

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209138

# 基于机械臂的管道检测全向机器人设计\*

田丰<sup>1</sup> 陆怡晨<sup>2</sup> 贾银亮<sup>2</sup> 王平<sup>2</sup> 罗小华<sup>3</sup>(1.合肥市轨道交通集团有限公司 合肥 230000; 2.南京航空航天大学自动化学院 南京 211100;  
3.中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

**摘要:** 随着综合地下管廊的快速发展,管道的安全对于保证管廊电力、燃气等运输的安全越来越重要,由于管廊环境恶劣,采用人工巡检效率低且安全隐患大。为了实现地下管廊全方位无盲区检测,设计了一种基于机械臂的管道检测全向机器人,将移动机器人、机械臂、检测探头融为一体,具有路径自主规划、循迹、避障等功能,并通过漏磁技术检测管道泄露、通过机械臂实现复杂环境下的检测。实验证明此集成机器人可以进行全方位检测且缺陷识别精度良好。

**关键词:** 管道缺陷;机械臂;无损检测;巡检机器人

**中图分类号:** U216.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design of pipeline inspection omnidirectional robot based on mechanical arm

Tian Feng<sup>1</sup> Lu Yichen<sup>2</sup> Jia Yinliang<sup>2</sup> Wang Ping<sup>2</sup> Luo Xiaohua<sup>3</sup>(1. Hefei City Rail Transit Group Co., Ltd., Hefei 230000, China;  
2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China;  
3. China Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

**Abstract:** With the rapid development of underground utility tunnel, the safety of pipelines is becoming more and more important to ensure the safety of electricity and gas transportation in pipelines. Due to the harsh environment of utility tunnel, manual inspection is inefficient and has great security risks. In order to realize the omnidirectional detection of underground utility tunnel without blind spots, an omnidirectional robot for pipeline detection based on mechanical arm is designed. The mobile robot, mechanical arm, detecting probe are combined into a whole. The robot has the functions of path independent planning, tracking, obstacle avoidance, etc., and detects pipeline leakage through magnetic flux leakage technology, and realizes detection in complex environment through mechanical arm. Experiments show that the integrated robot can carry out omnidirectional detection and has good accuracy in defect identification.

**Keywords:** pipeline defect; mechanical arm; nondestructive testing; inspection robot

## 0 引言

城市综合管廊是将电力、通信、热力、给水、排水、燃气等集于一体的地下隧道空间。管线被集中布置在隧道中,便于管线检查、维修与更换,是一种能有效保证管线安全的措施,可以避免传统方法带来路面开挖引发交通堵塞等一系列城市公共安全问题<sup>[1]</sup>。由于综合管廊位于地下,包含通信、燃气、供水和电力电缆等多种管道,供电电缆如果产生短路,过载等情况可能造成火灾,燃气管道如果泄露可能产生爆炸事故。管廊中一旦发生此类灾害,如不能及时控制,会对当地的生产和生活造成非常不利的影响,甚至会危

及工作人员的人身安全<sup>[2]</sup>。

截至2021年5月,国内地下综合管廊试点项目已开工建设787 km,建成廊体260 km,完成投资400多亿元<sup>[3]</sup>。作为城市市政地下管线综合体,地下管廊是城市地下“神经网络”,其智慧化管理和运营是建设“智慧城市”的基础,其安全问题至关重要<sup>[4]</sup>。

随着人工智能的发展,管道检测已进入智能识别阶段。城市地下管道识别领域的专家学者们做出了大量研究,现阶段已有多种泄露检测方式:Zang等<sup>[5]</sup>提出了一种基于虚拟样本生成(VSG)和统一特征提取(UFE)技术的管廊小泄露检测方法。Xu等<sup>[6]</sup>设计了一种基于变分模态分解和支持向

收稿日期:2022-03-02

\* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2100903)、科技部创新方法工作专项(2020IM020800)资助

量机的管道泄漏检测器,采用内球面检测器球形探测仪(SD)能够接近泄漏点并从长管道内部采集泄漏声音。郭成超等<sup>[7]</sup>利用单平面 UCT 检测技术在施工缝缺陷检测及密实度评价上表现出较高精度的特点,可直观获取缺陷分布形态。曹建树等<sup>[8]</sup>通过激光超声 B 扫描可以检测出管道内表面裂纹缺陷并精准定位,具有在管道无损检测领域推广应用的價值。城市地下管道工程庞大,这些方法可以有效检测管道缺陷,但也有其不足,如巡检速度慢,灵活性低等问题。

由于管廊内空间狭小、缺氧,甚至可能释放有害气体,采用人工巡检不仅监测效率低,而且存在安全隐患<sup>[9]</sup>。使用机器人代替人工可以保证人员安全,且支持随时制定巡检路线、拍摄巡检视频、调整巡检方案等功能。由此提升了在综合管廊中巡检的可控性以及灵活性。同时,巡检机器人系统会对不同时间的报表进行保存,方便以后的参考使用<sup>[10]</sup>。

为疏通城市排污管道,罗继曼等<sup>[11]</sup>对清淤机器人行走装置的变径弹簧系统进行研究,实现管道机器人的行走清淤作业要求。李强等<sup>[12]</sup>采用基于蚁群算法的路径规划方法,把规划好的路径信息转变为全向机器人可识别、可执行的运动指令,将测量传感器运送到多个被测位置完成测量任务。陈文涛等<sup>[13]</sup>融合了机器人技术、嵌入式技术,物联网通信技术,传感检测技术,数据库技术,C++/QT 软件开发等技术设计的管廊巡检机器人系统,可替代人工巡检作业。为了使操作更加灵活,研究员在机器人基础上设计了机械臂进行辅助检测,如:李金良等<sup>[14]</sup>建立了机械臂的 D-H 坐标系,对机械臂进行正、逆运动学分析,设计一种集巡检和消防灭火功能于一体的管廊消防巡检机器人。陈梁远等<sup>[15]</sup>设计了一种六氟化硫检测机械臂能够有效稳定地完成六氟化硫断路器罐体的气体泄漏检测作业。王凤祥等<sup>[16]</sup>针对非常热门的机器人技术,搭建了一款小型的六自由度机械臂系统,对机械臂系统进行后续更深层次研究奠定了最重要的基础。

随着机器人技术的发展,利用移动机器人完成管道巡检已经成为管道巡检方法中越来越重要的一个分支。该方法可有效降低人工的劳动强度和安全风险,提高巡检效率,达到巡检无盲区的目的,成为管道巡检中的一个重要的技术手段,因此,研究管道巡检机器人具有重大的现实意义。

研究员已经在管道检测这方面做了一定的积累,但在实际工程中依然存在地下管道狭小、无法全方位监测管道或自由转向等问题。对此,本文设计了一种基于机械臂的管道检测全向机器人,采用机械臂与全向巡检机器人融合能正常进行行驶、转向运动,还可以根据巡检需要,使用机械臂在狭小的管廊中灵活转向,实现无盲区探测,具有速度快,灵活性高等优点。

## 1 系统设计

智能作业臂的巡检机器人指在现有轨道车平台上,采

用移动平台搭载作业臂的架构,集成环境感知、病害检测技术、智能控制、无线传输等功能,构建智能巡检机器人平台,实现机器人自主运行。为实现该目标,需要解决定位控制、运动控制、环境感知、检测等难点问题。

本文所设计城市地下管廊巡检机器人是一个复杂的机电一体化系统,主要包括上位机系统、主控系统和功能系统等。功能系统包括运动控制系统、定位系统、环境感知系统、检测系统和冗余控制系统六个功能子系统,上位机系统位于远端控制室,主控系统和功能系统搭载于机器人上,所设计机器人系统组成如图 1 所示。

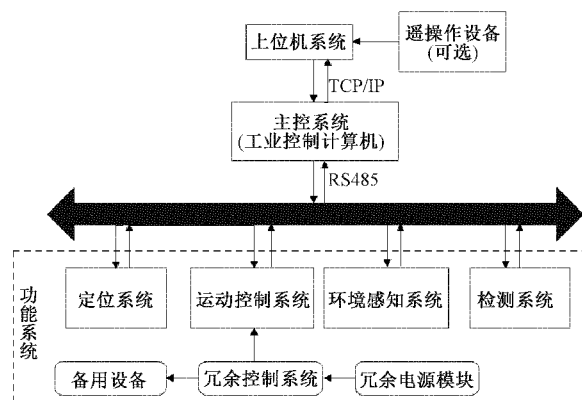


图 1 综合巡检机器人系统组成

上位机系统是操作者遥控综合管廊巡检机器人进行管道检测作业的最直接方式。

主控系统作为整个轨道巡检机器人系统的核心系统,其性能的好坏,直接影响整个机器人系统数据处理的高效性,信号传输的实时性,模块控制的集中性。设计采用 STM32F103 系列作为机器人的主要控制单元。STM32F103 系列具有低能耗,高速度,高性能,低成本等特点,内核采用 ARM32 位 Cortex-M3CPU。

环境感知系统为巡检机器人提供周围环境中的温湿度信息、通过超声波感知机器人周围的障碍物信息,主控系统以此判断当前环境对机器人系统作业的影响,做出相应动作,如:调整系统设定参数,紧急停止作业。因此,环境感知模块包括采集周围环境信息的传感器和处理传感器数据的环境感知控制器组成,模块方案如图 2 所示,激光雷达在潮湿环境中稳定性大大降低,摄像机在强光情况下无法准确获取周围环境的视觉信息,因此二者相结合可以弥补传感器自身的局限性。

检测系统通过摄像头采集管廊内部的图像信息,主控系统通过图像识别技术区分出要检测的管道,进一步驱动机械臂将检测探头靠近管道进行检测,在保存检测数据的同时,定位系统通过预先埋在管廊中的信标确定位置并同步记录,以便后期的维护。

运动控制系统是轨道巡检机器人的基础系统,用于搭载管道裂纹检测设备、扣件检测设备等的相关检测作业。

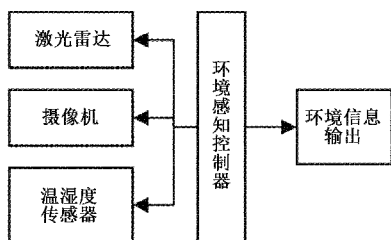


图 2 环境感知模块硬件组成

管道巡检机器人实时定位信息与管道检测数据相结合,形成完整的检测结果,为后续管道维护工作提供指导。当机器人系统出现故障时,精确的位置信息能够更快地找到机器人并处理故障,避免对正常运营造成影响。现如今,定位技术得到了很大的发展,定位方法也种类繁多,如基于里程计的定位方法、基于 GPS 的有源定位方法、基于应答器(RFID 电子标签)的定位方法等。每一种定位方法都有其优点和局限性,如基于里程计的定位方法成本低廉、易于实现,但具有无法避免的累计定位误差。为解决单一传感器定位方法的局限性,多传感器融合的机器人定位技术成为目前主要的发展方向。巡检机器人用于城市管道,而 GNSS 等有源定位信号在管道中存在盲区,考虑管道沿线存在 CP 点、扣件等众多标志物,本系统采用编码器累计定位、扣件定位校正、识别标签定位矫正相结合的定位方法,系统方案如图 3 所示。

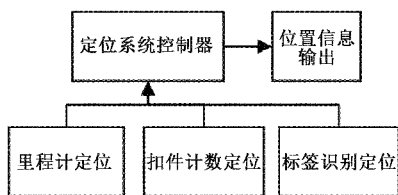


图 3 平台定位模块组成

## 2 机械臂设计

针对地铁巡检环境及巡检要求,采用移动机器人搭载作业臂的架构,集成环境感知、病害检测技术、智能控制、无线传输等功能,构建智能巡检机器人平台,实现无人监控下的高精度自主运行。移动机器人上的 6 自由度作业臂用于搭载缺陷检测设备实现缺陷的多角度智能识别及检测。机械臂示意图如图 4 所示。

机械臂由于使用环境、生产需求的不同,内部结构、整体大小、驱动方式均存在较大差异,管廊巡检所用机械臂主要由转部、大臂、小臂及腕部等部件组成,其示意图如图 4 所示。大臂和小臂的相互协调运动可实现机械臂末端的空间位置移动功能,机械臂的腕部可以实现俯仰轴与摆轴两个运动,机械臂设定好的运动轨迹可以由各个部件的相互协调运动来实现。此外,机械臂和腕部之间可以进行回转运动,可以实现水平或垂直这两维度的自由运动。

机械臂遥操作系统中控制接口主要为机械臂末端的位

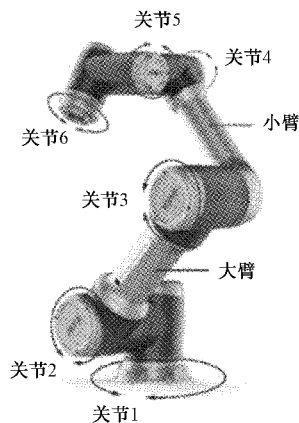


图 4 机械臂示意图

置和姿态控制以及末端与管道表面的恒力接触控制,以保证正常检测工作。恒力接触由机械臂力位混合控制,控制框图如图 5 所示。将力控和位控方向解耦,接触面法向为力控,切平面为位置控制模式。力控采用 PI 控制器,机械臂末端力矩传感器采集的力经过滤波后作为输入,输出为机械臂末端运动的速度,积分得到位置。位控则直接使用机械臂位置控制模式。

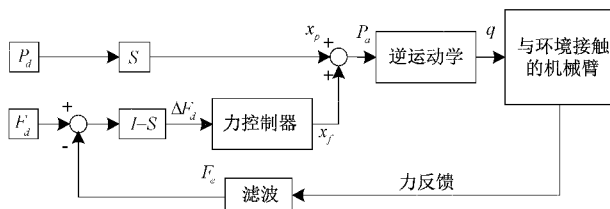


图 5 机械臂位置控制策略框图

## 3 探头设计

管廊全向巡检机器人利用电磁无损检测技术对管道表面的伤损进行检测。其具体工作原理如下:给磁化器一定大小的电压,使其周围生成一个感生磁场,磁场经过管道裂纹时会发生泄漏,用霍尔传感器拾取漏磁场并转化为电信号,经过调理电路的滤波、放大后由采集卡采集,最后在计算机上对数据进行处理和显示。检测系统硬件框图与探头内部结构如图 6 所示。

位于系统的最前端的是管廊巡检全向机器人的检测探头,主要由 3 大部分组成:U 型磁轭、霍尔传感器、电涡流式位移传感器。U 型磁轭是一种高导磁性的物体,它可以使通电线圈激发的磁场从磁轭进入钢轨。霍尔传感器拾取裂纹上的泄露磁场使之转化为电信号为后续电路所处理。探头与管道表面的距离由电涡流式位移传感器测量检测。

霍尔传感器内部依据霍尔效应制成的敏感元件将外界磁场转化为电势差。且霍尔传感器拥有尺寸小、灵敏度高和单位空间分辨率高等优点,所以非常适合低频、阵列式传感器的场合。综合考虑传感器的工作电压,灵敏度等性能

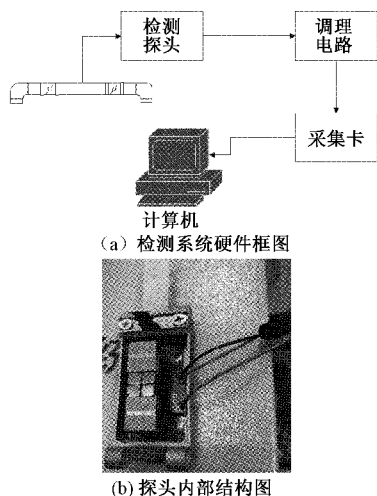


图 6 检测系统硬件框图与探头内部结构图

指标后,探头所用霍尔传感器为 UGN3503 型传感器。

此外,综合管廊空间狭小,全向机器人探头在满足各个功能的情况下应尽量减小自身体积。由于不同提高值对检测信号影响较大,在经过一系列测试后,最优提高值设置为 2 cm。

#### 4 实 验

在机器人移动平台上搭建了机械臂,如图 7 所示。该机器人投入城市地下管廊进行管道检测实验,移动平台具有全转向功能,在巡检时能完成基本动作,如前进、后退、转弯等。在靠近管道时利用机械臂进行转向,使管道外壁四周都能被探头检测到。

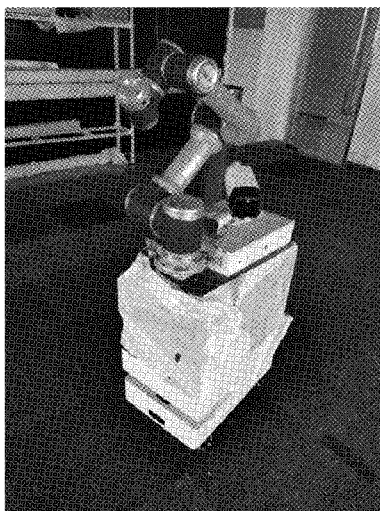
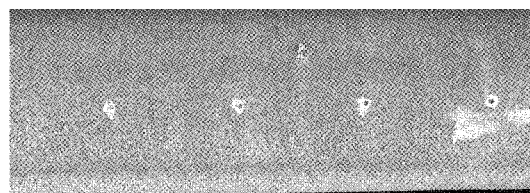


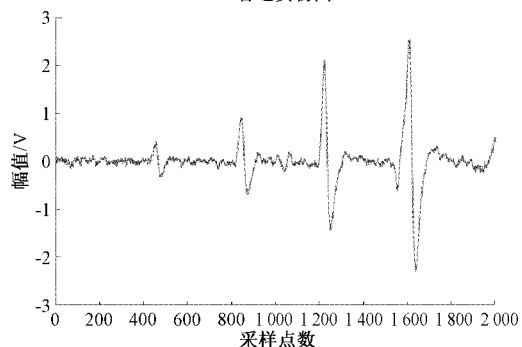
图 7 巡检机器人

设置传感器提高值为 2 mm,磁轭提高值为 20 mm,分别选用两组带有不同缺陷的管道进行检测实验。管道实物图和缺陷检测信号分别如图 8(a)、(b),图 9(a)、(b)所示。

如图所示,横轴为采样点数,纵轴为信号幅值大小。图 8 为 4 个不同深度的缺陷,且从左往右缺陷深度越来越

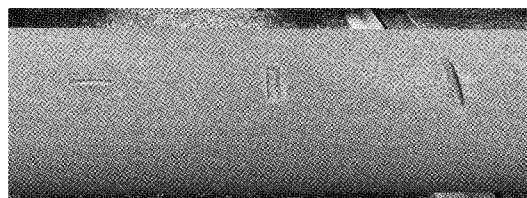


(a) 管道实物图

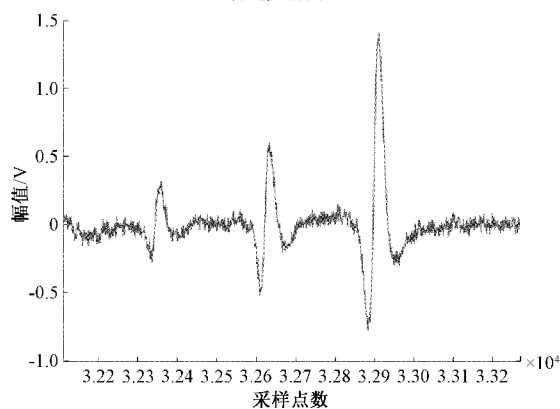


(b) 缺陷检测信号

图 8 管道与检测信号



(a) 管道实物图



(b) 缺陷信号图

图 9 管道与缺陷信号

大。图 9 为 3 个不同长度的缺陷,且从左往右缺陷越来越长。两组数据无缺陷处信号较为平稳,有缺陷处由于提高控制的较小,漏磁信号幅值偏大且没有被振动干扰信号淹没,缺陷处检测信号波形幅值从左往右依次增大,符合缺陷不同深度、长度的分布。

#### 5 结 论

使用机器人代替人工检测已成为目前趋势,本文所设计的基于机械臂的全向巡检机器人将移动底座、机械臂、检测探头融于一体能灵活转向,具有速度快,灵活等优点,主

要设计了定位系统、运动系统、环境感知系统等,具有一定的先进性与现实意义。并对两段管道进行检测,取得良好效果,未来可以更进一步改进机器人定位系统和机械臂控制系统使其定位更准确、操作更灵活。

### 参考文献

- [1] 郑立宁,罗春燕,王建. 综合管廊智能化运维管理技术综述[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S1):1-10.
- [2] 罗家木,陈雍君,邱实. 基于嵌入式系统的智慧管廊防灾预警系统设计[J]. 电子测量技术,2017,40(5):123-128.
- [3] 张世宇,眭小红,赵瑜,等. 管廊巡检机器人技术分析[J]. 信息记录材料,2021,22(7):94-95.
- [4] 罗家木,陈雍君,陈渝江,等. 基于 5G 无线传感网络的智慧管廊综合监控系统设计[J]. 电子测量技术,2017,40(4):127-132.
- [5] ZANG D, LIU J H, QU F M. Pipeline small leak detection based on virtual sample generation unified feature extraction[J]. Measurement, 2021, DOI:10.1016/j.measurement.2021.109960.
- [6] XU T, ZENG Z, HUANG X, et al. Pipeline leak detection based on variational mode decomposition and support vector machine using an interior spherical detector [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, DOI:10.1016/j.psep.2021.07.024.
- [7] 郭成超,郭铸锋,马会环,等. 基于单平面 UCT 技术的综合管廊施工缝缺陷检测研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(8):1315-1323.
- [8] 曹建树,姬保平,纪卫克. X80 管道内表面裂纹的激光超声检测方法 with 试验[J]. 油气储运,2021,40(12):1365-1369.
- [9] 晏海静,罗大兵,漆令飞. 城市地下综合管廊巡检小车全转向系统研究[J]. 机械设计与制造,2021(1):159-162.
- [10] 戚琛琛. 智能巡检机器人在智能管廊中的应用[J]. 智慧中国,2021(9):82-83.
- [11] 罗继曼,戴璐璐,印辉,等. 管道清淤机器人协调运动控制系统的设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(3):556-562.
- [12] 李强,杜福洲. 全向机器人蚁群算法路径规划与运动控制研究[J]. 机械设计与制造,2018(S2):157-159,163.
- [13] 陈文涛,刘飞飞,代云勇,等. 一种城市地下综合管廊巡检机器人系统的设计与实现[J]. 制造业自动化,2020,42(9):65-69,74.
- [14] 李金良,芦伟,宗成国,等. 管廊消防巡检机器人设计与分析[J]. 机床与液压,2021,49(11):7-11.
- [15] 陈梁远,郭丽娟,唐彬,等. 一种六氟化硫检测机械臂的设计与分析[J]. 沈阳理工大学学报,2020,39(3):88-94.
- [16] 王凤祥,张志杰,陈昊泽. 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究[J]. 电子测量技术,2021,44(4):1-8.

### 作者简介

田丰,高级工程师,本科,主要从事城市轨道交通建设管理工作。

E-mail: tfbeat@126.com

陆怡晨,硕士,主要研究方向为钢轨漏磁无损检测。

E-mail: yichenlu@nuaa.edu.cn

贾银亮,博士,主要研究方向为钢轨漏磁无损检测等。

E-mail: jyl@nuaa.edu.cn

王平,博士,主要研究方向为钢轨漏磁无损检测等。

E-mail: zeitping@nuaa.edu.cn