泄漏时介质会对运行参数造成扰动,形成特定的曲

线<sup>[8-9]</sup>。针对介质的流体特性设定运行模式,将采集到的原始数据分类为不同的工况,对各自工况条件下的采集时间差进行标定,则全程介质突变的传播时间如下:

$$p = p_a + p_s \quad (1)$$

式中: $p$ 表示介质突变的传播时间。 $a, s$ 分别为泄漏后泄漏点产生的压力传导的方向。则达到两点的的时间分别为 $p_a$ 和 $p_s$ 。假定雷达探测的管路长度为 $d$ ,则不同时间表示为:

$$p = \frac{d}{f} \quad (2)$$

$$p_a = \frac{d_{ag}}{f} \quad (3)$$

$$p_s = \frac{d_{sg}}{f} \quad (4)$$

式中: $f$ 为介质传播速度。 $g$ 表示为假定的泄漏点。对于一段特定的管路,当长度和输送介质为已知量时,可以在理想的状态下计算长输管路中介质的传播时间<sup>[10]</sup>。设定 $p_a$ 与 $p_s$ 的时间差为 $\Delta p$ ,即:

$$p_a - p_s = \Delta p \quad (5)$$

由此综合式(1)和式(5)可以转换为 $p_a = \frac{p + \Delta p}{2}$ ,基于此求取泄漏点与 $a$ 的距离,表达式如下:

$$d_{ag} = \frac{p + \Delta p}{2} \times f = \frac{p + \Delta p}{2} \times \frac{d}{f} = \frac{d}{2} \times \left(1 + \frac{\Delta p}{p}\right) \quad (6)$$

将 $a$ 点作为长输管道的首站,根据公式可以得出泄漏点到首站的距离,与管路长度和介质传导时间以及时间差有关,因此在特定的管理中,若传导介质的流动较为稳定,可以忽略其温度和黏度对传播速度的影响,直接通过

数学模型预测出传播时间,求取出对泄漏点定位的关键参数,即时间差 $\Delta p^{[11]}$ 。

在正常情况下,若长输管道没有遭受到人为操作影响,管道的压力基准值会在一定范围内波动,当发生泄漏时会产生负压波动,通过计算时间差确定泄漏点与首站之间的距离,判断泄漏点在空间中所处的节点位置。

### 3 正演模拟判断节点空间分量

对其内部的物质进行正演模拟,在不同的泄漏情况下获取泄漏节点的空间分量,利用正演模拟能够将地下长输管道作为目标体,使其探测存在一个形象化的结构,也能够提高雷达探测的正确性<sup>[12]</sup>。此次,通过正演模拟来获取雷达探测的介质传播途径,判断正常位置与泄漏位置的不同反应,在二维空间中构建推导方程:

$$\nabla q = \frac{w}{e} + r \quad (7)$$

$$\nabla t = -\frac{y}{e} - r_u \quad (8)$$

式中: $\nabla q$ 表示磁场强度,单位为A/m。 $w$ 表示电通量密度,单位为C/m<sup>2</sup>。 $\nabla t$ 表示电场强度,单位为V/m。 $y$ 表示磁通量密度,单位为Wb/m<sup>2</sup>。 $r$ 表示电流密度,单位为A/m<sup>2</sup>。 $r_u$ 表示磁流密度,单位为V/m<sup>2</sup>。 $e$ 表示探测时间,单位为s。为判断节点分量,将上述所有物理量转移至坐标系中,并且此次默认设定的方程组中的所有物理量均与Z轴坐标无关,即 $\beta/O_z=0$ 、 $qZ=tX=tY=0$ ,其中 $\beta$ 表示任意物理量, $O_z$ 表示Z坐标轴。则此时方程组可以被解耦成以下形式:

$$\frac{t_z}{Y} = -\chi \frac{q_x}{e} - \omega_i q_x \quad (9)$$

$$\frac{t_z}{X} = \chi \frac{q_y}{e} + \omega_i q_y \quad (10)$$

$$\frac{q_y}{X} - \frac{q_x}{Y} = \delta \frac{t_z}{e} + \omega t_z \quad (11)$$

式中: $t_z$ 为电场分量。 $q_x$ 、 $q_y$ 分别表示磁场在X、Y轴的分量。 $\delta$ 为介质介电系数,单位为F/m。 $\chi$ 为磁导系数,单位为H/m。 $\omega_i$ 为磁导率,单位为S/m。 $\omega$ 为电导率,单位为 $\Omega$ /m。依据上述设定的参数进行正演模拟, $t_z$ 可以根据周围的 $(q_x, q_y)$ 完成更新,而 $(q_x, q_y)$ 也可以根据 $t_z$ 进行更新,实现 $t, q$ 在相同时间步长中的分量取值判断。

### 4 最小均方差原则下识别管道泄漏位置

由于探地雷达在采集过程中其雷达信号是在动态过程中产生,其原始数据中不仅会含有真实信息,还会含有运动产生的模糊信号<sup>[13]</sup>。综合上文中获取的传播速度和时间差,经过正演模拟后能够进一步确定泄漏节点的空间分量,若想要准确地识别管道的泄漏位置,需要对存

在的运动信号进行剔除,以最小均方差原则处理图像数据:

$$z = \min \left\{ x \left\{ \left[ c''(n, m) - c(n, m) \right]^2 \right\} \right\} \quad (12)$$

式中: $z$ 表示最小均方差。 $c(n, m)$ 为原始数据图像。 $c''(n, m)$ 为整合后的图像数据。 $x(\bullet)$ 为均方差函数。在此基础上,对整合后的数据图像进行泄漏点标定,若想保证均方差最小原则成立,以退化函数进行表达:

$$v(n, m) = c(n, m) \times k(n, m) + b(n, m) \quad (13)$$

式中: $v(n, m)$ 表示最终需要的图像。 $k(n, m)$ 为退化函数。 $b(n, m)$ 为图像中可能含有的运动噪声,其中 $b$ 在未知情况下,需要寻找一个准则函数,使噪声项的范数尽可能降低,以此实现泄漏点在实际图像中的区分:

$$\|b\|^2 = \|v - kc''\|^2 \quad (14)$$

$$l(c'') = \|v - kc''\|^2 \quad (15)$$

式中: $l(c'')$ 为准则函数。 $c''$ 为具象的图像推导准则,一般情况下,需要使 $kc''$ 在最小二乘关系中近似于 $v$ 。则此时关于准则最小化的推导公式为:

$$\frac{l(c'')}{c''} = 2k \|v - kc''\| = 0 \quad (16)$$

根据上述公式可知,在设定的最小原则处理原始数据,能够使运动噪声处于相对均匀的状态,不会对泄漏点的节点标记造成影响,以此对相邻节点的位置进行函数假设,可以在介质满足传导条件下,实现对泄漏位置的标记并识别泄漏区域。

## 5 实验测试分析

### 5.1 搭建测试环境

上文中以探地雷达为应用技术,重新研究了长输管道的泄漏位置识别方法,为验证该方法能够进行准确且快速的位置识别,采用对比测试的方法进行论证,分别为基于深度学习的识别方法、基于小波熵的识别方法、基于加权相关的识别方法。测试共分为两个阶段:第一阶段验证不同方法检测的准确性,包括对管路图像的识别和泄漏点的识别,准确度越高识别定位效果越强;第二阶段测试识别时间,在多个泄漏点同时存在时验证不同方法的识别效率。

随机选择一组长输管路作为测试对象,建立管道的采集数据集,并按照是否发生泄漏以及泄漏区域进行分类,包含有:未发生泄漏图像、腐蚀洞口泄漏、裂缝区域泄漏三个类型。未泄漏图像能够与泄漏图像形成参照,当发生泄漏时,不同泄漏原因会产生不同形状,整理数据集后发现此次泄漏均为锥形形状。为保证此次测试的真实性,设定测试所需的环境以及配置参数:

(1) 硬件环境:计算机系统为UBUNTU16.08LTS,

系统位数为16位;CPU为INTEL-XEON-E7-5252V6,主频为4.6 GHz;内存大小为128 GB。

(2) 软件环境:OPENCE2.52.13;PYCHA RM2020;CUDA8.0+PYTORCH0.8。

(3) 运行参数:网络归一化参数为 $244 \times 244$ ;目标分类数量为5个;学习效率为0.002;最大采集次数为2000组。网络参数为FCN+UNET。

根据设定的测试环境对采集到的长输管路图像进行分类,按照目标像素和背景像素以及平均像素三个指标的进行评定,对各指标精度进行分析,测定数据是否符合测试条件,具体见表2。

表2 数据样本采集精度/%

指标	未发生泄漏图像	腐蚀洞口泄漏图像	裂缝区域泄漏图像
目标像素	98.5	70.2	78.6
背景像素	98.7	72.4	74.6
平均像素	98.6	71.3	76.6

如表2中内容所示,此次采集到的数据中没有发生泄漏的图像精度较高,而发生泄漏后的管道图像精度较差,目标像素和背景像素的精度基本无差别,容易造成干扰,因此直接通过图像进行泄漏位置标记不理想,具有测试条件。其中腐蚀洞口的精度要低于裂缝区域,将发生泄漏的数据集上传至测试平台,分别连接四组识别方法完成测试。

### 5.2 长输管道泄漏区域识别结果对比分析

为防止数据训练过于拟合,在整个运行系统中设定权重衰减系数为0.005,统计此次采集到的腐蚀洞口泄漏图像、裂缝区域泄漏图像数据分别为共1500组和1000组,以实际勘察结果对照采集图像,两个类型的图像数据分别来自地下长输管道和海底长输管道,地下管道基本为腐蚀泄漏、海底管道为裂缝泄漏,分别对泄漏图像中泄漏位置进行识别,按照识别精度、交并比和召回率作为对比项目,具体结果见图2。

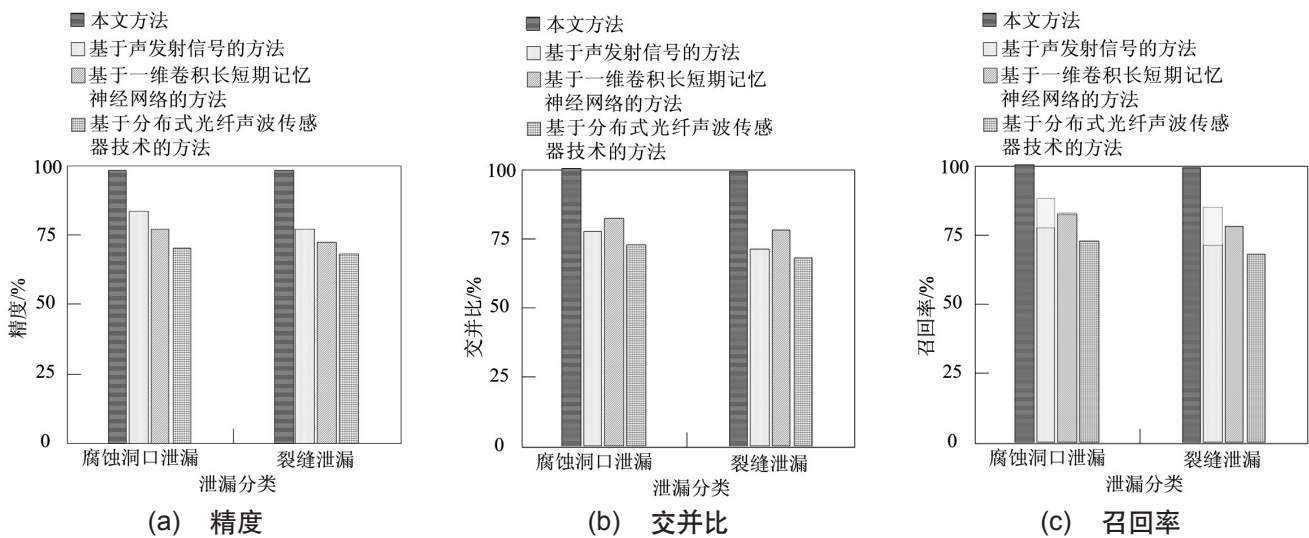


图2 泄漏区域识别结果

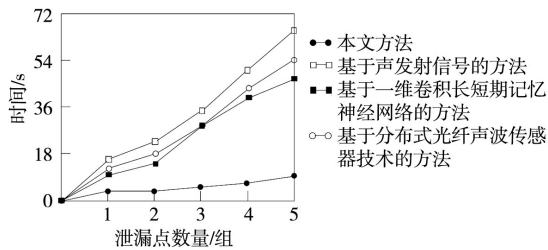
如图2所示在本文方法的应用下,无论是腐蚀洞口识别还是裂缝区域识别,其泄漏区域的识别精度和交并比以及召回率均大于98.5%,说明本文方法能够在采集到的图像中确定泄漏位置,准确地标记出泄漏区域。而三组传统方法在上述对比项目中存在差异,均低于本文方法,其中精度和召回率排序为:基于深度学习的识别方法>基于小波熵的识别方法>基于加权相关的识别方法;交并比排序为:基于小波熵的识别方法>基于深度学习的识别方法>基于加权相关的识别方法,且对裂缝泄漏的识别精度要低于腐蚀洞口的识别,综合比较下本文方法更加有效。

### 5.3 多个泄漏点位置定位时间对比分析

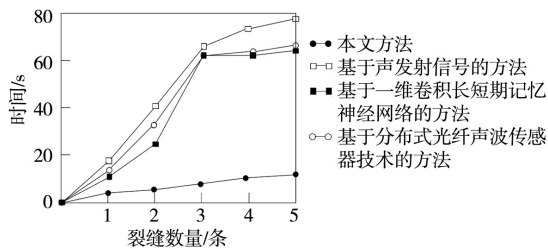
在上一阶段测试完毕后,能够验证本文方法的识别准确性,但由于长输管路中的介质压力较大,一旦发生泄

漏会造成严重后果,因此不仅需要较为精准地识别结果,还需要保证对泄漏位置的识别效率。仍按照上述两个泄漏类型进行比较,设定在管道上存在不同的数量泄漏点和泄漏裂缝,具体识别时间见图3。

根据图3中内容所示,在腐蚀泄漏类型中本文方法的识别时间变化较小,无论是存在几组泄漏点,均可以控制在10 s之内,其他三组传统方法的识别时间会随着泄漏点的增加逐渐增加,当泄漏点为5组时,传统方法的识别时间分别为65 s、45 s、50 s;而对于裂缝泄漏类型的识别,本文方法也能够控制在15 s之内,而三组传统方法的增长幅度更大,当裂缝为3组时,各自的识别时间均超过60 s,但后续识别时间增加较为缓慢,综合说明本文方法更具有应用价值。



(a) 腐蚀洞口泄漏类型



(b) 裂缝区域泄漏类型

图3 泄漏区域识别效率

## 6 结束语

为保证长输管路的运行安全,本文以探地雷达为应用技术设计了新的识别方法,并且在测试中论证了其应用效果,能够对泄漏位置进行准确且快速的识别。但由于此次研究时间有限,在测试环节仍存在一些不足之处,如对产生泄漏的具体图像没有进行展示,在实际操作中会存在偏差性,后续研究中针对问题所在提出更加有效的识别方法,为实地探测泄漏情况提供理论支持。

### 参考文献:

- [1] 李长生,杜翠,刘杰,等.基于探地雷达的路桥过渡段病害检

测识别方法[J].铁道建筑,2022,62(8):19-22.

[2] 徐长航,刘鹏谦,李振兴,等.基于声发射信号的气液两相流管道泄漏识别方法[J].油气储运,2021,40(10):1131-1137.

[3] 聂维,江竹,刘伯相,等.一维卷积长短期记忆神经网络的管道泄漏检测方法[J].中国农村水利水电,2022(1):147-157.

[4] 林融冰,曾祥方,包丰,等.基于分布式光纤声波传感技术的管道侵入识别与定位[J].油气储运,2021,40(5):545-560.

[5] 邓勇,曹敏,赖治屹.基于深度学习的天然气管道气体压力超声检测模式识别方法[J].电子测量与仪器学报,2021,35(10):176-183.

[6] 崔国宁,杨理践,耿浩,等.基于卷积神经网络的管道缺陷量化识别方法[J].仪表技术与传感器,2022(10):99-103.

[7] 沈明松,曾绍攀,廖振陆.输电线路通道树障生长风险预防系统[J].自动化技术与应用,2022,41(4):99-103.

[8] 王浩,李耐心.输电线路故障行波波头检测方法研究[J].自动化技术与应用,2023,42(12):55-56,167.

[9] 洪恩雨.大管径给排水管道径向变形自动检测[J].自动化技术与应用,2023,42(2):36-40.

[10] 邓勇,蒋田,赖治屹.基于DBN和LSSVM的管道气体压力检测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(6):198-204.

[11] 贾文龙,孙溢彬,汤丁,等.基于支持向量机的输气管道泄漏压降信号智能识别方法[J].化工进展,2022,41(9):4713-4722.

[12] 秦臻,黄波林,张鹏.基于探地雷达检测的岩溶岸坡内部宏观裂隙响应规律研究[J].工程地质学报,2021,29(3):628-639.

[13] 尹渊博,袁辰,杜荟敏,等.基于扰动响应的输油管道泄漏检测方法[J].振动与冲击,2022,41(23):43-50.

作者简介:黄昕(1982-),男,高级工程师,研究方向:天然气项目建设及安全运营管理。

(上接第60页)

### 参考文献:

[1] 聂为之,王岩,杨嵩,等.基于循环生成对抗网络的跨媒体信息检索算法[J].计算机学报,2022,45(7):1529-1538.

[2] 刘芳名,张鸿.基于多级语义的判别式跨模态哈希检索算法[J].计算机应用,2021,41(8):2187-2192.

[3] 赵晋斌,王凯,李盼.基于规则推理和贝叶斯网络算法的多方证据关联分析[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(5):508-514.

[4] 钟坤华,陈芋文,秦小林.基于子网融合的贝叶斯网络结构学习算法[J].计算机科学,2022,49(S2):64-70.

[5] 陈树丽,张学帅,张鹏远,等.静音掩蔽和频域分段的音频指纹检索算法[J].声学学报,2022,47(4):531-540.

[6] 高萍.基于混合属性数据的高校图书馆文献精准检索方法[J].科技通报,2022,38(8):118-121.

[7] 冯睿琳.面向深度学习的智慧图书馆文本相关性资源数据检索模型设计[J].自动化技术与应用,2021,40(12):41-44.

[8] 姜轶岚,夏寒,金晓卿.基于用户个性化需求的一站式信息搜索推送方法研究[J].中国卫生资源,2022,25(1):139-143.

[9] 孙昊.基于改进随机森林的海量高维数据最近邻检索[J].自动化技术与应用,2022,41(11):73-76.

[10] 张仕,赖会霞,肖如良,等.开放环境多分布特性的局部敏感哈希检索方法[J].软件学报,2022,33(4):1200-1217.

[11] 周斌,李锋,杨福军,等.验证与确认数据库系统设计与实现[J].自动化技术与应用,2023,42(12):80-84,171.

[12] 刘浩然,王念太,王毅,等.基于V-结构&对数似然函数定向与禁忌爬山的贝叶斯网络结构算法[J].电子与信息学报,2021,43(11):3272-3281.

[13] 赵会群,曲艺.面向组合投资预测的大数据生成算法[J].计算机工程与设计,2021,42(2):388-395.

作者简介:孙琳(1987-),女,硕士,馆员,研究方向:图书馆管理、信息检索与咨询研究。

通信作者:王天一(1992-),女,本科,工程师,研究方向:建设项目全过程管理研究。