

电厂带压堵漏机器人的设计与实现

Design and Implementation of Online Leak Sealing Robot in Power Plant



答辩人：陈文钊



指导老师：范衡教授



信息与通信工程

广东省数字信号与图像处理技术重点实验室
汕头大学人工智能与机器人实验室

目录



汕头大学
SHANTOU UNIVERSITY

- 研究绪论
- 机器人硬件设计
- 机器人软件设计
- 管道三维重建方法
- 运行及测试结果
- 总结与展望



研究绪论

INTRODUCTION

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**，类似的事故仍时有发生。



图1-1 电厂锅炉泄漏爆炸事故现场照片



图1-2 传统带压堵漏作业现场照片

带压堵漏，也叫带压密封、在线密封，英文为 online leak sealing，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。**

为什么需要带压堵漏机器人？

- 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。
- 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。



机器人硬件设计

HARDWARE DESIGN OF THE ROBOT

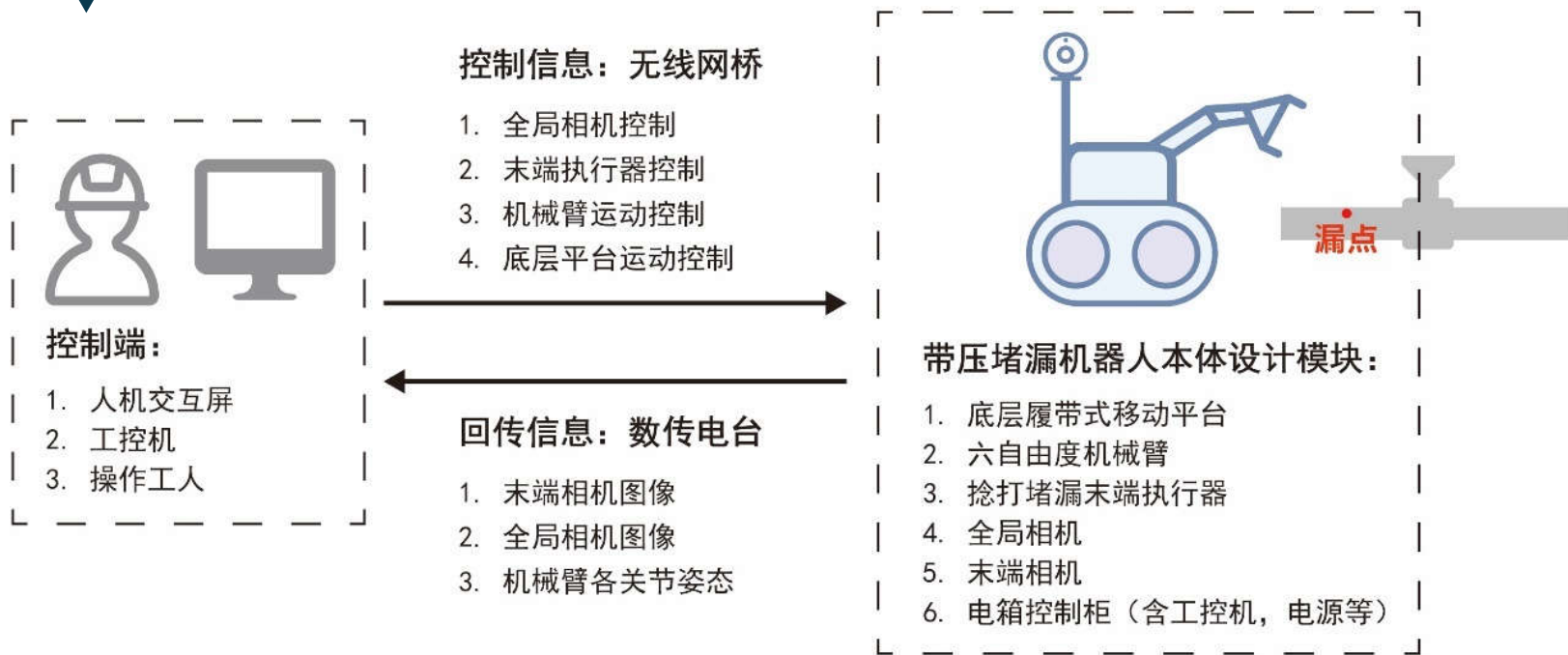


图2-1带压堵漏机器人系统方案设计框架图

核心需求：

- 一个能**实现带压堵漏的执行器**：机器人的执行器核心是如何实现捻缝堵漏功能，并能实现远程控制或自动作业。
- 一套能**运送该执行器至现场的机构**：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。
- 一套能**辅助作业人员的视觉系统**：项目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。

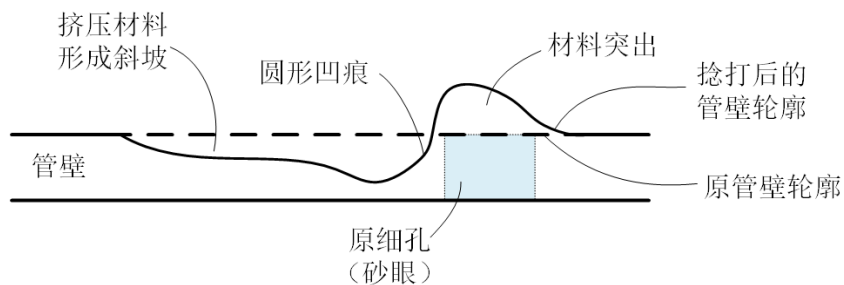


图3-1 捻打堵漏原理示意图

捻打末端执行器：

- 捻打堵漏技术的核心是**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。
- 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）
- 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）泄漏设备（管道）的捻打堵漏**。

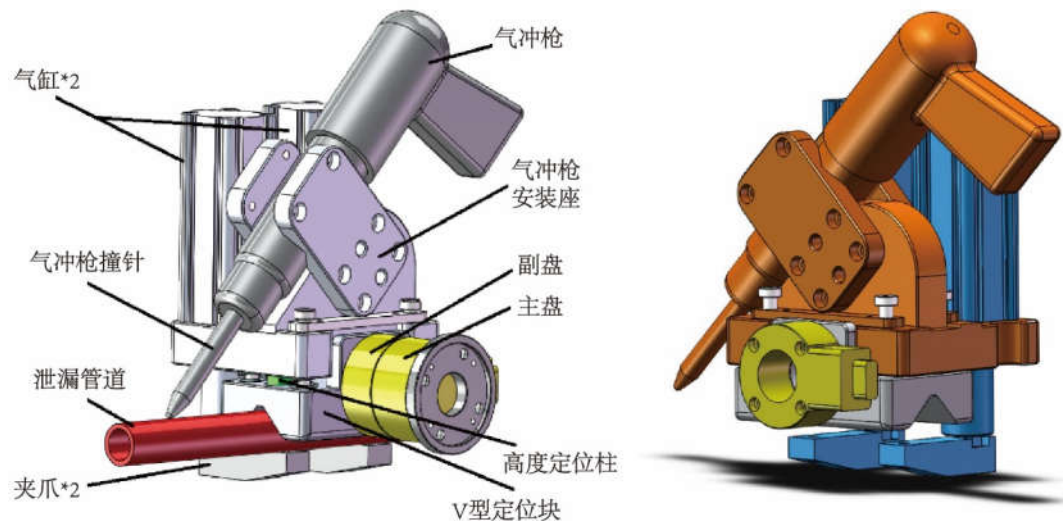


图3-2 捻打末端整体设计图，其包括捻打模块（橙色）、夹取模块（蓝色）、定位模块（灰色）和机械臂连接模块（黄色）

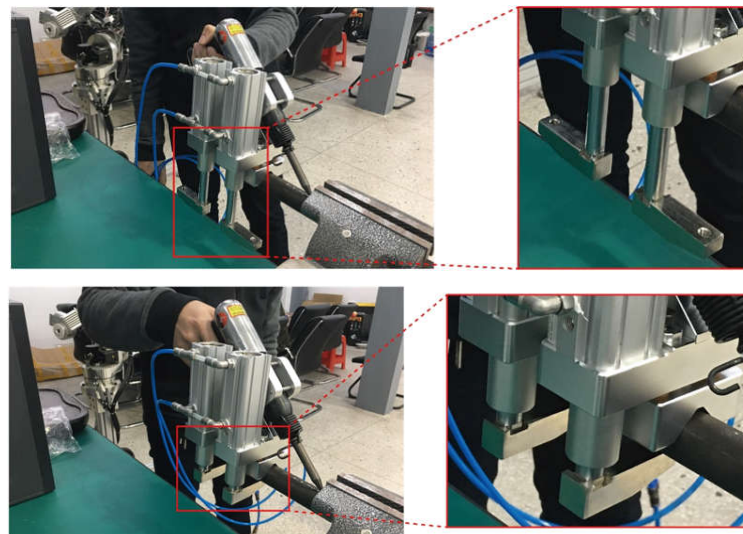


图3-3 捻打末端夹取管道示意图

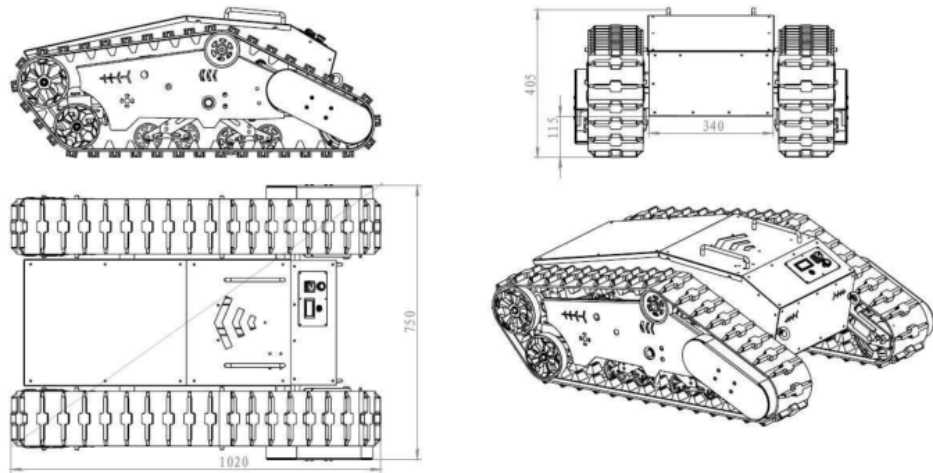


图3-4 履带平台设计示意图

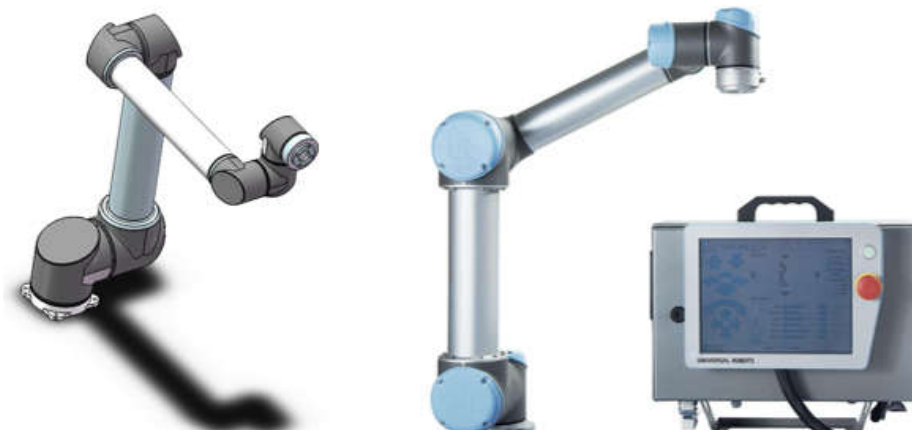


图3-5 UR10机械臂示意图

底层运动平台及机械臂：

- 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。
- 带压堵漏机器的操作手是一个**六自由度的机械臂UR10**，主要考虑到：**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；其次是**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。

视觉系统:

- 机器人系统中将会有三套摄像头，分别为全局云台摄像头，立体摄像头ZED mini，以及末端的小型摄像头及GoPro摄像头。
- 全局云台摄像头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。
- 立体摄像头ZED mini采用双目视差法获得物体的深度，主要作用是利用双目可见光图像计算泄漏管道的当前的深度信息，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。
- 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。



图3-6 全局云台摄像头

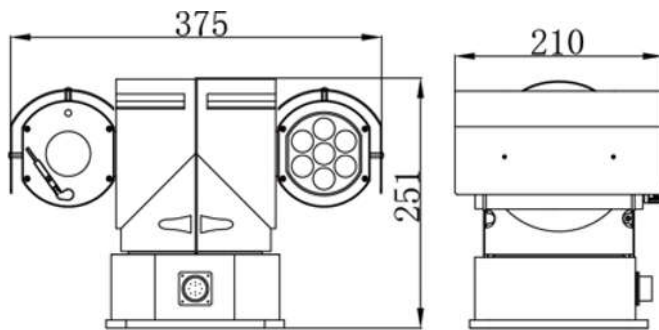


图3-7 立体摄像头ZED mini及末端摄像头

带压堵漏机器人整机硬件系统

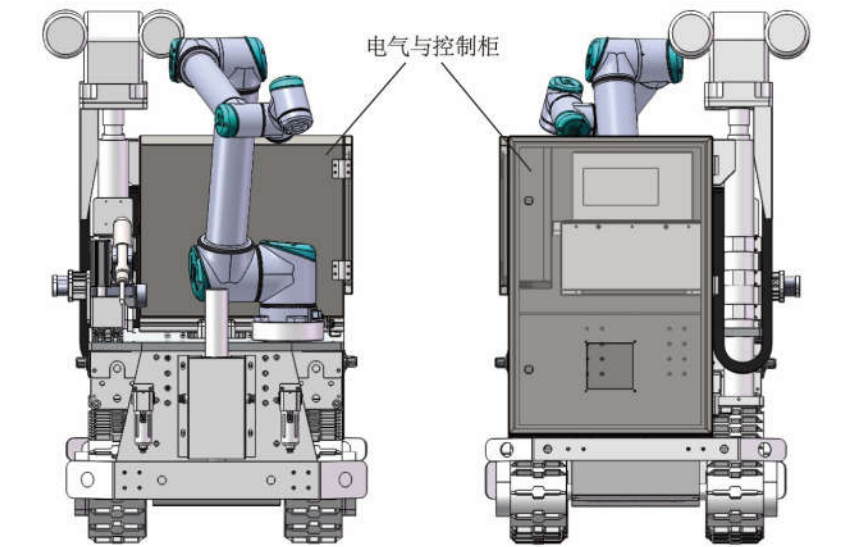


图3-8 带压堵漏机器人正视图（左）与背视图（右）

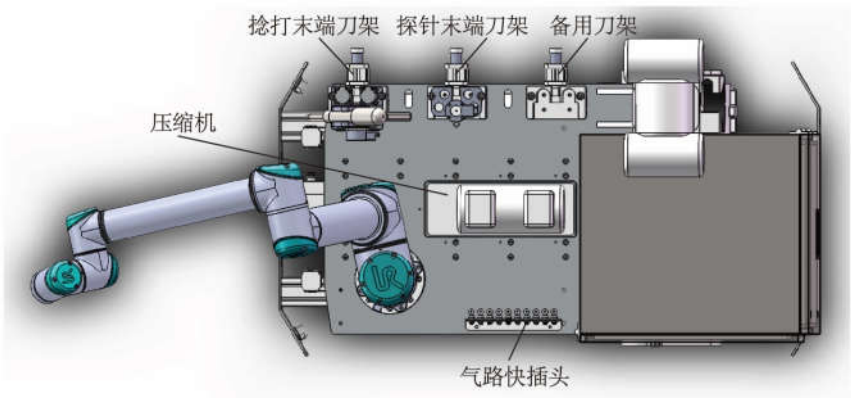


图3-9 带压堵漏机器人俯视图

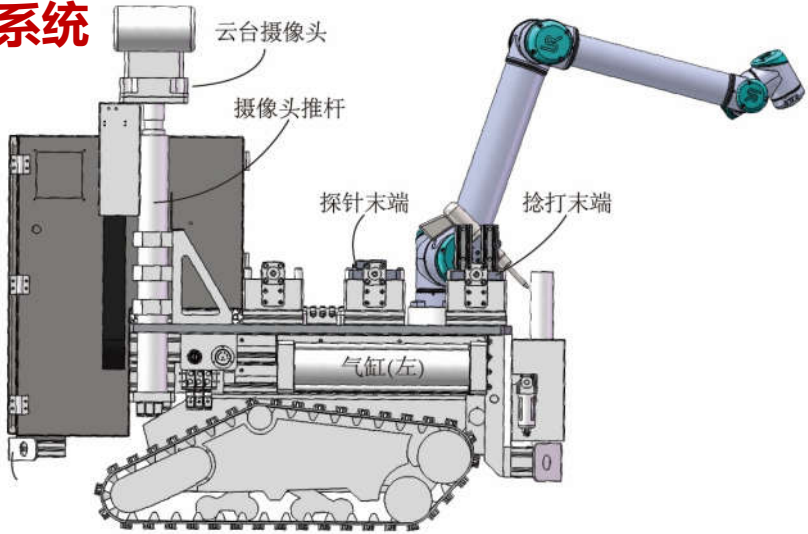


图3-10 带压堵漏机器人左视图

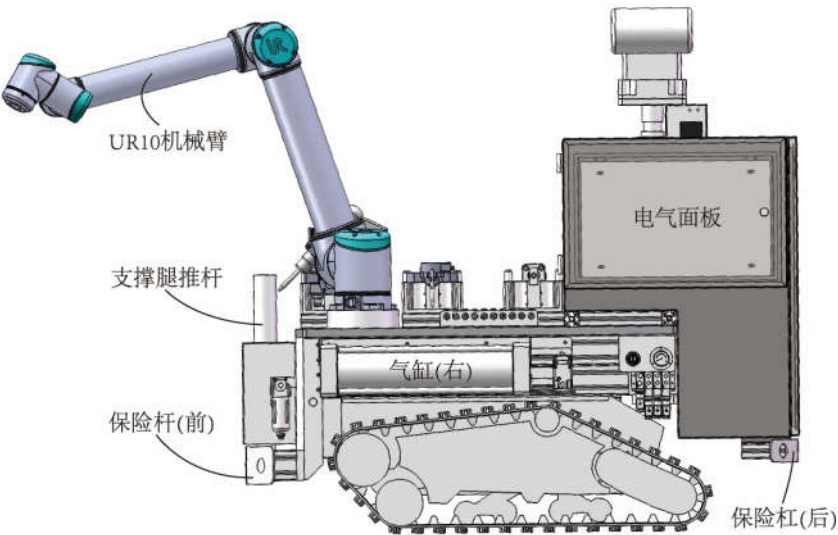


图3-11 带压堵漏机器人右视图

带压堵漏机器人整机硬件系统

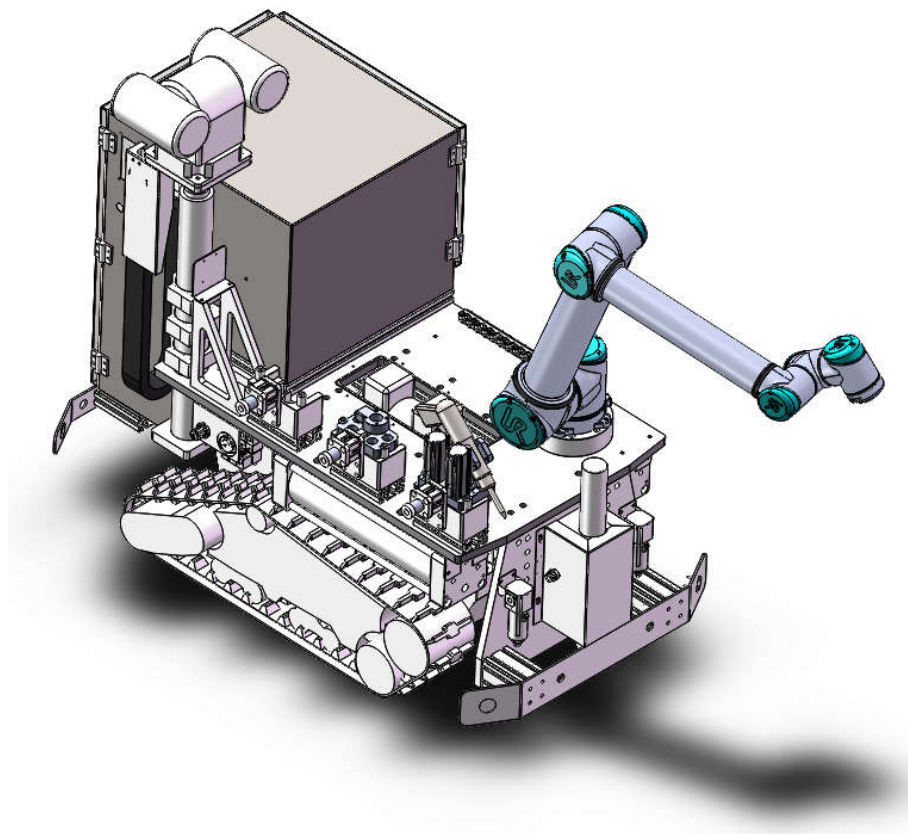


图3-12 带压堵漏机器人俯视三维图



图3-13 带压堵漏机器人整体实物图



机器人软件设计

SOFTWARE DESIGN OF THE ROBOT

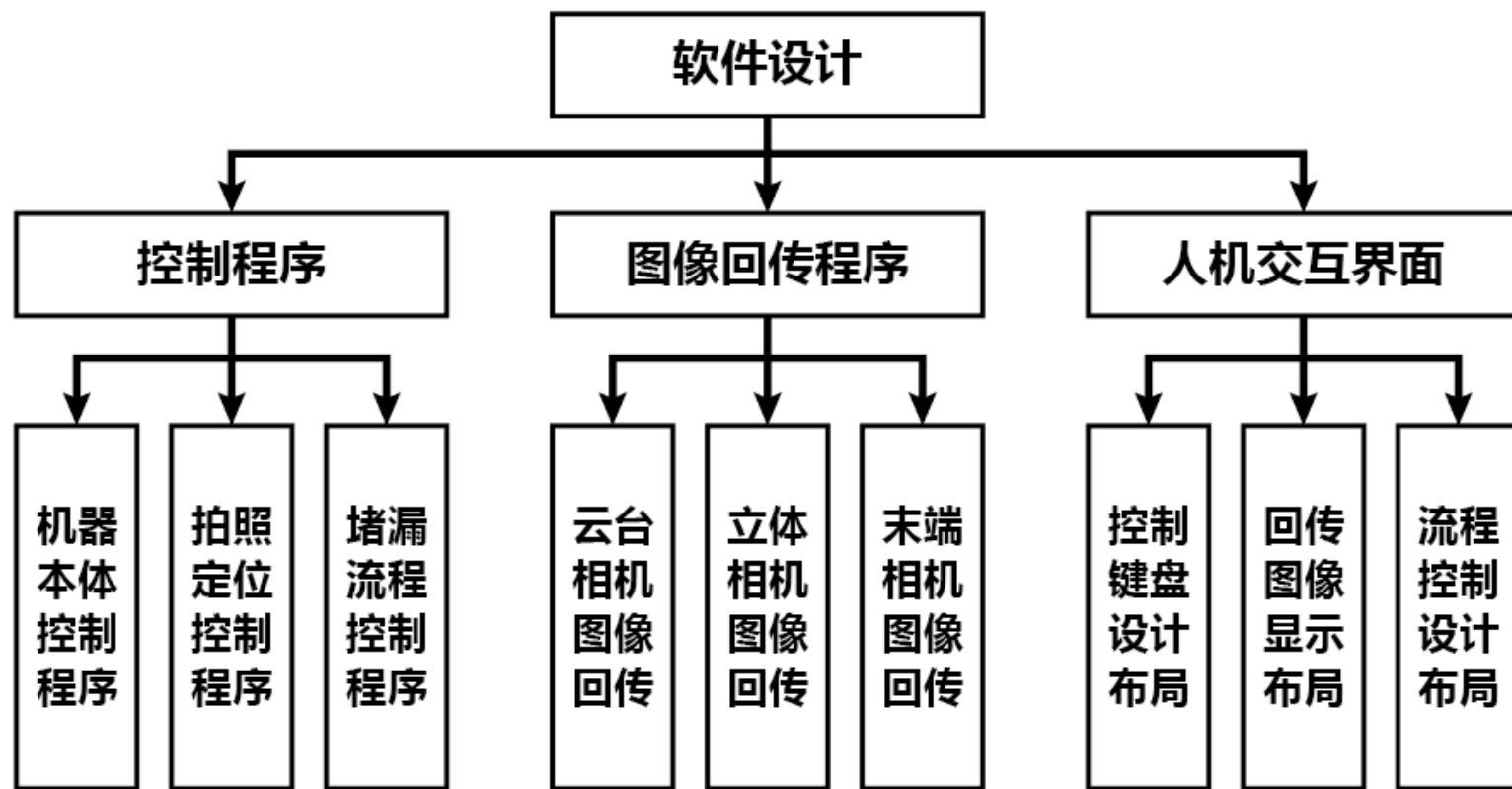


图4-1 带压堵漏机器人软件设计框图

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。

控制程序:

● 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，云台摄像头的控制等，图4-2给出了键盘控制设计分布图。

● 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，降低操作难度。

● 数据传输

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，因此采用了**无线数传电台**的方案。如图4-3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**。



图4-2 带压堵漏机器人键盘控制设计分布图



图4-3 数传电台传输示意图

图像回传程序:

● 本体工控机读取传感器图像信息:

本文软件采用了实时流传输协议（Real Time Streaming Protocol, RTSP）进行云台摄像头的读取，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，其他摄像头可通过USB线和底层驱动程序直接读取

● 本体工控机图像信息远程传输至控制端

本文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4-4所示。不同传感器的图像信息转换为ROS消息类型后，可以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，建立连接之后通过TCPROS协议进行数据传输。

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4-4 基于RTSP协议的交互过程，用于网络摄像头图像读取

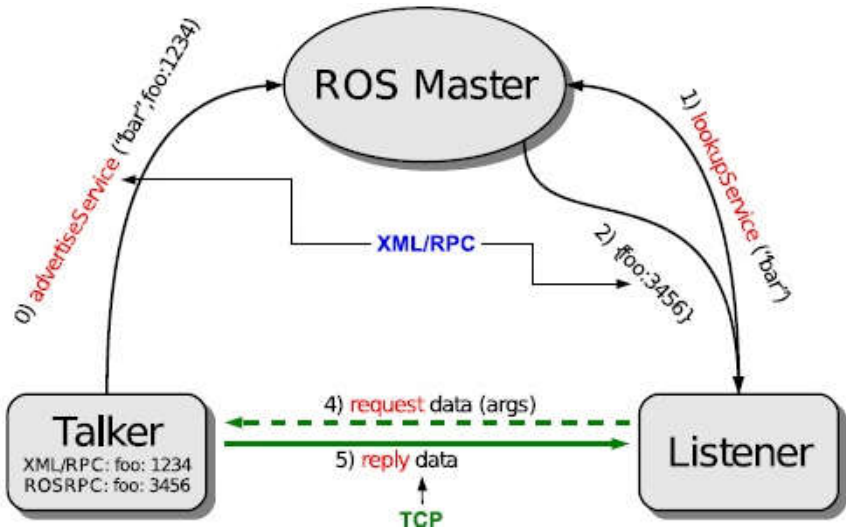


图4-5 ROS中的通信模式

人机交互界面:

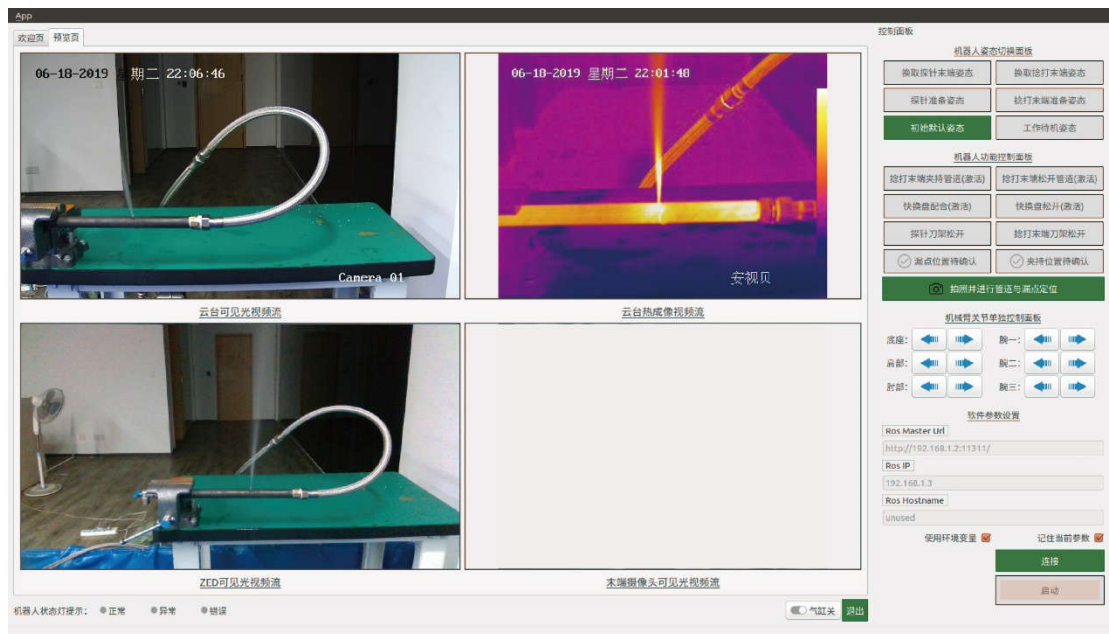


图4-6 带压堵漏机器人可视化控制软件，左图：默认界面，右图：图像显示界面

- 如图4-2所示，软件的人机交互界面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。



管道三维重建方法

3D RECONSTRUCTION OF PIPELINE

为什么需要管道三维重建？

- 带压堵漏机器人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。。
- 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。

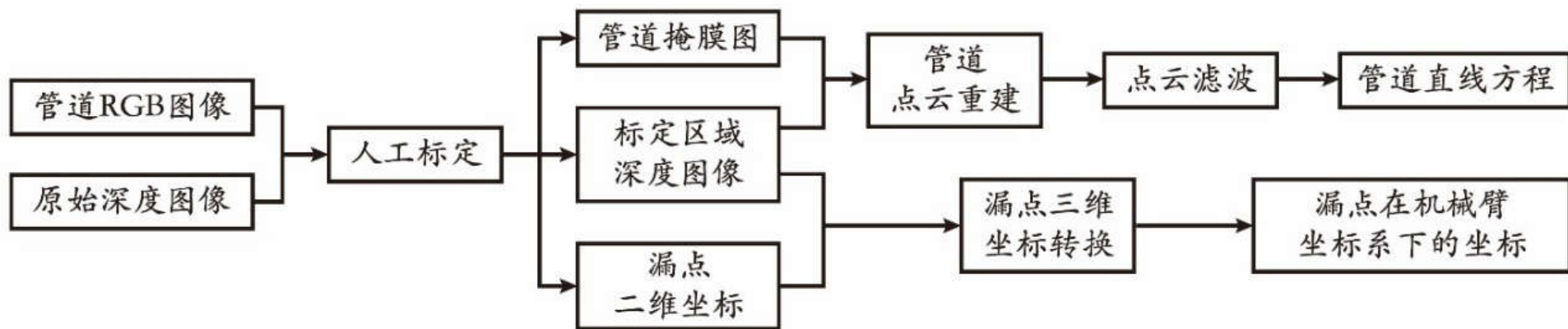


图5-1 基于最小二乘法的管道三维重建算法流程图

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。

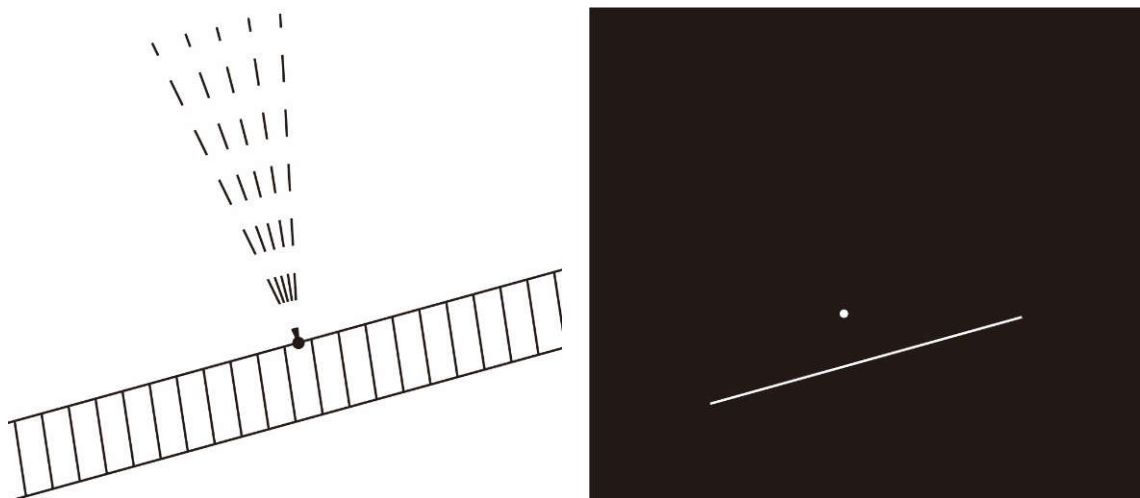


图5-2 左图：泄漏管道图像，直线填充矩形为管道，虚线束为泄露物质，圆点为泄露点 右图：人工标定输出掩膜图

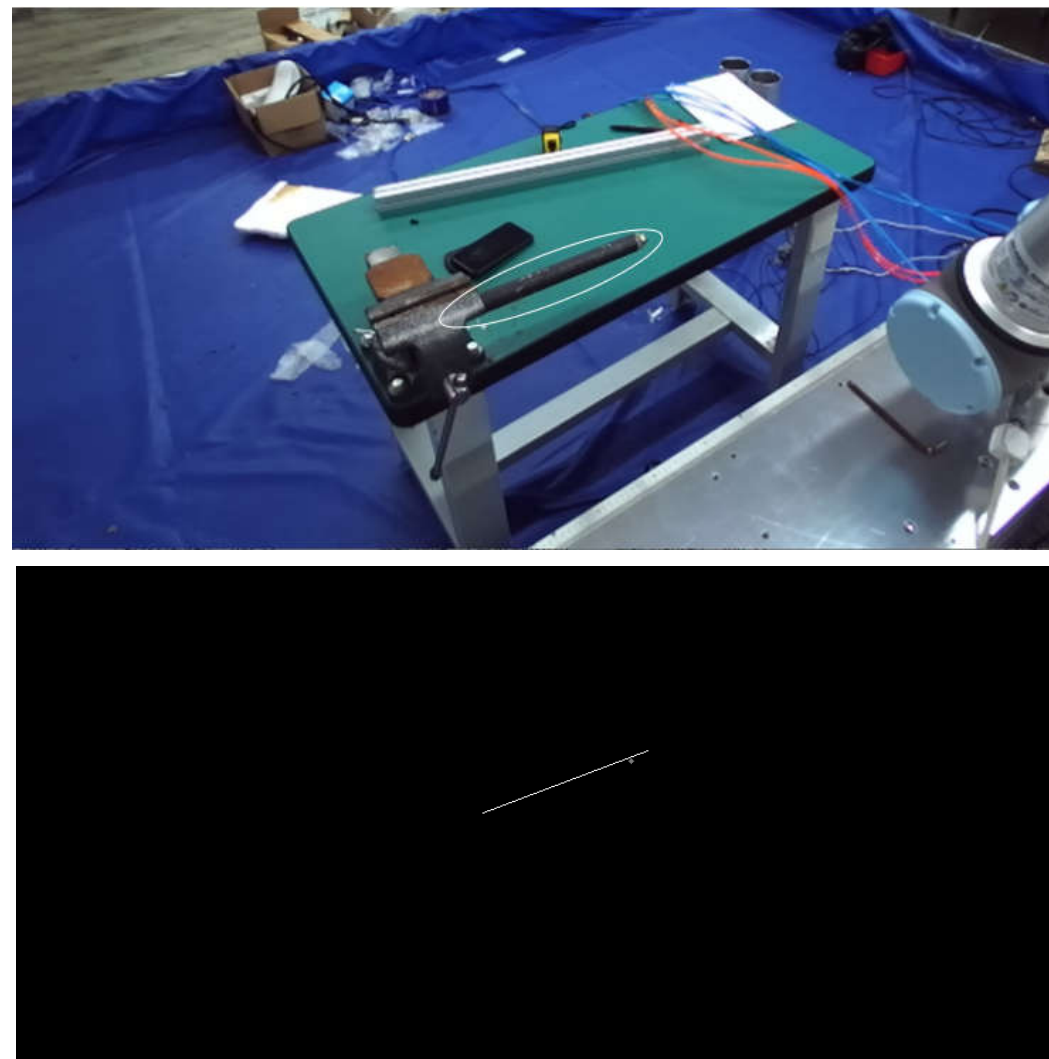
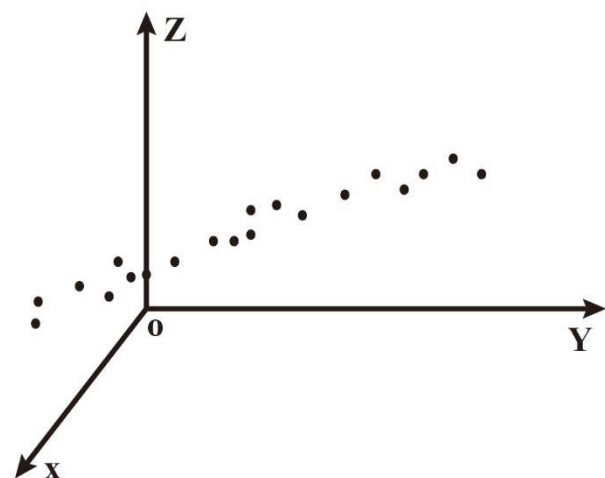
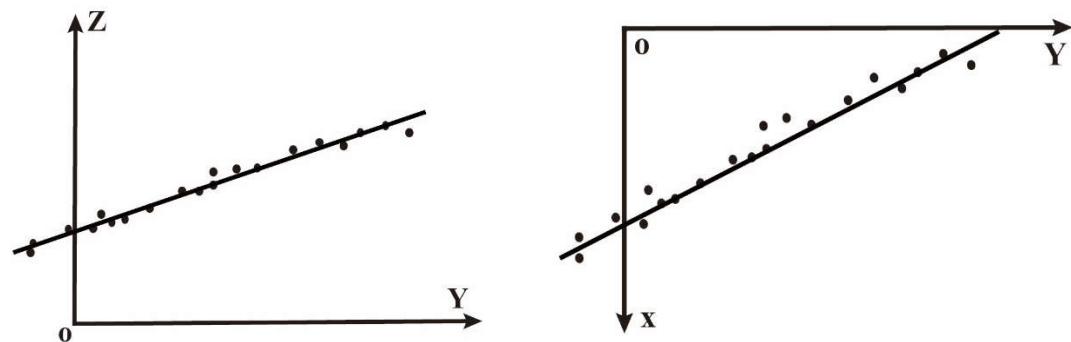


图5-3 上图：实际泄漏管道RGB图像， 下图：对应掩膜图

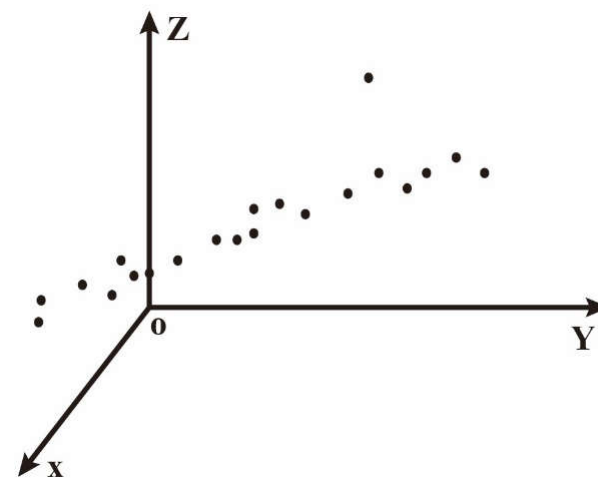


(a) 管道三维点云示意图

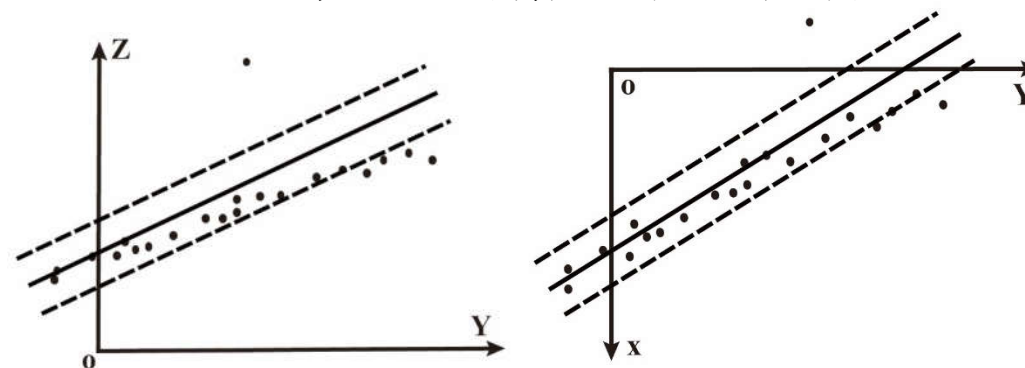


(b) 管道三维点云在ZOY, XOY上的投影以及平面分别进行拟合直线的结果

图5-4 管道三维点云图及投影拟合直线示意图



(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

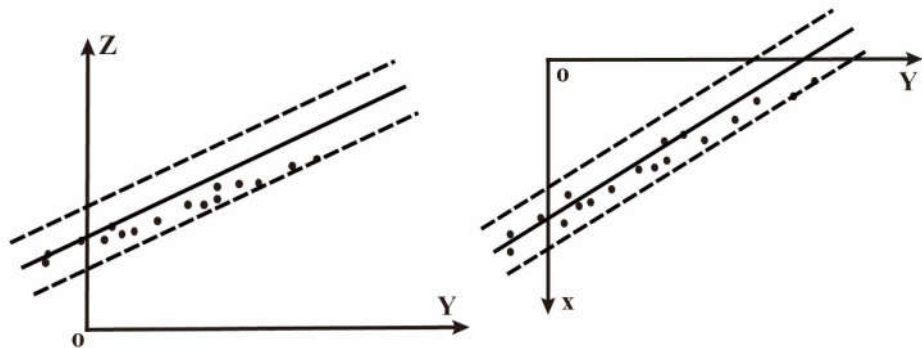


图5-6 经过点云滤波消除孤立点云后YOZ, XOY平面上保留的点集

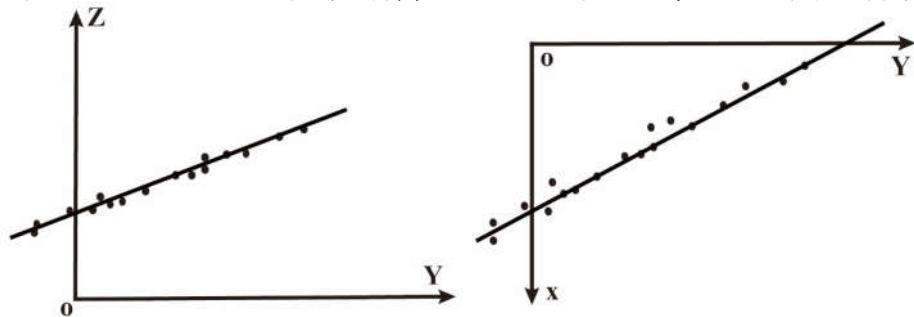


图5-7 在ZOY, XOY平面上使用过滤后的点云做拟合得到的直线结果

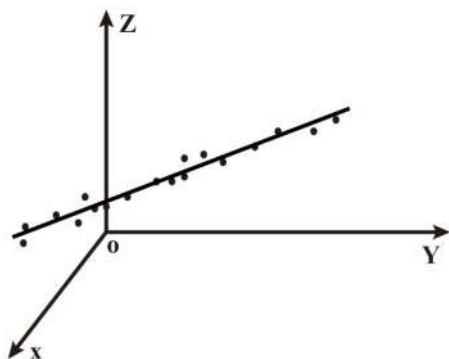


图5-8 在三维空间上经过点云滤波后的直线拟合结果

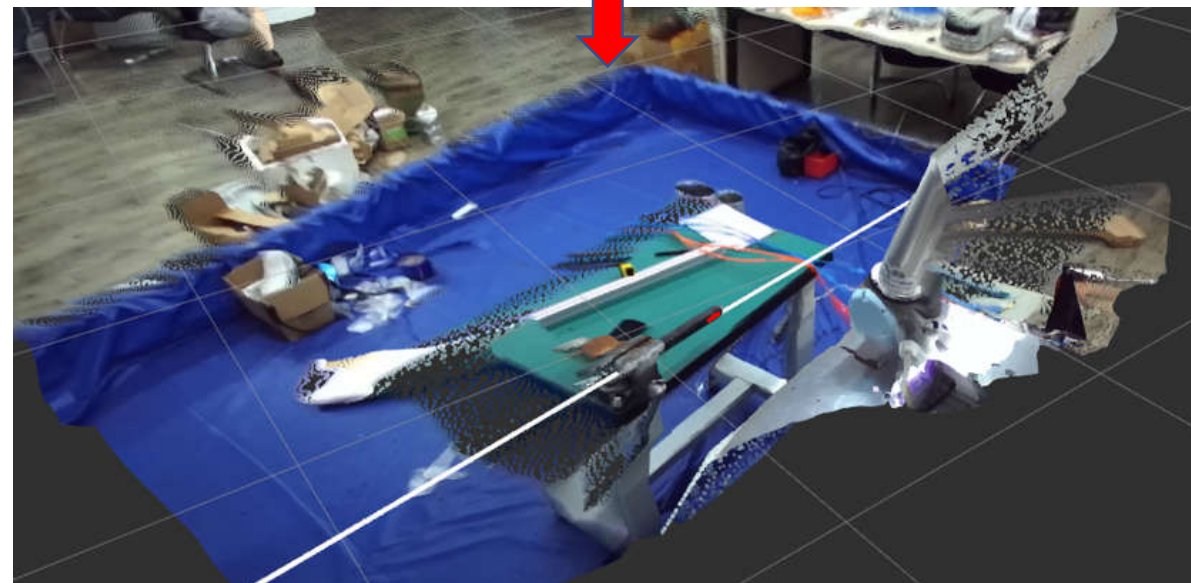


图5-9 经过直线拟合后的管道直线与原有点云的重合效果



运行及测试结果

ANALYSIS AND RESULT OF EXPERIMENT



图6-1 带压堵漏机器人室内测试环境图



图6-2 前进后退运动功能测试

图6-3 转弯运动功能测试

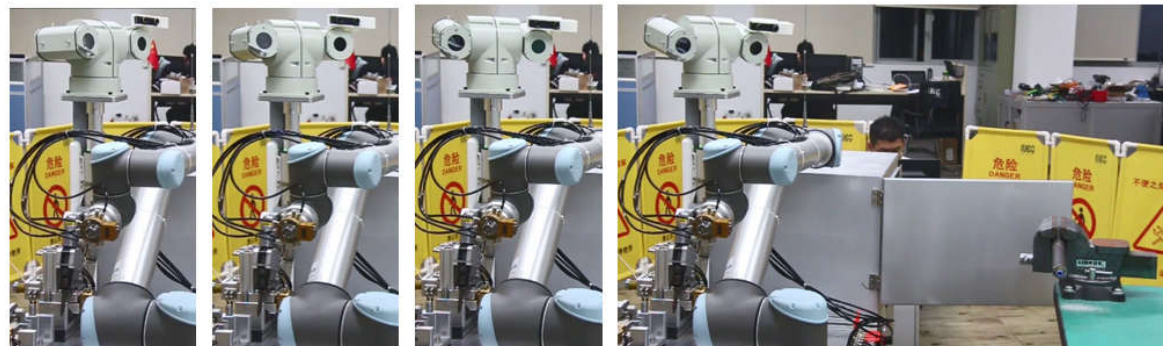


图6-4 云台相机旋转及俯仰运动测试



图6-3 可视化控制软件图像回传测试

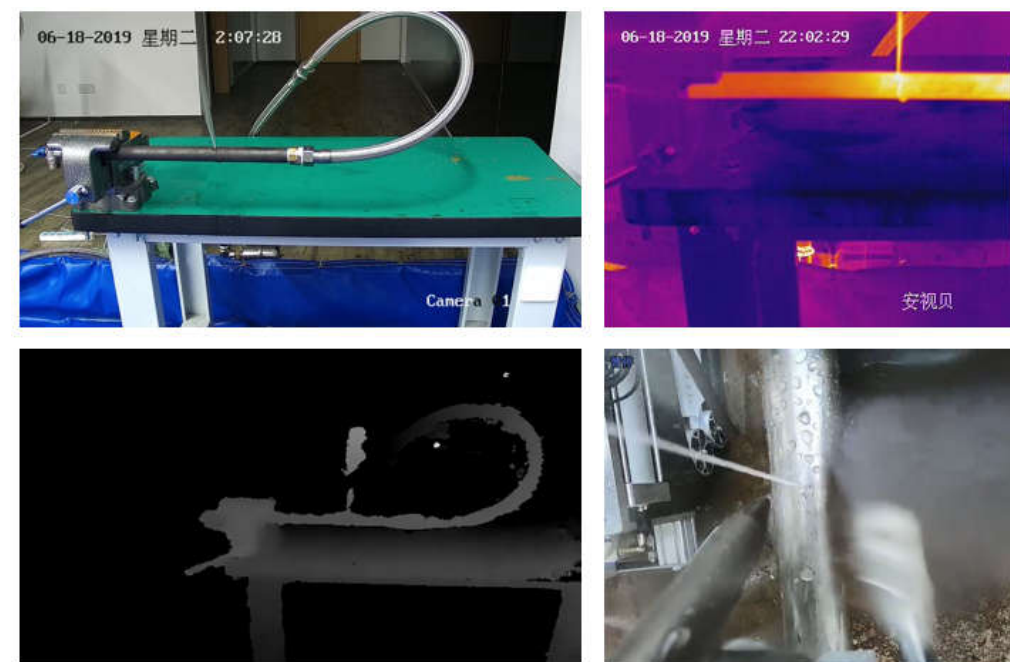
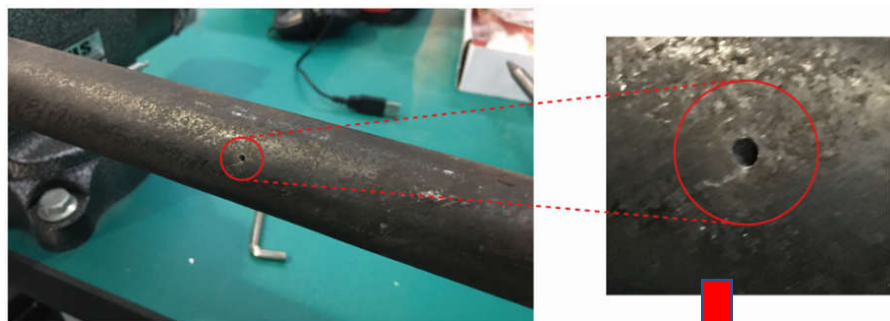


图6-4 各相机图像回传显示测试



(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6-5 带压堵漏机器人捻打过程测试



图6-6 捻打堵漏失败情况出现的缝状泄漏

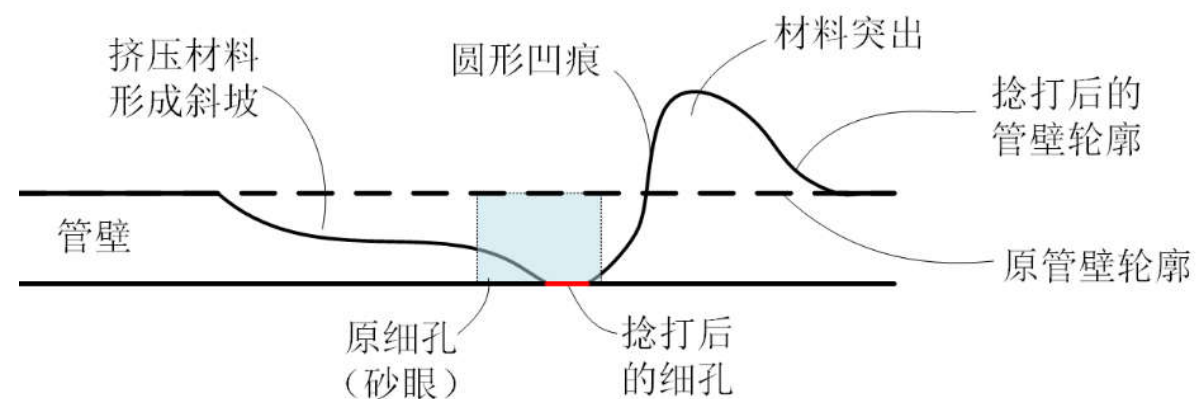


图6-7 材料位移过大的堵漏失败情况

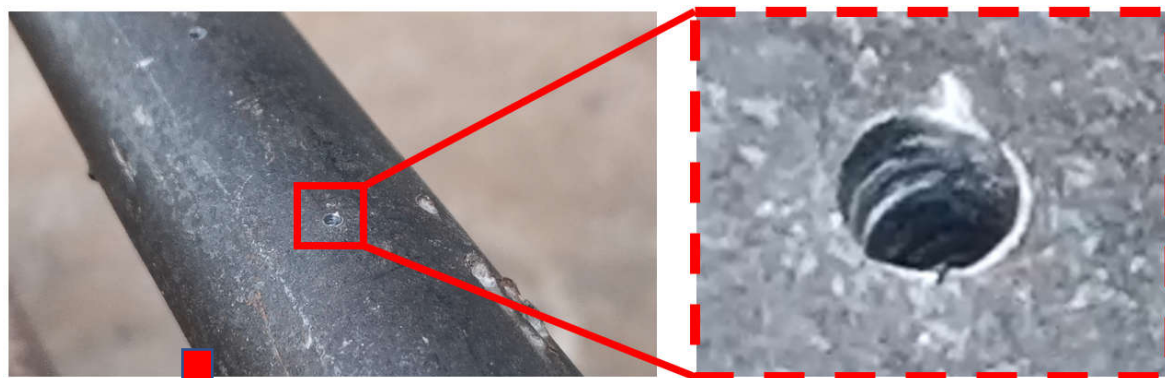


图6-8 待修复管道砂眼情况

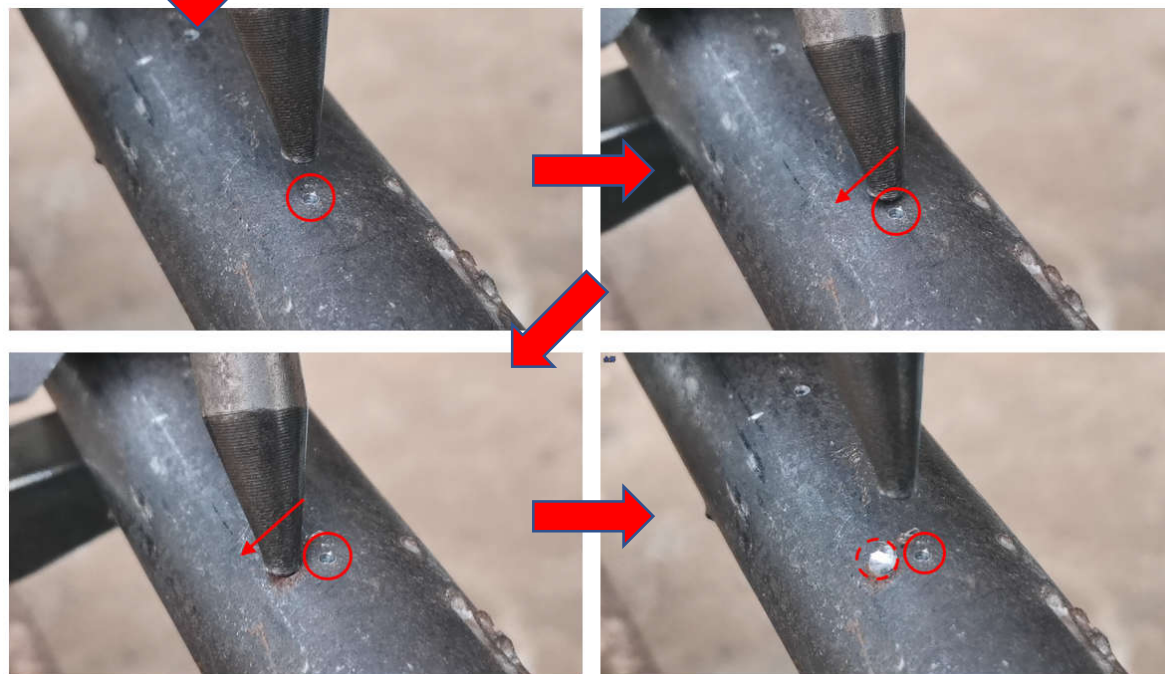


图6-9 枪头滑动后带来的捻打位置偏移

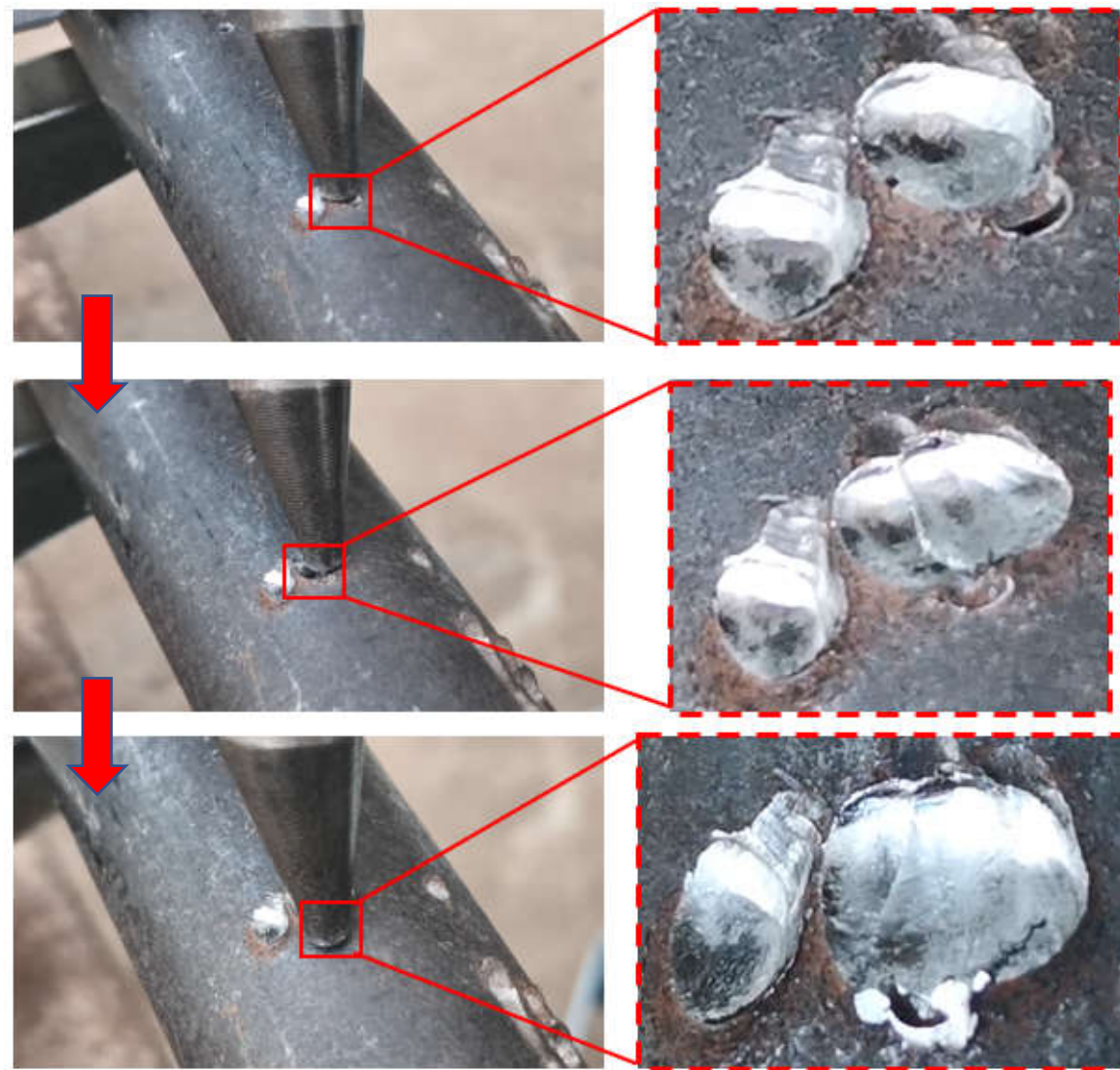


图6-10 人为补偿滑动定位误差后的捻打堵漏效果

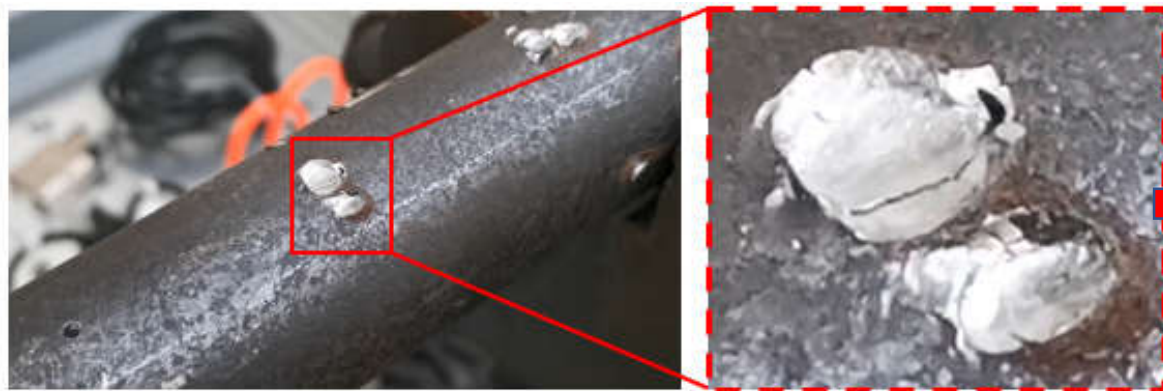


图6-11 由于重复凹痕处捻打造成的缝隙泄漏

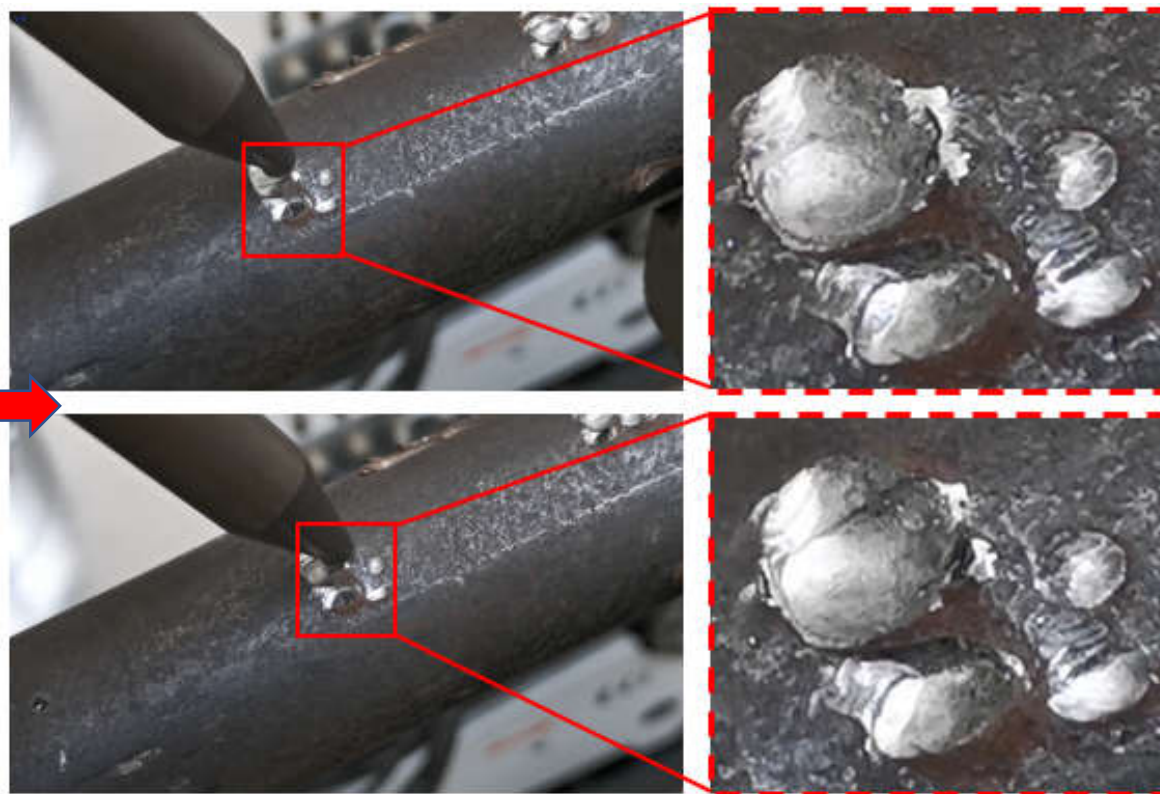


图6-12 在缝隙处直接捻打堵漏的效果

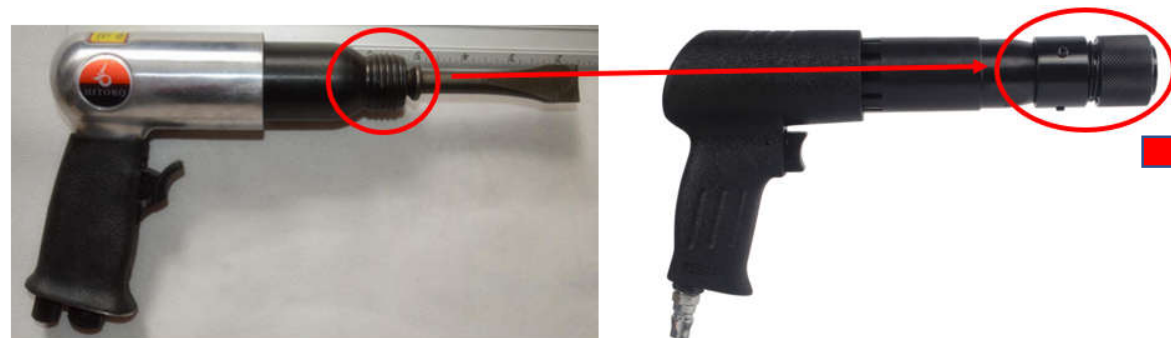


图6-13 将气冲枪的弹簧限位改为免簧限位器

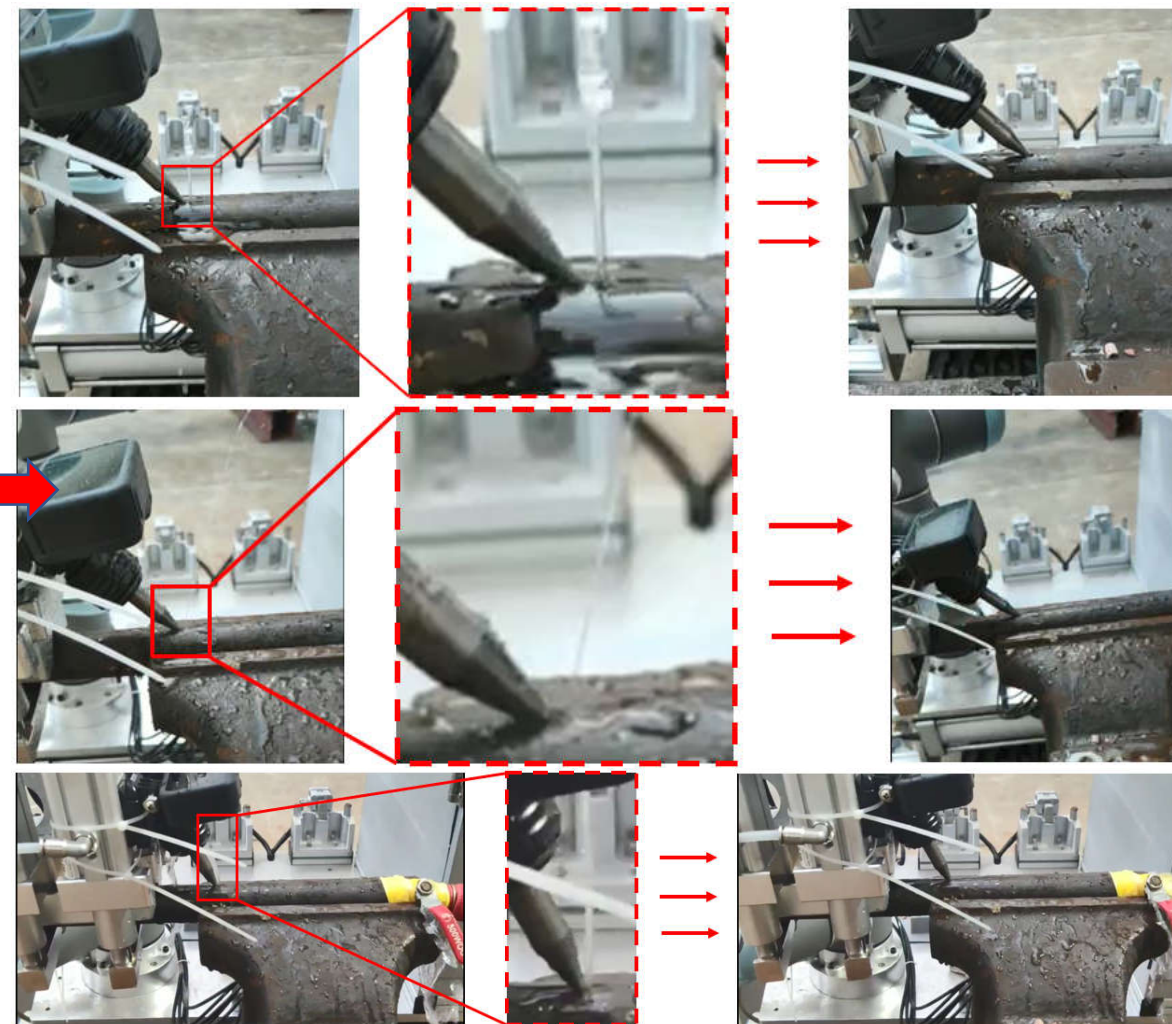


图6-14 改进后的气冲枪捻打堵漏自来水泄漏管道



总结与展望

CONCLUSION AND FUTURE

工作总结

(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。并详细介绍了三个模块的设计思路及实现。

(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。实验结果证明了带压堵漏机器人的有效性和先进性。

工作展望

(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。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。

(3) 该项目中的带压堵漏机器人仍属于遥操作机器人，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。