

## 摘要

本文分析了 PID 算法的背景、意义以及 PID 算法的发展状况和未来展望。通过构建一个旋转倒立摆来深入学习、研究 PID 算法在闭环控制系统中起到的作用。通过观察 PID 对倒立摆摆杆角度的影响来迅速加深对 PID 的理解。在分析完一环 PID 之后再深入到双环 PID 控制，由浅入深地分析 PID 在没有人工干预的情况下对闭环旋转倒立摆的影响。

对于旋转倒立摆系统方面。本文采用了精度非常高的 WDD35D-4 精密导电塑料电位器、最高工作频率为 72Hz 且具备 11 个定时器的 STM32F1 系列单片机为控制单元、带有编码器的直流减速电机。除了以上基本的硬件外。为了更直观地观察 PID 算法对倒立摆系统的影响以及整定 PID 参数。加入了 OLED 显示屏来实时显示 PID 的参数，且可以实时调整。

**关键字：** PID STM32 单片机 旋转倒立摆 OLED 角位置传感器 直流电机



## **Abstract**

This article analyzes the background and significance of the PID algorithm, as well as the development and future prospects of the PID algorithm. By constructing a rotating inverted pendulum to study in depth and study the role of PID algorithm in closed-loop control system. By observing the influence of PID on the angle of the pendulum of the inverted pendulum, we can quickly deepen our understanding of PID. After analysing the first-loop PID, we will go into the double-loop PID control, and analyze the influence of PID on the closed-loop rotating inverted pendulum without human intervention.

For the rotating inverted pendulum system. In this paper, the very high precision WDD35D-4 precision conductive plastic potentiometer, the highest operating frequency of 72Hz and STM32F1 series of single-chip microcomputers with 11 timers are used as the control unit and DC gear motor with encoder. In addition to the above basic hardware. In order to more intuitively observe the influence of the PID algorithm on the inverted pendulum system and set PID parameters. An OLED display is added to display PID parameters in real time and can also be adjusted in real time.

**Keywords:** PID STM32 microcontroller rotating inverted pendulum OLED angular position sensor DC motor.



# 目录

<b>第一章：绪论</b> .....	1
1.1 课题的背景与意义.....	1
1.2 选题研究现状和展望.....	1
<b>第二章：整体方案设计</b> .....	2
2.1 系统需求分析.....	2
2.2 系统整体框架 .....	3
<b>第三章：硬件电路设计</b> .....	4
3.1 系统原理图.....	4
3.2 主控芯片 .....	8
3.3 直流电机 .....	9
3.3.1 直流电机原理.....	9
3.3.2 内置编码器原理.....	9
3.3.3 单片机采集编码器数据.....	10
3.3.4 驱动模块 TB6612FNG.....	10
3.4 角位移传感器 .....	11
3.5 OLED 液晶显示器.....	11
<b>第四章：软件系统设计</b> .....	12
4.1 软件总体框架.....	12
4.2 各个模块的驱动代码.....	13
4.2.1 电机驱动的编写逻辑 .....	13
4.2.2 OLED 液晶显示器驱动的编写逻辑.....	14
4.2.3 角位移传感器驱动逻辑编写 .....	14
4.3 PID 算法 .....	15
4.4 一阶低通滤波算法。 .....	16
4.4. 起摆算法 .....	16
<b>第五章：软件调试与系统测试</b> .....	17

---

5.1 编译与调试.....	17
5.2 稳定性测试.....	19
5.2.1 按键测试.....	19
5.2.2 系统稳定性测试.....	19
<b>第六章 结语</b> .....	<b>20</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>21</b>
<b>致谢</b> .....	<b>22</b>
<b>附录</b> .....	<b>23</b>

# 第一章：绪论

## 1.1 课题的背景与意义

本文的倒立摆系统主要应用的是 PID 闭环控制。在早期的控制系统中，PID 控制也是唯一的自动控制。时至今日，计算机发展迅猛，自动控制理论方面也更随着潮流取得了非常巨大的进步，为现在的工业自动化奠定了扎实的基础，虽然其他的控制算法层出不穷，但是 PID 算法由于其简单易学，容易被基层技术人员掌握，企业容易培养相关的人才、适应性强，可以应用在各种场景中。据统计，PID 控制算法仍然是工业控制中使用最广泛的控制算法之一，这就使得学习 PID 算法非常具有实用价值。所以研究 PID 算法不仅可以锻炼算法思维，还可以为日后找工作增加优势。

## 1.2 选题研究现状和展望

自动控制系统的早期应用可以追溯到 2000 多年前的中国汉代古埃及的水钟控制和南向车辆控制，但当时还没有建立自动控制的理论体系。PID 的出现是在 30 年代末，发展到现在已经七十年的历史了，其算法简单易学，可以很好地在企业中推广，企业不需要花费多大的代价就可以培养一批有经验的工人，而不用花高薪聘请算法人才调试。伴随着计算机技术的飞速发展。PID 控制也发生了巨大的转变。在基础 PID 算法中演变出更贴合应用场景的控制算法，例如：非线性、最优控制、预测控制、智能控制。

Simulatie 仿真的出现也给 PID 算法带来了巨大的发展空间。在做项目之前，进行一次模拟仿真不仅仅可以给工程一个指导作用，还为 PID 参数整定提供了非常大的便利。

目前的世界各地的发展趋势越来越机械化，智能化，减少了诸如生产线、扫地、洗完等等，生活中经常可以看到。机械性的工作被大量的机械化。而机械化的发展又离不开控制系统。PID 作为应用场景广，简单易学的特点。将来必定会拥有更为广阔的舞台。在未来的市场中大放异彩。

## 第二章：整体方案设计

### 2.1 系统需求分析

首先是动力，系统需要一个可以产生动力的装置，而且可以控制这个动力装置速度的快慢。这个动力装置控制着水平旋转臂的旋转，进而带动摆杆摇摆起来，摆杆摇摆起来后我们需要测量出摆杆的位置所以需要有一个电位器。为了控制双环 PID，除了需要知道水平旋转臂的速度以外，还需要知道水平旋转臂的位置，所以电机最好是带有编码器的。除了以上的器件以外，我们还需要一个支撑的框架，大体如图 2-1 所示。除了这些必须品以外，为了更好地显示数据以方便调试而加入一个 0.96 英寸 OLED 显示屏。当然根据查找资料知道，旋转倒立摆普遍会存在一个问题：就是水平旋转臂旋转起来的时候很容易使连接电位器的线绕起来，所以为了防止出现这个问题。特意加了一个导线环。

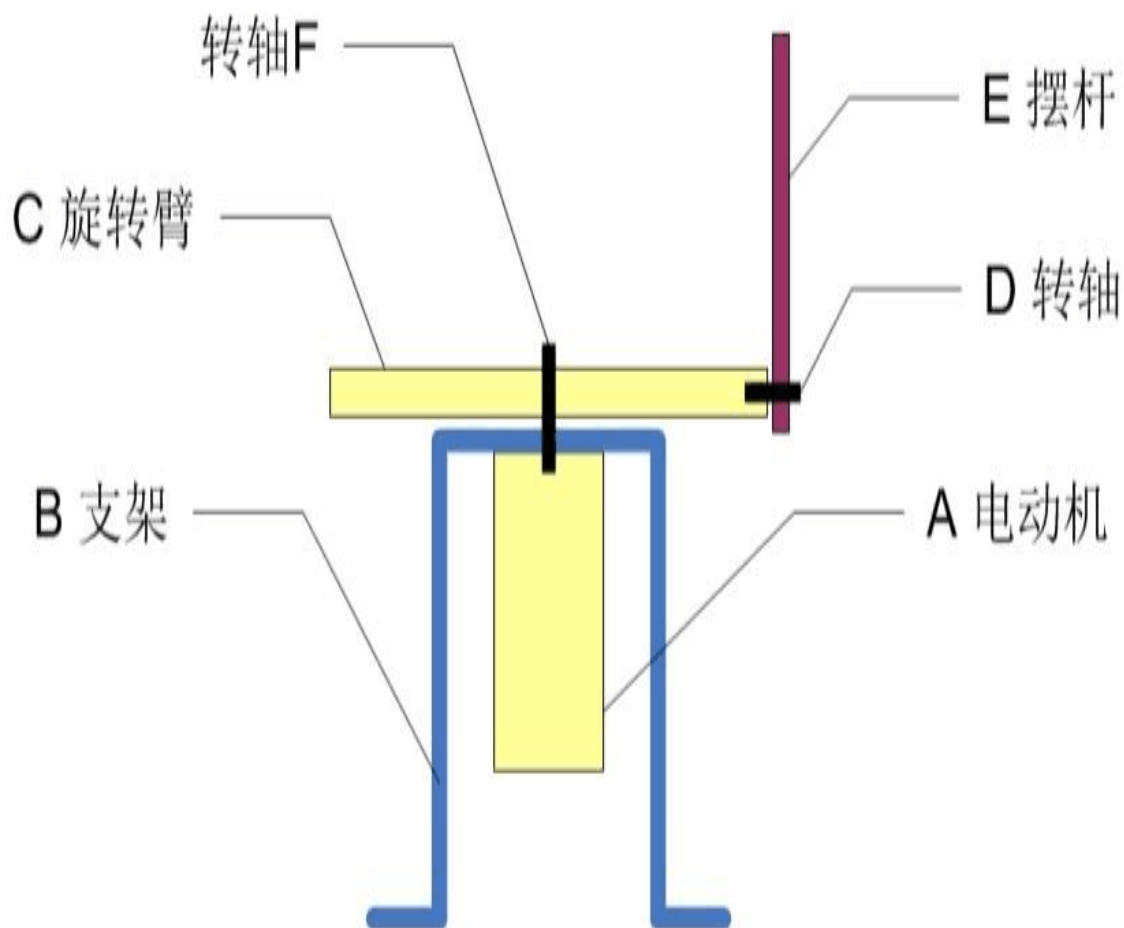


图 2-1 基本的倒立摆框架



## 2.2 系统整体框架

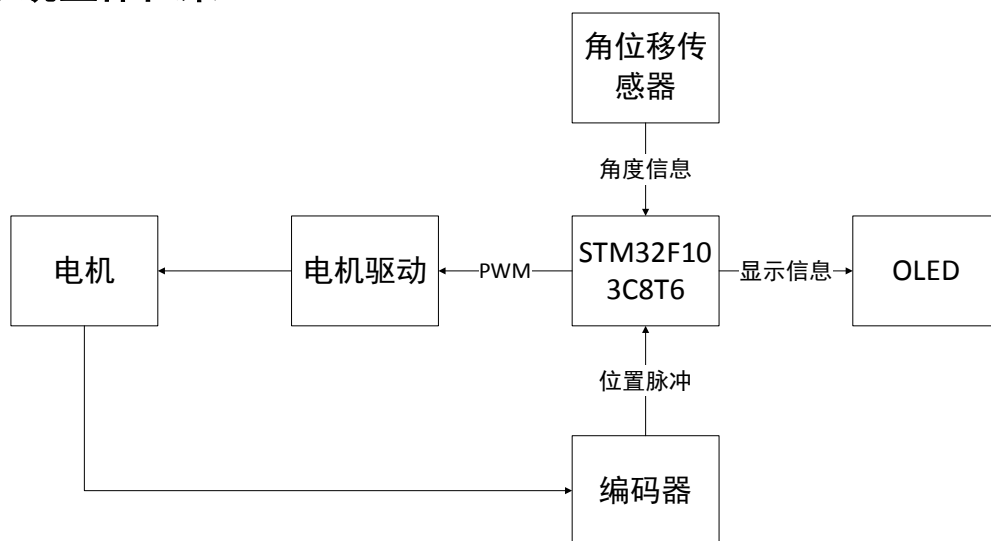


图 2-2 硬件系统框架

系统的初步设计图如图 2-2 所示，以 STM32F103C8T6 为核心控制器，控制电机转动的信息，电机自带的编码器反馈电机的位置信息给 STM32，角位移传感器反馈角度信息给 STM32，最后 STM32 将需要显示的调试信息显示在 OLED 液晶显示器上面。以上为一些信息的流向。这些信息基本都为 PID 这个核心服务。对于硬件，需要尽量低保持对称性、统一性、平衡性、减少摩擦等。尽可能地往比较理想的方向搭建。这样才能比较好的整定 PID 的参数。

### 第三章：硬件电路设计

#### 3.1 系统原理图

整个倒立摆系统主要分开为两个板子总图放在附录二，下面将介绍每个部件的原理图。

如图 3-1 为 STM32 单片机的最小系统原理图，左下角的按键为单片机的复位按键

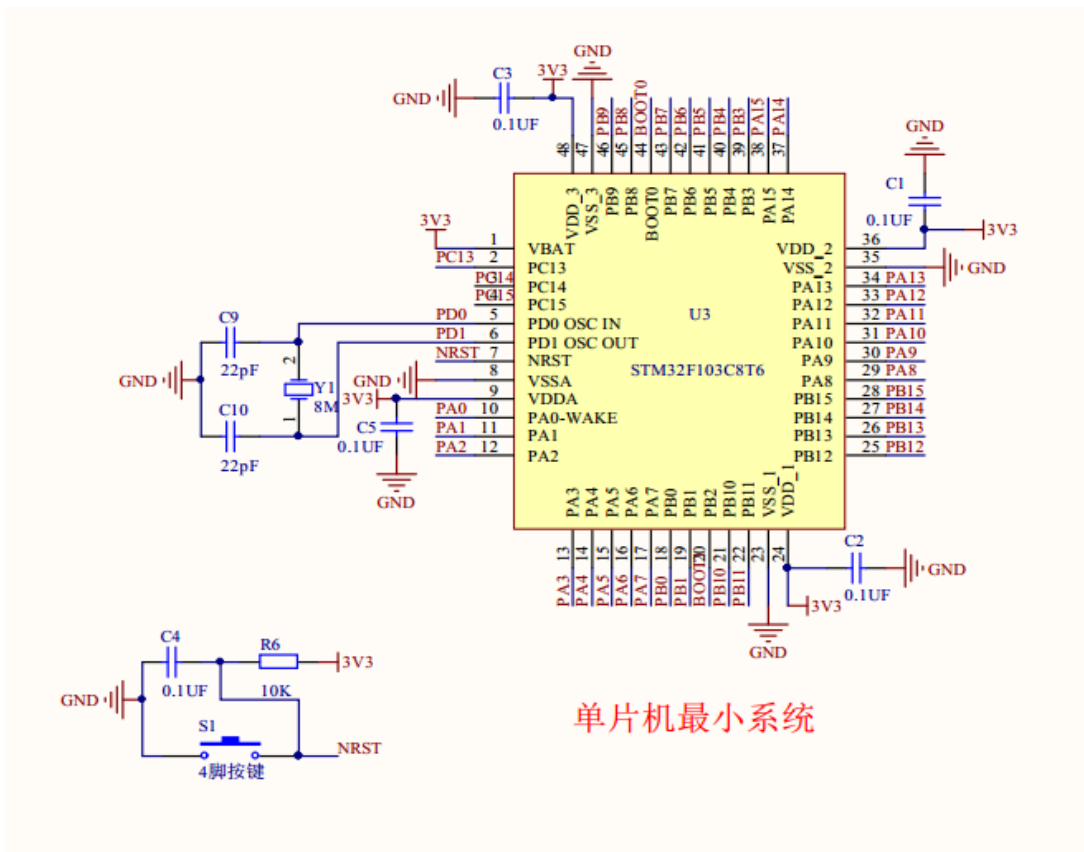


图 3-1 SMT32 单片机的最小系统

如图 3-2 为 STM32 单片机的启动区域选择电路

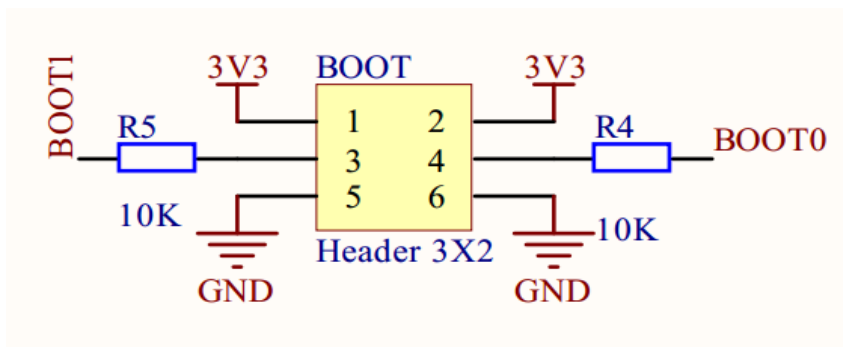


图 3-2 启动区域选择电路

如图 3-3 所示为电路的 5V 转 3.3V 的电路图

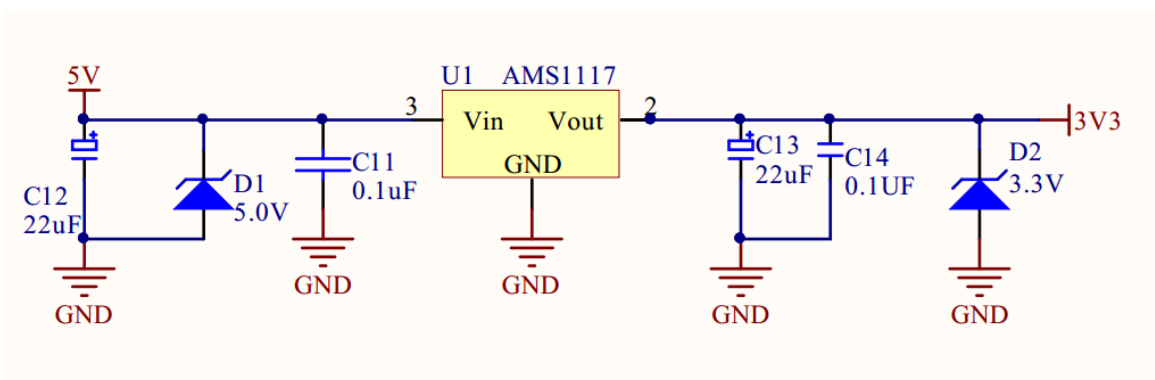


图 3-3 5V 转 3.3V

如图 3-4 为 USB 转 TTL 电平电路，主要用于单片机与电脑串口的电平转换

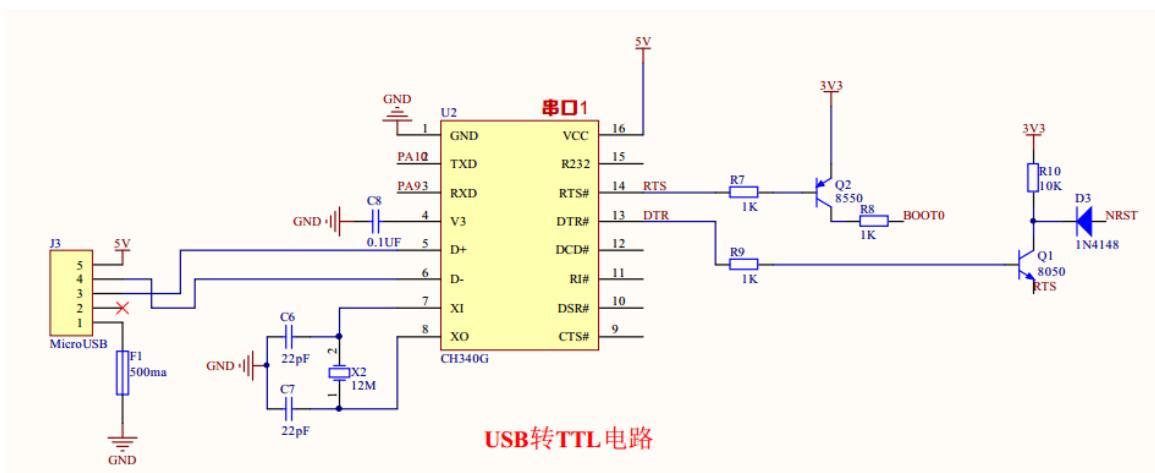


图 3-4 USB 转 TTL

如图 3-5 所示为按键电路，电阻为上拉电阻，主要是保持引脚的输入为高电平，但按键按下去的时候电路短路，引脚相当于接地，所以输入引脚的相当于低电平。

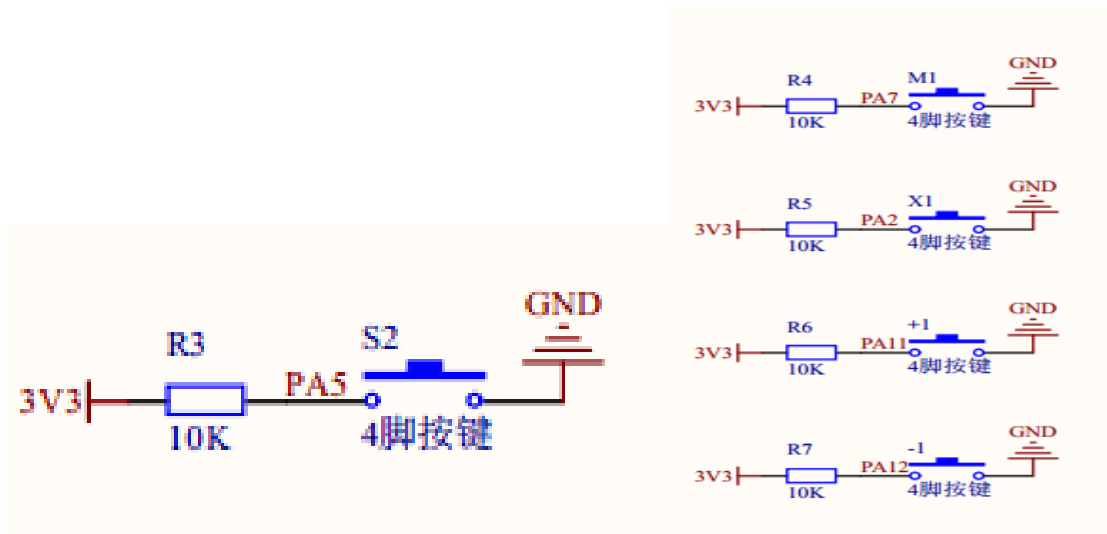


图 3-5 按键电路

如图 3-6 为 LED 等电路，在 LED 与引脚或者 LED 与 GND 之间的电阻为限流电阻，主要的作用是防止电流过大。

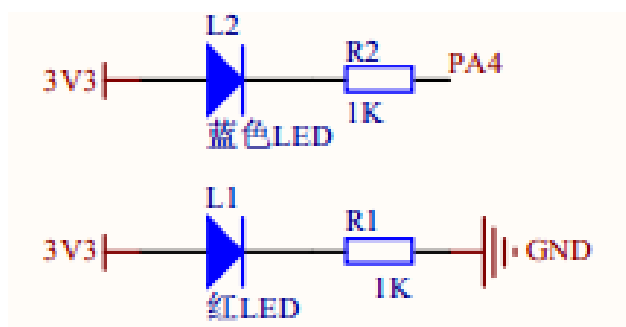


图 3-6 LED 电路

如图 3-7 为 ST-LINK V2 的仿真调试接口

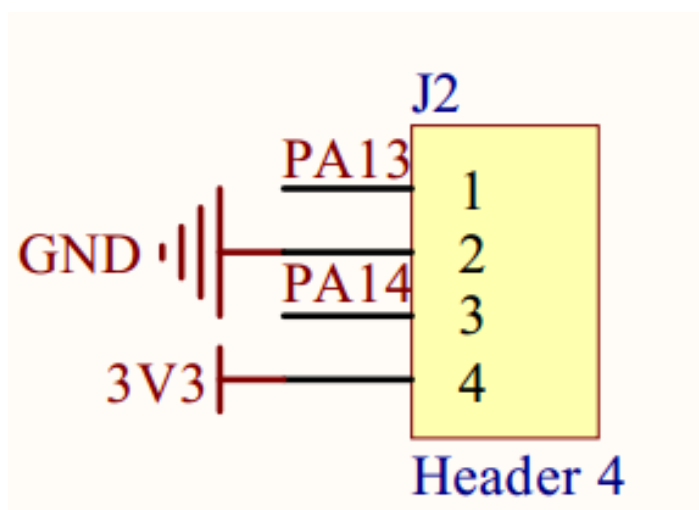


图 3-7 接口

如图 3-8 位 OLED 显示器接口

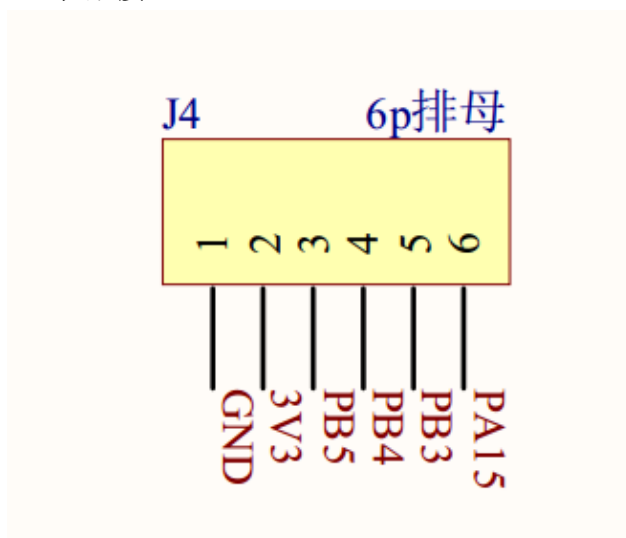


图 3-8 接口

如图 3-9 所示为角位移传感器接口

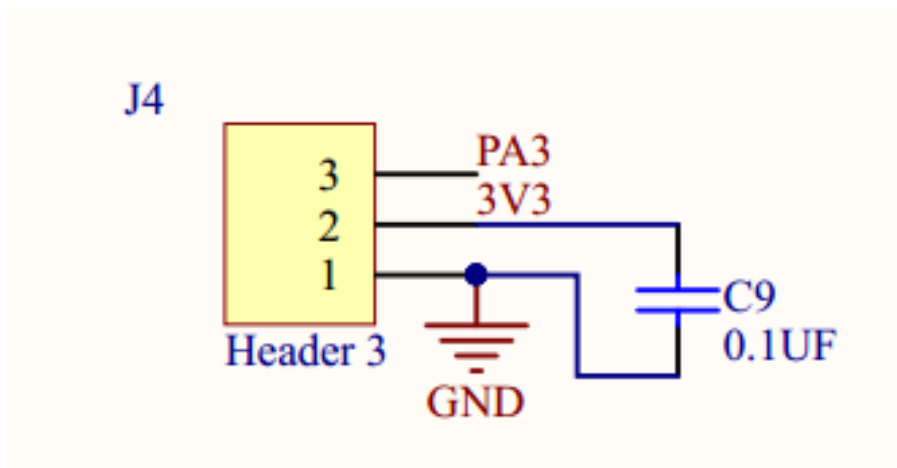


图 3-9 接口

如图 3-10 为电机与编码器接口电路。

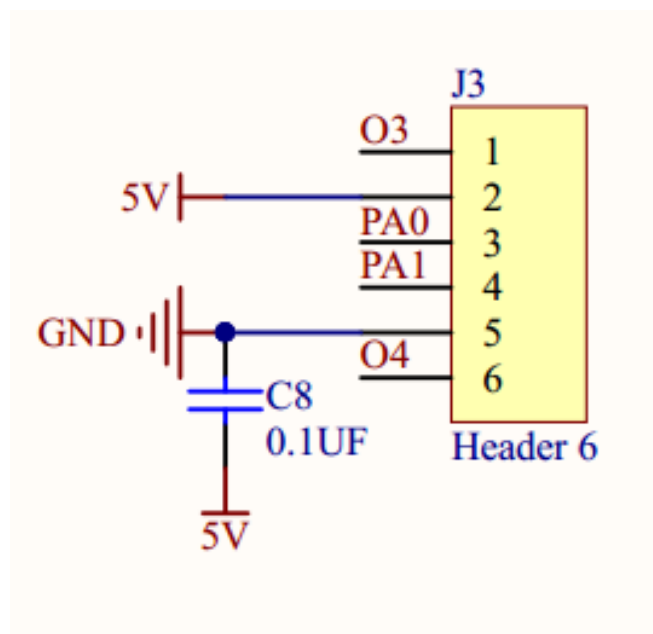


图 3-10 电机与编码器接口

图 3-11 为电源管理模块电路

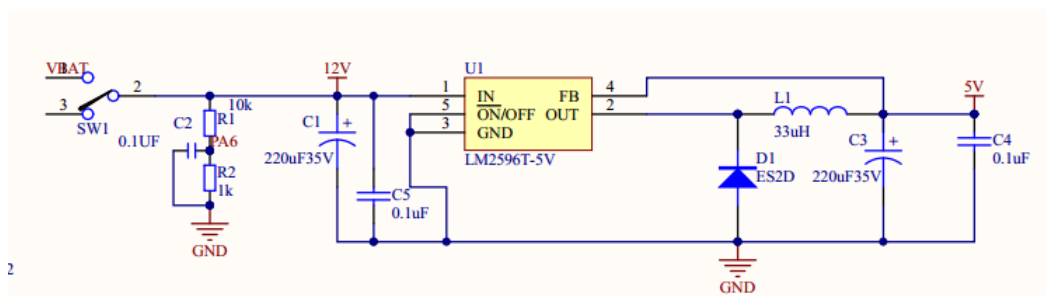


图 3-11 电源管理模块电路

如图 3-12 为电机驱动电路

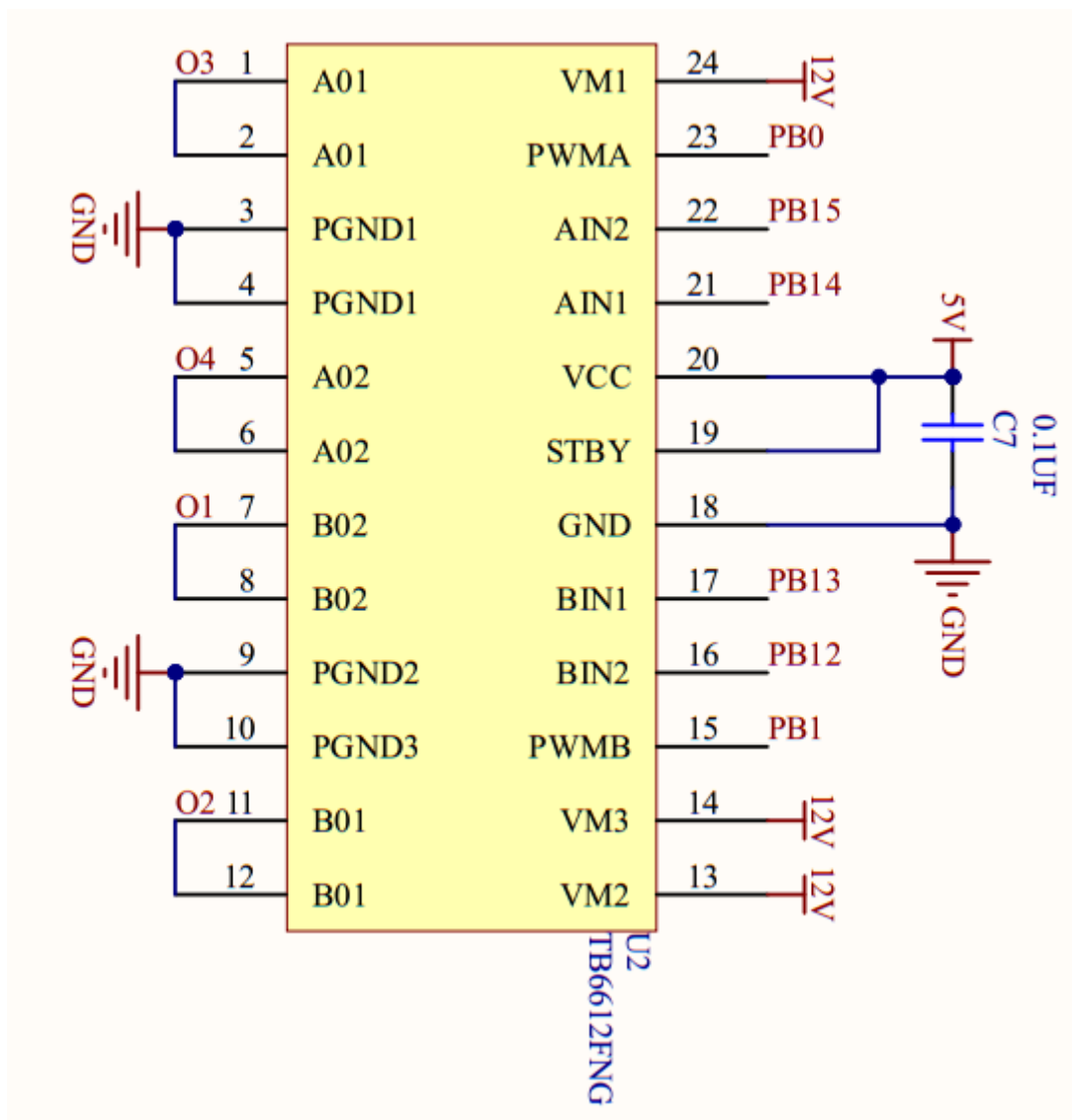


图 3-12 电机驱动电路

以上为各个电路的介绍。

### 3.2 主控芯片

本文的旋转倒立摆系统采用的是 STM32f103 主芯片，核心是 ARM32 位 Cortex-M3 高性能中央处理器，工作频率高达 72 Mhz。该芯片具有三种低功耗模式，包括睡眠模式，其中所有外围设备仅在 CPU 停止运行时才连续运行，而只有在发生中断或事件时才启动 CPU。停止模式将寄存器和静态随机存取存储器的内容保持在最低功耗。待机模式，以实现最低功耗，关闭内部稳压器，从而断开 1.8V 电路部分。同时，当 STM32f103 进入停止或待机状态时，TRC, iwdg 和相关的时钟源不会停止，而电池电压仅由实时时钟 RTC 和备用寄存器供电效率并以最低的功耗完成任务。该

芯片具有最大的集成度，在线复位电路，具有唤醒功能的低压检测，稳压器，精密的内部 RC 振荡器，与 5V 兼容的 IO 引脚等，为启动器提供了灵活性。

除了与突出的简单结构和制造工艺相关的节能功能外，STM32f103 系列还提供了其他功能，使开发人员能够提高效率和应用设计的可行性，并且 STM32f103 还设置了两种可调试模式，包括串行调试 swds 和接口，可以通过 ST-Link 或 J-Link 进行调试，并具有多达 112 个快速 IO 端口，用于数字和模拟输入和输出。多达 11 个定时器，包括 4 个 6 位定时器，2 个 16 位 6 通道高级控制定时器，2 个看门狗定时器（独立的看门狗和窗口看门狗），Systick 定时器，2 个用于驱动 DAC 的 6 位基本定时器，以及多达 13 个通信接口，包括 2 个 I2C 端口，5 个 usart 端口，3 个 SPI 端口，CAN 端口，usb2.0 全速端口<sup>[13]</sup>，SDIO 端口。

### 3.3 直流电机

#### 3.3.1 直流电机原理

图 3-13 为直流电机的简单模型图。在直流电机的所有组成部分中，固定部分有磁铁，这里称作主磁极；固定部分还有电刷。转动部分有环形铁心和绕在环形铁心上的绕组。<sup>[14]</sup>如下图 3-13 所示(图中的 2 个小圆圈是为了方便表示该位置上的导体电势或电流的方向而设置的)

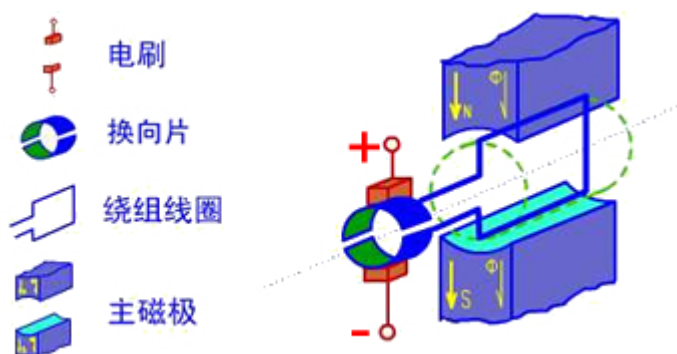


图 3-13 直流电机工作原理图

电机的原理主要是高中的物理知识，运动的电荷在磁场中受到的力称为洛伦兹力。如图 3-13 所示，里面装有主磁极 N、S，在电刷的+和-中分别添加电压后，绕组线圈有电流流过，有电流流过意味着有电荷运动，而绕组线圈又是放置在主磁极的 N、S 之间的，所以收到又收到磁场力。根据运动的电荷在磁场中会受到洛伦兹力，所以在受力的作用下，带动电机转动。

#### 3.3.2 内置编码器原理

霍尔编码器是一种通过磁电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器。霍尔编码器是由霍尔码盘和霍尔元件组成。霍尔码盘是在一定直径

的圆板上等分地布置有不同的磁极。霍尔码盘与电动机同轴，电动机旋转时，霍尔元件检测输出若干脉冲信号，为判断转向，一般输出两组存在一定相位差的方波信号。可以看到两种原理的编码器目的都是获取 AB 相输出的方波信号。<sup>[15]</sup>下面图 3-14 是一个简单的示意图。

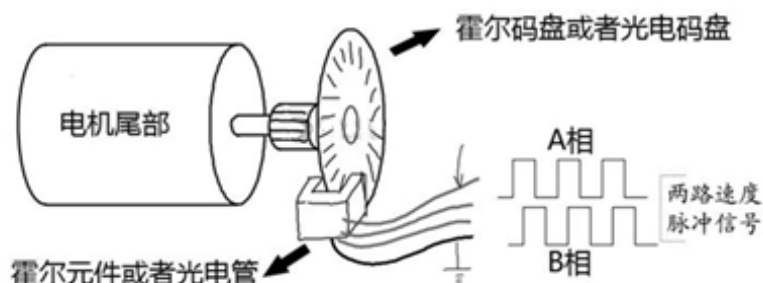


图 3-14 编码器工作原理图

### 3.3.3 单片机采集编码器数据

STM32 有专门读取编码器的功能，所以使得编码器使用起来非常方便，不用在用软件去读取然后编写软件处理。STM32 可以直接接到相应的接口上面去，然后配置好寄存器就可以直接读取。外部中断可以读取没有编码器接口的微控制器（例如 51 微控制器），例如将编码器 A 相输出连接到微控制器的外部中断输入端口，以便可以通过过渡沿触发中断，并且那么相应的外部中断在服务功能中，正向和负向由阶段 B 的电平决定。例如，当阶段 A 带有过渡沿时，如果阶段 B 为高电平，则认为它是正向，并且低水平被认为是反向的。STM32 微控制器通过定时器输入捕捉或 GPIO 引脚外部中断来检测边沿变化，以检测脉冲数。

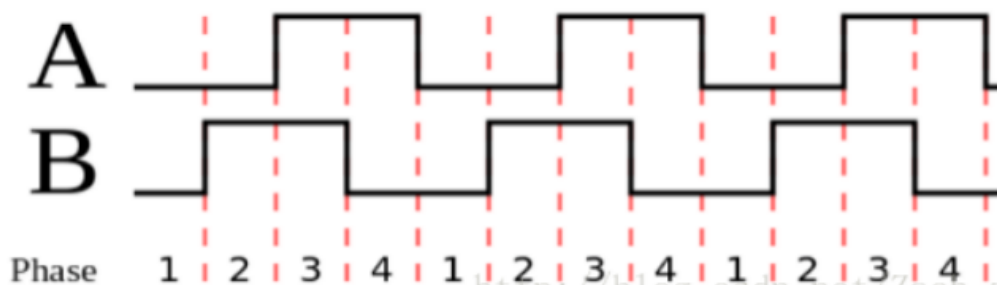


图 3-15 编码器倍频工作原理图

如图 3-15，A、B 两相正交信号，对 TI1 和 TI2 检测上升沿，那么同一段时间我们检测到 6 个上升沿。如果下降沿也检测，那么一共就是 12 个边沿跳变。每个实际来的脉冲会被检测 4 次，同样是  $12/4=3$  个脉冲，但是这样的话精度大大提高了。

### 3.3.4 驱动模块 TB6612FNG

TB6612FNG 具有高电流 MOSFET-H 桥结构和双通道电路输出，可同时驱动 2 个电机。尺寸小。对于 PWM 信号输入频率范围，高达 100 kHz



的频率足以满足我们的大多数需求。TB6612FNG 的主要参数如下：最大输入电压：VM = 15V 最大输出电流：Iout = 1.2A（平均）/3.2A（峰值）正向/反向/短路制动/停止功能模式内置过热保护和低压检测电路

其真值表如下表 3-1 所示

AIN1	0	1	0
AIN2	0	0	1
	停止	正转	反转

表 3-1 真值表

### 3.4 角位移传感器

导电塑料器电位器使用时按分压原理以电压输出或者转换电流输出与转轴转角或直线位移成高精度的线性关系，器优点是高分辨率、高精度、长寿命、高平滑性。可用作位置反馈，这也是我们可以用角位移传感器的原因，还有位置检测、电平调节等。一般用于紧密一起仪表、纺织、火车、飞机等领域中的制动控制、信息反馈还有伺服系统等场景之中。

电位器最主要的结构是由电阻元件、轴、电刷、盖等组成。另加数字显示器或者移变送位器，点信号通常引出采用接线柱形式。

角位移传感器的原理与电位器的原理基本一致。正负极接线分别接在电阻最大值的的两边，不分正负，可以随便接，中间一条为读取角位移传感器值的信号线。主要通过 STM32 单片的 ADC 功能测出其中的模拟量，再转换成数字量。

### 3.5 OLED 液晶显示器

OLED (Organic Light Emitting Display, 中文名有机发光显示器) 是指有机半导体材料和发光材料在电场驱动下，通过载流子注入和复合导致发光的现象。其原理是用 ITO 透明电极和金属电极分别作为器件的阳极和阴极，在一定电压驱动下，电子和空穴分别从阴极和阳极注入到电子和空穴传输层，电子和空穴分别经过电子和空穴传输层迁移到发光层，并在发光层中相遇，形成激子并使发光分子激发，后者经过辐射弛豫而发出可见光，具体结构原理图如图 3-16 所示。

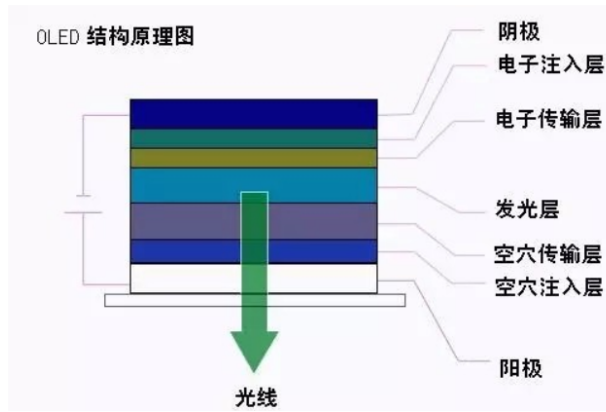


图 3-16 OLED 点阵扫描工作原理图

## 第四章： 软件系统设计

### 4.1 软件总体框架

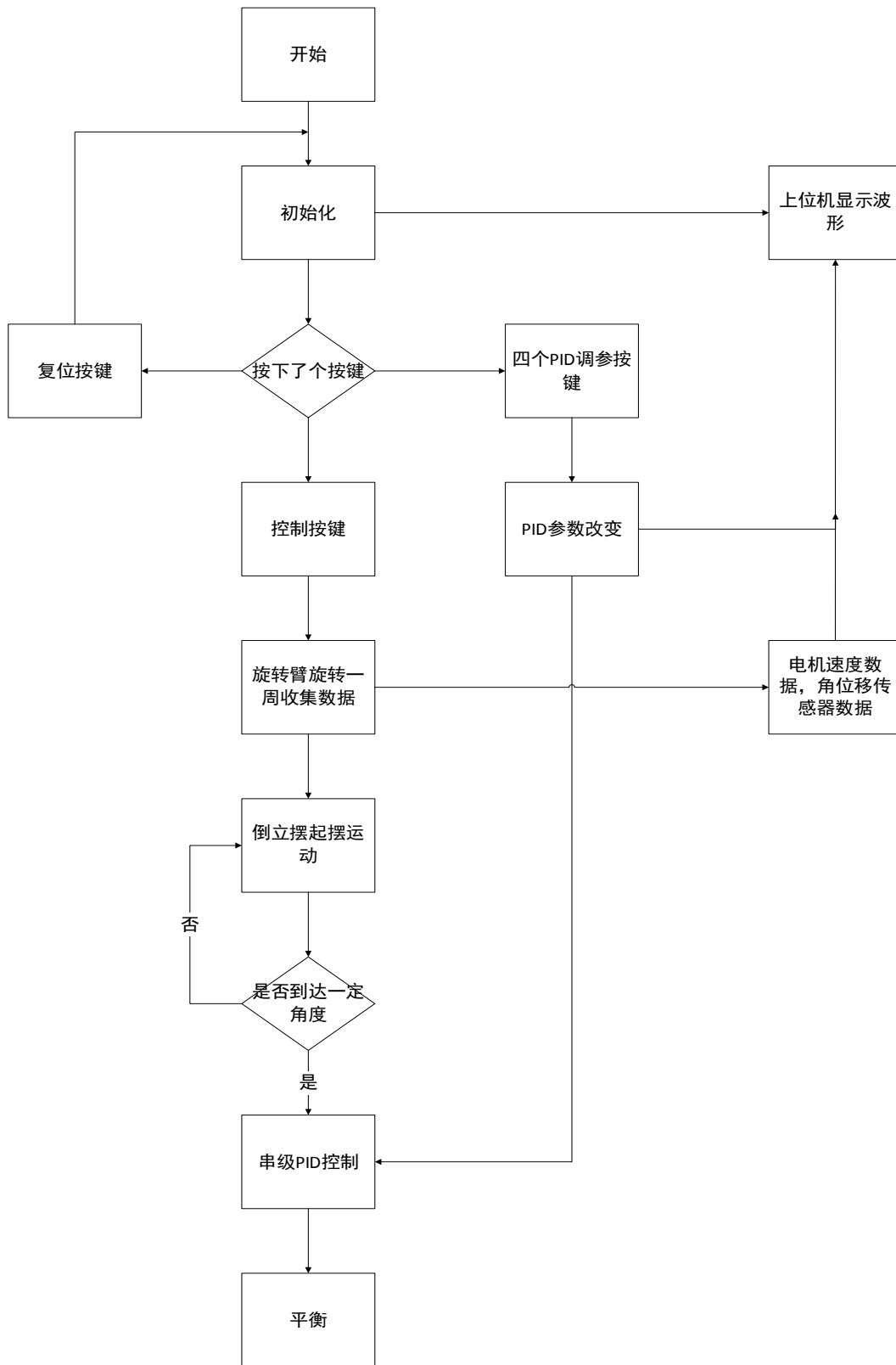


图 4-1 软件流程图



如上图所示 4-1，给 STM32 单片机供电之后，程序开始运行，单片机 STM32 显示初始化各个函数的驱动。具体的有：STM32 的系统时钟设置，延时函数的初始化。由于单片机的烧录接口兼容了 JTAG 还有 SWD 的接口，所以要提前选择好所用的烧录器，因为选用的是 ST-LINK V2 所以这里选择初始化 SWD 接口的函数。LED 等的初始化、中断功能初始化、OLED 液晶显示器初始化、串口初始化、PWM 初始化、角位移传感器初始化。编码器初始化最后还有定时器初始化。

代码的功能执行主要根据按键是否按下，还有是那个按键按下来触发的。如果初始化按键按下的话。系统将重新初始化各种函数。四个调节参数的按键。分别为：选择需要调节的参数，一个向上选，一个向下选。一个为选定参数的加，最后一个为选定参数的减。控制按键为主要按键。根据摆杆的位置不同实现不同的功能，如果摆杆的位置在平衡位置周围，则按下控制按键后为直接调用 PID 控制摆杆的平衡，如果摆杆的位置垂直向下，则先是调用起摆运动算法，当摆杆摇摆到一定的位置后才调用 PID 控制摆杆的平衡。而 OLED 液晶显示器主要是显示角度环的比例 P、角度环的微分 D、旋转臂位置环的比例 P、旋转臂位置环的比例 D，电压、ADC 采集的值、目标值、实时的位置值等 8 个数据。

## 4.2 各个模块的驱动代码

### 4.2.1 电机驱动的编写逻辑

电机的驱动程序是基于电机驱动模块 TB6612FNG 写的。根据 TB6612FNG 的说明书。TB6612FNG 有三个引脚与 STM32 线连接，分别是 PWM、AIN1、AIN2。AIN1、AIN2 主要是通过 STM32 输入的高低电平来控制电机的正反转。PWM 控制电机的转速。本系统设计采用的是 SM32 上专门的 PWM 模式，它的原理就是使用比较输出的方式，如图 4-2 所示

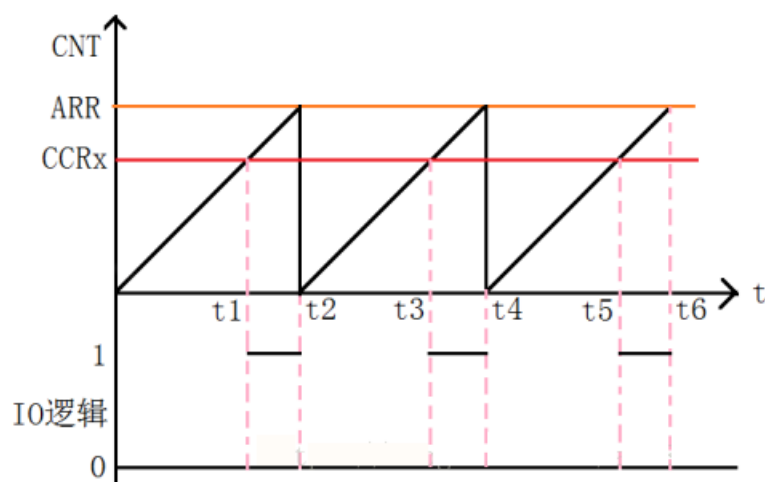


图 4-2 ADC 工作原理图

阅读 STM32 的 datasheet 可以知道：ARR 为自动重载寄存器，CCR 为捕获/比较寄存器，CNT 就是定时器的计数器，CNT 的值从 0 开始递增，使用 PWM 模式后，可以设置有效电平，以及 PWM 的模式。上图所示的是当 CNT 的值小于 CCRx 时，输出低电平，当 CNT 的值大于 CCRx 时，输出高点平，所以我们可以通过改变 ARR 的值来改变 PWM 的周期，改变 CCRx 的值来改变 PWM 的占空比，从而实现任意频率任意占空比的 PWM 波。

#### 4.2.2 OLED 液晶显示器驱动的编写逻辑

OLED 驱动主要涉及的是 STM32 的 IIC 协议问题。IIC 是一种半双工的通讯协议。串行总线有两根，分别是数据线 SDA 和时钟线 SCL。IIC 协议允许接多个设备，时钟信号是由主控制器产生。各个设备的数据线 SDA、时钟线 SCL 分别对应着接上。IIC 协议主要有三种信号。分别是开始信号、结束信号还有应答信号。其中起始信号是必须的，其他的可以不要。当然，空闲状态还有数据有效性也非常重要。一下为几种信号对应的电平变化。

起始信号：当时钟线 SCL 为高电平期间，数据线 SDA 由高电平转变为低电平。

停止信号：当数据线 SCL 为高电平期间，数据线 SDA 由低变高的跳变。

应答信号：主要分为有效应答和无效应答。在时钟脉冲 9 期间释放数据线，由接收器反馈一个电平应答信号，低电平为有效应答，高电平为无效应答。

数据有效性，数据线在时钟线 SCL 的上升沿来到之前需要准备好高电平，且数据线上的数据必须保持稳定，当时钟线上的信号为低时，数据上的电平状态才可以发生变化。

其中还有一个需要注意的是。在硬件上，数据线 SDA 和时钟线 SCL 都需要接一个上拉电阻，以保证两条线在空闲的时候是高电平状态。

根据以上的电平变化信息可以轻松写出与 OLED 液晶显示器的 IIC 通讯协议。基本配置可以通过查阅直接发送指令即可。

#### 4.2.3 角位移传感器驱动逻辑编写

角位移传感器主要使用的 STM32 的 ADC 模式。ADC 模式是指将连续变量的模拟信号量装变为离散数字信号的一种功能。在 STM32F1 系列单片机中可以支持最多 3 个 ADC 控制器，既可以单独使用，也可以使用双重模式。主要的涉及 STM32 单片机的 ADC 时钟配置、是否产生中断、通道选择、转换方式、数据对齐（左对齐，右对齐的选择）以及通道采样时间的选择。

本文中主要的配置是设置 PA6 位输入口接受角度的信息。ADC1 时钟使能以及复位、分屏因子清零、工作模式清零、独立工作扫描模式、非扫描模式、单词转换模式、软件控制、使用外部触发、数据右对齐。配置完成后 STM32 的 ADC 功能就可以正常工作了。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/446135005235010105>