文章编号:1001-5078(2025)04-0540-06

·激光应用技术 ·

基于激光扫描基准修正的埋地管道泄漏定位

李荣光1,孙 伶1,于立成2,姜柳生2

(1. 国家管网集团北方管道有限责任公司,河北 廊坊 065000;2. 海隆石油集团(上海)信息技术有限公司,上海 201900)

摘 要:传统基于传感器采集压力的管道泄露检测,很容易受到管道周围环境噪声、土壤条 件、管道材质等因素的影响,导致定位结果不准确。针对上述问题,研究一种基于激光扫描 基准修正的埋地管道多点泄漏定位方法。利用激光扫描技术采集埋地管道内部图像并实 施基准修正处理。利用 Canny 算法检测图像边缘并提取几何特征。以几何特征为输入,训 练随机森林算法,利用随机森林算法识别埋地管道泄漏点并通过坐标转换,实现埋地管道 多点泄漏定位。结果表明:所研究方法在泄露点定位上的平均误差最小,显示出较高的定 位精度和稳定性。

关键词:激光扫描;基准修正;埋地管道;多点泄漏;特征提取;定位方法 中图分类号:TP274;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.009

Leakage location of buried pipeline based on laser scanning reference correction

LI Rong-guang¹, SUN Ling¹, YU Li-cheng², JIANG Liu-sheng² (1. Pipe China North Pipeline Company, Langfang 065000, China; 2. Hilong Group(Shanghai) Information Technology Limited Company, Shanghai 201900, China)

Abstract: Traditional pipeline leakage detection methods relying solely on pressure sensors often suffer from inaccuracies due to various factors, including environmental noise, soil conditions, and pipeline materials around the pipeline, causing inaccurate positioning results. To overcome these challenges, a multi-point leakage localization method for buried pipelines based on laser scanning benchmark correction is studied. Firstly, laser scanning technology is used to collect images of buried pipelines and implementing benchmark correction processing. Subsequently, the Canny algorithm is adopted to detect image edges and extract geometric features and the random forest algorithm is trained with the geometric features as input. The leakage points of buried pipelines are recognized by the random forest algorithm and multi-point leakage localization is achieved through coordinate transformation. The results indicate that the studied method has the smallest average error in locating the leakage point, demonstrating high positioning accuracy and stability.

Keywords: laser scanning; benchmark correction; buried pipelines; multiple leakage points; feature extraction; positioning method

1 引 言

在现代城市化与工业化的浪潮中,埋地管道作 为城市基础设施的关键组成部分,承载着能源与资 源的传输重任。其安全稳定运行直接关系到社会的 正常运作与民众福祉。然而,管道老化、腐蚀及外部 环境因素如地质变动、气候变迁等,共同构成了管道

收稿日期:2024-08-14

基金项目:智慧管网建设运行标准研究项目(No. JCGL202108)资助。

作者简介:李荣光(1980-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为维抢修科研攻关及数字化管理等。E-mail:rbeil62@ 163.com

泄漏的潜在风险^[1]。这些风险一旦转化为实际泄漏,将引发资源浪费、环境污染乃至安全事故,对社 会与环境构成重大威胁。

针对埋地管道泄漏定位问题,国内外学者提出 了多种方法。韩文翔^[2]等人基于声波分析,通过管 道两端传感器采集的声波信号,利用相关系数匹配 与时间差计算,实现了单点泄漏定位。但声波信号 的衰减及复杂环境干扰限制了其精度与适用范围。 Zhao Siliang^[3]等人则引入多尺度残差网络,通过深 度学习模型提取信号特征,提升了泄漏检测的准确 性,但数据标注难题与模型泛化能力仍是挑战。郑 晓亮^[4]等人提出的基于灰狼优化算法的泄漏定位 方法,利用双波谱函数与三维空间谱函数,通过迭代 优化求解泄漏源位置,针对多点泄漏情况进行了初 步探索,但多点泄漏下的声波信号干扰增加了定位 难度。易康^[5]等人结合经验模态分解(EMD)与负 压波时间差定位,再通过加权融合算法优化结果,但 算法性能易受参数选择影响。

鉴于传统方法在多点泄漏定位中的局限性,激光 扫描技术以其高精度与非接触性优势,逐渐在管道检 测领域崭露头角。本文提出一种基于激光扫描基准 修正的埋地管道多点泄漏定位新方法。该方法旨在 通过激光扫描技术快速获取管道及其周围环境的精 确三维数据,结合基准修正算法,有效排除外部环境 干扰,实现对多点泄漏位置的精准定位。此方法有望 显著提升泄漏检测的效率与准确性,为城市能源安 全、水资源管理及环境保护提供坚实的技术支撑。

2 埋地管道多点泄漏定位方法研究

快速、准确的泄漏定位不仅能够及时止损,减少 资源的浪费和环境的破坏,还能为后续的维修和恢 复工作提供有力的支持,确保管道系统的安全稳定 运行^[6]。研究结合激光扫描基准修正技术进行定 位,研究分为三部分,即采集与处理、激光扫描图像 特征提取以及定位实现。

2.1 激光扫描采集埋地管道图像与基准修正处理

在埋地管道多点泄漏定位中,首要且关键的工 作是精确采集地下管道及其周围环境的数据。传统 的采集方法,如声波传感器、高清摄像头等,虽然在 一定程度上提供了有关泄漏的信息,但它们在实际 应用中仍存在一些明显的不足^[7]。声波传感器受 限于声音在土壤和管道材料中的传播特性,其定位 精度往往不够理想,特别是在复杂环境或长距离传 输时。此外,声波法还容易受到环境噪声和其他声 源的干扰,导致误报或漏报。高清摄像头虽然能够 直接观察管道内部的情况,但其在埋地管道中的应 用存在诸多限制^[8]。由于埋地管道的封闭性和限 制空间,高清摄像头难以部署和移动,且其在黑暗环 境中,视野范围有限,难以覆盖整个管道系统。此 外,摄像头对于管道外的环境信息几乎无法获取,这 限制了其在多点泄漏定位中的应用^[9]。为了克服 这些不足,研究中采用了激光扫描技术进行数据采 集。激光扫描技术通过发射激光束并测量其反射时 间,可以获取地下管道及其周围环境的三维数据。 然而,管道这种复杂且不平的环境,激光扫描设备在 长时间使用或移动后,其内部参数(如激光发射角 度、扫描速度等)可能会发生变化,导致扫描结果出 现偏差。为此,需要进行基准修正,采用的修正方法 是多站扫描与拼接,通过在不同位置设置多个扫描 点,对同一区域进行多次扫描,然后进行拼接和融 合,以提高数据的完整性和准确性^[10]。首先计算数 据点之间的误差,即:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} (x_i - x_j)}{n} \\ \Delta y = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} (y_i - y_j)}{n} \\ \Delta z = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} (z_i - z_j)}{n} \end{cases}$$
(1)

式中, $\Delta x \langle \Delta y \rangle \Delta z$ 代表误差平均值。 $(x_i, y_i, z_i) \langle (x_i, y_i, z_i) \rangle$ (y_i, z_i) 代表数据点 i j的三维数据。

基于误差,选择一个数据点作为基准点,按照下 述公式进行基准点误差修正。

$$\begin{cases} \hat{x}_i = \Delta x + \lambda \theta_x x_i \\ \hat{y}_i = \Delta y + \lambda \theta_y y_i \\ \hat{z}_i = \Delta z + \lambda \theta_z z_i \end{cases}$$
(2)

式中, $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ 代表修正后的数据点; λ 代表修正 系数; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 代表绕三个方向的旋转矩阵。

基于修正后的激光数据,使用建模软件(如 AutoCAD、Revit 或 3ds Max 等)生成埋地管道图像,完 成埋地管道图像采集。这种技术具有高精度、高效 率、非接触式测量等优点,能够有效地覆盖整个管道 系统,并捕捉到管道内外的各种信息^[11]。为了将激 光扫描设备有效地应用到埋地管道中,研究将其搭 载到管道机器人上。管道机器人能够灵活地在管道 内部移动,将激光扫描设备带到需要测量的位置,从 而实现对整个管道系统的全面扫描。通过结合激光 扫描技术和管道机器人,能够实现对埋地管道多点 泄漏的精确定位,为后续的维修和恢复工作提供有 力的支持^[12]。

2.2 激光扫描图像特征提取

在激光扫描图像中,提取特定的特征是实现高效目标识别和定位的关键步骤,这一点对于埋地管道多点泄漏定位来说尤为重要^[13]。特征包括形状特征、纹理特征、大小特征等,它们能够描述泄漏点在激光扫描图像中的独特表现。例如,泄漏点可能会在激光扫描图像中形成特定的形状(如圆形、椭圆形等),或者在纹理上与周围环境存在明显差异。通过提取这些特征,可以实现对泄漏点的快速识别和分类。本研究中,针对形状特征进行提取。首先利用 Canny 算子,进行边缘检测,具体过程如下:图像平滑处理,即:

$$A(x,y,z) = \frac{e^{\frac{x^2+y^2+z^2}{2\beta^2}}}{2\pi\beta^2}$$
(3)

式中, A(x,y,z) 代表滤波后的激光图像; β代表高 斯函数的标准差。

计算梯度强度和方向。梯度强度表示边缘的强弱,而梯度方向则指向边缘的法线方向。

$$\begin{cases} B = \sqrt{\left(\frac{\partial A(x,y,z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A(x,y,z)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A(x,y,z)}{\partial z}\right)^2} \\ C = \arctan\frac{\left(\frac{\partial A(x,y,z)}{\partial x}\right)}{\left(\frac{\partial A(x,y,z)}{\partial y}\right)} \end{cases}$$
(4)

式中, *B*、*C* 代表梯度强度、方向。在梯度强度和方向上应用非极大值抑制,以消除边缘检测中的冗余响应。非极大值抑制只保留梯度强度在局部范围内的最大值点,从而得到细化的边缘^[14]。设置两个阈值(高阈值和低阈值)对梯度强度进行阈值处理。高阈值用于得到确定的边缘,而低阈值用于捕获可能的边缘。然后,通过滞后阈值方法,将低阈值得到的边缘连接到高阈值得到的边缘上,从而得到完整的边缘图像^[15]。基于得到的边缘图像,提取边缘的几何特征。具体如下:

(1)周长 d_1 :其所有边之和的长度。

$$d_1 = \sum_{i=1}^{N} \{r_i = 1\}$$
(5)

式中, r_i代表第 i 个数据点像素值; n 代表边缘上的数据点数量。

(2) 面积 d2: 几何图形所占的平面空间大小。

$$d_2 = \sum_{i=1}^{m} \{r_i = 1\}$$
(6)

式中, m 代表边缘包含区域内的像素点数量。

(3)矩形拟合因子 d3:外接矩形的充满程度。

$$l_3 = \frac{d_2}{R} \tag{7}$$

式中, R 代表边缘区域最小外接矩形面积;

(4) 宽长比 d₄:外接矩形宽度与长度之间关系的参数。

$$d_4 = \frac{u}{V} \tag{8}$$

式中, u 代表边缘区域最小外接矩形的宽度、长度。

(5)圆形度 *d*₅:边缘区域与其外接圆的接近 程度。

$$d_5 = \frac{1}{d_1} \cdot 4\pi d_2 \tag{9}$$

经过特征提取,将得到的特征以集合的形式进行整理,记为 $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4d_5\}_{\circ}$

2.3 埋地管道多点泄漏识别与定位

本章探讨利用随机森林算法对激光扫描图像特 征提取结果进行埋地管道多点泄漏识别的过程。随 机森林通过集成多棵基于自助抽样和随机特征选择 的决策树,提升分类准确性并减少过拟合。应用自助 法从原始数据集中重复抽样构建多个训练集,每棵树 基于独立训练集训练,并在构建过程中随机选取特征 子集以决定分裂^[16]。此过程确保每棵树独立且多样 化,增强模型泛化能力。通过合并各树预测结果,随 机森林有效识别埋地管道的多点泄漏,为管道维护与 安全监测提供可靠的技术手段。具体过程如下:

1) 设定决策树的根节点,并将整个训练数据集 作为该节点的样本集。

2)对于每个特征,计算其信息增益。首先计算 信息熵:衡量数据集的混乱程度或不确定性。信息 熵越小,数据集越纯。

$$U = -\sum_{i=1}^{n} P(k_i) \cdot \log_2 P(k_i)$$
 (10)

式中, n 代表类别数量; P(k_i) 代表样本集合中第 i 个类别 k_i 所占比例。

根据信息熵计算信息增益。信息增益衡量了使 用该特征进行分裂后,数据集的纯度提升程度。

$$F(X,d) = U(X) - \sum_{l \in D(d)} \frac{|X_l|}{|X|} \cdot U(X_l) \quad (11)$$

式中, F(X,d) 代表信息增益; U(X) 代表样本集合 X 的信息熵; X_l 代表样本集合 X 中特征 d 对应值为 l的样本子集; |X|代表整个数据集的样本数量; $|X_l|$ 代表样本子集 X_l 的样本数量; D(d) 代表属性

d 所有可能取值的集合。

3)选择信息增益最大的特征作为当前节点的 分裂特征。

4)根据该特征的不同取值,将当前节点的样本 集划分为多个子集,每个子集对应一个取值。

5)对于每个子集,递归地执行步骤2)和步骤 3),构建当前子集的子树。

6) 递归终止。

决策树构建完成,就可以使用它来对新的、未见 过的样本进行识别。在获得泄漏识别结果后,下一步 是对泄漏点进行定位和标注。为了在激光扫描图像 上直观地展示泄漏点的位置,使用一个矩形锚框来标 注每个被识别为泄漏的区域。这个矩形框的大小和 位置需要根据区域的形状和大小进行确定。接着,确 定其中心点在图像上的三维坐标位置,该坐标就是泄 漏点在图像中的坐标,最后,建立图像坐标与世界坐 标之间的映射关系,从而实现对泄漏点的精确定位。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \left\{ \Im \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} + \Re \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \right\}$$
(12)

式中, 3、31代表平移距离、旋转角度的变换矩阵;

$$\begin{bmatrix} x'\\ y'\\ z' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x\\ y\\ z \end{bmatrix}$$
代表转换前、后的坐标;
$$\begin{bmatrix} G_x\\ G_y\\ G_z \end{bmatrix}$$
代表平移
距离;
$$\begin{bmatrix} \theta_x\\ \theta_y\\ \theta_z \end{bmatrix}$$
代表旋转角度。

将定位结果以可视化的形式展示在激光扫描图 像上。通过标注泄漏点并显示其三维坐标,可以更 直观地了解泄漏点的位置和数量,为后续的维修和 修复工作提供重要的参考信息,这不仅能够提高泄 漏识别的准确性和效率,还能够减少对环境的影响 和保障管道系统的安全运行。

3 算例分析

3.1 算例概况

为验证基于激光扫描基准修正的埋地管道多 点泄漏定位技术的有效性,本研究选取一工业园 区内钢质输油管道作为实验对象。该管道直径 800 mm,壁厚10 mm,具有代表性。管道段长约 50 m,南北走向,已知存在两处因老化腐蚀导致的 泄漏点,位置与大小已精确标定。实验区域地形 平坦,砂质土壤透水性佳,泄漏导致的地形变化明 显,且无其他地下干扰因素,确保了实验环境的纯 净与数据的准确性。此选择不仅贴合实际工业场景,还充分考虑了技术验证的全面性与挑战性,为 后续激光扫描与定位实验奠定了坚实基础。通过 此实验,旨在深入探索并验证新方法在复杂环境 下的应用潜力与精准度。

3.2 实验样本采集

利用如图 1 所示管道机器人搭载激光扫描设备,进行实验样本采集。



图 1 管道机器人搭载激光扫描设备 Fig. 1 Pipeline robot equipped with laser scanning equipment

图1中的管道机器人为是一种采用轮子作为移 动机构的机器人,能够迅速地在管道内部或外部进 行移动,通过搭载的激光扫描设备,可以对管道内部 进行全方位的检测,发现管道破损、堵塞等问题。针 对50米的输油管道,共采集了526个激光扫描图像 样本,示例如图2所示。



图 2 激光扫描图像样本 Fig. 2 Sample laser scanning image

这些样本中,其中45个样本为存在泄漏点的样本,其余样本为无泄露点样本。

3.3 特征提取测试

基于 2.3 节的研究,提取边缘区域的几何特征, 结果如表 1 所示。

基于表1结果,为后续定位提供了关键依据。 3.4 结果与分析

利用随机森林算法对 526 个激光扫描图像样本 进行泄露点识别并进行定位,结果如图 3 所示。

通过应用所研究方法对泄露点进行定位分析,成 功地从图3中识别出了泄露点的精确位置坐标。这 一成果不仅验证了该研究方法在理论上的正确性,也 充分展示了其在实际应用中的可行性和有效性。

Tab. 1 Geometric feature list (part)							
样本编号	周长	面积	圆形度	矩形拟合因子	宽长比		
1	100. 29	785.43	0. 98	0. 85	1.62		
2	85.36	567.28	0. 89	0. 92	1.05		
3	120. 18	1131.08	0.95	0. 78	1.68		
4	92.75	665.96	0. 87	0. 82	0. 53		
5	110.44	949. 73	0. 92	0. 89	1.74		
6	78.53	491.08	0. 85	0. 95	1.64		
7	130.06	1327.06	0.97	0. 75	2.02		
8	99.86	784. 20	0.90	0. 80	1. 54		
9	105.69	862.42	0. 93	0. 87	0. 84		
10	112. 52	654.84	0. 91	0. 74	0. 79		

表1 几何特征表(部分)



Tab. 1. Coometrie feature list(part)

图3 泄露点识别及定位结果 Fig. 3 Results of identification and location of leakage points 为进一步证明所研究方法的定位准确性,计算 定位结果与已知的实际结果之间的平均误差,并与 传统方法进行对比,结果如表2所示。

表 2 泄露点定位平均误差对比

Tab. 2 Comparison of average error

		-		
方法	泄露点	X	Y	Ζ
彩研索十进	1	0. 053	0.082	0.032
別研究力法	2	0. 084	0.071	0.025
→±[2]→±	1	0. 224	0. 25	0. 205
又歌[2]万法	2	0. 217	0. 235	0. 212
ナ #[2]ナンナ	1	0. 324	0. 126	0.093
又歌[3]万法	2	0. 182	0. 135	0.118
→±[1]→>+	1	0. 288	0. 275	0. 262
又歌[4]万法	2	0. 295	0. 283	0. 276
<u>→</u> ±\[ɛ]→→	1	0. 170	0. 195	0. 163
乂旤[3] 力法	2	0. 149	0. 205	0.213

of leakage location

从表2中可以看出,所研究方法在泄露点定位

上的平均误差最小,显示出较高的定位精度和稳定性。相比之下,其他方法在不同程度上表现出较大的误差,可能需要进一步改进以提高定位精度。

4 结 语

研究高效、精准的埋地管道泄漏定位方法,对于 及时发现并处理泄漏事故,保障管道安全具有重要意 义。在此背景下,研究提出了"基于激光扫描基准修 正的埋地管道多点泄漏定位方法"。该方法利用激光 扫描技术的高精度、高效率特性,结合基准修正算法, 消除了测量误差和环境干扰对定位结果的影响,实现 了对埋地管道多点泄漏的快速、精准定位。另外,结 合随机森林算法准确识别出潜在的泄漏区域并通过 坐标转换确定泄漏点的位置。研究不仅解决了传统 定位方法在多点泄漏场景下定位精度低下的问题,还 为埋地管道泄漏检测领域带来了改进思路,为泄漏事 故的应急处理提供了有力的技术支持。

参考文献:

- [1] Yang Jian, Wu Yujia, Xu Ning, et al. Locating of multipoint leakage in pipeline based on ICEEMD sample entropy[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(6):757 762. (in Chinese)
 杨健, 吴雨佳, 许宁, 等. 基于 ICEEMD 样本熵分析的 管道多点泄漏定位[J]. 消防科学与技术, 2022, 41 (6):757 762.
- [2] Han Wenxiang, Zhang Lanzhu. Research on pipeline multi-point leakage location based on the time difference location method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022,41(24):210-217. (in Chinese)
 韩文翔,章兰珠. 基于时差定位法的管道多点泄漏定 位研究[J]. 振动与冲击,2022,41(24):210-217.
- [3] Zhao Siliang, Zhou Linhui, Liu Shaogang, et al. Liquidfilled pipeline leak detection and localization based on multi-scale residual networks[J]. Measurement Science & Technology,2024,35(5):055012.
- [4] Zheng Xiaoliang, Xie Xiaoxian, Wang Qiang. Grey wolf optimization based buried pipe leak localization using dual-wave spectrum[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 204 214. (in Chinese)
 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.
- [5] Yi Kang, Cai Changxin, Liao Ruiquan, et al. Pipeline leakage detection and location method based on WOA-VMD and IAWF[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(33):14220-14230. (in Chinese)

易康,蔡昌新,廖锐全,等.基于鲸鱼优化算法的变分 模态分解和改进的自适应加权融合算法的管道泄漏 检测与定位方法[J].科学技术与工程,2023,23(33): 14220-14230.

- [6] Wang Dongmei, Tong Yingli, He Zhuang, et al. Generalized third cross-correlation pipeline leakage location detection based on VMD[J]. Pressure Vessel Technology, 2024,41(2):72-80. (in Chinese)
 王冬梅,童影力,何壮,等. 基于 VMD 的广义三次互相 关管道泄漏定位检测[J]. 压力容器,2024,41(2):72-80.
- [7] Tian Baozhu, Xu Wentao, Liang Peng, et al. Acoustic emission localization method of buried water pipeline leakage based on multi-sensor fusion [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (24):10307 - 10316. (in Chinese)

田宝柱,徐文涛,梁鹏,等.基于多传感器融合的埋地 输水管道泄漏声发射定位方法[J].科学技术与工程, 2023,23(24):10307-10316.

[8] Guo Shuaijie, Zhang Lishen, Li Cheng, et al. Leakage detection and localization of direct buried hot water heating pipeline by acoustic wave method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (11): 4765 - 4772. (in Chinese)

郭帅杰,张立申,李成,等. 声波法直埋热水供热管道 泄漏检测定位[J]. 科学技术与工程,2023,23(11): 4765-4772.

[9] Zhou Zhiyi, Yin Guanxiong, Wang Bin, et al. A new twostage natural gas pipeline leakage locating method considering base point and correction point[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5):88-99. (in Chinese) 周芷怡, 尹冠雄, 王彬, 等. 考虑基准点——修正点两 阶段的天然气管道泄漏定位新方法[J]. 天然气工业,

2023,43(5):88 - 99.

[10] Chen Kaixiang, Liu Ran, Zhao Bin, et al. Laser positioning method based on line endpoint direction matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(4):448-455. (in Chinese)

> 陈凯翔,刘冉,赵宾,等.基于直线端点方向匹配的激 光定位方法[J].激光与光电子学进展,2024,61(4):

448 - 455.

- [11] Liu Xin'gen, Xu Minjuan, Xing Zhixin. Rapid detection technology of metro tunnel convergence deformation based on laser scanning[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9):
 63-68. (in Chinese) 刘新根,许敏娟,邢智馨. 基于激光扫描的地铁隧道收 敛变形快速检测技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9):63-68.
- [12] Zhu Boyuan, Ren Yongjie, Duan Xianlong, et al. Passive multi-target location method based on rotating laser scanning[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5):66 76. (in Chinese)
 朱博源,任永杰,段显龙,等.旋转激光扫描无源多靶点定位方法[J].光学学报,2022,42(5):66 76.
- [13] Wu Gang, Zhao Min, Zheng Xin, et al. Microleakage iocating algorithm of gas gathering pipeline based on whitening filter[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41 (2):159-164. (in Chinese) 武刚,赵敏,郑欣,等. 基于白化滤波的天然气集输管 道微泄漏定位方法[J]. 油气储运, 2022, 41 (2):159-164.
- [14] Zhu Meng, Ma Qihua. Online calibration method of lidar and vision sensor combined system[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(8):1-6. (in Chinese) 朱蒙,马其华. 激光雷达和视觉传感器组合系统的在 线校准方法[J]. 电子设计工程, 2024, 32(8):1-6.
- [15] Wang Mengying, Lu Anjiang, Zhao Wenpei, et al. Adaptive weld recognition algorithm based on a modified Canny operator [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(10):162 169. (in Chinese)
 王梦莹,陆安江,赵文培,等. 基于改进 Canny 算子的自适应焊缝识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42 (10):162 169.
- [16] Li Dan, Zhagn Wenqi, Wang Shouxi, et al. Single variable fault warning method for gas pipelines during operation based on SPC-RF[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11):1341-1348. (in Chinese) 李丹,张文奇,王寿喜,等. 基于 SPC-RF 的天然气管道 运行单变量故障预警方法[J]. 油气储运, 2022, 41 (11):1341-1348.