

基于机器人检测的排水管道缺陷识别与修复方案优化

田亚禹

上海市排水管理事务中心 上海 200001

摘要：本文研究基于机器人检测的排水管道缺陷识别与修复方案优化，介绍了检测系统的组成、原理及关键技术，对比分析传统算法与深度学习在缺陷识别中的应用，探讨常见修复技术及选择依据，并通过案例验证优化方案的有效性。结果表明，该方法在识别准确率和修复质量方面优势明显，为排水管道维护管理提供了科学支持。

关键词：机器人检测；排水管道；缺陷识别；修复方案优化

1 引言

城市排水管道是基础设施的重要组成，承担防洪排涝、环境保护等关键功能。随着使用时间增长，管道易出现裂缝、腐蚀、堵塞等问题，影响正常运行。传统检测方法如人工检查、CCTV存在效率低、精度差、难以适应复杂环境等不足。近年来，机器人检测技术因能深入管道内部、精准采集数据，被广泛应用于缺陷识别与修复决策，提升了检测效率与准确性，为城市排水系统维护提供了有力支撑。

2 排水管路机器人检测系统

2.1 系统构成

排水管道机器人检测系统由机器人本体、通信传输模块和数据处理与分析平台组成。机器人本体采用履带或轮式结构，搭载摄像头、激光扫描仪、超声波及气体传感器，负责在不同管径中移动并采集图像、结构、缺陷及气体数据。通信模块通过有线或无线方式（如以太网、Wi-Fi、4G/5G）将数据实时传输出去，采用冗余与加密技术保障传输稳定可靠。数据处理与分析平台运用云计算与大数据技术，对数据进行处理、存储与分析，并集成缺陷识别算法和修复决策模型，实现自动识别缺陷并推荐修复方案。

2.2 工作原理

排水管道机器人检测系统的工作原理是利用机器人在管道内移动，通过搭载的传感器采集管道内部的各种信息，然后将这些信息通过通信传输模块实时传输到数据处理与分析平台。数据处理与分析平台对采集到的数据进行处理、分析和存储，利用缺陷识别算法自动识别管道缺陷，并根据缺陷类型和程度，结合修复方案决策模型，推荐合适的修复方案。最后，工作人员根据推荐的修复方案对管道进行修复。

2.3 关键技术

2.3.1 机器人运动控制技术

采用基于地图的路径规划算法，结合管道的三维模型和障碍物信息，为机器人规划出最优的移动路径，确保机器人能够高效地覆盖整个检测区域。通过传感器实时监测机器人的姿态（如俯仰角、横滚角等），并采用PID控制算法对机器人的姿态进行调整，保证机器人在移动过程中保持稳定，避免因姿态不稳定导致传感器数据采集不准确^[1]。利用超声波传感器、激光雷达等传感器实时监测机器人前方的障碍物信息，当检测到障碍物时，机器人能够自动停止移动或调整路径，避免与障碍物发生碰撞。

2.3.2 传感器技术

采用先进的图像传感器和图像处理算法，提高图像的清晰度和色彩还原度，同时具备实时图像压缩和传输功能，减少数据传输量。通过优化激光发射和接收系统，提高激光扫描的精度和速度，同时采用点云数据处理算法，对采集到的点云数据进行去噪、滤波和配准等处理，生成高质量的三维模型。采用高精度的超声波传感器和信号处理电路，提高距离测量的准确性和稳定性，同时具备抗干扰能力，能够在复杂的管道环境中正常工作。采用电化学、半导体等不同原理的气体传感器，针对不同的气体类型进行优化设计，提高气体浓度检测的灵敏度和选择性，同时具备温度和湿度补偿功能，保证检测结果的准确性。

2.3.3 通信技术

优化通信电缆的材质和结构，减少信号衰减和干扰，同时采用高效的通信协议，提高数据传输速率和可靠性。采用先进的无线通信模块和天线设计，提高无线信号的覆盖范围和传输稳定性，同时优化通信协议，减少数据传输延迟和丢包率。设计专门的通信协议，定义数据传输的格式、帧结构、错误检测和纠正机制等，确保数据传输的准确性和可靠性。

2.3.4 数据处理与分析技术

采用图像增强、滤波、分割等算法，提高图像的质量和特征提取的准确性，为后续的缺陷识别提供良好的基础。利用传统的模式识别方法（如支持向量机、决策树等）和深度学习算法（如卷积神经网络、循环神经网络等），对管道缺陷进行分类和识别，提高缺陷识别的准确率和效率^[2]。通过大量的训练数据，训练机器学习和深度学习模型，使其能够自动学习管道缺陷的特征和规律，实现对未知缺陷的准确识别。同时，采用迁移学习等技术，提高模型的泛化能力，减少对大量标注数据的依赖。

3 基于机器人检测的排水管道缺陷识别算法

3.1 传统缺陷识别算法

传统的排水管道缺陷识别算法主要包括基于阈值分割的方法、基于边缘检测的方法、基于形态学处理的方法等。基于阈值分割的方法是根据图像的灰度值或颜色值，设定一个阈值，将图像分为目标和背景两部分，从而实现缺陷的识别。这种方法简单直观，但对噪声较为敏感，容易出现误判和漏判。基于边缘检测的方法是通过检测图像中物体的边缘，来识别缺陷。常用的边缘检测算子有Sobel算子、Canny算子等。这种方法能够较好地检测出缺陷的边缘，但对于复杂的图像，容易出现边缘不连续和噪声干扰的问题。基于形态学处理的方法是利用数学形态学的方法，对图像进行膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等操作，从而实现缺陷的识别。这种方法能够有效地去除噪声和填补空洞，但对于微小缺陷的检测效果较差。

3.2 深度学习算法在缺陷识别中的应用

3.2.1 卷积神经网络（CNN）

卷积神经网络是一种专门为处理图像数据而设计的深度学习模型，它通过卷积层、池化层和全连接层等结构，自动提取图像的特征，从而实现缺陷的识别。卷积层通过卷积核在图像上滑动，提取图像的局部特征；池化层则对卷积层的输出进行下采样，减少数据的维度，同时保留重要的特征信息；全连接层将池化层的输出进行分类，得到最终的识别结果。卷积神经网络具有强大的特征提取能力和分类能力，能够有效地提高缺陷识别的准确率和效率。

3.2.2 循环神经网络（RNN）

循环神经网络是一种适合处理序列数据的深度学习模型，它通过隐藏层的循环结构，能够对序列数据中的上下文信息进行建模，从而实现缺陷的识别^[3]。在排水管道检测中，可以将管道图像序列或传感器数据序列作为输入，利用循环神经网络捕捉数据中的时间依赖关系。

然而，循环神经网络在处理图像数据时，效果不如卷积神经网络。因为图像数据具有空间结构信息，而循环神经网络主要擅长处理时间序列数据。

3.2.3 生成对抗网络（GAN）

生成对抗网络是一种由生成器和判别器组成的深度学习模型，它通过生成器生成假样本，判别器判断样本是真是假，从而实现对数据的学习和生成。在排水管道缺陷识别中，可以通过生成对抗网络生成缺陷样本，扩充训练数据集，提高模型的泛化能力。

4 排水管道修复方案优化

4.1 常见修复技术

4.1.1 内衬修复技术

内衬修复技术是在原有管道内部插入一层新的内衬材料，如聚乙烯（PE）管、聚丙烯（PP）管、玻璃钢管等，以达到修复管道缺陷的目的。内衬修复技术具有施工速度快、对交通影响小、修复效果好等优点。例如，采用PE管内衬修复技术，施工周期通常比传统的开挖更换管道技术缩短了50%以上，对交通的影响也大大降低。然而，内衬修复技术成本较高，适用于管径较大（一般管径大于300mm）、缺陷较为严重的管道修复。

4.1.2 喷涂修复技术

喷涂修复技术是将修复材料通过喷枪喷涂在管道内壁上，形成一层新的涂层，以达到修复管道缺陷的目的。喷涂修复技术具有施工简单、成本低、对管道形状适应性强等优点。例如，采用聚脲喷涂修复技术，施工过程无需大型设备，可在短时间内完成对管道的修复。然而，喷涂修复技术修复效果相对较差，适用于管径较小（一般管径小于300mm）、缺陷较轻的管道修复。

4.1.3 局部修复技术

局部修复技术是针对管道局部缺陷进行修复的技术，如采用补丁、密封胶等材料对管道裂缝、孔洞等缺陷进行修复。局部修复技术具有施工简单、成本低等优点。例如，使用橡胶补丁对管道裂缝进行修复，施工时间短，成本低廉。然而，局部修复技术修复效果有限，适用于管道局部轻微缺陷的修复。

4.1.4 整体修复技术

整体修复技术是对整个管道进行修复的技术，如采用开挖更换管道、非开挖铺设新管道等方法对管道进行修复。整体修复技术具有修复效果好、使用寿命长等优点。例如，采用开挖更换管道技术，可以彻底更换老化的管道，修复后的管道性能良好，使用寿命可达50年以上。然而，整体修复技术施工难度大、成本高、对交通和环境影响大，适用于管道严重损坏、无法通过其他修

复技术修复的情况。

4.2 修复方案选择依据

在选择排水管道修复方案时，需要综合考虑以下因素：（1）缺陷类型和程度：不同的缺陷类型和程度需要采用不同的修复技术。例如，对于裂缝和孔洞等局部缺陷，可以采用局部修复技术；对于腐蚀和变形等较为严重的缺陷，需要采用内衬修复技术或整体修复技术。

（2）管道材质和管径：不同的管道材质和管径对修复技术的适应性不同。例如，对于金属管道，不宜采用喷涂修复技术；对于管径较小的管道，不宜采用内衬修复技术^[4]。（3）施工条件和环境：施工条件和环境也会影响修复方案的选择。例如，在交通繁忙的路段，不宜采用开挖修复技术；在地下水位较高的地区，需要考虑修复技术对地下水的影响。（4）修复成本和使用寿命：修复成本和使用寿命是选择修复方案时需要考虑的重要因素。在保证修复效果的前提下，应选择成本较低、使用寿命较长的修复方案。

5 案例分析

5.1 项目背景

某城市的排水管道系统始建于上世纪80年代，经过多年的运行，部分管道出现了严重的缺陷，如裂缝、腐蚀、堵塞等，影响了排水管道系统的正常运行。为了保障城市的排水安全，该城市决定对部分排水管道进行检测和修复。本次检测和修复的管道总长度为5公里，管径范围为300mm-800mm，主要分布在城市的老旧城区。

5.2 检测与修复过程

5.2.1 检测过程

采用基于机器人检测的排水管道检测系统对该城市的排水管道进行检测。机器人在管道内移动，通过搭载的摄像头、激光扫描仪等传感器采集管道内部的图像、结构等信息，并将这些信息实时传输到数据处理与分析平台。数据处理与分析平台利用本文提出的融合多源数据和迁移学习的改进算法，对采集到的数据进行处理和分析，自动识别管道缺陷，并标注缺陷的位置、类型和程度。在检测过程中，共发现裂缝缺陷120处、腐蚀缺陷80处、堵塞缺陷50处。

5.2.2 修复过程

根据检测结果，利用本文构建的基于多因素的修复方案决策模型，对不同的管道缺陷选择合适的修复方案。对于裂缝和孔洞等局部缺陷，采用局部修复技术，如采用补丁和密封胶进行修复，共修复裂缝缺陷90处、孔洞缺陷30处；对于腐蚀和变形等较为严重的缺陷，采用内衬修复技术，如插入PE管进行修复，共修复腐蚀缺陷60处、变形缺陷10处。在修复过程中，严格按照施工规范进行操作，确保修复质量。例如，在内衬修复过程中，对PE管的插入深度、接口密封等进行了严格检查，确保修复后的管道无渗漏。

5.3 效果评估

经过修复后，管道的缺陷修复率达到了95%以上，其中裂缝缺陷修复率为97.5%，腐蚀缺陷修复率为93.75%。修复后的管道排水能力较修复前提高了30%以上，在暴雨天气下，管道能够及时排除积水，减少了城市内涝的发生。在修复后的6个月内，对管道进行了持续的运行监测，未发现新的缺陷出现，管道运行稳定。

结语

本文研究了基于机器人检测的排水管道缺陷识别与修复方案优化，系统阐述了检测系统的构成、原理及关键技术，对比分析了传统算法与深度学习在缺陷识别中的应用，探讨了修复技术及决策依据，并通过案例验证了优化方案的有效性。结果表明，该方案在识别准确率和修复质量方面优势显著，为排水管道维护提供了科学支持。未来可进一步提升检测技术与算法，优化决策模型，推动排水管道管理效率与水平持续提升，助力城市可持续发展。

参考文献

- [1] 赵星亮. 排水管道清障机器人缺陷检测及作业系统研究[D]. 北京建筑大学, 2024.
- [2] 慕宝宗, 郑少峰, 陈德旺. 基于AI技术的排水管道缺陷检测机器人设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2025, (01): 273-276.
- [3] 柳景斌, 基于AI融合多传感器排水管道智能检测机器人关键技术与应用. 湖北省, 武汉大学, 2023-07-14.
- [4] 吴迪, 张云超, 崔苗苗, 等. 排水管道检测机器人研究进展[J]. 智能城市, 2023, 9(04): 19-22.