

分 类 号_____

学号 M201171879

学校代码 10487

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

基于 Kinetis+FPGA 的 小型移动机器人平台设计

学位申请人： 程 昊

学 科 专 业： 控制理论与控制工程

指 导 教 师： 关治洪 教授

何顶新 副教授

答 辩 日 期： 2014 年 2 月 16 日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Design of a Mobile Robot Platform Based on
Kinetis and FPGA**

Candidate : Cheng Hao

Major : Control Theory and Control Engineering

Supervisor : Professor Guan Zhihong

Associate Professor He Dingxin

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

February, 2014

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属 ☐ 保密， ☐ 在_____年解密后适用本授权书。
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

随着机器人性能的不断完善，移动机器人的应用范围不断扩展，在工业、航天、服务业等各个方面发挥着巨大的作用。轮式移动机器人作为移动机器人最重要的实现方式之一，是当前机器人领域科研与应用的热点。现有的移动机器人研究在硬件和软件上的开发已趋于成熟，但是依然存在不足，针对不同问题开发的大部分移动机器人各自有特定的需求，要求研发人员重新对硬件电路、软件程序进行设计，大大降低了研发效率。根据模块化、层次化的设计方法，本文介绍了一种模块化、可重构、混合架构的小型移动机器人平台设计方案，帮助研发人员快速的根据需求构建特定的机器人平台，缩短研发周期、降低了开发成本。

本文设计的移动机器人采用四轮独立驱动的底盘，系统分为三大模块：感知与运动模块、实时控制模块、高性能处理模块。感知与运动模块包含了各式各样的传感器和动作器的驱动电路，文中设计为通用接口便于开发者针对需求进行更换；实时控制模块为整个移动机器人平台的核心，其核心处理单元为 ARM-FPGA 的混合架构，由一片 Cortex M4 内核的 Kinetis 系列微控制器与一片 FPGA 构成，并搭载各种常用的嵌入式通讯协议接口和外设；高性能处理模块无需做硬件设计，可采用 PC 机或手机等移动终端。最后通过一些测试和实验，本文对移动机器人平台的性能进行检测，并验证了系统的可行性。

关键词：移动机器人，模块化，嵌入式系统，传感器

Abstract

With the constant improvement of robot performance, the application range of the mobile robot is expanding and playing a huge role in many aspects, such as industry, agriculture, life. As one of the most important realization of the mobile robot ,wheeled mobile robot is the hotspot in research and application of robots. Existing research on the hardware and software development of mobile robot has been mature while problems still exist, according to different applications and problems most of the mobile robot have their own specific needs, and need the researchers to design the hardware circuit and software program design again, which greatly reduces the efficiency of research and development. According to the modular, hierarchical design method, this paper presents a modular, reconfigurable, mixed architecture of mobile robot platform design, help developers quickly construct a specific robot platform according to the demand,which improve the reusability of the hardware of the robot and reduce the development cycle.

In this paper, we design the mobile robots driven by four wheel independent control and chassis, the system is divided into three modules: perception and movement module, real time control module, high-performance processing module. Perception and movement module contains a wide variety of sensors and action of drive circuit, the design for the generic interface to facilitate developers in relation to the replacement of the demand. As the core of the whole mobile robot platform, the processing unit of Real-time control module is the mixture architecture of ARM and FPGA , by a piece of Kinetis series microcontroller with Cortex-M4 kernel and a piece of FPGA, which pick up all sorts of commonly used embedded communication protocol interface and peripherals; High performance processing module doesn't have to do hardware design but use PC or mobile terminals such as mobile phone. At last, through a series of tests and experiments for testing the performance of mobile robot platform function, this paper verify the feasibility of the system.

Keywords: Mobile Robot, Modular, Embedded System, Sensor

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 本课题背景.....	(1)
1.2 轮式移动机器人的国内外研究现状.....	(2)
1.3 轮式移动机器人平台的研究意义.....	(4)
1.4 论文主要内容安排.....	(5)
2 移动机器人平台总体架构分析	
2.1 移动机器人系统的整体结构分析.....	(6)
2.2 移动机器人平台的硬件系统需求分析.....	(7)
2.3 移动机器人平台的软件系统需求分析.....	(10)
2.4 本章小结.....	(10)
3 移动机器人平台硬件系统的模块化设计	
3.1 移动机器人平台的硬件设计方案.....	(11)
3.2 移动平台的硬件结构设计.....	(12)
3.3 感知与运动层的硬件结构设计.....	(13)
3.4 实时控制层的硬件结构设计.....	(20)
3.5 电源系统的硬件结构设计.....	(28)
3.6 本章小结.....	(32)
4 移动机器人平台的软件系统设计分析	
4.1 移动机器人平台的软件设计方案.....	(33)

4.2 传感器模块的控制方案.....	(35)
4.3 电机驱动控制方案.....	(39)
4.4 本章小结.....	(45)
5 移动机器人平台测试与分析	
5.1 电源完整性测试.....	(46)
5.2 基于图像传感器的路径识别测试.....	(48)
5.3 本章小结.....	(49)
6 全文总结与展望	
6.1 全文总结.....	(50)
6.2 研究展望.....	(51)
致谢.....	(52)
参考文献.....	(53)
附录 攻读学位期间发表论文目录.....	(57)

1 绪论

1.1 本课题背景

基于计算机技术与网络技术的大量研究与应用，机器人技术得到了飞速发展，在工业、农业、国防、医疗等各个领域得到了广泛的应用，而作为机器人的一个重要分支，移动机器人在其中起到了重要的作用。早至 20 世纪 60 年代末，一个被命名为 Shakey 的自主移动机器人就诞生于美国斯坦福研究院(SRI)，作为研究人工智能技术、机器人自主规划和控制技术的研发平台^[1]。上世纪 70 年代末至 90 年代，随着计算机、传感器等技术的高速发展，越来越多的科研机构开始了对移动机器人的研究，如美国的 General Electric 公司、日本的索尼公司、瑞典的 ABB Robotics 公司等纷纷开始研制移动机器人，更促进了移动机器人的多元化发展^[2]。由于技术的限制，大部分移动机器人由工控机、通用计算机等来控制，因尺寸过大、价格较高等因素而无法普及。21 世纪以来，伴随着电子技术、计算机技术的飞速进步，移动机器人技术开始向着小型化、快速可靠化、智能化、网络化等方向全面发展。

现有的移动机器人研究在硬件架构和软件开发上已趋于成熟，但仍然存在一些问题，常见的有硬件扩展性差、系统实时性差、软件可移植性差等^[3]。过往的研究中，大部分移动机器人是面向特定的、具体的问题或者研究对象而设计，功能针对性强，但是硬件通用性、扩展性差，很难跨领域完成指定任务。因此，面对不同的问题，需要研究人员对机器人进行重新设计，大大增加了成本、降低了效率。

为了解决上面提出的问题，依据模块化、层次化的设计方法，本文以轮式移动机器人为研究对象，介绍了一种模块化、可重构、混合架构的移动机器人平台设计方案。目的是提供一个具备通用性、硬件可复用性、可扩展性等优点的移动机器人平台，使研发人员可以根据需求快速简单的选择所需模块、搭建硬件平台，缩短研发周期、提高研发效率。

1.2 轮式移动机器人的国内外研究现状

1.2.1 嵌入式理论的研究与应用

IEEE(国际电气和电子工程协会)对嵌入式系统的定义:嵌入式系统是“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备的装置”^[4]。在结构上,嵌入式系统由硬件和软件组成。硬件一般以嵌入式微处理器为核心,集成存储器和必要的外围接口部件;软件上分为嵌入式操作系统和嵌入式应用软件,其核心是操作系统,应用软件是针对特定需求开发的程序。

20 世纪 70 年代,英特尔公司研究出首款微处理器--Intel 4004^{[5][5]},自此以微处理器为核心的微型计算机飞速发展,因其小型、成本低、可靠性高等特点开始在各个领域应用起来。英特尔公司的创始戈登·摩尔总结了关于芯片性能每 18 个月倍增的摩尔定律,而 CPU 不断的推陈出新,向着更小、更快、更可靠的方向发展^[6]。微机的高速计算能力和智能化水平引起了广泛关注,于是各研究机构纷纷着手研制将微型机嵌入到各自领域以实现智能化控制的方案^[7]。随着半导体技术、计算机技术的发展,逐渐形成了现代计算机系统的一个重要分支-嵌入式系统。

嵌入式系统与应用对象密切相关,与通用计算机系统不同,其技术发展并不是追求性能的提升,而是以应用为中心^[8],不断扩展应用对象需求的外设,综合考虑性能、功耗、成本等因素,形成满足应用对象要求的处理器和应用系统。因此,虽然起源于微型机时代,但是嵌入式系统很快走上了探索单片机的发展道路。早期的单片机是在 CPU 的基础上,将存储器、时钟发生器、I/O 接口电路等集成在一个芯片而成。从 1975 年美国 TI 公司单片机问世^[9],到现在 ARM 公司设计的大量高性能低成本的 RISC 处理器^{[5][10]},嵌入式系统经历了从最初的 4 位机到 32 位、64 位的发展历程,比较有代表性的产品包括 8051、P51XA、C540 等。

进入 20 世纪 90 年代,随着信息技术、智能技术、自动化技术的发展与应用,嵌入式系统技术得到了飞速的发展^{[5][11]},除了继续在传统的工业控制、家电中广泛应用,在通信和消费类领域中也发挥了重要的作用。数字电视广播技术、数字机床、智能手

机等等，这些都离不开嵌入式技术。而随着网络化的信息时代到来，以往的家电设备如冰箱、微波炉等设备功能将不再单一，嵌入式设备在硬件上必然要求配备各种网络通信接口，实现联网功能，以此衍生出的智能家居、智能玩具行业也是目前嵌入式领域研究的热点^[12]。嵌入式系统技术日益完善，小到手机、手表，大到冰箱、汽车等产品，嵌入式系统的身影随处可见，在与网络结合日益密切的将来，必然会更加广阔的发展空间。

1.2.2 移动机器人的研究与应用

伴随着机械技术、网络技术、嵌入式技术的高速发展，移动机器人在航天、工业控制等多个领域得到了广泛的应用。移动机器人主要有轮式、履带式、腿式、蛇形式和复合式几种移动方式^[13]。相比其他几种，轮式移动机器人具有机械结构简单、控制相对简单、承载量大等优点，因此被大量应用于工控、航天、农业等领域，是当前机器人领域的研究热点之一^{[14]-[20]}。

从上世纪 70 年代至今，由美国太空总署（NASA）正在逐步实现的火星探测计划中，轮式移动机器人就扮演着重要的角色，1997 年的探路者号火星车、2012 年的好奇号火星车都成功的将火星上未知的信息带回地球，帮助人们实现登陆火星的梦想^[21]。2004 年起，美国 DARPA 发起无人智能车挑战大赛，这些无人驾驶的智能车完全有电脑控制，完成自主导航、竞速等功能，极大的促进了轮式移动机器人的发展和创新^{[5][22]}。

欧洲的各个国家也在移动机器人的研究和应用中获得了丰厚的成果^[23]。2012 年德国航空中心研制出一款命名为“贾斯汀”的轮式移动机器人系统，用来模拟宇航员在太空空间站的移动，并配合其他机器人进行月球探索。1992 年，大众汽车公司配合德国的研究机构研制出的 Carevalle 系统，由 Carevalle 旅行车改装而成，主要是用来研究高速公路上的视觉导航，最高速度可达 120km/h^[24]。同时期的，还有奔驰汽车公司与德国慕尼黑联邦国防大学联合研制的 VaMoRs-P 系统，其已经通过大量的公路实验验证了其优良的自动驾驶性能和道路识别能力^[25]。在英国，由布里斯托尔大学和先进交通系统公司共同开发的“尤尔特拉”（UL Tra）无人驾驶车也开始应用在伦敦的机场，

该智能车依靠电池来提供动力，时速最高可达 40km/h，乘客可以通过车载的触摸屏选择目的地^[26]。

相比国际先进的移动机器人研究机构，中国对移动机器人的研究起步略晚，但从 80 年代末至今一直保持着高速的发展势头。早期的有由清华大学、浙江大学等多个大学联合研制 ATB-1 系统，自主行驶速度可达 21km/h^[27]。此外，还有清华大学研制的 THMR-V 系统^{[28]-[32]}、吉林大学研制的 JLUIV 系列等等都极大的促进了我国对移动机器人技术的研究。这些研究成果大大促进了我国移动机器人技术的发展，并缩小了我国与国际一流研究机构的差距，甚至在一些领域达到国际顶尖水平。

1.3 轮式移动机器人平台的研究意义

移动机器人系统是涉及到了传感器技术、软件技术、自动化控制、电子设计等学科的综合体。基于嵌入式技术、电子技术、传感器技术的大量研究成果，移动机器人性能不断提升，其应用范围逐渐渗透到工农业、医疗、服务等多个领域之中，并开始在军事、航天等领域中展现出其无可比拟的优势。例如，具备智能避障功能、自主导航的移动机器人可以取代传统的车辆方式，减少交通事故的发生；在航天探测方面，机器人也能帮助人们进入一些未知的环境中获取信息。因此，对移动机器人的研究不仅是来自学术领域的需求，也具有很高的实用价值。

现有的移动机器人大部分是针对某一具体应用而设计的，硬件扩展性、软件可移植性较差，无法跨领域完成任务。基于视觉定位的智能移动机器人，通过获取环境的视觉图像信息进行导航，被广泛应用在军事、医疗、工业等领域，但数据处理量较大、系统实时性较差，需要做图像处理。而 FPGA 的优点在于高速并行运算，适合处理如图像数据的密集数据流。

因此，本文介绍了一款基于 Kinetis+FPGA 混合硬件架构的小型嵌入式移动机器人平台设计方案，K60 微控制器处理上层控制流，FPGA 处理密集数据流，利用片外存储总线实现 K60 微控制器和 FPGA 之间的通信^[33]，充分发挥 K60 处理器与 FPGA 各自的特点。此外，平台设计有设计有丰富灵活的传感器接口，可以根据不同的应用

需求，外接各种传感器来实现对应的功能，为机器人和嵌入式技术的研究提供良好的平台。

1.4 论文主要内容安排

本文将嵌入式系统相关技术和成果应用到移动机器人的构建中，介绍了一种具备模块化、可扩展性强、硬件灵活性高等优点的移动机器人平台。在硬件实现上，该移动机器人平台采用层次化、模块化的结构设计，主要分为四个层次：移动平台（移动机器人底盘）、感知与运动层、实时控制层、高性能处理层。感知与运动层由机器人的动力系统（驱动器）和各种通用传感器组成。实时控制层的核心是一块集成多种通用外设的嵌入式处理器，集成丰富的接口来连接相应的传感器，并提供通信系统以满足模块之间和外部通信的需求。高性能处理层主要完成实时性要求不高的数据处理任务，如地图建模等。该层通常为通用计算机，随着技术的发展，智能手机、平板电脑等移动终端也能完成该层的大部分任务。

全文内容安排如下：

第一章介绍了本课题的背景和研究意义，以及移动机器人的国内外研究状况。

第二章介绍整个移动机器人平台的总体架构，并详细给出了各个层次的需求分析和设计思路。

第三章介绍移动机器人平台的硬件结构设计，描述了整个平台模块化和层次化的设计理念，并从硬件选型、电路设计等方面详细分析了移动机器人平台各个功能模块的具体实现。

第四章介绍移动机器人平台的软件体系设计。

第五章实现移动机器人平台并进行相关性能测试。

第六章总结了本文在设计移动机器人平台中所做的工作，分析了平台的改进方向。

2 移动机器人平台总体架构分析

作为一个典型的嵌入式系统，针对不同的应用对象和功能需求，移动机器人之间有着很大的区别，例如移动方式就包括轮式、履带式、爬行式等多种方式。然而一个完整的机器人平台的基本组成必然包括机械结构、硬件系统、完善的软件体系三个部分。本章将对机器人系统的总体结构进行全方位的分析，并介绍该平台的设计要求和设计思路。

2.1 移动机器人系统的整体结构分析

目前已经有大量关于移动机器人体系结构的研究成果，其中比较有代表性的有基于功能划分的分层式体系结构和基于行为划分的包容式体系结构。前者中比较典型的有 1979 年 Saridis 按照功能将机器人划分为执行层、协调层、组织层^[34]，与分层式体系的串行结构不同，包容式体系结构更强调各模块的独立性和并行工作的特点。

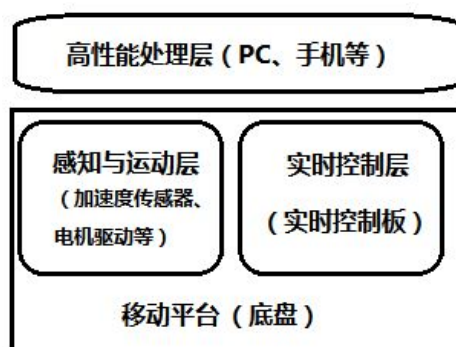


图 2-1 移动机器人系统整体结构图

本文设计的机器人平台旨在面向嵌入式技术的研究和教学，以及轮式移动机器人理论与应用的研究，因此在设计上采用结构更为清晰、灵活性更高的分层式结构，即采用模块化、层次化的设计理念，将整个移动机器人平台分为四个层次：移动平台、感知与运动层、实时控制层、高性能处理层^[35]。如图 2-1 所示。其中高性能处理层对应上面的组织层，在整个系统中起到协作、规划、组织、决策的作用；实时控制层对应协调层，实现对传感与驱动层的控制，及对高性能层的反馈；感知与运动层对应执

行层，主要是实现数据采集、执行来自控制层的指令并完成相关动作；移动平台，即移动机器人底盘，则是提供机械结构部分的支持，为机器人的各个模块提供安装空间和支撑平面。

2.2 移动机器人平台的硬件系统需求分析

1. 移动平台（底盘）的设计需求分析

相对于足式、履带式等移动方式，轮式移动机器人由于其承重大、自重轻、机械简单、控制方便、工作效率高等优点，在军事、航天等领域得到了广泛的应用。目前针对轮式移动机器人的车轮布局和驱动方式已经有了大量研究成果^{[36]-[38]}，比较典型的是双轮驱动、四轮驱动。相较于其他驱动方式，四轮驱动的机器人设计更为复杂，但是在转向、加速、稳定性等方面都有更大优势，能够为移动机器人的教学和研究提供更多的资源和空间。因此本文选择支持四轮独立驱动的移动平台作为机器人的底盘。

2. 感知与运动层设计分析

感知与运动层为移动机器人平台提供与外部信息交流和沟通的模块，主要由各式各样的通用传感器与驱动机器人的驱动器组成。传感器是机器人控制系统中必不可少的一部分，它能够帮助机器人获取外部环境的信息，包括温度、速度、光强等等，使机器人能够根据特定需求应用在不同的环境和任务上。运动层，即驱动机器人实现各种运动的驱动器组，不一样的驱动程序会帮助机器人完成不同的动作，包括转向、加速、停止等。

目前市面上有很多种不同功能、不同种类的传感器，需要综合任务需要、环境需求、成本等因素进行针对性的选择，考虑到本文所设计的平台主要是作为嵌入式技术、移动机器人技术的研究与教学平台，需要尽可能的提供更多的资源以供研究。因此，本文设计的机器人平台对传感器的需求包括陀螺仪、图像传感器、温度传感器、加速度传感器、声波传感器、霍尔传感器、电磁传感器等等。由于本文设计的机器人平台是面向小型移动机器人设计的开发平台，其接口资源十分有限，无法同时加载太多的传感器，因此只能在预留出一些特殊的接口（如摄像头）的同时，尽量选用常用的传

传感器接口，包括 IIC、SPI、RS232、RS485、USB 以及模拟式的 GPIO 接口。这种设计方式能帮助机器人更好的适应未知环境和任务，根据需求有针对性的加载传感器模块，提高的机器人平台的灵活性和可扩展性。

相对传感器，驱动器的种类要少一些，但是依然有各式各样的机器人驱动器供开发人员选择。由驱动器组组成的运动层，是移动机器人的执行机构，帮助机器人实现各种动作的模块。在选择驱动器的时候，应尽量选择常用的接口类型，如 PWM 型，这样在设计机器人平台的时候可以通过接口复用减少资源的占用。经过分析，本文设计的轮式移动机器人平台需要驱动器的装置包括电机、舵机、云台等等。

3. 实时控制层设计分析

在机器人系统设计中，硬件系统的设计方案是影响系统稳定性和可靠性的重要因素。优良的硬件设计不仅能够提高机器人的抗干扰能力、运动能力，还能极大的提高软件开发的效率。作为机器人硬件部分的核心，也是整个移动机器人平台的核心，实时控制层需要足够大的计算能力来处理来自传感器、高性能处理层等不同地方的数据，控制移动机器人实现目标探测、巡线等基本功能，并尽量保证其实时性、高速性、稳定性。

本文设计的移动机器人平台，其实时控制层在硬件上使用一块中等性能的微处理器作为核心处理器，扩展一片 FPGA 用于处理底层的密集数据流，并加载如存储系统、通信接口等足够多的通用外设和通用接口，为将来的嵌入式技术教学和研究提供丰富的资源。

首先，移动机器人需要一套稳定、抗干扰能力强的电源管理系统来保证整个机器人平台稳定的工作。电源管理系统不仅需要对传感器、电机等模块供电，还需要为包含主控芯片在内的整个实时控制层提供稳定、高品质的电源。其次，需要通信系统保证与高性能处理层、其他机器人进行高效的信息交互，需要显示系统及时将机器人的信息传递给开发人员，需要额外的存储系统提升系统的存储空间。最后，需要提供足够多的通用接口来保证实时控制层与传感器、驱动器之间的数据传输。

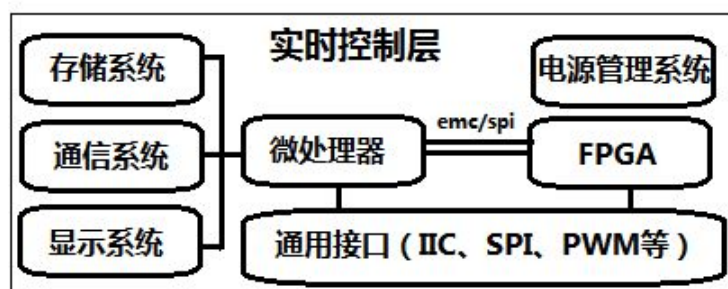


图 2-2 实时控制层结构图

如图 2-2 所示，实时控制层的控制核心采用由一块 Cortex M4 内核的 K60 处理器与一片中等性能的 FPGA 构成的混合架构形式，并加载丰富的外围器件。包括用于扩展内存的 SRAM 模块，提供大容量存储的 SD 模块，提供通信服务的有线局域网、USB-OTG、通用异步串行通讯 UART 等模块，丰富的外设，以及连接传感器、驱动器的各种通用接口和自定义接口等等。

4. 高性能处理层设计分析

高性能处理层一般为通用计算机，需要与实时控制层进行信息交互，在整个移动机器人平台中主要负责解决一些需要复杂计算但实时要求较低的需求。随着科技的不断发展，目前市面上主流的智能手机、平板电脑性能上已经不亚于一般的通用计算机，大部分都拥有 WIFI、陀螺仪、USB 接口、摄像头等硬件模块和通用接口，不仅能够利用 USB、WIFI、GPRS 等模块与实时控制层、其他计算机通信，还能够完成诸如地图建模之类的大部分高性能处理任务。

由于高性能处理层可以选择为通用 PC 机、智能手机或平板电脑，也可以选择市面上的高性能成品开发板。由于大多为现成产品，本文只介绍下大致的硬件需求，不做具体的硬件设计。以通用计算机为例，主频 1G 左右，优先选择多核的高性能处理器，扩展了 RAM、ROM、SD 等存储设备，加载有 WiFi、USB、RS-232、以太网等通讯模块，并集成有丰富的外设资源。

2.3 移动机器人平台的软件系统需求分析

在移动机器人平台中，软件系统和硬件系统相辅相成，构成一个完整的实时嵌入式系统。通常，软件系统处理由硬件系统采集的数据，并将一系列指令返回至硬件系统，达到控制机器人的效果。软件设计是基于硬件平台的，其设计水平优劣对机器人性能有这很大的影响，应尽量保证其可靠性、可扩展性、易移植性、实时性。

感知与运动层中，软件主要包括板级支持包、通信协议、驱动、应用程序接口等，要求程序有良好的可移植性，并能帮助该层与实时控制层快速准确的完成信息交互；实时控制层是整个平台的核心，需要处理来自传感器、驱动器、高性能层等各个位置的数据，提供完善的电源管理系统，必须加载实时操作系统来实现程序的控制和资源的管理，并加载各种中间件如通信协议、硬件驱动等；高性能层主要负责实时性要求不高的高性能处理任务，要求能够搭载常用的大型嵌入式操作系统，并提供外设资源的驱动程序和应用程序接口，包括固件、驱动、通信协议、操作系统、中间件、应用程序接口等。

2.4 本章小结

本章按照功能规划了机器人平台的层次化结构，分别从机械、硬件、软件三个方面对平台各个模块进行了详细的阐述，并针对机器人平台各层需求分别进行分析，从整体上明确了移动机器人平台的设计方案。

3 移动机器人平台硬件系统的模块化设计

在嵌入式产品研发中，硬件系统的设计优劣对整个系统的稳定性、抗干扰性等性能有着重大的影响。良好的硬件设计还能帮助开发者提高软件设计的效率，降低开发成本和难度。由第二章可知，本文介绍的移动机器人平台分为四个部分，其中移动平台和高性能层均采用现有的成品，电源管理系统集成在实时控制层，因此需要对感知与运动层、实时控制层的各个模块进行详细的硬件设计。

3.1 移动机器人平台的硬件设计方案

3.1.1 感知与运动层接口设计方案

感知与运动层是由各种功能与类型的传感器模块、驱动器模块组成，在实际应用的过程中不可能单独为每种传感器与驱动器设计接口，这样设计也不满足平台可扩展性的要求。比较理想的一种方法是，机器人平台设计几种常用的通用接口如 SPI、IIC、PWM，使其完全模块化，无需考虑接口就能针对应用需求搭载不同的传感器、驱动器，但需要对市面上一部分不满足接口或信号类型的成品重新改装，提高了设计成本，有时还会降低数据传输效率。

传感器的分类方式有很多，按照输出信号的性质可分为开关式、模拟式、数字式三种^{[32][39]}。开关式传感器输出“0”和“1”两种状态到控制器，例如一些微动开关、光电开关等；模拟式传感器输出与被测物理量对应的模拟信号（电量），需经过放大、采样、A/D 转换、电平转换才能被微型机处理，例如某些红外传感器、光电传感器等；数字式传感器又分脉冲数字式传感器和代码式传感器（编码器）两类，其接口一般满足某种工业标准接口规范，比如 IIC、SPI 等。

基于模块化的设计理念，本文介绍的移动机器人平台除了需要设计标准接口供大部分传感器使用，也要为一些特殊的传感器留下接口资源，比如摄像头。经调查，IIC 或 SPI 的接口类型在传感器中被大量使用，也在大部分的微控制器中有集成相应控制

模块。在本文的设计中，传感器采集的数据大都交由 FPGA 进行预处理，然后再送至微控制器，而 FPGA 对 IIC 或 SPI 实现的 IP 核也很容易获得。因此，本文将 IIC 和 SPI 作为传感器的主要通用接口方式，接口资源大部分来自 FPGA，小部分由微控制器提供。类似摄像头接口、A/D 和 D/A 模块这种无法满足上述标准的必备接口，留出一到二组即可。采用这种设计方式，移动机器人平台能针对应用加载不同传感器，提高了其硬件灵活性和可扩展性。

目前，电机的驱动控制常常采用 H 桥式控制，其具有很高的开关速度和稳定性，因此这种脉冲调制技术（PWM）在目前被广泛应用。基于和传感器一样的设计理念，移动机器人平台主要留出 PWM 接口与一些普通 I/O 口以供驱动器使用。

3.1.2 实时控制层硬件设计方案

实时控制层是移动机器人平台的控制核心，需要同高性能层和感知与运动层进行数据交换，一方面通过感知与运动层实时控制机器人，另一方面与高性能层进行通信，实现状态监测、调试等功能。因此，主控制器的芯片内部应集成定时/计数器、看门狗、存储器、串口、总线、PWM、A/D、D/A 等各种必要的模块和丰富的外设资源，在保证可靠性、低功耗的同时，最好实现单片化。此外，还需要考虑 RAM、ROM 的容量，在兼顾性能、成本的情况下，对微控制器和 FPGA 提供内存扩展，常用的有 SRAM、SDRAM、NandFlash 等。在显示模块中可以考虑使用控制器内部集成的 LCD 模块，也可以考虑选择市面上成熟的 LCM 产品。LCM，也称液晶显示模块，是一种将 LCD、PCB 板、背光源、驱动器、控制器、连接件等装配在一起的完整组件。

集成在实时控制层中的还有电源管理模块。在设计电源模块的时候，除了要考虑功耗的问题，稳定性、纹波大小都对机器人平台的各个模块能否正常工作有着重要影响。

3.2 移动平台的硬件结构设计

移动机器人的底盘即移动平台，在完成启动、转弯等动作的同时，通常还需要装

载各种设备，包括电池盒、驱动板、传感器。因此，移动平台必须具备一定的承载能力和移动能力。根据实验室的现有条件和后续研究的需求，本文选择 Arduino 4WD 四轮驱动机器人底盘作为移动机器人的移动平台，如图 3-1 所示。



图 3-1 Arduino 四驱移动机器人平台实物图

该平台兼容多种传感器，内部有足够的空间用于安放电池、电机，还设计有舵机安装孔，方便扩展云台摄像头和机械手的研究。具体参数如下：

- (1) 平台尺寸：长 200mm 宽 170mm 高 105mm；
- (2) 车轮直径：65mm，最大速度：60cm/s；
- (3) 电机：12V 的德国 Faulhaber 空心杯直流减速电机四台，带 12 线编码器，减速后转速为 180RPM；
- (4) 小车重：660 克，最大载重：900 克

3.3 感知与运动层的硬件结构设计

移动机器人需要搭载多种多样的传感器来感知外界的环境变化和检测机器人自身的状态，还需要完善的驱动系统帮助机器人完成指定的任务。本章将详细介绍感知与运动层中几种常用的传感器模块、驱动器模块的原理与设计分析。

感知与运动层主要包含各式各样的传感器模块和驱动器模块。根据移动机器人的应用背景，传感器模块应包含有图像传感器、红外传感器、激光传感器、超声波传感器、陀螺仪、碰撞传感器、加速度测量仪等常用的功能模块；本文介绍的移动机器人是四轮驱动，需要提供至少四组电机驱动，两组舵机，并提供云台系统安装摄像头。

3.3.1 超声波传感器模块设计

超声波是一种人耳无法听见的声波，频率一般超过 20kHz。声波在空气中的传播速度很慢，约为 340m/s（温度为 20℃ 时），波的传播速度等于频率乘以波长，因此超声波的波长很短，拥有很高的距离或方向分辨率。而且，超声波拥有良好的指向性，在空气中传播时能量衰减较慢，所以超声波常被应用在非接触式的测距应用中，并具有很高的精度。其测距的工作原理是：由发射器发生声波，经传播碰到障碍物或被检测物会产生反射从而返回到接收器，通过反射时间的长短和反射波的光强就能判断障碍物的性质和位置。



图 3-2 SRF02 超声波传感器实物

目前，由英国公司生产的 SRF 系列的 SRF10，代表着市面上高性能、高成熟度的超声波测距模块，但价格比较昂贵。根据实验室现有的条件，本文介绍的移动机器人采用同系列的一款 SRF02 超声波传感器，如图 3-2 所示。

表 3-1 SRF02 传感器参数表

技术参数	描述
工作电压、电流	5V，4mA
工作频率	40kHz
探测距离	15cm-250cm
接口类型	标准 IIC，串口
校正	无需人工调整
尺寸	24mm*20mm*17mm

这款超射波传感器将波发射器、波接收器、控制器、电源部分集成在一块 PCB 板上，并采用换能器有效的减小了体积和功耗。SRFO2 模块提供有 IIC 和串口两种接口，

具有良好的兼容性，方便控制器快速获得传感器捕获的数据信息。而且，传感器输出的数据是已经过修正后的数据，无需人工调整。其相关参数如表 3-1 所示。

3.3.2 图像传感器模块设计

作为移动机器人智能化的重要标志，视觉系统通过模仿生物的视觉感知帮助机器人获取外界环境的信息^{[32][40]}，配合处理其他传感器收集到的信息，移动机器人能够完成路径规划、避障、目标跟踪等任务。

目前常用的图像传感器有 CMOS 图像传感器和 CCD 图像传感器两种。CCD 图像传感器有噪声低、动态范围大等优点，但是其高功耗、体积大等缺点极大的限制了其市场空间^[41]。相较之下，CMOS 图像传感器将像素阵列和外围电路集成在一起，具有体积小、低功耗、易控制等优点，更适合应用在移动机器人平台的设计当中。在本文设计中，需要利用 FPGA 高速并行处理的特点对图像传感器采集的数据进行预处理，从而提高数据处理效率、降低 ARM 的资源占用。

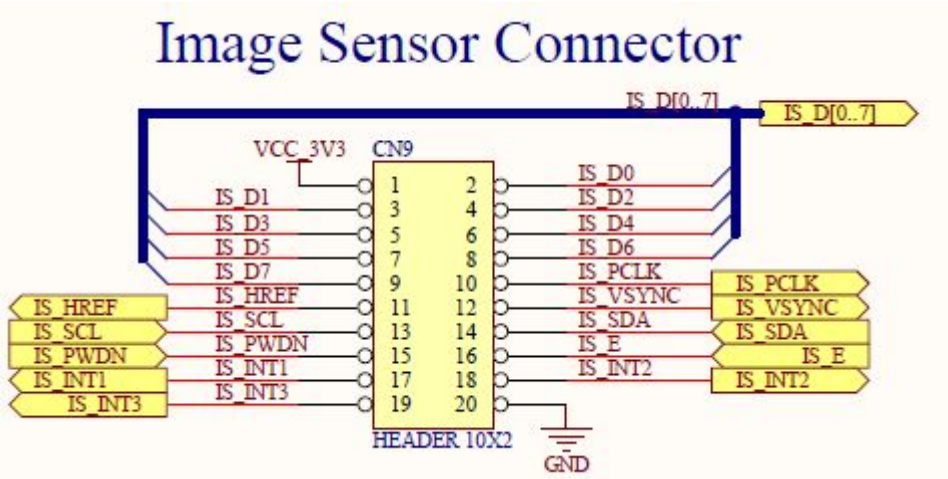


图 3-3 图像传感器模块接口示意图

在本文的后续工作中，将用到 Omni Vision 生产的 OV7620 图像传感器，故机器人平台的图像传感器选择数字式接口，主要包括 8 位的数据接口、同步信号接口（帧、行、像素）、控制信号接口（复位、中断等），如图 3-3 所示。这些接口都由 FPGA 引出，方便 FPGA 做一些图像的预处理工作。

3.3.3 红外传感器模块设计

物体辐射出的红外线其波长随着温度的不同而变化，温度越高，辐射出的光的波长越短，据此可使用红外传感器进行非接触式的温度测量，再经过适当的信号处理得到相应的电量信号。相较于超声波传感器和激光传感器，红外传感器简单易用，成本也远低于另外两种传感器，在探测距离上正好与超声波传感器相互弥补不足，因此尽管有精度低、方向性差、易受环境影响的缺点，依然被广泛应用在智能机器人的测距、避障模块中。



图 3-4 GP2Y0A21 红外传感器实物

本文采用日本的夏普公司生产的 GP2Y0A21YK 红外测距传感模块，如图3-4所示。该传感模块集成了红外发射管、PSD(位置灵敏检测器)和信号处理电路，不需要外部控制电路，体积小、低功耗，且成本低廉，非常适合用于智能机器人的避障、测距等模块设计当中，其具体参数如下表所示：

表 3-2 GP2Y0A21YK 传感器参数表

技术参数	描述
工作电压	4.5V-5.5V
平均消耗电流	30mA
探测距离	10cm-80cm
输出	模拟信号
模拟输出噪声	小于 200mV
最大允许角度	大于 40 度
更新频率	25Hz
尺寸	29.5mm*13mm*13.5mm

夏普公司的红外测距传感器模块大都是基于三角测距原理设计，如图 3-5 所示。红外线发射管向外发送脉冲式的红外光束，遇到障碍会发生反射，反射光经透镜落在 PSD 上，得到一个偏移值 L ，在发射角、偏移距 L 、发射管与 PSD 的中心距 X 、透镜焦距 f 已知的情况下，就能通过几何关系得到障碍物到传感器的距离 D 了。可以从原理图中看出，当 D 很大时， L 会很小，如果 PSD 的分辨率不够测出 L 的大小，就无法得到正确的 D 值；当 D 很小时， L 有可能会超出 PSD 的探测范围之外，也就是所谓的传感器盲区，例如 GP2Y0A21YK 无法准确测量出 10cm 以内的距离。

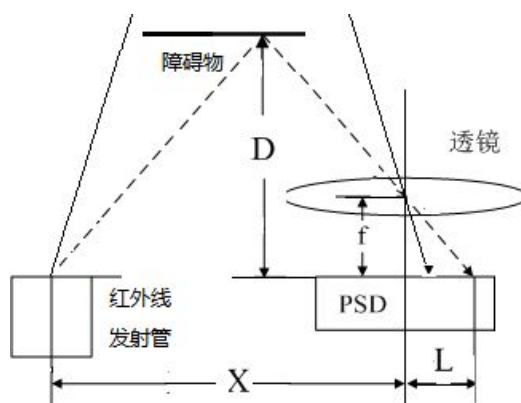


图 3-5 红外传感器的三角测距原理图

3.3.4 电磁传感器模块设计

同摄像头、光电传感器相比，电磁传感器前瞻受到明显的限制，但其功耗更小，自主巡线受光线的影响较小。电磁传感器检测外界信息，本质是在电容传感器上添加一个电感，通过检测谐振点来获取加速度的变化等信息。飞思卡尔全国大学生智能车竞赛中就有利用电磁传感器检测赛道信息的智能车比赛，其设定的导航信号为 20kHz、100mA 的正弦交流电经导线产生的突变磁场，但是信号强度太小，需要经过信号放大电路、检波、AD 采样后，才能交给 MCU 处理。

3.3.5 传感器模块通用接口设计

除了上面介绍的传感器，在需要其他的传感器时，尽量在市面上选择有 IIC、SPI 标准接口的模块。这样设计体现了移动机器人平台模块化的设计理念，也方便针对不

同的应用选取合适的产品。

IIC 总线是由飞利浦半导体公司开发的一种通用标准协议，大大提升了硬件设计的效率。其本质是一种串行通信总线，由一条串行时钟线 SCL 和一条串行数据线 SDA 构成，标准模式下传输速率为 100kbit/s。SP 总线是 Motorola 公司开发的时钟同步、全双工的串行通信总线，被大量用于外设通信中。SPI 总线基于主-从配置，包含 MOSI（主机输出从机输入）、MISO（主机输入从机输出）、SCK（串行时钟）、SS（从机使能）四条信号线。本文的设计中，只将两种总线的接口引出，需要使用时可用杜邦线自行连接到传感器模块上。

3.3.6 驱动器模块设计

移动机器人平台使用锂聚合物电池作为动力能源，根据可逆驱动的需求，采用经典的 H 桥控制控制四台工作电压为 12V 的德国 Faulhaber 空心杯直流减速电机，并尽量提高驱动电压电流、减少能量损耗。可以选择两片集成半桥驱动或者四片 MOSFET 搭建 H 桥，两种方式各有优劣，但集成驱动芯片在死区时间的调节上有较大限制，会影响低速运行时的性能。故本文选择使用 MOS 管搭建 H 桥的方式，并添加短路保护和驱动能力提升电路。

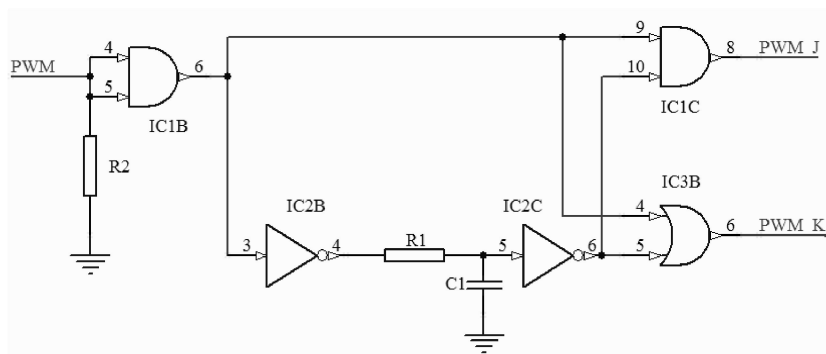


图 3-6 延时保护电路原理图

MOSFET 管的导通和闭合有一定延时，就存在 H 桥上下臂同时导通的可能，会导致 MOSFET 短路，故采用 RC 电路对信号进行延时，避免出现短路状况。并通过逻辑门对控制信号进行隔离，防止 H 桥电路对 MCU 端的影响，具体电路原理如图 3-6 所示，此时 PWM 与 PWM_J、PWM_K 逻辑是一致的。

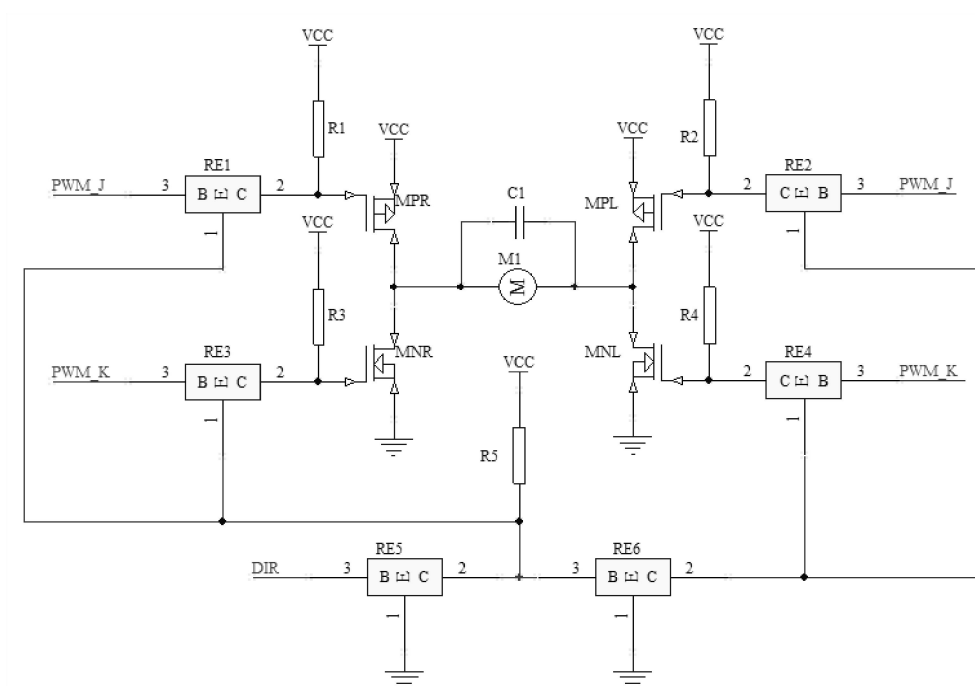


图 3-7 电机驱动部分电路原理图

足够大的栅源电压才能保证 MOS 管的性能，而 ARM 输出的控制信号电压为 3.3V，对于一般的 MOS 管会显得驱动能力不够，可以使用三极管提升驱动电压，如图 3-7 所示。其逻辑分析如表 3-3 所示，其中 PWM 表示电机驱动信号占空比，DIR 控制电机方向，×表示关断，○表示导通。

表 3-3 电机驱动逻辑分析表

PWM	DIR	RE1/3	RE2/4	RE5/6	LP	LN	RP	RN	MOTOR
0	0	××	××	×○	×	○	×	○	过N 能耗制动
>0	0	××	○○	×○	○	×	×	○	正向运行
0	1	××	××	○○	○	×	○	×	过P 能耗制动
>0	1	○○	××	○○	×	○	○	×	反向运行

同传感器类似，市面上有很多成熟的驱动器模块供开发者选择。本文采用 PWM 控制电机转动，接口大都包括负载电源端，PWM 信号，IIC 或 SPI 总线，正交编码器信号端，逻辑电路的电源端和接地端。故本平台的设计的驱动器统一接口由上述的信号源组成。

3.4 实时控制层的硬件结构设计

作为移动机器人平台的核心，实时控制层一方面需要实时控制感知与运动层，保证机器人高效、实时的运作，并通过通信系统与高性能处理层完成信息交互。另一方面，还需要提供完善、稳定的电源管理服务，将动力电池或者经变压器变换的交流电源提供的电源动力，转换为机器人平台各个模块能使用的稳定电源。

根据 2.2 章节可知，实时控制层的控制核心由一块 Cortex M4 内核的微控制器与一块中等性能的 FPGA 构成，并在同一块 PCB 板上集成各种外设模块和接口，如图 3-8 所示。ARM 选型为飞思卡尔公司 Kinetis 系列基于 Cortex M4 内核的 K60DN512 芯片，FPGA 选型为 Xilinx 公司 Spartan-6 系列的 XC6SLX25-2CSG324C 芯片。实时控制层的通信、存储管理、复杂数据处理控制等任务都由 ARM 处理器完成，而 FPGA 主要发挥其高速并行运算的特点，负责传感器、驱动器等模块的大量数据处理，并留出一部分数字接口作为扩展使用，方便开发人员针对特定的应用增减或更换传感器和驱动器模块。

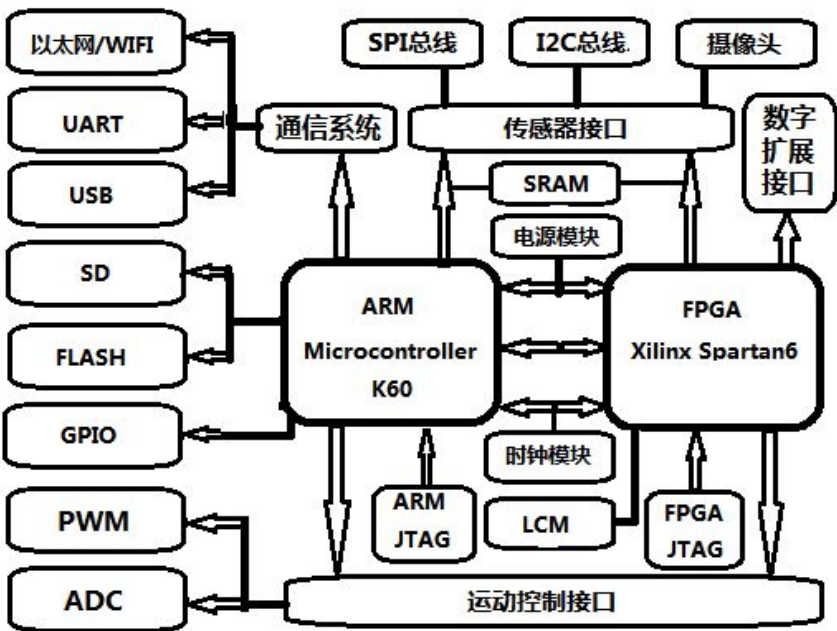


图 3-8 实时控制层硬件框图

3.4.1 ARM 控制器子系统设计

(1) K60 微控制器简介

Freescall 公司于 2011 年推出的 Kinetis 系列微控制器 K60DN512 采用 Cortex M4 内核，具有可扩展、高效的信号处理能力、低功耗、低成本的优势，为智能化领域、嵌入式领域提供了灵活的解决方案。本文使用的 Kinetis 微处理器完整型号为 K60DN512ZVLQ10，其特性简介如下：

- 1) ARMv7-M 架构，32 位 Cortex M4 内核，最高频率 100MHz；
- 2) 512KB 片上 FLASH，128KB 片上 SRAM，串行闪存编程接口 Ezport；
- 3) 工作电压 1.7V-3.6V，闪存编程电压 1.7V-3.6V，10 种低功耗模式；
- 4) 支持 DSP 扩展指令集和浮点运算能力；
- 5) 带外部监控的硬件和软件看门狗，硬件 CRC 模块，16 路 DMA 控制器；
- 6) USB2.0（支持 OTG），2*IIC，3*SPI（支持 6 路片选），2*IIS，4*16-BIT ADC，2*12-BIT DAC，6*UART，SDHC，100*GPIO，1*PDB（可编程延时模块），2*CAN，3*FTM，4*PIT（可编程中断定时器），Ethernet，CMT（载波调制定时器），RTC。

(2) 最小系统设计

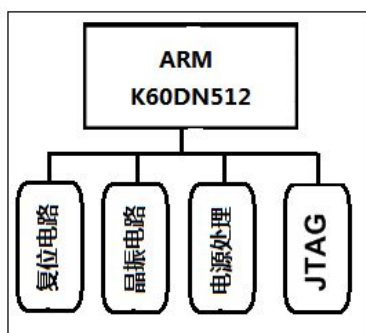


图 3-9 ARM 最小系统结构简图

硬件的最小系统是可以运行内部程序所必须的外围电路，主要包括电源处理电路、复位电路、JTAG 接口电路、晶振电路，如图 3- 所示。

电路中的电源和地引脚有 VDDx、VSSx、VDDA、VSSA、VREFH 等，一些仅需要外接滤波电容抑制噪声，一些位置需要用到 π 型电路滤波，具体的电路图这里就不给出了。晶振电路为芯片提供准确的工作时钟，本文选择使用 50M 有源晶振作为主晶振，需要注意晶振周围不能走高频线，以免产生干扰。

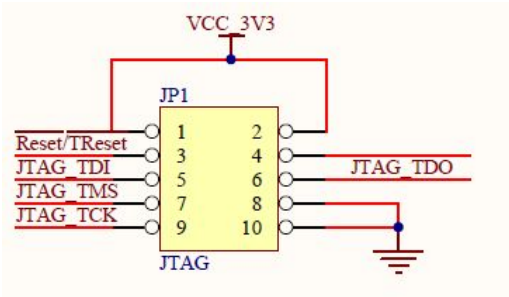


图 3-10 JTAG 接口电路

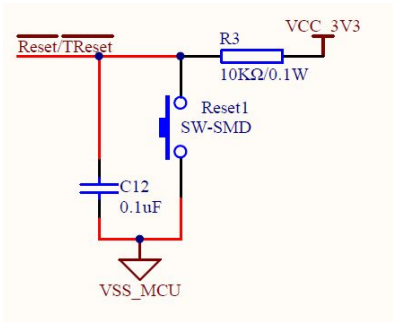


图 3-11 复位电路

K60 采用 Cortex M4 内核，内部集成了 JTAG 接口以供程序下载和调试，本文设计中平台采用 Open JTAG 的 10pin 接口设计，可以节省 PCB 空间，如图 3-10 所示。一般来说，可以采用复位芯片来提供特定的电平信号使芯片复位，但考虑到节约成本和空间的因素，本文直接采用图 3-11 所示的复位电路为 K60 芯片提供低电平复位信号，其中滤波电容和上拉电阻作用是降噪和提高稳定性。

3.4.2 FPGA 子系统设计

(1) FPGA 选型

表 3-4 FPGA 特性参数简表

参数	传输速率	逻辑单元	DRAM	Block RAM	用户 I/O	其他
最大值	1080Mbit/s	24051	229Kbit	936	266	DDR, DDR2, DDR3, LPDDR

目前，FPGA 供应商大多来自美国的公司，市场占有率较高的有 Xilinx（赛灵思）公司、Altera 公司等。赛灵思公司生产的 FPGA 分两类，一类面向于低成本、中等性能需求的应用，如 Spartan 系列；一类面向高性能需求的应用，如 Virtex 系列。本文的设计中，FPGA 作为 ARM 微控制器的辅助单元，主要完成 IO 扩展和密集数据处理的功能，再从成本与电源管理等方面考虑，选型为赛灵思公司生产的 Spartan-6 系列的

XC6SLX25-2CSG324C，其特性参数如表 3-4 所示。

（2）FPGA 最小系统结构

同 ARM 最小系统一样，FPGA 最小系统主要包括电源电路、配置电路等外围设备，其结构如图 3-2 所示。



图 3-12 FPGA 最小系统结构

FPGA 有三组电源模块，VCCOX（驱动电源）、VCCAUX（辅助电源）需要 3.3V 供电，VCCINT（内核电源）需要 1.2V 供电，每个电源块都必须由多个指定电容组成电源滤波电路，电容的具体参数和数量参照 Xilinx 提供的数据手册。FPGA 自带时钟管理模块，DCM 可用于消除时钟歪斜和占空比失真，PLL 可用于实现对时钟频率的控制，本文设计了一个 50MHz 有源晶振以供开发者使用。

（3）FPGA 配置

Spartan-6 系列 FPGA 在 SRAM 型的内部锁存器中存储配置文件，故断电后需要重新载入配置文件。一般有 JATG 配置、主串行外设配置（SPI）、从串行外设配置、SPI 串行闪存配置和字节外设接口配置（BPI）几种配置方式，并支持多配置文件，可以通过控制选择加载其中一个配置文件及加载时间。

本文选择的芯片是 XC6SLX25，查询手册知该芯片无法使用字节外设接口模式，选择设计 JTAG 与从串两种 FPGA 配置方式。这样设计能帮助开发者在 ARM 配置 FPGA 成功以前，能使用 JTAG 对 FPGA 进行配置有利于提高研发效率。其中 JTAG

配置只需直接连接 FPGA 和 JTAG 接口，保证扫描链路的完整性即可；从串配置中需要 ARM 和 FPGA 使用一路异步串行总线进行数据传输，通过这种配置方式 ARM 控制器才能完全控制整个机器人平台。

（4）FPGA 与 ARM 的通信

为了提高本文机器人系统的数据处理效率，ARM 与 FPGA 之间必须设计高效可靠的通信方式。根据 K60 自带的标准通信接口资源，可以选择通过串行方式（如 SPI、IIC）与 FPGA 进行通信，但是其数据吞吐速率和效率均较低，都会大量占用 FPGA 的逻辑资源。相较之下，并行通信方式是保证数据吞吐率更为合适的选择。

理想的方式是通过片内存储总线实现两者的通信，但在常用的微控制器来说都无法实现。文献^[42]介绍了一种 CPU 和 FPGA 间接（松耦合）的通信方式，利用双端口内存实现 CPU 与 FPGA 的数据交换，CPU 通过寄存器触发 FPGA，FPGA 通过中断响应。基于这种架构，本文通过外部存储总线实现类似的通信方式，此时 FPGA 相当于一块外部存储器，通过地址映射接受 ARM 的访问，大大提高数据传输速率和效率。

3.4.3 存储系统设计

近年来嵌入式微控制器保持飞速发展，内核频率不断提高，存储器已经成为制约系统性能的重要因素。移动机器人需要完成巡线、导航、路径规划等任务，为了满足性能需求，本文对存储系统的扩展包括 SRAM、NandFlash、NorFlash 以及可移动的 SD 和 USB Storage。此外，为了保证 FPGA 与 K60 的高效率通信，将 FPGA 的内部寄存器地址分配在 K60 的静态存储空间，通过外部存储总线传输数据，对 K60 来说 FPGA 相当于一块外部存储器。

（1）RAM

随机存储器（RAM）可以分为静态随机存储器（SRAM）和动态随机存储器（SDRAM）。SRAM 的特点是速度快、无需刷新、静态功耗低、使用简单，而相同容量下的 SDRAM 成本低很多，特点是功耗低、集成度高、需要刷新、速度相对较慢，常用作主存储器。

本文选择 Kinetis 系列微控制器 K60DN512 的 RAM 为 128KB，只能应对中小型应用，无法满足任务较多的高性能嵌入式系统需求，故本文选择通过 Kinetis 自带的 FlexBus 总线外扩 SRAM 扩展系统的存储空间，选型为 ISSI 公司容量为 16*256K 的高速 SRAM 芯片 IS61LV25616。FlexBus 是一种灵活的外部总线接口，可以与外部 SRAM、PROM、EPROM、EEPROM、闪存和其他外设无缝对接。

（2） Flash

在 ROM 扩展上，本文选择同时扩展 NandFlash 和 NorFlash，前者用于存储大量数据，后者用于存储程序代码。NandFlash 对大数据块的操作速度非常快，可以作为系统的大规模数据存储器挂载在 FPGA 上，由 FPGA 实现控制。相比之下，NorFlash 价格较贵、容量较低，但是可以片内存储和执行程序代码，适合用于频繁读写的嵌入式系统应用中。

（3） 其他存储器的扩展

为了提升机器人平台的可扩展性和灵活性，本文还扩展了 SD、USB 接口，用于支持可移动的数据存储。Kinetis 系列芯片内部集成 SD 主机控制器，实时控制层搭载了一路 Micro SD 卡，采用 SD 总线通讯，注意由于资源有限其引脚与 WiFi 复用。

3.4.4 通信模块设计

通信模块主要负责实时控制层与高性能处理层或多机器人之间的通信服务，包括数据传输、远程控制、信息交互、调试等功能。通信方式包括有线通信和无线通信，目前应用在机器人系统中比较成熟的通信方式有 UART、以太网、USB、WIFI、Zigbee 等。考虑控制器的数据处理能力和实际需求，本文选择 UART、以太网、USB 作为移动机器人实时控制层的常用通信方式，并提供 WiFi 接口以供后续扩展使用。

（1） UART 模块

通用异步收发传输器，也称作 UART，是一种实现全双工的通用串行通讯方式，常用于主机与外围设备的通信。电路原理如图 3-13 所示，本文设计分别由 ARM 和 FPGA 各引出一路 UART，接口采用简化后的 RS-232 格式，引出三根信号线 TXD、

RXD、GND，并使用 MAX3232 完成 TTL 和 232 电平之间的相互转换，方便研发人员实现对实时控制层的调试以及完成简单的数据传输。

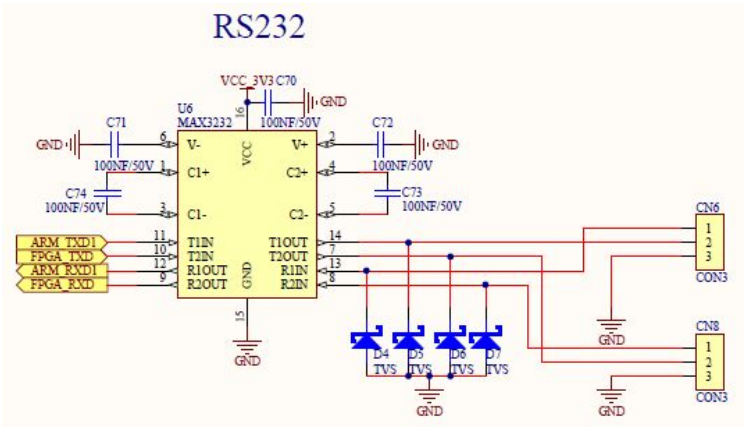


图 3-13 UART 模块电路原理图

(2) USB 模块

USB(Universal Serial Bus),即通用串行总线，是一种规范 PC 与外设通信的外部总线标准，被广泛应用于手机、PC、数码相机等智能化设备中，而 USB 接口几乎成为目前市场上嵌入式系统硬件的标准存储和通信接口。K60DN512 芯片集成有 USB-OTG 模块，可以实现 USB 主机通讯和 USB 从机通讯，速率高达 12Mbps，非常适合作为短距离的有线通信方式应用在移动机器人上。原理如图 3-14 所示，本文选择芯片 MAX3353 作为物理层驱动器。

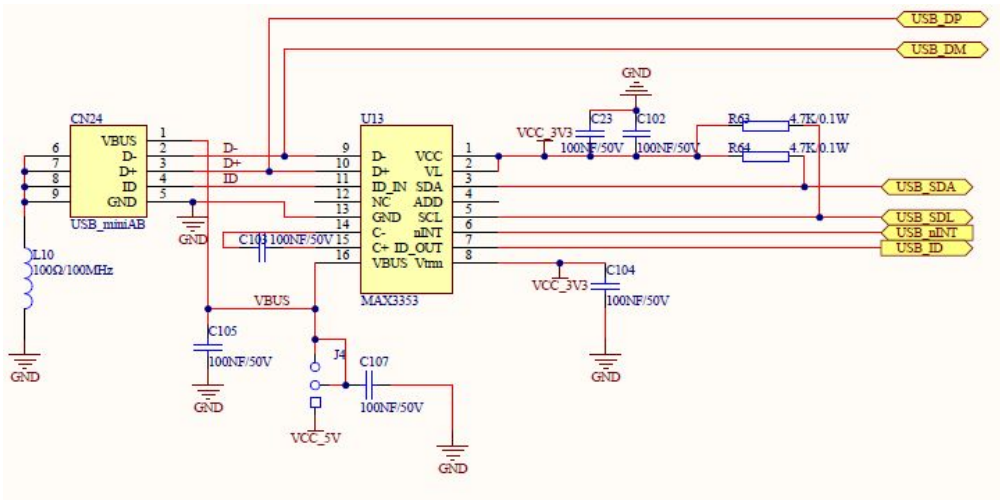


图 3-14 USB-OTG 模块电路原理图

（3） 以太网模块

以太网（Ethernet）是一种计算机局域网组网技术，能快速简单的实现局域网各节点之间的信息传递和通信，而且能够帮助机器人实现网络化，非常适合作为远距离的有线通信方式应用在智能机器人平台中。在实际应用中，还能通过无线 AP 转换到无线局域网模式。K60DN512 芯片内部集成了 10/100Mbps 以太网控制器，支持 MII 和 RMII 通讯，本文使用芯片 KSZ8401 作为物理层数据收发器，选择 RMII 通讯方式进行数据收发，并提供带变压器的 HR91105A 作为网线接插件。

（4） WiFi 模块

WiFi 是一种可以将 PC、平板电脑、智能手机等终端相互连接的无线局域网络技术，已被广泛应用到游戏机、智能手机、计算机等各种智能化设备中，而全世界包括中国的一些公共场合已经开始提供免费 WiFi 服务。相比其他的无线通信如 Zigbee、蓝牙，WiFi 的传输距离更远、速率更高，并支持多个通信链路存在，非常适合作为机器人平台的短距离的无线通信方式。市面上完整的 WiFi 模块一般支持 USB 接口或者 SDIO 接口，K60DN512 芯片内部集成有 SD 主机控制器，支持 SDIO 模式，故本文将 SD 卡和 WiFi 接口复用，引出一路 SDIO 接口，方便在后续的开发中使用 WiFi 模块。

3.4.5 其他外设模块

本文设计的外设模块主要包括 LCM 显示模块、LED 阵列、GPIO 等资源。LCM 显示模块可以帮助开发人员及时了解机器人的相关信息和状态，是实现人机交互的必要功能模块。LED、GPIO 这些都是作为测试调试以及研发教学的辅助资源。

由于 LCM 模块的数据传输相对较慢，在本文的设计中，LCM 的接口由 FPGA 提供，故 K60 需要通过 FPGA 来控制 LCM 的显示。基于实验室的条件和成本考虑，LCM 选型为市面上完整的 LM6800 系列模块，该 LCM 是 256*64 点阵。此外，FPGA 还引出一路 SPI 接口和 IIC 接口，开发者可以自行选择带 SPI 或者 IIC 接口的 LCM 模块作为调试或显示使用，体现了本平台的模块化设计和硬件灵活性。

3.5 电源系统的硬件结构设计

电源供电系统是整个移动机器人平台的动力来源，稳定可靠、抗干扰能力强以及高效的电源管理系统是移动机器人正常稳定工作与的重要保障^[35]。本文设计的移动机器人平台需要兼容电池供电系统，设计中需要考虑整个系统各个模块的功耗，提供短路保护等措施，提高系统的电源可靠性。

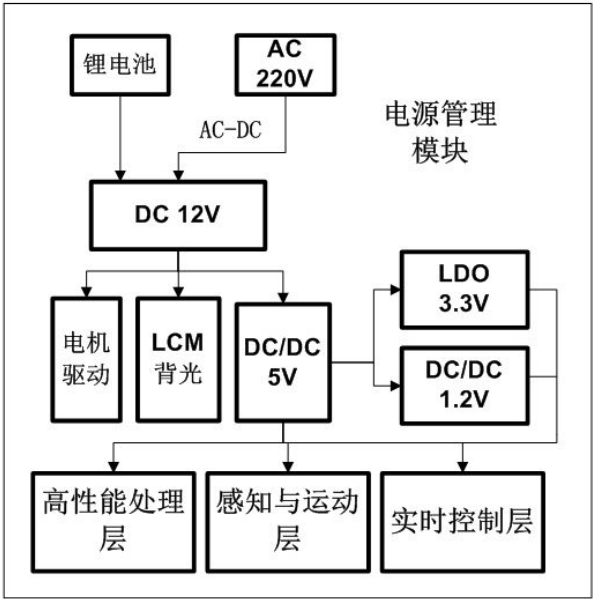


图 3-1 移动机器人电源管理系统结构图

如**错误! 未找到引用源。**所示，移动机器人系统最终电源来源有两种，一种是 220V 交流电源，一种是来自锂电池（14.8V）的输出处理。而机器人平台需要的电源分别有 1.2V、3.3V、5V、12V，需要设计合理的电源管理系统为感知与运动层、实时控制层的各个模块提供稳定的电源。其中 220V 交流电需要经过 AC-DC 降压处理，整流滤波降压处理得到 12V。5V 电源是整个外设系统的电源入口，是将 12V 的 DC 输入直接转换为 5V，考虑到电源效率以及散热等因素，这一级压降很大，采用 DC/DC 方式进行稳压。然后需要的 3.3V 电压直接由 5V 转换而来，压差较小，采用 LDO 方式进行稳压。

此处的高性能处理层只是是当选择使用成熟的高性能开发板才会有电源需求，若

是使用通用计算机、手机、平板电脑，则无需考虑供电问题。

移动机器人系统电源需求分析如表 3-5 所示：

表 3-5 机器人平台电源需求简表

技术参数	3.3V	5V	12V	1.2V
感知与运动层	各种传感器模块	舵机	电机	
实时控制层	实时控制板大部分器件	USB、LCM等外设		FPGA内核
高性能处理层	核心处理器及外围器件	USB		

3.5.1 1.2V 稳压电源模块设计与选型

由数据手册可知，XC6SLX45 芯片的内核电源 VCCINT 工作电压 1.2V 左右，电流峰值约为 800mA。本文设计的 1.2V 电源是由 5V 电源而来，为了提高电源的效率以及防止过热，故采用 MPS 产品 DC/DC 型稳压器 MP2249 作为该部分电源稳压芯片。电路原理图如 3-16 所示。

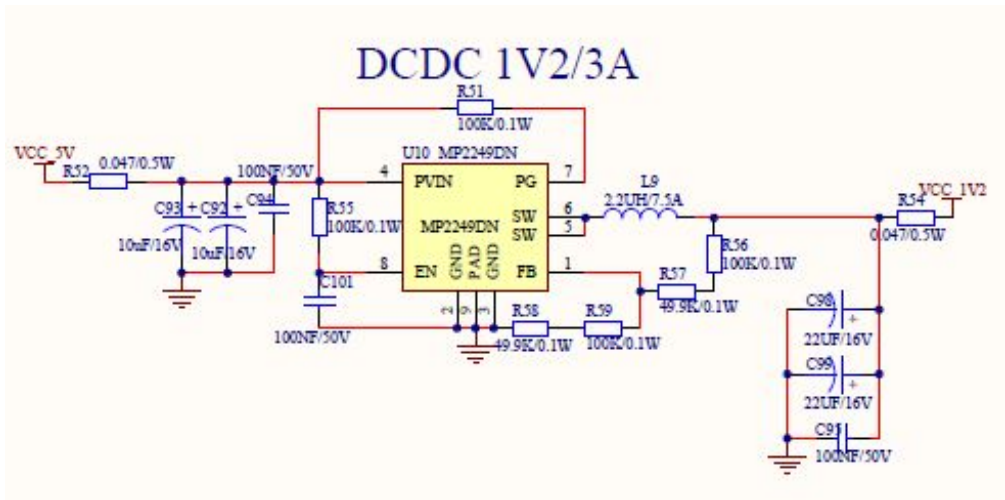


图 3-2 DCDC 1.2V 稳压电源

3.5.2 3.3V 稳压电源模块设计与选型

对 3.3V 稳压电压有需求的包括感知与运动层的传感器，实时控制层的 ARM 子系统、FPGA 子系统、存储器模块及大部分外设模块，以及高性能处理层（选择高性能开发板时）的核心控制器及相关外设，具体如表 3-6 所示。

表 3-6 3.3V 电源需求简表

	器件	型号	峰值估计	最小	最大
实时控制层	ARMv7	K60	100mA	+3.0V	+3.6V
	SRAM	IS61LV25616	300mA	+3.0V	+3.6V
	FPGA	X6SLX25	500mA	+3.135	+3.465
高性能处理层	-	-	1000mA	-	-
传感器	-	-	500mA	-	-
其他部分	-	-	200mA	+3.0V	+3.6V
合计	-	-	2650mA	+3.0V	+3.6V

由表 3- 可以看出 3.3V 供电的设备大多为低功耗设备，工作电流大都是毫安级别，选择凌力尔特公司的 LT1084_3.3V/5A 稳压芯片作为该部分电源，能完全满足负载要求，还能有一定裕量。具体原理图如 3-17 所示。

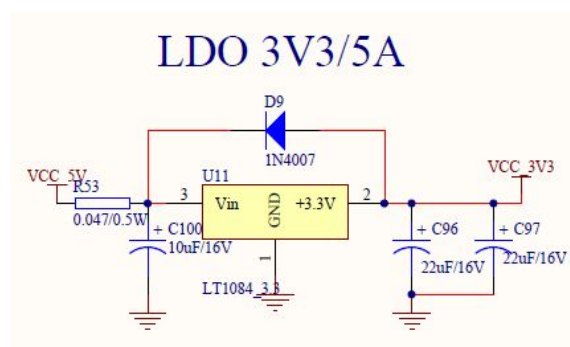


图 3-3 LDO 3.3V 稳压电源

3.5.3 5V 稳压电源模块设计与选型

表 3-7 5V 稳压电源负载估计表

设备	电压	估计负载峰值	类型	效率
LDO 3.3V	3.3V	2650mA	LDO	-
DCDC 1.2V	1.2V	800mA	DC/DC	80%
USB	5V	1000mA	DC/DC	-
其他部分	5V	100mA	DC/DC	-
合计	-	4750mA	-	-

由 3-15 图可以看到，除了电机等少部分器件直接由 12V 供给电源，无需做功耗的考虑，整个机器人平台其他各模块的电源都是由 5V 电源提供的，包括对 1.2V、3.3V

需求的器件其本质也是来自 5V 稳压电源。因此，设计 5V 电源前需要对系统的功耗做初步的估计。将 5V 电源处负载估计如表 3- 所示。

本文设计将 12V 的 DC 输入直接转换为 5V，考虑到电源效率以及散热等因素，这一级压降很大，这个模块采用 DC/DC 方式进行稳压。由表 3-7 知负载峰值估计在 4.8A 左右，再留一定的裕量，选择 MPS 产品 MP9415 作为 5V 稳压电源稳压芯片，该芯片最大负载为 5A，效率能达到 80% 以上，支持 4.5-16V 的输入电压，纹波小于 20mV，开关频率为 500KHz。电路原理如图 3- 所示。

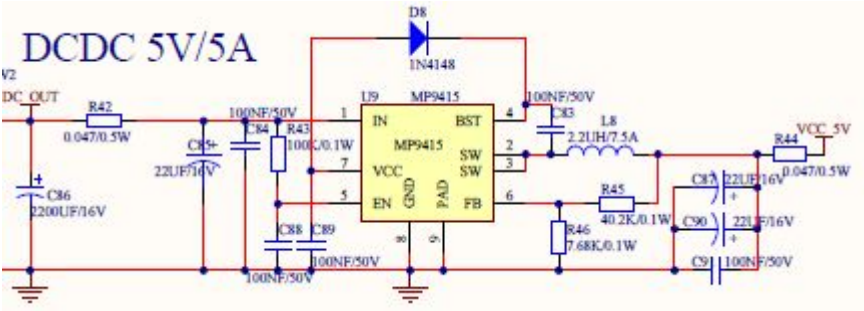


图 3- 18 DCDC 5.0V 稳压电源

3.5.4 动力电池选型

电池类型	重量能量密度 (Wh/kg)	体积能量密度 (Wh/l)	功率密度 (W/kg)	循环寿命 (次)	成本 (元/wh)
铅酸电池	30-40	120	200-400	500	0.7
镍镉电池	50-60	110	200-400	1000	2.5
镍氢电池	80-90	150-200	400-1200	1000	4.0
锂离子电池	120	210	400-1000	1000	4.0

图 3- 4 动力电池特性对比

目前市面上常用的动力电池^{[32][43]}有铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂聚合物电池、太阳能电池等，其特性对比如图 3-19 所示。铅酸电池价格低、工艺成熟，支持大电流放电，但其功率密度等各项指标都较低，多用于电动自行车；经济耐用、充电快，但记忆效应、污染环境都降低了其市场需求；比起镍镉电池，镍氢电池安全环保、可靠，但性价比略低，还是有一定的记忆效应；锂离子电池能量比大、安全无污染、使用寿命长、无记忆效应，但也有容量会缓慢衰退、无法过充过放电、容易爆炸等缺点，

其升级产品锂聚合物电池容量比同样大小的锂离子电池高出一倍，且具备突出的爆发能力。

移动机器人对电池的特性需求是重量轻体积小、能量密度高、爆发力强、使用寿命长，综合考虑本文选择性价比较高、市场占有率较高的锂聚合物电池作为移动机器人平台的离线动力源，具体选择为 4 芯锂聚合物电池（单芯 3.7V）。

3.6 本章小结

根据上一章提供的需求分析和设计方法，本章具体分析了移动机器人平台感知与运动层、实时控制层各个模块的硬件方案，同时介绍了机器人平台电源系统的具体设计分析，初步完成对移动机器人平台的搭建。

4 移动机器人平台的软件系统设计分析

移动机器人的性能除了取决于机械结构和硬件设计的优劣，还同软件系统有着紧密的联系。机器人的软件系统设计与开发是基于硬件和机械平台的，而且需要在实践和理论分析中不断的优化，帮助出机器人更好的发挥其硬件性能。本文的目的是设计一个开放式的机器人平台系统，具备较高的灵活性和可扩展性，能应用在不同的领域和任务中。嵌入式软件设计一般包括驱动程序、操作系统、应用程序等，在本章中主要介绍机器人平台的软件系统结构、传感器信号处理及电机驱动方案。

4.1 移动机器人平台的软件设计方案

本文中的移动机器人平台由移动平台、感知与运动层、实时控制层、高性能处理层组成，其软件设计在后面三个部分中。其中感知与运动层主要是需要接口数据转换、基础驱动程序，高性能处理层选择成熟的产品，都不是本文研究重点。本文将重点介绍实时控制层的软件结构。实时控制层是整个机器人平台的控制核心，负责控制机器人实现如对感知与运动层的数据处理、与高性能处理层的数据交互等操作，故软件设计方案应尽量保证其具备开源、安全可靠、易维护、效率高的特性。

4.1.1 实时控制层的软件架构分析

在完成巡线、跟踪等功能时，移动机器人平台中的运动控制、传感器信号处理等任务都对实时性有很高的要求。这些都无法用简单的前后台程序实现，需要在实时控制层搭载嵌入式实时操作系统 RTOS (Real-Time Operating System) 辅助其实现实时控制与实时计算的功能。除此之外，还需要在软件平台中添加各种中间件、驱动程序和组件系统，才能帮助机器人加载应用程序实现特定的功能和任务。

实时控制层软件架构如图 4-1 所示，可以看到整个软件设计是基于硬件的，以实时操作系统为核心，加上 FatFS、TINET、USB 等中间件，并提供 API 以便开发者实现应用程序的设计。

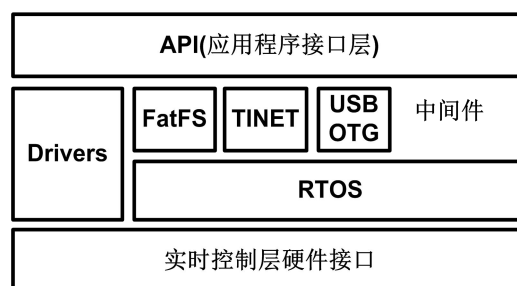


图 4-1 实时控制层软件架构图

4.1.2 实时操作系统的分析与选型

实时操作系统能够管理硬件资源，帮助应用程序开发者绕过硬件编程，专注于算法和程序架构的研究上，并能降低应用程序开发难度、提高软件重用性。市面上已经出现许多以实时操作系统（RTOS）为核心的嵌入式系统软件平台，一种是在可靠性、稳定性、开发工具等方面占优但收费的商业平台，一种是各方面有劣势但免费的开源平台。在实际应用中，常用的 RTOS 包括 eCOS、 μ C/OS-II^[44]、RTEMS、FreeRTOS、TOPPERS/ASP、RT-Thread 等。2000 年，来自日本的高田教授（Hiroaki Takada）发起 TOPPERS 工程，旨在创建一个针对中小嵌入式系统的开源软件平台^[45]。TOPPERS 平台主要专注于内核与中间件的研究，其 TOPPERS/ASP 内核具有开源、高性能高可靠性、开发工具链完备等多种优点，非常适合应用在中小型嵌入式系统中。较于 μ C/OS-II、FreeRTOS、RT-Thread 等实时内核，TOPPERS/ASP 在功能、性能、存储消耗上都更加优秀，故本文选择 TOPPERS/ASP 作为机器人平台的软件核心。

4.1.3 中间件与驱动部分的设计分析

（1） 文件系统设计分析

文件系统用于管理文件和目录，是嵌入式系统中非常重要的中间件。在嵌入式领域，目前常用的文件系统有 μ C/FS，开源的 EFSL，以及通用的 FatFS^[35]。其中 μ C/FS 是一个可移植、性能优良的文件系统，但需要购买版权才能使用。EFSL 是一款开源免费的文件系统，但在性能、功能上有待完善。FatFS 是一个通用的文件系统，不依赖于硬件平台，且已有现存的移植到 TOPPERS 内核的范例。综合考虑成本、性能等

因素，故本文选择 FatFS 作为移动机器人平台实时控制层的文件系统。

(2) TCP/IP 协议栈设计分析

由于本文的实时操作系统选择 TOPPERS 内核，因此 TCP/IP 协议栈选择与 TOPPERS 配套的 TINET。TINET 遵循 ITRON TCP/IP API 规范和弱标准化的原则，方便根据协议类型定义最合适的 API，支持静态配置^[46]。

(3) USB 协议栈设计分析

USB-OTG 在兼容 USB2.0 的基础上，添加了电源管理功能，支持设备实现主机和外设两种模式。作为主机时主要需要实现与 U 盘等存储器的数据交互，作为从机时需要实现与主机的通讯。机器人平台的主控制器 K60DN512 芯片内部集成了 USB-OTG 的控制模块，综合考虑开源、支持 DMA、性能等方面，本文选择 NXP 公司的 LPCUSB 移植为平台的 USB 协议栈。

(4) 外设驱动设计分析

本平台还必须开发一些常用外设的驱动程序，这些大都是基于具体的硬件平台设计的，例如 IIC 总线、SPI 总线驱动，定时器资源驱动等。

4.2 传感器模块的控制方案

本文介绍的移动机器人平台能够支持多种传感器，包括红外传感器、图像传感器、超声波传感器等等，主要面向自主巡线等应用，本文将就 LC 谐振传感器、视觉传感器详细介绍控制传感器时的数据处理方案。

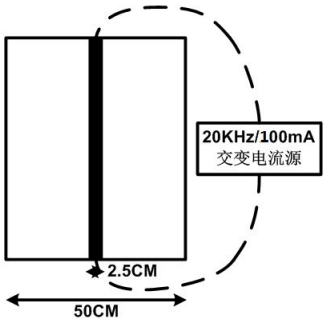


图 4-2 自主巡线的路面信息

机器人完成自主巡线的路面信息，如图 4-2 所示。整个路面由白色底层、黑线层、导线构成，其中白色底层宽 50cm，宽 2.5cm 的黑线层位于白色底层的正中间，黑线层下面的导线通过 20KHz/100mA 的交流电，产生用于巡线的突变磁场。

4.2.1 视觉传感器的数据处理方案

作为机器人实现自主巡线所需传感器中最常用的一类，尽管会占用很多资源用于信号处理，视觉传感器通常因精确性、检测范围大、高性价比成为最终选择。本文介绍的移动机器人平台在图像传感器模块上采用数字摄像头接口设计，引出 8 位数据线、同步信号线、控制信号线，可以兼容市面上很多成熟的数字摄像头模块。综合成本、性能等因素的考虑，选择 Omni Vision 公司的 OV7620 图像传感器。

OV7620 是一种 1/3 英寸数字式 CMOS 彩色/黑白图像传感器，最高像素为 664*492，帧速率为 30fps。内置 10 位双通道 AD 转换器，分别输出 8 位图像数据，支持 8bit/16bit 数据输出，格式包括 YUV、YcrCb、RGB 三种，基本能够满足一般图像采集系统的要求。为了提高图像数据处理效率，在本文的设计中由 FPGA 对摄像头密集数据进行低通滤波、灰度二值化处理等预处理，再交由 ARM 实现进一步的优化处理工作，从而实现对图像信号的采集。

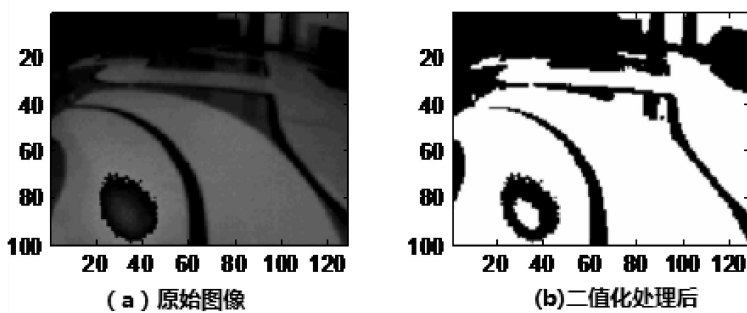


图 4-3 摄像头拍摄处理前后的图片对比

由摄像头采集到的原始图像和经过二值化处理后的一幅图像对比，如图 4-3 所示，图中可以非常清晰的看到路面黑线形成的有效信号，以及由阴影、路边杂物、噪点组成的无效信号。机器人实现自主巡线算法需要巡线目标在图像中的位置，也就是路面上黑线在图像中的坐标，在本文中通过软硬件结合的方式，利用 FPGA 高速并行

计算的特点来处理初始的大数据，得到有效的坐标交由算法使用。

由 OV7620 摄像头输出的数字图像处理流程图，如图 4-4 所示。摄像头输出的数据包括行同步信号、帧同步信号、像素同步信号及并行数据总线传输的图像灰度数据。摄像头采集的初始数据先经过 FPGA 进行预处理，再由 ARM 进行进一步优化和计算。

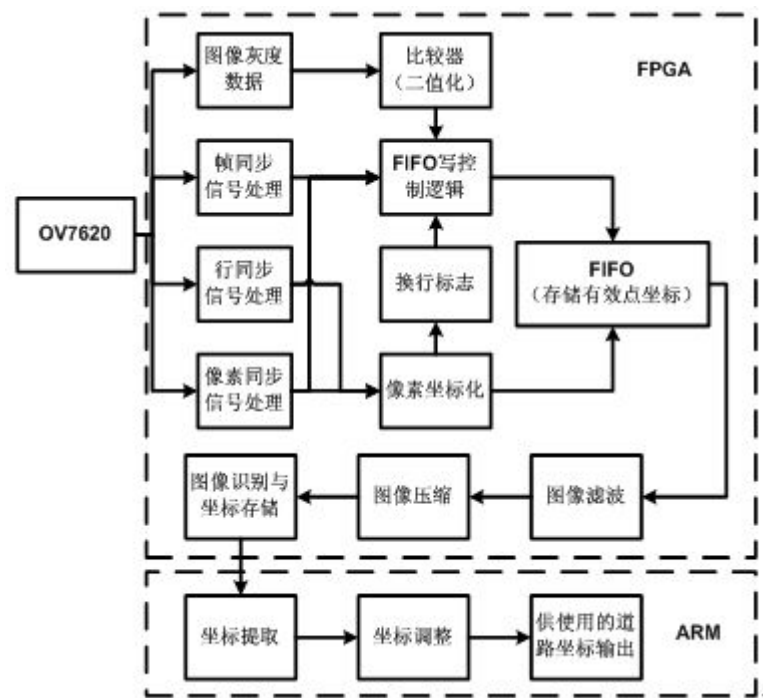


图 4-4 摄像头数字图像处理流程图

由图 4-4 可以看出，数字图像在 FPGA 中的处理包括：对图像的灰度值二值化处理，对同步信号进行滤波等处理，并通过计数器实时计算出黑点坐标；将二值化得到的比较结果与同步信号进行逻辑运算，并配合行末坐标控制，将黑点坐标信号写入 FIFO 中进行存储。由图像处理单元读取 FIFO 中的坐标，进行滤波、图像细化并存储，得到将在 ARM 中后续处理的目标路径坐标。

ARM 对数字图像的后续处理包括：通过外部存储总线提取经 FPGA 预处理后的目标路径坐标，通过滤波、几何特征运算等方式做进一步优化与调整，再将目标道路坐标组数据输出。

4.2.2 电磁传感器数据处理方案

传感器目标路面设有一根用于路径导航的电磁诱导信号线，并通过 20KHz/100mA 的交变电流。根据麦克斯韦电磁理论，交变电流会产生突变电磁场，20KHz 的频率会得到低频电磁波。通过检测电磁波强度和方向可以得到诱导信号线的位置信息，本文采用多个 LC 谐振传感器对信号进行采集，初始信号为多个模拟信号，需要通过采样、数据归一化、滤波、目标偏差计算，才能得到供应用软件使用的信号数据。

(1) 电磁传感器信号预处理

在对初始信号进行采样前，首先需要对每个 LC 谐振传感器进行标定。利用传感器离导线越远感应电动势越小的原理，测出每个传感器与诱导信号线中心偏移不同时的接收值，选取几个特殊点得出特征曲线，保存在存储器中以便迅速得出某一传感器的偏移值。还应考虑环境的干扰，通过远离和贴近信号诱导线，测出每个传感器的最低平均接收值与最高平均接收值。由于电磁传感器中的各个接收器存在差异，需要对信号 AD 采样结果做归一化处理，以方便后续使用。其原理是利用每个传感器得到的电压的最大和最小值，计算其相对值，公式如下：

$$\text{相对值} = \frac{(\text{测量值} - \text{最低电压})}{(\text{最高电压} - \text{最低电压})} * 100 \quad (4-1)$$

在应用中，还应考虑到震动、附近电磁波的干扰，在归一化处理后进行滤波去噪。传感器扫描频率为 100Hz 左右，机器人移动速度很慢，约 0.6m/s，因此电磁传感器的信号很难发生突变，只需将即时信号数据与上次存储的信号数据对比，将发生突变的数据去掉即可。

(2) 目标偏差计算

将诱导信号线作为无限长直线处理，根据毕奥-萨伐尔定律、几何关系可知，与信号线垂直距离为 s 的电磁传感器所在位置的磁场强度为：

$$B_s = K_B \cdot \frac{h}{s^2 + h^2}, \quad (4-2)$$

其中 B_s 为与信号线垂直距离为 s 的电磁传感器位置的磁场强度， K_B 为毕奥-萨伐尔系

数， s 为电磁传感器与诱导信号线的距离， h 为电磁传感器所在高度（距路面）。

磁场强度与传感器在该位置的谐振电压成正比，可知该位置传感器的输出电压为：

$$U = A \bullet \frac{h}{s^2 + h^2} , \quad (4-3)$$

其中 A 为系数， U 为垂直距离为 s 的电磁传感器输出的电压值（经放大等处理）。

为了提升信号精度，本文采用多对电磁传感器同时采集路面信号，对称分布在车体左右两边，将对称位置的输出电压进行差值运算，即得诱导信号线与机器人的位置关系。设式(4-3)中左侧传感器的输出电压和距离分别为 U_l 和 S_l ，右侧传感器的输出电压和距离分别为 U_r 和 S_r ，则一对传感器间的距离为 $S = S_l + S_r$ ，其中心与信号诱导线的偏移距离为 $S_{offset} = \frac{S_l - S_r}{2}$ 。带入到式(4-3)中，可得：

$$\frac{1}{S_l} - \frac{1}{S_r} = A \bullet \frac{S_l^2 - S_r^2}{h} , \quad (4-4)$$

化简后可得：

$$S_{offset} = A_o \bullet \frac{h}{S} \bullet \frac{U_r - U_l}{U_r \bullet U_l} , \quad (4-5)$$

其中 A_o 为 S_{offset} 的系数，可由特性标定法测得。

由(4-5)可得到一组对称传感器的中线与诱导信号线的偏移距离跟其输出电压的关系。

4.3 电机驱动控制方案

本文采用四轮独立驱动来控制移动机器人实现转向、行进等运动，没有舵机这种转向装置，在进行非直线运动时，需要将转向速度分解到四个轮子上，再结合直行分量算出移动机器人的运动状态。

4.3.1 机器人移动方案设计

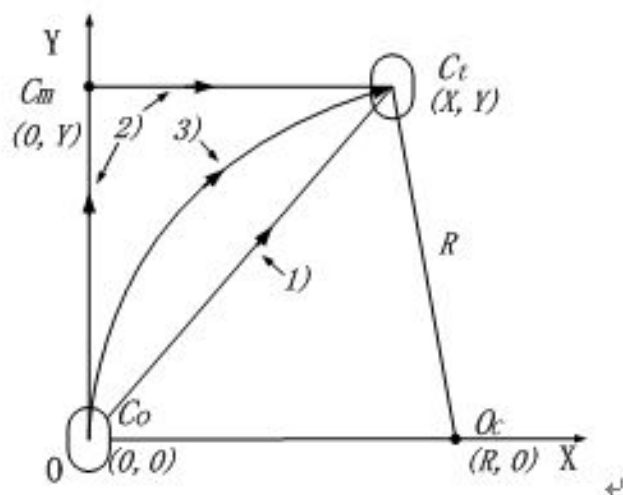


图 4-5 机器人移动轨迹图

在移动机器人研究中，要建立一个彻底真实的运动学数学模型是不可能，也没有多少实用价值的，只需一个简化了的模型以求反应机器人移动轨迹即可，如图 4-5 所示。用大写字母 C 表示机器人的几何中心位置，机器人轮子（椭圆）切向和法向分别为 Y 轴和 X 轴。如果机器人计划从 $C_o(0,0)$ 移动至 $C_t(X,Y)$ ，耗时为 t ，有很多移动方案，其中比较简单的三种方案^[32]如下：

路线 1，先转向至正对目标点 C_t ，然后直线抵达；路线 2，走矩形路线经 $C_o-C_m-C_t$ ，需在 C_m 处转向；路线 3，规划圆弧路径，以 O_c 点为圆心沿圆弧 3 匀速运动至 C_t 。

方案 1 与方案 2 都很容易实现。方案 1 是走最短路径的直线运动，但不适用于机器人的连续移动任务；方案 2 和方案 1 都需要经过原地转向，耗时长，而且走矩形路线效率太低。相较之下，本文使用的方案 3 尽管设计更为复杂、路径非最短，但移动机器人移动更为平滑稳定，非常适合用于传感器目标识别的控制设计中。

4.3.2 移动机器人各轮的速度分析与计算

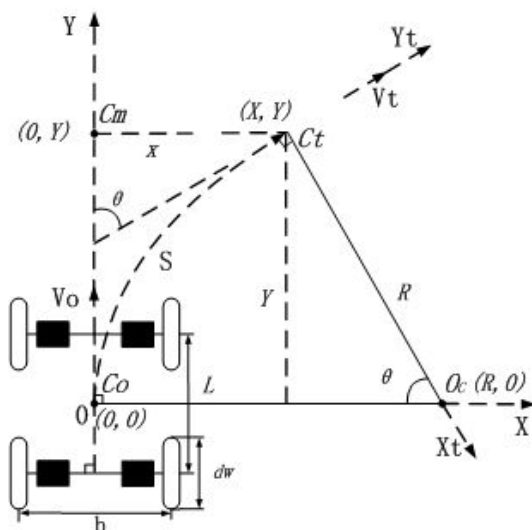


图 4-6 机器人运动学模型

机器人运动学模型如图 4-6 所示，对移动机器人的瞬时运动状态（ θ 无限小）进行分解，由几何关系可得移动轨迹约束方程组(4-6)如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \arcsin \frac{Y}{R} \\ R^2 = Y^2 + (R - X)^2 \\ S = V \cdot t = R \cdot \theta \\ V_y = \frac{dY}{dt} = R \cdot \omega = V \\ \omega_m = \omega = \frac{\theta}{t} = \frac{V}{R} \end{array} \right. , \quad (4-6)$$

其中 θ 为机器人在时间 t 内转动的角度（无限小）， X, Y 为机器人的位移在 X 轴与 Y 轴方向的分量， R 为机器人转向圆弧的半径， S 为机器人的运动路程， V 为机器人圆弧运动的线速度， V_y 为机器人沿 Y 轴的平均速度， ω_m 为机器人自转的角速度， ω 为机器人圆弧运动的角速度， t 为机器人移动的总时间。

本文介绍的移动机器人是四轮独立驱动，随后将对如何实现 Y 轴方向的运动和自身转动两种运动进行分析。

(1) 平均速度为 V_y 沿 Y 轴的直线运动

只需令四个轮子的速度均为 $V_y=V$ ，且方向相同，就能实现沿 Y 轴方向以平均速度 V_y 进行的直线运动。

(2) 以角速度 ω_m 的自转

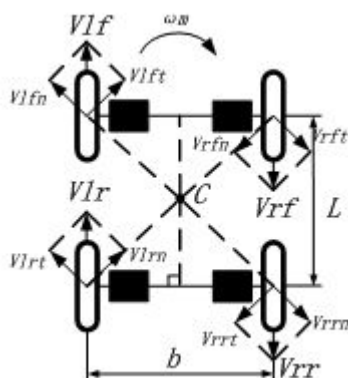


图 4-7 移动机器人转向状态运动学分解

图 4-7 为转向运动分解图，按图示对各轮的瞬时速度都沿对角线及其垂线分解即得式(4-7):

$$\begin{cases} V_t = \frac{b}{\sqrt{L^2 + b^2}} V \\ V_n = \frac{L}{\sqrt{L^2 + b^2}} V \end{cases}, \quad (4-7)$$

其中 L 为机器人前后轮的间距， b 为机器人左右轮的间距， V 为机器人各轮速度， V_t 为机器人各轮沿机器人对角线的切向速度分量， V_n 为机器人各轮沿机器人对角线的垂线的速度分量。

本节后文做如下设定：对于参数 X ，四个轮子分别为 $X_{lf}, X_{lr}, X_{rf}, X_{rr}$ ，示例见图 4-7。

由式(4-6)、(4-7)可以得到每个轮子的期望速度 $V_{lf}, V_{lr}, V_{rf}, V_{rr}$ 约束方程组(4-8)如下所示：

$$\begin{cases} V_w = \frac{L^2 + b^2}{b} \cdot \omega_m = \frac{L^2 + b^2}{b} \cdot \frac{V}{R} \\ V_{lf} = V_{lr} = V_y + V_w \\ V_{rf} = V_{rr} = V_y - V_w \\ R = \frac{X^2 + Y^2}{2X} \\ V_y = V \end{cases}, \quad (4-8)$$

其中 X, Y 为起始点与目标点的位移在 X 轴与 Y 轴方向的分量, L 为机器人前后轮间距, b 为机器人左右轮间距, V_y 为机器人各轮 Y 轴方向的运动速度分量, V_w 为机器人各个轮子的转动运动速度分量, ω_m 为机器人各个轮子的角速度, V 为机器人的平均线速度, R 为机器人转向圆弧的半径。

$$\text{令 } V = [V_{lf}, V_{lr}, V_{rf}, V_{rr}], \quad K_0 = \frac{L^2 + b^2}{b}, \quad \Delta XY = \frac{2X}{X^2 + Y^2}, \quad v_0 \text{ 为平均速度, 得速度控}$$

制向量:

$$V = v_0 [1 + K_0 \cdot \Delta XY, 1 + K_0 \cdot \Delta XY, 1 - K_0 \cdot \Delta XY, 1 - K_0 \cdot \Delta XY] \quad (4-9)$$

式(4-9)所示为, 移动机器人做连续曲线运动时, 四个轮子的期望速度 V 与所需位置调整 ΔXY 和平均速度 v_0 的函数关系。

4.3.3 给定速度与电机 PWM 的关系

机器人平台采用四台工德国 Faulhaber 直流减速电机, 分析所选电机特性、PWM 原理特性、电机与轮子的物理关系, 可知 PWM 与电机转速的约束方程^[32]如下所示:

$$\begin{cases} U_a = L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a + K_e \cdot \omega \\ \frac{t_{on}}{1/f} \cdot U_{battery} = U_a + R_{on} \cdot i_a \\ v = d_w \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{m} \\ \omega = \frac{n}{60} \cdot 2\pi \end{cases}, \quad (4-10)$$

其中, U_a 为直流电机转子电压, m 为减速比, i_a 为直流电机转子的电流, R_a 为电机转子的电阻, R_{on} 为导通电阻, L_a 为电机转子电感, $U_{battery}$ 为电池提供的输入电压, t_{on} 为单周期内高电平持续时间, f 为 PWM 频率, n 为电机转速 (转每秒), ω 为电机角速度, K_e 为系数, v 为轮子线速度, dw 为机器人轮子直径。

令 $\delta = \frac{1}{U_{battery}} \left(L_a \bullet \frac{di_a}{dt} + R_a \bullet i_a + R_{on} \bullet i_a \right)$, 化简式(4-10)可得:

$$\frac{t_{on}}{1/f} = \frac{2K_e}{U_{battery}} \bullet v \bullet \frac{m}{dw} + \delta \quad (4-11)$$

令 $PWM = \left[\frac{t_{if}}{1/f}, \frac{t_{ir}}{1/f}, \frac{t_{rf}}{1/f}, \frac{t_{rr}}{1/f} \right]$, $K_E = \frac{2K_e}{U_{battery}}$, $\Delta = [\delta_{if}, \delta_{ir}, \delta_{rf}, \delta_{rr}]$, 结合 4.3.2

中得出的速度关系, 可得控制输出与给定的关系:

$$PWM = K_E \bullet \frac{m}{dw} \bullet v \bullet [1 + K_0 \bullet \Delta XY, 1 + K_0 \bullet \Delta XY, 1 - K_0 \bullet \Delta XY, 1 - K_0 \bullet \Delta XY] + \Delta \quad (4-12)$$

其中 m , L , dw , b , K_E 均为常数, Δ 很小可直接忽略, (4-12) 即各电机的给定 PWM 与期望速度 v 、位移 X 和 Y 的关系。

4.3.4 PWM 控制

将目标路面的摩擦系数看做一个常数, 则机器人移动时转动惯量与负载固定不变, 故可对机器人进行 PWM 跟速度、加速度的标定, 通过期望速度、加速度性能综合运算后直接得到各个电机的 PWM。此外, 可采用标定法降低资源占用、减轻控制器负担, 具体方法是利用理论公式和多组对比测试推出变量的特征曲线与关系式中的系数, 就能通过查表来控制电机。

4.4 本章小结

本章具体分析了图像传感器、电磁传感器在自主巡线中的信号处理，以及电机驱动控制的方法，并介绍了移动机器人平台的软件架构的设计。

5 移动机器人平台测试与分析

本章重点介绍了移动机器人平台的电源特性测试和移动机器人的路径识别实验。图 5-1 所示为机器人平台实物图，只是根据测试内容简单的安装了图像传感器模块、电磁传感器模块以及电机驱动模块，经测试系统正常运行。

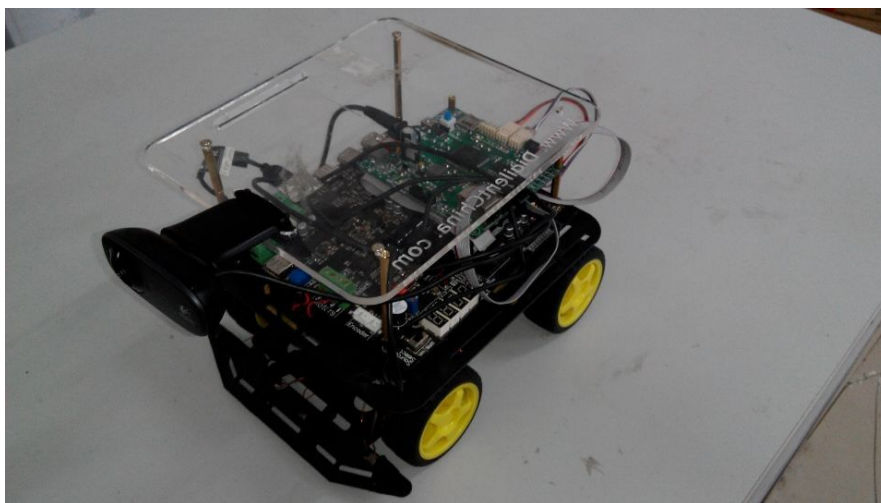


图 5-1 移动机器人平台实物图

5.1 电源完整性测试

5.1.1 测试环境

本文主要对移动机器人平台做电源测试，包括 5V 电源、3.3V 电源、1.2V 电源和 FPGA 上电测试。表 5-1 所示为性能测试环境和测试工具参数。

表 5-1 性能测试环境及工具

环境参数	值	备注	
温度	26℃	室内	
测试仪器	型号	特征参数	备注
万用表	VC9208	手持，数字式，3 位半	
示波器	DLM2054	2.5GS/s, 500MHz	
常规探头	701939	500MHz, 10M Ω ×10, 600V	2 个
差分探头	PBD2000	2GHz, 50K Ω , 1.5pF, \pm 25V	

(1) DCDC-5V 电源性能测试

DCDC 电源具有效率高、输入电压范围宽的特点，但其负载相应较差，而且一般有较大的输出纹波。故本文对 DCDC-5V 电源分别作了波形和纹波测试，结果如图 5-所示,5V 电源的输出电压为 $V_{\max} = 5.12V$, $V_{\min} = 4.81V$, $V_{\text{mean}} = 4.97V$ ，纹波峰值为 44mV，基本符合机器人平台设计需求。

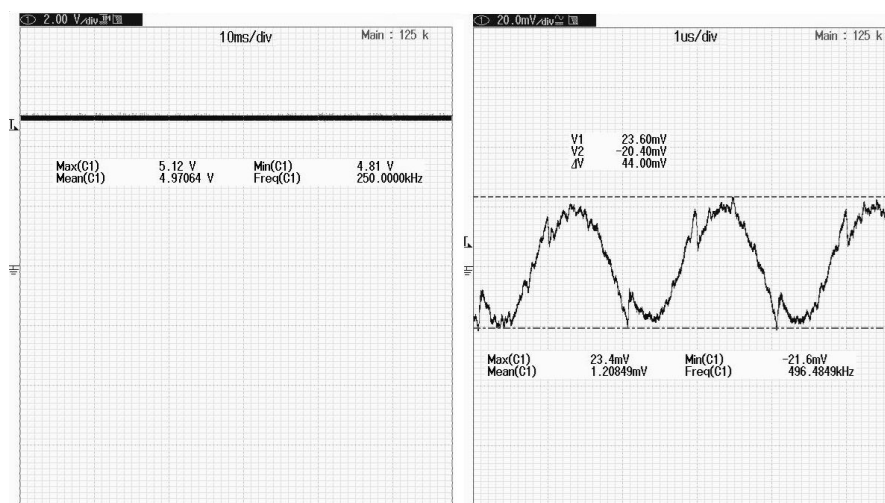


图 5-2 DCDC 5V 电源波形测试（左）与纹波测试（右）

(2) LDO-3.3V 电源性能测试

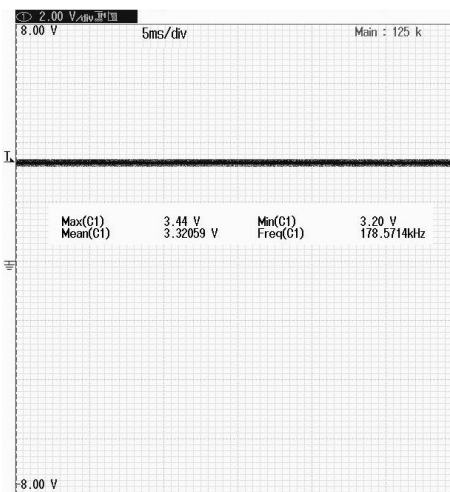


图 5-3 LDO 3.3V 电源波形测试

LDO 电源为低压差稳压源，缺点是效率低、输入电压限制大，但稳定性好、输出

纹波。故对于 3.3V 电源本文不做纹波测试，波形测试结果如图 5- 所示，3.3V 电源的输出电压为 $V_{\max} = 3.44V$, $V_{\min} = 3.20V$, $V_{mean} = 3.32V$ ，基本符合机器人平台设计需求。

(3) DCDC-1.2V 电源性能测试

对 DCDC-1.2V 电源做了波形和纹波测试，结果如图 5-，1.2V 电源输出电压为 $V_{\max} = 1.24V$, $V_{\min} = 1.16V$, $V_{mean} = 1.20V$ ，其纹波峰峰值为 32.4mV，满足系统设计要求。

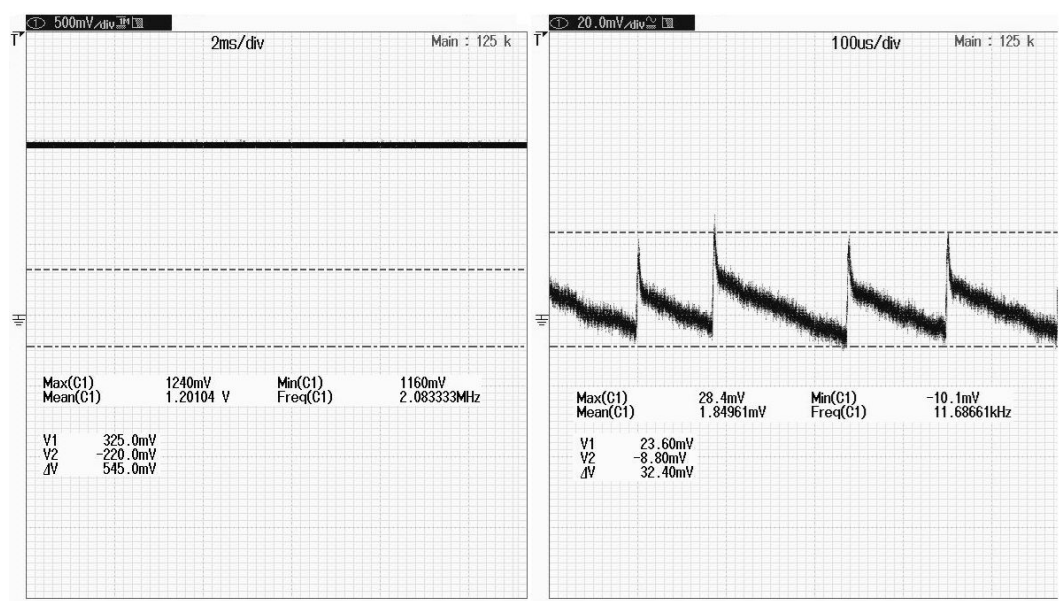


图 5-4 DCDC 1.2V 电源波形测试（左）与纹波测试（右）

5.2 基于图像传感器的路径识别测试

该部分主要以摄像头的图像处理与最终得出的参考路线结论。

将一张目标路面的图像经过二值化、压缩、优化后的结果对比，如图 5- 所示。可以看到，图像经二值化处理后几乎没有变化，仅是由彩色变成了黑白（图 5- 左）；选取黑色路径中心坐标值进行压缩处理，并通过对比处理掉图像中的黑色干扰块，可以得到比较干净的图像（图 5- 中），输出结果为坐标组，此时已经可以直接交由处理器处理了；要对机器人进行控制，还需进一步优化路线，在保证不丢失目标的前提下使控制简单化，优化后结果如图（图 5- 右）。

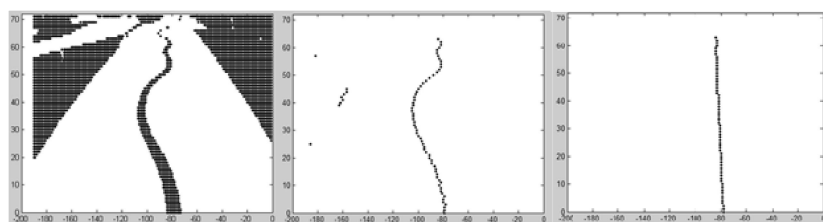


图 5-5 图像的二值化（左）、压缩（中）、优化（右）结果

5.3 本章小结

本章主要对实现的移动机器人平台各部分进行测试与实验，其中基础测试表明移动机器人平台硬件的稳定性以及能够提供足够的开发条件，路径识别实验则用实例的方式验证移动机器人平台机械结构、硬件电路与软件程序的结合操作与基本运行性能。

6 全文总结与展望

6.1 全文总结

根据轮式移动机器人平台的应用需求，本文在综合了国内外轮式机器人设计方案的基础上，设计了一种具备模块化、可扩展性强、硬件灵活性高等优点的移动机器人平台。该平台在硬件上采用 ARM-FPGA 混合架构，充分发挥了 ARM 控制器软件灵活性和 FPGA 硬件灵活性及高速并行运算的优点。本文主要工作包括以下几点：

（1） 移动机器人平台的总体架构设计

按照功能规划了机器人平台的层次化结构，依据模块化的设计理念从机械、硬件、软件三个方面对平台进行了详细的阐述，并针对机器人平台各层需求分别进行分析，从总体上明确了移动机器人感知与运动层、实时控制层的设计方案。

（2） 移动机器人的硬件平台设计方案设计

详细介绍了移动机器人平台感知与运动层、实时控制层各个模块的硬件选型与设计，重点分析和阐述了各层之间、传感器、驱动器的接口设计，旨在提高平台的通用性和扩展性。并对平台的电源管理系统做了全面的研究和分析，初步完成对移动机器人平台的搭建。

（3） 平台软件结构设计、传感器信号处理以及电机驱动分析

软件是移动机器人的灵魂，本文详细阐述了移动机器人平台的软件架构的设计，具体介绍了图像传感器、电磁传感器在自主巡线中的信号处理，以及电机驱动控制的方法，提出了可行的控制方案。

（4） 移动机器人平台的基础测试与实验

通过对移动机器人平台的电源完整性分析的性能测试，摄像头对路径的识别实验，验证了移动机器人平台的可行性。

6.2 研究展望

本文已经基于 ARM-FPGA 混合架构和 TOPPERS 实时操作系统构建了初步完善的小型移动机器人平台，但仍然可以进一步做深入研究，后续工作可以归纳为以下几个方面：

- （1） 对移动机器人的传感器与驱动器做进一步的扩展和改进，使该移动机器人平台能够实现更多的功能，应用在更多的领域中；
- （2） 完善和扩展移动机器人的软件平台，丰富软件中间件、IP 库，更好的帮助软件开发人员提高开发效率，缩减开发成本；
- （3） 相对于日益增长的需求，机器人的控制处理核心资源十分有限，可以考虑多核扩展的方向，提升机器人性能。
- （4） 构建仿真平台，提升人机交互能力，实现手机、平板电脑等常用设备对机器人的控制；

致谢

在华中科技大学两年半研究生阶段的学习与研究，作者感觉受益良多，在此向学校、老师、师兄师姐、师弟师妹、同学表示我最真诚的谢意，感谢你们对我来自各个方面帮助。移动机器人平台的设计仅靠一个人的力量是无法完成的，感谢实验室研究团队的开发成员为该机器人平台的设计开发做出的努力，感谢实验室师兄打下的良好基础。

感谢我的父母对我的大力支持，养育之恩，无以回报，希望你们永远健康快乐。

感谢我的导师关治洪教授和何顶新副教授在学习和生活中对我的悉心教导和谆谆教诲。关老师渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风，将一直是我今后工作、学习的标杆。感谢何老师老师和他优秀的团队，在这里我不仅学到了技术能力和学术知识，更多的是学到了如何做人、如何做事，何老师朴实、平易近人的人格魅力对本人影响深远。

感谢瑞萨实验室的所有成员；感谢任慰师兄在移动机器人理论，嵌入式系统理论、实时操作系统、计算机体系结构以及学科前沿研究上对我的帮助与指导；感谢张慧琳师姐、顾强师兄、周波师兄、郑凯师兄、汪卓师兄对我的指导与帮助；感谢方华启、陈小丽、彭柳、在学习与研究过程中的合作；感谢牛盼情、胡灿、胡春旭、马浩以及实验室的师弟师妹们在开发过程中的支持与建议。感谢大家在实验室中的团结拼搏，和谐相处，是在大家提供的良好氛围中，课题才能顺利完成。

最后，感谢所有其他关心过、支持过我的各位朋友们。

参考文献

- [1] Nils J. Nilsson. A mobile automation: an application of artificial intelligence techniques. In the International Joint Conference on Artificial Intelligence, Washington DC, 1969, 509~520
- [2] 蔡自兴. 机器人学[M]. 清华大学出版社, 2000
- [3] 方正, 杨华, 胡益民, 等, 嵌入式智能机器人平台研究[J], 机器人, 2006, 28(1):54-58
- [4] 嵌入式系统设计与实例开发[M]. 清华大学出版社, 2002.
- [5] 肖刚, 周兴铭. 微处理器的现状及发展. 微处理机, 1998, 3: 1~7
- [6] Schaller R R. Moore's law: past, present and future[J]. Spectrum, IEEE, 1997, 34(6): 52-59.
- [7] Dickmanns E.D., Behringer R., Dickmanns D. et al. The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. Proc. 1994 IEEE Symp on Intelligent Vehicles: IEEE Press Piscataway, N J, Paris, 1994, 68~73
- [8] 韦照川, 李德明. 嵌入式系统发展概述. 科技信息, 2010, 1: 839
- [9] Mollick E.. Establishing Moore's Law. Annals of the history of computing. IEEE, 2006, 28(3): 62~75
- [10] 何荣森, 何希顺, 张跃. 从 ARM 体系看嵌入式处理器的发展. 微电子学与计算机, 2005, 5: 42~45
- [11] 吴学智, 戚玉华, 林海涛等. 基于 ARM 的嵌入式系统设计与开发. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 30~36
- [12] 陈志灵. 智能移动机器人嵌入式控制系统开发与设计: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008
- [13] 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:

- [14] R. Krohling, Y. Zhou, A. Tyrrell. Evolving FPGA-based robot controllers using an evolutionary algorithm. In the 1st International Conference on Artificial Immune Systems, Canterbury, 2002, 41~46
- [15] Low T'Liu Y H, Eelhajj I. Cooperative control of internet based multi-robot systems with force reflection. In the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003, 14~44
- [16] J. McLurkin, J. Smith. Distributed algorithms for dispersion in indoor environments using a swarm of autonomous mobile robots. In the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, Toulouse, 2004, 4:399~408
- [17] Leong P.H.W., Tsoi K.H.. Field programmable gate array technology for robotics applications. In the IEEE International Conference on Robotics and Bioimetics, Hong Kong and Macau, 2005, 295~298
- [18] Caprari G., Colot A., Siegwart R. et al. Animal and robot mixed societies: building cooperation between microrobots and cockroaches. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2005, 12(2): 58~65
- [19] S. S. Solano, A. J. Cabrera, I. Baturone et al. FPGA implementation of embedded fuzzy controllers for robotic applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 4(54): 1937~1945
- [20] Yan Meng, Kerry Johnson, Brian Simms et al. A generic architecture of modular embedded system for miniature mobile robots. In the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice , 2008, 22~26
- [21] 李佳宁, 易建强, 赵冬斌, 等. 移动机器人体系结构研究进展[J]. 机器人, 2003, 25(7): 756-760
- [22] Thorpe C, Hebert M, Kanade T et al. Toward autonomous driving: the CMU NavLab part II-architecture and systems. IEEE Expert, 1991, 43~52

- [23] Dickmanns E.D., Behringer R., Dickmanns D. et al. The seeing passenger car ‘VaMoRs-P’. Proc. 1994 IEEE Symp on Intelligent Vehicles: IEEE Press Piscataway, N J, Paris, 1994, 68~73
- [24] 高山. 智能汽车指日可待[J]. 科学时代, 2003 (05S): 30-31
- [25] Thomanek F., Dickmanns E.D. et al. Multiple object recognition and scene interpretation for autonomous road vehicle guidance. In Proceedings of the Intelligent Vehicles'94 Symposium, Paris, 1994, 231~236
- [26] 何俊学, 李战明. 基于视觉的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(8): 2839-2843
- [27] 韦照川, 李德明. 嵌入式系统发展概述. 科技信息, 2010, 1: 839
- [28] R. Chapuis, A. Potelle, J.L. Brame et al. Real-time vehicle trajectory supervision on the highway. International Journal of Robotics Research, 1995, 14(6): 531~542
- [29] He Kezhong, Sun Haihang, Guo Muhe et al. Research of intelligent mobile robot key techniques. In the IEEE International Conference on Industrial Technology, Shanghai, 1996, 503~507
- [30] 何克忠, 郭木河, 王宏等. 智能移动机器人技术研究. 机器人技术与应用, 1996, 2: 11~13
- [31] 王宏, 何克忠, 张钺. 智能车辆的自动驾驶与辅助导航. 机器人, 1997, 19(2): 155~160
- [32] 欧青立, 何克忠. 室外只能移动机器人的发展及其关键技术研究. 机器人, 2000, 22(6): 519~526
- [33] Nguyen Thi Huong G, Na Y, Kim S W. Applying frame layout to hardware design in FPGA for seamless support of cross calls in CPU-FPGA coupling architecture[J]. Microprocessors and Microsystems, 2011, 35(5): 462-472
- [34] 王作为, 张汝波. 自主发育智能机器人体系结构研究[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(11): 36-39

- [35] 胡航笛. 基于 ARM+ FPGA 的模块化移动机器人平台设计[D]. 华中科技大学, 2012.
- [36] 赵文平. 方向转角控制车轮差动电动汽车驱动装置设计分析[J]. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2012, 28(2): 190-192
- [37] 王志文,郭戈. 移动机器人导航技术现状与展望. 机器人,2003,25(5): 470-474.
- [38] Thomas Braunl. Embedded Robotics Mobile robot design and applications with embedded systems. (Second Edition). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [39] 魏永广. 现代传感技术. (第一版). 哈尔滨:东北大学出版社, 2001
- [40] 图像传感器应用技术[M]. 电子工业出版社, 2003
- [41] 熊平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. 半导体光电, 2004, 25(1): 1-4.
- [42] Edwards M D, Forrest J, Whelan A E. Acceleration of software algorithms using hardware/software co-design techniques[J]. Journal of Systems architecture, 1997, 42(9): 697-707
- [43] 郑如定, 锂离子电池和锂聚合物电池概述. 通信电源技术, 2002,10(5): 18~21
- [44] Jean J.Labrosse 著, 邵贝贝 等译. 嵌入式实时操作系统 μ C/OS-II. (第二版). 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- [45] Wei Ren, Dingxin He, Jin Zhao. A performance evaluation of RTOS for TOPPERS/ASP kernel. In the 13th IEEE Joint International Computer Science and Information Technology Conference on, Chongqing, 2011, 61~65
- [46] 付君. 嵌入式 TCP/IP 协议栈 TINET 的移植研究[D]. 华中科技大学, 2011.
- [47] Hangdi Hu, Wei Ren, Dingxin He. Design and Implementation of Multi-motor Coordination and Control System for The Wheeled Mobile Robot. The 2nd IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering, LuShan, 2012 (Accepted)

附录 攻读学位期间发表论文目录

- [1] 程昊, 任慰. 基于K60+FPGA的小型移动机器人硬件设计[J]. 数字技术与应用, 2013,12