



汕 頭 大 學

SHANTOU UNIVERSITY

硕 士 学 位 论 文

题 目 管道漏点的检测、定位与修复

英文题目 Pipeline Leak Detection,
Localization and Repair

姓 名 林培涵 学 号 151909124

所在学院 工学院 导师姓名 范 衡

专 业 电子与通信工程

入学日期 2019 年 9 月 答辩日期 2022 年 5 月

学位论文原创性声明

本论文是我个人在导师指导下进行的工作研究及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在论文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

作者签名：_____

日期：2022 年 05 月 10 日

学位论文使用授权声明

本人授权汕头大学保存本学位论文的电子和纸质文档，允许论文被查阅和借阅；学校可将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存和汇编论文；学校可以向国家有关部门或机构送交论文并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容。对于保密的论文，按照保密的有关规定和程序处理。

作者签名：_____

导师签名：_____

日期：2022 年 05 月 10 日

日期：____年__月__日



汕 頭 大 學
SHANTOU UNIVERSITY

硕士学位论文

论文中文题目：管道漏点的检测、定位与修复

论文英文题名：Pipeline Leak Detection, Localization and Repair

指导教师：范衡

申请人：林培涵

论文答辩委员会成员

主席：肖刚 教授（韩山师范学院）

委员：陈耀文 教授（汕头大学工学院电子系）

邹安民 教授（汕头大学工学院电子系）

赖李洋 教授（汕头大学工学院电子系）

李兵 教授（汕头大学工学院电子系）

摘要

管道带压堵漏(Pipeline Online Leak Sealing),是指电厂或化工厂的工作设备未关闭且管道内部存在一定压力的情况下,针对管道泄漏问题采用不停输不倒罐方式,在内部介质飞溅的过程中堵住管道的修复方法。

传统的管道带压堵漏需要专业的带压堵漏人员携带沉重的修复工具抵达作业现场,而现场由于管道运输介质的高温、高压以及腐蚀性等特质,这项工作具备一定的危险性。随着机器人技术与人工智能技术的发展与应用,利用机器人辅助甚至代替人工来进入管道泄漏现场完成管道修复这一类具有危险性的工作成为一个趋势。本文的主要研究内容及工作如下:

(1) 提出了一种基于卡尔曼滤波的多模态机器人手眼协同三维定位方法。该方法通过传感器获取深度图像和压力数据等多种模态的信息,压力数据再经过卡尔曼滤波处理以过滤噪声,最后融合深度图像,用于在三维空间中对物体进行特征定位。

(2) 带压堵漏领域的机器人被设计并实现,打破了以往这项高危工作只能依赖人工完成的传统。机器人的设计制造工作包括了硬件选型、结构设计、电路设计、气路设计、控制系统、通信系统以及各个系统之间的接线,利用控制板和继电器对机器人的电路和气路以及运动平台进行控制。

(3) 创新性地设计了具有管道泄漏修复能力的末端工具,同时设计了机械臂的工具快速更换器来兼容不同形态的末端执行器。该执行器解决了同类型工艺下的修复工具体积、重量大的问题。

本文中实现的带压堵漏机器人适合在有相关需求的工业行业内部推广,对于未来类似的带压堵漏机器人自动化作业的研究与设计实现具有一定的指导意义。

关键词: 带压堵漏; 手眼协同; 管道修复; 特种机器人; 深度学习

Abstract

Pipeline leak-sealing under pressure is a repair method for the pipeline leakage problem of production enterprises. In detail, when the working equipment is working normally and there is pressure inside the pipeline, the enterprise does not shut down the production equipment, but repairs the pipeline in the case of fluid splashing.

Traditional pipeline plugging under pressure requires professional plugging personnel to carry heavy repair tools to the job site. Due to the high temperature, high pressure and corrosive properties of the pipeline transport medium, this work has certain risks. With the development and application of robot technology and artificial intelligence technology, it has become a trend to use robots to assist or even replace manual work to enter the pipeline leakage site to complete the pipeline repair. The main research contents and work of this thesis are as follows:

(1) A hand-eye cooperative 3D localization method for multi-modal robots based on Kalman filtering is proposed. The method obtains multi-modal sensor data such as depth image and pressure data through the sensor, and then the pressure data is processed by Kalman filter to filter noise, and finally the depth image is fused for feature localization of objects in three-dimensional space.

(2) The first robot used in the field of leak plugging under pressure has been designed and manufactured at home and abroad, breaking the tradition that this high-risk work can only rely on manual labor. The design and manufacture of the robot includes hardware selection, structural design, circuit design, gas circuit design, control system, communication system and wiring between various systems. We also use the control board and relay to control the circuit and air path of the robot and the sports platform.

(3) The end tools with pipeline leakage repair ability are innovatively designed. At the same time, the tools of robotic arm are designed to quickly replace the robotic arm to compatible with different forms of end actuators. The actuator solves the problem of the size and weight of the repair tool under the same type of process.

The pipeline leak-sealing robots realized in this paper is suitable for promotion within the industrial industry with relevant requirements, and has certain guiding significance for the research and design of the automatic operation of similar under-pressure leakage

plugging robots in the future.

Keywords: Pipeline online leak-sealing; Hand-eye synergy; Pipeline repair Task;
Special robot; Deep learning

目 录

摘要	I
Abstract.....	I
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景与研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 管道漏点检测研究现状	2
1.2.2 管道漏点修复研究现状	4
1.2.3 特种机器人研究现状	6
1.3 本文的主要研究内容	7
第 2 章 项目总体方案设计	9
2.1 项目中管道泄漏的定义及性质	9
2.2 管道漏点的检测方案设计	10
2.3 管道漏点的定位方案设计	11
2.4 管道漏点的修复方案设计	12
2.5 项目总体方案设计	13
2.6 本章小结	14
第 3 章 管道检测、定位与修复的总体实现框架	16
3.1 带压堵漏机器人总体设计框架	16
3.2 定位末端的设计	17
3.3 修复末端的设计	18
3.4 机器人的硬件控制	20
3.5 机器人的软件界面	22
3.6 本章小结	24
第 4 章 图像识别和定位的具体实现	25
4.1 图像识别任务分析	25
4.2 YOLO	26
4.2.1 YOLO 算法简介	26
4.2.2 YOLO v3 的网络结构	27
4.2.3 YOLO v3 的特点	28

4.3 管道漏点数据集的采集	33
4.4 基于 ROS 的图像获取和识别	35
4.5 本章小结	38
第 5 章 基于 ROS 的机器人控制实现	39
5.1 机器人手眼系统协同	39
5.2 基于双末端的控制策略	41
5.3 基于 ROS 的机械臂控制实现	43
5.4 本章小结	44
第 6 章 仿真实验与实际场景实验	45
6.1 修复末端捻打倾角实验	45
6.2 管道修复实验	47
6.3 管道漏点的检测与定位实验	49
6.3.1 管道漏点检测实验	49
6.3.2 管道漏点定位实验	49
6.4 真实管道泄漏环境下的漏点修复	53
6.5 本章小结	58
第 7 章 总结与展望	60
7.1 总结	60
7.2 展望	61
参考文献	62
硕士期间取得的学术成果	70
致谢	72

第1章 绪论

1.1 课题背景与研究意义

管道作为一种长距离运输装置，无论是在生活中或是在工业生产中都十分重要，具有十分广泛的用途。在工业生产中，管道常被用于输送气体、液体或带固体颗粒的流体，并且这些介质可能会带有高温或者高压的特性。在生产过程中如果管道由于各种原因被破坏或者发生泄漏，那么无论是高压或者高温的特性，还是运输的流体本身的特性，都可能会带来极大的危险性，造成不可修复的损坏或者重大的生命财产损失。在世界各地，用于工业生产的管道泄漏事件不时发生^[1]。对于这一类工厂企业，管道修复是一项重要的工作内容。并且在部分企业中，对于管道泄漏的修复方式会经过审慎地考虑选择。这是由于在这部分企业中，为了使得整个生产系统达到平衡稳定的生产状态，需要进行长时间地启停和调整才能够到达稳态。而如果为了管道的修复工作而将整个系统停止关闭，会导致非常大的经济损失。因此，在管道泄漏状态可控的情况下，通常会采用管道带压堵漏的方法来对管道进行修复。

带压堵漏是指在电厂或化工厂的工作设备未关闭且压力管道内部的内部储存或输送介质在一个大气压以上的情况下，针对管道由于腐蚀穿孔跑冒滴漏或人为损坏等原因导致泄漏的问题，采用不停输不倒罐方式，在内部介质飞溅的过程中堵住管道，从而对输送高温和高压介质的管道进行修复的方法。该技术是属于在不停产情况下检修技术的一种。更加具体的技术定义是在不改变泄漏介质流量、压力、温度的条件下，对泄漏缺陷部位进行的再密封作业。在带温带压条件下，对管道进行修复的任务是一个危险的工作。但随着机器人技术的发展，利用机器人来辅助甚至代替人完成一些危险、复杂的任务已成为一种趋势。在近年来，为了能够高效、低成本地检查和维护生产设备，无人系统已开始逐渐应用于这一类危险的工作^[2, 3]。利用无人系统来完成危险工作的主要优点是显著减少了对人类生命安全的威胁^[4]。然而，在针对这一类特定复杂危险的任务是，对机器人提出了更高的要求，机器人需要达到更高性能和具备特定的功能，并且针对不同的工作任务中，也需要一些特殊的设计，如模块化平台设计^[4, 5]和防水设计^[6]。

以往针对管道带压堵漏的特殊工作，通常采用人工堵漏这一方式，这对现场操作的堵漏工人的堵漏经验和灵活应变能力提出了一定的要求。而在 2016 年，国家已

经停止了带温带压堵漏这一工种的资格认证。面对日益增长的管道带压堵漏需求，专业的堵漏操作工人难以填补上这一空缺，因此通过自动化技术和机器人技术，来辅助或者代替操作人员对管道进行修复成为一种必然的趋势。

在推动管道修复的自动化程度发展时，对于管道泄漏的检测、定位和修复的自动化是十分重要的因素。管道泄漏检测是一项耗时耗力的任务，如果通过人工巡检的方式来对管道泄漏进行检测，则需要耗费一定的人力，并且由于工作内容枯燥乏味、人的情绪状态波动和工作经验等等，管道泄漏检测的准确性并不稳定。在检测到管道发生泄漏时，则需要定位泄漏的具体位置。因此管道的泄漏检测是管道定位的前置任务，同时在很多方法中，能够同时完成对管道泄漏的检测和定位。完成管道泄漏的检测和泄漏位置的定位之后，则需要对管道进行修复。因此我们的课题主要围绕着管道的泄漏检测、定位和修复。



图 1-1 管道泄漏与人工修复

1.2 国内外研究现状

1.2.1 管道漏点检测研究现状

管道检测是用于对长距离运输流体的管道进行检测预警的技术。在管道长期的运行过程中，管道可能会由于外力破坏、腐蚀和缺陷等问题出现泄漏。普通的管道出现泄漏会影响管道的正常运行，而用于运输天然气或者石油的管道发生泄漏时，随之而来的还可能是重大的经济损失和安全事故^[7]。在国内外的研究中，管道检测技术比较多且分类方式比较繁杂。基于检测技术智能化特征，检测技术分为自动检测、半自动检测和手动检测；基于检测数据的特征相关性，检测技术分为直接检测和间接检测^[8]；从检测装置所处位置可以将管道泄漏检测技术分为内部检测法和外

部检测法^[9]；从检测装置所处位置可以将管道泄漏检测技术分为内部检测法和外部检测法^[10]。

根据使用的技术原理可以分为基于化学成分分析法、基于声学分析法、基于光学测量法、分布式光纤传感器法和智能球法。

(1) 基于化学成分分析法^[7]是通过特殊仪器来捕获泄漏气体并分析其浓度的方法^[11]。该方法检测速度快、精度高，但成本高且易受风速等因素干扰。

(2) 基于声学分析法包括声波法和声发射法。声波法^[12]的原理是通过声波传感器检测燃气管道内沿着天然气传播的特定声波信号，根据泄漏信号定位分析泄漏点。优点是工作原理简单可靠且灵敏度高，但当管道地形环境复杂时，声速信号降噪、弱特征提取难以准确计算。声发射法^[13]的原理是通过声传感器获得可用的声音全波形来实现管道泄漏状况和定位泄漏点监测的目的。检测灵敏度较高但安装传感器不方便。

(3) 基于光学测量法包括激光雷达系统法、热成像法和光谱成像法。激光雷达系统法^[14]是利用激光发射装置发射甲烷易吸收的光波，再传感器采集激光回波信号，通过测量激光散失能量与功率计算得到大气中甲烷的浓度来检测管道是否出现泄漏。热成像法^[15]的原理是采集检测对象气体的红外波段辐射信息实现气体泄漏检测的热成像。光谱成像法^[15]的原理是利用光谱扫描空间，获取随波长分布的光谱辐射信息，对信息数据进行处理后得到目标的三维特征及内部属性信息^[7]。

(4) 分布式光纤传感器法^[16]的原理是依靠分布式光纤可用于检测应变和温度异常的功能，从而能够实时监测管道泄漏。分布式光纤传感器法可分为反射式分布式光纤检测方法、干涉式分布式光纤检测方法和准分布式光纤光栅检测方法^[17]。

(5) 智能球^[18]是一种搭载声传感器、加速度计、磁力计、温度等传感器的自漂流式球形装置，可以在管道中运动并记录所有噪声事件，除了部分与小型泄漏噪声（例如调压器、阀门的泄漏噪声）特征类似的环境噪声，管道泄漏噪声特征可以清楚地区别于其他形式环境噪声。

上述各类不同的管道检测方法由于其特点和所使用的设备差异，其检测的效果精度以及环境适应性上都有所区别。因此在实际的管道检测应用中应当具体考虑实际情况来对管道检测技术进行选择。

以上管道检测技术中，有部分技术是可以同时用于管道泄漏位置检测，如声发射法、热成像法、光谱成像法和智能球等。当往往这些技术都仅仅是大致对管道的泄漏区间进行粗略的定位，再由技术人员前往所定位的位置附近勘察寻找准确的泄漏点，因此无法获得管道上漏点的精确三维位置。在本课题中，由于需要利用机器人对管道进行修复工作，因此需要过的管道的精确三维位置，而普通的管道泄漏定

位技术无法满足课题需求。随着深度学习技术的发展,图像识别检测的精度和速度不断提升。同时利用 RGB-D 摄像头、激光雷达、超声波传感器等传感器进行多模式融合^[19, 20]等技术也能够实现同时检测并精确定位管道漏点位置。不仅如此,冗余的传感器系统还能够实现准确的三维模型重建^[21]等功能。由此,利用合适的传感器并通过深度学习对管道泄漏点进行检测和准确定位是一个具有可行性的思路。

1.2.2 管道漏点修复研究现状

带压堵漏这一概念^[22]由英国费曼奈特有限公司第一次提出了,带压堵漏技术的研究的序幕在 19 世纪 20 年代起被揭开。该公司内部任务带压堵漏技术是一项具有先进性、具有良好前景的设备维修技术。而自 20 世纪 60 年代,在英、法、德等发达国家也迅速发展了这一门技术,带压堵漏技术在 20 世纪 70 年代变得愈加成熟,,从最初只能封堵寥寥数种非高温高压介质,发展到能够封堵 300 多种不同的介质,该技术覆盖的工作温度支持-195 ~900℃,压力从真空~60MPa^[23]的工作环境,在封堵介质、夹具设计、密封剂的研究上取得了显著的突破。同时用于管道的堵漏夹具呈现多样性,各种密封剂能承受越来越多的泄漏介质和苛刻条件^[24]。

随着微型机器人技术的发展,一些微型机器人也被应用于管道泄漏修复工作。YF Yeung^[25, 26]等人研究了一种管道内机器人用于无污染管道内部修复,该机器人包含三个模块,分别用于管道表面密封、管道壁清洁和管道内操作。随后,又提出了一种具有操纵模块和柔顺曲面自适应模块的机器人系统,利用一个 4 自由度机械手在受到到污染的管道中清除由于腐蚀泄漏而产生的结节^[27]。Peng Tao^[28]等人提出亲水性树脂是大多数管道非结构性泄漏的最佳修复材料,使用这一类材料对管道进行修复可以在大多数情况下避免管道等设备停机和服务,从而提升经济效益。Silva^[29]等人针对海上老化的管道系统,使用了高性能聚合物和复合材料来维修和结构加固管道系统,从而对管道进行密封堵漏,这种方式十分安全且不会造成生产损失。Nokjib^[30]等人从经济型角度出发,开发一款夹具用于修复气体再生系统中由于管道支架裂缝引起的泄漏,该夹具能够带温条件下运行而无需工厂临时停机。

在带压堵漏技术^[31]的研究发展中,不同的方法被用于不同工作环境下的管道泄漏情况。具体可以分为以下方法:

(1) 焊接带压堵漏^[32-34]:派遣专业的电焊工人进行焊接作业,对管道泄漏位置直接焊堵,从而形成封闭区,来完成管道的堵漏工作。焊接堵漏作业可分为带压工况和常压工况下的动火焊接,这种方法的特征是动火作业风险高但效果好。

(2) 带压导流焊接堵漏^[35, 36]:充分利用壳体、管道的焊接性能,在本体或者管道上,焊接上一个带有导流阀的密闭腔体。在作业过程中,导流阀处于开启状态,

腔体焊接完毕后，关闭导流阀。

(3) 夹具带压堵漏^[37]：一般用在正常生产运行设备上的法兰、管道、阀门等部位。该技术是在管道的泄漏区域安装合适的夹具，使得泄漏区域的外侧和设计的夹具之间能够形成一个密封腔^[38]，再通过其他方式将泄漏位置进行堵漏。

(4) 高频捻打堵漏^[39]：利用金属所具备的塑性变形能力封堵管道上的泄漏区域，通常是使用高频捻打工具(如捻打锤等)对出现泄漏管道的金属表面做高频捻打处理，管道泄漏区域附近的金属会由于塑性变形而封堵住管道泄漏位置。

总体来说，带压堵漏技术是针对生产中的特定需求的一项重要技术，具有以下优点：能够在不停机、带温带压工况下实现管道堵漏，最小程度减少对生产的影响，降低经济风险；这种技术可用于 300 多种介质的泄漏，适应性强；该技术的实施时间短，一般可在几小时内完成堵漏作业，效率高^[24]。

相较于带压堵漏技术在国内的研究与发展，带压堵漏技术在国内的研究与应用较晚^[40]。在早期，面对管道泄漏等问题，通常都是采用补焊、打桩子、打卡子、以及断电停机检修等方法处理管道泄漏，然而以上方法存在较多的缺点。在 20 世纪 80 年代开始，国内逐步重视这项技术。其中，1986 年受国家经委和中石化总公司委托，兰化研究院开始研究带压堵漏技术，并且后续实现了一套可行的带压堵漏技术。此后这项技术在国内发展迅速，并且逐步推广到各个行业领域。而带压堵漏技术的应用范围几乎涉及了所有的流体贮存和输送的工业领域，更具体而言，带压堵漏技术在石油化工、热电厂与核发电厂、冶金工业、船舶、海上工程、造纸工业、食品工业以及流体输送管道等八大领域得到广泛的应用。针对不同的领域，不同类型的堵漏技术、密封材料及专用夹具设计被提出^[41-45]。

解应涛^[46]等人设计了专用的夹具来解决川气东送管道站场、阀室中的一体式焊接截止阀的阀杆微漏问题，获得了很好的效果。闫杰^[47]等人从通过优化带压堵漏器的结构、选用稀土永磁铁以及设计特殊的连接机构等工作，最终研制出的磁力组合式管道带压堵漏器，这种工具结构简单、体积小、重量轻，能够适用于较大口径管道的带压堵漏修复工作，以提高管道修复效率，缩短抢修时间。李鑫^[48]等人对面向对象的带压堵漏夹具的设计方法进行了探讨，通过夹具设计计算软件，能够根据泄漏介质不同的温度、压力以及工作现场的相关数据等参数初步实现了夹具设计的智能化。

另一方面，全国锅炉压力容器标准化技术委员会与各相关单位合作，已经完成了 GB/T26467-2011《承压设备带压密封技术规范》^[49]、GB/T26468-2011《承压设备带压密封夹具设计规范》^[50]和 GB/T26556-2011《承压设备带压密封剂技术条件》^[51]的起草工作，2011 年 12 月 1 日这 3 项国家标准正式发布实施。国内的带压堵漏技术

正逐渐向规范化、标注化和智能化发展^[24]。

纵观当前各种堵漏技术，由于国外对于带压堵漏技术的研究起步较早，因此对于带压堵漏技术的研究更为成熟，并且开始将机器人技术引用到带压堵漏的领域中。而国内的带压堵漏技术手段虽然历经几十年的发展，技术到装备的发展也趋于相对完善和成熟，但在实际生产中，带压堵漏技术依旧受限于许多实际的问题，例如堵漏工人所面对的一些压力容器目前仍是一种处于极端危险的作业环境，另外还有其他一些需要研究和克服的问题^[52]。总的来说，带温带压管道堵漏操作是一项危险性大、专业性强的任务。但无论是国内还是国外，带亚堵漏这项工艺在绝大多数情况下仍旧是由专业的堵漏工人来完成的，智能化和自动化程度低。目前也尚未有成熟的系统能够很好地针对各类管道泄漏场景自动化地完成管道带压堵漏工作，因此目前带温带压管道堵漏工作的智能化和自动化在国内外基本处于空白阶段。

1.2.3 特种机器人研究现状

特种机器人指的是应用于专业领域的机器人，能够用于辅助或者代替人类执行任务，一般是指除了工业机器人、公共服务机器人之外的机器人^[53]。特种机器人覆盖了相当多的行业，包括了农业机器人、建筑机器人、物流运输机器人、医疗辅助机器人、医用护理机器人、医用康复机器人、城市安防机器人、救援机器人、军用机器人、核工业机器人、矿业机器人、石油化工机器人、市政工程机器人和其他行业机器人^[54]。这一类的特种机器人相较于传统结构化环境下的工业机器人等，其控制、性能以及与环境交互的实现难度与复杂程度更高，对于特种机器人的研发设计与制造也提出了更高的要求^[55]。

特种机器人的工作环境相较于一般的机器人更为特殊，这些环境通常具备一定的危险性或者对机器人特定的属性具备一定的要求。按照根据特种机器人使用的空间（陆域、水域、空中、太空），可将特种机器人分为：地面机器人、地下机器人、水面机器人、水下机器人、空中机器人、空间机器人和其他机器人^[56]。以机器人运动方式来对特种机器人进行分类的话则分为：轮式机器人、蠕动式机器人、飞行式机器人、履带式机器人、潜游式机器人、固定式机器人、足式以及足轮式机器人、喷射式机器人、穿戴式机器人、复合式机器人和其他运动方式机器人^[57]。若按照特种机器人的功能分类，可分为括采掘、安装、检测、维护、维修、巡检、侦察、排爆、搜救、输送、诊断、治疗、康复、清洁等^[56]。

在整体机器人产业以及相关机器人技术的道路上，国内的起步相对较晚但发展速度很快^[58]，并且逐步推进特种机器人产业的发展，通过聚焦于更细化的领域技术研发与推进国内特种机器人的标准来引导特种机器人产业及相应的研究^[59]。例如在

2018 年制定发布的 GB/T 36321-2018《特种机器人 分类、符号、标志》^[60]、GB/T 36239-2018《特种机器人 术语》^[61]、以及在特种机器人的各个细分领域的各项标准^[62-74]。近几年随着特种机器人行业的发展，不难看出特种机器人标准的规范化制定也在逐步完善推进。并且从国内的特种机器人目前制定的标准中可以看出，所涉及行业领域包括了医用康复机器人、水下作业机器人、农业机器人、石油化工机器人等多个行业的特种机器人，而且主要是侧重在机器人的相关通用技术以及零部件标准^[75]。

与国外（如美国、韩国等）比较，国内所制定的特种机器人相关规范标准较晚，可以看出国内对于机器人的研究起步较晚，在技术方面落后于国外。在特种机器人这一行业领域中，无论是标准制定还是应用实施经验都亟待积累。另一方面，对于特种机器人标准体系研究也急需加大投入力度深入开展，规范化、系统化地进行标准的制定工作^[59]。

1.3 本文的主要研究内容

本课题来源于华能国际电力股份有限公司下华能海门电厂的应用技术落地项目“用于电厂动力管路在线作业的智能机器人”。在项目的具体技术要求中，需要完成带压堵漏机器人的开发，具备一定的远程控制功能，具备移动功能前往泄漏管道附近。机器人主要用于电厂内的现场热力管道的检修，对管道的检修能力应该至少满足管径范围 DN25-DN50 内的热力管道，管道的材料包括但不限于合金钢、锈等。机器人的性能应当满足热力管道检修任务要求的性能，其上应当搭载合适的传感器能够感知采集环境信息。

根据课题要求，本论文主要进行了以下几方面的研究与工作：

(1) 根据课题需求对项目中的管道修复的各项功能的实现方案进行设计，最终分别总结获得管道漏点的检测方案、管道漏点的定位方案和管道漏点的修复方案。根据上述三个方案的实现思路制定机器人总体的硬件需求和编程控制需求，最终总结得到项目的总体实现方案。

(2) 根据设计方案开展机器人整体的实现，包括机器人整体的硬件选型、结构设计、电路设计、气路设计、控制系统、通信系统以及各个系统之间的接线。同时完成了用于管道漏点检测、定位以及管道漏点修复的两个专用末端，利用控制板和继电器对机器人的电路和气路以及运动平台进行控制，利用网桥、交换机等设备建立通信系统，利用核心计算机等接收图像、压力传感器等数据信号，利用核心计算机发布控制指令到各个硬件进行控制。

(3) 对图像识别任务、管道漏点定位以及机械臂的运动规划与控制进行了编码实现并基于 ROS 部署完成。最终能够实现通过软件显示机器人的各类传感器信息，并且通过操作面板对机器人各个动作的节点进行启停控制，从而完成管道漏点检测、定位和修复操作。

(4) 进行了多项实验与试验，来测试机器人以及各部分机器人功能的可靠性。通过对管道修复的各项参数进行了讨论和研究以提升管道修复的质量，另外还进行了管道检测和定位实验来验证检测和定位的可靠性。最后将机器人进行实地的管道修复实验以证明了带压堵漏机器人的可行性与先进性。

1.4 论文章节安排

本文共包含七个章节，各个章节的具体内容如下：

第一章：绪论。在本章节主要介绍了课题的研究背景和意义，同时调研了管道漏点检测、定位和搜索的研究现状，并指出其研究的重难点所在。为以下各个章节打下基础。

第二章：方案设计。管道带压堵漏是一项复杂的任务，本章会介绍在这项任务中各个阶段的具体实现方案和技术手段，阐述该课题的具体实现思路。。

第三章：机器人框架介绍。本章会对带压堵漏机器人的具体实现框架以及其整体的功能和性能做详尽的介绍，以具体阐述机器人的设计原则。

第四章：图像识别。本章针对管道漏点的检测和定位问题，介绍了所使用的 YOLO 算法，并描述了利用深度学习来实现检测定位的过程。

第五章：控制框架。本章介绍了基于 ROS 搭建的机器人控制框架，用该框架实现所有的传感器和机器人的执行器的读取与控制。

第六章：实验说明。本章进行了不同的实验，验证了机器人在执行不同任务的可行性与可靠性，证明其先进性。

第七章：总结与展望。在该章节中，将会对全文的研究内容、研究方法以及实验结果进行总结，然后凝练出本文的主要工作和贡献点。最后再并对本文研究领域的未来工作和研究前景进行展望。

第2章 项目总体方案设计

2.1 项目中管道泄漏的定义及性质

管道是一种长距离运输各类介质的装置，一般用于运输气体、液体或者是带有固体颗粒的流体，多见于运输水、油、燃气、化学物品等，可以应用于给水、供暖、供煤气或燃气、运送天然气或者石油、水利工程、农业灌溉等等。管道的运输作用需要符合一定的条件，目前常见于利用压缩机、锅炉或者泵等增压装置对管道中的介质进行增压，驱使介质从管道中的高压处流向低压处，也可通过重力或者流体其自身的压力等特性实现运送。

管道按照工作状态下的压力可分为真空、超高压、高压和低压管道；根据工作状态下的温度可大致分为液体介质管道、气体介质管道和固体颗粒管道；按照材料则可分为非金属和金属管道；按照管道的部署位置可大致分为地上管道、地下管道和水下管道。

管道的泄漏从广义定义上包括管道内漏和管道外漏。内漏是指系统内部所运输的介质在隔离物体内发生的泄漏现象，一般从外部不易发现，管道中各类止流阀等阀门在关闭后存在的泄漏就属于内漏。而外漏是管路内部介质与管路外部介质在隔离物体上发生的泄漏现象。针对管道中运输的流体介质，管道泄漏分为负压泄漏和正压泄漏。前者是指外部流体介质经由隔离物体向受压体内部渗入的一种现象。正压泄漏是指流体介质经由隔离物体的内部向外部渗出的现象。本项目中针对的泄漏定义为：隔离物体上出现的渗出现象，属于正压泄漏，且严格局限在流体介质范围内^[76]。

管道在日常生活和工业生产中被广泛使用，而管道发生泄漏主要分为以下三个原因：

- (1) 在施工人员进行施工的过程中未遵循施工规范进行工作或者收到第三方的外力可能会造成对管道的破坏；
- (2) 许多管道虽然表面进行了防护层等防护处理，但其使用寿命仍旧是有限的，如果超期服役的管道没有被及时维护更换，则容易发生老化泄漏的情况；
- (3) 管道在正常使用的情况下仍旧会有可能会由于自然腐蚀或者电腐蚀造成管道泄漏^[77]。

2.2 管道漏点的检测方案设计

目前对于管道的泄露检测存在很多方案，这些方案大体可以分为不同的具体实现：

（1）直接检测：作为最常用的方法，直接检测是通过管道检测人员通过自身的感知（如视觉、听觉或者嗅觉等）来检测管道是否存在泄漏情况。而随着科技发展，管道检测人员也能够通过携带诸如红外线探测器或者气体检验装置来辅助进行管道泄漏检测^[78]。

（2）电缆检测：电缆检测的原理是利用管道泄漏出来的介质会于带有特殊检测性质的电缆发生反应从而能够检测到管道是否存在泄漏情况。还可以通过空气检测装置来分析管道附近的气体含量或浓度来检测管道泄漏，优点是效率高且设备检测准确度高，但缺点是成本较高^[79]。

（3）声波检测：声波检测的原理是检测发生泄漏的管道内外部会出现明显的压力差并形成成功产生声波的涡流，检测人员能够通过使用声波检测设备确定管道是否发生泄漏。该方法的准确性取决于被安装在管道上的声波传感器数量，因此该方法同样存在成本较高的缺点^[78]。

（4）压力检测：当管道发生泄漏时，管道内部压力就会降低，如果在管道内部部署一系列压力传感器对管道内压进行监测，通过不同部位的压力变化进行分析能够检测到管道是否泄漏^[77]。

（5）腐蚀检测：检测人员通过管道的腐蚀情况并结合管道周围的工作环境和使用寿命来预估判断管道是否发生了泄漏^[79]。

在本课题中，主要是针对运输带有一定压力的水的管道进行泄漏检测，该类管道在充足光照的环境中发生泄漏时，水会从泄漏的位置喷射而出并形成水柱，这种情况可以通过摄像机直接观察得到。

随着深度学习的发展^[80, 81]，目前通过图像视觉的方法对带有特征的目标进行检测的准确度和稳定性也足够满足项目中对于泄漏管道的漏点进行检测^[82, 83]；另一方面，深度学习对于抗环境干扰（包括光照、角度等）的鲁棒性也显著提高；同时，单纯使用摄像头采集图像视频流来作为传感输入也相较于使用其他传感器的成本更低，方案更易实现，并且不需要大范围部署传感器^[84]。因此针对管道漏点的检测任务中选择使用深度学习来检测管道漏点。

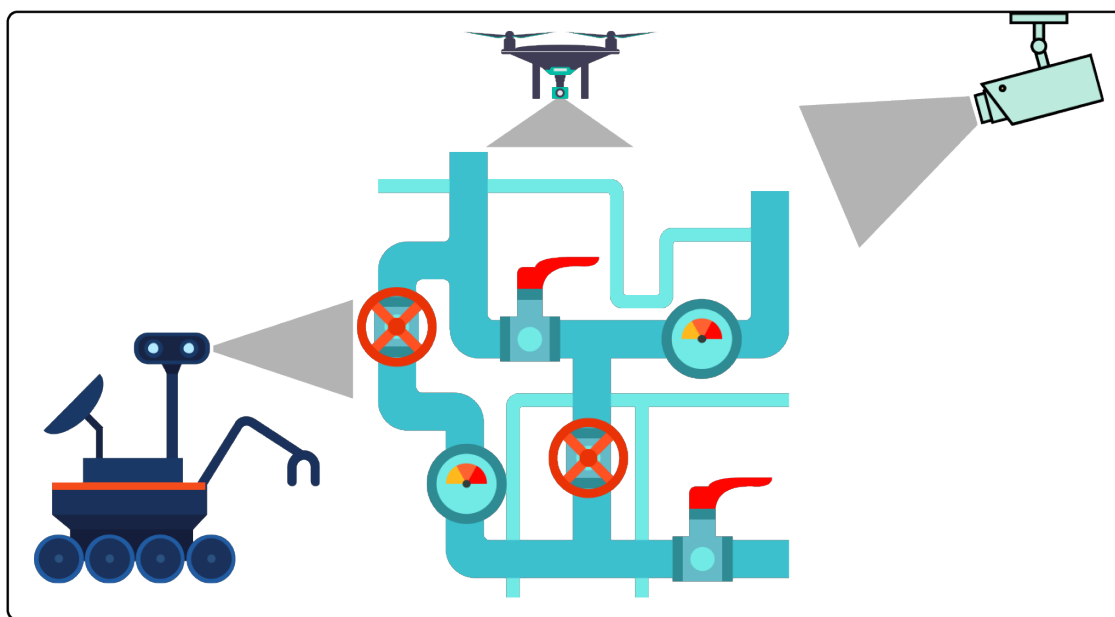


图 2-1 使用摄像头等传感器检测水管泄漏情况

如图 2-1 使用摄像头等传感器检测水管泄漏情况所示，在管道漏点检测方案中，我们将使用摄像头作为传感器，通过摄像头采集图像视频流信息，并通过深度学习来分析和检测管道是否存在漏点。

2.3 管道漏点的定位方案设计

目前针对管道泄漏问题的泄漏点定位主要分为两个方面，一方面是对大范围区域的管道网进行泄漏监测同时对泄漏的大致方位确定，另一方面是对基于管道的泄漏检测结果精确定位管道的泄漏点。前者在管道泄漏检测方法中，一部分方法也能够对管道的泄漏位置大致地进行定位。其中，声波检测和压力检测等方法都能够帮助检测人员将管道的泄漏位置定位在某一个范围区间，并且对漏点判断的准确率也十分可观，但仍旧无法高精度地对管道漏点的具体位置进行定位。在本项目中，管道漏点的检测和定位是为漏点的修复而服务的，为了尽可能地提高管道修复任务的自动化程度，就必须尽可能地提高漏点定位的精确度。如果漏点定位的精度不满足项目的需求，不仅会导致管道漏点无法被修复，还可能对管道造成二次破坏。在管道漏点的检测任务中，检测方案是通过将摄像头部署在管道上方，通过摄像头采集图像视频流信息，并通过深度学习来分析和检测管道是否存在漏点；另一方面，带有三维信息的摄像头，可以通过其三维信息构建管道和漏点的三维模型，对管道和漏点进行精确的定位。除此之外，目前消费级别的双目摄像头在三维信息重建的

精度上受限于环境因素，相较于仅有 2mm 以下的管道漏点仍需提升精度。因此我们设计了带有压力传感信号的定位末端用于更精确地定位管道漏点的位置。

因此我们对于管道漏点定位方案是通过采用双目摄像头来收集环境中管道的三维信息。其中，普通的 RGB 图像可以构建环境的二维信息，而深度信息来自于双目摄像头中的像素对准来生成，通过整合 RGB 图像和深度信息，就能够获得管道环境的三维点云。根据三维点云信息，利用带有压力传感信号的定位末端来精确地定位管道漏点，提高管道漏点的精度和准确性，提升管道漏点定位的效率。

2.4 管道漏点的修复方案设计

各类管道堵漏方法从原理上可分为了焊接堵漏、粘接堵漏、机械堵漏、注剂式带压堵漏。机械堵漏主要包括了顶压堵漏、捆扎堵漏、堵塞堵漏、捻打堵漏、卡箍堵漏、压盖堵漏等^[85]；焊接堵漏主要包括了尖平铲挤压、锤击焊接法、引导流、加阀门焊接法、钉子补丁螺母焊法、套管焊接法等^[86]。在各类管道堵漏方法中，机械堵漏方式相较于其他堵漏方法在原理上更加直观简单，所采用的管道堵漏设备也对管道泄漏环境要求更低，因此我们采用了机械堵漏这种堵漏方法。参照项目中管道漏点的具体情况，当管道出现砂眼小孔这一类管道泄漏情况时，捻打堵漏这类工艺更加适用。考虑到各类管道材料的硬度和强度，当管道材料采用碳素钢、合金钢以及碳素钢焊缝等硬度更低材料时，捻打堵漏会更加适用。同时也需要考虑管道外壁的厚度，当管壁厚度大于 5mm 时，才适用于捻打堵漏；当管壁厚度变薄至 3mm 时，使用该工艺的效果会下降，还可能造成更糟糕的情况^[87]。而针对机械堵漏的各类堵漏工艺，捻打堵漏这种方式所使用工具的体积和重量更小，需要的驱动能源也更易获得^[88]。

高频捻打堵漏技术是用高频捻打气锤对管道漏点进行修复的一种技术，捻打工具一般由空压机（气泵）、输气管、快速连接更换头、捻打气锤（捻打枪）、铲组合而成。枪头一般采用平头型设计或钝头型设计，捻打气锤可使用高压空气为驱动能源，通过高压气推动捻打气锤内部的气动活塞高速沿轴线往返运动，带动气锤枪头高频冲击。但捻打气锤的枪头并不是直接捻打管道漏点的位置，而是捻打推移漏点附近的位置。其原理是通过推移管道漏点附近的材料，使其堆积到管道漏点上，将管道的漏点进行覆盖堵塞，最终达到修复管道泄漏的目的。

在电厂中，基于捻打堵漏方法对管道漏点修复，具有以下优点：1）适用于大部分场景下的高压设备的漏点堵漏，泛用性高；2）修复工具重量和体积更小，方便携带；3）在修复过程中不会产生对人体有害的气体，更加安全；4）且相比于粘捻法

和塞捻法，该方法无需引入其他材料，而是使用原材料来修复管道漏点，节省了物料，因此不需要额外携带耗材。采用捻打堵漏对管道漏点进行修复，能有效地提升电厂企业的劳动生产率、经济性以及系统的供电稳定性^[89]。

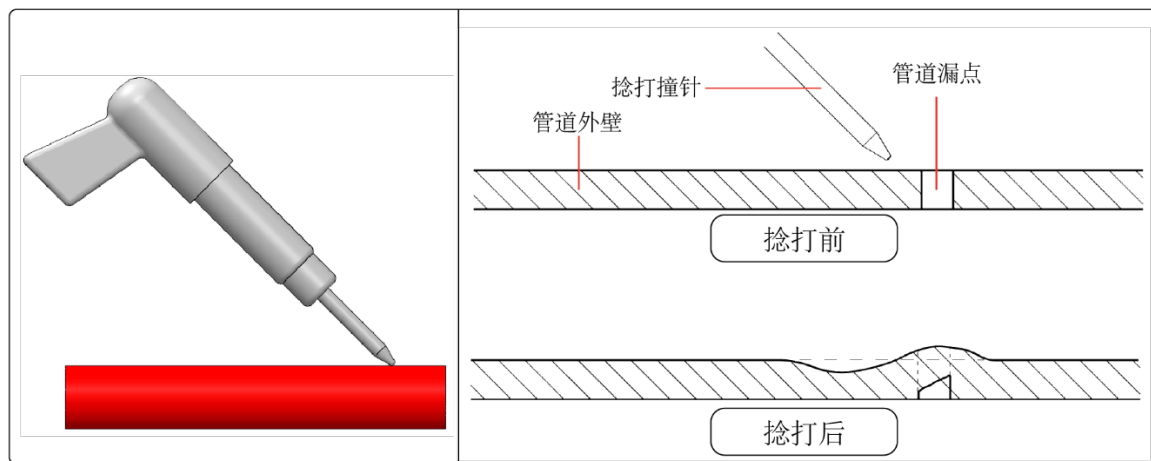


图 2-2 捻打枪和捻打堵漏原理图

2.5 项目总体方案设计

根据上述对于管道漏点的检测、定位和修复方案，需要采用双目摄像头作为传感器来采集图像视频流信息，从而检测管道是否发生了泄漏；同时利用带有压力传感信号的定位末端结合带有深度信息的图像视频流信息精确定位管道的漏点。最后针对于管道漏点的修复方案，则需要使用专用的修复末端对管道进行修复。

首先，为了能够将定位末端去探测管道漏点的位置与将捻打工具运送到管道漏点的修复位置上，可考虑采用将末端固连在机械臂上，由机械臂来操作定位末端和修复末端进行管道修复任务。同时，双目摄像头也可以固连在定位末端，由机械臂来移动视角以对管道环境进行更加直观的观测。而捻打工具需要高压气源来进行驱动，因此需要有空压机来产生高压气体。机械臂的驱动与图像视频流的计算分析需要一定的算力，因此需要有核心计算机来完成这部分的工作。另外还需要有一套移动平台和电源来保证机械臂的灵活性和能源供给。因此大体的硬件需求依赖如图 2-3 所示。

针对整一套硬件的控制需求，首先需要图像的检测和定位算法来实现管道漏点的检测和定位，其次对于机械臂的控制和路径规划也需要相应的算法，空压机、气阀和移动平台的控制可利用继电器和驱动板来实现，并且根据项目需要，远程通信控制方案也包括在内，整体的硬件控制依赖如图 2-4 所示。

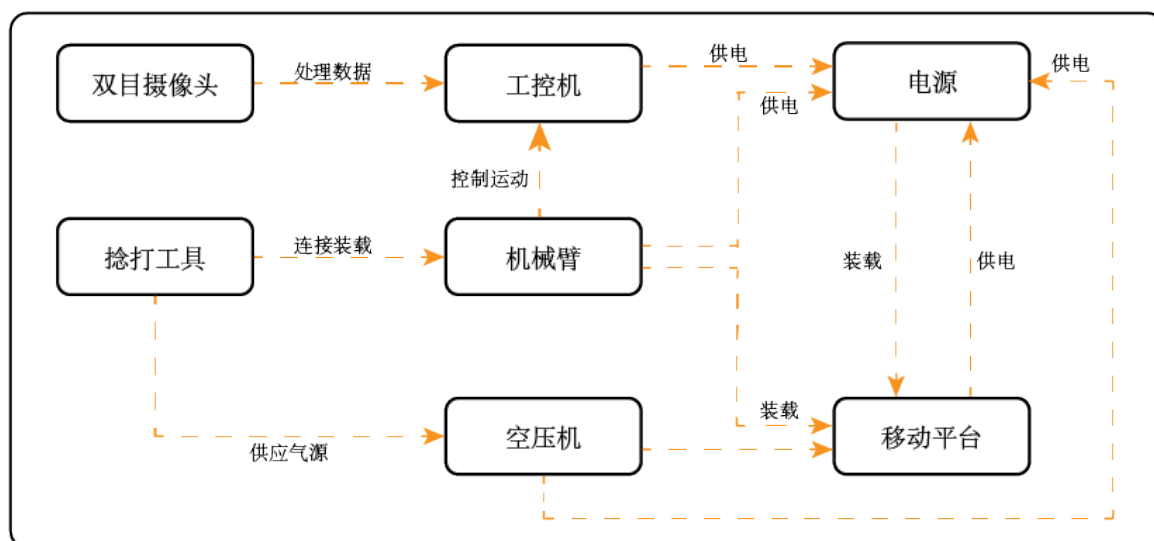


图 2-3 硬件需求依赖关系

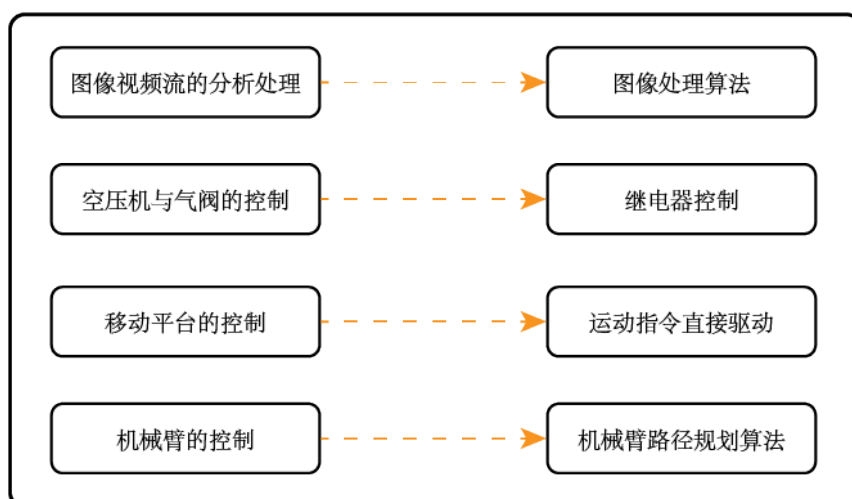


图 2-4 硬件控制依赖关系图

根据以上硬件依赖，我们设计了一台管道堵漏机器人用于执行管道的漏点检测、定位和修复任务，同时根据项目需求，我们通过搭载红外摄像云台以拓展了机器人巡检能力。因此最终设计了一台兼备移动能力、操作能力、感知能力，带有稳定能源的机器人。

2.6 本章小结

本章基于项目的具体任务分析了管道泄漏的定义和性质，并针对管道检测、定位和修复三个任务的各类具体实现方法进行了对比和分析，阐述了三个任务的方案

制定思路。其次，对项目中针对管道泄漏的检测，定位和修复的具体实现方法进行详细的介绍，明确了三个任务的具体实施方案，并基于硬件需求依赖和硬件控制依赖初步制定了相应的硬件和软件实现框架。后续会根据以上三个任务的实现方案和硬件、软件的实现框架指定详细的实现思路。

第3章 管道检测、定位与修复的总体实现框架

3.1 带压堵漏机器人总体设计框架

根据第二章中对于管道漏点的检测、定位和修复方案以及总体方案的实现思路，对带压堵漏机器人的总体框架进行详细设计。机器人由 6-DOF 机械臂、定位末端和修复末端、双目摄像头等传感器、移动平台、核心计算机、电源和空压机等组成，图 3-1 为机器人的框架图。

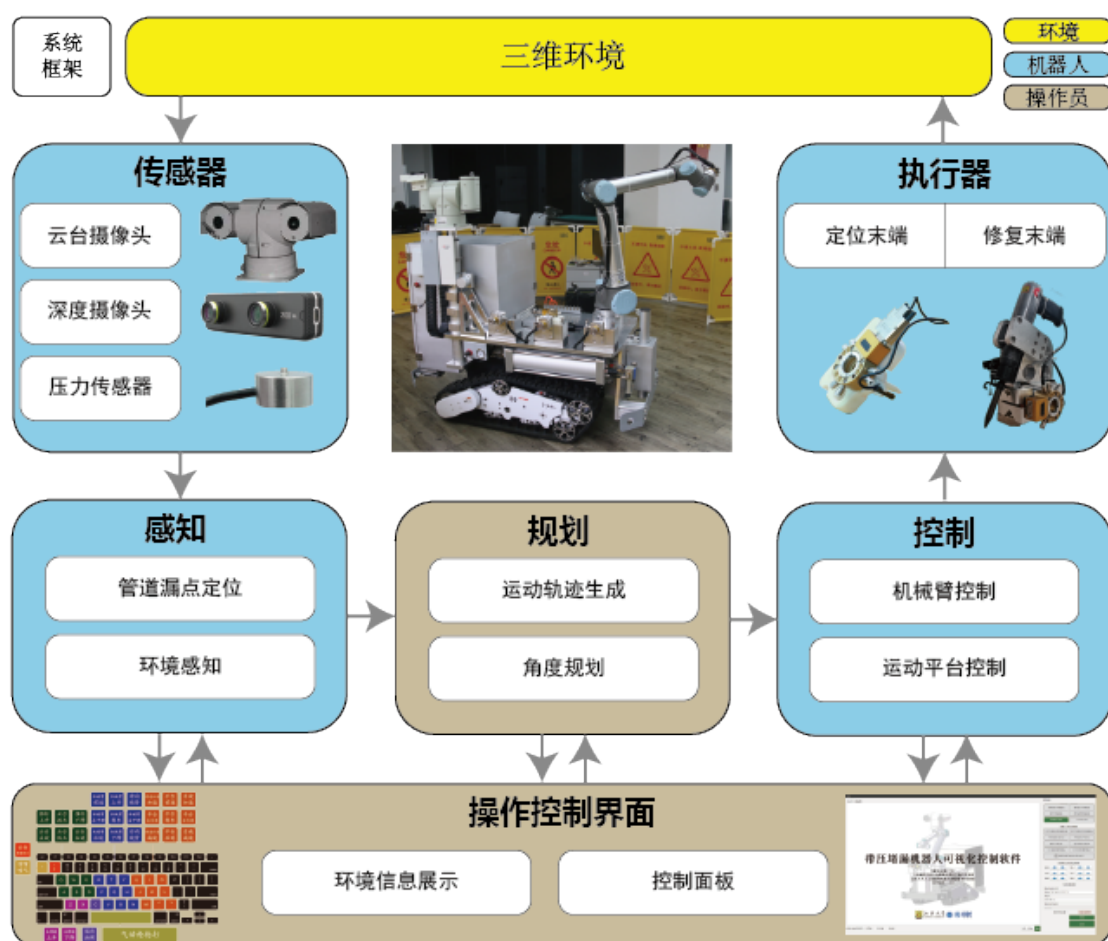


图 3-1 机器人总体框架结构说明

在这套机器人的设计框架中，红外摄像云台用于感知环境，能够对具有明显温度差异的环境进行观测，云台具备的升降能力、60° 俯仰角调整和 360° 偏航角调

整提升了机器人的环境感知能力。机械臂是具有一定负载能力的六自由度机械臂，能够满足定位末端和修复末端的负载需求和精确运动需求。机械臂的定位末端和修复末端分别用于准确定位管道漏点和执行管道漏点修复工作。为了保证两个机械臂的末端高效工作，在末端的设计上配置了快速更换的结构，使得机械臂能够根据任务需求更换末端执行器。另外，机器人整体的控制可通过远程遥感操纵，为此配置了一系列远程通信硬件和软件。

3.2 定位末端的设计

定位末端指的是用于管道漏点定位的机械臂末端执行器，在本文第二章的管道漏点的修复方案概述中，拟采用双目摄像头和压力传感器作为主要部件设计定位末端，定位末端的三维模型图如所示，定位末端主要由双目摄像头，定位探针，压力传感器、主体支架和支架盖板组成。定位末端的半剖图如图 3-2 所示。

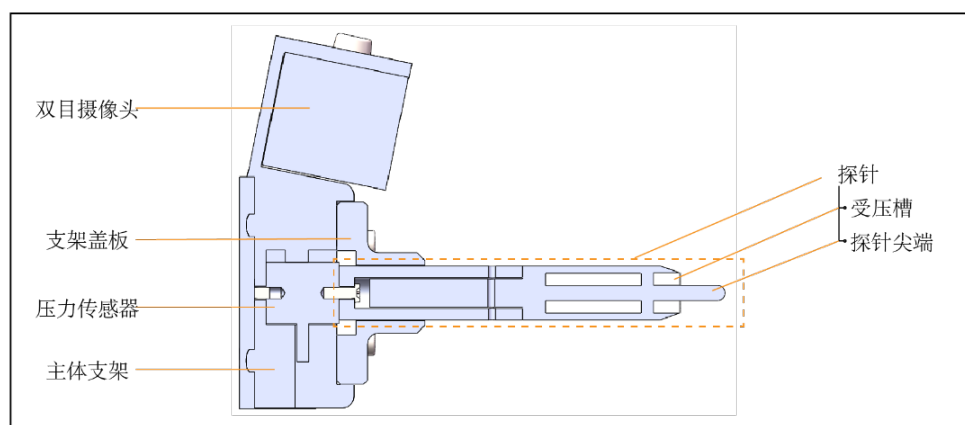


图 3-2 定位末端剖面图

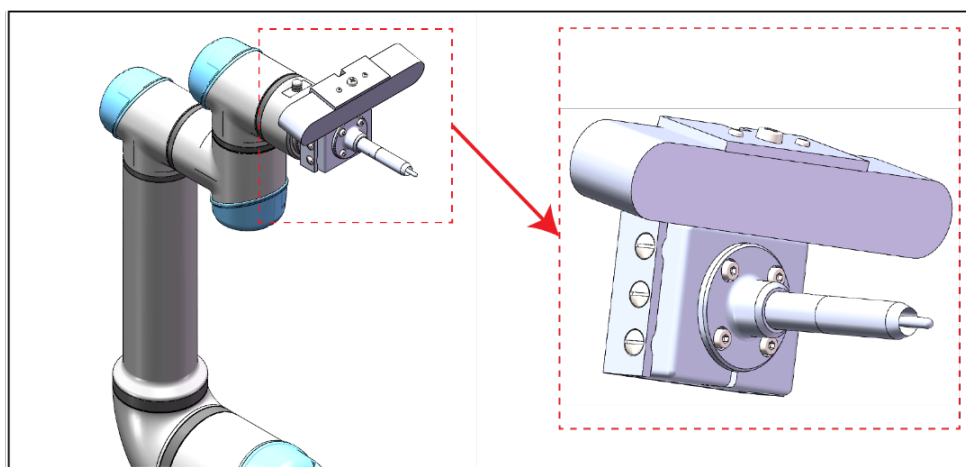


图 3-3 定位末端三维图

压力传感器位于主体支架内部，定位探针位于末端前部，通过螺栓与压力传感器连接，能够将探针所受到的压力和拉力传递到压力传感器上，压力传感器能够将所受到的压力转换为电信号进行输出。在探针的前端进行了受压槽的设计，能够更加稳定高效地感应和放大水柱地水压信号。当压力传感器分别为空载、接触管道表面、接触水柱以及接触管道漏点时，其压力转换电信号的负载曲线是不同的。通过对电信号的曲线进行记录并分析，结合漏点识别，即能够对定位末端的与管道漏点之间的相对位置关系进行判断。

3.3 修复末端的设计

在本文第二章的管道漏点的修复方案概述中，通过对项目拟定的管道修复任务分析以及对管道产生漏点的原因、漏点的大小和管道的材料进行了综合考虑，拟采用采用捻打堵漏对管道漏点进行修复，能有效地提升电厂企业的劳动生产率、经济性以及系统的供电稳定性^[89]。捻打堵漏是利用管道金属材料的塑性（物体变形的能力），通过外力对管道漏点周围的金属材料施加一定的外力，推移管道周围的材料覆盖到漏点上，对管道的漏点进行堵漏的工艺^[90]。通常是利用高频的捻打气锤等工具对泄漏管道表面材料做捻打处理。在进行修复末端的设计，是主要围绕捻打工具进行设计的。

在对修复末端进行设计的问题上，主要考虑三个设计要点：

(1) 使用捻打工艺对漏点进行修复的过程中，捻打工具与管道之间是存在相互作用力，因此需要克服它们之间的相互作用力，保证捻打工具始终不会因为相互作用力导致工具和管道之间的相对位置发生偏移，以确保捻打位置的准确性；

(2) 捻打工具的捻打工艺是通过管道表面的进行击打，击打的深度取决于管道的管径，因此在设计的时候要考虑对不同管道管径的适应性；

(3) 由于管道环境的复杂性，需要尽可能对捻打工具的质量和体积优化设计，做到轻量化和小型化。

根据以上三个设计要点，对修复末端进行了模块化的设计，如图 3-4 所示。修复末端分为捻打模块、紧固模块和快换模块。

捻打模块的主体是捻打气锤气锤固定板和角度调节板，气锤固定板通过 V 型结构来固定捻打气锤，保证捻打气锤跟捻打模块的牢固连接。另外，通过调整捻打气锤与固定板之间沿捻打气锤的相对轴向位置，可以调整捻打时对管道击打的深度。捻打气锤作为捻打末端中最核心的工具，由气缸、捻打撞针、牵引弹簧等组成，如图 3-5 所示。在捻打气锤正常工作过程中，高压气体会推动气缸中的活塞高频往复

运动，推动捻打撞针高频撞击。在图中，角度调节板可以对捻打气锤捻打管道的角度进行调节，以适应不同泄漏情况的管道漏点。

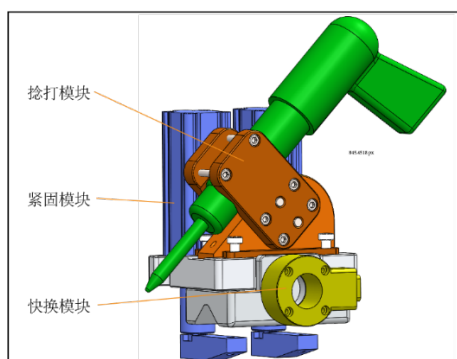


图 3-4 修复末端三维结构图



图 3-5 捻打气锤示意图

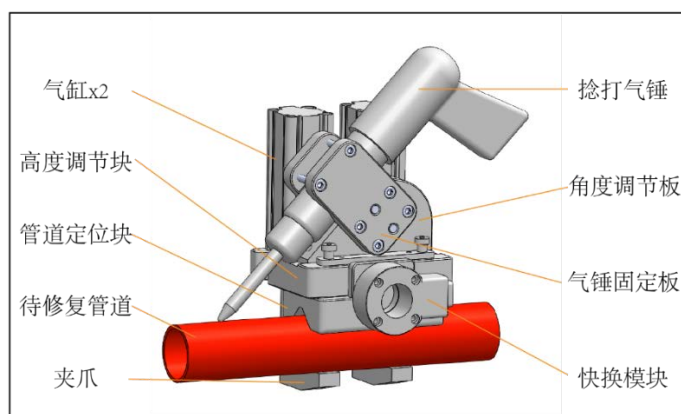


图 3-6 修复末端组件说明图

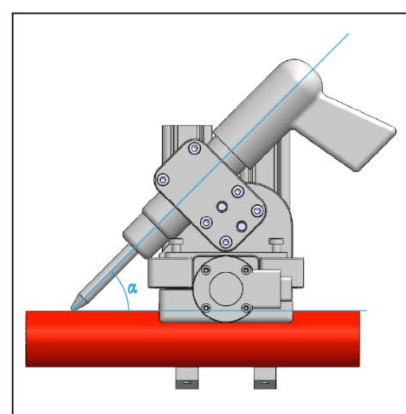


图 3-7 捻打角度示意图

紧固模块是为了克服捻打过程中管道和捻打工具之间的相互作用力，保证捻打工具和管道之间的相对位置不会发生偏移从而确保捻打位置的准确性。由于捻打气锤是用高压气体作为能源来驱动的，因此在紧固模块中同样采用了高压气体作为能源。紧固模块包含气缸、夹爪、管道定位块和高度调节块，空压机通过压缩空气并经过气缸来为夹爪提供动力源，可使夹爪完成向下伸展或向上夹持的动作。由于管道定位块为 V 型块设计，末端执行器需要从上往下运动来对管道进行定位，普通的气缸在打开时，夹爪是直线运动的，因此在末端执行器上往下运动过程中会碰撞到管道，因此我们采用了 90°回转气缸，能够在打开的同时向外侧进行 90°旋转。相较于普通的直行运动气动活塞，回转气缸的活塞杆上具有的运动槽，能够使得气动活塞在受压直线运动的同时发生旋转，如图 3-8。另外，管道定位块与角度调节板之间利用了压缩弹簧来适应不同管径大小的管道，使得捻打末端在夹紧管道时，捻打气锤的捻打撞针能够刚好接触到管道外壁，从而使得应对不同的管道都能够保持相

近的捻打深度，如图 3-9 所示。

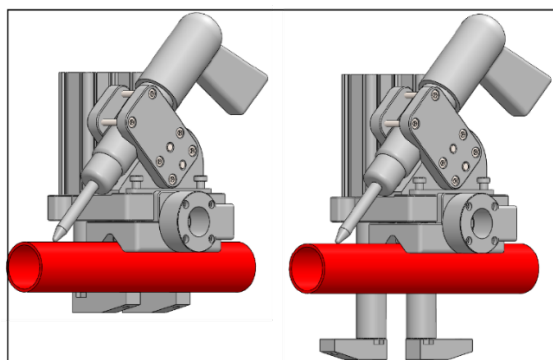


图 3-8 修复末端夹爪旋转示意图

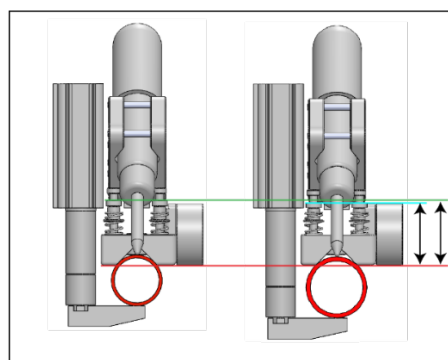


图 3-9 修复末端高度自动适应示意图

3.4 机器人的硬件控制

在机器人的实现中，需要通过控制指令和控制信号对机器人的硬件进行控制。在整个机器人的设计中，主要有以下主要部件需要对其进行控制：机器人移动平台、机械臂、电路开关、气路阀门控制。

针对机器人移动平台，其运动主要是通过两个电机产生的正反转运动来带动履带完成前进和后退的运动，履带移动平台的自旋动作是通过两个电机不同的旋转方向或旋转速度产生的差速来实现的，而电机的控制是通过脉冲宽度调制技术（Pulse width modulation, PWM）来实现控制电机的正转反转以及停止。因此我们利用了一块 Arduino 控制板来输出实时的 PWM 输出到无刷伺服驱动板上，最终实现对履带平台的平滑稳定控制，如图 3-10 所示。

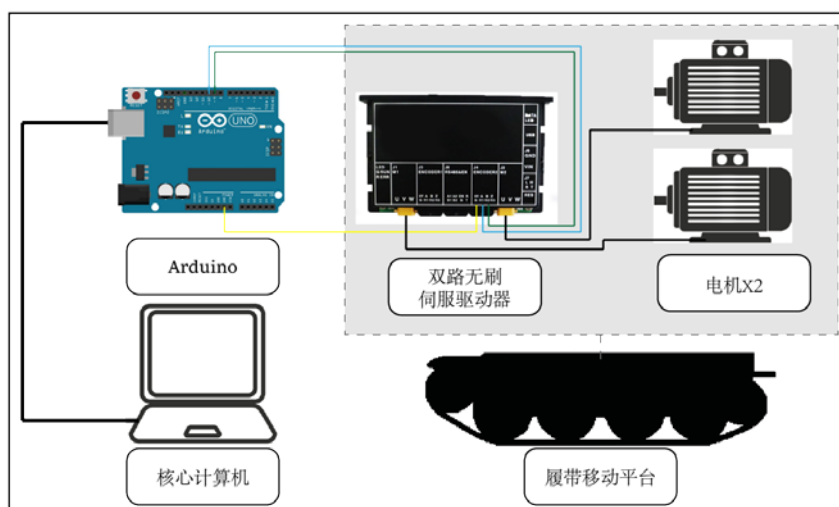


图 3-10 履带移动平台控制接线示意图

针对机械臂的实时高精度控制，采用了 Moveit!来实现对 UR10 机械臂的路径轨迹规划和控制。其流程大致如下：1)获得机械臂的初始位置（包括各个关节电机的旋转角度），并将该机械臂末端的初始位置列入机械臂路径规划的起点；2)将机械臂末端的运动目标点列入机械臂路径规划的列表中；3)根据机械臂逆运动学对列表中的机械臂末端位置进行解算，求得各个关节的旋转角度可行解；4)根据求得的可行解，利用运动规划器的运动规划请求进行路径插值路点，并发布控制指令去执行这一系列路点的运动，使得机械臂按照规划的轨迹运动。

针对各类电路开关和气阀控制，通过 16 路继电器来实现精确控制，核心计算机通过 RS232 接口与继电器连接，通过发送 16 位二进制状态控制码来对继电器各个输出 OUT 口进行控制，能够实现对捻打气锤、末端固定架、快速更换模块、捻打末端夹爪、云台摄像头升降、支撑柱升降、信号灯和空气压缩机的控制，如图 3-11 所示。

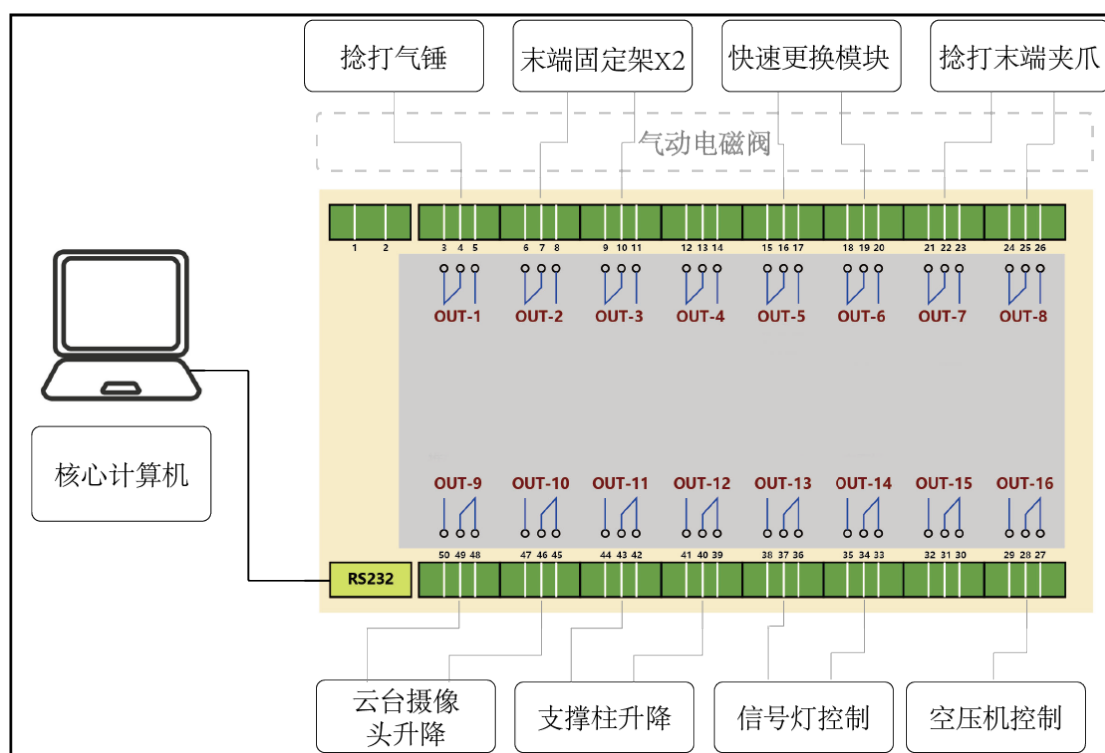


图 3-11 继电器控制板接线原理图

在数据信息交互和内部通信方面的配置和设计如图 3-12 所示，由于信息交互的设备较多，因此配置了交换机和无线网桥。云台摄像头、无线网桥、机械臂和核心计算机接入同一个交换机因此能够处于同一局域网下，通过硬件地址（MAC）绑定 ip 地址后，核心计算机就能够在局域网中发现这些设备并通过 ip 地址对各类数据信息进行交互和处理。另外核心计算机与十六路继电器、双目摄像头和 Arduino 控制

板直接连接，同样能够直接与上述硬件直接进行交互处理。

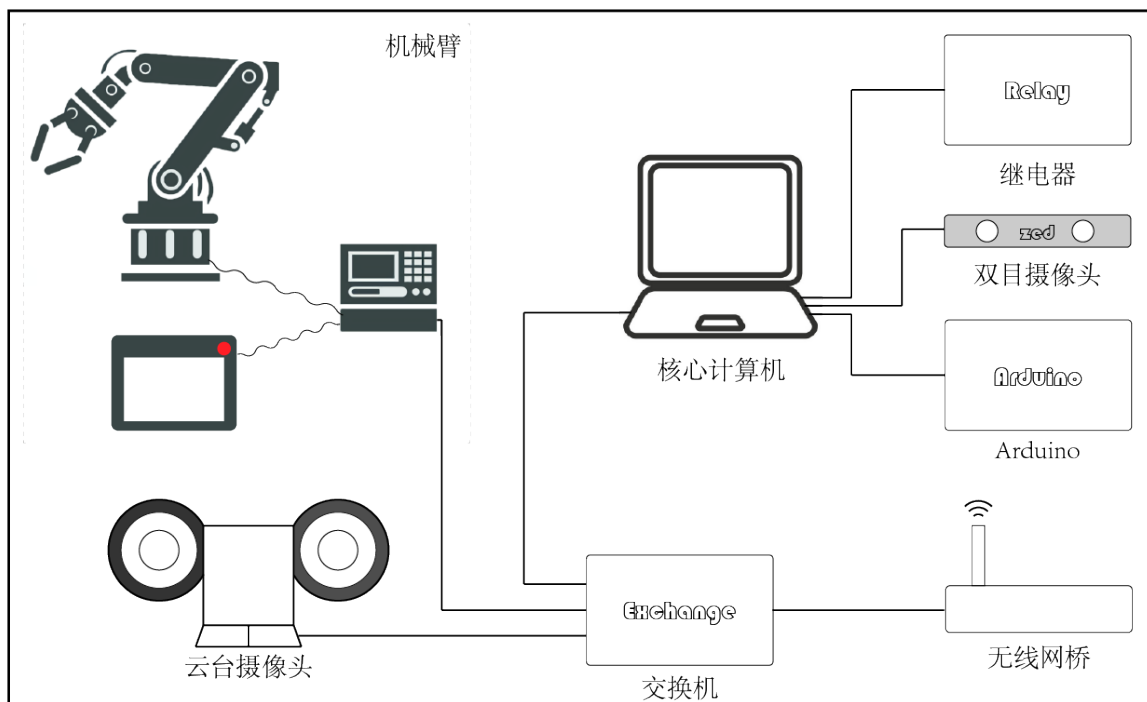


图 3-12 交互和通信控制示意图

3.5 机器人的软件界面

为了更直观地观测机器人执行工作的情况和更高效地控制机器人，我们设计了一套辅助配合机器人工作的机器人控制软件系统。这套系统的设计主要分为远程操作界面和机器人控制按键两个部分。其中，远程操作界面被设计用于帮助操作人员进行个性化的人机交互，操作人员不仅能够通过操作界面直观地观察机器人周围的环境和机器人执行任务的情况，还能够对操作人员对机器人的控制进行一定的限制，避免操作人员误操作；而机器人控制按键能够使得操作人员高效地利用物理按键向机器人发出控制指令。这两个部分相辅相成。

如图 3-13 所示，远程操作软件基于 ROS 和 QT 进行开发^[76]，其界面主要分为两个部分。界面的左侧能够直观的对摄像头的图像视频流进行展示，操作人员能够清晰地观察机器人的工作情况。左侧下方可以控制机器人的状态提示灯以对周围人员进行警示作用。在右侧分别为机器人的姿态切换面板、机器人控制面板和机械臂控制面板。在机器人执行管道修复任务的过程中，操作人员会根据机器人的工作状态和界面的按钮提示来控制机器人执行管道修复任务。而当机器人在捻打管道漏点以

修复管道的步骤中，操作人员可以通过机械臂关节单独控制面板来微调机械臂的姿态，用人的管道堵漏经验帮助机器人更高效更优地执行管道修复任务。

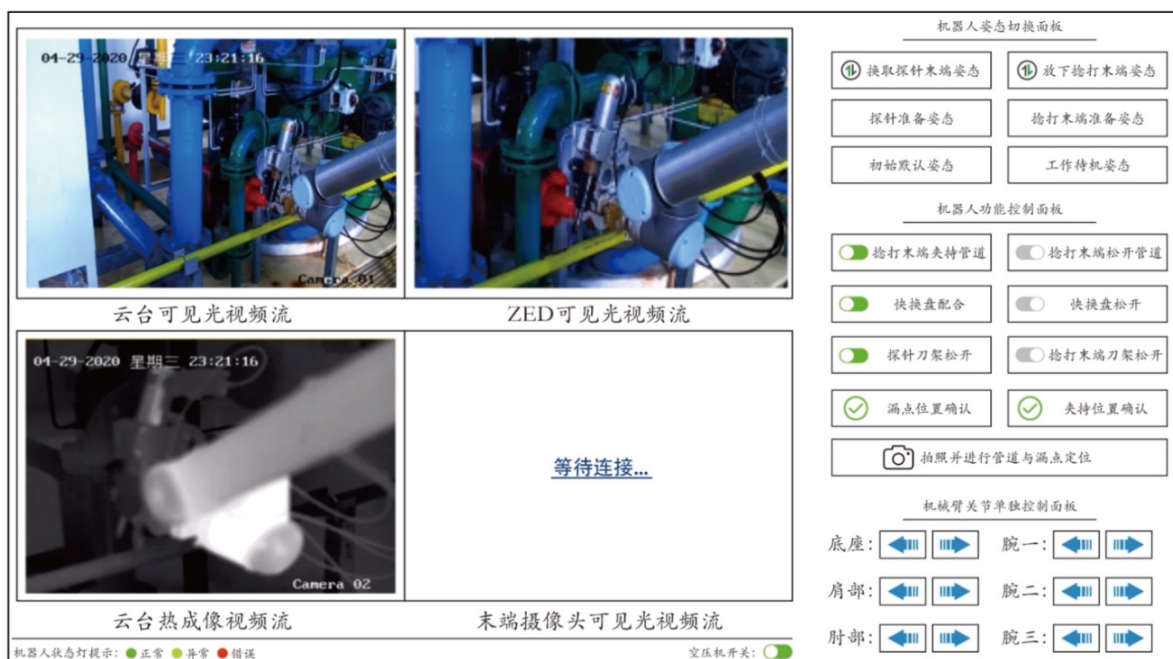


图 3-13 远程操作界面

图 3-14 为机器人控制按键示意图。主体键盘控制主要分为云台控制、支撑柱控制、机械臂控制、移动平台控制和捻打控制。机器人按键是作为远程操作界面的控制补充，能够提高熟练远程操作人员的控制效率，并且开放了更多的权限供操作人员对机器人进行控制。



图 3-14 键盘控制示意图

3.6 本章小结

本章基于第二章介绍的总体设计方案，大致地讲述了机器人总体的设计框架，包括机器人各个部分的组成和各个模块的作用，并着重详细地阐述了两个机械臂末端地设计思路和实现方案。另一方面，详细地介绍了各类硬件的基本控制思路，我们还专门设计了一套远程操作软件和键盘控制程序来实现对各类硬件进行控制以配合机器人顺利完成管道修复任务。

第4章 图像识别和定位的具体实现

4.1 图像识别任务分析

在第二章中，通过对目前各类管道漏点检测定位技术方法进行调研和深入探讨，最终选择了使用深度学习来进行管道漏点的检测。在利用深度学习来对管道漏点进行检测并定位的任务，属于深度学习中的目标检测问题。目标检测是计算机视觉研究领域的核心问题之一，其目的从图像中找出所有感兴趣的目标，确定这些目标的类别和位置。传统的目标检测方法由区域选择、特征提取和分类器分类 3 个步骤组成^[91]。这一类方法由于存在时间复杂度高、区域选择策略针对性差、手工设计的特征鲁棒性较差等特点，使得检测效果不理想。自深度学习应用于目标检测之后，目标检测技术的检测效果取得了显著突破，截至目前为止最主流的 2 个方向是以 R-CNN(Region-based Convolutional Neural Network)系列^[92-94]为代表的基于候选框(Region Proposal)的两阶段(two-stage)深度学习目标检测算法和以 YOLO(You Only Look Once)^[95-97]、SSD(Single Shot MultiBox Detector)系列^[98]为代表的基于回归方法的单阶段(one-stage)深度学习目标检测算法。基于深度学习的目标检测广泛应用于人脸识别、行人检测、交通标识检测、视频流实时目标检测、车辆检测和医学影像识别等领域。

小目标检测^[99-101]的定义主要有两种：第一种是绝对小物体，在 COCO 数据集^[102]中指明当目标的像素点小于 32×32 时，此物体可看作为小物体；第二种是相对小物体，当目标尺寸小于原始图片尺寸一定比例时即可认为该目标为相对小物体，如行人数据集 CityPerson^[103]中，原始图像尺寸为 2048×1024 像素，小目标被定义为高度小于 75 像素的物体。而在我们自己制作的管道漏点泄漏数据集中，我们使用了 Zed mini 摄像头采集得到的原始图像的像素大小为 2207×1242 ，而图像中的漏点大小是小于 20×20 像素的。因此无论是上述哪种小目标检测的定义中，管道漏点检测的任务是严格属于深度学习中的小目标检测的范畴。

当前的小目标检测也面临一些难题，这是由于小目标的覆盖区域小，其分辨率低，图像模糊，携带的信息少，位置缺乏多样性，特征（亮度、边缘信息等）比较浅，表达能力弱。因此在使用各类检测方法对小目标进行检测时都难以达到检测大目标同样的精度^[104]。

针对管道漏点检测任务，我们所设计的管道漏点检测和定位方案为机械臂搭载带有双目摄像头的定位末端在环境中运动，以此对管道漏点完成检测和定位。因此，该任务对目标识别算法有一定的延迟要求，即要求在输入原始图像像素大小在 1080p 或者 720p 时的处理速度要满足机械臂的运动时延要求，以避免机械臂由于算法处理时间的延迟导致运动准确性降低的情况。在目前主流的 anchor-based 目标检测方法中，two-stage 目标检测算法相较于 one-stage 目标检测算法在检测准确率和定位精确的上更有优势，但 one-stage 目标检测算法的检测速度更快。在 one-stage 目标检测算法中，目前比较受认可的包括 YOLO 系列和 SSD 系列的目标检测算法，也有很多学者在这两类算法的基础上针对特定场景进行优化。在管道漏点检测这一场景中，由于 SSD 采用了多层级特征分类，使得末尾的卷积层的感受野比较大，这会导致小目标的特征较为模糊，不利于小目标的检测^[91]，因此 YOLO 这一类算法会更加适合管道漏点检测这一任务。

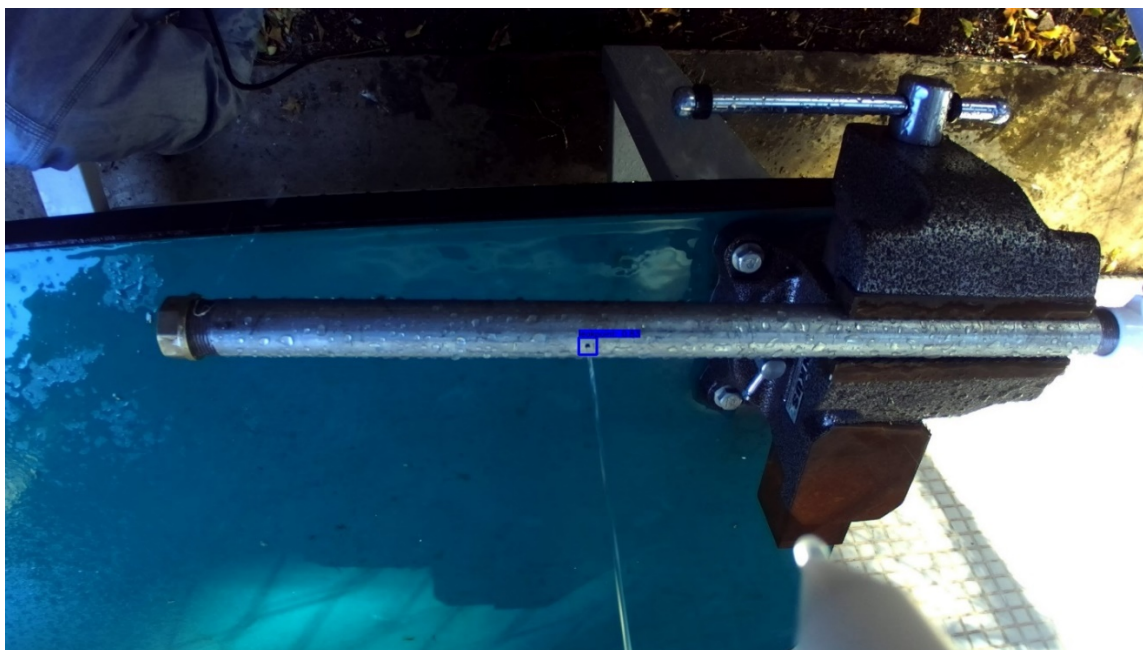


图 4-1 管道漏点检测示意图

4.2 YOLO

4.2.1 YOLO 算法简介

YOLO 是 2015 年由 Redmon 等人提出的继承 OverFeat 的目标检测算法。为了简化网络结构，YOLO 去掉了提取候选框分支(Proposal 阶段),用了一个无分支卷积网络

来提取特征、回归候选框和分类，并直接预测各个网格的边框坐标及所有类别的置信度。YOLO 的检测速度比 Faster R-CNN 提高了 10 倍，使得基于深度学习的目标检测满足了实时性的要求^[91]。但由于 YOLO 只分析最后 7*7 pixel 的特征图谱，导致对于小目标的检测质量不佳并且难以区分多个目标在同一网格单元的情况。

在 2017 年，Redmon 等人对 YOLO 的网络结构进行了改进，提出了 YOLO v2。YOLO v2 用了 Darknet-19 作为特征提取网络，并添加批标准化（Batch Normalization）进行预处理。针对 YOLO 对于小目标检测质量不佳的情况，YOLO v2 增加了候选框的预测并用强约束定位方法提高算法的召回率，同时融合了图像细粒度特征让浅层和深层的特征相结合以更好的检测小目标。除此以外，YOLO v2 还借鉴了 Fast R-CNN 的 anchor 机制，采用了 K 均值聚类算法(K-Means)来聚类计算训练集，而为了使得模型更加稳定，对网格单元采取了预测其相对坐标的方法再用逻辑函数对 ground truth 进行归一化处理。

2018 年 YOLO v3 被提出。YOLO v3 使用了 YOLO v2 的 Darknet-53 的网络并结合了 FPN(Feature Pyramid Networks for Object Detection)的网络结构，再由卷积网络得出预测结果。这样的改进使得 YOLO v3 在获得与 SSD 相当的精确度下却能达到 22.2ms/张的速度，在 COCO test-dev 数据集上将 IoU 的阈值设为 0.5 时 mAP 值达到 33.0%,与 Retinanet 的结果相近，速度快了 4 倍。但整体模型变得更加复杂，与速度和精度相互制衡。

4.2.2 YOLO v3 的网络结构

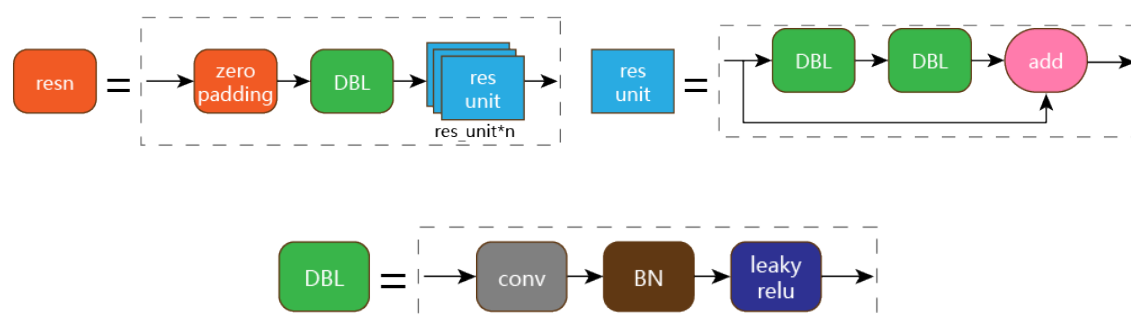


图 4-2 网络基本组件

YOLO v3 的网络结构主要借鉴了 Darknet-53 的网络结构，但是去掉了最后的全连接层。在 YOLO v3 的网络结构中主要包含了 DBL(Darknetconv2d_BN_Leaky)、resn(resblock_body)、res_unit 和 concat 等基本组件。如图 4-2 所示，DBL 基本组件为经过卷积操作、BN(Batch Normalization)和 leaky relu 激活函数；而 res_units 是

YOLO 借鉴了 ResNet 网络的参加结构的组件,使得网络的深度更高以提取更加复杂的特征,包含了两个 DBL 和一个 add; resn 中的 n 代表数字,指的是 resn 中含有 n 个 res_unit,在经过 resn 时,会先进行 zero padding (零填充)操作,接着经过 DBL 和 n 个 res_unit; concat 是指张量拼接,即将 darknet 中间层和 darknet 后面的某一层通过上采样之后再进行拼接,扩充张量的维度。整个 YOLO v3 的网络层一共为 252 层,其中卷积层为 75 层,BN 层和 Leaky ReLU 分别为 72 层,add 层 23 层,zero padding 5 层,上采样和 concat 分别为 2 层,输入层 1 层。

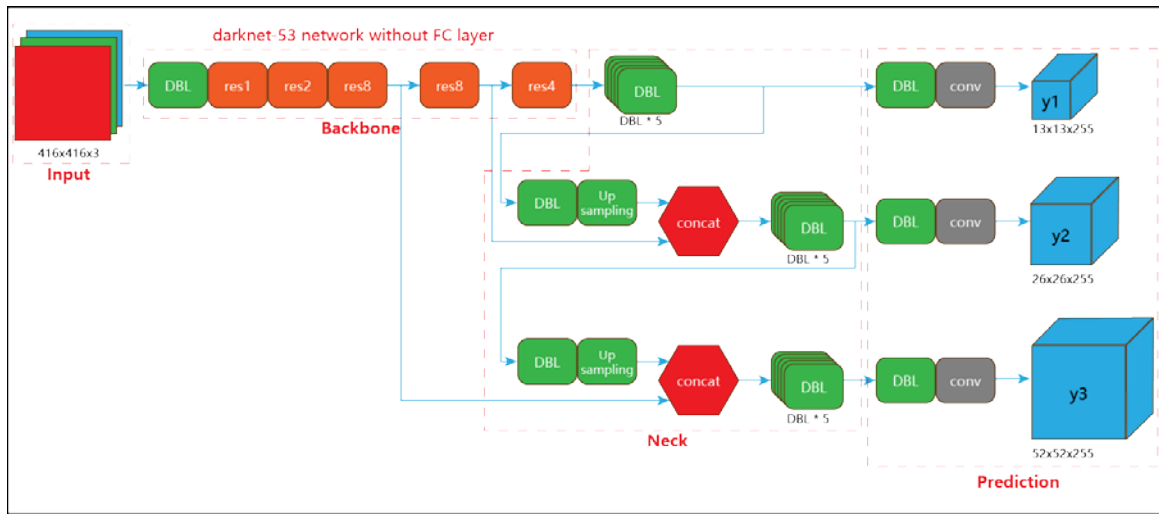


图 4-3 YOLO v3 网络结构

YOLO v3 的采用了去掉全连接层的 Darknet-53 骨干网络(Backbone Network),输入图像像素尺寸为 416x416x3 经过骨干网络分别抽取下采样 32 倍、下采样 16 倍和下采样 8 倍的特征,其中下采样 8 倍的特征经过处理最后得到了 13x13x255 的结构,而另外一路经过了上采样变为 26x26 的尺度,再与之前下采样 16 倍的特征经过 concat 拼接经过处理最后得到 26x26x255 的结构,另外一路同样是经过上采样变为 52x52 的尺度,再与之前下采样 32 倍的特征经过 concat 拼接经过处理最后得到 52x52x255 的结构。这样的网络结构即利用了深层网络语义特化抽象的特征,也充分利用了浅层网络细粒度的底层结构特征。通过这个网络结构能够实现多尺度的特征融合与不同尺度物体的预测。

4.2.3 YOLO v3 的特点

YOLO v3 的输入支持不同大小的图片,即使图片的长和宽不相等。但在图片长与宽不相等的情况下则需要对图片进行缩放或者填充处理。缩放指的不保留图片的原始比例,直接将图片进行缩放使得长边的长度与短边相等,这会使得图片产生一

定的畸变；而填充指的是保留图片的原始比例，填充图片使得图片的长和宽相等，如图 4-4 所示。最后处理所得到的图片的尺寸需要满足长宽相等并且为 32 的倍数。

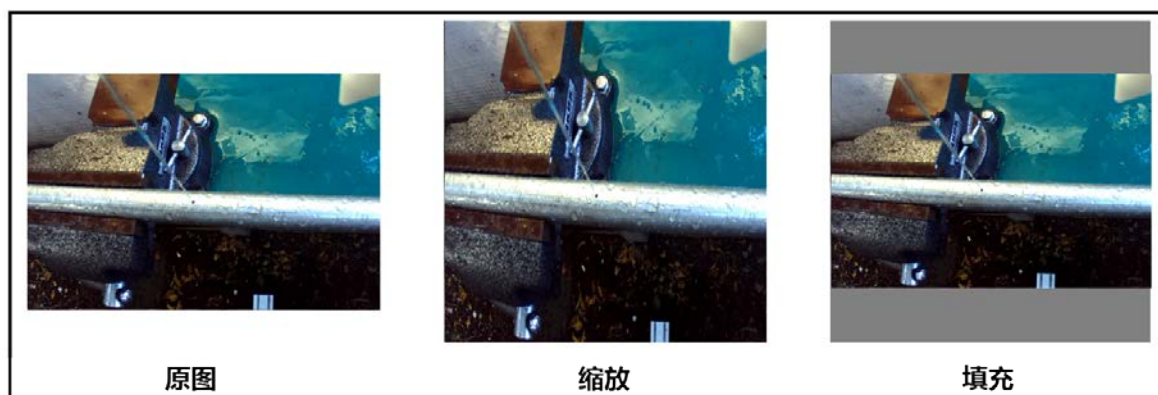


图 4-4 图片前处理

在整个 YOLO v3 的网络结构中，并没有使用到其他网络常用到的池化层（pooling）和全连接层（full connected layer）。而对于前向过程中张量尺寸的变化主要是通过改变卷积核的步长来实现的。以输入图像像素尺寸为 416x416 的图片作为输入为例，经过 backbone 网络和 Neck 网络，最后得到 13x13、26x26、52x52 三个不同尺度的特征图。并且借鉴了 FPN 的思想，对这部分特征图采取了融合的方法，通过采用上采样(up sample)和拼接对输入进行多尺度来检测不同大小的目标，而越精细的栅格(grid cell)对越小的物体的检测效果更优。

如图 4-5 所示，得到不同尺度大小的特征之后，不同尺度所对应的锚框会用来预测不同大小的物体。如 13x13 尺度大小的特征图所对应的锚框负责预测比较大尺寸的物体，26x26 尺度大小的特征图所对应的锚框负责预测比较中等尺寸的物体，52x52 尺度大小的特征图所对应的锚框负责预测比较小尺寸的物体。

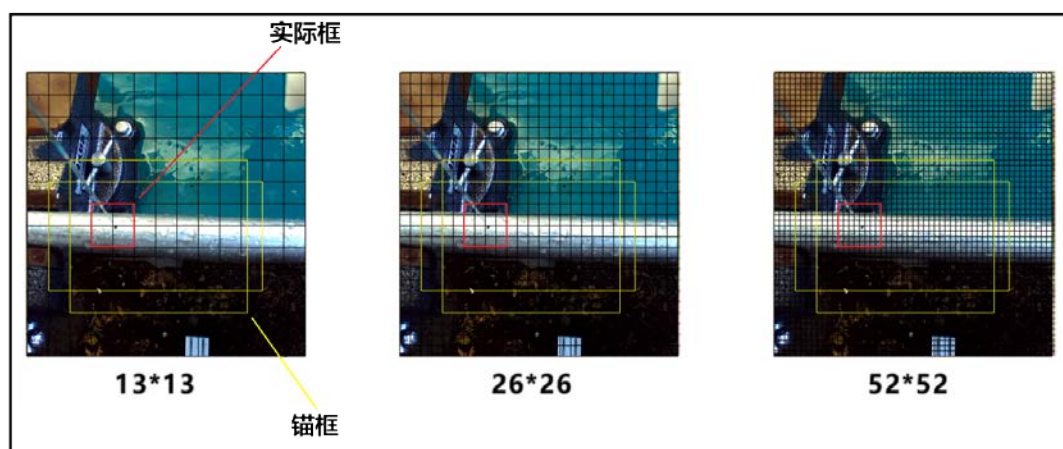


图 4-5 不同大小锚框

在图 4-5 左侧的 13x13 尺度的特征图中，被检测物体所处位置中心的栅格所对应的三个锚框中的某一个锚框会负责预测这个物体。而这三个锚框的 IOU 会决定是由哪一个锚框来负责预测这个物体。而被检测物体所处位置中心也会处于不同尺度下的某一个栅格中，而具体由哪个尺度的栅格来负责预测呢？则是取决于与实际框 (Ground True) 的 IOU 最大的锚框所在的尺度的栅格来负责预测。

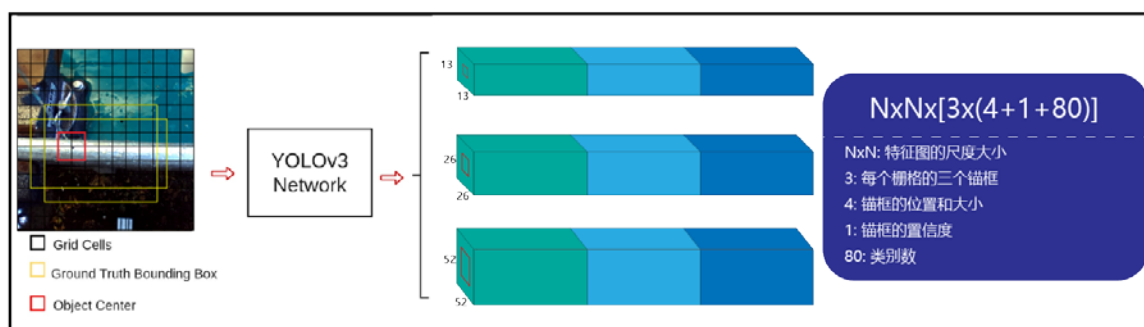


图 4-6 YOLO v3 网络输出

每个栅格会由 3 个锚框来对物体进行检测，不同尺度的特征栅格对应的锚框的尺度也是不同的。每一个尺度锚框的 Box 由 $(t_x, t_y, t_w, t_h, t_c)$ 所表示，其中 (t_x, t_y) 代表的是 Box 在原始图像中的具体中心位置，而 (t_w, t_h) 为 Box 的长和宽， t_c 为这个 Box 存在物体对象的概率。假设以 COCO 数据集中物体类别数为 80，那么每个尺度的特征图最后的输出数据大小为 $N \times N \times [3 \times (4 + 1 + 80)]$ ，N 指的是特征图的大小，每个栅格会有 3 个锚框，4+1 为 $(t_x, t_y, t_w, t_h, t_c)$ 的大小，最后的 80 为 COCO 数据集的每一种类别的类别分数，如图 4-7 所示。

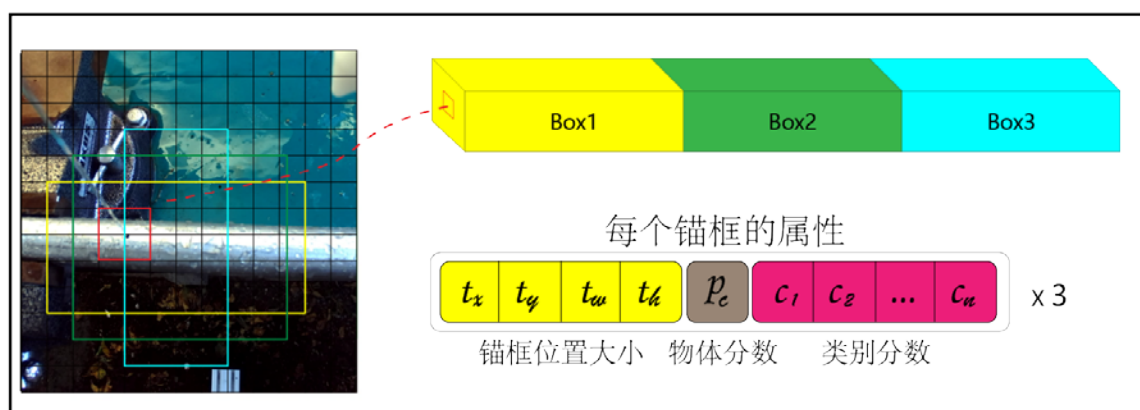


图 4-7 锚框的属性

锚框的各个类别算公式如下：

$$scores = p_c \times \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{78} \\ c_{79} \\ c_{80} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_c c_1 \\ p_c c_2 \\ p_c c_3 \\ \vdots \\ p_c c_{78} \\ p_c c_{79} \\ p_c c_{80} \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

计算后会得到多个类别的置信度，最终会从其中取得置信度最高的类别作为检测的类别，并将最高的置信度作为该锚框的置信度。

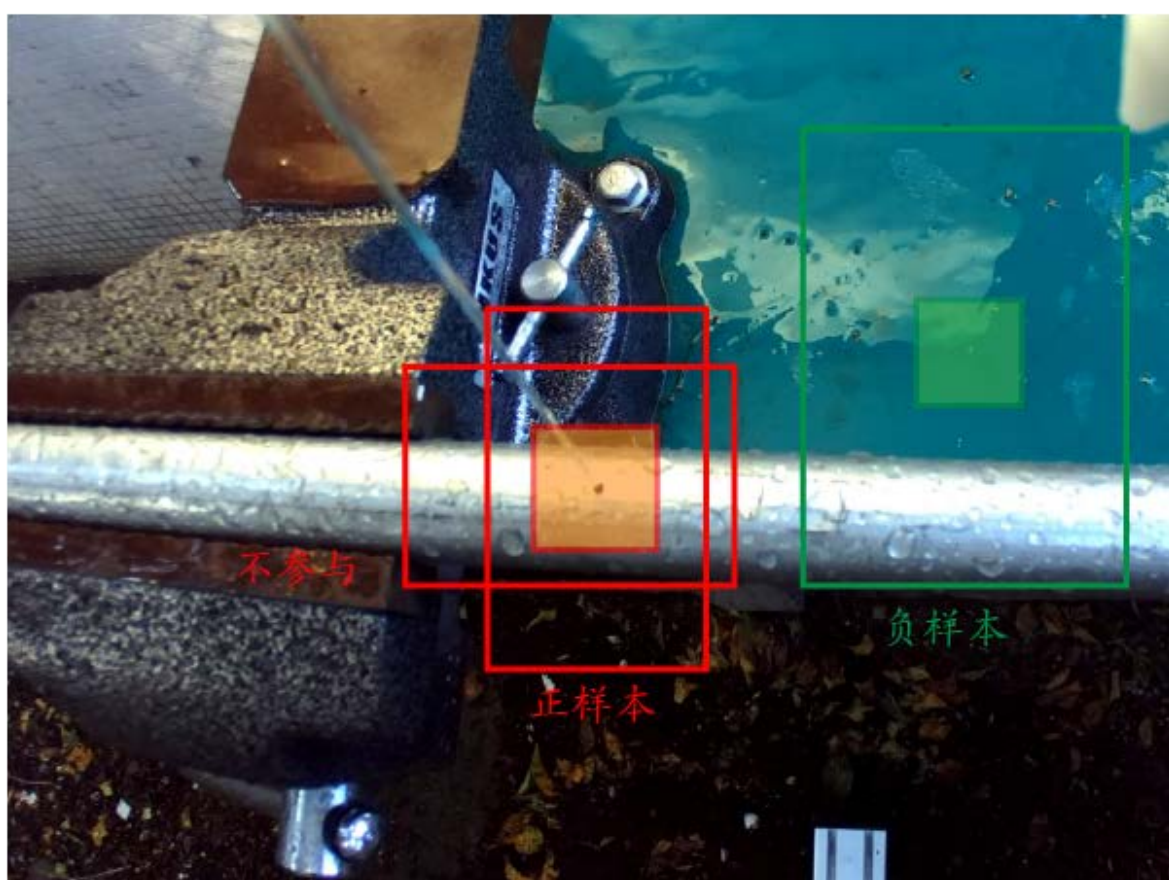


图 4-8 正样本与负样本

在对预测框的定位是否准确的问题上，采用了交并比 IOU 衡量预测框和标注框的重合程度，如下式：

$$IOU = \frac{area(B_p \cap B_{gt})}{area(B_p \cup B_{gt})} \quad (4-2)$$

式中， B_p 为预测框， B_{gt} 为标注框

在 YOLO v3 中，如果一个锚框与 Ground True 的 IOU 最大，则认为是正样本；如果一个锚框与 Ground True 的 IOU 大于设定的阈值但不为最大，则该锚框会被忽略；如果一个锚框与 Ground True 的 IOU 小于设定的阈值，则认为是负样本。正样本的 objectness 置信度标签为 1，而负样本的 objectness 置信度标签为 0。因此在 YOLO v3 中产生损失的只有正样本和负样本。正样本在损失函数中会计算其坐标损失函数、置信度损失函数和类别损失函数，而负样本只会计算负样本损失函数。因此损失函数主要分为三个部分的加和，第一个部分为计算正样本坐标位置的回归，第二个部分为计算正样本的置信度和类别，第三个部分为计算负样本的置信度。损失函数如下：

$$Loss = Error_{pos_coord} + Error_{conf_cls} + Error_{neg_conf} \quad (4-3)$$

其中，正样本的坐标损失函数如下：

$$Error_{pos_coord} = \lambda_{coord} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B 1_{i,j}^{obj} \cdot (2 - w_i \times h_i) \cdot \left[(b_x - \hat{b}_x)^2 + (b_y - \hat{b}_y)^2 + (b_w - \hat{b}_w)^2 + (b_h - \hat{b}_h)^2 \right] \quad (4-4)$$

式中， λ_{coord} 是正样本权重系数， $\sum_{i=0}^{S^2}$ 和 $\sum_{j=0}^B$ 分别表示遍历每个栅格和遍历每个栅格所对应的锚框，乘积则代表遍历所有锚框， $1_{i,j}^{obj}$ 用来判断是否为正样本， $(b_x - \hat{b}_x)^2 + (b_y - \hat{b}_y)^2 + (b_w - \hat{b}_w)^2 + (b_h - \hat{b}_h)^2$ 为锚框中心的位置和锚框的宽高与实际框的差值平方求和， $(2 - w_i \times h_i)$ 是用于惩罚小框的系数，会对小框赋予更大的损失。

正样本的置信度和类别损失函数的计算公式如下：

$$Error_{conf_cls} = \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B 1_{i,j}^{obj} \cdot [-\log(p_c) + \sum_{i=1}^n BCE(\hat{c}_i, c_{wi})] \quad (4-5)$$

式中， p_c 为锚框存在检测物体的得分， $\sum_{i=1}^n BCE(\hat{c}_i, c_{wi})$ 用于逐类别地计算二元交叉熵损失。其中

$$BCE(\hat{c}_i, c_{wi}) = -\hat{c}_i \log(c_i)$$

负样本的置信度损失函数的计算公式如下：

$$Error_{neg_conf} = \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B 1_{i,j}^{noobj} \cdot [-\log(1 - p_c)] \quad (4-6)$$

式中， λ_{noobj} 是负样本权重系数。

在训练过程中，输入图像会经过主干网络和颈部网络生成三个尺度的特征图，通过栅格生成的锚框与实际的标注框进行比较，利用损失函数进行训练，进行反向传播和梯度下降来迭代 YOLO v3 网络中的权重。

测试过程中主要分为两个部分，第一个部分是输入图像会经过主干网络和颈部

网络生成三个尺度的特征图，对预测框的信息进行计算，并通过设定置信度阈值来过滤得分低的预测框，第二个部分是通过多分类非极大值抑制(Non-Maximum Suppression, NMS)来过滤重叠较大预测框。

4.3 管道漏点数据集的采集

随着人工智能的发展，深度学习被应用在越来越多的领域，以更加优越的性能和可靠性提高了人们的生活水平和生产效率，但目前针对管道漏点通过深度学习来进行识别和定位的具体应用还没有引起人们的广泛重视。针对这一应用，相较于传统的管道漏点检测和定位方法，深度学习不仅凸显出其高效和可靠，而且拥有更低的成本和更好的兼容性。截至目前位置，鲜有人将目光投到深度学习的漏点检测和定位应用上，因此管道泄漏的数据集在工业界十分匮乏，难以通过训练得到满足对管道漏点检测的神经网络参数权重。为了解决这一问题，我们自己完成了对管道数据集的采集。

在进行对数据集进行采集之前，我们对数据集进行了多个维度的考虑。首先，工业生产中管道可能会被搭设在不同的环境中，其中室内与室外的管道的环境由于会由于特征的差比造成检测的准确度差异；另外管道在室外时可能会受到昼夜等因素影响，造成图片中显现出不同的光照差异；除此以外，摄像头拍摄时与管道的距离、角度，管道与管道漏点在图片中的大小和具体位置也由一定的影响；最后，我们还采集了常规的 RGB 图像和红外热成像，如图 4-9 所示。

可以从不同的管道泄漏图片看出，我们所采集的数据集针对实际的工作场景和应用角度，综合考虑了所采集的数据集的各个因素可能会对深度学习训练和预测的影响。同时不难从图片中发现，利用深度学习来检测和定位管道漏点时一项非常具有挑战性的任务，原因如下：

(1) 泄漏管道所处的环境非常宽泛，可能处于封闭的室内，也可能处于旷阔的室外，这两类图片的特征区别差异会非常大，而训练过程中需要让神经网络具有泛用性从而使得在不同的场景中都能够保证准确性；

(2) 无论处于哪一类环境中，我们所采集的数据集的背景都具有一定的复杂性，同时管道漏点喷射出来的水柱是透明的，在白色的背景下水柱的特征会变得更加不明显，这无疑提升了神经网络对管道漏点检测和定位的难度；

(3) 在我们的数据集中，管道可能会被周围的物体遮挡，同时不同的光照也会使得图片的整体亮度等发生差异，并且会使得图片中某些材质的物体发生反光现象，这也会对管道漏点的检测和定位任务带来一定的挑战性。

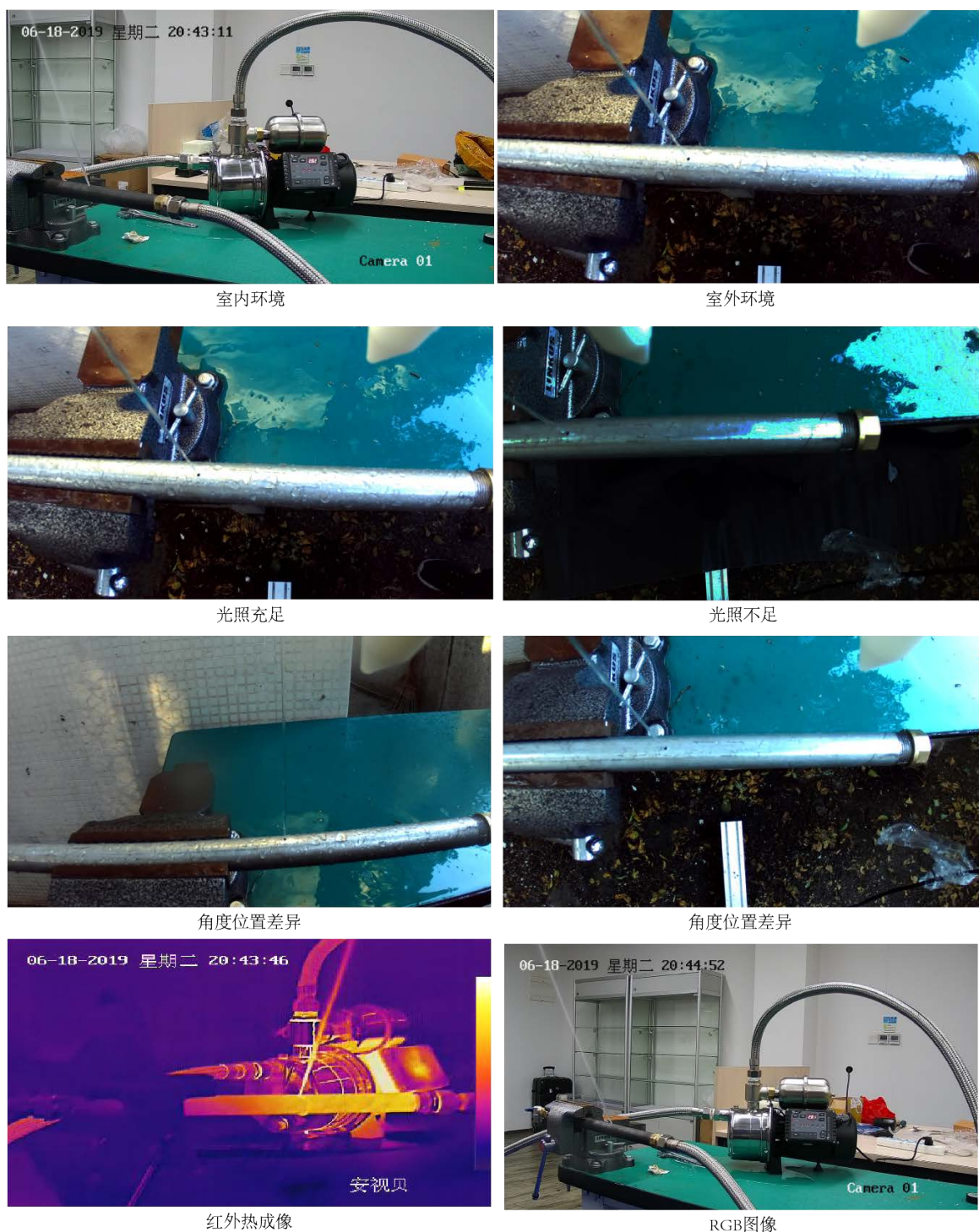


图 4-9 数据集图片实例

通过对管道泄漏的数据集进行采集，最终获得 360p 室内深度点云图片 100 张，360p 的室内 RGB 图片 100 张，1080p 的室内 RGB 图片 100 张，384x288 的室内热力图 100 张，2270x1242 的室外 RGB 图片 236 张，另外还有 1920x1080，30fps 的室外 RGB 视频约 154 秒左右，如表 4-1 所示。由表中可以看出，数据集的格式类型的种

类以及各种不同尺寸，能够很好地覆盖各类场景。

表 4-1 管道泄漏数据集

格式	大小	类型	数量
图片	640x360	室内深度点云图	100 张
	640x360	室内 RGB 图	100 张
	1920x1080	室内 RGB 图	100 张
	384x288	室内热力图	100 张
	2270x1242	室外 RGB 图	236 张
视频	1920x1080, 30fps	室外 RGB 视频	154 秒

4.4 基于 ROS 的图像获取和识别

在定位末端的设计中，我们使用了 Zed mini 来作为传感器来采集图像视频数据，Zed mini 是 Stereolabs 的一款双目摄像头产品，能够通过双目成像来获取 RGB 图像中的深度信息，并且具备体积小质量轻以及二次开发难度低等优点。在官方的支持文档中已经开发了较为完备的 ROS 功能包，能够让开发者方便地使用。在官方已经发布的 ROS(Robot Operating System)功能包中，利用 rviz 就能够对各种数据类型进行可视化，如图 4-10 和图 4-11 所示。

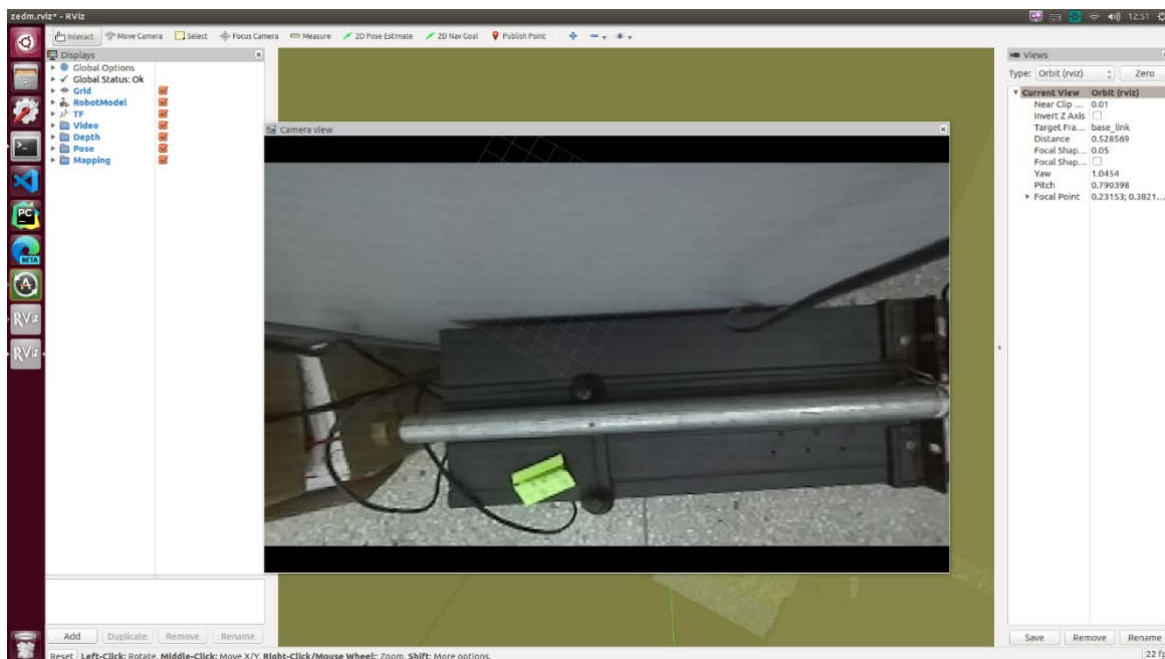


图 4-10 Rviz 中的 RGB 图像

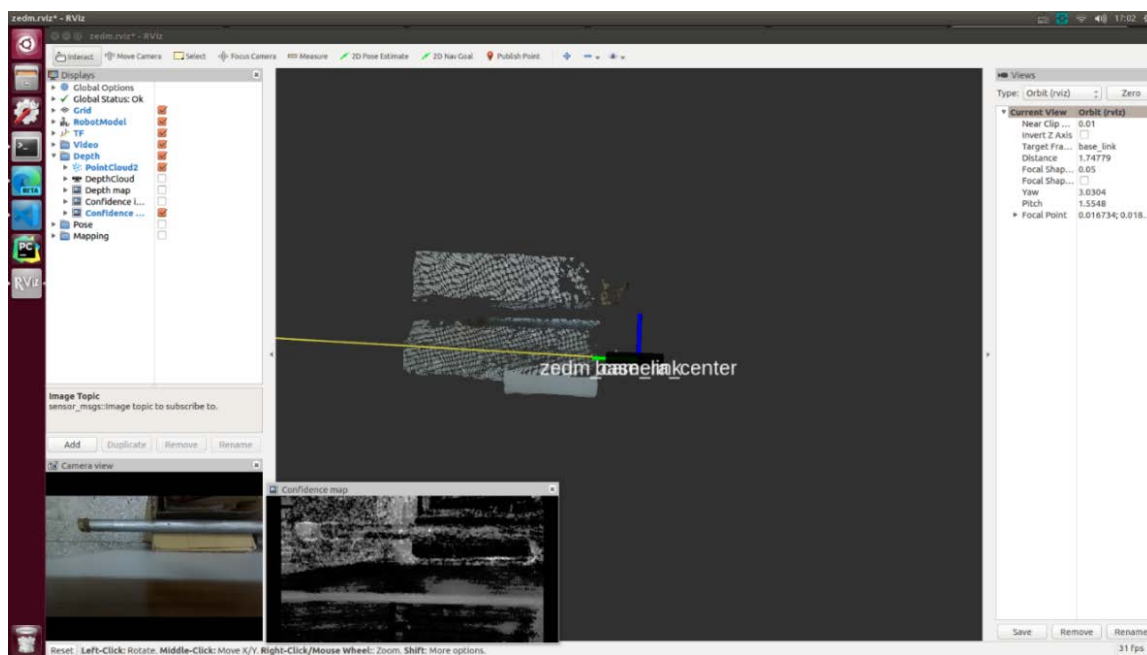


图 4-11 Rviz 中的深度点云图像

我们使用的深度学习算法为 YOLO v3，我们选择了 darknet 版本。在 ROS 目录下，我们利用我们采集的数据集来训练神经网络，并且在对测试集进行漏点预测时，第 900 代的权重参数的预测效果已经足够优秀。通过目标检测算法，能够对管道漏点进行检测并输出相应的位置信息，如图 4-13 所示。



图 4-12 室内环境下的管道漏点检测

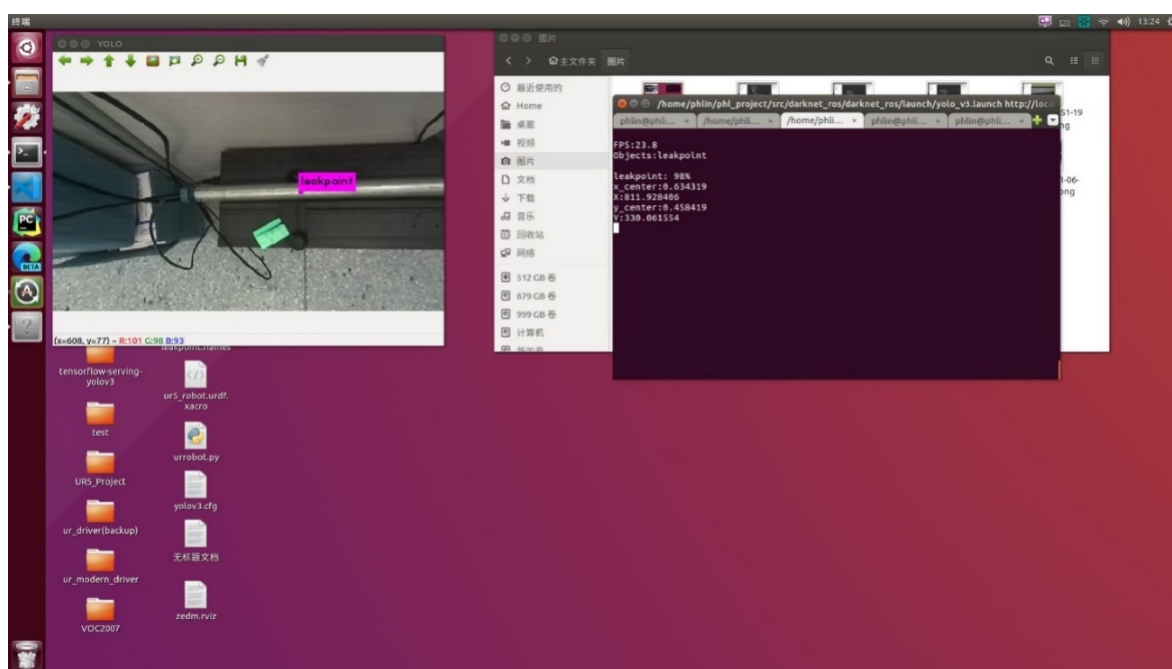


图 4-13 室内环境下的管道漏点位置输出

在 ROS 的程序架构上, 如图 4-14 所示, 双目摄像机 Zed mini 的启动程序 `zedm.launch` 注册节点 `/zedm/zedm_state_publisher` 发布图像和深度信息等话题消息, YOLO v3 算法节点 `/darknet_ros` 订阅了话题消息 `rgb/image_rect_color`, 并通过对管道漏点的检测, 输出 `/darknet_ros/bounding_boxes` 话题消息。最后由节点 `/LeakPoint_Location` 输出的管道漏点相对于双目摄像机 zed mini 左摄像头的相对位置的话题 `/leakpoint_Location_Topic`, 最后输出话题的具体内容如图 4-15 所示。

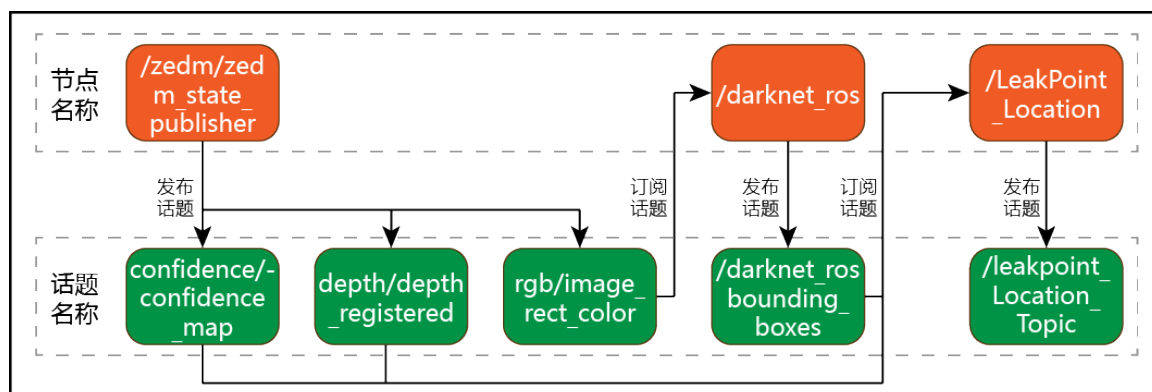


图 4-14 管道漏点检测节点和话题关系

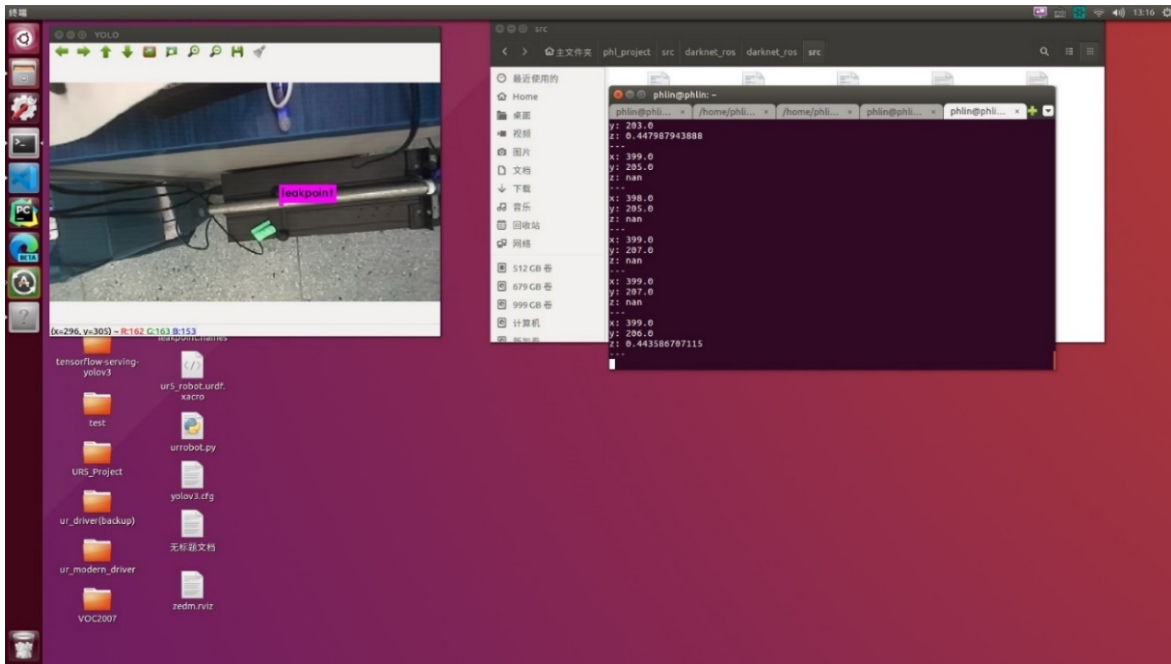


图 4-15 话题消息输出漏点三维坐标

4.5 本章小结

本章详细地介绍了在管道漏点的检测和识别任务中的具体实现思路和实现方法。在图像识别任务分析中，对任务的类型以及解决方法进行了概要的介绍。对图像处理算法中的 YOLO 的发展和特点进行了详细地介绍，通过对 YOLO v3 的网络结构和特点进行阐释以说明 YOLO v3 的特性能够满足管道漏点检测的任务。随后我们阐述了管道漏点识别的现状，并且为了训练出针对管道漏点检测识别任务更好的网络权重参数，我们采集了管道漏点的数据集，并概括了数据集的特点和采集思路。最后，我们简单地概况管道漏点的图像检测算法的部署以及程序的基本结构。

第5章 基于 ROS 的机器人控制实现

5.1 机器人手眼系统协同

在本课题中，我们使用了 UR10 机械臂作为执行器来完成各类不同的任务。机械臂作为一种十分灵活的工具，通过在其末端搭载不同的末端执行器，就能够完成不同的任务满足不同的需求。在本课题中，我们为机械臂设计了两种专用的执行器以应对不同的任务场景。但仅有执行器是不够的，没有了传感器，其模型只能是类似于正反馈的模型，无法通过对外界的感知来进行调整。因此我们在机器人上搭载了多种传感器以提升机器人感知环境的能力。其中最主要的传感器是摄像头，即视觉传感器。这种传感器和执行器的组合就类似于人的手和眼，即机器人的手眼协同系统。在这个系统中，摄像头和压力传感器作为机器人感知环境的感官，而机械臂作为执行器来完成相应的工作，组成了一个带有反馈的系统，如图 5-1 所示。

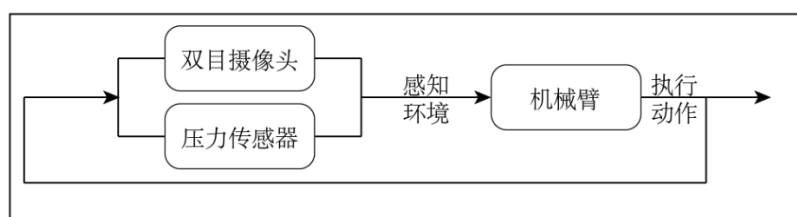


图 5-1 机器人的手眼协同系统

在采集压力传感器的电平的过程中，由于传感器的采样率限制，所得到的数据是离散的。同时在传感器采集环境的压力信号过程中，存在一定的噪声，为了尽可能地过滤噪声，获得一条高可信的压力数值曲线，我们采用卡尔曼滤波方法对输入信号进行处理。

卡尔曼滤波（Kalman filtering, KF）是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法；时间序列分析（Time-Series Analysis, TSA）是指将数据分解趋势、周期、时期和不稳定因素这四部分，然后根据这四部分因素来进行预测^[105]。卡尔曼滤波具有能够动态修改预测权值的优点，并且依靠预测递推方程可以获得较高的准确度，但另一方面，建立卡尔曼状态方程和测量方程会相对繁琐^[106]。卡尔曼滤波状态空间模型所描述的动态系统表达式为：

$$X(k+1) = \phi X(k) + \Gamma W(k) \quad (5-1)$$

$$Y(k+1) = HX(k) + V(k) \quad (5-2)$$

一般称式(5-1)为状态方程，称式(5-2)为观测方程。称 ϕ 为状态转移矩阵， H 为观测矩阵， Γ 为噪声驱动矩阵。式中， k 为离散时间，系统在时刻 k 的状态为 $X(k) \in R^n$ ， $Y(k) \in R^m$ 为对应状态的观测信号， $W(k) \in R^r$ 为输入的白噪声， $V(k) \in R^m$ 为观测噪声。若假设 $W(k)$ 和 $V(k)$ 是均值为0，方差各为 Q 、 R 的不相关白噪声，初始状态 $X(0)$ 与 $W(k)$ 和 $V(k)$ 不相关，递推得到：

$$\hat{X}(k+1|k) = \phi \hat{X}(k|k) \quad (5-3)$$

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)\varepsilon(k+1) \quad (5-4)$$

$$\varepsilon(k+1) = Y(k+1) - H\hat{X}(k+1|k) \quad (5-5)$$

式(5-3)和(5-4)分别为状态预测和状态更新方程。式中 $\hat{X}(k+1|k+1)$ 表示对 $k+1$ 时刻的状态估计， $K(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的卡尔曼增益矩阵。通过卡尔曼降噪之后的数据如图 5-3 所示，其中蓝色曲线为通过压力传感器采集的观测数据，而红色曲线为通过卡尔曼降噪之后的数据，可以看出降噪之后的数据避免了由于传感器的采样率和系统噪声带来的干扰，更加接近与真实值。

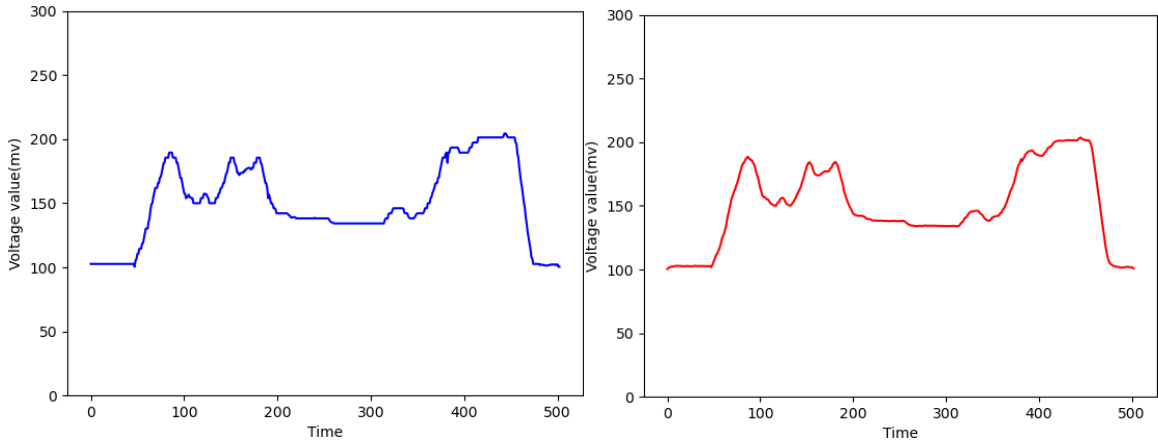


图 5-2 压力传感器的点电平信号曲线

在定位末端的设计中，我们希望通过双目摄像机对于周围环境的感知作为机器人的视觉感知，来引导机械臂进行运动。在具体实现中，我们利用双目摄像机来初步确定管道漏点的位置，并通过定位末端上的探针尖端去触碰管道泄漏位置，通过对压力的分析来确定漏点的精确位置。在第四章中，已经对通过深度学习来定位漏点的过程进行了详细的阐述。而对于获取管道漏点精确位置的过程，机械臂会通过离散的运动逐渐接近漏点最后定位漏点。我们将机械臂靠近漏点的过程划分为离散的运动过程，其原因如下：

管道修复任务应当尽量避免对管道的二次损伤，离散过程中，机械臂不会进行大幅度的移动，降低碰撞管道的可能性；在深度学习定位漏点的过程中，仍旧带有

微小的误差，这部分的误差的形式可能为相对误差，而绝对误差的数值可以通过调整摄像头视角来和逐渐将摄像头靠近管道来降低。

由此，对机器人手眼协同的程序进行编写和构建，程序流程图如图 5-3 所示。

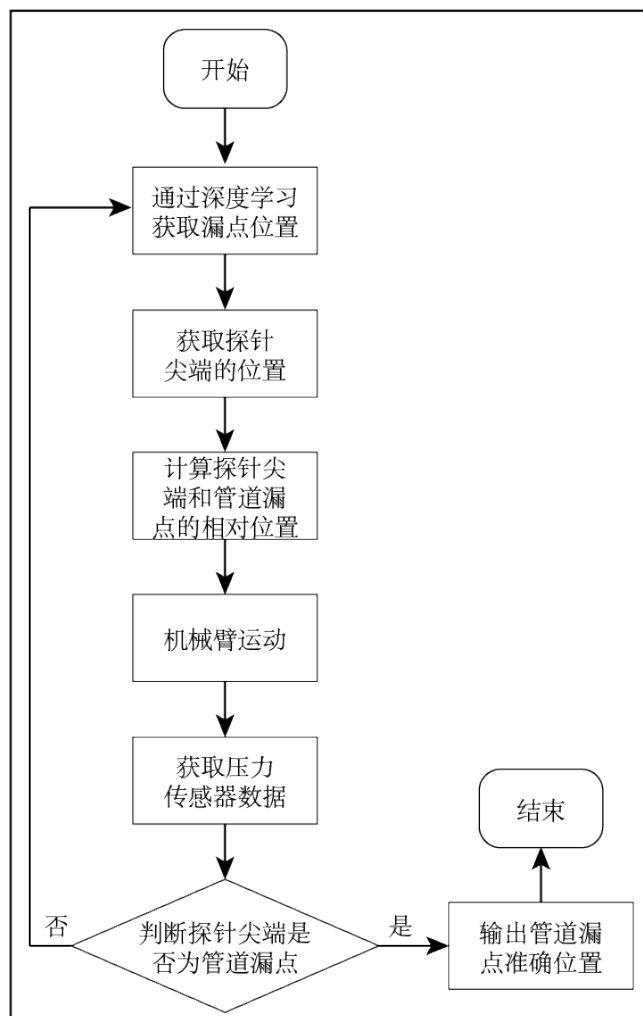


图 5-2 程序流程图

5.2 基于双末端的控制策略

在机器人的设计中，我们设计并制造了定位末端和修复末端来分别实现管道漏点检测定位和管道漏点的修复功能。在实际的机器人任务执行中，机械臂利用快换模块能够根据需求与不同的末端建立连接，以此来完成相应的任务。因此我们针对双末端提出了一套机械臂的控制策略，如图 5-4 所示。在机器人移动到达合适的工作位置之后，机械臂首先连接定位末端对漏点进行检测并定位。此时获得的管道漏点位置是基于摄像头的相对位置，通过坐标变换获得基于机械臂机座的漏点位置。

同时机械臂断开与定位末端的连接，与修复末端建立连接，并根据漏点在管道上的大致位置移动到指定的修复位置上进行修复工作。

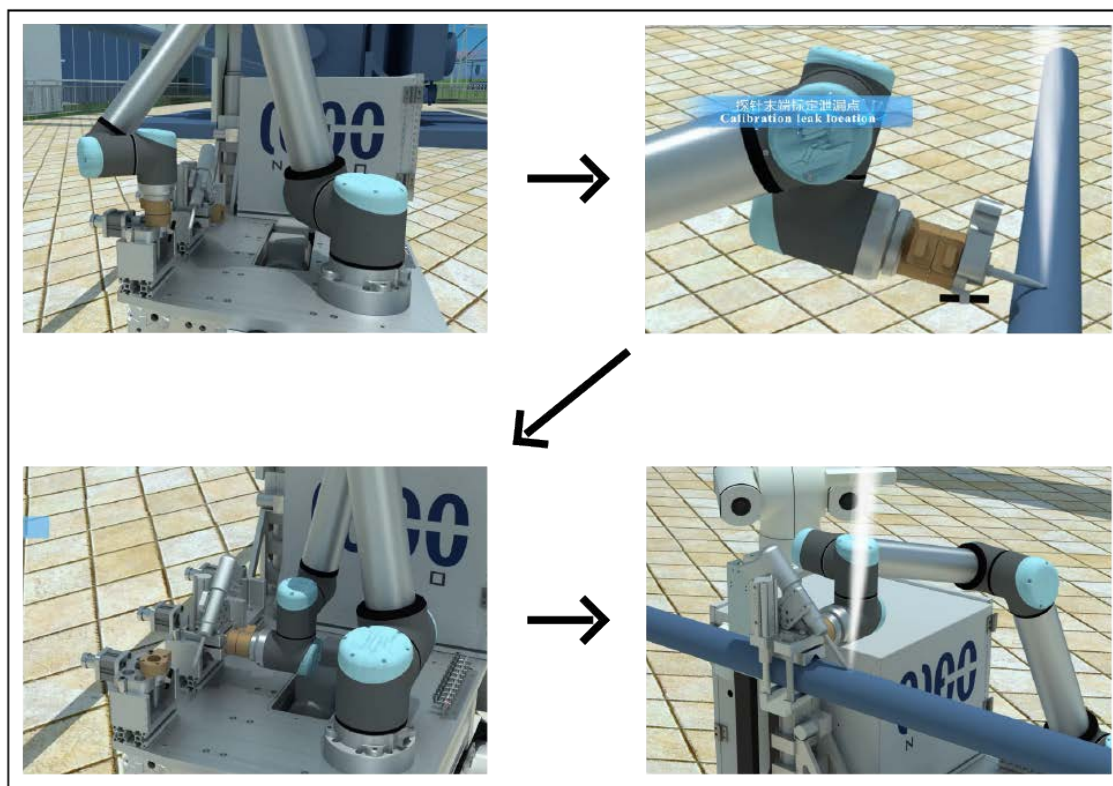


图 5-3 双末端控制策略图示

在工作过程中，机械臂的整体运动过程可以分解为 10 个阶段，如下表所示。

表 5-1 机械臂的运动过程

1	装载定位末端	6	移动至漏点附近
2	移动至管道附近	7	移动至管道漏点上
3	定位管道漏点	8	移动至漏点附近
4	卸载定位末端	9	卸载修复末端
5	装载修复末端	10	恢复初始位置

通过对机械臂不同阶段运动过程的运动路径进行分析，在实现对机械臂的控制程序中，将装载与卸载定位、修复末端和恢复初始位置等 5 个机械臂的运动过程路径设计为固定路径；剩下的机械臂的其余运动过程均会根据管道和管道漏点的位置对机械臂的运动路径做出调整以实现机械臂的灵活运动。此外，考虑到修复过程中

修复末端和管道会有接触，因此将移动到管道漏点上的这一运动过程中，采用了机械臂的 Force Mode 柔顺控制，以避免在夹紧管道的过程中对管道造成破坏。在整个机械臂的运动过程中，也需要通过继电器对多个气阀进行控制，以完成机械臂和末端的装载连接、卸载断开、对管道的夹紧动作和捻打控制的各类动作。

在上述过程中，通过远程操作界面开放了部分对于机械臂的控制操作权限，能够使操作人员在远程观察的情况下，利用其丰富的管道修复经验对机械臂的姿态进行微调，达到更好的修复质量和效果。

5.3 基于 ROS 的机械臂控制实现

ROS 是一个十分灵活便捷的机器人软件架构，该架构提供了操作系统基础能力，包括下层设备控制、通用函数和通用工具库的实现、硬件抽象、进程间消息传递以及软件包管理等等。同时 ROS 也能提供用于获取、编译、编写、和跨计算机运行代码所需的工具和库函数^[107]。在本课题中，我们所使用 UR 机械臂系列有着完备的官方底层编码支持，同时 ROS 中也有 MoveIt!、TF、Rviz、Gazebo 等成熟方便的库和工具等支撑。最重要的是，在 ROS 这个架构中，对于硬件的拓展性十分友好，能够通过节点、话题和服务的形式对机器人的各类硬件和工具进行拓展，极大地方便了机器人的调试测试与开发。

如图 5-5 所示，在 ROS 中我们通过以下结构实现机器人的功能。首先 *ur_bringup.launch* 会启动机器人的一系列功能，包括控制器等等，同时发布了机器人各个关节的状态话题/*JointState*；压力传感器会实时发布其压力数据/*StressData*；*Check_LeakPoint* 会订阅/*StressData* 话题并且判断机器人是否定位到管道漏点，并且将结果由/*Check_Result* 话题发布出去；而后 *tf_library* 会订阅由图像识别获得的漏点位置话题/*leakpoint_Location_Topic* 和/*StressData*、/*JointState*，并且将对应的坐标转换结果通过/*Motion_path* 发布出去；最后由/*motion_planning* 节点订阅/*JointState* 和/*Motion_path*，对机器人的路径进行规划。基于此，机械臂就能够实现对于定位管道漏点和修复管道漏点实时控制。

根据机器人修复任务的具体动作，检测、定位和修复管道等机械臂动作需要配合双目摄像头和压力传感器共同完成，而剩余的机械臂动作则直接固定运动路径即可。机械臂各个阶段的动作由机器人控制软件界面触发执行，即操作人员远程通过操作机器人的软件界面来控制机械臂各个阶段的动作。

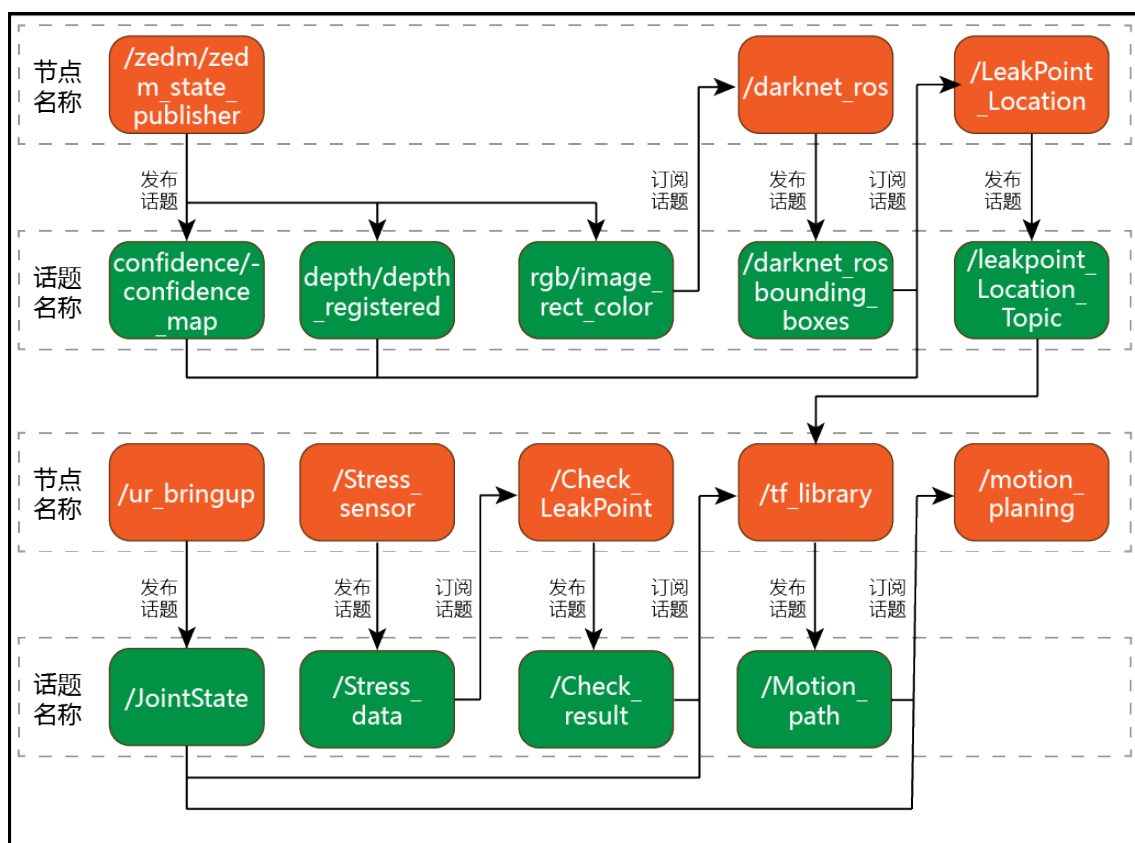


图 5-4 管道漏点定位与机械臂运动节点话题

5.4 本章小结

在本章中，我们针对机器人需要执行不同的任务，配套了不同的执行器末端。并基于两个末端，设计了机械臂的运动控制策略和控制系统。首先我们根据定位末端的两个传感器设计了机器人定位末端的过程，并阐述了相应的程序流程；而后我们针对双末端执行器提出了双末端的控制策略，针对具体执行任务的流程对机械臂的具体运动进行了分析和分解；最后介绍了机械臂控制程序的具体部署方式，同时说明了实际使用中这套机械臂控制系统是与我们所开发的软件界面配套进行使用的。

第6章 仿真实验与实际场景实验

6.1 修复末端捻打倾角实验

在实际管道修复作业中，修复末端捻打气锤距离管道漏点位置距角度和距离会影响管道修复的质量与效果。当捻打末端相对于管道的角度过小时，捻打气锤修复管道漏点过程中会容易产生偏移现象，即捻打位置偏移动管道漏点位置，这会使得材料塑性变形的位置与方向偏离，使得表面金属材料难以准确地堆积在管道的漏点位置。当捻打末端相对于管道的角度过大时，管道表面金属材料在捻打气锤作用下主要发生与管道轴线方向垂直的位移而并非平行的位移，容易致使管壁出现较深凹痕，在管道漏点位置的周围形成了突起^[3]。

捻打气锤顶针距离管道漏点位置的大小也会影响管道修复的效果与质量，当捻缝气锤顶针距离管道漏点过于接近时，金属材料的塑性变形位移可能会因为捻打外力作用而越过实际需要修复的泄漏区域，如图 6-1 所示；在这种情况下管道泄漏区域会由原来的气孔形状变为缝状，如图 6-2 所示。当捻缝气锤顶针距离漏点位置过远时，金属材料所需的塑性变形位移过大，无法保证金属材料能够准确覆盖到管道泄漏区域，容易造成带压管道其他位置的破坏性泄漏，引起更大的安全事故^[3, 76]。

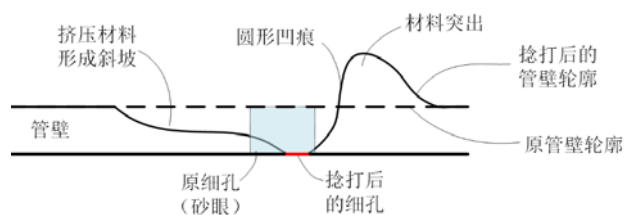
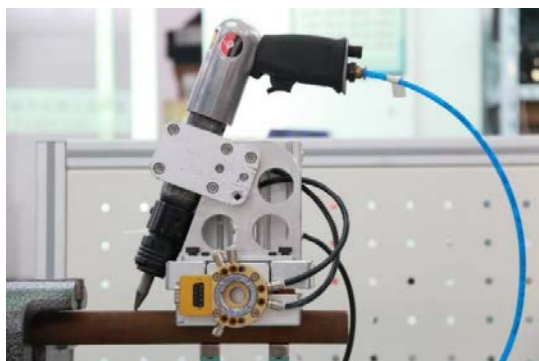


图 6-1 材料位移过大的堵漏失败情况



图 6-2 堵漏失败情况出现的缝状泄漏

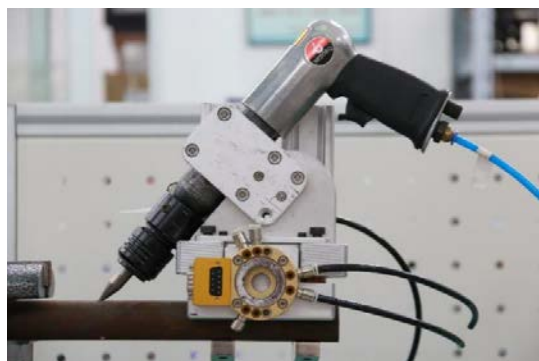
为了确定捻打气锤与管道的相对位姿因素对于堵漏质量的影响，我们针对修复末端设计了不同角度的角度调节板，通过更换角度调节板就能够调整捻打气锤相对于管道的角度。我们在本次实验中使用了角度调节板，通过使用这三个调节板，捻打气锤相对于管道的角度分别为 50° 、 60° 和 70° ，我们使用了材料为碳素钢，直径为 50mm，壁厚为 5mm 的管道，利用电钻在管道一侧外壁上钻了 2.5mm 的通孔，通孔的轴线方向与管道的轴线方向垂直，并基于此多次进行了管道修复实验。



(a) 70° 捻打角度



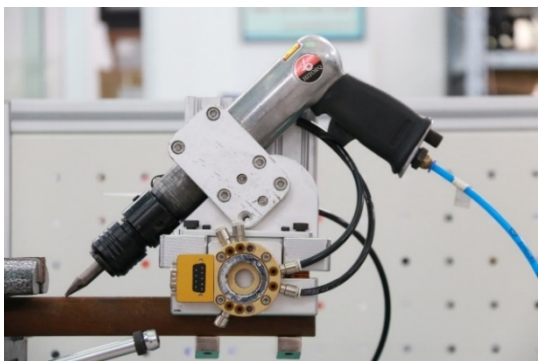
(b) 管道漏点与 70° 管道修复效果



(c) 60° 捻打角度



(d) 管道漏点与 60° 管道修复效果



(e) 50° 捻打角度



(f) 管道漏点与 50° 管道修复效果

图 6-3 不同捻打角度 (50° 、 60° 、 70°) 的实验效果图

从图 6-3 能够看出来, 实验结果与理论分析是一致的。当捻打角度为 50° 时, 捻打的深度较浅且推移材料的距离较远; 当捻打角度为 70° 时, 捻打的深度较深且推移材料的距离变短。而当捻打角度为 60° 时, 捻打的深度和推移材料的距离适中。在 50° 至 70° 的捻打角度区间内, 随着捻打角度加大, 砂眼捻打深度逐渐变深并且材料的管道轴线推移距离减小。通过实验证明, 对于 2.5mm 直径大小的管道漏点, 较为合适的捻打角度在 60° 左右, 同时捻打气锤顶针离漏点位置的管道轴向方向上的大致距离应为 1mm。在上述各参数条件下, 对金属管道泄漏点进行捻打堵漏, 可以有效地将管道表面金属材料覆盖至泄露位置从而修复管道, 也能保证对于管道的损伤影响较小。

通过上述实验的分析, 在实际对管道进行修复的工作中, 如若可能, 需要根据管道漏点的具体情况 (包括管道外壁漏点的大小、管道外壁的材料以及管道外壁的厚度) 制定合适的捻打角度和捻打距离, 保证管道修复质量的同时避免管道被二次破坏造成更加糟糕的局面。

6.2 管道修复实验

为了验证修复末端的稳定性、可靠性以及兼容性, 我们设计了一系列管道修复实验来验证所设计的修复末端的性能。我们将管道固定在工作上来作为实验场地。在这个实验中, 我们一共使用了多达 36 条不同直径的管道进行实验, 这些管道上分别钻有 2mm 至 4mm 的通孔。我们通过空气压缩机的高压空气来作为能源, 将修复末端固定到管道上, 使其将捻打撞针对准管道漏点的修复位置, 如图 6-4 所示。该实验的主要目的是通过分析修复末端夹紧管道的牢固性、捻打过程中发生的偏移量以及管道维修的质量来评估修复末端对管道的修复性能。

在管道修复的作业期间, 如果捻打气锤偏离泄漏点的修复位置时, 可能会使得难以将修补的材料推移到管道的漏点上, 造成管道的修复失败。影响捻打气锤偏离修复位置的因素包括气缸夹爪夹固管道的牢固性与捻打过程中修复末端和管道之间的相互作用力。

首先, 我们将修复末端固定在 DN25-40 直径管道上 10 分钟后, 观察到修复末端几乎没有产生任何偏移, 说明在静止状态下的牢固性完全可以保证。其次, 我们分别观察修复末端连接到机械臂上和修复末端不连接到机械臂上的两种情况, 填缝过程中填缝枪相对于泄漏点的平均偏移量记录在表 1 中。可以从表中的数据分析得到, 当修复末端未连接到机械臂上时, 在捻打期间会出现较大的偏移。但当修复末端连接到机械臂上时, 修复末端的偏移量很小, 几乎不影响管道的修复效果。

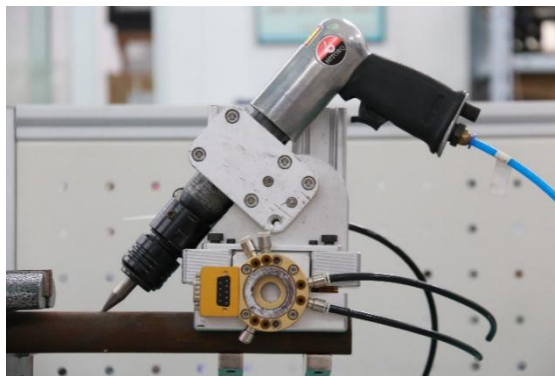


图 6-4 管道修复实验

表 6-1 捻打的平均偏移量

	DN25	DN30	DN35
空载	2.62	1.93	1.76
连接机械臂	0.16	0.16	0.16

最后，我们将直径大小为 DN25、DN30 和 DN35 的管道分别钻取直径大小为 2mm、3mm 和 4mm 的通孔。按照一致的管道修复流程利用连接在机械臂上的修复末端对管道进行修复，我们规定每一次都只能捻打 2 次，每次至多 5 秒。按照此基准完成管道修复任务后，我们会将管道注入压力为 0.2 Mpa 的水，通过观察是否仍旧存在泄漏情况来决定管道修复是否成功。每组试验将重复 4 次，总共 36 次。不同直径的管道和不同直径的通孔的修复成功的实验结果如图 6-5 所示。通过对结果进行分析，大致认为在满足修复末端设计要求的管道直径范围内，管道的直径越大，修复末端夹紧管道的稳定性更高，可以很好地抵消在捻打过程中的捻打气锤与管道之间的相互作用力，因此对管道的修复质量更好，成功率越高。而另一方面，管道泄漏点直径越小，则更容易被推移的材料覆盖堵住，因此修复的难度更低，成功率越高。

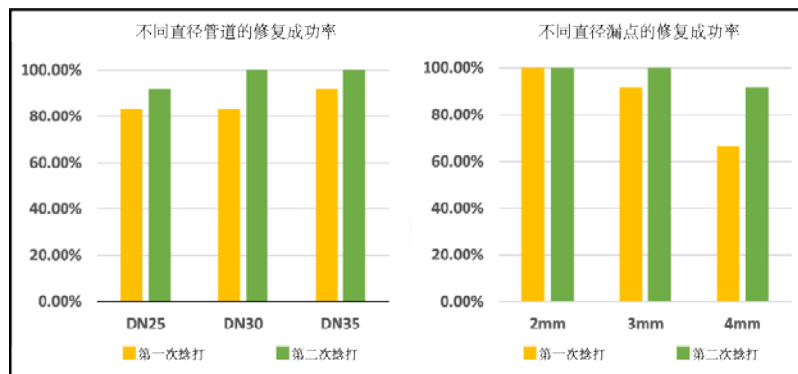


图 6-5 不同直径的管道与漏点的修复成功率

6.3 管道漏点的检测与定位实验

在管道修复任务中，对于管道漏点的检测和定位是至关重要的，我们基于此利用了深度学习来检测管道的漏点并配合定位末端精确的对管道的漏点进行定位。在这个实验中，我们同样将管道固定在工作台上来作为实验场地，并且管道上钻有 2mm 的通孔，管道上的通孔方向朝上，另外我们还为管道注入了 0.2 Mpa 压力的水。连接了定位末端的机械臂被固定在工作台的正前方，并且其运动范围能够覆盖泄漏的管道。

6.3.1 管道漏点检测实验

在管道漏点检测实验中，我们使用了之前训练好的网络模型来进行预测，我们使用了 YOLO v3 的 Darknet-53 版本，利用我们自己采集的数据集进行训练，使用的网络参数为第 900 代的参数。所采用的设备包括机械臂 UR5、定位末端、搭载 NVIDIA-2070S 的计算平台，其中定位末端上的图像视频采集设备为 ZED mini。在做好电子设备的防水处理之后，我们控制机械臂在发生泄漏的管道周围进行移动，在机械臂运动的过程中尽可能保证摄像头的拍摄方向大致朝向管道的漏点，在这种实验情况下，NVIDIA-2070S 平台上可输出 10fps 720P 视频，管道泄漏点检测精度达到 85%以上。如图 6-6 所示，尽管管道的漏点这一目标在图片中的显得十分小，环境中地光照和反光等因素也会对预测结果带来一定干扰，并且在实验环境中背景十分杂乱，但管道上的漏点仍旧被准确地检测出来，并且置信度也保持在较高的水平。我们尝试将机械臂移动以获得管道泄漏环境中不同的角度，但只要管道的漏点出现在画面中，我们使用的网络结构就能够将其检测出来。

该实验充分说明了我们所使用的神经网络对于小目标检测的优异性能，也印证了我们采用了神经网络来对管道漏点检测的可靠性。

6.3.2 管道漏点定位实验

在管道漏点检测的基础上，我们进行了管道漏点的定位实验。通过对管道漏点的检测，YOLO v3 输出的 Bounding Box 可以获得在 RGB 二维图像中漏点的二维位置和置信度。另一方面，我们可以从双目摄像头中的获取 RGB 图像中的深度点云信息，通过滤波将多帧高置信度的深度信息得到之后，就能够得到基于双目摄像头的管道漏点位置，再通过 TF 坐标变换，最后获取基于机械臂机座的漏点三维坐标。我们利用基于机械臂机座的漏点三维坐标，利用机械臂的工具坐标系来检验计算得

到的漏点位置的准确性,如图 6-7 所示。

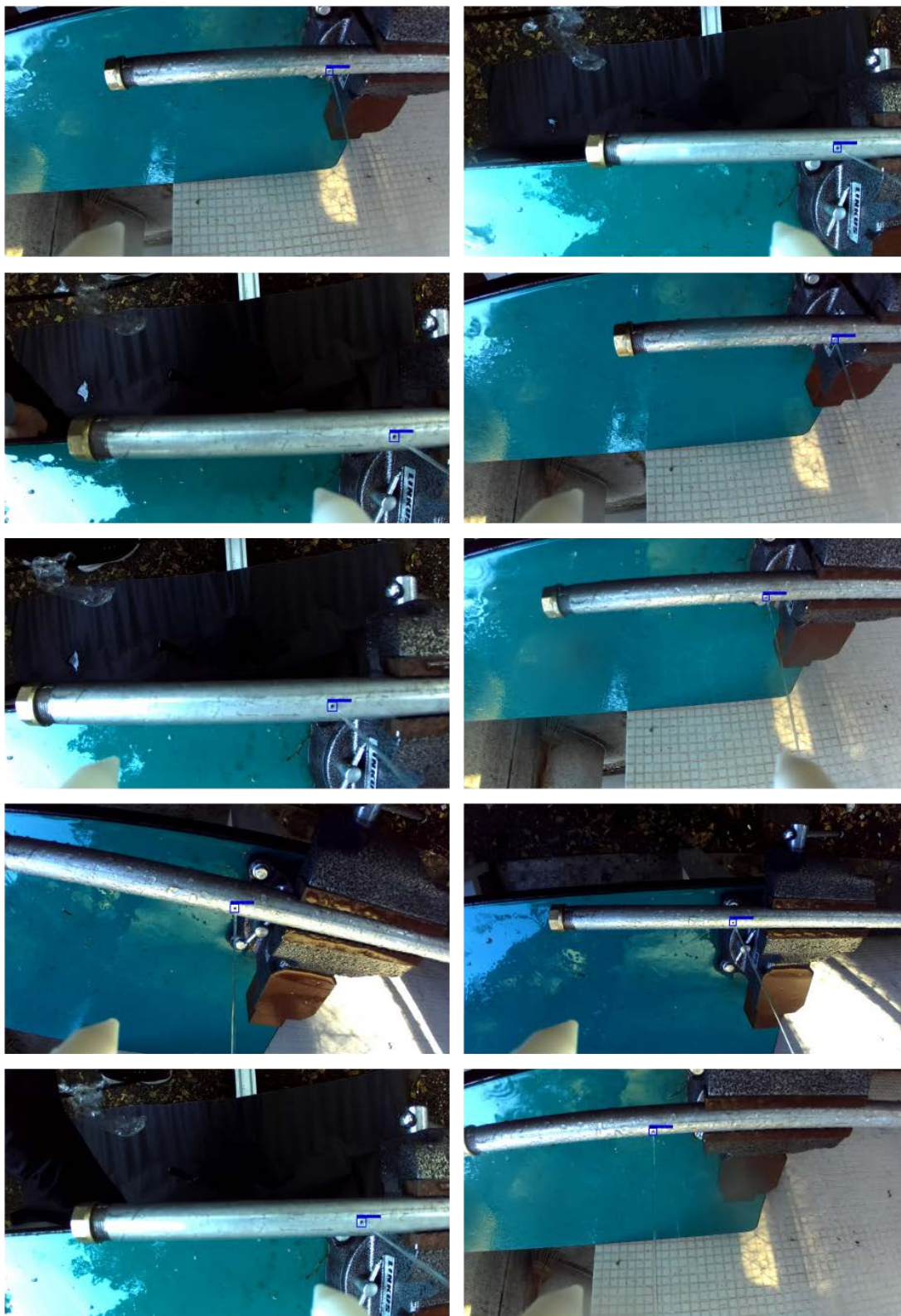


图 6-6 室外管道漏点检测效果

在实验中，由于 UR5 本身的运动范围是具有一定限制的，并且 Zed mini 摄像头采集图像深度信息的范围限制，因此我们将连接定位末端的机械臂的初始姿态固定在管道漏点上方 300mm 至 400mm 的位置。开始实验后，机械臂会根据计算得到的漏点坐标，将定位末端的探针尖端移动到该坐标上,如图 6-8 所示。我们在通过手动控制机械臂，将定位末端的探针尖端移动到真实的管道漏点上，并记录该点的位置。通过比对这两次的坐标差异，我们可以计算得到这两点之间的欧式距离，该欧氏距离即为计算得到管道漏点位置的坐标值与真实管道漏点位置的坐标值的误差，如图 6-9 所示。通过 30 次重复实验之后，我们对实验数据进行记录并做统计分析。通过对管道漏点定位的误差进行统计，如图 6-11 所示，在常规情况下，误差距离小于 2mm，已经能够基本满足管道修复任务需求。

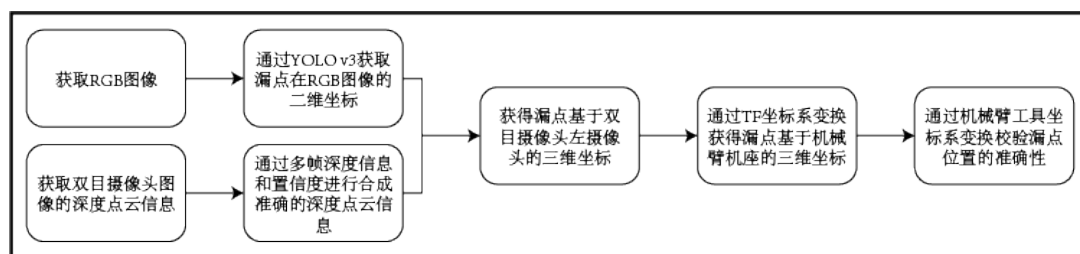


图 6-7 管道漏点定位实验过程图示

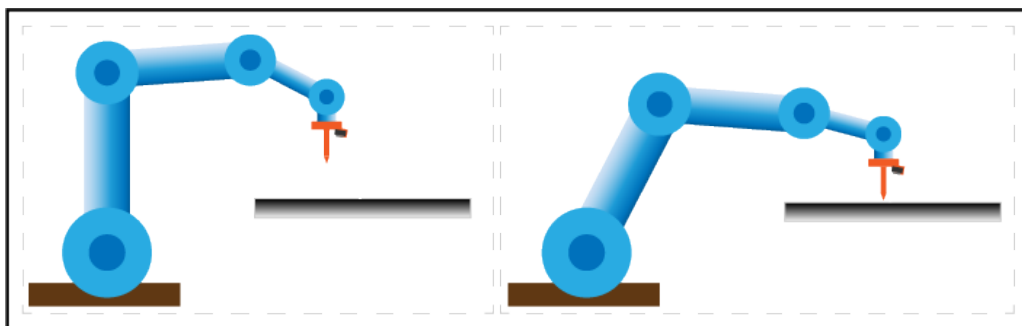


图 6-8 管道定位实验机械臂运动

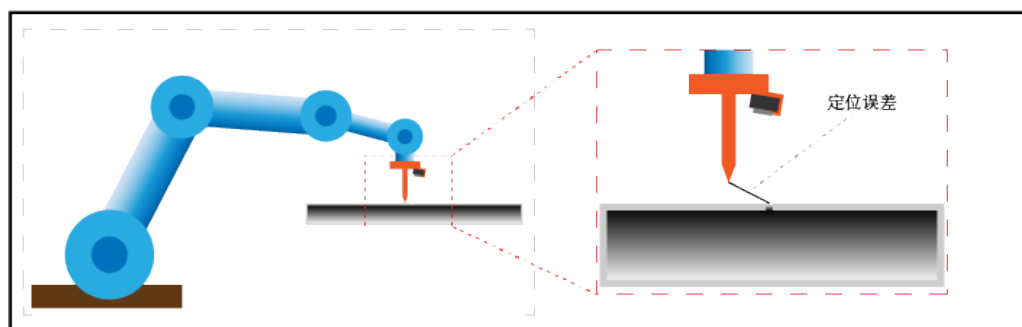


图 6-9 管道定位实验定位误差



图 6-10 管道定位实验现场图

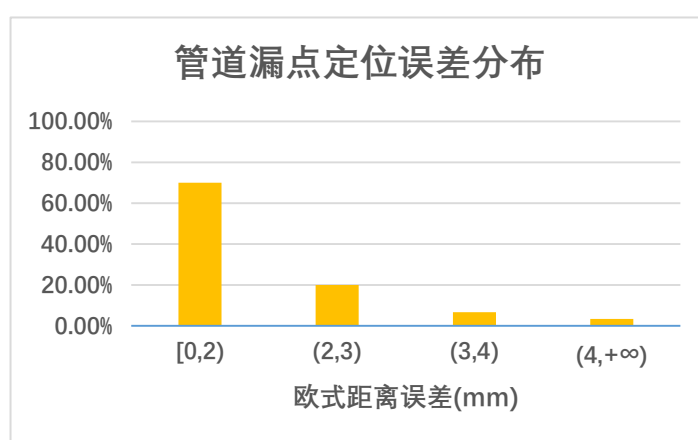


图 6-11 管道定位实验结果

在实验中，对于漏点的三维位置的定位误差来源于以下因素：

- (1) 首先，YOLOv3 对于管道漏点检测的准确性以及输出的 Bounding Box 的准确度；
- (2) 其次，深度摄像头所计算得到的环境深度点云信息的准确性也会造成影响；
- (3) 另外，定位末端模型的尺寸误差以及定位末端连接到机械臂上的装配误差会被带入 TF 坐标变换计算的过程中，也会造成相应的计算误差；
- (4) 最后，机械臂执行点到点的运动任务时，本身也有细微的误差，这取决于机械臂本身的性能。

以上造成误差的各个因素相互之间是独立的，实际的机器人运行过程中，这些因素所造成的误差相互叠加可能会造成累计误差。在本节中，由于工作量的原因，我还没有各个因素对造成误差的影响程度进行相应的分析以及优化漏点的定位精度。虽然目前对于管道漏点的定位精度已经基本满足管道修复任务的需求，但管道漏点的定位精度的性能仍旧有一定的提升空间，在后续的工作中可以继续完善这方面的工作。

6.4 真实管道泄漏环境下的漏点修复

在完成了带压堵漏机器人各个模块的功能调试和整机的系统调试后，我们将机器人运送至电厂进行真实的管道修复实验。实验的环境在电厂内部的普通厂房中，泄漏的管道为输送带有一定温度的自然供水的高压管道，管道直径为 38mm，泄漏点直径约为 2.8mm。图 6-12 为机器人执行管道修复任务的主要流程。

首先机器人正常启动之后，云台摄像头会正常启用，远程操作人员可以通过摄像头观察机器人周围环境的情况。操作人员通过远程遥控控制机器人规划路径上进行巡检，当发现有疑似泄漏的管道时，控制机器人到达管道附近。随后，机械臂连接上定位末端，通过深度学习的方法检测管道是否发生了泄漏，并精确地定位管道漏点地三维位置。完成管道漏点定位后，机械臂断开与定位末端地连接，并连接上修复末端，机械臂通过路径规划移动到前面计算得到的管道漏点位置，并在操作人员的监督下执行管道修复任务。最后，远程操作人员会评估管道修复的效果。具体的真实实验过程如图 6-13 至图 6-27 所示。

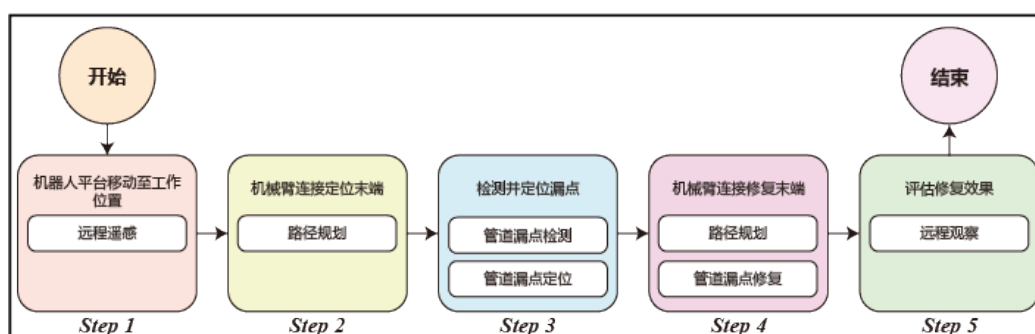


图 6-12 机器人工作过程



图 6-13 机器人到达工作位置



图 6-14 机械臂连接装载定位末端



图 6-15 管道泄漏检测并准备进行管道漏点定位



图 6-16 定位管道漏点



图 6-17 机械臂卸载定位末端



图 6-18 机械臂准备连接装载修复末端



图 6-19 机械臂运动过程



图 6-20 机械臂运动过程



图 6-21 修复末端打开夹爪

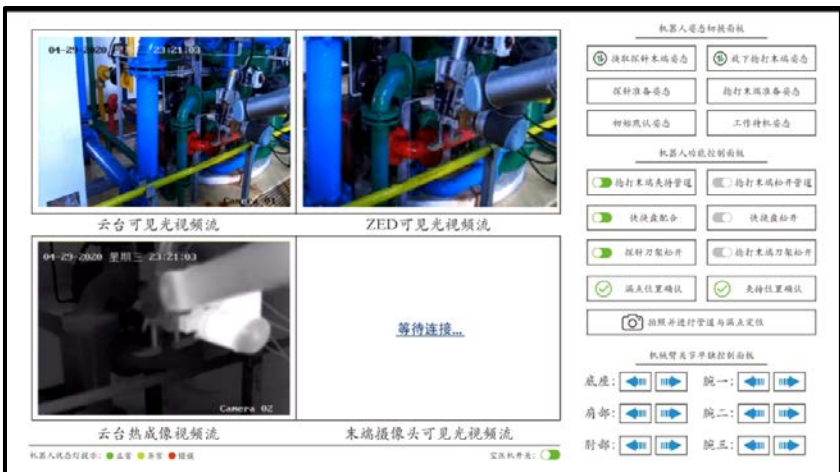


图 6-22 移动至管道漏点附近

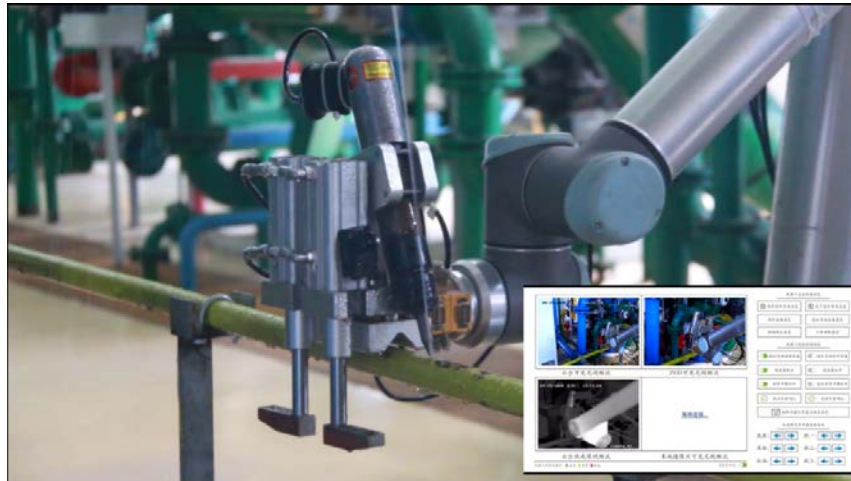


图 6-23 修复末端移动到漏点上



图 6-24 修复末端收紧夹爪



图 6-25 捻打气锤工作以修复管道



图 6-26 修复末端打开夹爪



图 6-27 修复完成后机器人离开

通过对管道修复任务整个过程的执行，管道的漏点能够被很好的修复，也充分体现了我们所设计的带压堵漏机器人能够满足管道堵漏的需求。在电厂的试验环境下，机器人在人工辅助的情况下，顺利地完成了任务，证明了带压堵漏机器人地可行性与先进性。

6.5 本章小结

在本章中，我们进行了多项实验与试验，来测试机器人以及各部分机器人功能地可靠性。我们不仅仅对于利用捻打工艺来实现管道修复的各项参数进行了讨论和研究以提升管道修复的质量，还对管道检测和定位这类提升机器人自动化性能的功能进行了深入的探讨和实验验证。最后，我们将机器人运送至电厂进行实地的管道

修复实验，在机器人执行任务的过程中，我们仍旧保留了一部分操作人员控制机器人的权限（例如在管道修复时对捻打位置做出略微的调整），以此更好地利用操作人员对于管道捻打工艺的理解以及相应的经验，这部分的能力恰恰是机器人本身所欠缺的。最后机器人能够在电厂环境下顺利地完成任务，不仅证明了我们所采用的漏点检测和定位方法的可靠性，更是证明了带压堵漏机器人的可行性与先进性。

第7章 总结与展望

7.1 总结

本课题是源自电力生产工业对于管道修复的需求，在针对该需求进行调研与分析的过程中，我们发现国内相关的职业认证的取消和管道带压修复的危险性都对这一工作提出了更大的挑战。随着机器人技术和人工智能的发展，在工业生产中许多类似的危险工作都可以使用机器人及无人系统来协助甚至自主完成，而带压管道修复作为一项具有挑战性和危险性的任务，但是却缺乏相关的技术研究和具体应用。因此，在发展机器人技术来应用于挑战性工作的浪潮中，利用专业的机器人来帮助完成带压管道修复工作是一个必然的趋势。

该论文针对工业生产中的带压管道修复工作，聚焦于利用机器人技术和人工智能技术来提升带压管道修复工作的自动化程度。为此，一款远程操作带压堵漏机器人被设计并应用于该任务，该机器人能够辅助操作人员进入带压管道泄漏环境来实施带压管道修复任务以取代传统的专业堵漏操作人员独自进行现场进行修复工作的方式。这不仅能够降低专业堵漏操作人员因操作失误造成的生命安全风险，还能提高带压管道修复效率和修复质量。

针对带压管道修复工作的自动化程度，我们将管道的整个修复流程分解为管道漏点的检测、管道漏点的定位以及管道泄漏修复。基于此设计了两种不同的机械臂末端执行器，并通过模块化设计一款带有机臂的移动机器人，这款机器人带有核心计算机以满足计算需求，带有通信装置来满足远程通信需求，搭载了不同的传感器以感知工作环境。本论文主要完成的工作点如下：

(1) 针对管道漏点修复整个过程中的管道漏点的检测、管道漏点的定位以及管道泄漏修复三个子任务分别进行分析，并指定制定的实现方案。并基于子任务制定相应配套硬件方案。其中，基于管道漏点的检测和管道漏点的定位这两个子任务设计并实现了定位末端，基于管道泄漏修复子任务设计并实现了修复末端；

(2) 根据管道漏点修复工作的实际工作场景设计了一款带有机臂的移动机器人，机器人上配套搭载了电源、核心计算机、电源、继电器、机械臂、空压机、各类气动电磁阀。介绍了机器人的硬件控制实现、通信实现和软件界面实现；

(3) 针对管道漏点的检测和管道漏点的定位这两个子任务，使用了 YOLO v3

算法来对管道漏点进行检测，并提出了一种基于卡尔曼滤波的多模态机器人手眼协同三维定位方法用于实现对管道漏点进行精确定位；

(4) 针对管道漏点修复的整个过程将机械臂的运动规划过程进行分解，提出了机器人的手眼协同系统。逐过程分别实现了对机械臂的精确控制，保证机械臂在执行任务的过程中不会碰撞管道及其他物体。基于 ROS 对管道漏点的检测、管道漏点的定位和管道漏点修复进行代码编写和部署。最终实现操作人员通过远程软件界面面对机器人执行管道修复任务的控制。

(5) 通过捻打倾角实验和管道修复实验来分析管道修复过程中的各类参数对于管道漏点修复质量和修复效率的影响，并基于实验结果对修复末端进行优化。通过管道漏点检测实验验证检测的可靠性；通过管道漏点定位实验分析影响定位误差的因素。最后在真实的管道泄漏环境中进行系统测试，验证了所设计的机器人系统的各项功能，证明了带压堵漏机器人的可靠性和先进性。

7.2 展望

在本论文中，在管道修复领域的首台带压堵漏机器人被设计并且实现，由于该机器人是一个完整的机器人系统，在设计、调试和实验中工作量十分巨大，因此在机器人的设计和实现中仍有提升空间。

(1) 该项目中对于机器人执行任务的控制流程出于安全性考虑仍旧未实现完全的自动化，在机器人执行的过程中需要专业的操作人员对各个控制节点进行启动，并且修复管道漏点时开放了对机械臂的位姿进行微调控制。在未来可以将专业的捻打修复工人的经验以知识提取的方式提升漏点修复的质量和效率，同时在大量的测试之后可以将机械臂的控制流程进行整合以提升自动化程度；

(2) 考虑到管道修复工艺的复杂度，本项目中只选用了捻打修复工艺，而在实际的使用中根据不同管道的不同泄漏情况选择不同的修复工艺，但机器人上要搭载不同的修复工具无疑会提升机器人的设计难度和机器人的性能要求。在未来的工作中可以优化管道修复的工艺和工具以适应不同的管道修复场景。

参考文献

- [1] Adegboye M A, Fung W-K, Karnik A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches [J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2548.
- [2] Wang W, Dong W, Su Y, et al. Development of search - and - rescue robots for underground coal mine applications [J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(3): 386-407.
- [3] Lin P, Li X, Long Z, et al. Pipeline Leak Detection, Location and Repair[C]. 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2021. p. 102-108.
- [4] Adams J A. Unmanned vehicle situation awareness: A path forward [C]. Human systems integration symposium. Citeseer, 2007. p. 31-89.
- [5] Schneider F E, Wildermuth D. An autonomous unmanned vehicle for CBRNE reconnaissance[C]. 2011 12th International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2011. p. 347-352.
- [6] Guzman R, Navarro R, Ferre J, et al. Rescuer: Development of a modular chemical, biological, radiological, and nuclear robot for intervention, sampling, and situation awareness [J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(7): 931-45.
- [7] 严荣松, 赵自军, 高文学, et al. 城镇燃气管道泄漏检测技术现状与展望 [J]. *煤气与热力*, 2021, 41(10): 27-9+37+46.
- [8] 付道明, 孙军, 贺志刚, et al. 国内外管道泄漏检测技术研究进展 [J]. *石油机械*, 2004, (03): 48-51.
- [9] Leis B, Francini R, Stulen F, et al. Real-time monitoring to detect third-party damage[C]. The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference. OnePetro, 1998.
- [10] 许诺, 邵倩倩, 王晓琪, et al. 长距离输气管道泄漏检测技术研究综述 [J]. *山东化工*, 2021, 50(14): 101-3+6.
- [11] 王雪亮, 苏欣, 杨伟. 油气管道泄漏检测技术综述 [J]. *天然气与石油*, 2007, (03): 19-23+1-2.
- [12] 张家梁, 张奋, 吴伟然, et al. 声波法在长输管道检漏中的实验研究 [J]. *辽宁化工*, 2013, 42(12): 1431-2+6.

- [13] 李炜, 朱芸. 长输管线泄漏检测与定位方法分析 [J]. 天然气工业, 2005, (06): 105-9+79.
- [14] 卢泓方, 吴晓南, Iseley T, et al. 国外天然气管道检测技术现状及启示 [J]. 天然气工业, 2018, 38(02): 103-11.
- [15] 沈英, 邵昆明, 吴靖, et al. 气体光学检测技术及其应用研究进展 [J]. 光电工程, 2020, 47(4): 16.
- [16] 孙启昌. 分布式光纤在管道泄漏检测中的应用 [J]. 石油化工自动化, 2011, 47(05): 54-7.
- [17] 郑小梅, 王荣昌, 张荣斌, et al. 分布式光纤测温系统在管道泄漏检测中的应用 [J]. 净水技术, 2020, 39(05): 69-74.
- [18] 马晓斌, 曾新定, 濮人强. Smartball 自漂流式检漏系统在输油管道的应用 [J]. 油气储运, 2010, 29(11): 839-40+797-8.
- [19] Du J, Li W, Lu K, et al. An overview of multi-modal medical image fusion [J]. Neurocomputing, 2016, 215: 3-20.
- [20] Chen H, Li Y, Su D. Multi-modal fusion network with multi-scale multi-path and cross-modal interactions for RGB-D salient object detection [J]. Pattern Recognition, 2019, 86: 376-85.
- [21] Huo J, Yu X. Three-dimensional mechanical parts reconstruction technology based on two-dimensional image [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2): 1729881420910008.
- [22] 胡忆洸. 带压密封技术规范讲座——带压密封技术发展简介 [J]. 润滑与密封, 2008, (02): 112-5.
- [23] 程世权, 邵建新, 吕瑞典, et al. 带压堵漏技术的研究现状与应用 [J]. 石油和化工设备, 2012, 15(03): 52-4.
- [24] 胡立. 带压堵漏技术的研究现状及应用 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2012, 29(05): 57-9.
- [25] Yeung Y F, Youcef-Toumi K. An In-Pipe Manipulator for Contamination-Less Rehabilitation of Water Distribution Pipes[C]. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020. p. 6390-6397.
- [26] Yeung Y F, Genevriere E, Youcef-Toumi K. Design of a mechanical sealing device for robotic water distribution pipe rehabilitation[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2020. p. V006T06A018.

- [27] Yeung Y F. Design of a robotic water-pipe rehabilitation [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2019.
- [28] Peng T, Dooks P. Concrete pipe leak repair without service Interruption [M]. Pipelines 2019: Condition Assessment, Construction, and Rehabilitation. American Society of Civil Engineers Reston, VA. 2019: 84-94.
- [29] Di Cesar Silva G, Georg Fink T, Almeida Bordieri P, et al. Structural reinforcement and leak sealing with composite materials[C]. Offshore Technology Conference. OnePetro, 2019.
- [30] Nokjib S, Pewkliang S, Theeradechphuwadol T. The development of economical clamp to repair expansion piping in regeneration gas system[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. OnePetro, 2018.
- [31] Batisse R. Review of gas transmission pipeline repair methods [M]. Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines. Springer. 2008: 335-49.
- [32] Tang Y, Lu L-S, Deng D-X, et al. Cold welding sealing of copper-water micro heat pipe ends [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 568-74.
- [33] Han H, Han B, Li L, et al. Research on welding technology of mechanical bimetallic composite pipe [J]. Electric Welding Machine, 2017: 07.
- [34] Yong T, Lu L-S, Deng D-X, et al. Cold welding sealing of copper-water micro heat pipe ends [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 568-74.
- [35] 李夏喜, 廖如超, 霍志刚, et al. 燃气管道导流式带压焊接堵漏技术 [J]. 油气田地面工程, 2016, 35(05): 104-6.
- [36] 罗强, 廖如超, 张海涛, et al. 燃气管道导流焊接式带压堵漏装置的研究 [J]. 煤气与热力, 2015, 35(10): 26-31.
- [37] Sun C, Mao D, Zhao T, et al. Investigate deepwater pipeline oil spill emergency repair methods [J]. Aquatic Procedia, 2015, 3: 191-6.
- [38] 赵建平, 高东民, 薛剑. 管道泄漏及带压堵漏夹具设计分析 [J]. 化工设计通讯, 2017, 43(05): 252+4.
- [39] Pavel A. Effectiveness of hermetically sealing a well casing pipe column with the seating of a dividing caulking on the restraining ring [J]. Mine, Pet Gaze;(Romania), 1980, 31(5).
- [40] 黄志明. 带压堵漏的关键技术 [J]. 福建化工, 2003, (03): 50-5.

- [41] Bown H. Sealing leaks by the furmanite process[J]. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association-June, 1981: 63.
- [42] Kumar S, Selvan S. Online inspection & clamping of large size steam Headers (52 & 48) to Mitigate Steam Leaks from Multiple Weld Seams in Utilities Piping Systems[C]. IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference. European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. p. cp-395-00051.
- [43] Maury H, Bris J, Gomez H, et al. Critical and comprehensive evaluation of high pressure pipeline rehabilitation methods and patents for seeking innovation trends [J]. Recent Patents on Engineering, 2018, 12(1): 46-55.
- [44] Shuttleworth F, Billington C. A new approach to designing repair clamps for offshore structures[C]. Offshore Technology Conference. OnePetro, 1989.
- [45] Porter P C. Composites? An effective repair alternative[C]. CORROSION 2002. OnePetro, 2002.
- [46] 解应涛, 陈利琼, 李云云. 一体式焊接截止阀的带压堵漏 [J]. 油气储运, 2015.
- [47] 闫杰, 常征, 孟烨, et al. 磁力组合式管道带压堵漏器的研制与应用 [J]. 油气储运, 2016, 35(11): 3.
- [48] 李鑫, 杨梅, 胡忆洧. 面向对象的带压密封夹具设计方法研究 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(08): 88-90+9.
- [49] 天津翔悦密封材料有限公司. 承压设备带压密封技术规范 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2011: 28.
- [50] 天津翔悦密封材料有限公司. 承压设备带压密封夹具设计规范 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2011: 36.
- [51] 天津翔悦密封材料有限公司. 承压设备带压密封剂技术条件 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2011: 12.
- [52] Tu S T, Chen X D. Higher pressure, more power and greater responsibility [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 139: 1-3.
- [53] 王沛霖. 共同攻克特种机器人技术难题 [J]. 机器人产业, 2021, (05): 2.
- [54] 杨学志, 余娴, 葛耀谋. 机器人产业标准发展现状 [J]. 机器人产业, 2021, (01): 20-6.
- [55] 谈士力. 面向 21 世纪:特种机器人技术的发展 [J]. 世界科学, 2001, (6): 2.
- [56] 张亚晨. 从标准化角度探究机器人及其分类 [J]. 家电科技, 2016, (6): 4.
- [57] 王树国, 付宜利. 我国特种机器人发展战略思考 [J]. 自动化学报, 2002, (S1): 7.

[58] 杨凡, 阮佳琪. 简述特种机器人发展趋势及国外发展的领域 [J]. 智能机器人, 2017, (3): 6.

[59] 孙良艳. 特种机器人标准现状调查与分析 [J]. 质量技术监督研究, 2018, (6): 5.

[60] 福建省特种设备检验研究院, 香港中文大学, 东南大学, et al. 特种机器人分类、符号、标志 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 16.

[61] 中机生产力促进中心, 香港中文大学, 南京市特种设备安全监督检验研究院, et al. 特种机器人术语 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 24.

[62] 中国农业大学, 苏州博田自动化技术有限公司, 北京机械工业自动化研究所. 锄草机器人安全要求 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 12.

[63] 中国农业大学, 苏州博田自动化技术有限公司, 北京机械工业自动化研究所. 锄草机器人通用技术条件 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 12.

[64] 中国农业大学, 苏州博田自动化技术有限公司, 北京机械工业自动化研究所. 锄草机器人性能规范及其试验方法 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 16.

[65] 中国科学院沈阳自动化研究所, 中国地震应急搜救中心, 中机生产力促进中心, et al. 地面废墟搜救机器人通用技术条件 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2019: 28.

[66] 北京机械工业自动化研究所, 广州数控设备有限公司, 北京理工大学. 工业机器人性能规范及其试验方法 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 1990: 72.

[67] 北京机械工业自动化研究所, 华南理工大学, 北京理工大学. 工业机器人性能规范及其试验方法 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 1990: 52.

[68] 北京机械工业自动化研究所有限公司, 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 科沃斯机器人有限公司, et al. 机器人服务机器人性能规范及其试验方法第 1 部分: 轮式机器人运动 [Z]. 国家市场监督管理总局;国家标准化管理委员会. 2020: 20.

[69] 常州先进制造技术研究所, 常州市生产力促进中心, 江苏牧羊控股有限公司, et al. 码垛机器人通用技术条件 [Z]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局;中国国家标准化管理委员会. 2017: 20.

[70] 上海交通大学, 浙江大学, 国家海洋标准计量中心. 轻型有缆遥控水下机器人第 1 部分: 总则 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 16.

- [71] 浙江大学, 杭州宇控机电工程有限公司, 国家海洋标准计量中心, et al. 轻型有缆遥控水下机器人第 2 部分: 机械手与液压系统 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 12.
- [72] 浙江大学, 杭州宇控机电工程有限公司, 国家海洋标准计量中心, et al. 轻型有缆遥控水下机器人第 3 部分: 导管螺旋桨推进器 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 12.
- [73] 上海大学, 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋标准计量中心, et al. 轻型有缆遥控水下机器人第 4 部分: 摄像、照明与云台 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2018: 12.
- [74] 东南大学, 南京市特种设备安全监督检验研究院, 福建省特种设备检验研究院, et al. 运动康复训练机器人通用技术条件 [Z]. 国家市场监督管理总局;中国国家标准化管理委员会. 2019: 20.
- [75] 陈雨雪, Chen, Yu-Xue, et al. 中美特种机器人标准现状调查与分析 [J]. 质量技术监督研究, 2017, (6): 24-26.
- [76] 陈文钊. 电厂带压堵漏机器人的设计与实现 [D]. 汕头大学, 2020.
- [77] 李萌. 燃气管道泄漏检测技术的现状及发展 [J]. 化工管理, 2021, (14): 132-3.
- [78] 黎键. 石油天然气长输管道的泄漏检测以及定位技术措施 [J]. 石化技术, 2021, 28(09): 105-6.
- [79] 韩宝坤, 何景涛, 王金瑞, et al. 天然气管道泄漏声学检测及定位方法 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(05): 58-64+146.
- [80] Guo Y, Liu Y, Oerlemans A, et al. Deep learning for visual understanding: A review [J]. Neurocomputing, 2016, 187: 27-48.
- [81] Shrestha A, Mahmood A. Review of deep learning algorithms and architectures [J]. IEEE Access, 2019, 7: 53040-65.
- [82] Zhao Z-Q, Zheng P, Xu S-T, et al. Object detection with deep learning: A review [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(11): 3212-32.
- [83] Voulodimos A, Doulamis N, Doulamis A, et al. Deep learning for computer vision: A brief review [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018.
- [84] O'mahony N, Campbell S, Carvalho A, et al. Deep learning vs. traditional computer vision[C]. Science and information conference. Springer, Cham, 2019. p. 128-144.
- [85] 余硕, 赵丹丹, 吴凯旋. 天然气管道设备泄漏堵漏研究 [J]. 技术与市场, 2018, 25(09): 117+9.

- [86] 韩伟. 浅谈带压焊接精准堵漏方法 [J]. 价值工程, 2020, 39(19): 148-9.
- [87] 王丽梅. 埋地长输管道泄漏事故应急关键技术研究 [D]; 北京工业大学, 2012.
- [88] 胡东. 埋地输油管道泄漏事故应急关键技术研究 [D]; 北京工业大学, 2014.
- [89] 孙明洁, 戴子勤. 基于捻缝技术的高压设备不停电堵漏探讨 [J]. 电力与电工, 2009, 29(03): 31+53.
- [90] 梁井梅. 自来水管带压作业施工技术研究 [J]. 智能城市, 2019, 5(24): 54-5.
- [91] 段仲静, 李少波, 胡建军, et al. 深度学习目标检测方法及其主流框架综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 59-74.
- [92] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 38(1): 142-58.
- [93] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6): 1137-49.
- [94] Girshick R. Fast R-CNN[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2015. p. 1440-1448.
- [95] Redmon J, Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement [J]. arXiv preprint arXiv:180402767, 2018.
- [96] Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.
- [97] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. p. 779-788.
- [98] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. Ssd: Single shot multibox detector[C]. European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016. p. 21-37.
- [99] Ju M, Luo H, Wang Z, et al. The application of improved YOLO V3 in multi-scale target detection [J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3775.
- [100] Zhang M, Zhao W, Li H, et al. Research on the application of deep learning YOLOv3 in aerial patrol inspection of optical cable lines[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. p. 032068.
- [101] Li Y, Hu J, Ji B. Research on small target recognition technology based on deep learning[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. p. 022119.

- [102] Lin T-Y, Maire M, Belongie S, et al. Microsoft COCO: Common objects in context[C]. European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2014. p. 740-755.
- [103] Zhang S, Benenson R, Schiele B. Citypersons: A diverse dataset for pedestrian detection[C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. p. 3213-3221.
- [104] 刘洪江, 王懋, 刘丽华, et al. 基于深度学习的小目标检测综述 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(08): 1429-42.
- [105] 曹鹤元. 基于卡尔曼滤波和神经网络的金融时间序列分析与预测 [D]; 中山大学, 2011.
- [106] 李春辉, 马健, 杨永建, et al. 低复杂度自适应容积卡尔曼滤波算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 716-24.
- [107] 李建勇, 刘雪梅, 李雪霞, et al. 基于 ROS 的开源移动机器人系统设计 [J]. 机电工程, 2017, 34(2): 205-8.

硕士期间取得的学术成果

已录用的学术论文:

[1] Lin P, Li X, Long Z, et al. Pipeline Leak Detection, Location and Repair. 2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2021: 102-108.

[2] 范衡,朱贵杰,李文姬,游煜根,李晓明,林培涵,辛斌.进化计算在复杂机电系统设计自动化中的应用综述[J].自动化学报,2021,47(07):1495-1515.DOI:10.16383/j.aas.c190767.

[3] 范衡,李晓明,郭谊,王诏君,李文姬,林培涵,马培立,朱贵杰,李恪,李兵,朱晓敏,包卫东,辛斌.基于在线调整的群体聚合形态动态生成方法[J].流体测量与控制,2021,2(03):1-8.

已授权实用新型专利:

[4] 范衡,龙周彬,林培涵,李晓明,马培立,陈文钊,叶志豪,黄铭威,李建立.一种集成视觉与压力反馈的带压堵漏末端执行器[P].广东省:CN214745029U,2021-11-16.

[5] 范衡,朱贵杰,林培涵,叶志豪,何伟源,李建立,黄铭威,姜志成,钟铸威,李晓明,马培立.一种捻打堵漏的机械臂末端执行器[P].广东省:CN214560994U,2021-11-02.

[6] 范衡,朱贵杰,马培立,何伟源,叶志豪,黄铭威,李建立,李晓明,林培涵,姜志成,钟铸威.一种齿轮式机械臂末端执行器[P].广东省:CN214744153U,2021-11-16.

已申请发明专利:

[7] 范衡,林培涵,陈梓泓,王诏君,李晓明,龙周彬,董朝晖,马培立.一种无中心机器人集群包围任务控制方法及系统[P].广东省:CN112527012A,2021-03-19.

[8] 范衡,林培涵,马培立,王琛,宁为博,李晓明,王诏君,李文姬.一种群体机器人的多目标搜索与围捕控制方法及系统[P].广东省:CN112684700A,2021-04-20.

[9] 范衡,马培立,林培涵,李晓明,朱贵杰,王诏君.一种带压堵漏机器人的漏点定位自主控制方法及系统[P].广东省:CN112571425A,2021-03-30.

[10] 韦家弘,范衡,林培涵,朱贵杰,马培立,黄文宁,李晓明,龙周彬.基于进化神经架构搜索的眼底图像视网膜血管分割方法[P].广东省:CN112258486A,2021-01-22.

[11] 范衡,李晓明,龙周彬,林培涵,马培立,韦家弘,姜志成,何伟源,钟铸威. 一种带压堵漏机器人自主漏点定位方法[P]. 广东省: CN113001559A,2021-06-22.

[12] 朱贵杰,马培立,范衡,李晓明,林培涵,韦家弘,黄文宁,叶志豪,李建立,黄铭威. 一种基于 U 型编码解码器神经网络的道路裂缝检测方法 & 系统[P]. 广东省: CN112785578A,2021-05-11.

[13] 马培立,范衡,李晓明,林培涵,朱贵杰. 一种基于人群密度估计的指引机器人方法及系统[P]. 广东省: CN112731919A,2021-04-30.

[14] 范衡,马培立,朱贵杰,林培涵,李晓明. 一种行人轨迹预测和跟随的机器人方法及系统[P]. 广东省: CN111708042A,2020-09-25.

[15] 王宏民,朱贵杰,范衡,林培涵,李晓明,马培立,陈文钊,游煜根. 管道漏点定位装置、带压堵漏装置及管道漏点定位方法[P]. 广东省: CN111022936A,2020-04-17.

[16] 马培立,朱贵杰,范衡,李晓明,林培涵. 一种混合注意力机制的眼底图像视网膜血管分割方法[P]. 广东省: CN112132817A,2020-12-25.

[17] 范衡,李晓明,王诏君,王柳,黄华兴,林培涵,马培立,龙周彬. 基于基因调控网络的群体机器人动态围捕控制方法及系统[P]. 广东省: CN112462779A,2021-03-09.

[18] 范衡,马培立,王诏君,石泽,蔡埴伟,李晓明,林培涵,李文姬. 一种基于群体机器人的目标围捕控制方法及系统[P]. 广东省: CN112527020A,2021-03-19.

[19] 朱贵杰,韦家弘,范衡,马培立,黄文宁,李晓明,林培涵,叶志豪. 基于遗传算法和 U 型神经网络的道路裂缝分割的方法[P]. 广东省: CN112257622A,2021-01-22.

致谢

本论文的完成以及项目的顺利进行得益于许多人给予我的指导与帮助，首先我十分感谢我的指导老师范衡教授，他在项目的推进过程中不断地提出建议和意见，正是他的倾囊相授才使得项目能够达到现在的水平。在论文的撰写过程中范衡老师也不时地以其严谨的学术态度和严格要求来督促我不断完善这篇论文，再次对范衡老师的教导表示由衷感谢。

研究生的三年对我来说是一个自我提升的重要阶段，在这三年中我不仅仅是负责了本论文中的项目，还参与了实验室中许许多多的项目。在这些项目的磨砺中，有许多实验室的同学陪伴共同推进和合作，才能够使得各个项目在每个人的努力下不断完善。在这里要感谢实验室中的李同学、龙同学、马同学以及好伙伴兼室友的韦同学。感谢这些同学在科研上和生活上的帮助与支持，祝各位在未来的日子一帆风顺。

在这个项目中，我倾注了无数的日夜于其中。在项目的推进过程中，也曾遇到许多挫折，无论是冬日中被管道中的水柱溅得浑身都湿漉漉，还是在夏日下顶着烈日修复管道，抑或是面对工人围观中谈吐“机器人抢饭碗论”的冷嘲热讽，我还是仍旧砥砺前行。应用研究于技术研究是科学重要的组成部分，愿机器人技术能够继续腾飞发展，为人类创造更美好的生活。

无论是本课题在进行方案制定及设计实验的过程中还是撰写论文的过程中，都阅读并且参考了许多文献、专利及书籍，并在论文中引用了部分资料。谨向这些书刊资料的作者表示衷心的感谢！