



汕 頭 大 學

SHANTOU UNIVERSITY

# 硕 士 学 位 论 文

题 目：电厂集控室触屏操作机器人的设计与实现

英文题目：Design and Implementation of Touching-Screen  
Operation Robot in Central Control Room of Power Plant

姓 名 罗晨林 学 号 151809031

所在学院 工学院 导师姓名 魏楚亮

专 业 电子与通信工程

入学日期 2018 年 9 月 答辩日期 2021 年 5 月



## 硕士学位论文

论文中文题目：电厂集控室触屏操作机器人的设计与实现

论文英文题名：Design and Implementation of Touching-Screen Operation  
Robot in Central Control Room of Power Plant

指导教师：魏楚亮

申请人：罗晨林

论文答辩委员会成员

主席：沈民奋 教授 （汕头市智能制造产业联盟）

委员：庄哲民 教授 （汕头大学工学院电子系）

李芬兰 教授 （汕头大学工学院电子系）

唐雅娟 副教授 （汕头大学工学院电子系）

袁野 副教授 （汕头大学工学院电子系）

## 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： 罗晨林

日期： 2021 年 5 月 29 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： 罗晨林

导师签名： 魏培光

日期： 2021 年 5 月 29 日      日期： 2021 年 5 月 29 日



## 摘要

火力发电机组在当今的一个主要运行控制方式就是运行人员在电厂集控室中对 DCS 系统屏幕进行 24 小时监控和操作。因此也带来了几点问题：1. DCS 系统界面需监控的位点众多，需要一人对多个屏幕信息进行查看与判断，因此在执行时需要精神高度集中以避免错误，运行人员工作高度紧张，压力巨大；2. 电厂必须严格按照生产规范进行频繁的例行检查，工作重复性大，人员容易轻视大意；3. DCS 系统界面包含多种图例、灯号等，逻辑复杂，运行人员长时间进行监控，容易因疲劳造成误判，存在较大的安全风险；4. 人工监盘自动化水平不高，电厂需要投入较多人力和资金，电厂的生产效率还不高。针对该特殊场景和以上问题，本论文设计并实现了一款稳定、低成本的集控室触屏操作机器人。本论文主要的研究内容及工作如下：

(1) 根据华能海门电厂集控室人工监盘操作 DCS 系统出现的问题，设计出一个整体的机器人系统方案，包括机器人协管系统、触屏操作系统、图像采集系统、触屏功能授权系统、人机交互系统、操作人员站六大功能模块。同时详细阐述了各个模块的硬件设计与搭建和软件的设计及实现。

(2) 分析了人工监盘的操作逻辑，提出一种采用机械臂视觉伺服技术的触屏操作控制方法；使用基于像素的模板匹配方法对采集的 DCS 系统界面图像进行页面识别、图例识别及定位、点选效果复查，将获得的目标图例像素坐标通过坐标转换为机械臂基座标下的三维坐标；最后驱动机械臂完成实时轨迹规划，精确点击目标图例。

(3) 在保证系统安全方面，采用了视频采集卡作为获取图像信息的来源，该方式只获取图像信息，不会对 DCS 系统进行信息回传；还设计了 DCS 显示屏触摸功能控制电路，防止了机器人待机时人为误触触摸屏的情况发生，有效保证了机器人操作的安全性；最后为了保证 DCS 系统的信息安全，设计了人-机器人-DCS 的控制模式，运行人员通过机器人系统（上位机）对机器人下达操作指令，机器人在触摸屏上具体点击执行操作逻辑票，上位机和机器人都不直接接入 DCS 系统进行操作。

(4) 在华能海门电厂的集控室进行触屏操作机器人的实际运行和调试。整个触屏操作机器人在运行人员下达指令后，能够自动完成识别页面、图例、点选效果复查等，且能精确点击目标图例等一系列任务。本文设计的触屏操作机器人，实现了全国首例电厂集控室智能监盘辅助机器人技术，可以在有相关需求的行业内推广使用。对于未来实现机器人自动监盘，电厂无人化运行具有一定的参考价值。

**关键词：**电厂集控运行；触屏操作；工业机器人；视觉伺服；人机交互

## Abstract

One of the main operation and control modes of thermal power plant units is that the operators supervisory and operate the DCS system screen 24 hours in the central control room of the power plant. So there are also some problems: 1. The interface of DCS system needs many sites to be monitored, which often requires one person to view and judge multiple screen. Therefore, it needs to be highly concentrated in order to avoid errors during execution. Operators are highly stressed and under great pressure. 2. The power plant must carry out routine inspection frequently in strict conformity with the production standard, which is repetitive work and the operators are easy to ignore and neglect. 3. The interface of DCS system contains many keys, lamps and so on, and its logic is complex. Operators are easy to misjudge due to fatigue when they monitor for a long time, and there is a big safety risk. 4. The automation level of the manual monitoring panel is not high. The power plant needs to invest more manpower and capital, and its productivity needs to be improved. Aiming at the special situation and above problems, a stable and lower-cost touch screen operation robot for central control room is designed and realized in this paper. The main research contents and work of this subject are as follows:

(1) A set of touch-screen operation robot is designed to assist the manual monitoring operation in the central control room of Huaneng Haimen power plant. It includes six functional modules: robot assistant management system, touch screen operating system, image acquisition system, touch screen function authorization system, human-computer interaction system and operator system. This paper describes the hardware selection, construction and software design and implementation of each module in detail.

(2) The operation logic of the manual monitoring panel is analyzed, and a touch-screen operation control method based on visual servo technology of manipulator is proposed. The method of template matching is used to identify the capture interface image of DCS system, such as page recognition, legend recognition and location, and point click effect review. The

obtained pixel coordinates of the target legend are transformed into 3D coordinates under the base coordinates of the manipulator, and the manipulator is driven to complete the real-time trajectory planing and click the target legend accurately.

(3) In terms of system security. The video capture card is used as the source of image. This method only obtains image, and does not carru out information return to DCS system. The touch authorization control circuit and physical switch of DCS system display screen are designed to control the touch function of DCS display sceen, to prevent the wrong touch when the touch screen operation robot during standby, and to ensure the operation safety of power plant. In order to ensure the information security of DCS system, the man-robot-DCS system interaction mode is designed and implemented. The operator gives the operatin instructin to the touch-screen operation robot through the upper computer. The robot receives the instruction and then performs the touch-screen operation to the DCS system. Both the host computer and the robot are not connected to the DCS system, and both work independently of the DCS system.

(4) The experiment and debugging of touch-screen operation robot are carried out in the central control room of Huaneng Haimen power plant. After the operator gives the command, the touch-screen operatin robot can automatically complete a series of tasks, such as identifying the page, legend, checking the effect of click, and cliking the target legend accurately, which proves the validity of the robot. The robot designed in this paper has realized the first intelligent monitoring panel assistant robot technology in power plant central control room in China. Which is suitable for promotion and ues in the industry with relevant needs. It has a certain reference value for the future realization of robot monitoring and unmanned operation power plant.

**Keywords:** Centralcontrol of power plant, Touch-screen operation, Industrial robot, Visual servo, Human-computer interaction

## 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 .....           | 4  |
| 1.2.1 电厂集控运行的国内外研究现状 .....  | 4  |
| 1.2.2 工业机器人的国内外研究现状 .....   | 6  |
| 1.2.3 视觉引导技术的国内外研究现状 .....  | 7  |
| 1.3 本文的主要研究内容 .....         | 8  |
| 第 2 章 触屏操作机器人整体系统设计 .....   | 10 |
| 2.1 人工监盘操作的模式和流程分析 .....    | 10 |
| 2.1.1 人工监盘操作的模式分析 .....     | 10 |
| 2.1.2 人工监盘操作流程分析 .....      | 10 |
| 2.2 电厂集控室监盘操作任务需求分析 .....   | 14 |
| 2.3 机器人总体方案设计 .....         | 15 |
| 2.4 机器人硬件选型及设计 .....        | 17 |
| 2.4.1 整体硬件结构设计 .....        | 17 |
| 2.4.2 触屏操作系统硬件设计 .....      | 21 |
| 2.4.3 触屏功能控制系统硬件设计 .....    | 24 |
| 2.4.4 图像采集系统设计 .....        | 25 |
| 2.4.5 触屏操作机器人整机硬件 .....     | 26 |
| 2.5 本章小结 .....              | 27 |
| 第 3 章 触屏操作机器人视觉控制方法研究 ..... | 28 |
| 3.1 基于模板匹配的点击目标识别 .....     | 28 |
| 3.1.1 基于灰度值的模板匹配 .....      | 28 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 3.1.2 触屏目标图标位置计算.....        | 30 |
| 3.2 触屏操作机器人视觉控制方法.....       | 31 |
| 3.2.1 触屏机械臂坐标系视觉目标定位 .....   | 31 |
| 3.2.2 基于位置的机械臂视觉控制 .....     | 33 |
| 3.3 本章小结.....                | 35 |
| 第 4 章 触屏操作机器人软件设计.....       | 36 |
| 4.1 软件总体设计 .....             | 36 |
| 4.2 上位机控制程序模块设计与实现 .....     | 36 |
| 4.3 图像处理程序模块设计与实现.....       | 38 |
| 4.4 人机交互界面设计 .....           | 39 |
| 4.4.1 环境配置.....              | 39 |
| 4.4.2 界面结构布局 .....           | 40 |
| 4.4.3 功能介绍.....              | 40 |
| 4.5 机械臂运动控制程序模块设计 .....      | 41 |
| 4.6 本章小结.....                | 43 |
| 第 5 章 触屏操作机器人实际环境调试与运行 ..... | 45 |
| 5.1 模块功能测试.....              | 45 |
| 5.2 实际运行与调试.....             | 47 |
| 5.3 本章小结.....                | 52 |
| 第 6 章 总结与展望.....             | 53 |
| 6.1 总结 .....                 | 53 |
| 6.2 展望 .....                 | 54 |
| 参考文献.....                    | 55 |
| 攻读学位期间主要研究成果 .....           | 58 |
| 致谢.....                      | 59 |



## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题背景与研究意义

近年来,我国的经济迅速发展,对电力的需求越来越大,我国电力工业以前所未有的速度快速增长,发电装机容量从 2015 年底的 15 亿千瓦提高到 2020 年底的 22 亿千瓦,年均增长 7.6%。其中火电装机容量超过了 12.4 亿千瓦,占到了全部装机容量的 56.58%。电力工业不仅为社会发展提供动力,同时也与我们的生活紧密相连。然而近几年来相继发生的澳洲大停电、印度大停电、台湾大停电等事件,不仅造成这些国家重大的经济损失,而且也深刻阻碍了人们的正常生活,如图 1-1 所示。电力生产过程中产生的电压往往高达几十甚至上百千伏,这样的高电压拥有巨大的能量和安全隐患,一旦发电厂运行出现故障,轻则损坏设备,重则发生爆炸等生产安全事故,如图 1-2 所示。

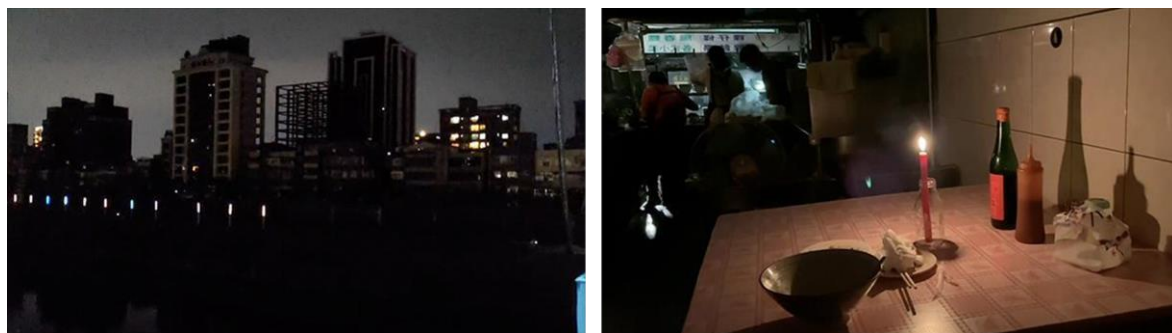


图 1-1 台湾大停电现场照片



图 1-2 发电厂生产安全事故现场照片

华能国际电力股份有限公司海门电厂(以下简称“海门电厂”)是一个以火力发电为主的发电厂,随着目前生产和生活用电量的不断提高,华能汕头海门发电有限责任公司规划建设 2 台 1036MW 超超临界燃煤发电机组,是广东省主力电厂之一,海门电厂目前采用的是集散控制系统来控制发电厂的安全运行。

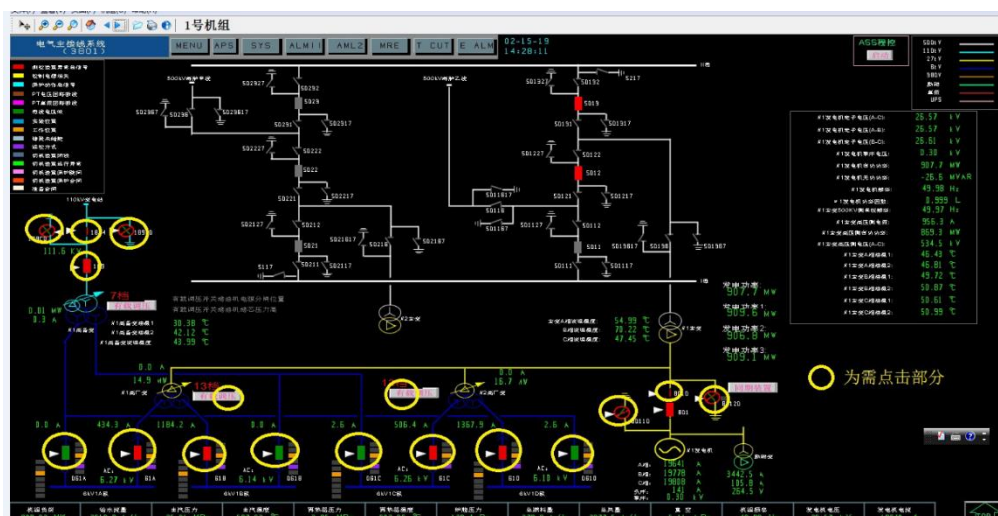
集散控制系统 (Distributed Control System), 以下简称 DCS 系统, 是以微处理器为基础的全分布式控制系统, 是通过计算机对工业生产现场进行分散控制、分散操作、集中管理和集中监视<sup>[1-2]</sup>。火力发电机组在当今的一个主要运行控制方式就在电厂集控室中对 DCS 系统屏幕进行监控和操作, 集控室作为 DCS 系统中的中控室, 操作员站、历史站和工程师站都集中与此, 是整个生产环节产生的控制信息、监控信息的集散地, 承担着生产指挥、调整、操作和监控的任务<sup>[3-4]</sup>, 如图 1-3 所示。每台机组的汽轮机、锅炉、发电机组等设备都在集控室 DCS 系统上操作, 集控室一天 24 小时都有值班人员在监视、操作 DCS 系统进行生产运行<sup>[5-6]</sup>。



图 1-3 发电厂集控室现场照片

华能海门电厂作为粤东最大的火力发电厂, 恰好承担着粤东地区火电机组繁重的发送电任务, 对 DCS 系统界面的安全监控和操作是必不可少的一项工作。在实际运行过程中, 人工监盘需要值班人员 24 小时监视设备的运行状况。发电厂集控运行人员处于生产一线, 他们的工作不仅要保障这些设备正常运行, 同时他们管理的电厂设备价值巨大, 价格动辄上百万甚至上亿元<sup>[7]</sup>, 如图 1-4 所示。因此也带来了几点问题: 第一, DCS 系统界面需监控的位点众多, 往往需要一人负责多个屏幕信息进行查看与判断, 因此在执行时需要精神高度集中以避免错误, 集控运行人员因此工作高度紧张, 压力巨大; 第二, 电厂必须严格按照生产规范进行频繁的例行检查, 工作重复性大, 人员容易轻视大意; 第三, DCS 系统界面信息包含多种图例、灯号等, 逻辑复杂, 监控人员长时间进行监控, 容易因疲劳造成误判; 第四, 为了减轻监盘人员的工作压力, 一般电厂往往通过安排人员轮班进行监盘, 保证人员执行监盘任务时有充足注意力,

但也因此需要投入更多人力和资金，这与电厂降低运行成本，提升综合绩效的发展方向不符合，同时也会降低电厂在激烈的市场竞争中的优势。



a)DCS 显示界面信息示例



b)一人监视多个屏幕

图 1-4 集控室人工监盘场景

近年来，随着电力行业科学技术发展和应用，以及工业 4.0 发展目标，发电企业在设备自动化、管理信息化方面取得较大提升<sup>[8-9]</sup>。华能海门电厂作为南方电网首座百万千瓦级超超临界节能环保型绿色电厂，积极践行新发展理念，不断推进智慧电厂建设，但是在发电企业长期传统管理和运行经验的影响下，电厂生产现场的运行和管理工作还存在较大的不足。比如电厂集控室的运行监盘工作需要工作人员长时间对 DCS（Distributed Control System）显示界面进行监控和下发指令，用于调整现场设备

的运行状态，以使整个电力生产系统安全稳定的运行。完全依靠人工 24 小时去监控和控制 DCS 系统，这就要求集控室运行人员必须长时间精神高度集中，这种监盘任务对于监盘人员来说是一项繁重的工作，容易因疲劳和其他心理因素造成误操作，因此存在一定安全风险。电厂集控室触屏操作机器人项目，意在使用机器人取代或协助集控室运行监盘人员对 DCS 系统的监控和操作。一方面可以借助机器人技术降低电厂集控室运行人员监盘的压力，缓解他们的疲劳，另一方面使用机器人代替或辅助运行人员工作，有助于提高电厂的自动化和智能化水平，可以提升电厂集控运行的准确性、稳定性和安全性。随着国家工业 4.0 和智能制造等政策的推动下，电厂也在大力发展集控室无人监控技术，致力于建设为智慧电厂和无人电厂，同时国内集控室运行监盘场景众多，遍及电力、石油、化工等等行业，因此集控室监盘操作机器人具有很大的推广使用价值和广阔的应用场景。

为此，针对集控室的监盘工作，研发一款稳定、低成本的智能操作机器人，辅助监盘人员工作，缓解他们的工作压力，同时保证高效准确的监盘操作质量，具有重要的意义。该项目的研究对电厂集控室的监盘工作将带来极为深远的意义。一方面通过触屏机器人的图像识别功能，能有效减少长时间人工监盘带来的误判，提高电厂集控室监盘的安全性。另一方面，该项目可以有效解放生产力，触屏操作机器人可以胜任大多数繁重且重复性高的监盘操作工作，因此可以提高电厂的生产效率和自动化和智能化程度。可以预见，该项目的研究成果可以推广至全国的电厂集控室监盘工作中，甚至其他有集控监盘场景的行业也可以得到推广，具有广阔的市场前景，也能有效改善目前我国人工监盘因疲劳造成误判的现状，对电厂的经济、安全方面的提升大有裨益，同时也提高了电厂的自动化和智能化水平，是对实现电厂无人监盘，建设无人电厂和智慧电厂的一次有益尝试。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 电厂集控运行的国内外研究现状

近年来电力系统生产运行的自动化和网络化程度不断提高。20 世纪末，西方发达国家的大量发电厂已经实现了无人值班，在法国东南部的杜郎斯-威尔登总共建设有 21 个水电站，组成了一个区域级的水电站群，21 个电站由一个控制中心负责集中控制，站点现场都已经实现了“无人值班和少人值守”；日本东京电力公司 20 世纪 80 年代初拥有电厂 156 座，无人化程度达到 98%以上<sup>[10]</sup>。以上水电站都具有“远方控制、关门运行、定期巡检”的特点。国外在实现对多个水电站群的远程集中控制方面的研究和应用比国内要早很多年，并且也在不断地完善、总结和进步，相比较而言国外发达国家的水电站远程集中控制的管理模式较为成熟。

我国在 20 世纪 90 年代中期提出“无人值班”概念。其后，随着计算机和通信技术的快速发展和应用，我国水电站开始逐步推进“无人值班，少人值守”的工作模式。进入 21 世纪，国内水电企业掀起了探索运检分离、运管分离、主辅分离、集中控制、无人值班等各种管理模式的高潮<sup>[11]</sup>。目前，南方电网公司下属的广州抽水蓄能电站、鲁布革水电站，华能澜沧江旗下的糯扎渡、景洪等水电站等已经实现了“关门运行、远方控制、无人值班”的工作方式<sup>[12]</sup>。



图 1-5 华能糯扎渡水电站集控室“无人值班”现场

“无人值班”水电厂主要通过集控中心远程监控水电厂运行系统各项参数和信息，指导受控电厂现场人员进行实际操作电厂系统和设备来保证电厂安全、正常生产运行。集控中心运行人员每天 24 小时按值轮班，主要负责对受控电厂接入设备的运行监控；也要接收电网调度指令，执行电网调度机构下达的发电计划，对受控电厂进行远程开停机等操作；当监盘发现电厂设备出现故障信息时，需要及时通知电厂值班人员到现场核实确认，受控电厂应急值守人员在现场及时处置故障；集控中心作为总控台负责对受控水电站实施联合优化调度来实现水电厂的最优经济运行<sup>[13]</sup>。

目前，火力发电机组的集控技术（DCS 技术）在我国电力行业中已经得到广泛应用，随着技术的不断提升，火力发电厂集控运行技术也不断得到提升，有效保证了电厂生产运营的效率和安全性<sup>[14]</sup>。电厂集控运行技术主要包含了电厂运行情况监督技术、发电设备运行操作管控技术与分散控制技术这三方面的内容<sup>[15]</sup>。火力发电厂还是采用传统的集控室运行人员 24 小时轮流监盘，在集控室中在 DCS 系统上对汽轮机、锅炉、发电机组等组件的运行实施控制。电气停送电，电厂发电机组正常生产以及投运、停运设备，单元机组的启动、关机、正常运行和事故监控等操作都由集控室运行

班员进行操作。这要求运行人员必须熟练掌握设备的运行方式，对设备运行状况要很了解，还需要有较强的实际操作能力。因此电厂也不断强调操作人员素质的提升，积极开展员工培训，不断强化工作人员专业技能素质，使集控运行人员掌握熟练的操作知识和技能，努力实现资源合理配置。

从已有的文献资料来看，关于电厂集控运行中监盘操作的智能化和自动化，还没有公开的工程应用成果，国内外还有待于研究。不管是水利发电厂还是火力发电厂都需要运行人员对 DCS 系统进行 24 小时监盘操作，这对监盘人员来说是一项繁重的工作；并且容易因疲劳造成误触发生，对电厂的运行安全也存在一定的安全风险；最后人工监盘自动化水平不高，还没有发挥电厂更高的生产效率。

### 1.2.2 工业机器人的国内外研究现状

工业机器人是现在世界上的最重要的高科技成果之一，目前已工业机器人已经在工业生产的许多领域中得到了广泛的应用，对提高工业生产过程自动化水平发挥着至关重要的作用。工业机器人被普遍接受的定义是：应用于工业领域中的多关节的机械臂或多自由度机器人。工业机器人主要经历了三个发展阶段<sup>[16]</sup>。

第一代的工业机器人被称为“示教再现型”工业机器人。世界上第一台该型机器人是由美国发明家乔治·德沃尔在二十世纪六十年代设计发明的，该机器人可以按照固定的程序重复简单抓取、放置等精细任务。这一代工业机器人的特点是首先由操作者将作业过程中的各种知识如运动方式、运动轨迹、作业顺序等对机器人进行示教，然后机器人将这些知识记忆下来并根据程序再现指令，逐条将这些知识取出，最后反复无误地执行各种被示教过的复杂动作<sup>[17]</sup>。第二代工业机器人被称为“感知回馈型”工业机器人。这种类型的机器人都安装了各种类型的传感器，如红外传感器、温度传感器、压力传感器和加速度传感器等，使得工业机器人能够根据这些传感器反馈回来的信号，做出一定简单判断和应对一些简单的故障问题，有了一定的感知能力，但是其智能性离工厂自动化水平需求还有较大的差距<sup>[18-19]</sup>。第三代工业机器人被普遍称为“智能机器人”。这一代工业机器人使用了计算机视觉技术，通过给工业机器人安装工业数字相机，对获取的图像信息进行图像处理使机器人可以对周围环境、作业条件进行感知和判断，使其具有了类似人眼的视觉功能<sup>[20-21]</sup>。

国外的工业机器人研究起步较早，发展较快，经历了几十年的发展，已经大量应用于各种工业生产领域，一些生产加工过程中的关键步骤都逐渐由工业机器人代替一线工人进行操作。目前工业机器人领域有国外的四大著名机器人公司，它们分别是德国的库卡(KUKA)公司，瑞士的 ABB 公司，日本的发那科(FANUC)公司和安川电机(YASKAWA)公司。这四家公司技术实力强，产品种类众多，它们的工业机器人被广泛应用于各行各业，并占据了市场主要的份额。

以其他国家相比，我国的工业机器人研究和发展要落后于国外，我国从 1972 年才开始进行研制，共经历了七十年代萌芽期、八十年代开发期和九十年代实用化期三个重要的阶段，推动生产方式从人工化、机械化、自动化、智能化的变革<sup>[22]</sup>。

随着工业机器人技术的迅速发展，其在工业中的各个领域和环节中都得到了广泛的应用。例如：工业机器人被充分利用到了汽车智能制造生产线的各个领域，比如材料拌匀、车身喷漆、车身焊接以及车辆组装<sup>[23-24]</sup>；智能巡检机器人已经在电厂中使用，可以代替人工巡检<sup>[25]</sup>；在机床制造领域，自动上下料机器人适用于生产线的上下料、工件翻转、工件转工等工序<sup>[26]</sup>等等，如下图 1-6 所示。在这些例子中，机器人辅助或取代了人工完成了一些重复、冗长的劳动任务，提高了生产的效率及生产的质量。而监盘过程中存在大量流程固定、判断条件明确且重复性大的操作，适合使用机器人取代或协助监盘人员的工作。



a) 涂胶机器人



b) 焊接机器人



c) 码垛机器人



d) 电厂巡检机器人

图 1-6 工业机器人运用于工业生产的各个场景

### 1.2.3 视觉引导技术的国内外研究现状

视觉引导技术是指利用数字图像处理技术检测和识别出图像中的目标物体，并引导机器人完成相应的抓取、分拣等操作，在图像中识别和定位目标物体是视觉引导中最核心的技术，目标物体的识别是在目标图像中找到与已知的模板图像相匹配的图像<sup>[27]</sup>。现在已经有很多有效的方法来实现对目标匹配，这些方法大部分都是基于几何形

状、颜色信息、局部不变特征来实现对目标物体的匹配。在对一些形状图像比较复杂的物体进行识别过程中,可能需要将多个特征信息结合进行使用。目标物体的定位实现的是通过计算来获取匹配到的目标物体在目标图像中的像素坐标,还需要得到目标物体相对于模板图像的旋转角度。最常用的定位方法是利用几何形心得到中心坐标,利用 hough 变换检测直线得到旋转角度。

在工业场景较为固定,外界环境影响较小或无需考虑外界的条件变化,同时需要完成的工业任务也比较简单的情况下,通常使用基于模板匹配的方法进行目标检测。常用的一种是基于像素值的模板匹配方法。在工业环境复杂,目标物体放置位置不固定,同时拍照位置的不同使得目标图像发生尺度变化,这使得在许多场景下目标检测不准确,因此局部不变特征近几年来常被用来做目标匹配和检测<sup>[28]</sup>。其中 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)尺度不变特征变换和 SURF(Speed Up Robust Features)加速鲁棒特征是应用最为广泛的两种局部不变特征描述子。

### 1.3 本文的主要研究内容

本课题来源于华能海门电厂申报的华能集团总部科技项目“智能机器人组在电厂集控室中的应用”。课题组与华能海门电厂和广东电科院能源技术公司开展了多方面的前期调研与广泛交流。课题组牵头组织成立了相应的研发团队,决定以科研开发的方式首先对电厂集控室进行实地调研。其目标是通过细致、深入的交流,结合电厂集控室的现场环境,研究确定一套触屏机器人系统。依据对象特性设计出符合电厂集控室实际运行情况的触屏操作机器人系统方案,并通过触屏机操作机器人现场调整试验,最终实现触屏机操作机器人在电厂集控室的长期投运。触屏操作机器人在电厂实际运行结果表明,该机器人能够安全稳定实现触屏操作,能够减少人工监盘带来的弊端,提高了电厂生产的安全性和智能化水平。

电厂集控室为电厂的控制中心,根据国内外文献报道表明,目前应用于电厂集控室的监盘策略主要为人工监盘,机器人自动监盘可以采用的技术有机械臂视觉伺服技术、机器人视觉信号处理等技术。这些技术还没有形成成功的工程应用案例,因此这一块还有待研究。我们应用到触屏操作机器人的是基于模板匹配的图像识别技术,通过图像识别的结果来进一步控制机械臂完成触屏操作,该项目已经完成了机器人实体搭建,并已成功投放到电厂中实际运行。电厂集控室自动化和无人化是一种新的趋势,我们的研究团队正沿着这种方向前行,力求改善电厂集控室的自动化水平,为电厂创造更大的经济效益。课题组通过文献调研和现场的实地调研主要完成了以下几方面的研究与工作:

(1) 分析了电厂集控室人工监盘操作流程,计划采用机器人代替或辅助监盘人员进行监盘操作,并根据该操作流程设计出一套触屏操作机器人系统,其中包括机器人

本体的结构设计、触摸屏的选型和放置，机械臂的选型分析和建模测试，工控机的配置和接口设计，图像采集系统的搭建。

(2) 分析了电厂工作人员人工监盘的操作逻辑，提出一种采用机械臂视觉伺服技术的机器人的触屏操作控制方法，实现了机械臂实时轨迹规划到目标位置并进行精确触屏操作。

(3) 为了保证电厂信息安全，设计并实现了人-机器人-DCS 系统交互模式。因此设计了机器人上位机（机器人协管系统），该系统是触屏机器人的总控制台，通过 socket 通信向触屏机器人发布运动指令并接收机器人的运行状态信息，机器人接收到指令后再对 DCS 系统执行触屏操作。在该交互模式下上位机和机器人都不接入 DCS 系统，都是独立于 DCS 系统之外工作。

(4) 针对 DCS 界面的操作安全性问题，另外设计了触摸屏触摸授权控制电路，并配备了物理开关，用来控制 DCS 显示界面触摸屏的触摸功能，当运行程序或者按下物理开关可以开关触摸屏的触屏功能，可以对 DCS 显示界面触摸屏的触屏功能进行有限的管控，防止触屏操作机器人待机时的误触情况发生，保证了电厂的运行安全。

(5) 为了获得更准确的图像信息和提高系统的精度，本文采用图像采集卡直接从 DCS 工作站中采集图像信息，可以很好地避免外界光照等环境因素对图像处理程序的干扰，并将其传送给工控机用于后续的图像处理。项目中主要涉及包括页面识别、图例识别及定位、点选效果复查等内容。控制系统页面布局比较固定，通过页面本身的特征及页面跳转的关系等，可以判断当前页面属于哪个工作页面，由此进行控制操作。页面内的图例包括按键元件，状态反映图例（灯，开关闸简图等），由于控制系统页面布局固定，页面内部图例具有独特的形状特征，可以以此实现图例定位。同时，系统还需要对相关文字进行识别以及对图例所反映的状态进行判断。点选复查包括两种，点击触发判断以及触发后效果的判断。点击触发判断，按键点击后的颜色变化等判断点击动作是否被触发。触发后效果的判断将需要结合点选后结合电厂进一步介绍的灯号的亮灭或系统数据变化情况进行进一步的判断。

(6) 为了机器人与人更好的协同工作，本文还设计了一套可视化的人机交互软件，软件主要包括三个部分。机械臂同步仿真区可以实时显示机械臂三维模型跟随实际机械臂运动的运动姿态；步骤执行流程区可以清晰的显示机器人正在执行的操作票流程、当前进度及待完成的任务；机器人状态区实时反馈机器人的当前状态。

(7) 将机器人放置在华能海门电厂的集控室进行现场系统调试和运行测试，针对电厂实际运行过程中机器人出现的问题，及时发现问题并分析出现的原因，同时向电厂运行人员提出了有效的解决办法。

## 第 2 章 触屏操作机器人整体系统设计

### 2.1 人工监盘操作的模式和流程分析

#### 2.1.1 人工监盘操作的模式分析

火力发电机组在当今的一个主要运行控制方式就是电厂监盘人员在电厂集控室中对 DCS 系统屏幕进行监控和操作。DCS 系统是以计算机技术为基础的自动化和智能化系统, DCS 系统有利于将生产控制功能优化和风险分散, 从而实现对生产过程中风险控制以提高工作效率。DCS 系统的组成结构如图 2-1 所示。操作站、工程师站和计算机部分共同组成了 DCS 系统的集中管理部分; 现场监测站、控制站是整个 DCS 系统的分散控制部分; 通信网络将整个 DCS 系统各个组成部分进行有效连接起来<sup>[29-30]</sup>。

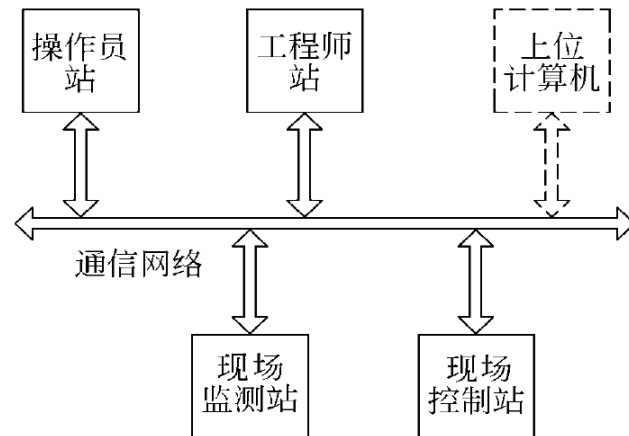


图 2-1 DCS 系统组成结构

集控室作为 DCS 系统中的控制中心, 集中放置有操作员站、历史站和工程师站, 是整个生产环节产生的控制信息、监控信息的集散地。承担着生产指挥、调整、操作和监控的任务, 布置有大屏幕、电视监控和紧急停车等备用手动操作装置, 方便全电厂的信息交互和展示。

#### 2.1.2 人工监盘操作流程分析

在本项目的开发过程中项目组以电厂集控室监盘操作人员对电厂保安电源系统 3806 画面中启停柴油发动机操作作为案例, 进行项目的样机开发。电厂集控室监盘操作人员保安电源系统 3806 画面中启停柴油发动机的操作方法为: 第一步进入保安电源系统 3806 画面, 如图 2-2 所示。



图 2-2 DCS 界面启停柴油发动机步骤一操作图

第二步，点击保安电源系统 3806 画面中的柴油机图标，之后弹出下一步操作界面，如图 2-3 所示。



图 2-3 DCS 界面启停柴油发动机步骤二操作图

第三步，检查有“启允许”信号，无异常报警，检查报警光字牌未亮。则点击操作界面中“P1-启动”按钮，如图 2-4 所示。若无“启允许”信号或者有异常报警，则停止后面的操作，现场集控运行人员进行原因分析和故障判断。



图 2-4 DCS 界面启停柴油发动机步骤三操作图

第四步，检查无异常报警，柴油发电机电压正常，检查柴油发电机出口开关合闸，变为红色，如图 2-5 所示。



图 2-5 DCS 界面启停柴油发动机步骤四操作图

第五步，点击操作界面“P2-停止”按钮，之后点击“柴油机停指令复归”按钮，检查确认按钮旁边红灯灭，如图 2-6 所示。

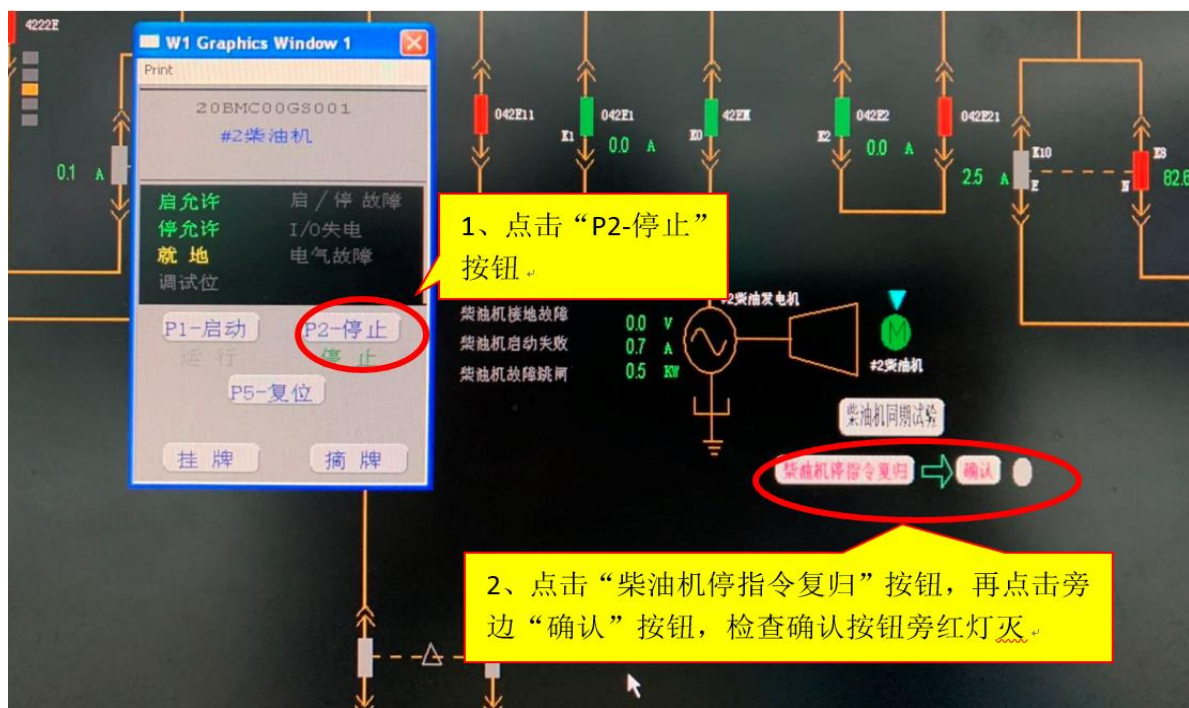


图 2-6 DCS 界面启停柴油发动机步骤五操作图

通过对人工监盘启停保安电源系统 3806 页面中柴油发动机的操作分析, 本文总结出了电厂集控室监盘人员对 DCS 界面监盘操作的普遍操作流程图, 如图 2-7 所示。同时, DCS 界面监盘操作具有以下特点: 电厂集控室监盘人员对 DCS 系统操作流程一般是顺序执行, 操作步骤比较固定, 通常可以在室内通过简单按钮控制实现对各生产环节的控制调整。同时 DCS 界面图例固定且丰富, 每一个图例都有不同的特征, 且图例特征明显, 每一个操作票都需要对不同的图例进行操作, 另外不同的图例的位置是固定不变的, 同一个指令的执行都是对 DCS 界面做出重复的操作。

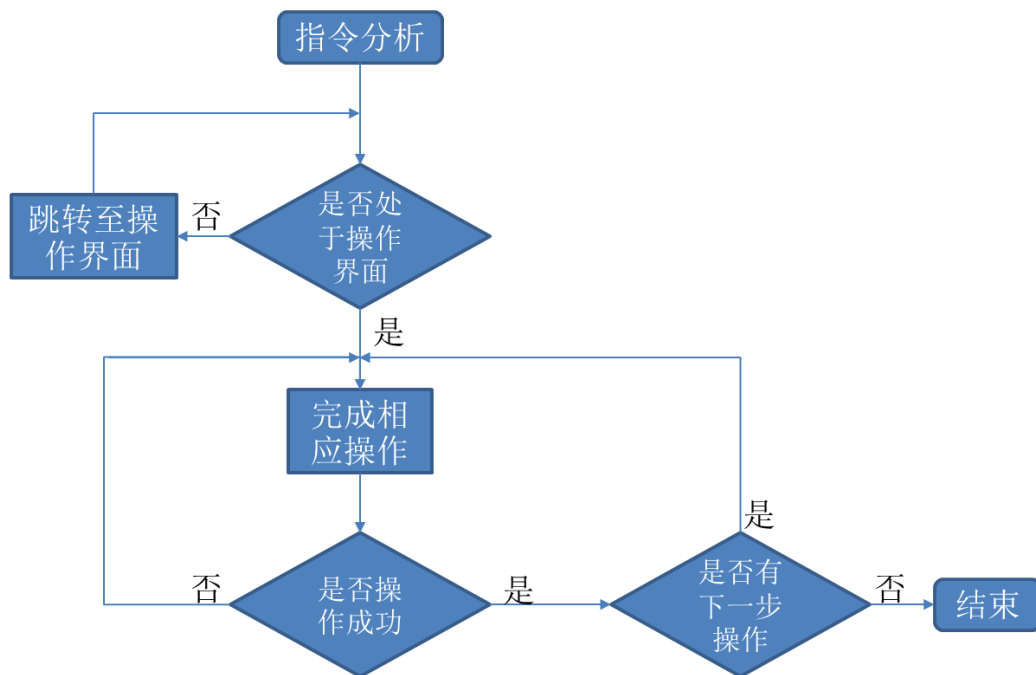


图 2-7 电厂人工监盘操作 DCS 界面流程图

现如今机器人已经广泛应用于工业生产的各个环节之中, 并且机器人非常适合从事流程固定, 重复性高的工作, 同时机器人工作稳定精确, 可以长时间不停机进行工作, 不会疲劳。因此可以采用机器人代替集控运行人员对 DCS 界面进行操作, 以此来减轻监盘操作人员的工作压力和强度, 减少因监盘人员疲劳造成的误操作情况发生。并且机器人的应用, 也有助于提高电厂的智能化水平, 可以提升电厂运行的安全性和生产效率。

## 2.2 电厂集控室监盘操作任务需求分析

电厂的监盘操作对电厂的正常、安全运行非常重要, 从人工监盘操作的模式和操作流程分析出发, 结合现有的技术发展的情况分析, 电厂集控室的运行人员往往都是经过专业的培训, 并且要求运行人员必须熟练掌握设备的运行方式, 清楚了解设备运行状况, 掌握熟练的操作知识和技能, 且具有较强的实际操作能力。机器人和人工智

能技术的发展还不能让机器人具备良好的认知能力,面对复杂的执行任务时,机器人并不能像人一样进行分析和判断。因此课题组抓住电厂“机器代人”的核心需求,并根据技术可行性的要求,设计了一款低成本、稳定、易于扩展的集控室触屏操作机器人,该机器人可以实现电厂集控室 DCS 系统触屏操作功能。随着人工智能和机器人技术的发展,从该系统升级到可行的电厂集控室 DCS 系统监盘操作机器人。根据监盘操作的模式和流程以及使用场景的特点,课题组总结出该机器人需要满足以下几方面的需求并设计相应的模块:

1. 一个能实现触屏操作的执行器:由于项目中屏幕图例按键均比较小,因此项目对机器人点击触摸屏具有较高的精度要求,同时,由于屏幕灵敏度的原因,触摸屏的点击有时未能触发,因此对点击后效果的复查具有重要的意义。

2. 一套能够帮助机器人感知外界信息的视觉系统:为了实现机器人精确点击到屏幕上的图例按键,机器人需要获取屏幕的图像并对它进行处理用来获得所需页面图例坐标,项目中主要涉及页面识别、图例识别和点选效果复查等内容。

3. 一套兼容执行器、视觉系统和符合集控室场地要求的结构:采用一体式的机器人触摸屏结构,可以有效避免因为机器人与屏幕的相对位置的改变,而导致系统失效的情况;显示屏的放置应该方便监督的工作人员快速掌握系统与机械臂的状态;整个系统集成成一个整体,摆放方便,只需要直接摆放好位置、接线,即可使用。

4. 充分考虑系统安全性的设置:为了保证电厂的安全运行,电厂对集控运行操作都有着严格的要求,所以机器人系统不接入 DCS 系统进行操作,保证电厂的信息安全;当机器人工作是还需要考虑人员误触触摸屏的情况,需要加设相应的安全装置;机器人运行时,往往具有较大的动能,需要考虑机器人撞伤工作人员和撞碎触摸屏的情况。

本文在后面提出的触屏操作机器人系统方案将围绕以上的需求来设计相应的模块,使整个机器人系统能够满足所有的要求并实现辅助人工监盘的功能。由于采用了模块化的设计方案,该机器人可以方便的在有相应需求的各个场景进行升级和改造。

## 2.3 机器人总体方案设计

根据 2.1 小节对电厂集控室人工监盘操作 DCS 系统的模式和流程分析,以及 2.2 小节中提出的任务需求,本文设计了一个触屏操作机器人总体方案,其将包含六大功能模块,机器人系统整体设计如图 2-8 所示。

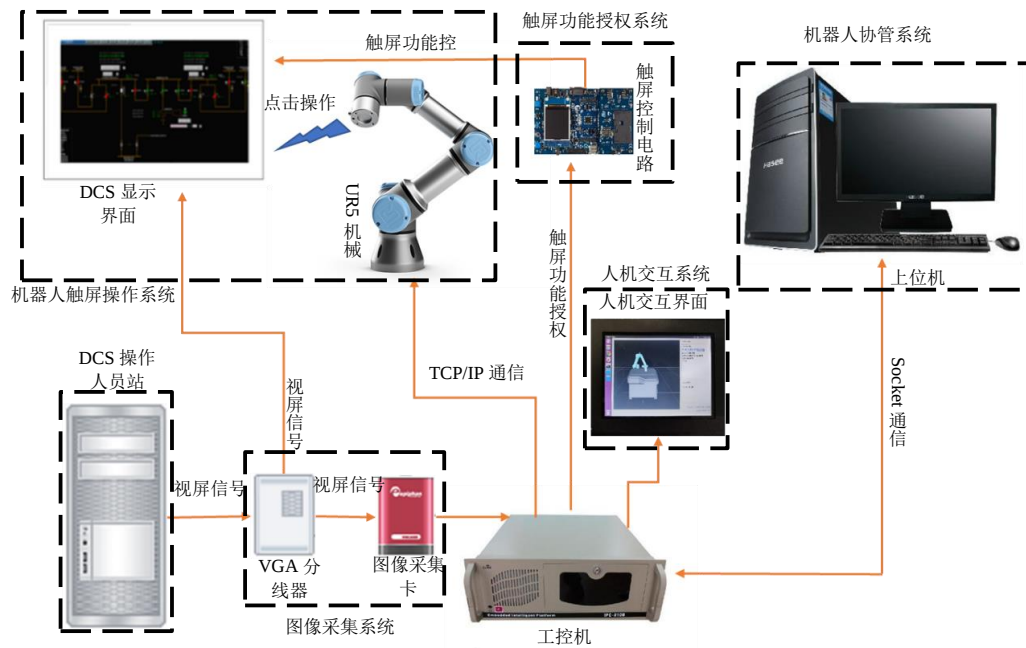


图 2-8 触屏操作机器人系统结构设计图

对于智能触屏机器人系统，安全性是重要的考虑因素之一。一方面集控室人员来往众多，机器人工作区域与运行人员工作区域有部分重合的地方，而集控室监盘结果影响着整个系统的稳定运行，操作稍有不慎，轻则损坏设备，重则造成严重的人员和财产损失。因此，机器人系统设计时，需要充分考虑系统安全性。另一方面，DCS 汇集了整个电厂生产的所有关键数据并对系统的运行进行远程控制。如果把 DCS 系统器件完全开放，允许智能算法直接干预系统，容易造成失控。为此，我们选择通过间接介入系统的方案，即模仿人类对 DCS 系统进行操作，仅提供与人类相同的操作权限，避免影响 DCS 系统的正常运行。此外，还应保留监盘人员对 DCS 与机器人充分的干预能力。当机器人运行错误时，工作人员可以及时干预机器人工作，并正常操作 DCS。人机交互系统主要是设计了人机交互界面，对机器人任务、状态进行三维图形和文字信息显示并与监盘人员进行交互<sup>[31]</sup>。

基于以上考虑，本文设计的触屏操作机器人包含六大功能模块，分别为机器人协管系统、机器人触屏操作系统、图像采集系统、人机交互系统、触屏功能授权系统、操作人员站组成。机器人协管系统是触屏操作机器人的总控制台，监盘人员通过协管系统向机器人下达操作指令，机器人具体执行操作指令的逻辑票，同时机器人将当前的状态、操作的步骤等信息实时反馈给协管系统，以方便监盘人员及时、清晰的了解和掌握机器人的工作情况<sup>[32-34]</sup>。机器人触屏操作系统实现的功能是机器人能够精准的点击 DCS 显示界面的目标图例，同时能够对机器人的速度、加速度、力等进行控制，使机器人能够与人协同工作，不会对现场的工作人员和设备造成伤害。图像采集系统

需要能够简单、高效地从 DCS 系统中获取清晰、完整的图像信息用于后续的图像处理，同时不能对 DCS 系统进行信息回传，不影响 DCS 系统的运行。触屏功能授权系统的设置是为了防止在机器人处于待机状态时有人员误触 DCS 显示界面图标按键。DCS 操作人员站是直接接入 DCS 的服务器操作端。传统监盘操作时，操作人员就是通过鼠标在操作端界面上进行点击操作，实现对系统的控制。DCS 系统内部对人为操作有严密的逻辑监控，而本方案中，机器人采用相同的图像信息与操作权限，完成监盘操作，这样就能利用 DCS 内原有的保护逻辑对机器人操作实施监控，保证安全。

## 2.4 机器人硬件选型及设计

### 2.4.1 整体硬件结构设计

为了实现机器人自动操作 DCS 系统界面的目的，在触屏操作机器人的整体结构设计上，机器人采用机械臂与触摸显示屏形成一体式机构的方案，与机械臂和屏幕分离的方案相比，这样的设计可以避免因为设备安装、人为碰撞等原因使得机械臂与屏幕的相对位置的改变，而导致点击精度下降乃至失效的情况。触摸屏设计方面采用双显示屏的方案：机器人通过点击操作 DCS 显示界面触摸屏，用于模仿人类进行 DCS 的监盘操作；而人机交互界面触摸屏设置在机器人正前方右侧，用于显示机器人的当前状态，便于工作人员掌握机器人运行情况并及时做出干预操作。这样的设置使机器人与工作人员的工作空间区分开，不相干涉，也保证了工作人员操作时的安全性。而机械臂采用柔性控制，当检测受到过大力矩时，机械臂将暂停运动，避免与操作人员发生碰撞，保证现场监盘人员的安全。同时，外观需要符合电厂集控室风格和实际场地的空间等限制，外观尽量避免对现场工作人员造成压迫感或不安全感。触屏操作机器人整体外观设计如图 2-10 所示。



图 2-9 电厂集控室机器人实际布置场地

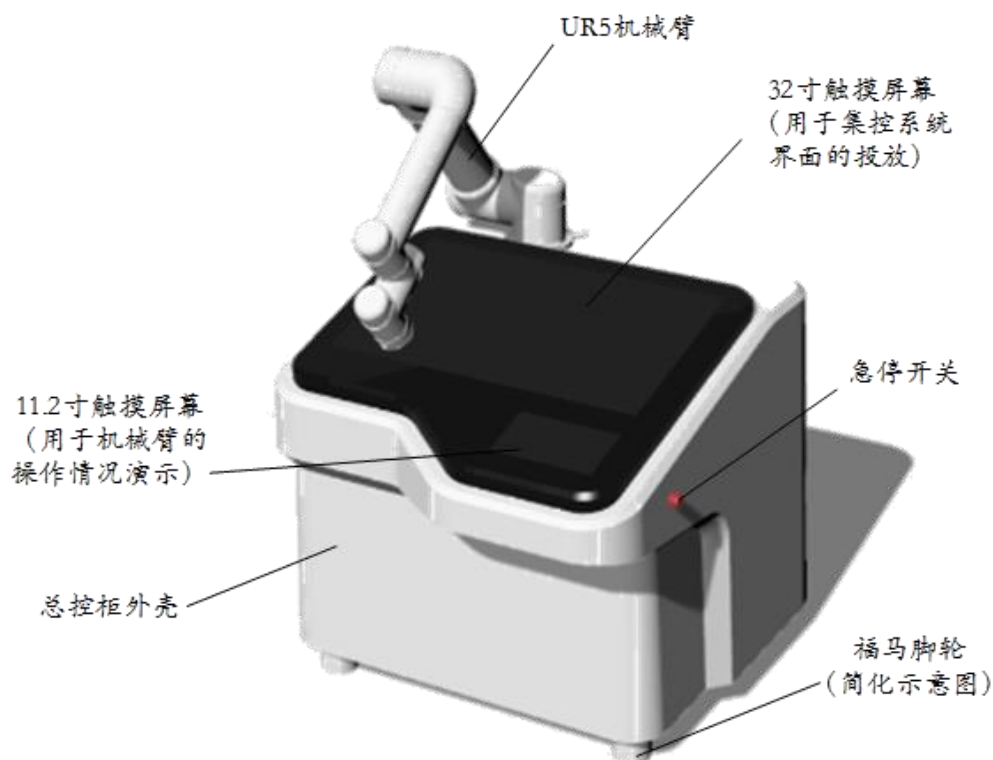


图 2-10 触屏操作机器人外观设计图

在结构上，需要重点设计两个部分：一是要集中放置工控机，机械臂等控制器等设备。二是需要安装承载机械臂、触摸屏等。结构的设计工作主要包括以下几方面，根据 ABS 材料性质，确定好已设计外壳的厚度；在尽可能保留外观设计效果的情况下，分拆外壳，使其能用于安装及装机调试，同时散热性能良好；机械臂于触摸屏都较重，机械臂约为 18.4kg,触摸屏约为 12kg，同时机械臂运动会对基座产生作用力，因此希望底座具有一定的质量，也需要考虑增加内部金属支撑结构，同时考虑安放工控机控制器的位置。

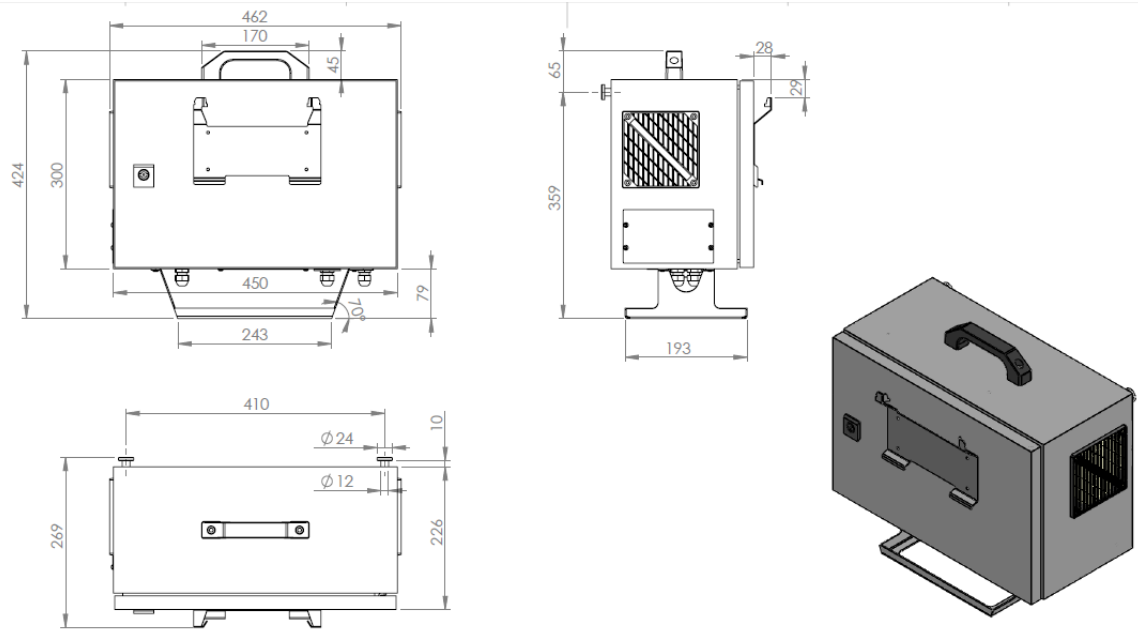


图 2-11 UR5 机械臂控制柜尺寸

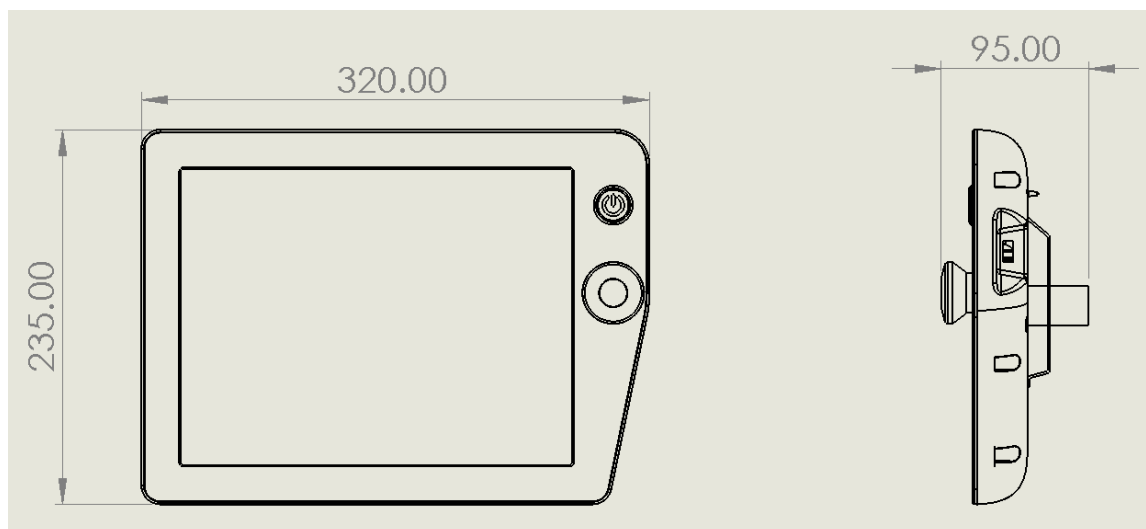


图 2-12 UR5 机械臂示教器尺寸



图 2-13 工控机尺寸

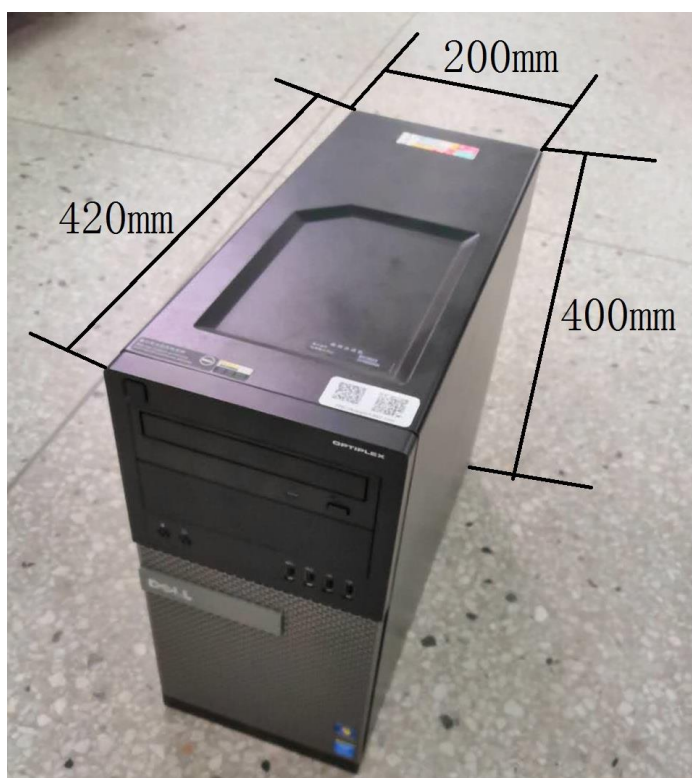


图 2-14 DCS 操作员站服务器尺寸

触屏机器人整个系统为一体式的结构设计，摆放方便，只需要直接摆好位置、接线，即可使用。这也方便集控室进行灵活布局。市面上常见的手眼触屏方案分触屏和机械臂两部分，放置的位置必须比较固定。若改变位置后，系统还需要进行调试，才能再次进入工作。而在实际使用过程中，系统将放置在集控室内，与监控人员的活动空间存在交集。机械臂与显示屏的相对位置可能因为人为碰撞、或挪移等而发生改变。但如果把机械臂固定在集控室地面，也将引起大的工作量，特别是像电厂这类敏感的

企业，对集控室进行环境改造需要经过多重风险的评估，耗费巨大。而本方案把机械臂与触摸屏结合，则可以有效避免这种情况。

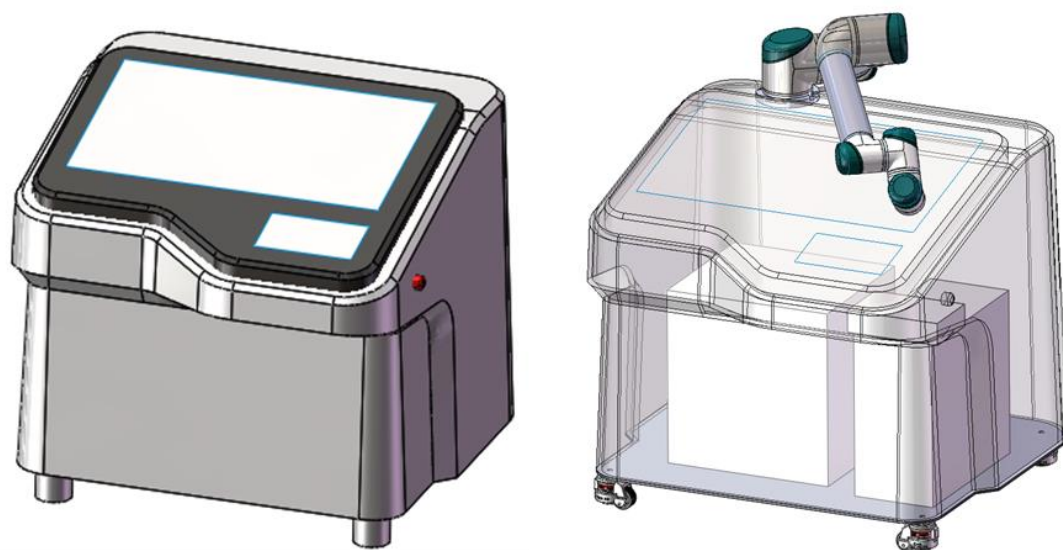


图 2-15 触屏操作机器人整体结构设计图

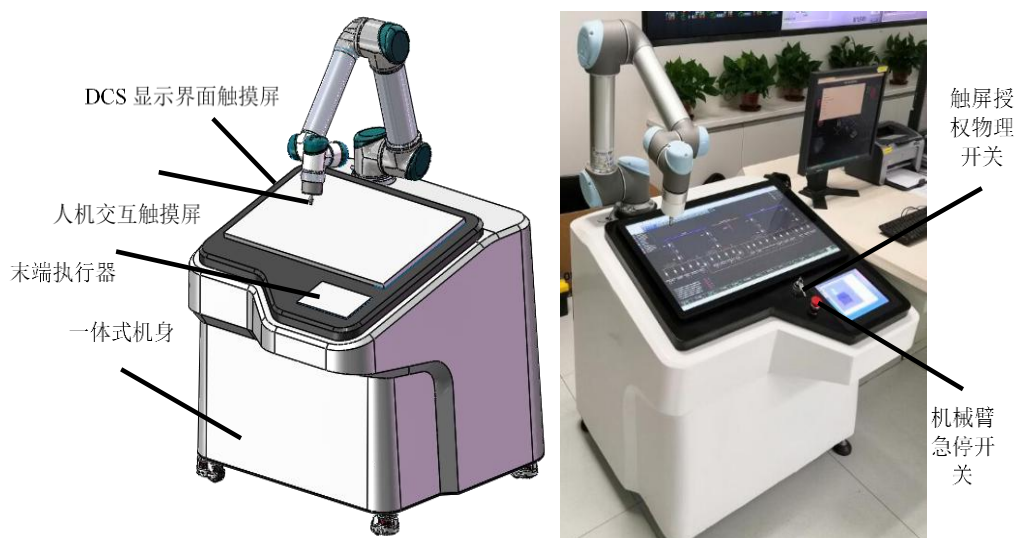


图 2-16 一体式结构的触屏操作机器人

## 2.4.2 触屏操作系统硬件设计

机械臂是系统的一大核心，因此机械臂选型极为重要。由于项目计划装备在电厂总控室内，运行时，机械臂工作区域极有可能与人的工作区域存在交叠。在考虑机械臂的工作范围以及操作精度的同时，更考虑环境工作人员的安全，使用了具有人机交互功能的 UR5 机械臂，它是全球知名的人机交互机械臂，具有良好的关节力矩的检测，当机械臂受到较大的阻力或碰撞，即会报警停机，充分保障了周边工作人员的安全。同时，机器人的工作精度均达到 0.1mm，为进行精确地点击操作提供了高精度

的操作执行平台。最后，机械臂需要设计一个能够精确点击且不会对屏幕点击造成伤害的弹性触摸笔末端。

UR5 机器人是 Universal Robots 公司开发的灵活、轻型的六关节工业机器人，它一般包含一套机械手臂，机械臂控制箱、软件系统和可视化编程控制界面，如图 2-17 所示，客户可以通过使用 UR5 机器人自带的图形化编程界面编程，也可以通过使用 ROS 对机器人进行编程来控制机器人完成需要的任务<sup>[35]</sup>。UR5 型机器人工作灵活，可以稳定地完成常见的如抓取和放置等工作，可以安全的与人一起工作，且不需要安装防护围栏。同时它比大型工业机器人工作时声音更小，对人的干扰很小，而且功耗低。UR5 机器人重量也轻，可以即插即用，所以可以灵活的在生产区域内移动和安置，可以满足在不同的地点部署和工作。

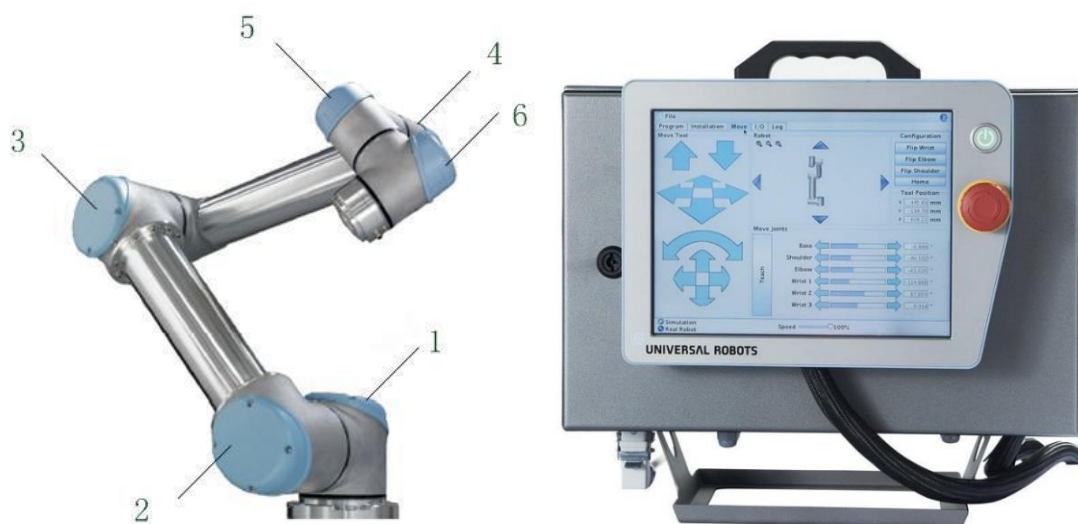


图 2-17 UR5 型六关节工业机器人

UR5 型机器人由 6 个关节和挤压铝管组成，所有关节均为转动关节。关节 1 到 6 分别命名为：机座，肩部，肘部，手腕 1，手腕 2 和手腕 3。其中机座可以用来确定机器人可以在其工作范围内(图)任意移动。

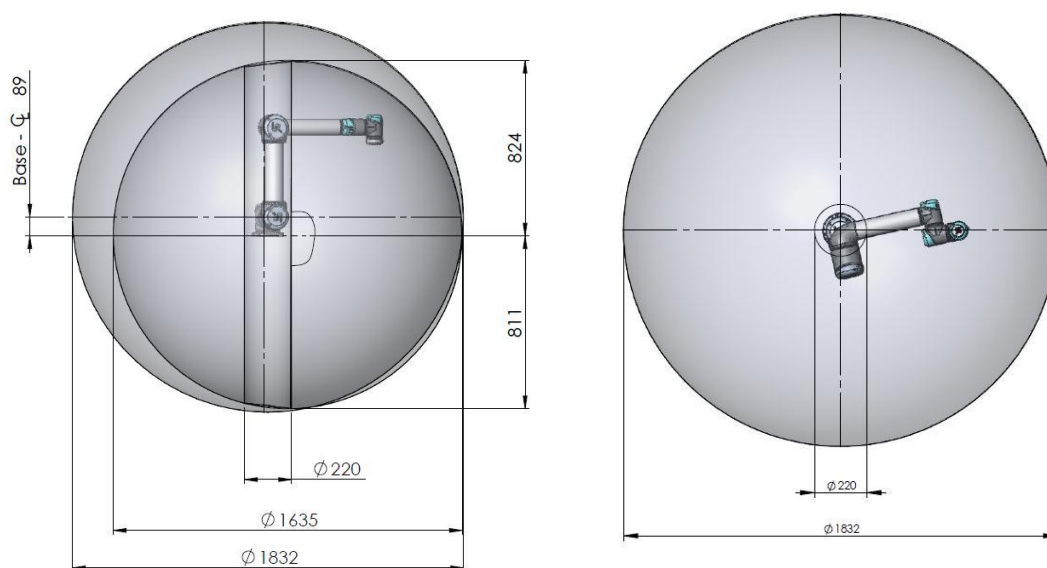


图 2-18 UR5 机器人的运动范围

UR5 机器人的参数如表 2-1 所示：

表 2-1 UR5 型机器人的具体参数

| 项目   | 参数                  |
|------|---------------------|
| 自重   | 18.4Kg              |
| 负载重量 | 5Kg                 |
| 工作范围 | 850mm               |
| 旋转   | +/-360°             |
| 最大速度 | 180°/s              |
| 重复精度 | +/-0.1mm            |
| 自由度  | 6 旋转关节              |
| 安装占地 | 0.149m <sup>2</sup> |
| 温度范围 | 0-50℃               |

机器人触屏操作系统实现的功能是机器人能够精准的点击 DCS 显示界面的目标图例，同时能够对机器人的速度、加速度、力等进行控制，使机器人能够与人协同工作，不会对现场的工作人员和设备造成伤害。主要由 DCS 界面触摸显示屏、UR5 机械臂和机械臂急停按钮组成。触摸屏可以显示和点击 DCS 页面，使用触摸屏操作的方式，不接入总控系统进行干预，保证了 DCS 系统的安全。采用六自由度机械臂，以保证机械臂可以足够灵活地实现主屏幕范围内的准确点击，机器人的重复精度达到 0.1 mm，保证了点击操作的精确性；同时对关节力矩进行实时检测，当机械臂受到较大的阻力或碰撞，即会报警停机，充分保障了周边工作人员的安全。另外，设置了急停开关，当出现意外情况，需要机械臂立即停止运动时，拍下按钮；向右旋转按钮，即可解除急停状态，机械臂继续运动。

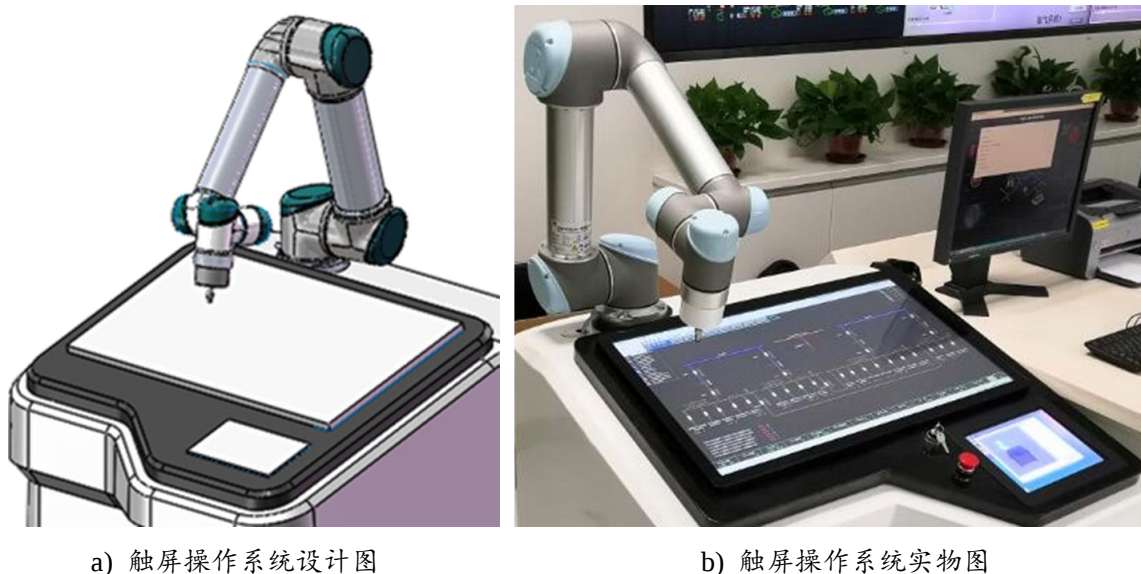


图 2-19 触屏操作系统设计图

### 2.4.3 触屏功能控制系统硬件设计

为了防止在机器人处于待机状态时有人误触 DCS 显示界面图标按键，项目设计了触屏功能授权控制系统，可以在程序中对 DCS 显示界面的触摸功能进行开断。同时为了防止人为点击触摸屏造成对机器人运行的干预，项目组在机器人上配备了物理开关用来控制 DCS 显示界面触屏功能的开断。只有当机器人执行操作指令或者按下物理开关时机器人 DCS 显示界面的触屏功能才有效，而在其它时间机器人 DCS 显示界面的触摸功能都处于无效状态，该触屏功能授权系统可以对触摸屏的触屏功能进行有效的管控，防止智能操作机器人工作时的误触情况发生，保证了监盘系统的安全运行。

触摸屏的基本工作原理是触摸检测器检测手指或其他物体触摸安装在显示器前端的触摸屏的位置，并计算出该位置的坐标，然后通过 usb 接口送到主机，从而确定输入的信息。根据该原理，本文在设计的控制电路中，主要是通过两种方式对 DCS 显示界面触摸屏的触摸功能进行控制。一种是使用物理开关，通过短路的方式，绕过继电器使触摸屏和 DCS 操作员站主机连通，从而控制触摸屏触摸功能的开启和关闭。另一种方式是通过工控机程序发送脉冲信号控制继电器开断，当程序发送高电平时，继电器开启，触摸屏与操作员站主机连通，触摸功能有效，当程序运行终止后，继电器断开，触摸屏与操作员站主机断开，触摸功能失效。

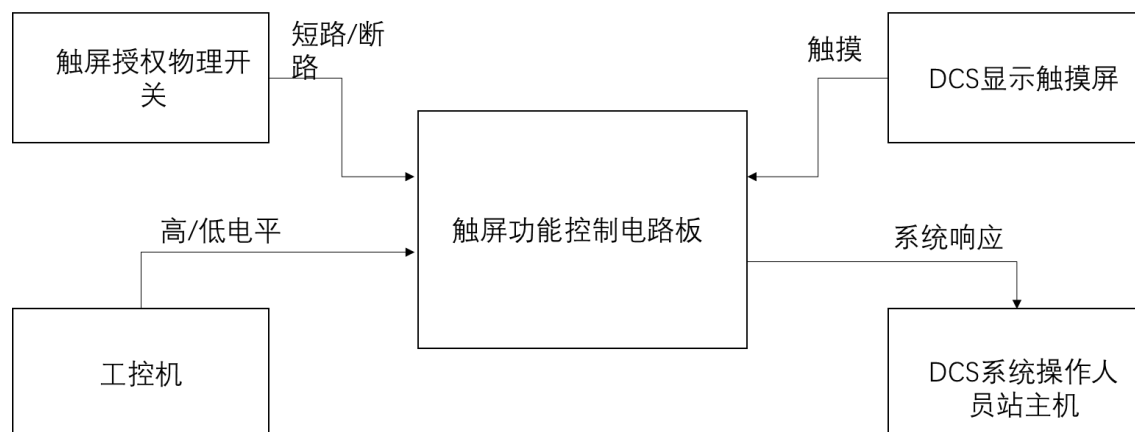


图 2-20 触摸功能控制原理图

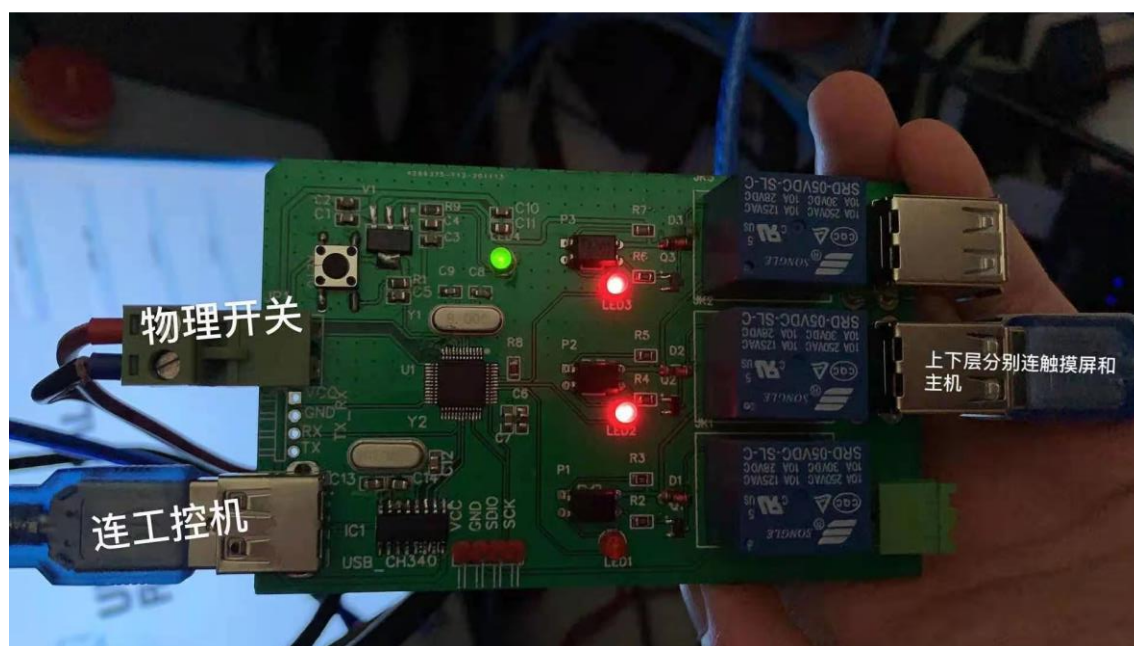


图 2-21 触摸功能控制电路板实物图

#### 2.4.4 图像采集系统设计

图像采集系统的设计要求不能对 DCS 系统进信息回传，同时图像采集的图像质量要清晰稳定，且受外界环境影响较小。本论文设计的图像采集系统主要由分线器、视屏采集卡等组成。通过将 VGA 视频采集卡接入 DCS 操作人员站主机，直接从系统显卡中采集图像，以用于进行各类图像处理。

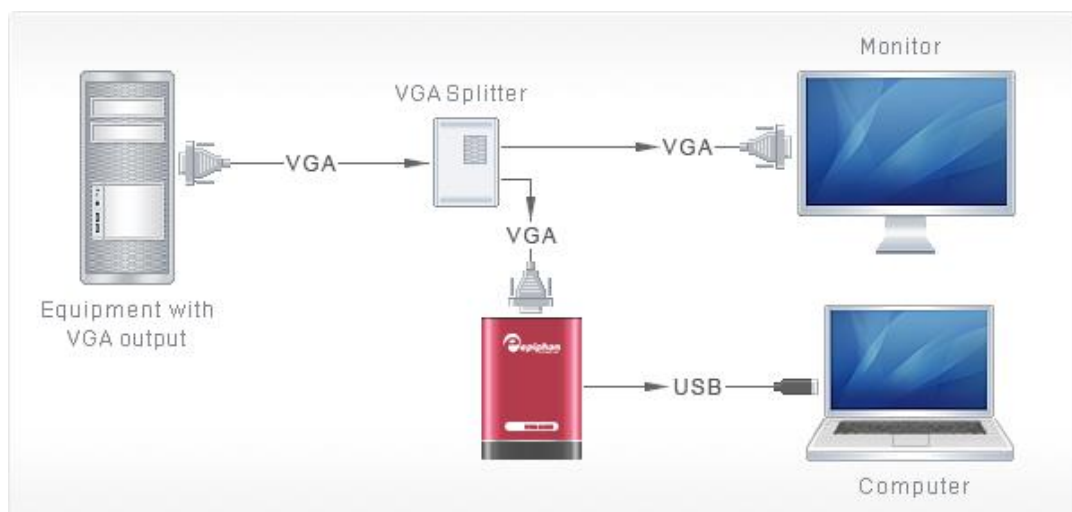


图 2-22 图像采集系统设计

与传统的使用外部摄像头获取图像的方法相比，本文设计的图像采集系统获取图像的方法具如下优点：

- (1) 图像直接从系统中采集，不受环境光照、摄像头的传感器误差的影响，图像失真少，更加清晰；
- (2) 确保获取的图像更加完整，不受摄像头视角大小、安装距离远近的限制；
- (3) 只获取图像信息，不会对 DCS 系统进行信息回传，保障了系统的安全。

#### 2.4.5 触屏操作机器人整机硬件

该机器人主体由触摸屏、UR5 机械臂、触屏开关、急停开关等核心设备和其他辅助设备组成，如图 2-23 所示，图中标记出了主要设备所在位置。

表 2-2 触屏机器人外观注释

| 序号  | 部件名称           |
|-----|----------------|
| (1) | UR5 机械臂        |
| (2) | 触摸屏            |
| (3) | 触摸屏触摸授权控制开关    |
| (4) | 机械臂急停开关        |
| (5) | 工控机触摸屏（软件交互界面） |



图 2-23 触屏机器人

## 2.5 本章小结

本章详细介绍了电厂集控室人工监盘操作的模式和流程，并总结出人工监盘的操作流程图，并明确了项目的核心需求是采用机器人替代人工对 DCS 系统进行触屏操作。针对电厂集控室特殊环境和机器人辅助监盘的任务总结了机器人系统设计的主要功能模块，首先是需要一个能实现触屏操作的执行器，一套能够帮助机器人感知外界信息的视觉系统，一套兼容执行器、视觉系统和符合集控室场地要求的结构，充分考虑系统安全性的安全设置。提出的适用于电厂集控室触屏操作机器人系统包括了机器人协管系统、触屏操作系统、图像采集系统、人机交互系统、触屏控制系统、操作人员站六大功能模块。并分析了机器人各硬件模块的尺寸和安装位置关系，给出了触屏操作机器人整机外形设计效果图和实物效果图。设计的触屏操作机器人的总体方案充分考虑了电厂生产的安全性和方案的实用性，并根据电厂工作人员的要求设计了机器人的各个功能模块，使机器人具备了接收操作指令、执行触屏操作、工作状态实时可视化显示、触屏功能控制、力控制、图像采集和处理等功能。

## 第3章 触屏操作机器人视觉控制方法研究

### 3.1 基于模板匹配的点击目标识别

模板匹配是在图像上识别与定位与模板图像相匹配的目标的一种目标识别方法。由于它原理比较简单，使用也比价简单方便，所以在物体识别和定位方面得到了大量的应用。它主要适用于当计算能力有限，但模板复杂且运算耗时的目标识别任务中<sup>[36]</sup>。

模板匹配方法的基本原理可以表述为：提供一个物体的参考图像（模板图像）和待检测图像（输入图像），按照一定的度量准则，在像素精度上计算模板图像与待检测图像的相似程度，根据相似程度确定待检测图像中是否存在与模板相匹配的区域，并且找到它们的位置。根据实际需要，有时还需要识别出可能存在的模板旋转或缩放情况。如图 3-1 所示。

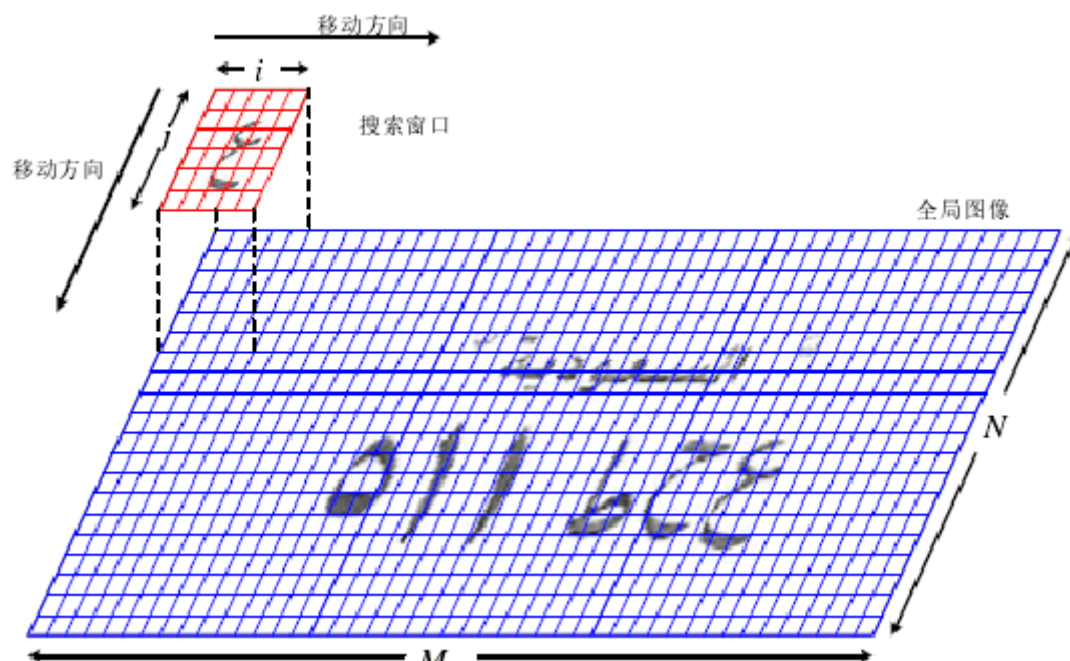


图 3-1 模板匹配原理图

#### 3.1.1 基于灰度值的模板匹配

基于灰度值的模板匹配算法的基本思想是通过某种度量准则计算物体参考图像（模板图像）与待检测图像之间在灰度值信息上的相似度，并根据相似度判断待检测图像上是否存在目标物体，这种匹配方法原理并不复杂且计算量相对较小<sup>[37]</sup>。

在实际应用中，常用相似性度量方法来表征模板图像和目标图像之间的差别，最常用的是模板图像与目标图像之间灰度值差值的平方和（SSD）的方法。设  $f(x,y)$  为  $M \times N$  的目标图像， $t(j,k)$  为  $J \times K$  ( $J \leq M, K \leq N$ ) 的模板图像，则 SSD 定义如下式 (3-1) 所示：

$$S(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [f(x+j, y+k) - t(j, k)]^2 \quad (3-1)$$

其中, (j,k)为模板图像中某点的像素位置坐标, 该像素的灰度值用  $t(j,k)$ 表示。目标图像中的与之对应的像素点坐标为(x+j,y+k), 该像素的灰度值用  $f(x+j,y+k)$ 来表示。

其中, (j,k)为模板图像中某点的像素位置坐标, 该像素的灰度值用  $t(j,k)$ 表示。目标图像中的与之对应的像素点坐标为 (x+j,y+k), 该像素的灰度值用  $f(x+j,y+k)$ 表示。式(3-1)计算在每一子图像  $S(x,y)$ 处的相似性度量值, 并根据  $S(x,y)$ 的值来推测目标图像中是否存在与模板相同或相近的目标。

将式(3-1)展开:

$$S(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [f(x+j, y+k)]^2 - 2 \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} t(j, k) \cdot f(x+j, y+k) + \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [t(j, k)]^2 \quad (3-2)$$

令

$$DS(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [f(x+j, y+k)]^2 \quad (3-3)$$

$$DST(x, y) = 2 \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [t(j, k) \cdot f(x+j, y+k)] \quad (3-4)$$

$$DT(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [t(j, k)]^2 \quad (3-5)$$

$DS(x,y)$ 与  $DT(x,y)$ 是目标图像与模板图像重合部分的各自的强度值。 $DS(x,y)$ 随着像素位置(x,y)的变化而变化, 但是变化较小。 $DT(x,y)$ 不随像素位置变化而变化, 在运算过程中为一常数值。 $DST(x,y)$ 为待搜索图像与模板图像对应区域互相关系数, 与图像像素位置(x,y)有关。当完全匹配时  $DST(x,y)$ 取得最大值。

根据上面的推论, 如果  $DS(x,y)$ 在运算过程中也为一常数值, 那么仅仅依靠  $DST(x,y)$ 的值便能完成匹配过程。但是这种假设会带来误差, 甚至可能导致无法匹配。归一化相关可以有效解决由于  $DS(x,y)$ 变化带来的不确定性因素, 其定义为式(3-6)形式。

$$R(x, y) = \frac{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} t(j, k) \cdot f(x+j, y+k)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [f(x+j, y+k)]} \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} [t(j, k)]^2}} \quad (3-6)$$

归一化互相关系数  $R(x,y)$ 的值域范围为[-1,1], 当  $R(x,y)=\pm 1$  时, 说明此时在目标图像中找到与模板图像完全匹配的实例。通常,  $R(x,y)$ 的绝对值越接近于 1 说明模板图像与目标图像越相近;  $R(x,y)$ 的绝对值接近于 0 则说明模板图像与模板图像越不匹配。

如图 3-2 所示, 在基于灰度值的图像匹配过程中, 目标图像  $f(x,y)$ 与模板图像  $t(k,l)$ 坐标系分别用  $O-xy$  与  $o-jk$  表示。在  $f(x,y)$ 中每一个像素位置(x,y)处, 通过式(3-6)都有一个  $R(x,y)$ 与之对应。随着模板  $t(j,k)$ 在图像中滑动并计算所有  $R(x,y)$ 的值。在  $R(x,y)$

最大值处便可得到匹配图像。

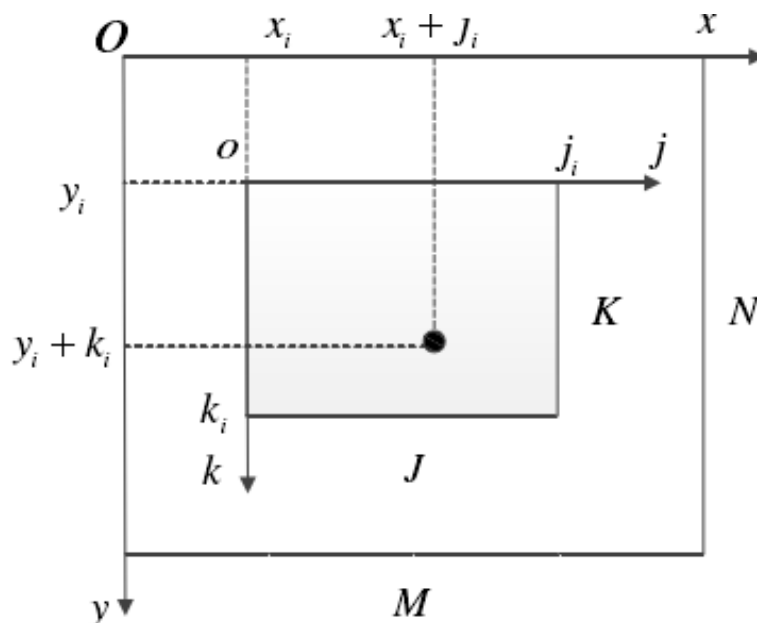


图 3-2 基于灰度值的模板匹配示意图

在该机器人系统中，本文设计了如图 3-3 所示的模板图像，需要在目标图像中找到与这些目标模板相匹配的区域，在程序中  $R(x,y)$  被设定的阈值为 0.8，当在目标图像中找到与模板图像的相似性大于或等于 0.8 时，则认为该区域与模板图像相匹配。



图 3-3 匹配模板示例图

### 3.1.2 触屏目标图标位置计算

经过上述模板匹配环节，触屏目标图标在图像中识别出来，但是为了完成机器人触屏或定位的任务，还需要确定目标图标在图像中的位置，并转化到机器人基础坐标系中，用于机器人定位或触屏。触屏目标图标求取的一般方法是：首先求取图像的矩特征，根据图像矩计算图标的中心坐标。但是这样的方法存在一定的计算误差，本文采取一种简单有效的像素坐标获取方法，该方法可以有效解决像素坐标获取的误差。由于 DCS 操作界面的图例按钮固定且特征明显，所以可以采用人工的方式利用画图

软件将所需的模板的四个顶点的坐标读取出来，图像  $f(x,y)$  分辨率为  $1920 \times 1080$ ，最后通过并与模板文件关联起来，则目标图标的中心的像素位置坐标可以由式(3-7)计算：

$$\bar{x} = \frac{(x_1+x_2)}{2}, \bar{y} = \frac{(y_1+y_2)}{2} \quad (3-7)$$

```
dict_template={'3806_diesel_green':[592,620,1230,1268],
'3806_diesel_red':[592,620,1230,1268],
'3806_reset':[694,716,1111,1266],
'3806_confirm':[694,716,1318,1365],
'Page_3806':[74,115,5,307],
'Menu_button':[77,105,311,382],
'3806_diesel_window':[42,125,4,228],
'3806_diesel_window_P1_start':[227,251,25,100],
'3806_diesel_window_P2_stop':[227,251,132,207],
'3806_diesel_window_start_permission_green':[128,147,18,73],
'3806_diesel_window_start_permission_gray':[128,147,18,73],
'3806_diesel_window_stop_permission_green':[151,169,18,73],
# '3806_diesel_window_p1_yunxing':[252,271,38,84],
# '3806_diesel_window_p2_tingzhi':[253,270,144,190],
```

图 3-4 模板图像与像素坐标关联

## 3.2 触屏操作机器人视觉控制方法

### 3.2.1 触屏机械臂坐标系视觉目标定位

在上一小节中我们通过模板匹配算法已经获得触屏目标图标在 DCS 操作界面图像中的像素坐标，为了实现机器自动监盘的功能，需要通过坐标变换将触屏目标图标二维图像像素坐标转换到基于机械臂基座坐标系下的三维坐标，进而实现机械臂笛卡尔空间轨迹规划，完成对监控系统界面的智能、精确操作。

对采集的 DCS 界面图像经过模板匹配后求得的是触屏目标图标的二维像素坐标。该像素坐标系  $uov$  是一个二维直角坐标系，原点  $O$  位于 DCS 显示界面图像的左上角， $u$  轴、 $v$  轴分别与像面的两边平行，像素坐标系中坐标轴的单位是像素（整数）<sup>[38]</sup>。而对机械臂做笛卡尔空间轨迹规划需要在机械臂坐标系中进行。经过图像处理获得的坐标不能直接用于对机械臂进行笛卡尔空间轨迹规划，从而无法控制机械臂运动到对应位置，还需要将其转换为基于机械臂坐标系下的三维坐标，也就是需要求得待点击图例按钮在图像坐标系到机械臂基座坐标系的映射<sup>[39-41]</sup>，从而实现机械臂笛卡尔空间的轨迹规划。该坐标变换过程分为以下两步。

由于像素坐标不利于坐标变换，首先将经过图像处理获得的像素坐标变换为 DCS 显示界面坐标系  $xoy$  下的三维直角坐标。DCS 显示界面坐标系单位通常为毫米（mm），该坐标系原点设置于显示界面屏幕的左上角点上， $x$ 、 $y$  轴分别与像素坐标

系的  $u$ 、 $v$  轴平行。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

其中,  $dx$ 、 $dy$  分别为像素在  $x$ 、 $y$  轴方向上的物理尺寸,  $(u,v,0)$  为 DCS 显示界面图像中的待点击点的像素坐标, 为了便于计算, 我们将像素坐标增加一维, 且这一维取值始终为 0。  $(x,y,0)$  为 DCS 显示界面坐标系下待点击点的三维直角坐标。

然后, 为了获得基于机械臂基座坐标系下的三维直角坐标, 还需要对上面获得的 DCS 显示界面下的待点击点的三维直角坐标做以下的坐标变换, 可简化为如图 3-5 所示。

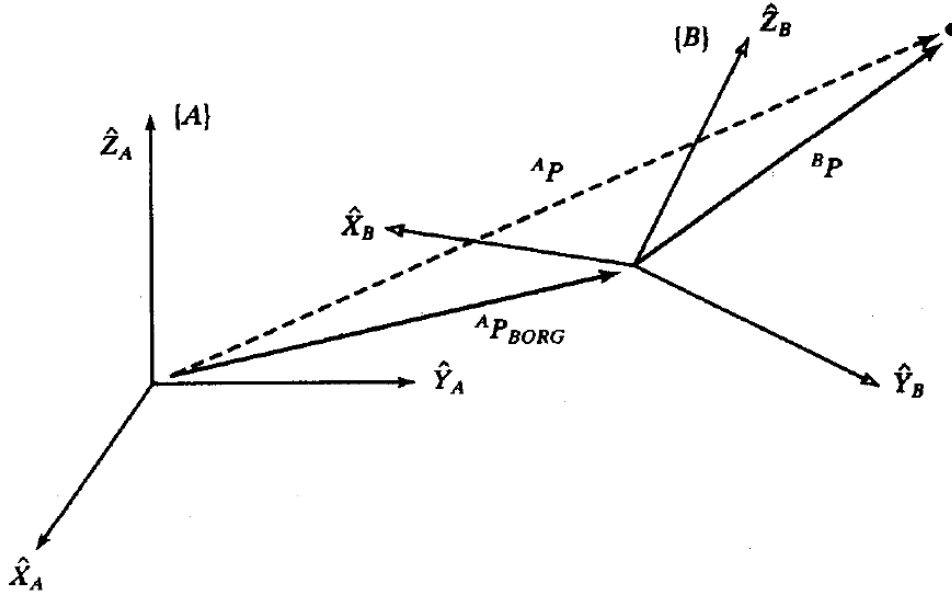


图 3-5 DCS 显示界面坐标系到机械臂基座坐标系坐标变换

上图中  $\{A\}$  为机械臂基座坐标系,  $\{B\}$  为 DCS 显示界面坐标系,  ${}^B P$  表示 DCS 显示界面坐标系中的任意一点。首先将  ${}^B P$  变换到一个中间坐标系, 这个坐标系和  $\{A\}$  的姿态相同、原定和  $\{B\}$  的原点重合。左乘旋转矩阵, 然后加上原点平移, 就得到:

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (3-10)$$

上式表示了从将一个矢量描述从 DCS 显示界面坐标系变换到机械臂基座坐标系矢量的一般变换映射。原点平移和旋转矩阵可以用下式表示:

$${}^A P_{BORG} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$${}^A_B R(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha) R_Y(\beta) R_X(\gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix}$$

上式中  $\gamma$  定义为回转角,  $\beta$  是俯仰角,  $\alpha$  是偏转角,  $ca$  是  $\cos\alpha$  的简写,  $sa$  是  $\sin\alpha$  的简写。

### 3.2.2 基于位置的机械臂视觉控制

本文设计的触屏操作机器人通过图像采集卡从 DCS 操作人员站获得 DCS 操作界面的图像后, 采用模板匹配算法获得待操作点基于显示界面坐标系下的像素坐标, 为了获得待操作点在机械臂基座坐标系下的三维坐标, 需要对机器人进行标定, 对获取的模型参数进行解算, 求取转换矩阵, 通过坐标转换实现对待操作点的定位<sup>[42]</sup>。获得触屏目标图标中心点基于机械臂基座坐标系坐标后, 就可以在笛卡尔空对 UR5 机械臂进行直线轨迹规划了, 目的是让机械臂的末端通过规划的轨迹从当前位置到达操作点所在位置, 从而实现稳定、精准点击监控系统页面图标, 从而完成自动监盘功能。

对于串联式多关节机械臂, 笛卡尔空间轨迹规划是通过对机器人末端的变量进行控制, 根据获得目标点三维位置控制机器人的关节或末端达到期望的位置。如图 3-6 所示, 机械臂末端位置给定值与当前值比较得到的误差作为位置控制控制器的输入量, 经过位置控制器的运算后, 其输出作为末端速度控制的给定值。经过速度控制器的运算后, 其输出作为末端速度控制的给定值。经过速度控制器的运算后, 其输出作为末端速度控制的给定值。

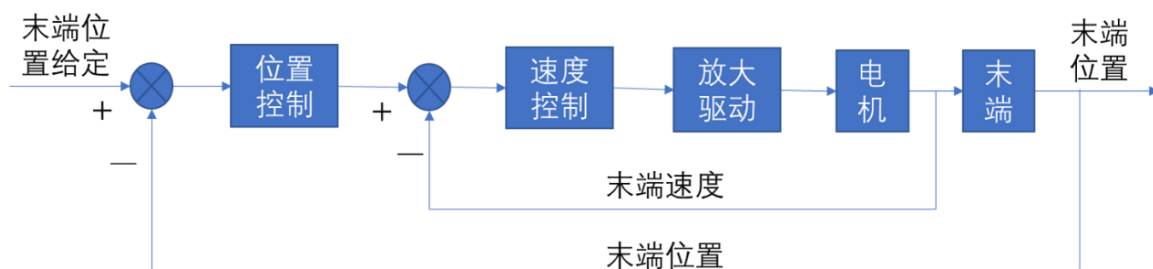


图 3-6 基于位置的视觉控制系统结构

下文通过机器人执行开启柴油发动机操作指令的 UML 状态图来举例说明机械臂实时规划算法的实现过程,如图 3-7 所示。



图 3-7 触屏操作机器人开启柴油发动机 UML 状态图

如上图所示,首先机器人检测当前是否接收到机器人协管系统发出的操作确认指令,机器人如果接收到操作确认指令,则机器人等待接收协管系统发送操作指令。若

机器人没有接收到操作确认指令，机器人则不能接收到协管系统发送的操作指令，并且机器人保持在初始位置；然后当机器人接收到开启柴油发动机操作指令后，先判断柴油发动机是否开启。若开启，则向协管系统反馈柴油发动机已开启，并保持机械臂在初始位置。若柴油发动机关闭，机器人通过当前界面图像信息，实时分析获得当前所在的页面，并通过点击跳转至开启柴油发动机目标页面，再根据设定的开启柴油机操作逻辑进行对应的运行状态分析和点击操作；最后机械臂回到初始位置，机器人进入待机状态。

在以上机械臂的实时轨迹规划算法中，机器人只有在接收到机器人协管系统发送的机器人操作确认指令后，才会接收操作指令执行相应的操作，该设置保证了机器人的安全运行，可以避免机器人的误操作。机器人可以通过图像处理算法实时获得 DCS 显示界面的信息，机械臂实时轨迹规划算法可以根据这些信息实时、灵活的规划机械臂的运动轨迹，从而实现辅助人工监盘的功能，并且当界面识别错误时，机械臂会自动回到初始位置，这有利于避免机械臂误操作和便于下一个操作指令的执行。

### 3.3 本章小结

本章主要介绍触屏操作机器人视觉控制方面的内容，触屏操作机器人能够像人那样自主执行监盘触屏操作命令，需要依靠机器视觉来获取待点击目标图标的位置，从而进行实时轨迹规划控制机械臂运动到目标位置执行触屏操作。本章介绍了机器人通过模板匹配方法获得 DCS 界面中待点击目标图标的图像像素坐标，为了实现 UR5 机器人的基于位置的实时轨迹规划，需要通过坐标转换获得待点击目标图标基于机械臂机座坐标系下的三维空间坐标。

## 第4章 触屏操作机器人软件设计

### 4.1 软件总体设计

在第二章中详细地介绍了触屏操作机器人整体结构设计和各功能模块的硬件设计。触屏操作机器人作为电厂集控室监盘人员的辅助监盘助手，因此设计的软件需要重点考虑的是保证电厂的生产运行安全，对电厂的 DCS 控制系统影响小，以及工作精度高、稳定、性好。本文设计的软件系统包括上位机控制程序模块、图像处理程序模块、机械臂运动控制程序模块、人机交互界面程序模块。监盘工作人员通过鼠标点击上位机电脑屏幕中的命令窗口即可对机器人下达触屏操作命令，机器人接收到命令后便自动执行触屏操作，并通过人机交互界面实时可视化的显示机器人的操作状态。该软件的总体设计框图如图 4-1 所示。

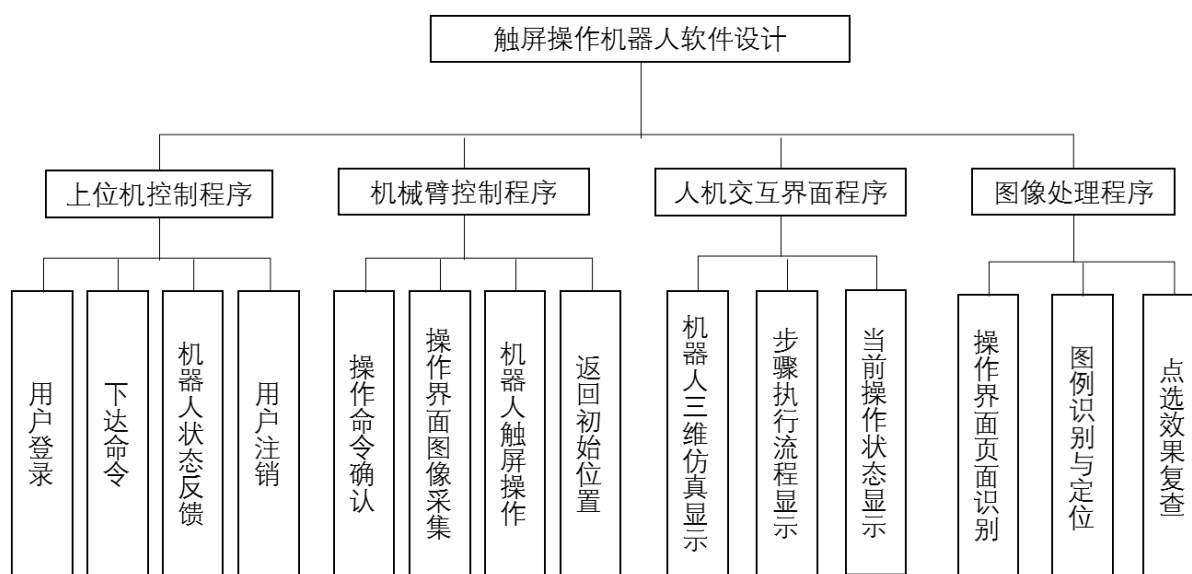


图 4-1 触屏操作机器人软件总体设计框图

### 4.2 上位机控制程序模块设计与实现

触屏机器人与其用于向机器人发送控制命令的上位机之间的通讯是双向的：当上位机需要进行定时任务或监盘人员的特定任务指令后，将向智能监盘机器人发送任务指令；而智能监盘机器人接收任务请求后将会对上位机进行应答，同时在机器人检测到异常情况或者完成任务后，将分别向上位机发送反馈信息。这样的通讯方式可以保证监盘人员可以始终了解到机器人系统的状态。

触屏机器人系统上位机的命令与反馈是通过 Socket 通信来实现的。Socket 是存在于应用层与传输层之间的一个抽象层，实现服务器与客户端的交互连接<sup>[43]</sup>。Socket 通信模型如图 4-2 所示。在该通信中，采用字典编码，字典变量为 String 类型，具体

的变量定义如表 4-1 所示。

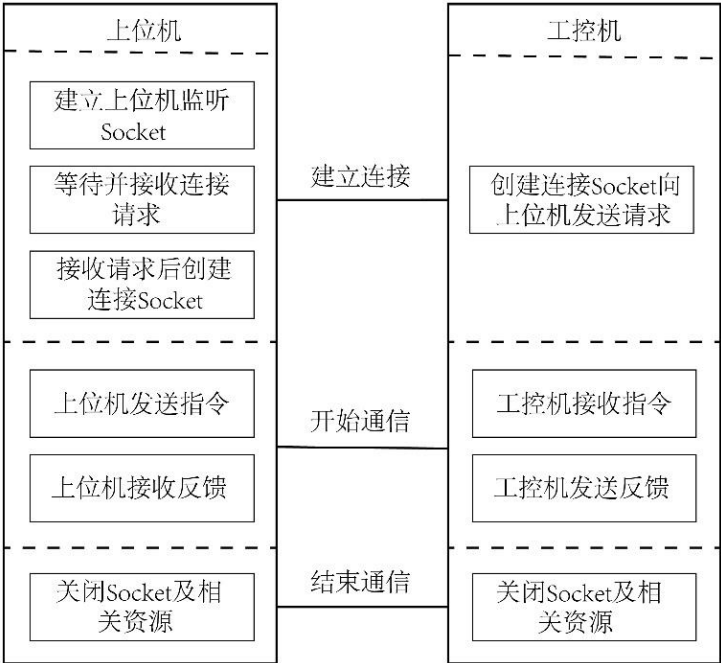


图 4-2 Socket 通信模型

Socket 通信流程主要分为以下三个步骤：

- (1)建立连接。上位机应用程序监听 Socket，工控机应用程序创建连接 Socket，向上位机发送请求，上位机等待并接收连接请求。上位机接收请求后创建连接 Socket。
- (2)开始通信。上位机发送命令，上位机向工控机发送一个数据请求，工控机接收请求，并处理该请求的响应数据；上位机接受工控机反馈，工控机发送一个数据请求，上位机接收请求,并处理该请求的响应数据并将其读取显示到上位机。
- (3)结束通信。关闭上位机与工控机的 Socket 及相关资源，结束通信。

通过这种紧密的通讯连接，保证触屏操作机器人始终处于上位机的监控当中，提高了机器人控制的安全性。

表 4-1 上位机与机器人通信中定义的数据

| 变量名称             | 变量定义     | 状态说明                                                        |
|------------------|----------|-------------------------------------------------------------|
| Task_id          | 任务编号     | 给定任务唯一识别码                                                   |
| device           | 设备编号     | 1 表示上位机端，2 表示机器人平台端                                         |
| function         | 功能编号     | 1 表示操作请求，2 表示数据反馈                                           |
| command          | 操作指令编号   | 0 表示确认机械臂点击操作，1 表示启动柴油发动机，2 表示关闭柴油发动机，3 表示启动备用开关，4 表示关闭备用开关 |
| Command_addition | 附加操作指令编号 | 1 表示每一步操作都需要上位                                              |

|        |        |                                      |
|--------|--------|--------------------------------------|
| state  | 操作状态编号 | 机确认, 0 表示不需要确认<br>0 表示操作失败, 1 表示操作成功 |
| reason | 状态原因   | 用于结果显示                               |



图 4-3 触屏操作机器人上位机系统界面视图

### 4.3 图像处理程序模块设计与实现

触屏机器人的核心工作是严格根据操作票的命令逐条执行。一般的, 执行操作是通过对 DCS 系统当前界面图像进行分析, 根据目标页面的数据与图例情况决定触屏操作机器人的动作策略。然而, DCS 系统操作系统由众多界面组成, 各个界面中采用同一套图例显示方案 (例如采用同样形状的红/绿灯颜色在表示不同电路或气阀的通断情况), 难以直接进行形状匹配判断。简单地采用图例识别与定位的方法可能导致机器人在错误的界面点击, 造成严重的后果。为此, 我们采取分步方法, 实现触屏操作机器人对系统状态的分析。具体的, 算法先通过目标界面特定的界面结构与界面元素, 判断当前界面是否为目标界面。通过建立有限状态机, 确定进行目标界面的跳转方案, 并下达到机械臂进行执行面板跳转的点击操作。当确保转换到目标界面后, 再根据操作票指令进行数据与图例的判断, 并下达机械臂执行具体控制操作。有时由于屏幕灵敏度的原因, 机器人点击可能没有效果, 该机器人还可以对点选效果进行复查, 包括两种, 依靠点击触发图例的改变来判断以及触发后页面跳转关系。而由于 DCS 系统界面相对固定, DCS 页面的识别、页面图例的识别和点选效果复查均基于模板匹

配的方法。

模板匹配法广泛应用于模式识别、计算机视觉和图像处理等领域<sup>[44]</sup>。模板匹配是指用一个比较小的模板图像与目标图像比较，以确定在目标图像中是否存在与模板图像相同或相似的部分。利用相关的模板匹配算法计算模板图像与目标图像的相关值，根据这一相关值的大小就可以判断模板图像与目标图像的匹配度<sup>[45]</sup>。常用的模板匹配相似度测量方法有多种，而本触屏操作机器人采用的是最为常用的归一化相关系数匹配算法。

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (T'(x',y') \cdot I'(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T'(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I'(x+x',y+y')^2}} \quad (4-1)$$

$$T'(x',y') = T(x',y') - 1/(w \cdot h) \cdot \sum_{x'',y''} T(x'',y'') \quad (4-2)$$

$$I'(x+x',y+y') = I(x+x',y+y') - 1/(w \cdot h) \cdot \sum_{x'',y''} I(x+x'',y+y'') \quad (4-3)$$

式中  $R(x,y)$  表示模板与目标图像相似度的大小， $T'(x',y')$  为模板图像与自身均值之差， $I'(x+x',y+y')$  为目标图像与自身均值之差。经过式(4-1)、(4-2)、(4-3)的计算后，目标图像和模板图像都被标准化了，这样可以保证目标图像和模板图像不受光照改变的影响计算结果。计算出的相关系数  $R(x,y)$  被限制在了 -1 到 1 之间，当相关系数的值为 1 或 -1 时，表示两幅图像完全匹配，0 表示两幅图像之间完全不匹配。

$$\begin{cases} R(x,y) \geq 0.8 & \text{匹配} \\ R(x,y) < 0.8 & \text{不匹配} \end{cases} \quad (4-4)$$

在该机器人系统中，设定了阈值 0.8，根据计算相似度结果判断模板图像是否与待检图像匹配。式(4-4)中当相似度  $R$  大于或等于 0.8 时，认为模板与待检图像匹配；当相似度  $R$  小于 0.8 时，则认为模板与待检图像不匹配<sup>[46-47]</sup>。

## 4.4 人机交互界面设计

为实现良好的人机交互，我们设计了一款界面直观、对用户透明的 UI 界面，用户接触本软件后对界面上的功能一目了然，不需要多少的培训就可以方便使用本应用系统。良好的人机交互，可以保证机器人运行情况可以随时快速被监控人员获知，并允许工作人员可以干预、修正机器人的不当操作。

### 4.4.1 环境配置

本用户界面使用的开发软件有 QtCreator、pycharm 等，使用 python 作为编程语言，同时导入第三方库 pyqt5 以帮助更加方便快速的开发<sup>[48-49]</sup>。

### 4.4.2 界面结构布局

本用户界面包含 3 个功能区，分别是机械臂视图区、步骤执行流程区、当前操作状态区，空间结构如下示意图。

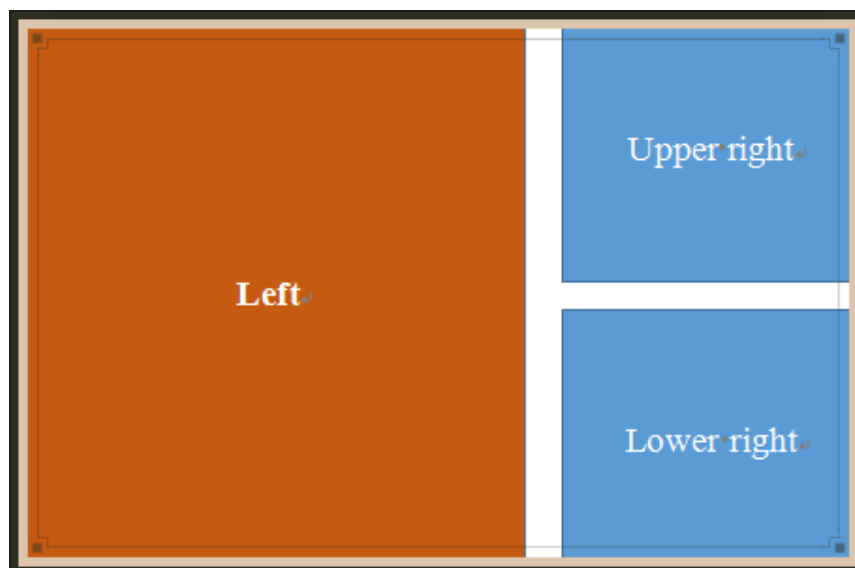


图 4-4 用户界面空间结构图

其中，Left 为机械臂视图区，主要显示机械臂模型实时运动轨迹，是基于 Qwidget 的框架加载，通过创建一个 Qwidget 的工程，在 pro 工程文件中增加 ros 库和头文件，在 Main 文件中初始化 ros，最后在 Widget 控件中调用 Rviz 库相关接口。Upper right 为步骤执行流程区，主要显示总体的执行步骤，采用 TextBrowser 控件。Lower right 为当前操作状态区，主要显示触屏机器人当前的执行步骤，采用 TextBrowser 控件。

### 4.4.3 功能介绍

为了防止误操作，用户界面只有显示功能，取消了传统的由工控机直接控制机器人，改为由上位机下达指令后，工控机接受指令做出相应的操作。下图为界面视图：



图 4-5 人机交互界面视图

各部分功能如下：①功能区为机械臂视图区，跟随实际机械臂运动，显示机械臂模型实时运动姿态，能够让操作者监视机械臂运动轨迹是否正常；②功能区为步骤执行流程区，显示操作的整体流程，蓝色加大字体表示即将执行的流程，能够让操作者直观的把控触屏机器人的操作步骤流程；③功能区为当前操作状态区，该区反馈触屏机器人的实时状态，能够让操作者方便的了解触屏机器人的当前状态，当机器人的操作实时状态与该区状态显示不一致时，可人为干预拍下急停按钮，防止机械臂误操作。

## 4.5 机械臂运动控制程序模块设计

为了保证机器人辅助监盘操作的安全，监盘操作机器人接收到协管系统下达的操作命令后，需要检测命令是否在触屏操作机器人的处理范围内。不在处理范围内的指令不会被机器人执行并且机器人会向协管系统反馈错误和原因。当命令在机器人处理范围内时，机器人会向协管系统请求操作确认指令，任何命令只有当协管系统确认后才能执行，这样的设计使机器人的每一次辅助监盘操作都在工作人员的控制之中，有效保证了电厂的安全运行。另外，为了防止机器人操作命令冲突，即当机器人正在执行某一命令时，协管系统又下达一个操作指令，我们在程序中设计了附加操作指令，该设计可以保证机器人正常执行当前指令，对之后下达的指令不予执行，有效保证了机器人和电厂的运行安全。

在上面的步骤完成后，将机器人通过视频采集卡获取 DCS 系统显示屏的 RGB 图

像通过模板匹配的方法来计算操作界面目标图例坐标,通过将获得坐标信息传入机械臂运动控制程序中,通过坐标转换获得目标图例在机器人基座标系下的三维坐标,之后机器人通过机械臂笛卡尔直线轨迹规划算法控制机械臂末端完成触屏操作。对于上位机下达的每一个操作指令机器人都有对应的操作逻辑程序控制机器人自动完成每一步触屏操作,该程序是基于 python 中的 urx 库进行开发,通过 socket 通信将 URScript 程序来控制机械臂运动,在该项目中我们使用 moveit 接口来实现机械臂的直线运动。同时也对机械臂的力、速度、加速度等已进行了设置。

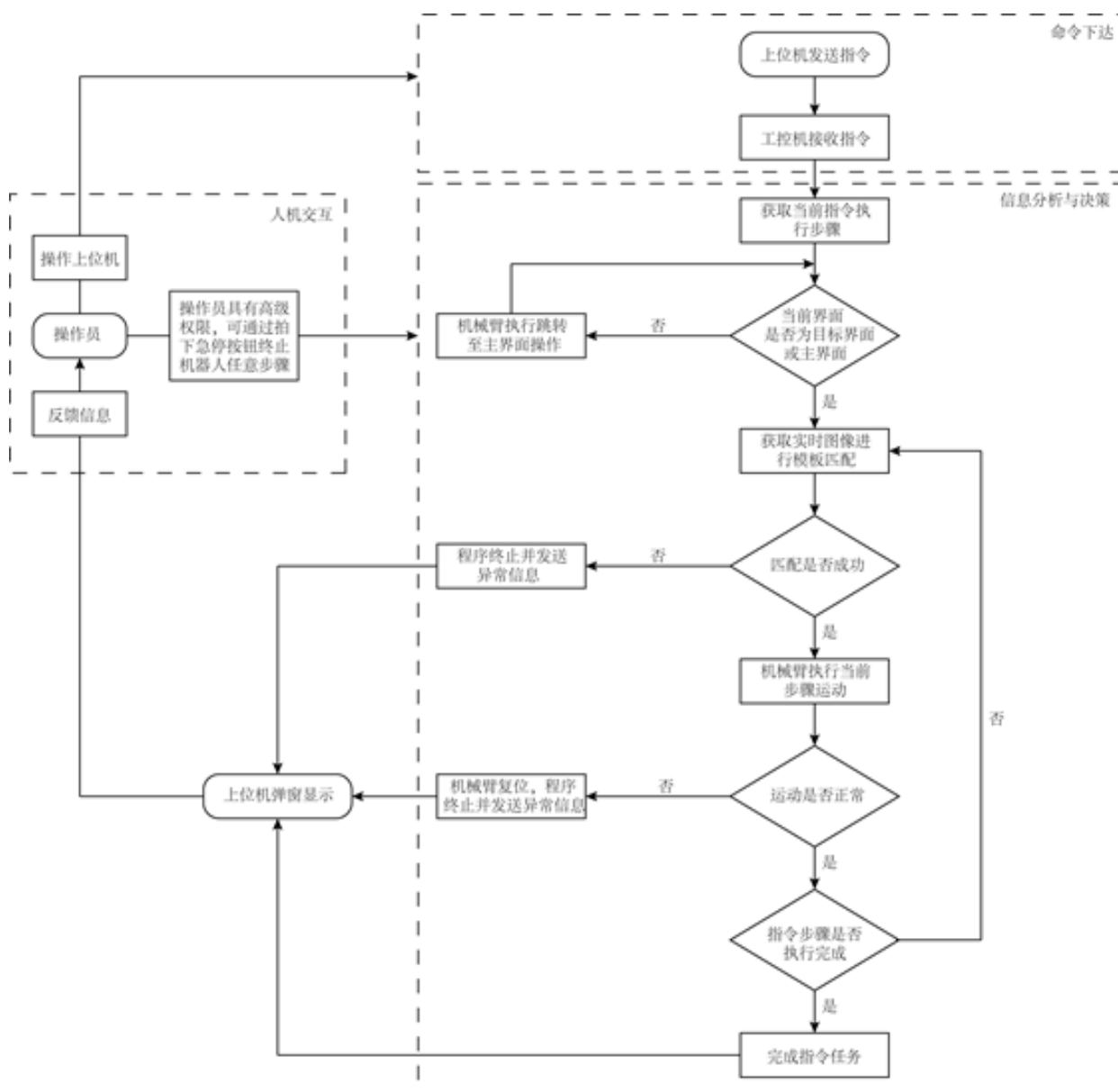


图 4-6 机械臂运动控制程序流程图

在系统开发过程中首先在虚拟环境中控制机器人运动,进行算法仿真和物理仿真,对改善机器人设计和加速开发具有重要意义。ROS 是一个用于编写机器人软件的灵活框架,它集成了大量的工具、库、协议,提供了类似操作系统所提供的功能<sup>[50-51]</sup>。

在构建真实机器人系统之前，利用 ROS 建立虚拟机器人系统，并在仿真环境下验证机械臂运动控制程序<sup>[52]</sup>，不断优化机械臂运动控制建模与仿真包含以下几个步骤：

- ① 创建机械臂的 URDF 模型描述文件。
- ② 用 moveit assistant 生成配置包。
- ③ Rviz 模拟环境测试 MoveIt,以矫正 URDF 文件

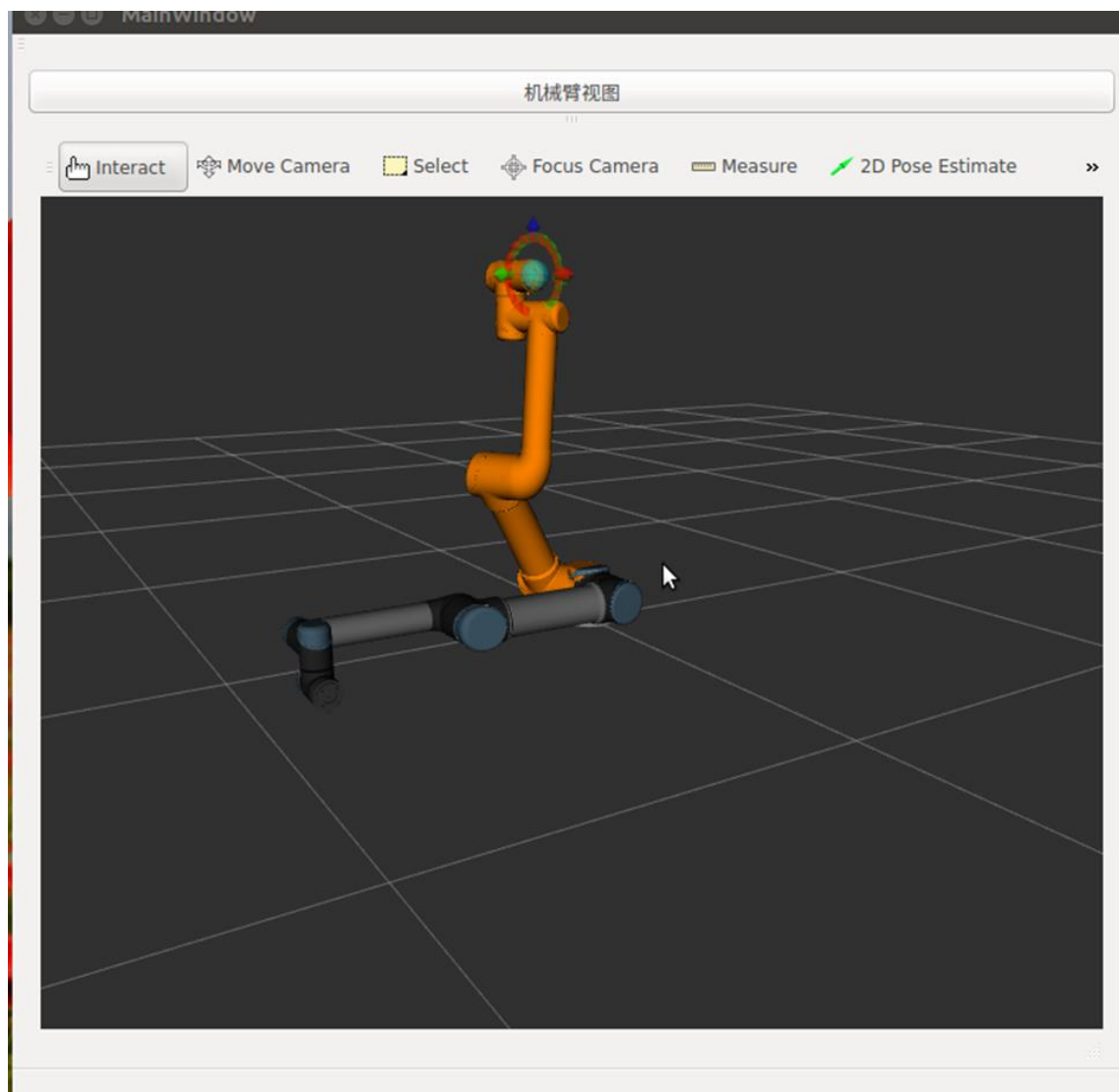


图 4-7 机械臂 Rviz 建模与仿真

待都符合机械臂的设计要求后，就可以把配置好的 MoveIt 移植到实际的机械臂上运行。

## 4.6 本章小结

本章详细地介绍了触屏操作机器人配套的整体软件设计与实现。软件包括了上位机控制程序模块、图像处理程序模块、机械臂运动控制程序模块、人机交互界面程序

模块等四大模块。在上位机控制程序模块介绍了上位机通过 `socket` 通信协议与机器人通信，实现对机器人下达操作指令并实时反馈机器人的运行状态；在图像处理程序模块主要介绍了视屏采集卡通过使用 `Opencv` 中的 `VideoCapture` 方法对 DCS 操作界面的图像信息进行读取，之后通过模板匹配的方式实现页面识别、图例定位和坐标获取；在机械臂控制程序模块中对电厂监盘操作逻辑进行流程化处理，并使用 `URScript` 配合 `urx` 库对 UR5 机器人进行编程控制；在人机交互界面程序模块中，介绍了交互界面的结构布局和功能说明。

## 第 5 章 触屏操作机器人实际环境调试与运行

### 5.1 模块功能测试

在对机器人进行实际的运行测试前,项目组首先对机器人进行了主要模块功能的测试,包括图像处理功能测试、机械臂运动控制功能测试、上位机与机器人通信功能测试。

图像处理功能模块正常工作是保证机器人可以对 DCS 操作界面进行页面识别、图例识别、点选效果复查的关键,它是机器人的视觉系统,实现机器人对目标位置的识别和定位。本文通过设计如下实验来验证图像处理程序的正确性:在程序中设定一个的特定模板,通过从 DCS 界面中实时采集的图像,测试图像处理程序是否可以在采集的图像中与指定的模板进行匹配。通过实验结果发现,图像处理程序可以正确识别指定的模板并能返回与模板匹配图例的像素坐标,实验结果表明图形处理模块功能正常,如图 5-1 所示。

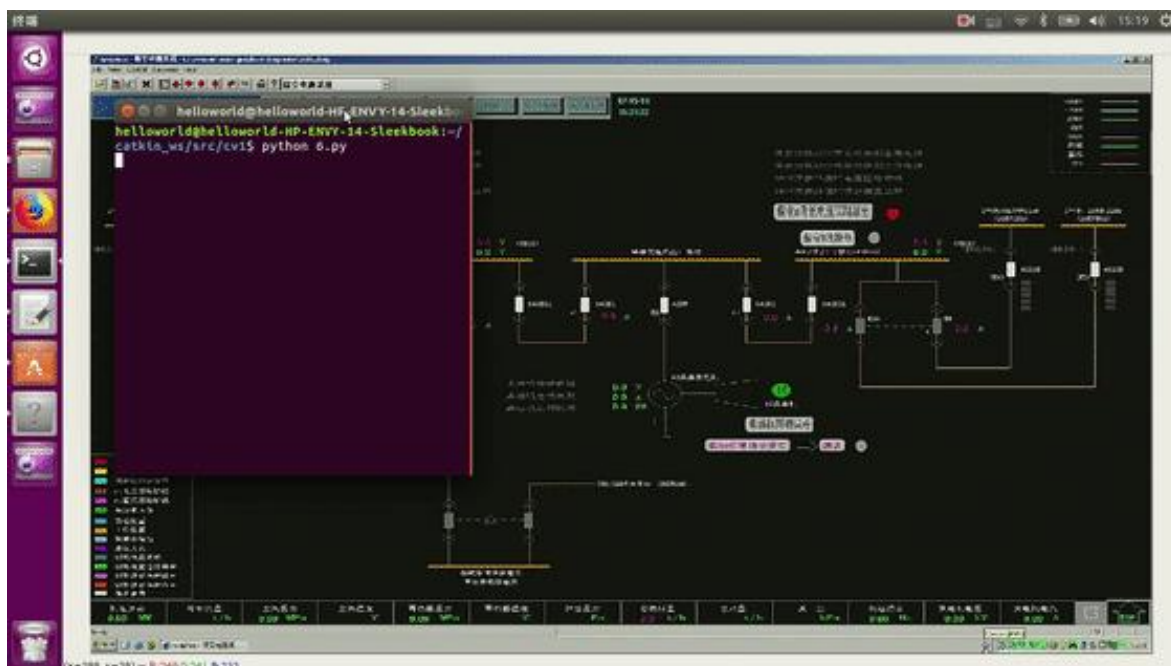


图 5-1 图像处理模块功能测试

本文设计如下实验对机械臂运动控制功能进行测试:使用 urx 库编写 Urscript 程序,通过网线将程序与 UR5 机器人控制箱进行通信,在程序中设置好 UR5 机械臂的 IP 地址、末端执行器 TCP 位姿、运动加速度、速度等参数,同时向程序传入 DCS 显示触摸屏中某点的像素坐标,测试机械臂能否定位并点击该点。



a) 机械臂运动到目标点上方



b) 机械臂点击目标点

图 5-2 机械臂运动模块功能测试

实验结果表明该机器人可以通过获得图像中目标点的像素坐标从而控制机械臂末端精确定位和点击目标点，如图 5-2 所示。

机器人协管系统与机器人是通过 Socket 套接字来通信的，需要设置好上位机和机器人的 IP 地址。通过使用 PING (Packet Internet Groper) 命令来确定上位机与机器人之间数据包交换是否正常<sup>[53-54]</sup>。实验结果显示网络连通成功，上位机向机器人发送四个数据包，并成功接收相同数量的数据包，数据包丢失率为 0，数据包往返行程的时间为 1 毫秒。

## 5.2 实际运行与调试

对机器人的主要模块功能进行测试后,实验结果表明各模块功能正常。之后项目组将机器人运送到电厂集控室进行实际环境的功能测试,如图 5-3 所示。



图 5-3 触屏操作机器人实际运行图

在实际的运行过程中,触屏操作机器人的操作流程可分为 3 部分:例行检查、触屏操作、异常恢复。流程图 5-4 所示。

为了保证机器人的安全正常使用,在对机器人发送命令前,需要对机器人进行例行检查,主要有如下步骤:

- (1) 检查触屏机器人外壳表面是否存在污渍。
- (2) 检查机械臂是否松动。
- (3) 检查机械臂末端执行器弹簧笔是否收缩复位正常。
- (4) 打开工控机上的操作软件后,机械臂视图里的机械臂是否在初始位置等待指令。
- (5) 检查大触摸屏 windows 桌面显示模式是否是经典(classic)模式,分辨率为  $1920 \times 1080$ 。

在一切例行检查都完成且无误后,集控室运行人员就可以对机器人发送操作命令,机器人就可以自动完成触屏操作,从而辅助人工对 DCS 系统进行监盘。使用机器人执行触屏操作的步骤如下:

- (1) 启动工控机触摸屏上的机器人软件;
- (2) 由上位机发送启停柴油发动机、开关备用开关等指令,触屏机器人自动完成触屏操作;
- (3) 工控机密码: ABCabc123

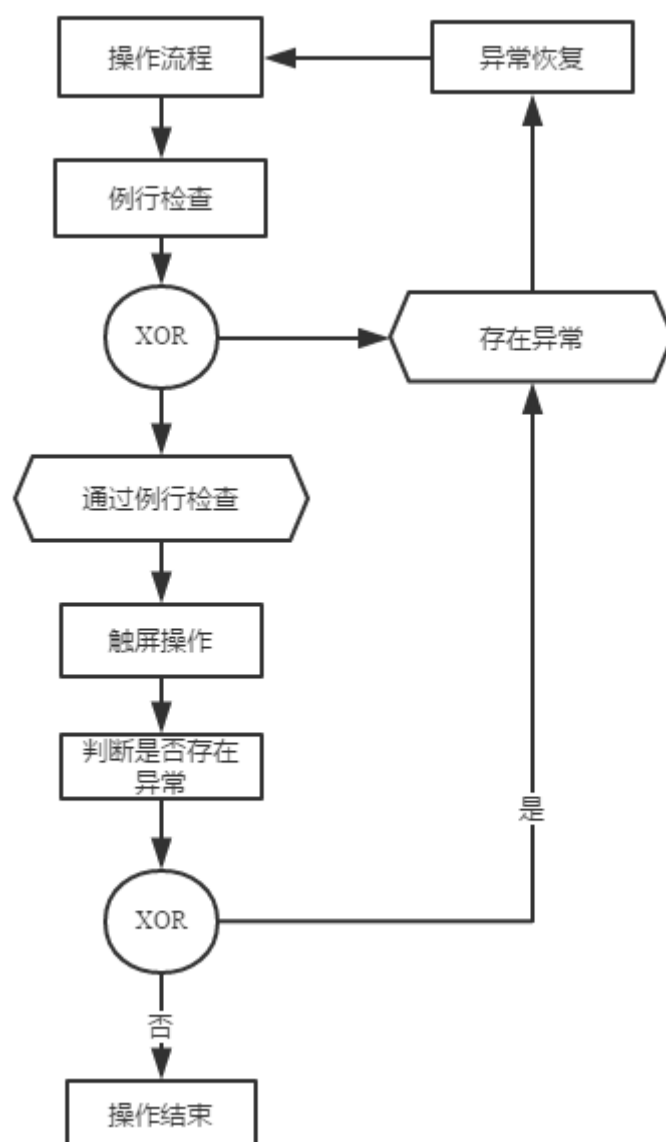
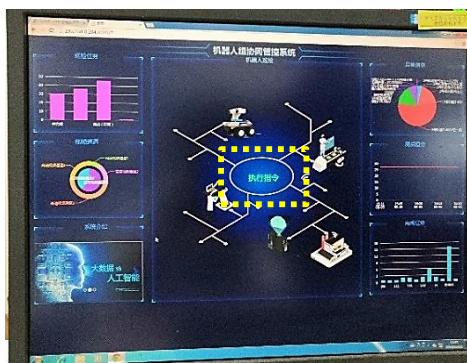


图 5-4 触屏操作机器人运行流程

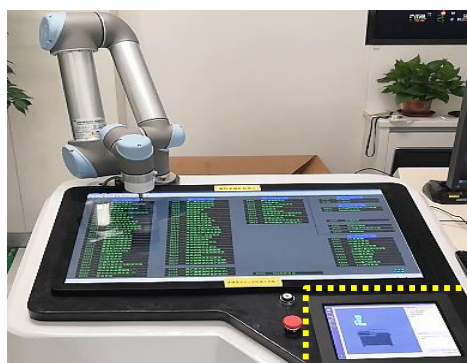
为了证明智能监盘机器人能有效完成既定任务,实现智能监盘机器人辅助监盘人员监盘这一功能,以实现停止柴油发动机为例,在电厂实际使用环境下做了停止柴油发动机的实验,实验效果见下图 5-5。实际运行过程中,首先运行人员根据电厂生产实际需要,通过上位机向机器人发送停止柴油发动机指令,机器人先判断柴油发动机是否开启。若关闭,则向上位机反馈柴油发动机已处于关闭转态,并保持机械臂在初始位置。若柴油发动机开启,机器人通过当前界面图像信息,实时分析获得当前所在的页面,并通过点击跳转至关闭柴油发动机目标页面,再根据设定的关闭柴油发动机操作逻辑进行对应的运行状态分析和点击操作,最后机器人通过页面图例判断柴油机是否关闭并将结果反馈给上位机,然后机械臂回到初始位置,机器人进入待机状态。



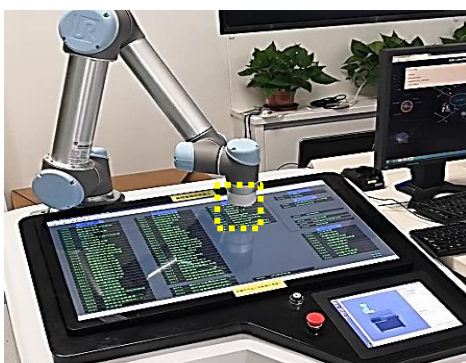
(a) 机器人协管系统发布操作指令



(b) 当前不在正确的操作界面，点击进入主菜单界面



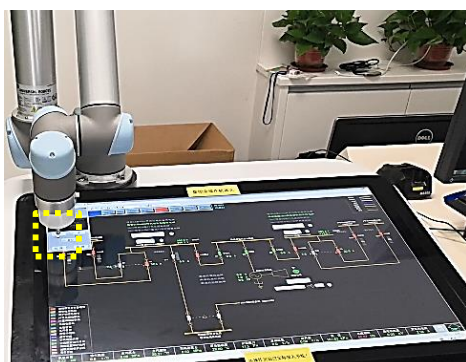
(c) 当前为主菜单界面，框出来的为人机交互界面



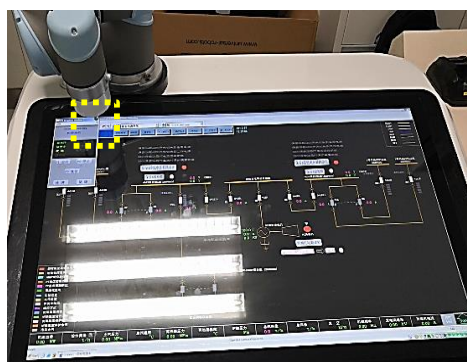
(d) 点击进入操作界面



(e) 点击柴油发动机



(f) 柴油发动机弹窗弹出，点击 P1 启动按钮

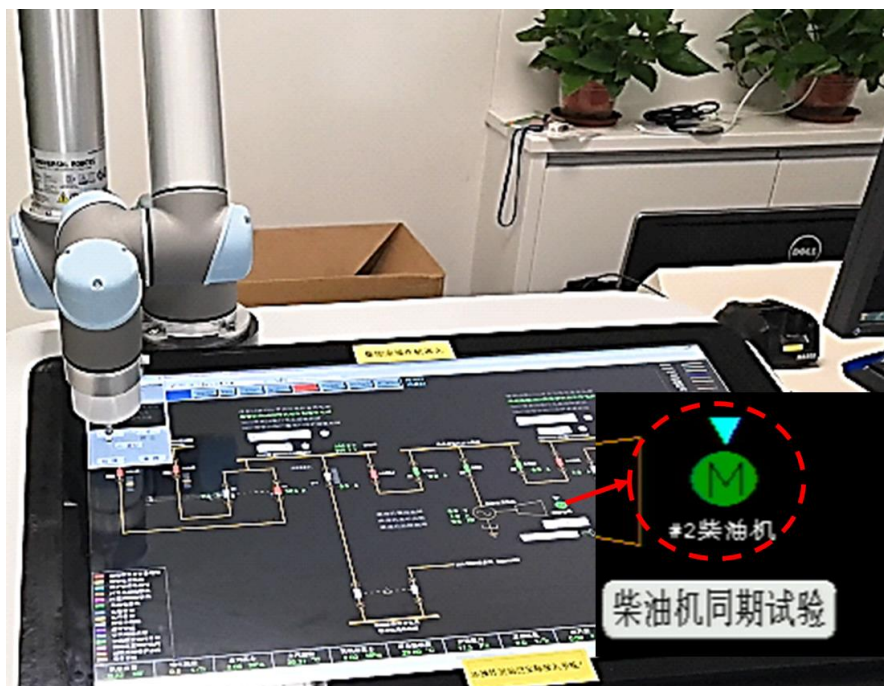


(g) 点击关闭柴油机弹窗



(h) 框中柴油发动机已开启，机械臂回到初始位置

图 5-5 触屏操作机器人关闭柴油发动机功能测试图



a) 柴油发动机处于开启状态



b) 柴油发动机处于关闭状态

图 5-6 触屏操作机器人关闭柴油发动机

图 5-5 中通过一个完整的“人-机器人-DCS 系统”的交互过程详细展示了该触屏操作机器人辅助运行人员进行监盘的工作流程。在图 5-6 中，在机器人接收开启柴油发动机命令前，DCS 系统中的柴油发动机图标为绿色，表示柴油发动机为开启状态，当机器人接收到关闭柴油发动机指令后，按照图 5-5 中的工作流程进行操作后，DCS 系统中的柴油发动机图标变为红色，表示机器人对 DCS 系统操作有效，柴油发动机

处于关闭状态。实验结果表明该触屏操作机器人能够正确完成监盘人员给出的停止柴油发动机指令任务，并将执行过程及结果及时反馈给监盘人员。

机器人先通过当前界面图像信息，实时分析获得当前所在的页面，并通过点击跳转至目标页面，再进行对应的运行状态分析和点击操作。由于机器人在执行新任务时，不能保证当前页面即为目标页面，无法预先规划路径，而需要确定跳转界面的方案再通过机械臂的实时规划算法来确定机械臂的运动轨迹。

触屏操作机器人已在电厂实际运行一年半多的时间，电厂运行人员在实际使用过程中发现机器人存在接收不到上位机协管系统下发的操作指令的情况。经过现场调试得出以下解决办法：

- ① 检测网线端口是否亮灯，若不亮，重新插拔网线，并点击图标；
- ② 重新插拔 USB 端口，并点击图标；
- ③ 若上述操作无法起效，插拔 12VDC 电源，使工控机重新上电。
- ④ 需要等待 6 秒左右让系统完全稳定后，再重复上面前两步，再点击小触摸屏上的软件图标，若无法启动软件，则重复点击几次软件图标。
- ⑤ 若软件无法启动重复上述操作。

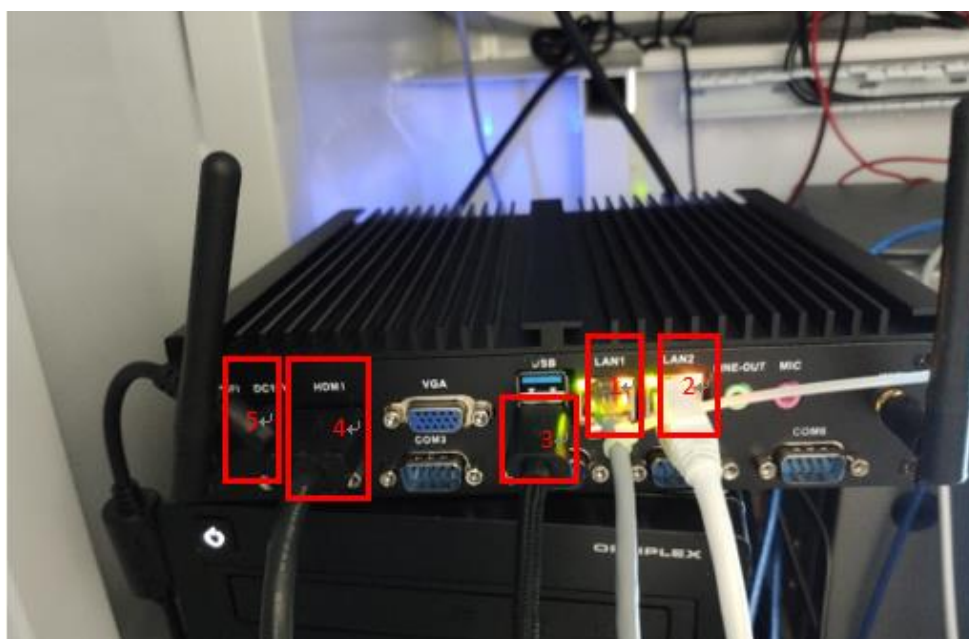


图 5-7 机器人工控机接线图

表 5-1 工控机接线说明表

| 接口序号 | 接口作用               |
|------|--------------------|
| 1    | 网线口 1 与协管系统（上位机）通信 |
| 2    | 网线口 2 与机械臂控制箱通信    |
| 3    | USB 口接小触摸屏         |
| 4    | HDMI 口接小触摸屏        |
| 5    | 接 DC12V 电源         |

### 5.3 本章小结

本章首先介绍了对机器人主要功能模块的功能测试,实验结果表明机器人各功能模块工作正常。然后在电厂集控室实际环境中对机器人的整机进行功能测试,触屏操作机器人的日常操作流程分为三步,即例行检查,触屏操作和异常恢复。在电厂集控室实际环境中触屏操作机器人进行了启停柴油发动机的功能测试,运行结果表明该机器人能准确执行操作命令,实现了项目的预期效果。最后对机器人在电厂实际运行时发现的故障给出了解决方法。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 总结

本文针对国内电厂集控室人工监盘中存在的一些问题,设计并实现了一种用于电厂集控室的触屏操作机器人,并部署在华能海门电厂辅助人工监盘,实现了全国首例电厂集控室智能监盘辅助机器人技术。从实际运行效果来看,监盘操作机器人的结构设计、人机交互界面、图像识别定位、机器人点击操作精度、机器人运行安全防护等均满足电厂生产实际的要求,达到了预期让触屏机器人监盘的目标。在项目开展过程中,项目组通过既定方案,经过前期调研、实验室仿真调试、现场安装调试的几个环节。在触屏机器人的开发过程中,本论文主要完成了以下工作:

(1) 针对华能海门电厂集控室人工监盘操作的场景,设计出一套触屏操作机器人。机器人采用机械臂与触摸屏一体式的结构设计,能有效避免因为机械臂与屏幕的相对位置的改变,而导致系统失效的情况;为了获得更准确的图像信息和提高系统的精度,使用图像采集卡直接从 DCS 操作人员站主机中采集界面图像信息;开发了一套人机可视化交互软件,软件主要包括机械臂同步仿真区、步骤执行流程区、机器人状态区三个部分;双显示屏集中放置于机器人正前方,方便运行人员快速掌握 DCS 系统与机械臂操作的状态。整个系统集成成一个整体,摆放方便,插电即可使用。

(2) 分析了人工监盘的操作逻辑,提出一种采用机械臂视觉伺服技术的触屏操作控制方法;使用模板匹配的方法对采集的 DCS 系统界面图像进行页面识别、图例识别及定位、点选效果复查,将获得的目标图例像素坐标通过坐标转换为机械臂基座标下的三维坐标;最后驱动机械臂完成实时轨迹规划,精确点击目标图例。

(3) 为了保证电厂信息安全,设计并实现了人-机器人-DCS 系统交互模式。运行人员通过上位机对触屏操作机器人下达操作指令,机器人接收到指令后再对 DCS 系统执行触屏操作。上位机和机器人都不接入 DCS 系统,都是独立于 DCS 系统之外工作。

(4) 设计了 DCS 显示屏幕触摸授权控制电路和物理开关,用来控制 DCS 显示触摸屏的触摸功能,防止触屏操作机器人待机时的误触情况发生,保证电厂的运行安全。

(5) 在海门电厂集控室实际运行现场,对触屏操作机器人进行了系统联调和功能运行测试。整个触屏操作机器人,在运行人员下达指令后,能够自动完成识别页面、图例、点选效果复查等,且能精度点击目标图例等一系列任务。本文设计的触屏操作机器人,实现了全国首例电厂集控室智能监盘辅助机器人技术,适合在有相关需求的行业内推广使用。对于未来实现机器人监盘,电厂无人化运行具有一定的参考价值。

## 6.2 展望

本文设计的电厂集控室触屏操作机器人是国内第一台智能辅助监盘操作机器人，经过现场的测试和实际的运行，该机器人可以成功地完成触屏操作任务，可以作为实现无人电厂、机器人监盘的实验平台进行下一步的研究。本项目仍有许多可以改进的地方：

（1）目前机器人能够执行的触屏操作还比较有限，未来可以继续开发实现更多的指令，实现电厂集控室监盘操作更加自动化和智能化。

（2）在现场运行过程中机器人在正常运行一段时间后有时出现接收不到指令和不执行指令的情况，需要在后续的开发中解决该问题。

（3）本项目中我们只是在机器人待机时对 DCS 显示屏幕的触摸功能进行了控制，当机器人正在执行操作指令时，屏幕的触摸功能是有效的，存在人为误触 DCS 显示屏幕的风险，未来可以采取将机器人隔离起来单独运行，或是在屏幕外面加装隔离措施。

（4）国内外需要对生产环节进行集中监控运行的行业和领域还有很多，该机器推广应用的市场广阔。随着人工智能和机器人技术的不断发展，触屏操作机器人将更加智能，将真正的实现机器人自动监盘，实现“无人电厂”和“智慧电厂”。

## 参考文献

- [1] 覃成刚. 电厂集控设计与运行技术探讨[J]. 河南科技, 2016(13): 29-31.
- [2] 许宁. DCS 在电厂控制系统的应用及展望[J]. 电站系统工程, 2016, 32(01): 60-61.
- [3] 胡志坚, 张兴顺, 张永等. 综合利用电厂集控室布置方案[J]. 电气技术, 2011(6): 74-76.
- [4] 庞圣涛. 某电厂集控室 LED 播报系统和 DCS 系统的融合性数据采集改造[J]. 神华科技, 2017, 15(07): 55-57+63.
- [5] 赵昊伟. 小型火电厂自动化集控系统的设计与实现[D]. 电子科技大学, 2013.
- [6] 孙岩, 孙国春. 电厂集控室布置方案优化[J]. 电力勘探设计, 2011(05): 50-53.
- [7] 郭夏言. 电力企业集控运行员工疲劳问题研究[D]. 北京交通大学, 2007.
- [8] 王曦钊, 刘胜军, 王德军, 何宁. 智能电站框架研究与信息化工程实践[J]. 电信科学, 2016, 32(04): 181-185.
- [9] 陈世和, 张曦. 基于工业 4.0 的智能电站控制技术[J]. 自动化博览, 2015(09): 42-50.
- [10] 谭文胜, 魏志鹏. 水电厂推行"无人值班、集中控制"若干问题的思考[C]. 2009 年水电站运行与水库调度技术交流会论文集. 2009: 1-4.
- [11] 高志国. 集控运行模式下 DTNL 水电站安全生产管理研究[D]. 长沙理工大学, 2017.
- [12] 刘朋, 刘持源, 黄德福, 郭卓, 王秀平. 水电站“区域集控、无人值守”运行管理模式的探讨[J]. 山东工业技术, 2018(24): 228-229.
- [13] 黄杰. 水电厂“远程集控、无人值班(少人值守)”运行模式的探索与实践[J]. 红水河, 2020, 39(02): 97-99.
- [14] 高全帅. 火力发电机组集控运行现状及技术研究[J]. 中国设备工程, 2018(05): 205-206.
- [15] 张鹏飞. 电厂集控运行控制模式及应用技术探究[J]. 设备管理与维修, 2021(07): 135-136.
- [16] 张超. 基于视觉引导的工业机器人应用研究[D]. 陕西科技大学, 2017.
- [17] 倪自强, 王田苗, 刘达. 基于视觉引导的工业机器人示教编程系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(03): 562-568.
- [18] Axelsson P. Evaluation of six different sensor fusion methods for an industrial robot using experimental data[C]. 2011 10th IFAC, Linkoping, Sweden, 2011: 126-132.

- [19] Koch H, König A, Weigl-Seitz A. Multisensor contour following with vision, force, and acceleration sensors for an industrial robot[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(02): 268-280.
- [20] Aitor Ibarguren, José María Martínez-Otzeta, Iñaki Murtua. Particle Filtering for Industrial 6DOF Visual Servoing[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3-4): 689-696.
- [21] Tahri Omar, Araujo Helder, Chaumette François, Mezouar Youcef. Robust image-based visual servoing using invariant visual information[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1588-1600.
- [22] 孙英飞, 罗爱华. 我国工业机器人发展研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(12): 2912-2918+3031.
- [23] 韩旭萍. 人工智能在汽车制造业中的进展分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, (04): 88-89.
- [24] 李 新. 自动化技术在机械设计制造中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(9): 126.
- [25] 张燕东, 田磊, 李茂清等. 智能巡检机器人系统在火力发电行业的应用研发及示范[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 1-7.
- [26] 欧栋生. 机器人在上下料生产线中的应用分析[J]. 中国新技术新产品, 2019(20): 14-15.
- [27] 夏群峰, 彭勇刚. 基于视觉的机器人抓取系统应用研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(06): 697-701+710.
- [28] Loncomilla P. Object recognition using local invariant features for robotic applications: a survey[J]. Pattern Recognition, 2016(60): 499-514.
- [29] 权赫. 徐州华润电力#4 机组 DCS 系统改造与应用研究[D]. 中国矿业大学, 2020.
- [30] 巩少龙. X 电厂 DCS 系统的优化设计与实现[D]. 石家庄铁道大学, 2019.
- [31] 孙红娟. 以人为本的用户交互界面设计[J]. 包装工程, 2015, 36(04): 113-116.
- [32] 王少伟, 张伟军, 艾田. 基于触屏控制的遥操作排爆机器人设计[J]. 机械与电子, 2018, 36(07): 67-71.
- [33] 陈鹏. 面向公共安全的机器人指控系统中机器人远程操控子系统的研究与实现[D]. 东南大学, 2017.
- [34] 杜帅, 袁建军, 管仁明. 伴随型服务机器人的远程控制系统设计[J]. 机电一体化, 2017, 23(07): 29-34.

- [35] 蔡肖肖. UR5 型机器人的运动学分析与标定实验研究[D]. 浙江理工大学, 2017.
- [36] 董鹏飞. 基于位置的工业机器人视觉伺服控制系统研究[D]. 华南理工大学, 2015.
- [37] William J. Rucklidge. Efficiently Locating Objects Using the Hausdorff Distance[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(3): 251-270.
- [38] 舒奇, 黄家才. 基于 Halcon 的机器人手眼标定方法研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2019, 17(01): 45-49.
- [39] YOU Yugen, FAN Zhun, CHEN Wenzhao, et al. Design and implementation of mobile manipulator system[C]. IEEE-CYBER 2019, Suzhou: IEEE, 2019: 1-6.
- [40] ZHU Guijie, FAN Zhun, CHEN Wenzhao, et al. Design and implementation of a manipulator system for roadway crack sealing[C]. IEEE-CYBER 2019, Suzhou: IEEE, 2019: 1-4.
- [41] 姚艳. UR 机器人结构光三维检测系统的研究[D]. 天津科技大学, 2019.
- [42] 徐同庆. 基于机器视觉的苹果采摘机器人控制系统研究[D]. 江苏科技大学, 2020.
- [43] 潘湘飞. 基于 socket 通信的工业机器人监控系统研究[D]. 浙江工业大学, 2017.
- [44] 朱秀昌等. 数字图像处理与图像通信[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [45] 田娟, 郑郁正. 模板匹配技术在图像识别中的应用[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 112-114.
- [46] Gary Bradski, Adrian Kaehler. Learning OpenCV[M]. 东南大学出版社, 2009.
- [47] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [48] 徐建明, 甘万正, 张文安等. 基于 QT 的工业机器人人机交互系统的设计[J]. 高技术通讯, 2019(6): 576-584.
- [49] 王 硕, 孙洋洋. PyQt5 快速开发与实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [50] 张鹏. 基于 ROS 的全向移动机器人系统设计与实现[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2017.
- [51] 胡春旭. ROS 机器人开发实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 292-300.
- [52] 熊 超. 基于 ROS 的机械臂避障运动规划及仿真[D]. 陕西理工大学, 2018.
- [53] 田书亮. 基于视觉的机器人焊缝自动跟踪系统设计与开发[D]. 北京化工大学, 2020.
- [54] 慈兆鑫. 汽车天窗框架注塑成型自动化系统设计[D]. 北京化工大学, 2020.

## 攻读学位期间主要研究成果

### 一、发表的学术论文

刘安仓, 李洪, 罗晨林, 范衡等. 电厂集控室智能操作机器人设计与实现 [J]. 广东电力, 2020, 33(增刊 1): 114-116. (中国科技核心期刊)

### 二、已授权实用新型专利

海门电厂, 范衡, 安康, 姜涛, 邱本章, 罗晨林, 熊宇. 一种手眼触屏机械臂[P]. 中国: CN211682135U, 授权日期 2020-10-16.

### 三、已申请实用新型专利

海门电厂, 范衡, 姜涛, 安康, 邱本章, 罗晨林, 熊宇. 一种电厂集控室深度学习和视觉伺服的触屏控制操作方法. 实用新型. 申请号: CN201911075065.1

### 四、参与的科研项目

华能集团总部科技项目(HNKJ18-G33): 智能机器人组集控室操作机器人触摸平台研发.

### 五、参与的科技比赛

第十五届“兆易创新”杯中国研究生电子设计竞赛华南赛区团体二等奖.

## 致谢

时间匆匆，转眼就到了毕业季，读研以来，有苦有甜，自己也成长了很多，感谢遇到的老师、师兄、师姐、同学和师弟师妹。

首先，我要感谢我的导师魏楚亮教授和范衡教授。本论文是在两位导师的悉心指导下完成的，从硕士方向确定到课题选题到论文撰写等均得到导师的指导和帮助。在攻读硕士学位期间，两位导师学识丰富，而且非常关心我的生活，非常感谢两位老师对我的帮助。在此，谨向导师及家人致以最诚挚的感谢和最崇高的敬意！

我也要感谢实验室的朱贵杰师兄，游煜根师兄，莫嘉杰师兄，李文姬师兄，对我学习和生活上的帮助。也要感谢同级的吴观生、杨知、邱立靖等同学的帮助，让我读研的生活不再孤独。

最后要感谢我的父母，是他们在背后无私的支持，才让我有机会和动力完成研究生的学习。

作者：罗晨林

2021年5月29日