



汕 頭 大 學

SHANTOU UNIVERSITY

硕 士 学 位 论 文

题 目 电厂带压堵漏机器人的设计与实现

英文题目 Design and Implementation of Online
Leak Sealing Robot in Power Plant

姓 名 陈文钊 学 号 111709027

所在学院 工学院 导师姓名 范 衡

专 业 信息与通信工程

入学日期 2017 年 9 月 答辩日期 2020 年 6 月

学位论文原创性声明和学位论文授权声明

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：_____年____月____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：_____年____月____日 日期：_____年____月____日

摘要

带压堵漏，是指在有连续化生产需求的工业行业中，如电力行业，化工行业等。为了不影响生产，而采取的在特种设备带压力工作状态下进行管道泄漏修复的一种技术。带压堵漏技术涉及的方法和工具众多，现场实际情况的变化和泄漏特点对执行方案的选择影响极大，传统采用人工堵漏时，现场操作工人需要具备丰富的操作经验和足够的现场应变能力，否则操作不当很可能会导致严重的操作工人伤害或设备损坏等情况。

针对该特殊场景及以上问题，该论文设计并实现了一款针对电厂带压堵漏场景的远程操作机器人，旨在使用该机器人取代传统堵漏操作工进入现场作业，一方面可以使得操作人员远离泄漏现场，降低伤亡风险；其次是可以借助机器人技术提高带压堵漏的修复质量及效率；最后是通过模块化设计，可以使得该款机器人在不同的堵漏技术中灵活切换，提高了其应用的广泛性和普适性。本课题主要的研究内容及工作如下：

（1）针对华能海门电厂内部分高温输水管道泄漏的场景，设计了一款结合履带平台和六自由度机械臂的复合型机器人，机器人本体搭载有热成像摄像头、立体摄像头等传感器用于对泄漏管道进行建模和泄漏位置定位；机械臂末端配套多种执行器，用于执行人工泄漏定位和捻缝堵漏作业。同时为了方便观察和操作，该论文还设计了一款可视化软件用于控制机器人进入现场，完成观察、定位及堵漏等操作。

（2）该论文还设计了一种用于泄漏管道的三维重建方法，通过人工标记作业管道及泄漏点在二维图像上的位置，对二维图像上已标记的像素点进行深度信息提取，最后通过最小二乘法剔除离中心拟合较远的噪声点，重建管道在机械臂坐标下的三维姿态。这个方法可使机器人在人类经验下识别并标记泄漏的位置，是带压堵漏机器人自动化作业的重要基础。

（3）带压堵漏机器人在华能海门电厂的模拟泄漏现场进行大量的实验和调试，对管道修复过程中出现的问题，采取了一些有针对性的解决措施，提高了机器人在实际堵漏过程中的效率和实用性。整个带压堵漏机器人，在操作工人的远程控制下可以很好地完成进入现场，观察管道，修复泄漏位置等一系列任务，证明了机器人的有效性。本文设计的带压堵漏机器人，属于国内外该领域第一台实验性样机，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；特种机器人；移动操作机器人；远程操作；管道三维重建；

Abstract

Online leak sealing refers to industrial industries that require continuous production, such as the power industry and the chemical industry. In order not to affect production, a technique is adopted to repair pipeline leaks with special equipment under pressure. There are many methods and tools involved in the online leak sealing. The changes in the actual situation on site and the characteristics of the leak have a great impact on the selection of the implementation plan. When manual repairing is used traditionally, the field operators need to have rich experience and sufficient on-site strain ability, otherwise improper operation is likely to lead to serious operator injuries or device damage.

Aiming at this special task and the above problems, this paper designs and implements a remote operation robot for online leak sealing tasks in power plant scenarios. The purpose is to use this robot to replace traditional operators to enter the field. On the one hand, it can keep operators away from the leaking field, reducing the risk of injury and death; secondly, the use of robotics technology can improve the quality and efficiency of this task; finally, through the modular design, this robot can be flexibly switched between different plugging technologies, which improves its application Extensive and universal. The main research contents and work of this subject are as follows:

(1) Aiming at the leakage of some high-temperature water pipelines in Haimen Power Plant, a mobile manipulator robot combining a crawler platform and a six-degree-of-freedom manipulator was designed. The robot is equipped with sensors such as thermal cameras and stereo cameras for leak detection, pipeline modeling and leak location; multiple actuators at the end of the manipulator are used to perform leak location and sealing operations. At the same time, in order to facilitate observation and operation, this paper also designed a visualization software for remotely controlling the robot to enter the scene to complete the operations of observation, positioning and sealing.

(2) The paper also designed a three-dimensional reconstruction method for leaking pipelines. By manually marking the positions of the operating pipelines and leaking points on the two-dimensional image, the depth information extraction of the marked pixels on the two-dimensional image was performed. Finally, the least square method is used to eliminate the noise points that are far from the center and reconstruct the three-dimensional pose of the pipeline in the coordinates of the manipulator. This method enables the robot to identify and mark the location of the leak under human experience, which is an important basis for the automated operation of an online leak sealing robot.

(3) A large number of experiments and debugging of the online leak sealing robot were performed at the simulated leaking field of Haimen Power Plant. For the problems occurred in this process, some targeted measures were taken to improve the robot's actual leak-sealing process efficiency and practicality. Under the remote control of the operator, the entire online leak sealing robot can complete a series of tasks such as entering the site, observing the pipeline, and repairing the leak, which proves the effectiveness of the robot. The online leak sealing robot designed in this paper belongs to the first experimental prototype in this field at home and abroad, and is suitable for promotion in the industrial industry with related requirements. It has certain guiding significance for the future research and design and realization of similar automatic operation of online leak sealing robots.

Keywords: Online Leak Sealing; Special type robot; Mobile manipulator; Remote operation; 3D reconstruction of pipeline;

目 录

摘要	I
Abstract	II
目 录	IV
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	3
1.2.1 带压堵漏研究现状	3
1.2.2 特种复合机器人研究现状	7
1.3 本文的主要研究内容	13
第 2 章 带压堵漏机器人总体方案设计	14
2.1 项目中管道泄漏的定义及性质	14
2.2 带压堵漏工艺分析及选型	14
2.3 电厂带压堵漏任务需求分析	15
2.4 带压堵漏机器人总体方案设计	16
2.5 本章小结	17
第 3 章 带压堵漏机器人本体硬件设计与实现	18
3.1 带压堵漏机器人硬件设备选型及设计	18
3.1.1 机械臂捻打末端	18
3.1.2 机械臂探针末端	21
3.1.3 摄像头传感系统	22
3.1.4 移动平台及机械臂	25
3.2 带压堵漏机器人电气设计及实现	27
3.3 带压堵漏机器人气路设计及实现	31
3.4 带压堵漏机器人通信设计及实现	32
3.5 带压堵漏机器人整机硬件	34
3.6 本章小结	37
第 4 章 带压堵漏机器人控制端软件设计与实现	39
4.1 软件总体分析描述	39
4.2 人机交互界面的设计	39
4.3 图像回传程序的设计与实现	41
4.4 控制程序的设计与实现	44

4.5 本章小结	48
第 5 章 基于最小二乘法的管道三维重建	50
5.1 管道三维重建的意义	50
5.2 基于最小二乘法的管道三维重建法	50
5.3 本章小结	55
第 6 章 电厂模拟泄漏环境的运行与测试	57
6.1 整机运行与测试	57
6.2 带压堵漏功能的运行与测试	63
6.3 本章小结	71
第 7 章 总结与展望	73
7.1 总结	73
7.2 展望	74
参考文献	75
攻读学位期间主要研究成果	80
致谢	81

第 1 章 绪论

1.1 课题背景与研究意义

在现代电力工业生产中，输气输水容器和管道必不可少，其生产过程中由于各种原因会产生破损甚至泄漏，而在管道或容器持续泄漏的情况下容易导致设备发生不可修复的损坏和重大人员伤亡，类似事故仍时有发生。2016 年 8 月 11 日下午，湖北省宜昌当阳市马店矸石发电有限责任公司 50MW 热电联产项目在出产调试过程中，高压蒸汽管道突然爆裂，导致 540 摄氏度的蒸汽大量外泄，击碎中控室玻璃窗，如图 1-1 所示。事故共造成 22 人死亡，4 人烫伤。2017 年 9 月 8 日下午，位于厦门市海沧区翁角路和新美路转角处星鲨制药（厦门）有限公司围墙外，厦门国贸中顺环保能源股份有限公司新阳热电事业部阳光西路供热管线星鲨制药支线，输送高温高压蒸汽的管道发生泄漏，蒸汽冲出造成 3 人死亡、2 人受伤。2017 年 12 月 23 日下午，位于浙江嘉兴南湖区新丰镇的嘉兴市富欣热电有限公司的 1 号炉主蒸汽管道至减压减温站支管处发生爆裂事故，如图 1-2 所示，导致 9 名员工不同程度受伤。其中 5 名伤员经医院抢救无效死亡。



图 1-1 湖北当阳电厂爆炸事故现场照片

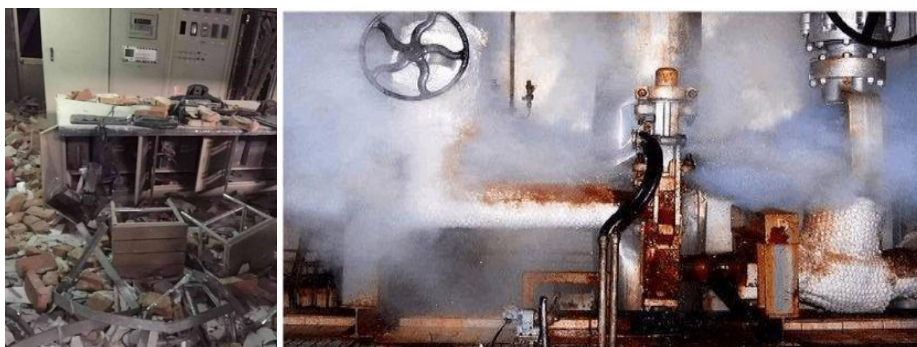


图 1-2 浙江嘉兴富欣热电厂锅炉蒸汽管道爆裂事故现场照片

对于像电力生产这样的流程工业来说，生产系统启动并达到稳态运行是一个耗时且复杂的过程。因此，流程工业中让机组停机或重启都会造成较大的经济损失。然而在实际生产过程中，机组中的管道却会由于各种因素造成破损泄漏，并影响整

个系统的可靠性，甚至会威胁到人员生命安全。

带压堵漏，也叫带压密封、在线密封，英文为 online leak sealing^[1]，是指在有连续化生产需求的工业行业中，如电力行业，石油化工行业等。为了不影响生产，而采取的在特种设备带压力工作状态下进行管道泄漏修复的一种技术；该技术属于不停产检修技术的一种，其更准确的技术定义是指：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。带压堵漏技术涉及的方法和工具众多，现场实际情况的变化和泄漏特点对执行方案的选择影响极大，传统采用人工堵漏时，现场操作工人需要具备丰富的操作经验和足够的现场应变能力，否则操作不当很可能会导致严重的人员伤亡或设备损坏等情况^[2]。传统采用人工堵漏时，现场操作工人需要具备丰富的操作经验和足够的现场应变能力，如图 1-3 所示。带压堵漏机器人项目，意在使用机器人取代或协助操作工人进行带压堵漏操作，一方面可以保证人员安全，另一方面借助机器人技术提高带压堵漏的修复质量以及修复效率。同时，中国已在 2016 年（国发[2016]68 号）取消了带温带压堵漏工的资格认证。带温带压堵漏工种无法产生新的就业人员，同时国内电厂数量多，带压堵漏市场巨大，并会因为堵漏专业工人的日益减少而成为急需解决的市场难题。可见，通过机器人换人，机器人协助人进行带压堵漏作业是一种必然的趋势。



图 1-3 传统带压堵漏作业现场照片

1.2 国内外研究现状

1.2.1 带压堵漏研究现状

带压堵漏技术起源于国外，在 19 世纪 20 年代，英国弗曼奈特工业维修服务公司成立，并率先提出带压堵漏的概念，该公司认为这是一种先进且有效的泄漏设备维修方法，具有非常好的应用前景。初期带压堵漏技术只能处理压力 1MPa，温度 200 度以下，化学性质较稳定的蒸汽类介质泄漏的问题^{[3]112}。随着在后续实际修复过程中的不断改进和研发应用，证实了该技术在处理泄漏问题上的有效性及优越性^{[18]52}。

随着工业技术的发展，带压堵漏技术在 19 世纪 60 年代开始在英国、德国、法国等发达国家得到了大量应用和迅速发展。1972 后，该技术在理论和实践上都得到了很大提高，从一开始的只能封堵少量的非高温高压泄漏介质到可以封堵介质类型达 300 余种，适应的温度范围也变成了从-195 度到 900 度，压力范围从真空到 60MPa^{[18]53}。这些带压堵漏技术的提高得益于封堵介质、夹具设计及密封剂等研究水平显著提高，用于堵漏的夹具开始呈现多样性和针对性，新研发的密封剂也能承受更苛刻的泄漏条件。进入 20 世纪末，带压堵漏技术的应用范围迅速得到扩大，几乎涉及到所有的流体输送和贮存工业领域，并在石油化工、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，各种各样的专用夹具设计、密封材料及堵漏技术也被提出^{[3]115 [4-8]}。

大多数的泄漏问题中，夹具都是最常用和最有效的手段。改进夹具的设计使其具有更优的堵漏性能是必然的发展趋势。针对实际生产中使用的法兰存在间隙不均匀、偏心、缩径等安装加工缺陷的情况，文献[9]提出了一种基于现有带补偿的增强型密封夹的新型垫片法兰夹紧器设计，可以有效解决上述安装加工缺陷；文献[10]提出适用复合材料代替传统金属制造夹具的方法，复合材料具有重量轻、密度比水小，耐腐蚀等优良性能，实验证明在室温、65 度、80 度等三个温度条件下，复合材料夹具均能承受 10.5MPa 的设计压力；类似的，如图 1-4 所示，文献[11]提出使用一种独特设计的树脂注入到复合材料夹具中，在夹具的强度和鲁棒性得到保留的前提下，提供了轻量级和耐腐蚀的好处；

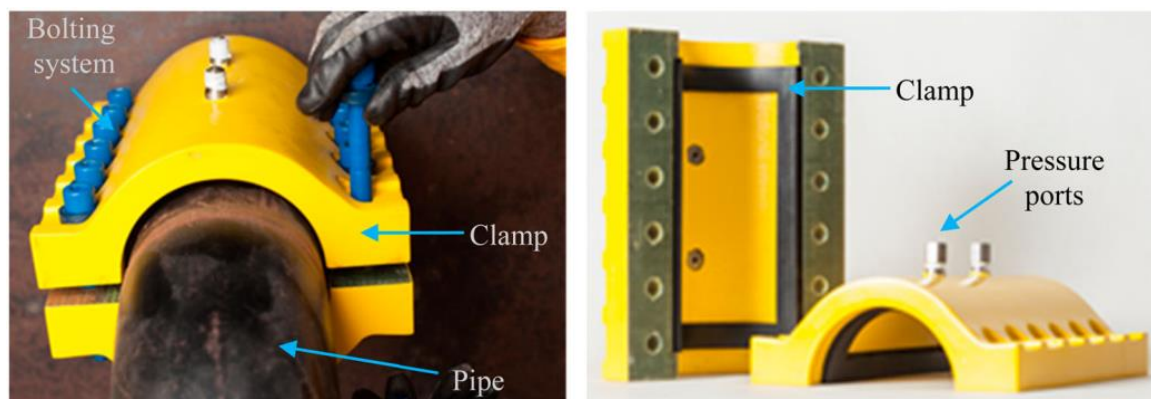


图 1-4 注入树脂的复合材料夹具

在密封材料方面，报告[12]表明环氧树脂涂层可以有效解决高压空气运输管道的泄漏问题，在用户要求的流量和压力不变情况下减少了能源的消耗；文献[13]阐述了压力活化密封剂用于修复阿拉斯加油田中的异常泄漏点的案例，表面该方法相对于传统的钻机修井法，可以用更低处理成本完成修复任务；如图 1-5 所示，文献[14]描述了如何用高性能高分子复合材料解决海上石油平台上由于海水运输对管道造成的腐蚀泄漏问题，结果表明使用该材料可以在不停产状态下实现修补 24 小时后的 100%密封状态。类似的，文献[15]提出使用纤维增强聚合物来修复腐蚀性管道泄漏

压力容器行业的发展也对堵漏方法提出了更高的要求，文献[16]首次将血小板技术用于带压堵漏行业中，血小板技术是一种新型的在带压管道中进行定位和密封的方法。它是基于远程注入小型机械物体到生产线上，然后这些流体被输送到泄漏点并形成密封，从而堵住泄漏点的流动。通过在这些小型机械物体上添加示踪剂，还可以起到定位的作用；在传统的泄漏围堵措施的基础上，文献[17]提出了两种类型的堵漏装置及相应的方法，一种是管道内密封气囊快速充气，实现管道内部的封闭，适用于供热、供水、化工管道等；另一种是管道的外漏密封气囊，以倾斜叠加的带式胶层安装在管道外面，气囊充气时膨胀使得气囊中的气垫相互挤压，对管道泄漏进行快速封堵。



图 1-5 使用高性能高分子复合材料进行海水管道泄漏修复的过程

相较于国外带压堵漏技术的快速起步和发展,我国带压堵漏方法的研究起步较晚。20 世纪 50 年代末我国工人利用焊接技术对具有可焊接性金属承压设备上出现的泄漏缺陷进行带压补焊,逐步形成了“带压焊接密封技术”;进入 70 年代,随着合成胶粘剂工业的迅速发展,“带压粘接密封技术”顺势诞生,并逐步形成了带压填塞粘接法、顶压粘接法、紧固粘接法等。但上述方法均有一定的局限性,无法完全满足工业生产中的修补需求。70 年代末期,国内开始大规模引进国外的先进技术的设备,英国弗曼奈特公司采用的带压密封技术也给了国内相关行业的很大启发。1980 年我国发表第一篇关于在带压条件下实现密封的论文《设备、管道泄漏的密封堵漏技术》,该文详细阐述了带压密封技术的基本原理,提出了在带压条件下消除泄漏的工艺途径和方法,揭开了我国带压密封技术研究走向工业实用化途径的序幕^{[3][14]}。1986 年兰化研究院在这基础上成功研发形成一套完整的带压堵漏技术方案^{[18]52},此后带压堵漏技术在我国发展迅速,在如发电厂^[19]、冶金^[20]、燃气^[21]、石油产业^[24]、给水排水^[25]等行业的推广应用愈发广泛,成功消除各类泄漏事故达 50 多万起,避免了几十万起火灾、爆炸、中毒及环境污染等恶性时间的发生,挽回各种经济损失达 600 多亿,具有非常积极的经济和社会效益^[27]。

综观当前各种堵漏技术,比较成熟的堵漏技术有手工填塞堵漏、钢带拉紧、快速捆扎、低压粘接、注剂式密封、焊接堵漏、袋式充气堵漏、磁压堵漏、带压开孔

封堵和真空堵漏技术等^{[2][28]}。虽然这些带压堵漏技术手段已经走过几十年历程，从技术到装备都相对完善和成熟。但带压堵漏技术仍然受到诸多实际问题的困扰，操作工所面对的压力容器目前来说仍是一种处于极端工况的作业环境，其还有非常多需要研究和克服的问题^[29]，带温带压堵漏操作总体上还是一项准备烦琐、危险性大、专业性强的任务。

目前国内外的带压堵漏技术都朝着单一化、简单化、标准化、智能化和自动化等方向进行发展和研究，目前已有的研究大多在标准化和智能化上，如全国锅炉压力容器标准化技术委员会与各相关单位合作完成的各种国标规范文件《承压设备带压密封技术规范》^[30]、《承压设备带压密封夹具设计规范》^[31]等；在智能化方面，文献[32]提出的面向对象的带压堵漏夹具设计方法，可以根据泄漏介质温度、压力以及现场实际测绘等数据参数，由软件完成夹具设计计算，初步实现了夹具设计的智能化；文献[33]提出一种承压设备带压密封夹具智能化设计系统，包括图纸信息管理、参数计算、图纸处理等模块，提供了可视化的操作界面和使用方法，初步实现了带压堵漏夹具设计的信息化和图纸文件处理的自动化。如图 1-6 所示，上海消防研究院设计了一套多功能带压应急堵漏模拟训练装置，可以让消防人员提前熟悉了解低温和常温压力罐车的主要泄漏方式和来源，以及各种堵漏工具的操作方法和适用对象^[34]。该装置除了可以提高消防队处理危险品泄漏事故的能力，还可以成为机器人远程完成堵漏作业的测试环境和模拟现场，具有很高的实用价值。



(a) 带压堵漏训练装置实物图



(a) 带压堵漏训练装置远程控制界面

图 1-6 多功能带压应急堵漏模拟训练装置实物图 (a)，远程控制界面 (b)

但从已有的文献资料及实际应用项目来看，关于带压堵漏作业过程中的智能化和自动化，目前尚未有公开的研究成果支持，国内外尚处于空白阶段。

1.2.2 特种复合机器人研究现状

随着科技水平的不断提高，越来越多机器人技术开始应用于各行各业。虽然尚未有用于带压堵漏作业的智能机器人。但类似于电厂泄漏问题这样的特殊场景，却已经有一批机器人投入使用，他们一般在我国被归类为特种机器人，国外称为先进机器人（advanced robot）。相比于传统在结构化环境下的工业机器人，特种机器人与环境的交互作用更加复杂，控制更加困难，在本体设计和智能化程度等方面提出了更高的要求^[35]。特种机器人一般需要在特殊环境下为人类服务，这些环境一般对于人类来说难以涉足或者存在一定的危险性，专业人员可以通过远程控制机器人进入场地完成自主作业^[36]。按照机器人的使用空间上来说，可分为地面、地下、水下、空中及空间机器人等；按照使用场景及功能来分类，可以归结采掘、巡检、维修、搜救、运输、治疗等等^[37]；目前在具有高危险性的环境下研究及应用比较多的特种机器人有消防灭火机器人、排爆机器人、还有新冠肺炎疫情中投入使用的消杀防疫机器人等等。表 1-1 给出了不同行业对特种机器人的需求程度和已实用或接近使用的特种机器人。

表 1-1 不同行业对特种机器人的需求程度和已实用化的特种机器人^{[35][37]}

产业	行业	已实用或接近实用化的特种机器人	需求程度
第一产业	农业	谷物、棉花、蔬菜（西红柿、黄瓜等）、水果的收获、嫁接、移植、喷洒农药、除草等	大
	林业	剪枝、喷洒农药、除草等	中
	畜牧业	挤奶、剪毛、屠宰加工、割草	中
	渔业	屠宰加工	小
第二产业	矿业	采矿机器人、水下机器人	大
	建筑	高层建筑抹灰机器人、预制件安装机器人、室内装修机器人、地面磨光机器人、擦玻璃机器人	大
	土木	隧道工程用机器人	大
	能源	核电站、输电线、变电站检查机器人	大
	油、汽、水	管道挖掘和埋设机器人、管道清理、维修机器人	大
第三产业	零售业	搬运机器人、清扫机器人	中
	旅馆、饭店	保安机器人、清扫机器人、饭菜运送机器人	中
	交通、运输、通信	飞机清扫机器人、汽车加油机器人、海底电缆、管道敷设机器人和检查机器人	大
	金融	金融服务咨询机器人	小
	房地产、租赁	楼宇清扫机器人	小
	公共事业与国防	消防机器人、保安机器人、防爆机器人、爆炸物处理机器人、排雷机器人、野外快速巡逻机器人	中
	教育	启蒙教育机器人	小
	医疗、护理、保健	辅助外科机器人系统、腹腔诊断机器人、护理机器人、导盲机器人、送药机器人	大
	社区服务	保安机器人	中
	家庭服务	草坪修剪机器人、清扫机器人、公共场所	大

无论是服务机器人、特种机器人还是工业机器人，底盘的移动平台都是非常重要的本体结构。现有的地面特种机器人从移动平台的结构及运动形式可以分成轮式、履带式、足式及其他结构^[38]。轮式移动平台具有结构简单，控制方便，运动稳定，消耗能量低等特点，其一般应用在较为平坦的地面上^[39]；履带式结构底盘由主动轮驱动，带动柔性链环进行运动，对比轮式结构可以适应更复杂的地形环境，在高低不平、宽壕陡坡等地面情况下都能有较为稳定出色的运动能力^[41]；足式结构往往从生物学角度出发，设计出仿人的双足结构^[43]或者仿野生动物的多足结构^[44]，其能适应更复杂苛刻，如自然灾害后的地形环境，但其控制方式最复杂，设计费用也最为昂贵，所以目前多用于实验室产品上；其他一些特种机器人还包括了轮足式^[46]、履带轮式等复合机构，这些机构结合了前三者各自的一些优点，使其能够在不同的地形环境中切换或者共同工作，获得更稳定的运动性能和更强大的地形适应能力。图 1-7 至图 1-10 分别

展示了上述轮式、履带式、足式和复合式等底盘运动类型的机器人应用。



图 1-7 轮式机器人应用，物流机器人（左），AGV 机器人（中），三轮全向机器人（右）

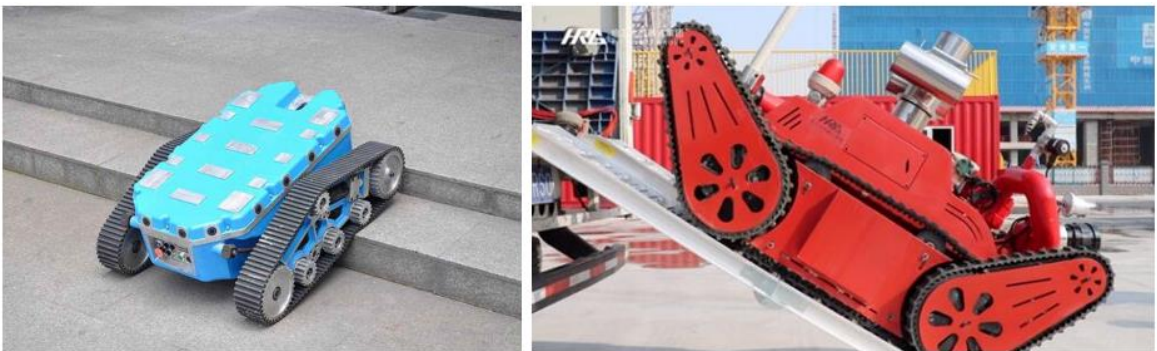
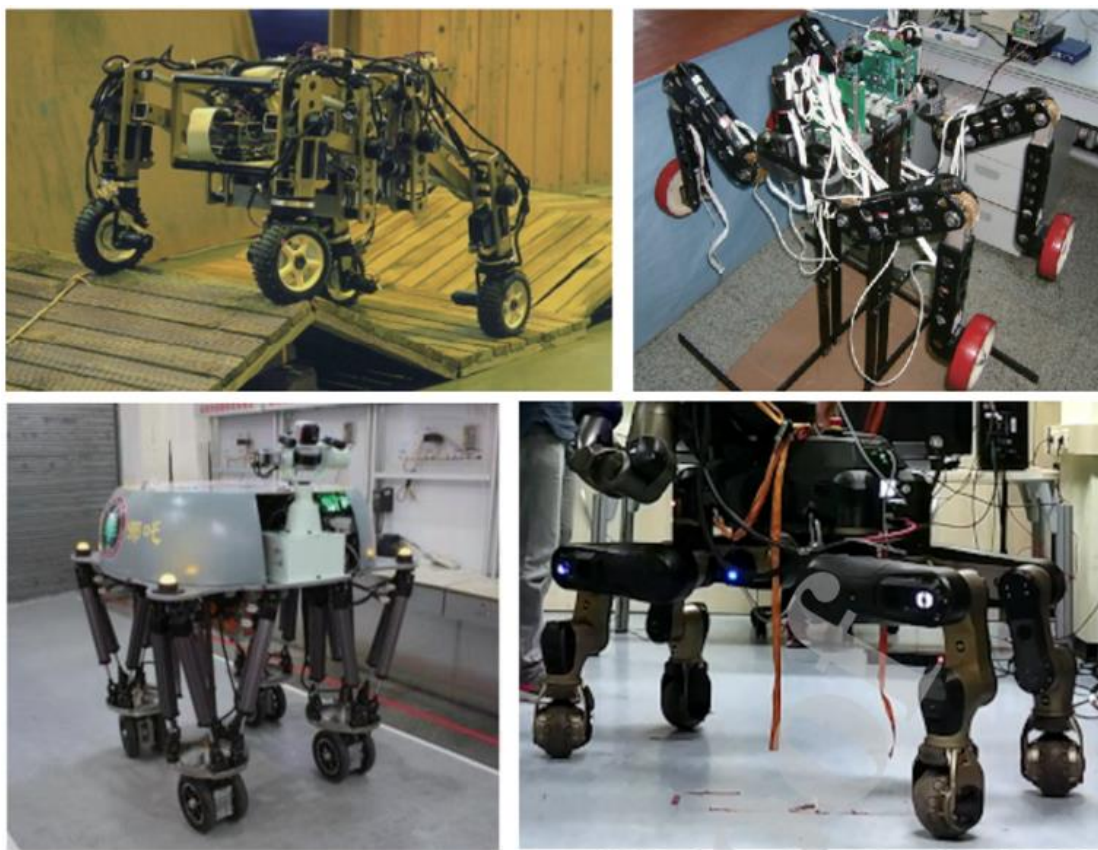


图 1-8 履带式机器人应用，普通履带机器人（左），前后双翻转臂履带式消防机器人（右）



图 1-9 足式机器人应用，波士顿人型机器人及犬型机器人系列

图 1-10 轮足复合式机器人应用^{[46][47]}

对于特种机器人来说,除了进入作业现场以外,还需要可以执行任务的机械臂或类似机构。服务机器人用于室内,一般执行小型搬运任务,因此机械臂的末端负载能力较小。同时考虑到服务机器人的体型及电量资源,这类机械臂一般自由度较少,体积较小,末端复杂度不高,所以不能很好地适应特种机器人执行特殊作业的需求^[48];工业机器人所使用的机械臂多用于生产工业中,一般由人类事先编程实现固定的任务内容,工作效率高,末端负载能力强。但这类机械臂体积往往非常巨大,同时质量重,运动模式适合与高精度的重复性运动,不适合灵活的自主规划运动,所以往往也无法直接安装在特种机器人的底盘上^[52];现有的特种机器人一般采用平衡体积与灵活,负载能力与自重等元素的方案来进行机械臂或执行机构的设计与实现,这类机械臂往往自重不超过机器人整体负载的 1/3,负载能力可达 5-20KG,具有较多的自由度,可在人类的操控下完成较为灵活和复杂的定点到达,也可以在摄像头传感器对目标的定位下实现视觉伺服,自主规划到预定位置执行操作^[53]。同样类似的方案还常用于设计在智能工厂中作业的复合型机器人^[54],这些机器人一般多以集成方案为主,属于国内外目前出现较多的复合机器人产品。该类产品特点为平台底座较低,或采用麦克纳姆轮作为全向运动方案。但这种复合平台无法很好地适应室外高低不平或粗糙的路面情况。大多仅适合室内任务,而无法应对室外复杂任务。图 1-11 及图 1-12 展示了该类机器人的一些著名产品。



图 1-11 室内特种服务机器人国内产品，从左往右分别是：新松 HSCR5 复合机器人，大族 STAR 复合机器人，海康威视复合型机器人，功夫机器人



图 1-12 室内特种服务机器人国外产品，从左往右分别是：MiR with UR3，NEOBOTIX 毫米 O-500，KUKA iiwa，RB-KAIROS

跟化工行业中的带压堵漏问题一样，在针对恶劣环境或特殊任务的机器人中，往往需要创新的方法或结构来满足任务需求。文献[58]提出并设计了一款用于在生化、核辐射等环境中进行采样和干预的复合机器人，在该环境工作后的机器人可能会携带微量污染物至人类环境中。如图 1-13 及图 1-14 所示，作者提出了新的机电接口和机器人的模块化的设计，允许机器人根据不同的任务或者完成任务后快速轻松地拆卸机器人并消毒。

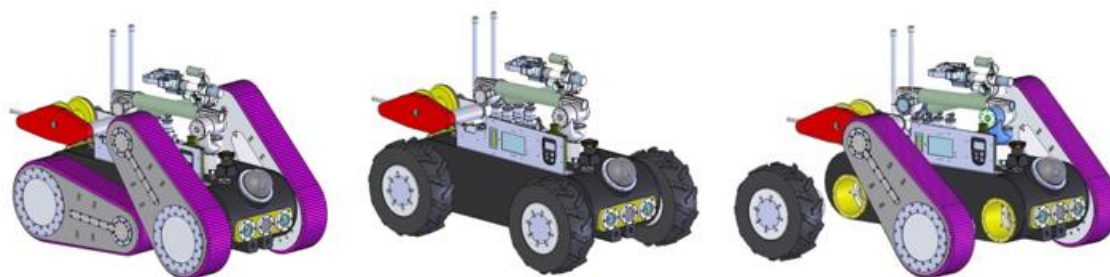


图 1-13 可模块化更换运动模式的特种机器人[58]

图 1-14 针对不同的任务实现的模块化特种机器人配置^[58]

类似的，文献[59]提出一款基于已在加拿大军队服役多年的无人哨兵车上安装机械手的机器人 MATS vehicle，并利用该复合机器人完成如拾取物体、打开车门和建筑门、环境建模等任务，由于该机器人的载体是无人车，因此机械臂可以设计得更大，完成更复杂的室外任务；文献[60]提出了一款同样适用于室外生化采样任务的履带复合式机器人，跟前者不同的是其配有多种特殊设计的采样仪器，并配备有激光传感器，可以完成障碍检测后机械臂动作的自动规划；文献[61]提出一种用于室外苹果树果实自动收割机器人的设计与实现，先利用机器视觉定位苹果的位置，并用一个七自由度的机械臂进行采摘，总体成功率为 84%；图 1-15 为上述特种复合机器人的物理样机。

图 1-15 室外特种复合机器人，左边：MATS vehicle 机器人^[59]，

右上：生化采样机器人^[60]，右下：苹果采摘机器人^[61]

除了使用机械臂外，对于只在特定场合下使用的机器人，还可以设计如高压水炮、消毒喷枪等执行机构代替机械臂安装在机器人底盘上来完成指定任务，这些机构相比于机械臂具有更强的针对性，可以用更高的效率和更简单的控制方式来完成的任务，但也意味着这些机器人的扩展性稍显不足，应用场合将会受到局限^[62]。

1.3 本文的主要研究内容

本课题来源于汕头华能海门电厂的开发项目“用于电厂动力管路在线作业的智能机器人”。结合项目实际的需求，开发出一套能在电厂泄漏模拟环境下自主或协助人类完成带压堵漏操作的机器人。其中作业环境包括：管道内流物为干蒸汽或热水，泄漏介质包含气液两相，管道属性为 DN25-DN50 的合金钢无缝管，堵漏工艺采用捻缝堵漏工艺。本课题在以上条件下主要进行了以下几方面的研究和工作：

（1）分析带压堵漏中的捻缝堵漏工艺，并根据该工艺实际的捻缝效果设计出一套机器人专用的末端执行器；同时完成一款复合型机器人的软硬件设计与实现，其中包括：底层移动平台、机械臂及摄像头系统的选型分析及测试，工控机、底层控制器等控制系统的配置及接口设计，人-机器人遥操作通信框架设计与实现，气源系统的设计与实现，整体系统的电气原理图、接线图绘制，实际的电气设计及实现。

（2）针对该机器人设计了一款配套机器人使用的可视化交互软件，软件可显示机器人摄像头系统，包括热成像，双目摄像头，末端摄像头的回传信息，并在右侧提示用户操作逻辑顺序，用户根据简单的按键控制即可控制机器人完成进入现场、观察泄漏场景、机械臂定位漏点及捻缝堵漏等操作。

（3）该课题还设计了一种用于泄漏管道的三维重建方法，通过人工在软件上对作业管道的二维图像进行位置标记，已标记的像素点将会从双目摄像头返回的深度图像中进行配准和三维信息提取，最后通过最小二乘法剔除远离中心拟合较远的噪声点，重建管道在机械臂坐标下的三维姿态。该方法可以使机器人在人类先验下识别并标记泄漏的位置，是自动化作业的重要基础。

（4）在华能海门电厂的模拟泄漏现场，进行带压堵漏机器人的实验和调试。对于试运行过程中机器人出现的问题，采取了有针对性的解决措施。根据实际工人操作时的用户体验，调整并简化了软件的操作逻辑，在满足项目基本要求和实现远程堵漏的条件下，有效提高了机器人在作业时的效率和实用性，提升了机器人系统的整体性能。

第2章 带压堵漏机器人总体方案设计

2.1 项目中管道泄漏的定义及性质

广义的泄漏包括内漏和外漏。内漏是系统内部介质在隔离物体内部发生的传质现象，一般是不可见的，如管路系统阀门关闭后存在的泄漏就属于内漏。外漏是系统内部介质与系统外部介质在隔离物体上发生的传质现象。对流体来说，泄漏又分为正压泄漏和负压泄漏。正压泄漏是指介质由隔离物体的内部向外部传质的现象，生产领域内发生的泄漏绝大多数属于正压泄漏。负压泄漏是指外部空间介质通过隔离物体向受压体内部传质的一种现象，又称真空泄漏。本项目中针对的泄漏定义为：隔离物体上出现的传质现象，属于正压泄漏，且严格局限在流体范围内。

在金属焊接过程中，由于某些原因使熔池中的气体来不及逸出而留在熔池内，焊缝中的流体金属凝固后形成孔眼，称为气孔。气孔的形状、大小及数量与母材种类、焊条性质、焊接位置及电焊工的操作技术水平有关。根据气孔产生部位的不同，可分为表面气孔和内部气孔；根据分布情况的不同，可分为疏散气孔、密集气孔、连续气孔等。这些气孔产生的原因是多种多样的，所形成的气孔形状大小也各不相同，有圆形、长形、链形和蜂窝形等。

电厂的泄漏主要包括锅炉供水系统、饱和与过热蒸汽设备以及蒸汽管道、供水加热器、涡轮机壳、冷凝器及真空系统的泄漏，核反应堆的蒸汽系统的泄漏等。这一领域的泄漏情况特点是：压力高、温度高，一般均在 10MPa、200 度以上，泄漏物体为水汽两相混合，无毒，作业难度较大。本项目针对的情况为可能含有焊缝缺陷导致的气孔泄漏或者由于管道长时间使用造成破损的砂眼小孔泄漏，且针对的管壁较厚，可以采用捻缝技术实现堵漏。

2.2 带压堵漏工艺分析及选型

各种带压堵漏方法从原理上主要分为了机械堵漏、带压焊接堵漏、粘接堵漏、注剂式带压堵漏。机械堵漏主要包括了捻缝（捻打）堵漏、顶压堵漏、堵塞堵漏、卡箍堵漏、压盖堵漏、捆扎堵漏等。本项目所使用的带压堵漏工艺属于机械堵漏中的捻缝堵漏。

管道出现砂眼小孔时，适用于捻缝，捻缝这种工艺适用于合金钢、碳素钢以及碳素钢焊缝，不适用于铸铁、合金钢焊缝等硬质材料。管壁厚度在 6 毫米以上且占管直径厚度 2/3 以上时，才适用于手工捻缝；当管壁厚度变薄至 1/2 时，禁止使用该工艺，因为过薄的管壁在捻缝时容易造成新的地方破裂，造成更大的泄漏事故^[64]。

捻缝方法包括直接捻缝、粘捻方法和塞捻方法。当砂眼的尺寸在 0.5 毫米以内的，

适用于手工直接捻缝；尺寸在 1 毫米以内的，适用于粘捻法，粘捻法是用胶粘剂或密封胶填充在砂眼和小孔中，然后用捻缝的方法堵住泄露孔；塞捻法是用比金属管道软的金属丝和密封条敲入泄露孔中，然后捻铆的一种方法，适用于较大的砂眼和小孔。本项目针对的砂眼和小孔均在 0.5 毫米以内，因此可以采用手工高频直接捻缝法。

高频捻缝堵漏技术是用高频捻缝枪对砂眼进行补漏的一种技术，捻缝工具一般由捻缝泵（气泵）、软管、快接头、捻缝枪、铲组合而成。枪头一般采用钝头或一字型设计，以高压空气为气源，产生的气压将推动枪头产生往前的高频震动。在泄漏点的两侧捻缝边，捻缝边到泄漏点的距离取决于泄漏点的大小和管壁的厚度，利用捻缝锤和管道表面成 45 度角对捻缝边进行冲击，金属管壁在切应力的作用下，形成晶体的错位运动，造成金属的塑性变形，最终完成对漏点的堵漏。

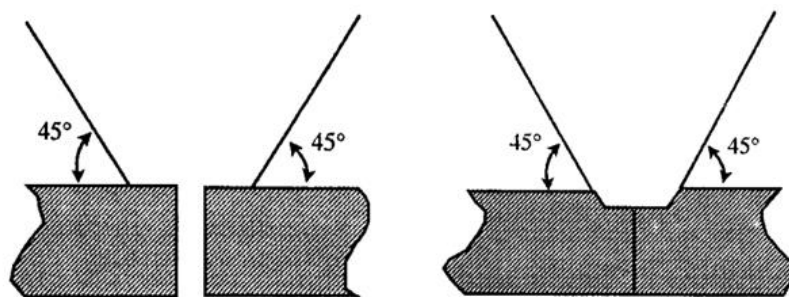


图 2-1 捻缝堵漏技术示意图，左：处理前，右：处理后^[65]

在电厂中，基于捻缝堵漏的修复，可用于 80% 以上高压设备的砂眼堵漏，修复过程中不会产生有毒气体，且相比于粘捻法和塞捻法，该方法用原材料来填补泄漏砂眼，无需额外的填补材料，节省了物料，操作也更加简单。采用该技术进行砂眼堵漏，能显著提高电厂企业的经济效益、劳动生产率以及系统的供电可靠性^[65]。

2.3 电厂带压堵漏任务需求分析

电厂的带压堵漏是一个复杂特殊的任务，从项目的可行性角度分析，太高压力和温度的泄漏难以被模拟和进行测试。因此该项目化繁为简，抽取核心任务需求并加以分析，力求设计出一款具有可扩展性，并实现基本堵漏功能的机器人系统。从该系统升级到实际可行的堵漏现场机器人，只需针对某些模块进行升级和改造即可。从泄漏的性质以及场景的特点，该项目可以总结出以下几方面需求和对应的模块：

1. 一个能实现带压堵漏的执行器：任务中的泄漏管道管壁较厚，可以采用捻缝堵漏的工艺进行修复，则机器人的执行器核心模块则是如何实现捻缝堵漏功能，并能实现远程控制或自动作业，过程中应能够随开随停。

2. 一套能运送该执行器至现场的机构：为了保护作业人员的安全，希望在整个堵漏过程中能够远离现场。则将实现捻缝堵漏功能的执行器准确无误地运送至现场是必

须考虑的功能，该机构应该具有灵活的运动能力和一定的负载能力，并能实现远程控制，该控制应当包括从库房到现场，以及从现场到泄漏点两部分的运动。

3. 一套能辅助作业人员的视觉系统：作业人员远离泄漏现场，这也意味着操作人员无法通过肉眼直接观察泄漏的情况。则该项目还需要一套安装在运动机构上的视觉系统，将现场泄漏的情况，多角度，多模态地进行记录和反馈至作业人员屏幕上，用以辅助作业人员判断泄漏的位置及堵漏时的工艺细节。

以上三个模块回答了带压堵漏任务中的核心需求，本文接下来提出的带压堵漏机器人方案将围绕这三个模块进行设计和阐述。面对不同的泄漏场景，如不同的堵漏工艺或更高要求的视觉系统等，该方案可以进行模块化的更换和升级。

2.4 带压堵漏机器人总体方案设计

根据 2.3 小节中描述的任务需求，本文设计了一个带压堵漏机器人总体方案，其将包含控制端，通信传输以及机器人本体设计三大部分，整体框架图如图 2-2 所示。

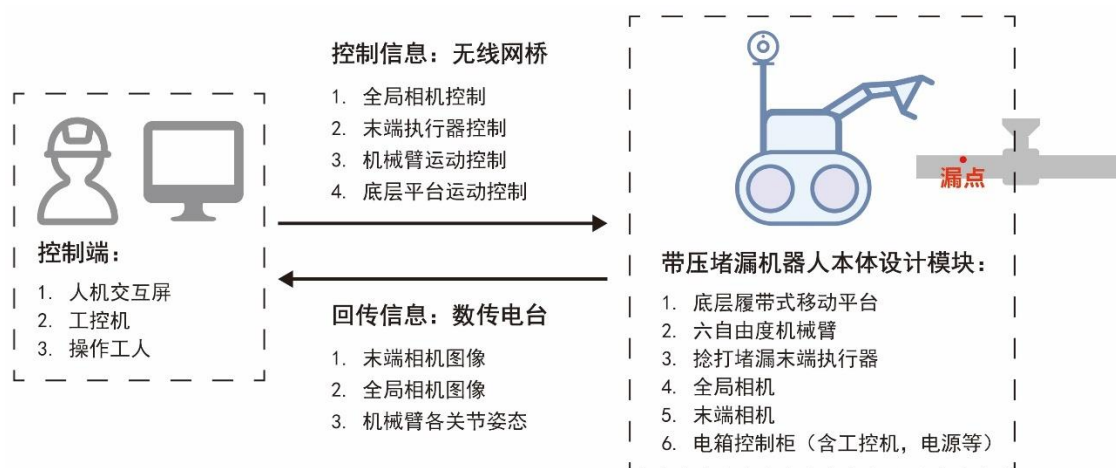


图 2-2 带压堵漏机器人系统方案设计框架图

带压堵漏机器人本体将包含六大模块：底层履带式移动平台，六自由度机械臂，一个捻打堵漏末端执行器，一套视觉系统包含全局云台相机以及末端相机，以及一个用于放置工控机、电源等设备的控制柜。本体机器人将直接进入现场，完成观察、定位及堵漏等操作，本体系统性能指标如表 2-1 所示。控制端为专业操作工人所处的一端，其通过工控机及人机交互屏幕对机器人本体实现控制，以及查看来自机器人采集的现场信息。因此在控制端及本体中间，应该存在两种信息的同时传送。首先是控制信息的下达，信息方向为控制端到本体，主要信息内容包括了全局相机的控制信息、末端执行器的控制信息、机械臂以及底层运动平台的控制信息，这些信息的特点是频率较快、数据量少，同时要求传输过程响应快，抗干扰能力强。第二类信息是现场信息的回传，主要包括了视觉系统对泄漏环境采集的图片的反馈以及机械臂各关节状态

的信息。视觉系统的信息主要为实时视频流，由于视觉设备较多，因此该类信息的特点是数据量大，数据格式各有不同，要求传输过程尽量低时延、稳定以及各信息流同步。根据信息自身的特点以及对于传输的要求，该方案中将选用两种方式分别进行控制信息和回传信息的传输，其中控制信息将通过无线数传电台进行传输，通过无线网桥搭建起一个专用的局域网，回传信息将在内部通过 ROS 系统进行传输。

表 2-1 机器人系统性能指标

运动性能			
底盘额定负载	150kg	机械臂额定负载	10kg
额定行走速度	0.8m/s	最大行走速度	1.0m/s
底盘爬行坡度	$\leq 30^\circ$	底盘越障高度	≤ 100 毫米
底盘涉水深度	≤ 200 毫米		
电气性能			
机器人工作电压	DC48V	充电电压	AC220V 50Hz
堵漏性能			
堵漏管径	DN25-DN50	工作高度	≤ 1.3 m
泄漏性质	气液混合的正压泄漏	泄漏定额蒸发量	≤ 4 Kg/h
泄漏管道压力	≤ 0.4 MPa	泄漏介质饱和温度	$\leq 150^\circ$

2.5 本章小结

本章详细地介绍了项目中泄漏环境的定义及性质，明确带压堵漏任务所针对的环境是可能含有焊缝缺陷导致的气孔泄漏或者由于管道长时间使用造成破损的砂眼小孔泄漏，并介绍了用于修复该种泄漏的技术捻打堵漏法，该方法适用于管壁较厚，砂眼较小的钢管。紧接着在这些项目背景下，分析了该项目主要的三大任务需求，分别是构建一个能实现带压堵漏的执行器，一套能运送执行器到现场的机构，以及一套能辅助作业人员的视觉系统。最后，为了应答解决这三大核心任务需求，提出了一个适用于带压堵漏机器人系统的总体设计方案，包括了机器人本体设计，控制端设计以及通信传输三大模块。

第3章 带压堵漏机器人本体硬件设计与实现

3.1 带压堵漏机器人硬件设备选型及设计

3.1.1 机械臂捻打末端

管道泄漏具有多种形式,本文提出的末端结构主要解决的是管道泄漏中的气孔泄漏。在金属焊接过程中,由于某些原因使熔池中的气体来不及逸出而留在熔池内,焊缝中的流体金属凝固后形成孔眼,称为气孔。圆形气孔的直径大小一般在 0.5-3 毫米,当发生气孔泄漏的管道壁金属较厚时,可采用高频捻缝技术进行修复。如图 3-1 所示,该技术的核心是采用高频气动捻缝枪对气孔或砂眼附近进行反复的捻打,枪头采用钝头设计,所以泄漏位置附近的材料会在外力作用下沿捻打方向发生塑性形变,形变材料经过位移刚好堆积在泄漏气孔位置上,实现快速止漏的效果。

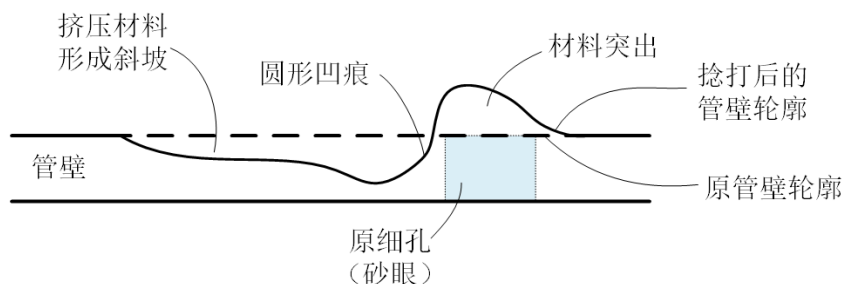


图 3-1 捻打堵漏原理示意图

机械臂捻打末端是一种用于捻打堵漏的机械臂末端执行器,如图 3-2 所示,其包括捻打模块(橙色)、夹取模块(蓝色)、定位模块(灰色)和机械臂连接模块(黄色),捻打模块由气冲枪、气冲枪基座和气冲枪安装座组成,气冲枪安装座由安装在气冲枪基座上凸块两侧的两块铝合金夹块组成,气冲枪与两铝合金夹块相接触的一侧呈“V”字型,用于紧固该气冲枪;夹取模块由两个气缸和两个夹爪组成,夹爪设于气缸的下端;定位模块设于气冲枪基座和夹爪之间,并与该夹取模块上的夹爪相配合,用于夹取泄露设备,机械臂连接模块由主盘和副盘组成,副盘与捻打末端的一侧连接,主盘则与机械臂末端连接。整个捻打末端采用夹取后斜 45°或 60°捻打的方式对泄露点进行捻打堵漏,可适用于不同管径大小(DN25-50)泄露设备(管道)的捻打堵漏。

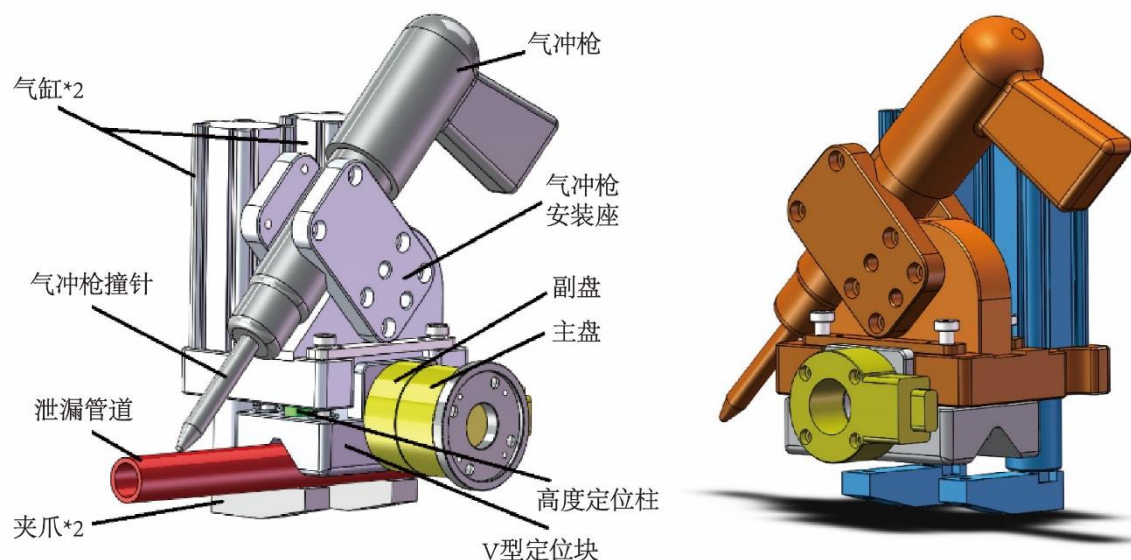


图 3-2 捻打末端整体设计图，其包括捻打模块（橙色）、夹取模块（蓝色）、定位模块（灰色）和机械臂连接模块（黄色）

捻打模块由气冲枪和气冲枪安装座组成，气冲枪顶端配备可更换的撞针头，一般配套为钝头针状和一字铲状。气冲枪安装座将气冲枪与管道的相对位置进行固定，保证捻打的时候不会因为气冲枪的高频震动导致捻打位置出现偏移。如图 3-3 所示，在本结构中气冲枪与待修复管道水平面呈 45° 夹角，捻打位置距离泄漏砂眼位置的高度和水平距离可通过调节安装座上的螺丝来改变。

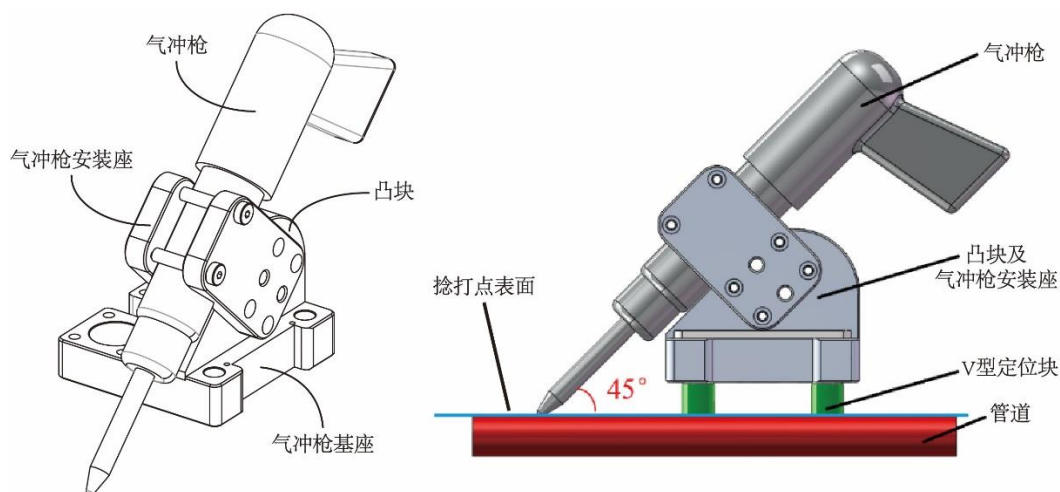


图 3-3 左图：捻打模块，右图：捻打角度说明图

如图 3-4 所示，夹取模块主要由两个气缸及夹爪组成，主要用于捻打末端夹取在管道上，保证捻打过程中末端不会因高频产生的力而发生太大的抖动以及掉落。每个气缸均有一个进气口及一个出气口，默认状态下夹爪处于夹紧状态下。到达预夹位置前，气缸气源上进下出，如图 3-4 右图右边所示，夹爪在高压空气的作用下向下打开，实际效果如图 3-5 所示，当捻打末端位置调整完毕时，更换气流方向为下进上出，气

体此时推动夹爪向上夹紧泄漏管道，实际效果如图 3-6 所示。

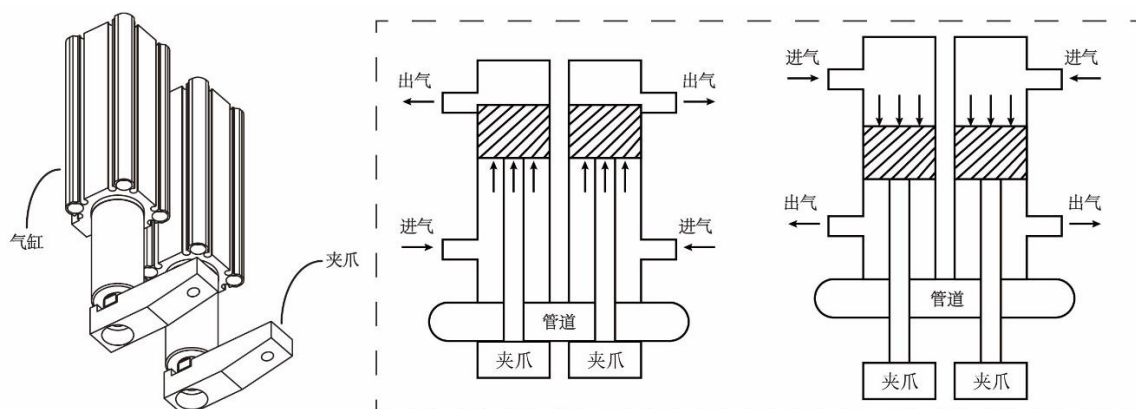


图 3-4 左图：夹取模块，右图：夹爪定位示意图，夹爪夹紧（左），夹爪打开（右）



图 3-5 夹爪打开的实际情况

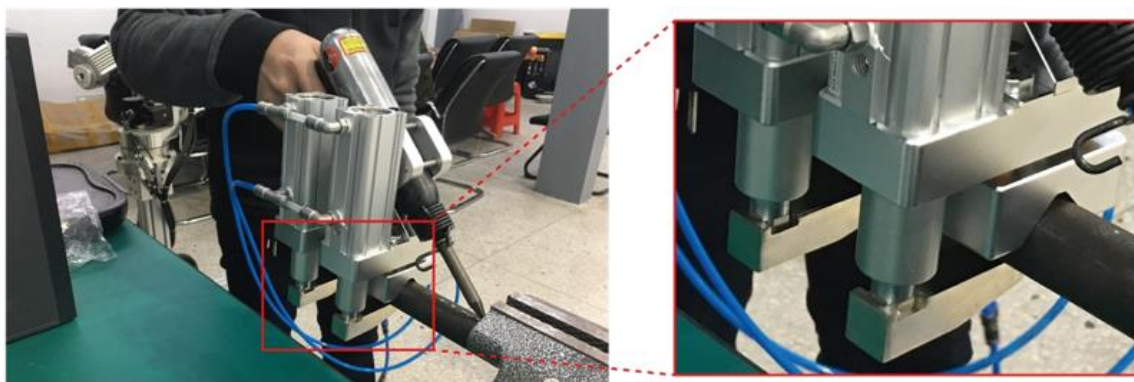


图 3-6 夹爪夹紧的实际情况

图 3-7 是定位模块的设计示意图，其主要起到两个作用：固定机械臂连接模块中的副盘，同时对泄漏管道进行自定心定位，确定夹取姿态。定位模块核心为 V 型块设计，V 型定位块的设计可以让 DN25-DN50 之间的不同尺寸管道均能适应，并在夹取过程中起到一个自定心的作用。配合高度定位柱的使用，使得不同管径大小的管道进行捻打时，气冲枪撞针对管道的初始捻打高度一致，从而实现管道的高质量、低差异的堵漏修复。

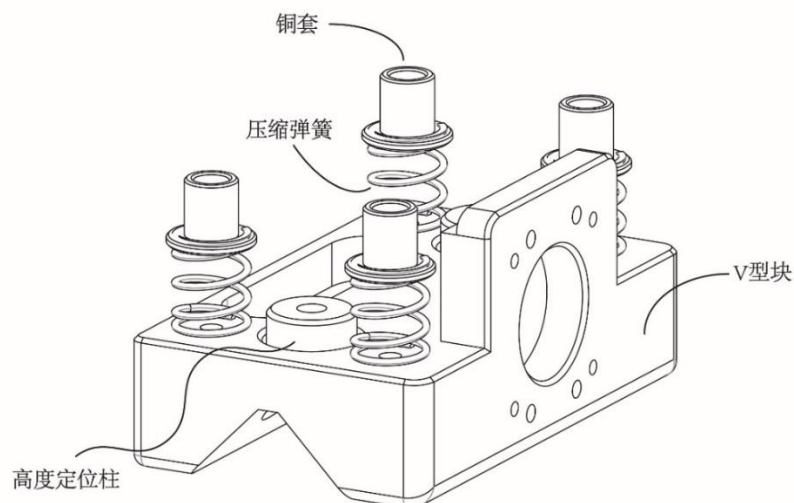


图 3-7 定位模块

考虑到本结构主要用于机械臂末端，同时机械臂还配有用于观察和定位的探针末端。因此两个末端必须能够自主地在现场完成快速更换，因此本结构中还配备了一个快换盘结构，如图 3-8 所示。主盘安装在六自由度机械臂的末端，副盘安装在捻打末端中的定位模块中，以及探针末端基座背后。主副盘之间有电气接口及气动接口，电气接口可用于末端摄像头的供电及数据传输，气动接口用于传输气冲枪捻打作业时的高压气源。当主盘与副盘位置对准后，对主盘控制气口进行通气，主盘凸块上的钢珠将被顶出并卡在副盘孔内的凹槽内，实现装配的效果；对主盘控制气口更换进气方向，主盘凸块上的钢珠将缩回内部，此时主副盘无连接，可拔出分离。

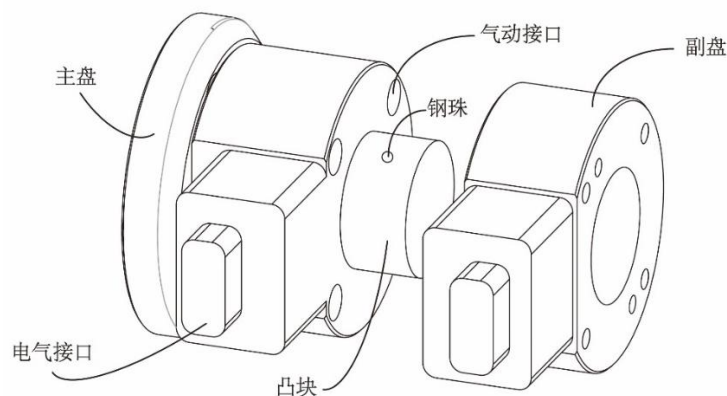


图 3-8 机械臂连接模块

3.1.2 机械臂探针末端

机械臂探针末端是一种用于在捻打之前定位泄露位置的机械臂末端执行器，由探针基座、探针、末端摄像头及机械臂连接模块组成。相比于捻打末端，探针末端整体体积及重量都较小，末端上的视角不会因为自身执行器的体积原因挡住太多信息，因此可以安装末端摄像头用于不同角度观察，同时也比较适合以比较灵活的姿态去靠近

泄漏管道，总体末端设计示意图如图 3-9 所示。

探针基座用于连接探针、摄像头及连接模块等部件，同时提供一个与捻打末端中的捻打模块中的气冲枪基座类似的标准化形状，以方便可以与捻打末端使用同一种类型的末端刀架，起到模块化设计作用。探针的形状将模仿气冲枪撞针的形状，摄像头的视角将与该探针针头形成约 15° 的夹角，用于观察探针针头附近的情况，如是否在泄漏点附近或者是否已经触碰到管壁。

在摄像头观察得到漏点初步位置后，由操作人员半自动地控制机械臂携带探针末端直至探针针头触碰到泄露砂眼附近，此时可根据机械臂的姿态及探针末端的尺寸计算出当前位置相对于机械臂底座的坐标，该坐标可在未来带压堵漏自动化作业过程中起到标定的作用或者位置提示的作用。

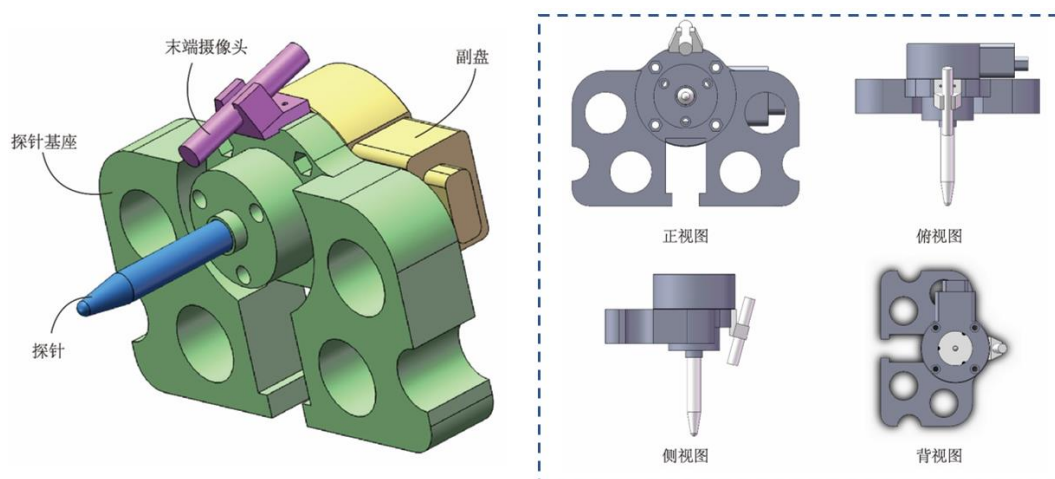


图 3-9 左图：探针末端整体设计图，其包括探针基座（绿色）、探针（蓝色）、末端摄像头（橙色）和机械臂连接模块-副盘（黄色），右图：机械臂探针末端多视角图

3.1.3 摄像头传感系统

带压堵漏机器人作为一款远程机器人，其需要摄像头来对现场环境进行观察，并将视频信息实时传送至控制端。在整套机器人系统中将会有三套摄像头，一套摄像头为全局云台摄像头，里面包含一个可见光摄像头及热成像摄像头；一套摄像头为立体摄像头 ZED mini，最后一套为安装在末端的小型摄像头。

云台摄像头作为全局摄像头，采用的是海康威视方案，如图 3-10 所示。主要在于远程控制机器人到达现场的过程中，对四周环境进行观察，并寻找泄漏管道。其包含一个普通的可见光摄像头及一个热成像摄像头，由于具有温度的介质从管道中泄漏时会引起泄漏点附近温度的变化，因此热成像中的图像可以很好地辅助操作人员定位具体的泄漏位置。这两个摄像头的信息将具有两个不同的地址，工控机将通过 RTSP 协议对摄像头中的视频流进行读取，并通过无线网桥发送至控制端人机交互软件上呈现出来。

云台摄像头自身带有一个旋转云台，可实现旋转，俯仰等动作。同时该云台摄像头将安装在一个电动伸缩杆上，可以使他观察到不同高度平面的信息，增强了全局相机的信息采集能力。

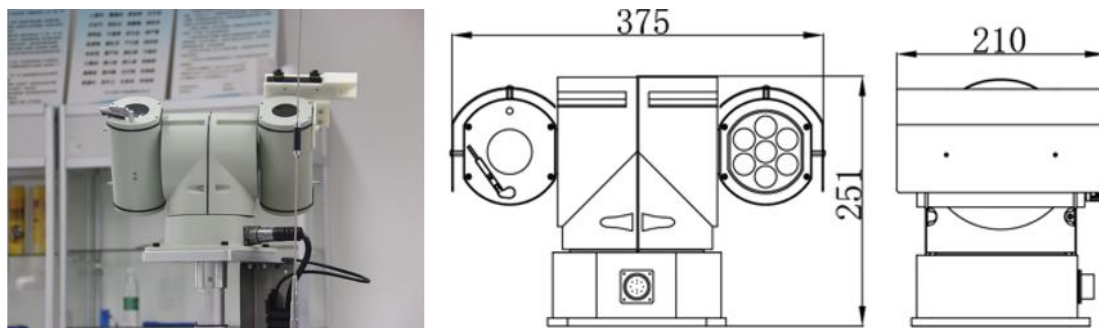


图 3-10 左图：全局云台摄像头实物图，右图：全局云台摄像头尺寸图

立体摄像头是指能够测出物体在空间中的距离信息的相机，相比于传统可见光摄像头只能对空间的物体进行二维平面上的位置以及颜色进行采集，立体摄像头还可以通过技术手段读取出相机和物体之间的距离，从而可以对物体进行准确的三维重构。通过不同的深度读取技术手段，立体摄像头可分为 RGB-D 摄像头以及双目摄像头。技术原理一般有结构光、飞行时间法、视差法等。

考虑到泄漏环境中要观察的环境往往不具有规整的物体表面可用于反射光线，因此采用视差法原理的双目立体摄像头 ZED mini 是较好的选择，其安装在立体摄像头中热成像镜头的上方，主要作用是当云台摄像头已经在视野内观察到泄漏管道后，利用双目可见光图像计算泄漏管道的当前的深度信息，这些信息将通过 USB 直接与工控机相连并读取，该深度信息与可见光图像信息将用于后续三维管道在机械臂坐标下重建的过程。

表 3-1 云台摄像头性能参数

规格			
电源	DC12-24V Iin≥4A	功耗	50VA
重量	7kg	防水等级	IP66
可见光摄像头			
视频输出	网络编码输出	分辨率	50HZ:25fps(1920x1080) 60HZ:30fps(1920x1080) 50HZ:25fps(1280x720) 60HZ:30fps(1280x720)
镜头焦距	4.7-94 毫米，20 倍光学	视频压缩标准	H.265/H.264
热成像摄像头			
像素	384*288	镜头焦距	15 毫米
响应波段	8~14um	测温范围	-20~150℃ 或 100~500℃
测温精度	±2℃或读数的±2%		
传输性能			
网络功能:		压缩输出码率	32kbps-12Mbps
支持协议 TCP/IP、HTTP、DHCP、DNS、DDNS、RTP、RTSP、PPPoE、SMTP、NTP、UPnP、SNMP、FTP、802.1x、QoS、HTTPS、IPv6 (SIP、SRTP、可选)			

表 3-2 立体摄像头性能参数

电源	5V/380mA	操作温度	0℃~45℃
重量	62.9g	尺寸	124.5*30.5*26.5 毫米
运动传感器	陀螺仪/加速度计 (800HZ)	姿态精度	位置 ± 1 毫米, 方向 0.1° (100HZ)
视场	90°(H) x 60°(V) x 110°(D) max	分辨率	100fps(1344*376) 60fps(2560*720) 30fps(3840*1080) 15fps(4416*1242)
深度范围	0.15~12m		

末端摄像头安装在末端执行器上, 要求近距离对泄漏管道和砂眼附近进行观察, 由于近距离接触泄漏介质, 且末端执行器自身体积较大, 因此末端摄像头要求其体积小, 重量轻, 较短的焦距以及防水。考虑到探针末端以及捻打末端具有不同的体积, 因此在探针末端上采用内窥镜摄像头的方案, 以及在捻打末端上采用运动摄像头 GoPro 的方案, 表 3-1 至表 3-3 描述了三种摄像头的主要性能参数, 图 3-11 展示了立体摄像头及两款末端摄像头的实物照片。

表 3-3 末端摄像头性能参数

内窥镜摄像头			
电源	USB 数据供电共用	USB 接口	Micro USB/Type-C/USB
防水等级	IP68	摄像头直径	8 毫米
辅助光源	可控式 8LED	最佳焦距	1.2 英寸-3.2 英寸
视角	70°		
运动摄像头 GoPro			
电源	可拆卸电池	USB 接口	Type-C 接口
防水等级	十米防水	总像素	1200 万像素
视频	4K60		



图 3-11 左图：立体摄像头 ZED mini，中图：内窥镜摄像头，右图：运动摄像头 GoPro

3.1.4 移动平台及机械臂

机器人的行走结构采用履带式结构移动平台，与地接触面积大，结构运行平稳，能灵活实现崎岖路面上的平稳运行；通过控制履带的运动方向，可以实现原地转弯，左右转弯，前进后退等基本动作。表 3-4 是履带移动平台的性能参数，图 3-12 是其设计示意图。

表 3-4 履带平台性能参数

设计尺寸	1020*750*405 毫米	内仓尺寸	600*320*240 毫米
底盘高度	115 毫米	履带平台自重	95kg
防护等级	IP54	运行速度	0-6km/h
设计载重	100kg	最大载重	150kg
额定功率	880w*2	额定扭矩	60N/m
减震	左右独立*6 避震器	表面处理	黑色喷塑（磨砂）
主体材质	不锈钢 304/合金钢板/镀锌钢/铝	电机	48V 直流无刷电机/ 高精度伺服电机

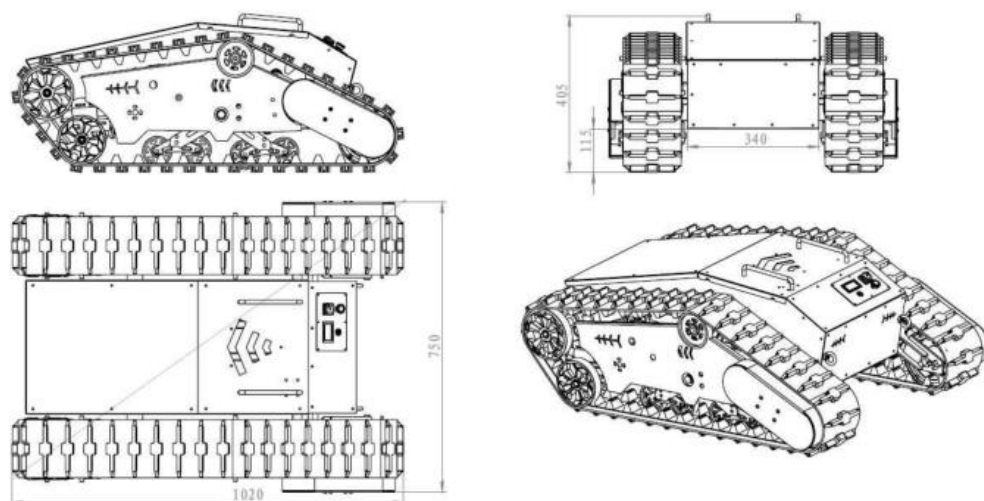


图 3-12 履带平台设计示意图

带压堵漏机器的操作手是一个六自由度的机械臂，采用的方案是丹麦优傲机器人的六自由度机械臂 UR10。采用 UR10 机械臂的原因主要有两个，第一机械臂的自重不可过大，需要在履带平台最大载重的 50%以内；第二是机械臂的负载能力需要足够大，至少能平稳地装载 7 公斤的捻打末端进行作业。UR10 机械臂是优傲 CB 系列中仅次于 16E 的工业协作型机器人，专门为更大型的、对精确性和可靠性仍然有高要求的作业所设计。表 3-5 给出了 UR10 机械臂的一些关键性能参数。

表 3-5 UR10 机械臂性能参数

有效负载	10kg	有效工作半径	1300 毫米
关节范围	+/- 360°	控制箱尺寸	475*423*268 毫米
自重	28.9kg	可重复精度	+/- 0.03 毫米
底座安装面积	直径 190 毫米	自由度	6 个旋转关节
速度	基座和肩部：120°/秒； 肘部、手腕 1,2,3：180°/秒； 工具端：1 米/秒	通讯	TCP/IP 100Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX 以太网接口& Modbus TCP
I/O 电源	控制箱中为 24V/2A	IP 级别	IP54
功耗	运行典型的程序时大约 为 350W	材质	铝合金，ABS 塑料，PP 塑料

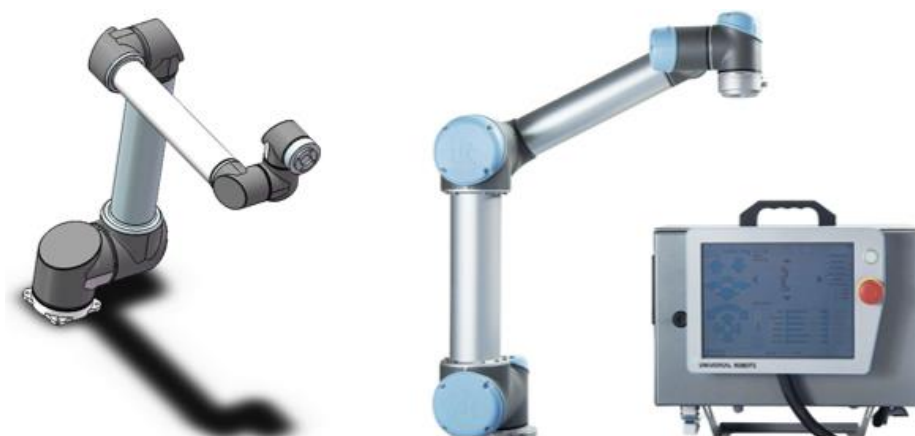


图 3-13 左：UR10 机械臂模型，右：UR10 机械臂实物图

3.2 带压堵漏机器人电气设计及实现

带压堵漏机器人整机利用位于履带平台内部的 48V 电池以及放置于电气面板的小型 24V 电池供电，主要用电部分将分为四个部分：

① 48V 供电：履带移动平台双电机。

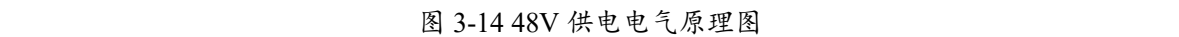
② 48V 转 24V 供电：使用位于平台内部的转压模块将 48V 稳压至 24V，并为云台摄像头、散热风扇等供电。

③ 24V 独立供电：继电器控制板（即包括气动电磁阀、云台推杆、支撑腿推杆以及指示灯）由 24V 小电池独立供电，此处设计原因为考虑到继电器的串口线与工控机直接连接，而工控机由 48V 转 220V 供电，如果继电器同样由 48V 转 24V 供电，则相当于控制地与功率地并没有做隔离。在压力试验中证明此接法会导致串口线中的地，或用电器中的地被烧毁。

④ 220V 供电：使用逆变器将 48V 电压逆变至 220V 为大型设备供电；这里的逆变分为小型逆变（800W）以及大型逆变（1000W），小型逆变器主要为工控机、数传电台、海康威视网桥以及网络交换机供电；大型逆变器主要为 UR10 机械臂以及空压机供电。

详细的用电器功率及一般运行时电流值如表 3-6 所示：

用电设备	功率	一般运行电流
履带移动平台电机	880W*2	前进后退：<10A 带旋转/自转：30A-40A
空压机	800W	加压：15A-17A 非加压：<2A
工控机	650W	3A±1A，<7A
UR10 机械臂	500W	启动瞬间：12A±1A 正常运行：3A±1A 发生异常：<15A
云台摄像头	120W	<2A
云台推杆	50W	正常负载：<1A
支撑腿推杆	50W	非支撑：<1A；支撑：<23A
海康威视网桥	12W	<1A
数传电台	12W	<1A
散热风扇	25W	<1A
继电器控制板	50W（粗略）	<2A
气动电磁阀	3W*7	<1A
指示灯	2W*4	<1A
网络交换机	2W	<1A
额定总功率/电流	约 4100W	>1A，<40A



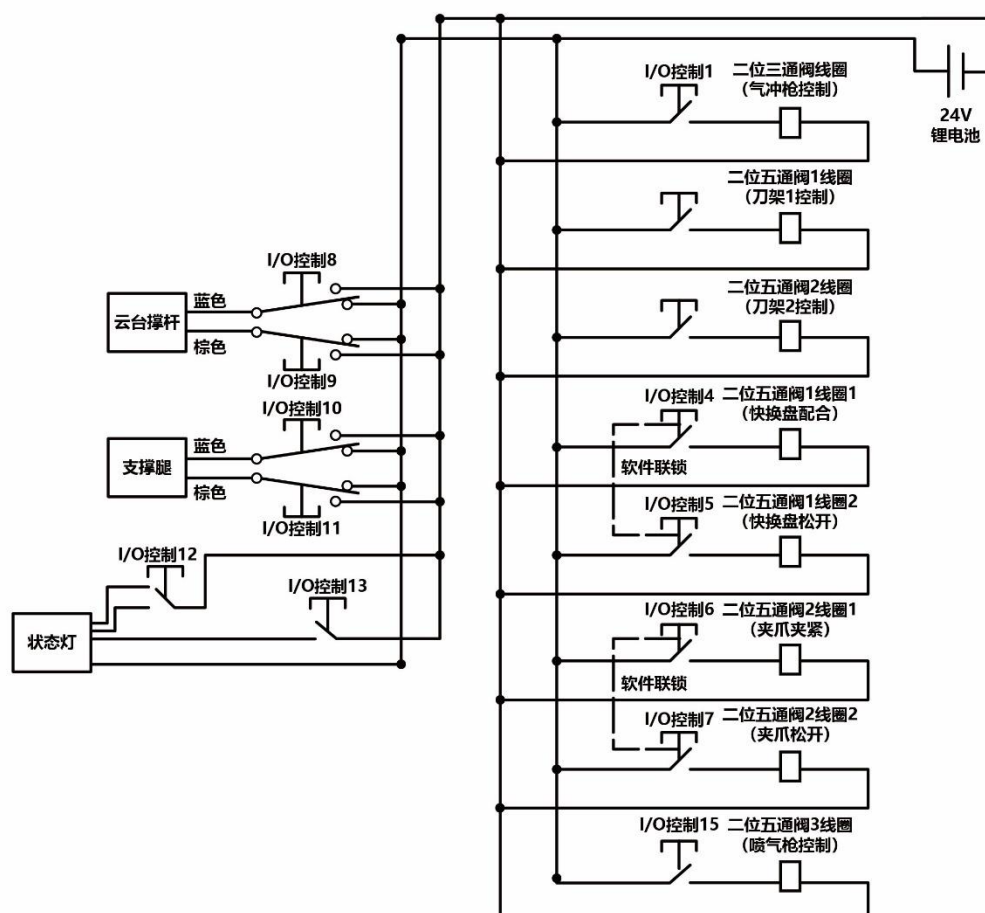


图 3-15 24V 供电电气原理图

电气与控制柜位于带压堵漏机器人的后方，主要分为电气接线柜及控制柜，如图 3-16,3-17,3-18 所示。在电气接线柜中，带压堵漏机器人的主要电气接线都会集中在此处，柜中同时包括用于安全考虑的空气开关及接触器若干个；控制柜中的布局主要分为三层，在底层为 UR10 机械臂的控制箱及示教面板，在中间层的后部装有两个逆变器，分别为 800W 及 1000W；中间层的前部装有继电器控制板，用于控制各个气动电磁阀、电动推杆及其他一些用电器、数传电台以及一块 Arduino 板，上层放置的是带压堵漏机器人的核心工控机，其含有机器人所有的硬件驱动及控制程序。

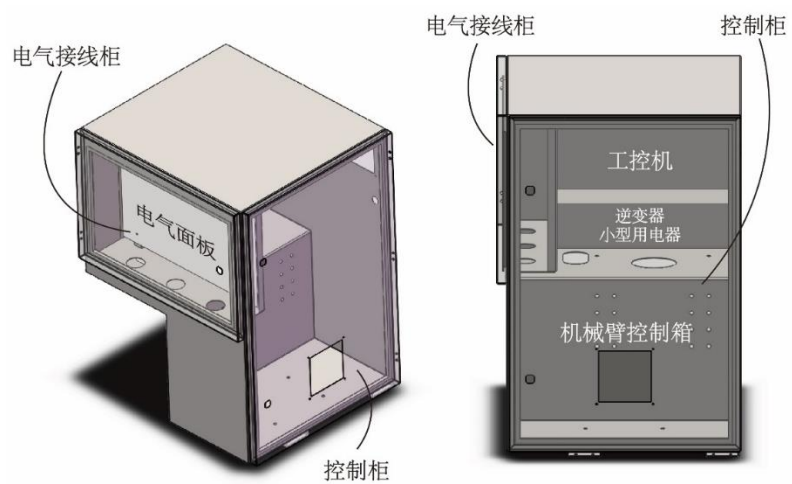


图 3-16 电气与控制柜布局分布图

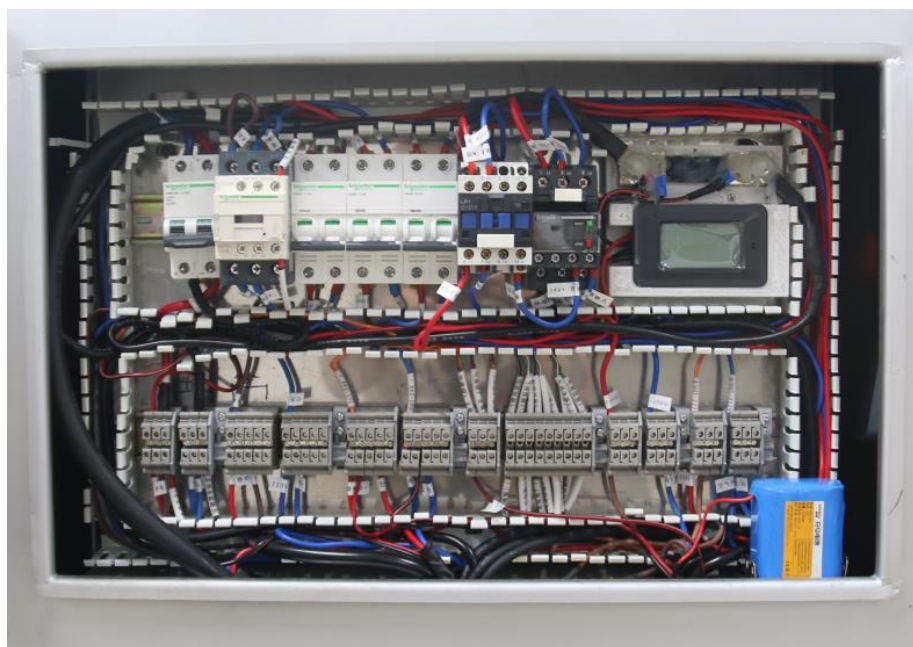


图 3-17 电气柜布线实物图



图 3-18 电气柜与控制柜实物图

3.3 带压堵漏机器人气路设计及实现

带压堵漏机器人中有大量的气动硬件或执行器，其中包括了快换盘、捻打末端枪体、捻打末端夹爪、放置末端执行器的刀架、预留喷气枪接口等。因此机器人本体还设计搭载有一套气源系统，消耗电能产生高压空气并储存在气缸中，需要使用时通过控制电磁阀来输出高压气源。

图 3-19 及图 3-20 是车载气源系统的设计示意图，它是一套为带压堵漏机器人气动硬件提供高压空气作为动力来源的系统，其主要包括一台空气压缩机放置于机器人中间，置于左右的两个气缸以及分别位于气缸后方的调压阀、压力表及气动电磁阀组，位于左手边的气动电磁阀称为 A 组，其包括三个二位三通阀，分别控制刀架一、二、三；位于右手边的气动电磁阀称为 B 组，其包括两个二位三通阀，分别控制气冲枪及喷气枪，以及两个三位五通阀，分别控制快换盘配合及捻打末端的夹爪运动；系统同时还包括位于机器人前端的一个空压机安全阀及两个过滤器，过滤器在这里的作用是过滤压缩空气中的水分，保障在长时间使用后设备不会因为空气中携带的水分而腐蚀生锈。

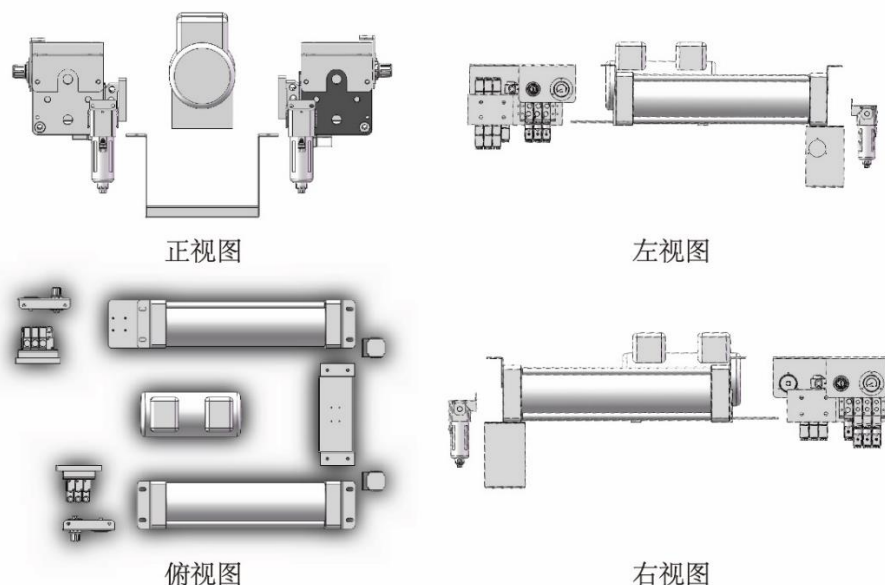


图 3-19 车载气源系统多视图展示

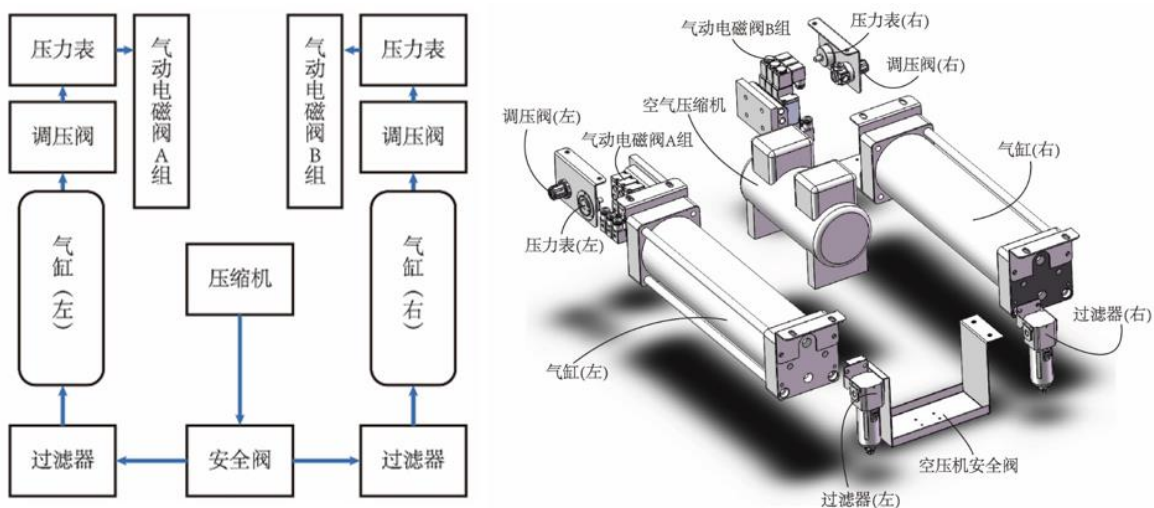


图 3-20 车载气源系统气路图

3.4 带压堵漏机器人通信设计及实现

带压堵漏机器人的通信主要分为内部通信和外部通信，内部通信是指传感器与工控机之间，或者不同控制件之间的通信；外部通信是指传感器的信息与远程控制端之间的通信。

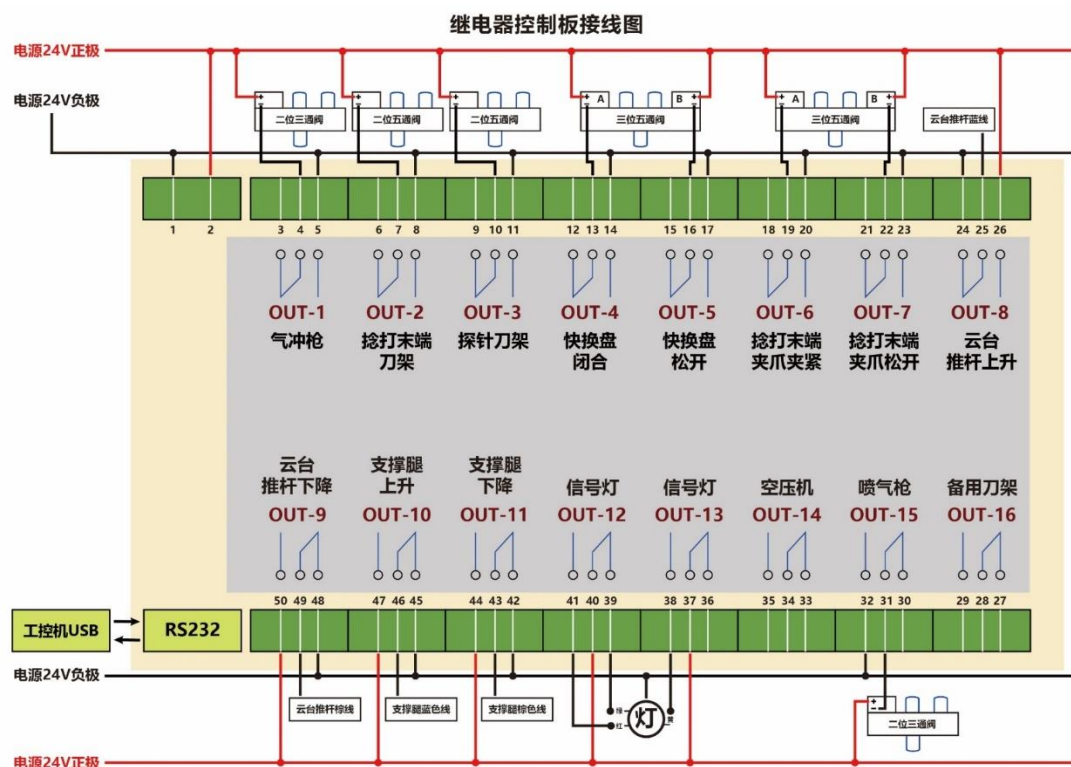


图 3-21 继电器控制板接线原理图

内部通信又分为了硬件设备与工控机之间、以及控制板与硬件设备之间。硬件设备与工控机之间主要包括了立体摄像头 ZED mini 与工控机之间的连接，末端摄像头与工控机之间的连接，数传电台与工控机之间的连接，以及继电器控制板与工控机之间的连接；他们均是以 USB 接口的形式插入到工控机中，并以 ROS 下的程序作为驱动接收和发送相关信息。控制板与硬件设备之间的连接则主要通过 I/O 口来实现，主要分布在继电器控制板与各个硬件设备，如电磁阀、升降杆、指示灯等的连接中，具体接线图如图 3-21 所示。

内部通信中同样存在一部分以网络协议进行通信的设备，如云台摄像头、UR10 机械臂等；同时机器人外部通信需要与控制端建立无线连接，以传递实时视频流。因此带压堵漏机器人本体配置有一个交换机以及一套海康威视网桥。云台摄像头、UR10 机械臂、工控机以及海康威视网桥均通过网线连接到交换机中形成同一个局域网。其中云台摄像头有两个设备需要地址，分别是可见光摄像头以及热成像摄像头，UR10 机械臂需要一个地址。同时，交换机还需要与机器人本体端的网桥连接，可以将控制端的电脑与本体端的工控机建立通信，具体网路框架图如图 3-22 所示。

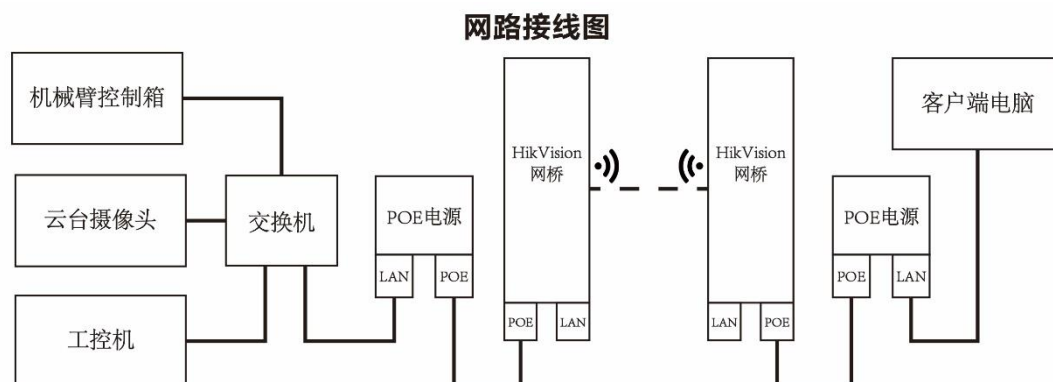


图 3-22 带压堵漏机器人网络框架图

3.5 带压堵漏机器人整机硬件

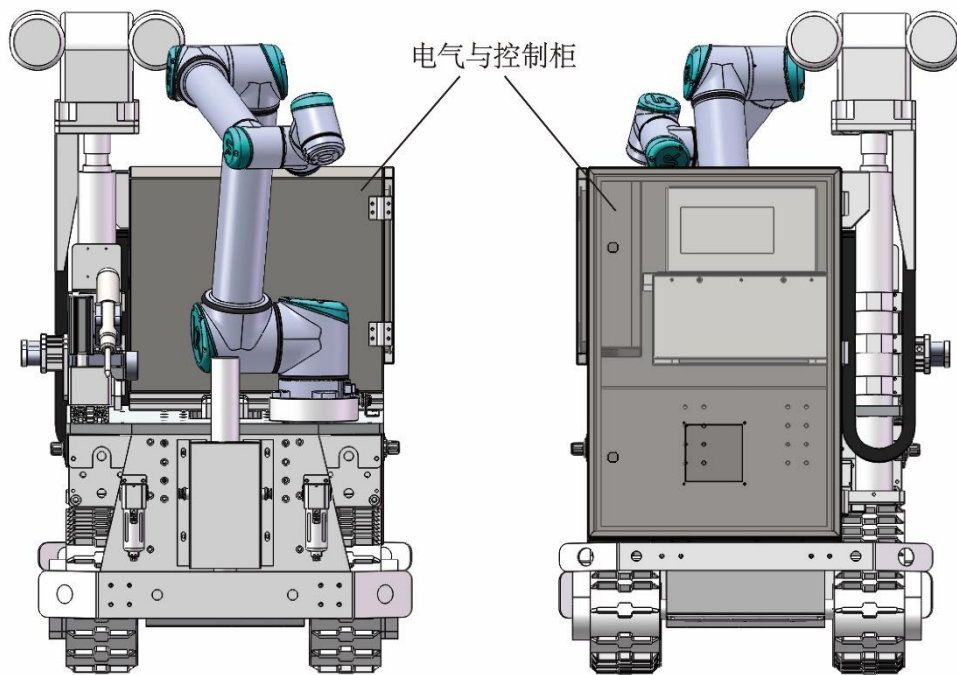
带压堵漏机器人本体整机设计图如图 3-23 所示，从小图（a）到小图（e）分别展示了机器人的正/背视图，俯视图，左/右视图以及俯视三维图。其与第二章中描述的机体设计方案一致。本体主要由履带移动平台、六自由度机械臂、末端执行器、相机系统以及电气柜组成。机器人本体的实物图如图 3-24 所示。

履带移动平台上搭载有一块定制尺寸的铝板，铝板的表面用于放置机器人顶部的硬件，包括机械臂底座，三个末端执行器放置刀架，相机推杆以及电气柜；铝板的底部用于固定气源系统的部分硬件，包括两个气缸以及对应的电磁阀及压力表；铝板的前面安装了包括气源系统中的过滤器、车体防撞栏杆等硬件，考虑到车体在工作时机械臂可能携带较重的末端执行器并伸出车体外较远执行任务，重心可能会从后方向前方或侧方转移。因此铝板前面还安装有电动支撑腿，在到达现场位置确定后会往下伸出，并起到支撑车体的作用。铝板中间被挖空，用于放置气源系统中的空压机，空压机在中间将电能转化为压缩空气能并储存在两侧的气缸中，提供气动元件的能量。铝板的后方为电气柜的安装位置，后方车体防撞栏杆将安装在电气柜往后突出的部分底部。

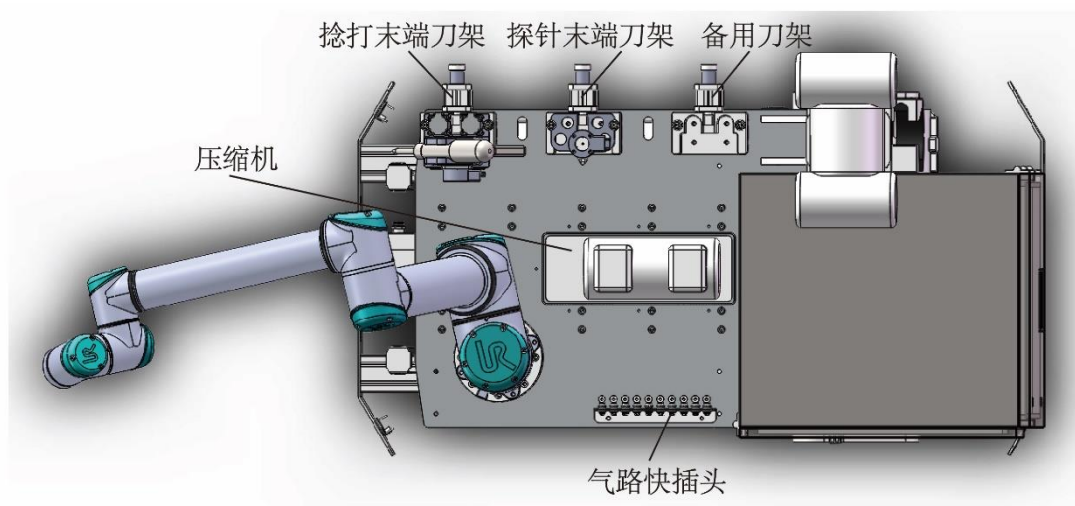
车体表面主要的硬件有末端刀架，末端刀架同样是气动元件。当刀架正动作口进气时，刀架中间的凸块将往前推出，此时末端可放置在刀架内，停止进气口后凸块将在弹簧的作用下往后被拉紧，即顶住末端的卡槽，实现锁住末端执行器的功能。表面同时还安装有六自由度机械臂 UR10，摄像头的电动推杆以及电气柜。用于与控制端通信无线网桥将被安装在电动推杆的杆上，杆的顶部是云台摄像头以及立体摄像头 ZED mini。

电气柜被安装在整个机器人的后方，电气面板位于右侧，主要用于电气部分的布线，整个电气面板将采用模块化设计，同一种用电需求的线路将通过接线端子统一在一起。电气柜的后方是控制柜，从上往下放置了工控机、逆变器、继电器控制板、机

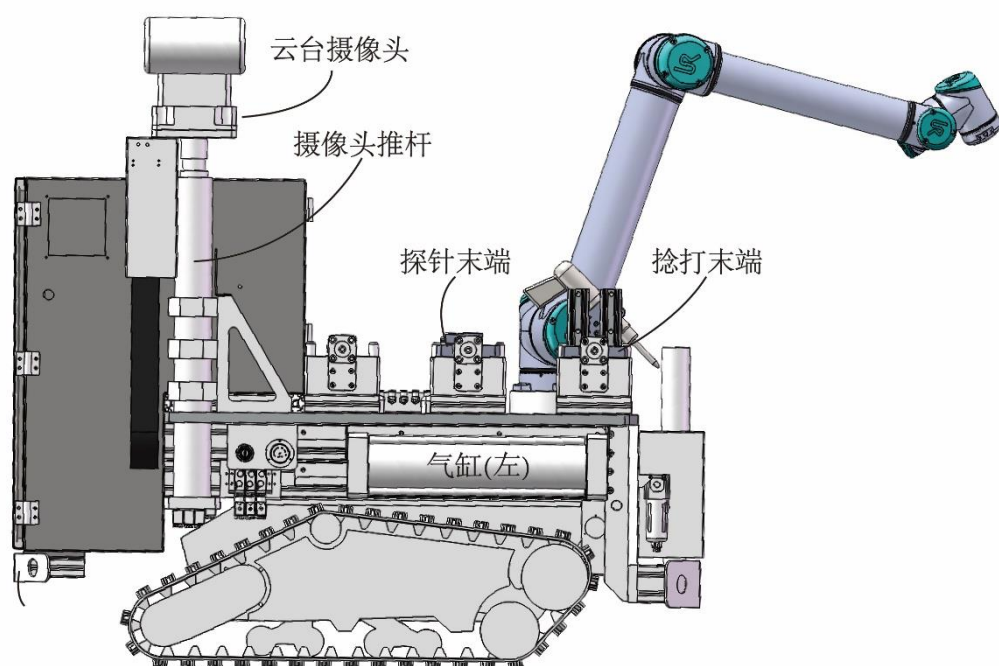
械臂控制箱等元件。电气柜的左侧顶部将会有有一个排气扇，用于整机工作时控制柜内部通气散热。



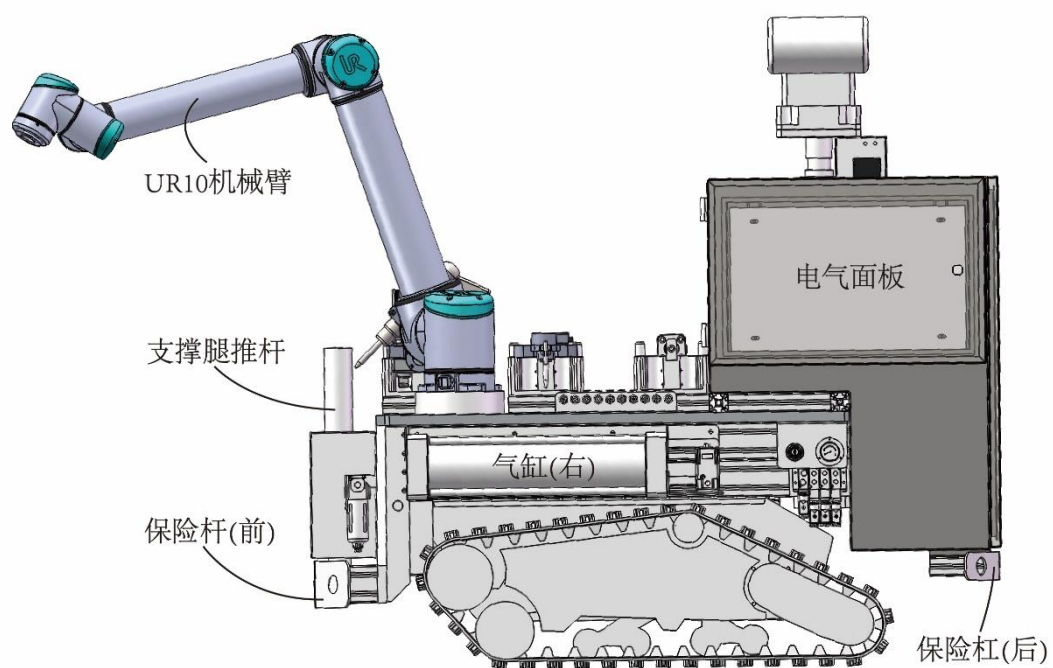
(a) 带压堵漏机器人正视图（左）与背视图（右）



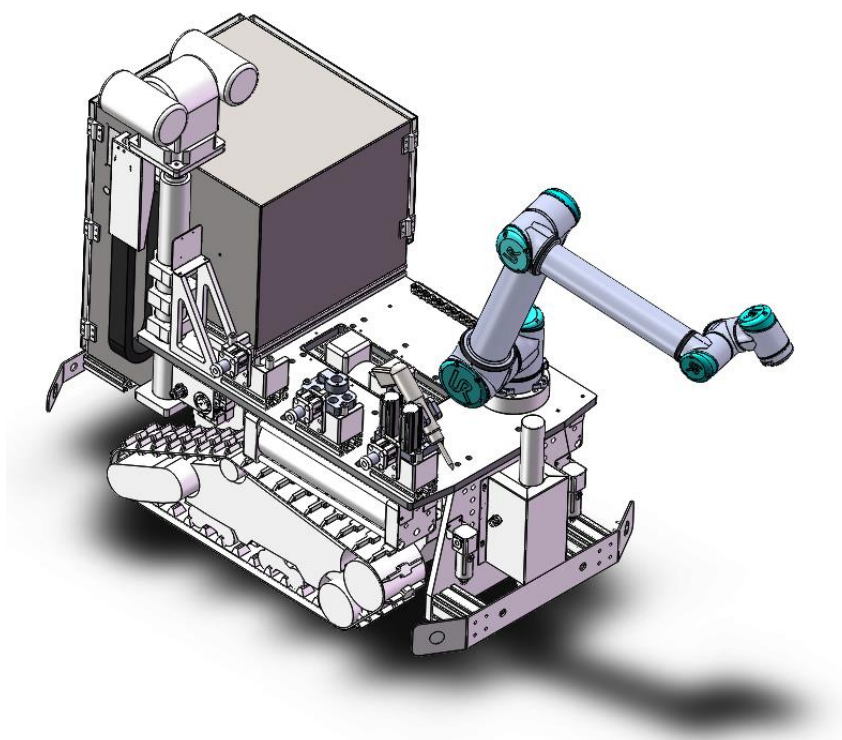
(b) 带压堵漏机器人俯视图



(c) 带压堵漏机器人左视图



(d) 带压堵漏机器人右视图



(e) 带压堵漏机器人俯视三维图

图 3-23 带压堵漏机器人整体设计图



图 3-24 带压堵漏机器人整体实物图

3.6 本章小结

本章在第二章介绍的总体设计方案基础上,详细阐述了带压堵漏机器人本体的硬

件设计与实现。包括用于捻打堵漏以及观察定位的两个末端执行器，其中详细地说明了捻打堵漏末端执行器各个模块的设计功能以及构成；除末端执行器以外还介绍了本体方案所采用的相机系统、移动平台以及机械臂，并给出了选型理由以及关键性能参数。为了使机器人形成一个完整可行的系统，本章还介绍了本体方案中的电气、气路以及数据通路三大模块的设计与实现，详细描述了包括在电气模块中的电路设计、车载气源系统的实现以及硬件之间的 USB 数据通路及网路设计。在最后本章还给出了带压堵漏机器人整机的设计图示以及实物效果图，并在前面模块基础上描述了它们的安装空间关系。

第4章 带压堵漏机器人控制端软件设计与实现

4.1 软件总体分析描述

本文第三章中详细地描述了机器人本体的硬件选型、设计与装配关系。一个完整的机器人系统应包括硬件及软件，软件的设计优劣直接决定了操作人员的用户体验以及上手难度。考虑到带压堵漏机器人是一个远程作业机器人，因此配套的软件属于远程控制的软件。操作人员与软件同属于控制端，控制端中的软件应能下达控制信息，并接收来自机器人的现场信息，所有的操作应通过一个人性化的人机交互界面完成。控制端的软件设计框架如图 4-1 所示。

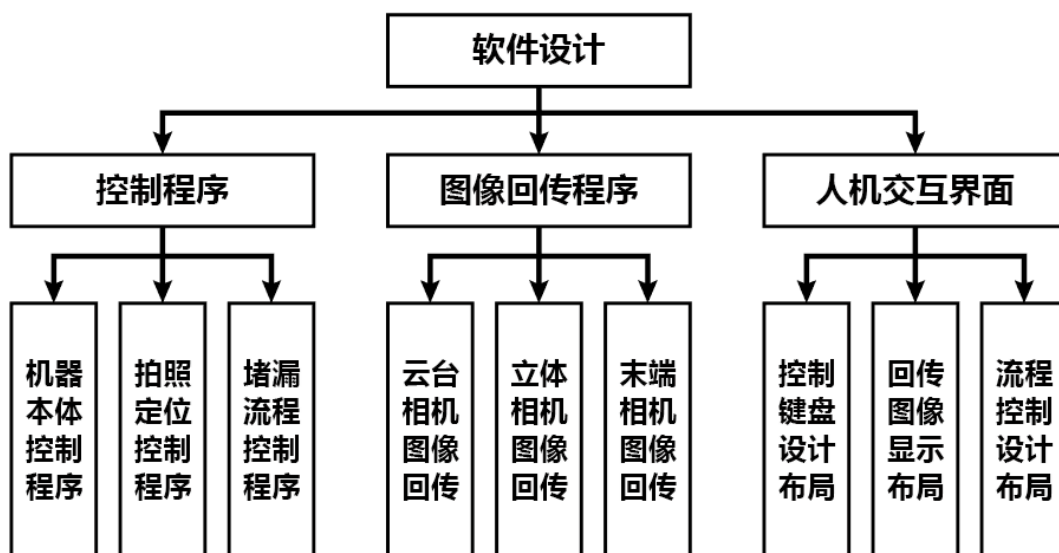


图 4-1 带压堵漏机器人软件设计框图

整个软件将基于 ROS 及 QT 进行开发，并包含三大模块的设计内容：控制程序，图像回传程序以及人机交互界面。控制程序中的机器人本体控制部分将通过键盘按键控制的方式实现，剩下的拍照定位控制以及堵漏流程控制，将与图像回传模块一起集合在带压堵漏机器人可视化软件中，并由鼠标点击控制实现。

4.2 人机交互界面的设计

整个软件将基于 ROS 及 QT 进行开发，并包含三大模块的设计内容：控制程序，图像回传程序以及人机交互界面。控制程序中的机器人本体控制部分将通过键盘按键控制的方式实现，剩下的拍照定位控制以及堵漏流程控制，将与图像回传模块一起集合在带压堵漏机器人可视化软件中，并由鼠标点击控制实现。

在整个软件设计中，首选需要考虑的是整个人机交互界面的设计。因为它是操作人员与在现场作业的带压堵漏机器人最直接的交互方式，在本文提出的带压堵漏机器

人可视化控制软件中，如图 4-2 所示，整体设计将由左右两部分组成，左边为显示，右边为控制，软件尽量采用简洁的方式进行设计，不同的功能块之间会有小标题提醒用户此处的作用。

在软件的左边部分是现场信息的反馈，从左往右、从上往下的顺序分别呈现了可见光摄像头、热成像摄像头、立体摄像头左目图像以及末端摄像头的图像；软件的右半边将是流程控制与拍照等控制功能的实现，一共将分为姿态切换以及功能切换两部分；在功能切换模块的下方是机械臂各关节的单独控制，之所以放在软件界面上而非与其他本体控制功能一起使用键盘，是因为机械臂具有十六个关节，每个关节有两个控制方向，使用可视化的界面进行操作可以降低操作难度以及用户体验。右下方是整个软件的配置信息，因为软件基于 ROS 系统，因此与机器人进行通信前必须先通过 IP 地址连接本体的工控机，配置信息默认已填且不会改变，用户只需按连接即可实现通信，启动则是开始接收现场图像信息的回传并显示出来。



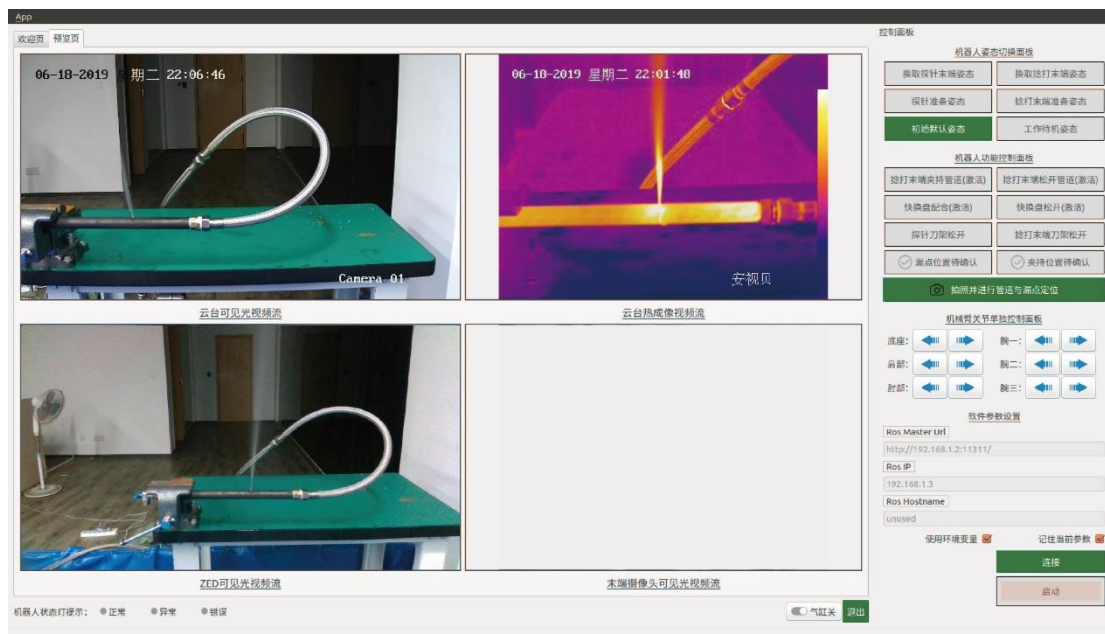


图 4-2 带压堵漏机器人可视化控制软件，上图：默认界面，下图：图像显示界面

4.3 图像回传程序的设计与实现

图像回传程序将分为两部分进行介绍，第一部分是图像信息从传感器到本体工控机的传输，第二部分是图像信息从本体工控机到控制端软件上的传输。由于所使用的传感器有所不同，所以第一部分中的信息读取将会在不同相机系统中略有不同；而在第二部分的远程传输中，由于此时图像信息已经整合进本体工控机中，并以 ROS 消息形式存在，所以它们可以以一个统一的方式进行传输实现。

一、本体工控机读取传感器图像信息

云台摄像头中包含可见光相机及热成像相机，这两个相机的机芯内部都具有网络通信的功能，因此可以通过基于 TCP/IP 的网络协议进行视频流的读取。在本文提出的软件设计中，采用了实时流传输协议（Real Time Streaming Protocol, RTSP），该协议属于 TCP/IP 协议体系中的一个应用层协议，一次基本的 RTSP 交互过程如图 4-3 所示，C 可以表示客户端即本项目中的本体工控机，S 为网络摄像头及云台摄像头中的可见光及热成像相机。基于 RTSP 协议的视频流读取在 OpenCV 中已经比较成熟，使用 cv 类中的 VideoCapture 方法可以很方便地打开具有合法 RTSP 地址的相机，并存储在 Mat 类中，此时图像信息已经从传感器中被读取至工控机中，但 Mat 类中的图像信息只适合用于图像上的处理，如压缩或裁剪，而并不适合传输。此时需要 ROS 中的 cv_bridge 包将 Mat 类型的图像数据转化为 ROS 消息 sensor_msgs/Image，则可以进行如其他消息一样的话题发送，其他 ROS 节点也可以随时订阅这个话题，并在订阅成功后再转换为 Mat 类型显示出来。

Number	Direction	Message	Description
1	C → S	OPTION request	Client询问Sever有哪些方法可用
	S → C	OPTION response	Sever回应信息中包含所有可用的方法
2	C → S	DESCRIBE request	Client请求得到Sever提供的媒体初始化描述信息
	S → C	DESCRIBE response	Sever回应媒体初始化信息，主要是SDP（会话描述协议）
3	C → S	SETUP request	设置绘画属性以及传输模式，请求建立会话
	S → C	SETUP response	Sever建立会话，返回会话标识符以及会话相关信息
4	C → S	PLAY request	Client请求播放
	S → C	PLAY response	Sever回应播放请求信息
5	S → C	Media Data Transfer	发送流媒体数据
6	C → S	TEARDOWN request	Client请求关闭会话
	S → C	TEARDOWN response	Sever回应关闭会话请求

图 4-3 基于 RTSP 协议的交互过程

立体摄像头采用的是 ZED mini 方案，通过官方 ROS 驱动即可完成读取和转换为 ROS 消息的功能，相关的话题信息将一并被控制端的软件节点所订阅并显示出来。末端摄像头通过 USB 与工控机进行通讯，所以同样可以通过 OpenCV 中的 VideoCapture 方法直接读取并存储在 Mat 类型中，从 Mat 类型向 ROS 消息 sensor_msgs/Image 的互相转化与云台摄像头中的方法相同，都可通过 cv_bridge 功能包实现。

二、本体工控机图像信息远程传输至控制端

ROS 中的通信方式有三种，分别是话题(topic)，服务(service)以及动作(action)。话题是单向的，一般用于连续发送数据的传感器，在建立起一次联系后，一个发布者可以向多个订阅者发送消息，同样，一个订阅者也可以订阅多个发布者的消息；服务是一个同步双向的通信机制，服务器只有在有请求的时候才会响应，客户端在发出请求后才接受响应，当服务的请求和响应完成后，两个节点之后的连接会自动断开；动作的通讯方式与服务类似，但是不同的是，动作不需要一直等待服务器给出响应回答才执行下一个动作，同时服务器也可以时刻反馈给客户端当前动作完成的情况。

如图 4-4 所示 ROS 系统中具有一个 master 节点，它作为系统调度中心管理着所有的发布者和订阅者，它跟踪发布和订阅的话题或者服务，并且提供全局参数服务。不同的节点之间的连接以及数据传输是通过远程过程调用来建立的，具体来说，ROS 中的远程过程调用是通过 XML-RPC 实现的，这些调用用于管理整个 ROS 网络和全局设定参数，但不能用于实际的数据流传输，节点之间的实际数据将通过 ROS 自定义的二进制数据流传输协议 TCPROS 进行传输，它本质上是一种基于 TCP/IP 的 socket 通信，传输的原始数据几乎不需要解析，这种方式以增加带宽为代价降低了数据传输的延迟。

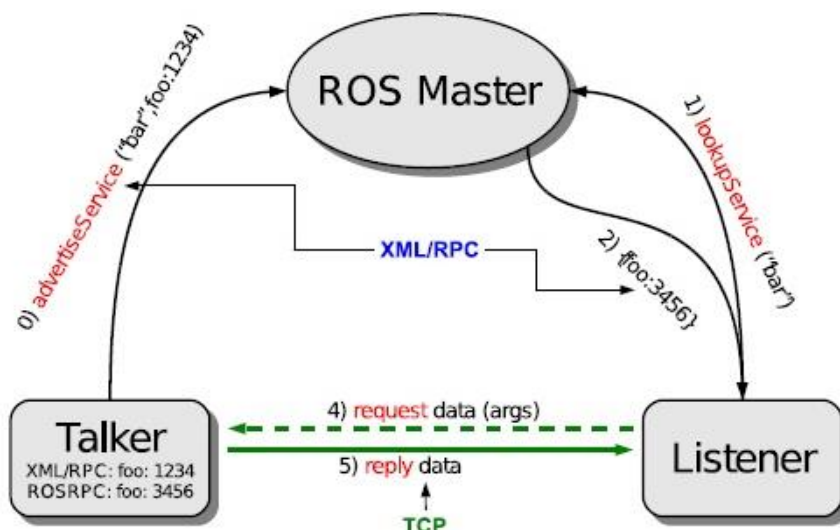


图 4-4 ROS 中的通信模式

考虑到回传的图像消息只需要完全显示的功能，不需要执行一个双向的通信或特定的动作。因此该软件中的图像传输采用了 ROS 中的节点话题分布式通信方案，如图 4-5 所示。不同传感器的图像信息通过 OpenCV 中的不同方法被读取并经过 `cv_bridge` 功能包转换为 ROS 消息类型后，可以经过不同的节点发布在不同的话题上，这些节点和话题信息将向 `master` 节点注册它们的信息。在该软件中，`master` 节点将被设置在机器人本体工控机中，用户可以通过带压堵漏机器人可视化控制软件右下方的环境参数配置中设定控制端电脑连接到本体的 `master` 节点中，则此时控制端与本体工控机均位于同一个 ROS 环境下，控制端的软件将开启四个不同的节点，这些订阅节点同样会将自身信息与需要订阅的话题向 `master` 节点注册。之后发布者与订阅者之间就可以建立连接，并通过 TCPROS 协议进行数据传输。

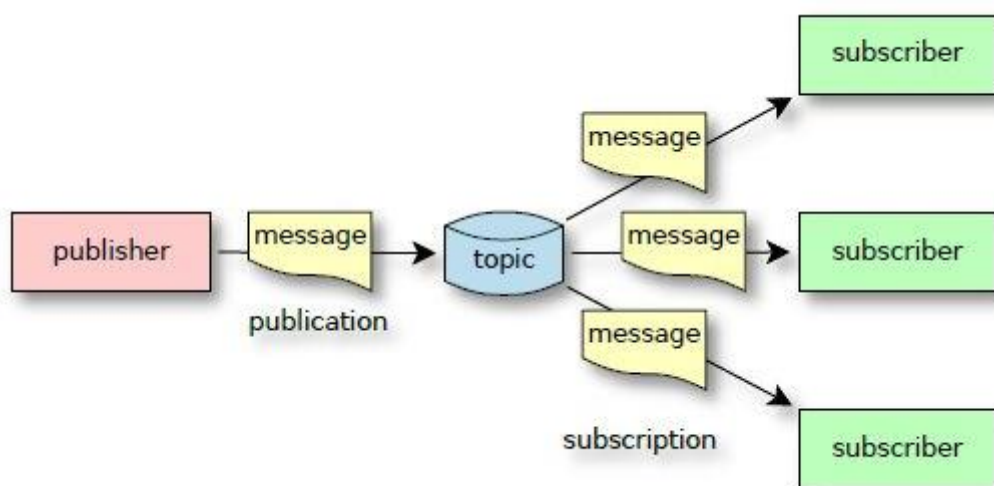


图 4-5 ROS 中的基本计算信息图，以订阅发布模式为例

4.4 控制程序的设计与实现

控制端中的控制程序主要分为两部分，一部分为涉及带压堵漏机器人本体的控制操作，这些操作往往都是按键单方向控制，种类及数量较多；另一部分是设计带压堵漏机器人在操作过程中的流程控制，这类控制特点是数量较少，但是属于序列性操作，操作人员需要知道下一步的操作提示以及意义。考虑到这两类控制信息的要求不一样，控制端中的控制方式也将分为了键盘按键控制以及可视化软件鼠标点击控制等两种方式。接下来将分别介绍这两种控制方式的设计与实现，以及它们与本体之间的数据传输。



图 4-6 带压堵漏机器人键盘控制设计分布图

一、键盘按键控制

键盘按键控制主要面向机器人本体的控制，其中包括履带移动底盘的控制，机械臂的控制，云台摄像头的控制、支撑腿的控制以及气动枪、喷枪等气动元件的控制，图 4-6 给出了键盘控制设计分布图。履带移动底盘的控制通过脉冲宽度调制（Pulse width modulation, PWM）技术来实现电机的正转反转以及停止，履带平台本身只由两个电机组成，因此左右自旋或边走边转弯则通过左右电机转动方向或差速来实现，不同的速度通过调节 Arduino 控制板上的 PWM 引脚输出的脉冲占空比实现。如图 4-7 所示，工控机与 Arduino 之间通过 USB 连接，键盘按键的信息将发布在平台速度的话题上，Arduino 内会时刻订阅该话题上的消息，并根据消息中的数据内容更改数字端口 9 与 10 的输出，这些 PWM 输出将直接通过无刷伺服驱动器控制双路电机的转

动方向及速度，实现平台整体在不同方向上的运动。

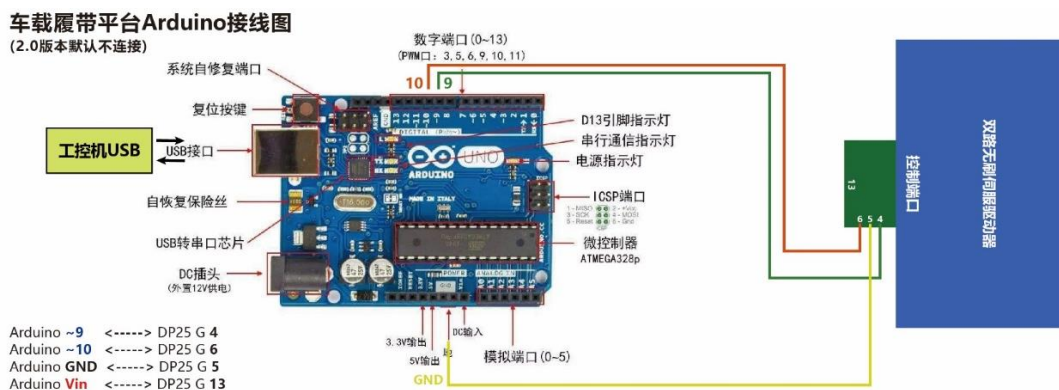


图 4-7 Arduino 输出 PWM 波控制平台电机示意图

该项目中的机械臂方案采用的是优傲机器人 UR10，对于简单的固定式程序，可以直接在 UR 机械臂上的示教器上进行逻辑编程实现。但面对更高级的开发要求，如按键控制等，则需要通过远程发送 URScript 来控制，远程发送的协议同样属于 socket 通信。该项目中的通信方案基于 python 的 urx 库进行开发，并根据 URScript 中的 API 接口添加相应的方法，具体来说，键盘控制中的方向移动主要是在机械臂的笛卡尔坐标系中的运动，即以末端为中心的上升/下降，前进/后退，平移/绕管等运动。这些运动可以通过 API 接口中的 speedl 接口实现，传递参数包括期望末端速度，期望末端加速度，执行时间三个参数。键盘按键将通过不同的按键实现不同方向上的期望末端速度定义，再把该参数通过 socket 通信写入到 speedl 接口中，机械臂即可实现不同方向上的末端运动。

云台摄像头内部采用了海康威视的机芯，因此云台摄像头的控制可以通过海康威视的接口 HCNetSDK 进行实现，该接口中的 NET_DVR_PTZControlWithSpeed_Other 方法可以实现以特定速度在某个方向上控制云台的运动。通过设定一个控制时间，在该程序中为 0.8s，即键盘按下后将以特定的速度在对应的方向上以 0.8s 为执行周期重复执行，直到按键被松开。云台运动的速度及持续时间均是可调的参数，通过不同的参数搭配可以实现不同的效果，如精度要求不高的快速转动，或精度要求较高的缓慢转动等。云台返回预置位 1 等操作同理可以通过 SDK 中的其他接口实现，预置位 1 需要提前在程序中记录位置信息，以用作下次一键到达。

其他按键控制大多属于继电器控制板上的控制，大部分是气动元件的控制，另一部分是电动元件推杆的控制。这两类的控制均在继电器控制板上可以实现，如图 4-8 所示，工控机与继电器之间的连接为 RS232，通过在工控机中发送不同的 8 位十六进制命令，可以实现继电器 1-16 口的闭合或断开。在接线上，气动元件及电动元件的正极均与电池连接，负极则通过端子或直接接在继电器的公共端中，公共端默认常闭于浮空位置，因此元件的正负极没有形成回路。通过程序中的按键控制，实现某个口

的公共端闭合于与负极相连的端口，即正负极接通，激活相应元件的动作。

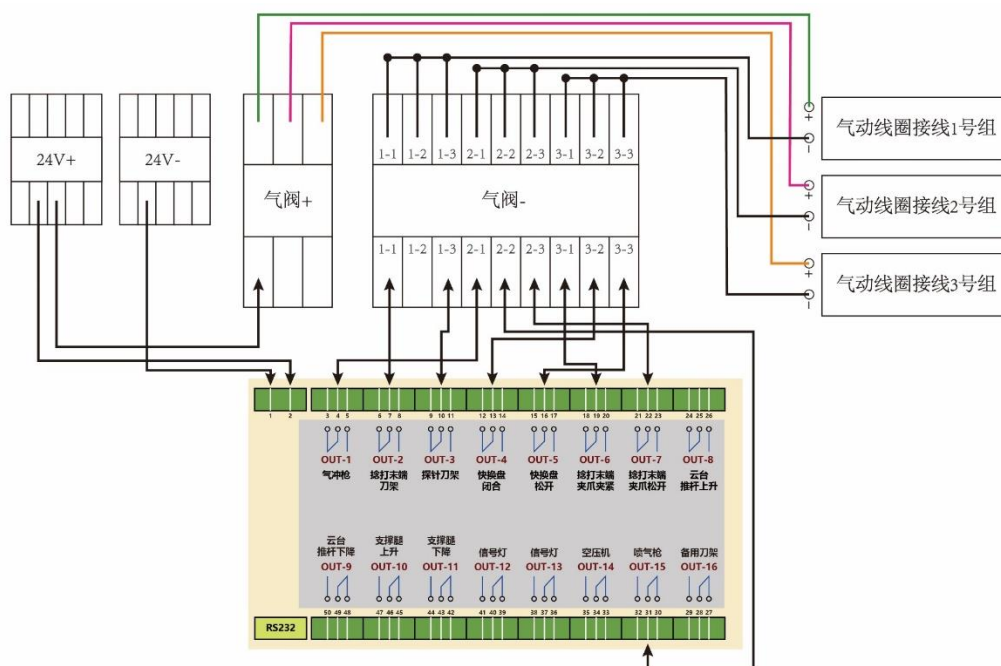


图 4-8 继电器控制板与气动元件控制连线示意图

二、可视化软件点击控制

可视化软件中的控制部分主要为堵漏流程控制以及拍照定位控制。在堵漏流程控制中，操作人员需要知道每一步操作的意义以及下一步操作时的提示，同时为了避免操作人员执行了错误序列动作导致机器人宕机或设备损坏，堵漏流程控制中只有下一步可行的按钮才会呈现出绿色，且点击有效，其他无效的按钮则呈现灰色，用户误点击后将不会触发任何控制指令。

控制功能中主要分为了机器人姿态控制、机器人本体气动元件控制以及机械臂各关节姿态控制三大部分。这些模块内按照不同的功能或姿态又细分了不同的按钮，这些按钮组成了完整的一套堵漏流程。这些按钮被按下后将以 21 位的 `std_msgs/String` 数据格式发布到 `/client_msgs` 这个话题上，传输程序会订阅这个话题并填充各个数据位至相应变量后再发送到机器人本体，经解码被订阅后激活机器人动作，具体动作的执行方式与键盘控制的方式一致。表 4-1 展示了该控制程序中定义的 21 位数据格式的设置及含义。

表 4-1 控制程序中定义的数据格式

变量名称	数据位	位定义	常态		
data1	0	捻打末端夹持状态位	0-夹持中间态	1-夹持	
data2	1	捻打末端松开状态位	0-夹持中间态	1-松开	
data3	2	快换盘配合状态位	0-平衡中间态	1-配合	
data4	3	快换盘松开状态位	0-平衡中间态	1-松开	
data5	4	探针末端刀架开合标志位	0-闭合	1-打开	
data6	5	捻打末端刀架开合标志位	0-闭合	1-打开	
data7	6	漏点位置确认标志位	0-未确定	1-确定	
data8	7	夹持位置确认标志位	0-未确定	1-确定	
data9	8	换取/放下探针末端标志位	0-常态	1-换取	2-放回
data10	9	换取/放下捻打末端标志位	0-常态	1-换取	2-放回
data11	10	移动至探针准备姿态	0-常态	1-移动	
data12	11	移动至捻打准备姿态	0-常态	1-移动	
data13	12	移动至初始默认姿态	0-常态	1-移动	
data14	13	移动至工作待机姿态	0-常态	1-移动	
data15	14	底座旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data16	15	肩部旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data17	16	肘部旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data18	17	腕一旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data19	18	腕二旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data20	19	腕三旋转控制位	0-常态	1-顺时针旋转	2-逆时针旋转
data21	20	机器人状态灯	0-正常	1-异常	2-错误
data22	21	气缸开关控制位	0-关	1-开	

三、数据传输

无论是键盘控制还是软件点击控制，它们首先都需要读取键盘按下或鼠标点击的事件，并根据这个事件向不同的话题中发布相应的信息。表 4-2 展示了所用到的控制话题及其含义。这些话题在控制端中将被 Transmission 该节点全部订阅，并将这些不同话题订阅回来的数据填充至一个 69 位的 char 数组中，并将该数组通过写串口的方式写入到数传电台发送端中，等待数传电台接收端的接收。

表 4-2 控制程序中发布的话题及消息类型

话题名称	消息类型	值变量名称	含义
/cmd_vel_ori	Twist	twist	控制履带移动平台运动
/PTZ_keys_ori	Int64	yuntai_value	控制云台摄像头运动
/gun_keys_ori	Int64	gun_value	控制气冲枪
/injector_keys_ori	Int64	injector_value	控制喷气枪
/rod_keys_ori	Int64	rod_value	控制摄像头升降杆
/foot_keys_ori	Int64	foot_value	控制支撑腿升降杆
/UR10_keys_ori	Twist	arm_twist	控制 UR10 机械臂相对运动
/client_msgs	String	client_value	软件控制

考虑到控制信息在操作过程中对鲁棒性、抗干扰性等具有较高的要求，因此数据在发布至某个话题后并没有直接在本体工控机中进行订阅，而是采用了无线数传电台的方案。如图 4-9 所示，无线数传电台采用了 LoRa 扩频调制技术，与传统单频通信或基于局域网的 ROS 通信相比具有更远的通信距离和更强的抗干扰能力，由于所有控制单元都放置在控制柜内部，对于空气放电、浪涌测试、接触放电等情况，数传电台也具有更强的硬件保护能力。通过在控制端的数传电台写入数据后，通电自动建立连接的数传电台接收端则可自动接收数据。本体工控机将通过串口读取这些数据，并新建一个节点 `receiver`，通过这个节点将读取回来的信息解码填充至不同变量后，重新发布到不同的话题上。机器人本体的控制程序将会订阅这些由本体工控机发布出来的话题，并根据话题上的消息内容完成不同的动作。

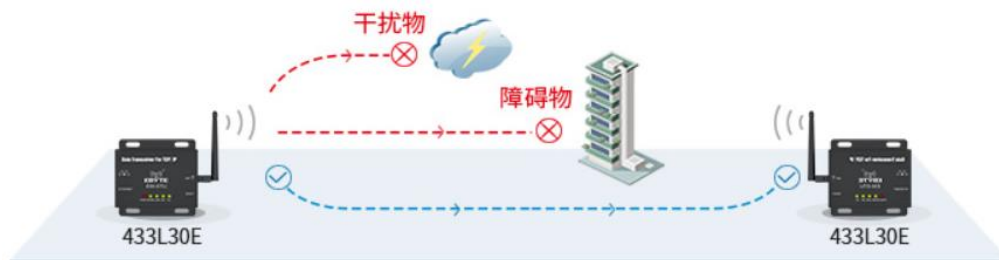


图 4-9 数传电台传输示意图

4.5 本章小结

本章详细地介绍了带压堵漏机器人配套的控制端软件的设计与实现。软件包括了控制程序、图像回传程序以及人机交互界面等三大模块。在人机交互界面模块中，本章介绍了可视化控制软件的设计布局与功能说明，同时还介绍了键盘控制的按键分布设计；在图像回传程序中，介绍了云台摄像头、立体摄像头及末端摄像头通过 OpenCV 中的 VideoCapture 方法进行读取，利用 cv_bridge 功能包进行 Mat 类型图像数据与 ROS 图像数据类型之间的相互转化，并基于 ROS 中的分布式通信协议，通过 TCPROS 传输到位于同一局域网中控制端软件中；在控制程序中，主要介绍了键盘按键控制中

对应的机器人本体各部分控制方式，其中包括移动平台的 PWM 波控制速度及方向，URScript 配合 urx 库对优傲机器人的控制，海康威视接口 HKNetSDK 对云台摄像头的控制以及继电器控制板的串口控制，同时还介绍了软件鼠标点击控制中的通讯协议，以及所有控制数据通过数传电台建立连接并传输的设计意义与方法。

第 5 章 基于最小二乘法的管道三维重建

5.1 管道三维重建的意义

带压堵漏机器人可以在工人远程操作下完成修复管道的任务，在这个过程中主要靠工人直接观察管道泄漏的情况，并手动控制机械臂进行运动，靠近漏点完成夹持和捻打的动作，整个作业过程仍属于遥操作半自动化过程。而要实现带压堵漏作业更高自动化程度的智能作业，则需要实现视觉伺服的功能。则让机械臂与视觉设备形成一套配合的系统，摄像头能够发现管道并进行定位，泄漏管道的三维姿态信息应能被重建出来并表示在机械臂的坐标系空间下，此时机械臂能够根据泄漏目标点的位置进行自主规划，并在该过程中绕开管道，避免碰撞。因此管道三维重建是实现智能化带压堵漏的基础环节，本章将在已实现的遥操作半自动化过程基础上提出一种管道三维重建方法，该方法可以实现在人工标记下对管道进行三维重建，并将重建后的管道直线表示在机械臂底座的笛卡尔坐标下。

5.2 基于最小二乘法的管道三维重建法

基于最小二乘法的管道三维重建法主要利用了管道的 RGB 图像以及深度图像，在人工标定管道位置的先验知识帮助下，建立管道的掩模图，并对掩模图二维坐标对应的深度信息进行提取，产生三维点云。最后通过点云滤波及最小二乘法，对筛选过后的点云进行直线拟合，整体重建算法流程如图 5-1 所示，算法步骤可以分为以下六个步骤：

S1：通过立体摄像头的视觉设备拍摄管道区域，得到泄露管道的 RGB 图像；

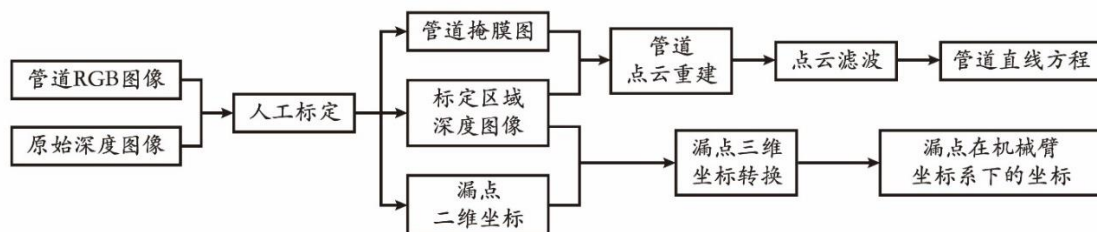
S2：对拍摄得到的管道 RGB 图像进行人工标定，标出一条平行于管道且位于管道中心轴线位置附近的直线及其漏点在图中的位置；

S3：算法自动构建管道掩模图，得到操作人员所绘制的直线以及漏点的二维坐标；

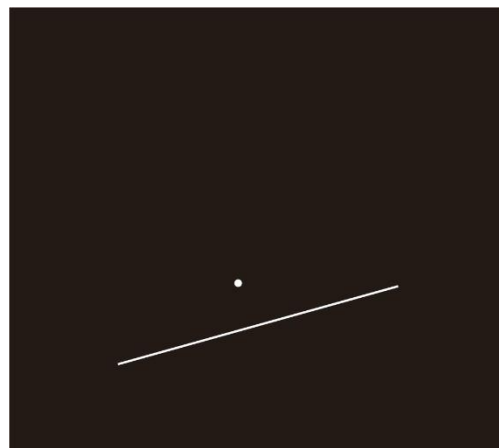
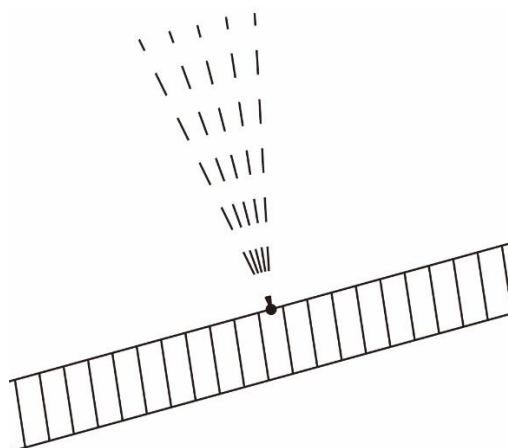
S4：进行管道的三维点云重建，得到摄像头视野范围内的环境点云图，并转换输出出漏点的三维坐标；

S5：对环境点云图进行点云滤波，根据 S2 中人工标定的直线，以该直线为中心线设定阈值，对超出阈值的点云进行筛选剔除；

S6：使用最小二乘法对筛选后的点云进行拟合，得到管道在机械臂坐标系下的直线方程，实现管道重建。



首先，操作人员通过远程控制机器人调整视觉系统以达到最佳的目标观测位置。其中视觉系统由立体摄像头、可见光摄像头以及热成像摄像头组成，为操作人员提供多方位的观测维度，使漏点和管道更加直观地显现在控制台中。视觉系统中的立体摄像头 ZED mini 具有惯性传感器，可以计算出相机开启后运动的方向和距离，这些信息将用于管道直线坐标从相机坐标系到机械臂坐标系的转换。



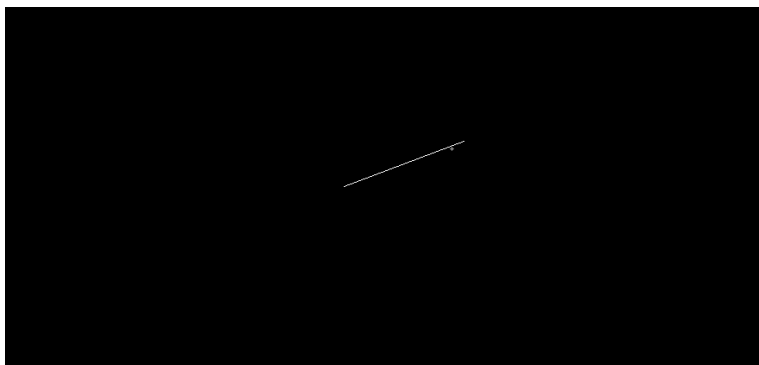
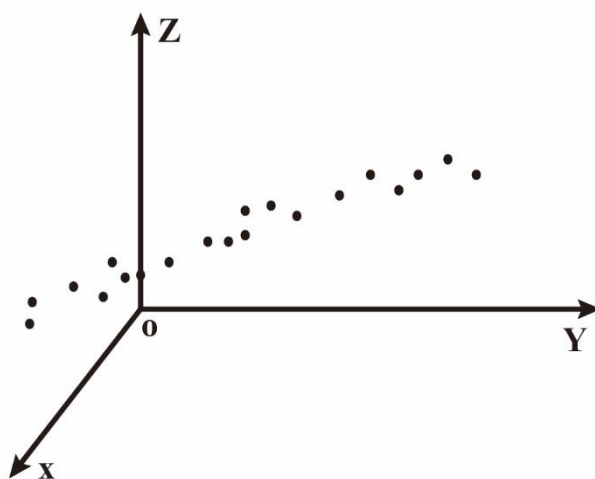
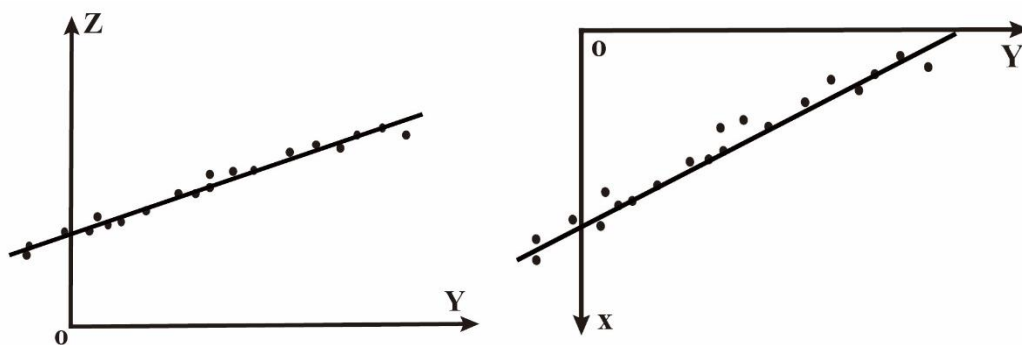


图 5-3 上图：实际泄漏管道 RGB 图像， 下图:对应掩膜图

如图 5-2 级图 5-3 所示，视觉系统到达管道最佳观测位置后，操作人员根据 RGB 图像，红外热成像等视觉信息进行分析，找到目标管道及其漏点在的位置，并手动标定管道和漏点位置。用一条平行于管道走向且位于管道中心轴线附近的直线描述管道的二维位置与方向，用点表示管道上的泄漏点的位置。计算机依据上一步中人工标定的图像中的管道直线及其漏点的位置，输出一张管道和漏点掩膜图，该图包含了标定管道上各点，表现形式为一条直线和漏点的二维坐标信息。



(a) 管道三维点云示意图

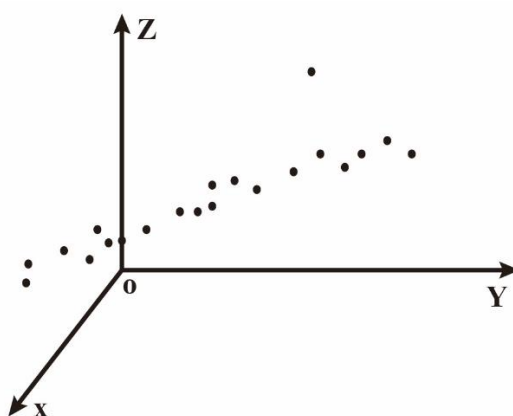


(b) 管道三维点云在 ZOY,XOY 上的投影以及平面分别进行拟合直线的结果

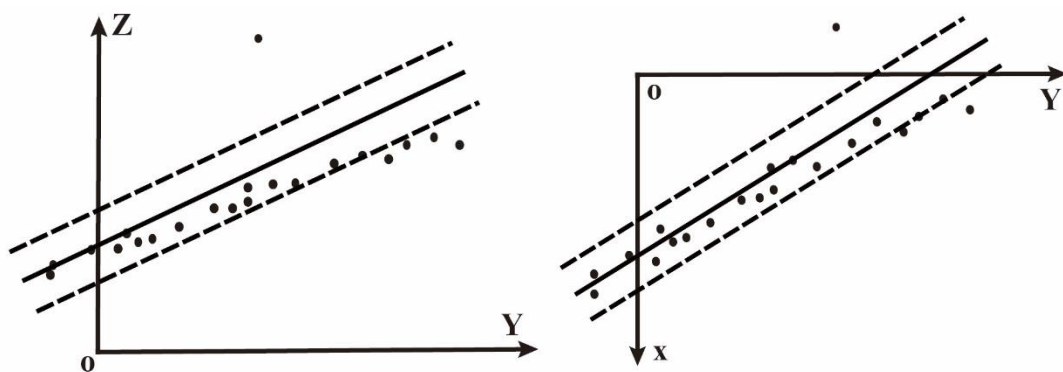
图 5-4 管道三维点云图及投影拟合直线示意图

计算机通过整合管道掩膜图及深度图像的信息，建立出管道的三维点云：计算机依据掩膜图中管道上各点的二维坐标，将其与深度图进行对应匹配，进而得出标定管道上各点在相机坐标系下的三维坐标，建立起管道上的点的三维点云，如图四所示。同时，计算机通过匹配掩模图图中标定的漏点位置及其深度图上的位置，进行漏点的三维坐标转换：通过将掩模图中的二维坐标放入深度图进行匹配，得出该点的深度信息，实现漏点二维至三维的坐标转换，并在计算机终端输出漏点在相机坐标系下的三维坐标。最后根据摄像头与机械臂底座的位置关系，进行坐标转换，求得管道点云和漏点在机械臂坐标系下的坐标。

人工标定后，计算机根据管道掩膜图像提取漏点坐标和其对应的深度数据，求解出漏点基于世界坐标系下的三维坐标。同理，使用管道掩膜图提取管道像素点并计算管道各点的三维坐标，获取世界坐标系下的管道点云，如图 5-4 所示。由于相机噪声的存在，管道点云不能直接构成期望中管道直线，因此需要对点云进行直线拟合。计算机将经过点云滤波后三维点云中剩余的点分别投影至 ZOY 和 XOY 平面如图 5-5 所示，随后，计算机在两个平面内对两个平面点集进行线性规划，得出一条 Z 关于 Y 的方程和一条 X 关于 Y 的方程。随后，我们仅需对 Y 设定取值范围，最终使三维点云中剩余的点能够拟合出一条较为接近实际的曲线。



(a) 带孤立点云的管道三维点云示意图



(b) 带孤立点云的管道三维点云在 ZOY,XOY 上的投影以及拟合直线的结果

图 5-5 带孤立点云的管道三维点云图及投影拟合直线示意图

然而考虑到人工噪声和天然噪声的影响，管道点云中往往会存在孤立点云，这样在两个平面分别拟合出来的直线会因为孤立点云距离真实点云集较远的影响，偏离了正确的方向，即拟合出来的直线不能真实代表管道的位置及方向，如图 5-5 (b) 图所示。

本文提出一种过滤这种孤立点云的方法：如图 5-6 所示，计算机先依据上一步中得到的管道直线，设定阈值并规定将三维点云中距离该拟合直线距离超过预定阈值的点进行剔除。如图 5-7 所示，对孤立点云进行剔除后重新对点云集合进行一次直线拟合，最终可准确拟合出管道的直线。至此，管道与漏点的重建已完成，如图 5-8 及图 5-9 所示。

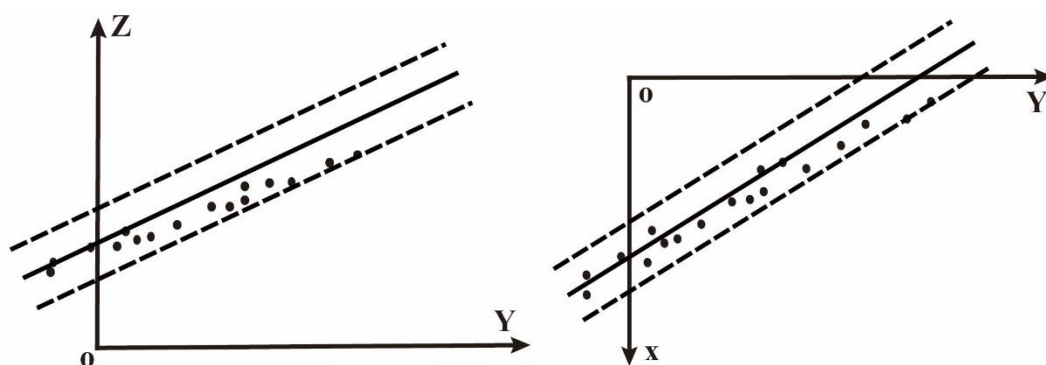


图 5-6 经过点云滤波消除孤立点云后 YOZ,XOY 平面上保留的点集

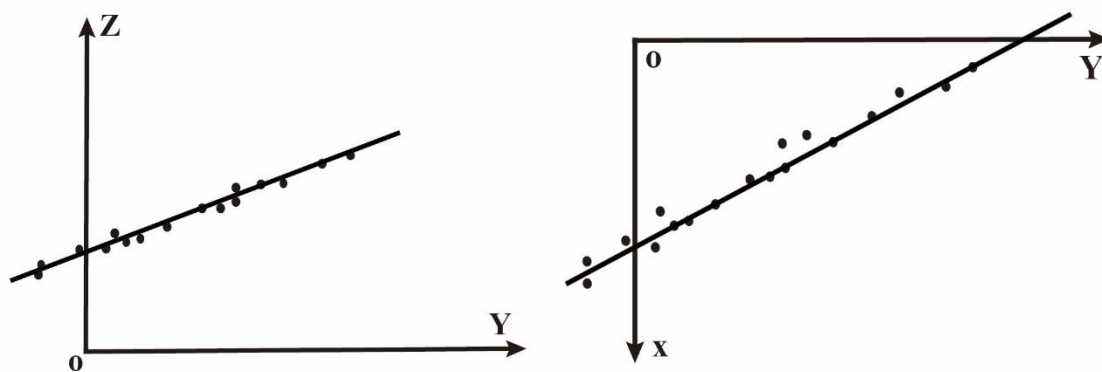


图 5-7 在 ZOY,XOY 平面上使用过滤后的点云做拟合得到的直线结果

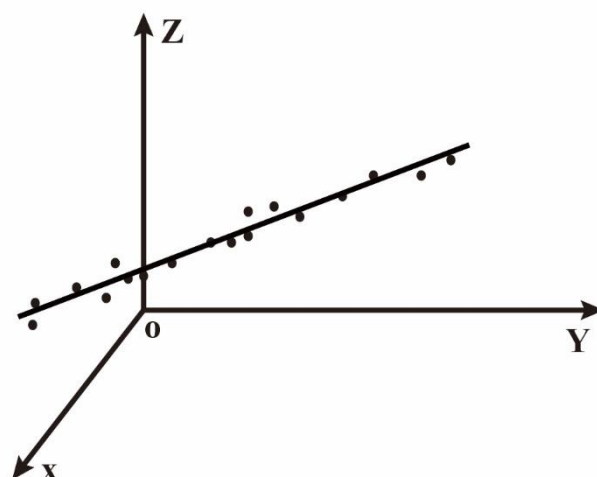


图 5-8 在三维空间上经过点云滤波后的直线拟合结果

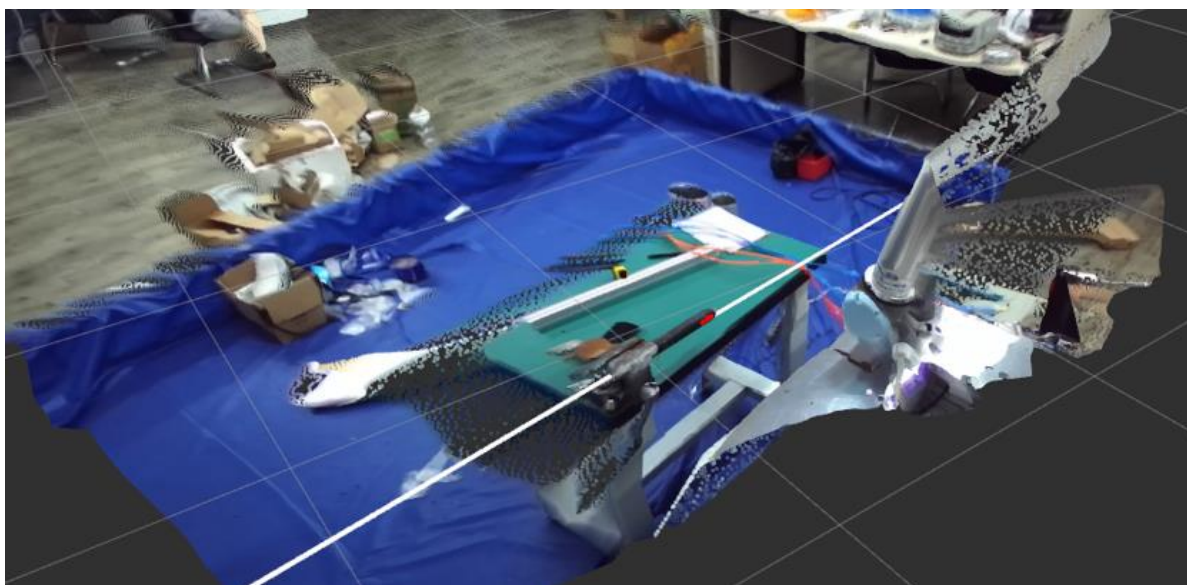


图 5-9 经过直线拟合后的管道直线与原有点云的重合效果

5.3 本章小结

本章提出一种基于人工标定的管道及漏点重建方法。通过对管道图像的实时反馈的分析，操作工人可以较为精确地找到泄露管道及其漏点的具体三维位置：操作工人结合深度图与 RGB 图像，得到管道及其漏点在图像中的位置，操作工人随即在图像中以一条直线的形式画出平行管道的中心轴线位置，随后工控机会拟合出一条直线，进而标定出管道位置。然后，操作工人可在拟合直线上或附近标出漏点，进而完成管道及其漏点的重建，用于后续带压堵漏机器人对漏点进行修补。这种管道及漏点确定方式，将管道漏点的判断以数据化的形式呈现出来，使其运作具备更高的准确性。再者，在利用神经网络进行管道位置确定时，设备往往要求相当高的图

像清晰度，在带压堵漏的工作环境下，深度摄像头的图像采集往往会受到泄露物质的干扰，使其判读出现较大误差，而本发明提出的人工标定重建管道及漏点的方法，因为加入了操作人员实时对图像的判断以及泄露现场的作业经验，可以在图像被环境中的泄露物质干扰的情况下，依据可见光图像及热成像的实时反馈，标出管道及其漏点的具体位置，对带压堵漏等环境因素干扰图像数据采集工作的问题具有可观的解决作用。

第 6 章 电厂模拟泄漏环境的运行与测试

6.1 整机运行与测试

带压堵漏机器人的整机运行及测试将首先在实验室室内环境下进行，主要测试项目包括在远程操作下底盘的移动功能、机械臂的遥操作、云台的遥操作以及气动元件的使用。测试环境如图 6-1 所示，属于室内空旷环境，地面为木板材质，光线正常。



图 6-1 带压堵漏机器人室内测试环境图



(a) 前进后退运动功能测试

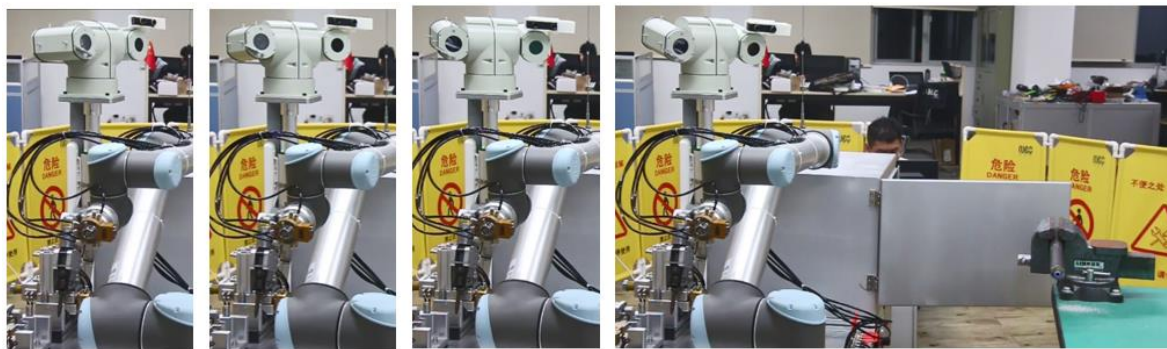


(b) 转弯运动功能测试

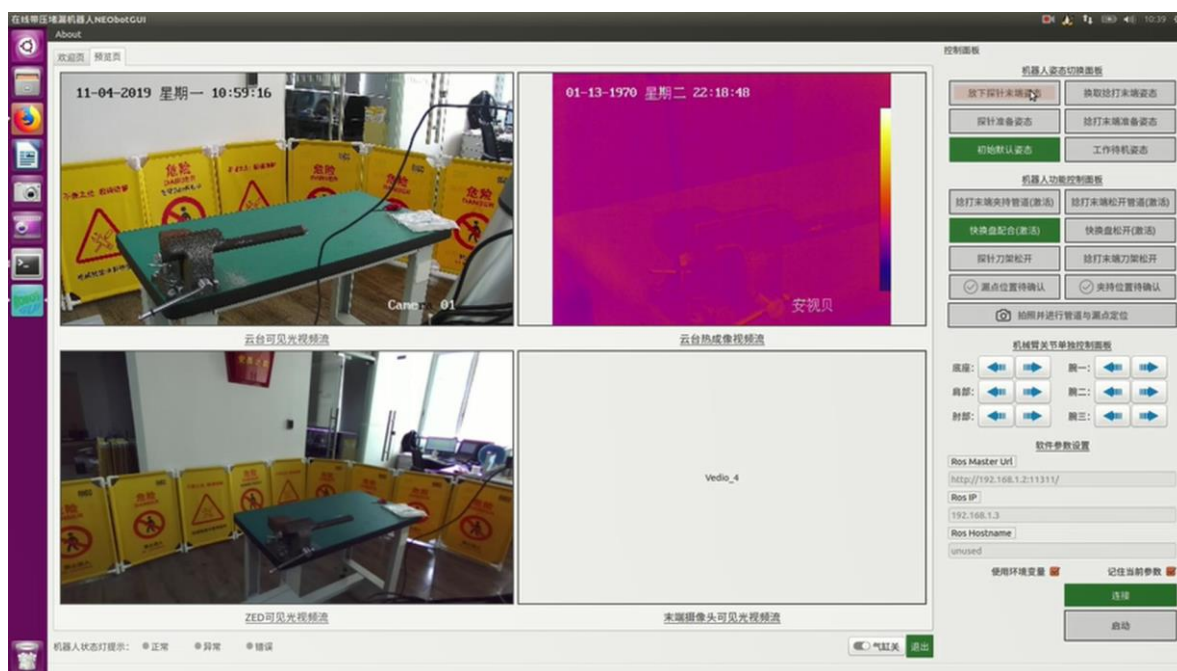
图 6-2 带压堵漏机器人室内运动功能测试

在室内环境中，我们主要测试了带压堵漏机器人前进后退以及自转两个运动功能，测试效果如图 6-2 所示，其中（a）图展示了前进后退的效果，（b）图展示了自转后前进的效果。相比于边走边转弯的运动方式，原地自转对电机输出扭矩的要求更强。因此我们只测试了要求更高的自转功能，在室内木板材质环境下进行自转，机器人底盘由于顶部负载大，为了保证输出扭矩足够，电机转速会变得很慢，且电机输出电流会增大，正常情况下为 5A 左右，最大不超过 10A，在自转情况下电流可达 30-40A。由于 UR10 机械臂安装在机器人本体右侧，本体两边的重量非绝对均匀，会导致机器人中心偏右，因此在相同的速度命令下，机器人本体实际表现出的左自旋速度会比右自旋稍快。

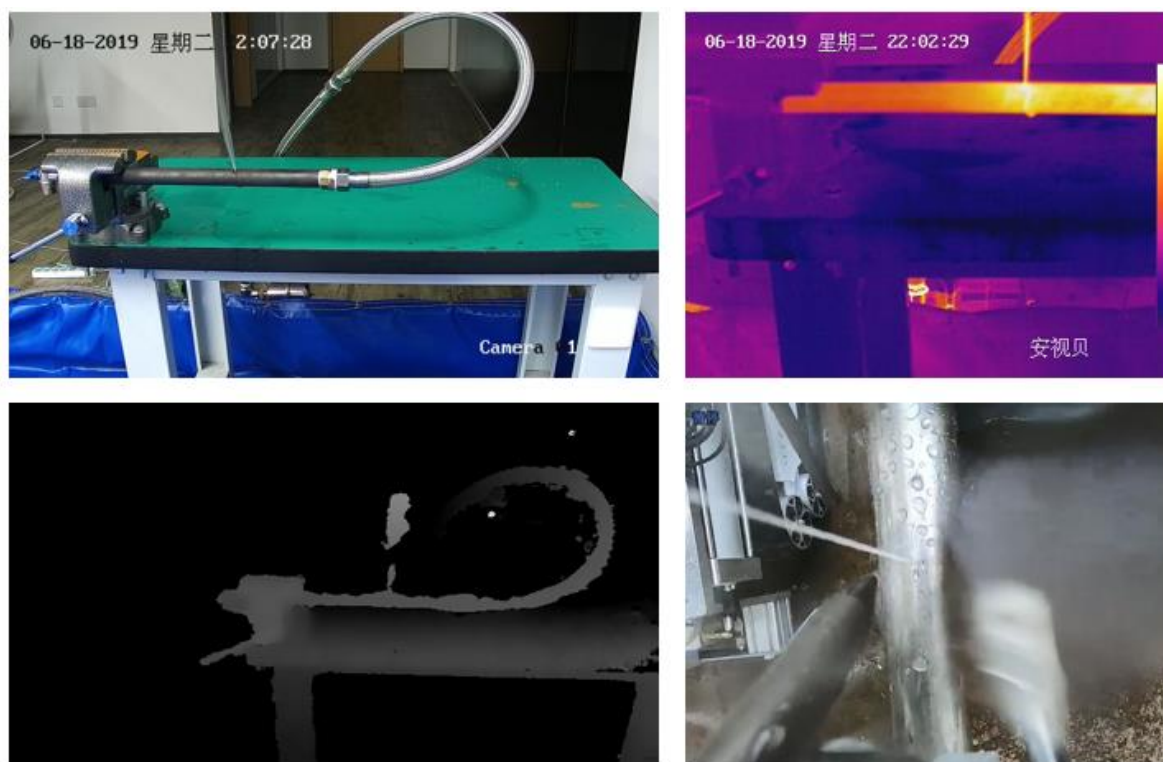
图 6-3（a）图展示了本体中云台摄像头在远程控制下从默认状态开始运动，直到回传画面中出现清晰的泄漏管道的过程。云台的基本运动包括了底座推杆的上升下降、云台的自旋以及俯仰。在图 6-3（b）图中的软件界面可以看到此时云台摄像头中的可见光摄像头、热成像摄像头以及立体摄像头 ZED mini 均已回传图像，末端摄像头画面空白因为此时机械臂未装配任何末端。软件中显示的画面场景略有不同的原因是因为安装位置与画面分辨率均有不同，这也给操作人员提供了多模态、多维度的一个观察效果。



(a) 云台相机旋转及俯仰运动测试



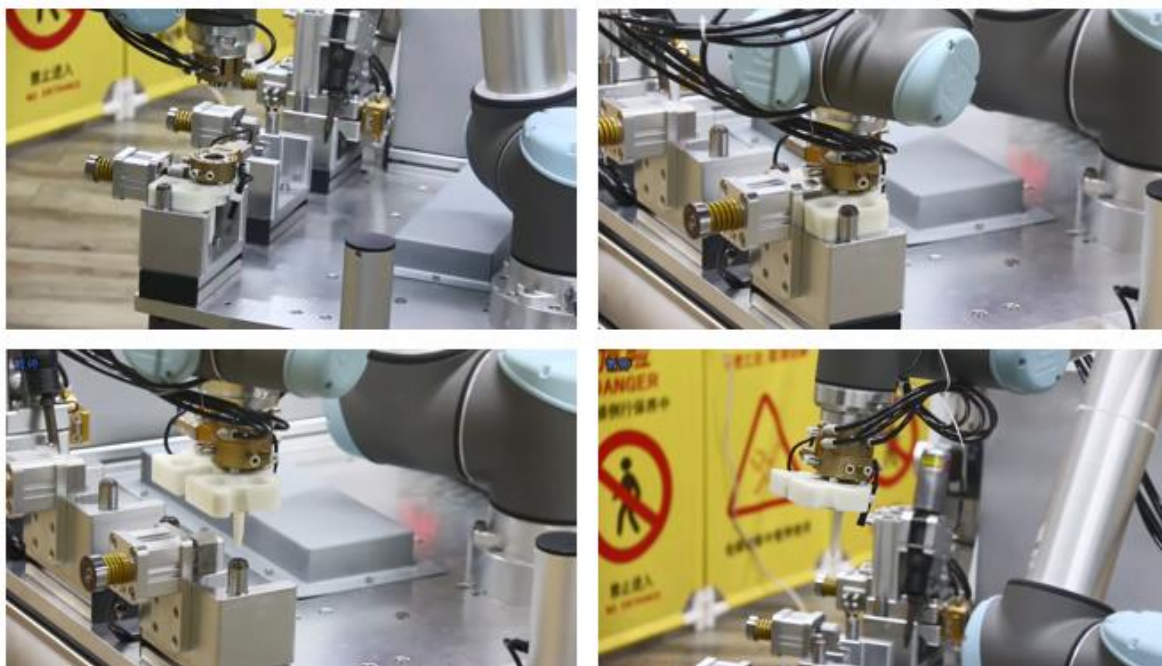
(b) 可视化控制软件图像回传测试



(c) 各相机图像回传显示测试

图 6-3 带压堵漏摄像头系统功能测试

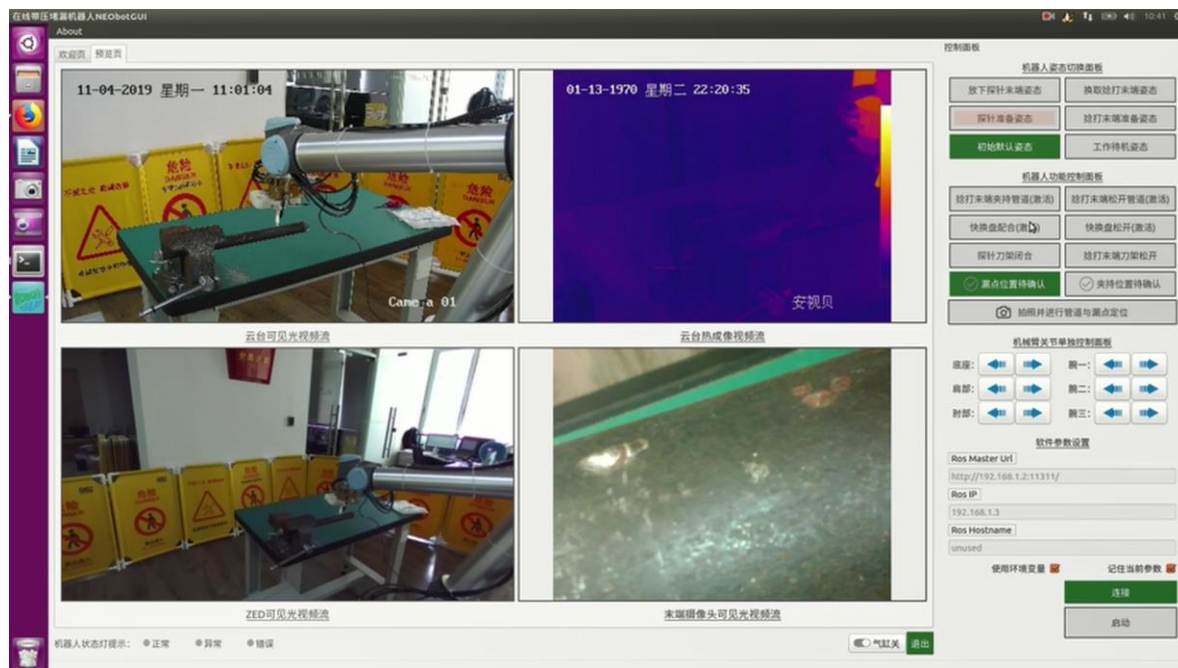
图 6-3(c)图中展示了整个机器人中的相机系统回传图像的测试效果,从左往右,从上往下分别是云台摄像头系统中的可见光图像、热成像图像,立体摄像头中的深度图像,以及末端摄像头的图像。通过不同的相机在不同角度传回来的信息,操作人员可同时观察到现场泄漏管道在全局及局部下的图像,由于泄漏介质一般具有高于空气的温度,因此从热成像图中也可以提示操作人员泄漏砂眼的具体位置,立体相机中的深度信息图可以让计算机计算当前管道在相机坐标系下的姿态,并转化至机械臂底座坐标系下,是实现智能化视觉伺服作业的关键基础。



(a) 带压堵漏机器人自动装配探针末端功能测试

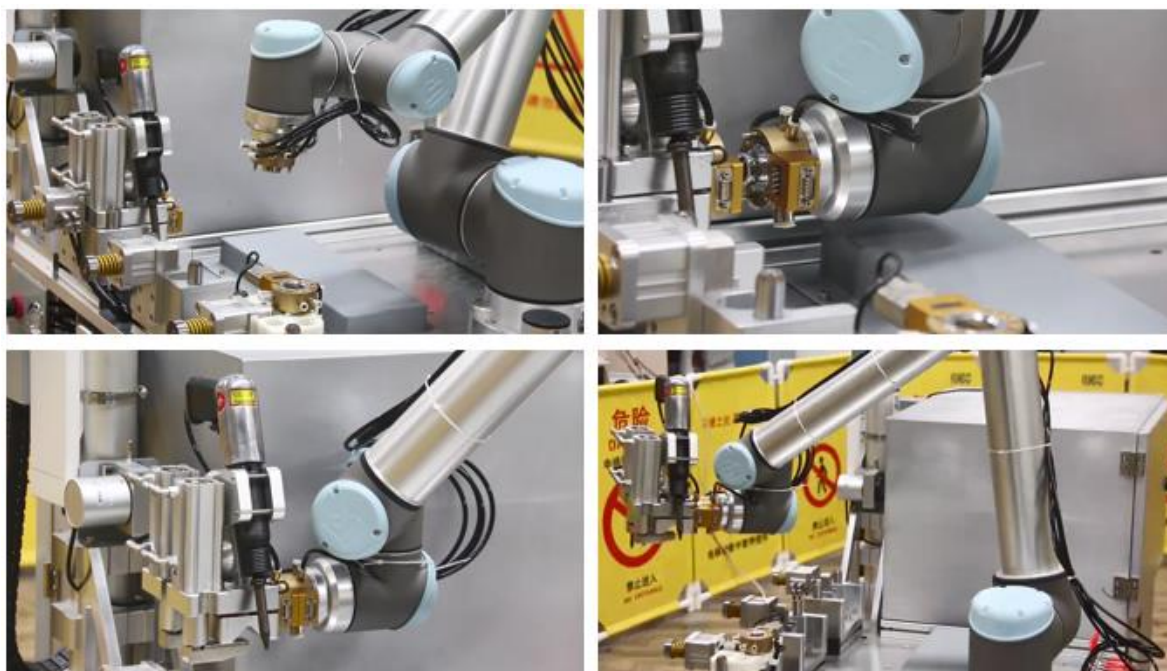


(b) 带压堵漏机器人装配探针末端进行近距离观察功能测试



(c) 装配探针末端后图像回传显示功能测试

图 6-4 带压堵漏机器人探针末端功能测试



(a) 带压堵漏机器人自动装配捡打末端功能测试



(b) 带压堵漏机器人装配捡打末端进行管道夹取功能测试

图 6-5 带压堵漏机器人捻打末端功能测试

图 6-4 与图 6-5 分别展示了带压堵漏机器人探针末端以及捻打末端装配和动作的过程。探针末端以及捻打末端被放置在本体表面的刀架上，刀架的位置是固定的，因此机械臂装配末端的过程可事先编程实现全自动化。机械臂收到可视化控制软件发来的命令，先到达相应刀架的上方或侧方，此时继电器控制板上快换盘松开对应的电磁阀闭合，快换盘内卡珠回缩；机械臂往前到达装配姿态，继电器控制板上快换盘闭合对应的电磁阀闭合，快换盘卡珠外顶，成功卡住对应末端；继电器控制板上对应刀架松开的电磁阀闭合，刀架松开对末端的卡锁，机械臂携带对应末端从刀架抽出。

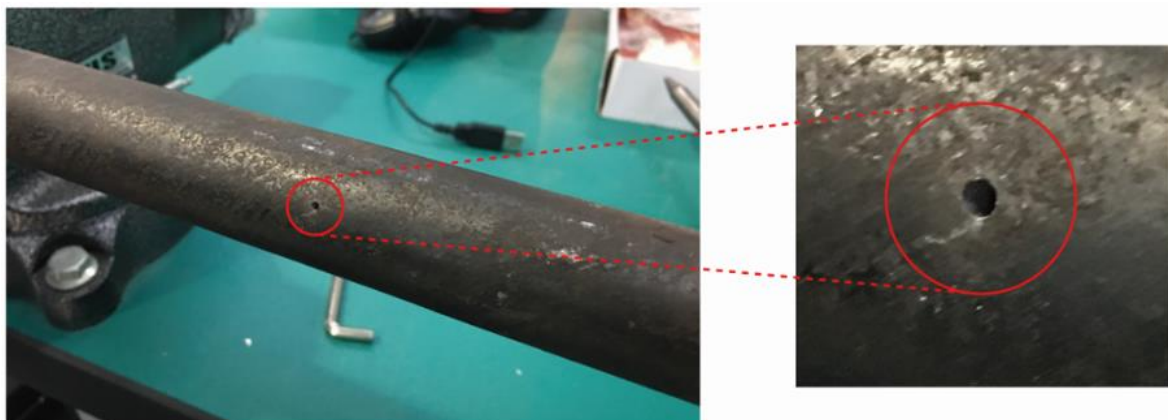
探针末端的主要功能在这里为捻打前对泄漏管道及砂眼进行近距离观察，因此机械臂从刀架抽出末端后只需控制机械臂到达管道泄漏位置附近即可。捻打末端主要的功能属于堵漏修复管道，因此在靠近管道之后，需要控制机械臂运动使得末端夹持位置与管道尽量平行，由于捻打末端中的 V 型块设计，夹持前的平行定位具有一定的容错度。但为了提高夹持后捻打末端捻打位置的精确度，在操作机器人本体靠近管道时，应使得机器人已经尽量平行于待作业管道，之后再由机械臂携带捻打末端进行位置的微调。

如图 6-5 (b) 图所示，操作人员确认捻打末端已平行于管道，即可控制继电器控制板上夹爪打开对应的电磁阀闭合，使夹爪在管道上方打开；此时控制机械臂以末端为中心作垂直下降运动直到 V 型块接近或触碰到管壁表面，控制夹爪夹持的电磁阀闭合，使得夹爪在气缸的推力下夹持住待作业管道；在实际作业过程中，若夹持后捻打末端的针头并没有在捻打位置附近，则松开夹爪并机械臂整体往上提起，再微调末端位置并重复以上过程。

6.2 带压堵漏功能的运行与测试

带压堵漏机器人系统中的各模块功能已在上一小节中介绍，本小节中主要介绍机器人在携带捻打末端并夹持至管道后堵漏的效果，以及在电厂模拟泄漏环境中的整体表现。

当末端执行器夹紧待修复管道后，此时气动枪距离泄漏位置约 3-5 毫米，如图七 (b) 所示。通过控制电磁阀来启动气动枪进行捻打，捻打时间为 1-2 秒一个周期，一个周期后松开捻打键进行观察，决定是否继续捻打。泄漏位置附近的金属材料在高频捻打的外力下发生塑性形变，并沿着捻打方向向前推移，最后材料堆积在泄漏砂眼附近形成突起，图 6-6 分别展示了在无泄漏介质下的砂眼小孔、捻打定位以及最终效果。



(a) 待堵漏泄漏砂眼



(b) 捻打夹取过程



成功堵漏，捻打形成圆形凹痕堵住砂眼

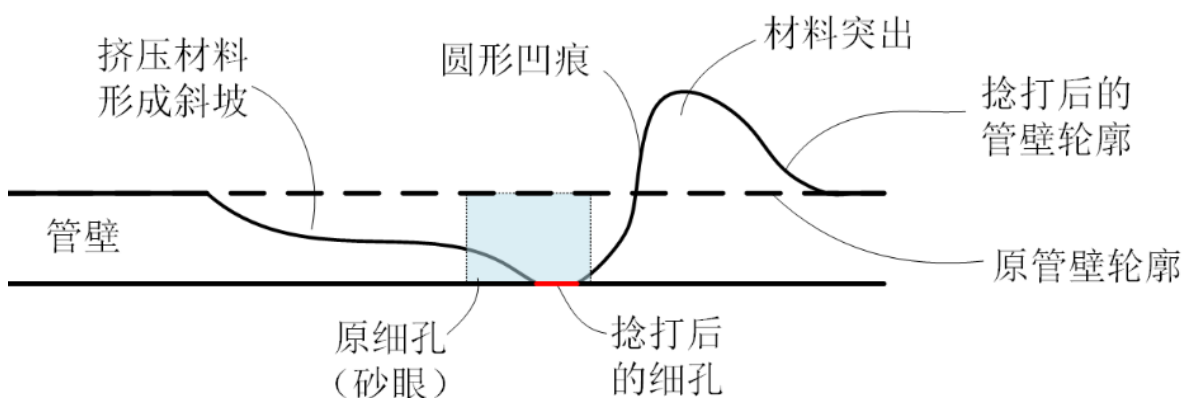
(c) 捻打堵漏成功的管壁表面

图 6-6 带压堵漏机器人捻打过程测试

从图 6-6 (c) 图中可以发现，管壁表面材料被打出凹痕，也露出了内部白色钢材材料，这些材料在外力推移下顶到了泄漏砂眼附近，形成了一个周边凹下，中间凸起的情况，成功堵漏住泄漏砂眼。

在实际带压堵漏作业中,捻打的角度和气动枪离漏点位置的距离会对堵漏效果造成显著的影响。当角度过小时,气动枪撞针与管道的有效接触面积变小,在高频捻缝过程中,容易产生滑移现象。即捻打位置偏离原设定位置,导致变形材料位移的方向出现偏差,无法将材料准确堆积在泄漏砂眼处。当角度过大时,变形材料在外力作用下主要发生垂直位移而并非水平位移,管壁就会出现较深的凹痕,同时凹痕两侧的材料也无法形成突起进行砂眼填补。

气动枪离漏点位置的距离同样会影响堵漏质量,当气动枪末端距离漏点位置过近时,由于捻打外力作用较大,变形材料的位移会超过实际需要填补的泄漏位置,如图八(a)所示;在实际情况下,由于只有部分位移材料堆积在泄漏位置,所以泄漏位置会由原来的气孔形状变为缝状,如图八(b)所示。当气动枪末端距离漏点位置过远时,变形材料需要发生的位移过大,无法保证材料准确堆在泄漏位置上,同时对管壁表面的破坏程度也会随着距离变远而增加,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。



(a) 材料位移过大的堵漏失败情况



(b) 堵漏失败情况出现的缝状泄漏

图 6-7 捻打失败的情况

为了确定不同参数对于堵漏质量的影响,本文在已有的末端结构上基础上进行了

角度为 50 度、60 度、70 度，气动枪离漏点位置的距离（表格中简称距离）为 1 毫米、4 毫米、7 毫米，共九组实验，实验结果如表 1 所示。

表 6-1 不同参数对于捻打效果的影响

距离 角度	1 毫米	4 毫米	7 毫米
50 度	捻打失败	捻打成功但凸块较浅	捻打失败
60 度	捻打失败	捻打成功	捻打成功但凸块较浅
70 度	捻打成功但凹痕较深	捻打成功但凹痕较深	捻打失败

由表 1 可知，实验结果表明，当角度过大或过小时，容易造成无法推移材料或凹痕较深，对管壁造成二次破坏的后果；当距离太近或太远时，均无法对材料的推移距离进行一个较为精准的控制，容易造成图 6-7（b）中的堵漏后缝状泄漏。在对于 1-3 毫米直径大小的砂眼泄漏情况，最佳的捻打工艺参数为捻打角度为 60°，同时气动枪末端离漏点位置的距离应在 4 毫米左右。此时对金属管道进行捻打，可以有效地将变形材料推挤至泄露位置形成突起达到堵漏效果，同时对管壁的破坏程度也比其他方案要少。若无特殊说明。该论文中的捻打堵漏实验将均采用 60 度的捻打角度以及 4 毫米左右的捻打距离作为操作方案。

带压堵漏机器人将在电厂模拟泄漏室外环境中进行整机运行及测试，测试环境如图 6-8 所示，地面材质为粗糙水泥地面，管道将通过台钳固定再桌子上，泄漏介质为自来水，温度为常温，压力为 0.2MPa。



图 6-8 电厂模拟泄漏室外场景



图 6-9 带压堵漏机器人从库房进入模拟泄漏现场

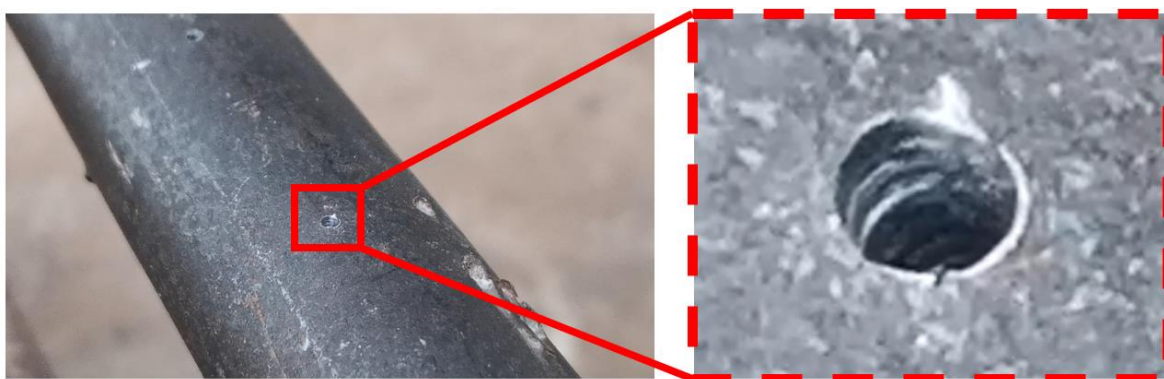


图 6-10 待修复管道砂眼情况

图 6-9 展示了带压堵漏机器人从库房出来并进入模拟泄漏现场的实验结果，操作人员可以通过远程控制机器人完成该动作。实验场地位于较为空旷的室外场地，在本次室外行走测试中采用了边走边转的方式进行移动，降低了由于原地自转时履带与地面摩擦极大造成的磨损。图 6-10 是模拟泄漏现场待修复管道的砂眼情况，大直径小为 3 毫米。

机器人操作的前半部分流程，包括通过摄像头的观察、换取不同的末端等已经在上一节中测试过了。本小节将不再详细阐述该过程，而是重点关注在该基础上堵漏的效果，即机械臂已经携带末端到达待修复管道上方，准备完成夹取及捻打操作。实际堵漏效果图如图 6-11 所示。

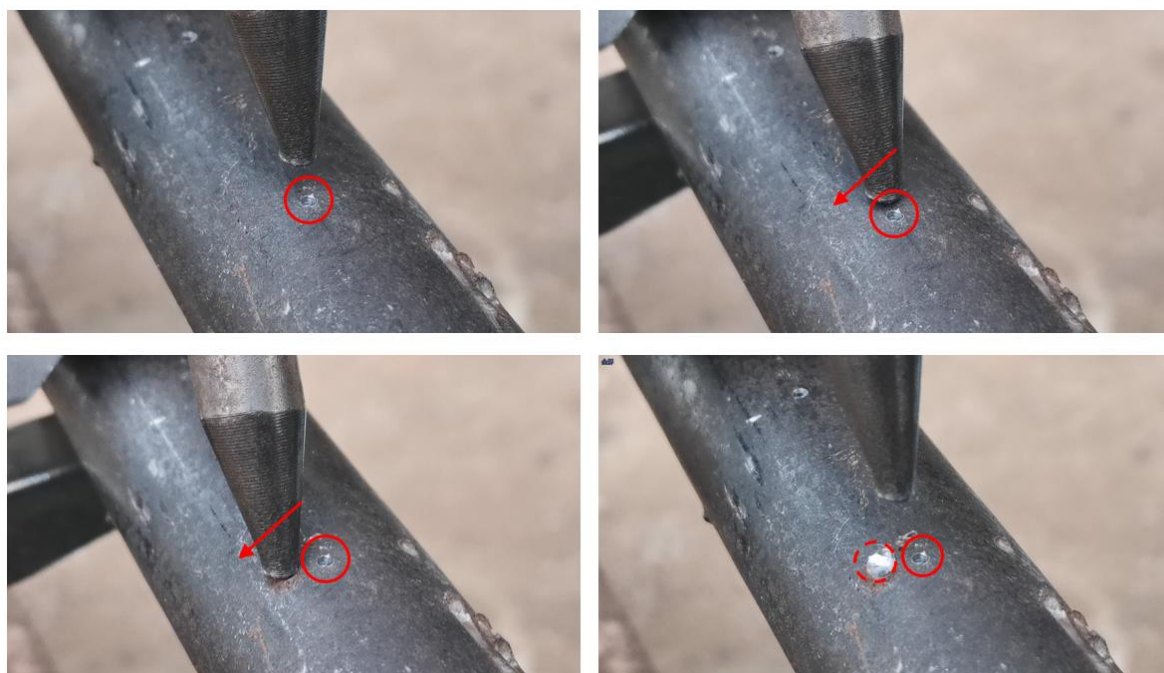


图 6-11 枪头滑动后带来的捻打位置偏移

在实际捻打过程中，由于气冲枪本身在枪头安装位置会预留位置用于前后运动，枪头的固定全靠弹簧进行限位，而弹簧限位具有较多可活动空间。这会导致在捻打末端夹持后，枪头表面与管壁表面形成一个坡面，则气冲枪的枪头会在捻打开始前或开始的一瞬间因为外力的作用在该坡面上滑走。图 6-11 展示了该情况的一个例子。红色实线圈为需要修复的砂眼位置，由于枪头与管壁表面在夹持后产生了一个滑动，滑动方向为图中的红色箭头，导致在开始捻打后捻打枪将非修复区域的材料打烂，位置位于红色虚线圈内，而实际需要泄漏的位置无法得到修复。

在得知当前位置夹持后枪头会滑动的方向，可以在夹持前有意地将捻打末端往滑动方向的反方向微调，使得滑动后的枪头方向刚好对准泄漏砂眼，相当于人为提前补偿了枪头滑动带来的定位误差。图 6-12 展示了加入人为补偿滑动定位误差后的捻打堵漏效果，该实验一共捻打了 3 个周期，每个周期持续约 2 秒。从图片上的堵漏效果可以看到，相比于图 6-11 中的修复效果，此时捻打的位置位于泄漏砂眼附近，也成功将附近部分材料打碎并推移至砂眼处。虽然该方法加入了人为补偿滑动定位误差的部分，但定位的时候仍存在不可控的因素，如前几次的凹痕会造成松动的枪头直接从捻打位置滑进来已有的坑内，对已有的凹痕继续捻打，实际上仍无法将其他方向的材料推移过来，所以会遗留下极小的缝隙泄漏，如图 6-13 所示。

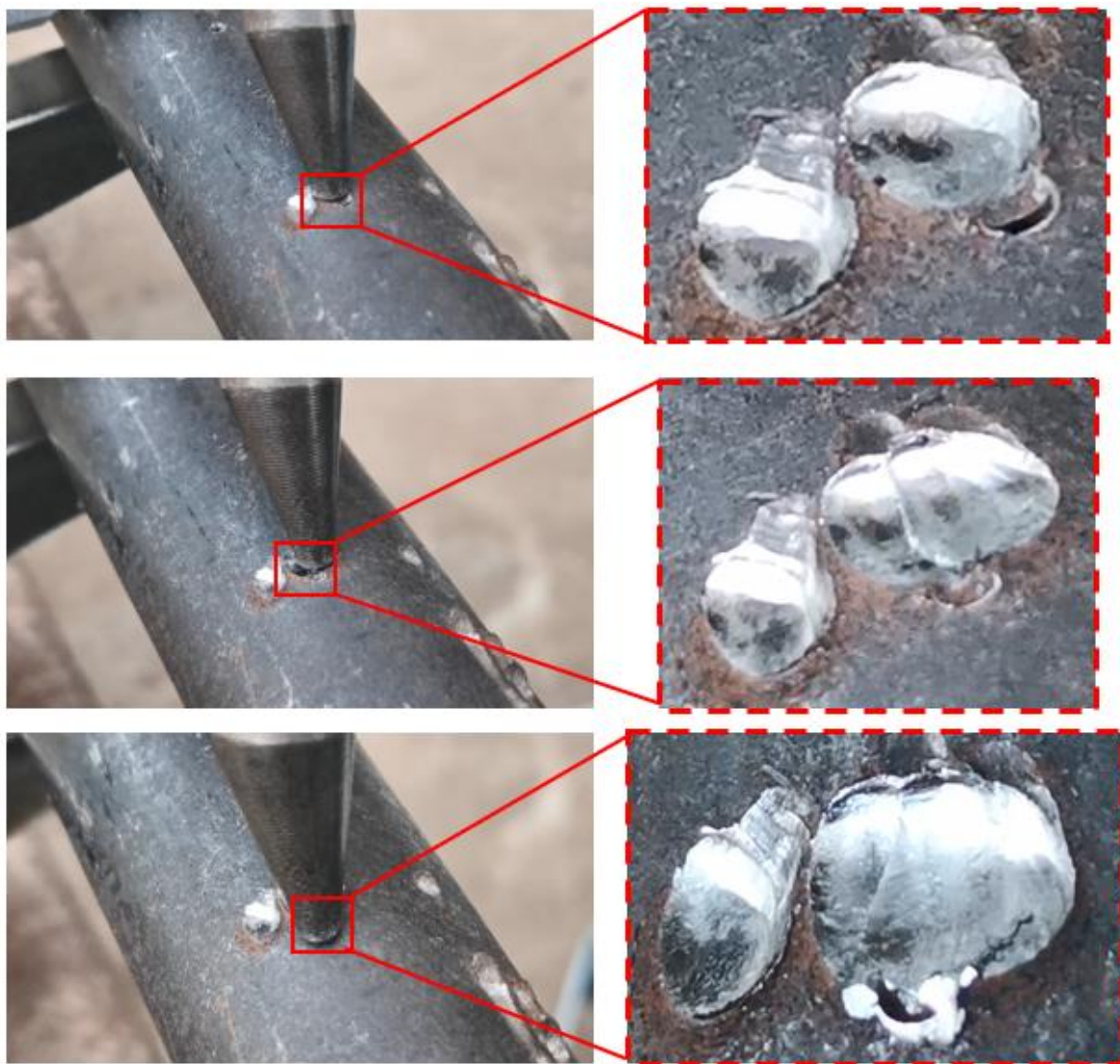


图 6-12 人为补偿滑动定位误差后的捻打堵漏效果

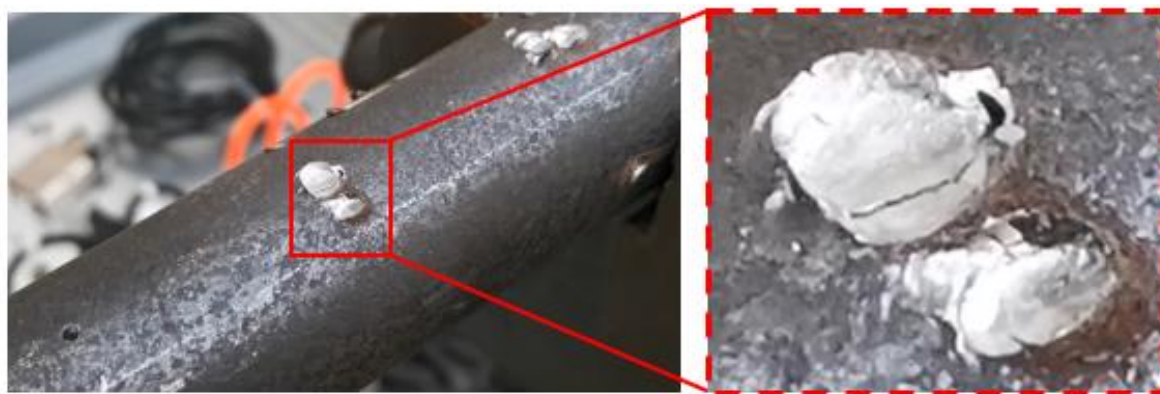


图 6-13 由于重复凹痕处捻打造成缝隙泄漏

当出现像图 6-13 所示的缝隙泄漏后，若继续采用距离泄漏位置 4 毫米的捻打方案，枪头会重复滑入已有凹痕。解决该问题的方法在于此时应将气冲枪的枪头直接对准缝隙处，即捻打位置与缝隙位置应完全吻合。由于此时缝隙位置已形成一个小

型的凸块，当枪头直接对准该凸块后，捻打枪的作用力将会将该凸块再次打平并往前推移，实现堵住缝隙泄漏的效果，效果如图 6-14 所示，图 6-12 的缝隙泄漏在使用该方法后被修复。

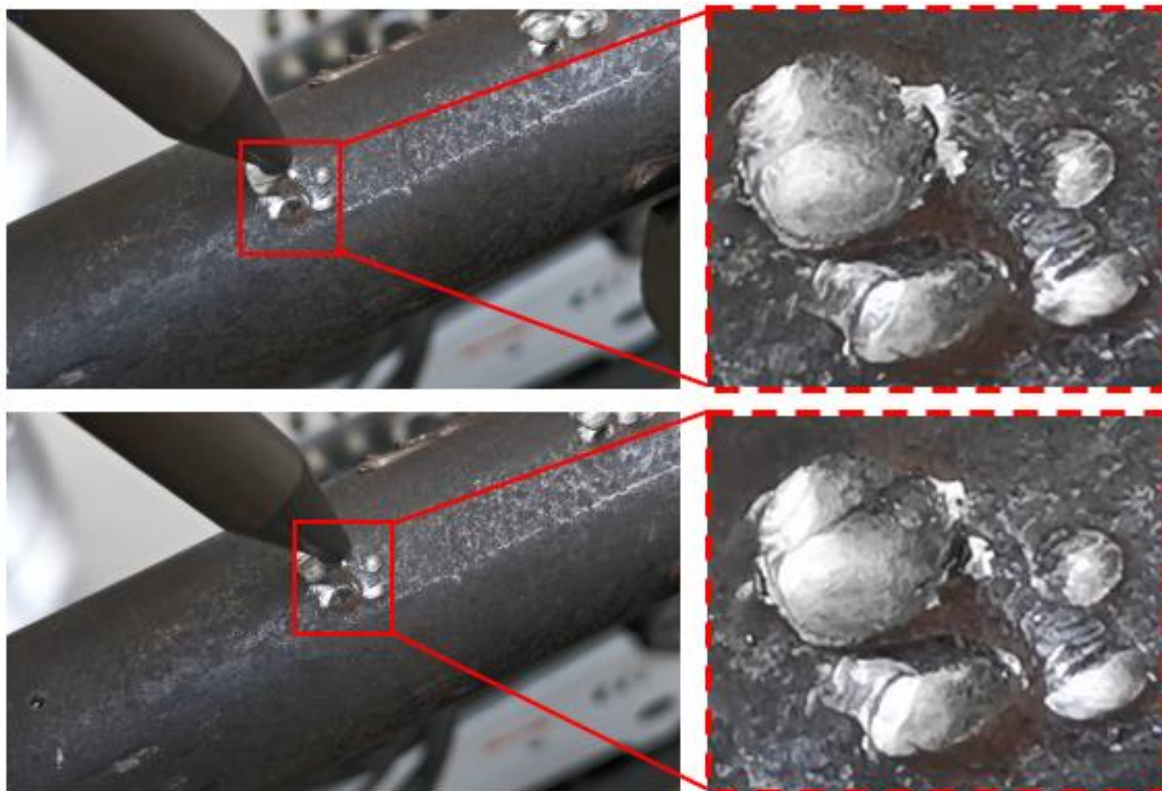


图 6-14 在缝隙处直接捻打堵漏的效果

在模拟泄漏环境中修复遇到的大多数问题都是因为气冲枪的枪头松动问题，虽然经过多次的调整也能达到修复的效果，但是为了能达到更好的修复效率，该项目在气冲枪的枪头安装处做出了改进，由原来的弹簧限位改为免簧限位器，如图 6-15 所示。免簧限位器对比与弹簧限位器，除了安装更加方便以外，它还有更加稳定的限位功能，在保证枪头具有必需的活动空间外对枪头位置的左右摆动实现很好的限制效果。使用该款免簧限位器后，由于枪头在左右位置上基本已无活动空间，也就保证了在夹持的时候枪头不会因为与管壁形成坡面而产生滑开偏离泄漏区域的现象。

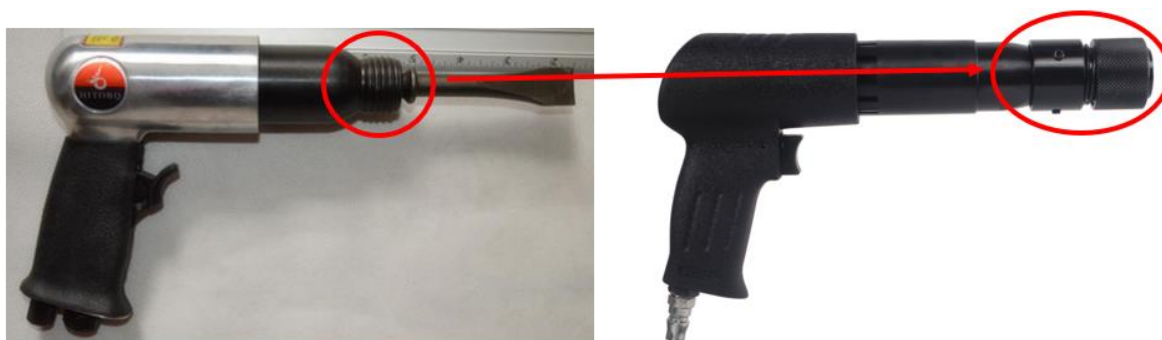


图 6-15 将气冲枪的弹簧限位改为免簧限位器

图 6-16 展示了安装免簧限位器后的气冲枪对于自来水泄漏管道的修复效果，从上到下分别展示了水压从小到大的一个泄漏情况，对于三种不同泄漏水压的任务，带压堵漏机器人携带捻打末端均能快速完成修复，相比于使用弹簧限位器，捻打次数可从 5-6 个周期缩减至 1-2 个周期，捻打堵漏的效率及质量都得到了较大的提高，快速修复的效率也意味着对管壁的破坏程序也降低到了最少。

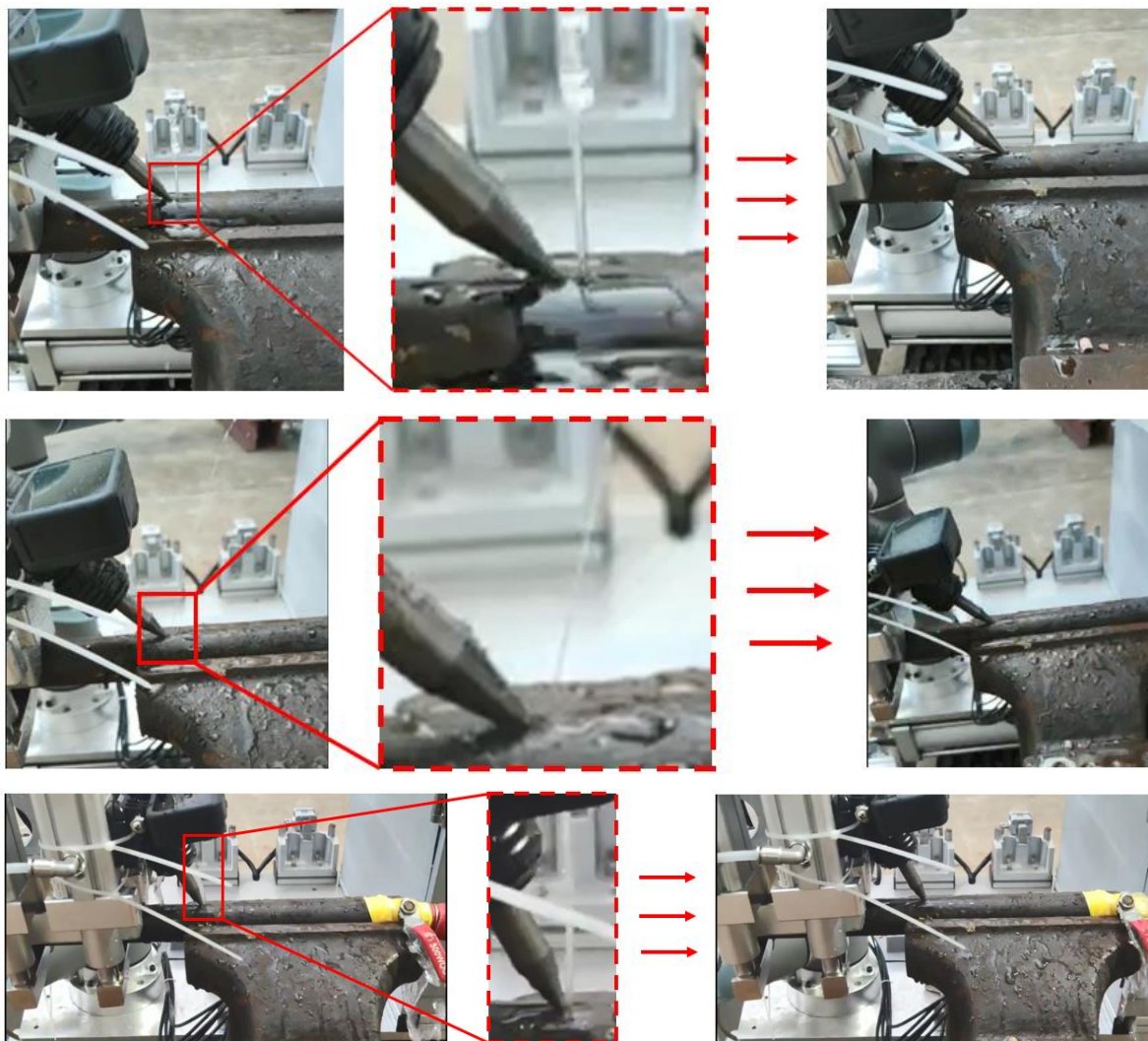


图 6-16 改进后的气冲枪捻打堵漏自来水泄漏管道

6.3 本章小结

本章详细的介绍了带压堵漏机器人各模块在实验室环境下的测试，其中包括了移动平台的遥操作、机械臂的遥操作、云台的遥操作、摄像头系统的读取及传输，以及各种气动元件的控制。同时还阐述了捻打堵漏工艺在实际堵漏过程中遇到的问题及背后的原因，对于不同参数对捻打效果的影响做了一个定量的分析，并从中挑选出最适合该项目的修复方案。最后在电厂模拟泄漏环境中实际部署了带压堵漏机器人，并通

过遥控操作完成了捻打堵漏的任务。对于任务中出现的气冲枪枪头滑动问题，有针对性地提出适用免簧接头代替弹簧接头的方案，使枪头在捻打过程中获得更好的限位效果。在电厂模拟泄漏环境中的实际运行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

该论文针对国内电厂中带压堵漏的任务问题，设计了一款远程操作带压堵漏机器人。该款机器人可以代替传统堵漏操作工人进入现场完成修复管道作业，这不仅可以使操作人员远离事故现场，降低因误操作带来的伤亡风险；更可以借助机器人技术来提高整个带压堵漏任务的效率及质量。本文中的修复技艺采用的是捻打堵漏方法，但该方法仅作为一个末端执行器存在，这意味着不同的工艺通过模块化设计，制定出适用不同工艺的末端执行器，同样可以安装在该款带压堵漏机器人中使用。本论文主要完成的工作点如下：

（1）针对华能海门电厂内部分高温输水管道泄漏管道修复的任务，提取核心需求点。制定出一个整体的机器人系统方案，包括机器人本体设计、控制端设计以及通信设计三大模块。在机器人本体设计方面，本文详细阐述了各个模块的选型、设计以及空间装配关系，除此之外还包含整台机器人的电气设计、气路设计以及内部通信链路设计。在控制端方面，本文设计了一套键盘控制方案以及一个可视化控制软件，配合使用可以远程遥控机器人完成进入现场、观察现场、修复管道等任务；在通信设计方面，本文采用 ROS 分布式多机通信+数传电台无线通信的方案，针对不同的信息类型特点采用不同的传输方法。

（2）提出了一种用于泄漏管道的三维重建方法，管道三维重建是带压堵漏自动化、智能化作业的基础，是实现视觉伺服必不可少的环节。本文提出的重建方法，基于人工标记管道及泄漏点在二维图像上的位置，对二维图像上已标记的像素点进行深度信息提取，最后通过最小二乘法剔除离中心拟合较远的噪声点，重建管道在机械臂坐标下的三维姿态。

（3）带压堵漏机器人在电厂模拟泄漏环境下的实际运行与调试，对于模拟修复过程中的失败原因进行了分析，提出捻打角度及捻打距离两个参数对于捻打效果的影响，并作出了定性分析。对于在实际修复过程中，因捻打枪枪头与管壁出现坡面形成滑动定位误差的问题，有针对性地提出使用不同的限位器提高定位精度。最后在不同水压大小的自来水泄漏任务中均以较高的效率和质量完成了带压堵漏的任务，满足了任务需求，证明了带压堵漏机器人的有效性和先进性。

7.2 展望

该论文提出的带压堵漏机器人属于国内外该领域的首台机器人,经过现场的测试,能够以较高的效率和质量完成基本的带压堵漏任务,适合在国内外相关领域作为一个实验性平台大力推广和应用。然而由于时间与投入的关系,本项目仍然有许多可以改进的地方:

(1) 该项目中考虑了捻打角度及捻打距离对于捻打效果的影响,但实际上可以影响的变量还包括:捻打末端枪头形状、捻打频率、进气压力、针头距离管壁垂直距离等等。不同的变量所含的参数空间也不一样,因此可以在后续工作中对这些变量对于捻打效果的影响设计正交实验,并使用一些定量的评价指标评价每次捻打实验后的效果得分,以分析出更有效的捻打堵漏技巧。

(2) 该项目中采用的带压堵漏修复工艺为捻打堵漏,但该工艺比较简单,也导致其适应面较窄,仅能修复一些管壁较厚的管道。实际上对于大多数泄漏场景中,都需要更复杂的工艺和夹具进行协同作业,才能完成修复的工作。因此该工作可在未来把更多主流的修复技巧考虑进来,并设计出不同的末端执行器以执行相应的工艺。

(3) 该项目中的带压堵漏机器人仍属于遥操作机器人,虽然已经提出了一种基于最小二乘法的管道三维重建方法,但该方法未融入到整个控制系统中。机械臂与立体相机、云台相机等仍未组成智能视觉伺服系统,考虑到实验数据不足的问题,诸如深度学习中的语义分割、物体识别等功能也未能加入当前工作。未来工作中可以考虑用该平台采集作业时的数据,并利用这些数据训练出适合带压堵漏任务中管道识别定位的神经网络模型,该模型应能指导机械臂的自主规划与作业过程,实现带压堵漏作业的智能化与自动化。

参考文献

- [1] 赵红梅,胡忆洧.“Online”一词的演变及规范译法[J].上海翻译,2010(03):56-58.
- [2] 人力资源和社会保障部教材办公室. 国家职业资格培训教程:带温带压堵漏工[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社, 2012.
- [3] 胡忆洧.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):112-115.
- [4] BOWN H. SEALING LEAKS BY THE FURMANITE PROICESS[J]. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association-June, 1981: 63.
- [5] 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, 2014(1): 1-9.
- [6] 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.
- [7] Shuttleworth F P, Billington C J. A new approach to designing repair clamps for offshore structures[C]//Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 1989.
- [8] Porter P C. Composites? An Effective Repair Alternative[C]//CORROSION 2002. NACE International, 2002.
- [9] Yang X H, Tai J X, Lv R D, et al. A Design of Online Leak Sealing Clamp for the Flange with Defects[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 516: 836-840.
- [10] Djukic L P, Sum W S, Leong K H, et al. Development of a fibre reinforced polymer composite clamp for metallic pipeline repairs[J]. Materials & Design, 2015, 70: 68-80.
- [11] Sum W S, Leong K H, Djukic L P, et al. Design, testing and field deployment of a composite clamp for pipeline repairs[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2016, 45(2): 81-94.
- [12] Anguiano G, Godinez I, Foreman M, et al. Energy Reduction Using Epoxy Coatings for Sealing Leaking Compressed Air Systems[R]. NAVAL FACILITIES ENGINEERING CO 毫米 AND PORT HUENEME CA PORT HUENEME United

States, 2018.

[13] Cary D N, Julian J Y, Jackson J C, et al. Pressure Activated Sealants-Non-Rig Solutions in Mature Fields in Alaska[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.

[14] Di Cesar Silva G, Georg Fink T, Almeida Bordieri P, et al. Structural Reinforcement and Leak Sealing with Composite Materials[C]//Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2019.

[15] Kumar P N, Khan V C, Balaganesan G, et al. Repair of through thickness corrosion/leaking defects in corroded pipelines using Fiber Reinforced Polymer overwrap[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 346(1): 012016.

[16] McEwan I K, Ryan N J, Chirnside I, et al. Leak Sealing on a Water Injection Line in the Foinaven Field, West of Shetland, using Platelet (trade mark, sans serif) technology[C]//Offshore Europe. Society of Petroleum Engineers, 2005.

[17] Yan H W, Kou Z M, Wu J, et al. Based on risk source pipe leakage emergency device and sealing method research[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 287: 2834-2839.

[18] 程世权,邵建新,吕瑞典,单来民.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):52-54.

[19] 高翔,陈志刚.电厂阀门外泄漏及带压堵漏方法[J].华北电力技术,2008(10):46-48+51.

[20] 李正明,王志群.不停车带压堵漏技术及应用[J].压力容器,1988(05):76-81.

[21] 黄幼平.不停车带压密封技术的应用[J].流体工程,1989(12):33-36.

[22] 苏忠杰,吴莹.带压堵漏技术在燃气抢修的应用[J].煤气与热力,2013,33(05):29-32.

[23] 罗强,廖如超,张海涛,邢琳琳,陈文利,韩赞东.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.

[24] 邓志彬,袁宗明,杨振声,贺三,赵毅.带压堵漏技术及其在油库中的应用[J].油气储运,2010,29(03):204-205+156.

[25] 王秀忠,王健璠.弧板式大口径 PE 管道带压堵漏技术的研发及应用[J].给水排水,2018,54(01):109-111.

[26] 樊新军,李云先.带压堵漏技术在供排水厂的应用[J].齐鲁石油化工,2006(S1):33-35.

[27] 胡忆洧.带压密封工程导论[J].吉林化工学院学报,2006(01):39-43.

- [28] 黄志明.带压堵漏的关键技术[J].福建化工,2003(03):50-55.
- [29] Tu S T, Chen X D. Higher pressure, more power and greater responsibility[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 100(139-140): 1-3.
- [30] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T-26467-2011 承压设备带压密封技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [31] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T-26468-2011 承压设备带压密封夹具设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011
- [32] 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 (8): 88-90.
- [33] 吴巍,胡忆洧.承压设备带压密封夹具智能设计系统研究及应用[J].压力容器,2015,32(08):75-80.
- [34] Wang J J, Ruan Z, Shi W, et al. Research on Pressure Emergency Plugging Technology and Equipment[C]//2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE, 2014: 565-568.
- [35] 戴先中.21 世纪非制造业自动化的发展与特种机器人研究思考[J].自动化学报,2002(S1):96-102.
- [36] 刘金国,王越超,李斌,马书根.灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J].机械工程学报,2006(12):1-12.
- [37] 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):70-76.
- [38] 谭民,王硕.机器人技术研究进展[J].自动化学报,2013,39(07):963-972.
- [39] Muir P F, Neuman C P. Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot[M]//Autonomous robot vehicles. Springer, New York, NY, 1990: 25-31.
- [40] 谢德胜,徐友春,万剑,韩栋斌,陆峰.基于 RTK-GPS 的轮式移动机器人轨迹跟随控制[J].机器人,2017,39(02):221-229.
- [41] 李岩,杨向东,陈恳.履带式移动机器人动力学模型及其反馈控制[J].清华大学学报(自然科学版),2006(08):1377-1380.
- [42] Yajima R, Nagatani K, Hirata Y. Research on traversability of tracked vehicle on slope with unfixed obstacles: derivation of climbing-over, tipping-over, and sliding-down conditions[J]. Advanced Robotics, 2019, 33(20): 1060-1071.
- [43] 张永进,谢慧松,李庆庆,余张国.基于虚拟黏弹性肌肉模型的仿人机器人不平整地面稳定行走[J].机器人,2019,41(03):289-297.
- [44] 潘希祥,徐坤,王耀兵,丁希仑.具有悬挂系统的轮腿式机器人设计与分析

[J].机器人,2018,40(03):309-320.

[45] 柏龙,龙樟,陈晓红,江沛,陈锐,官渐.连续电驱动四足机器人腿部机构设计与分析[J].机器人,2018,40(02):136-145.

[46] 刘冬琛,王军政,汪首坤,沈伟,彭辉.一种基于并联 6 自由度结构的电动轮足机器人[J].机器人,2019,41(01):65-74+82.

[47] Kameduła M, Kashiri N, Tsagarakis N G. Wheeled motion kinematics and control of a hybrid mobility CENTAURO robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020: 103482.

[48] Li Z, Chen L, Zheng Q, et al. Control of a path following caterpillar robot based on a sliding mode variable structure algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 293-306.

[49] Avanzini G B, Zanchettin A M, Rocco P. Constraint-based model predictive control for holonomic mobile manipulators[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015: 1473-1479.

[50] Båberg F, Wang Y, Caccamo S, et al. Adaptive object centered teleoperation control of a mobile manipulator[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 455-461.

[51] Mucchiani C, Torres W O, Edgar D, et al. Development and Deployment of a Mobile Manipulator for Assisting and Entertaining Elders Living in Supportive Apartment Living facilities[C]//2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Co 毫米 unication (RO-MAN). IEEE, 2018: 121-128.

[52] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(09):1-13.

[53] Li Z, Moran P, Dong Q, et al. Development of a tele-nursing mobile manipulator for remote care-giving in quarantine areas[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017: 3581-3586.

[54] Chenf F, Gao B, Selvaggio M, et al. A framework of teleoperated and stereo vision guided mobile manipulation for industrial automation[C]//2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2016: 1641-1648.

[55] Hvilshøj M, Bøgh S. “Little Helper”—An Autonomous Industrial Mobile Manipulator Concept[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2011, 8(2): 15.

[56] Madsen O, Bøgh S, Schou C, et al. Integration of mobile manipulators in an industrial production[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015.

- [57] Roa M A, Berenson D, Huang W. Mobile manipulation: toward smart manufacturing [tc spotlight][J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(4): 14-15.
- [58] 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): 931-945.
- [59] Giesbrecht J, Fairbrother B, Collier J, et al. Integration of a high degree of freedom robotic manipulator on a large unmanned ground vehicle[C]//Unmanned Systems Technology XII. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7692: 769218.
- [60] Wang W, Gao W, Wu D M, et al. Research on a mobile manipulator for biochemical sampling tasks[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2017.
- [61] Silwal A, Davidson J R, Karkee M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1140-1159.
- [62] Li Z, Chen L, Zheng Q, et al. Control of a path following caterpillar robot based on a sliding mode variable structure algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2019, 186: 293-306.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.

攻读学位期间主要研究成果

一、发表的学术论文

- [1] Zhun F, Wenzhao C, Guijie Z, et al. Collaborative Robot Transport System Based on Edge Computing [C]. IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Suzhou, China, 2019.07.

二、已授权发明专利

- [2] 范衡,游煜根,陈文钊,等. 一种自主移动机器人平台用控制系统、方法及装置[P]. 中国: CN106383517B, 授权日期 2019-06-07.

三、已授权实用新型专利

- [3] 范衡,游煜根,陈文钊,等. 一种自主移动机器人平台控制装置[P]. 中国: CN206115273U, 授权日期 2017-04-19.
- [4] 范衡,朱贵杰,陈文钊,等. 一种复合型移动机器人及复合型移动机器人控制系统[P]. 中国: CN208438335U, 授权日期 2019-1-29.

四、已申请发明专利

- [5] 范衡,陈文钊,等. 一种基于人工标定管道位置及其漏点的重建方法. 发明. 申请号: 201910914815.3
- [6] 范衡,陈文钊,等. 一种基于双末端的管道漏点定位与修补的设备与方法. 发明. 申请号: 201910914812.X
- [7] 范衡,陈文钊,等. 一种在线带压堵漏的机器人、系统及方法. 发明. 申请号: 201910914710.8
- [8] 朱贵杰,范衡,陈文钊,等. 一种路桥裂缝检测与修复一体化机器人. 发明. 申请号: 201910517472.7

五、已申请实用新型专利

- [9] 范衡,陈文钊,等. 一种用于裂缝修复的机械臂末端执行器. 实用新型. 申请号: 201920901185.1
- [10] 范衡,陈文钊,等. 一种用于捻缝堵漏的机械臂末端执行器. 实用新型. 申请号: 201920707519.1
- [11] 范衡,陈文钊,等. 一种用于在线带压堵漏的复合型机器人. 实用新型. 申请号: 201921611044.2
- [12] 朱贵杰,范衡,陈文钊,等. 一种路桥裂缝检测与修复一体化机器人. 实用新型. 申请号: 201920905378.4

致谢

在论文即将完成的现在，我要非常感谢我的指导老师范衡教授。在刚开始确定论文题目的时候，范衡老师就提出了很多宝贵的意见。在后续的实验设计、论文撰写过程中，范衡老师始终提出宝贵的意见来帮助我。他在学术上严谨的态度的对细节的严格把控都使我深刻明白如何去完成一个合格的实验、写一篇合格的论文。在此，向范衡老师一直以来的支持和帮助表示衷心的感谢！

带压堵漏机器人是一个完整的项目，其包括机械、电路、计算机等部分，仅仅靠我一人是无法完成的，感谢 NEO 团队这一年半以来的辛苦奋斗，是你们的努力的工作，才使带压堵漏机器人能够成功面世，并且让我能有机会在上面完成更多的工作。祝愿 NEO 的各位成员能够在日后的机器人道路上走得更好！

在项目开展的无数个日日夜夜里，我的家人和我的女朋友始终给予我最贴心的关怀和最温柔的鼓励，是他们的支持令我能够全身心地投入到项目当中，令我能够无数次面对项目的挫折和失败的时候能够充满信心和热情去克服困难，重新前进。感谢他们，他们是我生命中不可或缺的重要部分！

本文在撰写及设计实验时参考了大量文献及书籍，并引用了部分资料。谨向这些书刊资料的作者表示衷心的感谢！