

第七届

全国大学生集成电路创新创业大赛

报告类型*: 设计报告

参赛杯赛*: Robei

作品名称*: 基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人

队伍编号*: CICC2638

团队名称*: 卧云

基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人

参赛队名：卧云

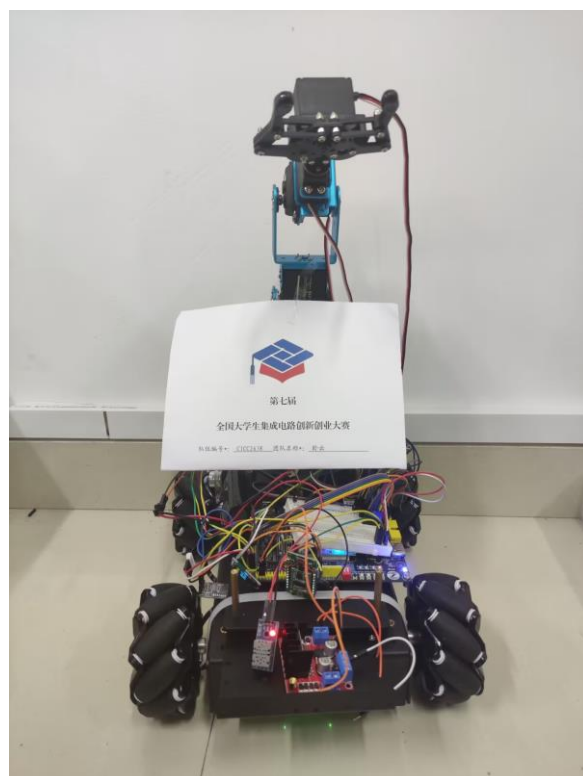
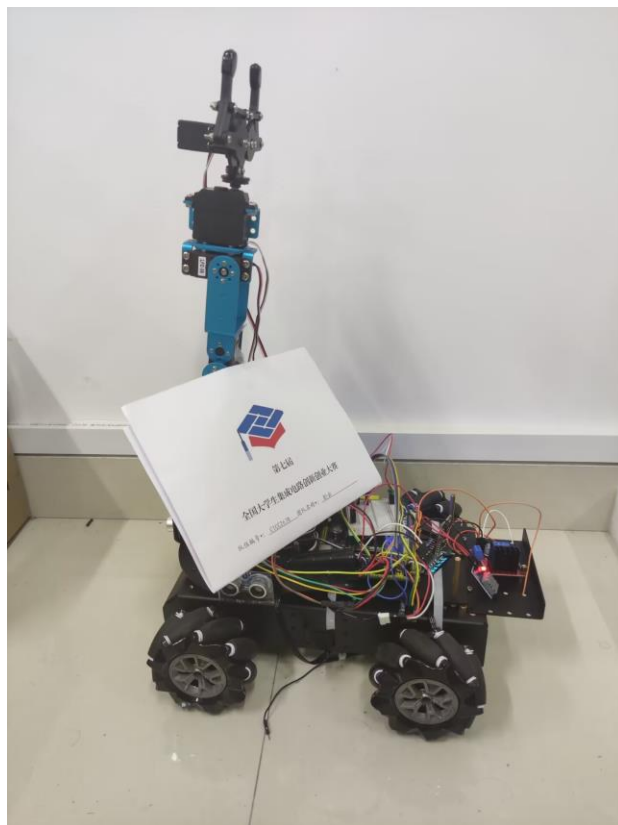
成员：柯皓栋 王强 黄晓毅

简介：基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人是一种利用 EDA 技术和机器人技术相结合的应用。它主要用于工业锅炉内部的检测和监控，以提高安全性、效率和维护的便利性。这种机器人通常由机器人平台、传感器系统、视觉系统和数据处理与分析组成。机器人平台提供了移动和导航功能，使机器人能够在锅炉内部进行自主移动。它可能采用轮式、履带或腿部等形式，具备足够的稳定性和适应性，以应对不同类型的锅炉环境。传感器系统是机器人的重要组成部分，用于收集锅炉内部的数据和信息。这些传感器可能包括温度传感器、压力传感器、湿度传感器等，用于监测锅炉内部的环境参数。视觉系统使用摄像头或其他视觉传感器，对锅炉内部的结构、管道、阀门等进行视觉检测和识别。这使得机器人能够检查锅炉内部的损坏、磨损、堵塞等问题，并生成视觉图像或视频供操作人员分析。数据处理与分析是机器人的关键功能之一，它配备了处理和分析数据的软件系统，利用 EDA 技术进行数据处理、特征提取和故障诊断。它能够分析传感器数据、视觉数据和其他采集的信息，识别潜在的故障和问题，提供及时的反馈和报警。通过这些组件的协作，基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人能够在锅炉内部进行全面的监测和检测，实时获取数据并分析，从而提高工业锅炉的运行安全性和效率，减少维护成本和人力投入。

关键字：Robei EDA，FPGA，机器人，图像传输，传感系统

Abstract: Based on the shortage of pipeline inspection robots in the market, in order to solve the physical injury caused by the complex and dangerous environment of pipelines to inspectors and realize intelligent and scientific detection, the team designed and implemented an intelligent pipeline detection robot by using domestic Robei EDA software, Robei octagonal FPGA hardware platform and Robei sunk core development board. The pipeline detection robot can detect the pipeline environment in real time and show the situation in the pipeline to the ground personnel in real time through the upper computer. It can also use the six-axis manipulator to sample and clean silt or other substances in the pipeline through the control of the ground personnel. Compared with single-chip software control, FPGA hardware control can ensure that there is no error and system stalling, and can ensure the fluency, safety and timeliness of the work. This work integrates light sensor, gas sensor, temperature and humidity sensor, ultrasonic sensor, GPS positioning sensor, voice start, to realize the gas concentration in the pipeline, temperature and humidity detection, robot precision positioning, complex terrain obstacle avoidance and other functions, and combined with camera image processing to realize pipeline monitoring and object recognition. The system uses Verilog hardware description language to create and realize the object grasping behavior planning of 6-DOF manipulator by using the robot arm path planning algorithm on FPGA, and integrates camera image processing and visual image positioning to grasp the object. Through the design and debugging of the system, the method proposed in this system has excellent realization effect, good market application prospect and commercial value.

Key Words: Robei EDA, FPGA, Robot, Image Transmission



目录

一、简介 (Introduction)	- 7 -
1.1 项目背景	- 7 -
1.2 项目内容	- 9 -
1.3 项目目标	- 9 -
二、架构设计 (Organization)	- 11 -
2.1 系统设计	- 11 -
2.2 FPGA 设计流程图	- 12 -
三、控制电路 (Controller)	- 13 -
3.1 机械臂控制电路设计	- 13 -
3.1.1 舵机的工作原理	- 13 -
3.1.2 6 自由度机械臂简介	- 14 -
3.1.3 6 自由度机械臂控制模块设计	- 15 -
四、传感系统 (Sensor)	- 17 -
4.1 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块	- 18 -
4.1.1 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块简介	- 18 -
4.1.2 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块驱动模块设计	- 23 -
4.2 ATK-BLE02 蓝牙模块	- 24 -
4.2.1 ATK-BLE02 蓝牙模块简介	- 24 -
4.2.2 ATK-BLE02 蓝牙驱动模块设计	- 25 -
4.3 BMP280 气压传感器	- 26 -
4.3.1 BMP280 气压传感器简介	- 26 -
4.3.2 BMP280 气压传感器模块设计	- 27 -
五、机械结构 (Structure)	- 28 -
5.1 麦克纳姆轮小车+IIC 驱动编码电机	- 28 -
5.1.1 麦克纳姆轮小车模块简介	- 28 -
5.1.2 IIC 驱动编码电机模块简介	- 32 -
5.1.3 麦克纳姆轮小车+IIC 驱动编码电机模块设计	- 33 -
六、算法系统 (Algorithm)	- 35 -

6.1 超声波避障模块.....	35 -
6.1.1 超声波避障模块简介.....	35 -
6.1.2 超声波避障模块设计.....	37 -
6.2 清洗装置.....	38 -
6.2.1 水泵简介.....	38 -
6.3 驱动模块.....	39 -
6.3.1 L298N 电机驱动模块+水泵模块（清洗装置）简介.....	39 -
6.3.2 L298N 电机驱动模块+清洗模块的控制程序设计.....	40 -
七、系统整合与调试（Integration & Test）.....	42 -
7.1 系统架构的整合.....	42 -
7.2 多传感器分模块 FPGA 上板验证.....	43 -
7.2.1 超声波避障模块 test 仿真.....	43 -
7.2.2 小车模块 test 仿真.....	43 -
7.2.3 机械臂 test 仿真.....	43 -
7.2.4 小车运动测试：.....	44 -
7.2.5 机械臂抓取测试：.....	44 -
7.2.6 dht11 显示模块测试：.....	45 -
八、未来发展与提升（Future Work）.....	46 -
九、总结（Conclusion）.....	47 -
十、参考资料（References）.....	48 -

一、简介（Introduction）

1.1 项目背景

工业锅炉是许多工厂和企业的重要设备，它们用于产生蒸汽或热水，以供应生产过程中的能源需求。然而，由于锅炉内部环境恶劣，包括高温、高压、腐蚀和污垢等因素，使得锅炉内部检测变得非常困难和危险。传统的锅炉内部检测方法通常需要人工进入锅炉内部进行检查，这不仅费时费力，而且存在安全隐患。

为了解决这个问题，工业锅炉内部检测机器人项目应运而生。该项目旨在开发一种能够在锅炉内部自主行动、进行检测和维护的机器人。这个机器人将配备各种传感器和摄像头，可以检测锅炉内部的温度、压力、湿度、污垢等参数，并将这些数据传输到外部的计算机进行分析和处理。此外，机器人还可以进行清洗、维护和修理等工作，从而提高锅炉的效率和安全性。

该项目的背景是由于传统的锅炉内部检测方法存在许多问题，如人工操作的风险和成本高、检测效率低、数据收集和分析困难等。这些问题不仅影响了锅炉的正常运行，还可能导致安全事故的发生。因此，开发一种能够自主行动、进行检测和维护的机器人成为了解决这些问题的有效途径。

该项目的目标是为工业锅炉的维护和管理提供更高效、安全和可靠的解决方案，减少人工操作的风险和成本，同时提高锅炉的运行效率和寿命。通过机器人的自主行动和数据收集，可以实现对锅炉内部环境的实时监测和分析，及时发现和解决问题，从而提高锅炉的安全性和稳定性。此外，机器人的自主维护和修理功能可以减少人工操作的需求，降低维护成本，提高工作效率。

总之，工业锅炉内部检测机器人项目是为了解决传统锅炉内部检测方法存在的问题，提高锅炉的安全性和效率，减少人工操作的风险和成本，为工业生产提供更加可靠和高效的能源供应。



图 1-1 人工清洗锅炉

现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）是一类高集成度的可编程逻辑器件，是以硬件描述语言为基础的硬件开发平台，与专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit, ASIC）相比，具有灵活性高、数据处理速度快、设计周期短、成本小的优势。数字图像处理过程中，虽然处理算法较为简单，但参与运算的数据量大，数据需多次重复使用，因此图像处理往往是图像处理系统中最耗费时间的环节，对整个系统速度影响很大。FPGA 为数字图像信号处理在算法、系统结构上带来了新的方法和思路，也为器件行为的高精度控制提供了更高的可能性。由于图像中的所有元素均可以实施同样的操作，存在固有的并行性，非常适合于映射到 FPGA 架构中应用硬件算法实现，大大加快了图像处理速度。

相比于嵌入式系统，可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）来说，能够做到更高的实时性和更低的实现成本，能够利用动态重构的特性，去改变和适应不同环境的控制方式。近年来，FPGA 发展迅速，实时处理等计算机视觉应用领域具有广阔的前景。特别是在提高计算速度上，将智能算法移植到硬件平台上进行加速已经成为当前领域内的热门研究方向，并且已趋于成熟。

对于数字图像处理，底层图像处理的数据量很大，要求处理速度高但运算结果相对比较简单；复杂器件控制的实时性要求很高，但实现方式容易。因此基于 FPGA 的图形采集处理和器件控制系统将具有功耗低、体积小、处理速度快的优势，将非常适合用于设计各类的识别控制系统。

1.2 项目内容

基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人是一种结合 EDA 技术和机器人技术的创新应用。它旨在提高工业锅炉内部的检测、监控和维护效率，确保锅炉的安全运行。该机器人利用麦克纳姆轮小车作为平台，搭载了多种模块和传感器，包括 IIC 驱动编码电机、超声波避障模块、L298N 电机驱动模块、水泵模块、6 自由度机械臂、温湿度检测模块（DHT11）、OLED 显示模块和 BMP280 气压传感器。

机器人平台提供了稳定的移动和导航功能，使其能够在锅炉内部自主操作。传感器系统是机器人的核心组成部分，用于监测锅炉内部的温度、湿度、压力等环境参数，并通过超声波避障模块实现障碍物检测和避免碰撞。机器人配备了 6 自由度机械臂，可进行精细的部件检测和维护操作，包括更换损坏的部件和使用水泵模块进行清洗。

通过融合 Robei EDA 技术，机器人能够实时处理和分析传感器数据、视觉数据以及其他采集的信息。它利用 EDA 技术进行数据处理、特征提取和故障诊断，识别潜在的故障和问题，并提供及时的反馈和报警。同时，机器人还配备了温湿度检测模块（DHT11）和 OLED 显示模块，实时监测和显示锅炉内部的温度和湿度数据，为操作人员提供即时的环境参数反馈。

该机器人的优势在于它能够代替人工进行危险环境下的检测和维护工作。它能够高效地执行任务，减少操作人员的风险和体力负担。通过使用机器人平台、传感器系统、视觉系统和数据处理与分析，它能够全面监测和检测工业锅炉内部的状态，提高安全性、效率和维护的便利性。同时，基于 Robei EDA 技术的数据处理和故障诊断功能，使得机器人能够及时发现问题并采取措施，从而确保锅炉的正常运行和高效性能。

1.3 项目目标

本设计提出了一种基于 FPGA zynq7020 核心板的工业锅炉内部检测机器人，该系统结合摄像头、6 自由度机械臂、多传感器，图像传输、机械臂运动算法，

通过 Robei EDA 和 vivado 工具进行设计与基础仿真验证，同时具有锅炉内部环境检测、机械臂抓取、蓝牙控制、超声波避障、环境温湿度检测、大气压实时检测等功能。

二、架构设计（Organization）

2.1 系统设计

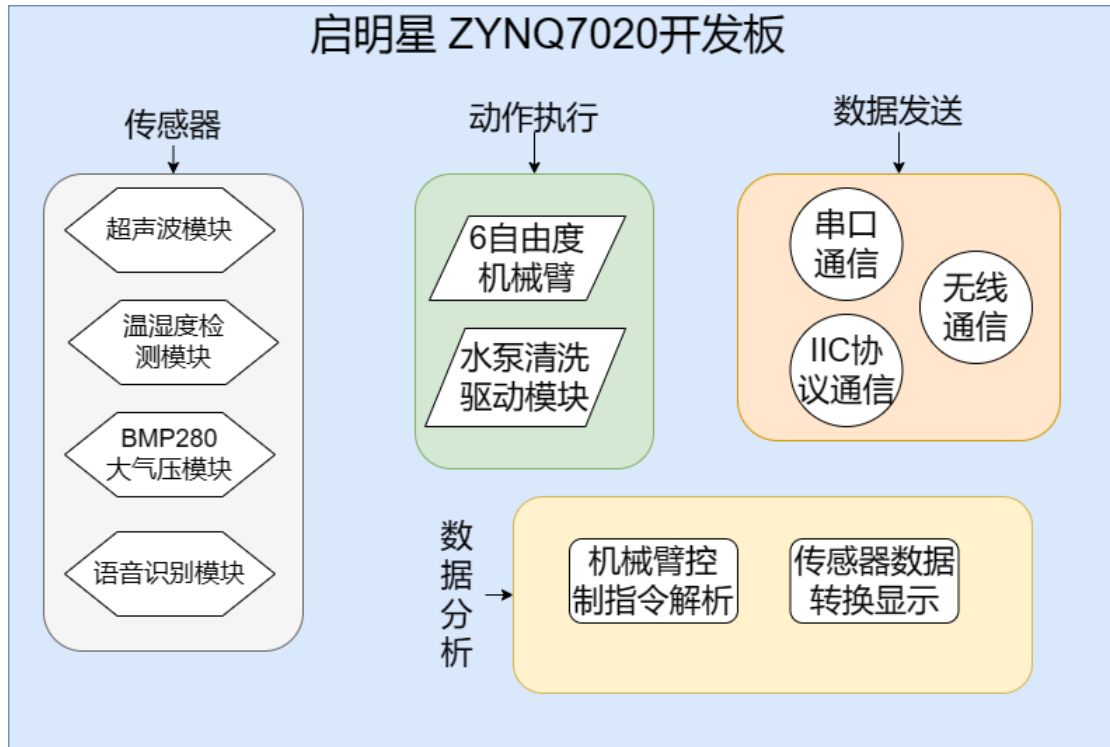


图 2-1 系统整体架构框图

该机器人系统的硬件设计包括多个关键模块：首先，使用了超声波模块、温湿度检测模块和 BMP280 大气压模块，用于实时监测工业锅炉内部的环境参数，如温度、湿度和气压等，以便及时发现异常情况并采取相应措施。其次，引入了 6 自由度机械臂和水泵清洗模块，以实现工业锅炉内部部件的检测和清洗，确保其正常运行和高效工作。

数据分析方面，机器人系统配备了机械臂控制指令解析和传感器数据转换显示模块。机械臂控制指令解析模块负责解析机械臂的控制指令，使机械臂能够精确地执行各种动作和任务。传感器数据转换显示模块对传感器采集到的数据进行处理、转换和显示，通过 OLED 显示模块将相关数据以可视化的方式呈现，供操作人员实时了解工业锅炉内部的环境参数和机器人执行情况。

数据发送模块是另一个重要组成部分，它通过串口通信、无线通信或 IIC 协议通信等方式，将机器人采集到的数据发送给外部设备或数据中心。这样，可以实现远程监控和数据存储，方便进一步的数据分析和决策。

基于 Robei EDA 的工业锅炉内部检测机器人通过以上模块的协同工作，能够全面监测工业锅炉内部的环境参数，并利用机械臂和水泵清洗模块对部件进行检测和清洗。这样的应用方案具有提高安全性、效率和维护便利性的优势，能够减少人工介入和维护成本，提高工业锅炉的运行效果和可靠性。

2.2 FPGA 设计流程图

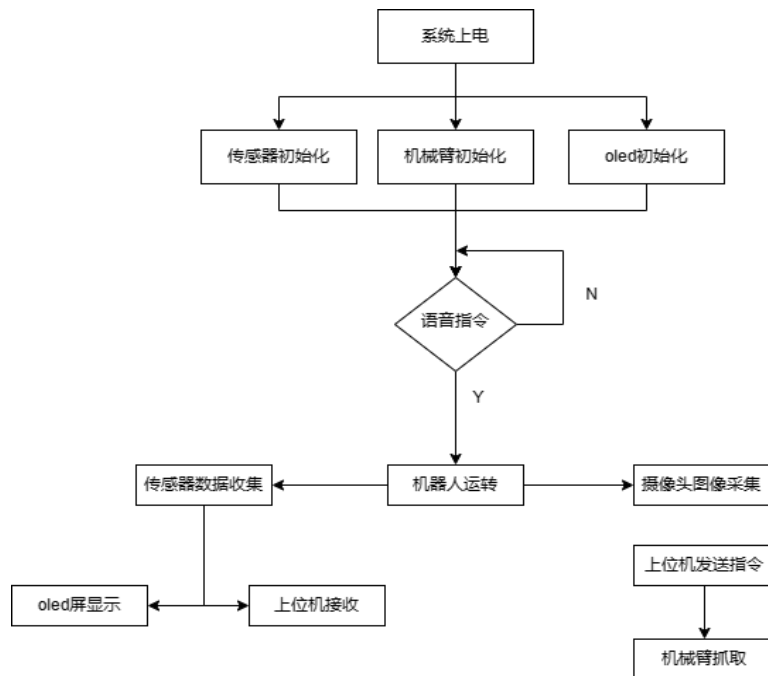


图 2-2 流程图

系统上电复位，等待指令，此时传感器初始化成功，各类传感器数据通过 FPGA 的采集融合经发送模块，将数据实时显示在上位机中。当机器人接收到语音指令时开始启动，通过前、左、右三个超声波传感器的数据进行路径的规划，道路的选择。在摄像头采集图像数据回传，监测人员通过图传的画面判断前方的异物是否需要排除，能够通过远程的指令对小车和机械臂进行控制，从而达到对目标进行清理的目的。

三、控制电路 (Controller)

3.1 机械臂控制电路设计

考虑到本系统的使用场景，如果屏幕中出现了需要被抓取的物体，且摄像头识别该物体在需要被抓取的区域，此时将判定为有物体需要被抓取，抓取指令发出，机械臂开始运作，实现目标的抓取。

3.1.1 舵机的工作原理

舵机根据 FPGA 发出的指令保持和改变转动方向。TBS-K20 机器人舵机是一种集电机、伺服驱动、PWM 信号接口一体的伺服单元，主要用于机器人、机械臂的关节驱动，也可以用于其他需要精确位置控制的场合。该舵机主要由舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计、直流电机和控制电路板等结构组成，3 条控制线分别是电源线（5-8.4）、地线、控制线。

PWM 舵机的伺服系统由可变宽度的脉冲来进行控制，控制线是用来传送脉冲的。一般而言，舵机的基准信号都是周期为 20ms，占空比有限范围 0.5-2.5ms。1.5ms 这个基准信号定义为中位信号，当脉宽给 1.5ms 时对 270°舵机来说就是控制其处于 135°的位置。舵机一般都有最大转动角度和最小转动角度，中间位置的定义就是从最大角度到最小角度的中间位置。重要的一点是，不同舵机的最大转动角度可能不相同，但是其中间位置的脉冲宽度是一定的，那就是 1.5ms。

表 3-1 舵机控制特性

No.	项目	规格
6-1	控制系统	改变脉冲宽度
6-2	工作频率	50-330Hz
6-3	操作角度	180° (在 500→2500 μ sec)
6-4	中立位置	1500 μ sec
6-5	脉冲信号虚位	3 μ sec
6-6	旋转方向	逆时针 (在 1500→2500 μ sec)
6-7	脉冲宽度范围	500→2500 μ sec
6-8	可转动角度范围	360°

3.1.2 6 自由度机械臂简介



图 3.2 机械臂结构图

6 自由度机械臂是一种具有六个独立运动自由度的机械臂系统。它模仿人类手臂的结构，由多个关节和连杆组成，可以在三维空间内进行灵活的运动和操作。每个自由度对应机械臂的一个独立运动维度，包括旋转和平移。

下面是对 6 自由度机械臂的常见组成部分和功能的简要介绍：

1、基座：机械臂的基座是安装在固定位置的支撑结构，提供机械臂的稳定性和刚性。它通常与工作区域的底座或机械平台连接。

2、关节：6 自由度机械臂通常由多个关节连接形成。关节是机械臂的运动节点，使机械臂能够实现旋转和转动的运动。常见的关节类型包括旋转关节和转动关节。

3、连杆：连杆是连接相邻关节的刚性杆件，它们构成了机械臂的结构框架。连杆的长度和形状会影响机械臂的工作范围和可及性。

4、手腕：机械臂的末端通常配备一个手腕部分，用于实现末端执行器（例如夹具、工具或传感器）的安装和操作。手腕通常具有多个关节，使末端执行器能够在多个方向上进行旋转和倾斜。

5、控制系统：6 自由度机械臂配备一个控制系统，用于控制和协调机械臂的运动。控制系统通常由电脑或嵌入式控制器、传感器和运动控制算法组成，以实现精确的位置控制和轨迹规划。

6、末端执行器：末端执行器是机械臂的最终工具，用于执行特定的任务。它可以是夹具用于抓取和操纵物体，也可以是工具用于进行加工、焊接、喷涂等操作，还可以是传感器用于采集环境数据。

6 自由度机械臂由于具有多个独立自由度，可以实现复杂的三维姿态控制和灵活的工作空间覆盖。它们广泛应用于工业自动化、装配线、仓储和物流、医疗手术、研究和教育等领域，以提高生产效率、降低劳动强度和实现精准操作。

3.1.3 6 自由度机械臂控制模块设计

uart_rx:指令接收模块，接收上位机发送的指令，将得到的指令发送到下一模块。

duoji_drive:指令解析模块，对指令进行判断，给下一模块进行使能

duoji: 动作执行模块，接收到使能信号 EN 就执行一次抓取动作

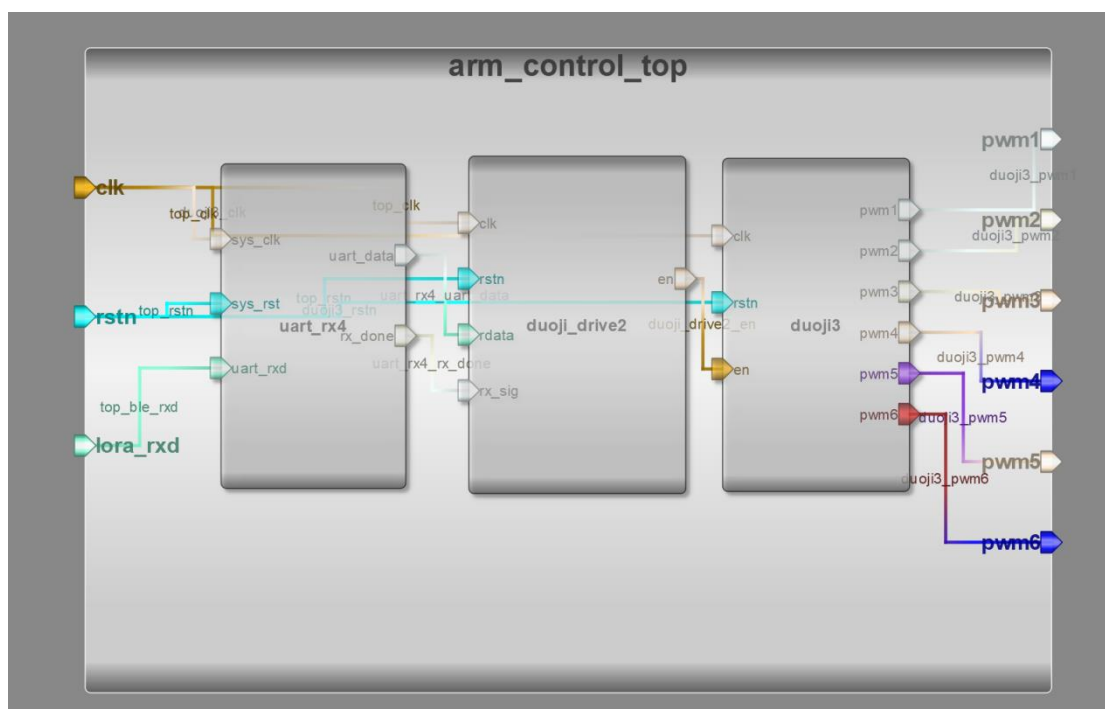


图 3.3 机械臂顶层模块

四、传感系统 (Sensor)

传感器顶层模块中包含了以下模块:

dht11: 温湿度传感器驱动。

dht11_data_trans: 温湿度数据转码模块, 将十六进制数的温湿度信息转化成 ASCII, 便于在上位机显示。

lora_top:LORA 无线串口通信模块作用是将各种传感器的数据进行整合和打包发送，由上位机进行显示。

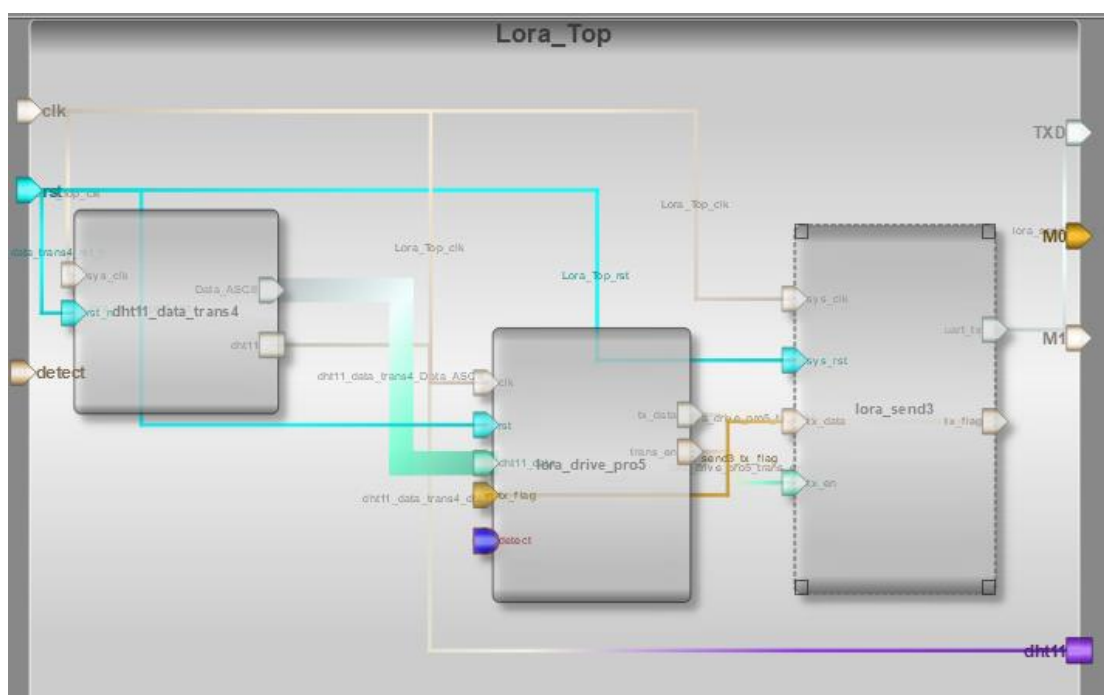


图 4 传感器逻辑顶层模块

4.1 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块

4.1.1 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块简介

温湿度检测模块 DHT11 和 OLED 显示模块通常结合使用，用于测量环境的温度和湿度，并在 OLED 显示屏上实时显示测量结果。下面是对这两个模块的简要介绍：



图 4.1.1 DHT11

DHT11 温湿度传感器：DHT11 是一款集成了温度传感器和湿度传感器的集成硬件传感器，该传感器包括 1 个电阻式测湿元件和 1 个 NTC 测温元件，通过与 FPGA 相连，能够利用电平协议进行串行数据读取。在上电情况下，FPGA 通过电平信号触发 DHT11 传感器进行数据采样，经过数据采样后，传感器将数据利用逻辑电平传回 40 bit 数据给 FPGA，FPGA 利用数据校验的方式进行检验，保证数据的有效性和协议数据传输的准确。

表 4-1 DHT11 电气参数

电气参数	DHT11 温湿度传感器
工作电压	DC5V
工作电流	0.5-2.5mA
工作频率	20hz
温度范围	0-50°C
湿度范围	20-90%RH
输入触发信号	18mS 的 TTL 脉冲
输出回响信号	输出 TTL 电平信号，逻辑温度信号

DHT11 温度传感器采用串行异步无时钟信号协议进行传感器的控制和温湿度数据传输，在器件上电初始化状态下，需要对传感器进行 1000ms 以上的热启动，才能保证器件驱动的正常性，在初始化状态下，FPGA 需要对其 GPIO 口设置为弱上拉状态，同时输出逻辑电平为低电平；在初始化后，FPGA 拉低电平输出至少 18ms 后，设置 FPGA GPIO 口输出为逻辑高电平且持续 20-40us，保证 DHT11 温湿度传感器接收到高电平信号触发；在 FPGA 触发 DHT11 进行数据采集后，设置串行 GPIO 端口为上拉输入，同时 DHT11 温湿度传感器返回响应低电平信号 80us，告知 FPGA 进行数据接收准备，DHT11 拉高 80us，进行串行数据的传输。温湿度数据共 40 bit，分别是 8 位湿度数据整数、8 位湿度数据小数、8 位温度数据整数、8 位温度数据小数、8 位数据校验位，对于串行逻辑信号二进制表示为初始状态拉低信号 50us，信号电平拉高 26-28us 表示为二进制逻辑 0；初始状态拉低信号 50us，信号电平拉高 70us 表示为二进制逻辑 1。信号校验位为前 32 位数据每 8 位数据相加且不进位的和，进行输出校验，判断协议数据传输是否有误。

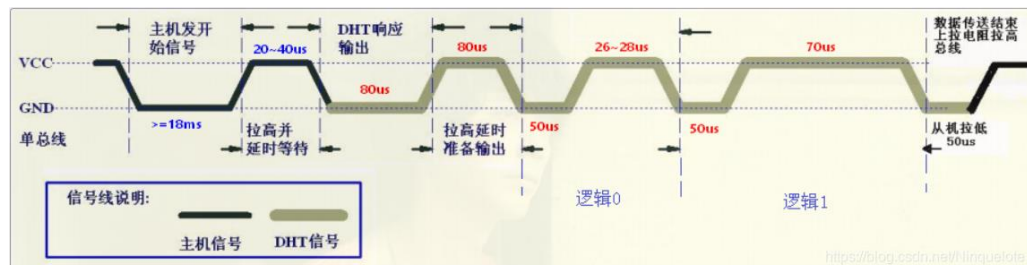


图 4.1.2 DHT11 传感器时序逻辑

DHT11 温湿度检测模块：DHT11 是一种常用的数字温湿度传感器模块。它内置了温度和湿度传感器，能够测量环境中的温度和湿度值。DHT11 模块通过数字信号输出测量结果，使用简单且成本较低。它适用于各种应用场景，如室内温湿度监测、气象站、温室控制等。

OLED 显示模块：



CSDN @24K纯学渣

图 4.1.3 Oled 显示模块

它有四个引脚：VCC、GND、SCL、SDA。功能如下表所示：

引脚名	功能
VCC	供电电源引脚，一般选用 3.3V 直流电源
GND	共地引脚
SCL	i i c 总线中的时钟线
SDA	i i c 总线中的数据线

表 4.1.1 oled 引脚分布

(一).OLED 的存储区域

这块存储区域分为 8 个 page，每个 page 下面共有 128bit，如下图所示

行 (COM0~63)	列 (COL0~127)						
	SEG0	SEG1	SEG2	SEG125	SEG126	SEG127
	PAGE0						
	PAGE1						
	PAGE2						
	PAGE3						
	PAGE4						
	PAGE5						
	PAGE6						
	PAGE7						

表 4.1.2 oled 存储区域分布

每一个 page 包括 8 行，所以说 8 个 page 共有 64 行。IIC 每次发送数据的时候，是发送一个 byte 的，也就是 8bit，这 8bit 数据会存储到某一列的八行中，例如图中 SEG0 区域，是第一列的头八行。这样 GRAM 的存储区域就弄懂了。

(二).OLED 的数据存储模式

当我们向 OLED 的 GRAM 发送显示数据的过程中，OLED 内部共有三种处理模式。

模式一: 当我们指定了一个 page 和某一列的时候，每写一个数据，列会自动加一，当写到 page 的最后一列的时候，列数，会自动跳转到第零列，需要手动的切换 page。

Figure 10-1 : Address Pointer Movement of Page addressing mode

	COL0	COL 1	COL 126	COL 127
PAGE0	→				
PAGE1	→				
:	:	:	:	:	:
PAGE6	→				
PAGE7	→				

表 4.1.3 oled 模式一

模式二: 与模式一不同的时候，当写达到 page 的最后一列的时候，列数跳转到第零列的同时，page 数也会加一。

Figure 10-3 : Address Pointer Movement of Horizontal addressing mode

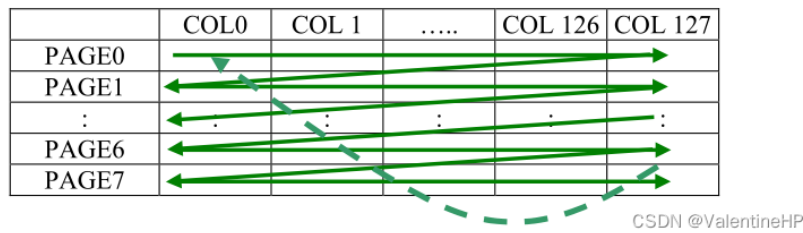


表 4.1.4 oled 模式二

模式三: 与前两个模式不同, 模式三, 是一列一列的写, 每写完一个数据, page 数加一, 当加到最后一个 page 的时候, 列数加一, page 跳转到第一个 page。

Figure 10-4 : Address Pointer Movement of Vertical addressing mode

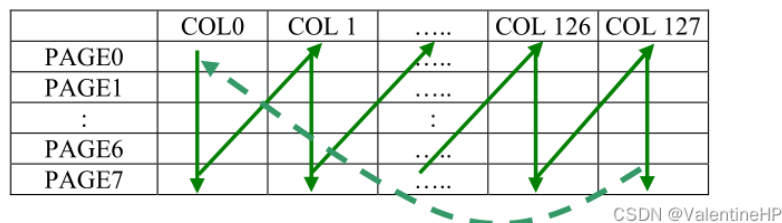


表 4.1.5oled 模式三

在实际的使用中, 具体使用那一种模式, 可以根据自己的子模软件或者项目来, 初始化 OLED 就是配置一些列命令的过程, 而这些寄存器和配置的值一般都是 copy 现成的。然后了解一下关键的一两个命令就可以啦。

三. OLED 关键命令介绍

0xAE/0xAF: 对应着开启 OLED 显示和关闭 OLED 显示

0x20-0x22: 对应着上面的三种 OLED 数据存储模式, 默认为 0x22, 模式一

0x00-0x0F: 设置列地址的低四位, 默认为 0x00,

0x10-0x1F: 设置列地址的高四位, 默认为 0x10,

0xB0-0xB7: 设置 page, 第四位表示 page。

四. IIC 驱动 OLED 数据格式

驱动 OLED 分为写数据和写命令(读暂时不考虑)。写命令就是配置的过程, 写数据就是写入 GRAM 中进行显示的过程。

IIC 数据格式: OLED 地址 + 命令 / 数据 + 值。

OLED 地址, 就是 IIC 协议中的从机地址, 我这里是 0x78。

命令/数据中，0x00 表示接下来的值代表命令，0x40 表示接下的值表示数据，存入 GRMA。

值，具体的命令或者数据

也就是说每一次 IIC 需要传输 24bit，3 个字节的数据

4.1.2 温湿度检测模块 dht11+oled 显示模块驱动模块设计

Dht11 模块有对应的输出温度的整数(tempH)、小数(tempL)部分，湿度的整数(humidityH)、小数(humidityL)部分。以及一个输入输出端口来获取 dht11 的数据。获取的间隔是 dht11_req（1s）的时间。



图 4.1.2DHT11 传感器模块

Oled 的相应的模块，刷新，接收数据处理显示等子模块，以及 IIC 输出接口

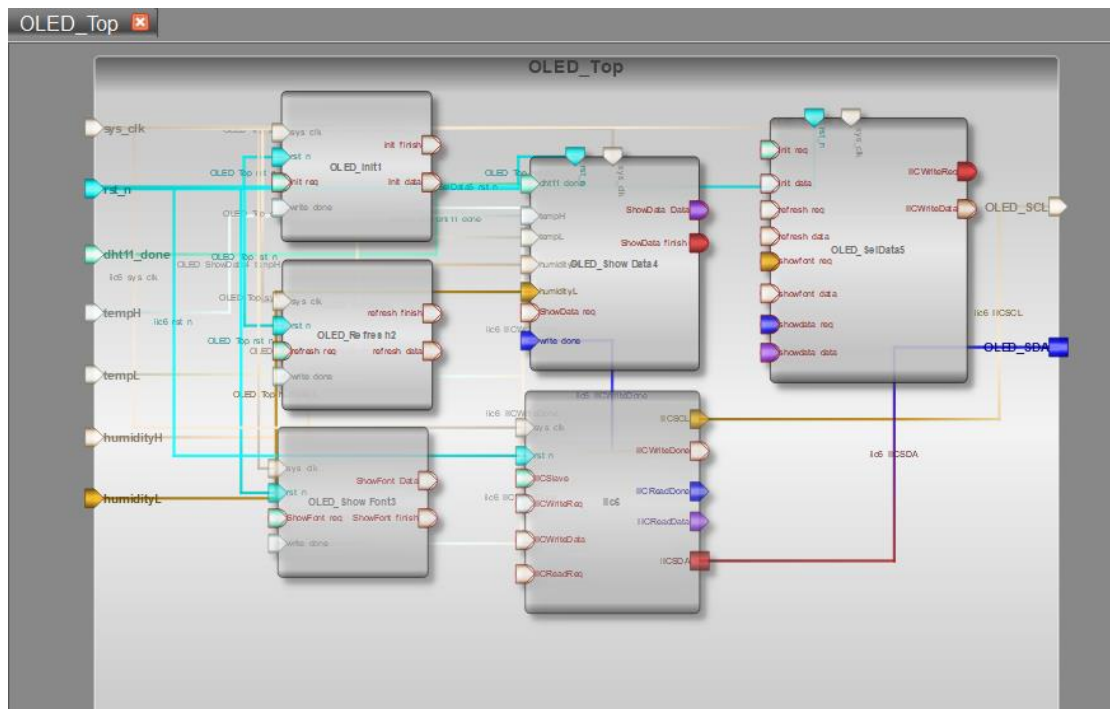


图 4.1.3oled 传感器模块

4.2 ATK-BLE02 蓝牙模块

4.2.1 ATK-BLE02 蓝牙模块简介

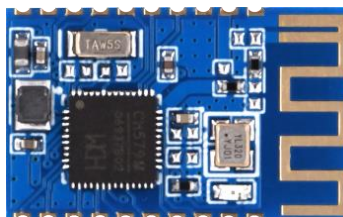


图 4.2.1ATK-BLE02 模块

ATK-BLE02 是一款蓝牙模块，用于实现无线蓝牙通信功能。下面是对 ATK-BLE02 蓝牙模块的简要介绍：

蓝牙技术：ATK-BLE02 蓝牙模块基于蓝牙技术，支持蓝牙通信协议，可与其他蓝牙设备进行数据传输和通信。蓝牙技术具有低功耗、短距离无线通信的特点，适用于物联网、智能家居、传感器网络等应用领域。

功能特性：ATK-BLE02 蓝牙模块具有以下功能特性：

1、低功耗：蓝牙低功耗（Bluetooth Low Energy，BLE）技术使得模块在保持通信的同时能够节省电能，适用于电池供电的设备。

2、高速传输：支持快速且可靠的数据传输，适用于需要实时或高速数据传输的应用场景。

3、小型化设计：ATK-BLE02 蓝牙模块具有紧凑的尺寸和轻量化设计，易于集成到各种设备和系统中。

4、强大的兼容性：兼容性良好，可与其他符合蓝牙标准的设备进行通信，包括智能手机、平板电脑和蓝牙网关等。

应用领域：ATK-BLE02 蓝牙模块广泛应用于各种领域，如物联网（IoT）设备、智能家居、传感器网络、医疗设备、工业自动化、无线传感器等。它可以实现设备之间的无线通信和数据传输，具有很高的灵活性和可扩展性。

4.2.2 ATK-BLE02 蓝牙驱动模块设计

串口接收协议

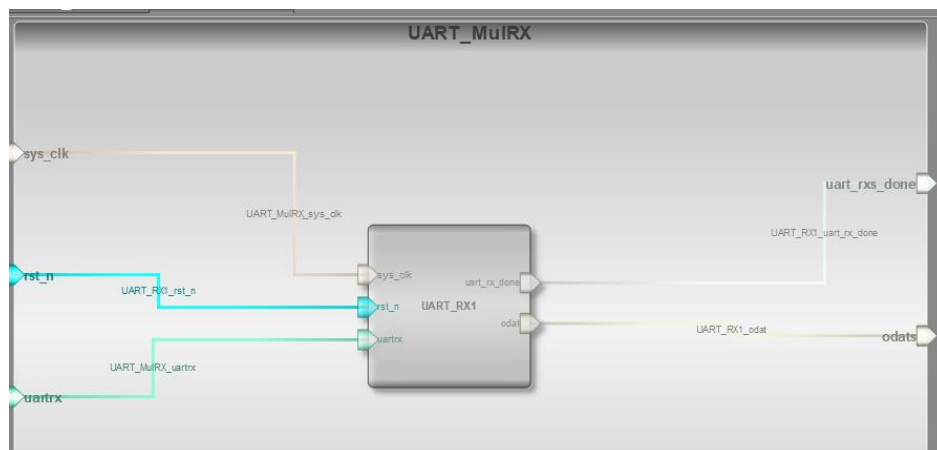


图 4.2.2 uart_rx 模块

串口传送协议

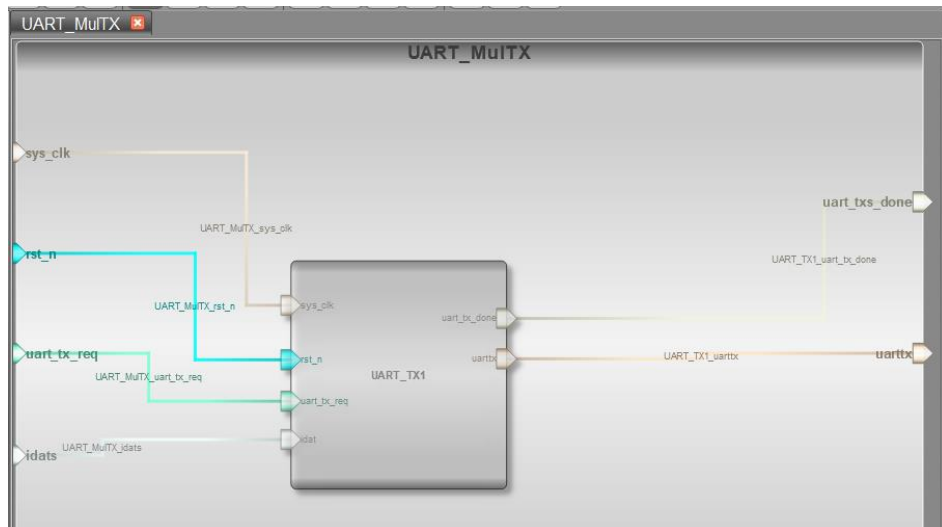


图 4.2.3uart_tx 模块

4.3 BMP280 气压传感器

4.3.1 BMP280 气压传感器简介

BMP280 是一种数字气压传感器，由博世 (Bosch) 公司开发。它是 BMP180 传感器的升级版，用于测量大气压力和温度。BMP280 采用微电子机械系统 (MEMS) 技术，结合了温度补偿和线性数字化校准，以提供高精度的气压和温度测量。

以下是 BMP280 气压传感器的一些主要特点和功能：

- 1、高精度测量：BMP280 具有很高的气压测量精度，可以达到 ± 1 hPa 的精确度，适用于气象、导航、室内外气压监测等应用。
- 2、温度补偿：传感器内部集成了温度传感器，能够对气压测量进行温度补偿，提高测量精度。
- 3、低功耗：BMP280 采用了优化的低功耗设计，工作电流仅为 $2.7 \mu A$ ，在待机模式下功耗更低。
- 4、SPI 和 I2C 接口：BMP280 可以通过串行外设接口 (SPI) 或 I2C 总线进行通信，方便与微控制器或其他外部设备进行连接。
- 5、宽工作范围：BMP280 的工作温度范围为 $-40^{\circ}C$ 到 $+85^{\circ}C$ ，可适应广泛的应用环境。

6、高线性度：传感器的输出信号经过 16 位 AD 转换器转换为数字信号，具有高线性度和稳定性。

7、超小封装：BMP280 采用超小型封装，便于在各种应用中进行集成和安装。

BMP280 气压传感器常用于气象站、导航系统、高度计、室内外温度和湿度监测等领域，提供准确的气压和温度数据，帮助实现各种应用的精确测量和环境监测。

4.3.2 BMP280 气压传感器模块设计

通过 IIC 协议，进行初始化、读取数据的任务，然后数据通过串口协议发送到上位机去。

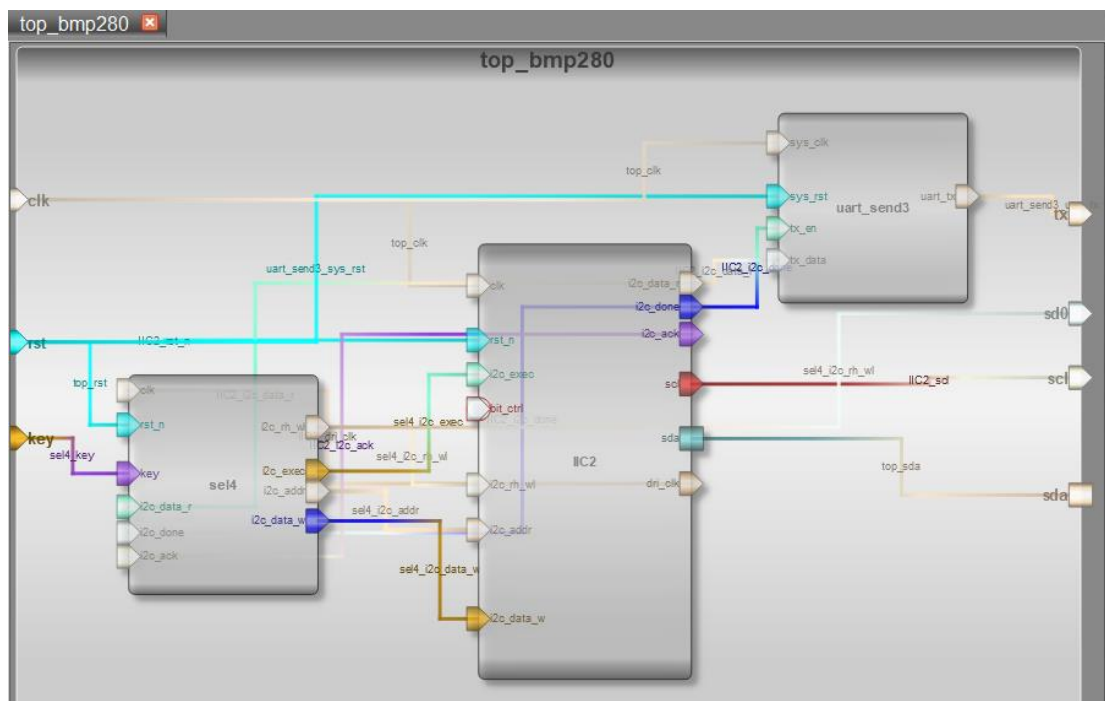


图 4.3.2 bmp280 模块

五、机械结构 (Structure)

5.1 麦克纳姆轮小车+HIC 驱动编码电机

5.1.1 麦克纳姆轮小车模块简介



图 5.1.1 麦克纳姆轮小车

麦克纳姆轮小车 (Mecanum Wheel Robot) 是一种具有特殊轮子布局的机器人车辆，它可以实现全向移动和转向能力。麦克纳姆轮小车最早由瑞典工程师 Bengt Ilon 于 1973 年发明，得名于他所在的公司 Mecanum AB。

麦克纳姆轮小车通常由四个特殊设计的轮子组成，每个轮子上都有一系列与轮子外围呈 45 度角倾斜的小滚轮。这种特殊的轮子布局使得麦克纳姆轮小车可以在任意方向上移动，包括前后、左右、斜向等。通过适当控制轮子的转速和方向，麦克纳姆轮小车可以实现平稳的全向运动，并且可以在狭小的空间内旋转和横向移动，而无需转弯。

麦克纳姆轮小车通常配备电机、编码器和控制系统，通过对电机施加适当的速度和方向控制信号，实现对小车的移动和转向控制。控制系统可以使用各种方式实现，例如使用微控制器、单片机或者计算机进行编程控制。

麦克纳姆轮小车广泛应用于机器人技术领域，例如自动驾驶车辆、物料搬运机器人、无人驾驶车辆等。由于其全向移动和转向能力，麦克纳姆轮小车在

狭小空间、复杂环境下具有灵活性和机动性，使其在工业、仓储、物流等领域中发挥重要作用。

麦克纳姆轮正逆运动学模型

以 O 型的安装方式为例，四个轮子的着地点形成一个矩形，或者正方形，由于加工精度等限制，很难做到四个麦轮安装位置成正方形，并且正方形的安装方式对于车身的控制并没有太大的优势，所以矩形安装方式即可。

AGV 小车的运动状态，可以通过三个量来进行描述 v_x , v_y , ω 即是 X 轴方向上的平动，Y 轴方向的平动，以及围绕 Z 轴旋转(逆时针方向为正)。麦轮的四个轮子需要用四个电机独立进行控制，并且四个轮子的速度存在约束，逆运动学方程存在唯一解，正运动方程如果不满足这个约束，则会无解。直接上图吧，俯视图如下，四个麦轮平行于 X 轴的方向安装，从 AGV 左上角开始逆时针开始，分别为四个麦轮编号为 1, 2, 3, 4, r 为轮毂半径， θ_n 为麦轮 n 辊子轴线与 X 轴线之间的夹角（就是辊子的偏置安装角，大小为 45° ）， X_n , Y_n 为麦轮 n 的中心点位置

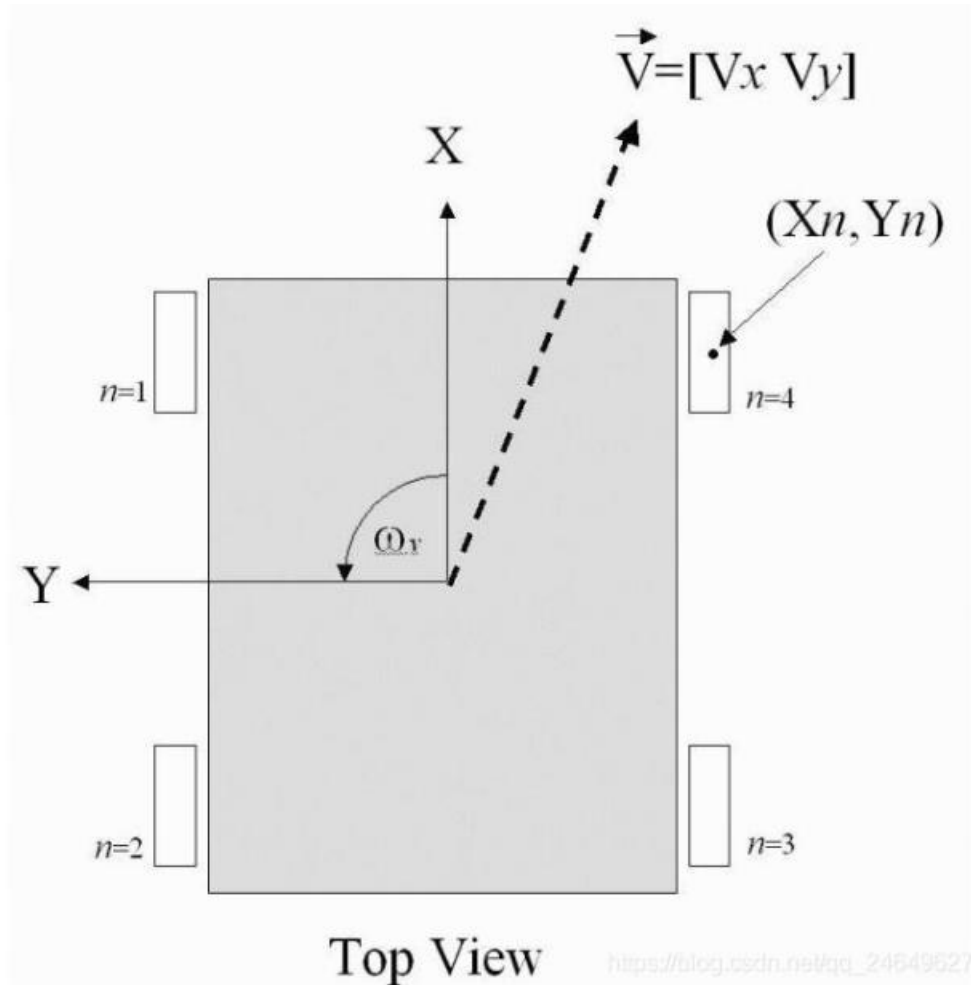


图 5.1.1 麦克纳姆轮小车运动分析

运动学方程

逆运动学(Inverse Kinematic Model)方程，根据期望 AGV 小车的运动状态求解出四个麦轮的转速以及转向。

正运动学(Forward Kinematic Model)方程，根据四个麦轮的运动状态来预估小车整体的运动状态。

这里介绍一种最简单的计算方式，即将三个正交的底盘运动方向 v_x ， v_y ， ω 进行线性叠加的方式。

因为，底盘安装方式是 0 型安装

X 轴方向运动

AGV 向前运动时，只需要四个电机以轮毂轴心为圆心，向 X 轴正方向旋转麦轮，向后运动时，只需要四个电机以轮毂轴心为圆心，向 X 轴负方向旋转麦轮，此时，底盘期望速度只有 X 轴方向的速度， \vec{V} 是小车的状态向量

$$\vec{V} = [v_x, 0, 0]$$

可以得到此时的四个麦轮的期望转速， k_x 为系数，需根据实际情况整定

$$\begin{cases} v_1 = v_x * k_x \\ v_2 = v_x * k_x \\ v_3 = v_x * k_x \\ v_4 = v_x * k_x \end{cases}$$

Y 轴方向运动

AGV 小车需要沿着 Y 轴正方向运动时，1、3 号轮沿着轮毂轴向着 X 轴负方向旋转，2、4 号轮沿着轮毂轴向着 X 轴正方向旋转；小车需要沿着 Y 轴负方向运动时，1、3 号轮和 2、4 号轮的旋转方向相反。此时，底盘期望速度只有 Y 轴方向的速度，小车的状态向量为

$$\vec{V} = [0, v_y, 0]$$

可以得到此时的四个麦轮的期望转速， k_y 为系数，需根据实际情况整定

$$\begin{cases} v_1 = -v_y * k_y \\ v_2 = v_y * k_y \\ v_3 = -v_y * k_y \\ v_4 = v_y * k_y \end{cases}$$

Z 轴旋转

首先，Z 轴是 XY 交点指向小车顶部为正方向，需要小车逆时针旋转的话，1、2 轮向 X 轴正方向旋转，3、4 轮向 X 轴负方向旋转；顺时针旋转的话，1、2 轮和 3、4 轮的旋转方向相反。

小车此时的状态向量为

$$\vec{V} = [0, 0, \omega_v]$$

四个麦轮的转速为

$$\begin{cases} v_1 = -\omega_v * (a + b) \\ v_2 = -\omega_v * (a + b) \\ v_3 = \omega_v * (a + b) \\ v_4 = \omega_v * (a + b) \end{cases}$$

式中，a 为任意一个麦轮到 X 轴的距离，b 为任意一个麦轮到 Y 轴的距离。

合成速度

综合上述，可以有 AGV 小车的状态向量为

$$\vec{V} = [v_x, v_y, \omega_v]$$

对应的麦轮转速为

$$\begin{cases} v_1 = v_x * k_x - v_y * k_y - \omega_v * (a + b) \\ v_2 = v_x * k_x + v_y * k_y - \omega_v * (a + b) \\ v_3 = v_x * k_x - v_y * k_y + \omega_v * (a + b) \\ v_4 = v_x * k_x + v_y * k_y + \omega_v * (a + b) \end{cases}$$

5.1.2 IIC 驱动编码电机模块简介



图 5.1.2 IIC 编码电机

IIC（Inter-Integrated Circuit）驱动编码电机是一种通过 IIC 总线进行控制的带有编码器的电机。IIC 是一种串行通信协议，也被称为 I2C（Inter-Integrated Circuit），广泛应用于电子设备之间的通信。

IIC 驱动编码电机通常由以下几个组件组成：

1、编码电机：编码电机是一种集成了电机和编码器的装置。编码器用于测量电机旋转角度和速度，并将这些信息反馈给控制系统。这样的反馈信息可以用于控制电机的位置和速度。

2、IIC 总线：IIC 总线是一种双线制串行通信协议，包括数据线（SDA）和时钟线（SCL）。它允许多个设备通过共享相同的总线进行通信。通过 IIC 总线，控制系统可以发送命令和接收编码器的反馈数据。

3、驱动器：驱动器是连接 IIC 总线和编码电机的接口。它负责将控制信号从 IIC 总线传递给编码电机，并将编码器的反馈数据传递回控制系统。驱动器通常具有适配 IIC 协议的电路和接口，以便与控制系统进行通信。

通过 IIC 驱动编码电机，控制系统可以实现对电机的精确控制和位置反馈。通过发送适当的命令和数据，控制系统可以控制电机的速度、方向和位置。同时，编码器提供的反馈数据可以用于监测电机的旋转情况，以便实时调整和控制。

IIC 驱动编码电机广泛应用于机器人、自动化系统和其他需要精确控制和反馈的应用中。它们提供了一种简便的方式来实现电机控制和编码器反馈的集成，从而提高了系统的性能和可靠性。

5.1.3 麦克纳姆轮小车+IIC 驱动编码电机模块设计

与超声波模块联合，收集前、左、右，三边超声波的数据，通过判断来实现不同的动作。

– 34 –

六、算法系统 (Algorithm)

6.1 超声波避障模块

6.1.1 超声波避障模块简介

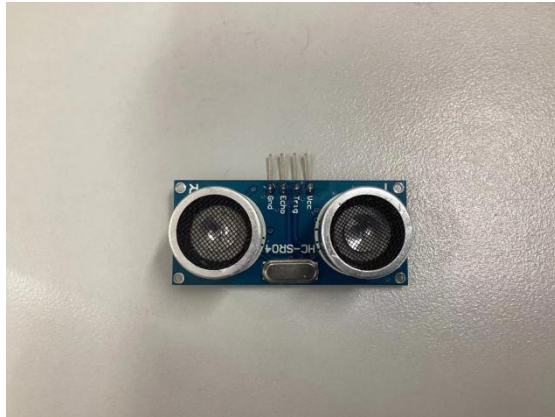


图 6-11 超声波避障模块

1) 产品特点

HC-SR04 超声波测距模块可提供 2cm-400cm 的非接触式距离感测功能，测距精度可达高到的非接触式距离感测功能，测距精度可达高到 3mm；模块包括超声波发射器、接收器与控制电路。

2) 基本工作原理

- (1)采用 IO 口 TRIG 触发测距，给最少 10us 的高电平信呈。
- (2)模块自动发送 8 个 40khz 的方波，自动检测是否有信号返回；
- (3)有信号返回，通过 IO 口 ECHO 输出一个高电平，高电平持续的时间就是超声波从发射到返回的时间。测试距离=(高电平时间*声速(340M/S))/2;

超声波避障模块的基本工作流程如下：

- 1、发射超声波信号：模块通过超声波传感器发射超声波信号。
- 2、接收回波：传感器接收到超声波信号的回波。
- 3、距离计算：通过测量超声波信号的传播时间，模块可以计算出与障碍物之间的距离。

4、障碍物检测：模块通过比较测得的距离与设定的阈值进行判断，确定是否存在障碍物。

5、避障控制：如果检测到障碍物，模块可以触发相应的控制信号，例如停止或改变行进方向，以避免碰撞。

表 6.1 接口定义

序号	接口定义	说明
1	Vcc	供电电源
2	Trig	GPIO 模式为 Trig, 触发信号。
3	Echo	GPIO 模式为 Echo, 反馈信号。
4	Gnd	地
5	NC	空脚
6	3V	3V 电源输出

工作原理：

1. 采用（IO 触发测距、给至少 10us 的一个高电平触发信号）；
2. 模块自动发送 8 个 40KHz 的方波，自动检测是否右信号返回；
3. 有信号返回、通过 IO 输出一高电平、高电平持续的时间就是超声波从发射到返回的时间。

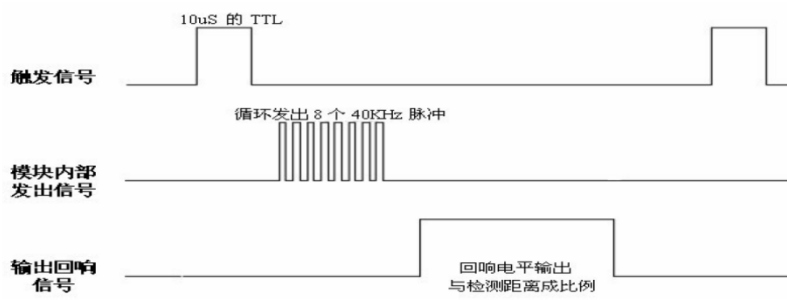


图 6.2 时序图

以上时序图表明你只需要提供一个 10uS 以上脉冲触发信号，该模块内部将发出 8 个 40kHz 周期电平并检测回波。一旦检测到有回波信号则输出回响信号。回响信号的脉冲宽度与所测的距离成正比。由此通过发射信号到收到的回响信号时间间隔可以计算得到距离。公式： $\mu\text{S}/58=\text{厘米}$ 或者 $\mu\text{S}/148=\text{英寸}$ ；或是：距离=高电平时间*声速（340M/S）/2；建议测量周期为 60ms 以上，以防止发射信号对回响信号的影响。

本系统中，当前面距离大于设定阈值，超声波输出为 0，小于设定阈值时，超声波输出为 1。

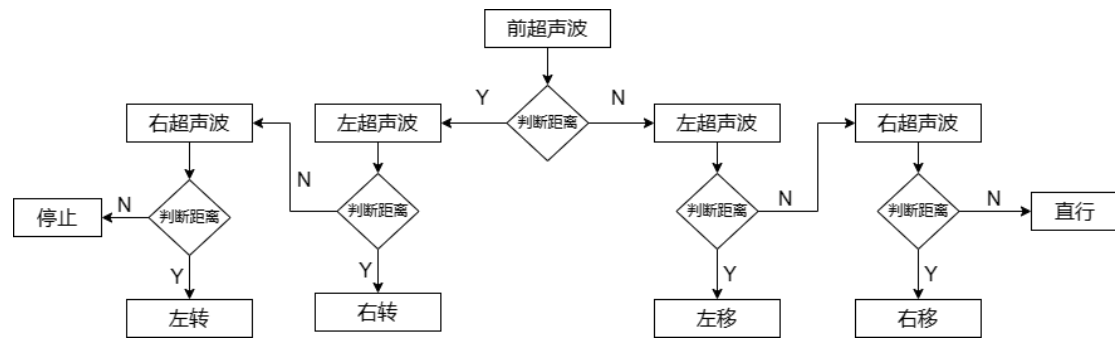


图 6.3 超声波流程图

6.1.2 超声波避障模块设计

超声波模块，通过测量，设置不同的阈值，当小于设置的阈值的时候会使得 out 信号为 1.

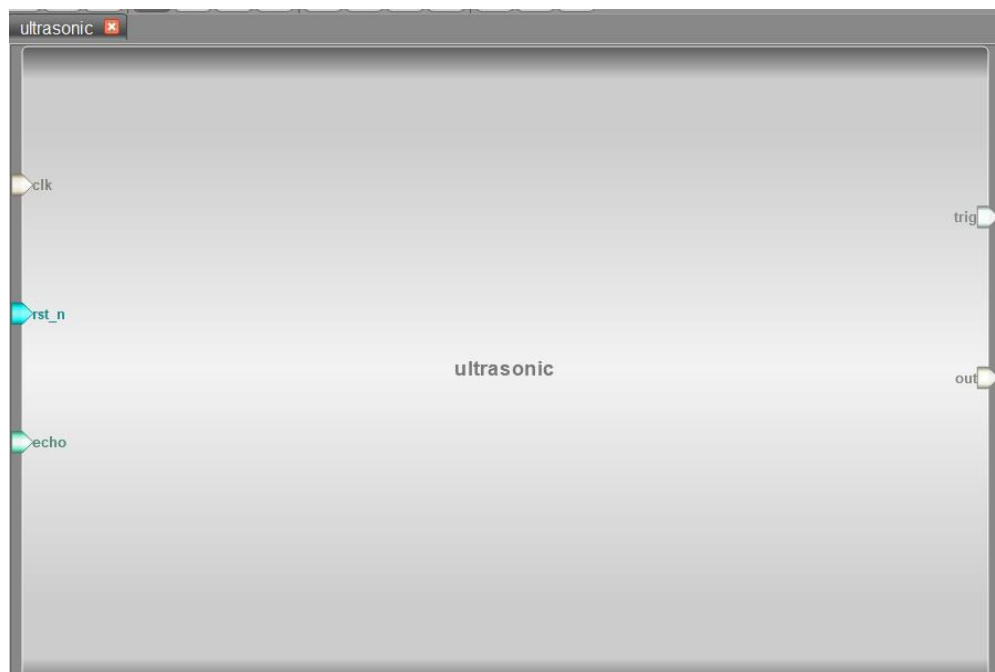


图 6.1 ultrasonic 模块

6.2 清洗装置

6.2.1 水泵简介



图 7.1 水泵模块

水泵模块是一种集成水泵和相关组件的独立装置，通常用于机械、工业、建筑和农业等领域的流体输送和处理。它们具有紧凑、便携和易于安装的特点，可以方便地集成到各种系统和设备中。

水泵模块通常包括以下组件：

1、水泵：水泵模块的核心部分是水泵本身，它负责产生流体压力并推动液体流动。根据具体应用需求，水泵可以是离心泵、轴流泵、混流泵、螺杆泵或柱塞泵等不同类型。

2、L298N 电机：水泵模块通常配备一台电动机，用于提供机械能源以驱动水泵的运转。电动机的功率和规格会根据水泵的需求进行选择。

3、控制系统：水泵模块可能包含一个控制系统，用于监测和控制水泵的运行。控制系统可以包括开关、按钮、传感器和自动控制装置，以确保水泵在正常范围内工作，并提供必要的保护功能。

4、进出口连接件：水泵模块通常具有进出口连接件，用于与外部系统或管道连接。进口连接件用于液体的吸入，出口连接件用于液体的排出。

5、阀门和管道：水泵模块可能包含一些阀门和管道，用于控制液体的流动方向、流量和压力。这些组件可以确保系统的稳定运行和流体的有效管理。

水泵模块的设计和配置可以根据具体的应用需求进行定制，以满足不同场景下的流体传输和处理要求。它们提供了便捷、可靠的解决方案，广泛应用于许多领域的流体系统中。

6.3 驱动模块

6.3.1 L298N 电机驱动模块+水泵模块（清洗装置）简介

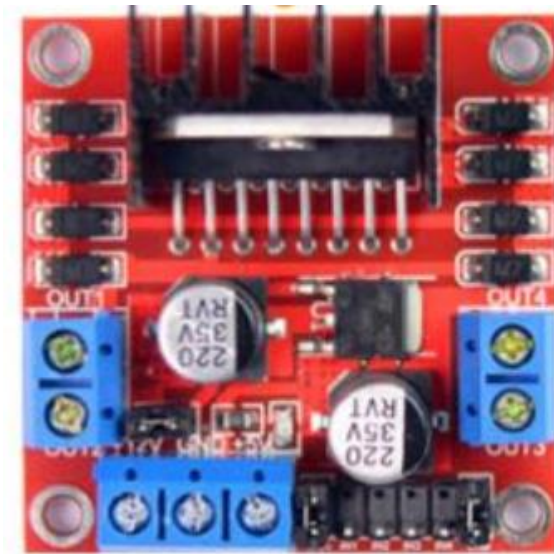


图 7.2.1 L298N

采用专用芯片 L298N 作为电机驱动芯片。L298N 是一个具有高电压大电流的全桥驱动芯片，它相应频率高，一片 L298N 可以分别控制两个直流电机，而且还带有控制使能端。用该芯片作为电机驱动，操作方便，稳定性好，性能优良。且由 L298N 结合单片机可实现对小车速度的精确控制。这种调速方式有调速特性优良、调整平滑、调速范围广、过载能力大，能承受频繁的负载冲击，还可以实现频繁的无级快速启动、制动和反转等优点。

L298N 电机驱动模块是一种常用的电机控制模块，可用于控制直流电机或步进电机。它具有高功率输出和双 H 桥驱动器，能够提供足够的电流和电压来驱动电机。

水泵模块是一种用于水泵控制的模块，通常用于控制水泵的运行和停止。它可以与 L298N 电机驱动模块结合使用，以实现对手泵的控制。

结合 L298N 电机驱动模块和水泵模块，可以构建一个清洗装置，其工作原理如下：

1、电源供电：将电源连接到 L298N 电机驱动模块和水泵模块，以提供所需的电压和电流。

2、连接电机：将水泵连接到 L298N 电机驱动模块的输出端口。L298N 电机驱动模块通常具有两个 H 桥，可以控制两个电机。在这种情况下，一个 H 桥可以用于控制水泵的正向运转，另一个 H 桥可以用于控制水泵的反向运转。

3、控制信号：使用控制信号来控制 L298N 电机驱动模块。通过设置控制信号的状态和电平，可以控制水泵的启停、正反转等操作。控制信号可以通过微控制器、单片机或其他控制设备产生。

4、清洗操作：根据需要，通过控制 L298N 电机驱动模块和水泵模块，可以启动水泵进行清洗操作。可以调整电机的转速和运行时间，以满足清洗装置的具体要求。

通过结合 L298N 电机驱动模块和水泵模块，清洗装置可以实现对水泵的灵活控制。这种组合可以广泛应用于各种需要水泵控制的场景。

6.3.2 L298N 电机驱动模块+清洗模块的控制程序设计

我们的水泵模块在工业锅炉内部检测机器人中起到关键作用。为了实现精确的水泵控制和稳定的电机运行，我们采用了 L298N 电机驱动模块。

L298N 电机驱动模块是一种常用的双 H 桥电机驱动器，具备强大的电流输出能力。它可以提供足够的电流和电压，以驱动水泵模块的电机，确保水泵正常运行并提供所需的水流量。

同时，L298N 模块采用双 H 桥设计，可以实现电机的正转、反转和制动功能。这使得机器人可以根据需要改变水泵的旋转方向，实现抽水和出水的控制。通过控制 L298N 模块的输入信号，机器人能够精确控制水泵的功率输出、旋转方向和转速。

此外，L298N 电机驱动模块还支持脉冲宽度调制（PWM）技术，通过调节 PWM 信号的占空比，可以精确控制水泵的转速。这样机器人可以根据需要调整水泵的运行速度，从而控制水流的流量和强度。

通过将 L298N 电机驱动模块与水泵模块结合使用，我们能够实现对水泵的精确控制和稳定运行。机器人可以通过控制 L298N 模块的输入信号，改变水泵的功率输出、旋转方向和转速，从而实现抽水和出水的效果。

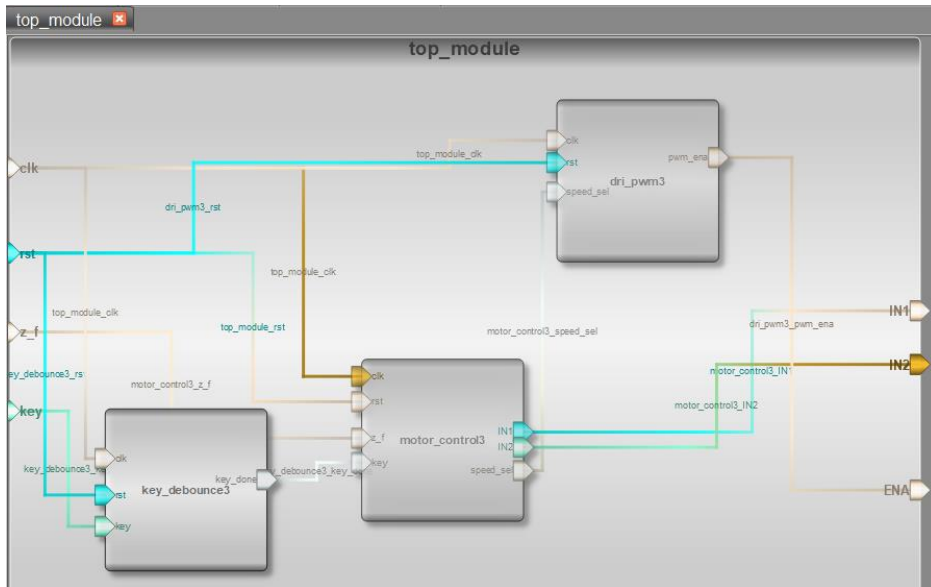


图 6.2.2 水泵模块

七、系统整合与调试（Integration & Test）

7.1 系统架构的整合

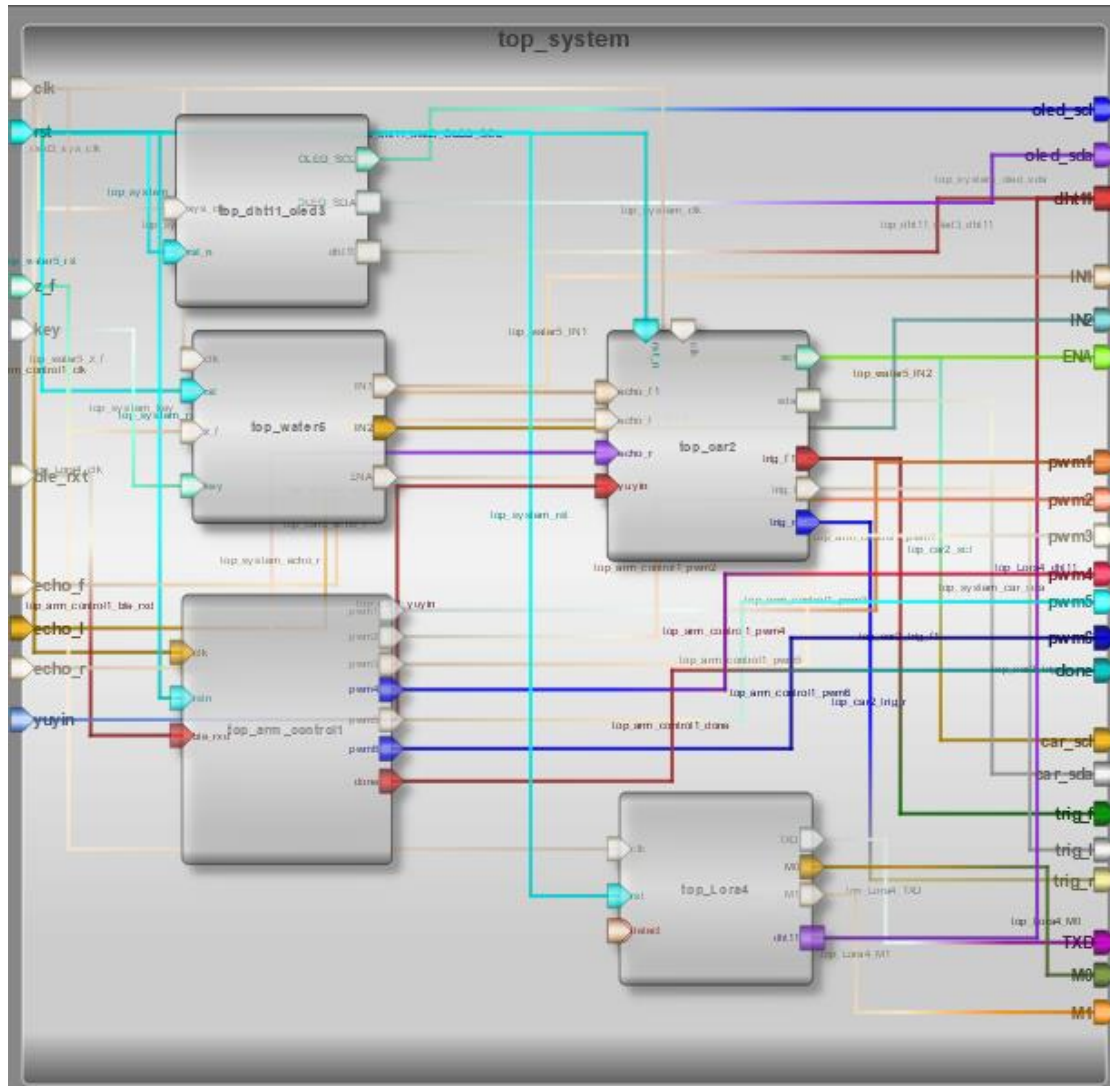


图 7.1 FPGA 硬件系统整体架构图

7.2 多传感器分模块 FPGA 上板验证

7.2.1 超声波避障模块 test 仿真

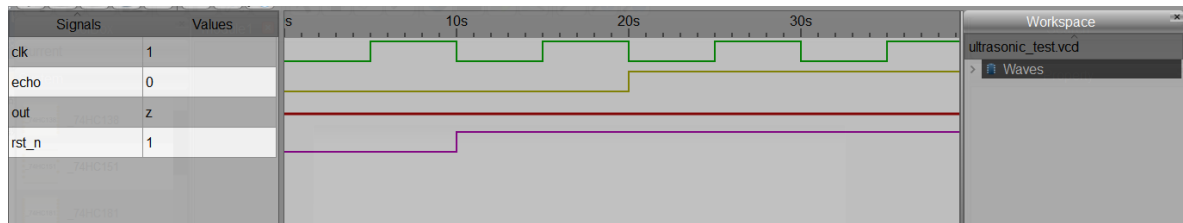


图 7.2.1 超声波模块 Robei EDA 仿真图

7.2.2 小车模块 test 仿真

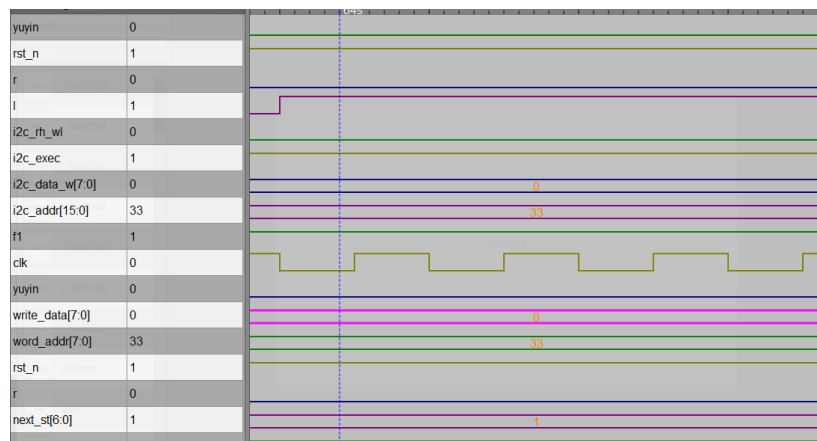


图 7.2.2 小车 Robei EDA 仿真图

7.2.3 机械臂 test 仿真

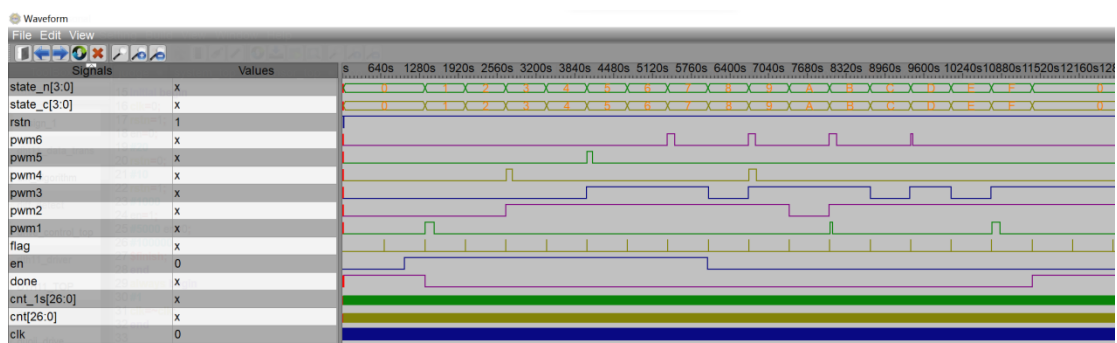


图 7.2.3 机械臂 Robei EDA 仿真图

7.2.4 小车运动测试：

经测试收到语音指令之后，小车会启动，并且通过超声波模块，经过算法之后拥有相应避障功能。



图 7.2.4 小车运动测试图

7.2.5 机械臂抓取测试：

经测试，在收到上位机信号后，会进行相应的动作，对目标物体进行抓取、清理。

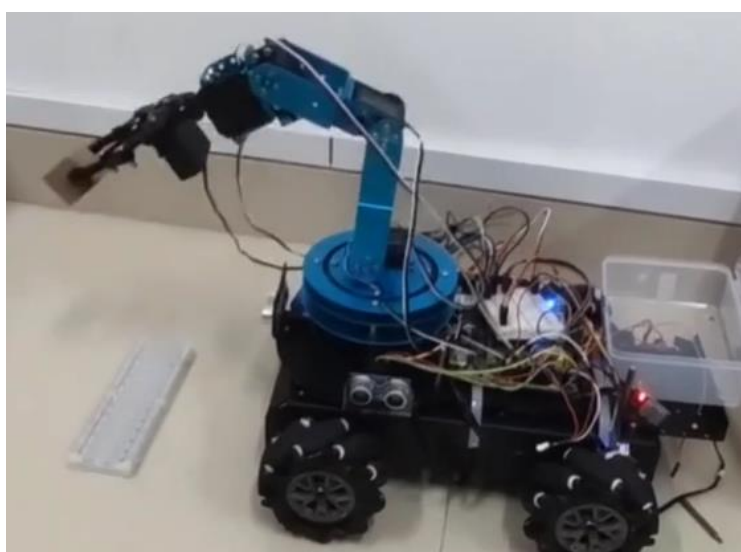


图 7.2.5 机械臂抓取测试图

7.2.6 dht11 显示模块测试：

经测试，oled 屏幕上可以成功显示当时环境的温湿度，并且 1s 后会刷新一次数据。



八、未来发展与提升 (Future Work)

对于本项目未来的发展与提升，我们打算主要从这几方面进行：

1. 算法优化：随着时间的推移和经验的积累，我们可以对机器人的算法进行优化和改进，以提高其在锅炉内部的导航、避障、部件检测和维护操作等方面的准确性和效率。通过运用机器学习和深度学习等技术，我们能够增强机器人在复杂环境中的适应能力和智能化水平。
2. 增强现实（AR）技术应用：将增强现实技术与机器人相结合，能够为操作人员提供更直观、实时的锅炉内部状态信息。借助 AR 眼镜或其他设备，操作人员可以在真实场景中观察到虚拟的温度、压力等数据，从而更便捷地进行监控和维护工作。
3. 自主学习与自适应能力：机器人能够通过自主学习和感知技术不断提升对锅炉内部状态的理解和识别能力。它能够根据实际运行情况自主地调整检测和维护策略，以适应不同的工作场景和锅炉类型，提高工作的灵活性和适应性。
4. 与云平台的连接：机器人可以通过与云平台的连接，将采集到的数据上传至云端进行存储和分析。通过云端的数据处理和大数据分析，我们能够实现对多个锅炉的集中监控和故障预测，从而提高维护的整体效率和可靠性。
5. 其他传感器和模块的应用：除了已经搭载的传感器和模块，根据实际需求，我们可以增加其他类型的传感器和模块。例如，振动传感器可用于检测锅炉内部零部件的损坏程度，气体传感器可用于检测燃烧排放物等。这些传感器的应用可以进一步增强机器人的检测能力和故障诊断能力。

九、总结 (Conclusion)

参加 Robei EDA 全国集成电路大赛让我们获得了宝贵的经验和持续的成长。在这个比赛中，我们深刻感受到了团队合作和激烈竞争的氛围，与其他优秀团队的交流和竞争激发了我们的学习热情。虽然我们的算法能力可能不是最突出的部分，但我们在其他方面取得了显著的进步，并展示出了我们的潜力和努力。参赛期间，我们团队的专业知识得到了全面提升。通过深入研究和实践，我们对集成电路设计与开发的流程和技术有了更深入的了解。我们通过团队合作，有效地分工协作，充分发挥每个成员的优势，共同完成了项目。这次比赛不仅锻炼了我们的团队协作能力，还提高了我们的沟通和解决问题的能力。

我们的项目虽然在算法能力上可能有所欠缺，但我们通过其他方面的创新和努力展示了我们的潜力。我们可能在设计思路上有独特的创新点，通过巧妙的解决方案解决了现有方案中的难题。我们的目标是持续进步，通过不断学习和积累经验，将我们的项目能力不断提高。

我们对未来充满希冀，相信我们的团队在集成电路设计领域有着巨大的潜力。我们将这次经历视为成长的契机，对未来抱有乐观的态度。我们将继续努力学习、提升技能，追求卓越。我们坚信，通过持续的努力和团队合作，我们将能够取得出色的成绩，并在该相关的领域实现更大的突破。

十、参考资料 (References)

- [1] Guosheng Wu, “Simplified FPGA Design with Robei”, Worldcomp proceedings of Intern. conf. Computer design, Las Vegas Nevada USA, pp.109-112, July 16-19, 2012.
- [2] 《7 天搞定 FPGA-Robei 与 Xilinx 实战》：2016 年电子工业出版社出版，ISBN：978-7-121-29310-9.
- [3] Altera. (2016, March). “Cyclone IV FPGA Device Family Overview” [online]. Available: https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv51001.pdf [May 3, 2016]
- [4] 叶梦君, 黄仰来, 雷改惠. 基于 OV7725 摄像头智能车系统的设计与实现[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(02): 82-87.
- [5] 张津京, 崔涛, 裴东, 王全洲, 芦艳. 基于 FPGA 的 4 自由度机械臂控制系统设计及实现[J]. 机械设计, 2017, 34(07): 62-66.
- [6] 李远重. 基于 FPGA 的 5 自由度工业机械臂控制系统研究[D]. 湖北工业大学, 2014.
- [7] 陈博翁, 范传康, 贺骥. 基于麦克纳姆轮的全方位移动平台关键技术研究[J]. 东方电气评论, 2013, 27(04): 7-11. DOI: 10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2013.04.002.
- [8] 朱艳杰. 基于麦克纳姆轮全向车设计与性能研究[D]. 燕山大学, 2016.
- [9] 马江. 六自由度机械臂控制系统设计与运动学仿真[D]. 北京工业大学, 2009.
- [10] 徐鑫秀, 赵士原. 基于 DHT11 传感器的机房温湿度控制系统设计[J]. 现代信息科技, 2020, 4(14): 57-59. DOI: 10.19850/j.cnki.2096-4706.2020.14.016.