

# 竞技机器人的分布式控制系统设计

王 岩

院（系）： 机电工程学院      专      业： 机械设计制造及其自动化

学    号： 1080810520      指导教师： 王娜君

2012 年 7 月 2 日

哈爾濱工業大學

# 畢業設計（論文）

題 目： 競技机器人的分布式控制系统设计

专 业 机械设计制造及自动化

学 号 1080810520

学 生 王 岩

指 导 教 师 王娜君

答 辩 日 期 2012 年 07 月 02 日

## 哈尔滨工业大学毕业设计（论文）评语

姓名：\_\_\_\_\_王岩\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_1080810520\_\_\_\_\_ 专业：\_\_\_\_\_机械设计制造及其自动化\_\_\_\_\_

毕业设计（论文）题目：\_\_\_\_\_竞技机器人的分布式控制系统设计\_\_\_\_\_

工作起止日期：\_\_\_\_\_2011\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_12\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_19\_\_\_\_\_日起 \_\_\_\_\_2012\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_07\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_06\_\_\_\_\_日止

指导教师对毕业设计（论文）进行情况，完成质量及评分意见：

---

---

---

---

---

---

指导教师签字：\_\_\_\_\_ 指导教师职称：\_\_\_\_\_

评阅人评阅意见：

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

评阅教师签字：\_\_\_\_\_ 评阅教师职称：\_\_\_\_\_

答辩委员会评语：

---

---

---

---

---

---

根据毕业设计（论文）的材料和学生的答辩情况，答辩委员会作出如下评定：

学生 \_\_\_\_\_ 毕业设计（论文）答辩成绩评定为： \_\_\_\_\_

对毕业设计（论文）的特殊评语：

---

---

---

---

---

---

答辩委员会主任（签字）： \_\_\_\_\_ 职称： \_\_\_\_\_

答辩委员会副主任（签字）： \_\_\_\_\_

答辩委员会委员(签字)： \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

年    月    日

## 哈尔滨工业大学毕业设计（论文）任务书

项目名称：竞技机器人的分布式控制系统设计
项目来源：2012 年 CCTV 全国大学生机器人大赛暨亚太机器人大赛国内选拔赛
项目起止日期：2011 年 12 月 19 日至 2012 年 7 月 6 日
项目类型：工程设计 <input type="checkbox"/> 、 科学实验 <input type="checkbox"/> 、 软件开发 <input type="checkbox"/> 、 理论研究 <input type="checkbox"/> 、 综合 <input checked="" type="checkbox"/>
<p>立题的目的和意义简介：</p> <p>本设计题目以 2012 亚太地区大学生机器人大赛国内选拔赛(ROBOCON 2012) 为背景。“亚广联亚太地区大学生机器人大赛”，其宗旨是致力于培养青少年对于开发、研制高科技的兴趣与爱好，提高我国的科技水平，为机器人工业的发展发掘培养后备人才。为了贯彻“亚广联亚太地区大学生机器人大赛”比赛宗旨，我代表学校参加 2012 年国内选拔赛，该课题要根据所学的知识及所具备的条件要设计出具有一定导航、定位精度及稳定性的控制系统，使我校竞技机器人在比赛中稳定发挥，延续 11 年比赛的辉煌。</p>
<p>项目的技术指标与要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 开发基于 CAN 总线的直流有刷伺服电机驱动器，并完成电机的上位机调试软件的编写。该驱动器可以满足机器人比赛中所有使用的电机要求；</li><li>2. 开发基于 ARM 和 FPGA 的机器人主控系统，并完成主控系统 ARM 部分的程序。</li><li>3. 开发 USB 转 CAN 模块。</li><li>4. 完成机器人比赛需要的其他部分模块并完成机器人调试工作。</li></ol>

项目的进度安排:

2011.12.19—2012.01.10: 查阅资料, 了解机器人系统的组成, 熟悉 ARM 开发环境, 了解  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  操作系统工作原理;

2012.01.11—2012.02.15: 开发机器人的基于 ARM 和 FPGA 的主控系统并完成 ARM 部分的程序;

2011.02.16—2011.04.15: 开发基于 CAN 总线的直流有刷伺服电机驱动器, 并完成电机调试软件程序的编写;

2011.04.16—2011.05.01: 开发 USB 转 CAN 模块;

2011.05.02—2011.06.09: 完成机器人调试工作, 优化机器人的控制参数, 提高机器人的稳定性与快速性, 完成最终系统;

2011.06.10—2011.07.02: 总结调试结果, 保证机器人控制系统稳定运行, 准备参加比赛, 撰写论文, 准备答辩。

同组设计者及分工: 独立完成

指导教师签字:

年 月 日

教研室主任意见:

同意

教研室主任签字:

年 月 日

## 摘要

本文主要介绍竞技机器人的分布式控制系统的软硬件设计与调试。

首先，介绍了所使用的主控系统的工作原理及软硬件结构特点。主控系统以 ARM 微处理器为核心，并在其中嵌入  $\mu\text{C}/\text{OS}$  操作系统，使机器人的软件模块化，便于管理；以 FPGA 为协处理器，减轻了主处理器的负担，增强了控制系统的性能，丰富了接口。

其次，介绍了应用于比赛中的直流有刷伺服电机驱动器的软硬件结构。该驱动器内置电流环，是一个位置、速度和电流的三环控制系统，相比以前的电机控制方法，更加合理。在驱动器内部集成了驱动器常见问题的各种保护措施，经过实际使用验证，该驱动器完全符合比赛要求，并且具有较高的稳定性。

再者，介绍了 USB 转 CAN 模块的软硬件设计。该模块在机器人的 CAN 总线监控及机器人的调试中起到了非常关键的作用。

最后，根据软硬件调试情况，对毕业设计工作进行了总结，提出了系统进一步改进方法。

**关键词** 移动机器人；分布式控制系统；伺服电机控制

## Abstract

Hardware and software design and debugging of distributed control system in competitive robot is introduced in this paper.

Firstly, working principle and structure of software and hardware features of the main control system is introduced. The main control system is based on ARM processor. The embedded operating system  $\mu\text{C}/\text{OS}$  makes the software of the robot modularization so that it is convenient to manage; FPGA coprocessor reduces load of the main processor, enhances the performance and enriches the interface of the control system.

Secondly, software and hardware structure of the brush DC servo motor driver applied in the competition is introduced. The control method of the driver which contains a position, speed and current control system, is more reasonable compared to the previous version. Protective measure of various common problems is integrated in the drive. The driver fully complies with the requirements of competition according to the result of the actual use.

Furthermore, the software and hardware design of the USB-CAN module is introduced. The module plays a very key role in the monitoring and debugging of robot CAN bus.

Finally, according to the software and hardware debugging, graduation design work are summarized, and a further improved method of the system is put forward.

**Keyword** Mobile robot; DCS; Servo motor control



# 目录

摘要 .....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.1.1 课题来源 .....	1
1.1.2 目的和意义 .....	2
1.2 国内外相关研究方向的发展现状综述 .....	2
1.2.1 移动机器人的发展历史及现状 .....	2
1.2.2 机器人控制系统的分类及特点 .....	3
1.2.3 比赛的任务对机器人控制系统提出的要求 .....	4
1.3 主要研究内容 .....	4
第 2 章 基于 ARM 和 FPGA 的主控系统的设计 .....	5
2.1 整体电控系统简介 .....	5
2.2 主控板原理电路 .....	7
2.2.1 主控模块 .....	7
2.2.2 CAN 总线接口电路 .....	8
2.2.3 电源模块 .....	9
2.2.4 PS2 手柄接口电路 .....	9
2.2.5 FPGA 模块 .....	10
2.2.6 USART/232 模块 .....	10
2.2.7 SD 卡接口电路 .....	11
2.2.8 FPGA 扩展 RAM 电路 .....	11
2.3 主控板 PCB 设计 .....	12
2.4 主控系统 ARM 的软件设计 .....	14
2.4.1 CAN 总线技术 .....	14
2.4.2 $\mu$ C/OS-II 操作系统任务划分 .....	15
2.4.3 程序结构的划分 .....	16
2.4.4 FatFS 文件系统的使用 .....	16
2.5 本章小结 .....	17

第 3 章 基于 CAN 总线的直流有刷伺服电机驱动器设计 .....	18
3.1 直流有刷电机驱动器的系统简介 .....	18
3.2 直流有刷伺服电机驱动器原理电路 .....	19
3.2.1 微控制器核心电路 .....	19
3.2.2 功率驱动电路 .....	19
3.2.3 电机电流检测电路 .....	20
3.2.4 电源电路 .....	21
3.2.5 温度检测电路 .....	21
3.3 直流有刷伺服电机驱动器 PCB 设计与实物制作 .....	22
3.4 伺服电机驱动器软件设计 .....	24
3.4.1 数字滤波算法 .....	24
3.4.2 PID 算法 .....	25
3.4.3 梯形速度曲线规划算法 .....	34
3.5 伺服电机驱动器调试软件设计 .....	35
3.6 本章小结 .....	36
第 4 章 USB 转 CAN 模块设计 .....	37
4.1 USB 转 CAN 模块简介 .....	37
4.2 USB 转 CAN 模块电路设计 .....	37
4.2.1 微控制器核心电路 .....	37
4.2.2 USB 转 TTL 接口电路 .....	38
4.2.3 电源隔离电路 .....	38
4.2.4 CAN 总线隔离电路 .....	38
4.3 USB 转 CAN 模块 PCB 设计 .....	39
4.4 USB 转 CAN 模块软件设计 .....	39
4.4.1 CAN 总线 ID 使用原则 .....	39
4.4.2 队列数据结构的使用 .....	40
4.5 本章小结 .....	40
结论 .....	42
参考文献 .....	43
致谢 .....	45
附录 .....	46

## 第1章 绪论

### 1.1 课题背景

#### 1.1.1 课题来源

ABU-ROBOCON 是一项起源于日本的竞技机器人比赛，并且有日本强大经济、技术实力的支撑。因此，日本的大学生在该项竞赛中已经能够设计制作出一些具有一定智能化的机器人，如图象识别处理技术、惯性导航、电子地图即时测绘定位技术等。这些技术已经在 ROBOCON2005 比赛中帮助东京工业大学在多个强队的包围下成功夺冠。因此，日本队在该项比赛中已经具有了很大的技术优势。

大学生机器人电视大赛是一项学科高度交叉、技术层次较高、充分锻炼参与者动手动脑能力和团队协作精神的课外科技活动。举办十届以来吸引了全国许多高校，充分体现了此项赛事的广泛参与性。再加上 Robocon 是以电视作为媒体的，因此影响面广、群众认同度高，在中国及亚太地区正逐渐成为一项家喻户晓的大学生竞赛，在中国每年的比赛视频将在 CCTV12 套播放。

2002 年第一届“全国大学生机器人电视大赛”中获得冠军的中国科学技术大学代表队代表中国参加了在日本东京举办的第一届“攀登富士山”亚广联亚太地区大学生机器人大赛，并获得了亚军。之后 2004 年第三届在国内获得冠军的西南科技大学代表队在韩国汉城举办的“鹊桥相会”亚广联亚太地区大学生机器人大赛中获得亚军。而国内传统强队西安交通大学在 2007 年、2008 年国际比赛中两夺冠军。2009 年我校代表中国在日本东京第九届亚太机器人大赛“敲响胜利之鼓”的主题比赛中一路过关斩将，夺得了冠军。2010 年在由埃及承办的“构建金字塔”比赛中，电子科技大学代表队以其优越的技术、稳定的发挥远远领先其他国家代表队轻松夺冠。

至此，中国已经在这项国际赛事上连续四年夺得桂冠。由此可见我国举办的“全国大学生机器人电视大赛”规格是较高的，我国高校学生的综合能力也是相当高的。创业维艰，守业更难。哈尔滨工业大学作为国内著名高校，在机器人研究领域有广泛建树，在机器人大赛上也大有作为。理应承担起为国家夺得冠军和保持荣誉的光荣使命。

2012 年第 11 届亚太机器人大赛将在香港举行，全世界的各个高校正紧锣密鼓的准备着，我们将以最充分的准备来迎接各个对手，争取在 2012 年 7 月的比赛正取得冠军！

### 1.1.2 目的和意义

在工业上，机器人的应用已经司空见惯。新型机器人的研发现现在也变得非常必要。移动机器人在军事侦察、扫雷排险、防核化污染等危险与恶劣环境以及民用中的物料搬运上具有广阔的应用前景，使得对它的研究在世界各国受到普遍关注。<sup>[1]</sup>

新型机器人要能够成为我们日常生活的一部分并为我们提供照顾。他们必须具有人类的善良和合作的特质，在速度、力量和精度上都远远高于传统机器人的要求。从这个新视角出发，机器人的设计希望可以满足日后日益增长的需求。

本课题希望可以作为实现智能机器人目标的第一个台阶，即完成一个完整的轮式移动机器人控制系统及其调试软件系统，并完成对控制参数的调试和优化。

## 1.2 国内外相关研究方向的发展现状综述

### 1.2.1 移动机器人的发展历史及现状

机器人是在综合控制论、信息论、仿生学、运动学、动力学和计算机技术等多学科的科学成果基础上应运而生的。机器人技术是一种面向未来的现代化技术，机器人技术与网络技术、基因技术、通信技术、计算机技术等一样，属于高新技术。<sup>[2]</sup>

移动机器人的研究始于 60 年代末期斯坦福研究院(SRI)的 Nils Nilsson 和 Charles Rosen 等人，在 1966 年至 1972 年中研制出了自主移动机器人 Shakey，目的是研究应用人工智能技术，在复杂环境下机器人系统的自主推理、规划和控制<sup>[3]</sup>。70 年代末，随着计算机的应用和传感技术的发展，移动机器人研究又出现了新的高潮，特别是在 80 年代中期以来，设计和制造机器人的浪潮席卷全世界。一大批世界著名的公司，如美国通用电气、日本本田、索尼等开始研制移动机器人平台，这些移动机器人主要作大学实验室及研究机构的移动机器人实验平台，从而促进了移动机器人学多种研究方向的出现。90 年代以来，以研制高水平的环境

信息传感器和信息处理技术，高适应性的移动机器人控制技术，真实环境下的规划技术为标志，开展了移动机器人更高层次的研究。

国内在移动机器人方面的研究起步较晚，大多数研究尚处于某个单项研究阶段。清华大学研制了 THMR\_V 自动引导车，已经实现了结构化环境下的车道线自动跟踪，准结构化环境下的道路跟踪，复杂环境下的道路避障，视觉临场感遥控驾驶等功能。此外，还有香港城市大学智能设计、自动化及制造研究中心的自动导航车和服务机器人、中国科学院自动化所研制的 CASIA-I 自主移动机器人<sup>[4]</sup>、哈尔滨工业大学研制成功的导游机器人“青青”等<sup>[5]</sup>。总之，近年来移动式机器人的研究在国内也得到很大的重视，并且在某些方面的研究取得丰硕的成果。

地面移动机器人系统一般包括机构环节、驱动控制环节、全局反馈环节。其中高性能驱动控制器、多传感器数据融合、运动学动力学求解理论等已成为地面移动机器人系统的研究热点。<sup>[6]</sup>

### 1.2.2 机器人控制系统的分类及特点

机器人控制系统能够根据指令以及传感器信息控制机器人完成一定的动作或作业任务，它是机器人的心脏，决定了机器人性能的优劣。机器人控制系统有多种分类方法，按控制方式可将其分为以下三类：

1) **集中式控制系统**在这种控制系统中由一个 CPU 完成系统的所有计算工作（如坐标变换）。这种控制系统结构简单，成本低，但其实时性较差且难以扩展。在早期的机器人，如 Hero-I 以及 Robot-I 中，采用的是这种控制系统。

2) **主从式控制系统**采用主从两级 CPU 实现系统的全部控制功能。一级 CPU 作为主机，担当系统管理、机器人语言编译和人机接口等功能，同时也利用它的运算能力完成坐标变换、轨迹插值等工作，并定时地把运算结果作为关节运动的增量送到公用内存，供二级 CPU 读取；二级 CPU 完成全部关节位置的数字控制。两个 CPU 总线之间仅通过公用内存交换数据，是一个松耦合的关系。主从式控制系统实时性较好，但其系统扩展性较差，维护困难。上世纪 70 年代生产的 Motoman 机器人（5 关节，直流电机驱动）采用的是这种控制系统。

3) **分布式控制系统**根据控制对象的性质将控制系统分成几个功能模块，每个模块各有不同的控制任务和控制策略，各模块之间一般是主从关系。复杂系统将任务是分发到每个模块，每个部分负责自己的职责。通过使用这种方法的控制系

统是变得更加灵活，因为错误检测是比较容易和快速恢复。<sup>[7]</sup>这种控制系统实时性好，易于实现高速、高精度控制，易于扩展。目前世界上大多数商品化机器人都采用这种控制系统。

上面的这种分类方法代表了机器人控制系统的发展历程，它由最初的集中式控制系统发展到后来的主从式控制系统再发展到现在广泛采用的分布式控制系统。现在分布式控制系统（DCS）和现场总线控制系统（FCS），已成为时下在制造和过程控制应用的主流<sup>[8]</sup>。

### 1.2.3 比赛的任务对机器人控制系统提出的要求

比赛共有手动机器人、自动机器人、采集机器人三个机器人。三个机器人之间涉及多次配合工程。

其中手动机器人需要人来驾驶而且有搬运其他机器人的任务，负载是其他机器人的 5 倍以上，对电机驱动器的允许功率提出了非常高的要求。以往比赛中使用的电机控制方式，为位置环、速度环双闭环控制，这种控制方式电机的响应速度可以保证，但存在电机堵转烧毁和保险丝熔断的可能，这些隐患在机器人比赛中是致命的，因此要求我们设计出一种新式的具有多重保护和电流控制功能的电机驱动器和一套简单易用并且方便扩展的机器人控制系统系统。

基于以上原因考虑并结合现有能力，针对今年的比赛设计了一套分布式的竞技机器人控制系统。本文的以下部分将详细介绍该系统的构成和原理。

## 1.3 主要研究内容

1) 确定参加比赛的机器人的软硬件构架，选择基于 ARM 和 FPGA 的主控系统架构，包括主控模块处理器的选择、外围电路的设计和主控模块 PCB 电路板的设计、制作和 ARM 部分的软件设计。

2) 研究基于 CAN 总线的直流有刷伺服电机驱动器的电路原理、PCB 设计、制作以及电机驱动器调试软件的设计。

3) 研究 USB 转 CAN 模块的电路原理、PCB 设计、制作以及该模块的软件设计。

## 第2章 基于 ARM 和 FPGA 的主控系统的设计

### 2.1 整体电控系统简介

机器人的控制系统采用分布式系统构架，我们采用集中管理和分布式控制的模型。根据结构和功能将系统分为三个层次。主控制层由 ARM 和 FPGA 构成，ARM 作为处理核心，FPGA 作为逻辑运算单元实现外设的接口信号的预处理。主控系统以其强大的数据处理能力完成机器人的信息采集与决策执行。执行层负责伺服电机以及其他驱动元件的控制和传感器的数据采集。通信层负责完成主控层和执行层间的数据交换。CAN 总线由两根差分信号线组成，并可以在小于 40m 的距离内保证 1Mbps 的通信速率。这些优势使得机器人在简化线路布置的同时，保证高效的性能。由于机器人系统的设计概念是将每个不同模块看做一个输入输出节点，因此只要在网络承受能力足够的条件下就可以非常容易的向系统添加一个电机或者传感器<sup>[9]</sup>。完整的电控系统架构如图 2-1 所示。

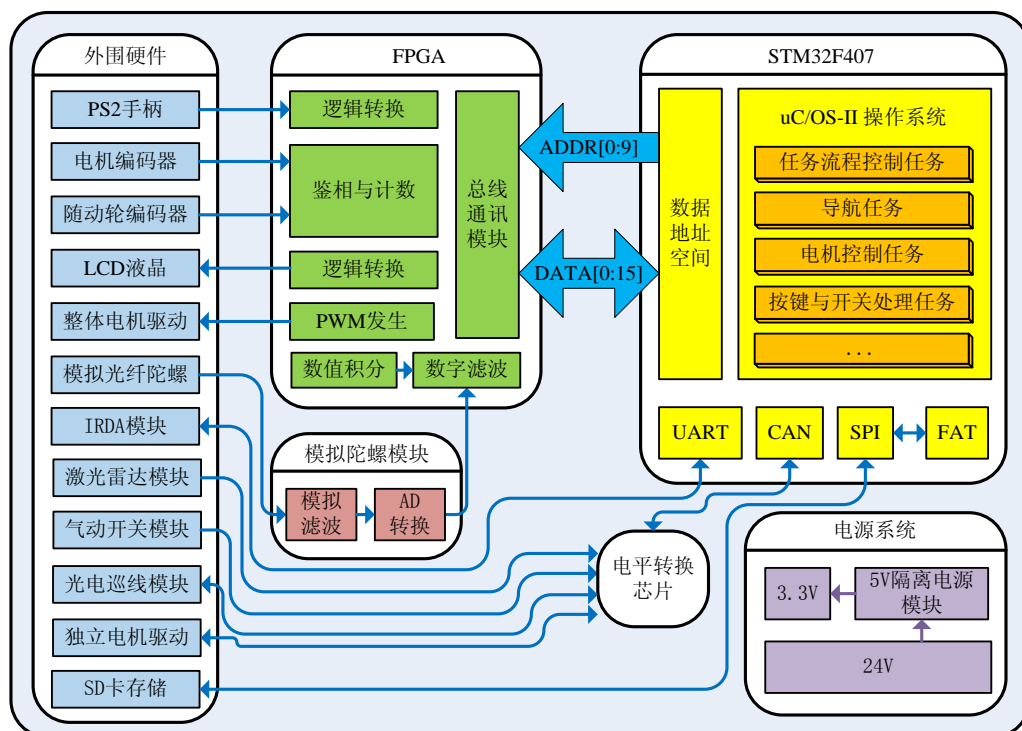


图 2-1 主控系统结构框图

主控系统模块是整个机器人控制系统的核心部分，它包含两个处理单元。一个是由 STM32F407ZGT6 构成的主控制器，另一部分是由 EP3C25Q240 构成的协处理器。主控制器 STM32F407ZGT6 通过读写芯片内部的自身外设寄存器和扩展总线上协处理器 EP3C25Q240 中寄存器实现与外设和数据之间的交互。主控系统丰富的外围设备接口使其可以极其方便地与各种传感器以及模块相连接，极大地提高了机器人的开发效率。比赛中与主控系统相连的外围设备模块的名称、型号以及接口如表 2-1 所示。

表 2-1 电控系统外部设备一览

外设名称	外设型号	外设接口
蓝牙模块	BMX 蓝牙模块	USART
光纤陀螺模块	VG910	SPI/USART
视觉模块	N/A	USART
气动开关模块	N/A	CAN
激光雷达模块	UBG-LS04-F012	CAN
伺服电机驱动模块	N/A	CAN
USB 转 CAN 模块	N/A	CAN
巡线模块	N/A	CAN
红外模块	N/A	IRDA
LCD 液晶	JM12864A	SPI
PS2 手柄	SONY PS2 游戏手柄	SPI
PS2 键盘	通用 PS2 键盘	SPI
SD 卡	N/A	SPI
电机控制信号	N/A	EN、PWM、DIR
光电编码器	OMRON E6B2	正交编码接口
ARM 与 FPGA 通信	N/A	异步总线
ARM JTAG 烧写	N/A	JTAG
FPGA JTAG 烧写	N/A	JTAG
FPGA ASP 烧写	N/A	JTAG



## 2.2 主控板原理电路

主机板采用 ARM 作为控制核心，FPGA 作为逻辑运算单元，经过参考以前比赛的主控系统的电路图并查阅大量的数据资料，在满足本届比赛功能需求的前提下，设计了本届比赛的主控系统的电路。将外设电路化分成各个子模块，以下将对一些主要模块进行详细介绍。

### 2.2.1 主控模块

选择使用 ST 公司的 STM32F407ZGT6 作为主控芯片，该芯片是 ARM Cortex-M4 32 位 MCU，带有 FPU 单元，有 210DMIPS，多达 1MB FLASH/192+4KB RAM，USB OTG HS/FS，Ethernet，17 个定时器，3 个 ADC，15 个通讯接口和一个摄像头接口。

微控制器提供了如下的优势：

- 1) 168MHz/210DMIPS Cortex-M4，一个单周期 DSP MAC 和浮点单元。
- 2) 为高性能和超快速数据传送而设计：ART 加速器、32 位，7 层 AHB 总线矩阵（7 个主的、8 个从的，包括 2 个 SRAM 块），多个 DMA 控制器（通用的 2 个、USB HS 的 1 个，Ethernet 的 1 个）一个内核专用 SRAM 块，从 FLASH 连续执行相当于 0 等待，和数据传送以及简化的资源分配。
- 3) 显著电源效率：超低动态功耗。在 VBAT 模式，典型地  $RTC < 1\mu A$ 。3.6V 降到 1.7V VDD，电压调节器具有电源调节能力。当运行在低电压或电池供电时，应用需要高性能和低功耗，可提供超灵活性以减少电源功耗。
- 4) 最高集成度：多达 1M 字节的片上 FLASH 存储器，192K 字节的 SRAM，复位电路，内部 RC，PLL 等。
- 5) 高级和创新的外设提供新的可能性，高速数据连接和通讯、高分辨率。
- 6) 在 STM32 生态系统中开发产品，大量的工具和软件方案提供了宽范围的选择。

该芯片在功能上完全满足机器人比赛需求，并且有较高的性价比。实际的 ARM 核心电路原理图如图 2-2 所示。

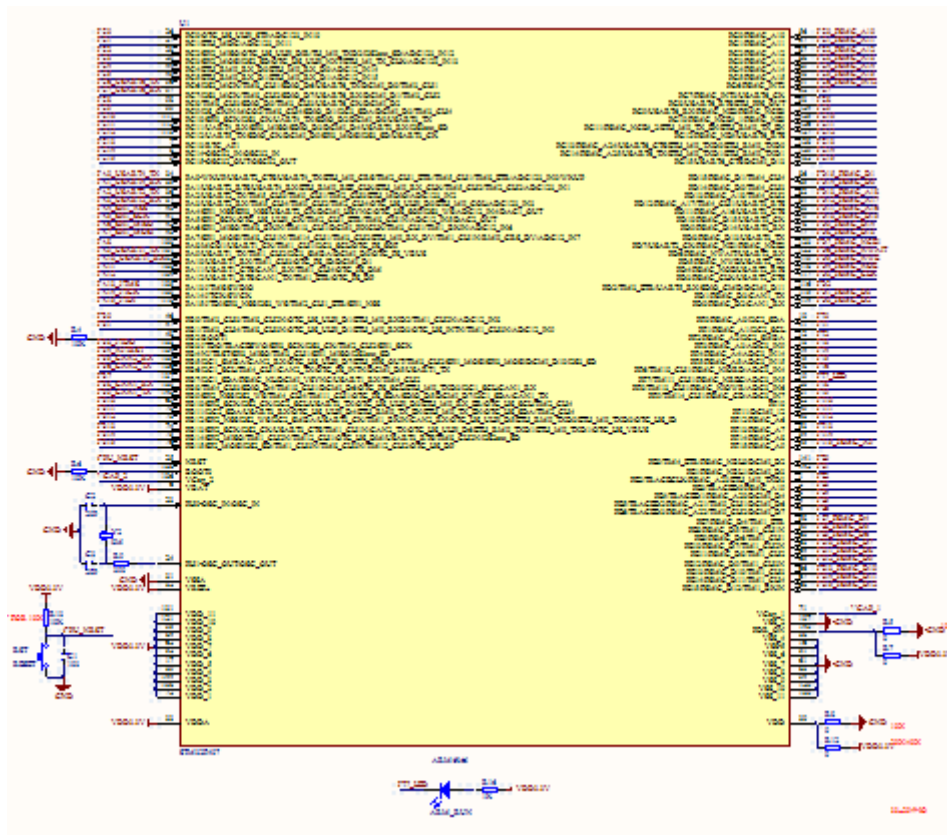


图 2-2 ARM 核心电路原理图

## 2.2.2 CAN 总线接口电路

使用 SN65HVD230 作为 CAN 总线收发芯片，同时使用 PESDCAN 来防止高压静电损坏芯片。

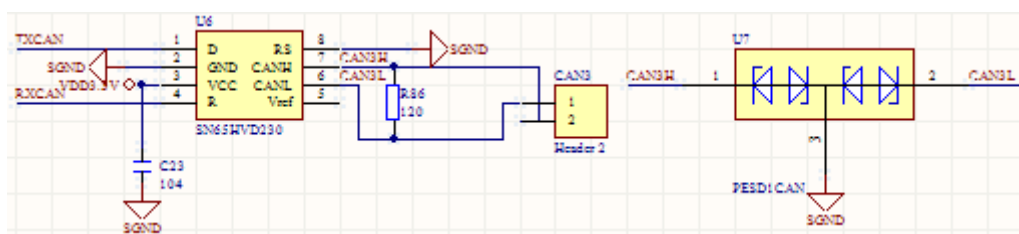


图 2-3 CAN 总线接口电路

### 2.2.3 电源模块

电源模块由为 ARM 和 FPGA 分别提供 3.3V、2.5V 和 1.2V 的 3 种电源的电路组成。分别使用 LT1084-3.3、LM1117-2.5、LM1117-1.2 三种不同的集成线性稳压电源芯片及其外围电路构成。电源模块电路原理图如图 2-4 所示。

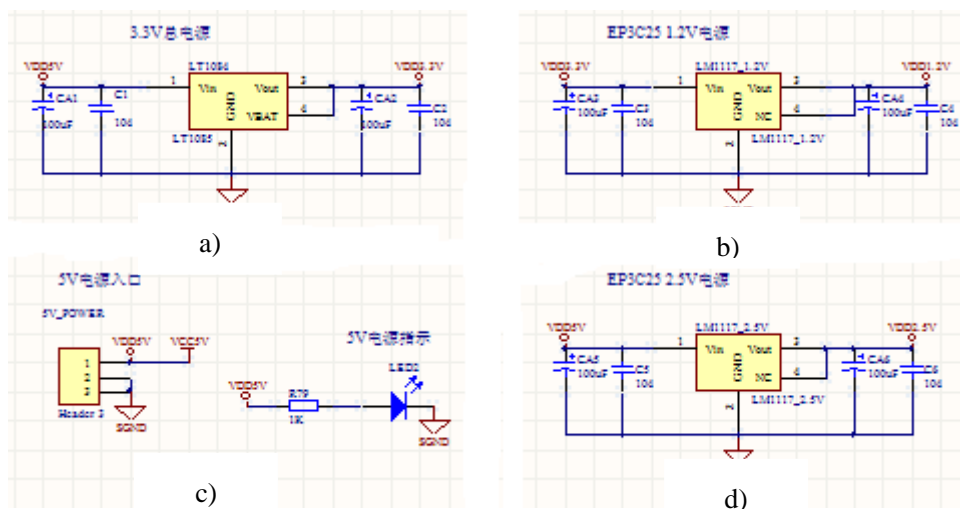


图 2-4 电源模块

### 2.2.4 PS2 手柄接口电路

为方便机器人操作手操作机器人，在主控系统上安装 SONY PS2 手柄，其接口如图 2-5 所示。

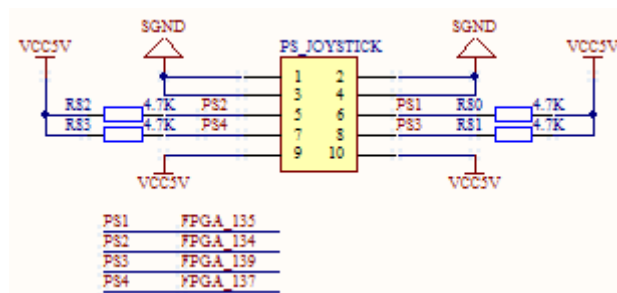


图 2-5 PS2 手柄接口电路

### 2.2.5 FPGA 模块

为增强处理器的处理能力以及与更多的外设实现连接，系统使用扩总线的方式实现 ARM 与 FPGA 的接口，由于系统并不是很复杂，评估系统所使用逻辑门的数量以及器件价格，选用 ALTERA 公司 CycloneIII 系列 FPGA 中的 EP3C25Q240，根据器件设计以及系统所使用的传感器设计接口电路，EP3C25Q240 的最小系统电路如图 2-6 所示。

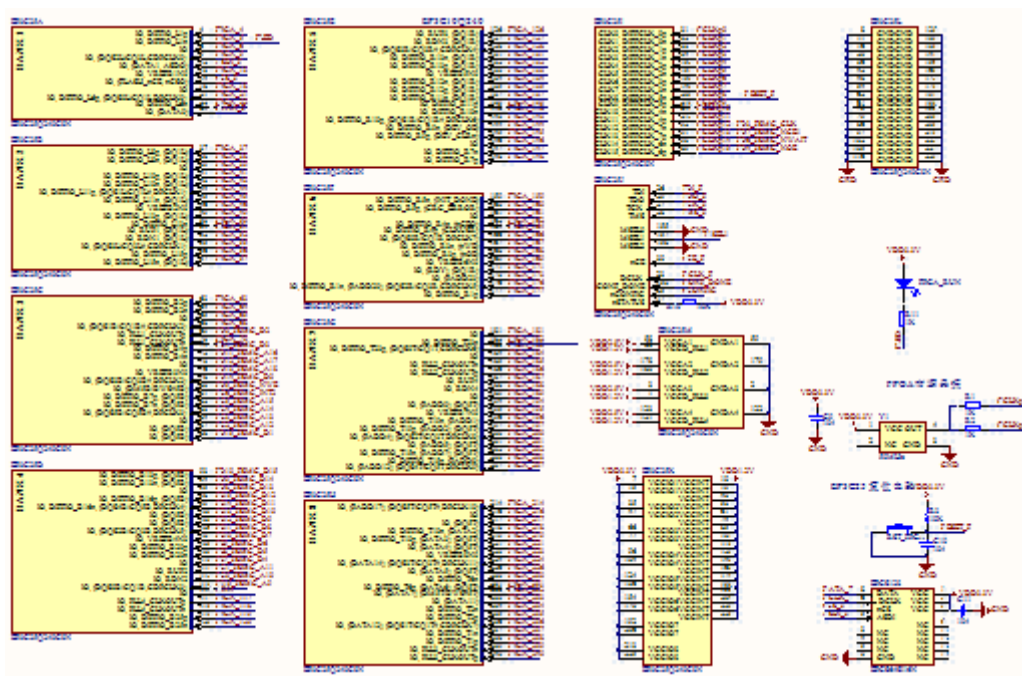


图 2-6 FPGA 核心电路原理图

### 2.2.6 USART/232 模块

为尽可能提高通信速率，选择高速 TTL 和 232 电平转换芯片 MAX3237，最高传输速率可达 1Mb/s，有效地保证了系统中不同模块交互的实时性。其原理图如图 2-7 所示。

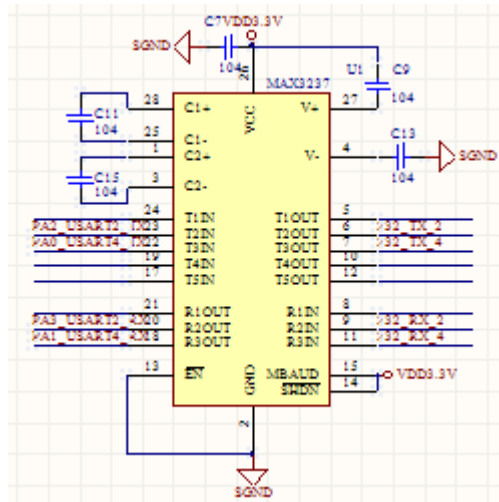


图 2-7 TTL 和 232 电平转换电路

## 2.2.7 SD 卡接口电路

为方便机器人与人信息交互，高速下存储大量数据，在主控板上安装了 SD 卡接口。SD 卡接口电路如图 2-8 所示。

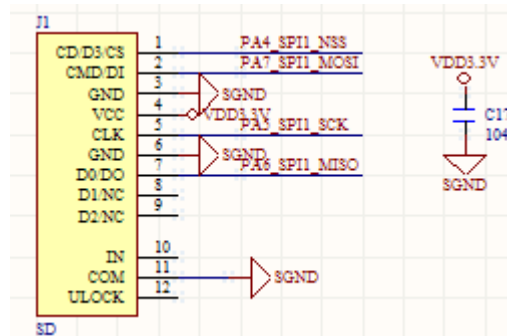
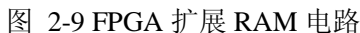


图 2-8 SD 卡接口电路

## 2.2.8 FPGA 扩展 RAM 电路

为了提高 FPGA 的调试效率，同时更有效的利用 FPGA 的内部资源，为 FPGA 外部扩展了 4MB 的 RAM，其原理图如图 2-9 所示。



根据以上介绍的的原理图设计了主控系统的 PCB 电路板,由于外部设备较多,需要大量的接插件,将外部接口板以最小系统板的载板的形式分开。为了在合理节约的前提下,尽量提高 PCB 的电磁兼容性,其中最小系统板(母板)为 4 层板,外部接口板(载板)为 2 层板。

1) 检查高频、高速、时钟及其他脆弱信号线, 是否回路面积最小、是否远离电源、是否有多余的过孔和绕线、是否有垮地层分割区。

3) 检查定位孔、定位件是否与结构图一致，ICT 定位孔、SMT 定位光标是否加上并符合工艺要求。

5) 报告布线完成情况是否百分之百; 是否有线头; 是否有孤立的铜皮。



- 6) 检查电源、地的分割正确；单点共地已作处理。
- 7) 检查各层光绘选项正确，标注和光绘名正确；需拼板的只需钻孔层的图纸标注。
- 8) 对工艺审查中发现的问题，积极改进，确保单板的可加工性、可生产性和可测试性。

最后设计主控核心板 PCB 如图 2-9 所示。

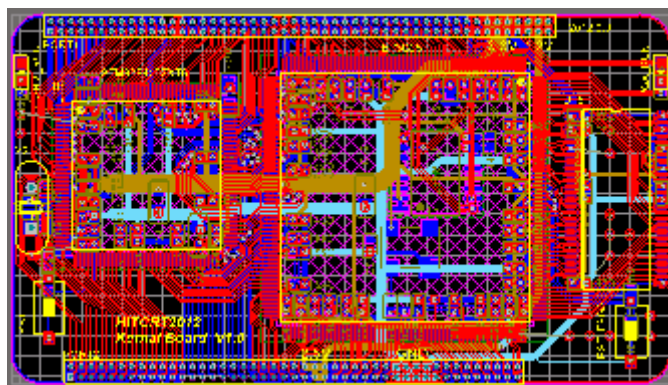


图 2-10 主控系统核心板 PCB

外设接口板 PCB 图 2-10 所示。

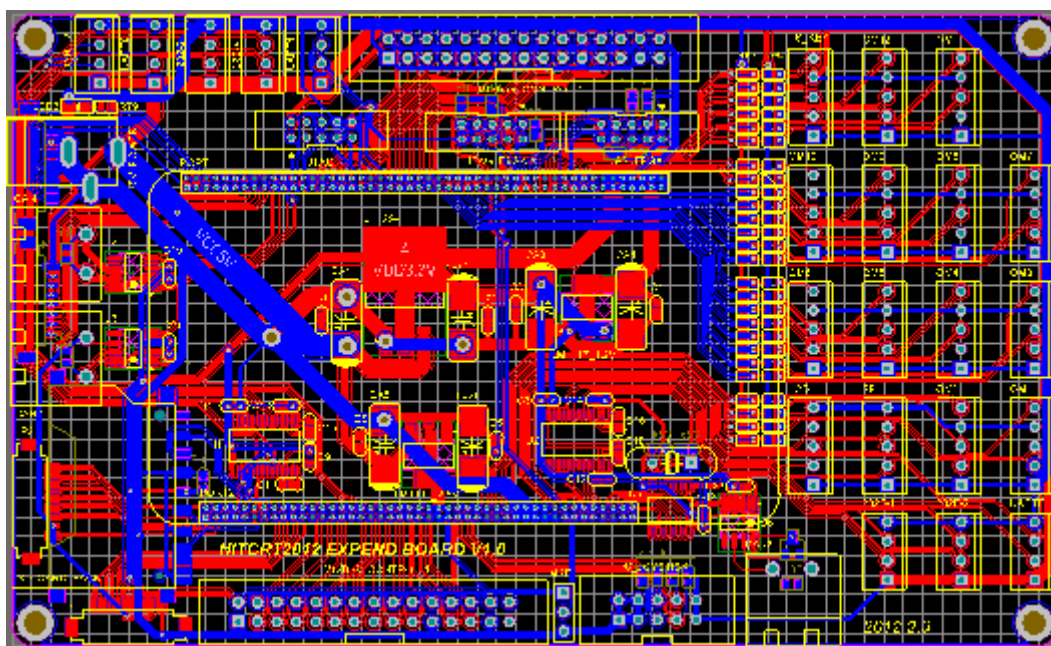


图 2-11 主控系统外设板 PCB

主控系统最终的 PCB 实物如图 2-12 所示。

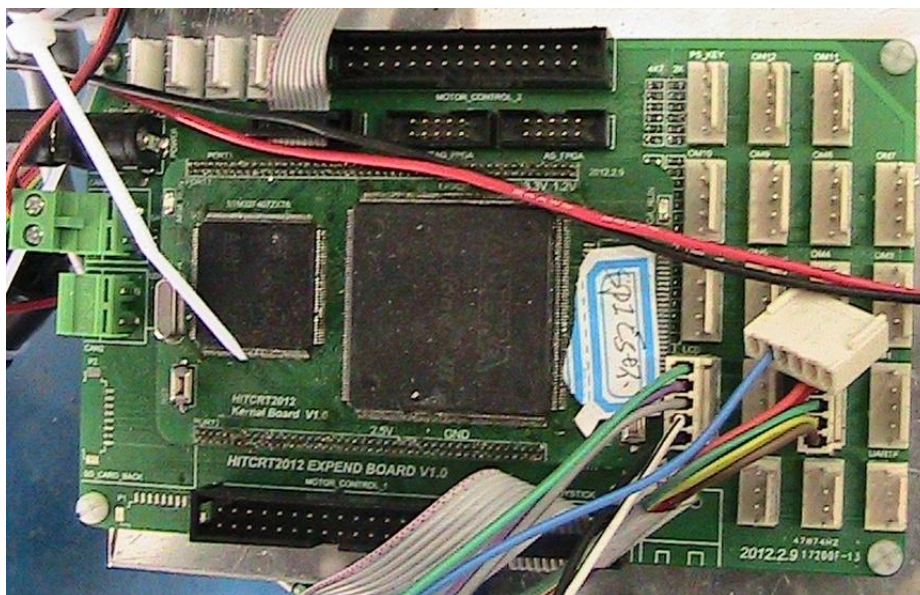


图 2-12 主控系统实物

## 2.4 主控系统 ARM 的软件设计

### 2.4.1 CAN 总线技术

传统的通信采用基于串行通信的标准如:RS232 和 RS485 但系统存在冲突无法解决、可靠性差、速度低等缺点,而且容易受到电气的干扰,当通信距离长时会出现传送的信号发生错误的现象,无法满足工业现场数据较远距离和较高速度的要求。<sup>[10]</sup>

CAN 总线即控制器局部网,主要用于各种设备监测及控制的一种网络。CAN 总线技术以其高的传输率、远的传输距离和强劲错误处理能力成为最有发展前途的现场总线之一。

STM32 的 CAN 控制器模块是一个完整的 CAN 控制器,该控制器具有以下特性:

- 1) 支持 CAN 协议 2.0A 和 2.0B 主动模式
- 2) 波特率最高可达 1 兆位/秒



### 3) 支持时间触发通信功能

在 CAN 总线的通信中,当总线空闲时,任何节点都可以向总线发送数据。当有两个或两个以上的节点要向总线发送数据时,就会引起总线访问冲突,而这个冲突就由仲裁场的位形式解决了。在仲裁期间,每一个发送器都对发送位的电平与被监控的总线电平进行比较。如果电平相同,则这个单元可以继续发送,否则丢失仲裁。当某个节点得到总线的使用权后,该节点就向总线发送其他场的内容。采用仲裁方式处理总线访问冲突是 CAN 总线的一大特点,而在 RS232 通信中,总线访问冲突是无法解决的。

CAN 总线可以支持多主结构,当发送节点在总线发送数据时,其他各个节点都可以接收总线上的数据流。在软件编程的时候,每个节点都应该有一个自定义的地址。当某节点要发送数据的时候,必须要加上接收节点的地址;而接收节点接收数据的时候,把接收到的地址跟自己的地址进行比较,如果相同时,就继续接收其他数据,否则就不接收。

## 2.4.2 $\mu$ C/OS-II 操作系统任务划分

嵌入  $\mu$ C/OS-II 操作系统可以实现对底层多个任务的调度,实现多任务处理,使机器人的控制及任务调度更加合理,根据功能需求,将机器人的任务分配如表 2-2 所示。

表 2-2 机器人各个任务分配

机器人任务名称	任务内容
InitTask	初始化任务,在这个任务中初始化其他的各个任务
DispatchTask	高层调度任务,完成路径以及电机等执行机构的任务分配
CANTask	处理 CAN 总线通信相关的任务
ReadKeyTask	读取键盘、手柄行程卡关等一些开关量任务
NavTask	导航任务,完成机器人的路径导航
LcdDispTask	液晶显示任务,完成机器人信息的显示

### 2.4.3 程序结构的划分

机器人控制是一件复杂的任务，其软件设计也是一件繁琐的工作，将这项复杂的工程分解为一个个子模块将有利于将这个复杂的任务化繁为简，也利于分工合作完成设计任务，更加利于软件设计的移植与继承。

根据机器人各个功能将程序归类并划分成不同层次，机器人的各软件模块文件分类如图 2-13 所示。

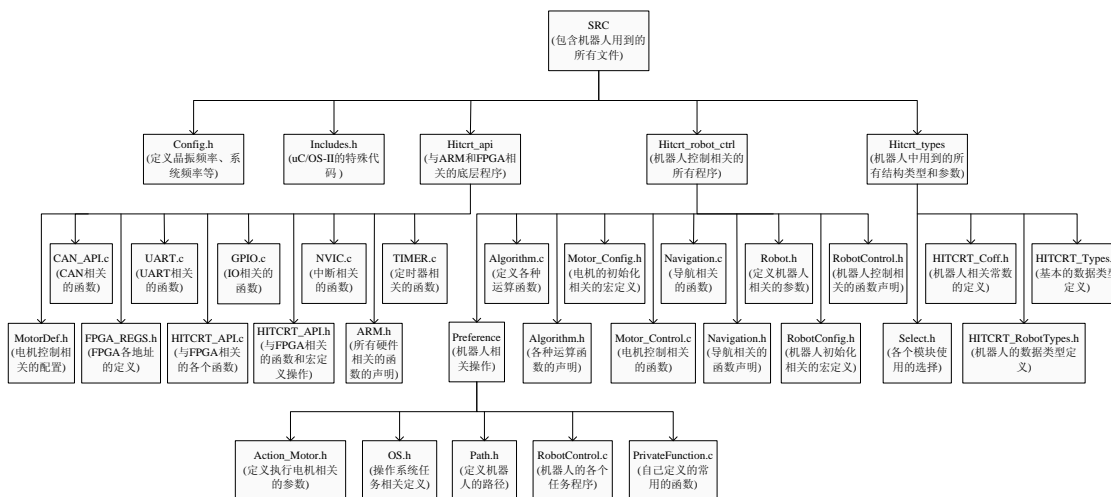


图 2-13 程序文件结构

### 2.4.4 FatFS 文件系统的使用

为了方便机器人数据的存取，在机器人的主控系统上安装 SD 卡，并在软件内嵌入 FatFS 文件系统，保证了机器人数据的大量高速存取。

FatFS 是一个通用的文件系统模块，用于在小型嵌入式系统中实现 FAT 文件系统。FatFS 的编写遵循 ANSI C，因此不依赖于硬件平台。它可以嵌入到便宜的微控制器中，如 8051, PIC, AVR, SH, Z80, H8, ARM 等等，不需要做任何修改。

需要移植的底层硬件函数如表 2-3 所示。

表 2-3 FatFS 需要移植的底层函数

函数名称	函数功能
disk_initialize	初始化磁盘驱动器
disk_status	获取磁盘状态
disk_read	读扇区
disk_write	写扇区
disk_ioctl	杂项功能

在 FatFS 已经移植好的环境下，使用者只需调用文件系统提供的 API 函数即可轻松完成文件创建以及读写等功能。常用文件操作 API 函数如表 2-4 所示。

表 2-4 常用文件操作 API 函数

函数名称	函数功能
f_mount	注册/注销一个工作区域（Work Area）
f_open	打开/创建一个文件
f_close	关闭一个文件
f_read	读文件
f_write	写文件

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了分布式机器人控制系统的构架、主控系统的控制器选择及其控制特点以及主控系统的软件架构。以 STM32F407 为核心的分布式控制系统并且辅之以 FPGA 协处理器，使主控系统的处理能力更加强大，接口更加丰富。和上届主控板相比，本届 Robocon 比赛的主控板的主控芯片功能更加强大，可以执行更加复杂算法。核心板与外设板分开设计，引入模块化设计理念，降低升级换代成本，提高维护性能。

## 第3章 基于 CAN 总线的直流有刷伺服电机驱动器设计

### 3.1 直流有刷电机驱动器的系统简介

机器人执行各种动作的性能关键在于电机的控制，针对今年比赛的特点只做了新一代的电机驱动器，由于新的主控系统为分布式系统，所以每个电机驱动都有一个数字控制器，通过现场总线与主控系统通信。该电机驱动器以采样电阻和电流采样放大器结合采集电流，以旋转编码器完成电机转速和绝对位置的反馈。在驱动器内部包含过热保护、过压保护、欠压保护、过流保护等完善的保护措施，保护电机正常工作的同时使电机发挥出最大性能。

电机驱动器内部采用三闭环控制方式，内环为电流环，采用 PI 控制，控制频率为 20KHZ，保证快速有效地达到给定电流值；中环为速度环，采用 PID 控制，控制周期为 1KHZ；外环为位置环，采用 PD 控制结合前馈控制的复合控制方式，控制周期为 500HZ。同时在位置控制上加入了梯形速度曲线规划，保证电机速度连续变化，机器人稳定运行。驱动器原理如图 3-1 所示。

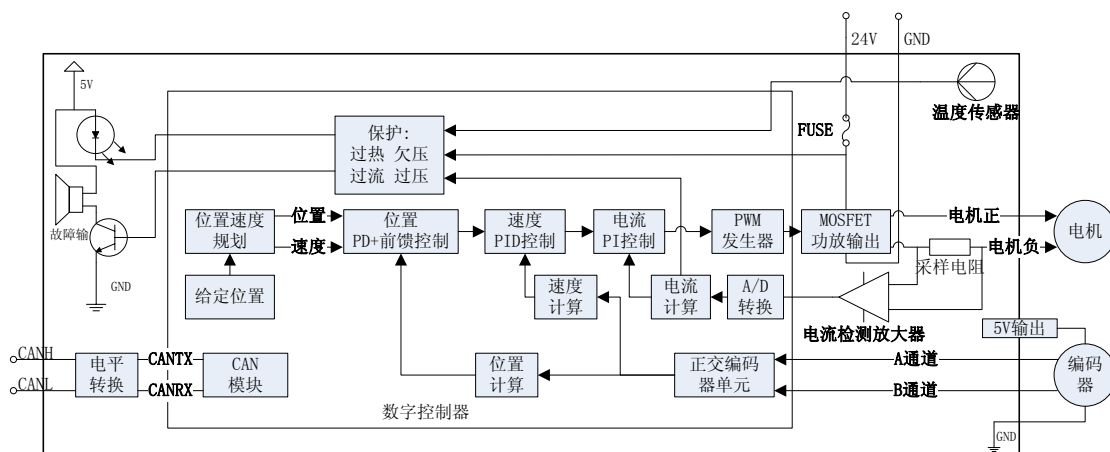


图 3-1 电机驱动器结构框图

### 3.2 直流有刷伺服电机驱动器原理电路

### 3.2.1 微控制器核心电路

选择 STM32F103C8T6 作为控制器,该控制器的正交编码单元、多路 AD 通道、多路带死区的 PWM、CAN 总线等外设完全满足伺服电机驱动器的需求。其核心电路如图 3-2 所示。

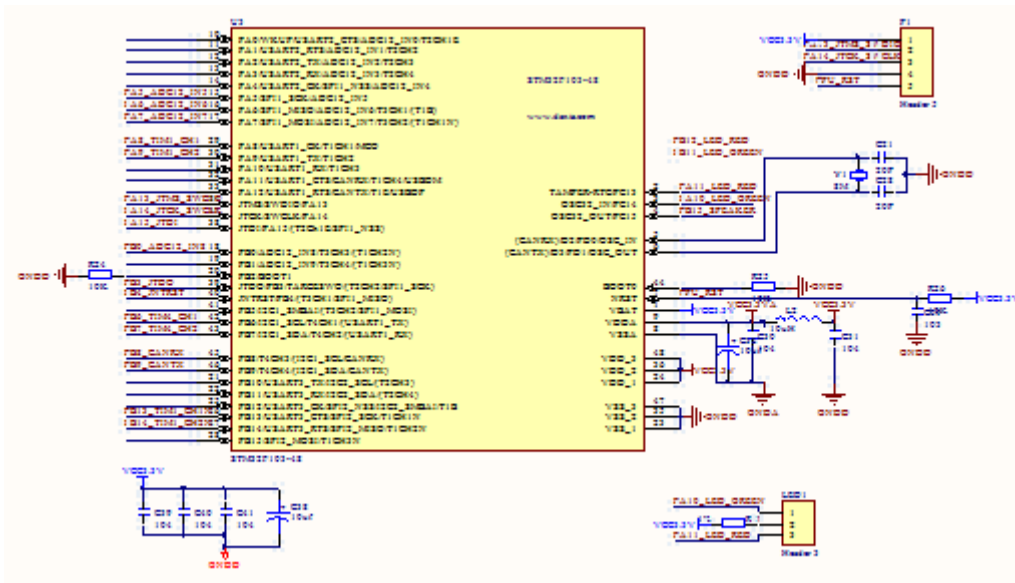


图 3-2 微控制器核心电路

### 3.2.2 功率驱动电路

根据电机驱动器的结构框图，并结合了对功率器件的保护电路、和减小功率管开关损耗的电路设计了电机驱动的功率电路。

MOSFET 的门极驱动芯片选择英飞凌公司的 HIP4081。HIP4081 是高压侧悬浮自举形式的 MOSFET 驱动器。经实验最终确定自举电容为 50V 耐压 1uF 的陶瓷电容, 二极管为 1N4148。经过测试性能满足要求。

由于 HIP4081 内置死区设置电路, 可通过外接电阻配置死区时间。选用  $1\text{M}\Omega$  电阻配置死区时间为  $700\text{ns}$ , 经过测试, 满足性能要求, 没有发生直通现象。

MOSFET 选用 IR 公司产的 IRF3205，电压 55V，峰值电流可达 110A，完全满足机器人最大功率电机的功率要求，并有足够的余量。该器件选用直插封装，可有效散热，进而保护器件不受热损毁。

MOSFET 栅极可承受的电压不可以超过 20V，因此在栅极和源极间反接一个 15V 的稳压二极管，用于保护栅极，防止由于电压尖峰而导致的器件损毁。

在栅极驱动回路中，选用 20 欧的电阻用于减低 MOSFET 打开时的冲击，防止栅极震荡，减少电压尖峰，降低电磁干扰。实验测得 MOSFET 开启时间为 100ns 左右。在开关损耗和电磁干扰之间取得了合适的平衡。同时与栅极电阻并联的一只二极管，是为了加速 MOSFET 关断，减少开关损耗，并有效防止直通的发生。

功率驱动电路如图 3-3 所示。

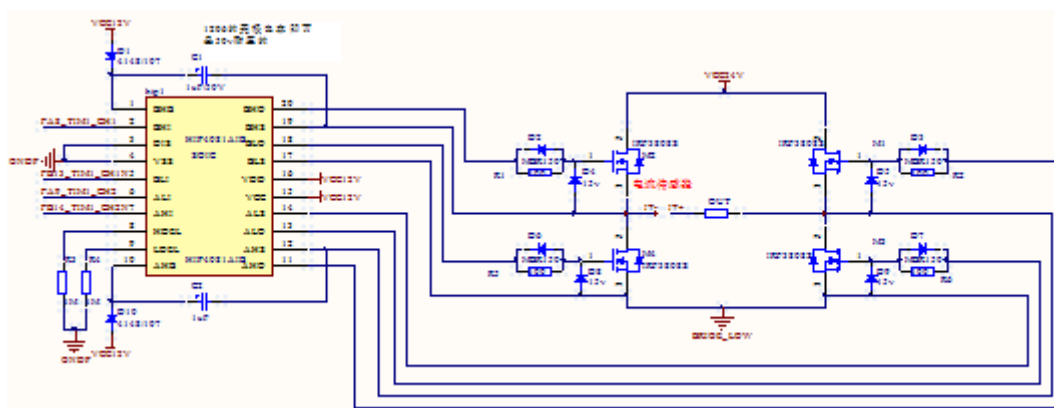


图 3-3 功率驱动电路

### 3.2.3 电机电流检测电路

在电机的电流采样上尝试过两种方案，分别是直接用霍尔电流传感器获得电机电流和使用采样电阻配合电流采样放大器来将电流值转换成电压值以获得电机电流。由于采样电阻配合电流采样放大器的方案具有电流采样准确、采样截止频率高、噪声小等优点，最终选择了这个方案采集电机电流。电流检测电路及滤波电路如图 3-4 所示。

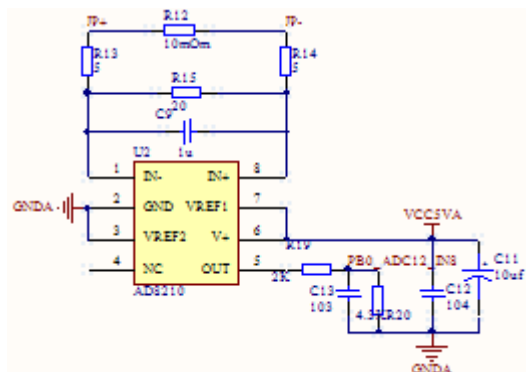


图 3-4 电流检测及滤波电路

### 3.2.4 电源电路

该系统共需要电压分别为 12V、5V 和 3.3V 的 3 种电源，考虑到保证系统电压稳定同时减少功耗损失分别选择 78D12 线性电源芯片、LM2596-5V 开关电源芯片和 ASM1117-3.3V 线性电源芯片组成各个电源电路。电源电路如图 3-5 所示。

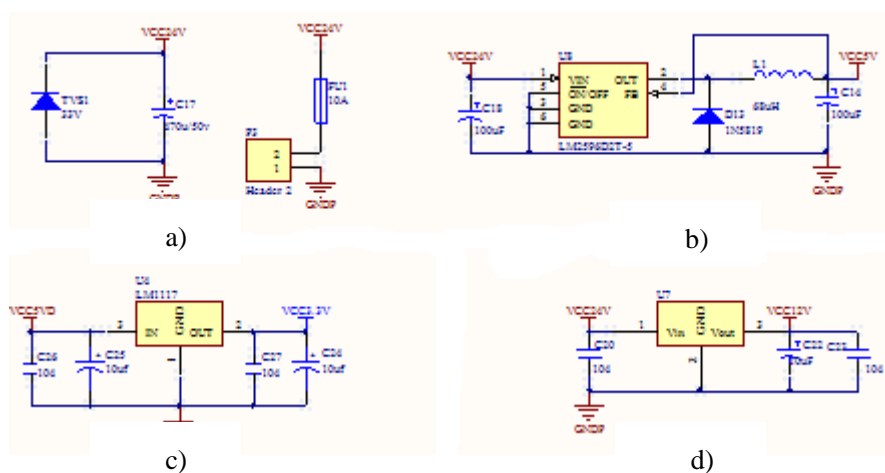


图 3-5 电源电路

### 3.2.5 温度检测电路

为了防止电机驱动器由于功率驱动电路损坏或者长时间功率过大等原因温度

过高，以致于损坏驱动器，增加了温度检测电路。选择集成模拟温度传感器 LM35 进行温度检测，LM35 输出和温度呈线性关系的电压值，连接到单片机的 AD 模块。温度检测电路如图 3-6 所示。

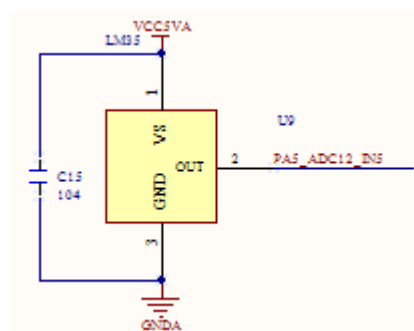


图 3-6 温度检测电路

### 3.3 直流有刷伺服电机驱动器 PCB 设计与实物制作

根据以上各电路模块设计了电机驱动器的 PCB。在考虑到节约成本和满足要求的条件下，选择设计双层 PCB。在 PCB 的设计过程中主要考虑到了以下几个因素。

- 1) 电机功率驱动部分选择大容量电解电容进行去耦。
  - 2) 电机驱动部分流过大电流的导线在表面涂锡以调高导电能力，减少导线上的能量损耗。
  - 3) 各个芯片旁均布置了 104 的陶瓷电容进行旁路，以避免高频数字的信号对电源质量影响。
  - 4) 各个导线在设计过程当中遵循尽量最短和过孔最少为原则以减小导线的等效电阻和电感。
  - 5) 模拟电路和数字电路隔离布置，一点接地，以减小高频数字信号对模拟电路电源的干扰。
  - 6) 在电源处使用 TVS 避免电机刹车时产生过高的泵升电压对系统造成毁坏。
- 最终设计的电机驱动 PCB 如图 3-7 所示。



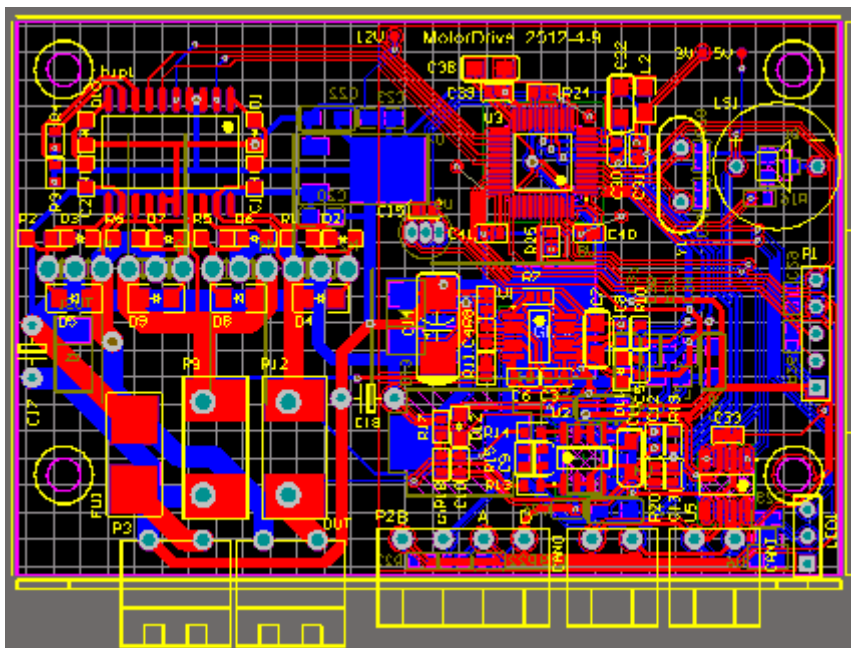


图 3-7 伺服电机驱动器 PCB

伺服电机驱动器最终装配实物如图 3-8 所示。

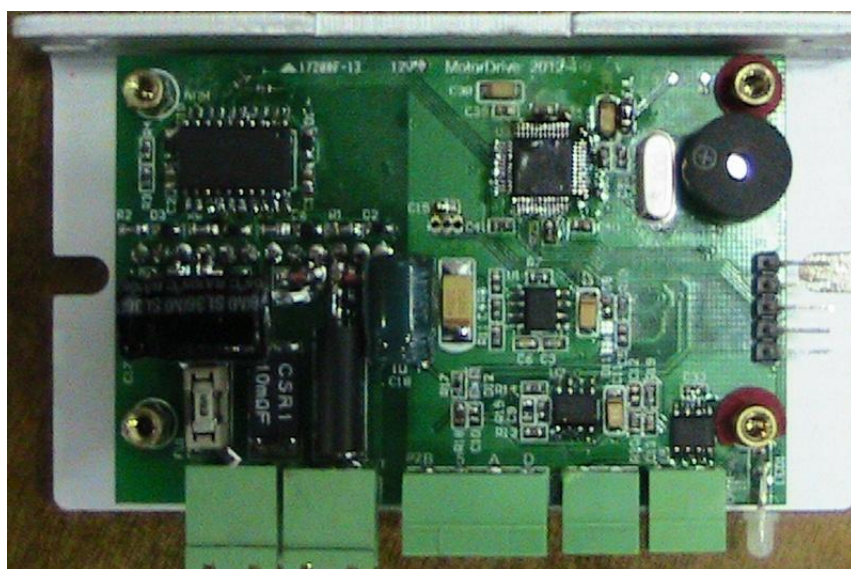


图 3-8 伺服电机驱动器

## 3.4 伺服电机驱动器软件设计

### 3.4.1 数字滤波算法

由于系统可能受到高频噪声干扰，导致采样值错误，采用数值计算的算法对采集的数据进行平滑处理，以减少随机误差。以下介绍该系统中使用到的 3 种数字滤波算法。<sup>[11]</sup>

#### 3.4.1.1 限幅滤波

设定控制系统采样间隔为  $T$ ；在  $T$  时间内被测量最大变化量小于  $D_{\max}$ ，选取  $D_{\max}$  作为限幅滤波的判据；获得一次采样值  $Y_k$  后，与前一次采样值  $Y_{k-1}$  进行比较，若  $|Y_k - Y_{k-1}| \leq D_{\max}$ ，则  $Y_k = Y_k$ ，否则  $Y_k = 2Y_{k-1} - Y_{k-2}$ 。当判断第  $k$  次采样值超限时，将其坏值丢弃，并选择一个可信度高的推断值结合被测值的变化趋势来插补该采样点。

#### 3.4.1.2 算术平均值滤波

根据测量误差理论，对于存在随机测量误差的  $N$  个采样数据样本，每个采样值都是随机变量。 $N$  个随机变量  $x$  的算术平均值是

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3-1)$$

算术平均值  $\bar{x}$  也是一个随机变量。算术平均值  $\bar{x}$  的方差与采样值  $x$  方差之间的关系是

$$\sigma^2(\bar{x}) = \frac{1}{N} \sigma^2(x) \quad (3-2)$$

式(3-2)说明，采样样本的算术平均值随机分布的方差要比单次采样值的方差小  $N$  倍。所以采用算术平均值算法，使用采样样本平均值代替单次采样值，可以得到滤除干扰噪声，显著减小测量随机误差的效果。显然是采样样本越大，滤波效果越好，但是采样样本的大小受限于被测状态的变化率和采样速率。

#### 3.4.1.3 数字低通滤波

在模拟电路中，常使用 RC 低通滤波电路来滤除高频噪声。也可以仿照模拟电路对输入信号的处理方式设计数字滤波器。图 3-9 给出了一个基本的一阶低通滤波电路。

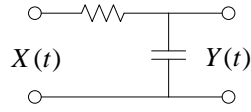


图 3-9 一阶低通滤波电路

在  $t=0$  的初始时刻，给电路的输入端施加一个阶跃信号，并且滤波电路的输出信号  $Y(0)=0$ ；之后滤波电路的输出  $Y(t)$  由以下微分方程描述

$$RC \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = X(t) \quad (3-3)$$

数字量化采样和数值计算将连续变化的模拟量离散化，所以用差分方程代替式(3-4)微分方程。

$$RC \frac{Y(k) - Y(k-1)}{T} + Y(k) = X(k) \quad (3-4)$$

整理差分方程得到数字低通滤波器的计算公式

$$Y(k) = (1-a)Y(k-1) + aX(k) \quad (3-5)$$

式中的  $a$  为一个小于 1 的常数

$$a = \frac{T}{T + RC}$$

### 3.4.2 PID 算法

#### 3.4.2.1 数字 PID 算法

在连续时间控制系统中，PID 控制器应用得非常广泛。其设计技术成熟，长期以来形成了典型的结构，参数整定方便，结构更改灵活，能满足一般的控制要求。

数字 PID 控制比连续 PID 控制更为优越，因为计算机程序的灵活性，很容易克服连续 PID 控制中存在的问题，经修正而得到更完善的数字 PID 算法。

连续时间 PID 控制系统如图 3-10 所示。图中， $D(s)$  为控制器。在 PID 控制系统中， $D(s)$  完成 PID 控制规律，称为 PID 控制器。PID 控制器是一种线性控制器，用输出量  $y(t)$  和给定量  $r(t)$  之间的误差的时间函数  $e(t) = r(t) - y(t)$  的比例、积分、微分的线性组合，构成控制量  $u(t)$ ，称为比例(Proportional)积分(Integrating)微分(Differentiation)控制，简称 PID 控制。

实际应用中，可以根据受控对象的特性和控制的性能要求，灵活地采用不同

的控制组合，构成不同类型的控制器。各种控制器及其结构式如表 3-1 所示。

表 3-1 控制器类型及其结构式

控制器类型	控制器结构式	
比例(P)控制器	$u(t) = K_p e(t)$	(3-6)
比例积分(PD)控制器	$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau]$	(3-7)
比例积分微分(PID)控制器	$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d(e(t))}{dt}]$	(3-8)

式中： $K_p$ ——比例放大系数； $T_I$ ——积分时间； $T_D$ ——微分时间。

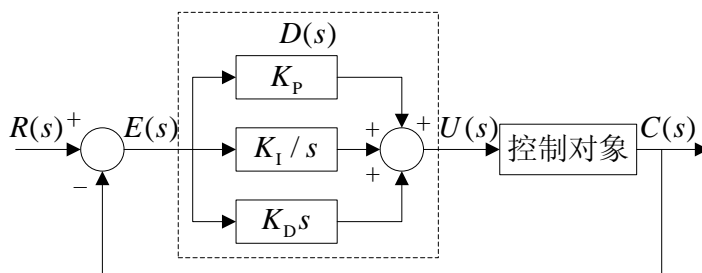


图 3-10 连续时间 PID 控制系统

比例控制能迅速反应误差，从而减小稳态误差。但是，比例控制不能消除稳态误差。比例放大系数的加大，会引起系统的不稳定。积分控制的作用是，只要系统有误差存在，积分控制器就不断地积累，输出控制量，以消除误差。因而，只要有足够的时间，积分控制将能完全消除误差，使系统误差为零，从而消除稳态误差。积分作用太强会使系统超调加大，甚至使系统出现振荡。微分控制可以减小超调量，克服振荡，使系统的稳定性提高，同时加快系统的动态响应速度，减小调整时间，从而改善系统的动态性能。

应用PID控制，必须适当地调整比例放大系数 $K_p$ ，积分时间 $T_I$ 和微分时间 $T_D$ ，使整个控制系统得到良好的性能。

### 3.4.2.2 位置式 PID 算法

考虑式(3-7)，用矩形积分时，有

$$\frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau = \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) \quad (3-9)$$

用差分代替微分

$$T_D \frac{d(e(t))}{dt} = \frac{T_D}{T_S} [e(k) - e(k-1)] \quad (3-10)$$

将式(3-9)、式(3-10)代入式(3-8)，PID 算法变为

$$u(k) = K_P + [e(k) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T_S} (e(k) - e(k-1))] + u_0 \quad (3-11)$$

或

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] + u_0 \quad (3-12)$$

式中：

$u_0$ ——控制量的基值，即  $k=0$  时的控制；

$u(k)$ ——第  $k$  个采样时刻的控制；

$K_P$ ——比例放大系数；

$K_I$ ——积分放大系数， $K_I = \frac{K_P T_S}{T_I}$ ；

$K_D$ ——微分放大系数， $K_D = \frac{K_P T_D}{T_S}$ ；

$T_S$ ——采样周期。

式(3-11)是数字 PID 算法的非递推形式，称全量算法。算法中，为了求和，必须将系统偏差的全部过去值  $e(j)$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, k$ ) 都存储起来。这种算法得出控制量的全量输出  $u(k)$ ，是控制量的绝对数值。在控制系统中，这种控制量确定了执行机构的位置，例如在阀门控制中，这种算法的输出对应了阀门的位置(开度)。所以，将这种算法称为“位置算法”。

#### 3.4.2.3 增量式 PID 算法

由位置算法求出

$$u(k) = K_P [e(k) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T_S} (e(k) - e(k-1))] + u_0 \quad (3-13)$$

再求出

$$u(k-1) = K_P [e(k-1) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T_S} (e(k-1) - e(k-2))] + u_0 \quad (3-14)$$

将式(3-13)与式(3-14)相减，得出控制量的增量算法。

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\}\end{aligned}\quad (3-15)$$

式(3-15)称为增量式 PID 算法。对增量式 PID 算法(3-15)归并后，得

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (3-16)$$

其中：

$$q_0 = K_p [1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_D}{T_s}];$$

$$q_1 = -K_p [1 + 2\frac{T_D}{T_s}];$$

$$q_2 = K_p \frac{T_D}{T_s}。$$

式(3-16)已看不出是 PID 的表达式了，也看不出 P、I、D 作用的直接关系，只表示了各次误差量对控制作用的影响。从式(3-16)看出，数字增量式 PID 算法，只要贮存最近的三个误差采样值  $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 就足够了。

#### 3.4.2.4 积分分离式 PID 算法

在普通的 PID 数字控制器中引入积分环节的目的，主要是为了消除静差、提高精度。但在过程的启动、结束或大幅度增减设定值时，短时间内系统输出有很大的偏差，会造成 PID 运算的积分积累，致使算得的控制量超过执行机构最大动作范围，引起过大超调。在此引入积分分离 PID 控制算法，既保证了积分作用，又减小了超调量，使得控制性能有了较大的改善。其具体实现如下：

1) 根据实际情况，人为设定一阈值  $\varepsilon > 0$ 。

2) 当  $|e(k)| > \varepsilon$  时，也即偏差值  $|e(k)|$  比较大时，采用 PD 控制，可避免过大的超调，又使系统有较快的响应。

3) 当  $|e(k)| \leq \varepsilon$  时，也即偏差值  $|e(k)|$  比较小时，采用 PID 控制，可保证系统的控制精度。<sup>[12]</sup>

写成计算公式，可在积分项乘一个系数  $\beta$ ， $\beta$  按下式(3-17)取值。

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{当 } |e(k)| < \varepsilon \\ 0 & \text{当 } |e(k)| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3-17)$$

以公式(3-12)为例，写成积分分离式即为

$$u(k) = K_p e(k) + \beta K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] + u_0 \quad (3-18)$$

有了式(3-17)和式(3-18)便可编制出计算机控制程序，其程序流程图如图 3-11 所示。

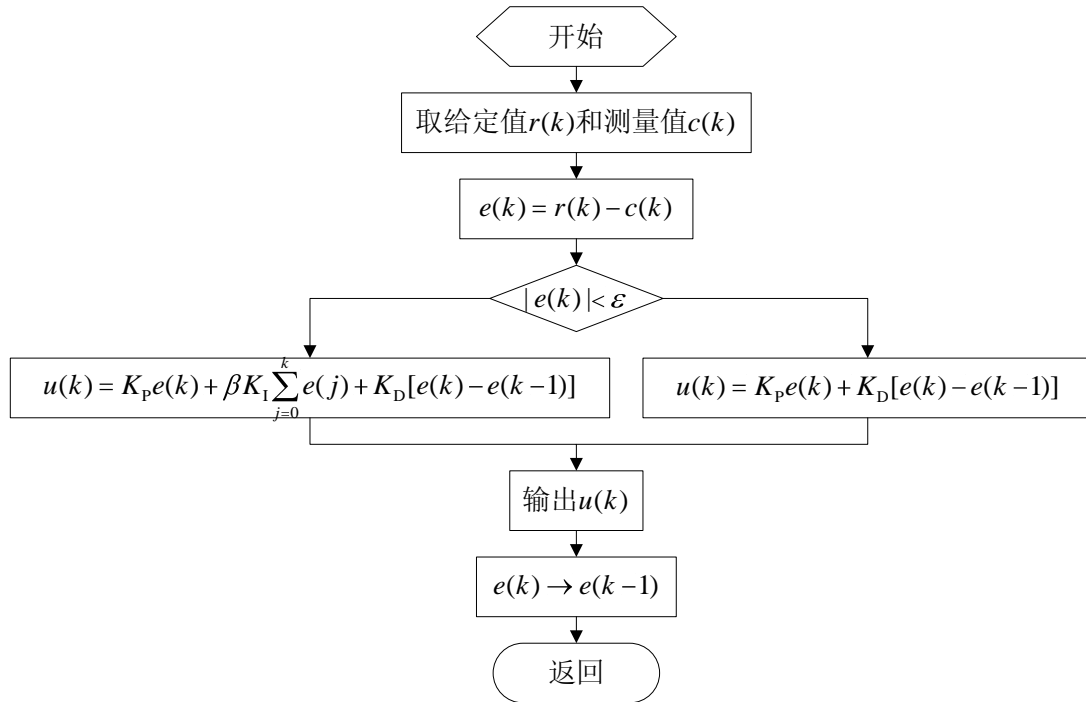


图 3-11 积分分离 PID 控制算法程序流程图

#### 3.4.2.5 复合控制算法

为了减小或消除系统在特定输入作用下的稳态误差，可以提高系统的开环增益，或者采用高型别系统。但是这两种方法都将影响系统的稳定性，并降低系统的动态性能。如果在系统的控制回路中加入前馈通路，组成一个前馈控制和反馈控制相组合的系统，只要系统参数选择得当，不但可以保持系统稳定，极大地减小乃至消除稳态误差，而且可以抑制几乎所有的可量测扰动，其中包括低频强扰动。这样的系统就称之为复合控制系统，相应的控制方式成为复合控制。

复合校正中的前馈装置是按不变性原理进行设计的，可分为按扰动补偿和按输入补偿两种方式。在这里我们选取将前馈补偿信号加在系统前向通道上某个环节的输入端，以简化误差全部长条件，控制系统结构如图 3-12 所示。

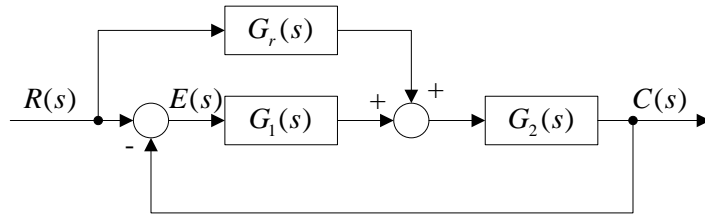


图 3-12 按输入补偿的复合控制系统

由图 3-12 可知，复合控制系统的输出量是

$$C(s) = \frac{[G_1(s) + G_r(s)]G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} R(s) \quad (3-19)$$

于是，等效系统的闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{[G_1(s) + G_r(s)]G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} \quad (3-20)$$

等效系统的误差传递函数为

$$\phi_e(s) = \frac{1 - G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} \quad (3-21)$$

由公式(3-21)可见，当取

$$G_r(s) = \frac{1}{G_2(s)} \quad (3-22)$$

时，复合控制系统实现误差全补偿。

从控制系统稳定性的角度来考察，复合校正控制系统很好地解决了一般反馈控制系统在提高控制系统精度与与确保系统稳定性之间存在的矛盾。

在实际的电机控制中，在系统的最外环位置环使用了 PD+前馈的复合控制方式，根据系统误差全补偿条件式(3-22)，得到实际的零静差系统如图 3-13 所示。

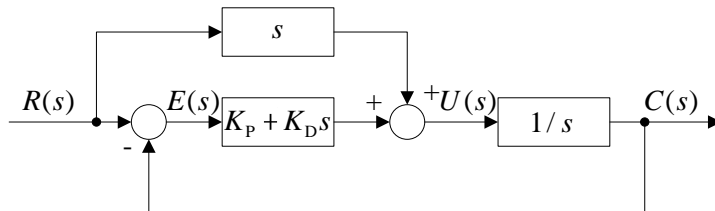


图 3-13 电机位置控制系统



实际应用中，计算机计算式为

$$u(k) = K_P e(k) + K_D [e(k) - e(k-1)] + K_F [r(k) - r(k-1)]$$

式中， $K_F \in [0,1]$ ，为前馈补偿系数。当  $K_F = 0$  时，未使用前馈控制， $K_F = 1$  时，前馈控制实现误差全补偿。 $u(k)$  为控制器输出量，作为速度给定值输入控制系统速度环。

#### 3.4.2.6 电机电流环仿真与 PI 参数确定

电枢控制直流电动机的工作实质是将输入的电能量转换为机械能，也就是由输入的电枢电压  $u_a(t)$  在电枢回路上产生电枢电流  $i_a(t)$ ，再由电流  $i_a(t)$  与激磁磁通相互作用产生电磁转矩，从而拖动负载运行。电机控制直流电机原理如图 3-14 所示。

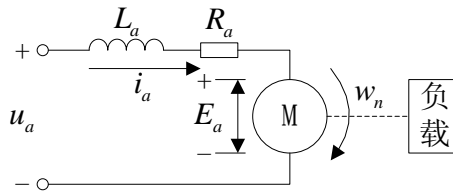


图 3-14 电机控制直流电机原理图

电枢回路电压平衡方程

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a$$

式中  $E_a$  是电枢反向电动势，它是电枢旋转时产生的反电势，其大小与激磁磁通及转速成正比，方向与电枢电压相反<sup>[13]</sup>。

由于实际应用中的电机机构转动惯量一般很大，系统的机械惯性环节远远大于系统的电磁惯性环节，而且在控制过程中电流环控制频率是速度环的 20 倍，所以可以近似认为，每次从电流开始响应阶跃信号并达到稳态期间，电机的速度保持不变，即  $E_a$  保持恒定。

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (3-23)$$

在本届机器人比赛中常用的几种电机参数如表 3-2 所示。

表 3-2 常用电机参数

电机型号	最大输出功率(KW)	电感( $\mu$ H)	电阻(m $\Omega$ )
Maxon 40	440	80	318
Faulhaber3863	220	130	620
Faulhaber2657	47.9	380	2840

以 Maxon 40 为例，将电机电感和电阻值分别代入公式(3-23)，得到传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{0.00008s + 0.318}$$

为了使电机电流迅速达到给定值，同时不产生过大超调，将 PID 算法进行改进，电流环采用积分分离式 PI 控制，经过在 MATLAB 上不断仿真调试，选择电机电流环的控制参数分别为  $K_p=30$ ， $K_I=25$ ， $U_{Limit}=900$ （900 为 PWM 最大脉宽值）。

在此参数下使用周期方波作为给定信号在 MATLAB 仿真得到的响应曲线如图 3-15 所示。

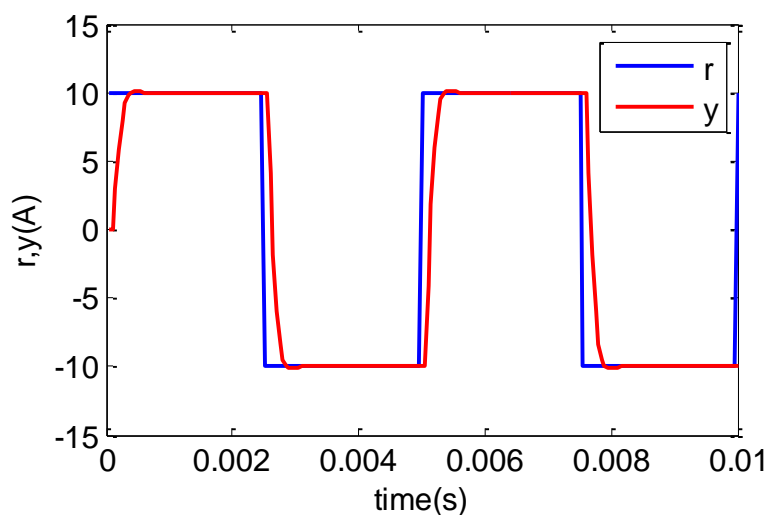


图 3-15 方波信号电流跟踪仿真

使用同样的方法得到常用电机电流环 PI 参数，参数如表 3-3 所示。

表 3-3 常用电机电流环 PI 参数

电机型号	$K_p$	$K_I$	$U_{Limit}$
Maxon 40	16	3.5	900
Faulhaber3863	20	6	900
Faulhaber2657	95	35	900

### 3.4.2.7 PID 参数的整定

在控制过程中多次用到了 PID 控制，对于不同的控制系统 PID 的参数是不一样的，甚至机器人本体上的稍微改动都会影响到 PID 的结果。所以在机器人的综合调试过程中，PID 参数的整定是很关键的一步。

PID 参数整定方法就是确定调节器的比例放大倍数  $K_p$ 、积分时间  $T_I$  和微分时间  $T_D$ 。一般可以通过理论计算来确定，但误差太大。目前，应用最多的还是工程整定法：如经验法、衰减曲线法、临界比例带法和反应曲线法。各种方法的大体过程如下：

1) 经验法又叫现场凑试法，即先确定一个调节器的参数值  $K_p$  和  $T_I$ ，通过改变给定值对控制系统施加一个扰动，现场观察判断控制曲线形状。若曲线不够理想，可改变  $K_p$  或  $T_I$ ，再画控制过程曲线，经反复凑试直到控制系统符合动态过程品质要求为止，这时的  $K_p$  和  $T_I$  就是最佳值。如果调节器是 PID 三作用式，那么要在整定好的  $K_p$  和  $T_I$  的基础上加进微分作用。由于微分作用有抵制偏差变化的能力，所以确定一个  $T_D$  值后，可把整定好的  $K_p$  和  $T_I$  值减小一点再进行现场凑试，直到  $K_p$ 、 $T_I$  和  $T_D$  取得最佳值为止。显然用经验法整定的参数是准确的。但花时间较多。为缩短整定时间，应注意以下几点：

根据控制对象特性确定好初始的参数值  $K_p$ 、 $T_I$  和  $T_D$ 。可参照在实际运行中的同类控制系统的参数值；

在测试过程中，若发现被控量变化缓慢，不能尽快达到稳定值，这是由于  $K_p$  过大或  $T_I$  过长引起的，但两者是有区别的： $K_p$  过大，曲线漂浮较大，变化不规则； $T_I$  过长，曲线带有振荡分量，接近给定值很缓慢。这样可根据曲线形状来改变  $K_p$  或  $T_I$ 。

$K_p$  过小， $T_I$  过短， $T_D$  太长都会导致振荡衰减得慢，甚至不衰减，其区别是  $K_p$  过小，振荡周期较短； $T_I$  过短，振荡周期较长； $T_D$  太长，振荡周期最短。

2) 衰减曲线法是以 4: 1 衰减作为整定要求的, 先切除调节器的积分和微分作用, 用凑试法整定纯比例控制作用的比例放大系数  $K_p$  (比同时测试二个或三个参数要简单得多), 使之符合 4: 1 衰减比例的要求, 记下此时的比例放大系数  $K_p$  和振荡周期  $T_s$ 。对有些控制对象, 控制过程进行较快, 难以从记录曲线上找出衰减比。这时, 只要被控量波动 2 次就能达到稳定状态, 可近似认为是 4: 1 的衰减过程, 其波动一次时间为  $T_s$ 。

3) 临界比例带法。用临界比例带法整定调节器参数时, 先要切除积分和微分作用, 让控制系统以较大的比例带, 在纯比例控制作用下运行, 然后逐渐减小  $K_p$ , 每减小一次都要认真观察过程曲线, 直到达到等幅振荡时, 记下此时的比例系数  $K_p$  (称为临界比例放大系数) 和波动周期  $T_k$ , 求出调节器的参数值。算出参数值后, 要把比例带放在比计算值稍大一点的值上, 把  $T_I$  和  $T_D$  放在计算值上, 进行现场观察, 如果比例带可以减小, 再将  $K_p$  放在计算值上。这种方法简单, 应用比较广泛。但对  $K_p$  很小的控制系统不适用。

4) 反应曲线法, 前三种整定调节器参数的方法, 都是在预先不知道控制对象特性的情况下进行的。如果知道控制对象的特性参数, 即时间常数  $T$ 、时间迟延  $\xi$  和放大系数  $K$ , 则可按经验公式计算出调节器的参数。利用这种方法整定的结果可达到衰减率  $\varphi = 0.75$  的要求。

### 3.4.3 梯形速度曲线规划算法

梯形加减速的主要优点是数学表达简单, 计算量小, 适合进行实时运算<sup>[14]</sup>; 缺点是在加速过程开始和结束时加速度是突变的, 加速度突变意味着驱动力的突变, 由此可能会带来大的冲击<sup>[15]</sup>。

一般情况下, 电动机的正反向的负载驱动能力是一致的, 因此可假设电动机的正向和反向最大加速度相等, 即

$$a_{\max} = d_{\max}$$

则可以得到加速度、速度、位移等计算公式通用形式如下。

$$a(t) = \begin{cases} a_{\max} & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_2 \\ d_{\max} & t_2 \leq t < t_3 \end{cases}$$

$$v(t) = \begin{cases} v_s + a_{\max} t & 0 \leq t < t_1, \text{ 当 } t = t_1 \text{ 时, } v_{01} = v_s + a_{\max} t_1 \\ v_{01} & t_1 \leq t < t_2, \text{ 当 } t = t_2 \text{ 时, } v_{02} = v_{01} \\ v_{02} - d_{\max} t & t_2 \leq t < t_3, \text{ 当 } t = t_3 \text{ 时, } v_{03} = v_{02} - d_{\max} t_3 \end{cases}$$

$$s(t) = \begin{cases} v_s t + \frac{1}{2} a_{\max} t^2 & 0 \leq t < t_1, \text{ 当 } t = t_1 \text{ 时, } s_1 = v_s t_1 + \frac{1}{2} a_{\max} t_1^2 \\ s_1 + v_{01} t & t_1 \leq t < t_2, \text{ 当 } t = t_2 \text{ 时, } s_2 = s_1 + v_{01} t_2 \\ s_2 + v_{02} t - \frac{1}{2} d_{\max} t^2 & t_2 \leq t < t_3, \text{ 当 } t = t_3 \text{ 时, } s_3 = s_2 + v_{02} t_3 - \frac{1}{2} d_{\max} t_3^2 \end{cases}$$

将梯形速度曲线实现算法在 MATLAB 软件下进行仿真，得到结果如图 3-16 所示。

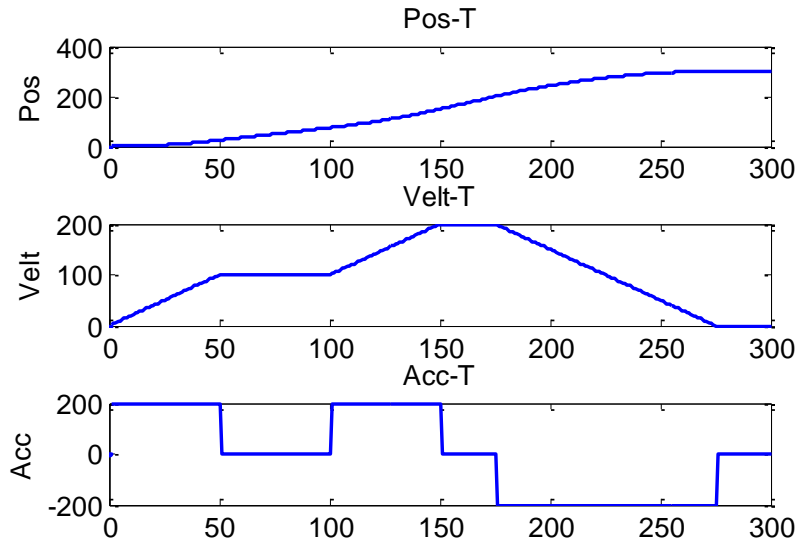


图 3-16 梯形速度曲线规划

### 3.5 伺服电机驱动器调试软件设计

为了帮助电机驱动器使用者高效的完成电机和电机驱动器的状态检测，以及电机参数的调试与设置，特在 Microsoft Visual Studio 2010 环境下，使用 C++ 编程语言开发了基于 MFC 的伺服电机驱动调试软件，该软件可完成 PC 与电机驱动器信息的实时交互，可实时绘制电流-时间、速度-时间以及位置-时间曲线，快速实现电流环、速度环和位置环的参数整定。有效地提高了电机调试效率软件调试界面如图 2-9 所示。

该软件可以实现电机参数的读取以及写入、电机控制模式的选择、电机错误状态的查询以及清除、多种模式的实时控制以及给定控制值和反馈值的实时回传并绘图等功能。电机参数信息可以通过调用文件操作函数保存为.txt 文本文档，当需要时可以读取该文档并写入电机驱动器，从而可以将电机驱动器参数备份，快速实现电机驱动器之间的互换。在软件的下方还留有调试窗口，可以实时观测到 CAN 总线发送和接受的数据以方便调试和实时监测总线状态。

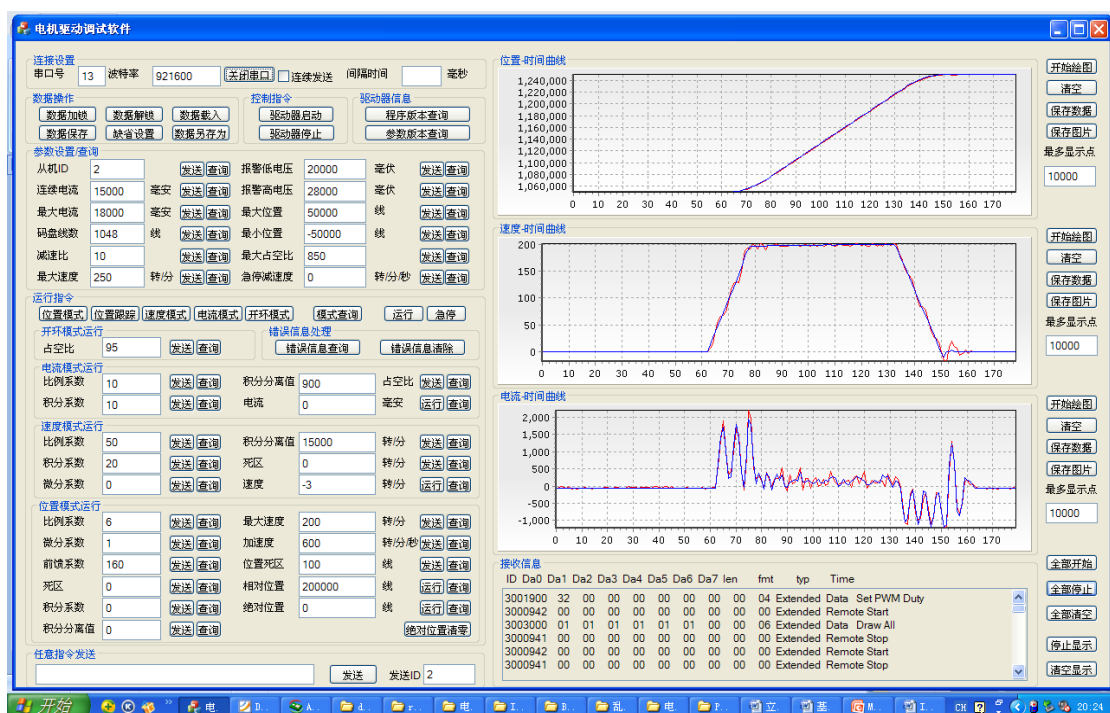


图 3-17 伺服电机调试软件

### 3.6 本章小结

本章对直流有刷伺服电机的软硬件设计做出了介绍。通过合理的硬件电路原理设计与 PCB 设计使电机驱动器在硬件上达到了较好的稳定性。在软件的算法使用上也充分发挥出了电机及其驱动器的性能。同时为使用者编制了简单易用的调试软件，极大地提高了电机调试效率。

## 第4章 USB 转 CAN 模块设计

### 4.1 USB 转 CAN 模块简介

为方便对整个 CAN 总线网络的监控以及各个模块的调试，所以制作了 USB 转 CAN 模块。通过这个模块可以轻松地完成与 CAN 总线中所有模块间的实时信息交互。

### 4.2 USB 转 CAN 模块电路设计

#### 4.2.1 微控制器核心电路

微控制器选择 STM32F103C8T6, 该芯片具有独立的 CAN 外设和多个 USART 外设，完全满足该系统要求。其核心电路如图 4-1 所示。

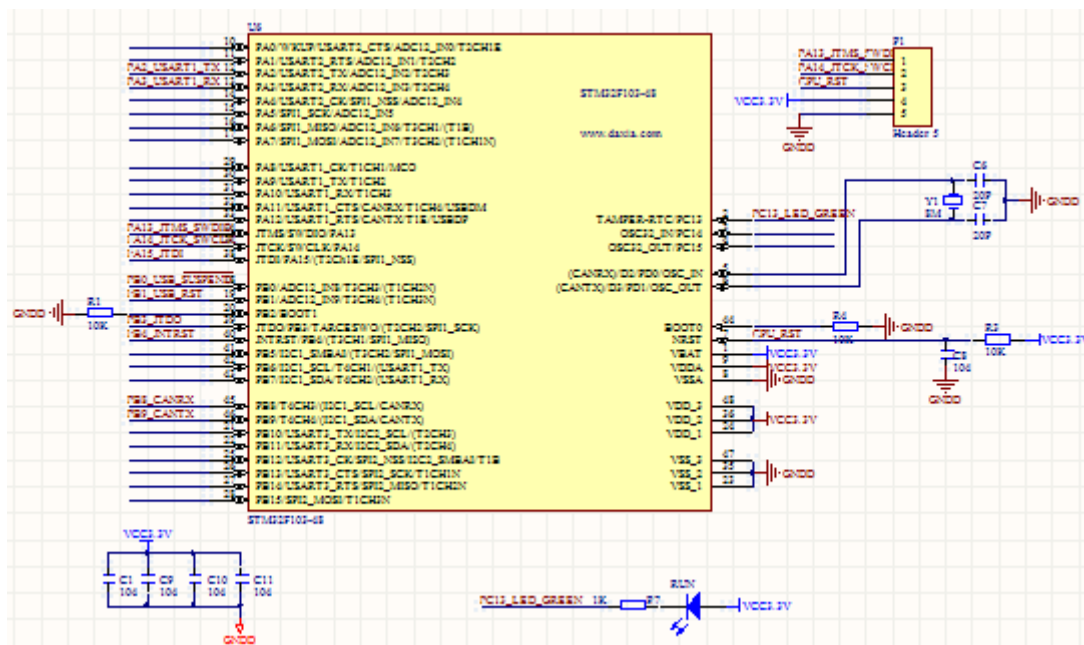


图 4-1 微控制器核心电路





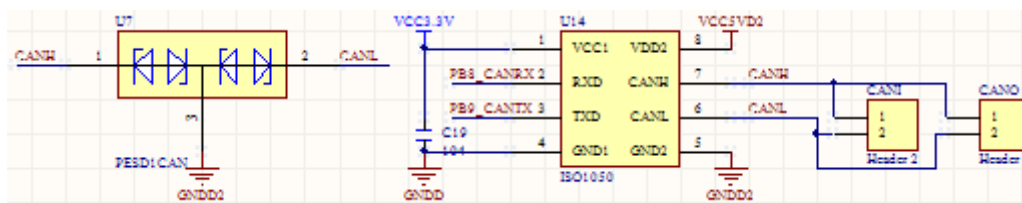


图 4-4 CAN 总线隔离电路

### 4.3 USB 转 CAN 模块 PCB 设计

该模块的设计遵循了 USB 设备的即插即用的原则，整个模块的最终尺寸仅为  $60 \times 20\text{mm}$  大小，使用非常方便。其 PCB 如图 4-5 所示。

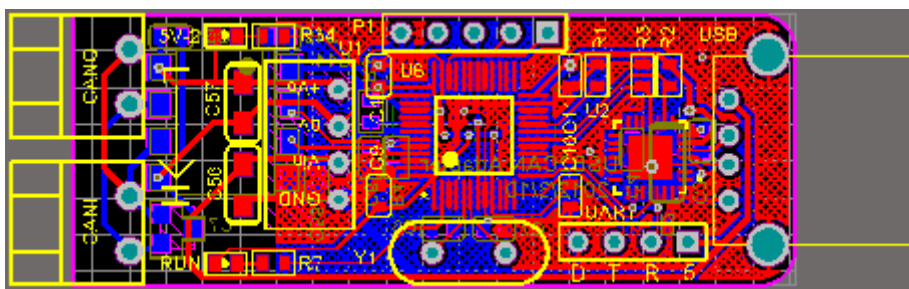


图 4-5 USB 转 CAN 模块 PCB

### 4.4 USB 转 CAN 模块软件设计

#### 4.4.1 CAN 总线 ID 使用原则

ID 统一使用扩展 ID，即 29 位的 ID。为充分使用 CAN 总线每个数据包的资源，将 CAN 的 29 位 ID 分配如图 4-6 所示。

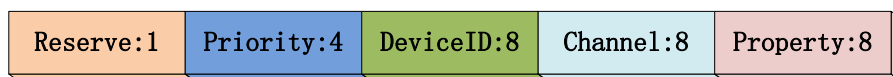


图 4-6 CAN 总线 ID 各位分配

对各部分做详细介绍如表 4-1 所示。

表 4-1 CAN 总线 ID 使用原则

属性	长度(bit)	含义
Reserve	1	保留
Priority	4	该字段用于标明消息的优先级。优先级越大，字段值越小，如 Priority=0 时优先级最高。命令优先级为 0-15。
Device ID	8	用于标识总线中的某个设备。Device ID 值为 0x00 时，为广播 ID。
Channel	8	用于表示器件内部各个功能模块的通道值。
Property	8	用于标识某个功能通道的属性。

#### 4.4.2 队列数据结构的使用

为提高微控制器的使用效率，将单片机从 CAN 总线和 USART 的发送等待中释放，在软件上设计了基于队列的数据发送模式，使得数据的发送均在中断中完成，极大地提高了微控制器的效率。

CAN 总线与 USART 的发送队列程序类似，CAN 总线发送使用到的函数如表 4-2 所示。

表 4-2 CAN 总线队列函数及其功能

函数名称	功能
CANPutDatatoTxBuf	数据入队
CANIsDataInTxBuf	查询队列中是否有数据
CANGetTxBufLen	查询队列中数据的长度
CANBeginSend	开始发送数据
CANStopSend	停止发送数据
CANGetTxBufDat	得到队列中的一个数据

#### 4.5 本章小结

本章主要对 USB 转 CAN 模块的软硬件设计做出了介绍。原理的设计上通过

隔离方式有效地保护 USB 段的设备，最终的实物制作上遵循了即插即用的原则，使模块使用非常方便，同时在软件上通过使用队列合理优化了微处理器软件结构。最终完成了一款比较稳定的 USB 转 CAN 模块，极大地方便了操作者对整个 CAN 网络的监控以及设备的调试。

## 结论

在此次设计过程中，我负责了“第十一届全国大学生机器人电视大赛”本校参赛队控制系统的软硬件的搭建。硬件部分主要是控制构架的设计和电路板的调试，软件部分主要是程序构架的搭建和控制算法的研究，在机器人整体的控制中起到了至关重要的作用。

本课题主要进行了如下工作：

- 1) 设计调试了机器人的分布式控制系统的硬件电路，并经过验证应用于本次比赛的机器人上。
- 2) 搭建了控制系统的软件构架，完成了操作系统的移植，以及底层程序的编写。
- 3) 设计并实现了直流有刷伺服电机驱动器，并应用在机器人比赛中。
- 4) 设计并实现了 USB 转 CAN 模块，并成功用于机器人的调试当中。

本课题需进一步研究的内容：

- 1) 机器人的智能性需要提高，可以通过增加更多的传感器，提高机器人对环境的适应能力。
- 2) 机器人导航路径类型需要丰富，用传统的圆弧和直线的导航，在时间上并不能达到最优，应根据机器人的动力学特性合理地规划机器人路径曲线，这样可以提高机器人的运动性能。
- 3) 由于机器人的分布式分布式控制系统是第一年搭建，所以在通信和测试上还未达到完善，之后的比赛中可以在这方面做深入研究。

## 参考文献

- [1] 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及趋势[J]. 机器人技术与应用, 2001, 3(7-14).
- [2] 朱世强, 王宣银. 机器人技术及其应用[M]. 浙江大学出版社, 2001.
- [3] 李磊, 叶涛, 谭民, 等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002, 24(5):
- [4] 李磊, 陈细军, 候增广, 等. 自主轮式移动机器人 CASIA-I 的整体设计[J]. 高技术通讯, 2003, 13(011): 51-5.
- [5] 李瑞峰, 孙笛生. 移动式作业型智能服务机器人的研制[J]. 机器人技术与应用, 2003, 1): 27-9.
- [6] 王鹏飞, 孙立宁, 黄博. 地面移动机器人系统的研究现状与关键技术[J]. 机械设计, 2006, 23(7): 1-4.
- [7] Rostami V, Ebrahimijam S, Sojodishijani O. Real-time distributed control system for navigating omnidirectional soccer robot[C], F, 2007. IEEE.
- [8] Shi D, Wang B, Wu H. A novel design of distributed servo system based on rearranging functions between host controller and servo driver[C], F, 2007. IEEE.
- [9] Yu Z, Huang Q, Li J, 等. Distributed control system for a humanoid robot[C], F, 2007. IEEE.
- [10] 李先祥, 肖红军. 基于 CAN 总线多电机分布式控制系统的研制[J]. 中小型电机, 2004, 31(003): 25-7.
- [11] 章亚明. 嵌入式控制系统应用设计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010.
- [12] 淘永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1998.
- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] 陈友东, 魏洪兴, 王琦魁. 数控系统的直线和 S 形加减速离散算法[J]. 中国

机械工程, 2010, 5): 567-70.

[15]郑魁敬, 高建设. 运动控制技术及工程实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

## 致谢

本课题是在王娜君老师的亲切关怀和悉心指导下完成的，导师以渊博的学识和严谨的治学态度，为学生开拓了研究视野，丰富了专业知识。老师谦逊无私的高尚品质、朴实真诚的做人原则和一丝不苟的敬业精神，对学生将永远的鞭策。在我毕业设计期间，王娜君老师在学习、生活上都给予了我极大的关怀和鼓励。从论文选题到最后论文的撰写，王娜君老师都做了悉心的指导，并提出了许多宝贵的建议。藉此完成之际，借此机会谨向尊敬的王娜君老师致以最衷心的感谢！

同时感谢王鹏飞老师在我毕业设计过程以及中给予的悉心指导和大力支持。

特别感谢研究所实验室师兄们为我论文的完成提供了许多帮助。感谢我的同学和朋友以及队友们的支持和帮助！

在求学期间，我的父母对我给予了无微不至的关怀，对此，我也表示深深的感谢！

## 附录