

分类号:

单位代码: 10433

密 级:

学 号: 20803060393

# 山东理工大学

## 硕士专业学位论文

基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统开发

Development of electric planter control system based on  
STM32 and Beidou measurement and control

专业学位类别(领域): 农业硕士

研 究 方 向: 智能农机

学 习 形 式: 非全日制

研 究 生 姓 名: 陆雪

指 导 教 师: 程卫东副教授

协 助 指 导 教 师:

论 文 完 成 日 期: 2024 年 4 月 15 日

## 摘 要

播种业作为农业现代化的关键一环，其进步依托于科技的强劲驱动。强化播种业的科技创新，不仅是兴盛农业、强化农村、富裕农民的重要途径，也是推动我国农业自主创新能力跃升、加速新时代农业科技成果转化应用的核心策略。现代化播种业在提升播种效率与增加作物产量上已取得显著成就，但仍面临人力成本管控、播种精准度提升、作业自动化水平提高等多维度挑战。针对以上问题，本文设计并实现了基于北斗测控与 STM32 的电动播种机控制系统，完成了系统的方案设计及功能测试。

研究开发基于 STM32 单片机与北斗测控的电动播种机控制系统，将电子信息控制技术、精确导航系统集中应用在农业机械自动化种植方面，推动现代农业实现精度高、质量高、效率高的快速发展模式。结合北斗测控技术、单片机技术、软件开发技术设计出一套可根据谷物类型进行变株距的电动播种机控制系统。系统主要针对的农机类型为免耕电动播种机，伺服驱动的电机为播种机上排种器的电机。总体技术思路为 STM32 单片机接收北斗测控的信号并解算位置信息，单片机输出可变频率的方波控制直流伺服电机精确转动，达到精确可控株距的功能。本文具体工作内容如下。

设计控制系统总体方案。通过对实际需求的分析，综合考量实际功能，设计了一种电动播种机的控制系统。基于 STM32 讲解了处理器的总体概念、工作流程，并对控制系统的特点进行了详细介绍。

详细设计控制器的硬件方案和软件方案。相关硬件设计主要包括北斗测控模块、控制系统模块（STM32 单片机）、伺服控制模块等，并对上述模块进行驱动和控制算法软件设计。

根据功能要求和技术指标，制定对应的测试方案。对自动控制系统技术、北斗卫星测控、数据集成与分析、伺服传动等方面进行实验与调试，测试检验整体思路的技术可行性、经济合理性以及技术先进性。

综上，本文开发的基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统，通过 STM32 单片机接收北斗测控的信号并换算位置信息，同时转化为电信号控制伺服电机，借助于电子控制技术和软件开发技术解决普通机械种植的参数不可控、种植密度不均、人力成本高等问题，进而实现农业科学技术向农业生产力的转化，最终促进农业现代化和农村经济的快速发展。

**关键词：**STM32 单片机；北斗测控；控制系统；伺服系统

## ABSTRACT

As a crucial part of agricultural modernization, the progress of the seeding industry relies on the strong driving force of technology. Strengthening technological innovation in the seed industry is not only an important way to prosper agriculture, strengthen rural areas, and enrich farmers, but also a core strategy to promote the leap of China's agricultural independent innovation ability and accelerate the transformation and application of agricultural scientific and technological achievements in the new era. The modern sowing industry has made significant achievements in improving sowing efficiency and increasing crop yield, but still faces multidimensional challenges such as controlling labor costs, improving sowing accuracy, and improving operational automation. In response to the above issues, this article designs and implements an electric seeder control system based on Beidou measurement and control and STM32, and completes the system's scheme design and functional testing.

Research and development of an electric seeder control system based on STM32 microcontroller and Beidou measurement and control, focusing on the application of electronic information control technology and precise navigation system in agricultural machinery automation planting, promoting the rapid development of modern agriculture with high precision, quality, and efficiency. Design a practical variable spacing electric seeder control system by combining Beidou measurement and control technology, microcontroller technology, and software development technology. The main type of agricultural machinery targeted by the system is the no till electric seeder. The overall technical idea is that the STM32 microcontroller receives signals from the Beidou measurement and control system and calculates position information. The microcontroller outputs variable frequency square waves to control the precise rotation of the DC servo motor, achieving the function of precise and controllable sowing spacing. The specific work content of this article is as follows.

Design the overall plan of the control system. A control system for an electric seeder was designed based on the analysis of actual requirements and comprehensive consideration of actual functions. Based on STM32, the overall concept and workflow of the processor were explained, and the characteristics of the control system were detailed.

Detailed design of hardware and software solutions for the controller. The relevant hardware design mainly includes Beidou measurement and control module, control system module (STM32 microcontroller), servo control module, etc., and software design for the above modules.

Develop corresponding testing plans based on functional requirements and technical indicators. Experiment and debug the automatic control system technology, Beidou satellite measurement and control, data integration and analysis, servo drive and other aspects, test and verify the technical feasibility, economic rationality and technical progressiveness of the overall idea.

In summary, the electric seeder control system based on STM32 and Beidou measurement and control developed in this article receives signals from Beidou measurement and control through STM32 microcontroller and converts them into electrical signals to control servo motors. With the help of electronic control technology and software development technology, the problems of uncontrollable parameters, uneven planting density, and high labor costs in ordinary mechanical planting are solved, thereby achieving the transformation of agricultural science and technology towards agricultural productivity, and ultimately promoting the modernization of agriculture and the rapid development of rural economy.

**Key words:** STM32 Microcontroller; Beidou Measurement And Control; Control System; Servo System

## 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
目 录 .....	I
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 研究的背景和意义 .....	1
1.1.1 研究的背景 .....	1
1.1.2 研究的意义 .....	2
1.2 发展及研究现状 .....	3
1.2.1 国外发展及研究现状 .....	3
1.2.2 国内发展及研究现状 .....	4
1.3 主要研究内容 .....	5
1.4 论文组织架构 .....	5
第 2 章 控制系统总体方案设计 .....	6
2.1 需求分析 .....	6
2.2 系统模型 .....	6
2.2.1 系统原理 .....	6
2.2.2 系统研发流程 .....	7
2.3 控制系统总体方案 .....	8
2.3.1 电动播种机控制系统工作流程 .....	8
2.3.2 系统功能与特点 .....	8
2.4 本章小结 .....	9
第 3 章 控制系统硬件设计 .....	11
3.1 Altium Designer 硬件开发平台 .....	11
3.1.1 Altium Designer 简介 .....	11
3.1.2 基于 Altium Designer 的电子产品的设计基本原则 .....	11
3.1.3 Altium Designer 在 PCB 板设计中的应用 .....	11
3.2 整体硬件结构和功能 .....	12
3.3 北斗定位模块设计 .....	12
3.3.1 北斗系统的简介 .....	12
3.3.2 北斗测控模块特点及原理 .....	13
3.4 STM32 单片机控制模块设计 .....	15
3.4.1 单片机定义及分类 .....	15

3.4.2 STM32 单片机简介 .....	15
3.4.3 STM32 单片机选型 .....	16
3.4.4 STM32 单片机 GPIO 设计 .....	17
3.4.5 STM32 单片机电源模块设计 .....	17
3.4.6 复位电路设计 .....	17
3.4.7 串口通信设计 .....	18
3.4.8 JTAG 接口设计 .....	18
3.5 伺服驱动系统设计 .....	19
3.5.1 伺服系统发展及技术特点 .....	19
3.5.2 磁场定向控制算法 .....	20
3.5.3 SVPWM 模型实现 .....	21
3.5.4 PARK 模型 .....	21
3.5.5 CLARKE 变换模型 .....	22
3.5.6 伺服硬件设计 .....	22
3.5.7 电流信号采集电路 .....	23
3.5.8 反电动势检测电路 .....	24
3.5.9 伺服系统控制设计 .....	24
3.5.10 双极性 PWM 驱动的控制 .....	25
3.6 电源设计 .....	27
3.7 本章小节 .....	28
<b>第 4 章 控制系统软件设计 .....</b>	<b>29</b>
4.1 控制系统工作流程 .....	29
4.1.1 微处理器工作流程 .....	29
4.1.2 控制系统总体软件流程 .....	29
4.2 北斗导航信息解算 .....	30
4.2.1 北斗模块工作流程 .....	30
4.2.2 经纬度信息解算流程 .....	30
4.2.3 经纬度解算代码实现 .....	32
4.3 经纬度和速度换算 .....	32
4.3.1 经纬度换算位置原理 .....	32
4.3.2 速度信息换算代码实现 .....	33
4.4 PWM 波生成软件设计 .....	34
4.4.1 PWM 控制原理 .....	34
4.4.2 PWM 功能实现 .....	35
4.5 伺服系统控制算法 .....	36

4.5.1 PID 算法简介.....	36
4.5.2 前馈 PID 控制 .....	37
4.6 FOC 算法 .....	38
4.6.1 FOC 算法工作流程.....	38
4.7 本章小结 .....	40
第 5 章 基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的测试与分析 .....	41
5.1 STM32 单片机控制系统调试与分析 .....	41
5.1.1 STM32 单片机的应用 .....	41
5.1.2 STM32 单片机控制系统调试及分析 .....	41
5.2 北斗导航系统测试分析 .....	42
5.2.1 北斗导航系统的测试.....	42
5.2.2 北斗导航系统的分析.....	42
5.3 伺服控制系统调试分析 .....	43
5.3.1 PWM 输出测试 .....	43
5.3.2 PID 测试 .....	44
5.3.3 FOC 测试.....	45
5.4 本章小结 .....	48
第 6 章 总结与展望.....	49
6.1 总结 .....	49
6.2 展望 .....	49
参考文献.....	51
致 谢 .....	55
攻读硕士期间主要工作 .....	56

## 第1章 绪 论

### 1.1 研究的背景和意义

#### 1.1.1 研究的背景

在农业生产中,播种是必不可少的,播种效率直接关系到农业生产的发展。因此,播种机的发展对农业生产影响很大。播种机的效率和准确性直接影响播种效果,信息技术的应用引发了农业播种机的技术革命。最常见的播种机通过地轮与播种刀相连。但在农业机械进行播种时,机械地轮工作时易发生机械故障或停止转动,不利于农业播种机械的生年工作,影响农业播种的技术质量。此外,现在应用的农业播种机通用性能较低、适应性差,农业播种不同农作物时,机械部件切换较为困难,不利于农业的实际生产应用。同时,我国农村农民土地集中度低,播种机以中小型为主,生产效率低,自动化程度不高。国外的农业国情与我国体系有很大不同,免耕等距播种设备的发展应遵循自主研发与国外技术相结合的原则,使农业机械和农艺得到调整。随着土地法定流转制度的实施,农村土地逐渐集约化<sup>[1]</sup>,我国农业科学技术应用于生产过程中各个环节,从春种到秋收,均在发生实质性的变化。加快建设新时代现代化农业生产体系,推动农业生产由增加产量向提高农产品质量转变。开展土地整治,因为中型农场有经济基础和政治基础,通过最新的土地承包期政策,提高农村农业规模化生产的效率,有利于机械化土地耕作和收获的全过程,未来农业机械向大中型方向发展,可有效提高播种效率。现阶段,我国对智能农机具迫切需求。农民追求智能化、简单化、专业化的工作方式,要把先进的智能、电子技术融入农机行业,进一步提升农机核心技术。我国耕种机械在融入现代电子科学技术后,必将向操作简易化、生产规模化方向发展,等距播种技术将与农学、农业管理模式相协调发展。

根据上述背景要求,在农业物联网的大趋势下,结合北斗测控技术、单片机技术以及软件开发技术,本文致力于设计一种可变株距免耕播种电动播种机控制系统。本控制系统主要针对的农机类型为免耕电动播种机,主要实现北斗测控信息的采集,主控单片机计算实时位置信息并换算速度信息,控制伺服电机带动播种器工作,实现精确控制播种距离的功能。本文选用 STM32 系列单片机作为硬件核心,并借助 IAR 软件编写软件算法和驱动,以实现了对伺服电机的驱动和控制。系统采用直流伺服电机作为驱动电机,利用精确的闭环控制算法实现对位置、速度和转矩的控制。在开发完成后,本文对系统的软硬件进行了全面调试,并对整体功能和稳定性进行了测试和分析。

因此,本文设计了基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统,该系统集自动控制系统技术、北斗卫星测控技术、数据集成与分析融合为一体。



### 1.1.2 研究的意义

近年来,我国免耕技术取得了显著成就,但随之而来的是对未来免耕发展提出了更高的要求。为此,需要政府大力支持农业发展,同时要求相关农业企业和科研机构积极参与,共同致力于推动免耕技术的进一步发展。随着国家加快智能农机装备研发和产业化步伐,未来人工智能、自动控制、大数据等技术将广泛应用于农机领域。为实现高可靠的播种作业,播种机的发展将继续向智能化、高速化、高品量化、精密化等方向发展。

以花生种植为例,采用人工等距单粒播种和机播单粒播种相比,人工等距单粒播种处理株距相同,而机播株距不均匀。在收获时,观察到在人工等距精密播种处理后,该行中的单株花生生长均匀且生长旺盛。机播线内株距不均,个体发育较好,株距较大的株列两侧株距较好,经人工精播处理,单株结果数比其它间距要高一些;当两株相距小时,人工精确的种子处理,每株结果数在同等距离以下;个体发育较差,单株结果数较少等,两株相距较近时进行人工精播处理(距离为 3-5 厘米)。试验结果表明<sup>[2]</sup>,虽然单位面积的株数、每株的豆荚数、100 个果实的重量和重 100 粒种子全部受累减产,花生荚的产量 4417.5 kg/hm<sup>2</sup>。人工单播,株距均匀,单粒发育良好,比机械播种控制单株结荚个数、百粒重、百粒重均有所提高,花生每公顷结荚 4784.99 公斤。比机播增产 367.49 kg/hm<sup>2</sup>,增幅 8.3%<sup>[2]</sup>。但要实现大面积种植,播种还需依靠和动用农机具。因此,我国农业农机科研单位要达到真正的农艺要求,实现单粒种子精确播种,就必须不断完善花生播种机精细化播种技术。

密切关注我国农业需求的增长和未来农业科技的发展趋势,旨在实现关乎国计民生的重要战略目标和产业核心竞争力。致力于发展高效植物育种、绿色环保、有害生物防治、农业资源高效利用、农产品品质安全控制、畜牧家禽全基因组选育技术、农业合成生物技术、农业大数据集成技术、农业纳米技术、人工智能在农业技术、智能装备开发等创新领域,这些领域的创新将发挥重要带动作用,并具有战略意义。

结合北斗测控技术、单片机技术和软件开发技术,本文成功设计出一款先进的电动播种机免耕等距播种控制系统。该系统专为可变株距播种的电动播种机设计,主要实现了北斗测控信息的高效采集、主控单片机对实时位置信息的精准计算,并通过精密控制直流伺服电机的转动,驱动播种器工作,从而实现对播种距离的精确控制。

此控制系统的研发旨在推动免耕机的智能化、高速化、高质量化和精密化发展。通过引入北斗测控技术,本文确保了播种机能够实时获取高精度的位置信息,从而提升了整个系统的定位精度。单片机技术的应用使得系统能够高效计算和处理位置信息,实现对播种距离的实时监控和调整。同时,通过软件开发技术,本文实现了系统的智能控制,使其更加灵活和可靠。

未来,免耕机的发展将持续朝着智能化、高速化、高质量化和精密化的方向发展,以实现更高可靠性的播种作业。这一技术创新不仅强化了农业科技改造,还将更好地

解放和发展生产力。通过实现现代化农业播种的机械智能化,这一创新技术最终将转化为农业经济效益的显著提升。

## 1.2 发展及研究现状

### 1.2.1 国外发展及研究现状

免耕等距离播种技术是美国从 18 世纪就开始使用的<sup>[3]</sup>。在此时期,大量外国移民进入美国,自从经历了土地严重的水土流失,他们开始意识到,可以利用农作物及其残留在土地里的秸秆残留物控制水土的流失;19 世纪后期的美国,大量草原被开垦并转为农田,导致地表裸露和严重的地表风蚀。20 世纪 30 年代,美国经历了一场唤起人们对传统耕作方式反思,并积极探索耕作新模式的“黑色风暴”,引发举国震惊。增土壤增产量保收益,但地上的秸秆覆盖会带来严重的病虫害,一时不为人知;后来除草剂、杀虫剂的问世,有效遏制了病虫害,并逐渐被人们接受。免耕等距离技术自 20 世纪 60 年代以来被广泛推广,并广泛应用于生产实践。50 多年以来,从科学种植试验到种植技术推广,各个阶段出现了各种免耕技术,导致完善保护性耕作技术日益增多。2015 年美国成为世界最大的农田免耕区。全球免耕区的比例从第一次“黑色风暴”事件到 21 世纪初已经超过 60%,而且还在继续呈现增长态势。澳洲是典型的海洋国家代表,地广人稀,人口密度不高。东西两岸被太平洋和印度洋包围。澳大利亚农地受季节性风气候影响,土地基本处于干旱和半干旱状态,因此也有利于机械的大规模收割和播种。等距技术于 1970 年代在澳大利亚引入,并在随后的 10 年内在全国推广。21 世纪初,全国农田免耕的比例超过 70%,这种传统的耕种方式——深耕和传统耕种——播种,逐渐销声匿迹<sup>[1]</sup>。加拿大地处北部寒带,与美国接壤,地理位置优越。先将免耕等距离技术从美国引进,再示范推广到国内农业重点产区。从 1996 年到 2002 年期间,免耕等距播种率,从之前的 30%迅速上升到现在的 80%,因此加拿大的免耕率居世界前列。欧洲国家引进保护性耕作技术较晚,但农业机械化耕作发展迅速,工业实力雄厚,掌握这一技术的国家已超过 50%<sup>[1]</sup>。南美洲处于亚热带,地表水蒸发严重。积极倡导和倡导保护性耕作的南美国家多为农业国。免耕等距离技术在这一地区的应用得到了迅速的发展,免耕等距离播种率已高达 95%,在全球范围内名列前茅。

有关保护性耕作的科学研究从 20 世纪 40 年代初开始在国际上开展。因为开展保护性耕作能够给农业生产带来很多的收益,保护性耕作通过不断的研发,已经有了很大的收获。在研发一些大型播种机的同时,美国 and 法国等许多西方国家的技术已经可以做到炉火纯青。目前,国外知名的农业机械企业,如德国亚马逊公司、美国曼森公司、英国弗格森公司、挪威格伦公司、美国 Johndiel 公司等<sup>[3]</sup>,都在加工生产精密播种机。由于国外免耕播种设备的开发与制造比较早,现在国外免耕播种技术已达到较高的水平。

## 1.2.2 国内发展及研究现状

播种机的问世,使农民在农业生产中的效益得到了极大的提高,人力被牲畜或机械的牵引所替代,使人们的身心逐步得到解放,从繁重的农活中解脱出来。传统播种机在播种前需要在耕地上打完苗床,而免耕机不用在田间预处理,就可以直接播种。免耕机通过这种方式降低了工序,降低了成本,降低了耕作时间,起到了保护自然环境的作用。我国栽培机械发展至今已有 2000 多年的历史,最早可追溯到西汉年间<sup>[3]</sup>。耧播种适合各种作物,可以选择最适合的种子种类进行播种,根据需要调整播种刀的大小。耧播种效率更高,均匀度也比人工播种更好。一般用于传统耕作的农机具有犁、耙、播种机三种。具体操作流程如下:先在田间除草,再用小型牵引车作动力,利用铧式犁深翻、铲除麦茬等方法,将麦茬铲除。随后,将湿度较大的深层土壤晾晒至适宜湿度,并在预处理好的育苗床上,用播种机播撒种子。传统农业破坏地表结构,造成大量人力资源浪费,严重扰动土层,消耗大量能源,耗费大量时间。最终造成对农业长远发展不利的无形经济损失。总之,农业现代化、智能化发展,首先要发展种植技术。

农业科技的整体进步,使我国在保证粮食自给、口粮供应绝对安全的情况下,基本摆脱了完全依赖气象条件的状况。实现了从“饿了么”到“饱餐一顿”再到“吃饱”的重大革命性变革。与美国相比,我国免耕装备研发起步较晚,但是受美国等发达国家保护耕作技术的影响,在防止栽种堵塞、覆盖苗田等方面成效突出。上世纪 80 年代,利用保护耕作技术的免耕机械在我国发展迅速、成果显著。我国开始研制适合我国土地生产方式的精密播种机,如今在播种中得到普遍应用。德邦大维农业机械有限公司、吉林省康达农业机械有限公司、黑龙江景博科技发展有限公司等多家农业机械生产企业,是精密免耕种植机研发的知名厂家<sup>[1]</sup>。但耕地加工现状、工业机械加工程度、机器作业效率以及机器价格等因素制约着我国免耕机的发展。因此,免耕播种机的发展空间还是很大的。

国外较大的免耕机不能适用国内的种植体系,所以发展免耕机要采取自主研发和国外技术相结合的原则,这样才能做到农业机械和农艺的兼容。随着土地法定流转制度的实施,将逐步实现农村土地的集约化,将原来分散的、不规则的小块土地逐步转化为大块有序集中的可耕地,这对于实现全程采收的土地机械化将有很大帮助。农业机械未来要重点发展提高播种效率的大型化、中型化设备。当前,我国发展智能农业机械已刻不容缓。农民们希望体验到人性化、舒适化、自动化在工作环境中的变革,所以为了进一步提升农业机械的核心技术水平,农民们希望在农机行业发展中使用先进的智能化、自动化技术。我国将推动免耕机械向多样化、双作用、简单化、规模化方向发展,将免耕技术与农艺相结合,实现种植业现代化、科技化的农业经营模式<sup>[5]</sup>。最终,我们的农民收入水平将得到有效提高,农村人口的生活质量将得到全面提高,从而实现农业经济的巨大效益。

## 1.3 主要研究内容

根据农业生产项目的实际需要，结合种植控制器的现状，开发了基于 STM32 单片机和北斗测控系统的控制系统。数据传输以组合方式进行，嵌入式系统的硬件系统主要以 STM32 单片机为核心，外围电路包括串口电路、电源电路、复位电路和 PWM（Pulse Width Modulation）控制电路。核心模块主要是北斗测控模块、STM32 处理器模块以及直流伺服驱动模块。主要功能包括硬件开发、位置信息获取与解算以及产生精确 PWM 波控制伺服电机。单片机接收北斗测控信号并计算位置信息，进而获取实时播种农机前进速度，预先设置播种距离和密度范围，使 PWM 波控制直流伺服电机实现精确转动。该设计不仅节约土地资源，降低劳动力成本，还提高了农作物的标准产量。

## 1.4 论文组织架构

第一章是绪论，首先介绍本论文课题研究的背景和意义，然后分析了国内外发展及研究现状，最后介绍了本课题的研究内容和本论文的组织架构。

第二章是控制系统总体方案设计，根据农业生产需求首先确定了系统的总体功能，对整体研发流程进行了一个步骤分析。然后针对课题中应用的几种关键技术进行分析与比较，确定可行性高的技术方案。

第三章是控制系统硬件设计，详细介绍了系统中用到的处理器芯片，定位模块，伺服驱动电路，并针对上述各个部分进行硬件电路设计。

第四章是控制系统软件设计，首先介绍控制系统的工作流程，接着设计了北斗导航信息解算程序，详细介绍了经纬度和速度的换算关系，最后对 PWM 波的生成和伺服系统的控制算法进行详细阐述。

第五章是基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的测试与分析，首先对 STM32 的调试过程进行论述，然后对北斗信号进行测试分析，最后对伺服系统的控制输出进行测试分析。

第六章是总结与展望，首先对系统的设计方案进行总结，然后针对控制系统的不足列举了系统改进的方向。

## 第2章 控制系统总体方案设计

根据农业自动化和机械化种植的需要,结合北斗测控技术和单片机技术,设计了一种可根据谷物类型进行变株距的播种机控制系统。系统主要针对的农机类型为电动免耕播种机,从需求分析、系统模型、控制系统三个方面介绍总体方案。

### 2.1 需求分析

本设计源于农业生产的现代化需求,通过分析本项目的实际应用需求和市场上现有的控制器,对本设计提出以下功能需求:

(1) 对卫星定位的需求。由于种植控制针对的是大面积种植区,操作人员不方便到种植区实际操作种植机械,也无法有效控制种植株距。需要通过北斗卫星定位系统精确定位机器的移动距离。

(2) 可变株距的需求。可变株距播种是等距播种的升级版本,可实现根据输入的种植种类播种控制器做出播种决策和执行,将播种密度控制在预设范围内,误差小于 2%。

建议的性能要求如下:

- 定位精度。由于播控工作地点一般在野外,地形起伏不定,因此需要较高的精度来保证播种距离的稳定性。
- 运行稳定性。农业种植是一个连续的过程,需要自动控制系统、信号接收系统、伺服驱动和机械传动部分稳定运行。
- 运行灵敏度。一般来说,传感器的灵敏度越高,成本越高,由于这种结构的环境复杂,外界干扰太多,这里可以考虑传感器在一定范围内的灵敏度。

### 2.2 系统模型

#### 2.2.1 系统原理

本控制系统设计主要分为北斗测控模块、CPU 控制单元和伺服驱动模块。北斗测控模块主要是北斗芯片及天线,CPU 控制单元主要包含 STM32 微处理器和外设,伺服驱动模块主要包含驱动器,如图 2.1。

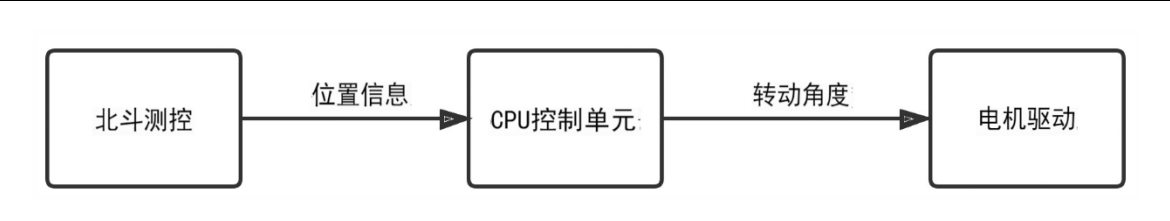


图 2.1 系统整体结构设计

Figure 2.1 Overall System Structure Design

CPU 控制单元通过 STM32 单片机实现对北斗定位通信模块的通讯并接收北斗定位通信模块发送过来的定位数据<sup>[6]</sup>，实时解算位置信息，换算得出当前农机的前进速度。控制伺服驱动器的输出信息，使电机按照设定的株距进行播种操作。

北斗定位通信模块的技术含量和芯片的参数设计，直接决定着设备的定位精度。北斗定位通信模块通常支持双频观测，接收两个不同频率的 GNSS 信号，例如 L1 频段和 L2 频段。这使得芯片能够校正大气层延迟，提高定位的精度。有些模块使用高精度的星历数据，包括卫星的轨道参数、钟差等信息。这些数据帮助芯片更准确地计算卫星的位置，提高定位的准确性<sup>[7]</sup>。定位原理如图 2.2 所示。

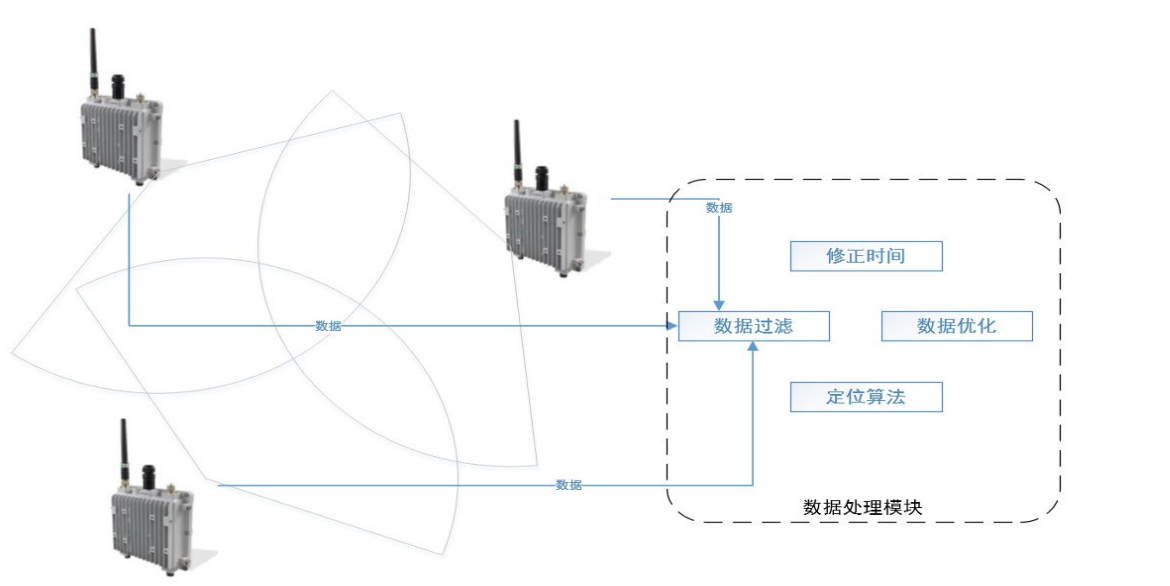


图 2.2 测距定位原理

Figure 2.2 Principle of Distance Measurement and Positioning

2.2.2 系统研发流程

基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统是依据实际应用为出发点，经过市场调研和需求分析，结合传感器数据融合技术的实践。基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统开发流程如下：

- (1) 电动播种机控制系统市场前景初步研究与分析。
- (2) 技术选型以 STM32 系列单片机为硬件核心，利用 IAR 软件编写软件模块，

接收北斗定位通信模块的报文并解析换算数据，驱动和控制伺服电机控制器。

(3) 采用直流伺服电机作为驱动电机，控制精确播种，实现位置、速度和转矩闭环控制的算法研究。

(4) 调试与测试：开发完成后，对系统的软硬件一起进行调试，对模块功能和稳定性进行测试和分析。

(5) 总结分析现代农业的发展和应用，说明市场需求。

2.3 控制系统总体方案

2.3.1 电动播种机控制系统工作流程

播种控制系统的操作流程按照图 2.3 所示。系统组成包括控制器、人机交互模块、红外光电传感器、声光报警器和电机驱动控制电路<sup>[8]</sup>。单片机控制系统依据人机交互界面设定的播种距离，实时获取北斗定位并换算位置速度信息，实时调整驱动器输出，从而实现可变株距播种。红外光电传感器实时监测播种管内种子的下落情况，一旦异常发生，即刻触发声光报警电路，实时在人机交互界面告警，并通知控制系统停止播种。

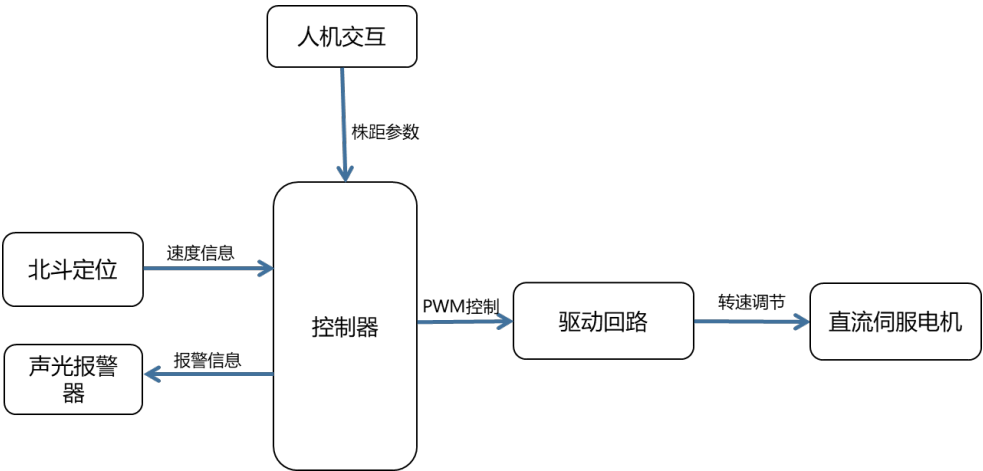


图 2.3 电动播种机控制系统结构图

Figure 2.3 Control system structure diagram of electric seeder

2.3.2 系统功能与特点

(1) 采用直流伺服电机

根据播种机选择合适的驱动方式是保证合格播种率的重要因素。综合考虑系统重量、体积、成本等因素，系统采用刷式排种装置，降低整机重量和电耗。为了确定排种器的旋转扭矩，在排种器中装满测试种子，并使用突破性扭矩测试仪进行测量，精度为 0.1N·m，范围为 0 至 135N·m，扭矩为 4.5N·m。在卡种的情况下，驱动扭矩至少是扭矩的 2 倍<sup>[9]</sup>。根据需求和现场情况，作业速度控制在 1km/h 以下，架下四个转轮直径 200mm，株距 250mm。根据以下式 (2.1)，计算出的最大转速为 4.45rpm。

$$n = \frac{100 \times v}{6 \times k \times s} \quad \text{式 (2.1)}$$

公式中,  $n$ 为转速(rpm),  $v$ 为机器前进速度(km/h),  $k$ 为播种盘孔数,  $s$ 为播种距离(m)。种子计数器要求驱动电机应具有低速大扭矩的特点。直流伺服电机在低速下经实验测试表明没有颤抖<sup>[9]</sup>。

为确保播种合格, 处理器根据北斗定位模块输出的信息解算当前运行速度, 计算排种器的理论转速, 并实时调整伺服驱动电路的输出, 使排种器电机达到理论转速。用户可通过人机交互界面输入播种类型, 系统根据类型选择相应播种距离。红外光电传感器实时监测种子管中种子流动情况, 以防止播种器工作异常。

### (2) 高精度定位

为确保定位精度, 选择使用 RTK (实时运动定位) 芯片。RTK 芯片实现高精度定位是一项先进的技术, 它基于实时运动定位系统, 通过与基站进行通信, 借助差分 GPS 信号, 显著提升了定位的准确性。RTK 系统的核心组件是 RTK 芯片, 它通过精密的数据处理和即时的差分校正, 能够将定位误差控制在厘米级的范围内。

RTK 芯片的工作原理是在移动设备和一个或多个基站之间建立通信, 接收基站发出的已知位置信息, 并利用这些信息对 GPS 信号进行差分校正。这种实时的校正过程能够有效消除大气层延迟、钟差等因素对定位精度的影响, 使得设备能够达到亚米甚至厘米级的高精度定位水平。

### (3) 低成本落地产品

使用 STM32 微控制器与直流伺服电机的组合具有显著的意义, 尤其体现在低成本和易于实施的方面。首先, STM32 系列微控制器以其低成本、高性能和丰富的外设功能而闻名。其强大的计算能力和丰富的外设接口, 使其成为各种嵌入式应用的理想选择。在实现控制算法和处理传感器数据时, STM32 微控制器能够提供高效而稳定的性能。

其次, 直流伺服电机作为一种简单、易于控制的驱动器, 能够以低成本、高效率地完成许多应用中的精准控制任务。与传统的步进电机相比, 直流伺服电机通常更容易集成到系统中, 具有更广泛的应用领域。其响应速度快、定位准确、功耗低等特点, 使其在各种自动化和控制系统中得到广泛采用。

综合考虑, 采用 STM32 和直流伺服电机的组合在低成本和易于实施的优势下, 为本控制系统提供了可行的解决方案。

## 2.4 本章小结

本章首先从电动播种机的控制系统需求和总体方案角度进行了深入阐述与分析, 特别侧重介绍了基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的结构与工作原理。通过详细探讨播种机的特点和功能, 本文设计了一种创新的电动播种机控制系统, 旨



---

在解决传统种植方式中存在的判断种植时种植距离不合理、人工成本高等问题。

## 第3章 控制系统硬件设计

### 3.1 Altium Designer 硬件开发平台

#### 3.1.1 Altium Designer 简介

随着科技的进步，新型电子器件的复杂度越来越高。于是，完成电路设计的最主要技术手段就变成了电子计算机。在 EDA（Electronic Design Automation 电子设计自动化）中包括了绘制原理图（schematic）和制作 PCB 文件（印刷电路板）等多方面的设计工作<sup>[10]</sup>。

Altium Designer 是一款广受市场欢迎的综合电子产品开发软件，由 Altium 制作，适用于 Windows 操作系统。最初的软件版本发布是在 1985 年见证的。目前，Altium Designer 已经具备了很多方面的能力，包括原理图的设计，电路模拟，PCB 绘图和编辑，拓扑逻辑自动布线，信号完整性分析，电路设计输出。首先，经过更新换代，现在已经涵盖了几乎所有能够大幅提速、提升设计工作效率的电路设计需求。

#### 3.1.2 基于 Altium Designer 的电子产品的设计基本原则

Altium Designer 在电子产品的设计和生产过程中扮演着重要的角色，帮助实现成品的电子设计理念。

- 1) 搭建电子产品 PCB 设计平台；
- 2) 通过 PCB 集成可编程器件；
- 3) 管理设备器件和库；
- 4) 实现从设计图纸到制造的全过程；
- 5) 充分利用各种可编程器件的功能；
- 6) 电子产品开发全过程的管理。

电子产品设计分为物理平台设计和可编程器件设计两个层次，Altium Designer 软件在打破传统设计局限的电子产品一体化设计中发挥了重要作用。通过将 FPGA 设计与 SOPC 功能完美结合，进而实现统一完整的相关设计软件系统，使电路板设计与生产之间的联系更加紧密。该技术不仅可以缩短设计周期，同时在设计过程中也可以对错误进行有效的控制，以提高效率和相关设计的品质。

#### 3.1.3 Altium Designer 在 PCB 板设计中的应用

PCB 板设计采用 Altium Designer 软件<sup>[11]</sup>。因此需要先根据器件的尺寸数据建立元件库，再进行 PCB 板的设计。第一个是 PCB 元件库的创建，第二个是 SCH 元件库的创建。PCB 元件库由于直接影响 PCB 板的设计和安装，因此比 SCH 元件库更为关键。所以这部分工作在 PCB 元件库的创建中要重点加强。适当的 SCH 元件库与 PCB 元件

和管脚属性的关系，可以在完成前期准备工作后，根据成品 PCB 元件库的要求来确定，然后再进行 PCB 结构设计。这一阶段的主要工作是调整尺寸，基本定位 PCB 板块。确定开关、按钮、接头、螺丝孔、安装孔的位置，需要考虑线路板上非布线区和布线区的分布情况。

3.2 整体硬件结构和功能

该系统主要由电源、显示屏、STM32 芯片控制模块、北斗测控模块、直流伺服电机模块、红外传感器和报警器模块组成。电源和控制器以及北斗测控模块安装在控制箱中，外置的北斗测控模块天线安装在车顶，红外传感器安装在排种箱中，用于实时检测排种是否正常，显示屏及报警器放置于驾驶室，用于实时人机交互<sup>[13]</sup>。系统的硬件结构如图 3.1 所示。

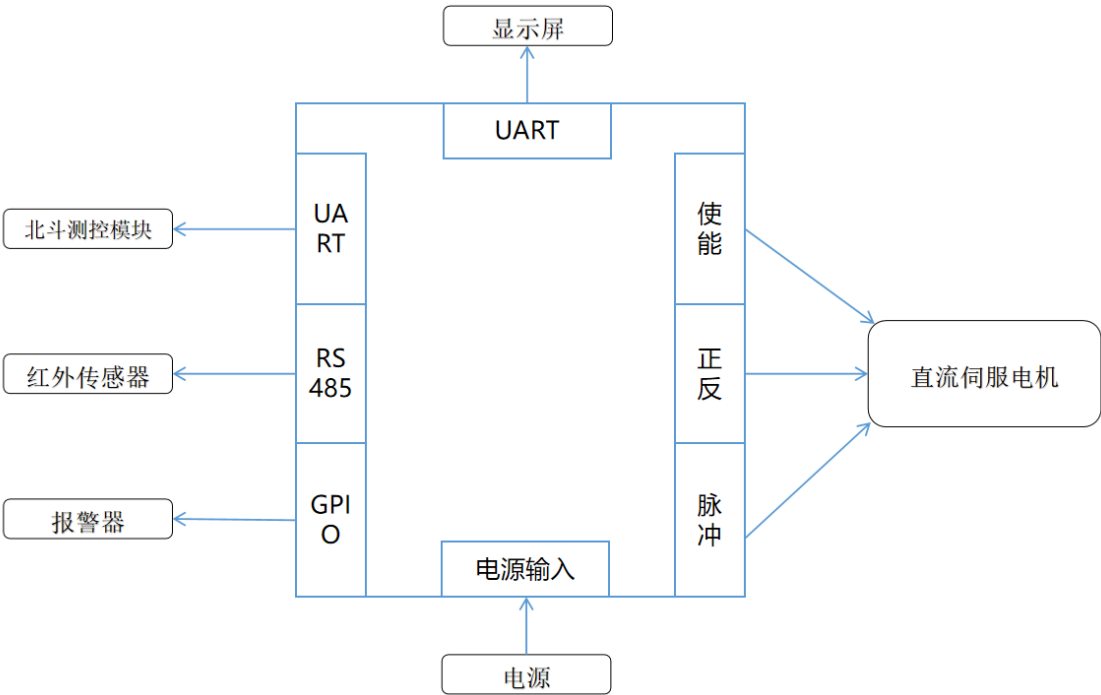


图 3.1 系统硬件结构

Figure 3.1 System Hardware Structure

3.3 北斗定位模块设计

3.3.1 北斗系统的简介

我国的北斗卫星导航系统，简称 BDS（BeiDou Navigation Satellite System），为国家重大航天基础设施提供高精度定位、导航和授时服务，我国坚持“自主、开放、兼容、先进”的原则设计开发北斗系统。

北斗系统按空间分布分为 3 个组成部分，即用户段、地面段和空间段<sup>[14]</sup>。空间段：由多颗静止轨道卫星、倾斜静止轨道卫星和中位轨道卫星组成的北斗系统空间段。地

面段：北斗系统地面段主要包括多个地面站点组成，包括星间链路运行的基础管理设施，包括主控制站、时间同步站、注入站、监测站等。北斗系统的用户段细分包括芯片、模组、天线等基础产品兼容其他卫星导航系统，以及终端技术产品、应用服务系统和北斗应用服务等。

北斗系统具有以下几个优势技术特点：首先，其空间段采用了由三颗轨道卫星组成的混合星座系，拥有大量高轨道地球卫星。尤其在低纬度地区，具备较强的防干扰能力，相比其他国外卫星导航系统，性能优势更为明显<sup>[16]</sup>。其次，北斗系统可通过多频信号组合使用，为用户提供多频点导航信号输出，提高导航业务的精确度。第三，北斗系统具备先进的导航通信技术能力，同时提供多种服务，包括定位导航授时、星基增强、地基增强、精确单点定位、短消息通信、国际搜救等，这些能力与国外其他卫星导航系统相当。在交通运输、农林渔业、水文监测、气象预报、通信授时、配电、减灾、公共安全等领域，由于北斗系统提供的技术服务而得到广泛应用。

卫星无线电导航服务，简称 RNSS(Radio Navigation Satellite Service)，用于国家生产生活的各个领域，用户接收卫星无线电导航信号，北斗系统可以独立完成对至少 4 颗导航卫星的距离测算，计算出用户的运行速度和时间的具体参数<sup>[18]</sup>。我国将继续推进北斗系统的技术应用和产业链化，为我国新时期服务现代工农业建设，为我国人民生活 and 全球科技发展、经济社会发展作出突出贡献。

我国是农业大国，基本农田就有 18 亿亩，人口 14 亿多。北斗卫星导航技术与遥感、地理信息等技术相结合，加速了我国传统农业向科学现代化农业的发展，大大降低了生产的成本，提高了劳动回报。主要应用场景包括农用地信息采集、土壤养分及分布调查、作物施肥、作物病虫害防治、特色作物种植区监测，以及无人农机、垄作、无人机植保等。其中无人农机、耕地梳状播种以及无人机植保等领域对高精度北斗服务的需求十分迫切。

### 3.3.2 北斗测控模块特点及原理

位置信息采集模块由北斗测控模块和有源天线组成。其中北斗测控模块为高性能模块，该模块采用和芯信通的 UM982 模块，支持 1408 个超级通道，内置双核 CPU，并集成高速浮点处理器及 RTK 专用协处理器，单芯片完成高精度基带处理和 RTK 定位定向解算，测量输出频率可以高达 20Hz。北斗模块具有体积小，性能优良的特性，通过串口可设置各种参数，使用方便。其电路原理图如图 3.2 所示。

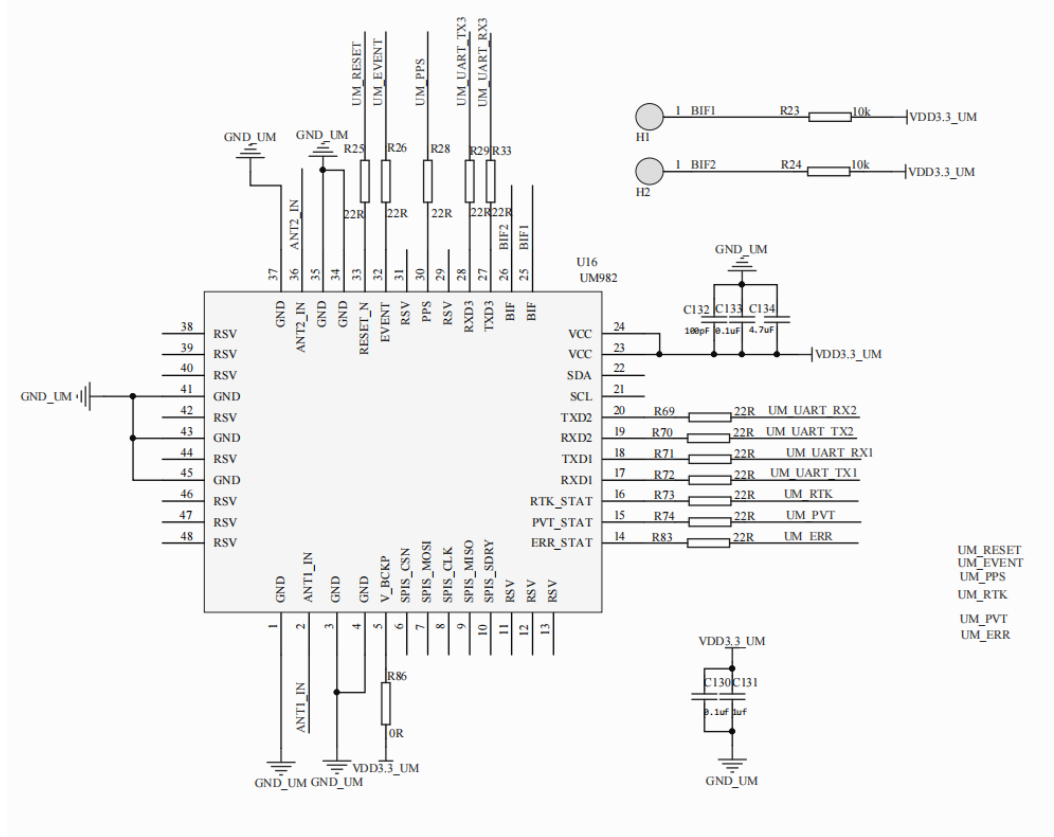


图 3.2 北斗测控模块电路原理图

Figure 3.2 Circuit schematic diagram of Beidou measurement and control module

该系统集成了接收天线模块和电源模块。使用 IPX 转 SMA 电缆将有源天线连接到北斗测控模块的 IPX 接口。有源天线通常由几个分布式收发单元和辐射模块组成。

本控制系统采用功能强大的 STM32 微控制器作为控制模块。该款单片机采用 ARM®Cortex®-M7 的 32 位 RISC 核心，工作频率最高为 480MHz，高速嵌入式存储器 (闪存高达 2Mbytes，SRAM 高达 864Kbytes)，以及广泛的增强型 I/O 和连接到两个 APB 总线的外设。此芯片具有低功耗、低成本、高集成度、易开发等特点。

北斗测控模块与单片机采用 UART（串口）通讯方式，将位置数据以 NMEA-0183 协议格式发送至单片机<sup>[19]</sup>。目前，北斗导航设备采用统一的 RTCM（海事无线电技术委员会）标准协议。常见的 NMEA-0183 命令列于表 3.1 中。STM32 对接收到的数据进行解码并换算，得到需要的速度信息。

表 3.1 NMEA-0183 常用命令

Table 3.1 Common commands for NMEA-0183

序号	命令	说明	最大帧长
1	\$ GNGGA	北斗定位信息	72
2	\$ GNGSA	当前卫星信息	65
3	\$ BDGSV	可见北斗卫星信息	210
4	\$ GNRMC	推荐定位信息	70

5	\$ GNVTG	地面速度信息	34
6	\$ GNGLL	大地坐标信息	
7	\$ GNZDA	当前时间信息	

北斗导航模块与 STM32 的硬件连接如图 3.3 所示。

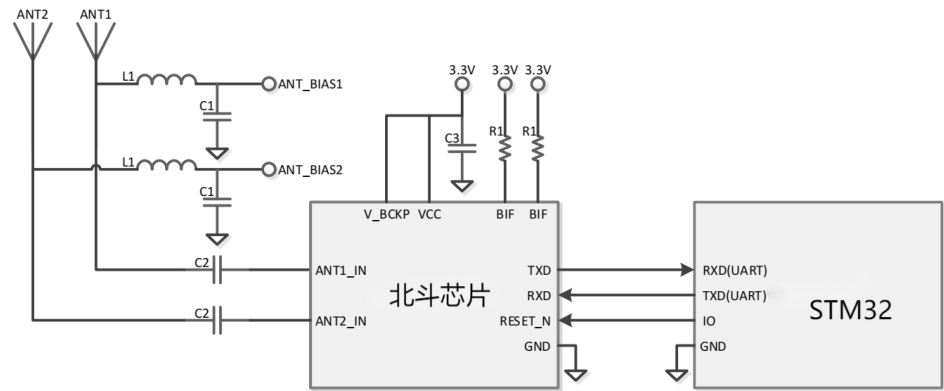


图 3.3 北斗定位模块与单片机的硬件连接

Figure 3.3 Hardware connection between Beidou positioning module and microcontroller

3.4 STM32 单片机控制模块设计

3.4.1 单片机定义及分类

单片机（Microcontroller）是一种集成了中央处理器（CPU）、存储器（RAM、ROM）、输入/输出（I/O）端口和定时/计数器功能等多种功能于一体的微型计算机系统。它通常被用于控制和执行特定任务，如嵌入式系统、自动化设备、电子设备等领域。单片机具有体积小、功耗低、成本低廉等特点，能够高效地完成各种控制和处理任务，因此在现代电子产品中得到广泛应用。

单片机按其存储器类型可分为无片内 ROM 型和带片内 ROM 型两种。对于无片内 ROM 型的芯片，必须外接 EPROM 才能应用（典型为 8031）；带片内 ROM 型的芯片又分为片内 EPROM 型（典型芯片为 87C51）、MASK 片内掩模 ROM 型（典型芯片为 8051）、片内 Flash 型（典型芯片为 89C51）等类型<sup>[24]</sup>。

按用途可分为通用型和专用型；根据数据总线的宽度和一次可处理的数据字节长度可分为 8、16、32 位单片机。

本控制系统主要选用 ST Microelectronics（意法半导体）公司生产的 STM32 单片机。

3.4.2 STM32 单片机简介

STM32 系列由 ARM Cortex®-M0、M3、M4 和 M7 等内核类型组成，可以提供性能高、成本低和功耗低的嵌入式技术应用。商用产品具体包括 STM32F0 型号、STM32F1 型号、STM32F3 型号、超低功耗产品包括 STM32L0 型号、STM32L1 型号、

STM32L4 型号、STM32L4+型号、高功率产品包括 STM32F2 型号、STM32F4 型号、STM32F7 型号、STM32H7 型号<sup>[25]</sup>。

STM32 系列具有快速启动的功能，能在不到 6 微秒的时间内将微控制器从停止模式唤醒。EnergyLite™ 超低功耗技术平台可最大限度地提高活动和睡眠模式下的能源效率。此外，该平台的嵌入式闪存采用了意法半导体独有的低功耗闪存技术。该平台还集成了直接内存访问(DMA) 支持，可在应用程序运行时降低闪存和 CPU 的转速，从而支持外围设备正常运行。

### 3.4.3 STM32 单片机选型

本系统的主控芯片采用的是 STMicroelectronics 公司设计和制造的一款基于 ARM Cortex-M7 内核的 32 位微控制器 STM32H743VIH6，STM32H743VIH6 是一款高性能 32 位微控制器芯片，属于 STMicroelectronics 的 STM32H7 系列，采用 Arm Cortex-M7 内核，具有强大的计算和处理能力，广泛应用于智能控制、工业自动化、嵌入式系统等领域。

STM32H743VIH6 芯片具有以下主要特性：

- 1、高性能：STM32H743VIH6 采用了 Cortex-M7 内核，最高主频可达 480MHz，具备高达 3.42 DMIPS/MHz 和 1.25 DMIPS/MHz 的性能。同时，它还集成了高性能浮点单元(FPU)，支持浮点运算，提供更高的计算能力。
- 2、大容量存储器：STM32H743VIH6 内置了 2MB 的闪存和 1MB 的 RAM，可支持大规模应用的存储需求。此外，它还具备外部存储器接口，支持 SDRAM、NAND 闪存和 Quad-SPI 闪存等。
- 3、强大的外设：STM32H743VIH6 集成了多种外设模块，包括高速 USB 接口、以太网控制器、CAN 控制器、SPI、I2C、USART 和 UART 等。这些外设模块可以满足各种应用领域的需求，例如工业自动化、通信设备和消费电子产品等。
- 4、数字信号处理(DSP)功能：STM32H743VIH6 内置了丰富的数字信号处理功能，如卷积运算、快速傅里叶变换(FFT)和数字滤波器等。这些功能使得 STM32H743VIH6 非常适合音频处理、图像处理和通信系统等应用。
- 5、安全性：STM32H743VIH6 提供了一系列的安全功能，包括存储器保护单元(MPU)、区域保护单元(RPU)和加密/解密引擎。这些功能可以保护用户数据的安全性，阻止未经授权的访问和攻击。
- 6、低功耗设计：STM32H743VIH6 采用了低功耗设计，具备多种低功耗模式，如待机、停止和休眠模式等。这些模式可以帮助减少功耗，延长设备电池寿命，并在需要时提供即时唤醒。

本系统需要使用 STM32 的定时器实现驱动电机伺服系统，所以需要高速率的定时器控制 PWM 生成，因此使用 STM32H743VIH6 完全满足。

### 3.4.4 STM32 单片机 GPIO 设计

GPIO 是一种基于 STM32 微控制器的通用输入/输出模式。GPIO 输出模式包括开漏复用输出、开漏输出、推挽输出和推挽复用输出。GPIO 模块允许 STM32 单片机与外部设备进行灵活而高效的通信，从而实现各种功能。其设计精妙之处在于，它可以配置为输入或输出，并且可以通过软件对其状态进行控制和监视。这使得 STM32 能够与各种外围设备进行连接，如传感器、执行器、LED 灯等。通过软件的配置，GPIO 可以实现数字输入、数字输出、中断控制、模拟输入等多种功能，从而满足不同应用场景的需求。

本控制系统设计中，需要使用 GPIO 口获取传感器数据，特设计了 5 个外接的 GPIO 口。

### 3.4.5 STM32 单片机电源模块设计

STM32 可配置为低成本、高速、超低功耗的 32 位 MCU<sup>[26]</sup>。与 51 和 AVR 单片机相比，STM32 单片机可以通过 USB 线连接电脑正常工作。但是基于 Cortex-M7 内核的 STM32 处理器供电范围比较宽，即 2.0 到 3.6V，一般选择 3.3V 供电，只需要使用 ADM7171ACPZ-3.3 稳压系列就可以将单片机的电源降到 3.3V。具体电路如下图 3.4 所示。

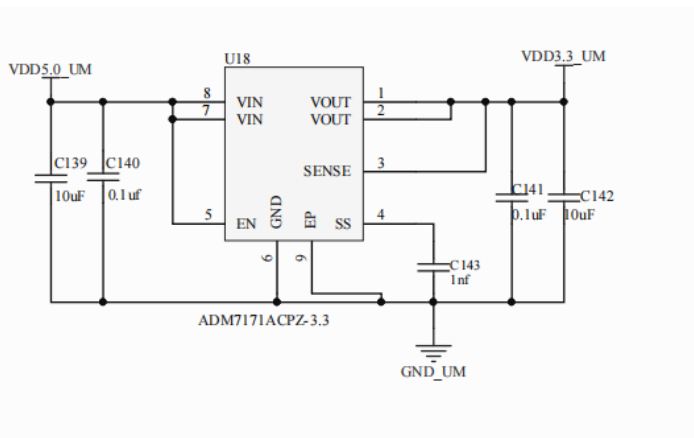


图 3.4 STM32 电源设计

Figure 3.4 STM32 Power Supply Design

### 3.4.6 复位电路设计

复位电路是用来将 STM32 单片机恢复到初始状态的电路。它通常由复位按钮、复位引脚和复位电路组成。

复位按钮是用来手动触发复位操作的装置。当按下复位按钮时，它会通过复位引脚发送一个低电平（或高电平）信号到 STM32 单片机，触发复位操作。

复位引脚是 STM32 单片机上的一个引脚，用来接收复位信号。当复位按钮按下时，它会接收到低电平（或高电平）信号，告诉单片机需要进行复位。



当复位按钮按下时，电路中的复位芯片会将一个短暂的低电平（或高电平）信号传递给复位引脚，触发复位操作。随后，复位芯片会保持复位引脚的电平一段时间，以确保单片机在复位期间完全恢复到初始状态。之后，复位芯片会释放复位引脚，使得单片机可以正常工作。电路如图 3.5 所示。

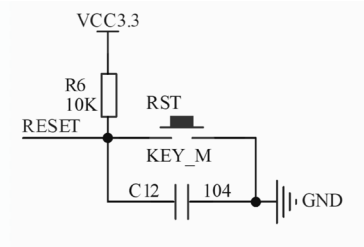


图 3.5 复位电路设计

Figure 3.5 Reset Circuit Design

3.4.7 串口通信设计

本控制系统的串口通信主要分为 RS232 和 UART。主要是和外部的红外传感器通讯。RS232 串口电路以 MAX232 芯片为核心芯片，即 MAXIM 专为 RS-232 标准串口设计的单功率电平转换芯片，采用 3.3V 单电源供电电源，并具有电平转换功能，为实现该功能，MAX232 串口采用经典方式连接。UART 电路以 ISO7221A 芯片为核心芯片，即德州仪器 TI 生产的双路数字隔离器，采用 3.3V 单电源供电电源，可实现高速数据传输和隔离，高达 4kV 的隔离电压，可保护系统免受电气干扰和电击。

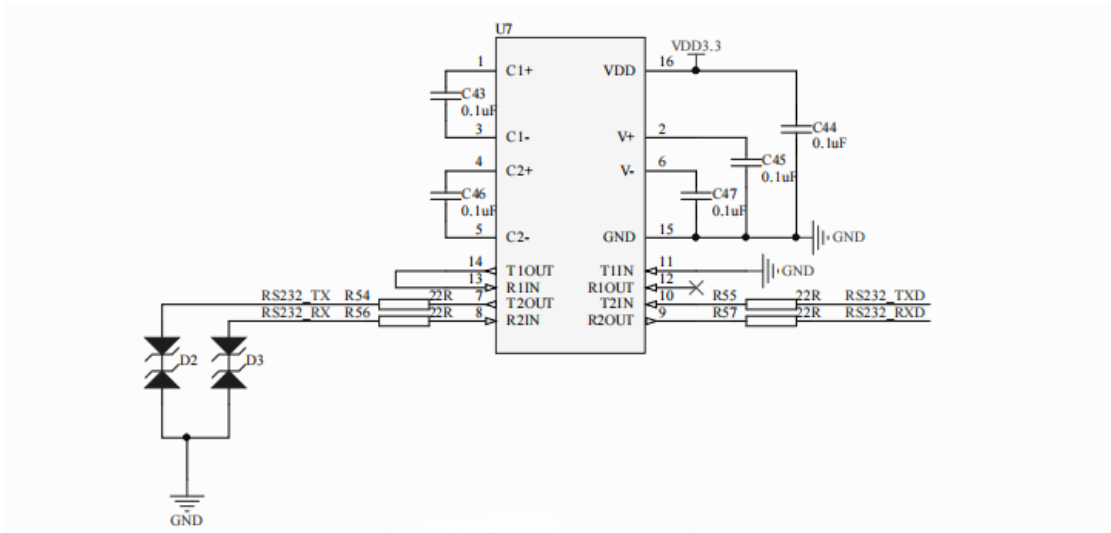


图 3.6 RS232 电路设计

Figure 3.6 RS232 Circuit Design

3.4.8 JTAG 接口设计

JTAG（Joint Test Action Group）是一种用于调试和测试集成电路的标准接口。在单片机调试过程中，JTAG 接口通常被用来进行调试、编程、以及测试操作。通过 JTAG 线缆将调试器与目标设备的 JTAG 接口相连。这条线缆上的连接通常包括 TDI

(Test Data In)、TDO (Test Data Out)、TCK (Test Clock)、TMS (Test Mode Select) 等引脚。

带有 JTAG 调试接口模块的 CPU，只要时钟正常，就可以通过 JTAG 接口访问 CPU 的内部寄存器和 CPU 总线上挂接的设备，如 FLASH、RAM、SOC（如 4510B、44Box,AT91M 系列），集成模块寄存器，如 UART，定时器，GPIO 等。以上仅代表 JTAG 接口的能力，使用这些功能还需要开发软件的配合，具体功能定义由具体软件的功能来实现。本控制系统的 JTAG 采用直连的方式，具体的电路如图 3.7 JTAG 电路设计所示。

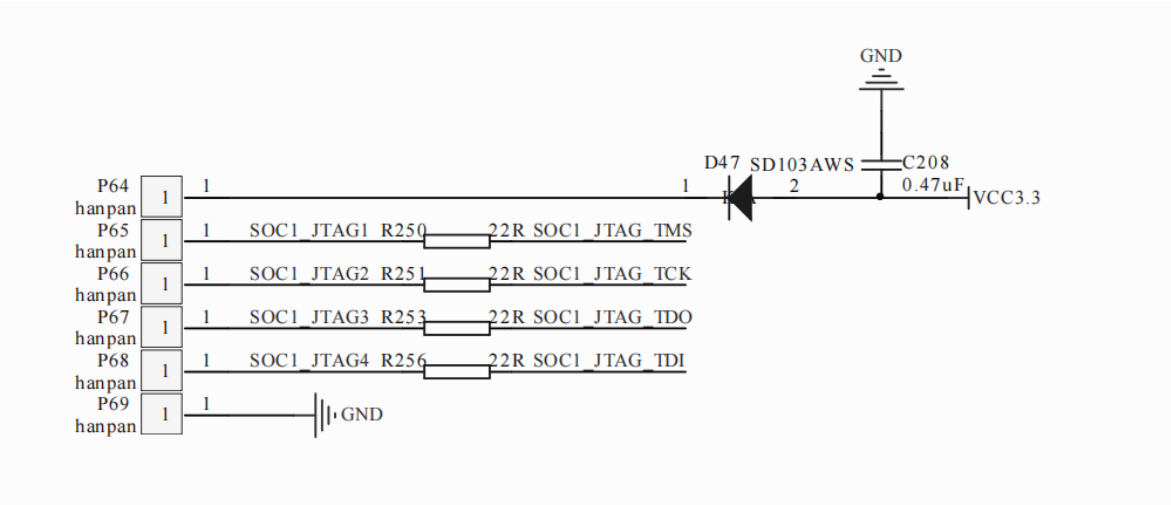


图 3.7 JTAG 电路设计  
Figure 3.7 JTAG Circuit Design

3.5 伺服驱动系统设计

3.5.1 伺服系统发展及技术特点

便捷、快速、灵活、精确的伺服系统驱动在机电设备中占有举足轻重的地位，而机电设备的发展与伺服电机的发展是相辅相成的。早在上世纪 60 年代，采用开环控制方式进行位置控制的伺服电机，或采用液压传动，或采用直接传动的方式进行位置控制。在工业等相关领域得到空前发展和推广的 60-70 年代出现并迅速发展起来的直流伺服电机，所采用的开环控制方式也被闭环式控制所取代。永磁直流电机在数控机床的应用上一直都是最好的，他没有什么励磁的损失，控制起来也比较轻松，低速的表现也是相当不错的。交流伺服驱动技术自 20 世纪 80 年代以来发展迅速，同时不断提高交流伺服系统的性能，并不断发展相应的伺服驱动器，实现了全数字化进程。20 世纪 90 年代通信伺服发展迅速并实现突破。进入 21 世纪，工业自动化控制的主要技术是交流伺服技术<sup>[27]</sup>。

伺服系统伴随着技术的进步和产业化的不断发展，加上工农业自动化设备，伺服系统具有高确精度、速度快、体积小、可靠性高、免维护、品种多、批量化的技术优

势，同时伺服驱动技术方面不断提出更新的要求，工农业生产中的自动化服务系统不断完善。高性能的伺服系统可以为电动设备提供方便、快速、灵活和精确的驱动。现如今，伺服系统日趋成熟，伺服驱动技术也取得了长足的进步，伺服控制技术已成为工业自动化的支撑技术之一。

伺服控制系统一般包括五个部分：控制器、被控对象、检测环节、比较环节、执行环节。伺服控制系统通常是 PID 控制电路或计算机，主要任务是转换比较器输出的误差信号，以控制执行器按要求的动作。PID 控制对象多为距离、加速度、加力、转速、扭力等机械参数。具体控制原理可见图 3.8。

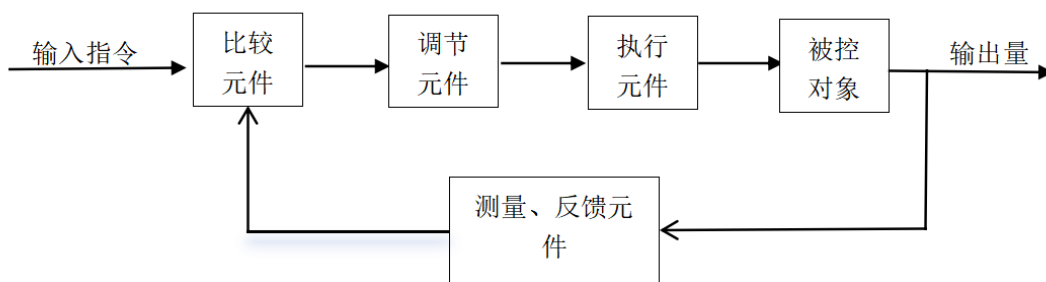


图 3.8 伺服控制系统原理图

Figure 3.8 Principle diagram of servo control system

伺服电机按容量分为大容量、中容量、小容量和超小容量四种（MINI 型）。具体划分范围为：大容量 22-55kW，中容量 300W-15kW，小容量 30-750W，10-10kW 20W 是超小型容量型。目前，大部分新型功率半导体器件如功率场效应晶体管（MOSFET）、绝缘栅晶体管（IGBT）、晶体管（GTR）用于伺服控制系统。

目前所有的工控设备都以智能化为发展方向，伺服驱动系统必不可少的是先进的工控装置。智能化的特点主要表现在：第一，它可以在系统中通过人机对话的方式，将参数进行存储并完成全部参数的设计。其次，可以适当修改软件设置方式。通过通讯接口和上位机可以实现对相关运行数据参数的更改。伺服驱动系统自带诊断系统，可以通过用户界面对运行中的自身故障进行实时分析，并对出现问题的原因和诊断结果进行提示，便于工作人员对系统进行及时的监控和维护。最后，参数自调程序也在一些伺服系统中被开发出来。要对系统参数进行闭环调整，才能保证系统性能的稳定。自整定功能的伺服单元，自动调节系统内部参数，使设备在试运行自动达到最佳水准。

### 3.5.2 磁场定向控制算法

FOC 系统架构，FOC（Field Oriented Control）是一种磁场定向控制，在业界也称为矢量控制。如图 3.9 所示，FOC 是一种电机控制方式。具体的数学和物理原理推导过程在本文中不做详细描述<sup>[28]</sup>。

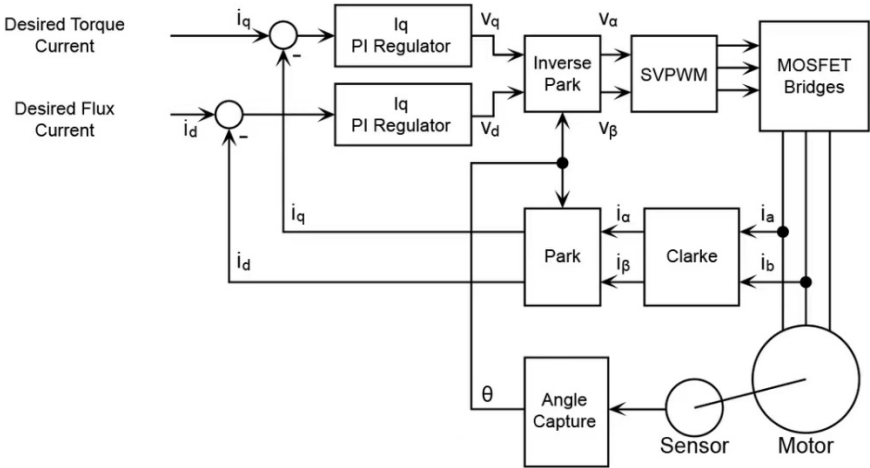


图 3.9 基于 PMSM 的伺服系统模型

Figure 3.9 Servo System Model Based on PMSM

3.5.3 SVPWM 模型实现

如图 3.10 所示，SVPWM 模型的输入由两相坐标系中的电压信号 $U_\alpha$ 和 $U_\beta$ 、直流环节电压 $U_{dc}$ 、PWM 信号周期 $T_s$ 组成；输出由对应于三三相的三组 PWM 信号组成，具体分为 3 步：第一步，由 4 个输入变量生成 3 个中间计算变量和扇区号，第二步是当前扇区 2 个基本向量的有效次数生成；第三步，根据当前扇区数和 PWM 周期 $T_s$ 产生 3 个 PWM 信号的高电平时间<sup>[28]</sup>。

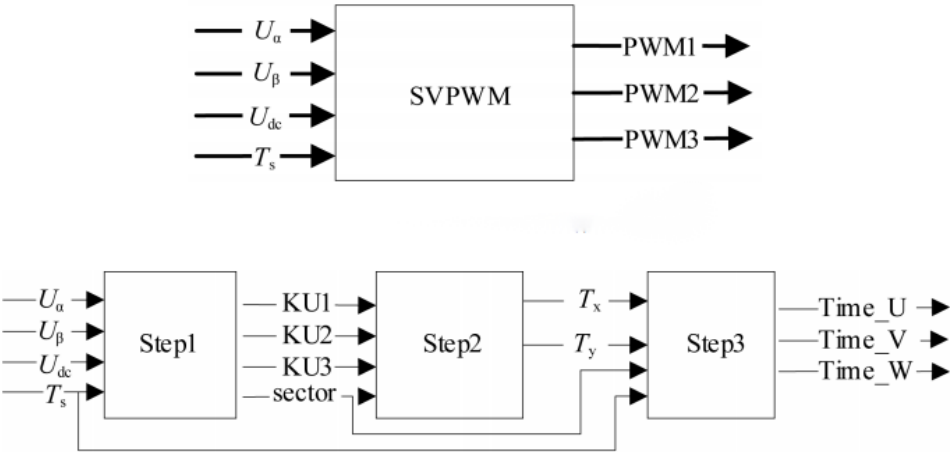


图 3.10 SVPWM 步骤分解

Figure 3.10 SVPWM Step Decomposition

3.5.4 PARK 模型

如图 3.11 所示，PARK 逆变换模型的输入是 $U_q$ 、 $U_d$ 、电角度 $\theta$ ，输出是 $U_\alpha$ 和 $U_\beta$ 。

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad \text{式 (3.1)}$$

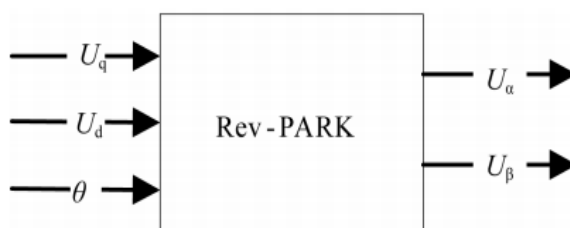


图 3.11 PARK 逆变换模型

Figure 3.11 PARK inverse transformation model

如图 3.12 所示，PARK 变换模型的输入是  $I_\alpha$ 、 $I_\beta$ 、电角度  $\theta$ ，输出是  $I_q$ 、 $I_d$ 。

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad \text{式 (3.2)}$$

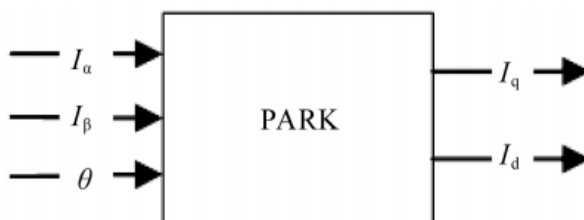


图 3.12 PARK 变换模型

Figure 3.12 PARK Transformation Model

### 3.5.5 CLARKE 变换模型

如图 3.13 所示，CLARKE 变换的输入是三相电流  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ ，输出是两相电流  $I_\alpha$ 、 $I_\beta$ 。

$$\begin{cases} I_\alpha = I_a \\ I_\beta = (I_a + 2I_b) / \sqrt{3} \end{cases} \quad \text{式 (3.3)}$$

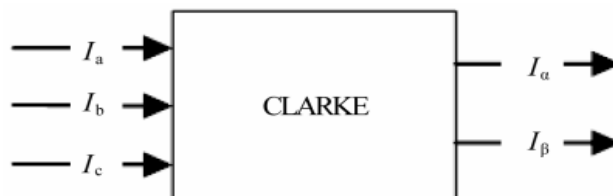


图 3.13 CLARKE 变换模型

Figure 3.13 CLARKE Transformation Model

### 3.5.6 伺服硬件设计

硬件设计方案如图 3.14 所示，包括模拟信号采集电路、编码器信号接口电路、电

源电路、通信电路和 STM32 核心电路<sup>[31]</sup>。

驱动回路主要包括功率驱动电路、电流采样电路和反电动势检测电路。此回路的工作直流电压正常范围在 8V 到 48V，可高达 15A 输出电流，有电流保护措施。可配置成给闭环控制的无传感器控制和有传感器控制，还可选择三个采样或单个采样。L6398 门驱动器和 STL220N6F7 功率 MOSFET 的组合为无刷直流电机形成了高电流电源平台。

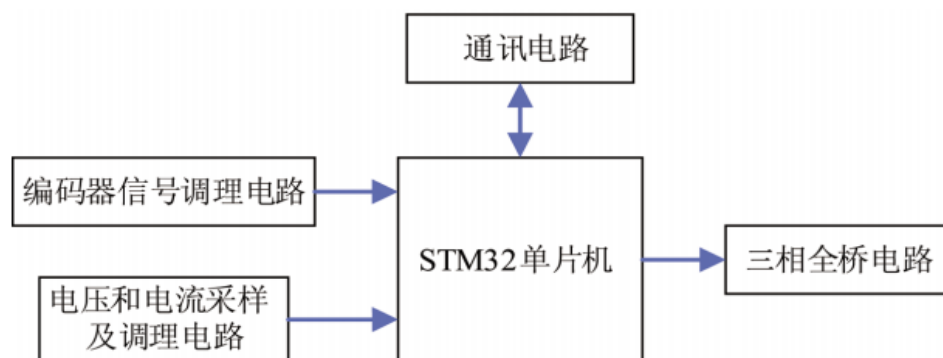


图 3.14 伺服驱动硬件设计

Figure 3.14 Servo Drive Hardware Design

### 3.5.7 电流信号采集电路

电流采样电路是系统稳定运行的关键<sup>[33]</sup>。电流采样电路主要由电流保护电路和电流采样电路组成。电流采样的作用一般有两个，第一，保护控制系统防止因电流异常的损坏，第二，反馈给微处理器的作用，使 MCU 更好地控制电机运转。

电流检测电路基于 TSV994IPT 和三个采样电阻。三个采样电阻用的是 0.01 欧姆 1W 的功率电阻。

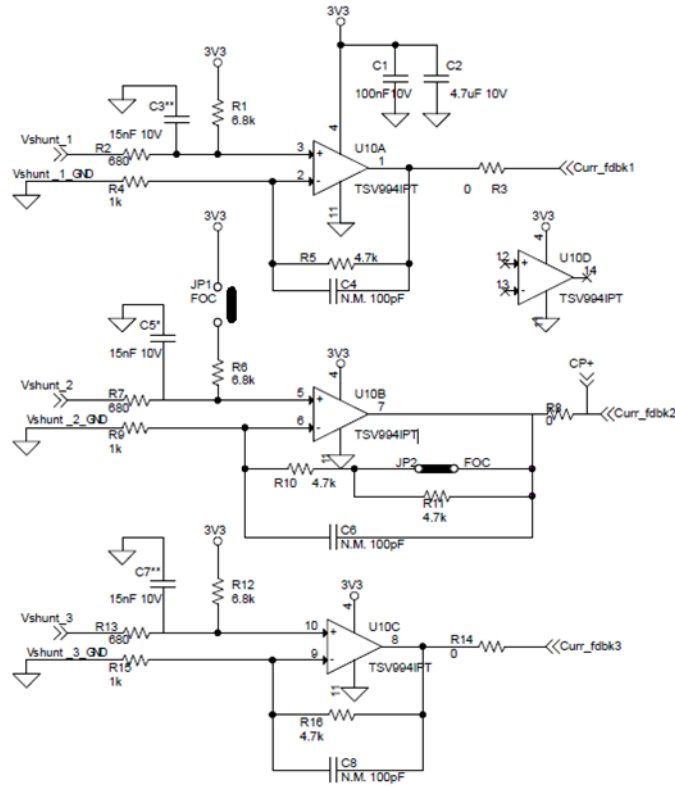


图 3.15 电流采样放大电路  
Figure 3.15 Current sampling amplification circuit

3.5.8 反电动势检测电路

在六步驱动模式下，三相中的其中一相处于高阻抗状态，而本文可以通过相电压比较中点引线电压来检测反电动势过零点。具体电路如图 3.16 所示。

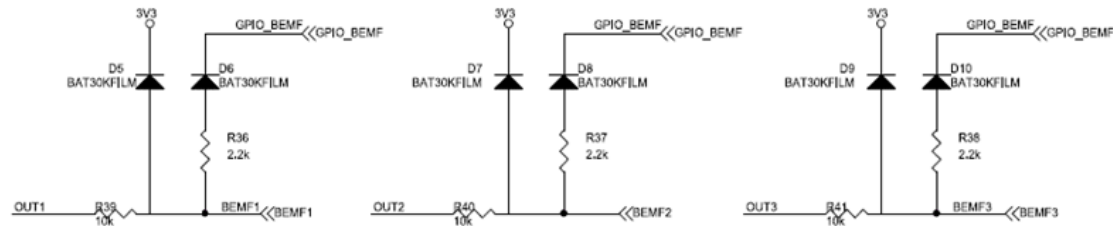


图 3.16 反电动势检测电路  
Figure 3.16 Back electromotive force detection circuit

3.5.9 伺服系统控制设计

伺服控制系统包括电流环、速度环和位置环，并且可以增加位置前馈控制来提高系统的响应速度。主要分为以下几个内容：

(1) 电流环控制

输入：给定的 $I_q$ 值和 $I_d$ 值，以及通过 Park 变换后的检测值。

过程：通过 PI 控制器比较给定的电流和实际检测到的电流，计算出对应的电压

值  $U_q$  和  $U_d$ 。

输出：计算得到的  $U_q$  和  $U_d$  值用于控制电机。

#### (2) 速度环控制

输入：给定的速度值以及根据编码器数据得到的速度检测值。

过程：通过 PI 控制器比较给定的速度和实际检测到的速度，计算出相应的电流给定值  $I_q$ 。

输出：计算得到的  $I_q$  值用于控制电机。

#### (3) 位置环控制

输入：给定的位置值以及根据编码器数据得到的位置检测值。

过程：通过 PI 控制器比较给定的位置 and 实际检测到的位置，计算出对应的速度给定值  $I_q$ 。

输出：计算得到的速度给定值  $I_q$  用于控制电机。

#### (4) 位置前馈控制

过程：将位置给定量的变化率作为速度给定量的补偿量，直接添加到速度环控制中，以提高系统的响应速度。

### 3.5.10 双极性 PWM 驱动的控制

在本设计中，针对控制排种器中的直流伺服电机，采用了双极性 PWM 驱动的控制。

PWM 控制—脉冲宽度调制技术，对一系列脉冲的宽度进行调制，以等效地获得所需的波形（包括形状和幅度）。所使用的逆变电路大多为 PWM 型，而 PWM 控制技术取决于在逆变电路中的应用来决定其在电力电子技术中的重要地位<sup>[34]</sup>。

直流伺服电机的调速通常通过改变 PWM（脉冲宽度调制）波的占空比来实现。在直流伺服电机中，PWM 信号的占空比通常与电机的转速成正比关系。当 PWM 信号的占空比增加时，平均电压也相应增加，导致电机产生更大的电磁力矩，从而提高转速。反之，减小占空比则减小平均电压，使电机减速。这种方式可以有效地调整电机的转速，实现精确的速度控制。PWM 调速方法简单、成本低廉，因此在直流伺服电机和其他调速应用中被广泛采用。根据驱动电路的特点，本方案采用上下互补 PWM 驱动方式，各相 PWM 波时间不同。采用这种方法还可以保证中点电位的稳定，减小转矩脉动。

采用换相检测电路，无需考虑中点电位变化对检测的影响。相较于传统的反电动势检测方式，该方法消除了需要软件延迟  $30^\circ$  的需求。同时，该方法将重心转移到电源电压之间的关系，而非反电动势电压的检测。为了处理 PWM 波的高频信息，需要设计低通滤波器对信号进行处理<sup>[36]</sup>。

在对各种 PWM 波调制方式对六臂全桥驱动电路的影响进行详细分析后，本文采



用了双极 PWM 驱动的控制方案。双极性 PWM 驱动控制方案基于脉宽调制原理，通过调整 PWM 信号的占空比来控制输出电压或电流的大小。在这种控制方案中，控制器通常根据系统需求生成一个参考信号，比如期望的输出电压或电流值。然后，通过将参考信号与实际输出进行比较，计算出误差信号。接着，控制器使用这个误差信号来调整 PWM 信号的占空比，以使输出达到期望值。

电压模式控制是其中一种常见的实现方式，它的目标是保持输出电压恒定。在这种模式下，控制器会将输出电压与参考电压进行比较，然后根据比较结果来调整 PWM 信号的占空比，以保持输出电压稳定。另一种常见的方式是电流模式控制，它的目标是保持输出电流恒定。在这种模式下，控制器会将输出电流与参考电流进行比较，并相应地调整 PWM 信号的占空比，以保持输出电流不变。

通常情况下，双极性 PWM 驱动控制方案都采用闭环控制，以提高系统的稳定性和响应速度。闭环控制利用反馈回路来监测实际输出，并与期望输出进行比较，从而实时调整 PWM 信号。结合系统硬件驱动方案，采用上下互补双极性 PWM 波驱动方式有助于保持电机中点电位的稳定，减小转矩脉动，并提高换相点的精度，如图 3.17 所示。

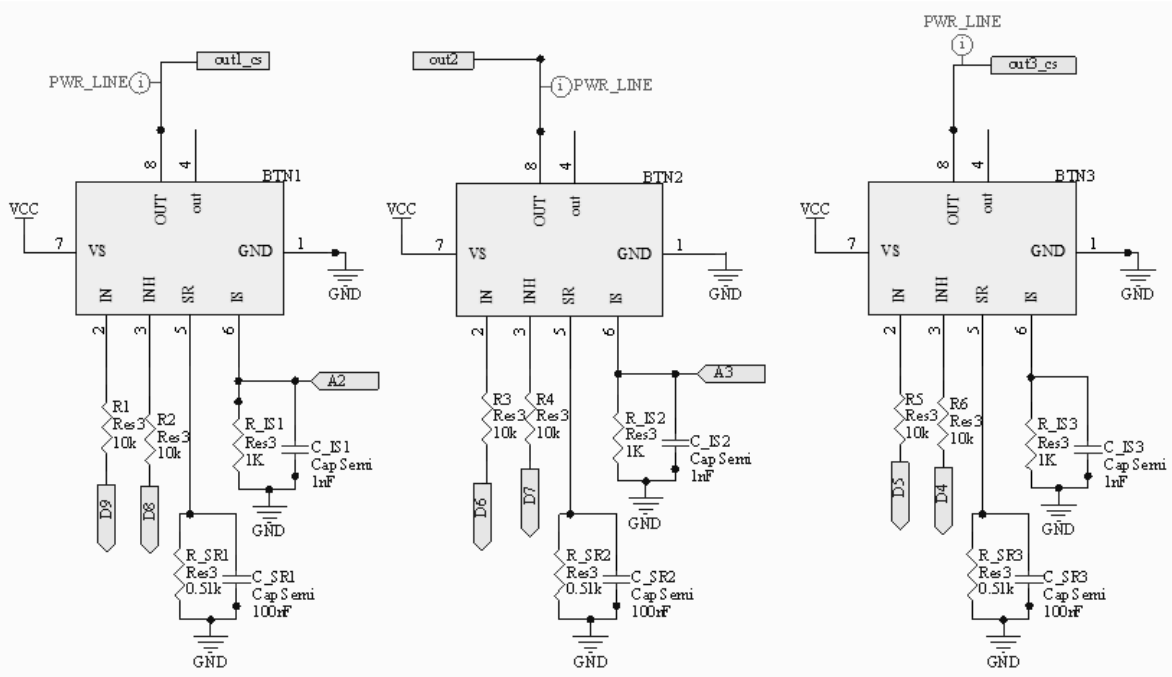


图 3.17 双极 PWM 驱动电路

Figure 3.17 Bipolar PWM Drive Circuit

该方案具有以下优点：

- (1) 驱动电路可由 CPU 直接控制，无需重新设计升压电路。
- (2) 切换控制信号时无需考虑死区时间。芯片会根据外接电阻自动调整上下桥的死区时间，以确保芯片不被损坏。

电路工作原理如下：来自控制器的 PWM 信号被送入 BTN8982TA 的控制引脚，分别对应电机的正转、反转和制动。PWM 信号的频率通常在几十 kHz 到几百 kHz 之间，其占空比决定了电机的平均电压，从而控制了电机的速度。BTN8982TA 内部的逻辑电路根据 PWM 信号的状态控制四个功率 MOSFET 管的开关，从而控制电机相的通断情况，实现正转、反转或制动。

选用 BTN8982TA 是其内部集成了电流检测电路，在电机工作时，监测电机相的电流。当电流超过设定的阈值时，BTN8982TA 会主动停止输出，以避免电机过载或损坏。BTN8982TA 具有过温度保护功能，当芯片温度超过一定阈值时，它会自动停止输出，并且在温度降低到安全水平以下时自动恢复输出。此外，低电压锁定功能可以防止电源电压过低时芯片工作不稳定或损坏。在电机制动时，BTN8982TA 可以利用电机的反电动势产生的信号来进行电机转速的反馈控制，以实现闭环控制。

### 3.6 电源设计

电源电路是任何电子硬件中不可缺少的部分，24V 转 5V 电路选用 TI 的直流 DC/DC 开关电源转换芯片 LM53602A-Q1，最大输出电流为 3A。设计选择使用 24V 输入电源，通过 LM53602A 将 24V 电压转换为 5V 电压，再经过 AMS1117-3.3 线性稳压器降压为 3.3V，为内部硬件电路提供合适的电压，电源电路如图 3.18 所示。

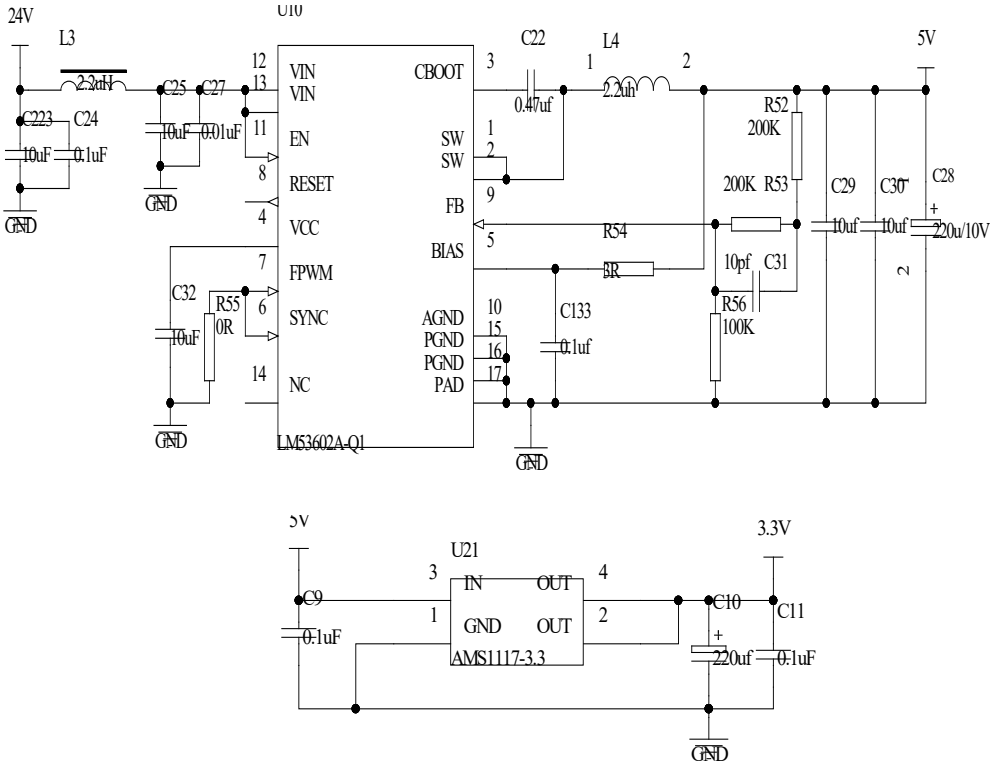


图 3.18 电源电路图

Figure 3.18 Power circuit diagram

### 3.7 本章小节

本章节介绍与研究了 Altium Designer 一体化电子产品开发软件在 PCB 板的设计的应用, 包括 PCB 的布局、布线、丝印到网络、抗干扰设计、结构检测以及常遇见的技术问题等, 对控制器各硬件系统进行了简要的介绍及设计说明。主要对北斗测控模块、控制系统模块 (STM32 单片机)、伺服系统及直流伺服电机、内外通讯、电源的进行相关技术分析与描述设计思路。其中北斗测控模块通过分析了其特点、原理及运行流程, 突出了北斗系统的技术优势和经济优势; 控制系统模块主要介绍与分析了 STM32 单片机的技术优势与实用性, 以及一些相关的技术如 GPIO 模式、I/O 模式与速率等; 伺服系统及伺服电机主要介绍与分析伺服系统的技术特点, 基于 PMSM 的伺服控制算法、SVPWM 模型、PARK 模型、CLARKE 变换模型, 以及与电流信号采集电路、外部通讯电路和双极性 PWM 驱动控制的关系。

## 第4章 控制系统软件设计

本章将介绍控制系统的软件开发设计，包括对北斗导航模块输出数据的解析，STM32 工作流程，伺服驱动系统的算法实现。

### 4.1 控制系统工作流程

#### 4.1.1 微处理器工作流程

微处理器上电后，会经历一个复位过程。复位是将微处理器的内部寄存器、程序计数器和其他关键部件恢复到初始状态的操作。这通常通过外部复位电路或内部复位逻辑来实现。复位后，微处理器会准备好从预定义的起始地址开始执行程序。

接下来，微处理器从 ROM（只读存储器）或 Flash 存储器中加载程序。程序是一系列指令的集合，这些指令告诉微处理器要执行什么操作。程序计数器（PC）是一个关键的寄存器，它指向当前要执行的指令的地址。每次指令执行完毕后，程序计数器会自动更新，指向下一条要执行的指令。

微处理器按照程序计数器的指示，从存储器中取出指令，并将其放入指令寄存器（IR）中。指令解码器对 IR 中的指令进行解码，确定指令的操作码和操作数。解码后的指令被送到控制单元（CU），CU 根据指令的要求，产生相应的控制信号，控制各个部件协同工作。

在指令执行阶段，微处理器根据指令的类型进行相应的操作。这些操作可能包括算术运算（如加、减、乘、除等）、逻辑运算（如与、或、非等）、数据传输（如从内存读取数据或向内存写入数据）、输入输出操作（如与外部设备通信）等。执行指令时，微处理器可能需要访问随机存储器（RAM）或其他外部设备来获取或存储数据。

除了执行主程序外，微处理器还能响应中断请求。中断是单片机工作流程中的重要概念，它允许微处理器在执行主程序时暂停当前任务，转而处理紧急或实时事件。当中断发生时，微处理器会保存当前程序的执行状态（如程序计数器的值），然后跳转到中断服务程序执行相应的操作。中断处理完成后，单片机会恢复之前保存的状态，并继续执行主程序。

此外，微处理器还具有定时和计数功能。通过内部的定时器/计数器，单片机可以精确地控制时间间隔或计数事件的数量，实现定时任务或频率测量等功能。

最后，当单片机完成所有任务或接收到外部复位信号时，它会停止执行程序并进入休眠状态或重新复位，等待下一次启动和初始化。

#### 4.1.2 控制系统总体软件流程

本控制系统主要实现两大功能，北斗测控模块的数据接收和直流伺服电机的控制。

伺服控制需要通过软件进行编程，使 STM32 单片机产生控制脉冲，实现脉冲分配。通过驱动算法控制 STM32 产生相应的 PWM 脉冲，驱动伺服驱动器控制电机的运转。软件整体流程图如下图 4.1 所示。



图 4.1 软件工作流程

Figure 4.1 Software workflow

## 4.2 北斗导航信息解算

### 4.2.1 北斗模块工作流程

使用 STM32 配置北斗定位模块的波特率、输出帧数据、测量频率和时钟（PPS）是项目中至关重要的一环<sup>[43]</sup>。STM32 的北斗模块控制程序主要包括三个核心功能：首先是对北斗定位模块输出的 NMEA-0183 数据进行精准分析处理，其次是对北斗模块的控制，涵盖波特率、输出脉冲、以及频率等参数的设置，最后是对北斗定位模块的监控、显示和验证，以确保模块代码的稳定工作状态。接收到北斗模块发送的数据后，进行数据解析和换算，从而得到速度信息。

### 4.2.2 经纬度信息解算流程

北斗导航定位数据通过 UART 串口协议传输至控制器，数据以\$BDGGA 作为消息协议头的字符串形式呈现。该字符串包含了多项信息，包括 UTC 时间、纬度、经度、卫星状态、HDOP 水平精度因子、海拔高度等等。

解析北斗卫星信息的首要步骤是设计串口通信解码器。本文借助 STM32 的 UART 模块实时获取串口数据。一旦获得串口数据，将其传输给解码器，该解码器具备一个分拣循环结构。北斗定位数据的格式为以\$BDGGA 为报头，以<CR><LF>为结束标记，各个信息之间使用逗号分隔的字符串。解算流程如图 4.2 所示。

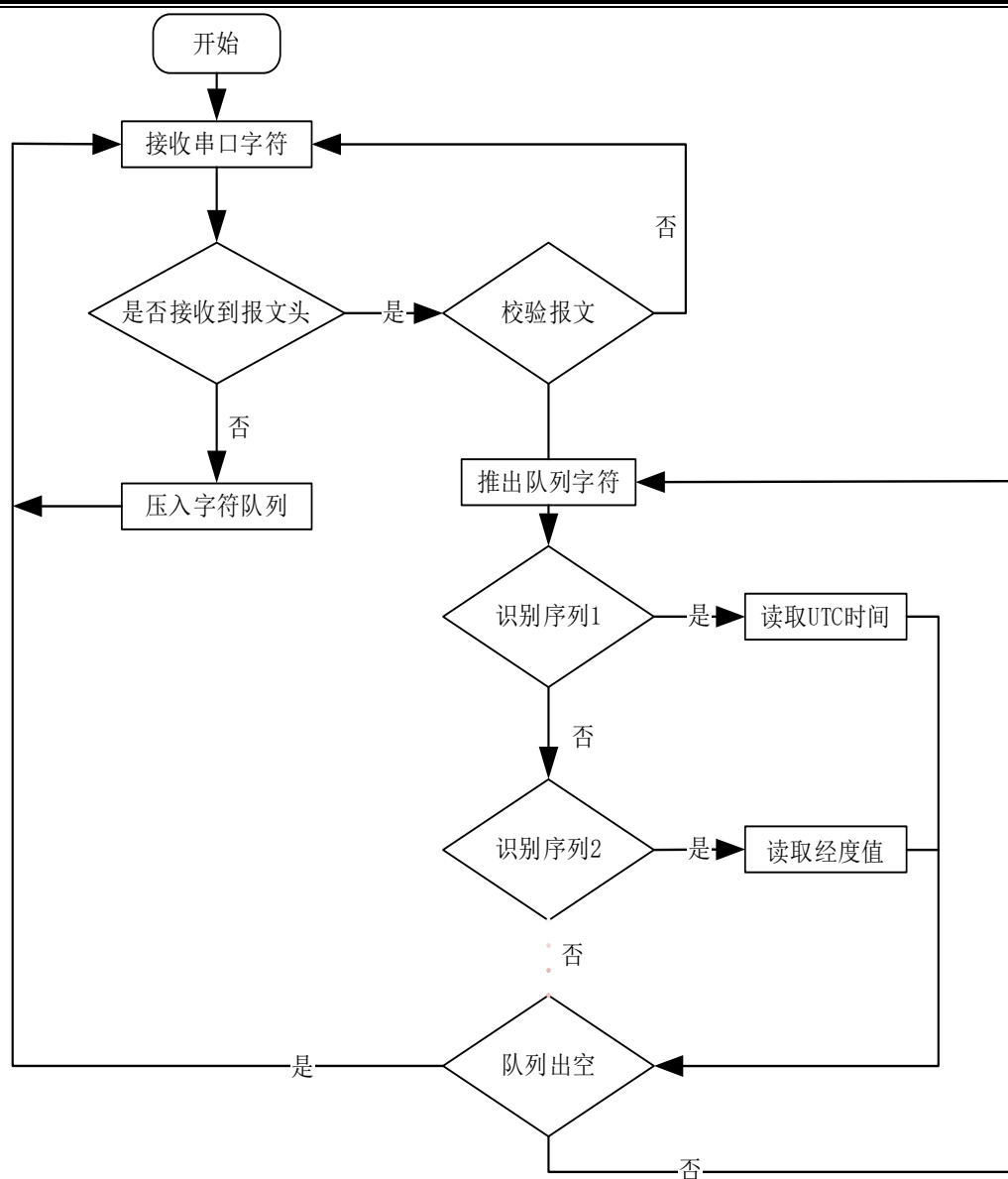


图 4.2 串口通信解码器工作流程

Figure 4.2 Workflow of Serial Communication Decoder

### 4.2.3 经纬度解算代码实现

```
GPSData parseGGA(const char *ggaSentence) {
    GPSData gpsData;
    memset(&gpsData, 0, sizeof(GPSData));

    // 校验Checksum
    int checksum = 0;
    int i;
    for (i = 1; ggaSentence[i] != '*'; i++) {
        checksum ^= ggaSentence[i];
    }

    // 提取Checksum
    int sentenceChecksum;
    if (sscanf(ggaSentence + i + 1, "%X", &sentenceChecksum) != 1) {
        fprintf(stderr, "无法提取Checksum\n");
        return gpsData;
    }

    // 检查校验结果
    if (checksum != sentenceChecksum) {
        fprintf(stderr, "Checksum错误\n");
        return gpsData;
    }

    char *token = strtok((char *)ggaSentence, ",");
    int index = 0;

    while (token != NULL) {
        switch (index) {
            case 2: // Latitude
                sscanf(token, "%lf", &gpsData.latitude);
                break;
            case 4: // Longitude
                sscanf(token, "%lf", &gpsData.longitude);
                break;
        }

        token = strtok(NULL, ",");
        index++;
    }

    return gpsData;
}
```

图 4.3 GPS 报文解析代码片段

Figure 4.3 GPS message parsing code fragment

首先初始化一个 GPSData 类型的结构体 gpsData，将其成员变量初始化为零。

使用 strtok 函数分割报文，提取其中的经度和纬度信息。

同时，计算并验证 Checksum。通过将"\$"和"\*"之间的所有字符进行异或运算，与报文中的 Checksum 进行比较，以确保数据的完整性。校验正确后，将值赋给结构体并返回数值。

## 4.3 经纬度和速度换算

### 4.3.1 经纬度换算位置原理

北斗卫星导航系统采用经度（Longitude）和纬度（Latitude）来表示地球上的任意位置。经度表示东西方向的位置，纬度表示南北方向的位置。经度的取值范围为-

180°到 180°，纬度的取值范围为-90°到 90°。

根据两个 GPS 坐标点的经纬度，可以使用球面三角学的知识计算它们之间的球面距离。常用的计算公式是 Haversine 公式，它可以计算两个经纬度点之间的圆弧长度。

$$d = 2 * R * \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{lat_2 - lat_1}{2} \right) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \sin^2 \left( \frac{lon_2 - lon_1}{2} \right)} \right) \quad \text{式 (4.1)}$$

其中， $d$ 表示两个坐标点之间的距离， $lat_1$ 和 $lon_1$ 表示第一个坐标点的纬度和经度， $lat_2$ 和 $lon_2$ 表示第二个坐标点的纬度和经度， $R$ 表示地球的半径（一般取 6371km）。

### 4.3.2 速度信息换算代码实现

```
// 定义地球半径（单位：千米）
const double RADIUS_EARTH = 6371.0;

double toRadians(double degree) {
    return degree * M_PI / 180.0;
}

double haversine(double lat1, double lon1, double lat2, double lon2) {
    // 将经纬度转换为弧度
    lat1 = toRadians(lat1);
    lon1 = toRadians(lon1);
    lat2 = toRadians(lat2);
    lon2 = toRadians(lon2);

    // 计算差值
    double dlat = lat2 - lat1;
    double dlon = lon2 - lon1;

    // Haversine公式
    double a = sin(dlat / 2) * sin(dlat / 2) + cos(lat1) * cos(lat2) * sin(dlon / 2) * sin(dlon / 2);
    double c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1 - a));

    // 计算距离（单位：千米）
    double distance = RADIUS_EARTH * c;

    return distance;
}

double calculateSpeed(double distance, double timeDifference) {
    if (timeDifference <= 0) {
        return 0; // 避免除以零或负数
    }

    // 计算速度（单位：千米/小时）
    double speed = distance / (timeDifference / 3600.0);

    return speed;
}

// 重载函数，使用 time_t 类型参数
double calculateSpeed(double distance, time_t time1, time_t time2) {
    double timeDifference = difftime(time2, time1); // 计算时间差（单位：秒）

    return calculateSpeed(distance, timeDifference);
}
```

图 4.4 由经纬度得出速度代码实现

Figure 4.4 Implementation of velocity code obtained from latitude and longitude

首先将经纬度转换为弧度，根据式 4.1 计算两个点位的距离，再引入卫导数据中的 UTC 时间，根据时间差换算得出实时的速度。



## 4.4 PWM 波生成软件设计

### 4.4.1 PWM 控制原理

STM32 输出 PWM（脉冲宽度调制）的原理主要基于其定时器功能。PWM 是一种通过编程控制输出方波的频率和占空比（高低电平的比例）的技术，广泛应用于测量、通信、功率控制与变换等领域。

在 STM32 中，PWM 输出的实现涉及定时器的基本配置以及额外的比较和 GPIO 输出设置。定时器内部包含记录当前值的寄存器（CNT）和自动重装载值的寄存器（ARR），它们用于控制 PWM 的周期。另外，引入比较寄存器（CCR<sub>x</sub>）用于确定一个周期内翻转电平的时机，从而控制 PWM 输出波的有效电平长度。

具体而言，当定时器开始计数时，计数器的值与 CCR<sub>x</sub> 进行比较。根据比较结果和 CCER 寄存器中配置的电平极性，输出相应的高低电平。当计数器的值达到 ARR 的值时，定时器会重新从 0 开始计数，从而形成一个完整的 PWM 周期。占空比则是通过调整 CCR<sub>x</sub> 的值来控制的，它决定了高电平持续时间与整个周期时间的比值。

此外，为了输出 PWM 信号，还需要配置 GPIO 模块的复用功能。只有具备定时器复用功能的 GPIO 引脚才能输出 PWM 波形。

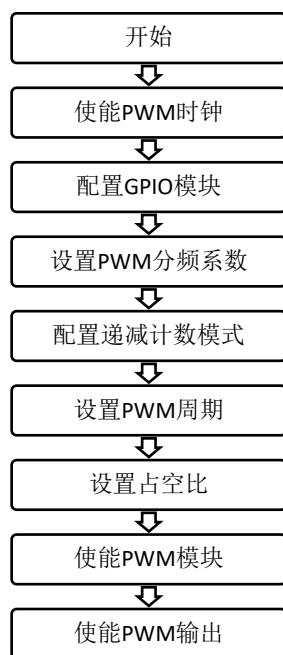


图 4.5 PWM 生成流程

Figure 4.5 PWM generation process

首先，使能 PWM 的时钟功能，确保 PWM 模块能够获得稳定的时钟信号。接着，配置 GPIO 模块，将相关的 GPIO 引脚设置为 PWM 输出模式。然后，设置 PWM 的分频系数，以调整 PWM 信号的频率范围。之后，配置递减计数模式，这样 PWM 信号的计数方式会按照预设的规则递减。接下来，设置 PWM 的周期，即确定 PWM 信号的一个完整周期的长度。再之后，根据实际需要设置 PWM 的占空比，以控制 PWM

信号的高低电平占比。完成以上设置后，使能 PWM 模块，启动其运行。最后，使能 PWM 输出，将配置好的 PWM 信号输出到目标设备上，完成整个 PWM 控制流程的初始化。

#### 4.4.2 PWM 功能实现

```

TIM_HandleTypeDef TIM3_Handler; //定时器 3 PWM 句柄
TIM_OC_InitTypeDef TIM3_CH4Handler; //定时器 3 通道 4 句柄
//PWM 输出初始化
void TIM3_PWM_Init(u16 arr,u16 psc)
{
    TIM3_Handler.Instance=TIM3; //定时器 3
    TIM3_Handler.Init.Prescaler=psc; //定时器分频
    TIM3_Handler.Init.CounterMode=TIM_COUNTERMODE_UP; //向上计数模式
    TIM3_Handler.Init.Period=arr; //自动重装载值
    TIM3_Handler.Init.ClockDivision=TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    HAL_TIM_PWM_Init(&TIM3_Handler); //初始化 PWM

    TIM3_CH4Handler.OCMode=TIM_OCMode_PWM1; //模式选择 PWM1
    TIM3_CH4Handler.Pulse=arr/2; //设置比较值,此值用来确定占空比
    TIM3_CH4Handler.OCpolarity=TIM_OCPolarity_LOW; //输出比较极性为低
    HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&TIM3_Handler,&TIM3_CH4Handler,
    TIM_CHANNEL_4); //配置 TIM3 通道 4
    HAL_TIM_PWM_Start(&TIM3_Handler,TIM_CHANNEL_4); //开启 PWM 通道 4
}

//定时器底层驱动，时钟使能，引脚配置
void HAL_TIM_PWM_MspInit(TIM_HandleTypeDef *htim)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    __HAL_RCC_TIM3_CLK_ENABLE(); //使能定时器 3
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE(); //开启 GPIOB 时钟
    GPIO_InitStructure.Pin=GPIO_PIN_1; //PB1
    GPIO_InitStructure.Mode=GPIO_MODE_AF_PP; //复用推挽输出
    GPIO_InitStructure.Pull=GPIO_PULLUP; //上拉
    GPIO_InitStructure.Speed=GPIO_SPEED_HIGH; //高速
    GPIO_InitStructure.Alternate=GPIO_AF2_TIM3; //PB1 复用为 TIM3_CH4
    HAL_GPIO_Init(GPIOB,&GPIO_InitStructure);
}

//设置 TIM 通道 4 的占空比
//compare:比较值
void TIM_SetTIM3Compare4(u32 compare)
{
    TIM3->CCR4=compare;
}

```

图 4.6 STM32 实现输出 PWM 波

Figure 4.6 STM32 achieves output PWM wave

此部分代码包含三个函数，第一个函数 TIM3\_PWM\_Init 首先通过调用定时器 HAL 库函数 HAL\_TIM\_PWM\_Init 初始化 TIM3 并设置 TIM3 的 ARR 和 PSC 等参数，其次通过调用函数 HAL\_TIM\_PWM\_ConfigChannel 设置 TIM3\_CH4 的 PWM 模式以及比较值等参数，最后通过调用函数 HAL\_TIM\_PWM\_Start 来使能 TIM3 以及使能 PWM 通道 TIM3\_CH4 输出。第二个函数 HAL\_TIM\_PWM\_MspInit 是 PWM 的 MSP 初始化回调函数，主要是使能相应时钟以及初始化定时器通道 TIM3\_CH4 对应的 IO 口模式，同时设置复用映射关系。第三个函数 TIM\_SetTIM3Compare4 是用来定义占空比的函数。

4.5 伺服系统控制算法

稳定伺服控制系统既要有良好的跟踪性，又要有较强的抗扰性<sup>[44]</sup>；既要有良好的静态特性、较高的稳态精度，又要有满意的动态过渡过程，对控制系统而言，其中最关键的一步就是控制方法的设计。控制方法设计的好坏关系到整个控制系统性能的优劣，其要求：实时性高、通用性强、具有一定的智能、在满足性能指标的前提下尽可能简单。在本控制系统中，本文采用复合控制方法，即在经典 PID 的基础上引入前馈控制方法来改善系统动态品质，提高响应速度和跟踪指令能力，拓展系统带宽；引入主动阻力矩摩擦补偿策略来补偿机械死区和摩擦对定位精度的影响<sup>[45]</sup>。

此外，为避免机械谐振，在系统的前向通道中引入二阶低通滤波器或陷波器，以消除机械谐振的影响。针对系统负载的变化（当负载变化后，复合控制系统闭环特性也随之变化，前馈控制器无法感知这种变化），设计了多套控制器，以达到最好的控制效果。在调试过程中，在对于干扰进行抑制的前提下，应尽可能的提高系统的带宽，以提高系统的响应速度并对动力学耦合力矩进行抑制。

4.5.1 PID 算法简介

经典 PID 控制算法，如图 4.7 所示，该控制算法简单易懂，使用中不需精确的系统模型等先决条件，因而成为工程应用最为广泛的控制算法。

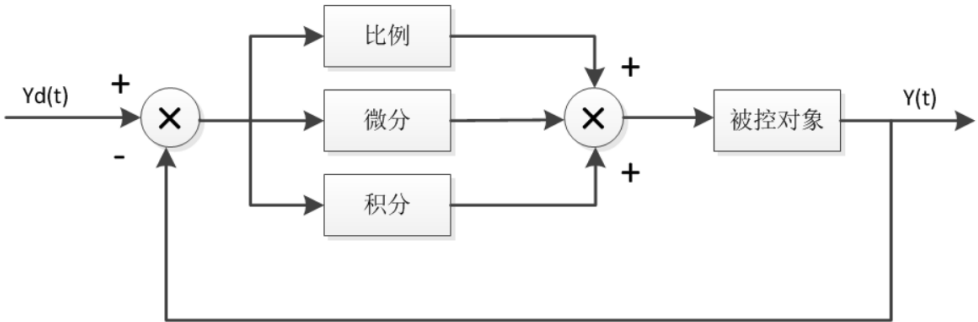


图 4.7 PID 控制算法原理框图

Figure 4.7 Principle Block Diagram of PID Control Algorithm

PID 控制算法基于反馈的概念，其要素包括三个部分：测量、比较和执行。测量关心的变量，与期望值相比较，用这个误差纠正调节控制系统的响应。

PID 调节器的数学模型为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

式 (4.2)

其中：

- $u(t)$ 是控制器的输出。
- $e(t)$ 是当前误差，定义为期望值与实际值之间的差异； $e(t) = r(t) - y(t)$ ，其中 $r(t)$ 是期望值， $y(t)$ 是实际值；
- $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 分别是比例、积分和微分项的增益系数；

在控制算法中采用位置式算式， $e(t)$ 由采样点的值代替，积分与微分由数值积分和差分算法来实现，采用后向矩形积分与后向差分，所得到的位置算式为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=1}^t e(j) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad \text{式 (4.3)}$$

为了减小系统超调量，对以上算式进行改造，采用积分分离 PID 算法。此算法引入逻辑功能，调节器输出采样点值为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i K_l \sum_{j=1}^t e(j) + K_d [e(t) - e(t-1)] \quad \text{式 (4.4)}$$

式中：

$$K_l = \begin{cases} 1, & |e(j)| \leq A \\ 0, & |e(j)| > A \end{cases} \quad \text{式 (4.5)}$$

其中，A 为门限，大偏差时，积分项不起作用，偏差在门限之内时，引入积分算法，这样既可以减少超调量，又可以使积分控制达到预期效果。

### 4.5.2 前馈 PID 控制

针对一般的时滞系统而言，要想在被控变量上反映设定值的变动，通常需要经历相当的滞后，才能实现合理的调节。与此不同的是，前馈控制系统根据扰动或设定值的变化，按照补偿原理进行工作。其特点在于，一旦扰动发生，控制系统就会根据扰动的大小进行调节，以在被控变量产生任何变化之前补偿扰动对其的影响。适当应用前馈控制系统可以将被控变量的扰动消除在萌芽阶段，使其不会因扰动或设定值的变化而产生偏差。相较于反馈控制，前馈控制能够更加及时地进行调节，并且不受系统滞后的影响。

在高精度伺服控制中，前馈控制可用来提升系统的跟踪性能。经典控制理论中的前馈控制设计基于复合控制的概念。当闭环系统为连续系统时，通过确保前馈环节与闭环系统的传递函数之积为 1，实现输出完全复现输入的目标。其系统结构图如下：

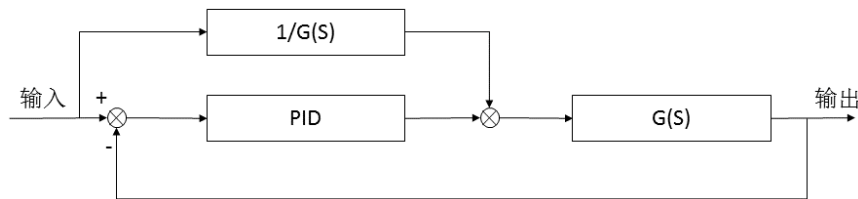


图 4.8 前馈系统控制

Figure 4.8 Feedforward System Control

从上图中，可以发现前馈环节的传递函数是被控对象的倒数。那么就是在使用前馈控制前需要对被控对象的模型有了解，才能有针对性的设计出合适的前馈控制器。也就是说，每个系统的前馈控制器都是不一样的，每个前馈控制器都是专用的。

要实施前馈控制，首先必须得到被控系统的近似模型，这个模型越接近真实的系统，控制的效果就越明显。在这里本文假定一个被控对向的模型为：

$$G(s) = \frac{B}{s^2 + As} \quad \text{式 (4.6)}$$

那么前馈控制器是被控对象的倒数，于是可以推导出前馈控制器的输入输出表达式为：

$$U_f(t) = \frac{A}{B} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{1}{B} \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad \text{式 (4.7)}$$

将其离散化，就可以得到想要实现的前馈控制器的输出公式。前馈控制器的输入是设定值，所以表示如下：

$$U_f = \frac{A}{B} \frac{x(k) - x(k-1)}{T} + \frac{1}{B} \frac{x(k) - 2 * x(k-1) + x(k-2)}{T^2} \quad \text{式 (4.8)}$$

前馈控制器是一种补偿控制，或者说模型控制，其特点就是必须能得到被控对象的精确模型或者近似模型才能起到较好的控制效果。对于时滞系统的模型控制有很多方法，前馈控制是其中比较简单和应用较广的算法。

## 4.6 FOC 算法

### 4.6.1 FOC 算法工作流程

磁场定向控制 FOC (Field Oriented Control) 核心就是分别控制电机的励磁电流和转矩电流，关键就是控制三相输入电流大小与方向。FOC 软件核心主要有坐标变换和 SVPWM 控制两大部分。

主要的工作流程如下：主程序会进行上电初始化，分别对外设、时钟、GPIO、ADC、串口、终端和一些电机控制进行初始化。接下来就会起动电机，电机正常起动后，检测到相电流，得到的相电流就可以进行 CLARK 变换得到  $I_\alpha$  和  $I_\beta$ ，然后进行 PARK 变换得到  $I_d$  和  $I_q$ ，经过 PARK 变换完成后，会通过电流 PID 调整器，进行实际值与目标值之间的调节，并输出相对应的电压  $U_d$  和  $U_q$ ，最后经过反 PARK 变换  $U_\alpha$ ， $U_\beta$ ，输入 SVPWM 模块进调制，最后作用于电机。如图 4.9 所示。

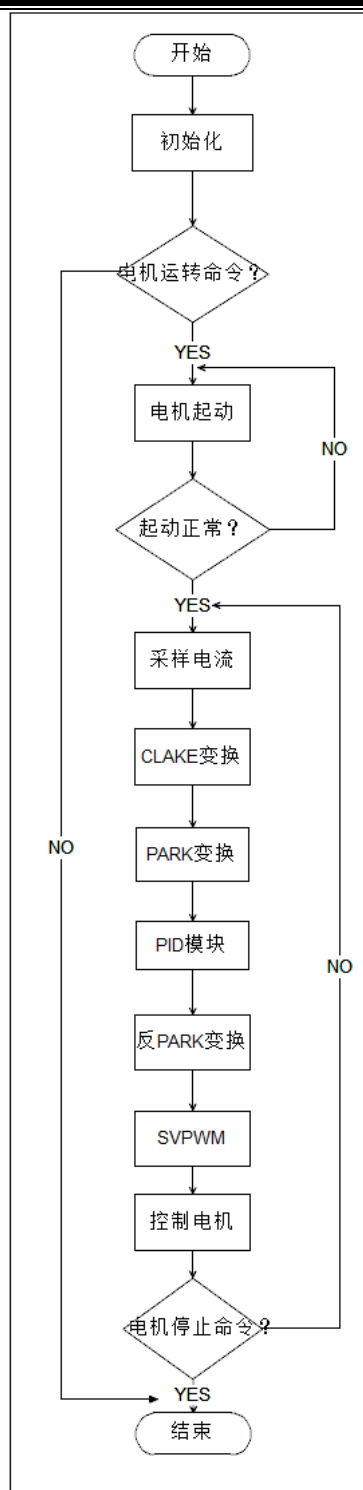


图 4.9 FOC 运行流程图

Figure 4.9 FOC Operation Flow Chart

本部分算法移植了 STM32 官方提供的 SDK 库，修改了其中的 PID 系数和电机参数<sup>[47]</sup>，所以本部分不对代码进行详细介绍。

## 4.7 本章小结

本章主要介绍了微处理器工作流程以及控制系统总体软件运行的过程。软件主要实现北斗导航经纬度信息解算、经纬度和速度的换算、FOC 算法和 PID 算法。结合了伺服系统控制方法和前馈 PID 控制算法，提高系统软件的响应速度和跟踪指令能力，拓展系统带宽，从而使其更具有实时性、通用性与智能性。

## 第5章 基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的测试与分析

从设计控制系统实际需求出发,对基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统进行功能性、稳定性测试。由于本控制系统主要针对控制进行设计,因此主要测试北斗导航系统速度信息的获取及电机驱动的精确控制。

### 5.1 STM32 单片机控制系统调试与分析

#### 5.1.1 STM32 单片机的应用

STM32 单片机采用 ARM Cortex-M 系列处理器核心,具有高性能的处理能力。不同型号的 STM32 单片机配备了不同频率和性能的处理核心,可满足各种需求。STM32 单片机采用 ARM Cortex-M 系列处理器核心,具有高性能的处理能力。不同型号的 STM32 单片机配备了不同频率和性能的处理核心,可满足各种需求。STM32 单片机在设计上考虑了低功耗,具有多种低功耗模式和功耗优化特性,可在电池供电的应用中实现长时间的运行。STMicroelectronics 作为 STM32 系列的制造商,提供了全面的技术支持和开发工具,包括 STM32CubeMX 配置工具、Keil、IAR 等集成开发环境、丰富的应用库和示例代码,以及定期更新的文档和技术支持。另外,STM32 相比其他厂家的 32 位单片机,提供类似功能的情况下价格具有极高的竞争力。

综上所述,STM32 单片机凭借其强大的性能、丰富的外设、低功耗设计、广泛的生态系统支持、灵活的开发工具链和高性价比等优势,成为了嵌入式系统设计中的首选之一。

#### 5.1.2 STM32 单片机控制系统调试及分析

单片机系统的一般调试方法是采用 PC 仿真器-用户单片机系统或仿真器到用户单片机系统的连接方式,利用仿真器提供的 RAM 等资源对硬件进行调试,调试完成后进行程序固化<sup>[51]</sup>。

STM32 单片机控制系统的调试和分析需要综合考虑硬件和软件两个方面。在硬件调试中,正确连接并利用示波器和逻辑分析仪观察信号波形和电源稳定性。软件调试则通过集成开发环境提供的调试工具,分项调试每个模块并打印日志以便问题定位。系统性能分析包括时间、资源和功耗分析,利用专业工具检查任务执行时间、内存使用情况以及电源消耗,来优化系统性能。通信接口调试需要注意数据格式和时序逻辑的准确性,并添加适当的错误处理机制。整个软件调试过程需要不停根据实际使用需求来完善功能和性能,以确保系统稳定性和性能优化。



5.2 北斗导航系统测试分析

5.2.1 北斗导航系统的测试

当 STM32 单片机通电时，通过接收所在地的经度和纬度，用模块输出的经纬度作为测量数据，高德地图查询本地的最官方的经纬度数据为真实数据，对两者数据进行加权，校正后观察、记录、统计和分析<sup>[53]</sup>。

根据表 5.1，再对 6 次测量结果进行加取平均值，经度的平均误差为 0.30%，纬度的平均误差为 0.08%。

表 5.1 经纬度测试数据对照表

Table 5.1 Comparison Table of Longitude and Latitude Test Data

移动距离	测量的数据		真实的数据		相对误差		加权		回归校正	
	纬度	经度	纬度	经度	纬度	经度	纬度	经度	纬度	经度
A(0米)	32.297440	118.356380	32.496419	118.593603	0.198979	0.237223	0.63%	0.23%	0.43%	0.13%
B(10米)	32.393195	118.496500	32.493520	118.597260	0.100325	0.200760	0.32%	0.19%	0.35%	0.11%
C(20米)	32.593276	118.332796	32.492999	118.595985	0.100277	0.263189	0.31%	0.25%	0.35%	0.10%
D(30米)	32.327652	118.632546	32.493159	118.595733	0.165507	0.036813	0.53%	0.12%	0.27%	0.06%
E(40米)	32.376589	118.532750	32.493209	118.596628	0.116620	0.063878	0.37%	0.06%	0.30%	0.10%
F(50米)	32.628456	118.614529	32.493923	118.593345	0.134533	0.021184	0.42%	0.02%	0.11%	0.03%

由以上数据可以看出，通过使用 STM32 单片机和北斗导航系统进行定位，其经纬度测量的相对误差在经度方面为 0.30%，纬度方面为 0.08%。经过加权和回归校正后，误差得到了进一步的优化。这表明 STM32 单片机在北斗导航系统中的应用具有较高的准确性和可靠性。

5.2.2 北斗导航系统的分析

通过实验得出结论，导航系统在不同距离下的纬度和经度误差均保持在一个较低的水平，表明该测量系统具有较高的精度和可靠性。通过多次测试，最终在这个设计上实现以 STM32H743 单片机为核心，通过编程的方法可以得到定位系统的功能，实现了实时定位的功能，最后在经过加权平均计算和最小二乘法回归算法正确地处理数据，可以使得测量出来的误差更小、更精准。

目前，北斗卫星导航系统广泛应用于各个领域，经济社会效应显著，在工、农、商等各个行业都有广泛的应用。随着北斗卫星导航系统功能的不断提升和性能的提升，北斗的应用规模和应用范围也将逐步扩大，前景相当可观。当今的数字电子系统越来越先进，也越来越集成。

## 5.3 伺服控制系统调试分析

### 5.3.1 PWM 输出测试

PWM 通过改变信号的脉冲宽度来控制电路的输出水平。在电机控制中主要用来调节电机的平均电压和电流，从而实现对转速的控制。

PWM 输出测试可以验证 PWM 模块是否按照预期功能工作。这包括确保 PWM 信号的频率、占空比等参数符合规格要求，并且能够正确地产生所需的脉冲信号。本文设计了以下方法来测试输出的 PWM 是否是可控可调：将 TIM8\_CH1（由 PC6 复用）输出 PWM 波，然后利用示波器查看 PWM 波形。上电默认输出 5 个 PWM 波，之后按一下按键，就输出 5 个周期的连续 PWM 波。LED 灯闪烁指示程序运行状态。主要测试代码如图 5.1 所示。

```
int main(void)
{
    uint8_t key = 0;
    uint8_t t = 0;

    HAL_Init(); /* 初始化 HAL 库 */
    sys_stm32_clock_init(85, 2, 2, 4, 8); /* 设置时钟, 170Mhz */
    delay_init(170); /* 延时初始化 */
    usart_init(115200); /* 串口初始化为 115200 */
    led_init(); /* 初始化 LED */
    key_init(); /* 初始化按键 */

    atim_timx_npwm_chy_init(5000 - 1, 17000 - 1); /* 2Hz 的 PWM 频率 */
    atim_timx_npwm_chy_set(5); /* 输出 5 个 PWM 波 */
    while (1)
    {
        key = key_scan(0);
        if (key == KEY0_PRES)
        {
            atim_timx_npwm_chy_set(5);
        }
        t++;
        if (t > 50)
        {
            t = 0;
            LED0_TOGGLE();
        }
        delay_ms(10);
    }
}
```

图 5.1 PWM 测试代码

Figure 5.1 PWM test code

PWM 输出测试对于确保 PWM 功能的正确性、稳定性和性能至关重要。通过对 PWM 输出进行全面的测试，可以确保系统在实际应用中能够可靠地工作，并满足实际场景使用的要求。本次测试结果如图 5.2 所示，所测功能能够按照设计方案实现，证明了 PWM 波形完全是可控可调。

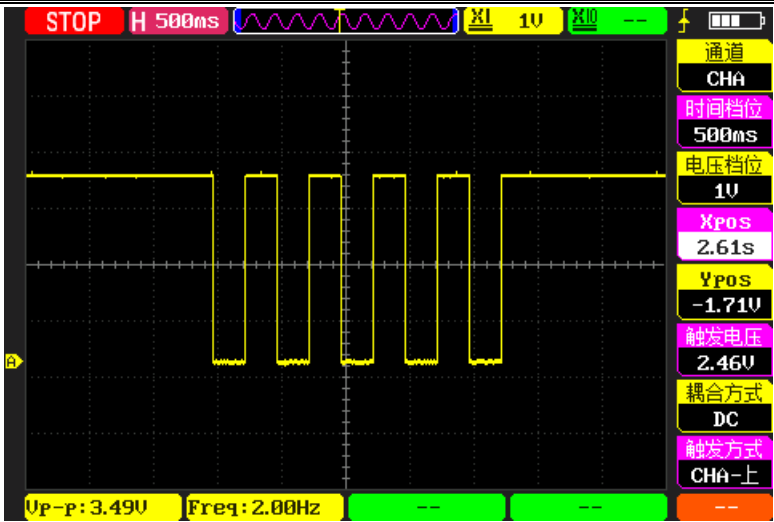


图 5.2 PWM 输出波形

Figure 5.2 PWM output waveform

5.3.2 PID 测试

采用位置 pid 控制方法，以目标角度减去实际角度的值  $err1$  作为输入量，pwm 占空比作为输出量， $k_p$  \* 误差， $K_i$  \* 误差的积分， $k_d$  \* 误差的微分。图 5.3 为 PID 控制算法代码。

```
int32_t increment_pid_ctrl(PID_TypeDef *PID,float Feedback_value)
{
    PID->Error = (float)(PID->SetPoint - Feedback_value); /* 计算偏差 */
    PID->SumError += PID->Error; /* 累计偏差 */
    PID->ActualValue = (PID->Proportion * PID->Error) /* 比例环节 */
    + (PID->Integral * PID->SumError) /* 积分环节 */
    + (PID->Derivative*(PID->Error - PID->LastError)); /* 微分环节 */
    PID->LastError = PID->Error; /* 存储偏差，用于下次计算 */
    return ((int32_t)(PID->ActualValue)); /* 返回计算后输出的数值 */
}
```

图 5.3 PID 控制算法代码

Figure 5.3 PID Control Algorithm Code

increment\_pid\_ctrl 函数用来进行位置式 PID 的控制，该函数的 2 个形参：\*PID 传入 PID 控制量相关的结构体地址；Feedback\_value 传入当前系统的实际值，用于计算偏差。在函数中，先计算本次偏差 Error，然后把偏差累计，存入 SumError 成员当中，接着根据位置式的公式进行三个环节的计算，计算后的期望输出存入 ActualValue 成员当中，然后存储本次偏差，最后返回期望输出值。

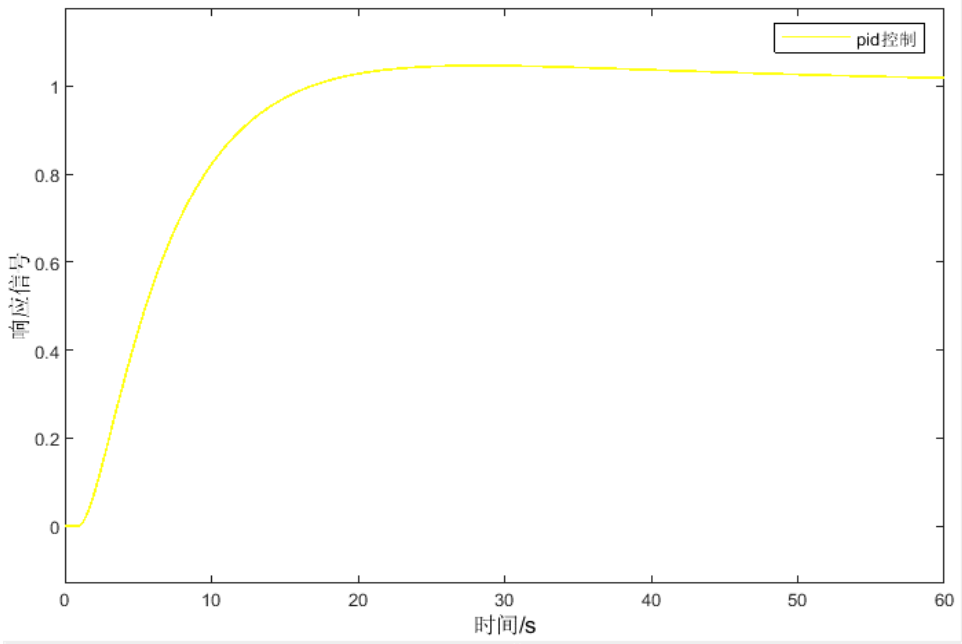


图 5.4 PID 控制

Figure 5.4 PID Control

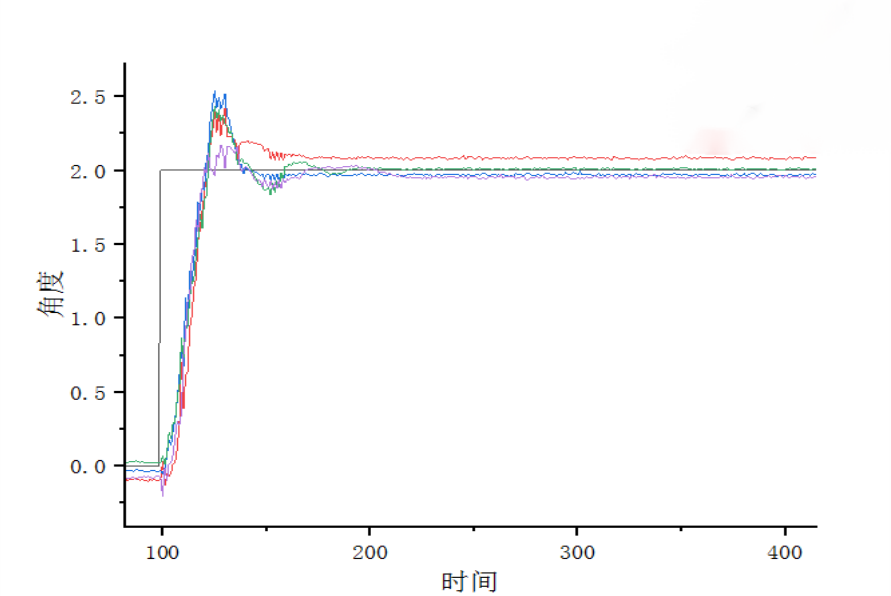


图 5.5 PID 参数修改对输出波形的影响

Figure 5.5 Effect of PID parameter modification on output waveform

如图 5.4 和图 5.5 所示，PID 参数调整后，经过多次测试，控制系统可以按照预先功能设计需求，输出控制信号更加精确及稳定，响应速度，超调量及误差得到了很大的改善。

### 5.3.3 FOC 测试

首先，进行测试测量电机参数；第二，通过设定特定转速，判断 FOC 算法运行是否正确；第三，通过改变一些电机参数，看控制系统及电机的运行状态。ST 公司提

山东理工大学硕士学位论文 第五章 基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的测试与分析

供了免费且易于使用的电机控制库，为了方便展示测试结果，通过借助该软件平台进行测试操作。实物测试如图 5.6 所示。

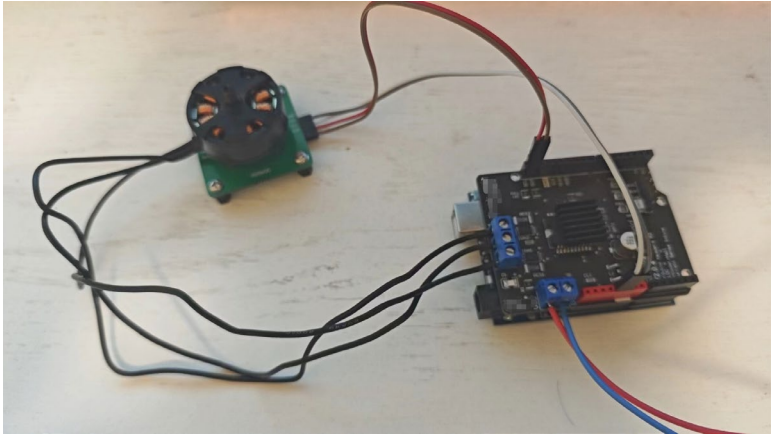


图 5.6 电机实测图

Figure 5.6 Actual Measurement of Motor

上位机界面如图 5.7 所示。

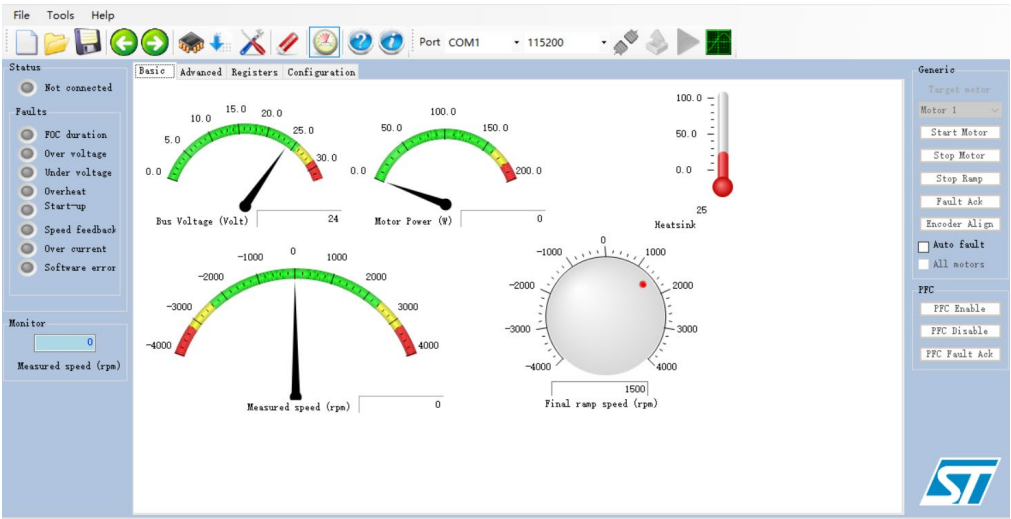


图 5.7 FOC 测试上位机

Figure 5.7 FOC testing upper computer

1) 测量电机参数

首先不进行通电，不连接任何电路，检查电机和开发板是否异常，接线是否正确。手动转动电机，检查电机是否异常。然后连接开发板、电机，最后接上电源，硬件连接好后，检查无误。启动控制板，开发板与上位机进行连接通讯，之后进行检测电机参数。如图 5.8 所示，可以看到线圈电阻、线圈电感等一些电机参数。

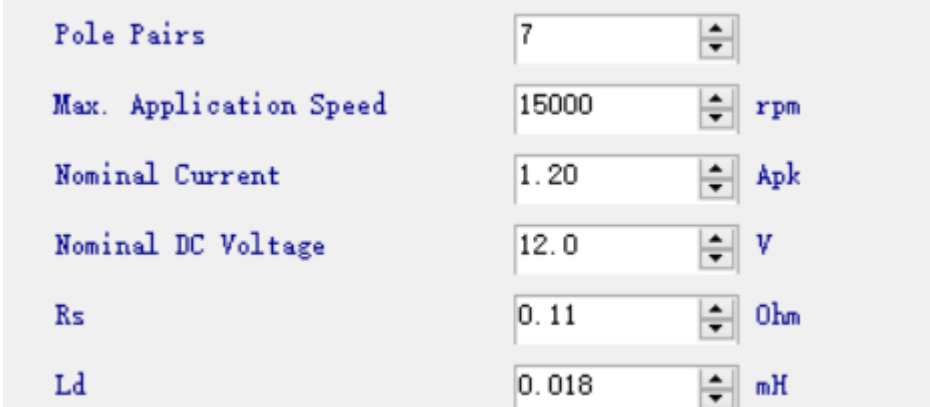


图 5.8 电机参数获取

Figure 5.8 Motor parameter acquisition

2) 电机启动

首先通过配置电机起动的参数，如图 5.9 所示。



图 5.9 设定速度转动

Figure 5.9 Set Speed Rotation

接下来观察电机转动的状态，电机起动成功，并且成功获得电机速度。

3) 设定速度

通过改变电机速度，来观察电机运作状态的变化，验证算法的可靠性。通过设定正转速度和反转速度，然后设定速度为 0，来观察电机的变化情况，如图 5.10 所示。

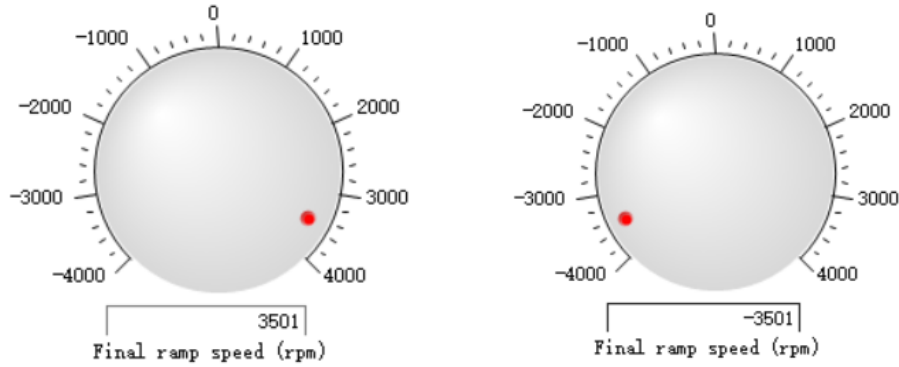


图 5.10 正反转设定

Figure 5.10 Forward and Reverse Settings

设定电机速度为 0，如图 5.11 所示，可以观察到，此时检测到的电机速度为零。

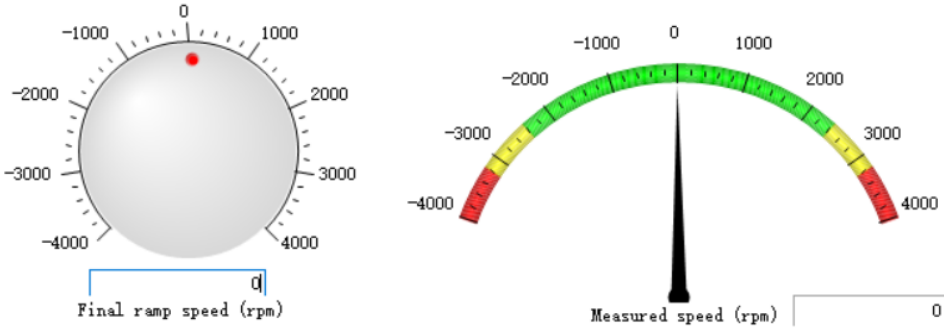


图 5.11 设定速度为零

Figure 5.11 Setting Speed to Zero

通过上述电机测试，当前设计的伺服控制回路能够精确的控制电机转动，满足设计要求。

## 5.4 本章小结

本章主要从北斗卫星测控、数据集成与分析、伺服驱动控制的精确度等方面进行实验与调试。在调试分析过程中发现问题、分析问题、解决问题，不断总结与改进实验中的各个环节，提升控制系统的精度与实用性，检验整体设计思路的技术可行性。

## 第6章 总结与展望

### 6.1 总结

近些年,围绕解决制约农业科技应用的重大技术瓶颈问题,我国科学技术人员着力研究关键核心技术,突破技术难点,为科学技术向农业领域发展提供技术科技基础,从而可以打造一系列的以先进的科学技术作为引领的农业生产机械,同时培育出新型的农业生产经营主体,完善我国农业科技支撑乡村振兴的政策,进而显著改善我国农村生活环境,充分开发农业农村的人力资源,以及专业化社会科技服务体系。

相比于传统的播种灌溉方式,基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统具有显著优势,包括降低人力成本、可变株距的播种方式。研究开发 STM32 单片机与北斗测控的电动播种机控制系统,将电子控制技术、精确定位系统应用于农业机械自动化种植,推动现代农业实现精度高、质量高、效率高的快速发展模式。本文按照研究课题,从硬件与软件系统的设计、选型,再到系统整体的融合测试分析,研发北斗测控系统与 STM32 单片机相结合的自动化播种系统,在北斗测控系统测试、控制系统综合调试过程中充分验证课题的可行性与实用性。

在基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统的设计分析与研究过程中,从查阅资料、收集文献、系统分析各个设计环节,尤其是在硬件元器件的选择和软件平台的选用都事先充分的考虑了控制系统的整体性能,同时也分析了控制系统的整体费用支出,最终做到技术先进可行,经济合理,适应市场需求等方面的综合性考虑。

综上所述,本文开发的基于 STM32 与北斗测控的电动播种机控制系统,通过单片机接收北斗测控信号并换算成速度信息,同时将其转化为电信号,以控制电动机及其附属机构,解决了传统机械种植中参数不可控、种植密度不均和人力成本高等问题。该系统不仅实现了科学技术向生产力的有效转化,还兼顾了经济合理性分析,最终达到使该系统成为适应市场需求与发展的电动播种机控制系统。

### 6.2 展望

由于时间和条件所限,本控制系统的开发还有一些问题需要解决,需后续工作进一步完善。主要是以下几个方面。

受到时间限制,本文未对伺服电机的选型进行充分分析和验证,伺服电机的选型关系到伺服系统的精度、稳定性以及动态响应。下一步的工作,根据实际应用场景的需要,综合考虑精度、稳定性、经济性等多个方面对伺服电机进行选型分析和验证。

现阶段设计的控制系统主要集中在伺服电机的控制,未对排种器的控制进行设计。排种器结合北斗定位系统,可以实现精准农业的目标,进行位置精确的播种操作,进



进一步提高农业生产的智能化和信息化水平。另一方面，不同的作物对播种要求不同，排种器可以根据作物种类、种子大小和播种方式进行调整和优化，满足多样化的农业需求。因此，很有必要对排种器进行系统设计。

现阶段的设计主要集中在功能的实现上，对实际运行环境未进行分析。通过对实际环境的可靠性和安全性分析，可以评估和预测系统的稳定性和有效性，避免可能出现的问题和故障。

## 参考文献

- [1] 张冲,吴努,张延化等.国内外免耕播种技术发展现状及趋势[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(16):1-5.
- [2] 张秀玲.花生人工等距精播种与机械播种产量性状比较[J]. 现代农业科技, 2017, (05):22+24.
- [3] 张一峰.国内外播种机的发展现状与发展趋势分析[J]. 当代农机, 2015(05):79-80.
- [4] 陈永亮.高速免耕播种机单体设计与试验研究[D]. 沈阳农业大学, 2020.
- [5] 金荣圣.我国播种机械的发展与技术创新[J]. 农业开发与装备, 2019(04):32.
- [6] 崔钊.基于ARM的北斗坐标转换模块设计[J]. 中国新通信, 2020, 22(7):57.
- [7] 王敬平,姜鑫,褚少鹤,等.北斗卫星导航系统定位精度研究[J]. 软件, 2019, 40(10):152-154.
- [8] 甘韦飞,郑鹏辉.基于STM32监控系统中无人机的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(21):188-193.
- [9] 匡丽红,赵雪,张博等.单行玉米电动播种控制系统的设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(06):89-94.
- [10] 付强.Altium Designer 软件在电路设计中的应用[J]. 科技传播, 2011, (14):165-166.
- [11] 叶俊杰.Altium Designer技术在PCB板设计中的应用研究[J]. 电子质量, 2017, (02):80-83.
- [12] 黄立培,张学.变频器应用技术及电动机调速[M]. 北京:北京人民邮电出版社, 1998.
- [13] 翁子彬,丁蔚,彭佳丽.基于STM32F103的一种通用MCU编程器[J]. 电子与封装, 2020, 20(11):68-72.
- [14] 张朝辉,吴海云,黄舞记,等.基于STM32单片机的农业机器人北斗/GPS定位系统设计[J]. 农技服务, 2019, 36(5):52-53.
- [15] 杨福霞.北斗/GPS组合RAIM算法研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2018.
- [16] 闫飞,王春博,吴永睿,等.森林BDS/GPS组合定位算法与精度分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4):221-227.
- [17] 张丰兆,刘瑞华,倪育德,等.北斗卫星导航系统动态定位精度测试与分析[J]. 全球定位系统, 2018, 43(1):43-48.
- [18] 叶剑峰,彭军,李娜娜.基于卫星导航信号模拟法的北斗接收机导航精度校准测试[J]. 计测技术, 2016, 36(6):30-36.
- [19] 程胜,蒋纯,李德志,等.基于北斗和GSM的儿童防走失单片机定位系统设计[J]. 科技视界, 2018(8):76-77.
- [20] 阎石.数字电子技术基础[M]. 5版.北京:高等教育出版社, 2006.
- [21] Kang Guohua,Liu Jianye,Zhu Yanhua,et al.Implementation of GPS/SST/SINS Integrated Navigation Filtering Algorithm for Ballistic Missiles[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015(2):115-118.
- [22] Duan Fang,Liu Jianye,Yu Feng.Autonomous Navigation Technology of LEO Satellite Based on Image Displacement[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016(2):165-169.

- [23] Jing Li.Design of DC motor PID Control System Based on STM32 Single Chip Microcomputer[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(7):47-49.
- [24] 周江.STM32单片机原理及硬件电路设计研究[J]. 数字技术与应用, 2015(11):1.
- [25] 蒋志林.STM32单片机的原理及硬件电路设计探讨[J]. 数字技术与应用, 2015(10):22.
- [26] 李辉.STM32单片机的原理分析与硬件电路设计[J]. 电子测试, 2018, (14):31+26.
- [27] 陈甫良.伺服系统的现状及发展趋势分析[J]. 科技资讯, 2014, 12(33):61-62.
- [28] 苏潮,吴洪德,陈庆武,等.基于STM32单片机的PMSM伺服系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(06):165-168.
- [29] 代睿.无位置传感器无刷直流电机调速控制系统设计[J]. 苏州大学学报(工科版), 2011, 31(06):36-41.
- [30] 鲁庭勇.基于模型设计的永磁同步电机调速实验平台设计[D]. 长安大学, 2015.
- [31] 赵守鑫.基于STM32的永磁同步电机调速控制系统的设计[D]. 吉林大学, 2015.
- [32] 李成桐,张敬宾,丁原彦.新一代伺服系统的现状与展望[J]. 国内外机电一体化技术, 1999(4):3-10.
- [33] 骆再飞,蒋静坪,许振伟.交流伺服系统及其先进控制策略综述[J]. 机床与液压, 2002(6):7-10.
- [34] 杨春旭,林若波,彭燕标.基于PWM控制的直流电机调速系统的设计[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2011, 27(03):10-13.
- [35] 宋玉锋,束慧.直流电动机测速装置的设计:基于2017年全国大学生电子设计竞赛项目[J]. 南通职业大学学报, 2017, 31(3):67-71.
- [36] 邱恒.基于STM32单片机的直流电机调速系统设计研究[J]. 电子世界, 2016(07):156-158.
- [37] 王鸿莹.步进电机控制技术入门[M]. 上海:同济大学出版社, 1990, 9:136-1
- [38] 邓安彤.永磁无刷直流电机调速控制系统的设计研究[J]. 内燃机与配件, 2020(12):111-112.
- [39] 葛宝明,王祥珩,苏鹏声,等.开关磁阻电机控制策略综述[J]. 电气传动, 2001, 31(2):8-13.
- [40] 李艳芳,李治慧.基于单片机的无刷直流电机调速控制系统设计[J]. 电子测试, 2021(21):24-25+46.
- [41] 宋鹏,张俊雄,李伟,等.精密播种机性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):71-74.
- [42] 周利明,张小超,苑严伟.小麦播种机电容式播种量传感器设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10):99-103.
- [43] 何米.基于51单片机的简易GPS定位器设计[J]. 数字通信世界, 2018(7):88.
- [44] 吴凡.基于DSP的光轴稳定平台控制系统研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2006.
- [45] 丛志浩.光刻机六自由度工件台控制系统设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [46] 娄秀华.精密播种机播种自动控制装置[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(2):15-17.
- [47] 徐扬,张兰红,陈永楼.基于STM32F411的无刷直流电机FOC控制系统设计[J]. 微特电机, 2023, 51(05):61-65+71.
- [48] 王宇.基于STM32的无刷直流电机FOC控制器设计[J]. 信息技术与信息化, 2022, (08):144-147.
- [49] 廖宇,郭黎,郭强.DSP 电力机车微机控制系统的设计[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2010, 28(2):168-170.

- [50] Pena R., Clare J.C.. Doubly Fed Induction Generator using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation[J]. IET electric power applications, 1996, 143(3):231-241.
- [51] 王爱明,潘建寿,康雪艳,等.用PC机直接调试单片机系统的实现[J]. 微型机与应用, 1999, (08):20-22.
- [52] 石宏,李成华,王君玲.排种器性能自动检测装置的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2003(2): 124-127.
- [53] 何泓稼,刘培培,蒋艳丽,等.基于STM32的北斗导航接收系统的设计[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(11):165-169.
- [54] 赵雪,赵斌,戈天剑.气吸式玉米播种机智能电控系统设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(4):102-105
- [55] 伊藤信孝.Computer based Optimal Control of Seeding Rate Based on Travel Speed and Seed Signals [J]. 日本农业机械学会志, 1997(6):93-101.
- [56] 李宇飞.四大全球导航系统特性比较[J]. 太空探索, 2019, (09):41-45.
- [57] 郑一平,花有清,陈丽能,等.水稻直播机播种监测器研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4):77-80.
- [58] 刘小莉,邵晶,肖帅,周开军,陈景翼.基于STM32单片机的人体红外感应系统硬件平台设计 [J]. 自动化应用, 2018(01):7-9.
- [59] 覃婕,阎波,林水生.基于 Cadence-Allegro 的高速PCB设计信号完整性分析与仿真[J]. 现代电子技术, 2011, 34(10):169-171, 178.
- [60] Eduard Muljadi, C. P. Butterfield, Brian Parsons, et al. Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):29-36.
- [61] 李振梅.模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2010:123-144.
- [62] 姜雪松,王鹰.电磁兼容与 PCB 设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:176-234.
- [63] 蔡荭,邹学峰,罗旻,等.浅析旁路电容的特性及其在PCB中的应用[J]. 电子与封装, 2010, 10(7):35-39.
- [64] 杜红彬,杨克浊,康小明.基于双极性PWM波的无感无刷电机驱动方案[J]. 微电机, 2016, 49(06):42-45+51.
- [65] 王浩.基于北斗定位的小区精量播种机控制系统研发[D]. 青岛理工大学, 2019.
- [66] 苏日古格,于新海,国芳,等.基于STM32单片机的北斗/GPS双模定位系统设计及测试[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(01):123-125.
- [67] J Hermam K.P.Neubert.Instrument TransducerS—An Introduction to their Performance and Desing [M]. Sencond Edition.Clarendon Press, Oxford, 1995 .
- [68] M.J.Usher and D.A.Keating.Sensors and Transducers[M]. Sencond Edition.London: MACMILLAN P RESS LTD, 1996.
- [69] 廖庆喜,张猛,余佳佳,等.气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 30-34.
- [70] 何培祥,杨明金,陈忠慧.光电控制穴盘精密播种装置的研究[J]. 农业机械学报, 2003 (1):47-49.
- [71] 何堤,陈立东,谢宇峰.气吸式排种器排种质量影响因素的试验研究[J]. 农机化研究, 2006 (1):175-176, 17.
- [72] 王丽君.针吸式穴盘自动播种机的设计与研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2003.

- [73] Zhang S. Automatic Feeding Control Offertilizer Applicator and Seeder Based on Running Speed Signals, [J]. Jsam, 1996, 58:49-55.
- [74] 唐尧华. 基于拖拉机前轮转速的排种驱动系统的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- [75] 郑送军, 杨卫民. 精密播种机排种器自动监测系统的设计[J]. 农机使用与维修, 2009(2): 29-30.
- [76] 李剑峰. 播种机排种自动控制系统的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- 丁喜波, 张忠典, 陆风霞, 孙宝军. 光电式传感器原理及其应用[J]. 传感器技术, 1995, (5): 49-51.