

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.023

基于漂流式胶囊机器人的管道快速检测系统

李清泉^{1,2,3}, 朱家松^{1,3}, 李 虹⁴, 薛卫星^{1,3}, 朱 松^{1,3}, 方 旭^{1,3}

(1. 深圳大学 广东省城市空间信息工程重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 人工智能与数字经济广东省实验室<深圳>, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 4. 中国人民解放军 96963 部队)

摘 要: 地下管网是城市的重要基础设施,但在长期运行过程中存在诸多病害问题,需要进行大范围常态化的病害探查。漂流式管道检测胶囊机器人是一种全新的地下管网快速检测系统。该系统集成低成本高清 CMOS 相机及 9 轴 MEMS 航姿参考系统,采用无动力设计,可随水流运动,实现管道内部图像数据和胶囊运动数据的快速采集。同时,还配备一整套完善的数据后处理软件,进行位置推算和图像处理,最终得到带有位置标签的管道病害检测视频,并生成标准的管道病害检测报告,还可配合管网信息化系统服务于综合管廊、海绵城市与智慧城市等领域。2018 年以来,该系统已经在深圳、合肥和浙江省等多地进行了实际应用。

关键词: 排水管网; 管道病害; 快速检测; 漂流式胶囊

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0126-07

Rapid Detection System of Pipeline Based on Floating Capsule Robot

LI Qing-quan^{1,2,3}, ZHU Jia-song^{1,3}, LI Hong⁴, XUE Wei-xing^{1,3}, ZHU Song^{1,3},
FANG Xu^{1,3}

(1. Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy < Shenzhen >, Shenzhen 518060, China; 3. School of Civil and Traffic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Chinese People's Liberation Army, Unit 96963)

Abstract: Underground pipe network is an important infrastructure in cities, however, there are many problems in the pipe after long-term operation. So it is necessary to carry out large-scale normalized problem detection. The floating capsule robot is a new rapid detection system for underground pipe network, which integrates low-cost high-definition CMOS cameras and a 9-axis MEMS navigation attitude reference system. It can move with the water flow without any power and realize rapid collection of the internal image data and capsule motion data. At the same time, it is also equipped with post-processing software for position calculation and image processing, so as to obtain the pipeline problem detection video with location label and generate the standardized pipeline problem detection report. It can also cooperate with the pipeline network information system to serve the utility tunnel, sponge city and smart city, etc. It has been applied in many cities and regions, such as Shenzhen, Hefei and Zhejiang Province

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0502203); 深圳市水务科技信息中心示范项目(0832-SFCX19SZC020)
通信作者: 薛卫星 E-mail:1304402787@qq.com

since 2018.

Key words: drainage pipe network; pipeline diseases; rapid detection; floating capsule robot

经过几十年的市政基础设施建设,很多城市都建立了庞大而复杂的排水管网系统,但因负荷流量太大、管材老旧和地铁等新建工程影响,管网病害问题越来越多。排水管网存在的主要问题包括:①排水管网运维状况不良,存在管道破裂、断头或堵塞等问题且病害位置不清;②雨水和污水管道错接,导致雨污混流;③城中村及老旧小区排水系统不完善,管网现状信息缺失。这些问题不仅严重影响城市雨污水排放,还可能引发城市内涝、环境污染和道路地陷等城市灾害^[1]。深圳市在2013年—2015年间因给排水管道破损导致的地面坍塌事故就高达330多起^[2]。因此,对地下管网病害开展大范围常态化检测意义重大。

现有的地下管网检测方法^[3-6]主要包括人工检查、管道潜望镜、声呐检测机器人和CCTV(Closed Circuit Television,即闭路电视)检测机器人等方法。人工检查局限性较大,只能适用于管径较大的管道。管道潜望镜^[4]测量距离太短,只能测量管道井附近的管道。声呐检测机器人^[5]制造成本高,且容易受到管道内部其他条件的干扰。CCTV检测机器人^[6]是目前主流的检测方法,主要包括主控器、操作线缆架和带摄像头的“机器人”爬行器三部分,通过摄像机器人对管道内部情况进行视频录像完成检测。但是,CCTV检测机器人体积较大、成本高昂、操作不便、回收困难、检测效率低,且无法检测小管径管段。因此,现有的排水管网检测技术存在检测效果、效率、成本等多方面的缺陷,难以满足城市管线信息化建设中大面积管线普查的需求^[3]。

提出了一种新的漂流式胶囊机器人管网快速检测方案,可以实现管道内部病害的低成本快速检测和精确定位。首先,将检测胶囊机器人投放到管道中随水流动,并在漂流中快速获取管道内部视频影像。然后,对检测胶囊获取的影像等多源传感器数据进行分析处理,确定管道病害的种类和位置。最后,将管道病害信息融入现有管网信息管理平台^[7]并进行可视化显示,实现管段动态属性和运行工况的管理,为管网高效运行管理提供准确、直观、高效的参考。

1 管道检测胶囊机器人系统

管道检测胶囊机器人系统主要包括检测胶囊机器人装备、多源数据处理软件和三维可视化展示平台。

1.1 漂流式管道检测胶囊机器人

漂流式管道检测胶囊机器人采用流线型无动力设计,可在复杂的管道环境中随水流动,灵活穿梭,实现管道内部图像数据的快速采集。其设备结构如图1所示,包括防水外壳、广角摄像头模块、惯性测量模块、LED补光灯、感光调节系统、主控电路系统、电源模块、稳定块和人机交互单元等部分。其中,摄像头监控模块、惯性测量模块、电源模块、主控电路以及人机交互单元放置于防水外壳内部。LED补光灯及感光调节系统安装于防水外壳表面并与电源模块相连。



图1 漂流式管道检测胶囊机器人

Fig.1 Floating capsule robot for detection of pipe network

该管道检测胶囊机器人的创新点主要包括以下4个方面:

① 无动力漂流

随水流动的无动力设计,可连续检测数公里的管道,相对于CCTV机器人等检测方法,具有操作简单方便、检测迅速、单次检测范围大等优点。

② 高精度自主定位

管道检测胶囊中集成了惯导、磁力计和视觉等多种传感器。结合多种传感器数据和管线地图,可以对胶囊的运动轨迹进行定位,实现亚米级的精确定位。

③ 稳定视场视频

采用陀螺电子防抖的技术,消除运动中产生的

抖动模糊和旋转带来的视场改变,得到稳定视场的检测视频。另外,针对排水管道中光线不足的情况,采用 LED 环状多角度光源补充,根据不同的光线环境进行亮度的调节,提供均匀充足的光照亮度,避免视线不均匀和过度曝光的情况发生。

④ 优异的防水性能

胶囊机器人对防水性能要求较高,特别是镜头和充电口处。镜头采用独立防水硅胶圈,充电口采用磁吸结构设计,通信采用 WIFI 无线通信模式,防水性能优异。除此之外,为适应不同水深环境的漂流作业要求,设置独立结构用于检测胶囊的配重调整。

胶囊机器人的应用定位在填补 CCTV 管道机器人等传统检测方法不能解决的盲区。首先,检测胶囊能有效解决管道积水的问题。当管道内有水流时,检测胶囊在漂流过程中拍摄管道影像进行检测。当管道内的水流不足时,在胶囊机器人下部绑定漂浮板,通过牵引线拖拽的方式进行管道检测。其次,检测胶囊体积小、易操作,可以在信息缺失的管段进行检测。只需要在胶囊后端绑定系留绳,当管道内出现淤堵或塌陷时,牵拽系留绳将胶囊收回即可。另外,胶囊机器人也可以解决小管径排水管网检测的难题。凭借其小巧的体积优势,胶囊机器人可以在 DN300 及以下的管段内进行漂流检测。

因此,胶囊机器人凭借其高检测效率与低廉的成本,可与 CCTV 检测技术形成互补。市政排水管网冗杂且繁多,胶囊机器人可以快速地对整个管网进行排查,检测效率可达到 CCTV 的 30 倍或更高;在完成管网快速排查后,针对病害量较多的管段,若需要更全面更清晰的影像数据,可投放 CCTV 机器人进行精密检测。

1.2 三维可视化云平台

将获得的管网病害状态与位置信息结果融入城市管网信息管理平台,直观显示地下管线的空间层次和位置,以三维仿真方式形象展现地下管线的埋深、材质、形状、走向、工作井结构、周边环境和历史运维记录等。系统提供了基于二维和三维模式的管网地图浏览和场景展示,可以在平面与立体自由切换或并行浏览。

可选择浏览地上、地面透明、浏览管线、地下模式等多种浏览模式,其中地下模式和地上透视模式如图 2 所示。

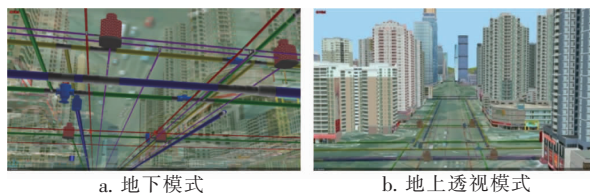


图 2 地下模式和地上透视模式

Fig. 2 Underground mode and ground perspective mode

同时,融合管道检测胶囊机器人的实时采集数据与分析结果,高亮绘制城市地下排水管网病害检测成果,让用户在立体空间内浏览、巡视地下管网的走向、属性、检测维修记录和所连接的设备,并动态显示管线信息;也可按管线属性信息、空间信息以及检测信息进行统计,并以环形图、热力图、柱状图或折线图等形式展示统计结果,实现管网系统从静态到动态的展现,为管网检修提供专门的接口和台账信息,提升现有管道巡检、抢修效率,也为管网统筹规划与合理利用以及智慧城市规划与管理提供辅助决策。

2 复杂环境下多传感器融合定位技术

根据管道内部环境的复杂程度,采用两种不同的多传感器融合定位技术。针对漂流相对稳定、管道视觉特征较好的情况,采用基于非线性优化框架视觉与惯性融合的状态估计算法进行胶囊定位。针对管道环境恶劣、抖动剧烈、图像纹理特征少的情况,采用基于深度学习框架下视频与惯性融合的状态估计算法进行定位。

① 基于非线性优化框架视觉与惯性融合的定位方法

基于非线性优化框架视觉与惯性融合的状态估计算法进行胶囊定位,包括数据预处理、初始化、后端非线性优化和绝对位置匹配及修正 4 个部分。

首先,对视频数据提取图像 Harris 角点^[8],利用金字塔光流跟踪相邻帧,通过 RANSAC 算法去除异常点,并将跟踪到的特征点加到图像队列中。对 IMU 数据进行积分,得到当前时刻的位置、速度和旋转,同时计算在后端优化中将用到的相邻帧的预积分增量,及预积分误差的 Jacobian 矩阵和协方差项^[9]。接下来,利用 SFM 进行纯视觉估计滑窗内所有帧的位姿及 3D 点逆深度,并与 IMU 预积分进行对齐求解初始化参数。

然后,将视觉约束、IMU 约束和闭环约束放在一个目标函数中进行非线性优化,求解滑窗内所有帧

的位置、朝向、速度、加速度计误差和陀螺仪误差。最后,采用视频数据获取井盖图像,得到其对应时间戳的绝对地理位置,对非线性优化获得位姿结果进行全局修正。

② 基于深度学习框架视频与惯性融合的定位方法

基于深度学习框架的定位方法,首先利用视频图像数据进行相似度计算,并结合 IMU 数据进行模式识别,确定胶囊在绝对井盖点之间的静止时间。然后,基于 IMU 数据,在两个井盖节点之间使用深度学习进行胶囊运动速度的回归。其中,深度学习卷积神经网络输入数据为 6 轴 IMU 数据,输出数据为检测胶囊的运动里程。最后,再采用绝对位置与静止状态对输出的运动里程进行约束和修正。

3 超广角鱼眼镜头视频采集与病害分类

当今主流的 CCTV 检测机器人是通过标准镜头摄像头的影像进行病害排查,需要借助转动轴和电机的辅助才能调整视角。但是,摄像头调整视角受转动轴限制,很难做到大范围多视角的快速视频检测。笔者提出的胶囊机器人采用超广角鱼眼镜头进行管道内视频拍摄,可以快速得到大范围多视角的检测视频。

3.1 多视角鱼眼图像校正方法

漂流式胶囊机器人采用广角鱼眼镜头,其所记录的影像为鱼眼畸变影像,需要校正。但单一的校正方法会丢失 40% 的原图像信息,因此结合正常校正、经纬展开校正、环绕展开校正、任意视角校正和多视角分幅校正等方法对鱼眼图像进行校正。

鱼眼图像球面投影模型和多视角分幅投影模型如图 3 所示。

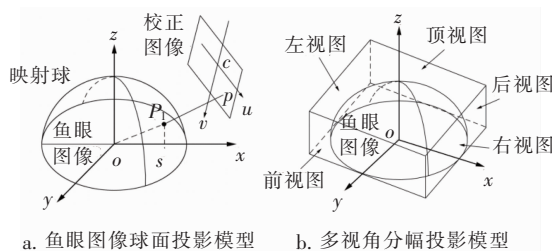


图3 鱼眼图像球面投影模型与多视角分幅投影模型

Fig.3 Spherical projection model of fisheye image and multi-view framing projection model

对于管道检测胶囊采用的视场 $> 180^\circ$ 的超广角鱼眼镜头,无法利用平面透视投影模型来进行校正。

因此,采用球面透视投影模型,如图 3(a) 所示,整幅鱼眼图像将被映射到一个单位球面上。其中,点 p_1 是 op 与映射球的交点,点 s 是球面点 p_1 到鱼眼图像平面的垂直映射,为校正图像上点 p 到鱼眼图像上的映射点。在球面透视投影情况下,空间直线投影成球面上的大圆,可以通过调整直线 oc 的角度得到不同视角下的校正图像。为了充分展现鱼眼图像的视觉信息,并减少单一视角下球面映射的图像畸变,将包围半球最小长方体的 5 个面添加为校正平面,即顶视图、左视图、右视图、前视图和后视图,如图 3(b) 所示。

校正前后的鱼眼图像实例见图 4。

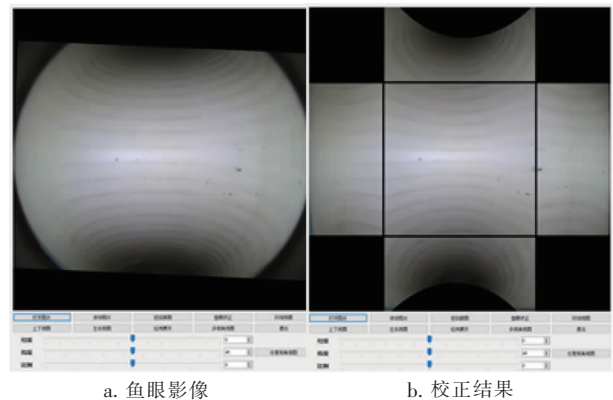


图4 鱼眼影像截图及校正结果

Fig.4 Screenshot and correction of fisheye shadow

3.2 基于异常检测的视频病害检测

将序列视频中的病害影像数据视为异常信号,提出基于异常检测的管网病害视频检测方法。以深圳市某地下排水管道为例,首先将两个井盖之间 40 s 的视频转换为 899 张序列图像,然后经过特征提取转变为序列信号特征,最后采用异常检测算法进行病害检测。

选取非病害样本精度 precision、病害样本精度 precision_b1、总样本准确率 acc、非病害样本召回率 recall 和病害样本召回率 recall_b1 作为评价指标,不同检测算法的对比如图 5 所示。从图 5 可以看出,包含 GLCM(灰度共生矩阵)特征的检测算法达到了 70% 以上的正确分类,检测效果最好。接下来,使用 precision_b1 与 recall_b1 两个关键指标的均值与方差来评价算法的性能,即均值越大且方差越小的算法最好,并优先考虑均值。

选择特征组合效果最好的 GLCM 特征,不同病害检测算法精度分析如表 1 所示。

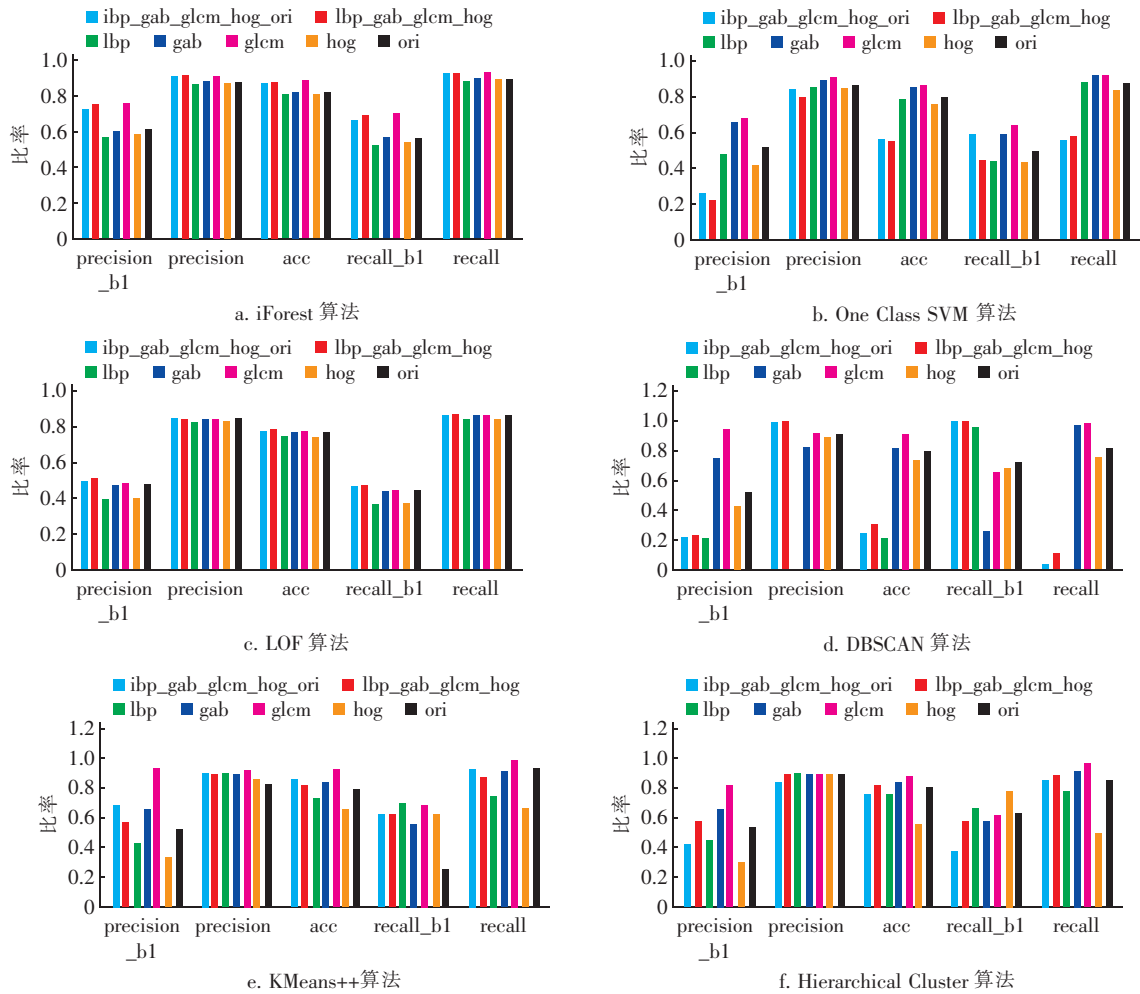


图 5 不同异常聚类检测算法的检测精度对比

Fig. 5 Detection accuracy comparison of different anomaly clustering detection algorithms

表 1 不同病害检测算法检测精度分析

Tab. 1 Accuracy analysis of different disease detection algorithms

算 法	准确率	病害样本精度	病害样本召回率	平均值	标准偏差
iForest	0.889	0.761	0.706	0.734	0.039
One Class SVM	0.858	0.681	0.639	0.660	0.030
LOF	0.782	0.494	0.459	0.477	0.025
DBSCAN	0.919	0.948	0.660	0.804	0.204
KMeans + +	0.923	0.937	0.691	0.814	0.174
Hierarchical Cluster	0.887	0.819	0.608	0.714	0.149

从表 1 可知, DBSCAN 和 KMeans + + 算法效果最佳。KMeans + + 算法需要先验知识, 而 DBSCAN 算法无需先验知识。因此, 采用 DBSCAN 算法结合 GLCM 特征来实现管道病害检测, 既无需提前建立病害样本库, 又能保证管网病害检测效率。

3.3 基于深度学习的病害检测

积累了大量病害样本数据之后, 提出基于深度

学习的病害检测方法。首先使用残差网络作为骨干网络的卷积神经网络算法来区分不同管材的病害类型, 在保证网络精度的同时, 通过深度学习提高网络的表达能力。然后, 针对不同管材中病害训练样本数量的不平衡问题, 使用层次分类的方法对不同管材的病害进行分类。

此外, 胶囊机器人的拍摄方式与 CCTV 机器人

不同,不能直接采用 CCTV 的病害样本库。参考 CCTV 检测规范,创建了胶囊机器人的规范标准,并在此基础上建立了管道检测胶囊的病害样本库。同时,在管道缺陷评估方面建立了一套新的评判标准,如破裂、变形、错位、脱节、渗漏、腐蚀、沉积、结垢等,并对其划分缺陷等级,如轻度缺陷、中等缺陷、严重缺陷与重大缺陷等。

4 多城市应用案例分析

从 2018 年管道检测胶囊装备研制成功以来,已经在深圳、合肥和浙江等多地进行了实际应用,凭借其高效的检测效率与低廉的成本,逐渐成为一种初步、快速的检测手段。

4.1 深圳市地下排水管网病害快速检测

2019 年承接深圳市“基于漂流式胶囊机器人的地下排水管网病害快速检测技术及应用示范”项目,研发出适用于小管径地下排水管道病害快速检测漂流式胶囊机器人 50 余台,在深圳市坪山、宝安、龙岗等不同区域选择 12 条路段共计约 28.3 km 的市政污水、雨水管段进行管网病害检测。

以坪山区为例,选取了东至体育二路、南至新和路、西至锦龙大道、北至坪山大道所包围的连贯区域,如图 6 所示。其中,雨水管道为钢筋混凝土管,直径有 DN800 和 DN1 000 两种;污水管道为钢筋混凝土管和双壁波纹管两种,直径有 DN400 和 DN600 两种。



图 6 深圳市坪山区排水管网病害检测区域

Fig.6 Drainage disease detection area in Pingshan District, Shenzhen

本次针对坪山区相关市政排水管网的检测,共发现病害 138 处,其中雨水管道 45 处,污水管道 93 处;包括功能性缺陷 24 处,结构性缺陷 114 处。截取相关典型病害如图 7 所示。其中,上半部分分别为树根堆积、石块以及堆积物导致管壁破损脱落现象等典型的功能性缺陷,下半部分分别为管壁严重破损

形变、严重脱落以及腐蚀等典型的结构性缺陷。

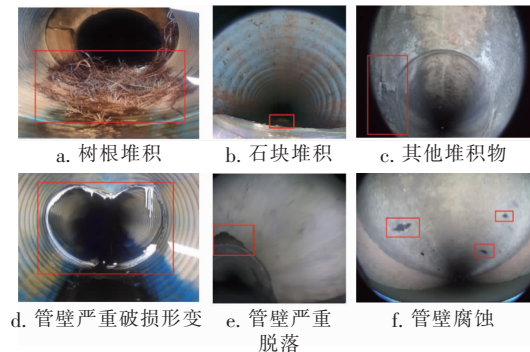


图 7 坪山区排水管网典型病害

Fig.7 Typical diseases of drainage network in Pingshan District

4.2 黄村水库输水隧洞首次检测

黄村水库位于浙江省瓯江好溪支流严溪中游河段,输水系统全长 12.765 km,其中隧洞总长 12.1 km。黄村水库输水隧洞于 2002 年建成,经过多年运行,尚未进行全面的安全检测和评估工作。但是,目前输水隧道进水口流量与出水口流量存在 10% 左右差异,可能存在一定的安全隐患。

黄村水库输水隧洞为丽水市主要供水源之一,无法停水对其进行调查及检测。通过调研,发现 4# 无压隧洞现场工作条件满足检测要求。4# 无压隧洞全长 2 911 m,设计之初未考虑洞中内压水作用,但多年运行过程中基本处于满管运行状态,存在一定的内压水头,对隧洞结构有不利影响,需进行结构检测。

典型病害见图 8。

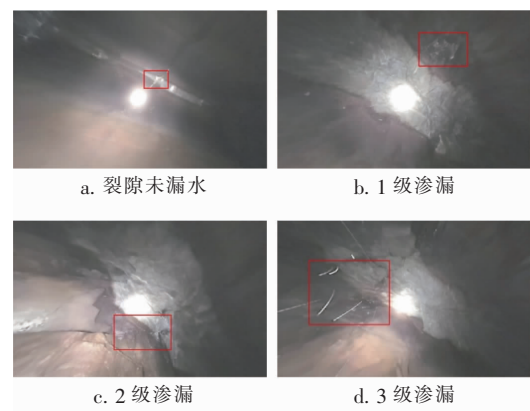


图 8 黄村水库输水隧洞典型病害

Fig.8 Typical diseases in water conveyance tunnel of Huangcun reservoir

在满足丽水市供水要求的前提下,通过降低隧

洞水位、减少流量,使用管道胶囊对黄村水库输水隧洞下游4#无压隧洞进行检测。发现黄村水库输水隧洞存在的典型病害包括裂隙未漏水、1级渗漏(在隧洞围岩壁有明显水印,水持续从岩体裂隙渗出)、2级渗漏(在隧洞围岩壁有明显水持续从岩体裂隙滴出)和3级渗漏(在隧洞围岩壁有明显水持续从岩体裂隙流出)四种类型。

5 结论

漂流式管道检测胶囊机器人是一种全新的地下管网快速检测系统,可以有效解决传统管道检测方法的盲区和显著提高管道检测效率。使用检测胶囊对管道进行低成本快速的病害检测,是实现地下管网病害大范围常态化检测工作的重要途径,便于科学、客观、公证地对管网进行安全评价。最后,应用漂流式管道检测胶囊机器人完成了深圳、合肥和浙江等多地的管道内部病害检测和管道运维三维可视化云平台建设。

参考文献:

- [1] 杨悦姮. 东京排水系统对北京内涝的启示[J]. 科技与生活, 2012(15): 124 - 125.
YANG Yueheng. The enlightenment of Tokyo drainage system on Beijing waterlogging [J]. Science and Technology and Life, 2012(15): 124 - 125 (in Chinese).
- [2] 贾小斌. 深圳市地面坍塌灾害成因分析[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 114 - 118.
JIA Xiaobin. Analyzing the reason of ground collapse disaster in Shenzhen [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 114 - 118 (in Chinese).
- [3] 谢晶, 杨秋萍. 城市排水检查井病害原因及防治对策分析[J]. 中国水运, 2015, 15(11): 337 - 338.
XIE Jing, YANG Qiuping. Analysis of disease causes and control measures of urban drainage inspection wells [J]. China Water Transport, 2015, 15(11): 337 - 338 (in Chinese).
- [4] 孙乐乐, 景江峰. 管道潜望镜检测技术在排水管道检测中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(2): 106 - 108.
SUN Lele, JING Jiangfeng. Application of quick view inspection technology in detection and evaluation of urban drainage pipeline [J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(2): 106 - 108 (in Chinese).
- [5] 陈海燕. 基于声呐技术的排水管道探测系统及实验研究[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2010.
CHEN Haiyan. Research on Drainage Pipeline Detection System and Experiment Based on Sonar Technology [D]. Beijing: Beijing University of Information Technology, 2010 (in Chinese).
- [6] 邓支凌, 夏金儒, 唐勇. CCTV 技术在排水管道状态检测中的应用[J]. 城市勘测, 2009(5): 130 - 133.
DENG Zhiling, XIA Jinru, TANG Yong. CCTV application in drainage pipeline condition detection [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(5): 130 - 133 (in Chinese).
- [7] 王浩正, 胡坚, 杨振, 等. 镇江市防汛预警和指挥调度系统[J]. 中国给水排水, 2013, 29(19): 137 - 140.
WANG Haozheng, HU Jian, YANG Zhen, et al. Early warning and management system for urban flood control in Zhenjiang City [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(19): 137 - 140 (in Chinese).
- [8] 吴一全, 谢芬. 基于对比度 Harris 的快速鲁棒图像配准算法[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(3): 316 - 324.
WU Yiquan, XIE Fen. A fast and robust image registration algorithm based on contrast Harris [J]. Transactions on Beijing Institute of Technology, 2020, 40(3): 316 - 324 (in Chinese).
- [9] 王学雷, 张宾, 李传军, 等. 基于 Jacobian 矩阵的 5UPS - RPS 并联机构全域性能指标分析[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(9): 899 - 904.
WANG Xuelei, ZHANG Bin, LI Chuanjun, et al. Analysis of global performance index of 5UPS - RPS parallel mechanism based on Jacobian matrix [J]. Transactions on Beijing Institute of Technology, 2018, 38(9): 899 - 904 (in Chinese).

作者简介: 李清泉 (1965 -), 男, 安徽滁州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为动态精密工程测量。

E-mail: liqq@szu.edu.cn

收稿日期: 2020 - 09 - 08

修回日期: 2020 - 09 - 17

(编辑: 衣春敏)