

净水技术前沿与热点综述

沈加子, 李继, 韩慧丽, 等. 城市排水管道缺陷检测技术与智能识别综述:方法、对比与应用展望[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 6-16.

SHEN J Z, LI J, HAN H L, et al. Overview of defect inspection technology and intelligent identification for urban drainage pipelines: Methods, comparisons, and application prospects [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 6-16.

城市排水管道缺陷检测技术与智能识别综述:方法、对比与应用展望

沈加子¹, 李继¹, 韩慧丽², 徐洪福², 张小磊^{1,*}

(1. 哈尔滨工业大学<深圳>土木与环境工程学院, 广东深圳 518055; 2. 深圳市龙岗排水有限公司, 广东深圳 518026)

摘要 随着城市经济的持续增长,排水管道作为城市基础设施的关键构成部分,其运行状态的有效监测与评估显得尤为重要。【目的】因此,研究目的在于全面了解排水管道缺陷检测方法以及在排水管道缺陷检测领域的最新研究进展。【方法】采用了文献调研的方法,对国内外相关研究进行分析比较。【结果】根据文献调研显示,视觉检测技术相较于其他现存排水管道缺陷检测技术而言,因其成本低、输出数据直观性强的独特优势已成为目前主流的检测手段。同时,人工智能模型的应用逐渐兴起,通过对视觉检测图像进行自动识别和分类,有效提高了检测效率。智能检测识别的研究主要集中于图像预处理、图像特征提取以及机器学习3个部分,其中降噪、对比度增强等图像预处理技术提升了图像质量,而特征提取方法和机器学习模型则决定了检测的准确性和泛化能力。【结论】尽管排水管道缺陷智能识别技术取得了一定进展,但仍面临挑战:①不同图像处理算法适用场景各异,如何针对不同缺陷类型选择最优算法仍需深入研究;②管道环境复杂多变,模型泛化能力不足,影响缺陷检测的稳定性;③深度学习模型依赖大规模高质量数据集,计算成本高。因此,未来研究应重点优化特征提取方法,提升算法的适应性与泛化能力,并构建完善的管道缺陷数据库,以推动智能检测技术的发展。

关键词 排水管道 检测方法 自动识别 深度学习 管道缺陷

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)06-0006-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.002

Overview of Defect Inspection Technology and Intelligent Identification for Urban Drainage Pipelines: Methods, Comparisons, and Application Prospects

SHEN Jiazi¹, LI Ji¹, HAN Huili², XU Hongfu², ZHANG Xiaolei^{1,*}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Longgang Drainage Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract With the continuous growth of the urban economy, effective monitoring and evaluation of drainage pipelines, a critical component of urban infrastructure, has become increasingly important. [Objective] This study aims to comprehensively explore drainage pipeline defect inspection method and the latest research advances in this field. [Methods] A literature review method is adopted to analyze and compare relevant studies both domestically and internationally. [Results] According to the literature review, visual inspection technology, compared to other existing defect inspection techniques, has become the mainstream method due to its unique advantages of low cost and intuitive data output. At the same time, the application of artificial intelligence models has gradually

[收稿日期] 2024-05-15

[基金项目] 深圳市科技创新委员会科技重大专项(KJZD20230923114800002)

[作者简介] 沈加子(2000—),男,硕士研究生,研究方向为排水管网技术缺陷自动识别,E-mail:17809293671@163.com。

[通信作者] 张小磊,女,副教授,主要从事工业及生活有机废弃物资源化、城市污水厂污泥减量及资源化研究等工作,E-mail:xiaolei.zhang2016@foxmail.com。

emerged, effectively improving inspection efficiency by automatically identifying and classifying visual inspection images. The research on intelligent inspection and identification mainly focuses on three areas, including image preprocessing, feature extraction, and machine learning. Image preprocessing techniques such as noise reduction and contrast enhancement improve image quality, while feature extraction method and machine learning models determine the accuracy and generalization ability of the inspection.

[**Conclusion**] Significant progress has been made in intelligent inspection of drainage pipeline defects, but challenges remain: ① Different image processing algorithms are suitable for various scenarios, and further research is needed to select the optimal algorithm for different defect types; ② The complex and ever-changing pipeline environment limits the generalization ability of models, affecting the stability of defect inspection; ③ Deep learning models rely on large-scale, high-quality datasets, which result in high computational costs. Therefore, future research should focus on optimizing feature extraction method, enhancing the adaptability and generalization ability of algorithms, and building comprehensive defect databases to promote the development of intelligent inspection technology.

Keywords drainage pipelines detection method automatic identification deep learning pipeline defect

城市排水管道系统是城市基础设施必不可少的组成部分,其主要功能是输送污水(通常包括生活污水和预处理的工业废水和雨水)^[1],保障其功能的正常运行是落实国家“十四五”计划建设韧性城市必不可少的重要环节^[2]。当前,我国排水管道主要由污水排水管道、雨水排水管道以及雨污合流排水管道构成,形成了合流制与分流制共存的复杂布局^[3]。我国排水管道系统建设不协调,雨水管道与污水管道之间相互混接或错接成为最常见问题,这也是当前我国水体污染的最主要原因^[4]。除了错接、混接之外,我国排水管道还存在着大量缺陷,例如管道堵塞、变形、腐蚀、破裂等。这些排水管道缺陷都是引发污水冒溢、城市内涝积水、地面塌陷、地下水污染等问题的主要成因之一^[5]。长久以来,我国排水管道的运行管理往往是将重点聚焦于施工,而忽视了日常维护,损坏管道无法及时修复,从而丧失了原有功能。因此,运用准确先进的管道缺陷检测技术定位检测管道存在的缺陷并及时修复,对于延长管道的使用寿命至关重要。

由于对于排水管道的管理维护的资金投入是有限的,如何在控制成本的同时实现管道的高效检测成了亟待解决的关键问题。近些年来,机器学习等人工智能模型在图像分类领域蓬勃发展,应用场景覆盖智能交通、无人驾驶、医学影像以及人脸识别等各个方面。越来越多的研究尝试将人工智能模型应用于管道缺陷图像的分类,以实现排水管道缺陷自动化识别,从而进一步降低成本、提高检测的效率。

因此,本文在综合概述了闭路电视(CCTV)检测技术、声纳检测技术、激光检测技术、探地雷达(GPR)技术、红外热成像技术、潜望镜技术以及污水管道扫描与评价技术(SSET)的基础之上,分析了

视觉检测技术相较于其他检测技术所具备的独特优势。此外,本文还探讨回顾了计算机视觉技术、机器学习以及深度学习在排水管道缺陷自动识别领域的研究与应用,并简要介绍了图像预处理、特征提取、机器学习以及深度学习等方面的关键内容。最终,文章叙述了当前排水管道缺陷自动化检测技术所取得的进展及面临的难点与挑战。

1 排水管道缺陷检测技术分析

在 20 世纪 60 年代以前,检修下水管道是一项极具挑战性的工作。检查工作需检查人员下井查看,这样的检修方法不仅效率低下并且危险度极高^[6-7]。随着视觉和红外摄像机、声纳和超声检测技术、SSET、激光检测技术和 GPR 技术的发展,检修人员有了更加多样化的方法来开展排水管道的检修工作。在本节中,将对现有管道检测技术进行介绍,并分析视觉检测技术所具有的独特优势。

1.1 基于视觉的检测技术

1.1.1 CCTV 检测技术

CCTV 检测技术于 20 世纪 90 年代引入我国,是当前我国检测和评估排水管道状况最常使用的方法^[8]。CCTV 检测的基本原理使用装有摄像头的管道机器人进入排水管道,对其进行巡检并拍摄缺陷,随后通过多芯电缆将数据传输给专业操作人员,以便进行后续的人工解读^[9-10]。目前,CCTV 检测系统已能够与地理信息系统和资产管理系统进行整合。这一整合可以更新管道的尺寸、连接性、管道材料等信息,并对管道的整体状况进行分析,这有助于确定未来的改建计划和维护计划^[11]。

CCTV 检测技术的显著优点是可以提供管道缺陷直观的图像证据,并且可以通过缩放摄像机和控

制管道机器人等操作来详细检查缺陷^[12]。然而, CCTV 检测技术也存在一些限制。例如,当检测污水管道水面以下的缺陷时,需要对污水管道进行预处理,比如封堵降水、冲洗清淤等^[13]。此外, CCTV 检测技术需要人工对于管道图像进行判读,不仅耗时且费力而且容易受到操作人员的主观影响^[14-15]。

1.1.2 潜望镜检测技术

潜望镜检测技术,主要包括主控器、手提竿上安装的摄像头和连接主控器与手提竿的线缆。通过视频录制方式,该技术能够在人孔处拍摄管道内部的沉积、渗漏以及支管暗接等缺陷,进而将管道内部状态的视频发送到地面的主控器,以供后续对管道内部的状态进行观察分析^[16]。

潜望镜检测技术具有较好的灵活性,同样可以提供直观图像证据,并且在使用前不需对管道进行预处理,适合于各种材质管道的检测,但是弊端在于该技术的使用场景受限,仅适用于水质较好的管道环境^[17]。并且与传统的 CCTV 检测技术一样,潜望镜检测无法提供水面以下的缺陷图像^[18]。此外,该技术检测结果不够精确,且无法提供管道缺陷准确位置。因此,潜望镜技术目前主要用于管道状态初步判断,为后续使用 CCTV 等技术进行详细检测提供参考^[19]。

1.2 其余常见检测技术

1.2.1 声纳检测技术

声纳检测技术基于声学原理,利用声纳头由管道内向外发射声纳信号,然后传感器接收经由管道壁反射的信号,以生成管道的横断面图像,从而实现对管道缺陷的检测^[20]。在我国,该技术主要应用于初步判断阶段,或作为 CCTV 技术的重要补充^[15]。

声纳检测技术的优点在于可以在不关闭排水管道系统的情况下进行检测并且检测速度快,检测范围广。但声纳检测技术也受到很多限制,例如声纳技术在很大程度上依赖于声波频率来形成声纳图像。根据管径、含水泥沙量、管道湍流等因素,可能需要不同的频率。此外,形成的数据结果不便直观理解,需要具有专业素养的人员进行解读^[7]。

1.2.2 GPR 检测技术

GPR 检测技术又可以称为地质雷达,是一种无损探测仪器。其基本原理是利用接收电磁波在遇到不同介质时产生的反射波,通过反射波波形、振幅强度和随时间变化等特征来推断地下介质的形状、空间

位置、埋深和结构等信息^[21]。

传统 GPR 在地面上对管道进行探测,近些年来也出现了管道内 GPR 从管道内向管道外发射电磁波^[22]。该技术可以检测管道和管道周围土壤结构,并且根据无线电波在饱和土壤和空洞中传播速率的不同从而识别出潜在的管道泄漏^[23]。该方法提供的检测数据具有较高的精确程度,但无法同时满足高分辨率和强穿透性的双重要求^[19],并且提供的检测数据复杂,需要专业人员解读。除此之外,该技术相比于 CCTV 检测技术等检测方法是昂贵的,限制了该技术推广。

1.2.3 红外热成像技术

在排水管道出现泄漏的情况下,周围环境温度会产生变化。红外热成像检测技术利用管道内红外线辐射源和专用扫描设备,捕获并生成管道表面的温度分布图像。通过分析这些图像,可以获得管道内表面温度变化情况,从而识别可能存在的缺陷信息^[11]。

红外热成像技术主要应用于检测和定位管道裂缝、孔洞等缺陷。但是该技术的应用面临着较大限制。首先红外辐射会受到许多因素的影响,例如随着检测深度的增加检测的有效性会降低,因而检测结果往往不精确,目前主要作为辅助判断依据。除此之外,红外线源释放出的能量会让管道内的温度升高,容易引发管道事故^[11,24]。

1.2.4 激光检测技术

激光检测技术作为新兴的管道无损检测方法,常常与 CCTV 检测技术相结合使用。其基本原理是利用激光发射器发射垂直于管道的激光环,用以检测管道内部的轮廓,从而识别管道的形变和淤积情况^[22]。

激光检测技术可精确定位管线,识别管道内裂纹、断裂、变形等缺陷的基本形态。该技术具有精度高、响应灵敏以及适用于各种材质管道的优点。但当管道内部存在淤泥或者污水时,与 CCTV 检测技术一样无法检测到管道内壁的状况^[11,25]。

1.2.5 SSET

SSET 是一项创新的非破坏性技术,用于获取排水管道内部图像。该技术主要由鱼眼相机、陀螺仪和光学扫描仪组成。可自动对鱼眼相机获得的数据进行预处理,输出包含整个管壁的计算机图像,以供进一步分析^[7,26]。SSET 与传统 CCTV 检测相比,提高了输出图像的质量,有助于在后续自动缺陷识别

中更好地对缺陷进行分类。然而,该技术所面临的最大限制是成本很高,增加了普及难度^[27]。

1.3 排水管道缺陷检测技术对比

常见的排水管道缺陷检测技术的优缺点对比如表 1 所示。其中,部分技术只能针对管道中特定缺陷进行检测,缺陷种类覆盖不够全面,例如红外热成像技术适用于识别裂缝和孔洞、激光技术能识别裂纹、断裂和变形。而在检测精度方面,声纳检测技术和红外热成像技术容易受到环境因素的影响,造成检测精度的下降。此外,检测成本高以及检测数据解读困难也成为了限制检测技术推广和应用的主要障碍,例如声纳检测及 GPR 检测输出的检测数据直观性差,而 SSET 技术作为一类混合技术,虽然能够

输出直观且高质量的图像数据,但昂贵的检测成本极大地限制了该技术的推广应用。

而 CCTV 这类基于视觉的检测技术的显著优势在于可以提供直观的图像检测数据的同时,其检测成本是现存检测技术中最低的。除此之外,该类技术能够检测所有的缺陷类别,并且可以通过缩放摄像机和控制管道机器人等操作来详细检查缺陷部位^[12]。但视觉检测技术最显著的问题在于输出图像需要进行人工判读,这极大地降低了检测效率并引入了主观性误差。因此,使用智能化模型取代人工对缺陷图像进行分类识别成为了该领域当前的研究热点。在第 2 章节中,将对这部分内容进行详细介绍。

表 1 排水管道缺陷检测技术对比

Tab. 1 Comparison of Defect Inspection Technologies for Drainage Pipelines

检测技术	优点	缺点
CCTV 检测技术	直观的图像数据,便于判断	需要人工解读、主观性强
潜望镜检测技术	直观图像数据,适合初步判断;操作灵活	缺陷定位不够精确,精度有限
声纳检测技术	检测速度快、范围广;可在不停水情况下检测	受环境因素影响较大;数据直观性差
GPR 检测技术	检测管道和周围土壤结构;精确度高	数据复杂,需专业人员解读;高分辨率与强穿透性互斥;检测成本高
红外热成像技术	能监测管道表面温度变化,适于识别裂缝和孔洞	精度低;检测引起管道升温,易引发事故
激光检测技术	精度高,适用于各种材质管道	需要与 CCTV 技术结合使用
SSET 技术	输出高质量图像数据,整体性强,涵盖管道全貌	检测成本高

2 排水管道缺陷智能识别

无论是何种检测技术,检测后的输出数据都需要经过人工判读,形成最终的检测报告。这往往是整个管道检测流程中最为耗时费力的步骤。随着机器学习算法的不断更新和计算机硬件能力的提升,研究人员们希望通过创新算法,利用训练好的模型替代人工对管道视觉检测输出的数据进行缺陷识别、分类和分析,进而消除人工研判的主观性影响并加快检测速度。近年来,大量研究将机器学习与视觉检测技术相结合,旨在实现排水管道缺陷的智能识别,其具体流程如图 1 所示。

目前,排水管道缺陷图像智能识别的研究内容主要涵盖 3 个方面:图像预处理、图像表示以及机器学习对缺陷进行识别和分类。接下来,将对这 3 个部分进行回顾和探讨。

2.1 图像预处理

由于排水管道内部昏暗,存在污垢淤积等原因,拍摄得到的图像质量往往是较差的。因此,需要进

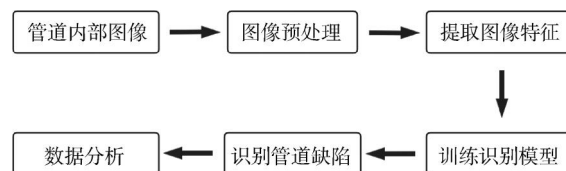


图 1 传统机器学习管道缺陷检测流程

Fig. 1 Traditional Machine Learning for Pipeline Defect Inspection Process

行灰度化、图像变换、降噪、图像增强等操作对图像进行预处理(图 2),以便后续特征提取和识别操作。图像灰度化是将彩色图像转换为灰度图像的过程,通过特定规则将原图中的像素点的三通道值映射到灰度值上。常用的灰度化方法包括:平均值法、加权平均法以及分量法等。图像变换操作是指通过尺寸调整、旋转或翻转、平移以及裁剪等一系列操作对图像进行处理,以满足不同预处理需求。

孙文雅等^[28]研究发现,当缺陷与背景灰度值相差不大时,图像分割效果差不利于后续缺陷识别。Motamedi 等^[29]利用灰度化、滤波及形态学等操作强



图2 图像处理流程

Fig. 2 Image Processing Flow

化缺陷和正常管道之间的差异,以便于后续进一步的识别过程。Yu 等^[30]提出了基于色线模型和同态滤波的图像去雾方法,实现了图像增强。2024 年,研究^[31]提出了一种基于 NSCT 变换和暗通道先验理论的图像复原算法,能够有效提高图像的对比度,锐化图像中的指定目标,有利于后续特征提取。下文将对图像去噪以及图像对比度增强进行详细介绍。

2.1.1 排水管道图像去噪

噪声是指在图像拍摄以及传输和处理过程中引入的不必要的信号,这些信号是图像退化和降质产生的主要原因,并且会对图像后续的处理操作产生干扰^[32]。排水管道内部常有各种污垢的淤积并且是昏暗无光的,因此,在管道图像的传输过程之中,不可避免地会掺杂高斯和椒盐噪声^[33]。

在图像处理的去噪过程中,发展出了多种经典的去噪方法。例如空域滤波法、频域滤波法、自适应滤波法、基于深度学习的方法以及基于奇异值分解的方法^[32]。每种方法都有其独特的优势和适用场景,需根据图像特征和噪声类型精心选择^[34]。现就几类常用的去噪方法进行简单介绍。

(1)均值滤波法:该方法的核心思想是用像素邻域的均值替代当前的像素值,从而减弱噪声对图像的影响。均值滤波法的优点在于实现简单、计算效率高,能有效去除图像中的随机噪声。但缺点在于会导致图像细节模糊,对椒盐噪声去除效果不理想^[35]。均值滤波法的数学表达式如式(1)。

$$g(x_1, y_1) = \frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in s} f'(x_1, y_1) \quad (1)$$

其中: $f'(x_1, y_1)$ ——含有噪声的原始图像;

$g(x_1, y_1)$ ——经过均值滤波处理后的图像;

(i, j) ——目标像素 (x_1, y_1) 周边相关像素的位置;

s ——以点 (i, j) 为中心,尺寸大小为 mn 的邻域空间。

(2)高斯滤波法:高斯滤波法与均值滤波法相

似,都是通过平滑图像来减弱噪声。其基本原理是使用高斯函数生成的权值来对像素点进行加权平均,也就是选中区域的中心位置的权重值最高,越接近边缘,权重值越低。这样不仅能有效去除噪声,还能较好地保留图像的边缘信息,减少模糊效果。权值的数学表达式具体如式(2)。

$$G(x_2, y_2) = \frac{1}{2 \times \pi \sigma^2} \exp\left(-\frac{x_2^2 + y_2^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中: $G(x_2, y_2)$ ——高斯核中位置 (x, y) 处的权重;

(x_2, y_2) ——滤波核中心像素相对于中心点的偏移量;

σ ——标准差,其决定高斯分布的宽度。

(3)中值滤波法:该方法的核心思想是将图像中的每个像素点替换成该像素选定邻域内的中位数,这样就可以达到去除与周围像素差异较大的噪声的目的。该方法的数学表达式为式(3)。

$$g(x_3, y_3) = \text{medf}\{f(i, j) \mid (i, j) \in N_{x_3, y_3}\} \quad (3)$$

其中: $f(i, j)$ ——原始图像在位置 (i, j) 处的像素值;

N_{x_3, y_3} ——以 (x_3, y_3) 为中心的领域窗口。

2.1.2 排水管道图像增强

由于排水管道内部昏暗,管道机器人在拍摄管道内部图片时需要进行照明。光照的不均匀会导致图像中过暗和过亮区域的边缘细节以及局部纹理特征的丢失,不利于后续对图像进行特征匹配的操作。因此,需要对图像增强处理,使得图像中物体边缘有更好的区分度^[36-37]。常见的图像增强方法有直方图均衡法、同态滤波法以及 Retinex 算法等^[36]。虽然,针对于排水管道图像增强的研究报道较少,但在图像增强研究领域已有大量的研究与应用。2020 年,为了解决单一图像增强方法在面对沙尘图像处理时处理效果差,周佐等^[38]将同态滤波法与直方图均衡法相结合,有效增强了图像的对比度,提升了图像质量。2023 年,涂毅晗等^[39]提出的基于多尺度局部直方图均衡化法应用于煤矿井下监控图时,有

效提升了图像的亮度以及对比度,表现效果良好。2024年,郑涤尘等^[40]提出了一种基于Retinex理论的低照度图像自适应增强算法,在多个图像数据集上都取得了较好的图像增强效果。

(1)直方图均衡化法:该方法采用直方图表示图像的频率分布^[41],可通过非线性映射处理重新分配图像的灰度级分布,从而增加图像中不同灰度级之间的差异来增强图像的视觉效果。对于直方图分布集中或者对比度低的图像,直方图均衡化法有良好的处理效果,但该方法不适用于直方图分布范围广的图像^[42]。

(2)同态滤波法:用于调整图像的光照和反射性质以提高图像的质量和可视性。该方法将图像表示为光照和反射2个成分的乘积形式,即式(4)。

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (4)$$

其中: $f(x, y)$ ——原始图像;

$i(x, y)$ ——照度分量(低频信息);

$r(x, y)$ ——反射分量(高频信息)。

同态滤波法旨在通过频率域处理来优化图像的视觉效果。其核心思路在于利用傅里叶变换将图像从空间域转换至频域,随后借助设计好的滤波器调整图像照度和反射成分,从而实现图像增强。在滤波器选择上,常见的包括高斯滤波器和巴德沃斯滤波器等。它们各具特点,能针对图像不同需求进行精确调整。

同态滤波法在处理各种图像增强任务时均表现出色,特别是在面对照度不均和细节模糊的图像时,其增强效果尤为显著。然而,这种方法也面临着一定的挑战,主要在于需要进行2次傅里叶变换和相应的反变换,这增加了计算复杂度和运算成本^[42]。因此,在实际应用中,需要权衡增强效果与运算效率之间的平衡。

(3)Retinex增强算法:该方法的设计灵感源自人类视觉系统对光照和色彩的独特感知方式。该算法包含多个变体,如单尺度Retinex、多尺度Retinex以及彩色恢复Retinex等,每种变体都有其独特的应用场景和优势。该方法能够有效地提高图像对比度、色彩鲜艳度和细节清晰度,特别是应用于局部灰度低的图像具有较大的优势,能够显著增强暗部细节信息,从而提升图像的质量和可视性。但也需要注意到该方法对噪声敏感,可能会过多增强

噪声^[42]。

2.2 图像特征提取

特征提取是从图像中提取出具有代表性和区分性的特征,这是图像识别中至关重要的步骤。由于直接分析图像中的数千个像素是不可能的,需要通过特征提取生成一组测量数据、构建区域属性的数值特征向量来减少维数和计算次数^[7]。

图像特征提取的方法多种多样,各具有其适用性和优缺点。例如,尺度不变特征变换(SIFT)、加速稳健特征(SURF)以及方向梯度直方图(HOG)等方法适用于描述图像中的局部特征和关键点,而灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence matrix, GLCM)以及局部二值模式算法(local binary pattern, LBP)则主要用于描述图像的表面纹理和结构特征。而边缘检测、角点检测以及阈值分割等方法主要用于描述图像中对象的轮廓、边界或几何形状。

在2012年,研究^[28]采用边缘检测、阈值分割法以及梯度算法提取管道破裂边缘信息,发现该算法对区分明显的目标区域和背景区域有良好的检测,但当两者接近时,该算法失效。Halfawy等^[43]应用Sobel边缘检测算子来识别裂纹特征,并借助Hough变换来消除管道检测图像中的文字信息。随后,使用一系列形态学操作来处理裂纹边缘和管道之间的失真情况。同年,Su等^[44]提出了一种基于边缘检测的形态分割方法(MSED)用于排水管道缺陷的检测。Hawari等^[45]在2018年采用多种图像处理算法以及数学公式分析了CCTV视频的缺陷,对于裂缝、沉降沉积物、管道接口位移的检测率各自达到74%、53%、65%。

2.3 排水管道缺陷的识别与检测

2.3.1 基于传统机器学习的排水管道缺陷识别与检测

在排水管道缺陷识别与检测领域,机器学习发挥着至关重要的作用。其基本原理是通过传统分类器对缺陷特征样本库进行深度学习和训练,从而使分类器能够精准地区分不同类型的缺陷特征^[17]。目前,广泛应用的分类器包括支持向量机(SVM)、随机森林以及决策树等。排水管道缺陷识别与检测中,机器学习训练和使用的具体流程如图3所示。

2008年,Yang等^[46]运用小波变化和共现矩阵方法对管道CCTV检测图像进行处理,采用SVM对管道缺陷进行分类,结果表示诊断准确率为60%。

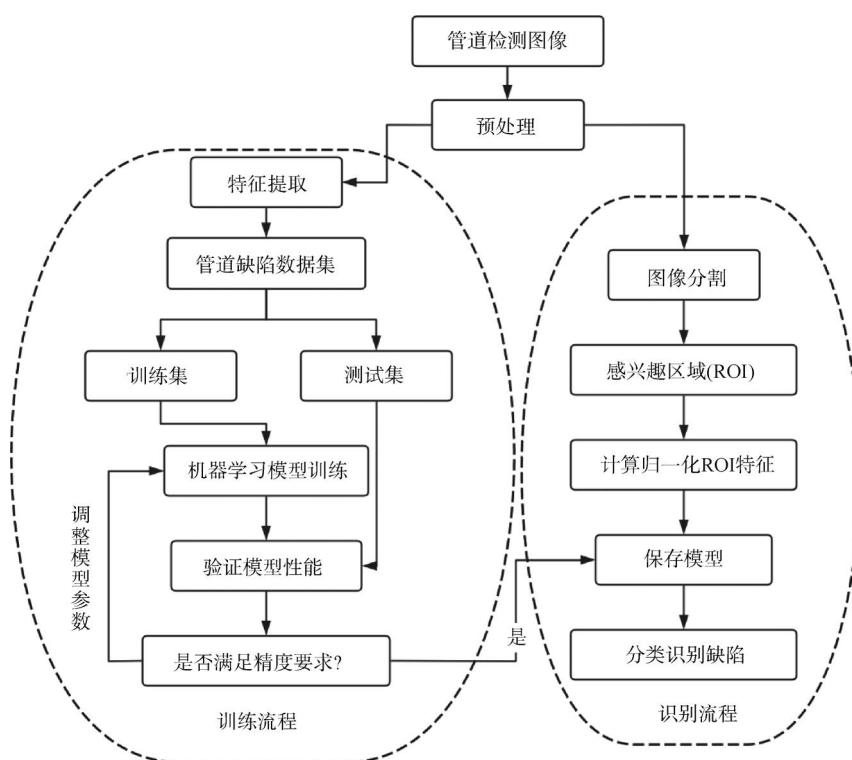


图3 机器学习训练和使用流程

Fig. 3 Training and Usage Flow of Machine Learning

Halfawy 等^[47]采用图像分割技术提取出可疑 ROI,并提取出这些区域的梯度特征直方图(HOG),随后使用 SVM 进行分类训练,最后以加拿大里贾纳和卡尔加里市的真实数据进行测试,证实了该方法的可行性和鲁棒性。Fang 等^[48]将水平数据视作序列信号,针对低质量排水管道检测视频提出了一种基于无监督机器学习方法和异常检测算法的多特征组合的管道缺陷检测方法。2019 年,Ye 等^[49]通过集成胡不变矩、纹理特征、横向傅里叶变换和多贝希小波变换等多种图像处理技术,对缺陷特征进行了描述。在后续的缺陷分类环节,选用 SVM 成功区分出 7 种不同的缺陷类型。在真实的排水管道缺陷检测场景中,该方法展现出了良好的性能,整体准确率达 84.1%,为管道维护和管理提供了有力的技术支持。

传统机器学习的关键在于获得好的高级特征表示^[50]。但在实际排水管网检测中,图像常受到光照不均和复杂环境的影响,导致噪声、抖动模糊和阴影等干扰普遍存在。机器学习中设定的特征提取器难以适用于各种缺陷类型和不同拍摄环境的数据和处理任务,需要针对不同情况重新调整阈值或重新设计算法。因此,如何提高管道缺陷检测方法的鲁棒

性,以适应真实工业检测环境,是进一步研究的重点。

2.3.2 基于深度学习的排水管道缺陷识别与检测

随着计算机视觉技术的蓬勃发展,深度学习已成为推动缺陷检测和识别算法革新的重要力量,为排水管道缺陷的智能化检测与识别领域带来了前所未有的机遇。与传统机器学习不同,深度学习省略了关键但耗时的特征工程步骤(图 4)。底层神经网络直接从图像像素中学习,第二层网络从第一层提取的特征中学习更复杂的特征,以此类推,最终实现输出层的缺陷检测。深度学习的核心在于构建层次化的神经网络模型,用以深度挖掘和分析数据的内在特征,神经网络模型为其采用的主流模型^[50]。

近年来,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)、更快基于区域的卷积神经(faster region-based convolutional neural networks, Faster-RCNN)、网络深度自编码器(deep autoencoders, DAEs)、循环神经网络(recurrent neural networks, RNN)、生成对抗网络(generative adversarial nets, GANs)以及深度信念网络(deep belief networks, DBN)等深度模型被广泛用于图像分类^[7]。

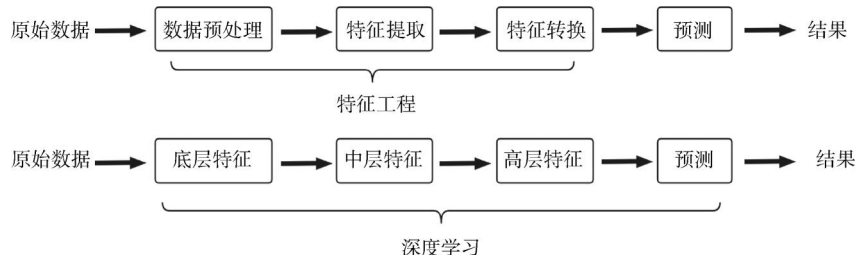


图 4 传统机器学习与深度学习对比

Fig. 4 Comparison between Traditional Machine Learning and Deep Learning

在排水管道缺陷自动识别领域,CNN 和 Faster-RCNN 展现出了显著的应用价值。例如,Kumar 等^[51]利用 CNN 对 CCTV 检测获取的 12 000 张样本图像进行了根入侵、沉积物和裂缝等缺陷的分类训练和测试,其准确率表现卓越。这一成果不仅验证了 CNN 在 CCTV 检测视频自动识别中的有效性,还为其在排水管道检测领域的应用提供了有力支持。另一方面,Cheng 等^[52]则基于 Faster-RCNN 模型,开发了一种自动检测排水管道缺陷的技术。研究利用 3 000 幅 CCTV 检测图像作为训练数据,经过精细训

练后,该模型的检测精度高达 83%,证明了其准确、高效的缺陷检测能力。Li 等^[53]针对缺陷分类中缺陷图像与非缺陷图像之间存在的不平衡现象,将分层分类方法引入 CNN 对 CCTV 管道检测图像的缺陷检测与分类过程之中。通过这种方法来监督不同层级网络的学习过程。最终结果使得缺陷检测准确率从 78.4%提高为 83.2%。总体而言,CNN 被认为具有较高的分类精度以及泛化能力,在未来的排水管道缺陷图像分类中有着极大的应用前景,CNN 模型训练架构如图 5 所示。

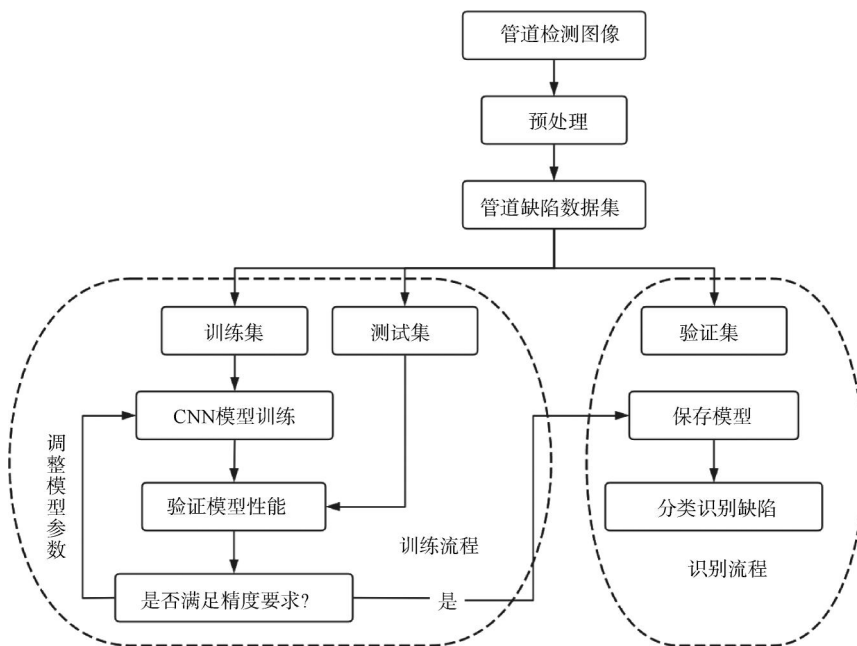


图 5 CNN 模型训练架构

Fig. 5 Training Structure of CNN Model

但所有的深度学习模型都需要庞大的数据库以供模型进行训练,并且训练过程复杂,计算成本高。因此,提供全面庞大的数据以供模型训练以及减少模型的计算成本是深度学习模型推广应用的关键因素。

3 结论

本文对现有排水管道缺陷检测技术进行了全面比较,分析了视觉检测技术广泛应用于国内外各类市政管道检测的原因。同时进一步指出,为了进一步降低排水管道的检测成本、提高检测效率,近年

来,研究者们将焦点转向了计算机视觉和机器学习等先进的图像处理技术,旨在与视觉检测技术相结合,实现排水管道缺陷的自动化识别。这一领域的研究已成为当前的热点和趋势。尽管当前管道缺陷自动识别技术仍处于发展阶段,许多研究已经取得了显著的成果,但也面临着许多的问题与挑战,主要有以下3点。

(1)图像处理算法各有优缺点,选择合适的算法对不同的图像进行处理,对于后续的特征和缺陷分类识别步骤至关重要。

(2)排水管道环境复杂多变,面对不同缺陷类型以及管道,特征提取难以实现泛化,这限制了机器学习模型对于缺陷图像的分类效果。

(3)深度学习虽然可以避免传统的机器学习中复杂的特征提取工程,但深度学习模型计算成本高,需要全面完整的数据库以供神经网络模型进行训练。因此,如何构建完整平衡的管道缺陷数据集、优化模型算法节省计算成本是深度学习模型应用的最关键问题。

参考文献

- [1] 唐建国. 对城镇排水管网建设和运行管理的几点想法[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 109-112.
TANG J G. Some ideas on the construction and operation management of urban drainage pipes[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(4): 109-112.
- [2] 缪惠全, 钟紫蓝, 侯本伟, 等. 中国特色韧性城市的经验探索与未来趋势——从唐山地震到汶川地震[J]. 北京工业大学学报, 2023(7): 1-23.
MIAO H Q, ZHONG Z L, HOU B W, et al. Experience exploration and future trend of resilient cities with Chinese characteristics——From Tangshan earthquake to Wenchuan earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023(7): 1-23.
- [3] WANG J, LIU G H, WANG J Y, et al. Current status, existent problems, and coping strategy of urban drainage pipeline network in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(32): 43035-43049.
- [4] XU Z X, QU Y, WANG S Y, et al. Diagnosis of pipe illicit connections and damaged points in urban stormwater system using an inversed optimization model [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126011.
- [5] 张莹. 城市排水管网运行风险评估研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2022(6): 104-109.
- ZHANG Y. Study on risk assessment in operation of urban drainage network [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(6): 104-109.
- [6] REYNA S M, VANEGAS J A, KHAN A H. Construction technologies for sewer rehabilitation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1994, 120(3): 467-487.
- [7] MORADI S, ZAYED T, GOLKHOO F. Review on computer aided sewer pipeline defect detection and condition assessment [J]. Infrastructures, 2019, 4(1): 10. DOI: 10.3390/infrastructures4010010.
- [8] HUANG D, LIU X H, JIANG S Z, et al. Current state and future perspectives of sewer networks in urban China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12: 2. DOI: 10.1007/s11783-018-1023-1.
- [9] HUYNH P, ROSS R, MARTCHENKO A, et al. Anomaly inspection in sewer pipes using stereo vision [C]. Kuala Lumpur: 2015 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), 2015.
- [10] ZUO J E, YE X Y, HU X Q, et al. Urban pipe assessment method and its application in two Chinese cities [J]. Urban Water Management for Future Cities, 2019, 12: 195-231. DOI: 10.1007/978-3-030-01488-9_10.
- [11] 王俊岭, 邓玉莲, 李英, 等. 排水管道检测与缺陷识别技术综述[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13520-13528.
WANG J L, DENG Y L, LI Y, et al. A review on detection and defect identification of drainage pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13520-13528.
- [12] HAO T, ROGERS C, METJT N, et al. Condition assessment of the buried utility service infrastructure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 331-344. DOI: 10.1016/j.tust.2011.10.011.
- [13] 钊童辉, 宋凯. CCTV 检测在排水管道检测中的应用与研究 [J]. 城市勘测, 2023(s1): 67-71.
ZHAO T H, SONG K. Application and research of CCTV inspection in drainage pipe detection [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2023(s1): 67-71.
- [14] YE X, ZUO J, LI R, et al. Diagnosis of sewer pipe defects on image recognition of multi-features and support vector machine in a southern Chinese city [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(2): 17.
- [15] HUANG R, TAO Z, LIN Y, et al. Current situation of drainage pipe network in china and its detection technology: A brief review [J]. Polish Journal of Environmental Studies. 2024, 33(1): 19-29.
- [16] 娄继琛, 罗建中. 管道潜望镜检测技术及其在城市地下管网检测中的应用 [J]. 广东化工, 2017, 44(12): 145-147, 173.
LOU J C, LUO J Z. Pipeline periscope detection technology and its application in urban underground pipeline network detection

- [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(12): 145-147, 173.
- [17] 马天柱. 基于深度学习的排水管网低质量检测视频缺陷识别方法研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2022.
- MA T Z. Research on deep learning based low quality detection video defect recognition method for drainage pipeline networks [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2022.
- [18] 刘沛. CCTV 及 QV 技术在城市雨污水管网摸排检测中的应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(1): 142-144.
- LIU P. Application of CCTV and QV technology in the detection of urban storm sewer network[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(1): 142-144.
- [19] SELVAKUMAR A, TUCCILLO M, MARTEL K, et al. Demonstration and evaluation of state-of-the-art wastewater collection systems condition assessment technologies[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2014, 5(2): 04013018. DOI:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000161.
- [20] 袁明道, 刘金涛, 徐云乾, 等. 基于声纳、雷达和管道内窥仪的多手段管道淤积检测[J]. 无损检测, 2018, 40(10): 73-76.
- YUAN M D, LIU J T, XU Y Q, et al. Pipeline silting detection based on sonar, radar and closed circuit television [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(10): 73-76.
- [21] 魏晓杰, 刘亚克. 探地雷达在浅层管道探测中的应用[J]. 现代测绘, 2017, 40(3): 38-41.
- WEI X J, LIU Y K. Application of ground penetrating radar in shallow pipeline detection[J]. Modern Surveying and Mapping, 2017, 40(3): 38-41.
- [22] HAO T, ROGERS C D F, METJR N, CHAPMAN D N, et al. Condition assessment of the buried utility service infrastructure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 331-344. DOI: 10.1016/j.tust.2011.10.011.
- [23] ZHENG L, KLEINER Y. State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes [J]. Measurement, 2013, 46(1): 1-15.
- [24] 白若男. 供排水管网检测技术发展现状[J]. 企业科技与发展, 2022(2): 43-45.
- BAI R N. Current development status of detection technology for water supply and drainage pipeline networks [J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2022(2): 43-45.
- [25] 王新妍. 城市排水管道缺陷检测方法与发展现状探析[J]. 铁道建筑技术, 2020(2): 50-53, 58.
- WANG X Y. Review on defect detection methods and development status of urban drainage pipeline [J]. Railway Construction Technology, 2020(2): 50-53, 58.
- [26] HAURUM J B, MOESLUND T B. A survey on imagebased automation of CCTV and SSET sewer inspections[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103061. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103061.
- [27] GUO W, SOIELMAN L, GARRETT J H. Automated defect detection for sewer pipeline inspection and condition assessment [J]. Automation in Construction, 2009, 18(5): 587-596.
- [28] 孙文雅, 李天剑, 黄民, 等. 基于图像处理的管道裂缝检测[J]. 制造业自动化, 2012, 34(1): 36-39.
- SUN W Y, LI T J, HUANG M, et al. Crack inspection of pipeline based on image processing [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(1): 36-39.
- [29] MOTAMED M, FARAMARZI F, DURAN O. New concept for corrosion inspection of urban pipeline networks by digital image processing[C]. Montreal: IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012.
- [30] YU H F, LI X B, LOU Q, et al. Underwater image enhancement based on color-line model and homomorphic filtering[J]. Signal, Image and Video Processing, 2022, 16: 83-91. DOI: 10.1007/s11760-021-01960-z.
- [31] 韩宏伟, 胡清平, 孙春生, 等. 基于 NSCT 变换和暗通道先验的水下图像清晰化算法研究[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(6): 14-20.
- HAN H W, HU Q P, SUN C S, et al. Underwater images visibility enhance algorithm based on NSCT transform and dark-channel prior [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2024, 22(6): 14-20.
- [32] 彭真明, 陈颖频, 蒲恬, 等. 基于稀疏表示及正则约束的图像去噪方法综述[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(1): 1-11.
- PENG Z M, CHEN Y P, PU T, et al. Image denoising based on sparse representation and regularization constraint: A review [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2018, 33(1): 1-11.
- [33] YANG M D, TSU T C. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1327-1337.
- [34] 李晶晶, 贾雪松, 耿立明. 数字图像去噪处理方法研究与实现[J]. 信息记录材料, 2019, 20(8): 104-106.
- LI J J, JIA X S, GENG L M. Research and implementation of digital image denoising processing methods [J]. Information Recording Materials, 2019, 20(8): 104-106.
- [35] 张娜娜, 张媛媛, 丁维奇. 经典图像去噪方法研究综述[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(5): 409-412, 423.
- ZHANG N N, ZHANG Y Y, DING W Q. Review of classical image denoising methods [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(5): 409-412, 423.
- [36] 张力. 基于机器视觉的城市排水管道内部缺陷检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- ZHANG L. Study on the detection method of defects of sewer based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [37] 龚云, 杨庞彬, 颜昕宇. 结合同态滤波与直方图均衡化的井

- 下图像匹配算法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10): 37-41, 61.
- GONG Y, YANG P B, JI X Y. Underground image matching algorithm combining homomorphic filtering and histogram equalization [J]. Journal of Mine Automation, 2021, 47(10): 37-41, 61.
- [38] 周佐, 张静. 基于同态滤波与直方图均衡的沙尘图像增强研究[J]. 信息与电脑, 2020, 32(23): 61-64.
- ZHOU Z, ZHANG J. Research on enhancement of dust image based on homomorphic filtering and histogram equalization [J]. Information & Computer, 2020, 32(23): 61-64.
- [39] 涂毅晗, 汪普庆. 基于多尺度局部直方图均衡化的矿井图像增强方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 94-99.
- TU Y H, WANG P Q. Mine image enhancement method based on multi-scale local histogram equalization [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8): 94-99.
- [40] 郑涤尘, 何继开, 刘艺, 等. 基于 Retinex 理论的低照度图像自适应增强算法[J/OL]. 计算机科学, 2024: 1-10. [2025-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20241028.1441.040.html>.
- ZHENG D C, HE J K, LIU Y, et al. Adaptive enhancement algorithm for low light images based on Retinex theory [J]. Computer Science, 2024: 1-10. [2025-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20241028.1441.040.html>.
- [41] 李平. 基于图像增强的管道探测机器人缺陷检测技术研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2020.
- LI P. Research on defect detection technology of pipeline detection robot based on image enhancement [D]. Ningbo: Ningbo University, 2020.
- [42] 张锐, 贾娜. 海域图像增强方法综述[J]. 液晶与显示, 2017, 32(10): 828-834.
- ZHANG R, JIA N. Sea image enhancement review [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(10): 828-834.
- [43] HALFAWY M R, HENGMECHAI J. Efficient algorithm for crack detection in sewer images from closed-circuit television inspections[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20(2): 04013014.
- [44] SU T C, YANG M D. Application of morphological segmentation to leaking defect detection in sewer pipelines [J]. Sensors, 2014, 14(5): 8686-8704.
- [45] HAWARI A, ALAMIN M, ALKADOUR F, et al. Automated defect detection tool for closed circuit television (CCTV) inspected sewer pipelines [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 99-109. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.01.004.
- [46] YANG M D, TSU T C. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1327-1337.
- [47] HALFAWY M R, HENGMECHAI J. Automated defect detection in sewer closed circuit television images using histograms of oriented gradients and support vector machine[J]. Automation in Construction, 2014, 38: 1-13. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.012.
- [48] FANG X, ZHU J, LI Q, et al. Sewer pipeline fault identification using anomaly detection algorithms on video sequences[J]. IEEE Access, 2020, 8(2): 39574-39586.
- [49] YE X Y, ZUO J E, LI R H, et al. Diagnosis of sewer pipe defects on image recognition of multi-features and support vector machine in a southern Chinese city [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(2): 17.
- [50] BENGIO Y. Learning deep architectures for AI [M]. Norwell: Now Foundations and Trends.
- [51] KUMAR S S, ABRAHAM D M, JAHANSHAH M R, et al. Automated defect classification in sewer closed circuit television inspections using deep convolutional neural networks [J]. Automation in Construction, 2018, 91(14): 273-283.
- [52] CHENG J C P, WANG M Z. Automated detection of sewer pipe defects in closed-circuit television images using deep learning techniques[J]. Automation in Construction, 2018, 95: 155-171. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.006.
- [53] LI D S, CONG A R, GUO S. Sewer damage detection from imbalanced CCTV inspection data using deep convolutional neural networks with hierarchical classification [J]. Automation in Construction, 2019, 101: 199-208. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.017.