

分 类 号_____

学号 M200971906

学校代码 10487

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

基于 ARM+FPGA 的 模块化移动机器人平台设计

学位申请人：胡航笛

学科专业： 控制理论与控制工程

指导教师： 何顶新 副教授

答辩日期： 2012 年 2 月 9 日

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

**Design of a Modular Mobile Robot Platform
Based on ARM + FPGA**

Candidate : Hu Hangdi

Major : Control Theory and Control Engineering

Supervisor : Associate Professor He Dingxin

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

February, 2012

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

移动机器人作为科研与应用的热点已经有很长一段时间，各科研机构与企业投入大量人力物力时间进行研制与开发，研制出多种实用的移动机器人，它们在工业、农业、生活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重要的一种实现方式，经过多年的发展，人们研发出各种轮式移动机器人，解决不同的研究与应用问题。但是由于这些研究与开发均是针对独立问题进行，故其开发的移动机器人往往是特定解决某一类问题，如果有新的需求，就需要重新对机械结构、硬件电路、软件程序进行设计。

本文从机器人设计的原理出发，自上而下地对轮式移动机器人的构成原理进行分析，提出一种模块化、可根据需求快速重配置的移动机器人平台设计方法，降低了设计的时间，提高了机器人的硬件复用率。本文中设计的移动机器人根据其物理组成为三大部分：机械结构、硬件电路、软件程序。结构上采用 4 轮独立控制与驱动的底盘；硬件与软件分为三层：传感与驱动层、实时控制层（电源管理系统）、高性能处理层。系统核心为实时控制层，其采用一片 ARM7 微控制器与一片 FPGA 构成核心处理单元，扩展足够使用的存储器，搭载常用嵌入式通讯协议接口，以及各种外设；传感与驱动层作为系统的信息获取与执行单位设计通用接口便于设备数量与种类的增减；高性能处理层作为系统的扩展部分，采用最新的高性能嵌入式器作为核心。搭好移动机器人平台后，本文进行一系列的测试与实验对移动机器人平台功能性能进行检测。

关键词：移动机器人，模块化，嵌入式系统，传感器

Abstract

As a focus, the research on mobile robot had been hot for a long time. A number of useful mobile robots which has been wide used in industry, agriculture and daily life were invested by many research institutes and corporations which used a lot of human resources, time and money to develop. Wheeled mobile robot as one of the most important implementation ways of mobile robot, after years of development, researcher and manufacturers have designed and produced various sorts of wheeled mobile robots to solve these real existent problems. However, these research and development are carried out for independence, so the development of the mobile robot is often to solve a specific class of problems, if there is a new demand, we need re-design architecture, hardware and software.

In this thesis, it analysis the mobile robot design principles from top to down and summaris the mobile robot every parts' needs layer by layer. It presents a modular, reconfigurable on demand fast design method for mobile robot platform reduce the researchers and users in the design and assembly robots consume time and costs, improve the robot's hardware components and module reuse rate. In the thesis, the design of mobile robot is divided into three parts: architecture, hardware and software. The mechanical architecture is based on a 4-wheel driving robot classis. Hardware and software is divided into three layers: sensor and driver layer, real time control layer (power management system) and high performance processing layer. Each layer is based on needs within the modular planning and design, estimated mobile robot platform can quickly increase or decrease according to user needs and the number of module types. Real time control layer is the core layer of the mobile robot system which uses an ARM7 microcontroller and a high performance FPGA constituting the core processing unit. It expands enough memory resources to meet the performance requirements of processors. At the same time, the layer is equipped with embedded communication protocol commonly

used interface, and the necessary peripherals. In sensor and driver layer, a common user interface is designed to facilitate the increase or decrease of sensors and drivers. High performance processing layer is an extended layer for the system. It uses the latest high-performance embedded device as a core processor, and communicates with real time control layer from the high speed communication interface. After setting up the mobile robot platform, the thesis does series of tests and experiments to detect the functions and performance of the wheeled mobile robot.

Keywords: Mobile Robot, Modular, Embedded System, Sensor

目 录

摘要	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 引言	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 本课题研究意义	(4)
1.4 论文主要内容及构成	(4)
2 移动机器人设计分析	
2.1 设计概要	(6)
2.2 系统结构与需求分析	(7)
2.3 本章小结	(14)
3 移动机器人硬件设计	
3.1 系统硬件方案	(15)
3.2 传感与驱动层设计	(17)
3.3 实时控制层设计	(23)
3.4 高性能处理层设计	(32)
3.5 电源设计	(34)
3.6 本章小结	(38)
4 移动机器人软件设计	
4.1 系统软件方案	(39)
4.2 传感器信号处理	(41)

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论

4.3 多电机协调控制	(47)
4.4 本章小结	(55)
5 实验结果与分析	
5.1 基础性能测试	(56)
5.2 路径识别	(63)
5.3 本章小结	(65)
6 全文总结与展望	
6.1 全文总结	(66)
6.2 研究展望	(67)
致谢	(68)
参考文献	(69)
附录 攻读学位期间发表论文目录	(73)

1 绪论

1.1 引言

随着嵌入式技术与智能控制技术的发展，机器人的智能化程度越来越高，并广泛地应用到各个领域。移动机器人是机器人学科的一个重要分支，从上世纪（20 世纪）60 年代末开始，就有美国斯坦福大学研究院研制的 Shakey 自主移动机器人^[1]。其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^[2]。美国通用电气公司对多足步行机器人 Quadruped^[4]的研制成功，解决了机器人在不平整区域内的运动问题。随着半导体、计算机、传感器、驱动器技术的发展与应用，从上世纪 70 年代到 90 年代，移动机器人被更为广泛的研究与应用，例如：德国的 KUKA Roboter GmbH 公司、瑞典的 ABB Robotics 公司、日本的 Yaskawa 公司、FANUC 公司等都在移动机器人研制上做过大量工作。但是这阶段的移动机器人主要以工控机、PC 机等作为控制单元，体积大都比较庞大，不适合普通用户使用和研究^[3]。在 21 世纪初，由于嵌入式技术全面发展，其为移动机器人的小型化提供了平台与条件。

由于移动机器人的应用领域非常多，功能非常杂散，故以前的一些移动机器人往往是针对特定问题被动式的研究一种或多种移动机器人来解决问题，其有很强的针对性，但是对于移动机器人的研究来说普适性不强。这种方式造成问题变更时，就需要耗费大量人力物力与时间对机器人进行重新设计，这无疑增加了成本、浪费了技术积累、方案移植与复用率不高。

针对这一问题，本文以轮式移动机器人为研究对象，自上而下地总结移动机器人的特点，逐层解剖分析移动机器人各部分的需求，提出一种模块化、可根据需求快速重配置的移动机器人平台设计方法。降低研究人员与用户在设计与组装机器人上消耗的时间和成本，提高机器人的硬件复用率与模块组件通用性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 嵌入式技术的发展

从 1971 年 Intel 公司制造出第一款微处理器--Intel 4004^[5]开始,微处理器的技术与价格几乎按照 Intel 公司创始人摩尔提出的发展规律--Moore's Law^[6]飞速的发展与进步。于是人们不断追求并制造更小更快的通用 CPU,随着 CPU 的计算能力不再是系统的核心瓶颈、功耗、体积、可靠性等问题逐渐成为系统设计时的问题,于是各公司与机构纷纷开始研制将 CPU 与外设集成一体的单片机。

从 TI 公司申请第一个单片机专利^[7],到 ARM 公司开发基于 RISC 指令集的处理器的^[8]。人们从单一的追求运算速度转变到追求系统的集成度、效率等方面,对计算机系统的评价也从更多元化的方面综合地进行。正式在这种统筹兼顾的思想与半导体集成技术、工艺水平的发展下,计算机系统发展出一个重要的分支--嵌入式系统。

与一般的计算机系统不同,“嵌入式系统是以应用为中心”^[9],在嵌入式系统中计算与处理单元作为某个完整功能目标的一部分,目的在于提高目标的智能化、信息化。故嵌入式系统需要对系统性能、功耗、可靠性、成本等进行综合考虑与设计。从嵌入式处理器的发展来看,其并不像通用 CPU 那样去追逐摩尔定律,而是针对其自身需要平衡系统各方面性能的特点,发展出面向不同需求有针对性的处理器与系统解决方案。

随着半导体技术、人工智能技术、网络通讯技术等信息技术的发展与应用,嵌入式系统逐渐从概念走向现实,特别在上世纪(20 世纪)的 90 年代开始得到了快速的发展^[10]。在跨过 2000 年,进入新世纪后,嵌入式系统技术得到了全面的发展,成为了许多行业提升与突破的重点方向,例如:移动终端、工业控制、消费电子等。在移动终端上,从第二代通信技术开始数字处理与通信技术广泛应用并成为了国际标准,从正在快速普及的第三代通信技术以及大力研发的第四代通信技术看,数字化,小型化,高性能化是以后移动终端的发展方向,而其核心支撑是嵌入式系统技术。在工业控制中,系统的人性化与信息化是当前设备研发与应用的最重要考虑因素之一,现在研究最热点、发展最迅速的物联网技术,企业的全面信息化,资源统一管理与调度等

方面均需要使用嵌入式系统技术进行开发。在消费电子领域,智能家居、智能玩具等概念也随着嵌入式系统技术的深入发展,而变成现实,并在世界各地拥有巨大的市场和应用前景^{[11]-[12]}。

1.2.2 轮式移动机器人的研究与发展

随着嵌入式技术的发展,世界各地均开展了嵌入式移动机器人的研究,并取得了丰富成果^{[13]-[23]},轮式移动机器人作为移动机器人最重要的实现方式之一,也被称为无人驾驶车辆,是指可以自动识别跑道路径并进行自动驾驶的车辆,是当前机器人领域的研究热点之一^{[24]-[32]}。

在美国,以由美国 DARPA 发起并支持的无人车挑战赛发展最为迅速,成果非常丰富。美国卡内基梅隆大学曾使用 Pontiac 跑车改装 NavLab-5 系统,其完成了四千多公里横穿美国大陆的自动驾驶,平均速度到达 88.5km/h^{[24]-[25]}。

在欧洲,无人驾驶技术也得到了各国的重视与发展,其中最为著名的有德国的 VaMoRs-P 系统与法国的 Peugeot 系统。VaMoRs-P 系统是德国联邦国防大学与德国奔驰汽车公司联合研制,由奔驰 500SEL 改装而成。其使用基于 Transputer 的并行处理单元与两台 PC-486 构成核心系统进行信息处理、控制、人机交互等工作。其在高速公路和普通标准公路上进行了大量实验,1995 年公布的最高时速为 130km/h^{[26]-[27]}。Peugeot 系统是法国帕斯卡大学与法国雪铁龙公司合作研究项目。与其他使用多台 PC 机作为主控制器的自动驾驶系统相比,该系统仅使用一块 DSP 卡进行传感器处理、决策、运动控制。通过在不同路况高速公路上的实验情况,该系统最高速度可达 130km/h,并且系统误检率低、适应性好^[28]。

在中国,具有代表性的有清华大学研制的 THMR-V 系统^{[28]-[32]}。其类似于德国 VaMoRs-P 系统,兼具面向高速公路与一般道路的驾驶功能,设计时速为高速公路 80km/h,一般道路 20km/h,采用两台 PC 进行视觉信息处理、信息融合、路径规划、决策控制等功能,使用 4 台工控机进行激光测距仪、定位等信息处理,以及通讯管理、驾驶控制等功能。

1.3 本课题研究意义

随着汽车电子、嵌入式系统、传感器等技术的发展，移动机器人已经从概念走进现实，并逐渐被人们应用到生产、生活的各个方面，例如：无人搜索、智能导航、空间探测等。它是集机电一体化、模式识别、图像处理、多传感器信息融合、计算机软件、智能控制算法、实时通讯等多种学科的技术交叉融合的个体，是进行相关学科研究的优秀平台。上述[24]-[32]中所实现与描述的移动机器人基本都是以真实汽车作为载体平台，加载高性能的传感器与处理机（工控机或者 PC 机）进行控制。虽然前述案例研究出非常好的方案与测试结果，但是本文发现其成本都比较高昂，需要资源较多，基本是大型机构甚至企业联合参与才能完成，普通实验室不便于从事这种全真实情况下的研究，故本文利用同比例缩小的原则，在提供模块化传感、控制与驱动的系统并满足对其功能研究的需求下，提出一种小型低成本模块化、可快速重构的移动机器人设计与实现方法。

1.4 论文主要内容及构成

本文应用半导体、嵌入式技术发展的最新成果，介绍了一种模块化轮式移动机器人平台的设计方法与应用实例。本文所设计的移动机器人在硬件上采用模块化的分层结构，除承载平台外，其电源系统采用集中式电源管理方式，信号部分分为传感与驱动层、实时控制层、高性能处理层设计，层与层之间通过标准通讯接口互联。其中实时控制层作为移动机器人的必备组件，其使用一片 ARM7 处理器与一片 FPGA 构成软硬件结合设计的实时控制核心，因为实时控制层是必备组件，故移动机器人的电源管理系统与实时控制层集成在一起；传感与驱动层作为感知与执行器，研究人员可根据需求定制传感器的种类、数量以及安装位置，需要注意的是本文中对各种该机器人平台兼容的传感器与驱动器接口有定义，当然需满足其接口特性才能正常工作；高性能处理层作为移动机器人的性能可扩展层，为高级嵌入式运算与处理留有资源空间，其采用最新的 ARM Cortex-9 双核嵌入式处理器作为核心，为整个系统提供强大的附加

运算能力，其与实时控制层的通讯主要通过有线局域网（LAN: Local Area Network）进行。

本文后续章节安排如下：

第二章介绍移动机器人的设计分析，本章是本文所提出的移动机器人设计方法的核心思想描述章节，其自上而下地分析了移动机器人的模块化组成及其原因，以及各个层应有的模块、功能、组件等，为后续章节的软硬件详细设计提供思路指导与方法提示。

第三章介绍移动机器人的硬件设计，在本章中将详细展开移动机器人各部分的硬件方案选型与原理设计。

第四章介绍移动机器人的软件设计，在本章中将对移动机器人软件体系结构，移动机器人驱动，传感器信号处理等底层软件进行分析与设计，对移动机器人的应用软件设计提出指导。

第五章介绍移动机器人的测试与实验，主要进行移动机器人平台的硬件特性测试，嵌入式组件性能测试，以及综合性的路径识别实验等内容。

第六章进行全文的总结与展望。

2 移动机器人设计分析

移动机器人主要由承载平台，系统硬件和软件构成，是一个集机械结构、硬件电路、软件程序的综合体。设计时需要使用工程化的方法与思路，一步一步逐级分解设计，分析方案，局部实现，最后再组合形成一个整体。该部分主要介绍移动机器人平台的设计概要与设计要求，对系统进行全方位的分析与定位。

2.1 设计概要

移动机器人平台主要是面向轮式移动机器人的理论与应用研究（包括自动驾驶、自动泊车、图像处理、智能算法等），要求其设计按照模块化、通用化、层次化进行^{[33]-[37]}。

机器人的承载平台需要提供充分的空间与结构资源，一方面需要将机器人的各种电源（电池）、驱动器（电机、伺服器等）、传感器（摄像头、光电阵列、接触传感器等）有效且稳定可靠地安装。同时也需要为控制电路板提供良好的支撑平面，保护其不受轻微撞击的损害，而且要便于研究人员的操作以及显示信息的反馈。典型的移动机器人承载平台可以使用真实轿车、等比例缩小的模型或者自制的微型平台，本文中针对地面的小型应用，需要使用 1:8 左右的轮式移动平台作为其承载平台。

机器人硬件平台主要由三个层次构成，分别为：传感与驱动层、实时控制层、高性能处理层。传感与驱动层要求搭载多种通用传感器（声光电、环境、姿态等方面）和驱动机器人各方向运动的驱动器组。实时控制层要求使用一块 50MHz 以上的中等性能嵌入式处理器作为该层核心处理器，并且其能集成尽量多的通用外设，提供足够多的接口，例如：Ethernet、USB、RS232、IIC、SPI、PWM、CAP/MAT、AD/DA、GPIO 等。由于该层需要实时处理多种传感器组的数据，并对驱动器组进行实时控制，可使用软硬件结合设计的思想与方法，扩展一片中等性能的 FPGA，将需要并行处理、大量数据运算等工作交由 FPGA 完成，同时实现系统中的各种数理逻辑运算，扩展核心处理器的资源。高性能处理层要求能够搭载大型嵌入式操作系统，例如：WinCE、Andriod 系统等；其需要能够进行复杂的图像运算，集成各种高级功能的通讯模块（例

如：3G、Wi-Fi、蓝牙等）与传感部件（例如：GPS、高清摄像头等）；作为支撑系统的高性能处理、复杂图像处理、高级通讯、高级控制等功能实现的平台。

机器人软件平台部分需要与硬件平台部分进行整合与协调，根据硬件平台的层次化设计，同样可以将其划分为传感与驱动层、实时控制层、高性能处理层三部分。传感与驱动层的软件结构为：Driver+BSP+CPS(Communication Protocol Stack)+API+APP；实时控制层的软件结构为：Driver+BSP+RTOS+ECS/MW+API+APP；高性能处理层的软件结构为：Firmware+Driver+BSP+EOS+ECS/MW+API+APP。软件系统性能方面要求：传感与驱动层、实时控制层满足实时运算与控制，高性能处理层满足高性能处理与运算。

2.2 系统结构与需求分析

从设计概要的分析中可以看出，机器人平台是多个学科、多种理论与技术的融合体，故需要自上而下层层分析与设计，才能做到性能均衡，统筹兼顾。

2.2.1 系统整体结构

从系统大框架上机器人可以分为承载平台、传感与驱动层、实时控制层、高性能处理层等四部分。如图 2-1 所示，承载平台提供机械结构部分的支持，电源与传感、驱动、控制提供机器人的管理、控制和程序载体，其中虚线框表示系统电源与实时控制层将会集成在一起。

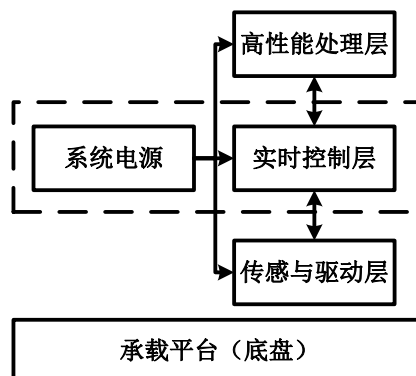


图 2-1 移动机器人系统结构图

从前述的系统设计要求中可以看出，实时控制层是系统的核心枢纽，如果实时控制层不工作，则整个平台将瘫痪，同理即使没有高性能处理层，或者传感与驱动层，系统任然可以通过实时控制层进行必要的运行。

2.2.2 承载平台

承载平台为机器人提供稳定可靠的支撑，并且提供足够的空间放置电池、电路板以及各种传感器，基于对现在嵌入式技术的发展和设计概要的分析其结构，如图 2-2 所示，是承载平台为系统正常运行提供的结构基础与支撑。

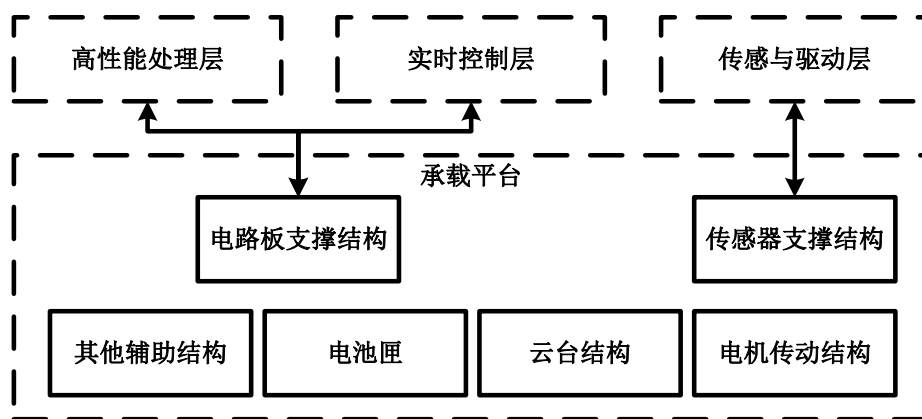


图 2-2 承载平台结构图

底盘是承载平台中非常重要的部分，移动机器人可以分为足式、履带式与轮式，本文主要研究轮式移动机器人。其中轮式移动机器人的典型驱动方式有单轮驱动、双轮驱动或者四轮驱动^[36]，为了达到最好的控制效果，提供尽可能多的研究资源与空间，本文选择最复杂的四轮独立驱动结构。

根据实验室的实验条件与研究的实际情况，本文承载平台的底盘选择为 1:6-1:8 的成品电动轮式移动平台。承载平台的尺寸控制在 500*400*300mm（长*宽*高）以内。参考平台选用图 2-3 所示的四驱移动机器人平台。

具体参数如下：

- (1) 尺寸：长*宽*高--360*355*165mm，净重：4.2kg；
- (2) 驱动电机：4 只冯哈伯 12V 空心杯行星齿轮减速电机，带 12 线编码器，空载转速--8100RPM，减速后转速--120RPM；

- (3) 运动参数: 4 个 1: 10 车轮, 直径 130mm, 最大行驶速度 80cm/s;
- (4) 动力参数: 整机输出功率--60W, 整机空载电流--500mA;



图 2-3 承载平台 3D 图

2.2.3 传感与驱动层

传感器与驱动层是提供移动机器人环境感知和动力驱动的部件。该层由传感器子系统与驱动器子系统组成, 其直接与实时控制层接口, 是机器人闭环控制的最基本单元。

传感器的种类有非常多^[38], 可以根据系统的特点、需求进行有针对性的选择, 本文的应用要求--移动机器人的理论与应用研究(包括自动驾驶、自动泊车、图像处理、智能算法等)。故本文对传感器需求如下: 超声波传感器、图像传感器(高速/标清)、光电传感器、霍尔传感器、LC 谐振传感器、温度传感器、轻触开关、加速度传感器、陀螺仪等。针对种类繁多的传感器, 其接口也非常复杂多样, 但是小型嵌入式系统的接口资源是有限的, 不能为每种传感器提供相应接口, 同时针对不同应用时传感器使用的数目、种类组合也不尽相同, 故要求传感器的接口电平尽量统一, 接口协议标准规范, 根据现在常用的接口类型, 传感器的接口应基本被下述接口类型涵盖: 模拟式--GPIO 型; PWM, CAP 型; 智能型--IIC、SPI、RS232、RS485、USB; 特殊接口型(尽量少用)--总线式等;

驱动器与传感器类似，其种类也非常的多样，小型移动机器人平台的驱动器选择不仅需要为移动机器人留出足够的驱动资源、接口，还要为基于核心控制器与传感器的其他嵌入式应用留有余量。通过分析可以得出其驱动器需求：有刷直流电机、舵机、继电器、云台系统等；驱动器的接口与传感器比起来要少很多，但是也需要注意接口的标准化与通用型，尽量选择为 PWM、GPIO 型。

软件需求：该层主要做信息的获取与执行，如图 2-4 所示，该层的软件以驱动（Driver）、类型转换、板级支持包（BSP: Board Support Protocol）、通讯协议栈（CPS: Communication Protocol Stack）等为主，其应用程序接口（API: Application Programming Interface）应以简洁、高效为主，其主要性能要求为快速准确地向实时控制层反馈传感器的信息，同时向驱动器输出实时控制层的指令。

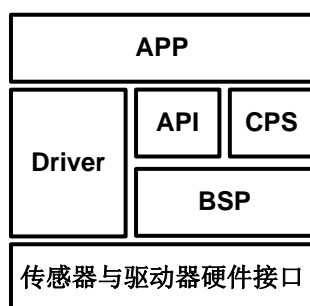


图 2-4 传感与驱动层软件结构简图

2.2.4 实时控制层

实时控制层作为机器人平台的核心单元，其需要实现移动机器人的大部分功能，处理大量数据，进行最重要的运算，特别是对系统响应、处理、执行实时性的保障。对于本文所设计的机器人平台，因为有传感与驱动层对传感器、执行器的支持，高性能处理层对大规模非实时需求的运算与处理，故实时控制层需要实现嵌入式系统中的实时控制单元和与其他两层的接口。如图 2-5 所示，除了核心运算处理单元外，实时控制层还必须有存储子系统保障该层运行时对 RAM 和 ROM 空间的需求，重要数据的及时保护与存储，多种海量外置数据存储器的支持；必须有通讯子系统保障同 PC、其他移动机器人实时控制层，以及高性能处理层的数据传递、信息交互；必须有显示

子系统保障调试和操作人员对实时控制层的手动控制，以及及时的信息反馈与状态显示；必须有辅助的外设子系统在调试、测试、扩展等应用时的资源。同时机器人的电源管理系统也是需要在实时控制层同一板卡上实现，其不仅需要为实时控制层服务，同时还需要为高性能处理层、传感与驱动层提供稳定可靠、品质优秀的电源。对于与其余两层的接口方面，与高性能处理层的信息与数据交互主要体现在大数据量上，故接口需要选择高速非实时的通讯接口；与传感与驱动层的信息与数据交互主要体现在数据量较少、实时性要求较高，故可选择低速同步或者能及时响应的慢速接口。

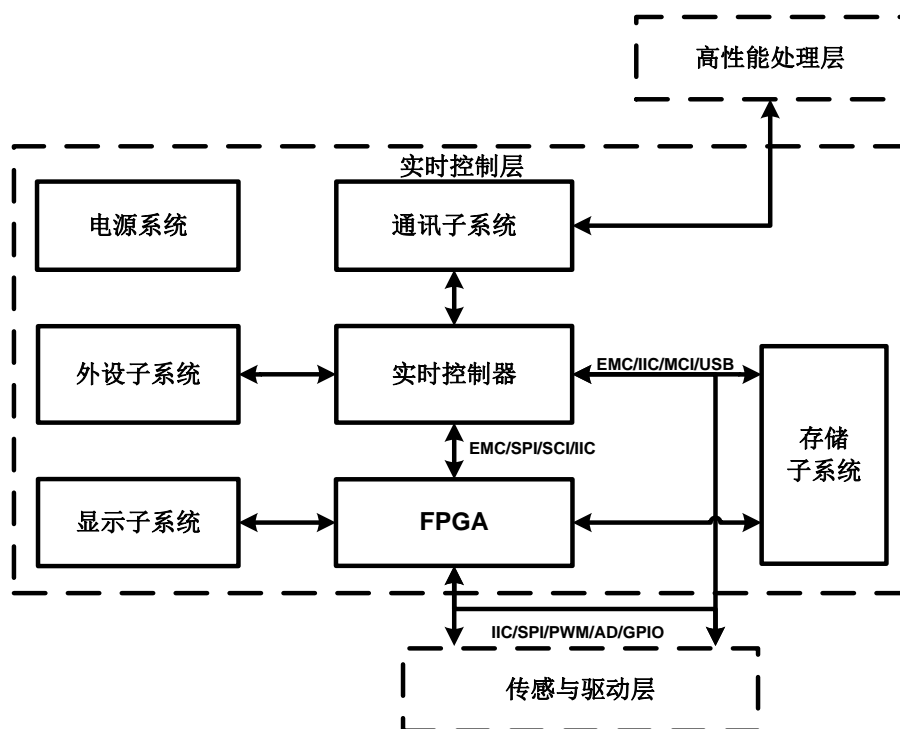


图 2-5 实时控制层硬件结构简图

根据上述分析，以及该层的结构简图，该层可选择软硬件结合设计的思想与方法，以系统实时性为关键，合理分配软硬件任务，充分发挥软硬件各自的优势，实现系统尽可能好的实时性能支持。如图 2-5 所示，实时控制层核心运算处理控制部分可采用 ARM+FPGA 的形式。实时控制器选择 32 位 ARM 处理器，主频在 50MHz 以上，100MHz 左右；外围支持尽量丰富：SDRAM、Flash、SD-Card、EEPROM、LAN、USB-Host、USB-Device、RS-232、点阵式 LCD、行列式键盘、GPIO 等。CPU 上不能支持的接口扩展、大规模并行计算等需求均采用一块 FPGA 集中实现。同时要注意合理设计 CPU

与 FPGA 的组织架构，重点考虑系统多传感器组的实时数据处理与驱动器组的实时运动控制。

软件需求：该层是机器人平台的核心枢纽，在电源上，为传感与驱动层和高性能处理层提供电源支持并进行电源管理；在信号处理上，如图 2-6 所示，该层以实时控制为主，因为系统在该层的设备与应用非常多，故需要搭载 RTOS 进行系统管理，同时加载各种嵌入式系统中间件（MW: Middle Ware），例如：通信协议栈（包括 TCP/IP、USB 等）、硬件驱动程序等，实时控制算法等均需要在该层实现。对于处理计算量大、又需要进行实时控制的部分，如摄像头的数据处理、激光传感器的输出逻辑控制等，使用软硬件协同设计的思路，在 FPGA 上实现。

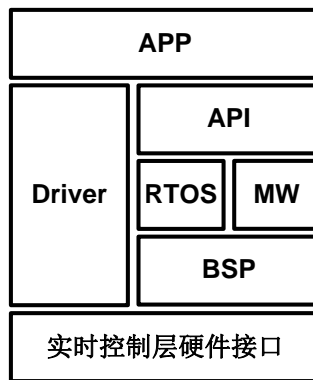


图 2-6 实时控制层软件结构简图

2.2.5 高性能处理层

高性能处理层主要为移动机器人平台的非实时性需求、大规模高性能处理需求服务。其需要能够支持与通用移动终端设备（例如：手机、平板电脑）进行互联与交互，以及通过运营商的移动通信网络（例如：GPRS、3G）进行信息交互等高级的信息交互处理功能，以及高性能的复杂图形图像处理，复杂的智能控制算法等。如图 2-7 所示，高性能处理层以一块高性能嵌入式处理器为核心，其优先选择使用 SoC 技术集成多种功能的芯片，然后加上足够多、性能强大的存储器支持（RAM，ROM），外设支持，以及各种通讯接口物理层支持（例如：通用异步串行通讯 UART（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter）、通用串行总线 USB（Universal Serial Bus）、有线

局域网 LAN(Local Area Network)、无线局域网 WLAN(Wireless Local Area Networks)、无线个人局域网 WPAN(Wireless Personal Area Network Communication Technologies)、无线广域网 WWAN(Wireless Wide Area Network))后组成。高性能处理层直接与实时控制层通讯,因为这一层的通讯实时性要求不高,但是数据量要求比较大,故其通讯方式可选择有线局域网 LAN(Local Area Network)。

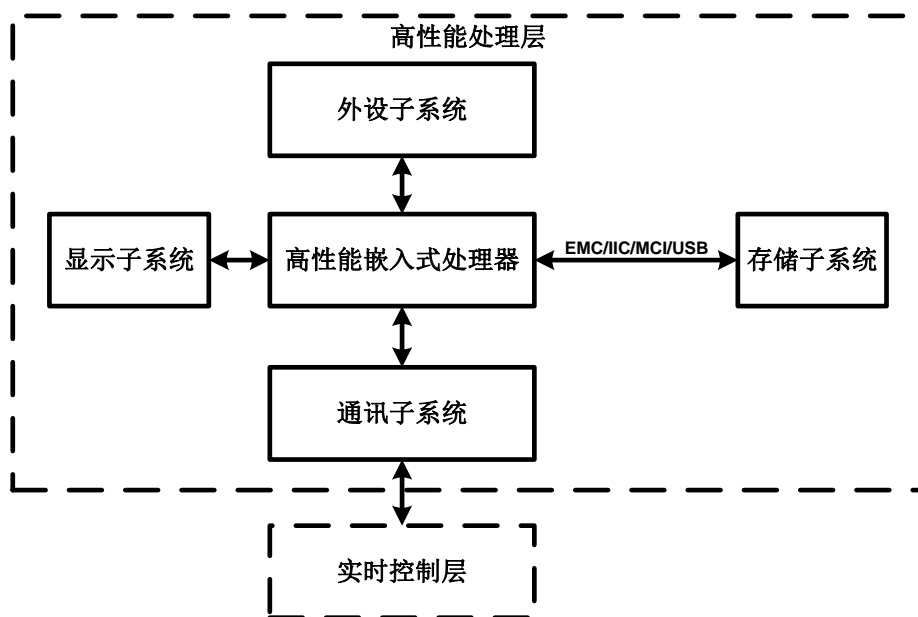


图 2-7 高性能处理层硬件结构简图

根据高性能处理层硬件结构,以及前面对高性能处理层的分析可知,该层核心器件嵌入式高性能处理器需要选择 32 位,主频 500MHz 以上,1GHz 左右的产品,可以考虑双核或者多核处理器,以及集成 DSP、高性能嵌入式控制器、硬件加速器、图形处理器等的高性能 SoC 方案;硬件开发可选用市场上成熟的开发板,要求外设资源丰富,结构紧凑,例如:DDR2、Flash、SD-Card、LAN、Wi-Fi、Blue-Tooth、USB-Host、USB-Device、RS-232、GPS、VGA、HDMI、若干 GPIO 等;

软件需求:高性能处理层主要进行非实时需求的大计算量操作处理,所以其软件结构如图 2-8 所示,在固件(Firmware)的基础上移植和开发驱动(Drive)与板级支持包 BSP(Board Support Package),然后搭载通用嵌入式操作系统(例如:Android、WinCE 等),以及相应的嵌入式中间件 Middleware,和应用程序接口 API(Application

Programming Interface), 其软件的主要功能是提供高性能处理与运算资源, 以及与通用移动终端(例如: 手机、平板电脑)的通信与信息处理资源。

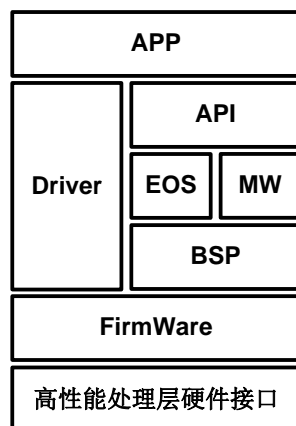


图 2-8 高性能处理层软件结构简图

2.3 本章小结

本章使用自上而下的设计思路, 通过对机器人平台需求的顶层分析, 进行其顶层框架的结构设计, 并从机械结构、硬件电路、软件程序三个主要方面, 针对提出的需求进行分层和各层的结构设计。本章为移动机器人的详细设计做了完整的思路引导与方法提供, 为移动机器人各部分的详细设计做好了总体准备工作。

3 移动机器人硬件设计

根据第 2 章的设计分析可知，移动机器人在硬件上分为三层设计，其中系统电源为集中式设计，并与实时控制层集成在一起，故移动机器人的硬件需要分为四大部分进行详细设计，下面就根据上文的分析与要求，逐一展开进行设计并实现。

3.1 系统硬件方案

3.1.1 传感与驱动层接口

根据移动机器人的设计分析可知，移动机器人实现时需要搭载多种用途与形式的传感器与驱动器，其信号输入输出类型与接口也非常多样，但是系统的接口资源是有限的，故不可能为每种传感器与驱动器都单独定制接口，这样也不符合系统扩展的要求。故需要整合各种传感器与驱动器的特点进行归一化的设计。

(1) 传感器接口

从 2.2.3 的分析中可以知道传感器的输出信号与接口可基本按表 3-1 分为三大类：

表 3-1 传感器接口类型分类表

信号类别	描述	举例
模拟式	普通模拟信号输出	红外传感器
标准数字式	其接口满足某种工业标准接口的规范	IIC、SPI
自定义数字式	其根据传感器特点定制的数字接口，不满足通用数字接口规范，基本没有通用性	摄像头

由前文的设计要求可知，本文设计的移动机器人平台要求按照模块化的方法进行设计与实现，故需要采用标准接口满足大量传感器的接口需求，然后为必备的特殊传感器留有一定的接口资源。这样设计的移动机器人平台才能够满足根据需求自主设计传感器数量与布局，灵活更换改变移动机器人功能的要求。通过调查发现传感器模块许多使用 IIC 接口，IIC 控制器在大部分的 ARM 控制器中均有集成，同时 FPGA 的对 IIC 实现的 IP 核也较容易获得，故可以将 IIC 作为移动机器人平台传感器与驱动层传感器的主要接口方式。对于上文中提到的模拟式与自定义数字式传感器则根据需求可

预留一部分资源，例如摄像头、激光传感器、电磁谐振式传感器等不能满足通用 IIC 接口定义，但是系统又必须需要，故留出 1-2 组可使用的接口即可。

(2) 驱动器接口

对于驱动器接口，其形式与传感器接口不同，现代控制方法中通常使用脉宽调制（PWM: Pulse-Width Modulation）技术，故主要留出 PWM 接口与一定量的普通 I/O 即可。

3.1.2 实时控制层

(1) 主控制器及其外设

对可靠性、实时性要求高的数字系统，需要其能尽可能集成化，尽量做成片上系统（SoC: System on Chip），主控制器应尽量包含多的外设，例如：USB Device/Host、SCI、SPI、ADC、DAC、输入捕捉及输出比较、定时器等，以基本满足本系统的功能要求，实现尽可能的单片化。

(2) 外扩存储器

现在嵌入式控制器片内的存储器一般都较小，故需要外扩 RAM、ROM。对于 RAM，一般可以选择 SRAM 和 SDRAM。SRAM 容量小，特别是相比 SDRAM 其成本太高，扩展 RAM 只考虑 SDRAM。对于 ROM，一般可以选择 NandFlash 和 NorFlash。NandFlash 速度快，容量大，成本低，但是考虑到容易出现坏块，会降低系统的稳定性，需要扩展 NorFlash。程序主要放在 NorFlash，NandFlash 放置文件系统。

(3) 串行点阵 LCD

对于串行点阵 LCD 有两种解决方案：一种是使用 ARM 自带的 LCD 控制器，要求 LCD 上不带控制器，但是需要有电源；另一种是使用 LCM，即将 LCD、背光源与驱动等外围电路装配在一起。LCM 数据接口一般为并行 8 位 IO 与控制信号，后者包括区域片选信号等。对于实时控制层 LCD 的大小选择在 256*64 比较合适。

3.1.3 高性能处理层

高性能处理层选择市场上处理性能领先的嵌入式处理器，主要考虑基于 ARM

Cortex-A9 及以上架构的多核高速高性能处理器。高性能处理层主要完成：大型嵌入式操作系统的挂载运行与研究，较复杂图形图像的处理，大型彩色 LCD 面板的显示支持，WLAN 的支持等实时控制层难以负荷，以及对实时要求不高但对处理性能又高要求的地方。鉴于开发周期与成本的考虑，可使用已经制作好的开发板。

3.2 传感与驱动层设计

传感与驱动层设计中要介绍各种传感器、驱动器的原理分析与设计，对于直接使用的模块化传感器则简略描述。

3.2.1 传感与驱动层详细框图

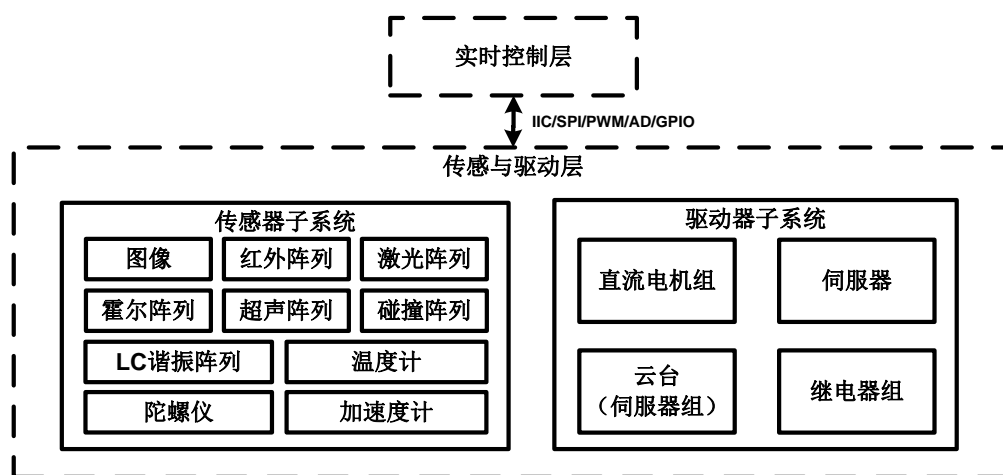


图 3-1 传感与驱动层详细结构图

如图 3-1 所示，传感与驱动层主要有传感器子系统与驱动器子系统组成。传感器主要包含声波类、光电类、电磁类、微机电类以及热力类等；移动机器人上的驱动器需要涵盖 4 个以上的普通直流有刷电机，2 个以上的舵机；针对机器人的应用，需要提供云台，继电器的支持；针对后续扩展，需要提供无刷直流电机，同步/异步交流电机控制接口。

3.2.2 图像传感器接口选型与设计

对于移动机器人的自动运行，其核心是路面信息获取。在多种路面信号传感器方

案中，可以归结为两个大类：被动式信息获取和主动式信息获取。

图像传感器作为被动式信息获取传感器是移动机器人平台的最重要外界信息获取通道之一。为了提高本文设计的移动机器人平台摄像头的处理效率，以及软硬件结合设计的任务分配与性能优化，适应高速摄像头的应用等要求，本文选择数字式摄像头作为图像传感器的接口。

对于数字式摄像头，其接口主要包括 8-10bit 的数据线，同步信号线（帧同步、行同步、像素同步），以及控制信号线（复位、数据传输、中断等）。通过对多种数字式摄像头的接口分析综合后发现 10 根数据线可满足多数摄像头的要求，并且其 10 根数据线提供的灰度值分辨率足够移动机器人平台的应用要求，控制信号线主要是通过 IIC 总线进行内部寄存器的读/写，以及复位、中断信号等。如图 3-2 所示，为本文中移动机器人提供的摄像头接口（直接与 FPGA 连接，便于图像处理部分的 FPGA 开发）。

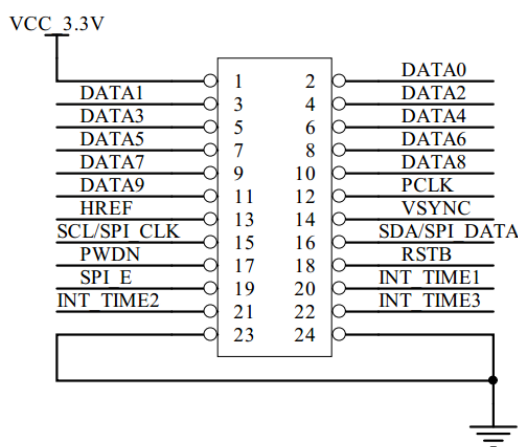


图 3-2 数字式摄像头接口示意图

3.2.3 激光阵列传感器设计

在光电式传感器中，红外阵列传感器的特点是近距离特性好，死区小，但是距离稍远由于散射严重，性能急剧下降，且接收管定位方式距离远后灵敏度会下降，故有效范围一般在 30CM 以内；激光阵列传感器的特点是单向性好，可进行以发射管定向的探测，节约接收器数量，但是其死区较大，比较适合用于 20CM-80CM 距离的探测。本文中选择探测距离远，单向性好的激光阵列传感器作为移动机器人一种光电式主动

路面探测传感器。

对于激光传感器，由于其发射端具有优秀的单向性与聚光能力，其发射部分显得较为简单，故选择一款合适的接收传感器成为激光传感器阵列设计中的重点考虑因素。虽然激光传感器的单向性优秀，但是由于其距离非常远，故漫反射回来的信号属于极微弱信号，需要进行多级的放大与滤波才能达到较好的性能。因为现在市场上集成的激光接收解调芯片非常多，故本文在设计中放弃自搭放大滤波解调等电路（前期试验发现自搭效果不佳），选择集成的 38KHz 激光接收器 FT-099 作为本文中激光阵列的接收管。

FT-099 的大致原理如下：FT-099 能接收到 38KHz 的调制光波，其调制的有效脉冲宽度需大于 $600\ \mu\text{s}$ ，脉冲与脉冲之间的间隔需大于 $600\ \mu\text{s}$ 。FT-099 的最灵敏波长为 650nm，即普通红色激光器发出激光的特征波长。FT-099 内建 I/V 转换，前级放大，滤波限幅放大，比较输出等各个环节。

由实验结果知，使用 FT-099 时，并不需要接收管与发射管一对一，因为就光器有良好的单向性，故激光器所指射的位置是精确的，仅需要接收管判断出来该发射管所指射位置信息（即反射光强度即可），然后按照一定的顺序逐一发射，等待，接收，判断，故需要通过 FPGA 内建简单逻辑电路进行译码控制，其原理如图 3-3。

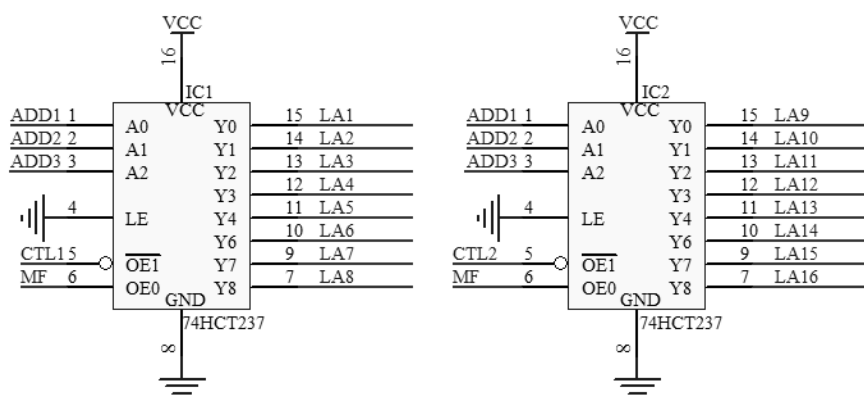


图 3-3 激光阵列发射控制逻辑

一组发射与接收器原理如图 3-4 所示，由于选择集成式接收器件，故接收部分电路得到大大简化，仅需要一个电阻 R1 上拉后即可，但是集成式接收器带来的问题是，

其输出信号为数字式信号，而自搭电路可输出模拟信号，分辨率更高，由于激光阵列采用超多发射器模式，这样可以提高传感器的分辨率。

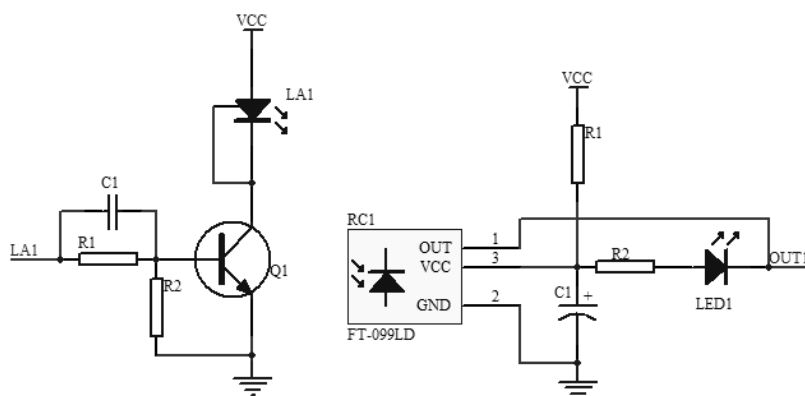


图 3-4 单个激光阵列发射（左）与接收（右）电路原理图

3.2.4 LC 谐振阵列传感器设计

为了使移动机器人兼容电磁线诱导的导航方式，设计相应的 LC 谐振阵列传感器。容易知道电磁诱导情况下，移动机器人平台可适应外部光线干扰强烈的情况下的自主巡线，例如：强烈的太阳光照下，或者光源复杂的外部环境时。

对于电磁诱导，其诱导源频率特性需要已知，才能便于电路参数调整，对于本文中设计的移动机器人平台，选用的信号源为常用的电磁诱导源，在铜线中同 20KHz，200mA 的正弦交变电流。由于 20KHz 在电磁波中属于甚低频（VLF: Very Low Frequency, 3KHz-30KHz），故其波长远大于移动机器人电磁传感器的机械结构尺寸，可将传感器看做一个点，将导线周围变化的磁场看做方向按 f_0 变化的同心圆磁场，使用比奥萨法尔定律进行分析。

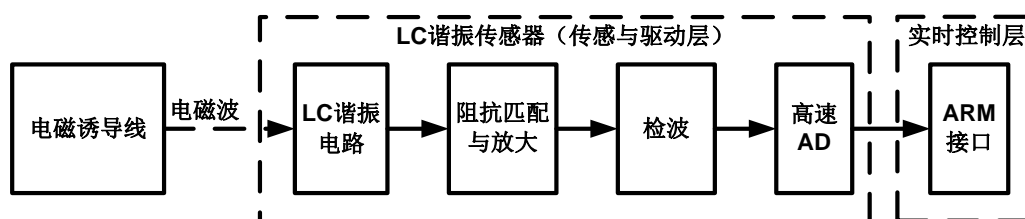


图 3-5 电磁信号接收与处理框图

其电路结构则类似于短波收音机的调制发射解调接收，提高电路的抗干扰能力，

如图 3-5 所示，经过谐振->放大->检波后送入高速 AD 采样再送入 ARM 处理。

具体电路原理如图 3-6 所示，分为 LC 谐振、阻抗匹配、放大和检波等部分。

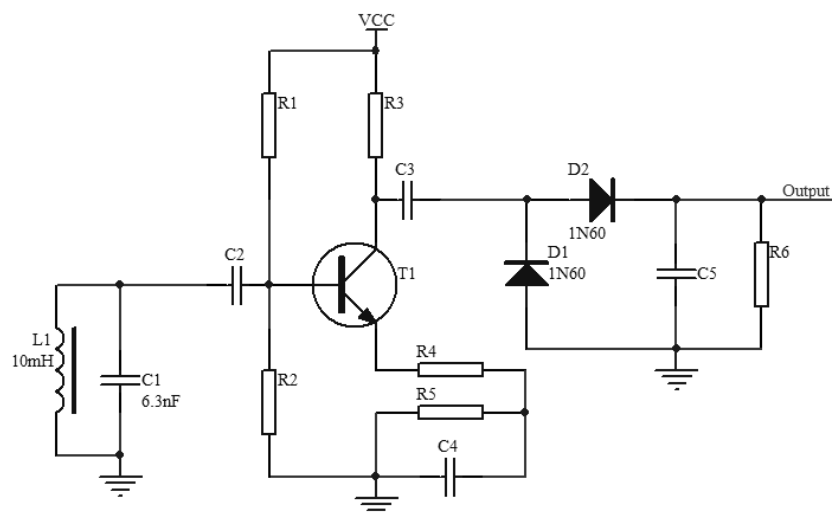


图 3-6 LC 谐振、阻抗匹配放大与检波电路原理图

3.2.5 其他传感器接口设计

如 3.1.1 所述，对于市场上购买的标准传感器，则统一使用 IIC 接口协议作为其接口方式，在此不详述。其接口定义为 GND-SDA-VCC-SCL-GND 五线式接口，这样的设计可以保障即使接口插反也不会造成电源与地线短路的破坏性后果。

3.2.6 驱动器接口设计

如 3.2.1 所述，驱动器部分有多种类与数量的驱动器供移动机器人平台使用与增减，为了方便操作，需要设计统一的驱动器接口。分析与总结各种驱动器可以发现，驱动器的接口资源基本上由这几种组成：功率电源，驱动信号（PWM 与方向），标准接口式信号（IIC 总线），通用正交编码器信号（X，Y），以及信号线的电源与地回路。

3.2.7 电机驱动器设计

机器人平台使用的是 4 台冯哈伯 12V 空心杯行星齿轮减速电机，整个系统的电力供应又全部是靠一块 4 芯（14.8V）的锂聚合物电池，所以如何给电机提供尽量大的驱

动电压（尽量接近电源电压）和电流，以及尽量减少驱动环节的能量损耗成了研究的重点。

在电机驱动上，本文选择逻辑保护电路+简单提升驱动能力电路+功率器件这种方案，该方案的优点是通过前级用逻辑门电路对程序输出的电机驱动信号进行处理，使其在各种情况下都不会产生 H 桥短路的情况。然后通过三极管将驱动电压进行提高（最高到电源电压 14.8V 左右）或者用 DC-DC 芯片将电压升高（可以到 15V 以上），然后再驱动 MOSFET。

（1） 驱动逻辑延时保护模块

在 H 桥中的四个 MOSFET 都需要给控制信号，故一旦信号逻辑出错，即会造成 H 桥的一半桥臂导通而造成电源短路。为了保证无论程序输出的何种电机驱动信号都不能使 H 桥发生短路的情况，故在程序输出时之要求输出 PWM 信号和方向信号。具体每个 MOSFET 的控制信号则由后面的逻辑电路根据程序输出的 PWM 信号和方向信号来产生，由于 MOSFET 的关断都需要一段时间，所以在产生控制信号时，还得将开通和关断的 MOSFET 的信号进行延时，让需要关断的 MOSFET 完全关断了再打开需要打开的 MOSFET，这就需要一个信号延时电路，一般可以选择 RC 电路延时。电路原理图如图 3-7：

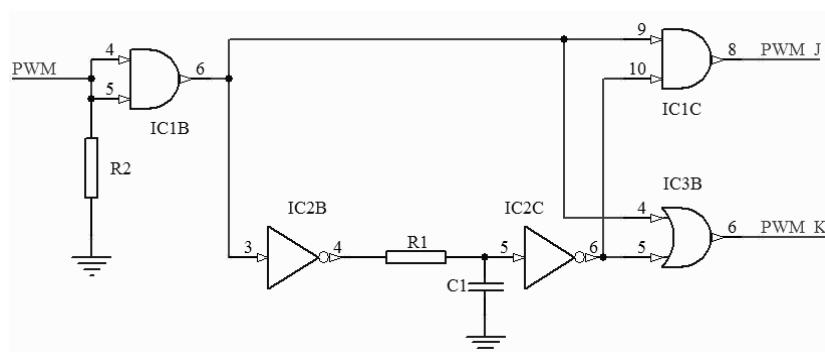
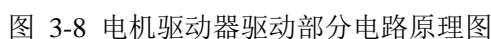


图 3-7 电机驱动逻辑延时保护电路原理图

（2） 驱动能力增强模块与 H 桥驱动模块

由于 ARM 输出的电压最多只有 3.3V，所以对一般的 MOSFET 来说其驱动性能都不是特别理想，特别是对 P 沟道 MOSFET，而 MOSFET 的驱动特性一般来说是栅源电压越高越好，而且其栅极电流非常小。由于电源电压高于 3.3V，所以考虑用控制信



(3) 驱动逻辑分析

表 3-2 驱动电路逻辑分析表

PWM	DIR	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

说明: PWM: 电机驱动信号占空比; DIR: 电机方向; ×: 关断; ○: 导通。

3.3 实时控制层设计

实时控制层是移动机器人硬件平台的信号与电源中枢。信号部分，实时控制层对传感与驱动层起着信号处理与实时控制的作用，对高性能处理层起着传输数据与执行指令的功能，作为信号承上启下用。系统电源部分，根据电源分布理论，EMC/EMI要求，在移动机器人平台上一次电源来自动力电池与市电，传感与驱动层、实时控制

层、高性能处理层的电源均由各部分的二次电源供给。

3.3.1 实时控制层详细框图

实时控制层的详细实现方案如图 3-9 所示，基于软件应结合设计的思想，实时控制层的核心处理器有一片 ARM7 处理器与一片 FPGA 组成，ARM7 的选型为 NXP LPC2478，FPGA 选型为 Xilinx Spartan-6 XC6SLX45。

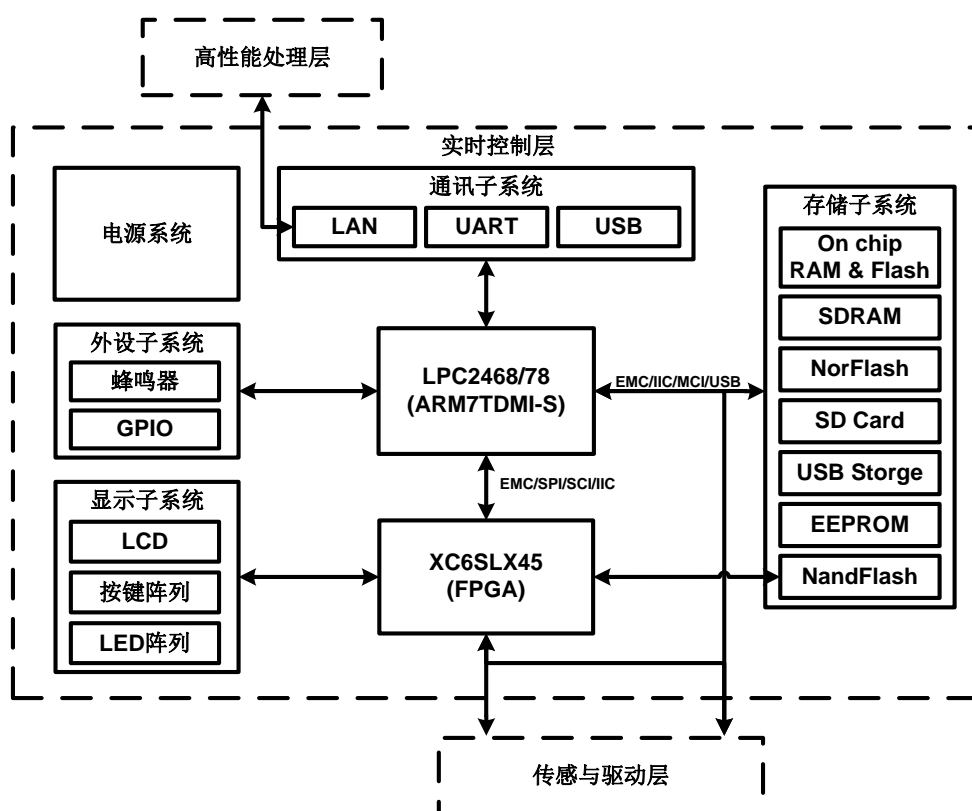


图 3-9 实时控制层详细硬件框图

ARM7 处理器主要承担实时控制层的核心控制、通讯、存储管理，普通外设控制等任务；大量的数据处理、传感器控制、驱动器输出逻辑，LCM 控制逻辑的则一并交由 FPGA 实现，同时移动机器人平台在面向不同应用时，其更多是进行传感器与驱动器种类与数量的增减，故通过 FPGA 接口的传感与驱动层将使系统更加灵活。

3.3.2 ARM 核心系统设计

(1) ARM 选型

生产 ARM7 微控制器的厂商很多，TI、NXP、Freescale 等均有选择，按照系统方案选择，最后选出 NXP 的如下 ARM7 系列 LPC2468/78 处理器。

NXP LPC2468/78 特性简介：

- 1) ARM7 TDMI-S 处理器，最高频率 72MHz；
- 2) 512KB 片上 FLASH 能 ISP 与 IAP，连接在 CPU 高速总线上；
- 3) 98KB 片上 SRAM：64KB 通用，16KB Ethernet 专用，16KB USB DMA 专用，2KB RTC 专用；
- 4) 其他外设，独立：LCD 控制器（LPC2468 无），2*AHB，VIC，EMC；串行接口：1*Ethernet MAC MII/RMII，2*USB2.0 D/H/OTG，4*UART，2*CAN，1*SPI，2*SSP，3*IIC，1*IIS；其他：SD/MMC，160*GPIO，8*10-BIT ADC，10-BIT DAC，4*Timer/Counter，2*PWM，RTC，WDT。

(2) ARM 最小系统结构

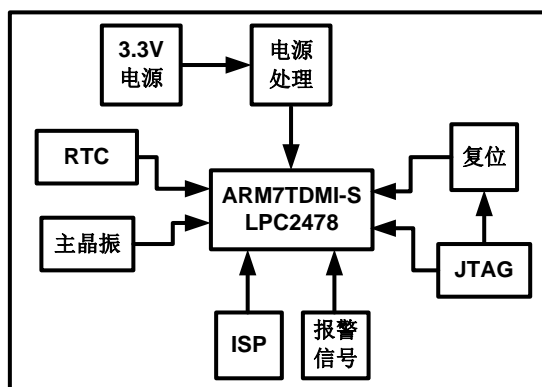


图 3-10 ARM 最小系统结构框图

如图 3-10 为 ARM 最小系统结构框图，主要包括 ARM 电源处理、主晶振、RTC 晶振、复位、JTAG 等。

(3) 电源引脚处理

VDD、VDD(DCDC)、VDDA、VREF，分别用三个 π 型电路滤波，VDDA 与 VREF 公用一组滤波器。地线未做特殊处理，VSSIO、VSSA、VSSCORE 直接连在一起。

(4) JTAG 引脚处理

因为移动机器人平台软件使用自由软件开发环境，故调试使用 Open JTAG。根据其接口设计参考，考虑节约面积，使用 10Pin 接法，如果开发工具没有 10Pin 连接器，需要使用接口转换板。

(5) RTC 设计

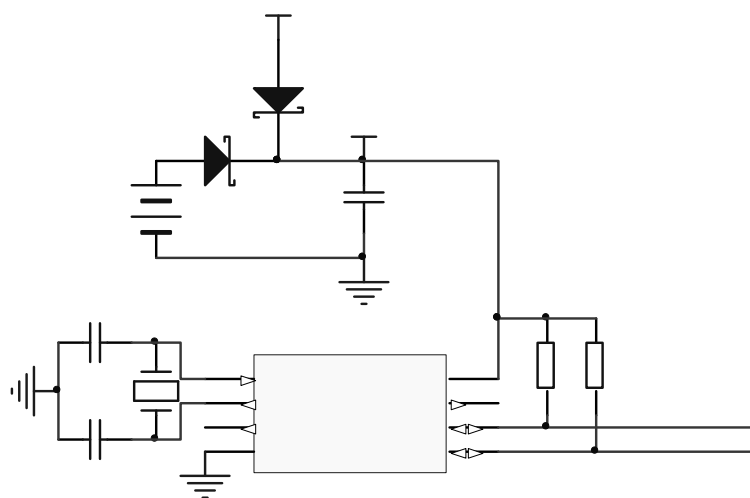


图 3-11 RTC 部分电路原理图

LPC2478 自带 RTC，但是其最小功耗为 $20\mu\text{A}$ ，嵌入式系统 RTC 电源通常使用 BR1220 型纽扣电池，其容量为 35mAh。使用该方案，RTC 电池在掉电情况下仅能维持 73 天左右，对于一般系统是不能容忍的，故选择 NXP Semiconductor 为实时时钟专用芯片 PCF8563，其典型功耗仅 250nA，这样掉电后一颗 BR1220 的纽扣电池理论上维持接近 16 年，远远满足使用的需求。其电路原理如图 3-11，E1 为纽扣电池，D1 与 D2 为双供电的电源切换低压差二极管，RTC 晶振中心频率为 32.768KHz，采用无源并联式接法。

(6) 复位引脚处理

使用集成复位芯片--IMP811，根据 LPC2478 芯片手册，选择门槛电压最低的 R 系列--2.63V IMP811R。IMP811R 复位状态会保持 140ms，LPC2478 全部完成复位需要约 $30\mu\text{s}$ ，所以适合该系统使用。

3.3.3 FPGA 核心系统设计

(1) FPGA 选型

对于 FPGA，其主要涉及 LCM 控制器的逻辑控制、摄像头信息处理逻辑、IIC 的 IP 核、SPI 的 IP 核、UART 的 IP 核，以及其他的逻辑控制单元。FPGA 选型则考虑到实际工业与应用中使用最为广泛的 Xilinx 产品。Xilinx 的 FPGA 主要有 Virtex、Spartan 两大类，对于该系统的应用来说属于低端应用，考虑专门为低成本、低功耗使用的 Spartan 系列较为合适。Spartan 系列中从使用与电源管理等方面看 Spartan6 系列 FPGA 对该系统比较合适，具体选型为 Xilinx Spartan-6 XC6SLX45。

XC6SLX45 特性简介：

- 1) 最高达 1080Mbit/s 的差分数据库传输速率
- 2) 逻辑单元：43661
- 3) 最大 DRAM：401Kbit
- 4) Block RAM：2088（最大）
- 5) 用户 I/O：358（最大）
- 6) 支持 DDR，DDR2，DDR4，LPDDR

(2) FPGA 最小系统结构

FPGA 最小系统部分，主要包括 FPGA 电源处理、FPGA 配置、时钟等，其结构如图 3-12。

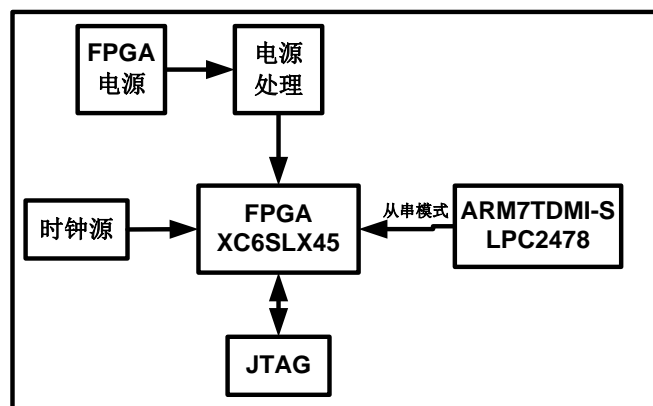


图 3-12 FPGA 最小系统结构

(3) 电源处理

FPGA 三组电源 VCCOX、VCCINT、VCCAUX，根据 Xilinx 提供的计算方法。每组电源的滤波电容由多个 $100\ \mu\text{F}$ 、 $4.7\ \mu\text{F}$ 、 470nF 组成。

(4) FPGA 配置

Spartan-6 系列常用的有 JTAG、从串、SPI 串行 Flash 配置模式、字节外设接口模式、主串模式。本文的设计中考虑到前期 FPGA 部分调试的便利，以及后期由 ARM 控制整个系统的配置，故选择设计 JTAG 与从串两种 FPGA 配置方式。

1) JTAG 方式配置 FPGA

FPGA 有自身的 JTAG 接口电路，电路上则可直接对应 FPGA 的 JTAG 接口连接。需要注意的是 JTAG 需要保证其扫描链路的完整性，即需要形成“TDI \rightarrow (TDI~TDO) \rightarrow (TDI~TDO) \rightarrow JTAG 连接器 TDO”的闭合回路。

2) 从串方式配置 FPGA

从串方式配置 FPGA 是 Xilinx 提供的 5 中 FPGA 配置方式之一，FPGA 配置只有通过这种方式，才能使移动机器人平台实时控制层由 ARM 控制。从串配置中 FPGA 方面接口非常简洁，ARM 则需要使用一路 SSP 同步串行总线提供时钟与传输数据。

(5) 时钟源

与 ARM 不同，FPGA 的特点使得其时钟来源非常多样化，为了方便系统设计，在 FPGA 部分留一路 50MHz 的有源时钟源共开发使用。

3.3.4 存储系统设计

现在嵌入式系统性能的瓶颈是存储器，其中 RAM 尤为突出，根据应用情况在小规模嵌入式系统中 ROM 与 RAM 容量比为 4:1 较合适。所以应对通用性高、任务较多的嵌入式系统，需要外扩 RAM、ROM。

(1) ARM 存储空间分配

有 3.3.1 可知，需要扩展的存储设备包含 SDRAM、NorFlash、SD-Card、EEPROM、NandFlash 等，同时为了满足 FPGA 与 ARM 的高效率通信，也将 FPGA 内部寄存器地

址分配在 ARM 的 EMC（External Memory Controller）空间内，通过 EMC 总线传输数据，提高吞吐效率。

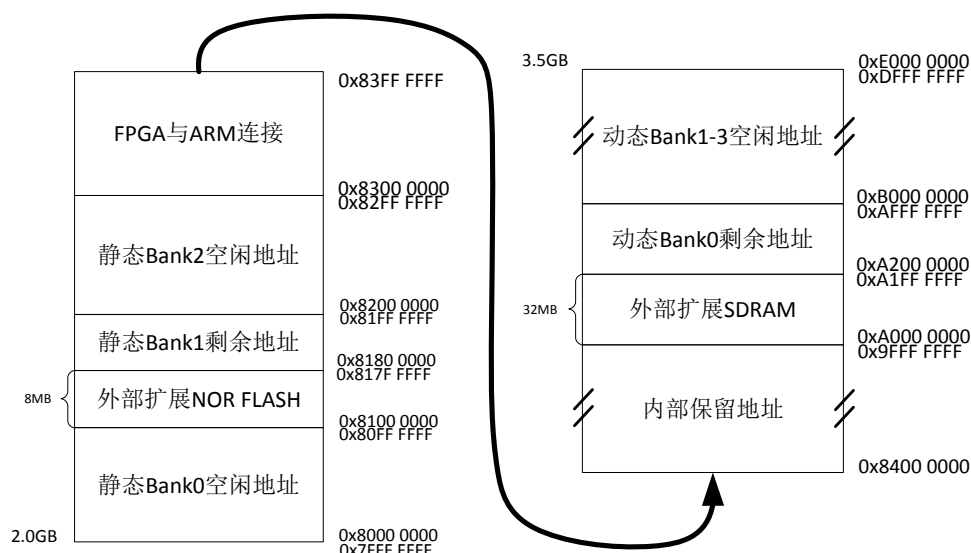


图 3-13 LPC2478 扩展存储器地址分配图

如图 3-13 所示，是 NXP ARM7TDMI-S LPC2478 的存储空间分配，除了内部保留的地址，对于扩展存储器可使用的空间为 4 个静态 Bank（每个空间 16MByte）与 4 个动态 Bank（每个空间 256MByte）。

（2） 扩展 RAM

对于 RAM，一般可以选择 SRAM 和 SDRAM。SRAM 是静态存储器，只要不掉电，不用进行刷新，其特点是速度快，主要面向高速应用，容量在 1MByte 左右，相同容量的 SRAM 比 SDRAM 体积大，价格高很多。SDRAM 动态存储器，需要及时刷新来保持其信号，但是其非常便宜，容量可以做到很大，一般都在 32MByte 以上，速度比较慢，主要面向大规模数据和需求时的应用。在移动机器人平台实时控制层中，RAM 的扩展使用扩展 SDRAM。

（3） 扩展 ROM

对于 ROM，一般可以选择 NandFlash 和 NorFlash。NandFlash 速度非常快，但是需要专门的接口和电路来进行管理，系统设计上会比较麻烦，由于本系统中扩展高性能的 FPGA，故可将 NandFlash 挂接在 FPGA 上，FPGA 实现 NandFlash 的控制器，作

为系统的大规模数据存储器使用。NorFlash 的特点是可以片内执行程序，这样就不必将代码读到系统的 RAM 中运行，但是需要注意其写的速度比较低。在嵌入式系统应用中，NorFlash 比较实用，特别是程序空间在 1MByte 左右的小型嵌入式系统应用时其综合性能优势明显。在移动机器人系统应用中，ROM 的扩展使用 NandFlash 与 NorFlash 结合的方式，NorFlash 存储程序与代码，NandFlash 存储海量数据。

(4) ARM 与 FPGA 的总系式通讯

ARM 与 FPGA 的通讯方式非常灵活，种类繁多，除了通用 I/O 外，就 LPC2478 自身带的标准通讯接口而言，ARM 与 FPGA 可以通过 UART、USB、SPI、IIC 等方式通讯，但是上述方法都不是直接与 FPGA 内部总线相连接，而且还是串行，其数据吞吐速率效率均较低，而且这些通讯接口都需要 FPGA 方面提供对应的 IP 核支持，这样会消耗大量 FPGA 的逻辑资源。故需要选择一种直接接入 FPGA 内部总线的高速并行式通讯方式。因为 ARM 自带 EMC，则可以将 FPGA 内部寄存器的空间分配在 ARM 的 EMC 管理的空间上，通过数据地址控制总线进行数据传输，这样会大大提高传输速率效率，同时占用 FPGA 资源相对较少。虽然使用 EMC 总线在性能上有强大的优势，但是同时需要注意使用并行总线占用引脚资源非常多，以 16 位宽为例，EMC 总线总共需要 37 根信号线，这也给 PCB 设计时的信号完整性控制带来了一定的难度。

(5) 其他存储器的扩展

考虑到系统的可扩展性，以及对各种主流存储设备的兼容性，存储器的扩展除了上述四种之外，还需要进行其他存储器的扩展与支持。扩展 SD-Card 与 USB Storage（支持 USB 接口的海量数据存储设备，例如：U 盘、MP3、移动硬盘等）进行可移动的海量数据存储，扩展 EEPROM 进行系统非正常情况下关键数据的保护与存储。

3.3.5 通讯系统设计

实时控制层的通讯系统主要实现与其他机器人实时控制层、高性能处理层以及 PC 间的通讯。从功能上通讯系统主要面向调试测试、数据传输、信息交互；从距离上通讯系统主要分为有线/无线短距、有线远距。分析通讯硬件、协议、软件等技术的发展，

可以发现有许多成熟的通讯技术可以选择应用。考虑到实时控制层的吞吐处理能力，实际需求情况和现在嵌入式系统通讯技术发展的主要特点，在实时控制层通讯系统上选择 UART、LAN、USB 作为实时控制层的通讯系统主要方式。

(1) UART

UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)是实现全双工传输与接收的串行通讯方式，主要用于 PC 对实时控制层的调试，以及小量的数据传输。实时控制层的物理层实现方案可采用 RS-232 格式，主要解决 PC 对实时控制层的调试，有线/无线的短距通讯。

(2) USB

USB(Universal Serial Bus)是通用串行总线，随着个人电脑、移动终端等技术的发展，由于 USB 协议优秀的设计、维护与推广，其几乎成为了应用型嵌入式系统硬件中通信、存储的标准接口，并统一了多种接口技术。市场上的各种 PC，嵌入式终端等大都对 USB 支持，故在点对点的有线短距离数据传输与通讯上非常适合实时控制层应用。需要注意的是 USB 通讯协议栈分为 USB 主机(USB Host)与 USB 设备(USB Device)，故需要根据要求及时进行角色更换，其协议栈的嵌入式系统的轻量化解决也是需要重点设计的问题，同时必要的电源处理与保护也不能少。

(3) LAN

LAN(Local Area Network)是局域网。LAN 可方便实现本地多台计算机（嵌入式处理器）的互联、通讯与信息共享。其传输吞吐速率远远大于 UART，并且易于通过网关连接到 Internet 上，适合进行远距离和大数据量的交互与通讯，适合实时控制层与高级处理器、远程控制主机的通讯使用，为实时控制层提供网络化的支持。值得注意的是 LAN 的通讯模型结构较为复杂，针对实时控制层的嵌入式处理器，需要设计相应的轻量级的协议栈配合使用。

3.3.6 外设系统设计

外设系统主要有信号输入、输出、显示系统与辅助外设，信号输入、输出、显示

系统主要是设计一些必要的显示，操作等人机交互的设备，以便调试测试等应用。主要包含 LCM，按键 LED 阵列等。辅助外设则为一些简单的调试资源。

(1) LCM

由于移动机器人平台属于小型平台，故选择技术成熟的 256*64 点阵 LCM 比较合适。256*64 点阵 LCM 的主要特点是将 256*64 点阵分为 4 块 64*64 区域，需要 2 根片选信号分别选择控制。一般产家会做成总线形式，方便使用与控制。因为 LCM 是慢速设备，如果直接与 ARM 相接，则会拖慢整个系统的速度，故将 LCM 通过 FPGA 与 ARM 相接，FPGA 内建 LCM 的控制器，ARM 写 FPGA 的寄存器控制 LCM 的操作与显示。在本文的设计中选择 LM6800 模组作为移动机器人平台实时控制层的显示设备。

(2) 按键与 LED 矩阵

LCM 是输出设备，移动机器人平台上还需要一个输入设备，较简单实用的选择 6*6 按键与 LED 阵列，足够移动机器人平台使用。按键与 LED 阵列的电路原理非常简单，比较复杂的是信号线的连接。因为实时控制层有 FPGA，故将按键与 LED 阵列的扫描线直接连接到 FPGA 上，FPGA 内建中断捕捉与信号转换逻辑，封装成寄存器共 ARM 操作。

(3) 辅助外设

作为实时控制层的辅助部分，设计上尽可能简单可靠，主要包含蜂鸣器、测试用 GPIO 等。

3.4 高性能处理层设计

如图 3-14 所示，为高性能处理层的系统结构图，高性能处理层主要包含一个高性能的嵌入式处理器、通讯子系统、存储子系统与外设子系统。其中存储子系统除了片上自带存储器外，还需要扩展 RAM、ROM 以及 SD-Card、EEPROM、USB Storage 等通用存储设备及接口。通讯子系统需要尽可能全的覆盖主流通用的有线与无线通讯方式，有线方式包括：用于调试以及短距低速率数据通讯的通用异步串行通讯 UART

(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)，用于短距高速大数据量通讯的通用串行总线 USB (Universal Serial BUS)，用于远距离高速大数据量通讯和与实时控制层通讯的有线局域网 LAN (Local Area Network)。

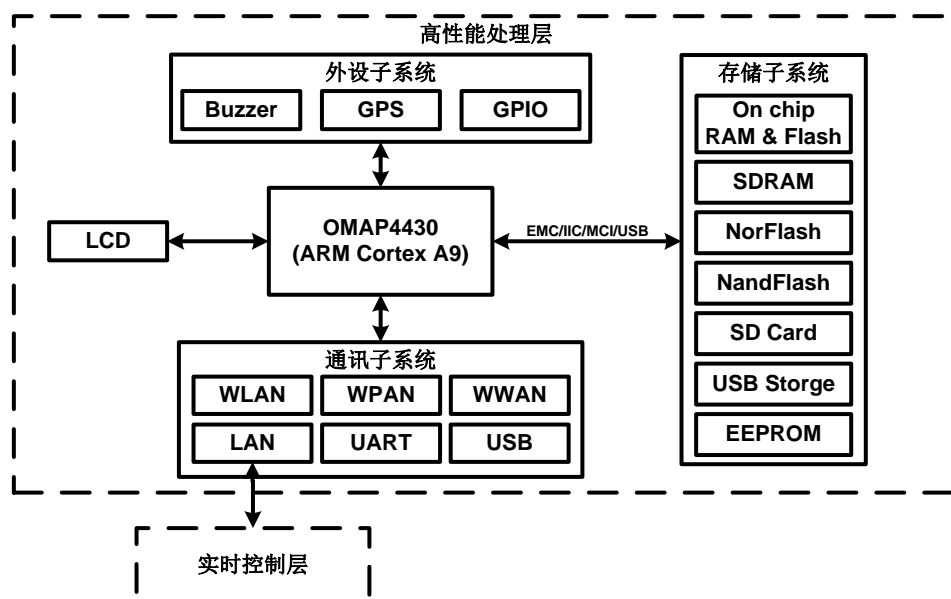


图 3-14 高性能处理层硬件详细框图

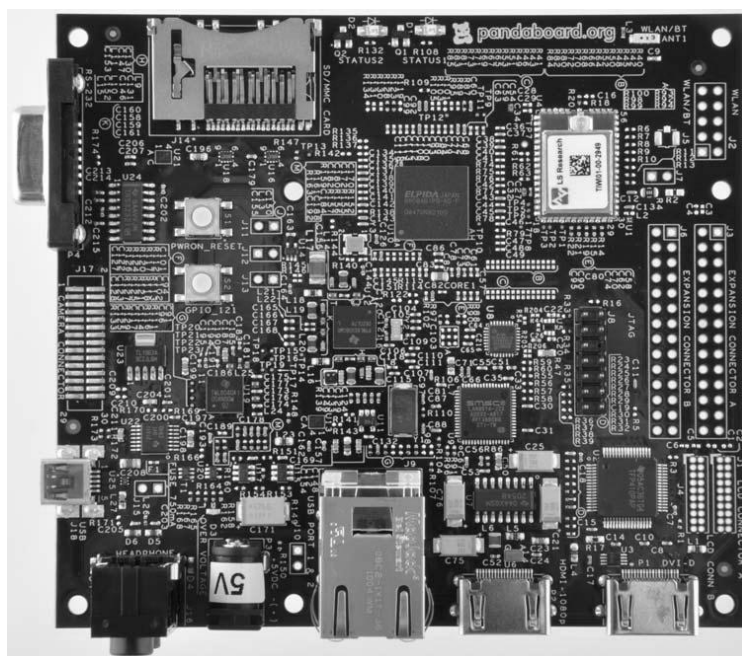


图 3-15 Pandaboard 成品图

无线方式包括：通过 Wi-Fi 方式实现用于短距无线通讯的无线局域网 WLAN (Wireless Local Area Networks)，通过蓝牙方式实现用于短距点对点无线通讯的无线

个人局域网 WPAN (Wireless Personal Area Network Communication Technologies), 通过移动通信运营商基站接入的无线广域网 WWAN (Wireless Wide Area Network)。对于外设子系统除了常用的 LED、按键、蜂鸣器、调试用 GPIO 之外, 还需要扩展较高级的外设, 例如: 全球卫星定位系统 GPS (Global Positioning System) 等。

根据系统的需求 Pandaboard 是一款比较合适的高性能处理层开发板选型。如图 3-15, Pandaboard 的核心处理器为一颗 TI(Texas Instruments)生产的 OMAP4430, 内建 2 个主频 1 GHz 的 Cortex-A9 MPCore、1 个主频 1 GHz 的 DSP 核、2 个主频 1 GHz 的 ARM Cortex-M3 Core、2D/3D 图形加速 SGX, 能实现 1080p 高清视频流 (1920*1080p, 30fps)。Pandaboard 性能参数如下: 内存--1GB LPDDR, 无 Flash, 标准 SD 卡接口, 视频输出接口--高清显示屏 HDMI Ver1.3 连接器, DVI-D 连接器支持同步双显示, 无线接口--WiLink 6.0 (802.11b/g/n、蓝牙 V2.1 +EDR), 调试接口--RS232+JTAG, 其他接口: 一个百兆以太网口, 2 个 USB Host 口, 1 个 USB OTG 口。目前支持的操作系统: WinCE、Android、Meego、Linux 等, 均能找到开源程序。

3.5 电源设计

电源是移动机器人系统的动力, 能否提供稳定可靠的电源, 以及高效的电源管理, 关系着移动机器人平台的正常工作与带电池续航能力。下面详细介绍本文中的移动机器人平台电源部分设计。

3.5.1 电源部分详细框图

如图 3-16 所示, 系统电源根据来源可分为一次电源与二次电源。一次电源为 220V 交流电源的整流滤波降压到 12V 处理 (AC-DC), 电池 (14.8V) 的输出处理; 二次电源为给传感与驱动层, 实时控制层, 高性能处理层提供的电源, 根据电压类型大致有 1.2V、3.3V、5V、12V 等, 当然还要根据电源消耗估算进行合理的各种二次电源处理方案选型。移动机器人系统电源需求分析如下:

(1) 传感与驱动层

- ## (2) 实时控制层

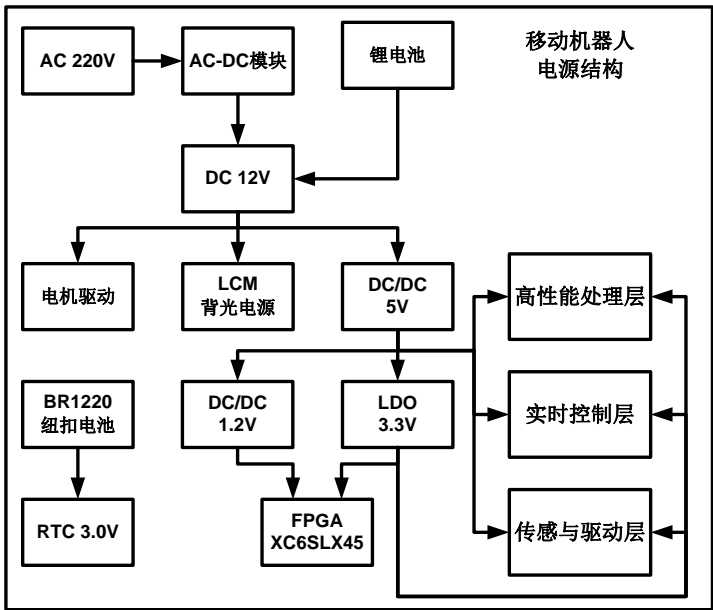


图 3-16 移动机器人电源管理系统结构图

3.5.2 RTC 电源设计

RTC 用来保障 ARM 实时时钟部分的工作，其电源用于使 ARM 处于深度休眠或者主要部分掉电时，RTC 依然能运行。为了在 ARM 上电时能够使用系统电源，故设

计时考虑将其通过二极管连接起来。

3.5.3 1.2V 电源设计

1.2V 电源是 FPGA 的内核专用电源，其峰值估计为 800mA，考虑电源的利用效率和散热，选择 DC/DC 型稳压器，使用 MPS 产品 MP2249 作为该部分电源。

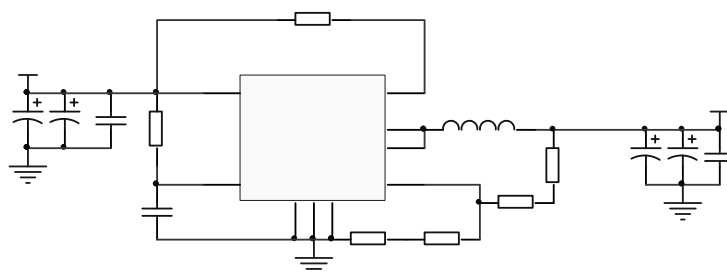


图 3-17 DCDC 1.2V 电源原理图

3.5.4 3.3V 电源设计

传感与驱动层的传感器均使用 3.3V 器件；实时控制层的核心控制器 ARM7 LPC2478，扩展存储器，ARM 外设，FPGA 的 VCCO、VCCAUX 均是使用 3.3V 器件；高性能处理层除 USB 以外均使用 3.3V 器件。

表 3-3 各个部分 3.3V 电源主要需求

层	器件	型号	峰值估计	最小	最大
实时控制层	ARM7	LPC2478	100mA	+3.0V	+3.6V
	存储器	Nor/Nand	50 mA	+2.7V	+3.6V
	SDRAM	K4S511632J	300mA	+3.0V	+3.6V
	FPGA	X6SLX45	500mA	+3.135	+3.465
高性能处理层	-	-	1000mA	-	-
传感器	-	-	500mA	-	-
其他部分	-	有余量的估计	200mA	+3.0V	+3.6V
合计	-	-	2650mA	+3.0V	+3.6V

从表 3-3 对 3.3V 负载的估计中可以看出，3.3V 电源部分所有设备总电源小于 5A，可以选择 Linear Technology 产品 LT1084_3.3V/5A 作为该部分电源。

3.5.5 5V 电源设计

5V 电源是整个系统的电源入口, 其将电池或者交流电源的输出电压先转换成 5V, 再为 5V 设备和其他电源芯片(1.2V, 3.3V)提供电源。将 5V 电源处负载估计如表 3-4。

表 3-4 各部分电源负载估计

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	1000 mA	DC/DC	-
其他部分	5V	100 mA	DC/DC	-
合计	-	4750 mA	-	-

由于负载峰值估计在 4.8A 左右, 为考虑电源的利用效率和散热, 选择 DC/DC 型稳压器, 使用 MPS 产品 MP9415 作为该部分电源, 电路原理如图 3-18 所示。

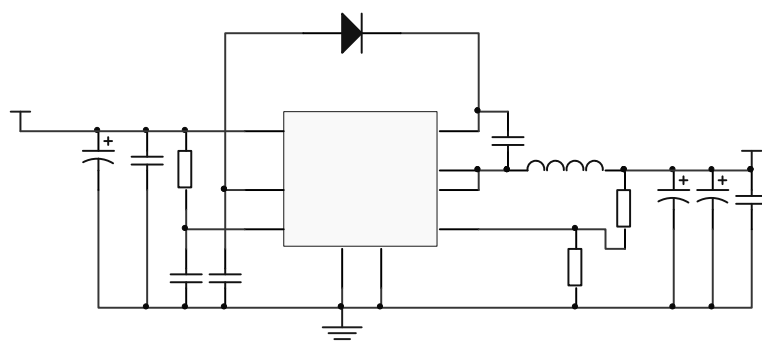


图 3-18 DCDC 5.0V 电源原理图

3.5.6 LCM 背光电源设计

LM6800 背光板为 LED 并联背光, 其对电源的要求为最大电压 5V, 最大能提供 150mA 电流。因为第一级稳压输出为 DC/DC 5V, 如果使用 DC/DC 做背光可能会造成背光闪烁。该部分需要使用 LDO 方式的电压可调电源, 可以选择 National Semiconductor 生产的 LM1117-ADJ 较合适, 通过电压调节控制背光板的亮度。

由于背光调节电阻需要程序控制, 故采用数字电位器。数字电位器可调级数在 32 级左右, 经过选型 Intersil 生产的 X9313 系列比较合适, 因为 X9313 的过流能力为 4.4mA, LCM 背光电压在 5V 左右, 故固定电阻+数字电位器阻值要在 1K Ω 以上, 而

且 LM1117 ADJ 端最大电流为 $120\ \mu\text{A}$, 故数字电位器阻值可选择全程 $1\text{K}\ \Omega$ 的 X9313Z, 固定电阻可选择 $510\ \Omega$ 的普通电阻, 电压调节范围在 2.5V — 5V 。

3.5.7 电池选型

现在常用的动力电池源可以选择铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂聚合物电池^[40]。镍镉电池爆发力强, 充电快, 但是其体积大重量大, 储电效率低, 特别严重的记忆效应, 易爆炸等不安全性和环境污染已经让其到了淘汰的阶段。镍氢电池相比镍镉电池安全, 重量轻, 但是爆发力不足, 以及一定的记忆效应限制了其在动力电池里面的发展。锂离子电池比镍氢电池轻, 无记忆效应, 但是其容量难以做大, 爆发电流能力弱。锂聚合物电池与锂离子电池类似, 但是其容量可以做大很大, 且有突出的爆发电流能力, 但是易爆炸的特性使用户需要关注其使用环境。

电池作为移动机器人的离线动力源, 主要需要满足重量轻, 储电能力强, 爆发能力强的电池, 综合上面的描述, 本文在设计中选择 4 芯锂聚合物电池 (单芯 3.7V) 作为移动机器人平台的离线动力源。

3.6 本章小结

本章按照第二章的设计思路与方法, 详细介绍了移动机器人平台硬件各层: 传感与驱动层、实时控制层、高性能处理层的核心硬件选型与设计, 以及系统的电源管理部分设计, 基本搭建起移动机器人的雏形。

4 移动机器人软件设计

移动机器人是一个机械结构、硬件电路、软件程序组成的综合有机体。其中软件是移动机器人各部分有机联系在一起的重要通道，也是发挥移动机器人硬件各部分功能与性能的途径，荷兰的 Andrew S.Tanenbaum 教授曾说过：“如果没有软件，计算机将是一堆破铜烂铁”^[41]，可见软件在系统中的重要性。由于本文设计的移动机器人平台是一个开放的系统，其软件无穷尽，但是移动机器人所有的应用软件都必须有系统软件与基础信号处理程序的支持，在本章节主要介绍本文所设计的移动机器人的系统软件结构、多种传感器信号处理以及多电机的驱动控制方法。

4.1 系统软件方案

由第 2 章的设计分析可知，移动机器人的软件分布在硬件的三层结构上。这是从理论上的划分，但是从实际的设计中可以看出，传感与驱动层的软件主要是接口数据转换，配置与基础驱动程序比较简单，本文不详述。而高性能处理层的软件主要用于大量运算与高级嵌入式用户体验，这与机器人的核心控制关系不大，不是本文的研究重点。而实时控制层，作为移动机器人的核心部分，其主导着移动机器人的绝大部分功能，包括传感器的信号处理，驱动器的控制，人机交互系统的管理，以及与高性能处理层的通讯等，故本文重点介绍实时控制层的软件结构。

由于技术的迅速发展，嵌入式系统的各种软件层出不穷，在应用时很多部分可以直接移植使用，考虑到版权等问题，以及现在开源软件的大趋势，本文的软件平台设计时主要考虑使用性能稳定、维护良好、开发工具与代码开源的软件解决方案。

4.1.1 RTOS 选型

移动机器人的实时控制层对其性能的要求主要体现在实时性上，即系统在能预见的时间内需要有响应。由于实时控制层所管理与控制的资源非常庞杂，用简单的前后台程序已不能满足其系统的需求，故实时控制层中需要搭载一个嵌入式实时操作系统

RTOS (Real-Time Operating System)。从文献[36][42][43]中可知, 实际可用于嵌入式平台的操作系统有非常多种, 对于嵌入式实时系统, 常用的有: $\mu\text{C}/\text{OS-II}^{[44]}$ 、RTEMS、FreeRTOS、TOPPERS/ASP 等。从文献[45]中可知, 日本名古屋大学教授 Hiroaki Takada 从 2000 年发起的 TOPPERS (Toyohashi OPen Platform for Embedded Real-time Systems) 计划下的 TOPPERS/ASP 内核具有开源、性能优秀、维护良好持续发展、开发工具链完备等多种优点, 特别适合小型嵌入式系统使用。综合考虑上述多种 RTOS, TOPPERS/ASP 内核为最适合本文中设计的移动机器人平台移植使用。

4.1.2 嵌入式中间件、组件系统与驱动

对于移动机器人平台的实时控制层而言, 选择合适的操作系统对于系统软件平台来说还是不够的。实时控制层上有各种存储、通讯组件, 均需要各种嵌入式中间件、组件系统与驱动的支撑。

(1) 文件系统

针对嵌入式应用, 现在常用的文件系统可以选择 Micrium 公司的 $\mu\text{C}/\text{FS}$, 开源文件系统 EFSL (Embedded Filesystems Library), 以及 FatFS。 $\mu\text{C}/\text{FS}$ 由于其公司 Micrium 的商业性质, 虽然发展得比较完善但是不适合本文的设计使用。由于 TOPPERS 组织有针对 FatFS 在其下 RTOS 内核的移植范例, 故本文设计的移动机器人平台实时控制层的文件系统选择移植 FatFS。

(2) TCP/IP 协议栈

因为 RTOS 采用 TOPPERS/ASP 内核, 故 TCP/IP 协议栈采用 TOPPERS Projects 下遵循 ITRON TCP/IP 规范的 TINET (由占小牧国家科技学院计算机科学与工程系开发) 作为本文所设计的移动机器人的 TCP/IP 协议栈。TINET 的特点是可非常容易地创建 socket 接口兼容库, 为每个协议类型定义最佳的 API, 特别适合实时操作系统使用, 系统可以静态配置等。

(3) USB 协议栈

USB 部分主要需要支持 USB Host 对 U 盘等大规模存储器的读写, USB Device 与

USB 主机的通讯支持。

嵌入式 USB 堆栈也有较多的选择，针对本文中移动机器人平台的应用，主要需要考虑开源软件，性能上支持所有的 USB 传输类型（批量、控制、中断和同步），支持 DMA，与系统硬件配合良好等。因为实时控制层的 USB 控制器是使用 LPC2478 集成的 USB 控制器，通过分析比较，本文采用 NXP 公司的 LPCUSB 为框架进行修改和开发，结合 NXP 公司提供的 USB Host Lite for LPC，弥补 LPCUSB 在主机控制器上的不足。

（4） 其余外设驱动

除了嵌入式中间件与组件系统，还有一部分较容易实现且与硬件紧密相关的外设驱动需要开发。主要包括 ARM 基础参数设置，IIC 总线驱动，SPI/SSP 总线驱动，RTC 驱动，定时器资源（PWM，CAP，MAT）的驱动等。

4.1.3 系统软件结构

通过上文的分析，选型与设计，可以得出移动机器人平台实时控制层软件结构如图 4-1 所示，以 TOPERS/ASP 内核以及各种必备的设置与驱动程序，各种嵌入式组件与中间件，FatFS、TINET、USB Host Stack、USB Device Stack 等由 TOPERS/ASP 内核管理与控制，最顶层为用户应用程序。

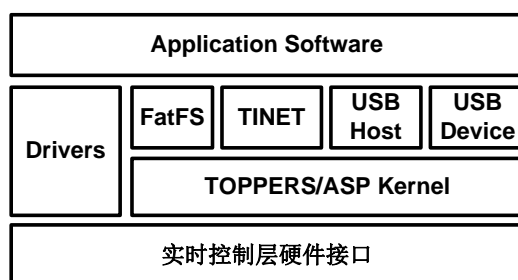


图 4-1 移动机器人平台实时控制层软件结构图

4.2 传感器信号处理

移动机器人平台对传感器的支持众多，本文中主要研究自动驾驶巡线传感器的信号处理与控制。巡线传感器中主要包括摄像头、激光传感器、LC 谐振传感器，下面

就这三种传感器的信号处理逐一进行说明。

4.2.1 传感器识别目标

如图 4-2 所示为移动机器人平台自动巡线的目标路面特征信息。该路面特征为宽度 50cm 的白底，中心有 2.5cm 宽的黑色引导线，在黑色引导线的中心下方铺设电磁诱导信号线，电磁诱导信号源为 20KHz/200mA 的交变电流源。

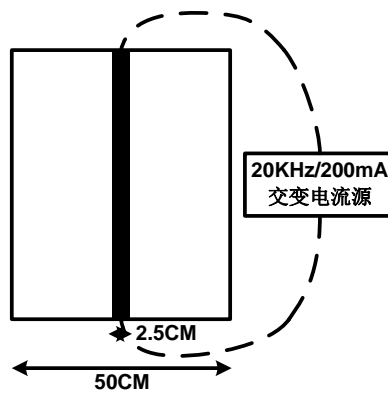


图 4-2 移动机器人自动巡线的目标路面特征

4.2.2 摄像头信号处理

摄像头在移动机器人自动巡线运行时最重要的一种传感器，其速度快，检测范围大，但是信息量大造成其信号处理时需要耗费很多系统资源。本文设计的移动机器人可以兼容多种数字摄像头的接入，本文采用 Omni Vision 生产的 OV5017 图像传感器，自制摄像头模组实现。Omni Vision 生产的 OV5017 是一种标准速度的数字 COMS 图像传感器，其最快输出图像频率为 50 帧/s，输出图像尺寸为 384*288。因为目标路面特征非常简单，故本文采用直接二值化图像、图像压缩、路径提取、路径优化等步骤实现摄像头图像有效信号的提取。

如图 4-3 所示，为 OV5017 摄像头拍摄出一幅实际图像（经过一次二值化处理后），可以看到有效信号非常明显，无效信号主要集中在路肩的一些阴影、噪点与杂物影像。因为巡线算法最后需要的是实际路径在图像中的位置，即坐标，故有此本文采用基于坐标的图像处理方法，通过 FPGA 的硬件并行处理，最后输出目标路径的坐标

给巡线算法使用。

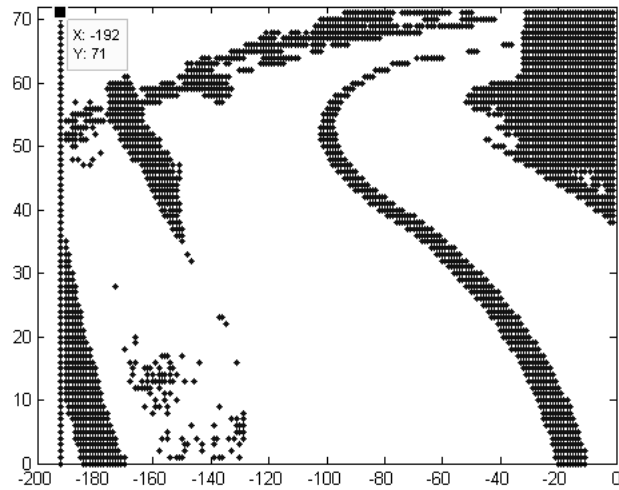


图 4-3 OV5017 拍摄出的图片

如图 4-4 所示为图像信号处理的程序框图，该部分程序由软硬件结合完成，前期大量数据由 FPGA 硬件化处理，输出有效图像坐标后再交由 ARM 进行下一步处理。

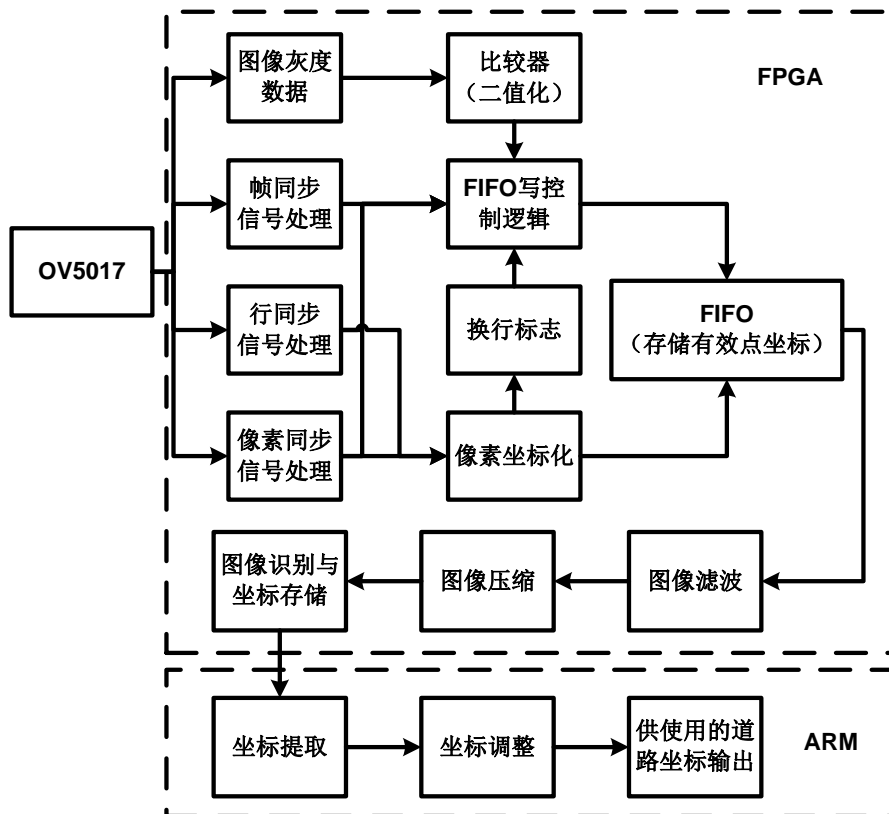


图 4-4 图像信号处理流程图

在 FPGA 中进行处理主要有：将图像灰度值一次二值化（如上图所示的输出），对像素（PCLK: Pixel Clock）、行（HREF: Horizontal Timing Reference）、帧（VSYNC: Vertical Timing Reference）同步信号进行分频、去噪等处理，使用计数器进行实时坐标计算；二值化的比较结果与三个同步型号的有效部分进行逻辑运算，同时加入行末坐标控制，产生黑点坐标的写控制信号，控制 FIFO 的总线存储实时计算的黑色点坐标信号。图像处理逻辑提取存储在 FIFO 中的黑色点坐标，进行图像滤波去噪、图像中值压缩以及有效路径识别并存储，等待 ARM 读取有效路径坐标。

在 ARM 中进行的处理主要有：读取 FPGA 处理后的有效路径坐标，然后进行优化与调整，因为图像难免有干扰或者瑕疵，在 ARM 中便于进行这方面的处理操作，使有效路径更加便于高层算法处理与运算，然后将供使用的有效道路坐标组数据输出。

4.2.3 激光阵列传感器信号处理

在传感器设计时，激光阵列有 16 个发射器，5 个接收器，激光阵列需要逐个发射，接收回来的信号经过加权处理后，得到有效信号数据组，因为信号是数字信号故处理时较为容易，主要分为：发射控制、接受判断和噪点处理。

（1） 发射控制

激光阵列为发射管定位型传感器，接收器可以接受到所有发射器的返回信号，故在使用时需要进行逐一发射扫描，避免两个激光发射器同时发射后出现信号无法判断的情况。因为系统中有 FPGA，按照 ARM 的指令实现循环扫描比较容易，仅需要设置时间间隔、发射时间长度、调制频率等参数，然后按照激光发射器的地址顺序逐一循环发射即可。

（2） 接收判断

在接收时，理想情况下是若激光器照射到白色路面则接收器均输出低（白色），若激光器照射到黑色路面则接收器均输出高（黑色）。但是由于接收管的特性不完全一致，而且路面难以保证完全的平整，故有时会出现某些接收管不灵敏的情况，故可以根据多个接收管的状态进行加权判断，较为简单的方法是数接收器返回信号为白色的数量，

若大于或者等于 3 个则该次发射中该发射管所照射的位置为白色，反之为黑色。

(3) 噪点处理

理想情况下激光阵列传感器检测到的黑线均是路面信号，但是不排除路肩、闪光、杂物等干扰，故在得出一组完整的激光阵列扫描数据后同样需要进行滤波处理。因为激光阵列的扫描频率约为 25Hz，而移动机器人的运动速度仅在 0.5m/s 左右，因为路面时连续的，故易知每次激光阵列传感器的扫描结果不会产生跳变，故存储上一次扫描结果的处理后值，将即时数据与之计较，出现跳变的发射管数据可视为噪点予以去掉。

4.2.4 LC 谐振阵列传感器信号处理

由于 LC 谐振阵列传感器输出的是模拟信号，故使用前需要进行标定，然后进行 AD 采样、信号归一化处理，最后对中心偏差的计算与处理，得出结果后进行输出供应用软件使用。

(1) LC 谐振阵列传感器的特性标定

在排除背景电磁杂波干扰，且诱导线电磁辐射均匀的时候，LC 谐振阵列传感器中每个传感器与中心黑线不同的偏移距离上均会有其特征的接收值，逐点测试后可以得到 LC 谐振阵列传感器的特征曲线组，对特征曲线组进行归一化后，保存在存储器中，便于使用时查表推导某一接收器与中心线的距离。

(2) 环境的标定

对于模拟式传感器，在不同的场合下其背景干扰是不一致的，其电磁诱导线的埋设深度也略微有差别，为了保障处理时的尽量准确，需要对传感器进行一次标定。标定的过程主要是得出当前一段时间内该场合的背景电磁波与最大目标电磁波接收值，即每个 LC 谐振传感器在远离诱导线时测得的平均接收值与在诱导线附近测得的最大平均接收值，并存储在处理器中。

(3) 信号归一化

因为 LC 谐振阵列传感器中的每个 LC 谐振单元，放大电路，检波电路等都会受到

其特性的影响，故即使使用同样的电路参数，或者用电路参数进行 LC 谐振传感器特性补偿后也很难是各个接收器的特性完全一致，为了方便后续处理在 AD 采样完毕后，首先需要将 AD 值进行归一化处理。归一化处理的方法为，使用前标定的各个传感器接收到的路面黑白部分最高电压和最低电压，然后计算出各个传感器的相对值。归一化的公式为：

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

(4) 传感器信号滤波

虽然理想情况下 LC 谐振阵列传感器检测到的黑线均是路面信号，但是不排除由于运动时的抖动，邻近并行诱导线的电磁波干扰，故在归一化后需要对传感器信号组数据进行滤波处理。因为 LC 谐振阵列的扫描速度非常快，约为 100Hz，而移动机器人的运动速度仅在 0.5m/s 左右，故易知每次 LC 谐振阵列传感器的扫描结果不会产生突变，故存储上一次扫描结果的处理后值，将即时数据与之计较，出现突变的接收管数据可视为噪点予以去掉。

(5) 黑线偏差的计算

因为中心电磁诱导线为 20KHz/200mA 的长导线，由于移动机器人的体积与电磁诱导线相比可以看作质点，故可将电磁诱导线当做无限长直导线处理。由比奥萨法尔定律，传感器阵列与中心诱导线的几何关系可得，正交方向距离为 x 的传感器处磁场大小为：

$$B_x = K_B \bullet \frac{h}{x^2 + h^2} \quad (4-2)$$

式中： B_x --正交方向距离为 x 的传感器处磁场大小

x --传感器距中心诱导线的距离

h --传感器离地面的高度

K_B --系数（由比奥萨法尔定律可计算）

因为磁场强度正比于传感器在该点产生的谐振电压，故可以知道该点传感器的输

出电压为:

$$U=K \bullet \frac{h}{x^2+h^2} \quad (4-3)$$

式中: U --距离为 x 的传感器返回电压 (放大检波等电路处理后的值)

K --系数 (含有电路参数)

因为 LC 谐振阵列传感器每一个传感器的探测范围很大, 理论上移动机器人使用一个 LC 谐振传感器就足够进行巡线, 为了提高信号的精度与系统的稳定性, 本文中对 LC 谐振传感器的处理为对称分布, 两个为一组, 进行差值运算后得到中心诱导线与移动机器人的偏移距离和方向。

设一组传感器中左边传感器的返回电压为 U_l , 与中心诱导线的距离为 X_l , 右边传感器的返回电压为 U_r , 与中心诱导线的距离为 X_r , 两传感器的间距为 $L = X_l + X_r$, 传感器中心线与中心诱导线的偏差 $offset = \frac{1}{2}(X_l - X_r)$ 。将其返回电压取倒数后相减可得:

$$\frac{1}{U_l} - \frac{1}{U_r} = K \bullet \frac{X_l^2 - X_r^2}{h} \quad (4-4)$$

化简后可得:

$$offset = K_o \bullet \frac{h}{L} \bullet \frac{U_r - U_l}{U_r \bullet U_l} \quad (4-5)$$

式中: K_o -- $offset$ 的计算系数

由此可知, 传感器中心线与中心诱导线的偏差同左右传感器的电压返回值成一线关系, 对于 K_o 则可通过传感器特性标定方法进行测定。

4.3 多电机协调控制

本文设计的移动机器人其承载平台的运动学特点是无主动转向机构, 4 轮独立驱动, 故在移动机器人进行转向运动时需要将转向运动分解到独立驱动的 4 个轮子上,

再与直线运动的分量合成为最终移动机器人的运动状态和轨迹。

4.3.1 自主运动方案选择

如图 4-5 所示，建立移动机器人的运动学模型，因为移动机器人是通过自主传感器识别并前进，而不是通过全局摄像头进行路径规划，故每时每刻移动机器人都是以自身位置（如图 4-5 所示，用移动机器人的几何中心 C 点代表移动机器人的位置）为坐标原点，移动机器人的轮子切向为 Y 轴，移动机器人的轮子法向为 X 轴，进行运动。若移动机器人需要从 $C_0(0,0)$ 经过时间 t 的运动到 $C_t(x,y)$ 。因为移动机器人有 4 个独立驱动电机，故其执行运动的方案有非常多种选择，比较简洁的有以下几种方案：

- (1) 对着目标点 C_t 完成原地转向，走直线到达目标点 C_t 。
- (2) 移动机器人沿着切线方向直线前进到 C_m ，原地转向 90 度，走直线到达目标点 C_t 。
- (3) 规划圆弧路径，以 TC 点为圆心沿圆弧 C_0C_t 以切向速度 V 匀速运动到目标点 C_t 。

上述三种方案都较易实现移动机器人的朝目标点运动。方案一最为简单，是移动机器人运动的最短路径，在移动机器人仅运动一段停止的情况下采用效果比较好，若是连续改变目标点则该方案不合适；方案二类似于数控系统中的插补方式，理论上可以满足移动机器人的任何位置转移，但是实际中移动机器人的运动速度非常有限，原地转 90 度非常耗时，而且走两段直线的路径过长，浪费时间，降低效率；方案三计算量较方案一和方案二都大，而且其坐标系需要转向，分析较为复杂，而且并非最短路径，但是通过该方案走的路径平滑，可以让移动机器人随自身状态的变化平滑的运行，比较适合通过自主传感器的目标识别进行运动控制。本文采用方案三进行移动机器人的运动控制。

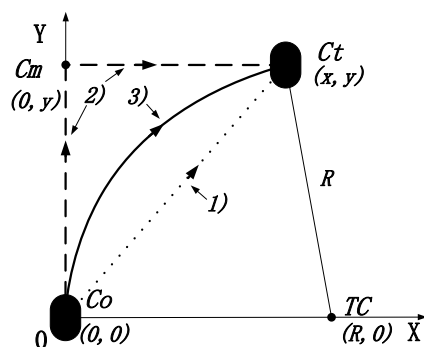


图 4-5 移动机器人运动轨迹示意图

4.3.2 运动轨迹与各轮速度的关系

如图 4-6，因为移动机器人走圆弧 C_0C_t ，故由几何关系可知，移动机器人的转动圆心为初始坐标系 X 轴与目的点坐标系 X 轴的交点 TC 。

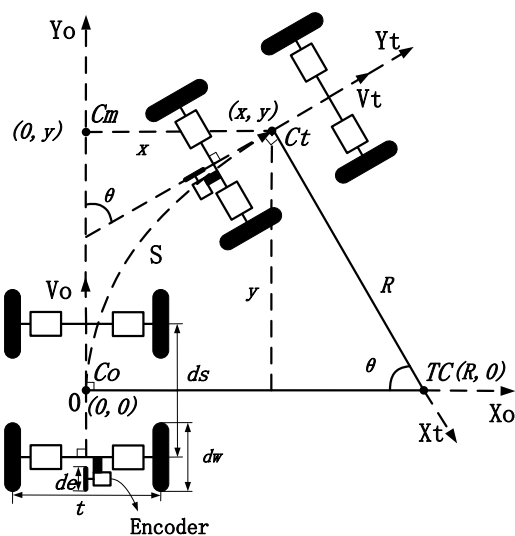


图 4-6 移动机器人平台运动学建模

通过运动轨迹的几何结构可得下面的运动轨迹约束方程组：

$$\begin{cases} \theta = \arcsin \frac{y}{R} \\ R^2 = y^2 + (R-x)^2 \\ S = R \cdot \theta = V \cdot t \end{cases} \quad (4-6)$$

式中: θ --移动机器人运动到目标点其坐标转动的角度

x, y --起始点与目标点在 X 轴与 Y 轴的坐标偏移

R --移动机器人的运动转向半径

S --移动机器人的运动轨迹路程

V --移动机器人的运动切向速度

t --从起始点到目标点, 移动机器人的运动时间

上式得出了移动机器人的运动学轨迹约束, 因为移动机器人是 4 轮独立驱动, 故必须建立去每个驱动轮与运动轨迹的关系才能进行运动控制。因为移动机器人的路径规划为走圆弧, 故可将其瞬时的运动状态进行 X 轴与 Y 轴的分解可得:

$$\begin{cases} V_y = \frac{dy}{dt} = R \bullet \frac{d\theta}{dt} = R \bullet \omega = V \\ \omega_m = \frac{\theta}{t} = \frac{V}{R} = \omega \end{cases} \quad (4-7)$$

式中: θ --移动机器人运动到目标点其坐标转动的角度

x, y --起始点与目标点在 X 轴与 Y 轴的坐标偏移

R --移动机器人的运动转向半径

V_y --移动机器人的运动切向速度

V --移动机器人的运动平均速度

ω_m --移动机器人的自转角速度

ω --移动机器人的圆弧运动角速度

t --从起始点到目标点, 移动机器人的运动时间

由式(4-7)可知, 移动机器人的圆弧运动可以分解为沿 Y 轴方向的以平均速度 V 进行的向前运动和自身以 V/R 为角速度的转动。下面就这两个运动的分解进行实现性分析。

(1) 沿 Y 轴方向的以平均速度 V 进行的向前运动

移动机器人为 4 轮独立驱动, 为了实现沿 Y 轴方向的以平均速度 V 进行的向前运动, 则需要使每个轮子的速度均为 V , 且方向相同即可。

(2) 自身以 V/R 为角速度的转动

移动机器人没有主动式转向结构，但是因为 4 各轮子独立驱动，故可以通过 4 个轮子的不同运动方向与速度的配合实现转向。如图 4-7 所示，将移动机器人每个轮子的运动沿着对角线和对角线的垂线进行分解可得：

$$\begin{cases} V_t = \frac{t}{\sqrt{ds^2 + t^2}} V \\ V_n = \frac{ds}{\sqrt{ds^2 + t^2}} V \end{cases} \quad (4-8)$$

式中： V_t --移动机器人单轮运动速度与移动机器人对角线的切向分量

V_n --移动机器人单轮运动速度与移动机器人对角线的法向分量

V --移动机器人单轮运动速度

ds --移动机器人的轴距

t --移动机器人的轮距

说明：本文中以下内容中均由如下约定，对名称为 X 的参数，左前轮为 X_{lf} ，左后轮为 X_{lr} ，右前轮为 X_{rf} ，右后轮为 X_{rr} 。

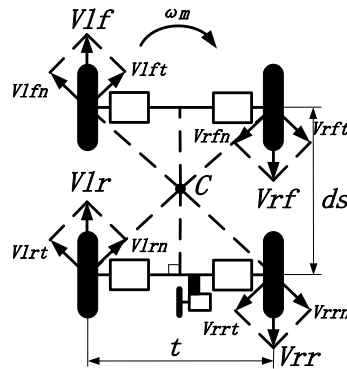


图 4-7 移动机器人转向状态运动学分解

由于 $V_{lf} = V_{lr} = V_{rf} = V_{rr}$ ，易得 4 个轮子的运动速度与移动机器人对角线的切向分量 $V_{lft} = V_{lnt} = V_{rft} = V_{rrt}$ ，且均是沿着同一转动方向，左前轮与右后轮的速度与移动机器人对角线的法向分量 $V_{lfn} = V_{rrn}$ ，但是方向相反，故刚好抵消，左后轮与右前轮的速度与移动机器人对角线的法向分量 $V_{lrn} = V_{rfn}$ ，但是方向相反，同样刚好抵消。故可知此时

移动机器人以自身几何中心 C 为转动中心，以线速度 $V_t = \frac{t}{\sqrt{ds^2 + t^2}} V$ ，角速度

$\omega_m = \frac{t}{ds^2 + t^2} V$ ，做原地转动。

故由式(4-6)、(4-7)、(4-8)可以合成当移动机器人以 TC 点为圆心沿圆弧 C_0C_t 以切向速度 V 匀速运动到目标点 C_t 时每个轮子的期望速度 V_{lf} ， V_{lr} ， V_{rf} ， V_{rr} 约束方程组：

$$\begin{cases} V_\omega = \frac{ds^2 + t^2}{t} \bullet \omega_m = \frac{ds^2 + t^2}{t} \bullet \frac{V}{R} \\ V_y = V \\ V_{lf} = V_{lr} = V_y + V_\omega \\ V_{rf} = V_{rr} = V_y - V_\omega \\ R = \frac{x^2 + y^2}{2x} \end{cases} \quad (4-9)$$

式中： x, y --起始点与目标点在 X 轴与 Y 轴的坐标偏移

V_y --移动机器人单轮的法向运动速度分量

V_ω --移动机器人单轮的转动运动速度分量

ω_m --移动机器人单轮的转动运动角速度

V --移动机器人圆弧运动的平均速度

R --移动机器人的运动转向半径

ds --移动机器人的轴距

t --移动机器人的轮距

令 $V = [V_{lf} \quad V_{lr} \quad V_{rf} \quad V_{rr}]$ ， $K = \frac{ds^2 + t^2}{t}$ ， $\Delta XY = \frac{2x}{x^2 + y^2}$ ，移动机器人圆弧运动的

平均速度为 v_0 ，可得移动机器人运动的速度控制向量：

$$V = v_0 [1 + K \bullet \Delta XY \quad 1 + K \bullet \Delta XY \quad 1 - K \bullet \Delta XY \quad 1 - K \bullet \Delta XY] \quad (4-10)$$

有上式可知，移动机器人实现圆弧运动时，各个独立驱动轮的期望速度与移动机器人需要移动的位置改变和整体平均速度成上式所述的函数关系。

4.3.3 给定速度与电机 PWM 的关系

根据前文各轮子期望速度与移动机器人运动轨迹，以及各种参数的关系，再融合驱动器、电机参数对控制的影响，即可得到机器人运动位移，期望平均速度，与各个轮子电机给定的关系。

因为移动机器人承载平台的驱动器为 4 只冯哈伯 12V 空心杯行星齿轮减速电机，带 12 线编码器，由空心杯电机的机械特性曲线知道，其转速与电压的关系近似为带补偿的线性关系，故可以分析移动机器人平台的运动速度，其各个电机期望速度，与各个电机需要的 PWM 占空比的关系，进行带闭环限速的直接 PWM 控制。根据 H 全桥 PWM 控制的特点，电机转速与轮子线速度关系，以及普通有刷永磁直流电机运行特点，可以得到 PWM 与电机转速的关系。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{t_{on}}{1/f} \bullet U_B = U_a + R_{on} \bullet i_a \\ U_a = L_a \bullet \frac{di_a}{dt} + R_a \bullet i_a + K_e \bullet \omega \\ v = dw \bullet \pi \bullet \frac{r}{60} \bullet \frac{1}{m} \\ \omega = \frac{r}{60} \bullet 2\pi \end{array} \right. \quad (4-11)$$

式中： U_a --电机电枢电压

i_a --电枢电流

R_{on} --驱动器导通电阻

U_B --电池电压（可看作恒压源）

t_{on} --PWM 中正频宽（高有效）

f --PWM 频率

r --电机转速（单位为 RPM）

ω --电机转动角速度（单位为 rad/s）

L_a --电枢电感

R_a --电枢电阻

K_e --电势系数

v --轮子线速度

m --减速比

dw --轮子直径

令 $\delta = \frac{1}{U_B} \left(L_a \bullet \frac{di_a}{dt} + R_a \bullet i_a + R_{on} \bullet i_a \right)$, 简化式(4-11)可得:

$$\frac{t_{on}}{1/f} = \frac{2K_e}{U_B} \bullet v \bullet \frac{m}{dw} + \delta \quad (4-12)$$

$$\text{令 } PWM = \begin{bmatrix} \frac{t_{lf}}{1/f} & \frac{t_{lr}}{1/f} & \frac{t_{rf}}{1/f} & \frac{t_{rr}}{1/f} \end{bmatrix}, \quad K_E = \frac{2K_e}{U_B}, \quad \Delta = \begin{bmatrix} \delta_{lf} & \delta_{lr} & \delta_{rf} & \delta_{rr} \end{bmatrix}, \text{ 结}$$

合 4.3.2 中得出的速度关系, 可得控制输出与给定的关系:

$$PWM = K_E \bullet \frac{m}{dw} \bullet v_0 \bullet \begin{bmatrix} 1+K \bullet \Delta XY & 1+K \bullet \Delta XY & 1-K \bullet \Delta XY & 1-K \bullet \Delta XY \end{bmatrix} + \Delta \quad (4-13)$$

在本文中移动机器人的各个驱动电机选用相同型号, 移动机器人的前轴轮与后轴轮选择相同减速比, 均为 $m:1$ 。同一个移动机器人中机械参数 ds, t, dw 均为常数, 故令

$$F(\Delta XY) = \begin{bmatrix} 1+K \bullet \Delta XY & 1+K \bullet \Delta XY & 1-K \bullet \Delta XY & 1-K \bullet \Delta XY \end{bmatrix}, \quad K = K_E \bullet \frac{m}{dw}, \text{ 得:}$$

$$PWM = K \bullet v_0 \bullet F(\Delta XY) + \Delta \quad (4-14)$$

式(4-14)中 Δ 非常小, 可忽略或者进行一定实验补偿, 故可以得出各个驱动电机的给定 PWM 与期望运动平均速度 v_0 成正比, 与位移的 $F(\Delta XY)$ 函数关系。

4.3.4 直接 PWM 控制方法

移动机器人运行的路面可看作摩擦系数近似均匀路面, 故运行时其整体转动惯量

与负载恒定。所以可对移动机器人进行 PWM 与速度，加速度的标定。运行时根据期望速度，加速性能综合运算后直接输出各个驱动电机的 PWM。同时因为控制器是在嵌入式处理器上实现，所以需要考虑处理器的实际运算能力。于是本文在实现时通过参考理论分析，采用控制变量法进行逐级测定，再反推各项系数。通过这些测定，移动机器人的电机控制实现转化为目标速度与角度对 PWM 的查表，再通过差速表对四台驱动电机进行分别给定。带闭环保护的前馈算法对参考目标速度 v_0 的求取，整个算法对系统资源消耗少，速度快，并且能够比较好的满足移动机器人运行的实际情况。

4.4 本章小结

本章主要对移动机器人平台的软件结构进行分析与设计，以及比较重要三种的巡线传感器的信号处理方法，多电机的协调控制方法进行研究，推导一定的理论依据，得出了可行的实现方法。

5 实验结果与分析

本章主要是介绍通过前文所述的移动机器人设计方法所设计的移动机器人的性能测试实验结果，并对结果进行分析。实验主要包括移动机器人的电气特性测试，包括电源特性测试，信号完整性测试等，以及移动机器人的路径识别实验等。

5.1 基础性能测试

5.1.1 测试环境

本文所设计的移动机器人平台进行基础性能测试环境如表 5-1 所示，主要测试工具为万用表，示波器，常规/差分探头等。

表 5-1 基础性能测试环境

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，±25V	

5.1.2 电源测试

电源测试主要包括 5.0V 电源，3.3V 电源，1.2V 电源以及 FPGA 上电测试。

(1) 5.0V 电源

测试结果如图 5-1，5.0V 电源在运行时的平均值为 4.97V，最大值 5.12V，最小值 4.81V，其纹波峰峰值为 44mV，满足系统设计要求。

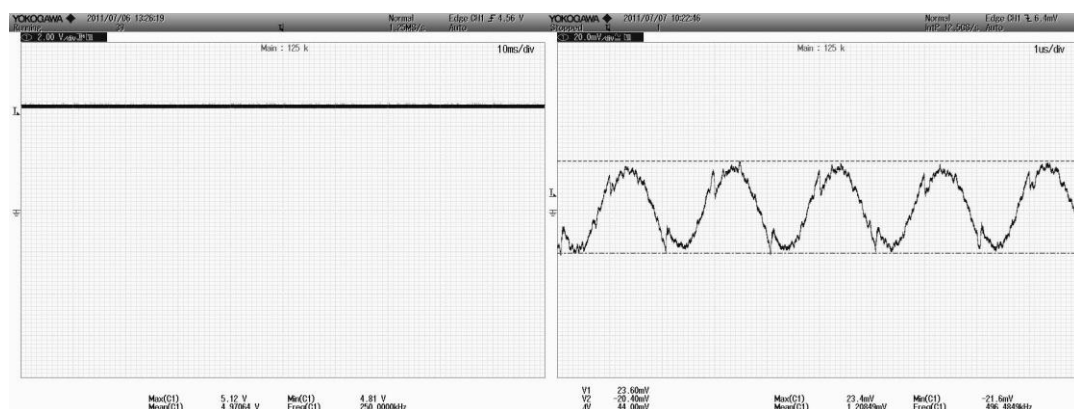


图 5-1 DCDC 5.0V 电源测试波形（左）与纹波（右）

(2) 3.3V 电源

测试结果如图 5-2，由于 3.3V 电源是 LDO 式，故不测量其纹波。在运行时的平均值为 3.32V，最大值 3.44V，最小值 3.20V，满足系统设计要求。

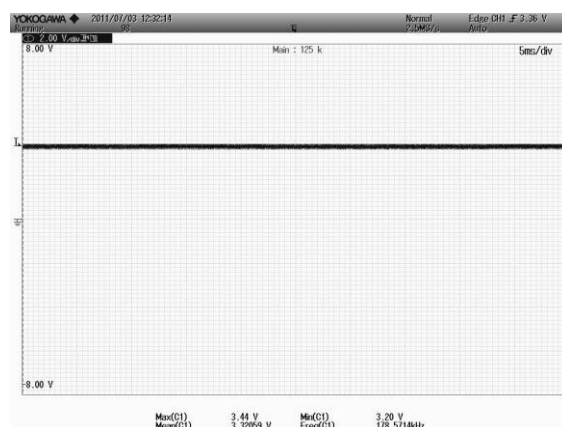


图 5-2 LDO 3.3V 电源测试波形

(3) 1.2V 电源

测试结果如图 5-3，1.2V 电源在运行时的平均值为 1.20V，最大值 1.24V，最小值 1.16V，其纹波峰峰值为 32.4mV，满足系统设计要求。

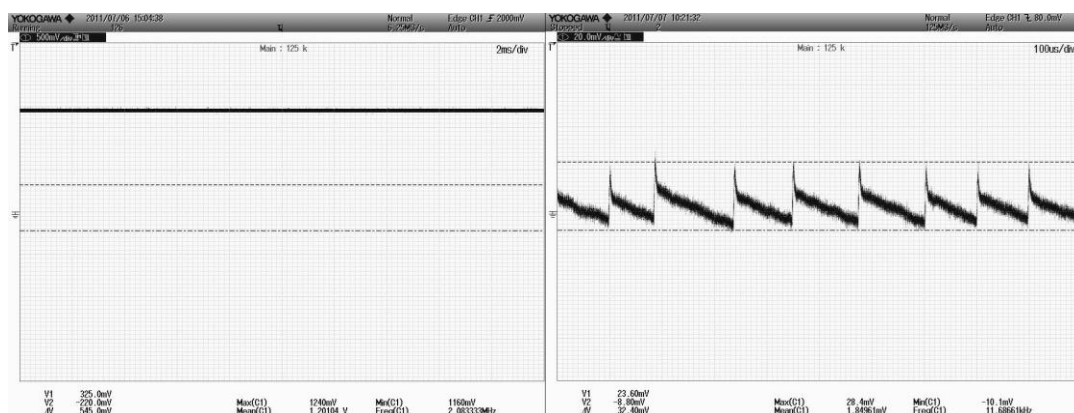


图 5-3 DCDC 1.2V 电源测试波形（左）与纹波（右）

(4) FPGA 上电测试

Spartan-6 系列 FPGA 对电源上电顺序有一定要求，其需要两种电源，分别是提供给 VCCO 的 3.3V，VCCAUX 的 3.3V 和 VCCINT 的 1.2V，其要求电源爬升时间在 0.2ms-50ms，且在爬升期间没有抖动。FPGA 的上电顺序则要求为先上 3.3V 再上 1.2V。各电源对应各种动作的门限电压值见表 5-2。

表 5-2 FPGA 各电源不同动作的有效门限

电源	POR 门限 (V)	运行门限 (V)	上电过程
3.3	0.4	1.1	单调上升
1.2	0.4	1.14	单调上升

上电顺序测试结果如图 5-4 所示，每幅图中上方为 5.0V 上电，下方为对应测试的电源上电情况，测试结果表明，系统电源设计满足系统电源上电顺序与时间要求。

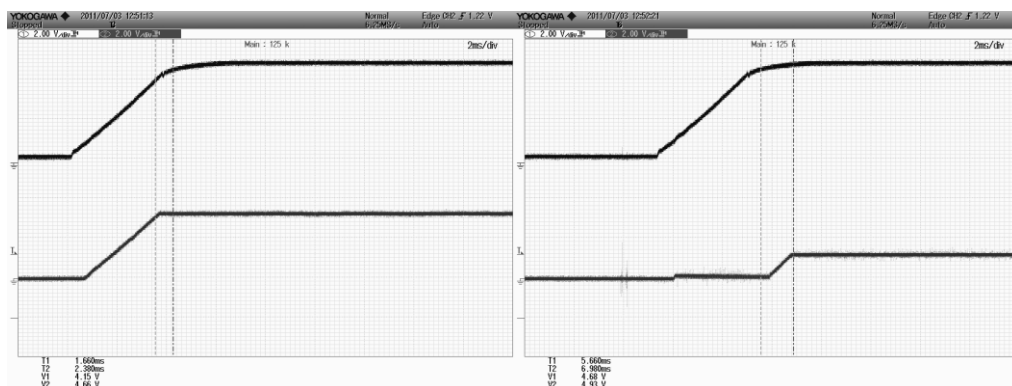


图 5-4 FPGA 上电顺序测试 3.3V（左），1.2V（右）

(5) FPGA 配置引脚上电时序测试

在 FPAG 从串配置模式中,ARM 需要先启动并控制 FPGA 的配置引脚,故在 FPGA 上电但是未配置时其配置管脚需要处于 3.3V 电源的高电平,并且需要在 ARM 的控制下进行相应的动作操作,时序如图 5-5 所示。

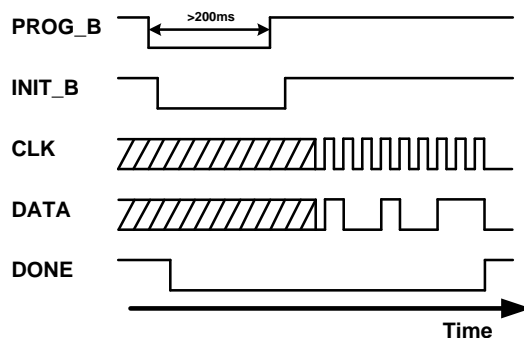


图 5-5 FPGA 从串配置引脚时序图

测试结果如图 5-6 所示, PROG_B 为参考信号在每幅图的上方, 其余各信号如图中结果所示, 测试表明 FPGA 上电后工作正常。

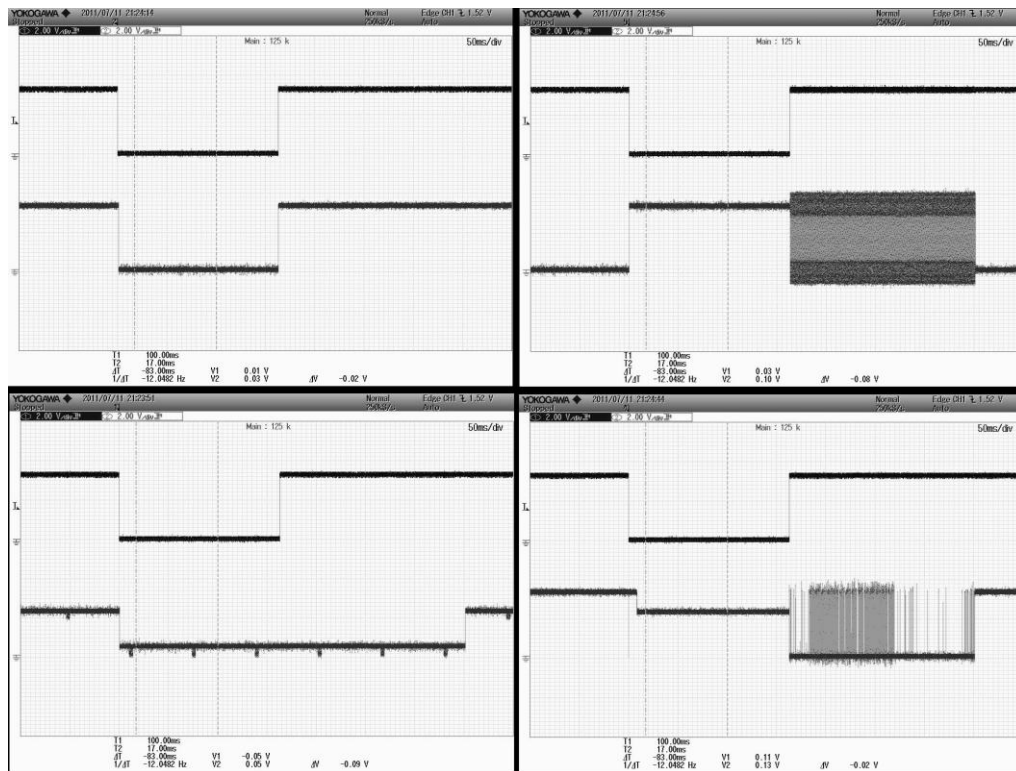


图 5-6 左上: INIT_B, 左下: DONE, 右上: CLK, 右下: DATA

5.1.3 SDRAM 信号完整性测试

SDRAM 信号完整性主要测试其上冲、下冲、振铃等效应，以及各信号的边沿情况。以下波形图片均是使用 DLM2054 示波器捕获。测试使用代码为 TOPPERS/ASP 下运行 TINET 时对 SDRAM 的信号测试。下图中的“最好”与“最差”均是对应信号线捕捉到的最差信号情况。

(1) 主要信号边沿测试

1) 地址线簇 (ADDR0-ADDR14)

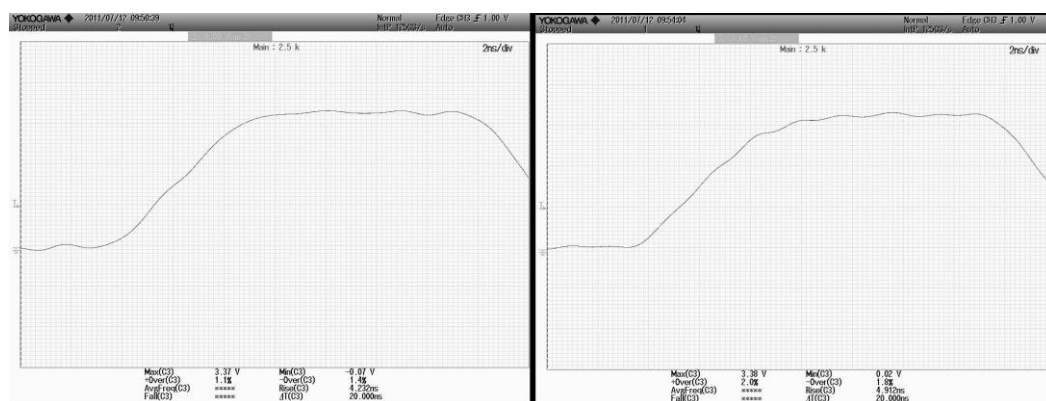


图 5-7 地址线簇最好（左：ADDR5）与最差（右：ADDR6）上升沿

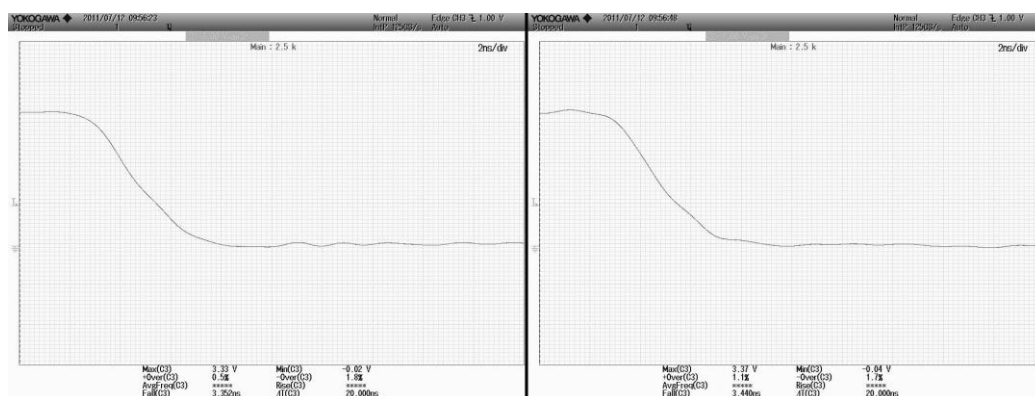


图 5-8 地址线簇最好（左：ADDR9）与最差（右：ADDR8）下降沿

2) 数据线簇 (DATA0-DATA15)

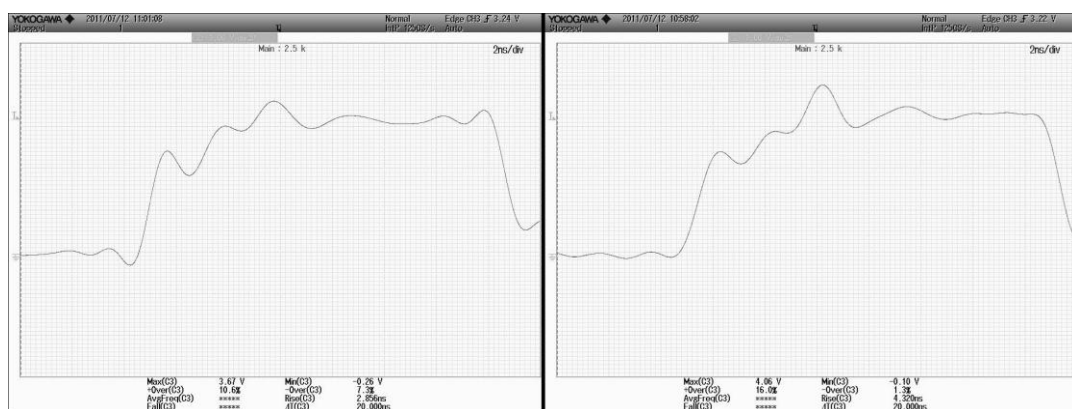


图 5-9 数据线簇最好（左：DATA11）与最差（右：DATA9）上升沿

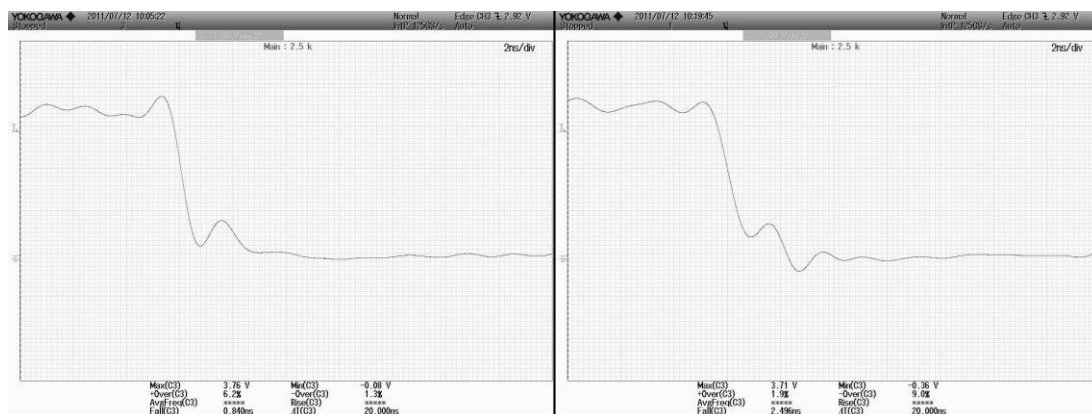


图 5-10 数据线簇最好（左：DATA7）与最差（右：DATA0）下降沿

3) 控制线簇



图 5-11 CLK（左）与 WE#（右）

(2) 主要信号余辉测试

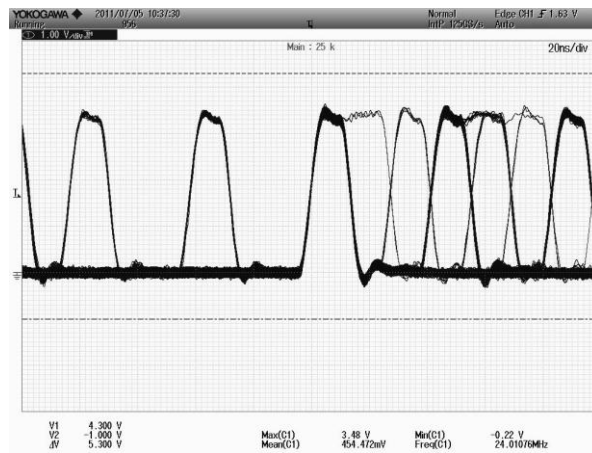


图 5-12 地址线簇典型余辉 (ADDR10)



图 5-13 数据线簇典型余辉 (DATA10)

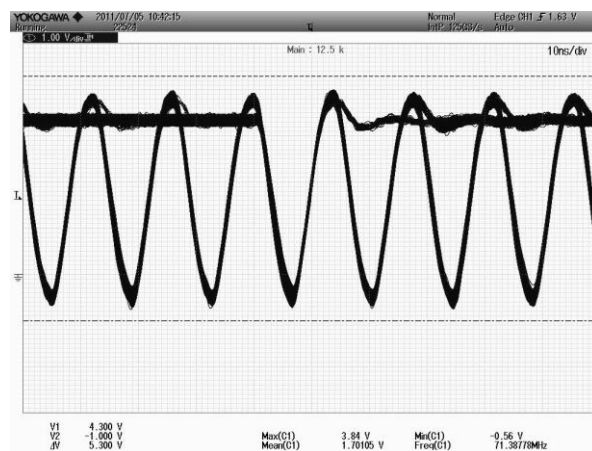


图 5-14 CLK 余辉波形

(3) SDRAM 信号完整性结论

如表 5-3 所示，SDRAM 的各个信号线特性满足 MT48LC16M16A2 资料的要求，符合移动机器人平台的应用要求，能够提供并支持移动机器人平台运行。

表 5-3 SDRAM MT48LC32M16A2P-75D 特征参数测试结果

参数	最大	最小	单位
Voltage on inputs, NC, or I/O pins relative to VSS	-0.36	+4.06	V
参数	上升时间	下降时间	单位
CLK	3.128	2.304	ns
CKE	3.040	2.216	ns
CAS#	3.120	4.288	ns
RAS#	3.160	1.944	ns
CS#	3.288	2.440	ns
WE#	4.864	4.232	ns
DQMOUT	2.672	2.280	ns
DATA	4.816	2.960	ns
ADDR	4.912	3.440	ns

5.2 路径识别

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。

5.2.1 普通路径的识别与优化

如图 5-15 所示，是一张典型的普通路面的二值化（左）与压缩（右）后的结果。二值化出来的图像与实际图像几乎是一致的，仅是变成了黑白图像，压缩采用取路径中心值压缩，同时将路肩大面积的黑色干扰块通过对比的方式直接祛除，可看出经过这一步骤，得到的图像已经比较干净和容易处理（输出结果均是坐标组，处理器可以直接处理）。

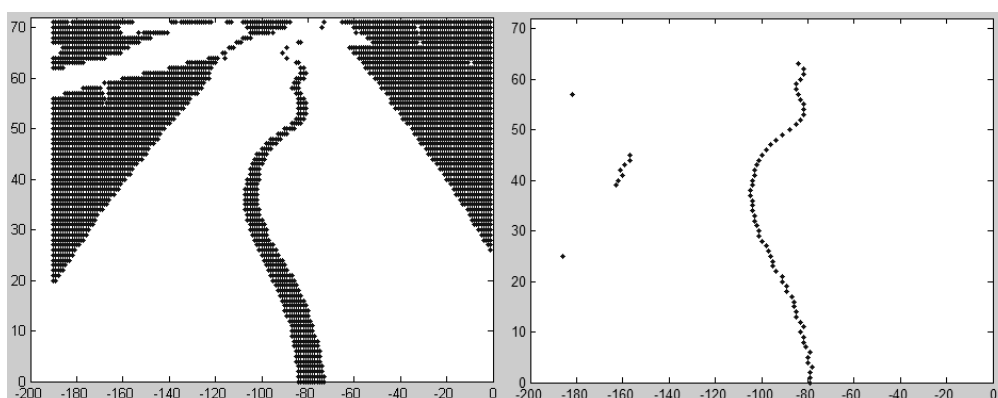


图 5-15 普通路面的二值化（左）与压缩（右）

虽然经过简单处理后得到图 5-15 右边的图像，但是对于移动机器人而言，还需要进一步优化路径，通过优化算法得到如图 5-16 所示的实际运行路线，从图中可看出优化后的路线不保证了移动机器人不丢失引导线，同时其路线非常简单，便于控制。

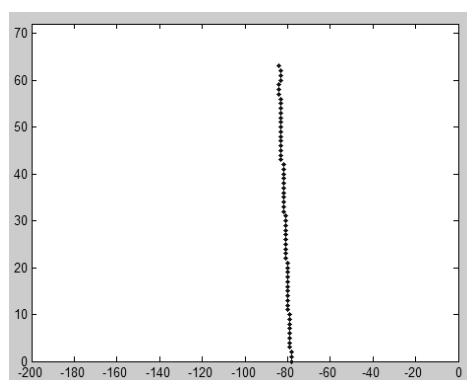


图 5-16 普通路面的路径优化

5.2.2 较复杂路径的识别与优化

如图 5-17 所示，是一张典型的较复杂路面的二值化（左）与压缩（右）后的结果。二值化出来的图像与实际图像几乎是一致的，仅是变成了黑白图像，压缩采用取路径中心值压缩，同时将路肩大面积的黑色干扰块通过对比的方式直接祛除，但是该图像中间出现了路径断裂的情况，需要进一步优化处理后才能便于运动控制（输出结果均是坐标组，处理器可以直接处理）。

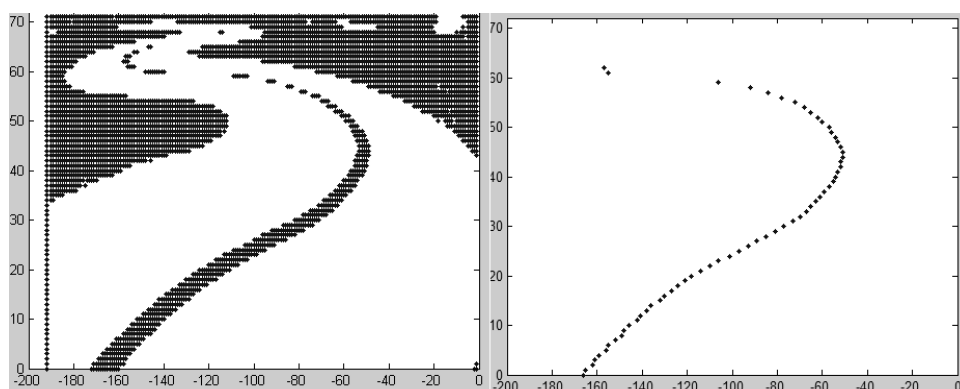


图 5-17 较复杂路面的二值化（左）与压缩（右）

通过优化算法得到如图 5-18 所示的实际运行路线，从图中可看出优化后的路线路线非常简单，便于控制，而且优化的程度是移动机器人不会运行到路以外的地方，因为如果按照图 5-17 左边的顶点进行完全优化或者像 5.2.1 中的方法进行优化，则移动机器人会很快运行到道路的外面，最终会丢失引导线。

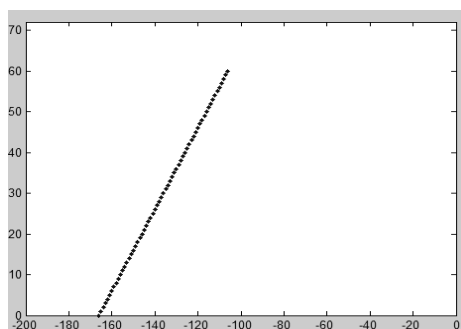


图 5-18 较复杂路面的路径优化

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

本文针对轮式移动机器人平台结构与性能的要求，在综合了国内外轮式移动机器人的设计方案，结合嵌入式系统技术的最新发展的基础上，提出了一种模块化、易重构的轮式移动机器人设计方法。并详细介绍了按照这种方法进行设计的轮式移动机器人平台机械结构、硬件电路与软件程序设计过程，最后进行了各方面的基础测试以及验证性试验，说明该方法适合小型轮式移动机器人的开发，有着较好的实用价值。本文主要完成的工作包括以下几个方面：

(1) 分析并设计了模块化移动机器人的总体结构

本文按照自上而下的方法，从移动机器人总体设计入手，进行分析，逐层分解移动机器人的各种需求，并且按照模块化的设计思路将移动机器人从机械结构、硬件电路、软件程序的技术结构进行分解，并对每个部分进行需求分析，同时按照传感与驱动、实时控制、高性能处理的系统结构进行探讨，提出各层的实现思路。

(2) 详细设计了移动机器人的硬件平台

本文首先进行承载平台的选型，然后按照传感与驱动、实时控制、高性能处理的结构进行硬件电路的详细设计。特别是对层与层之间的接口，特殊的传感器及其接口，驱动器及其接口进行调研，分析，最后设计出合理通用，兼容性好的电路系统；同时对实时控制层的核心处理系统进行分析与设计，提出并实现了高效的 ARM+FPGA 实时控制硬件架构，以及对高性能处理层进行定义与选型。

(3) 进行了平台软件结构设计、传感器信号处理方法研究以及运动学分析

软件是移动机器人必不可少的部分，本文中主要参与移动机器人软件体系结构的设计；对主要的传感器的信号处理进行研究，得出了理论分析的结论，提出了可行的方案；分析四台电机独立驱动移动机器人的运动学理论，并对提出了控制的方案。

(4) 开展了移动机器人平台的基础测试与实验

本文中对移动机器人最关键的硬件电路--电源系统与 SDRAM 信号完整性,进行了性能测试和分析,结果表明所设计的系统满足移动机器人的需求,能够保障移动机器人的正常运行。通过摄像头对路径的识别验证了前文中提出的图像处理方法的可行性。

6.2 研究展望

在上述工作的基础上,作者认为在未来的工作中还应该在以下几个方面进行更深入的研究。

(1) 按照论文的方法将移动机器人的传感器与驱动器进一步丰富的实现,是本文提出的移动机器人设计方法能够更多更快实现各种不同功能应用的轮式移动机器人,达到设计的高级目标;

(2) 完善高性能处理层的软件平台设计,实现移动终端与机器人的通信和控制,并进行高级的图像、声音等处理任务,提高移动机器人平台的人机交互性;

(3) 整理设计资料,规范化设计文档,为移动机器人平台的后续开发做铺垫。

致谢

经过两年半的学习与研究，在学校、老师、师兄、同学等多人的支持、帮助下，作者完成了硕士研究生的课题，撰写了硕士学位论文。作为一个多学科知识交叉融合的复杂系统平台，移动机器人平台的设计仅靠一个人的力量难以完成如此多的工作。在此向整个移动机器人平台研究团队的开发成员，在开发过程中给移动机器人开发团队提出各种帮助、建议与意见的人们表示衷心的感谢。

感谢我的父母对我默默的支持，也谢谢他们这么多年来抚养和教育。

感谢我的导师何顶新副教授的大力支持和帮助。在两年半的研究生学习与生活中，何老师始终对学生耐心指导，细心培养，使我在知识与学术上取得了一个又一个进步。您不仅从知识与学术对我进行指导，同时也从思想上给予我帮助，关心我的生活，告诉我们做人做事的道理，让我们竖立了正确的人生观与价值观，同时保持了一颗低调做人，高调做事的心态。

感谢郑南雁老师在硬件系统设计上的指导和帮助；感谢秦肖臻老师、代鄂东老师、刘昌琪老师、陈红老师、汪峰老师、朱平老师，在课题实施，论文撰写过程中给予的关心与帮助；感谢在研究生阶段授予我课程的赵金老师、李叶松老师、沈安文老师、程善美老师、周纯杰老师。

感谢瑞萨实验室移动机器人平台的所有成员；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；感谢姜娟师姐、冯鹏师兄、郑凯师兄、马驹师兄对我的指导与帮助；感谢顾强、叶存奎、汤国旺在学习与研究过程中的合作；感谢周波、汪卓、方华启以及华中科技大学智能车团队的师弟师妹们在开发过程中的支持与建议。感谢大家在课题研究进程中的技术交流，问题讨论，是在大家的支持下我才能将一个个问题化解；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、帮助过我的各位朋友们。

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] 李磊, 叶涛, 谭民. 移动机器人技术研究现状与未来. 机器人, 2002, 11(5): 475~480
- [3] 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及其趋势. 机器人技术与应用, 2001, 03: 9~14
- [4] R.S. Mosher. Test and evaluation of a versatile walking truck. In Proc. Off-road Mobility Research Symp, Washington DC, 1968, 359~379
- [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] 武晓岛, 于鹏. 透过专利看微处理器的技术发展(一) --早期微处理器的发展历程. 中国集成电路, 2009, 1: 86~92
- [7] Mollick E.. Establishing Moore's Law. Annals of the history of computing. IEEE, 2006, 28(3): 62~75
- [8] 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
- [9] 韦照川, 李德明. 嵌入式系统发展概述. 科技信息, 2010, 1: 839
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 王耀宾. 超声导航移动机器人系统设计及模糊避障技术研究: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2008

- [13] P. Will, A. Castaño, W.-M. Shen. Robot modularity for self-reconfiguration. Proc. SPIE Sensor Fusion and Decentralized Control II, Boston, 1999, 236~245
- [14] Goldberg K. The mercury project: a feasibility study for internet robots. Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, 48(5): 35~40
- [15] Coste M E, Sinmaons R. Architecture. The backbone of robotic systems, robotics and automation. In the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, San Francisco, 2000, 67~72
- [16] Brudka M, Pacut A. Intelligent robot control using ultrasonic instrumentation and measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3):454~459.
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] Thorpe C, Hebert M, Kanade T et al. Toward autonomous driving: the CMU NavLab part I-perception. IEEE Expert, 1991, 31~42
- [25] Thorpe C, Hebert M, Kanade T et al. Toward autonomous driving: the CMU NavLab part II-architecture and systems. IEEE Expert, 1991, 43~52
- [26] 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
- [27] 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
- [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. 室外智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] 白井良明. 机器人工程. (第一版). 北京: 科学技术出版, 2003
- [34] 熊有伦. 机器人技术基础. (第一版). 武汉: 华中科技大学出版社, 1996
- [35] Rea H J. Robot kinematics. Dublin: Trinity College, 1997
- [36] Thomas Braunl. Embedded Robotics Mobile robot design and applications with embedded systems. (Second Edition). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [37] 方正, 杨华, 胡益民等. 嵌入式智能机器人平台研究. 机器人, 2006
- [38] 魏永广. 现代传感技术. (第一版). 哈尔滨: 东北大学出版社, 2001
- [39] 罗志增. 机器人感觉与多信息融合. (第一版). 北京: 机械工业出版社, 2002
- [40] 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
- [41] Andrew S. Tanenbaum, Albert S. Woodhull. Operating systems design and implementation. (Third Edition). USA: Prentice Hall, 2006
- [42] 李渊, 言勇华. 嵌入式实时系统在移动机器人中的应用研究. 微计算机信息 (嵌入式与 SOC), 2006
- [43] 刘志雄, 李浙昆, 谢军等. 基于 RAM 和 μC /OS-II 的嵌入式移动机器人平台设计. 机电产品开发与创新, 2007
- [44] Jean J. Labrosse 著, 邵贝贝 等译. 嵌入式实时操作系统 μC /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

附录 攻读学位期间发表论文目录

- [1] 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)