

分类号: TP274

密 级: \_\_\_\_\_



## 硕士学位论文

# 基于 STM32 低功耗云台控制系统设计

学科专业: 计算机应用技术

作者姓名: 周官喜

指导教师: 王德兴 教授

青 岛 理 工 大 学

二〇一二年十二月

国内图书分类号: TP274

国际图书分类号:

## 硕士学位论文

# 基于 STM32 低功耗云台控制系统设计

硕士研究生: 周官喜

导师姓名: 王德兴 教授

申请学位级别: 工学硕士

学科、专业: 计算机应用技术

所在单位: 青岛理工大学

答辩日期: 2012.12.18

学位授予单位: 青岛理工大学

Classified Index: TP274

U.D.C: \_\_\_\_\_

Dissertation for the Master Degree in Engineering

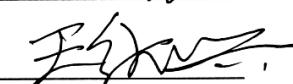
# **The Design of PTZ Control System Based on STM32**

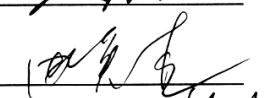
<b>Candidate:</b>	GuanXi Zhou
<b>Supervisor:</b>	Prof. DeXing Wang
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Specialty:</b>	Technology of Computer Applaction
<b>Date of Oral Examination:</b>	2012.12.18
<b>University:</b>	Qingdao Technological University

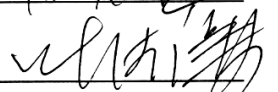
# 硕士学位论文

## 基于 STM32 低功耗云台控制系统设计

学位论文答辩日期: 2012.12.16


指导教师签字: 

答辩委员会成员签字: 









\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 青岛理工大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得青岛理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：周立奎 日期：2012.12.16

## 青岛理工大学学位论文使用授权声明

青岛理工大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、CDMD 和 DMD 有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权青岛理工大学研究生处办理。

研究生签名：周立奎 导师签名：王立 日期：2012.12.16

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 国内外云台监控系统发展现状 <sup>[2]</sup> .....	1
1.3 本文主要主要工作及其组织结构.....	2
第 2 章 系统概述.....	4
2.1 STM32F107 处理器.....	4
2.1.1STM32F107 处理器概述.....	4
2.1.2 STM32F107 处理器系统架构.....	5
2.1.3 STM32 微处理器对电机控制.....	7
2.1.4 STM32F107 处理器低功耗.....	9
2.2 电机的定义及控制原理 .....	10
2.2.1 直流电机定义 .....	11
2.2.2 直流无刷电机工作原理 <sup>[23]</sup> .....	13
2.3 OMRON 旋转编码器.....	14
2.3.1 旋转编码器定义及分类 .....	14
2.3.2 旋转编码器工作原理 .....	15
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 直流电机控制模块.....	17
3.1 直流电机驱动电路.....	17
3.1.1 直流电机驱动芯片 L298N .....	17
3. 2 直流电机转速 PWM 控制.....	18
3.3 直流电机闭环控制.....	20
3.3.1 过程控制 .....	20
3.3.2PID 控制算法.....	21
3.4 闭环控制系统.....	27
3.5 本章小结.....	28
第 4 章 基于 STM32 低功耗云台控制系统 硬件设计 .....	29
4.1 STM32 微控制器最小系统电路 .....	29



4.1.1 电源供电方案 .....	29
4.1.2 系统复位电路 .....	29
4.1.3 STM32 启动模式 .....	30
4.2 直流电机驱动电路.....	32
4.3 串口通信电路.....	33
4.4 旋转编码器信号采集电路.....	34
4.5 本章小结.....	36
第 5 章 基于 STM32 低功耗云台控制系统软件设计 .....	37
5.1 云台控制协议.....	37
5.1.1 PELCO 协议.....	37
5.1.2 PELCO 协议算法.....	39
5.2 PID 算法程序设计 .....	40
5.3 STM32 微控制器程序 .....	41
5.4 本章小结.....	49
第 6 章 总结与展望.....	50
6.1 总结.....	50
6.2 展望.....	50
参考文献.....	53
致谢.....	57

# 摘要

随着经济社会的发展，人们对公共安全的重视，视频监控技术得到了迅速发展并逐步开始应用于各个领域。为了扩大监控视野，便于远程操作，常借助于云台，即把摄像机安装在云台上，通过云台转动来带动摄像头转动，同时可通过云台控制协议设置摄像机镜头参数，云台在监控系统中起着非常重要的作用。而现有的云台控制系统普遍采用步进电机来作为驱动源，存在着稳定性差、功耗大、计数不准确等缺点，而采用体积小，节能环保的直流电机作为驱动源的云台控制系统成为研究的热点，并且具有广阔的应用前景。

本文提出以低功耗云台设计为出发点的系统设计方案。以现有的单片机技术和控制理论为依托，研究如何从硬件和软件两方面，对系统进行低功耗设计。硬件核心处理器采用的是意法半导体公司的 STM32F107 芯片，该芯片使用高性能且低功耗的 ARM Cortex-M3 处理器。云台驱动源采用低功耗的直流电机，在角度计数方面配合 OMRON 旋转编码器实现了云台的精确定位功能。软件方面依靠意法半导体公司开放的电机驱动代码为支撑，程序设计采用结构灵活的模块方式。

论文采用模块化的设计理念，以 STM32 处理器为核心，通过外围电机驱动电路来驱动直流电机，实现电机的正转与反转，同时由直流电机的特性曲线可知，直流电机的转速与其电枢两端的电压成正比，根据这一特性可通过 STM32 单片机 PWM 外设接口控制直流电机的转速，借助于高精度 OMRON 角度编码器可以精确记录云台转动的角速度，当云台转动过快或过慢时，通过 OMRON 角度编码器输出反馈作用于 STM32 微控制器，STM32 微控制器根据为角速度编写的 PID 算法来调节 PWM 输出，保证了云台的匀速、稳定、精确运行。论文最后测试了整体的功能和性能，从结果数据上验证了基于 STM32 低功耗云台控制系统的优势。

**关键词：**STM32 直流电机驱动 PWM OMRON 编码器 PID 算法



# Abstract

With the economic and social development, the attention of public safety, video surveillance technology developed rapidly, and gradually began to be used in various fields. In order to expand the horizons of monitoring, to facilitate remote operation, often by means of the PTZ camera that is installed in the head, head rotation to drive the rotation of the camera lens of the camera parameters, and can be controlled by agreement, PTZ plays in the monitoring system a very important role. Existing PTZ control systems commonly used by the stepper motor as a driving source, poor stability, power consumption, counting is not accurate, while the small size, energy saving DC motor as a driving source PTZ control become a hot topic, and has broad application prospects.

This paper presents the system design as a starting point to the low power head design. Existing SCM technology and control theory as the basis to study how low-power design of the system from both hardware and software. The hardware core processor STMicroelectronics the STM32F107 chip, the chip uses high-performance and low power ARM Cortex-M3 processor. PTZ driver source using low-power DC motor, in terms of angle count with the OMRON rotary encoder to achieve the precise positioning of the head. The software relies on open motor drive STMicroelectronics code support, programming using the flexible structure of the module.

Modular design concept papers, the STM32 processor as the core, peripheral motor drive circuit to drive the DC motor, the motor forward and reverse, while Known by the characteristic curve of the DC motor is proportional to the speed of DC motor with its armature voltage across this feature STM32 MCU PWM peripheral interface control DC motor speed, by means of high-precision the OMRON angle encoder can accurately record The angular velocity of head rotation, when the head rotation is too fast or too slow, the OMRON angle encoder output feedback in the STM32 microcontroller, the STM32 microcontroller based on the written for the angular velocity PID algorithm to adjust the PWM output, to ensure the cloud

Taiwan's uniform, stable, accurate operation. Finally to test the overall functionality and performance, PTZ control system based on the STM32 low power consumption advantages from the results of data validation.

**Key words:** STM32   DC Motor drive   PWM   OMRON Encoder   PID  
algorithm

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题研究背景

随着社会的快速发展，视频监控得到了越来越广泛的应用。数字监控已牢牢地成为监控市场的主导解决方案，并成熟地应用于金融、商业等领域。国内知名的视频监控提供商，如海康威视、大华等，由于在自身行业领域中的丰富项目经验，赢得了更多的市场机会。视频监控系统目前已经应用于小区、学校、医院等楼宇监控，交通违章，森林防火，流量控制，商场、车站、地铁等公共安全场所，并且将有着更加广泛的应用前景。

而目前市面上传统的云台只重视功能的实现，忽略了云台的结构设计，大多采用能耗高、便于实现的步进电机作为驱动源，对于用太阳能和风能提供电源的森林防火系统来说无疑是致命的，功耗的大小直接决定着云台的运行时间，而云台的运行时间是整片森林安全与否的最直接体现。

由上可知，既有强大完善的功能，又可实现低功耗长时间可靠运行的云台控制系统才是最受好评的云台控制系统。

为了满足这种需求，本文硬件以 STM32 驱动直流电机为基础，配合 OMRON 旋转编码器，软件以 PID 算法为依据研究了一种基于 STM32 低功耗云台控制系统。论文最后测试了整体的功能和性能，从结果数据上验证了基于 STM32 低功耗云台控制系统的优势。

## 1.2 国内外云台监控系统发展现状<sup>[2]</sup>

在国内，随着科技进步和社会发展，越来越多的大型监控项目因其监控点多、地域分布广泛，传统视频监控模式已经满足不了网络化远程监控、智能化监控的新需求。虽然目前监控系统前端设备中模拟产品还占据大部分市场，但从系统本身结构来看，目前监控系统几乎全部进入网络监控时代。

目前，随着网络电信运营商的介入和用户通过网络视频监控的逐步认可，网络视频监控市场份额越来越大，11 年网络视频监控路数大约在 980 万路左右，

已经占据总视频路数的 70%以上, 预计 2-3 年后, 网络视频监控将占据 90%以上的份额。此外, 随着“平安城市”, “和谐社会”的建设, 越来越多的城市开始使用网络视频监控系统来解决大范围视频监控项目在使用、管理、维护、共享等方面存在的问题, 导致对云台的管理控制需求如井喷式发展。目前平台的总体数据流已经超过 50 万, 增长速度在每年 10 万数据流。

与此同时, 视频监控正在走近普通家庭用户。中国电信全球眼和原中国网通已经在有条件的家庭尝试发展远程视频监控, 中国移动也在发展以“手眼通”为代表的手机彩信监控, 基于 3G 视频监控在正在调试和试用。在平安城市、平安家庭的政策引导下, 随着家庭网络环境的不断优化、用户消费能力的不断提升、安防意识的不断增长、独立式居住家庭的增多, 国内家庭监控将开始兴起。

### 1.3 本文主要主要工作及组织结构

本课题是在“2014 青岛市世界园艺博览会森林防火”项目的基础上展开的, 主要是设计一种低功耗云台控制系统, 保证园区云台监控系统长时间可靠、稳定运行。

本文的结构安排如下:

第一章首先阐述了本文的研究背景和意义, 阐述了云台监控系统的发展历程, 并对目前国内外视频监控技术发展现状和未来的发展方向作了介绍, 最后给出了本文的研究意义, 简单阐述了论文所做的工作。

第二章对系统硬件组成部分进行了概述, 首先对 STM32 微控制器的高性能、低功耗进行了阐述, 其次阐明了直流电机的分类及其工作原理, 最后介绍了旋转编码器的定义及其工作原理。

第三章针对直流电机的驱动, 首先介绍了一款高电压、大电流电机驱动芯片 L298N, 该芯片可以同时驱动两台直流电机, 其次阐述了直流电机的闭环控制理论及其 PID 控制算法。

第四章主要介绍了基于 STM32 低功耗云台控制系统的硬件设计电路, 对 STM32 最小工作系统做了详细的说明, 其次介绍了针对于电机驱动芯片 L298N 的电机驱动电路, 本章最后介绍了旋转编码器的信号输出电路。

第五章主要介绍了基于 STM32 低功耗云台控制系统的软件设计方案，对云台控制协议进行了详细的讲解，针对第三章讲解的 PID 算法控制理论给出了电机转速控制的 PID 算法，最后给出了基于 STM32 的 PWM 电机驱动程序。

## 第 2 章 系统概述

本文研究的是基于 STM32 的低功耗云台控制系统，在该系统中以意法半导体公司的 STM32F107 为核心控制器，该处理器具有低功耗、高性能、接口丰富等优点。在云台驱动方面采用更低功耗、噪音更小的直流电机作为驱动源，配合使用 OMRON 旋转编码器，实现了云台的精确定位，在转速控制方面采用直流电机双闭环控制理论，实现了转速的精确控制。

### 2.1 STM32F107 处理器

#### 2.1.1 STM32F107 处理器概述

STM32 系列 32 位微控制器使用高性能的 ARM Cortex-M3 32 位的 RISC 内核，该内核是专门设计于满足集高性能、低功耗、实时应用、具有竞争价格于一体的嵌入式领域的要求。其工作频率可达 72MHz，内置高速存储器，丰富的增强 I/O 外设接口和联接到两条 APB 总线的外设。所有型号的器件都包含 2 个 12 位 ADC、3 个通用 16 位定时器和一个 PWM 定时器，还包含标准和先进的通信接口。

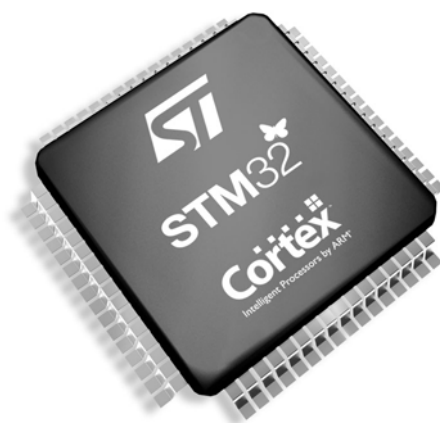


图 2-1 STM32F107

它具有如下特点：

1. 哈佛结构
2. Thumb-2 指令集以 16 位的代码密度带来了 32 位的性能
3. 单周期乘法指令和硬件触发指令

4. 内置了快速的中断控制器
5. 与 ARM7TDMI 相比运行速度最多可快 35%且代码最多可节省 45%
6. 自动保存和恢复处理器状态，可以实现低延迟地进入和退出中断服务程序（ISR）。

### 2.1.2 STM32F107 处理器系统架构

在 STM32F107 产品中，主系统由以下部分构成：

- 五个驱动单元：
  - Cortex-M3 内核 Dcode 总线(D-bus),和系统总线(S-bus)
  - 通用 DMA1 和通用 DMA2
  - 以太网 DMA
- 三个被动单元
  - 内部 SRAM
  - 内部闪存存储器
  - AHB 到 APB 的桥(AHB2APBx),它连接所有的 APB 设备

这些都是通过一个多级的 AHB 总线架构相互连接的，如图 2-2 所示：



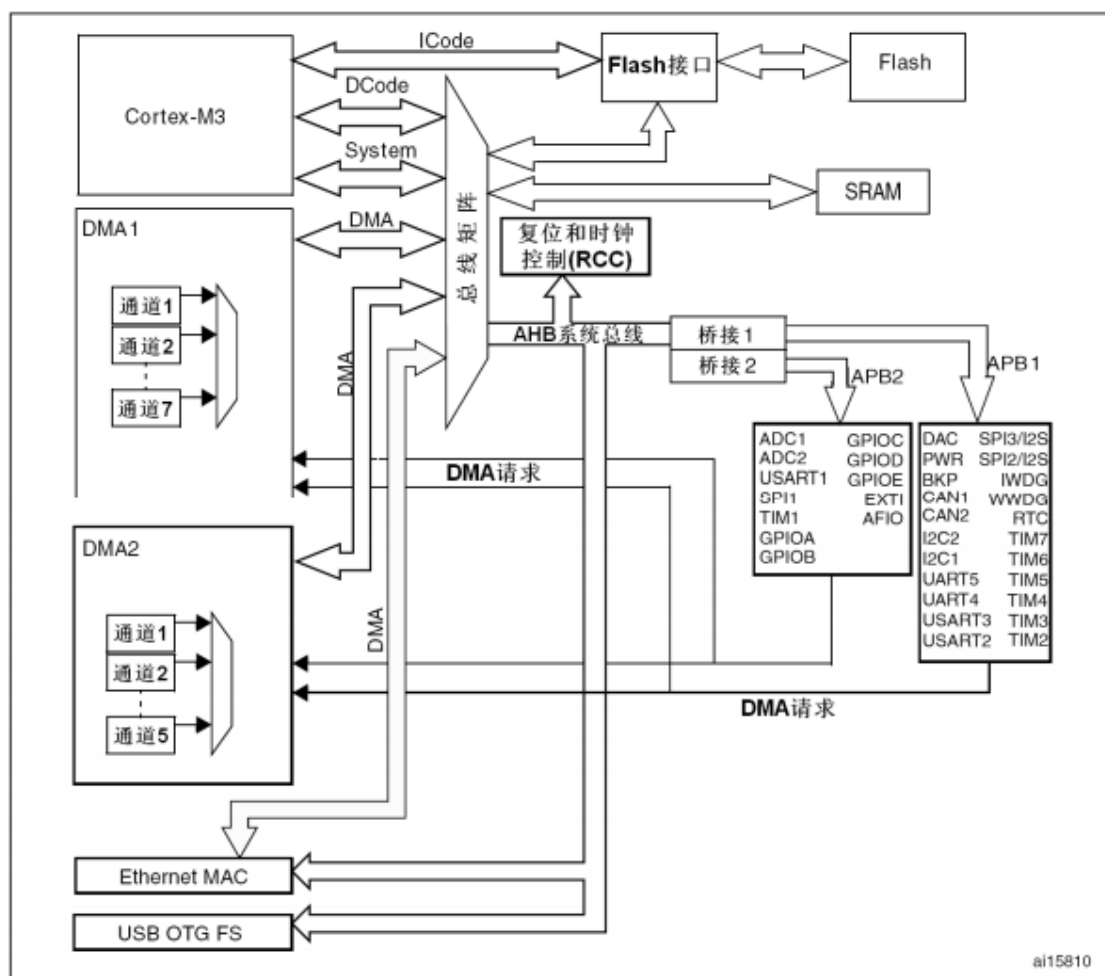


图 2-2 STM32 总线架构

## ICode 总线

该总线负责连接 Cortex-M3 内核的指令总线和闪存指令接口。指令预取操作在此总线上完成。

## Dcode 总线

该总线负责连接 Cortex-M3 内核的 Dcode 总线和闪存存储器的数据接口。

## 系统总线

此总线负责连接 Cortex-M3 内核的系统总线接口和总线矩阵接口，总线矩阵协调着内核和 DMA 间的访问。

## DMA 总线

此总线负责连接 DMA 的 AHB 主控接口和总线矩阵接口，总线矩阵负责协调 CPU 的 Dcode 和 DMA 到 SRAM 存储器、闪存存储器和外设的访问。

## 总线矩阵

总线矩阵负责协调 DMA 主控总线和内核系统总线之间的访问仲裁,仲裁采用轮换算法。在互联型产品中,总线矩阵包含 5 个驱动部件(CPU 的 Dcode 总线、系统总线、以太网 DMA、DMA1 总线和 DMA2 总线)和 3 个从动部件(主闪存存储器接口(FLITF)、SRAM 和 AHB2APB 桥)组成。在其它产品中总线矩阵由 4 个驱动部件(CPU 的 Dcode 总线、系统总线、DMA1 总线和 DMA2 总线)和 4 个被动部件(主闪存存储器接口(FLITF)、FSMC、SRAM 和 AHB2APB 桥)组成。AHB 外设通过总线矩阵与系统总线相连接,允许 DMA 访问。

### 2.1.3 STM32 微处理器对电机控制

电机控制系统要求微控制器具备卓越的实时响应性(中断延时短)、纯处理功能(例如单周期乘法)以及优异的控制性能(当处理非序列执行流和条件转移指令时)。目前市面上有大量的电机控制专用芯片可供选择。例如,美国 TI 公司生产设计的 TMS320C2000 系列的微控制器的电机控制电路固化在硬件芯片上,并且提供了广泛的外设接口,可以说是具有丰富的接口能力和嵌入功能,对于有大量数据处理的控制场合特别适合,如伺服系统、电机控制和工业自动化控制等等。意法半导体公司(ST)推出的 STM32 系列微控制器是专门开发,以满足家用电器的价格高敏感性和工业设备的高性能和低功耗的微控制器要求。STM32 系列微控制器以性能强大的 Cortex-M3 为内核。Cortex-M3 处理器是一个低功耗处理器,具有门数少,中断延迟小,调试容易等特点。Cortex-M3 内核能够完全满足这些要求<sup>[7]</sup>。

在 STM32 微控制器内,Cortex-M3 内核与 ST 优化型闪存接口紧密配合,仅需增加少量的外部元器件,周边设备即可处理外部事件。不用说,PWM 定时器和模数转换器是最重要的元器件。STM32 高级 PWM 定时器提供:

- 6 路 PWM 输出;
- 死区产生;
- 输出边沿对齐波形和中心对齐波形;
- 紧急故障停机,可与 2 路 ADC 同步及与其他定时器同步;

- 可编程的防范机制，可以用于防止对寄存器的非法写入；
- 编码器输入接口；
- 霍尔传感器输入接口；
- 完整的矢量控制环；

STM32 微控制器内置有高级控制定时器(TIM 1 和 TIM 8)、通用控制定时器(TIMx)以及基本控制定时器(TIM 6 和 TIM7)。高级控制定时器由一个 16 位的自动装载计数器组成，被一个可编程的预分频器驱动。它适用于各种用途，包括测量输入信号的脉冲宽度（输入捕获），输出产生的波形（输出比较，PWM，嵌入死区时间的互补 PWM）；预分频器由定时器预分频器和 RCC 时钟控制，可以实现波形周期和脉冲宽度从几个微妙到几个毫秒的调控，支持定位增量式编码器和霍尔传感器电路。通用定时器由一个可编程的预分频器的 16 位自动重载计数器开始。其他功能和高级控制定时器输出，除了没有嵌入在死区时间的互补 PWM 波形没有太大的区别。在基本的定时器 TIM6 和 TIM7 每个都包含一个 16 位的自动重载计数器，由各自的预分频驱动。它们可以是作为一个通用定时器提供了一个时间参考，特别是，可以设置为 DAC 时钟。

其对电机的控制电路如图 2-3 所示：

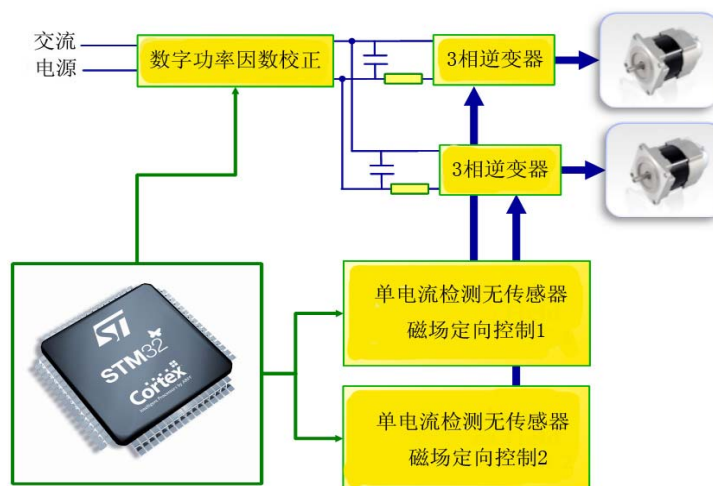


图 2-3 STM32 电机控制电路

以上专门的外围电路与高性能 Cortex-M3 内核相结合，可使完整的矢量控制环软件执行时间缩短为 21us。当电流采样频率为 10KHz 时，CPU 的工作负载低

于 25%，STM32 可以执行应用中电机控制之外的其他任务。

弱电部分的控制模块，是电机驱动控制的核心，也是伺服驱动系统核心控制算法的运行载体。控制芯片的性能将直接影响伺服系统作为一个整体的动态性能。意法半导体的基于 Cortex-M3 的 STM32 ARM 的行业标准嵌入式处理器内核的 32 位微处理器，主频高达 72MHz，内置闪存和 SRAM（容量高达 512 KB 和 64 KB）。强大的内核和其外围设备，它已被广泛地用于在无刷电机控制应用。辅助电机控制软件库 V2.0 包含电机矢量控制函数库，以支持新的单旁路传感器控制，内部永磁（IPM）电机控制和永磁同步电机（PMSM）电机弱磁控制算法，大大简化了控制的电机和缩短开发周期。在此基础上，本文选择 STM32 提出了 FOC+ SVPWM 控制算法的永磁同步电机控制作为控制核心芯片。交流永磁同步电机 FOC 矢量控制直流电动机的特性，以解决强耦合的交流电机，非线性问题中的应用，提高了系统的动态性能，实现双闭环控制的永磁同步电机电流，速度快。

#### 2.1.4 STM32F107 处理器低功耗

然而高性能并非意味着高耗电，STM32 有三种低功耗模式和灵活的时钟控制机制，用户可以根据自己应用所需的耗电/性能要求进行合理的优化。当代码从 Flash 中以 72MHz 的全速运行时，在外设时钟开启时 STM32 仅消耗 27mA 电流。在 3.3V 的供电电压下，其典型的电流消耗仅为 1.4uA。不同工作模式下功耗如下图 2-4 所示：

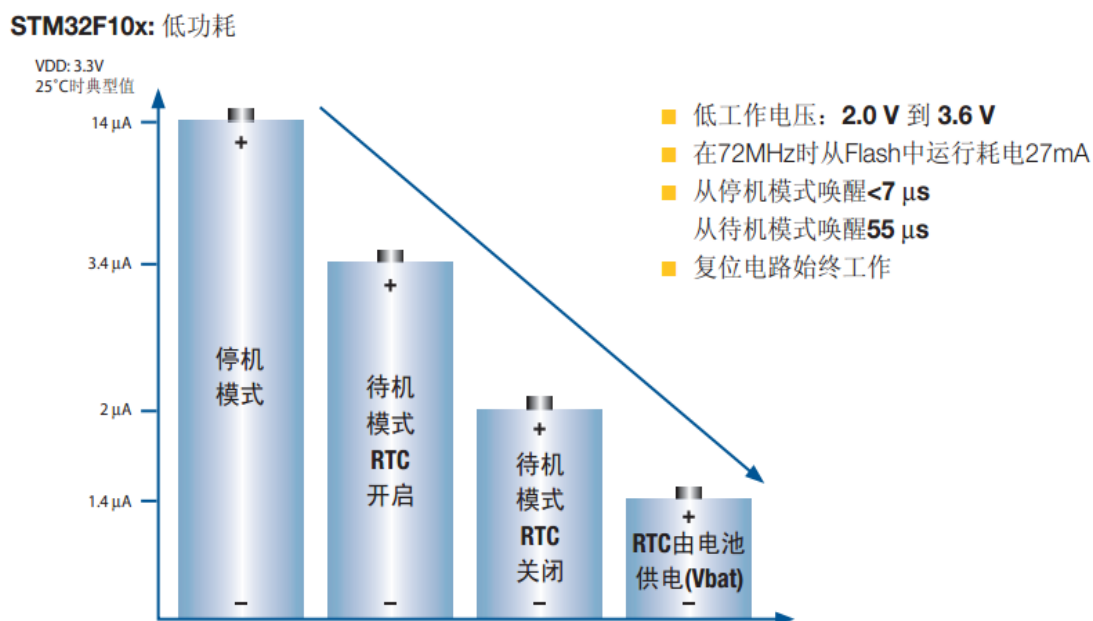


图 2-4 STM32 不同模式下功耗图

1、SLEEP 模式：实现方法简单，并且可以通过中断唤醒，但省电少。节能：外围设备，不需要被用来关闭时钟的时钟，这一次只打开。如 USART 发送数据之前 USART 时钟使能数据包传输完成后，立即关闭时钟。

2、STOP 模式：需要外部中断唤醒。RTC 报警醒来的时候，更灵活的应用模型。但是，应用程序注意：ADC 数据采集应用中的一个问题。如果您使用 STOP 模式下，它假定为 200Hz 的采样率，5 毫秒的唤醒时间，启动一个 ADC 采样测试 STOP 唤醒周期是不固定的（可能需要恢复的时钟设置唤醒，醒来时自动使用 HSI 时钟作为内部系统时钟），采样周期是不固定的，过滤，如电源频率陷波的缺点。

## 2.2 电机的定义及控制原理

电机是一种机电转换能力机械设备，它有效地将电能转换成机械能，从而使电机的操作，可实现多种。他们已被广泛应用于工农业生产，国防工业，生活和社会生活的各个领域。可以分为两种不同的电机类型划分的类型的电机控制，速度控制电机转速 DC 和 AC 的变速控制。

直流调速直流调速电机控制。众所周知，由于直流电动机产生的转矩的两

个元素之间的电枢电流的励磁磁通和没有耦合关系,使直流电动机的控制各自的电流可以很容易实现的控制和调节电机速度。直流电动机的速度控制是很容易获得良好的静态和动态的时序特性。在变速旋转直流电动机调速领域长期占据了主导地位。然而,由于直流电动机的结构,机械换向器和电刷是一个重大的缺陷,导致的直流电动机调速系统的应用和推广受到了限制。

交流变频调速交流电机的速度控制。交流电机结构简单,坚固耐用,运行可靠,特别是,它克服了这些限制存在刷直流电机的机械换向器在工业和农业生产带来了极其广泛的宣传。但长期以来受到的限制,实现技术,交流电机,电机速度的应用是一个很大的限制。然而,科学和技术的发展,交流变频调速的快速发展创造了有利条件和物质基础。交流电机可以通过使用的参数和状态重构交流电动机的定子电流的励磁分量和转矩分量的现代控制理论,实现交流电动机的控制直流电动机的控制过程是相当于直流去耦的概念重建,从而使交流变频调速系统的动态性能已显着改善和提高。

早期,调速控制系统的控制器多由模拟电子电路组成。但是,随着微机控制技术的发展,特别是以单片机、DSP 和 ARM 为控制核心的微机控制技术的发展,使得调速控制系统走向数字控制。数字化使得控制器许多难以实现的复杂控制得以解决,如矢量控制中的坐标变换计算。

## 2.2.1 直流电机定义

无刷直流电机是直流电机的一种,英文简称 BLDC。区别于有刷直流电机,无刷直流电机不使用机械的电刷装置,采用方波自控式永磁同步电机。直流无刷电动机与一般直流电动机具有相同的工作原理和应用特性,而其组成是不一样的。除了电机本身外,前者还多一个换向电路,电机本身和换向电路紧密结合在一起。许多小功率电动机的电机本身是与换向电路合成一体,从外观上看直流无刷电动机与直流电动机完全一样。

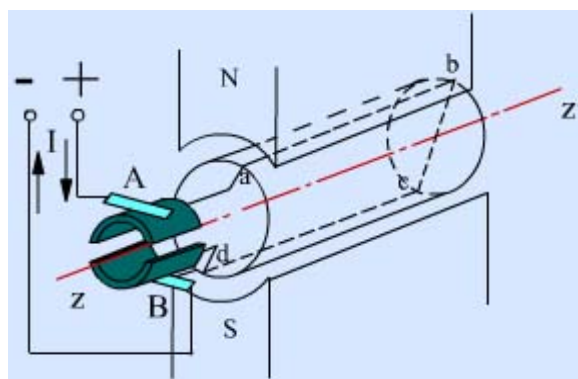


图 2-5 直流电机模型

图 2-5 是一个最简单的直流电动机模型。在一对静止的磁极  $N$  和  $S$  之间，装设一个可以绕  $Z-Z'$  轴而转动的圆柱形铁芯，在它上面装有矩形的线圈  $abcd$ 。这个转动的部分通常叫做电枢。线圈的两端  $a$  和  $d$  分别接到叫做换向片的两个半圆形铜环 1 和 2 上。换向片 1 和 2 之间是彼此绝缘的，它们和电枢装在同一根轴上，可随电枢一起转动。 $A$  和  $B$  是两个固定不动的碳质电刷，它们和换向片之间是滑动接触的。来自直流电源的电流就是通过电刷和换向片流到电枢的线圈里。

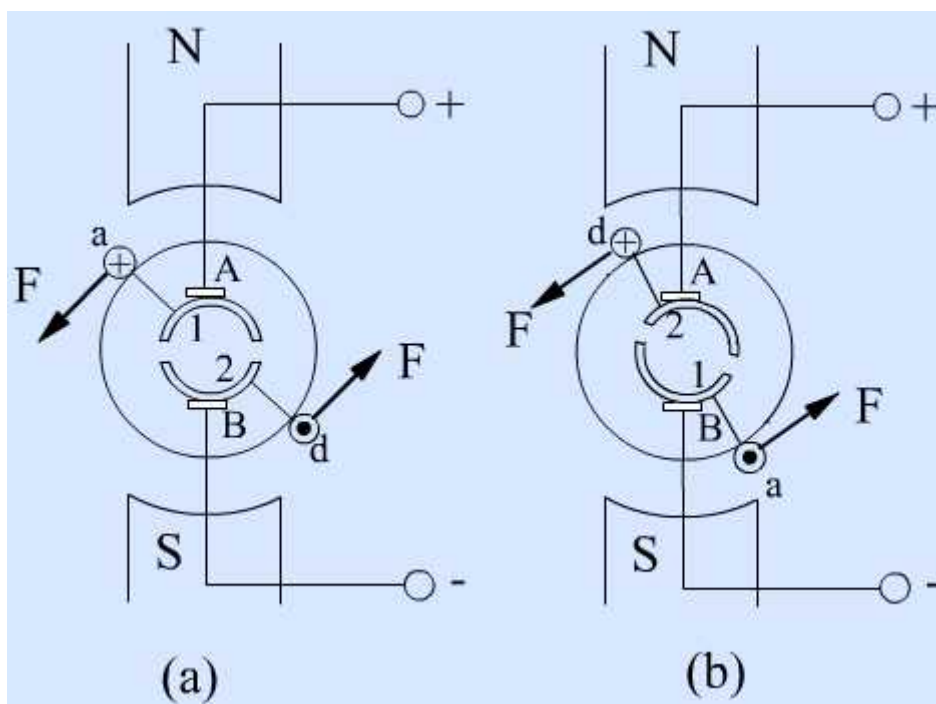


图 2-6 换向器在直流电机中的作用

当电刷  $A$  和  $B$  分别与直流电源的正极和负极接通时，电流从电刷  $A$  流入，而从电刷  $B$  流出。这时线圈中的电流方向是从  $a$  流向  $b$ ，再从  $c$  流向  $d$ 。我们知道，载流导体在磁场中要受到电磁力，其方向由左手定则来决定。当电枢在图



2-6 (a) 所示的位置时, 线圈  $ab$  边的电流从  $a$  流向  $b$ , 用  $\oplus$  表示,  $cd$  边的电流从  $c$  流向  $d$ , 用  $\odot$  表示。根据左手定则可以判断出,  $ab$  边受力的方向是从右向左, 而  $cd$  边受力的方向是从左向右。这样, 在电枢上就产生了反时针方向的转矩, 因此电枢就将沿着反时针方向转动起来。

当电枢转到使线圈的  $ab$  边从  $N$  极下面进入  $S$  极, 而  $cd$  边从  $S$  极下面进入  $N$  极时, 与线圈  $a$  端联接的换向片 1 跟电刷  $B$  接触, 而与线圈  $d$  端联接的换向片 2 跟电刷  $A$  接触, 如图 2-6 (b) 所示。这样, 线圈内的电流方向变为从  $d$  流向  $c$ , 再从  $b$  流向  $a$ , 从而保持在  $N$  极下面的导体中的电流方向不变。因此转矩的方向也不改变, 电枢仍然按照原来的反时针方向继续旋转。由此可以看出, 换向片和电刷在直流电机中起着改换电枢线圈中电流方向的作用。

### 2.2.2 直流无刷电机工作原理<sup>[23]</sup>

要使电枢受到一个方向不变的电磁转矩, 关键在于: 当线圈边在不同极性的磁极下, 如何将流过线圈中的电流方向及时地加以变换, 即进行所谓“换向”。为此必须增添一个叫做换向器的装置, 换向器配合电刷可保证每个极下线圈边中电流始终是一个方向, 就可以使电动机能连续的旋转, 这就是直流电动机的工作原理。

无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成, 是一种电气旋转式机械。 电动机的定子绕组多数情况做成三相对称星形接法, 与三相异步电机结构十分相似。电动机的转子上粘附有已充磁的永磁体, 为了便于检测电动机转子的极性, 在电动机内装有位置传感器。驱动器由功率电子器件和集成电路等组成, 其功能是: 接受电动机的启动、制动、停止信号, 以控制电动机的启动、制动和停止; 接收位置传感器信号和电动机正反转信号, 用来调控逆变桥各功率管的导通与截止, 产生连续转矩; 接受速度指令和速度反馈信号, 用来控制和调整转速; 提供保护和显示等等<sup>[28]</sup>。

无刷直流电机控制流程图如图 2-7 所示。

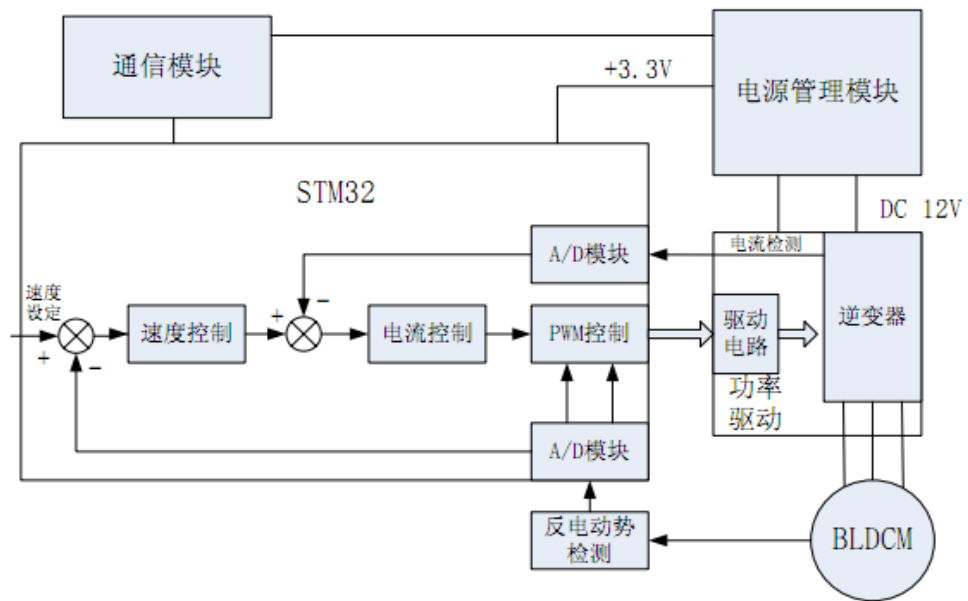


图 2-7 直流电机控制流程图

由上图 2-7 可以，整个系统接入电源是 12V 直流供电，通过电源管理模块将其转变成+3.3V 和+5V 给系统使用。STM32 微控制器接收上位机指令，输出不同占空比 PWM 调节加在直流电机电枢上的电压，来控制直流电机的转动方向与转速，同时旋转编码器将转速输出信号反馈给 STM32，通过转速计算，根据 PID 控制策略实现对转速闭环控制。同时 STM32 还检测调速系统的运行状态，当系统出现过压或者短路故障时，及时封锁 PWM 信号，使电机停止工作，并及时通过通信模块及时告知上位机软件。

整个控制系统由硬件平台和软件算法组成。硬件系统包含控制系统和驱动系统，控制系统以 STM32F107 为处理核心，它负责速度信号的计算和位移信号的采集。通过 STM32 的运算单元完成 STM32 中事件管理器中寄存器数值的更新，产生 PWM 信号输送给驱动系统。驱动系统以 L298N 为核心，接收控制系统输入的 PWM 信号，把输入的直流信号转化成驱动电机的交流信号，驱动电机做直线定位运动。

## 2.3 OMRON 旋转编码器

### 2.3.1 旋转编码器定义及分类

编码器是把角位移或直线位移转换成电信号的一种装置。旋转编码器是将旋转的机械位移量转化为电气信号，对该信号进行处理后检测位置速度等的传感器。旋转编码器被用于测量装置的旋转速度。它分为两路单输出和双输出。每转脉冲数（几十到几千），和电源电压的技术参数。单输出的旋转编码器的输出是一组的脉冲信号，而双输出的相位差为 90 度的脉冲的旋转编码器的输出组，不仅可以测量的速度，并且还可以通过两个脉冲确定旋转的方向。

按照工作原理划分，旋转编码器可以分为增量型编码器和绝对型编码器两类。

增量型编码器是将位移改变转变成周期性变化的电信号，再把这个周期性变化的电信号转换成计数脉冲，用计数脉冲个数的多少表示位移变化的大小。绝对型编码器光盘码上有许多道刻线，每道刻线以 2 线、4 线、8 线…编排，绝对编码器由机械位置决定每个位置的唯一性，它无需记忆，无需找参考点，它的输出示值只与测量的起始位置和终止位置有关，而与测量的中间过程无关，什么时候需要知道位置，什么时候就去读取它的位置。

### 2.3.2 旋转编码器工作原理

增量式编码器有一个中心有轴的光电码盘，其上有环形通、暗的刻线，通过内部两个光敏接受管转化其角度码盘的时序和相位关系，得到其角度码盘角度位移量的增加或减少。增量型编码器直接利用光电转换原理输出三组方波脉冲 A、B、Z 相；由于 A、B 两相相差 90°，可以通过比较 A 相在前还是 B 相在前，判断出编码器是正向转动还是反向转动。码盘每旋转一周，Z 相输出一个脉冲，代表零位参考位，用于指示机械位置或对累积量清零。其优点是原理构造简单，平均寿命长，抗干扰能力强，适合长距离传输。

由于 A、B 两相相差 90 度，可通过输出比较 A 相在前还是 B 相在前，以判断编码器的正转与反转，通过 Z 相输出的零位脉冲，可以获得编码器的零位参考位。

轴的每转动一周，增量型编码器提供一定数量的脉冲，周期性的测量或者单位时间内的脉冲个数可以从来测量转动的角速度。

旋转编码器输出脉冲信号计数如图 2-8 所示：

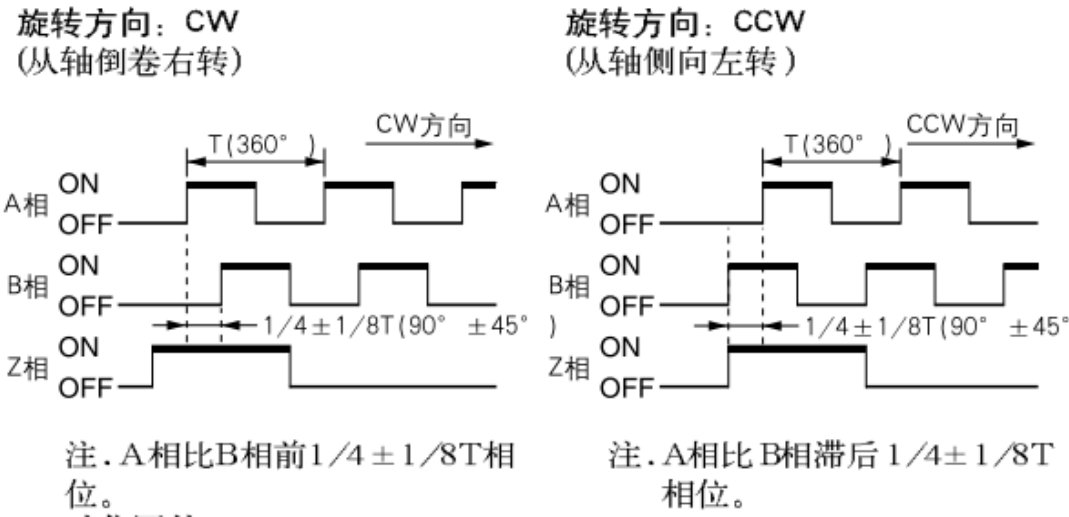


图 2-8 旋转编码器计数输出模式

## 2.4 本章小结

本章主要对基于 STM32 低功耗云台控制系统的组成进行了概述。

- (1) 介绍了基于 Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器的特点，其内嵌的定时器和 ADC 外设非常适合电机驱动，而且可以工作在三种不同的模式，满足客户对低功耗的追求。
- (2) 介绍了单机的定义及其控制方法，详细介绍了无刷直流电机的定义，对工作原理进行了简单的陈述，为下文直流电机驱动做好准备。
- (3) 阐述了旋转编码器的定义与分类，介绍了其计数输出方式。

## 第 3 章 直流电机控制模块

微控制器通过控制电机驱动电路来驱动直流电机实现正转与反转,通过控制 PWM 输出占空比来实现速度调节,直流电机的转动带动旋转编码器的转动,旋转编码器输出反馈作用于微控制器,微控制器可以根据内部给定的 PID 算法,再次调节 PWM 输出占空比,实现了对转速的闭环控制。在该系统中直流电机转速控制如图 3-1 所示:

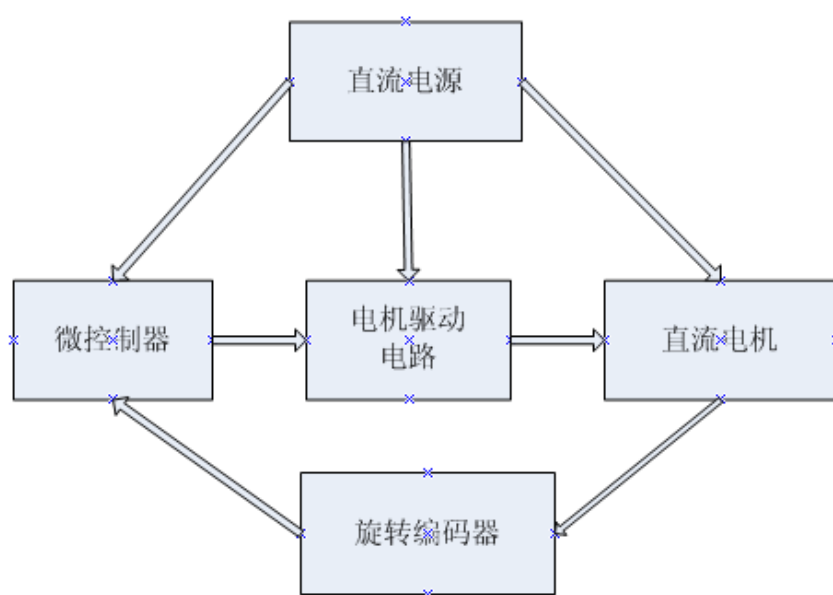


图 3-1 直流电机控制框图

### 3.1 直流电机驱动电路

#### 3.1.1 直流电机驱动芯片 L298N

L298N 是意法半导体公司(ST)生产的一种高电压、大电流电机驱动专用芯片。该芯片采用 15 脚封装。其主要特点是:

- 输出电流大,负载能力强,瞬间峰值电流可达 3A,持续工作电流为 2A;
- 额定工作功率为 25W;
- 耐高压,最高工作电压可达 46V;

- 芯片内含有两个 H 桥的高电压、大电流全桥式驱动器，可以用来驱动直流电机、步进电机和继电器线圈等感性负载；

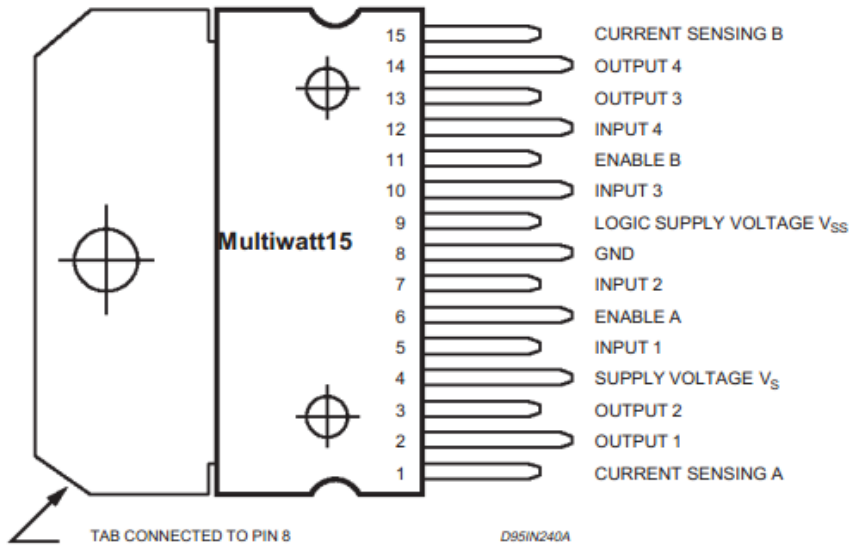


图 3-2 L298N

L298N 可以驱动 2 个直流电机，OUTPUT1、OUTPUT2 和 OUTPUT3、OUTPUT4 之间分别接 2 个直流电机。5、7、10、12 引脚接输入控制电平，控制电机的正反转，ENABLE A, ENABLE B 接控制使能端，控制电机的停转。L298N 功能模块如下图 3-3 所示：

ENABLE x	INPUT 1	INPUT 2	运行状态
0	X	X	停止
1	1	0	正转
1	0	1	反转
1	1	1	刹停
1	0	0	停止

图 3-3 L298N 功能模块图

### 3. 2 直流电机转速 PWM 控制

PWM 是 Pulse Width Modulation 的缩写, 中文意思就是脉冲宽度调制, 简称脉宽调制。它是利用微处理器的数字输出来对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术, 其控制简单、灵活和动态响应性好等优点而成为电子技术最广泛应用的控制方式, 其应用领域包括通信, 测量, 功率变换与控制, 电动机控制、伺服控制、调光、开关电源, 甚至某些音频放大器, 因此研究基于 PWM 技术的正负脉宽数控调制信号发生器具有十分重要的现实意义。

直流电机的转速控制主要是通过在保持励磁恒定不变的情况下, 通过调节电机电枢两端电压来实现调速, 通常可以通过线性放大驱动或者开关驱动两种方式控制电枢端电压。虽然传统的线性放大驱动原理简单、线性关系好、但存在着严重的散热和效率低下等问题, 所以直流电机一般采用开关驱动方式, 即通过 PWM 来控制电枢端电压。

PWM 是利用全控型电力电子器件的导通与关闭, 将恒定的直流电压调制成大小和极性都可以改变的直流电压作为电机的电枢绕组端电压, 实现转向控制和转速平滑调节, 直流电机调速原理如图 3-4 所示。

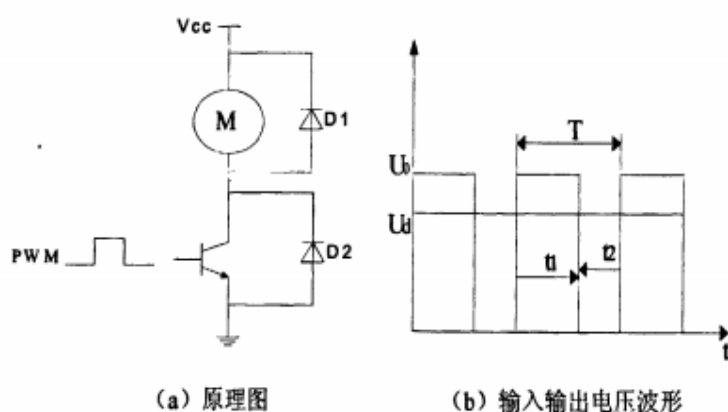


图 3-4 PWM 调速原理和电压波形

GTR 管工作在开关状态, 由 PWM 信号控制其导通与关闭, 当 NPN 三极管基极输入高电平时, 三极管导通, 直流电机电枢绕组端电压为  $U_0(V_{cc})$ , 电机正向转动,  $t_1(s)$  后 NPN 三极管基极输入变为低电平, 开关管截止, 直流电机电枢绕组端电压为 0, 电机停转,  $t_2(s)$  后, 基极输入重新变为高电平, NPN 三极管重复前面的动作, 随着对应输入电平的高低变化, 电枢绕组端电压波形如图 b 所示,



端电压平均值  $U_d$  为：

$$U_d = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_0 = \frac{t_1}{T} U_0 = \alpha U_0 \quad (3-1)$$

式中  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 为 PWM 输入占空比，为开关管导通时间  $t_1$  周期  $T$  的比值，当电源电压  $U_0$  保持一定时，电枢绕组端电压平均值  $U_d$  取决于  $\alpha$  的大小，改变  $\alpha$  值就可改变电机电枢端电压平均值，从而实现转速调节。采用 PWM 调速时，一般可以采用定宽调频、调宽调频、定频调宽三种方式改变占空比  $\alpha$  的值，由于前两种方法在调速时改变了控制脉冲的周期，当控制脉冲频率与系统固有频率接近时，将会引起震荡，因此在直流电机调速控制中，通常采用定频调宽法来改变占空比  $\alpha$  的值<sup>[35]</sup>。

### 3.3 直流电机闭环控制

要使电机的转速恒定在某一预定的转速，需要随时监测（采样）电机的转速并与预定值（设定值）相比较，根据比较结果来不断调整电机的转速，使之尽量接近设定值，这一过程称为闭环反馈控制，其控制方法（控制策略）称为控制算法，控制算法可以有多重多样，其中典型的一种算法叫做 PID 算法（比例-积分-微分）算法（或 PID 控制）。

#### 3.3.1 过程控制

过程控制——对生产过程的某一或某些物理参数进行的自动控制。

##### 一、 模拟控制系统

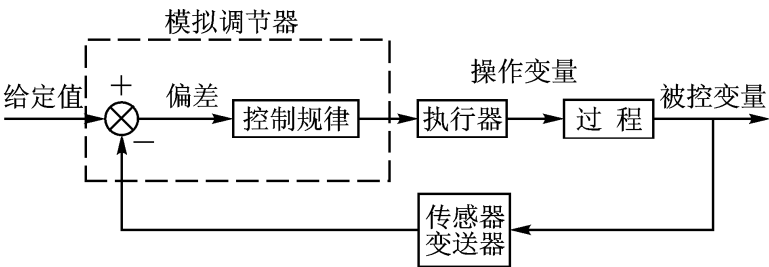


图 3-5 基本模拟反馈控制回路

被控量的数值由传感器或变送器来采集，这个数值与给定值进行比较，得到偏差，偏差的模拟调节器根据特定的控制操作变量的变化规律，使偏差接近于

零，其输出通过执行器作用于执行过程。

控制规律用对应的模拟硬件来实现，控制规律的修改需要更换模拟硬件。

## 二、微机过程控制系统

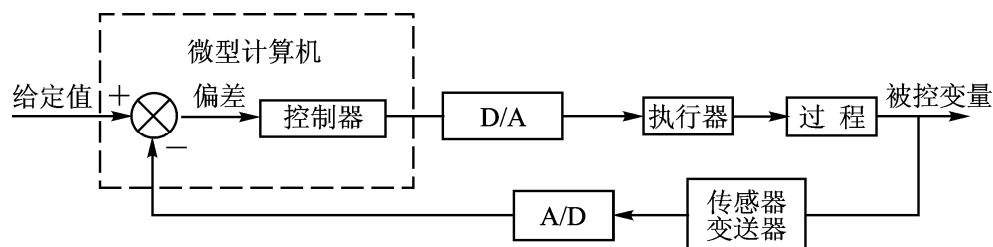


图 3-6 微机过程控制系统基本框图

微机过程控制系统是以微型计算机作为主控制器。其整个系统控制规律的实现，是通过计算机软件来完成的。改变相应的控制规律，只要更改相应的程序即可。

## 三、数字控制系统 DDC

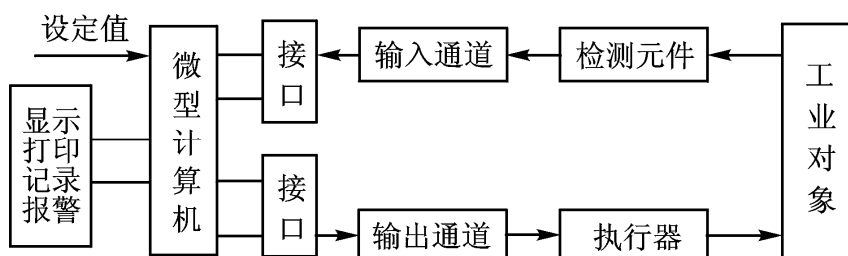


图 3-7 DDC 系统构成框图

DDC(Direct Digital Congtrol)系统是最典型的一个是用于过程控制系统的计算机。微机通过过程输入通道上的一个或多个检测到的物理量，并根据所确定的控制法（算法）的计算，并直接进入的致动器的控制，所以，每个充电量达到一个预定的通过输出信道请求。由于计算机的过程中的的直接决策作用的，它被称为直接数字控制。

### 3.3.2PID 控制算法

PID 控制算法是目前控制领域应用比较广泛的算法之一，主要包含比例控制、积分控制和微分控制三个部分。其 P、I、D 分别是 Proportional（比例）、Integral（积分）、Differential（微分）缩写，即为各个的项的系数。另外在实际使用中 P、I、D 三者可以按照需求自由组合、关闭或开启其中的任何一项，以满足不同的实验要求。

PID 算法的优点为：

- (1) PID 算法自身的优点；
- (2) 作为模拟调节系统中技术最成熟、应用最为广泛的一种调节方式；
- (3) 参数设定方便；
- (4) 应用性强；
- (5) 结构灵活（PI、PD、PID）；

## 1. 比例（P）调节器

比例调节器的微分表达式为：

$$y(t) = K_p e(t) \quad (3-2)$$

式中  $y$  为调节器输出； $K_p$  为比例系数项； $e(t)$  为调节器输入偏差， $e(t) = r(t) - m(t)$ ，其中， $r(t)$  为设定给定值， $m(t)$  为被测参数实际测量值。

由式（3-2）可以看出，调节器的输出结果与输入偏差成正比。因此可知，只要偏差出现，调节器就能及时地产生与之相应成比例的调节作用，具有调节及时的特点。比例调节器的特性曲线如下图 3-5 所示

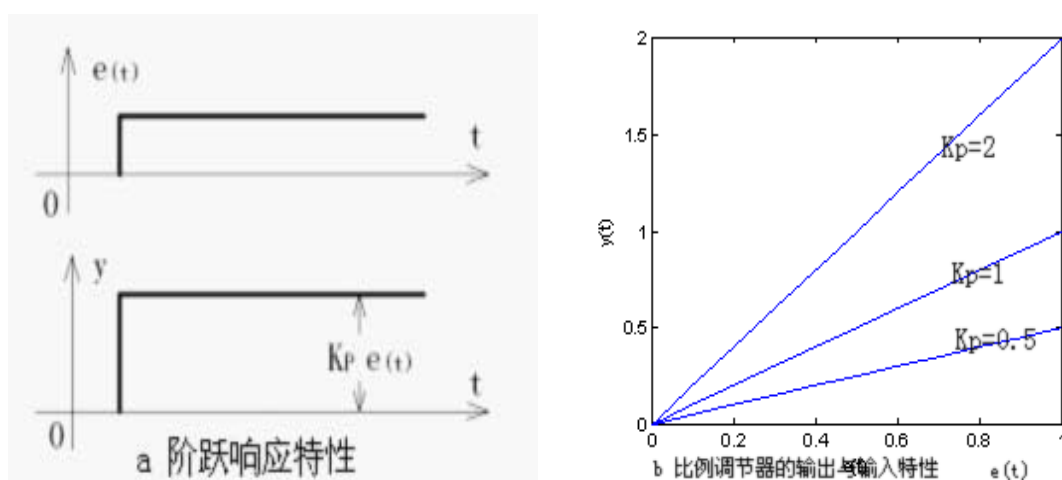


图 3-8 比例调节特性曲线

由图 3-8 可以看出比例调节的作用为：

- (1)  $K_p$  增大，比例调节作用增大。
- (2)  $K_p$  减小，比例调节作用减小。
- (3)  $K_p$  增大，比例调节作用使静差减小。
- (4)  $K_p$  太大，将引起自激震荡。

比例调节的有优势：①调节及时；②调节作用强。缺点是存在静差。因此，对于扰动较大，惯性也较大的系统，纯比例调节难以兼顾动态和静态特性，需要比较复杂的调节器。

## 2.比例-积分调节器

比例-积分调节器简称 PI 调节器，积分作用是指调节器的输出与输入的偏差对时间的积分成立的作用。

积分调节器的微分方程为：

$$y(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (3-3)$$

式中： $T_i$  是积分时间常数，它用来表示积分速度的大小， $T_i$  常数越大，对应的积分速度越慢，积分作用也越弱。积分作用的响应特性曲线，如图 3-6 所示

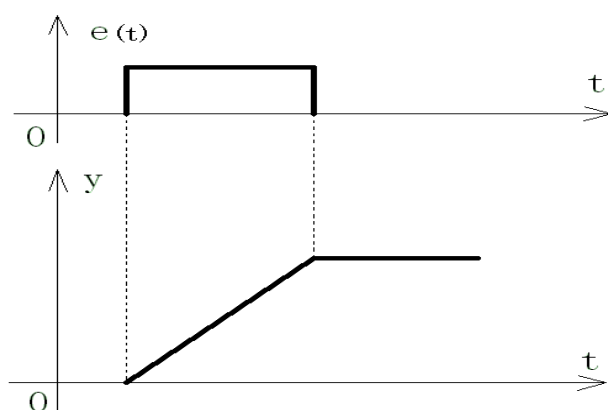


图 3-9 阶跃作用下积分作用相应曲线

由图 3-9 可知，积分调节作用的特点是：

(1) 积分调节作用的输出与偏差存在的时间有关，只要偏差存在，积分调节器的输出就会随时间增长，直至偏差消除。所以，积分作用能消除静差。

(2) 积分作用缓慢，且在偏差刚刚出现时，调节作用很弱，不能及时克服扰动的影响，致使被调参数的动态偏差增大，因此很少单独使用。

采用 PI 调节，效果就好的多。

PI 调节的微分方程为：

$$y(t) = K_P[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (3-7)$$

PI 调节器的输出特性曲线如图 3-7 所示

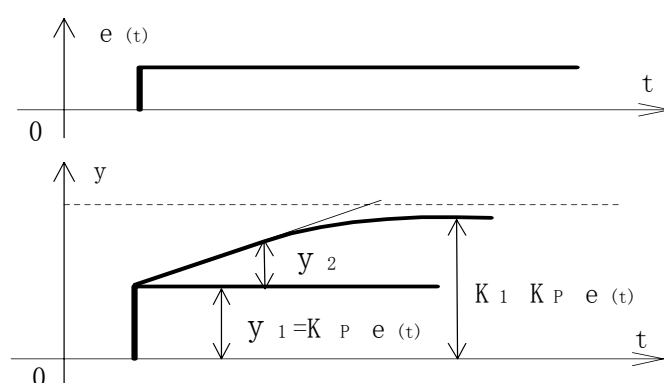


图 3-10 PI 调节器的输出特性曲线

由图 3-10 可以看出，阶跃作用时，首先有一个比例作用输出，随后在同一方向上，在比例输出的基础上，调节器输出不断增加，这便是积分的作用。如此，既克服了单纯比例调节存在静差的缺点，又克服了积分作用调节缓慢的缺点，即静差和动态特性都得到了改善，因此 PI 调节得到了广泛的应用。

### 3.比例-微分调节器

比例-微分调节器简称 PD 调节器，当对象具有较大的惯性时，PI 就不能得到很好的调节品质，如果在调节器中加入微分作用（D），将得到很好的改善。

微分调节作用方程为：

$$y(t) = T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3-5)$$

式中， $T_D$  为微分时间常数，代表微分作用的强弱。

微分调节作用动态响应曲线，如图 3-11 所示：

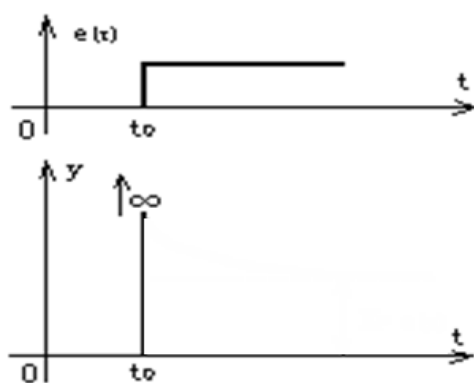


图 3-11 微分调节器响应曲线

从图 3-11 可以看出，当  $t=t_D$  时，引入阶跃信号，此时因为  $dt \rightarrow 0$ ，所以  $y(t) \rightarrow 0$ 。微分作用其输出只能反映偏差输入变化的速度，对于一个固定的偏差，不论其数值多大，都不会引起微分作用。因此，它不能消除静差，而只有偏差刚刚出现时产生一个大的调节作用。通常多采用 PD 调节。

PD 调节作用如图 3-12 所示。

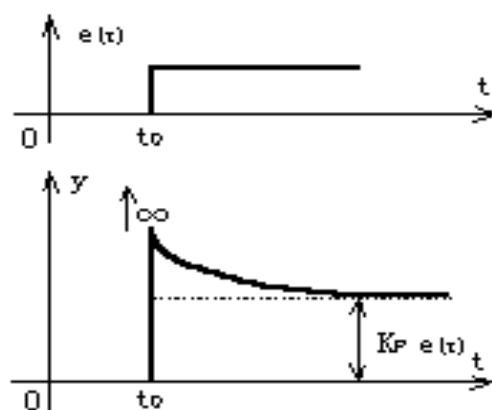


图 3-12 PD 调节作用的阶跃响应曲线

图 3-12 中当偏差刚一出现时，PD 调节器输出一个大的阶跃信号，然后微分输出按指数下降，最后，微分作用完全消失，成为比例调节。

可通过改变 $T_D$ 来改变微分作用的强弱。此种调节速度快，动态性能好，但仍存在静差。

#### 4.比例-积分-微分作用调节器（PID）

比例-积分-微分作用调节器，简称PID调节器，这是应用最多的一种调节器。

PID调节器的微分方程为：

$$y(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (3-6)$$

其对阶跃信号的响应曲线如图3-13所示

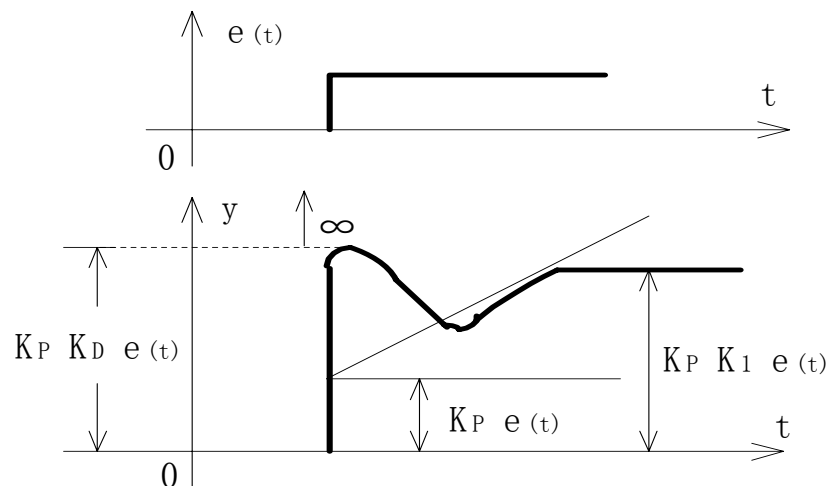


图3-13 PID调节作用的阶跃响应曲线

由图3-13可以看出，P、I、D三作用调节器，在阶跃信号的作用下，首先产生的是比例-微分作用，是调节器作用加强。然后进行积分，直到最后消除静差。因此PID调节从动态、静态都有所改善。

#### 5、PID调节器各校正环节的作用

- 1、比例环节：实时地成比例调节控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，一旦产生偏差，比例调节器立即发挥控制作用以缩小偏差。
- 2、积分环节：主要用来消除静态差，提高系统的无误度。积分作用的大小决定



于积分的时间常数  $T_I$ ， $T_I$  越大，积分作用越弱，反之则越强。

3、微分环节：能反应偏差信号的变化趋势(变化速率)，并能在偏差信号的值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

但在实际应用中根据需要采用 PI 调节器或 PD 调节器。

### 3.4 闭环控制系统

PID 控制有连续 PID 控制和数字 PID 控制，前者由模拟电子线路组成，不含智能元件，后者以微控制器为核心组成。闭环反馈控制系统的组成如图 3-14 所示：

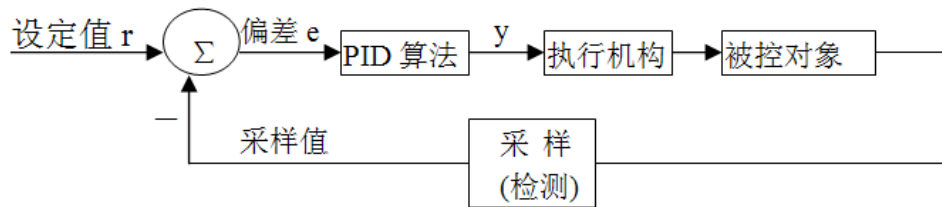


图 3-14 闭环反馈系统

数字 PID 控制常常采用增量 PID 算法，表达式如下：

$$y(k)=y(k-1)+\Delta y(k)$$

其中  $y(k)$  ——第  $k$  次输出的控制(信号)值

$y(k-1)$  ——前一次输出的控制(信号)值

$\Delta y(k)$  ——输出增量(可为正、负数)

$$\Delta y(k)=k_p[e(k)-e(k-1)]+k_i e(k)+k_D[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]$$

其中： $k_p$ ——比例系数

$k_i$ ——积分系数

$k_D$ ——微分系数

$e(k)$ ：第  $k$  次采样时的偏差值(采样值与设定值之差)

$e(k-1)$ ：第  $k-1$  次采样时的偏差值(采样值与设定值之差)

$e(k-2)$ ：第  $k-2$  次采样时的偏差值(采样值与设定值之差)

上式中有  $k_p$   $k_i$   $k_D$  3 个系数需要确定，在实际应用中具有难度，根据前人的研究，可采用如下的简化了的经验公式：

$\Delta y(k)=k_p[2.45e(k)-3.5e(k-1)+1.25e(k-2)]$ ，这样就只有一个系数  $K_P$ ，容易在实验中调整确定。

### 3.5 本章小结

本章详细的介绍了直流电机的驱动及控制理论。

(1) 首先介绍了用于驱动直流电机工作的高电压、大电流芯片 L298N 及其工作状态。

(2) 由于直流电机的转速与直流电机两端电枢的电压成正比，通过微控制器输出不同 PWM 来调节电机电枢两端电压，实现对转速控制。

(3) 对转速输出不断采样，引入闭环控制理论，根据设定的 PID 算法不断调整 PWM 输出占空比，实现直流电机的闭环控制系统。

## 第 4 章 基于 STM32 低功耗云台控制系统 硬件设计

基于前两章我们将系统组成, 系统控制原理进行了详细的阐述, 这一章将详细讲述基于 STM32 低功耗云台控制系统硬件设计。

### 4.1 STM32 微控制器最小系统电路

#### 4.1.1 电源供电方案

LM1117 是一个低压差电压调节器系列。其压差在 1.2V 输出, 负载电流为 800mA 时为 1.2V。它与国家半导体的工业标准器件 LM317 有相同的管脚排列。LM1117 通过 2 个外部电阻可实现 1.25~13.8V 输出电压范围。其供电原理图如图 4-1 所示:

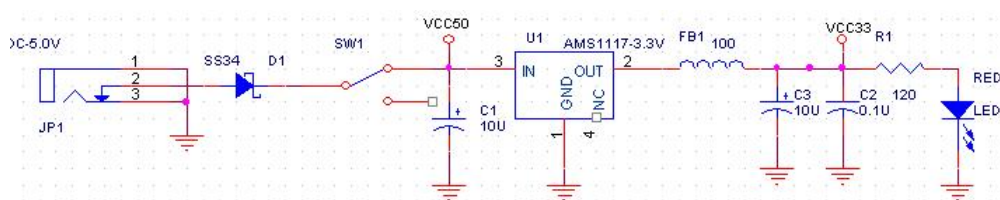


图 4-1 LM1117 供电电路

#### 4.1.2 系统复位电路

STM32 内部有一个完整的上电复位(POR)和掉电复位(PDR)电路, 当供电电压达到 2V 时系统既能正常工作。当 VDD/VDDA 低于指定的限位电压  $V_{POR}/V_{PDR}$  时, 系统保持为复位状态, 而无需外部复位电路。系统上电复位和掉电复位波形图如图 4-2 所示:

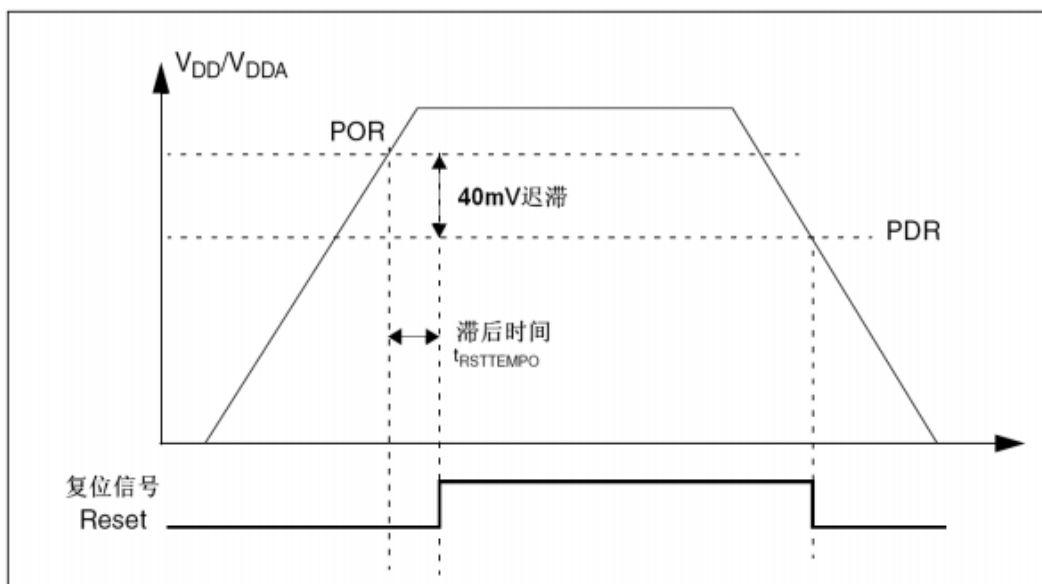


图 4-2 STM32 上电复位和掉电复位波形图

系统复位电路如图 4-3 所示

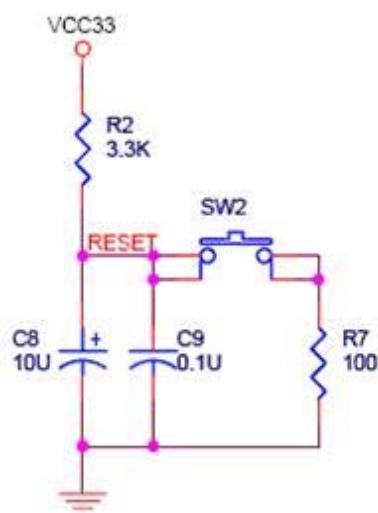


图 4-3 系统复位电路

### 4.1.3 STM32 启动模式

STM32 处理器内置三种启动模式，用户可以通过 BOOT[1:0]引脚选择三种不同启动模式。

启动模式选择引脚		启动模式	说明
BOOT1	BOOT0		
X	0	主闪存存储器	主闪存存储器被选为启动区域
0	1	系统存储器	系统存储器被选为启动区域
1	1	内置SRAM	内置SRAM被选为启动区域

根据用户选定的不同启动模式，主闪存存储器、系统存储器或 SRAM 可以按照以下方式访问：

- 从系统存储器启动：系统存储器地址被映射到启动空间(0x0000 0000)，但仍然可以在它原有的地址(互联型产品的原有地址为 0x1FFF B000，其它产品的原有地址为 0x1FFF F000)访问它。
- 从主闪存存储器启动：主闪存存储器地址被映射到启动空间(0x0000 0000)，但仍然可以在它原有的地址(0x0800 0000) 访问它，即闪存存储器的内容允许在两个地址区域访问（0x0000 0000 或 0x0800 0000）。
- 从内置 SRAM 启动：只允许从(0x2000 0000) 开始的地址区访问 SRAM 。

STM32 启动配置电路如图 4-4 所示：

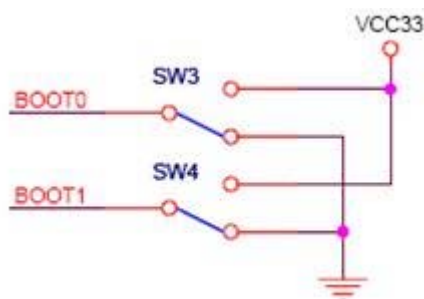


图 4-4 STM32 启动配置电路图

一般 BOOT0 和 BOOT1 跳线都接地。只有在 ISP 下载的情况下，BOOT0=1，BOOT1=0，下载完成后，把 BOOT0 的跳线接回 0，也即 BOOT0=0，BOOT1=0。

STM32 工作最小系统原理图如图 4-5 所示

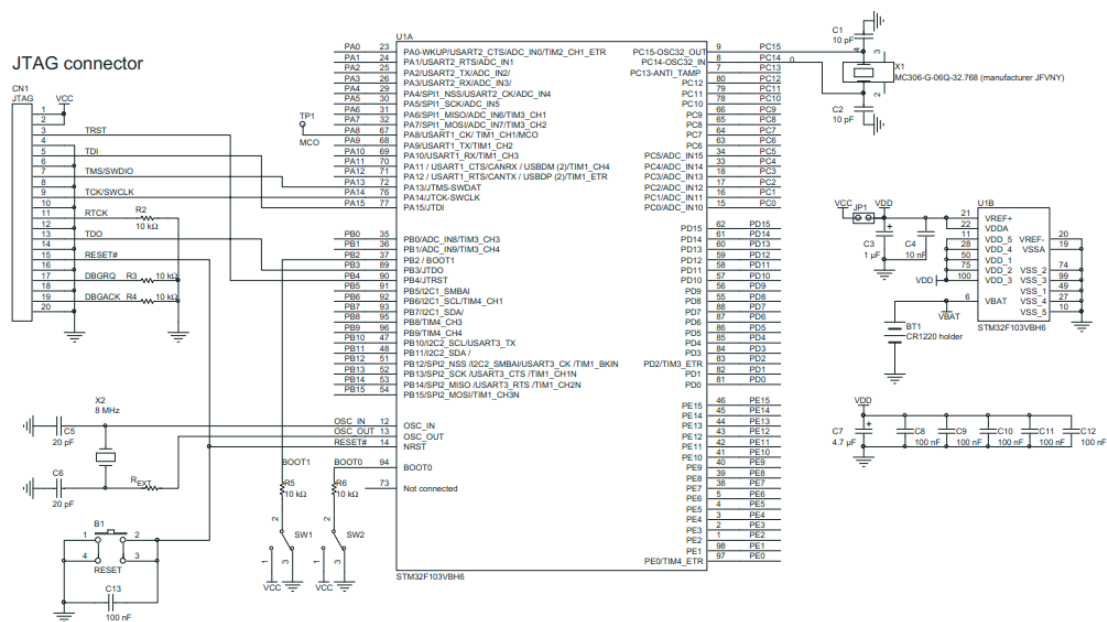


图 4-5 STM32 最小系统原理图

## 4.2 直流电机驱动电路

L298N 内部包含 4 通道逻辑驱动电路,是一种二相和四相电机的专用驱动器,即内含两个 H 桥的高电压大电流双全桥式驱动器,接收标准 TTL 逻辑电平信号,可驱动 46V、2A 以下电机。其电机驱动电路如图 4-6 所示。

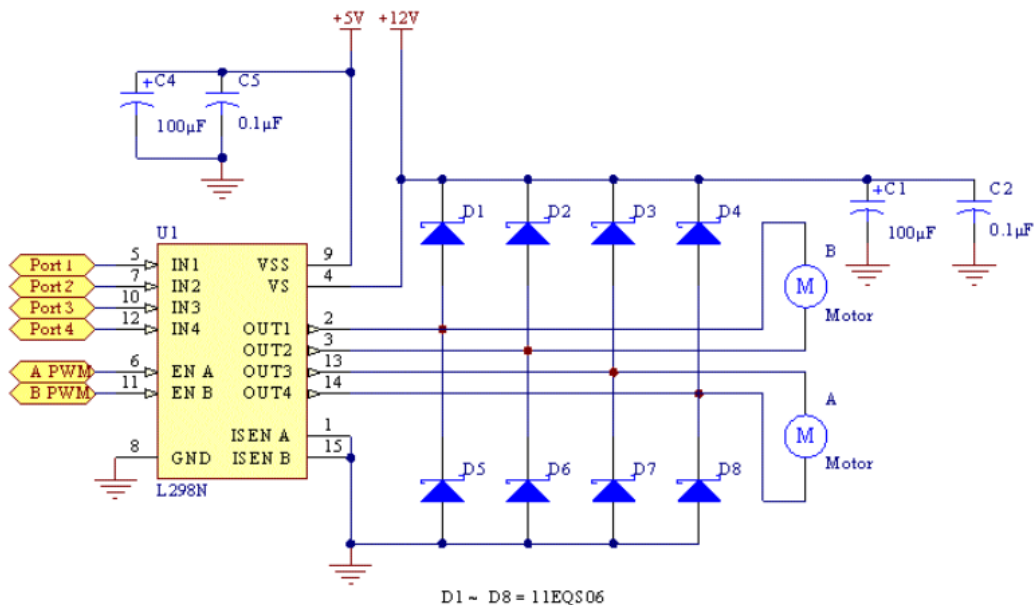


图 4-6 L298N 电机驱动电路

OUT1、OUT2 和 OUT3、OUT4 之间分别接 2 个直流电机。IN1、IN2、IN3、IN4

引脚接单片机输入控制电平，控制电机的正反转，ENA，ENB 接控制使能端，控制电机的停转。

另外特别在直流电机的电枢两端并联一个磁片电容 104，以稳定电机的电压不致于对单片机造成干扰。

## 4.3 串口通信电路

本系统由于要接收云台控制命令，向上位机返回云台位置、速度等参数，需要具有 RS-232 通讯功能。MAX232 芯片是美信公司专为 RS-232 标准串口设计的单电源电平转换芯片，使用+5V 电源供电。

### RS232 (DB9)引脚定义

- 1 : DCD:载波检测。主要用于调制解调器通知计算机其处于在线状态，即调制解调器检测到拨号音，处于在线状态。
- 2 : RXD:此引脚用于接收外部设备发送的数据；在你使用调制解调器时，RXD 引脚上有数据进入，你会发现 RXD 指示灯在闪烁。
- 3 : TXD:此引脚用于将计算机的数据发送给外部设备；在你使用 Modem 时，当计算机正在通过 TXD 引脚给外部设备发送数据时，你会发现 TXD 信号灯在闪烁。
- 4 : DTR:数据终端就绪；当此该引脚为高电平时，通知调制解调器可以进行数据传输，表示计算机已经准备好。
- 5 : GND:信号地。
- 6 : DSR:数据设备就绪；若此引脚为高电平时，通知计算机调制解调器已经准备好，可以进行数据通讯了。
- 7 : RTS:请求发送；此脚由计算机来控制，用以通知调制解调器立刻传送数据至计算机；否则，调制解调器将收到的数据暂时放入缓冲区中。
- 8 : CTS: 清除发送；此脚由调制解调器控制，用以通知计算机将欲发送的数据送至调制解调器。
- 9 : RI: Modem 通知计算机有呼叫请求，是否响应呼叫请求由计算机决定。

其工作电路如图 4-7 所示

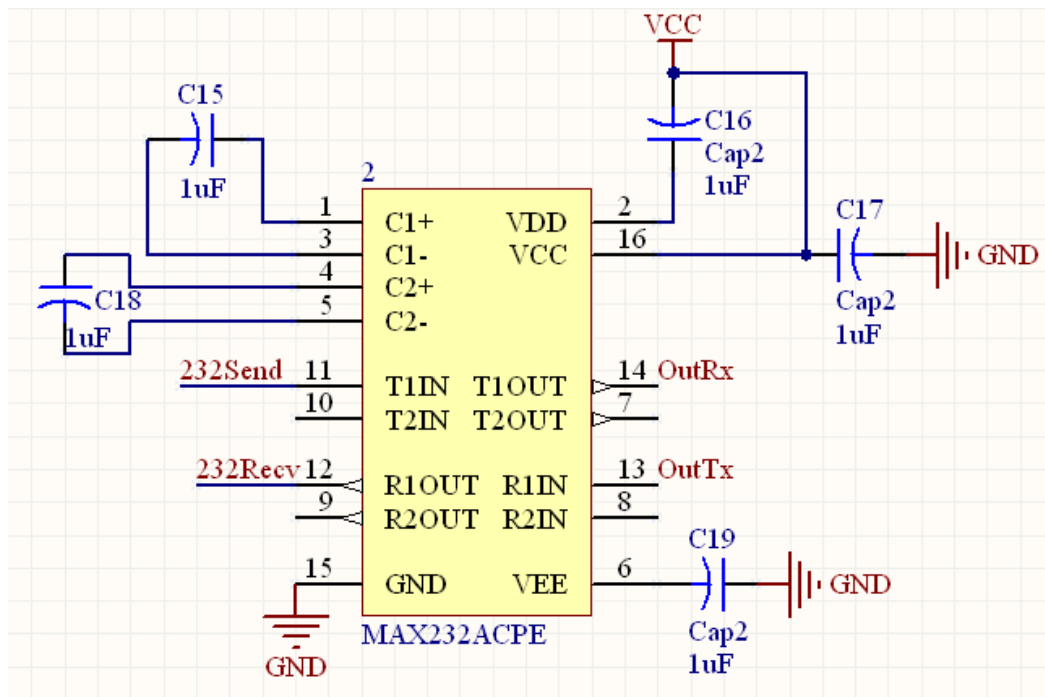


图 4-7 MAX232 串口通信电路图

MAX232 芯片是专门为电脑的 RS-232 标准串口设计的接口电路,该芯片使用+5v 单电源供电。内部组织结构基本可分三个部分:

第一部分为电荷泵电路。由 1、2、3、4、5、6 脚和 4 只电容构成。该部分功能是产生+12v 和-12v 两个电源,提供给 RS-232 串口电平的需要。

第二部分为数据转换通道。由 7、8、9、10、11、12、13、14 脚构成两组数据通道。其中 13 脚 (R1IN)、12 脚 (R1OUT)、11 脚 (T1IN)、14 脚 (T1OUT) 为第一组数据通道。8 脚 (R2IN)、9 脚 (R2OUT)、10 脚 (T2IN)、7 脚 (T2OUT) 为第二组数据通道。

TTL/CMOS 数据从 T1IN、T2IN 输入转换成 RS-232 数据从 T1OUT、T2OUT 传送到电脑 DP9 插头; DP9 插头的 RS-232 数据从 R1IN、R2IN 输入转换成 TTL/CMOS 数据后从 R1OUT、R2OUT 输出。

第三部分为供电。15 脚 DNG、16 脚 VCC (+5v)。



## 4.4 旋转编码器信号采集电路

为实现云台转动的精确控制与角度计数，本系统设计采用 OMRON 旋转编码器作为云台转动角速度计数器。其输出电路如图 4-8 所示：

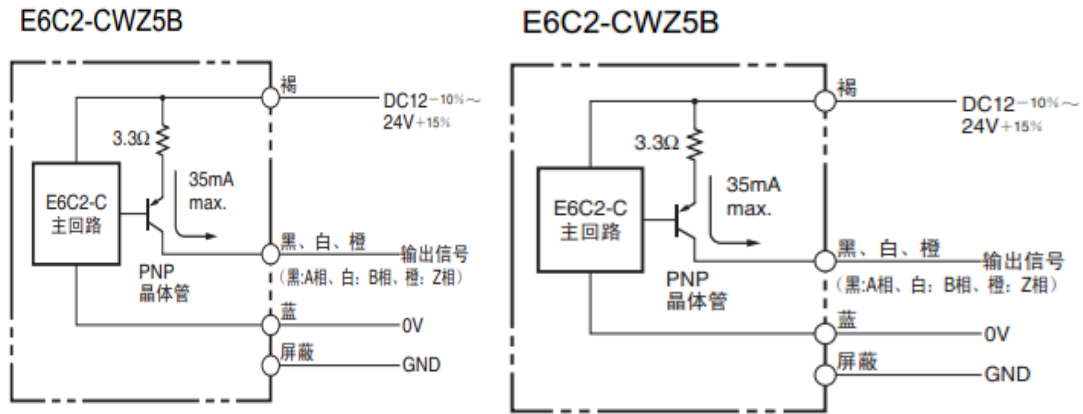


图 4-8 旋转编码器电路

产生的输出信号有正弦波（电流或电压），方波（HTL、TTL），推拉式，集电极开路（NPN、PNP）多种形式，其中 HTL 也称推挽式、推拉式输出，TTL 为长线差分驱动（对称 A,A-;B,B-;Z,Z-），编码器的信号接收设备接口应与编码器相应接口对应。

信号连接—编码器的脉冲信号一般连接计数器、PLC、计算机，PLC 和计算机连接的模块有低速模块与高速模块之分，开关频率有低有高。

在本系统中与 STM32 接口电路如图 4-9 所示

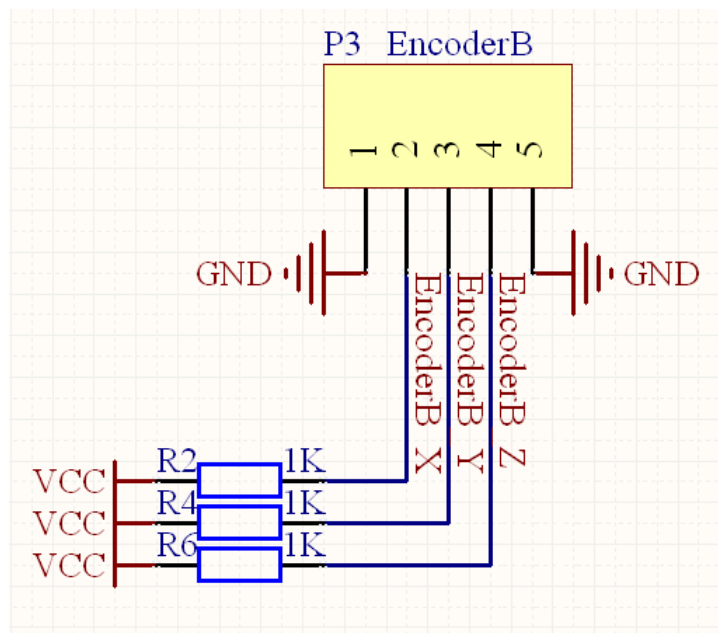
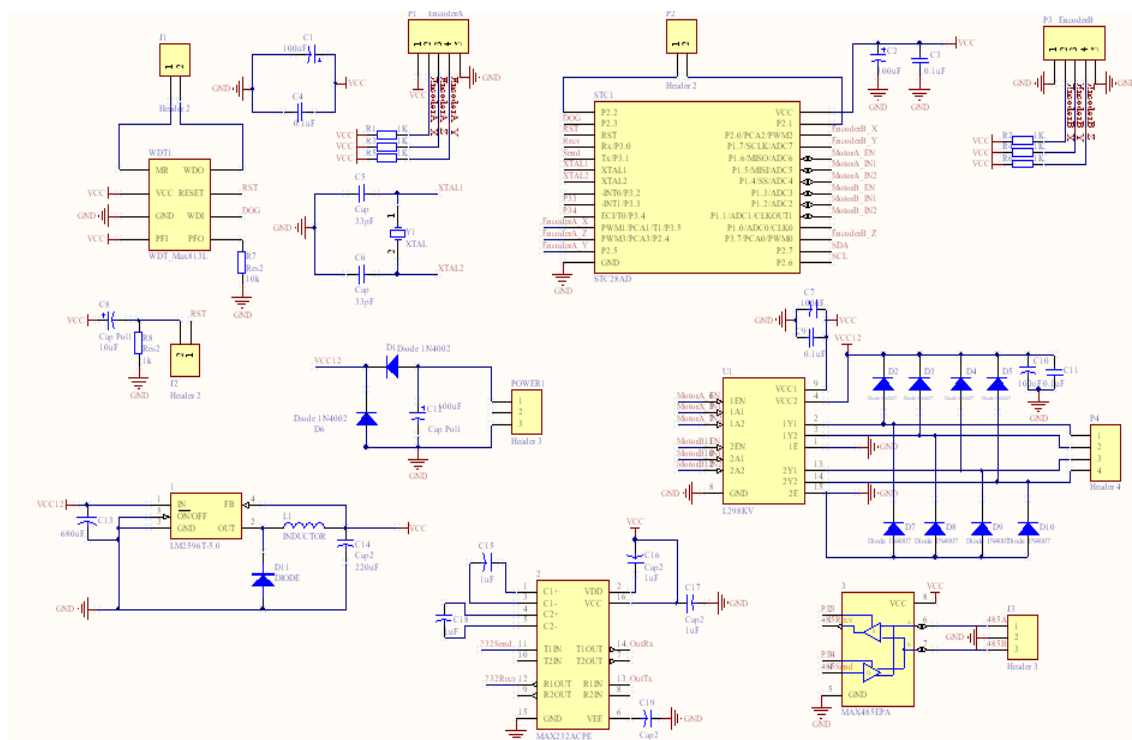


图 4-9 旋转编码器信号采集电路

## 4.5 本章小结

整个系统便是由以上 STM32 最小系统，直流电机驱动模块，串口通信模块、角度计数模块组合而成。STM32 定时器输出 PWM 使能 L298N 芯片，驱动直流电机转动，云台转动带动 OMRON 旋转编码器转动，旋转编码器输出的电平信号被 STM32 微控制器捕获，STM32 根据 PID 算法调整 PWM 占空比，来调节云台转速，实现云台的高效低功耗运行，系统总电路图如图 4-10 所示。



# 第 5 章 基于 STM32 低功耗云台控制系统 软件设计

## 5.1 云台控制协议

### 5.1.1 PELCO 协议

在 IBMS 接口开发中，我们需要用到一些常用的协议，而基于 PELCO (派尔高)协议的监控器材在我国有很广泛的应用。PELCO 有自己的传输控制协议，当它的产品配套使用时，可以相互兼容。但在某些情况下，由于项目工程的需要，要使用其它设备(比如电脑、键盘)来控制 PELCO 的矩阵或镜头，这就要求充分了解 PELCO 传输协议。

PELCO 常用的两种协议：PELCO-D 协议和 PELCO-P 协议。

#### - PELCO-D 协议解析

PELCO-D 协议一般用于矩阵和其它设备之间的通信。它的格式如下：

Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
同步字	地址码	命令字 1	命令字 2	数据 1	数据 2	校验码

其特点是：

- (1) 所有的值都采用 16 进制表示。
- (2) 同步字通常都是 \$FF。
- (3) 地址码是指与通信矩阵的那台设备的逻辑地址，可以在设备中进行设置。

命令字 1 和命令字 2 设置如下：

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
命令字 1	Sence 码	为 0	为 0	自动/手动扫描	摄像机打开/关闭	光圈关闭	光圈打开	焦距拉近
命令字 2	焦距拉远	视角变宽	视角变窄	上	下	左	右	为 0

Sence 码与 Bit4 和 Bit3 有关。

在 Bit4 和 Bit3 值为 1 的情况下，如果 Sence 码值为 1，则对应的命令就是表示自动扫描运行和和摄像机打开；如果 Sence 码值为 0，则对应命令就是表示手动扫描运行和摄像机关闭。当然如果 Bit4 或 Bit3 值为 0 的话为无效命令，不予执行。

数据字节 Byte1 表示镜头左右平移的速度，数值从\$00(停止)到\$3F(高速)，另外还有一个值是\$FF，表示镜头平移最高速。

数据字节 Byte2 表示镜头上下移动的速度，数值从\$00(停止)到\$3F(最高速)。

校验码是指从字节 Byte2 到字节 Byte6 这 5 个数的校验和(若超过 255 则除以 256 然后取余数)。

- PELCO-P 协议解析

与 PELCO-D 协议相比,PELCO-P 协议一般采用 RS-485 传输,波特率为 4800, 1 位起始位和停止位，8 位数据位，无校验。其编码格式如下：

Byte	Value	Function
1	\$A0	起始码
2	\$00 to \$1F	地址码
3	Data byte 1	数据位 1
4	Data byte 2	数据位 2
5	Data byte 3	数据位 3
6	Data byte 4	数据位 4
7	\$AF	停止码
8	\$00-\$FF	校验码

起始码是固定值\$A0。

地址码是设备的逻辑地址，可由接收设备上的 DIP 开关来设定。

数据位 1 到 4 的意义如下：

	Bit number							
	7	6	5	4	3	2	1	0
数据位 1	0	摄像机 打开	自动 扫描	摄像机打开/关 闭	光圈 关闭	光圈 打开	焦距 拉近	焦距 拉远
数据位 2	0	视角 变宽	视角 变窄	下	上	左	右	0
数据位 3		平移速度 \$00(停止)到 \$3F(高速)以及\$40(最高速)						
数据位 4		上下移动速度\$00(停止)到 \$3F(最高速)						

需要特别说明的是：

- (1) 停止码是固定值 **\$AF** 。
- (2) 校验码是 **Byte2** 到 **Byte6** 这 5 个数的异或值(XOR)。
- (3) 地址码是从 0 编起的，所以地址码**\$00** 表示第一台设备。

### 5.1.2 PELCO 协议算法

```
class PelcoD

{

private static readonly byte STX = 0xFF;           //同步字节

private const byte TiltUp = 0x08;                 //上
private const byte TiltDown = 0x10;               //下
#region 镜头上下移动的速度
private const byte TiltSpeedMin = 0x00;           //停止
private const byte TiltSpeedMax = 0x3F;           //最高速
#endregion

public enum Tilt { Up = TiltUp, Down = TiltDown } //上下控制
public byte[] CameraTilt(uint deviceAddress, Tilt action, uint speed)
{
if (speed < TiltSpeedMin)
speed = TiltSpeedMin;
if (speed > TiltSpeedMax)
speed = TiltSpeedMax;
return Message.GetMessage(deviceAddress, 0x00, (byte)action, 0x00, (byte)speed);
}
```

## 5.2 PID 算法程序设计

在第三章我们对直流电机的闭环控制及 PID 算法原理进行了阐述，本节着重讲解 PID 算法在电机控制上的实现。

PID 算法流程图如图 5-1 所示。

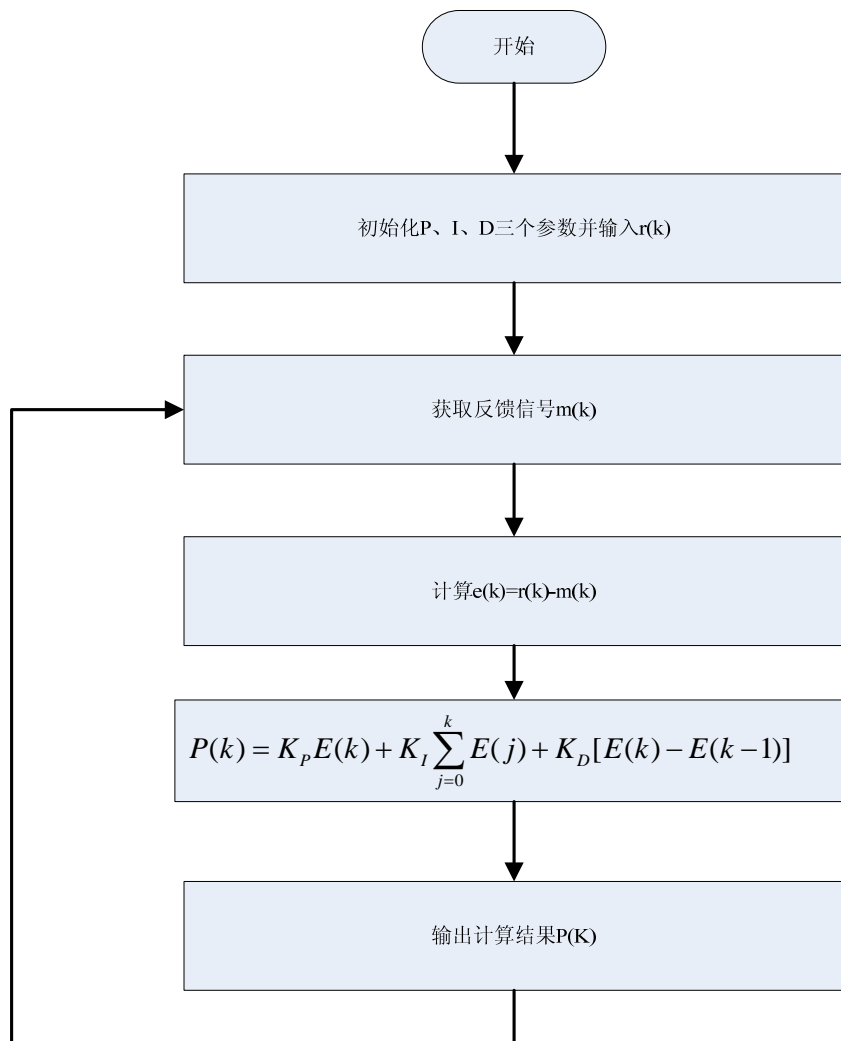


图 5-1 PID 算法流程图

本流程图中的关键算法为 PID 的计算过程，代码如下：

```
double PIDCalc( PID *pp, double NextPoint )
```

```
{
```

```

double  dError,

        Error;

Error = pp->SetPoint -  NextPoint;           // 偏差

pp->SumError += Error;                        // 积分

dError = pp->LastError - pp->PrevError;      // 当前微分

pp->PrevError = pp->LastError;

pp->LastError = Error;

return (pp->Proportion * Error               // 比例项

        +  pp->Integral * pp->SumError       // 积分项

        +  pp->Derivative * dError          // 微分项

);

}

```

### 5.3 STM32 微控制器程序

STM32 微控制器程序为本系统的核心控制程序，本系统所有控制命令及状态显示都由 STM32 微控制器完成。STM32 微控制器程序主要完成了系统上电初始化，产生 PWM 脉冲，旋转编码器计数中断，串口通信等。

本程序编写环境为 RealView MDK-ARM Version:4.12。RealView MDK (Miertococontroller Development Kit) 是 ARM 公司最先推出的基于 ARM 微控制器的专业嵌入式开发工具。它采用了 ARM 的最新技术编工具 RVCT，集成了享誉全球的  $\mu$  Vision IDE，因此特别易于使用，同时具备非常高的性能。它



适合不同层次的开发者使用，包括专业的应用程序开发工程师和嵌入式软件开发的入门者。RealView MDK-ARM Version:4.12 的编程界面如下所示

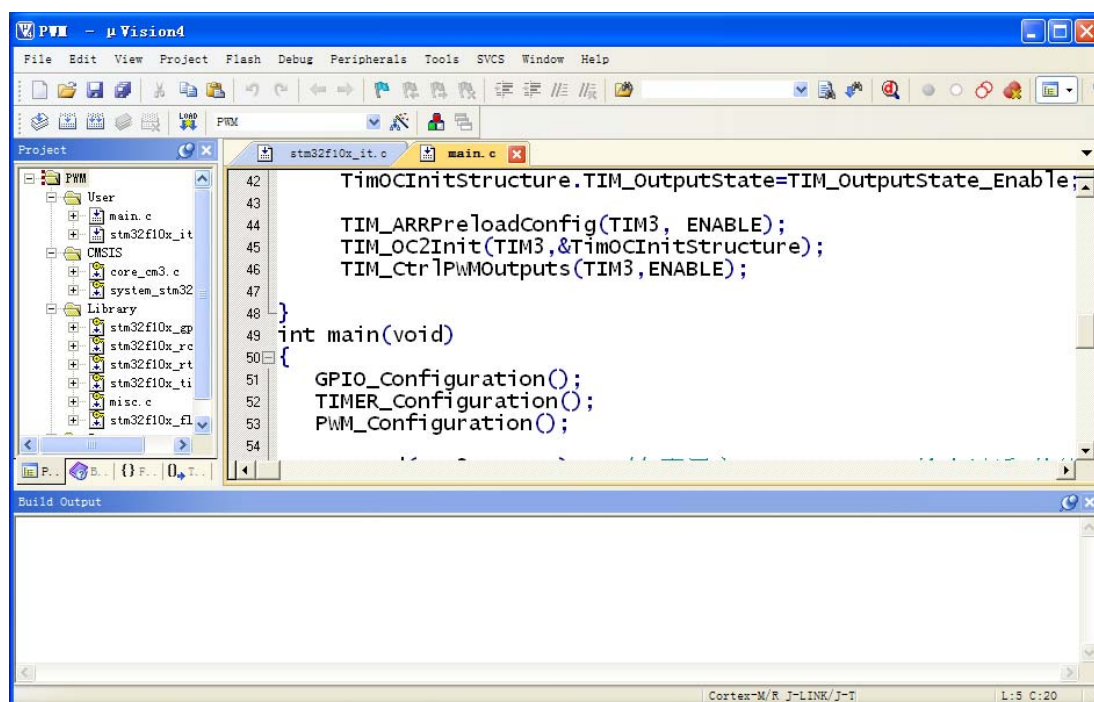


图 5-2 RealView MDK 编程界面

本系统程序流程图如图 5-3 所示

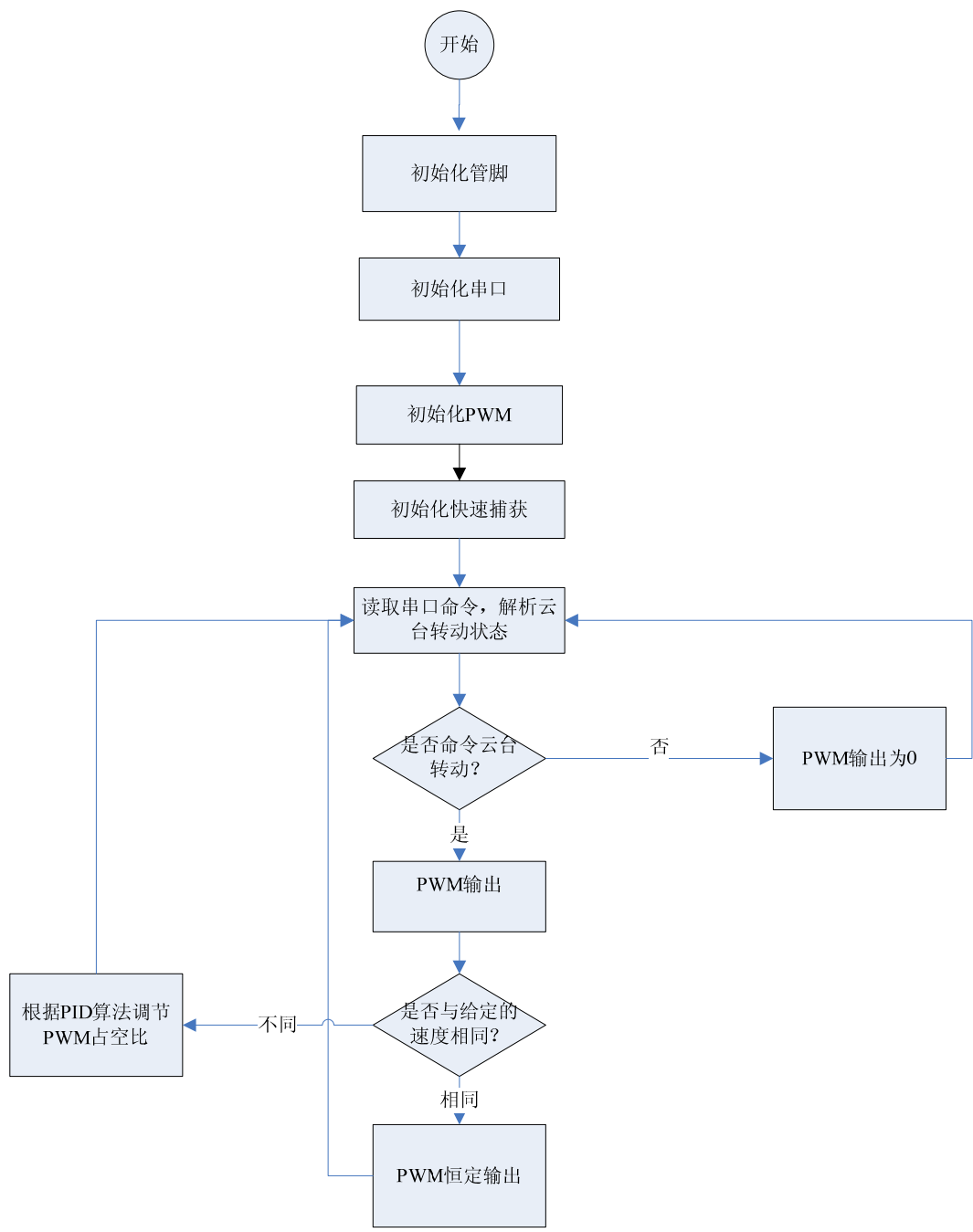


图 5-3 系统流程图

STM32 为了实现低功耗, 在使用外设管脚时, 必须对管脚进行初始化, 配置管脚时钟, 管脚初始化核心代码如下:

```
void GPIO_Configuration(void)
{
```

```

GPIO_InitTypeDef    GPIO_InitStructure;

RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOB|
                        RCC_APB2Periph_AFIO,ENABLE);

GPIO_PinRemapConfig(GPIO_PartialRemap_TIM3,ENABLE);

                        //TIM_CH2 部分映射到 PB5

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin=GPIO_Pin_5;

                        //设置部分重映像以后 TIM3_CH2 的输出被映像到 PB5 上

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode=GPIO_Mode_AF_PP;

                        //管脚复用输出模式

GPIO_InitStructure.GPIO_Speed=GPIO_Speed_50MHz;    //管脚 IO 速度
为 50MHz

GPIO_Init(GPIOB,&GPIO_InitStructure);

}

```

STM32 的 IO 管脚配置口默认为浮空输入，把选择权留给用户，这是一个很大的优势：一方面浮空输入确保不会出现用户不希望的默认电平（此时电平取决于用户的外围电路）；另一方面降低了功耗，因为不管是上拉还是下拉，都会有电流消耗。从另一个角度来看，不管 I/O 管脚的默认配置如何，还是需要在输出的管脚外加上拉或下拉，这是为了保证芯片上电期间和复位时，输出的管脚始终处于已知的电平。

由于云台要通过 MAX232 芯片与上位机进行通信，需要启用串口通信，串口初始化核心代码为：

```

void USART_Configuration(void)

{

```

```

    USART_InitTypeDef    USART_InitStructure;

    USART_StructInit(&USART_InitStructure);

    USART_InitStructure.USART_BaudRate=115200; //串口波特率为 115200

    USART_InitStructure.USART_WordLength=USART_WordLength_8b; //
串口字节长度为 8 位

    USART_InitStructure.USART_StopBits=USART_StopBits_1; //停止位为
1 位

    USART_InitStructure.USART_Parity=USART_Parity_No;

    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl=

        USART_HardwareFlowControl_None; //串口没有硬件流
        控制

    USART_InitStructure.USART_Mode=

        USART_Mode_Tx|USART_Mode_Rx; //串口工作模式为发送或接收

    USART_Init(USART2,&USART_InitStructure); //串口 2 结构初始化

    USART_ITConfig(USART2,USART_IT_RXNE,ENABLE); //串口 2 接收
中断使能

    USART_Cmd(USART2,ENABLE); //串口 2 使能

}

```

其中 STM32 输出 PWM 方波用于直流电机控制流程如图 5-4 所示

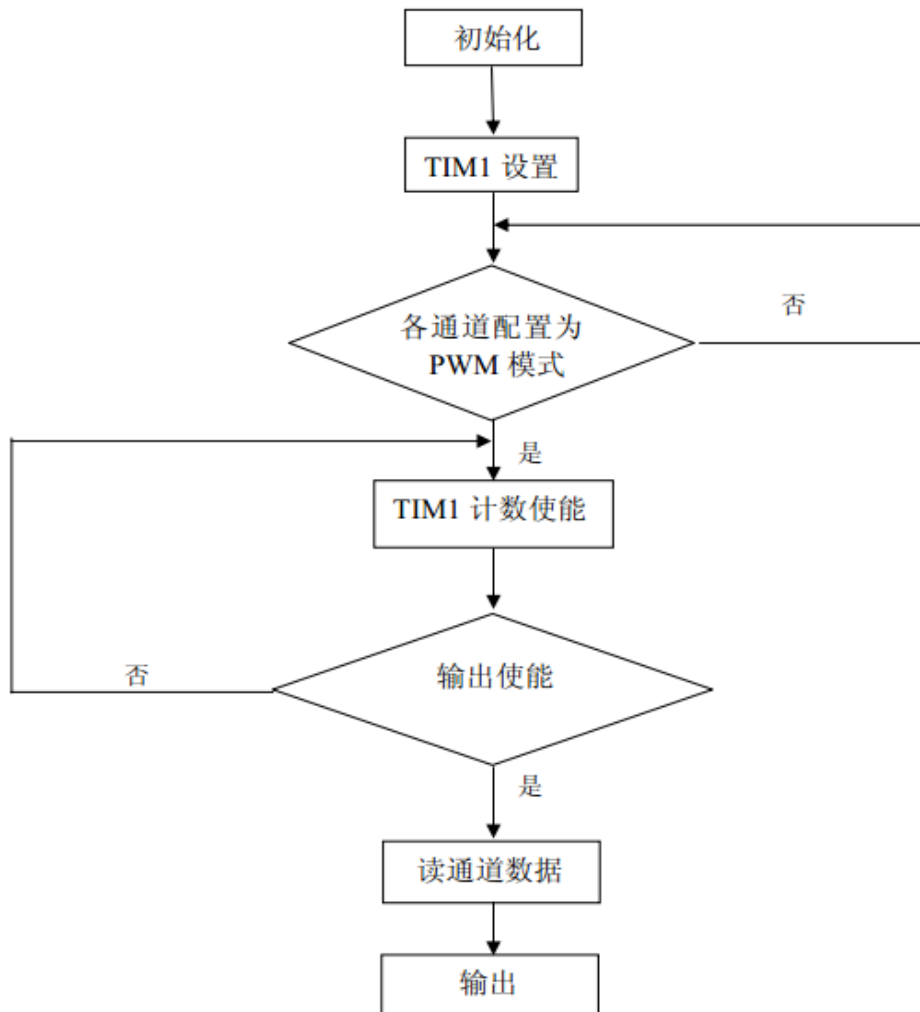


图 5-4 直流电机 PWM 输出流程图

STM32 输出 PWM 代码如下所示

定时器配置代码如下：

```
void TIMER_Configuration(void)
```

```
{
```

```
    TIM_TimeBaseInitTypeDef    TIM_TimeBaseStructure;
```

```
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3,ENABLE);
```

```
    TIM_DeInit(TIM3); //Timer3 设置为缺省值
```

TIM\_TimeBaseStructure.TIM\_Prescaler=10; //预分频系数为 0,此时 TIMER 的频率为 72MHz

TIM\_TimeBaseStructure.TIM\_Period=7200-1; //设置计数溢出大小, 每 7200 个数产生一个更新, 即 PWM 的输出频率 10KHz

TIM\_TimeBaseStructure.TIM\_CounterMode=TIM\_CounterMode\_Up; //计数器模式向上计数

TIM\_TimeBaseStructure.TIM\_ClockDivision=TIM\_CKD\_DIV1; //设置时钟分割

```
TIM_TimeBaseInit(TIM3,&TIM_TimeBaseStructure);  
  
}
```

PWM 输出代码如下:

```
void PWM_Configuration(void)  
{  
  
    TIM_OCInitTypeDef    TimOCInitStructure;  
  
    TIM_OCStructInit(&TimOCInitStructure);  
  
    TimOCInitStructure.TIM_OCMode=TIM_OCMode_PWM1;  
  
    TimOCInitStructure.TIM_Pulse=dutyfactor*7200/100; //设置占空比, 占空比  
    =(CCRx/ARR)*100% 或 (TIM_Pulse/Tim_Period)*100%  
  
    TimOCInitStructure.TIM_OCPolarity=TIM_OCPolarity_High; // TIM 输出极  
    性高  
  
    TimOCInitStructure.TIM_OutputState=TIM_OutputState_Enable;  
  
  
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM3, ENABLE); //定时器 3 预装值使能  
  
    TIM_OC2Init(TIM3,&TimOCInitStructure);
```

```

TIM_CtrlPWMOutputs(TIM3,ENABLE);    //使能定时器 3 PWM 输出

}

```

STM32 可提供的时间精度为 13.8ns，其内部高级定时器是由一个 16 位的自动重载，可产生高精度的 PWM 波形(输出比较 PWM、嵌入“死区”的互补 PWM)。输出的 PWM 模式有中心对称和边沿对称两种模式，由于中心对称模式下 PWM 波形没有精度损失，因此，在该文章中选取中心对称模式下的 7 路带死区互补输出的 PWM 作为驱动芯片的控制信号。

电机控制 PWM 信号是 TIMx\_ARR 寄存器，以确定的频率，占空比决定的 TIMx\_CCRx 寄存器。

用 Altium designer 绘制的 PCB 电路板如图 5-5 所示：

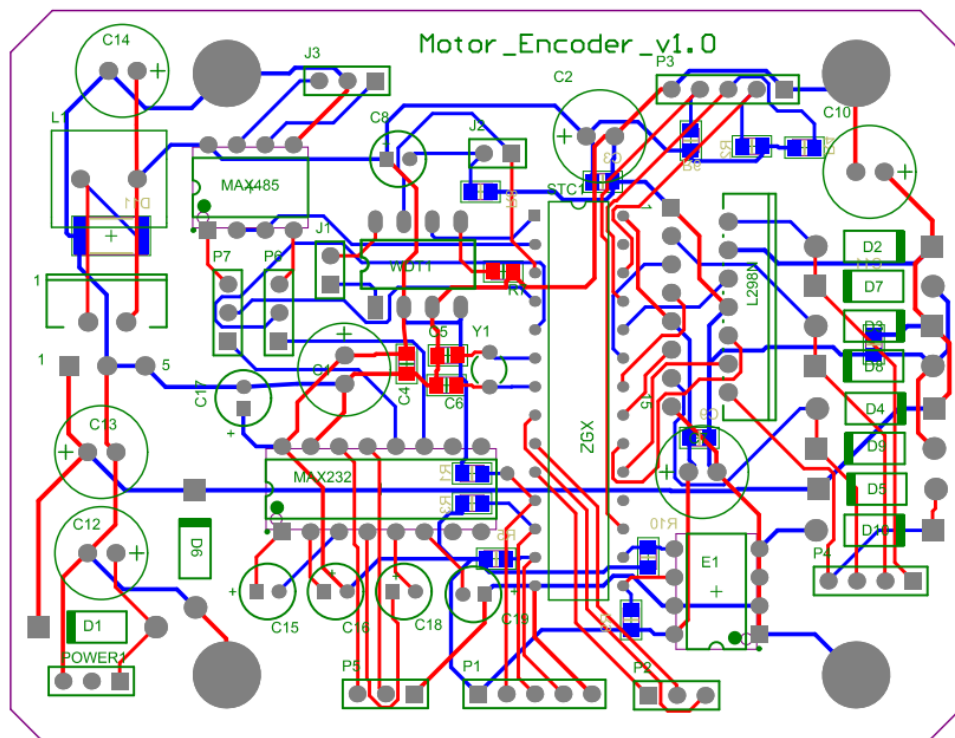


图 5-5 系统 PCB 电路图

以上就是基于 STM32 低功耗云台控制系统电路图，主要由直流电源系统、微处理器系统、直流电机驱动系统、旋转编码器信号采集系统、串口通信系统构成。

安装完成后实物如图 5-6 所示：

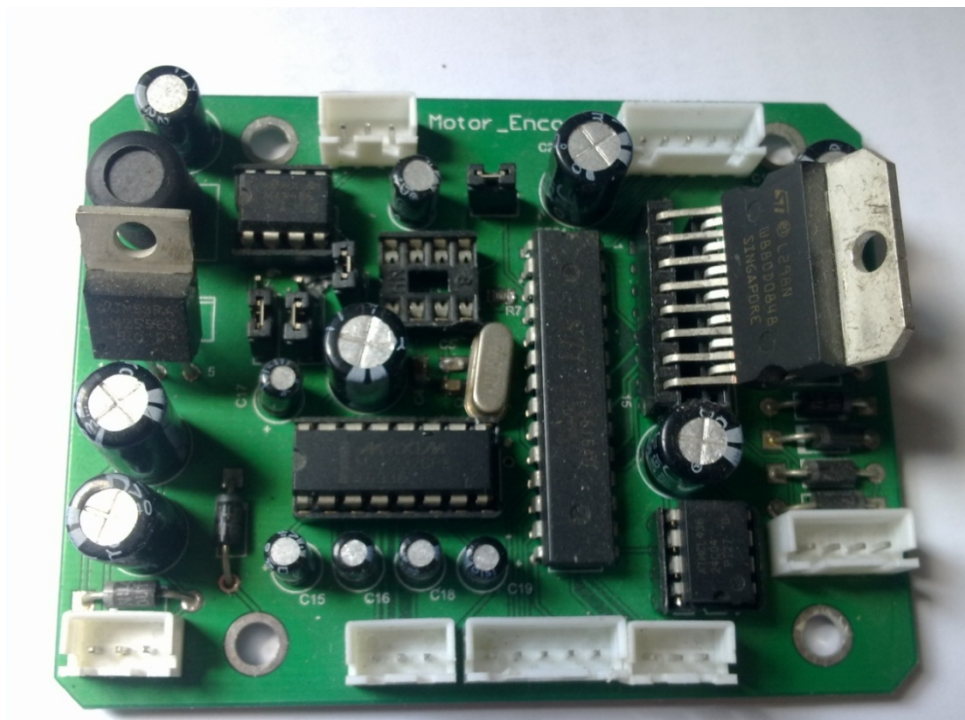


图 5-6 安装完成后实物图

## 5.4 本章小结

本章主要介绍了在系统设计过程中的软件设计思想及控制策略。主要是云台控制协议 PELCO 协议及电机转速控制 PID 算法设计。其次针对 STM32 的编程环境及其 PWM 输出给出了核心代码，本章最后给出了系统最终电路图，经过多次调试试验，该系统能完全满足使用要求。



## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 总结

本课题针对青岛市 2014 年世界园艺博览会森林防火视频监控项目中存在的问题，以 STM32 高性能、低功耗芯片为核心，结合直流电机控制理论及云台控制协议，研究并设计了一套基于 STM32 低功耗云台控制系统，与之前以步进电机为驱动源的云台控制系统相比，该系统具有功耗小、控制精确、使用寿命长等优点，非常适合在电力资源紧缺的情况下使用。目前该系统运行稳定，故障率低，为森林防火做出了十分重要的作用。

在本课题的研究设计过程中，充实了我的理论知识，锻炼了我的动手能力及解决问题的能力，使我对低功耗及直流电机控制理论有了全新的认识，同时对 STM32 微控制器也有了更深刻的理解。在实际动手操作过程中遇到的问题和解决问题的方法使我受益匪浅，开阔了视野，丰富了经验，使我更有信心面对今后的机遇和挑战。

本文虽然完成了研究设计的初衷，但在设计过程中及后期使用后发现还是有很多可以改进或升级的地方。比如在硬件设计上采用的还是比较传统的串口通信，而没有使用速度更快，协议支持更加完整的网口通信，在下次改进中可以充分利用 STM32 的网口功能，这样的云台控制系统更便于用户使用，另外软件设计中也没有启用 STM32 自身的看门狗功能，安装在山顶的云台控制系统一旦程序跑飞将失去控制，这些都是以后系统设计需要避免的问题。

### 6.2 展望

未来推动中国视频产业持续发展的动力主要体现在四个方面：安防应用范围不断扩大，高清监控需求爆发性增长、安防企业资本化进程加剧、物联网国家战略对安防利好、安防十二五规划引导产业政策对安防行业的倾斜及各地政府对当地安防企业的关注度和扶持力度增加。

国家十二五规划提出要大力发展以数字城市和智慧城市建设为核心的物联

网城市建设，在以数字城市和智慧城市为核心的物联网城市建设中，安防系统是最核心的应用系统。在建或已建的数字城市的项目，包括了平安城市视频监控系统，智能交通系统，智能家居系统，智能社区系统，数字城管系统，城市一卡通系统等等诸多安防子系统。这为中国视频监控行业的发展注入新的动力。国内视频监控企业已经敏锐的觉察出其中蕴藏的商机，并成功抓住了机遇。如 CSST 中国安防科技公司，从 2007 年即开始布局数字城市的建设和运营。2008--2009 年，用了 2 年的时间完成了总价值 2.1 亿元的昆明数字城市项目。2010 年 CSST 实现了总值超过 50 亿元的数字城市项目，2011 年仅南京智慧城市一个项目就为 CSST 带来了 38 亿元的建设合约，全年项目合约预计超过 70 亿元。海康威视则一举夺得了重庆市最大的物联网项目——重庆市社会公共视频信息管理系统建设项目 50 亿元的合约。

中国物联网城市建设将会给中国安防产业的发展带来多大的市场增长空间目前我们还无法做准确的判断，但是，从 2004 年国家平安城市建设及科技强警示范城市建设对视频监控行业及其他安防细分行业的推动来看，物联网城市建设对视频监控行业的巨大推动用还远远没有显露出来。

2011 年，是我国十二五规划的开局之年。中国安防行业主管部门在《中国安防行业“十二五”发展规划》(2011-2015)中提出，十二五期间，我国安防产业的发展目标是到“十二五”末期实现产业规模翻一番。年增长率达到 20%左右，2015 年安防产业总产值达到 5000 亿元，实现增加值 1600 亿元，年出口交货值达到 600 亿元以上。产业结构调整初见成效，安防运营及各类服务业所占比重达到 20%以上。



## 参考文献

- [1] 视频监控平台总体方案概述. 武汉烽火网络有限责任公司, 2006
- [2] 龙欣. 多协议云台模块设计及视频大纲技术研究应用:[硕士学位论文]. 武汉. 武汉理工大学, 2009
- [3] 余卫宇, 曹燕, 谢胜利. 视频摘要的现状和研究进展, 计算机应用研究, 2008. 07
- [4] 何国田, 胡建明. 住宅小区网络监控系统的设计与研究. 光电子技术与信息, 2006, (04)
- [5] Zhaoyu Liu, Dichao Peng, Yuliang Zheng, Liu. J. Communication protection in IP-based video surveillance systems Multimedia, Seventh IEEE International Symposium on 12-14Dec. 2005 Page(s):8
- [6] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002, 10-29
- [7] 意法半导体. 基于STM32微控制器的先进电机控制方法[M]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011
- [8] 李素芳, 贾正春, 许强. 一种新型的交流伺服驱动器控制电源的设计[J]. 电工技术, 2003. (04):63-65
- [9] 李长红, 陈明俊, 吴小役. PMSM调速系统中最大转矩电流比控制方法的研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 169-173
- [10] 黎永华, 皮佑国. 基于磁定位原理的永磁同步电机转子初始位置定位研究[J]. 电气传动, 2010, 40(3):28-31
- [11] 徐鹏. 大型设备监控系统的设计和实现:[D]. 上海: 上海交通大学, 2009
- [12] 贾茜. 智能视频监控中运动目标检测与跟踪技术研究及实现:[硕士学位论文]. 武汉: 中南民族大学, 2009
- [13] F.H. Wright. "Method and Apparatus for Electronically Commutating a Direct Current Motor without Position Sensors," US Patent 4162435, July197
- [14] 刘军, 李天舒. 单片机在无位置传感器无刷直流电机开环起动中的应用[J]船电技术, 2006(03)
- [15] Jiang Dan, Yu Yuan. A Multi-object Motion-tracking Method for Video

Surveillance. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2007.08

- [16] 中国电信网络视频监控业务技术规范 (V3.0)—客户端单元 (cU) 分册. 中国电信, 2007
- [17] Rim Cucchiara. Multimedia Surveillance Systems[A]. The third ACM international Workshop on Video surveillance and sensor networks[C]. Hilton Singapore, Nov 2005:1-10
- [18] Y.Yao, B.Abidi, M.Abidi. Fusion of omnidirectional and PTZ cameras for accurate cooperative tracking[J]. Video Signal Based Surveillance. Nov 2006: 46-51
- [19] Pelco-D, Pelco-P Communication Protocol. Pelco Incorporated
- [20] Philips Communication Protocol. Philips Incorporated
- [21] Everts.I, Sebe.N, Jones.G. Cooperative Object Tracking with Multiple PTZ Cameras[A]. The 14th International Conference on Image Analysis and Processing[C]. Modena, Italy. Sept 2007:323-330
- [22] 张薇. 大型云镜摄像机控制系统设计及实现[D]. 江苏: 南京理工大学. 2007
- [23] 陈峰. 可穿戴型助力机器人技术研究:[博士学位论文]. 安徽: 中国科学技术大学. 2007
- [24] 黄忠霖. 自动控制原理的MATLAB实现. 北京: 国防工业出版社, 2007:133-174
- [25] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型PID控制与应用. 北京: 机械工业出版社, 1999:10-36
- [26] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用. 北京: 机械工业出版社, 2004:25-50
- [27] 袁飞雄, 黄声华, 李朗如, 永磁无刷直流电机PWM调制方式研究. 微电机, 2004, 37(5):42-44
- [28] 李本亮. 汽车发动机检测仪检定装置的研制:[硕士学位论文]. 四川: 西华大学. 2004
- [29] Hongxing Wu, Shukang Chen. A controller of brushless DC motor for electric vehicle. IEEE transactions on Power Electronics. 2005, 41(2):522-524
- [30] YEN-SHINL, PU-SANS, YUNG-HSINC. Novel sensorless control scheme for

brushless DC motors without using Position and current sensors,filter and center-tap voltage.conference of IEEE Industrial Electronic.2003:2114-2149

- [31] 胡文静. 永磁无刷直流电机的发展及展望. 微电机, 2002, 35 (4) :37-38
- [32] 康华光. 电子技术基础(模拟部分) [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [33] 康华光. 电子技术基础(数字部分) [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [34] 鹿宝生, 陈其美. 基于TMS320DM642的视频采集驱动程序实现[J]. 电子技术应用, 2005, 11:66-68
- [35] 钟晓伟. 电动自行车用无刷直流电机控制系统研究: [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2011
- [36] 杨真, 闫英敏. TMS320C2812型DSP 在无刷直流电动机控制中的应用. 国外电子元器件, 2006.
- [37] 屈维谦. 电动机调速的功率控制原理[M]. 保定: 北方调速有限公司
- [38] 何新军, 张涛. 基于8089单片机的模糊PID控制系统[J]. 长沙大学学报, 2002, 16 (2)
- [39] 苏 明, 陈伦军, 林浩. 模糊PID控制及其MATLAB仿真[J]. 计算机应用, 2004 (04) :51-55
- [40] B. M. Mohan, Arpita Sinha. Analytical Structures for Fuzzy PID Controllers. IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY sYsTEMS. FEBRUARY 2008: 52-60.
- [41] 钟扬, 叶云岳等. 直线感应电机的新型PID控制研究综述[J]. 微特电机, 2002 (2) :72-76
- [42] 李斌, 唐永哲. 模糊PID算法在无刷直流电机控制系统中的应用[J]. 微电机, 2006 (2) :41-45
- [43] Jiangming Kan, Wenbin Li, Jinhao Liu. Fuzzy Immune Self-Tuning PID Controller and its Simulation[J]. Computer Automated Measurement&Control, 2005: 250-251
- [44] ST MicroelectronicsCorporation. STM32F10X Reference manual[M]. ST MicroelectronicsCorporation, 2008.

- [45] ST Microelectronics Corporation. STM32F103XX Datasheet[J].2007
- [46] 马忠梅, 马广云, 徐英慧等. ARM 嵌入式处理器结构与应用基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
- [47] PELCO-P云台控制协议. <http://www.pelco.com>.
- [48] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [49] 高明远. Protel DXP电路设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [50] 刘小伟. 智能视频监控系统的设计与实现:[D]. 湖北省:武汉科技大学, 2008. 05

# 致谢

两年半的研究生生涯即将结束，值此课题设计完成之际，谨向所有给予我关怀和帮助的单位和个人表示衷心的感谢！

首先感谢我的父母，感谢他们多年以来含辛茹苦的养育之恩，感谢他们为我的学业、生活作出的无私奉献，是他们抚育我成长，是他们的无私奉献和努力保证了我学业的完成。

感谢我的导师王德兴教授，感谢王老师的悉心指导和谆谆教导。王老师严谨的治学态度，实事求是的科学态度，丰富的项目经验，忘我的工作热情，不断探索的精神时刻影响着我，使我终生受益，在此向辛勤培育我的导师致以最衷心的感谢。

感谢青岛理工大学现代通信研究所各位老师。感谢王冰师兄，感谢他在嵌入式系统开发方面给予我的悉心指导。感谢陈辉老师在项目经费上对我们的支持。感谢刘化龙工程师在项目实施给予的意见和建议，感谢董兆谭工程师对我们知识的不断扩展。

感谢教授过我理论课程和实践课程的各位老师，是你们为我建立了深厚的理论基础，完备了知识结构。同时还要感谢于日平师兄、田春鹏师兄在我研究生期给予的指导和帮助，感谢青岛理工大学研 109 班的所有同学，谢谢你们这两年多时间给我留下的美好记忆。

最后再次向所有给予我关心和帮助的老师 and 朋友们表示感谢。

祝大家安康幸福！谢谢！