

武汉理工大学

(申请工学硕士学位论文)

基于 DSP 的两轮自平衡小车的设计及实现

培养单位：自动化学院

学科专业：控制科学与工程

研 究 生：凡胡荣

指导老师：李志俊 教授

2015 年 5 月

分类号_____

密 级_____

UDC _____

学校代码 10497

武汉理工大学

学 位 论 文

题 目 基于 DSP 的两轮自平衡小车的设计及实现

英 文 Design and Implementation of Two Wheeled

题 目 Self-Balanced Vehicle Based on DSP

研究生姓名 凡胡荣

指导教师姓名 李志俊 职称 教授 学位 硕士

单位名称 武汉理工大学 邮编 430070

申请学位级别 硕士 学科专业名称 控制科学与工程

论文提交日期 2015 年 5 月 论文答辩日期 2015 年 5 月

学位授予单位 武汉理工大学 学位授予日期

答辩委员会主席 评阅人

2015 年 5 月

独 创 性 声 明

本人声明,所呈交的论文是本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,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名: 日 期:

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、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。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生 (签名): 导师 (签名): 日期

摘 要

在日趋智能化的时代，科技将人类的生活方式不断革新，作为一种新型载人载物工具，两轮自平衡小车越来越频繁地出现在日常生活中。除此之外，其具备的独特性能，如结构简单、灵活性高、低噪声、自重轻等，使其在资源勘探、安防巡逻、军事侦察等领域也有着广泛的应用前景。本文基于一阶倒立摆的模型，采用先进的嵌入式控制器作为控制核心，有刷直流电机作为驱动设备，加速度计和陀螺仪作为传感器，设计并制作一台可载人的两轮自平衡小车。

本文首先通过对现有自平衡小车的调查与研究，确立了以两轮自平衡小车作为研究对象，并通过对一阶倒立摆模型的深入学习，经过适当的线性化处理，最终得到了自平衡小车的控制模型。在系统方案设计时，针对已确立的控制对象，选用了更为合适的硬件方案和控制算法，以达到较好的设计效果。

其次，在系统控制平台硬件设计时，充分考虑到平台的通用性、可靠性、稳定性等因素，选用 DSP+ARM 双处理器作为系统的控制核心，不仅保证了平台强大的数据运算能力，同时也解决了传感器与处理器之间的速度差距问题，减少了控制算法运行时被中断的几率，从而便于更好地比较在同一平台上不同控制算法的控制效果。在硬件设计上，充分考虑到功耗问题，对功耗较大的器件和模块做出合理的散热处理，有效提高了系统运行的稳定性。

最后，考虑到控制对象的特殊性，在对小车姿态检测时，采用了加速度计和陀螺仪两种不同类型的传感器，将传感器的输出进行数据融合处理，最终得到有效的姿态数据；在对小车的运行状态进行监测时，监测数据采用无线传输方式发送到上位机，实现了小车的远程监控，极大地方便了调试工作的进行。

本文完成了系统控制板和电机驱动板的原理设计与电路板制作，小车的机械结构的组装，载人测试和上位机联机测试。在载人测试过程中，通过更换不同的驾驶人员，获得不同的测试环境，最终为控制算法确立了一组最优的参数，保证了系统对驾驶者的适应性和稳定性。

关键词：自平衡小车，姿态检测，数据融合，载人测试，远程监控

Abstract

As the increasing of intelligent, human living style has changed by science and technology, two wheeled self balanced vehicle can be seen more and more frequently in our daily life as a new passenger loading tool. In addition, for its unique properties, such as simple structure, high flexibility, low noise, light weight, etc, it has a wide range of applications in resource exploration, security patrol, military reconnaissance and other field. Based on the model of Single-Inverted-Pendulum, a manned two wheeled self balanced vehicle which equipped with advanced embedded controller, brushed DC motor, accelerometers and gyroscope will be design and product in this thesis.

First, a lot of survey and research has been done on the existing self balanced vehicle before two wheeled self balanced vehicle established as the research object. The mathematical model of the two wheeled self balanced vehicle was got through study on the model of Single-Inverted-Pendulum and appropriate linearization. In the scheme design of system, a more suitable hardware design and control algorithm design has been chose in order to achieve better effect on the control of the object has been established.

Secondly, in the design of hardware platform, give full consideration to the factors of platform versatility, reliability, stability, etc, the DSP+ARM dual processor as the core of the control system was been used, not only ensured the powerful data processing ability of the hardware platform, but also solved the problem of the speed gap between sensor and processor, and reduced the risk of interruption in the executive of the control algorithm, so, the comparisons on the same platform with different control algorithm can be more accurately. In consideration of the power consumption, reasonable solution for power consumption of large components and modules has been taken in hardware design, which improves the stability of the system.

Finally, considering the particularity of the control object, accelerometer and gyroscope have been used in the attitude detection. The data which output from

the two sensors was processed by software, in order to obtain the status accurately. The monitoring data is sent wirelessly to position machine, which greatly facilitates the debugging work.

System control board and motor drive board designing, mechanical assembly, manned testing and on-line debugging were completed in this article. By changing different drivers in the manned test to get different test environment, established a set of optimal parameters for the control algorithm finally, which ensures the stability and adaptability of the system.

Keywords: Self Balanced Vehicle, Attitude Detection, Data Fusion, Manned Test
Remote Control and Monitor

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
目 录	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 课题历史与现状	2
1.2.1 Segway 两轮自平衡小车.....	2
1.2.2 第一代 Balancing Scooter.....	4
1.2.3 SON of EDGAR 两轮自平衡小车	5
1.2.4 Sway 两轮自平衡机器人	7
1.3 课题研究内容	7
1.3.1 课题设计需求	8
1.3.2 课题研究内容	9
1.3.3 论文结构	10
第 2 章 小车总体方案选取	12
2.1 小车控制模型的建立	12
2.1.1 总体模型建立	12
2.1.2 运动状态分析	14
2.2 系统总体方案的选取	16
2.2.1 控制器的选取	16
2.2.2 电机的选取	18
2.2.3 电源的选取	20
2.2.4 姿态传感器的选取	22
2.2.5 机械结构的选取	27
2.3 系统控制策略	29
2.3.1 直立运动的控制	30
2.3.2 直线运动的控制	31
2.3.3 转向运动的控制	32

2.4 本章小结	33
第 3 章 控制系统硬件设计	34
3.1 控制器设计	34
3.1.1 主处理器的设计	35
3.1.2 协处理器的设计	37
3.2 传感器设计	40
3.2.1 加速度传感器	41
3.2.2 角速度传感器	41
3.2.3 状态检测传感器	43
3.3 通讯接口设计	44
3.4 电源设计	46
3.5 电机驱动设计	47
3.6 控制系统硬件实现	52
3.7 本章小结	54
第 4 章 系统软件设计	55
4.1 电机驱动	55
4.2 传感器数据处理	57
4.3 运动控制	60
4.4 上位机通讯	61
4.5 综合调试	63
4.6 本章小结	66
第 5 章 总结与展望	67
5.1 总结	67
5.2 展望	68
致 谢	69
参考文献	70
攻读硕士学位期间参加的科研情况	73

第 1 章 绪论

1.1 课题背景

随着人类社会的不断向前发展，为了满足人们对生产力的发展需求，机器人作为一门新兴学科，与信息网络、基因工程、生物工程以及纳米材料等学科一样，越来越为人们所熟悉。作为一门新兴的高新技术，它涉及的学科极为广泛，如材料科学、理论力学、传感检测、控制理论、数值分析、计算机仿真、电磁学、半导体技术、通讯技术、人工智能、仿生学等等，是一门综合性极高的学科^[1]。

两轮自平衡机器人属于机器人的一种，是目前非常热门的研究方向，在对其控制的过程中能有效地反映诸如稳定性、随动性、鲁棒性以及跟踪性等许多控制中的关键问题，可以作为自动控制领域中典型的控制对象和理想的实验平台^[2]。研究人员可以通过这样一个典型的控制系统，不断发掘出新的控制策略和控制方法，同时通过这个平台检验和评价不同的控制方法在面对多变量、非线性、自然不稳定系统时的处理能力和控制效果，从而找出不同情况下最适合的控制方法，促进控制系统新理论、新思想的发展^[3,4]。通过研究两轮自平衡机器人所产生的方法和技术在机器人控制技术、人工智能控制、导弹拦截、航空对接控制、火箭发射中的垂直度控制、卫星飞行中的姿态调整以及一般工业应用等多方面具有广阔的开发前景^[5]。

除了理论研究意义外，两轮自平衡机器人还具有很高的实用价值。由于结构特殊，两轮自平衡机器人体积小、运动灵活、适应地形、鲁棒性强、适于在狭小和危险的工作空间内活动、能够胜任一些复杂环境里的工作，因此，两轮自平衡机器人在日常生活、工业生产、军事活动中有着广泛的应用前景，其典型应用包括紧急服务、邮件派送、空间探索、战场侦察、危险物品运输、智能轮椅等方面，尤其是在载人运输领域两轮自平衡机器人具有很大的发展潜力^[5]。两轮自平衡机器人体积小、重量轻、易于操控、移动灵活、停泊方便，可以作为一种小范围、短距离代步工具，应用于汽车无法通行、步行不便的场合（如游乐场、步行街、广场和大型会场等），既可以减少污染，又可以解决交通堵塞问题^[6]。

由于两轮自平衡小车的理论模型来源于倒立摆，因此其本身具有非线性、强耦合、多变量和自然不稳定等诸多特点^[2]。正是由于这些特点的存在，设计开发两轮自平衡小车的过程中会面临如下诸多问题：

- (1) 如何能准确建立两轮自平衡小车的数学模型；
- (2) 如何确定合适的控制算法；
- (3) 如何保证所采集数据的实时性、准确性；
- (4) 如何构建合适的硬件平台以便于设计开发；
- (5) 如何保证系统工作的稳定性和安全性。

以上问题的存在使两轮自平衡小车的研发成为了集静力学、动力学、运动学、控制理论、数据融合理论等多门学科于一体的综合性课题^[2]。

1.2 课题历史与现状

1.2.1 Segway 两轮自平衡小车

2001 年，Segway HT 第一次出现在美国的一个电视节目里，其独特的结构引起了人们的注意，2002 年，Segway HT 正式发布，成为世界上第一个商业化的两轮自平衡载人交通工具^[7]。Segway HT 是由 Dean Kamen 和他的 DEKA 公司共同完成，在其发布的时候，Dean Kamen 说：“Segway 将会替代轿车成为一种新的交通工具，就像当年轿车替代了马和马车一样。”13 年过去了，虽然 Segway 并没有如同当时设想一样，大范围革新人们的出行方式，但它的确为我们提供了一种更为先进的交通工具^[7]。如图 1-1 所示。



图 1-1 Segway 外形图

如图 1-1 所示, Segway HT 和一般的汽车不同, 它只有两个轮子, 而轮子的分布不同于自行车, 自行车结构上为双轮双轴, 但 Segway HT 两个轮子在轴向是处于一条直线上的, 这两个轮子既负责驱动车体, 也负责完成转向操作, 在实际驾驶中, 驾驶者只需要将身体轻微向前倾斜, 它就是向前移动, 而且速度与倾斜角度成正相关, 如果需要向后移动, 身体向后倾斜即可, 而转向功能通过移动手柄来实现, 这与人类的步行动作极为相似, 所有又有人将 Segway 称为体感车或者思维车^[8]。

Segway HT 的组成结构相比一般载人交通工具要更为简单, 主要由车体、驱动电机、车轮、转向支架、电池和控制电路构成。

驱动装置采用了无刷伺服电机, 最大功率可达 1.88 千瓦 (8000rpm), 该电机内部具有两组功能相同且相互独立的线圈, 并且这两组线圈分别由两块独立的控制板驱动, 在正常运行时, 两组线圈共同工作, 驱动负载, 当有一组发生故障时, 另一组线圈还能继续工作, 确保 Segway 能够安全停车, 极大地提高了系统的安全性。

在供电方面, Segway 提供了两种方案, 分别为镍氢 (NiMH) 充电电池和锂离子 (Li-Ion) 充电电池, 电池组由多个电池单元并联和串联构成, 整个电池组的额定电压为 72V, 最大续航能力分别为 19km 和 39km。

在控制电路中, Segway 在设计上使用了双机冗余结构, 系统包含两块功能相同的主控电路板, 每块主控电路板以每秒 100 次的频率从姿态传感模块读取数据, 获得车体姿态, 通过运行控制算法, 分别驱动无刷伺服电机里的两组线圈, 来完成相应的动作^[8,9]。系统主控板处理器选用了德州仪器公司的 TMS320LF2406A 数字处理器 (DSP), 时钟频率为 40MHz。虽然 Segway 所采用的控制算法和控制模型并未公布, 但它使用数字处理器来完成电机的闭环控制却是广为人知的^[10]。

作为世界上第一款商用的自平衡载人交通工具, Segway 在安全上作出了全面的设计, 车体上几乎所有设备都是冗余的: 两块相同的主控电路板, 电机里有两组功能相同但独立的线圈, 传感器方面也是使用了多达 5 片姿态传感器^[9], 其中两片作为紧急备用, 供电方面也是使用了两组电池, 保障系统供电安全, 当驾驶者的脚脱离正常行驶区域时, 系统会发出警报, 并停止运行, 保障驾驶者以及车体的安全。

1.2.2 第一代 Balancing Scooter

2002 年,就在 Segway HT 公布之后,来自加拿大的工程师特雷弗·布莱克威尔发表了一篇名为《Building a Balancing Scooter》报告,报告中介绍了制作 Balancing Scooter 的详细信息。

由于特雷弗·布莱克威尔制作的两轮自平衡小车没有名字,本文将使用 BSR1 (Balancing Scooter Version 1) 作为该车的代号。与 Segway 相比,BSR1 在外形上显得更为小巧简易,驱动电机为普通 24V 有刷直流电机,内部只有一组线圈,这类电机常用于电动轮椅,性能与 Segway 的无刷伺服电机相差甚远,当然成本相比之下会低很多(报告里显示单台电机的价格为 286 美元,约合人民币 2300 元)。由于此电机能安装在输出轴中直接驱动车轮,省去了变速箱和轴承,不仅可以降低开发成本,而且大大简化了机械设计^[11]。

在供电部分,BSR1 采用普通镍氢(NiMH)充电电池组,额定电压 24V,与 Segway 提供的电池组相比,整合性较低,不便于电源管理。电机驱动器直接选用成品,型号为 RoboteQ XDC2230,驱动器内部有两组 H 桥,每组最大输出电流 120A,额定输入电压 10~30VDC,通讯接口也提供了多种选择:USB、RS232、CAN、模拟量输入和 PWM(脉冲宽度调制)控制^[12],除此之外,制动时,电机将车辆的动能转化成电能,而该电机驱动模块能将这部分能量回收,用于电池组充电,从一定程度上提高了电池续航能力。

在控制部分,BSR1 选用了 AVR 系列微控制器,型号为 ATMEGA32,该控制器使用精简指令集,主频 16MHz,片上包含 16KB 的 FLASH,并配备有 I²C、SPI、UART/USART 等常用通讯接口。控制代码采用 C 语言编写,系统通过读取陀螺仪和加速度计的值,确定车体的倾斜角度,平衡控制算法采用 PD(比例-微分)算法^[13],最后将运算结果通过串口发送至电机驱动模块,实现小车的平衡运行。

为了保障驾驶者的安全,特雷弗·布莱克威尔在设计时采取了两个措施,第一个措施为手柄下方控制面板上的紧急按钮,当该按钮被按下时,电机电源切断,小车立刻停止运行;第二个措施是为了防止车体失控时,电机继续运行引发进一步的事故,这个功能是通过检查车体的倾斜角度来完成的,当倾斜角度超过 $-45^{\circ} \sim +45^{\circ}$ 的范围时,系统将自动停止电机运行,达到保护驾驶者的目的^[14]。

BSR1 的主要结构如图 1-2 所示，图中蓝色盒子即为 RoboteQ XDC2230 电机驱动模块，绿色方形物体为镍氢（NiMH）充电电池组，由图中可以看到电池并没有封装在一起，而是通过铝板固定在车体下方，这样的结构也就表明了 BSR1 是一台手工制作的两轮自平衡小车。

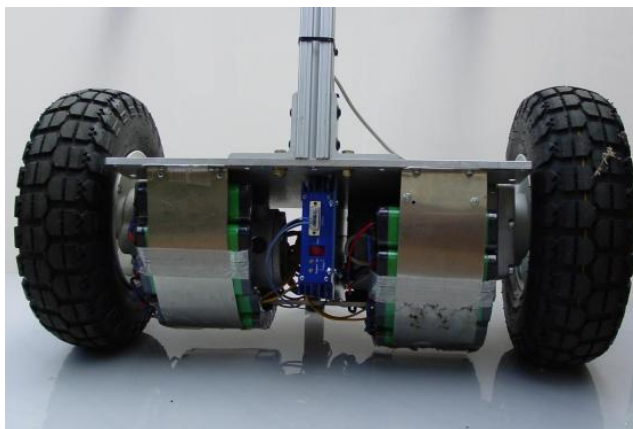


图 1-2 BSR1 主要结构图

1.2.3 SON of EDGAR 两轮自平衡小车

2005 年，来自阿德莱德大学机械工程学院几名大四学生成功设计并制作了一款两轮自平衡小车，取名为 EDGAR，如图 1-3.a 所示。2006 年，同样是来自这个学院的几名学生，参照 EDGAR 的设计思路，重新设计了一款两轮自平衡小车，并取名为 SON of EDGAR，如图 1-3.b 所示。

虽然 SON of EDGAR 并未作为一款商品出现在市场中，但相比其他手工制作的载人自平衡小车，其外部整体性较好。

系统驱动装置选用了 NPC 公司的 NPC-B81 型电动机，该电动机是一台四极直流电机，额定电压 24V，输出端配备了减速箱，堵转扭矩为 95Nm，在输出转速为 180RPM 时获得最大功率 0.52kW，是一款专为电动轮椅而设计的驱动装置。

由于该电机没有转速反馈功能，为了实现转向闭环控制的设计需求，后期加入外部编码器完成转速测量，通过计算左右轮的速度差，从而实现精准的转向控制^[15]。

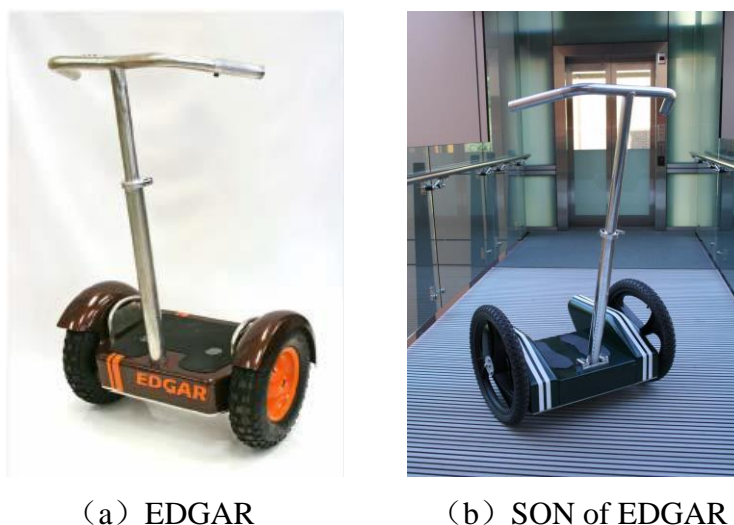


图 1-3 EDGAR 和 SON of EDGAR

电机驱动器直接选用成品，为 RoboteQ 的一款开源电机控制器，其输入电压 13V~50V，最大连续电流为 160A，峰值可达 400A，控制信号类型为 PWM 信号，模块采用强制风冷散热，保证驱动器能长时间稳定工作。

供电电源由两块德国阳光工业集团的 A512/16 G5 型铅酸蓄电池串联构成，单体电池额定电压 12V，最大放电电流 200A，容量为 16AH。与之前的两款小车的供电电池相比，铅酸蓄电池虽然能量密度较镍氢（NiMH）充电电池和锂离子（Li-Ion）充电电池低，但可靠性表现更加优异，成本较低，便于维护^[16]。

系统采用来自飞思卡尔半导体公司的 MC9S12DP256 作为主控芯片，该芯片最高主频 25MHz，片上包含 256KB 的 FLASH 和 32KB 的 RAM，具有丰富的外设和通讯接口。系统姿态测量选用亚德诺半导体技术有限公司的 ADXRS300 陀螺仪和克尔斯博科技公司的 CXL02LF1Z 加速度计模块^[17]。在车体平衡算法上，SON of EDGAR 采用了状态空间控制算法，并且利用 MATLAB 建立数学模型和仿真^[16]；在车体转向控制上也采用了闭环控制^[18]。

SON of EDGAR 配有蓝牙通讯接口，可通过手机实时查看系统工作时的相关参数，实现远程监控等功能。系统在人体检测时使用了两个非接触式电容接近传感器，该电容式接近传感器是专为检测人体而设计的，能区分人体和其他物体，大大提高了检测的准确性。

1.2.4 Sway 两轮自平衡机器人

Sway 两轮自平衡机器人是哈尔滨工程大学尹亮自行设计并制作的一款小型机器人，该机器人与载人自平衡机器人不同，由于系统结构在运行时不再改变，车体重心位置固定，所以在算法设计时相对较为简单^[19]。

Sway 机器人采用双控制器结构，控制器选用 Cygnal 公司（现已被 Silicon Labs 公司收购）推出的 C8051F005 单片机，最高时钟频率 20MHz，片上集成了 32KB FLASH 和 2304 字节 RAM，其中一片负责机器人平衡控制，另一片负责与上位机通讯。机器人采用 ADXL202 双轴加速度计和光电距离传感器来共同完成车体姿态的检测，削减了单一传感器检测精度与准确度的不足^[20,21]。

供电方面采用了两组电源单独供电的结构，主电源由 6 节 AA 干电池串联组成，主要负责电机运行，辅助电源主要负责单片机、传感器和通讯模块的供电，控制信号通过光电耦合器发送给电机驱动器，该供电模式大大减少了电机运行对控制系统的冲击和干扰，提高了系统的稳定性^[22]。

由于机器人外形较小，系统采用普通直流减速电机作为机器人的驱动装置。电机驱动模块是由达林顿管组成的 H 桥电路，通过改变 H 桥的导通方向，实现对电机的正反转控制，通过改变 H 桥的导通时间，实现对电机转速的控制。

Sway 控制信号输入装置为 360 度游戏摇杆，可以非常直观地对机器人的行进方向和速度进行控制。车轮上装有光电码盘，具有速度检测和路程计算功能。除此之外，Sway 还具有温度检测和无线传输功能，机器人运行时的相关信息均通过无线传输方式发送至上位机，在液晶显示器上实时显示。

1.3 课题研究内容

通过对国内外相关案例的分析与研究，基于 DSP 的两轮自平衡小车的设计及实现，需要将电路图设计、PCB（印刷电路板）绘制、计算机编程、控制算法和实际调试等相互结合，是一个综合度较高的课题。因此，在本课题的研究中需要对整个课题任务做出合理需求分析，并明确工作任务与工作重心，结合本专业的特点，重点完成自平衡小车控制电路的设计与制作、控制程序编写和实际调试等工作。

1.3.1 课题设计需求

目前国内在两轮自平衡小车的研究大多数处于以科研为目的的层次上，而且大多数的控制对象为体积较小、质心位置固定、功能单一的两轮机器人^[21]。综合比较来看，有如下三点：

（1）虽然大多数两轮自平衡小车都能实现动态平衡，但其稳定范围、抗扰动能力差距较大，部分小车虽然能够自立行走，但本身调整幅度过大，在转向时稳定性降低等不足；

（2）大多数自平衡机器人在硬件平台的设计上差异较大，采用的处理器运算速度较慢，无法满足复杂算法的运算速度与精度的需求，在控制算法移植过程中需要改动的代码较多，不便于比较不同的控制算法对同一控制对象在控制效果上的区别；

（3）大多数自平衡机器人在调试或运行时未能将小车姿态、电机运行状态等相关数据的及时上传，无法实现试验数据分析，更快更好地调节控制算法的关键参数。

针对以上存在的问题与不足，结合本专业特点，本课题提出如下设计需求：

- （1）设计并制作一台两轮自平衡小车；
- （2）能实现载人状态下直立平衡、直线行驶和曲线行驶；
- （3）能将系统运行状态和相关参数实时发送至上位机实时显示；
- （4）系统控制核心采用双处理器结构。主处理器负责控制算法的运行（控制算法采用 C 语言编写），控制电机运行；协处理器负责数据采集、数据传输和数据显示等功能；
- （5）系统利用多种传感器共同完成对车体姿态的检测，保证数据的准确与稳定；
- （6）系统运行出现故障时，能及时停止电机的运行，保障驾驶人员和设备的安全。

根据以上设计需求，系统结构框图如图 1-4 所示。

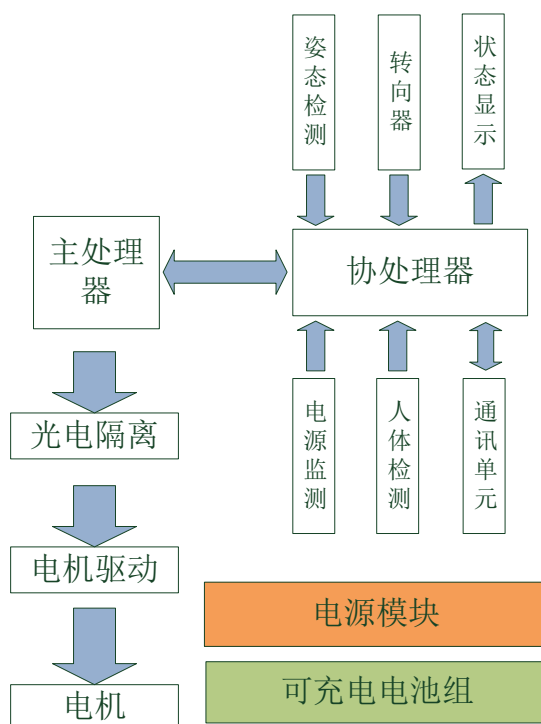


图 1-4 系统结构框图

1.3.2 课题研究内容

基于以上系统结构框图和设计需求，本课题需要完成的研究内容主要分为硬件设计和软件设计两个方面。

硬件设计：

（1）核心处理器的设计。一个系统的核心为处理器，处理器的选取对于整个系统的性能具有非常重要的意义。根据设计需求，自平衡小车控制系统需要两个处理器协同工作，因而如何选取这两种处理器和配套的外部存储器，才能满足控制系统所需的运算速度与功能；处理器之间采用何种通讯接口和通讯协议才能满足系统所需的通讯速度和可靠性，将是本文研究的一个重要方向。

（2）传感器的设计。传感器是控制系统重要的输入信号，其功能相当于人体的眼睛、耳朵或鼻子，传感器的输出信号的准确与否，将直接影响系统的输出信号，如果其不能反映真实的情况，那么处理器将不能做出正确的输出，导致系统工作不正常。在本课题中，需要采集的信号主要为车体重心的倾角，如何保证系统准确地采集到车体重心倾斜角度是传感器设计的首要目标，同时传感器的工作范围、采样率和稳定性也需要全面考虑^[22,23]。

(3) 电机及其驱动单元的设计。电机是本系统的主要执行机构, 额定电压、额定功率、额定转速是电机选型是需要考虑的主要方面。当电机型号确定后, 电机驱动单元如何能可靠、高效、稳定地控制电机, 是其设计时需要考虑到的。除此之外, 驱动单元还应具有完善的保护机制, 保障电机运行的安全性^[24]。

(4) PCB 设计。系统控制电路将最终体现在电路板上, 在这个过程中, PCB 的设计将直接影响电路的稳定与可靠。同一种电路, 不一样的 PCB 设计将会带来不一样的结果, 在 PCB 的设计中, 需要考虑电路功能、器件尺寸、元件功耗和安装方式等多个方面, 只有将这些因素都考虑在内, 电路才能稳定可靠的工作, 才能达到电路原理设计的功能。

软件设计:

(1) 系统模型的建立。两轮自平衡小车的数学模型是非线性的, 是典型的多输入多输出的系统, 只有通过一定的线性化处理, 才能降低控制难度, 获得较好的控制效果。

(2) 控制算法的设计。针对线性化的数学模型, 如何选取合适的控制算法, 达到稳定高效的控制效果, 是本课题软件设计的中心问题。

(3) 多传感器的数据融合。单一的传感器功能有限, 多传感器能将不同类型的传感器优势互补, 能尽可能真实地反应系统所处的状态, 而如何将多种传感器的数据融合在一起, 得到稳定可靠的信息, 是本课题需要重点解决的问题^[25]。

(4) 上位机通讯。如何将系统工作状态、相关参数实时地、直观地、准确地发送至上位机, 是通讯方式选取与上位机设计需要解决的问题。

1.3.3 论文结构

本文共分五大章节, 整体结构安排如下:

第一章: 绪论。阐述课题研究背景, 分别介绍两轮自平衡小车和两轮自平衡机器人的发展历史与研究现状, 分析课题意义, 提出设计需求, 并初步介绍课题所研究的内容。

第二章: 两轮自平衡小车的方案选取。本章首先通过分析本课题设计需求, 比较已存在的几种建模方式, 确定了系统所采用的数学模型。然后通过确立的数学模型, 完成了系统硬件总体方案的设计。最后针对该模型, 提出了相应的控制算法。

第三章：自平衡小车硬件设计。本章从系统控制核心的设计开始，依次完成了电源设计，电机驱动电路设计，传感器设计，通讯接口设计和状态指示电路设计，最后根据以上电路设计原理，完成了系统控制电路 PCB 的设计。

第四章：系统软件设计。本章完成了传感器数据融合算法、电机驱动算法、车体姿态控制算法、处理器之间的通讯协议和上位机的设计，并对系统各部分的工作流程进行了详细的介绍。

第五章：总结与展望。总结课题研究内容，提出本设计在现有基础上可以改进的方向，展望两轮自平衡小车的研究与发展方向。

第2章 小车总体方案选取

2.1 小车控制模型的建立

2.1.1 总体模型建立

两轮自平衡小车的模型来自于经典的直线一阶倒立摆模型^[20,26],倒立摆模型是机器人技术、经典控制理论、现代控制理论、计算机控制等多个领域、多种技术的有机结合,一阶倒立摆系统在外界不干预的情况下无法自行稳定,为了让其稳定在某种状态,就必须施加外力,所以其本身就是一个绝对不稳定、高阶次、多变量、强耦合的非线性系统,可以作为一个典型的控制对象进行研究^[2]。直线一阶倒立摆的运动模型如图 2-1 所示。

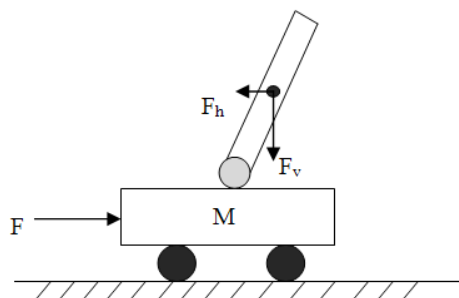


图 2-1 直线一阶倒立摆的运动模型

其中: F_v 为倒立摆自身重力垂直分量;

F_h 为倒立摆自身重力水平分量;

F 为水平方向施加到倒立摆的外力。

以上模型是在一定条件下简化得出的:

- (1) 倒立摆车体与摆杆均为匀质刚体;
- (2) 忽略摆与车体、车体与外界的摩擦;忽略摆轴、轮轴、轮与接触面之间的摩擦力等^[2]。

两轮自平衡小车作为一个典型的非线性系统,实际上是直线一阶倒立摆模型在三维空间的扩展。对其建立精确的数学模型将会有较大的难度,所以在实

际控制模型的建立时，可以通过合理地线性化来得到非线性系统的近似线性模型。在满足如下假设的情况下：

- (1) 两轮自平衡小车车体和车轮不产生弹性形变，即为刚体；
- (2) 左右两侧的车轮完全相同，左右电机完全相同；
- (3) 小车车轮与地面完全接触，在各种状态时，车轮与地面的相对作用力为静摩擦力，无滑动摩擦力；
- (4) 车轮在轴向与地面没有相对运动，即车体不出现侧滑现象。

对两轮自平衡小车的控制模型进行了一定的线性化处理，初步得到了小车的线性化运动模型，如图 2-2 所示。

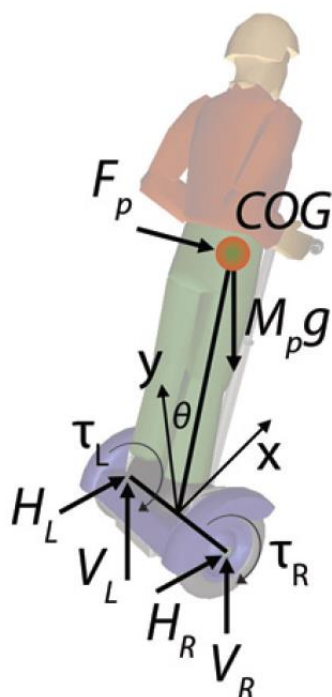


图 2-2 两轮自平衡小车的运动模型

其中： F_p 是驾驶人员施加到车体上的作用力；

$M_p g$ 是驾驶人员在 X 轴上的重力；

V_R 是指右车轮与车体在垂直方向上的分量；

H_R 是指右车轮与车体在水平方向上的分量；

V_L 是指左车轮与车体在垂直方向上的分量；

H_L 是指左车轮与车体在水平方向上的分量；

T 是指电机的输出扭矩；

COG 是驾驶人员与小车的质心；

θ 是指整个车体质心在垂直方向上的夹角^[25]。

从图 2-2 中可以看到小车所受的力主要来自车体本身的重力和电机的扭矩两个方面，当这两个力相抵消时，系统将会处于一个稳定状态。车体的重力主要与重力加速度、车体的质量和重心所处的位置这三个因素相关，而前两个因素在小车运行的过程中一般是不会大范围变化的，所以当电机输出扭矩的大小和方向合适时，就能将系统的重心控制某个位置，此时小车就处于一个相对稳定的状态。

2.1.2 运动状态分析

两轮自平衡小车的运动可以分解为直立、直线运动和转向运动，这三种运动方式的组合，就能完成小车运动的方向和速度控制，同时保证小车在运动中的直立平衡。

(1) 直立运动

当系统重心（小车车体和驾驶人员的共同重心）作用在车轮轴上的力与水平方向垂直时，此时车体就能处于直立状态^[26]。当没有外力作用在车轮上时，由于系统重心处于转动轴之上，处于一个不稳定的状态，无法长时间保持直立状态，所以只有外力与系统重力相对作用时，车体才能保持一种动态平衡，具体的情况有两种，如图 2-3.a 和图 2-3.b 所示：

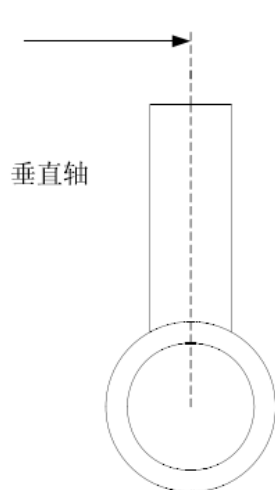


图 2-3.a 车体直立

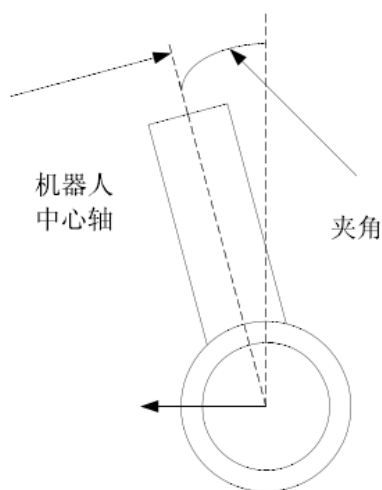


图 2-3.b 车体倾斜

在图 2-3.a 中，车体处于直立状态，此时车轮无需转动即可维持直立状态，当由于外界因素的扰动，车体会进入图 2-3.b 的状态，此时如果不对车体不施加外力，车体倾斜角度将继续增大，最终失去控制，无法重新回到直立状态。如果此时对车轮施加与倾斜方向相同的外力，即车轮往倾斜侧移动，这样车体重心就能往直立状态的位置运动，倾斜角度变小，通过反复调整，最后实现小车的动态平衡^[3,27]。

（2）直线运动

相比直立运动，小车的直线运动相对来说较为简单，只需在左右车轮上施加大小相同，方向也相同的力，即可完成小车的直线行驶。

（3）转向运动

与直线运动相似，小车的转向是通过左右车轮的速度差来是实现的。当小车行进方向的左边车轮移动速度较大时，相同时间内，左边车轮将产生更多的位移，从而使小车行进方向偏向右侧，实现了小车的向右转向运动。当右边车轮速度较大时，小车将会想左转弯。

与传统四轮或三轮汽车不同的是，两轮自平衡小车能够实现小半径回转和原地回转。当一侧车轮停止转动，此时小车的运动轨迹与画圆相似，静止的车轮相当于圆心，另一个车轮的运动轨迹就是围绕圆心做圆周运动，如图 2-4 左侧所示；当两侧车轮以同样的速率，但方向相反时，此时小车的运动轨迹为以车轮轴中心为圆心做圆周运动，如图 2-4 右侧所示。

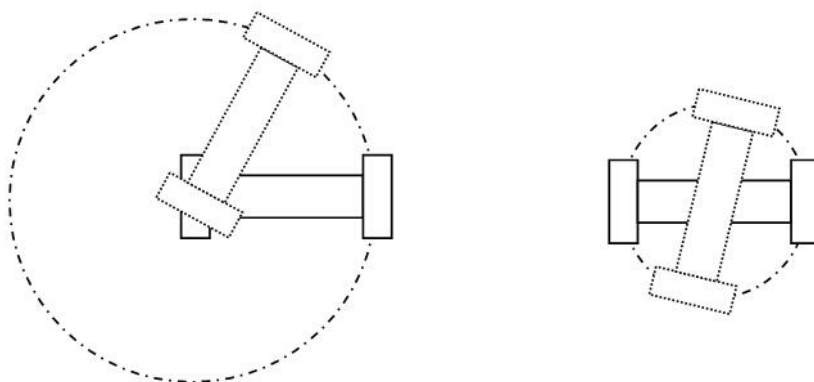


图 2-4 两轮自平衡小车小半径回转和原地回转

2.2 系统总体方案的选取

2.2.1 控制器的选取

控制器是一个系统的核心部件，其性能指标直接决定了整个控制系统运算速度，两轮自平衡小车在运行时，控制器需要采集多种状态数据，并将数据进行处理，得到系统的当前状态，再通过控制算法，得出电机的控制量，从而实现了对车体的平衡控制。

目前主流的控制器主要有以下几类：

(1) 传统单片机或增强型单片机

微型控制器（MCU），是微型计算机在工业控制领域的一个重要分支。单片机相比传统计算机，其将 CPU（中央处理器）、RAM（随机存取存储器）、ROM（只读存储器）和 I/O（输入输出设备）集成于同一硅片。由于其体积小、集成度高、价格便宜等特点，所以广泛应用于工业控制和移动设备^[28]。早期的单片机由于运算速度较慢，片上资源不够丰富，封装体积较大等缺点，在实际的应用中已经被逐步淘汰，现 Atmel、飞利浦、宏晶科技等公司均推出的功能更多、更强大的兼容产品。

(2) ARM（先进精简指令集机器）

ARM（Advanced RISC Machines）公司设计了大量高性能、高性价比、低功耗的 RISC（Reduced Instruction Set Computer）处理器。ARM 处理器是 Acorn 计算机有限公司面向低预算市场设计的第一款 RISC 微处理器，它提供了内核、体系扩展、微处理器和系统芯片方案四个功能模块，可供半导体生产厂商根据不同用户的要求来配置生产。

由于所有产品均采用一个通用的内核体系，在更换硬件平台后，极大地减少了软件移植的工作量，提高开发效率，缩短开发周期，降低开发成本。由于 ARM 处理器的运算速度快、片上外设丰富、功耗低、价格便宜、产品可选择性强等优点，所以在手持设备和其他移动设备占有绝大部分市场份额。

(3) DSP（数字信号处理器）

DSP（Digital Signal Processor）在数字信号的处理方面有着独特优势，具有完整指令系统，芯片架构不同于传统计算机所采用的冯·诺依曼结构，DSP 采用哈佛结构，程序代码和数据分别存储在两个独立的存储区，而且访问程序和

数据存储器也采用独立的地址总线 and 数据总线。支持流水线操作，允许取指令和执行指令完全重叠，使处理器的运算速度大大提高。

与通用微处理器不同的是，DSP 内核带有硬件乘法器，能在一个指令周期内完成一次乘法和一次加法运算，且部分 DSP 带有浮点运算单元，大大加快了浮点运算的速度，所以 DSP 的强大数据处理能力优于绝大多数微处理器，广泛应用于音频处理、视频处理和压缩算法等领域。与通用微处理器相比，其缺点为片上外设资源较少，通用性上较差，但随着半导体技术的发展，越来越多的外设被集成到 DSP 芯片上。值得提出的是，适用于 MATLAB 的控制算法可以直接转换为 C 语言类型的代码，在 DSP 上运行，体现了 DSP 在控制领域内的广泛应用。

（4）可编程逻辑器件

可编程逻辑器件是指能够通过配置芯片的寄存器而改变芯片的硬件功能的一类集成电路，目前主要有 FPGA（Field Programmable Gate Array）和 CPLD（Complex Programmable Logic Device）两种。FPGA 以逻辑单元为基本单位，用户通过组合这些逻辑单元，完成指定的逻辑功能，从最基本的数字逻辑电路到复杂的微控制器，都可以通过 FPGA 来实现。CPLD 一般在芯片内部带有 FLASH，可以将程序烧写在芯片里，掉电不会丢失，而 FPGA 的程序需要在芯片上电时从外部存储器载入，运行在内部的 RAM 里，掉电之后 FPGA 会回到初始状态，所以 FPGA 可以通过更换外部程序存储器来实现功能的改变^[29]，而 CPLD 需要使用编程器重新烧写程序。

相比通用微控制器，CPLD 和 FPGA 最明显的优势即为运算的高速性和并发性。由于芯片内部相当于硬件连接，信号传输速度极快，而并发性是指芯片的所有程序功能模块是在同一时间运行的。程序编写时引入了状态空间的概念，不同于通用微控制器的串行结构程序，是 CPLD、FPGA 与微控制器在编程思想上最大的不同。

通过对以上四种控制器的了解和学习，得出以下各类控制器的特点：

- （1）单片机的优势主要体现在性能稳定、抗干扰能力强和高性价比；
- （2）ARM 一般拥有较大的运行内存，可以用来运行操作系统及应用程序等，其优势主要体现在控制方面；
- （3）DSP 内部具有硬件乘法器，适用于加密解密、调制解调、FFT 运算等，具有较高的运行效率和优异的数据处理能力^[30]。

(4)CPLD 和 FPGA 在软件方面最明显的优势即为运算的高速性和并发性,硬件方面具有非常高的灵活性,在 PCB 设计后发现走线连接错误,如果使用普通微控制器,可能需要重新设计 PCB,但如果采用 CPLD,则可以通过简单的引脚映射来完成芯片引脚功能的改变,降低开发成本^[31]。

根据课题需求,两轮自平衡小车采用双处理器结构,考虑到硬件平台的通用性和为了使硬件系统满足各类算法的运算速度需求,所以主控制器采用 DSP 控制器,型号为 TI(德州仪器)公司的 TMS320F28335PGFA,该 DSP 是德州仪器公司为电机控制而推出的一款产品,时钟频率最高为 150MHz,片上集成了 256K×16 位 FLASH 和 34K×16 位 SARAM,一个 FPU,两个 16 位硬件乘法器;带有 CAN、SPI、MCBSP、SCI、I2C 等通讯接口;多达 18 路的 PWM 输出,其中有 6 路为 TI 特有的高精度 PWM 输出 (HRPWM)^[32,33];16 通道(12 位)ADC;得益于浮点运算单元,用户在控制算法的编写上而无过多考虑数据溢出的风险,减少在处理小数操作上耗费的时间和精力,与前代 DSP 相比,平均性能提高 50%,并与定点 C28x 控制器软件兼容,从而简化软件开发,缩短开发周期,降低开发成本^[34,35]。

而协处理器主要负责传感器数据读取、系统状态监控和上位机通讯等功能,所以选择一款 ARM 控制器来完成以上功能,型号为 STM32F103VET6,该芯片是意法半导体公司推出的一款高性价比 ARM 控制器,采用 Cortex-M3 内核,片上集成有 512K×8 位 FLASH 和 64K×8 位 SRAM。片上外设丰富,具有多达 16 通道的 12 位 AD 转换器,采样率可达 1MHz;通讯接口齐全,具有 CAN、SPI、USART、I2C、USB 和 SDIO 等。中断系统强大,任意通用 IO 引脚均能配置为外部中断输入源。

2.2.2 电机的选取

根据工作电源类型,电机可以分为直流电机和交流电机两种,由于两轮自平衡小车属于一种移动式电动载人工具,供电绝大多数采用直流电源,所以本节主要介绍直流电机。

直流电机根据结构和工作原理可分为无刷直流电机和有刷直流电机,其特点分别如下^[36]:

(1) 有刷直流电机

有刷直流电机是内含电刷装置的将电能转换成机械能（电动机）或将机械能转换成电能（发电机）的旋转电机^[37]。有刷直流电机是所有电机的基础，它具有启动、制动和过载转矩大，调速范围广，易于控制，可靠性高等特点。

有刷直流电机通常作为动力设备使用，工作转速相比无刷直流电机较低，使用工作寿命在几百到一千多小时，换向电刷容易磨损，磨损严重时需要及时更换，否则容易造成轴承磨损；生产工艺成熟，便于维护^[38]。

（2）无刷直流电机

无刷直流电机是指采用半导体开关器件来实现换向功能的直流电机。无刷直流电机内部的位置传感器检测转子位置的变化，发出一定规律的脉冲序列，控制器通过收到的脉冲序列，对定子绕组的电流进行换流，定子绕组的输入电压由控制器根据位置传感器输出，控制相应的半导体开关提供，无刷电机能实现转矩的直接控制，效率较高^[39]。无刷直流电机通常被用于控制要求比较高、工作转速比较高的设备上。

通过对以上两种直流电机特性的了解和比较，结合两轮自平衡小车的特点和课题设计需求，从用电安全、易于控制和使用成本的角度出发，选择了有刷直流电机作为小车的驱动装置。考虑到电机工作电压、电流的大小和安装方式，选择了一款额定电压 36V，额定转速 4500 RPM，额定功率 500W 的有刷直流电机，与该电机配套的还有减速比为 1:19 的变速箱，最终输出转速约为 236RPM，变速箱输出轴可以直接连接车轮，便于安装，其外形如图 2-5 所示。

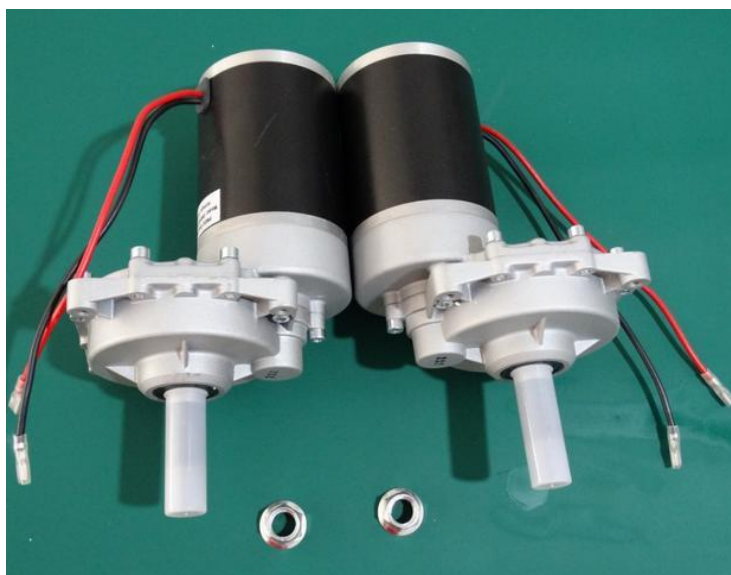


图 2-5 电机及减速箱外形图

2.2.3 电源的选取

由于两轮自平衡小车采用纯电动方式运行，电源不仅向控制系统提供电源，还负责电机的驱动，所以电源的类型应为动力型直流电源。在选取时需要考虑参数有输出电压、最大放电电流和额定容量等，以下为常见的车载式直流电源：

(1) 铅酸蓄电池

1859年由法国人普朗特发明了铅酸蓄电池，之后人们对其进行不断地改进，先后经过了免维护铅酸蓄电池（MF, Maintenance-Free），密封铅酸蓄电池（SLA, Sealed Lead-Acid Battery），到如今的阀控式铅酸蓄电池（VRLA, Valve Regulated Lead-Acid Battery）几个阶段，每一阶段都是铅酸蓄电池一次巨大的进步^[40]。铅酸蓄电池的单元电压为 2V，在生产中一般将多个单元串联起来，并封装在在一起，得到 12V、24V 等常用电压，目前广泛应用于电动助力车、内燃机车和其他可移动设备。

铅酸蓄电池自发明以来仍能牢固地占有大部分市场份额，除了其技术成熟、价格低廉、可靠性高等优点外，也要得益于近些年在与新型电池的竞争中发展的新型工艺和技术，如立体分布的电极、全密封式电池等，使用新的铅合金电极，使得比能量逐渐提高，电池使用寿命延长。

(2) 镍镉/镍氢充电电池

1899年，镍镉电池第一次出现在人们的世界里，1947年，密封型镍镉电池的研制成功是镍镉电池发展史上的里程碑，之后其便开始广泛地运用于人类的生产和生活中。镍镉电池能反复充放电 500 次以上，与铅酸电池相比，其拥有较高的能量密度，较小的体积，经济耐用。镍镉电池内阻很小，可以实现快速充电，同时也能实现大电流放电，放电时压降很低，可耐过充或过放，完全充电后可恢复原来的特性，温度范围广，操作简单方便，是一种理想的直流供电电源，非常适合作为便携式录音机，录像机等其他电子设备的供电电源。

镍镉电池具有充放电过程中的“记忆效应”和污染环境两个缺点，人们在其基础上进一步发明了镍氢电池。镍氢电池的额定电压为 1.2V，与镍镉电池相同，能量密度更高，没有“记忆效应”，也不会对环境产生污染，使得镍氢电池逐步取代了镍镉电池，成为了一种理想的“绿色”直流电源。镍镉电池与镍氢电池的区别如表 2-1 所示。

表 2-1 镍镉电池与镍氢电池的比较

参数和类别	镍氢电池	镍镉电池
能量、重量密度 (kW/kg)	67	27
能量、体积密度 (kW/L)	180	70~80
500 次循环容量保持率 (%)	95	90
大容量放电能力 (%)	80	60~70
充电时间 (hour)	0.5~1	1
循环次数	>1000	500
环境污染	无	严重
记忆效应	无	有

(3) 锂离子电池

锂离子电池主要依靠锂离子在电池正极和负极之间的移动来完成充放电过程。电池一般采用含有锂元素的材料作为电极，是现代高性能电池的代表。单节锂离子电池电压为 3.7V，充满电后约为 4.2V，相比镍氢电池的 1.2V 要高很多，而目前绝大多数半导体芯片的供电电压为 3.3V，所以锂离子电池非常适用于消费电子、移动设备的供电。锂离子电池能量密度大，是镍氢电池或镍镉电池的 1.5~2.5 倍；自放电率低，使用寿命长，无记忆效应，无污染性，充电快，重量轻，且外形可以定制，使其应用空间较其他充电电池更加广阔。

但锂离子电池也有一定的局限性，如生产成本高，电解质体系提纯困难；工作时需要完善的保护线路，过充或者过放都会破坏电池内部化学物质的可逆性，严重时会导致电池的使用寿命，操作不当可能导致电池发生燃烧甚至爆炸，危害人身安全。但随着技术的发展，锂离子电池现有的这些缺点将会逐步得以解决。

通过对以上几种可充电电池的学习和比较，可以得出各种电池的特点，如下所示：

(1) 铅酸蓄电池：性能稳定，价格低廉，能量密度较低，技术成熟，而且产品品质有成熟的标准来约束，市场占有率高，常作为动力型直流电源。

(2) 镍镉/镍氢充电电池：性能稳定，价格较低，能量密度较高，技术成熟，生产加工有相关标准来约束，主要作为中小功率移动设备的供电电源。

(3) 锂离子电池：效率高，生产成本高，属于新型电池，目前市场上产品类型丰富，质量参差不齐，广泛应用于手机、平板电脑、数码相机等消费类电子，作为动力型电源较少，不过国外已将锂离子电池作为电动汽车的供电电源，且效果可观^[41]。

参考以上几种电池的特性，结合两轮自平衡小车的设计需求，从设计成本、可靠性、安全性和是否便于维护、购买等角度出发，选择了硅胶电池作为系统的供电电源。硅胶电池全称为稀土纳米硅胶电池，是一种新型的密封铅酸蓄电池，是当今我国电动车动力电池的低碳产品，与传统铅酸蓄电池相比，其具有使用寿命长、重量轻、容量大、价格低、安全性高等优点。

本设计所使用的硅胶电池是由超威集团生产的 6-DZM-12 型电动自行车专用电池，电池电压为 12V，最大放电电流可达 48A，额定容量 12Ah。由于小车电机额定工作电压为 36V，所以采用 3 块 6-DZM-12 型硅胶电池串联，得到 36V 直流电源，满足电机工作要求。电池外形如图 2-6 所示。

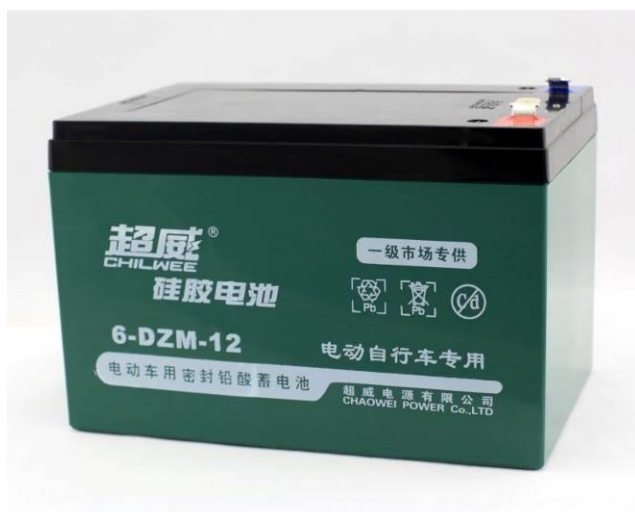


图 2-6 6-DZM-12 型硅胶电池外形图

2.2.4 姿态传感器的选取

两轮自平衡小车最重要的控制需求就是实现车体的动态平衡，这是一个典型的闭环控制系统，电机是执行机构，姿态传感器则是反馈回路中的重要部分，如果没有反馈回路，就不能完成闭环控制，无法实现小车的动态平衡^[29]。姿态传感器的作用就是采集车体所处的状态，即系统重心的倾斜角度，只要系统能够准确、及时地获取到这个倾角角度，适当地对电机进行控制，就能实现对系统重心位置的控制，所以姿态传感器的响应速度和准确度是两个重要的参考指标。

考虑到两轮自平衡小车的结构特点以及传感器的安装方式，我们需要采集的倾角实际上是车体底板与行驶路面的夹角 α ，如图 2-7 所示。

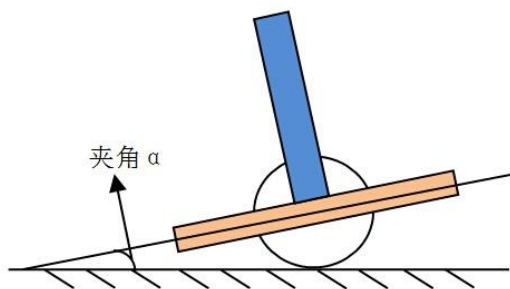


图 2-7 车体底板与路面夹角示意图

对于此夹角 α 的测量有以下两种方式：

(1) 采用安装在车体内部的加速度传感器来直接实现对此夹角的采集。加速度传感器固定于车体底板上，如图 2-8 所示。

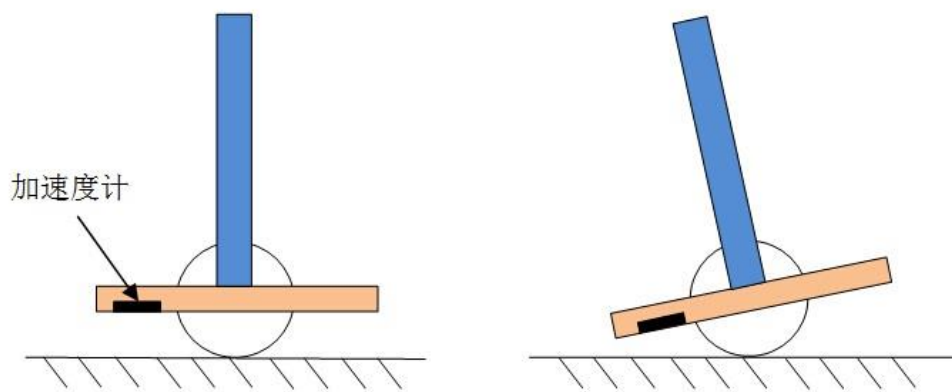


图 2-8 加速度传感器安装示意图

加速度传感器按测量轴的数量来分可以分为单轴、双轴和三轴加速度计，当采用三轴加速度计时，通过分析重力加速度在 X 轴、Y 轴和 Z 轴上的分量，就能通过相应的数学运算得到传感器的三维状态。

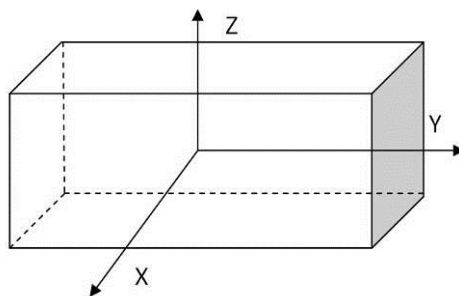


图 2-9 加速度传感器三维示意图

如图 2-9 所示，当传感器水平放置时，Z 轴上的加速度与重力加速度大小相等，方向相反，当传感器处于其他状态时，可用公式（2-1）来计算其与各轴之间的夹角，从而得出传感器的空间状态，进一步得出车体所处的状态。

$$\cos \theta = \frac{a}{g} \quad (2-1)$$

其中： a 为 Z 轴输出的加速度值

g 为重力加速度的值

当小车处于静止状态下，采用此方法测量具有较高的精度，当小车运动时，由于路面不平和小车自身的加减速运动，会导致各测量轴输出的加速度值不完全为重力加速度的分量，从而影响测量的准确性^[30]。同时，由于外界的干扰增多，传感器输出信号会与大量噪声信号叠加在一起，而这类噪声的频谱范围广，无明显特征，简单的滤波操作对于噪声信号的清除效果不佳，增加系统运算负担^[42]。

（2）采用安装在车体外部的距离传感器测量小车底板与路面的距离，通过计算得出车体与路面的夹角，其安装示意图如图 2-10 所示。

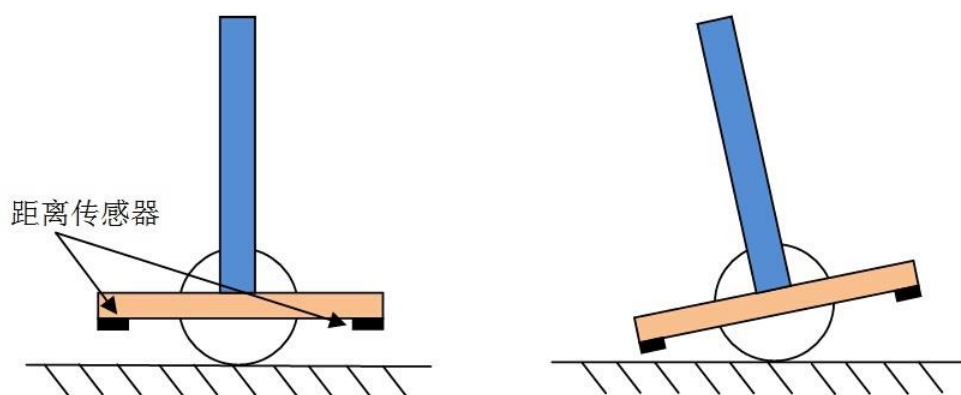


图 2-10 距离传感器安装示意图

车体底板两端分别装有距离传感器，能够测量车体底板与路面的距离，其几何分析如图 2-11 所示：

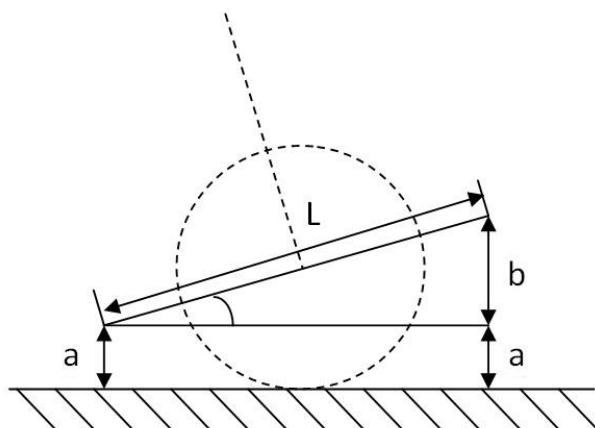


图 2-11 距离传感器测量倾角示意图

其中：a 为左端距离

b 为右端距离与左端距离的差值

L 为左右传感器在车体平面的距离（安装时已确定）

由图 2-13 可有，车体底板与路面夹角 α 与图中参数关系如公式 2-2 所示，通过公式（2-2）计算得出夹角 α 的值也就是系统的倾角值。

$$\sin \alpha = \frac{b}{L} \quad (2-2)$$

常用的距离传感器有红外式距离传感器和超声波式距离传感器。

红外式距离传感器内部有一只红外发射管和一只红外接收管，调制的信号通过发射管发射出去，传输过程中遇到的物体会将反射红外线反射回来，在一定的时间内，接收管将收到的红外线进行比较，当判断为自身发射出去的信号，传感器将给出有效响应。通过调整 t 的值，能改变传感器的检测距离，通过计算 t 的值，便能得到距离值，由于红外线在空气中的传播速度为光速（ $c = 299792458\text{m/s}$ ）。考虑到小车底板与路面的距离较近，而且路面色彩和材质多种多样，在特殊情况下，可能会有泥土或其他物体附着在传感器的检测窗口上，如果选用红外式距离传感器，将无法准确地提供距离值。

超声波距离传感器内部有一只超声波发射器和一只超声波接收器，其工作原理与红外式距离传感器类似，不同的是超声波距离传感器是采用超声波作为信号载体，由于超声波在空气中的传播速度与音速（通常 $u = 340.4\text{m/s}$ ）相同，远远低于光速，所以超声波距离传感器不仅可用于远距离的检测，也能用于较

小距离的检测。由于空气的温度、湿度、流动方向和大气压力均会对超声波的传播速度和方向产生一定的影响，所以超声波在近距离检测时准确度较低。

通过对以上几种传感器的分析，结合两轮自平衡小车的特点和本课题的设计需求，故选用第一种方式来完成小车姿态的检测功能。

加速度传感器选用飞思卡尔公司生产的 MMA7361 三轴加速度传感器，该传感器采用 3.3V 供电，可选测量量程 1.5g 或 6g；功耗低，开机响应快；内部带有低通滤波器，能有效滤除噪声，外围电路简单，频率及解析度高，提供精确的坠落、倾斜、移动、放置、震动和摇摆感应灵敏度。实际选用了该芯片的成品模块，如图 2-12 所示。

考虑到加速度传感器的动态性能的不足，本设计选用陀螺仪来实现对系统的动态补偿。陀螺仪本身是一种测量角速度的传感器，但通过对角速度在时间上的积分可以得到这段时间里的角度差值，如果将陀螺仪的检测方向与小车的前进方向统一，那么通过采集该方向上的角速度，便能计算得出车体的倾角值。但总所周知，积分运算会随着时间的累积产生非常大的累积误差，所以需要定时地对积分结果进行修正。陀螺仪具有良好的动态性能，而加速度计具有良好的稳态性能，将二者结合起来，通过一定算法融合，便能获得优异的性能^[43]。

陀螺仪传感器选用了村田公司的 ENC-03MB 型 MEMS 型陀螺仪，该传感器是一种基于科氏力原理的角速度传感器，工作电压 2.5V~5V，输出模拟电压信号，电压幅值与角速度成正比的^[33]。实际选用了该芯片的成品模块，如图 2-13 所示。

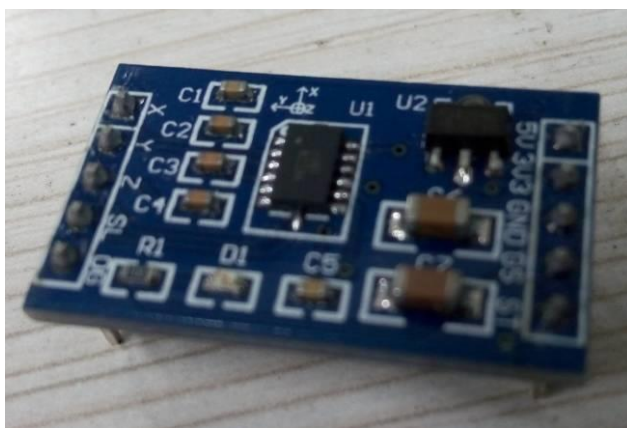


图 2-12 MMA7361 三轴加速度计模块

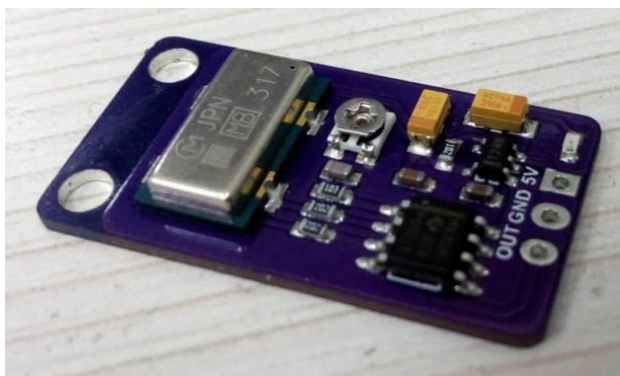


图 2-13 ENC-03MB 陀螺仪模块

2.2.5 机械结构的选取

根据课题设计需求，两轮自平衡小车的车体和车轮需要满足载人的需求，所以相比小型实验自平衡机器人，车轮的尺寸、器件的布局 and 车体的材料等将存在较大差别。

常见非载人性质的两轮自平衡小车通常将电源及控制电路板固定在车体上半部分，电机与车轮直接连接，分布在车体下方，这样的布局有利于车体重心的上移，使小车的更加容易控制；而对于车体材料的选取则没有严格要求，满足小车的整体性即可。

(1) 车体

而作为能载人运行的两轮自平衡小车，首先，在车体材料的选取上要满足一定的载重能力^[39]，成年人体重在 50Kg 以上，而本设计中选用的电机和电池组的重量约为 30Kg，为了能够承载以上重量，所以选用金属材料的车体。其次，为了易于驾驶，电机、电池组和控制电路应该安装在车体内部，提高车体的整体性；再次，考虑到小车在运行过程中所遇到的各种路面情况，车体应该具有一定的封闭性，满足一定的防水防尘能力；最后，考虑到本专业的特点，小车的车体尽量从市场中直接购买，避免自行加工带来的相关问题，减少设计过程中的步骤，提高设计效率，降低开发成本。

根据以上几点要求，经过多次市场调查，最终找到设计所需的车体，符合设计要求，车体组装完成后，如图 2-14 所示。



图 2-14 小车车体组装效果图

(2) 车轮

根据以确定的电机和车体，选用了小型摩托车车轮作为两轮自平衡小车的车轮，轮胎宽度 3.5 英寸，钢圈直径为 10 英寸，整体直径为 430mm，车轮与减速箱的输出轴直接相连，车轮外形与连接方式见图 2-15。



图 2-15 车轮及其连接方式

(3) 转向器

转向器采用金属结构，为驾驶人员提供足够的支撑力，两侧的弹簧能使转向器在无外力的情况下自动回到原点。转向器尾部与电位器的输入旋钮连接，其转动时会使电位器输出值发生变化，处理器检测到之后控制电机运行，完成转向，其外形如图 2-16 所示。

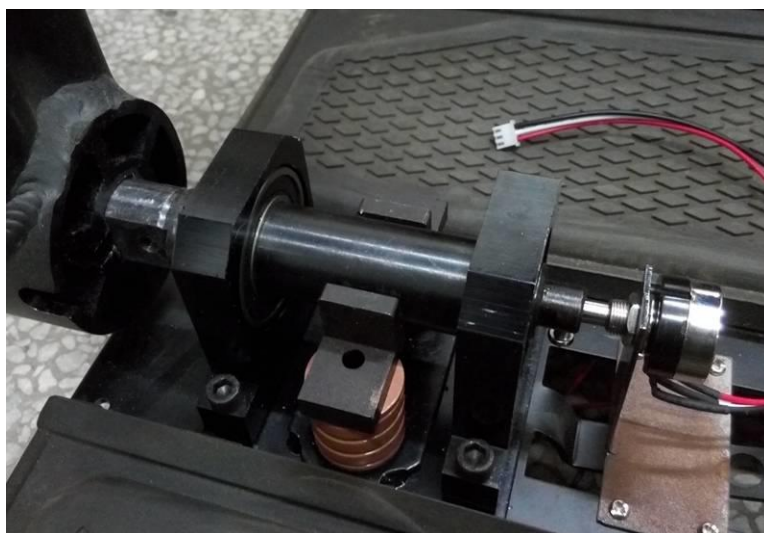


图 2-16 转向器

2.3 系统控制策略

控制策略是一个控制系统的核心，对于一个已经确定的系统，控制策略的选取是否合适，将直接影响到系统能否稳定，能否抵御外界的扰动，能否快速响应等^[37]。

对于要求不高的控制系统，采用开环控制方式便能达到预期的效果，只需将给定区间与输出区间一一映射即可，但这种系统对于外界的干扰不具备任何抵抗能力，当外界扰动出现在后，系统的输出便与预设值出现偏差，且随着扰动的增加而变大，最终影响系统正常运行，所以开环控制方式不能用于外界扰动复杂的场合。

为了解决以上问题，增强系统的抗干扰能力，人们提出了闭环控制系统，通过获取实际的输出情况，并与系统设定相比较，当二者不相匹配时，说明系统受到了外界的干扰，此时通过调整系统的输出，最终达到与系统设定相符，消除干扰带来的影响，实现了系统的闭环控制^[32]。

通过对两轮自平衡小车运动状态的分析，系统需要控制的行为有直立运动、直线运动和转向运动。本节将对于以上三种运动所采取的控制策略做出详细介绍。

2.3.1 直立运动的控制

直立运动是两轮自平衡小车所有行为的基础，只有实现对直立运动的良好控制后，才能完成其他控制。直立运动的控制目标是使系统重心维持稳定，由于两轮自平衡小车控制模型来自一阶倒立摆，本身是一个不稳定的系统，只有施加外力，才能实现自身的动态平衡，所以只有采用闭环控制方式，才能满足控制要求^[44]。控制系统结构框图如图 2-17 所示。

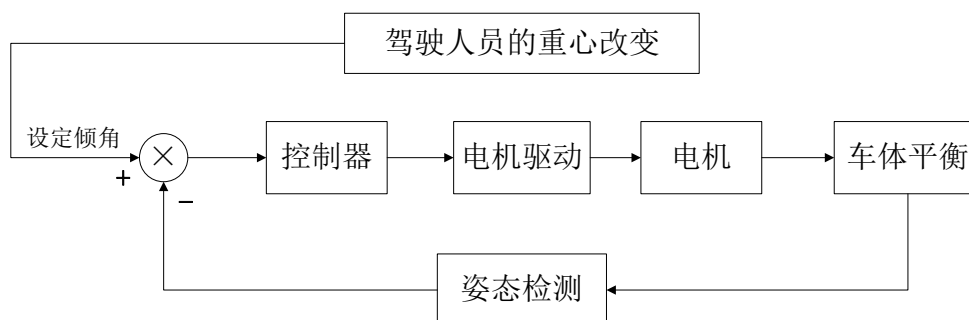


图 2-17 直立运动控制系统结构框图

由图 2-17 可以看出，控制系统的执行机构为电机，电机的运动直接影响车体的平衡，而驾驶人员重心位置的改变和其他外界干扰会直接影响系统的重心位置，从而影响小车的平衡。反馈回路主要由姿态传感器电路构成，当姿态传感器的采样速率足够高时，才能及时地将系统状态信息反馈至控制器，及时调整输出，完成平衡控制。

控制器是整个控制回路的核心，而控制算法则是控制器的灵魂。根据系统的输入量与输出量，结合控制器的运算类型与速度，控制算法的选取对于控制效果好坏以及实际调试的难易非常重要。本设计将采用经典的 PID（比例-积分-微分）控制算法来实现对小车直立运动的闭环控制。

PID 控制算法由于具有结构简单、易于稳定、调整方便等优点，从而广泛运用于各种控制系统。尤其是当被控对象的组成结构和具体参数不能完全掌握，无法得到精确的数学模型时，PID 控制算法便能发挥其优势，调试人员依靠经验和现场调试情况来确定控制器的结构，逐步选取控制效果最佳的控制器参数，获取最好的控制效果。

PID 控制器由比例控制（P）、积分控制（I）和微分控制（D）组成，是根据系统的给定和输出之间的误差，通过比例、积分、微分计算得出控制量，输出至执行器来实现闭环控制的。其输入 $e(t)$ 与输出 $u(t)$ 的关系如公式（2-3）所示。

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \times \frac{de(t)}{dt}] \quad (2-3)$$

其中： K_p 为比例系数， T_i 为积分时间， T_d 为微分时间。

比例控制（P）是一种最为简单的控制策略。控制器的输出与系统误差成比例，当误差越大时，控制器输出越大；当误差较小时，控制器的输出也会相应减小。系统采用比例控制器会存在稳态误差（Steady-state Error）。

积分控制器的输出与系统误差对时间的积分成正比关系。对于一个自动控制系统，如果系统输出稳定后，稳态误差继续存在，则称这个自动控制系统是有稳态误差的，或简称有差系统（System with Steady-state Error）。由于积分控制器的输出取决于误差对时间的积分，即使稳态误差很小，但随着时间的增加，积分项会越来越大，控制器继续增大输出量，进一步减小稳态误差，直至完全消除。因此，积分控制器的作用就是消除系统的稳态误差。

微分控制器的输出与误差信号的微分成正比关系。当一个控制系统内部存在大惯性环节或滞后环节时，由于这些环节的存在，导致控制器的输出不能即时作用于被控对象上，变化总是滞后于误差的变化，控制系统在消除误差的过程中可能会出现振荡，甚至无法稳定。为了解决这种滞后带来的问题，就必须使系统的输出具有一定的“超前”性，用于抵消控制回路中的滞后环节，而微分控制器就具备这种能力，能预测误差变化的趋势，能够提前使抑制误差的控制作用大幅降低，避免被控量的严重超调，所以微分控制器对于大惯性或纯滞后的被控对象具有良好的控制效果^[44]。

2.3.2 直线运动的控制

两轮自平衡小车左右车轮以同样的速度，往同一方向运动，这样就形成了小车的直线运动。由于本设计所选用的有刷直流电机没有配备转速输出接口，而且结构上也不便于自行安装测速装置，所以无法形成转速反馈，从而也无法实现转速的闭环控制。但本设计中选用的有刷直流电机使用永磁体代替了励磁线圈，电机磁通在运行过程中可以认为是恒定不变的，所以其运行特性与他励直流电动机的特性及其相似。

直流电机的转速特性如公式（2-4）所示：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} I_a \quad (2-4)$$

其中， n 为电机转速， U 为电机输入电压， R_a 为电枢电阻， I_a 为电枢电流， C_e 为电机电动势常数， Φ_N 为电机每极磁通。

由于电机的电枢电阻 R_a 非常小，所以公式 (2-4) 右侧减数部分约等于零，可以忽略，而电机电动势常数 C_e 和每极磁通 Φ_N 在电机运行的过程是恒定不变的，从而电机转速与输入电压的关系如公式 (2-5) 所示。

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} \quad (2-5)$$

可以看出电机转速与电机输入电压成正比关系，而且比例系数为常数，所以，当电机输入电压不变时，其转速将会对应的保持恒定（实际中考虑到电枢电阻的存在，当电机负载变化时，电机转速也会有轻微地变化），可以认为电机为一个线性控制对象，且对输入电压以外的扰动具有较强的抑制能力。

综合上述分析，系统对小车直线运动将采用开环控制，并且针对电池电压的变化进行一定的补偿，提高系统的控制精度。直线运动控制系统结构框图如图 2-18 所示。

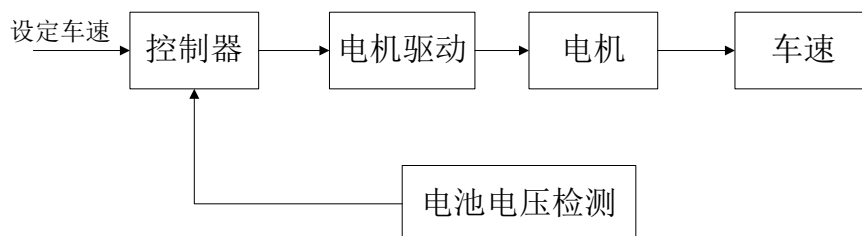


图 2-18 直线运动控制系统结构框图

2.3.3 转向运动的控制

转向运动是建立在小车左右车轮速度差基础上完成的运动。转向运动控制系统的给定信号是由驾驶员根据路况实时给定的，给定信号的幅值是驾驶人员通过大脑计算后，控制手臂来完成的，所以整个转向运动的控制核心是驾驶人员的大脑，小车在系统中扮演着执行器的角色，控制系统结构框图如图 2-19 所示。

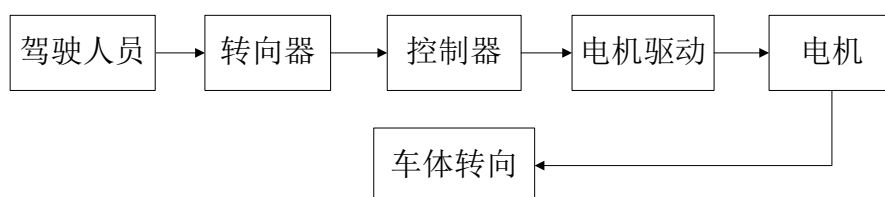


图 2-19 转向运动控制系统结构框图

由图 2-19 可以得出，小车的转向运动，实际上是由驾驶人员来实现闭环控制的，当驾驶人员发现前方有障碍物时，会主动控制小车的转向器，使小车运动方向发生转变；当驾驶人员发现目前的转向幅度不足以让小车安全的通过障碍物时，会继续加大转向的幅度，使小车顺利通过障碍物。通过驾驶人员的介入，转向运动实际上也是一个闭环控制系统，只不过控制算法是由驾驶人员的自己根据实际情况而确定的。

当左右两侧的电机性能差异较大或者负荷不同时，会导致小车的转向不如预期，控制难度增加，这是开环控制系统的弊端，所以在选取电机时，应该尽量保证左右电机参数的一致性，使小车更易于操控。

2.4 本章小结

本章第一部分通过分析本课题设计需求和两轮自平衡小车的结构特点，在一阶倒立摆的基础上，对小车受力进行分析，完成了小车控制模型的建立工作，然后通过对小车运动状态的分析，将直立运动、直线运动和转向运动作为小车的三种基本运动，便于控制策略的选取。

第二部分主要介绍了系统硬件总体方案的设计。通过仔细分析各类方案的利弊，结合本课题的设计需求，完成了系统控制器、电机、电源、姿态传感器以及车体机械结构的选取和设计工作。

最后针对小车的控制模型特点，结合直立运动、直线运动和转向运动各自控制系统的特征，分别提出了相应的控制策略和控制算法。

第3章 控制系统硬件设计

一个完整的控制系统由硬件和软件两部分构成，硬件是控制系统的基本，软件是控制系统的灵魂，是建立在硬件之上的。而良好的硬件设计能提高系统运行的稳定性，为软件提供良好的运行环境。

硬件设计主要包含电路原理图设计和印刷电路板（PCB）设计两个部分。

电路原理图设计是指按照一定电路规则，使用特定方法，针对所需实现的功能，设计出相应电路的过程。通常在电路原理图设计过程中，需要完成系统控制器的选取及其最小系统的设计，存储器的设计，电源设计，数字电路中的逻辑变换，模拟电路中的信号滤波、放大、限幅等处理和通讯接口的设计等等。当电路原理图设计完成后，整个电路所具备的硬件资源也随之确定，如果资源不能满足整个系统的需求，则需要对电路进行重新设计，直至达到设计需求。

印刷电路板（PCB）设计的目标是将电路从原理图一一对应在实际的电路板上，将原理图中的每个元件替换为相应型号的器件，按照电路运行的原理，将所有器件按规则排列在一定区域，再通过生产厂家完成电路板的制作，最终将电路图中的电气连接实现在一块电路板上，当电路板上的元器件焊接后，即能实现电路的功能。

本章介绍的硬件设计包括控制器设计、电源设计、电机驱动设计、姿态传感器设计和通讯接口设计。

3.1 控制器设计

根据课题设计需求和系统总体方案的选取，两轮自平衡小车的控制器采用双处理器结构，主处理器采用 DSP 控制器，用于控制算法的运行，对电机进行控制^[38]；协处理器采用 ARM 控制器，用于姿态采集、上位机通讯以及其他功能的实现。

3.1.1 主处理器的设计

根据第二章中的方案设计，本系统所采用的主处理器为德州仪器公司的 TMS320F28335PGFA 型 DSP，由于该芯片采用的封装为 LQPF176 脚封装，引脚间距为 0.5mm，不便于手工焊接，所以本设计将直接采用 TMS320F28335 核心板成品。

核心板型号为 Core28335，是索思达电子针对德州仪器（TI）公司 C2000 系列微控制器所研制的一款高性价比核心板。核心板采用 5V 单电源供电，外扩 SRAM: IS61LV6416（64K*16 位）和 FLASH: SST39VF400A（256K*16 位），Core28335 不仅扩展处理器的运行内存，而且扩展了程序存储器，大大提高了核心板的运算能力和存储能力，所有 IO 和外设接口都通过双排针引出，方便了片上外设的使用^[40]。Core28335 外形如图 3-1 所示。



图 3-1 Core28335 外型图

根据设计方案，DSP 主处理器需要从协处理器获得小车的姿态数据，计算得出电机的控制量（即为电机的输入电压），为了完成该功能，核心板与系统其它功能模块有如下联系：

- （1）核心板采用单组 5V 供电，需要从电源模块引入；
- （2）处理器之间采用 SPI（Serial Peripheral Interface）通讯接口，通过设定的协议完成数据传输，需要将 SPI 通讯接口引出^[34]。同时，为了紧急情况下停止电机的运行，主协处理器之间还需要有普通信号线相连，并接入 DSP 的中断系统，实现快速响应；
- （3）引出 7 个通用 IO，分别用于左右电机工作状态、系统工作状态和调试状态的显示；

所以核心板所需要引出的信号线和电源线数量如表 3-1 所示。

表 3-1 核心板需引出的接口详单

名称	接线数量	用途	类别
电源线	2 根	用于对 DSP 核心板的供电	电源
SPI 通讯接口	4 根	用于主、协处理器之间的数据交换	信号
数字输出	5 根	用于 DSP 和电机工作状态的显示	信号
数字输入	2 根	用于紧急情况下停止电机运行	信号

为了便于原理图的设计，本文中将 CORE28335 分为两个部分，并且单独使用，分别为 CORE28335A 和 CORE28335B，如图 3-2 与图 3-3 所示。

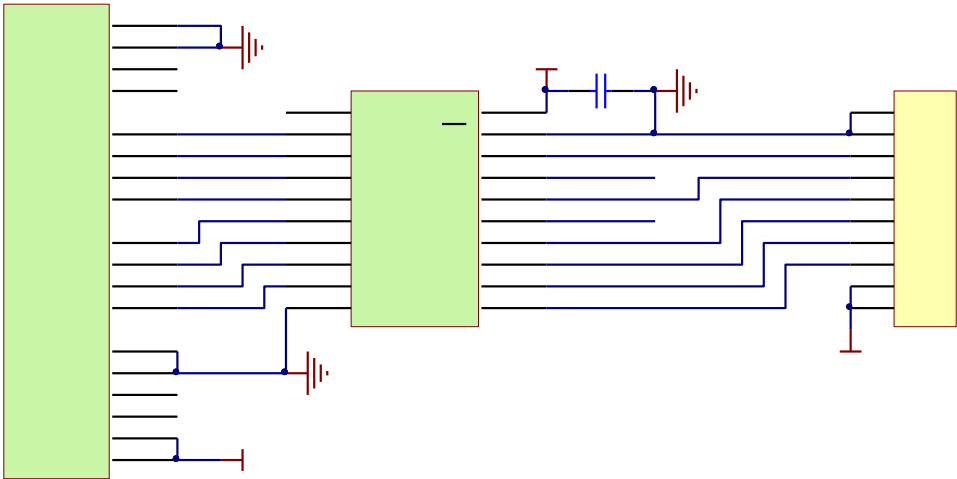


图 3-2 CORE28335A 电路设计

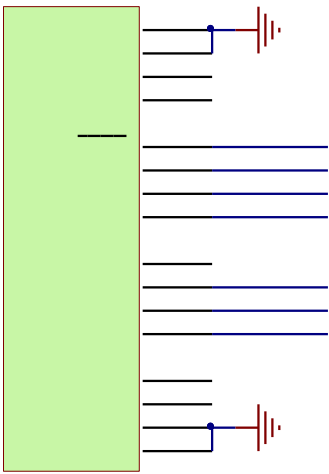


图 3-3 CORE28335B 电路设计

为了保护主控芯片，在芯片输出端接入了 74HC245 总线缓冲器，不仅能有效隔离芯片与电机驱动器，而且增强了输出信号的驱动能力。通过查看 74HC245 的数据手册，其输入信号高电平额定值为 2.75V，而输出信号高电平为 VCC，所以电路中 74HC245 采用 5V 供电，实现了控制器 3.3V 输出信号至 5V 信号的转换，能更好地与电机驱动板相匹配。

考虑到 TMS320F28335PGFA 型 DSP 不属于低功耗型的处理器，其工作时产生的热量会导致芯片温度明显升高，而在本设计中，它将被安装于相对密封的车体中，所以必须采取一定的措施，增强芯片的散热能力。经过实际测试，核心板在输入电压 5V，时钟频率为 150MHz，运行流水灯程序（未开启对外部存储器的访问）时，整板工作电流约为 210mA，且 DSP 芯片温度上升很快，最后芯片温度约为 43℃；当程序中开启对外部存储器的访问功能后，整板工作电流上升至 260mA，最终芯片温度约为 55℃。从以上数据来看，DSP 在正常运行时会使芯片温度明显升高，长时间运行时可能导致处理器的稳定性降低，所以本设计对 DSP 芯片的散热采取了一定的措施，将小型铝片式散热器固定在芯片表面，增大芯片与空气的接触面积，达到加快散热的目的。小型铝片式散热器实际安装效果如图 3-4 所示，图中右下角为未安装散热器的效果。

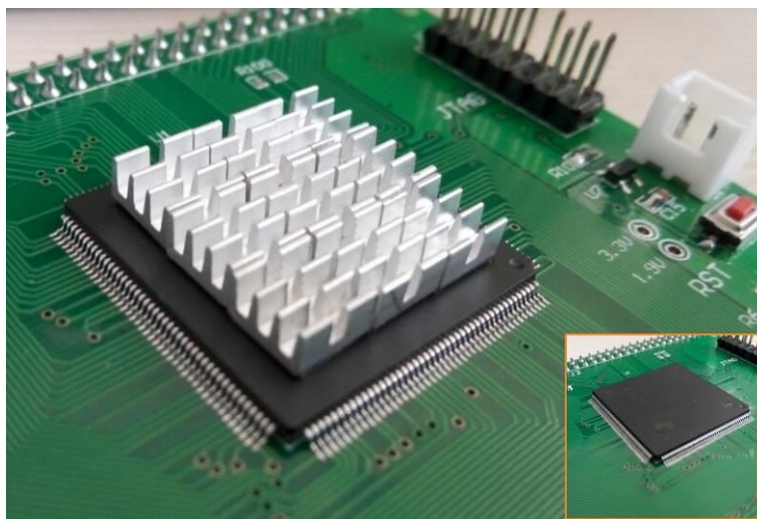


图 3-4 散热器实际安装效果图

3.1.2 协处理器的设计

本系统所采用的协处理器为意法半导体公司的 STM32F103VET6 控制器，内核为 Cortex-M3，芯片采用 3.3V 单电源供电，最高时钟频率为 72MHz，芯片

内部集成有 64K 字节的 SRAM 和 512K 字节的 FLASH，满足系统设计需求，无需进行外部存储器的扩展。

最小系统是芯片正常运行的基本保障，主要包括电源电路、时钟电路和复位电路三个部分，对于 STM32F103 系列控制器，还需要对启动模式进行配置，启动模式配置如表 3-2 所示^[45]。

表 3-2 STM32F103 系列启动模式

BOOT1	BOOT0	启动方式
X	0	片上 FLASH（AP 区）启动
0	1	片上 FLASH（LD 区）启动
1	1	内置 SRAM 启动

本设计使用拨码开关实现不同的启动模式，大多数情况下，芯片从用户闪存启动，即上电后直接运行片内 FLASH 中的程序。启动电路如图 3-5 所示。

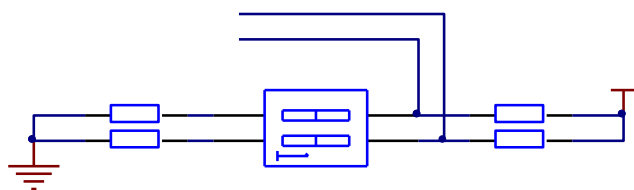


图 3-5 启动电路

由于使用了处理器片上 AD（模数）转换器，所以数字电源与模拟电源需要隔离，本文中利用 0 欧电阻实现数字电源与模拟电源的隔离，如图 3-6 所示：

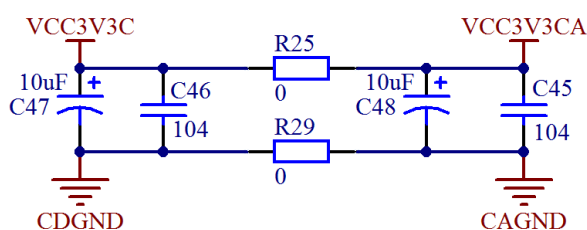


图 3-6 数模隔离电路

STM32 系列控制器可以使用通用的 JTAG 接口和 ST 公司自行设计的 SW 接口来完成芯片的调试工作，SW 接口仅需要 2 根信号线：SWDIO 和 SWCLK，兼容 JTAG 型仿真器，具有接线少的优势，便于电路板设计的简化。在实际电路设计中，SW 调试接口还加入了一组电源线，用于对仿真器的供电，如图 3-7 所示。

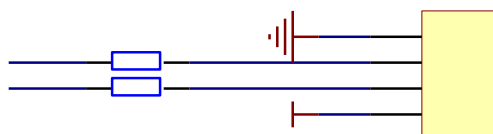


图 3-7 SW 调试接口电路

为了更好地保护主控制器，在与主控制器通讯时需要加入缓冲器，本文选用了 SN74LVC2G241 双路三态输出缓冲器，用于对信号输入输出的双向隔离。根据无线通讯模块接口说明，其采用半双工的 SPI 通讯接口，而 STM32 的 SPI 接口为全双工，为了实现模块数据线的分时复用，实现数据的发送与接收，本文中采用 SN74LVC2G241 双路三态输出缓冲器作为信号的分离。协处理器的缓冲电路如图 3-8 所示。

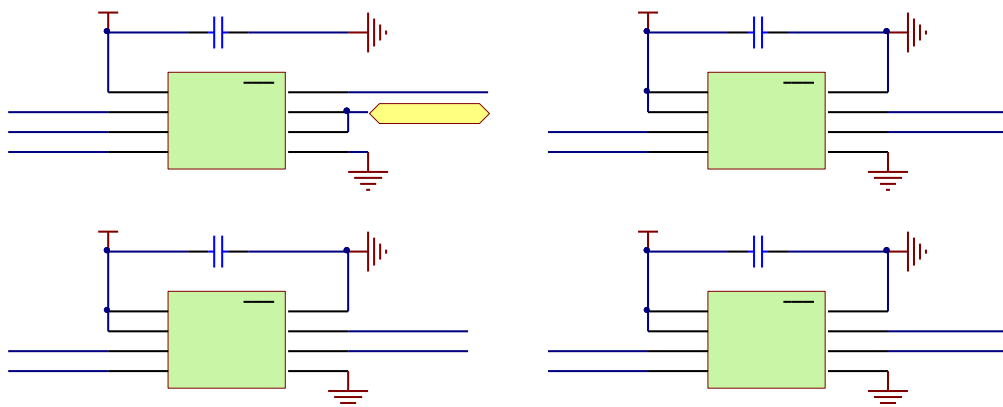


图 3-8 协处理器缓冲电路

根据本文设计方案，协处理器需要完成所有传感器的数据采集和转换、电池电压检测、人体检测、与主处理器通讯、与上位机通讯和系统相关状态信息的显示等任务，需要使用的资源如表 3-3 所示。

表 3-3 协处理器资源使用表

名称	数据	使用资源	说明
姿态检测	2 模拟量输入	ADC	采集加速度计和陀螺仪数据
人体检测	2 数字量输入	GPIO	检测是否有驾驶人员
电源监测	1 模拟量输入	ADC	监测电池组电压
主协通讯	通讯接口	SPI+GPIO	与主处理器通讯
上下通讯	通讯接口	SPI+GPIO	与上位机通讯
状态输出	5 数字量输出	GPIO	显示小车工作状态

根据表 3-3，结合 STM32F103VET6 的片上资源分布，完成了芯片引脚功能的分配，如图 3-9 所示。

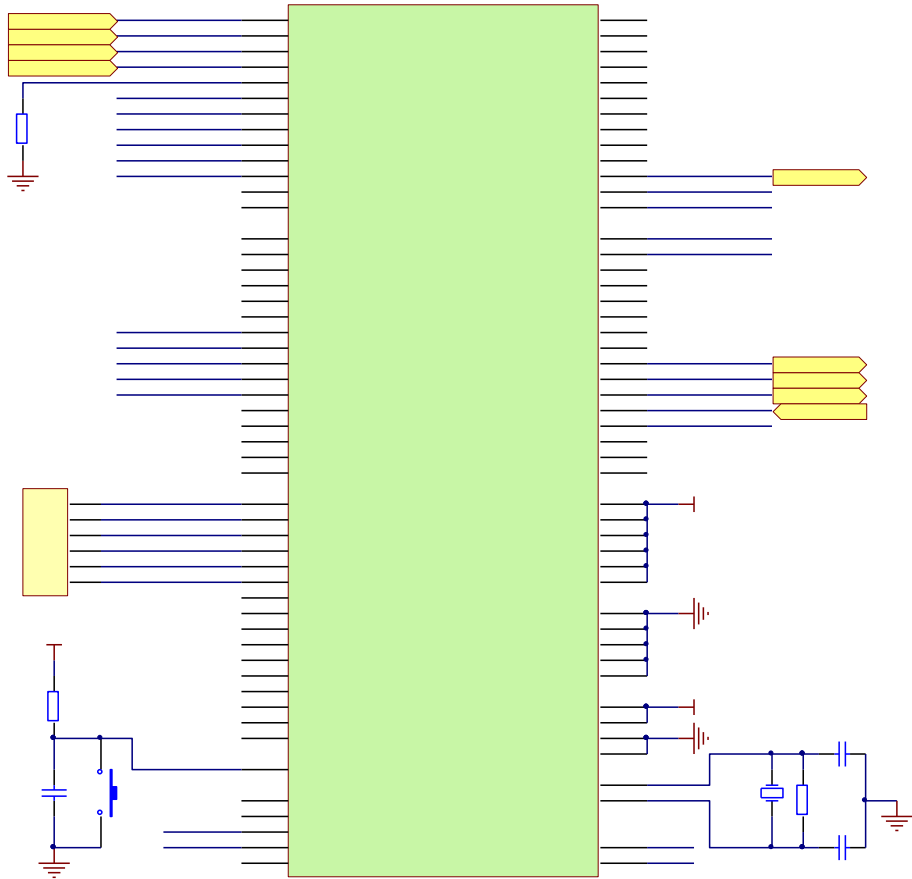


图 3-9 协处理器外围电路

3.2 传感器设计

本文中传感器主要分为两类，第一类为检测小车姿态的姿态传感器。姿态传感器是小车直立运动闭环控制反馈环节的重要元件，其输出信号将直接影响到控制器的判断，从而影响到整个系统的稳定。为保证传感器的输出信号稳定、可靠的传输至 AD 转换器，必须为传感器提供优质的电源。本设计所选用的加速度传感器模块和陀螺仪模块内部均有独立的线性稳压电源，无需为其另行设计电源电路。第二类为检测系统工作状态的状态检测传感器，主要包括电池电压检测，人体检测，转向器输入检测等部分。

3.2.1 加速度传感器

本文所选用的加速度传感器为 MMA7361 型三轴加速度计，能同时测量三个相互垂直方向上的加速度。

根据芯片文档，当芯片用于倾斜检测时，建议采用 1.5g 的量程，在此量程下，芯片的灵敏度为 800mV/g，信号变化范围满足 AD 转换器的转换范围。考虑到芯片输出信号为模拟电压量，为了减少外界噪声对信号产生的干扰，在电路设计时，对模拟量输入通道串入了电压跟随器，用于降低信号内阻，同时也能隔离传感器与 AD 转换器，遇到冲击时能有效保护 AD 转换器。加速度传感器模块外围电路如图 3-10 所示。

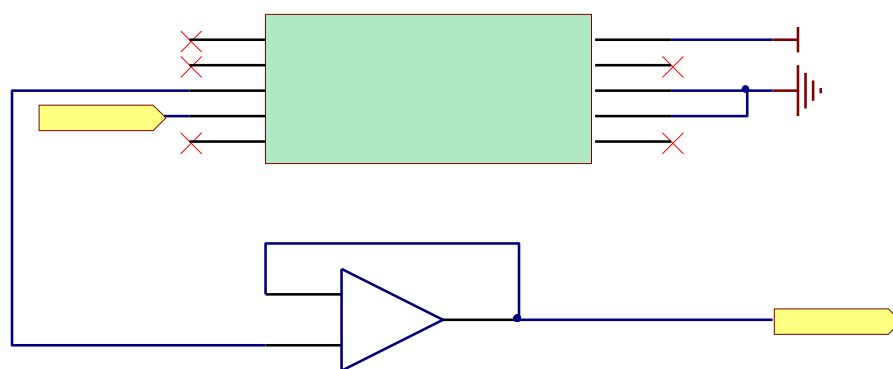


图 3-10 加速度传感器模块外围电路

图 3-10 中，U7 为加速度传感器模块，模块采用 5V 供电，可对外输出 3.3V。其中 1、2、3 号引脚分别对应 X、Y、Z 轴的加速度分量；GS 为量程选择，由控制器的 I/O 口输出高低电平来控制，GS 或接低电平时，量程为 1.5g，接高电平时为 6g。0G 为自由落体检测，正常情况下为低电平，当芯片处于自由落体的状态时输出高电平，可用于触发报警信号。SL 为休眠控制引脚，悬空默认为高电平，芯片正常工作，低电平时芯片休眠，降低功耗。ST 引脚为芯片自检触发信号，高电平时触发。

3.2.2 角速度传感器

本文所选用的角速度传感器为 ENC03-MB 型单轴陀螺仪模块，能测量单一方向上的角速度。

该模块采用单 5V 供电，输出信号是与角速度成正比的模拟电压，根据 ENC03-MB 芯片数据手册，该角速度传感器基本参数如图 3-11 所示。

Part Number	Supply Voltage (Vdc)	Maximum Angular Velocity (deg./sec.)	Output (at Angular Velocity=0) (Vdc)	Scale Factor (mV/deg./sec.)
ENC-03M	2.7~5.25	+/-300	1.35	0.67

图 3-11 ENC-03MB 型角速度传感器基本参数

从图 3-12 中可以有如下角速度计算公式，如公式 (3-1)，

$$V = \frac{U - 1.35}{0.67 \times 10^{-3}} \quad (3-1)$$

其中：V 为角速度，U 为传感器输出电压。

通过以上公式，可以计算出传感器的瞬时角速度，在实际中角速度的波动较大，对角速度积分求取角度时，应该采用积分区间内的平均角速度作为积分对象，才能得到较为准确的数据。

参考芯片的应用手册，传感器的信号输出至控制器的过程中应该包含以下几个环节，如图 3-12。

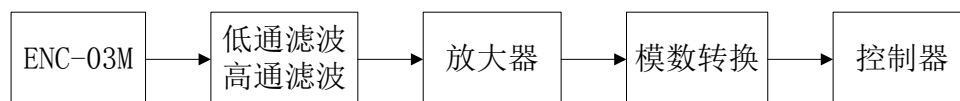


图 3-12 ENC-03M 型陀螺仪采样电路结构

本文所使用的传感器模块已将高通无源滤波器和低通有源滤波器集成在模块内，即包含了图 3-12 中的前三个环节，但为了隔离传感器与 AD 转换器，有效地保护集成在协处理器内部的 AD 转换器，所以在模块的输出端接入了电压跟随器，具体电路如图 3-13 所示。

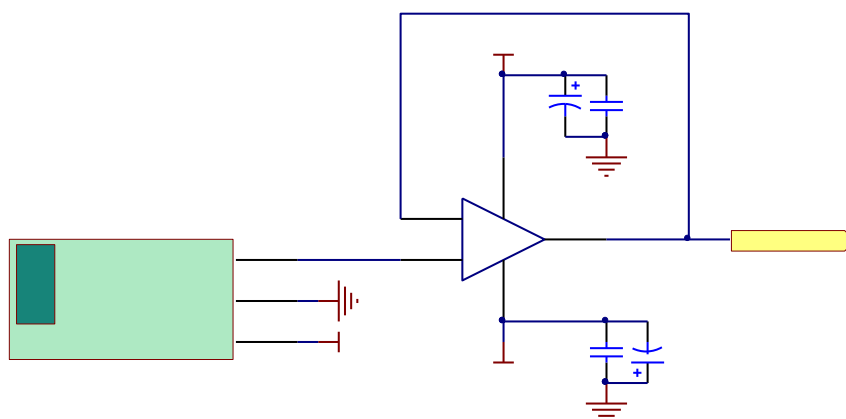


图 3-13 角速度传感器外围电路

3.2.3 状态检测传感器

状态检测传感器主要包括电池电压检测、人体检测和转向器输入检测。

(1) 电池电压检测

由于控制系统的电源与电池之间采用了隔离型 DC-DC 变换器，为了准确的检测电池电压，本文采用了 PC817 型线性光耦作为隔离器件，并且结合 TL431 电压基准源芯片，实现了电池电压的隔离采集，在光耦输出侧接入电压跟随器，减少 AD 转换器对实际电路的影响，起到了隔离与缓冲的作用。电池电压检测电路如图 3-14 所示。

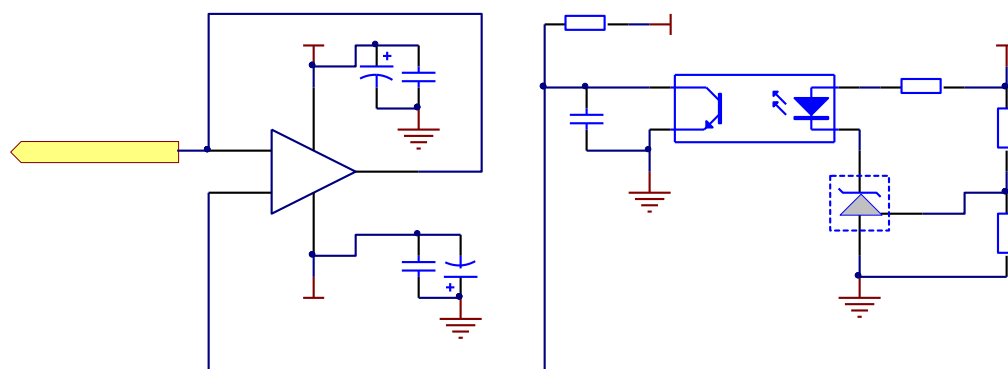


图 3-14 电池电压采集电路

(2) 人体检测

人体检测主要用于检测小车驾驶区域是否有人，为小车的安全运行提供保障。本文中采用脚踏开关作为检测器件，4 个开关并联使用，当有任意开关被按下时，即认为站立区有人，小车启动平衡控制。人体检测电路如图 3-15 所示。

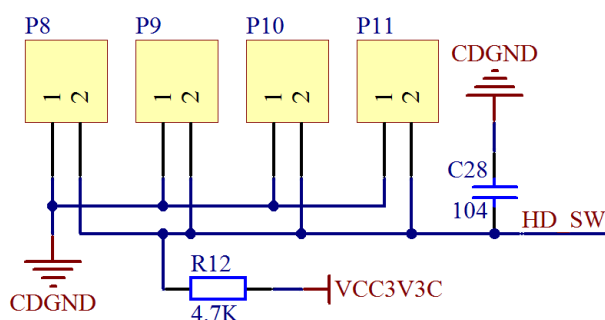


图 3-15 人体检测电路

(3) 转向器输入检测

转向器输入检测主要用于检测小车转向器的输出值。小车采用单圈旋转式电位器作为转向器的输出器件，电位器旋转轴与转向杆同轴转动，转向器旋转产生的角度变化转换为电位器可调端的阻值变化，并进一步将阻值变化转换为电压变化，最后送入 AD 转换器，被处理器获取，从而实现了转向器输入检测功能。为了减少 AD 转换器对电路产生的影响，在转向器的输出端接入了电压跟随器，起到了隔离与缓冲的作用。转向器输入检测电路如图 3-16 所示。图 3-16 中 P3 即为电位器接口，C9、C10 用于滤除高频干扰，使转向器输出更加稳定。

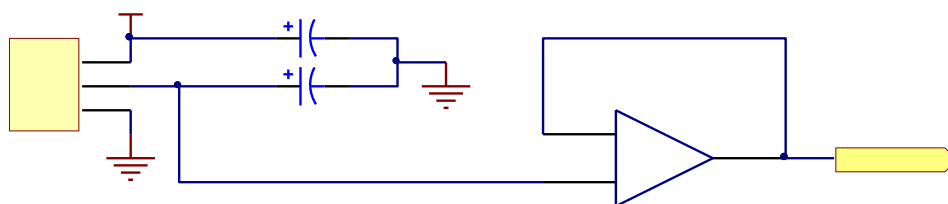


图 3-16 人体检测电路

3.3 通讯接口设计

常见的无线通信方式有无线局域网（WLAN）、蓝牙（Bluetooth）、红外（Infrared）和紫蜂（ZigBee）等^[36]，考虑到小车的测试环境，本设计中采用 ZigBee 无线通讯方式来完成上下位机的数据传输，实现小车的在线监测功能。

ZigBee 是一种短距离、低功耗、低速率、多节点的无线传输技术。本文选用了基于 nRF2401A 芯片的 2.4GHz 无线传输模块，型号为 S001 nRF2401A，模块如图 3-17 所示。



图 3-17 S001-nRF2401A 外形图

该模块采用 3.3V 供电，工作频率 2.4GHz~2.524GHz，数据传输速度 250kbps~1Mbps，最大发射功率 1mW，最大有效通讯距离可达 500m，与控制器通过 SPI 接口通讯，完成芯片的配置和数据的发送与接收，满足本设计需求。

nRF2401A 具有一个发送通道和两个接收通道，可以同时接收两个通道上的数据，在接收完成后通过 DR1 或 DR2 引脚电平变化，提示控制器将芯片收到的数据及时取走，该模式能有效提高“1 对 2”网络中的通讯效率。S001 nRF2401A 模块引脚说明见表 3-4。

表 3-4 S001 nRF2401A 模块引脚定义

引脚	名称	功能
1, 2	VCC	电源输入 (1.9~3.3V)
3, 7, 9, 13, 15	GND	电源地
4	PWR_UP	掉电模式，低电平有效
5	CE	工作模式选择
6	DR2	通道 2 接收完成，高电平有效
8	CLK2	通道 2 时钟
10	DOUT2	通道 2 数据
11	CS	芯片配置模式选择
12	DR1	通道 1 接收完成，高电平有效
14	CLK1	通道 1 时钟
16	DATA	通道 1 数据

由表 3-4，可以看出通道 1 可以工作在发送和接收两种模式，而通道 2 只能工作在接收模式，根据本文设计需求，上下位机之间采用无线通讯方式，为点对点通讯，所以在电路设计中只需连接通道 1，便能完成上下位机之间的数据传输，具体电路如图 3-18 所示。

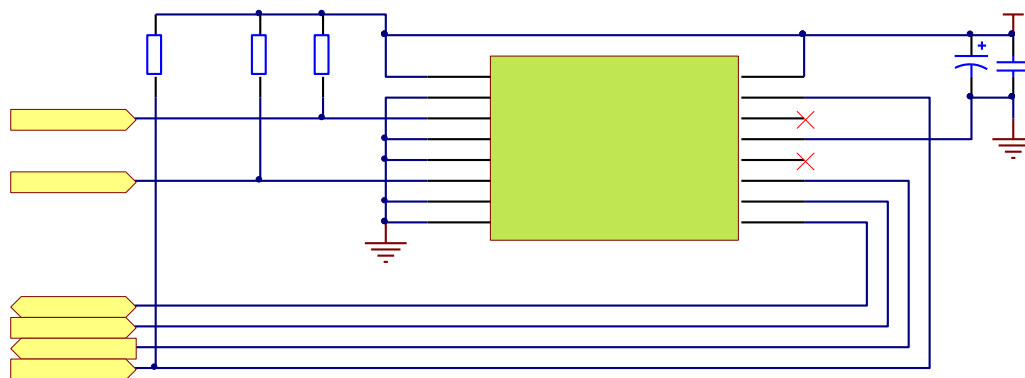


图 3-18 无线通讯接口电路

3.4 电源设计

电源是整个系统工作的基础，只有稳定的电源才能保证小车可靠地运行。根据控制系统中主要器件的工作电压和功耗，得到其对供电电压的需求，如表 3-5 所示。

表 3-5 系统供电需求表

元件名称	所属类型	电压
加速度计	传感器	5.0V
陀螺仪	传感器	5.0V
无线通讯模块	通讯接口	3.3V
协处理器	控制器	3.3V
主处理器核心板	控制器	5.0V
运放	传感器	$\pm 5.0V$

根据以上需求表，考虑到如下几点：

(1) 小车采用电池供电，需尽可能地提高电池的利用率，在电压等级的变换中应尽量选用开关电源，减少损耗；

(2) 电源输入端为 3 只铅酸电池串联组成的电池组，每只电池额定电压为 12V，总额定电压为 36V，但随着电池电量的变化，电池组的输出电压在 32V~42V 之间变化，所以电源正常工作时，输入电压范围必须包含此区间。

(3) 为了减少电机运行时对控制系统的冲击和干扰，应将控制板电源与电源隔离，通过光耦完成信号传输。

控制系统电源电路如图 3-19 所示。

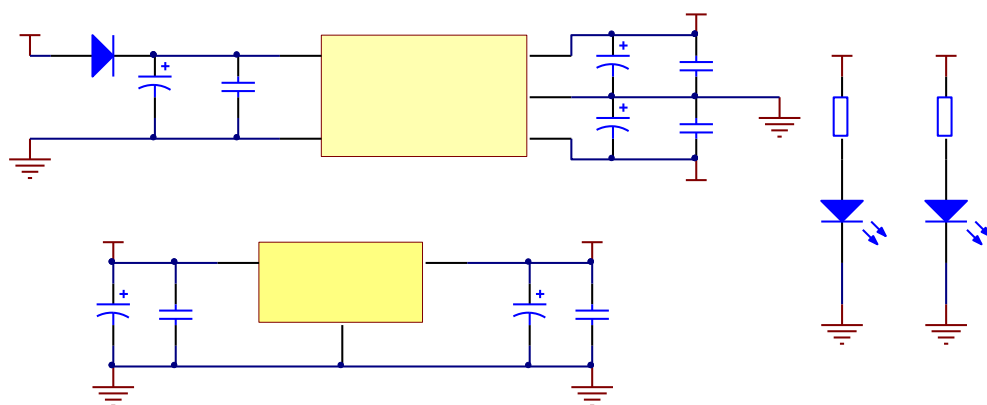


图 3-19 控制板电源电路

其中，图 3-19 中 U17 为隔离型 DC-DC 模块，型号为 HZD10C-12D05W，北京汇众电源设备厂生产的隔离型 DCDC 模块，输入电压 9V~18V，输出电压 $\pm 5V$ ，功率 5W，满足控制板所有器件的功率需求。U16 为线性稳压电源芯片 LM1117，实现 5V 到 3.3V 的电平转换，用于协处理器和无线通讯模块的供电。

为了减少数字电路对模拟信号的干扰，本文还设计了 $\pm 5.0V$ 电源的数模隔离电路，用于运放的供电。如图 3-20。

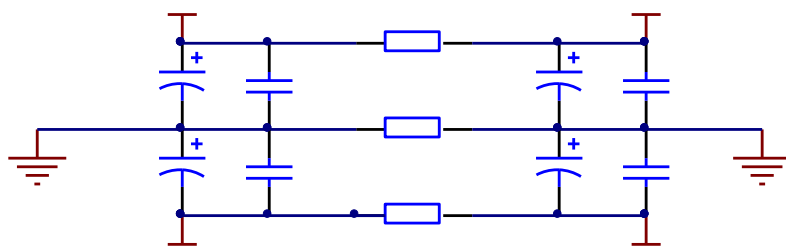


图 3-20 $\pm 5.0V$ 电源数模隔离电路

3.5 电机驱动设计

小车选用的电机为 36V、500W 的有刷直流电机，额定工作电流约为 14A（启动电流可达 40A），为了满足系统设计需求，实现电机的正反转控制，本设计采用 H 桥作为电机的基本驱动结构。

H 桥电机驱动主要由功率开关管及其驱动电路、逻辑电路、隔离电路和电源电路构成。

（1）功率开关管

对于电动车这类低电压、大电流的使用环境，通常采用大功率场效应管作为 H 桥电路的开关器件。本设计选用了 IR 公司的 IRFB3206PbF 型场效应管，其采用 TO220 封装，最大电流可达 210A（理论值），内阻最大为 $3.0m\Omega$ ，最高工作电压为 60V，满足电机运行需求。由 IRFB3206PbF 构成的 H 桥电路如图 3-21 所示。为了使功率开关管产生的热量及时散去，保证电机长时间运行的稳定，在实际安装时将功率管固定在铝制散热片上，大大提高了器件的散热能力。

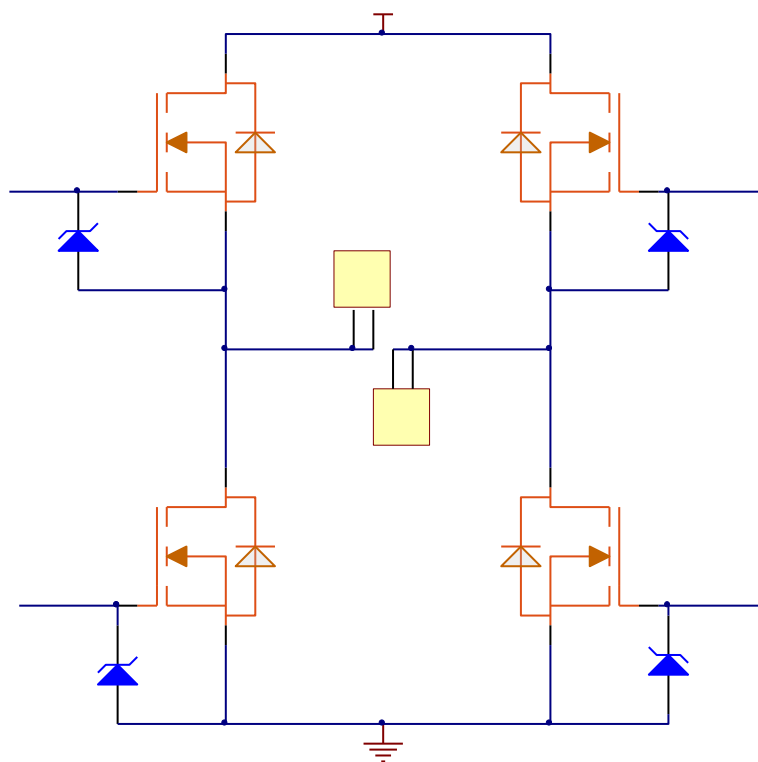


图 3-21 H 桥驱动电路

(2) 功率开关管驱动电路

功率开关管有脉冲变压器驱动和专用芯片驱动两种驱动方式，脉冲变压器能独立驱动每个开关管的，而且能实现驱动信号的电气隔离，但由于其电路复杂，体积大等缺点，在中小功率的电路中使用较少；专用驱动芯片以其体积小、外围电路简单，性能稳定等特点，广泛用于功率 MOS 管和 IGBT 的驱动电路^[12]。本设计采用两片半桥专用驱动芯片 IR2184S 来实现对整个 H 桥四个场效应管的驱动。IR2184S 门极驱动电压为 10V~20V，逻辑电压为 3.3V~5.0V，最大驱动电流可达 1.4A，满足 IRFB3206PbF 的驱动要求。驱动电路如图 3-22 所示。图 3-22 中仅描述了左半桥的驱动电路，右半桥的驱动电路与此相同。

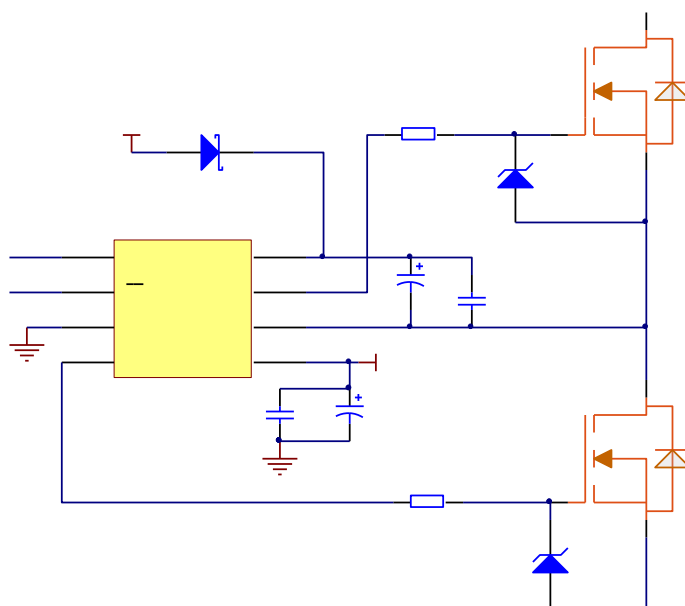


图 3-22 IR2184S 驱动电路

(3) 逻辑电路

根据 IR2184S 的数据手册，该芯片控制上、下桥臂的开通与关断的逻辑不同于正常的电机控制规律，其输入与输出的逻辑关系如图 3-23 所示。其中 IN 和 \overline{SD} 为逻辑输入信号， HO 、 LO 分别为上桥臂与下桥臂的门极驱动信号。

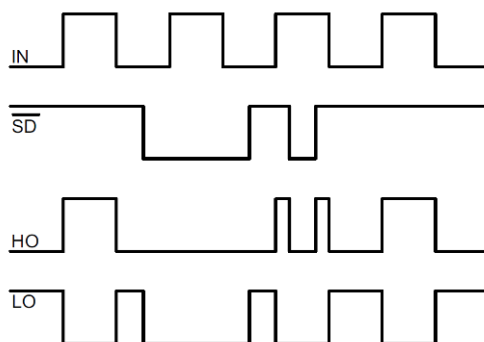


图 3-23 IR2184S 输入输出时序图

通过进一步阅读芯片数据手册，发现只有当 PWM 信号输入至 IN 时，芯片才具有死区控制效果，而 \overline{SD} 信号可用于 H 桥的紧急关闭，所以并不能简单的通过逻辑转换来实现开关管的正常工作。为了实现左右两侧的 PWM 控制信号相互匹配和提高信号的驱动能力，本文采用 COMS 系列数字电路芯片 CD4001 用于逻辑信号的转换，如图 3-24 所示。

通过逻辑转换后电路后，电机控制规律如表 3-6 所示（表中仅为左电机的控制规律，右电机相同）。

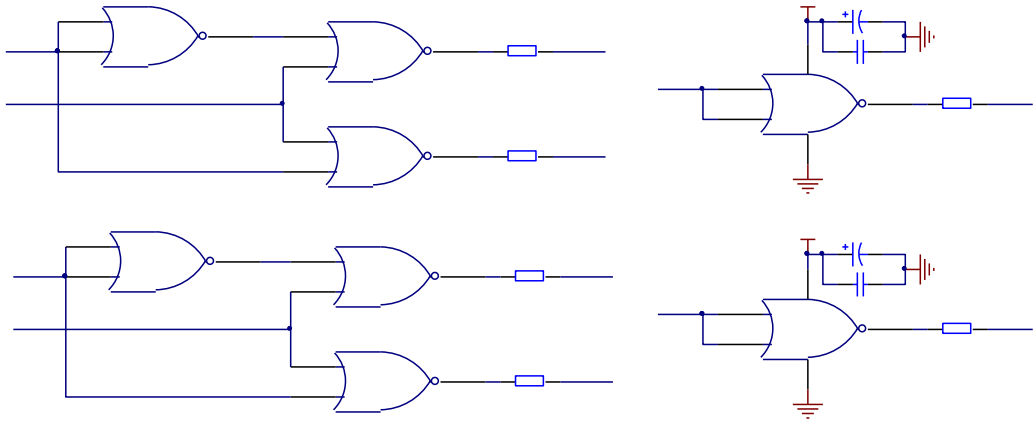


图 3-24 逻辑变换电路

表 3-6 电机控制信号规律

控制信号 LD1	控制信号 LD0	PWM 信号	电机运行状态
0	1	转速调节	正转
0	0	转速调节	反转
1	X	无效	制动

（4）隔离电路

为了减少电机对控制系统的影响，本文通过光耦将 DSP 发出的电机控制信号与电机驱动单元中的逻辑变换电路相隔离。普通型光耦器件的工作频率约为几千赫兹，为了完成高频 PWM 信号的有效传输，电路采用 HCLP2630 型高速光耦，最高频率可达 10MHz，完全满足系统设计需求，而控制信号采用 TLP521 型普通型光耦进行隔离^[41]。为了保护 COMS 电路，在信号输入通道中串入限流电阻，避免电流过大，损坏 COMS 电路。隔离电路如图 3-25 所示。

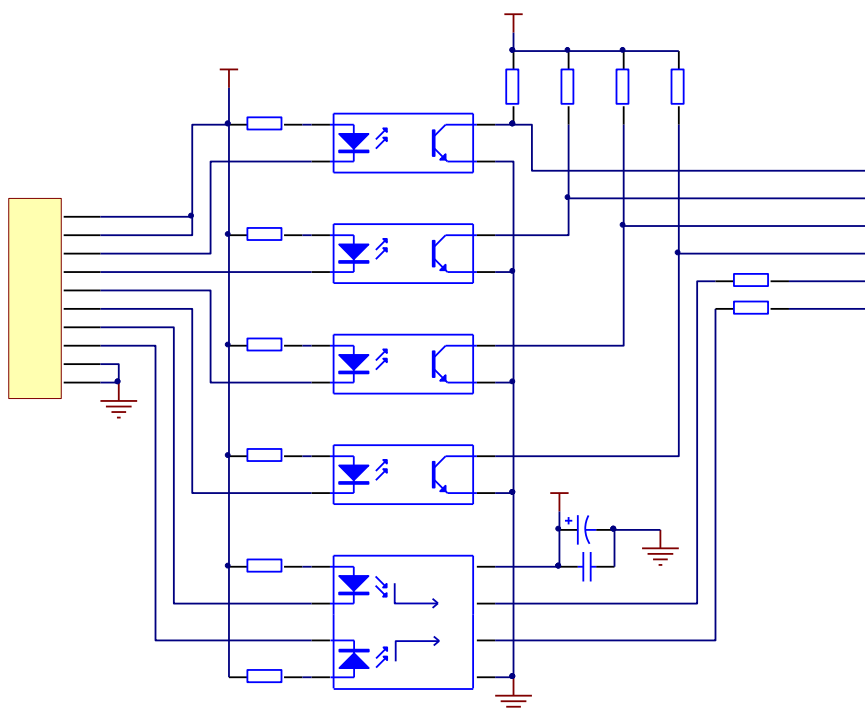


图 3-25 光电隔离电路

(4) 电源电路

电源是电机驱动模块正常工作的保障，半桥驱动芯片需要供给的 12V 电源通过 LM2596HVS-ADJ 开关电源模块来实现，该模块输入电压范围 4.5V~60V，（测试前已调整到 14V），电流可达 3A，满足半桥驱动芯片 IR2148S 的工作电压与电流要求。逻辑电路需要供给的 5V 电源在 12V 电源的基础上采用 LM7805 型线性稳压芯片变换得出。如图 3-26 所示。

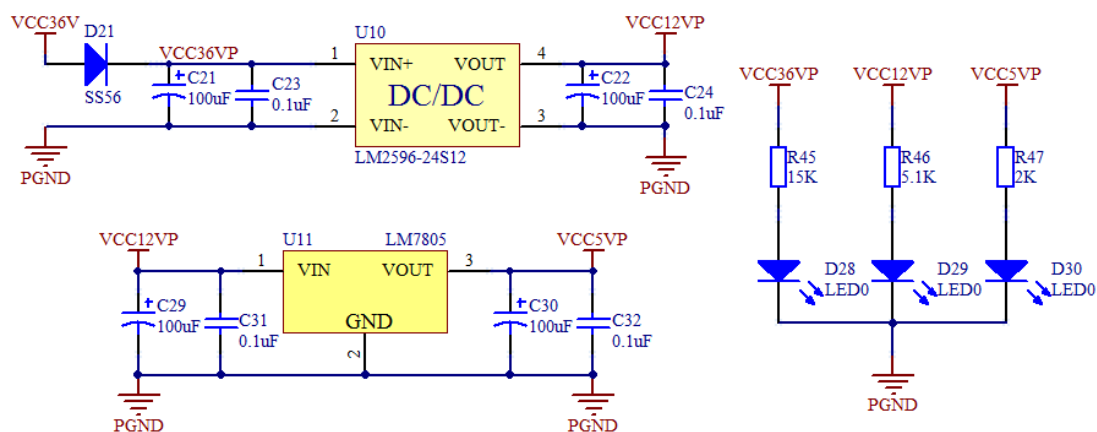


图 3-26 电机驱动模块电源电路

3.6 控制系统硬件实现

综合以上各功能模块，完成控制系统的整体电路设计和 PCB 制作，电机驱动板如图 3-22 所示。从图 3-27 中可以看出，用于控制左右两个电机的 H 桥（8 个功率 MOS 管）均固定在同一散热器上，之间通过导热硅胶绝缘片完成电气隔离。在驱动板的电源输入端并联了两个 1000uf 的电容，用于滤波。



图 3-27 电机驱动板实物图

系统控制板分为上下两层，上层为 DSP 核心板，下层为底板，包含了电源、STM32F103VET6、加速度计、陀螺仪、无线通讯模块和其他输入输出电路，核心板供电通过两根电源线与底板相连，其余信号线均通过核心板两侧的引脚与底板连接。如图 3-28 所示。

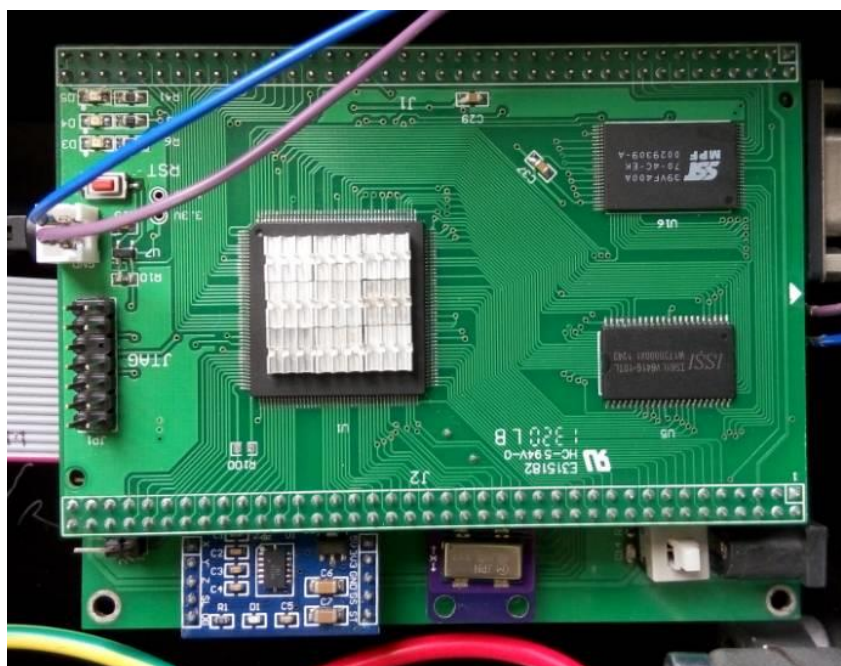


图 3-28 系统控制板实物图

最后将电机、电池组、电源控制板（成品）、电机驱动板与主控板安装于小车车体内，如图 3-29 所示。

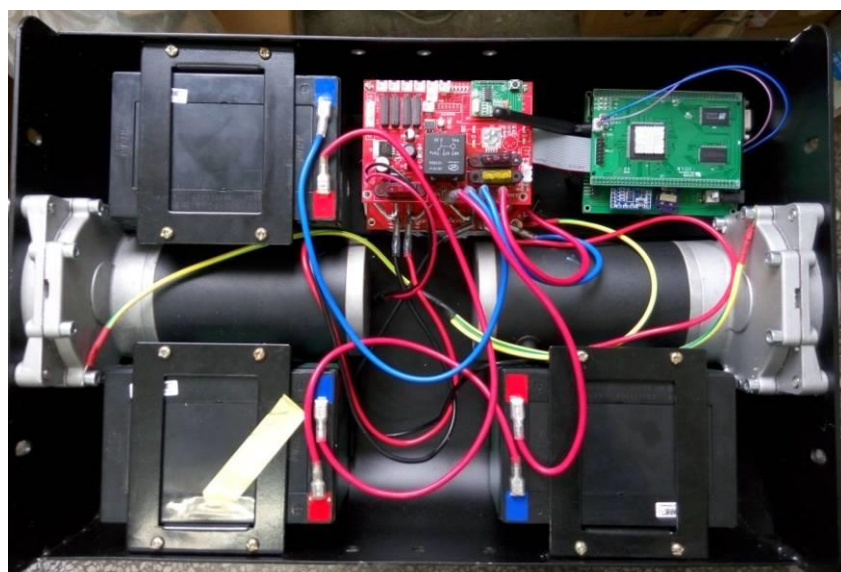


图 3-29 车体内部图

3.7 本章小结

本章从小车控制系统出发，完成了控制器、电机驱动、姿态传感器、通讯接口的设计，并在此基础上完成了系统电源的设计。

在数字电路的设计上，根据设计需求，考虑到各功能模块的接口需求，完成了控制器的资源分配，并且在电机驱动的设计中通过基本数字逻辑电路完成了控制逻辑的转换，一方面起到了隔离作用，另一方面也便于控制程序的编写。

在模拟电路的设计上，充分电压跟随器的特点，完成了传感器与 AD 转换器之间的连接，既提高了信号的驱动能力，减少 AD 转换器对传感器输出信号的干扰，也是二者之间一层缓冲，保护核心器件。

对于发热较大的器件，如 DSP、稳压芯片和功率开关管，采取了增大散热面积的措施来提高散热能力，确保系统长期运行时的稳定与可靠。

第4章 系统软件设计

软件运行于硬件平台之上，是整个控制系统的核心，对于系统的运行有着至关重要的作用。

软件设计需要在系统控制需求与系统硬件平台之间的取得平衡，当系统需求确定后，软件设计时应该尽可能的提高软件运行效率，降低对硬件平台的需求，用于开发成本的降低；而当硬件平台确定后，软件设计应该充分利用已有的条件，发挥硬件的优势，扩充软件功能，提高运行的稳定性和可靠性。

本章主要介绍了电机驱动、传感器数据融合、运动控制和数据传输五个方面的软件设计，再结合以上功能模块，完成两轮自平衡小车的整体软件设计，并且与硬件控制系统相结合，实现了小车的载人测试。

4.1 电机驱动

本设计选用的有刷直流电机作为控制对象，并选用 H 桥作为电机驱动电路，所以在对电机的转速和方向的控制上相对简单，控制 H 桥的导通方向便能实现电机输入电压的方向，从而控制电机转速的方向；通过改变 H 桥的导通时间，便能改变电机输入电压的幅值，从而调节电机转速大小^[12]。

值得注意的是，由于 H 桥的输入端与电池组直接相连，中间没有稳压电路，所以电池输出电压会随着容量的变化而变化，且实际测试过程中，电压波动可达 10V，对于电机的转速影响非常大。

例如：

当 $U_b = 42V$ ， $PWM = 70\%$ 时，电机的输入电压为 $U_1 = 42 \times 70\% = 29.8V$ ；

当 $U_b = 32V$ ， $PWM = 70\%$ 时，电机的输入电压为 $U_2 = 32 \times 70\% = 22.4V$

此时 PWM 信号相同，但由于电池电压的不同，最终使电机得到的电压相差了 7.4V，能明显地影响电机运行转速。

为了解决这一问题，本设计对电机驱动部分加入了电源电压补偿功能。具体实现如下：

(1) 由于电机额定输入电压为 36V，为了保证电机运行的安全，所以 H 桥的输出电压必须控制在 36V 以下，当 $U = 36V$ 时，电机全速运行，即电机转速为允许设定转速 n_s 的 100%；

(2) 电机运行转速区间为 0% ~ 100%，对应输入电压为 0V ~ 36V。当设定输出转速 n 时，输出 PWM 占空比 D_{PWM} 的计算如公式 (4-1) 所示；

$$D_{PWM} = \frac{n}{n_s} \times \frac{36}{U_b} \quad (4-1)$$

(3) 由于电机本身的非线性，运行时可能存在电压死区，需加入死区电压补偿，确保输入电压较低时，电机能正常运行；

(4) 考虑到 H 桥驱动芯片采用自举升压方式，最大工作占空比为 97%，所以 D_{PWM} 的实际输出需做限幅处理，确保驱动电路的正常运行；

(5) 当通过以上电源电压补偿之后仍然无法到达设定转速时，需将此状况及时发送至人机交互模块，但不影响小车运行。

通过在程序中对电机驱动采取电源电压补偿措施后，可以使大部分情况下电机转速与设定相匹配。但当电池电压偏低，而所需设定转速较高时，只能以当前电压下的最高转速运行。

电机驱动程序流程图如图 4-1 所示。

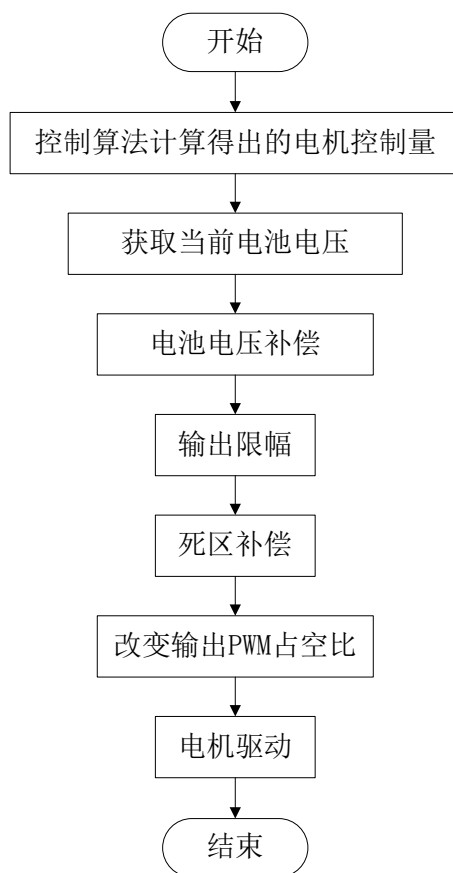


图 4-1 电机驱动程序流程图

4.2 传感器数据处理

本文选用加速度计和陀螺仪来测量小车的倾角，并将倾角值发送至主控制器，改变电机控制信号，完成小车的直立控制。但单一的加速度计或者陀螺仪都不能提供真实和可靠的信息，准确地反映车体的实时姿态。

加速度计是用于测量加速度的传感器，但其对机械震动非常敏感，小车行驶在路面时会大量噪声，而且噪声频谱范围广，单纯的数字滤波并不能将这些噪声有效滤除，对车体倾角的计算产生严重影响。陀螺仪是用于测量角速度的传感器，众所周知，角速度对时间积分，可以得到这段时间内的角度变化值，但由于本文选用的陀螺仪采用微型机电系统（MEMS），本身对于温度、湿度等工作环境非常敏感，具有一定的漂移误差，所以其输出经过积分运算后会产生更大的累积误差，不便于长时间工作。

综合加速度计与陀螺仪的特点，本文首先两种传感器者所采集的数据进行中均值滤波，去除高频噪声，然后进行卡尔曼滤波，有效解决了陀螺仪的累积误差和加速度计的动态误差，得到一个更为准确的倾角值。

（1）中均值滤波

中均值滤波是指在去除一组数据的最大值与最小值之后，再进行均值滤波的行为，是中值滤波与均值滤波的结合，中值滤波能有效滤除脉冲噪声，而均值滤波可以滤除加性噪声，可以有效消除来自 AD 转换器自身的干扰。

本文中，协处理器负责完成中均值滤波。首先 AD 转换器连续对传感器输出信号进行转换，得到 5 组数据，再通过去除数据最大值与最小值，实现中值滤波，最后对剩余的 3 组数据进行均值滤波，得到初步数据。

（2）卡尔曼滤波

卡尔曼滤波以最小均方误差作为预测的最佳准则，其基本思想是：建立信号与噪声的状态空间模型，利用 $t(n-1)$ 时刻的估计值和 $t(n)$ 时刻的测量值来更新估计状态变量的值，从而求出 $t(n)$ 时刻的估计值。由于卡尔曼滤波所需要的参数主要是由系统的结构确定，而且是需要多次测试才能选择符合系统的一组参数，而在计算中需要改变的量仅与 $t(n-1)$ 时刻的估计值和 $t(n)$ 时刻的测量值有关，无需进行大量数据的存储，计算速度快，迭代周期短，具有非常高的实时性，便于通过软件编程来实现。卡尔曼滤波的本质是一种回归算法，通过“预测—实测—修正”三个阶段的不断循环，实现对信号的准确估计，在控制领域具有非常高的实用价值^[45]。

本文中，主处理器负责完成卡尔曼滤波，其流程如图 4-2 所示。

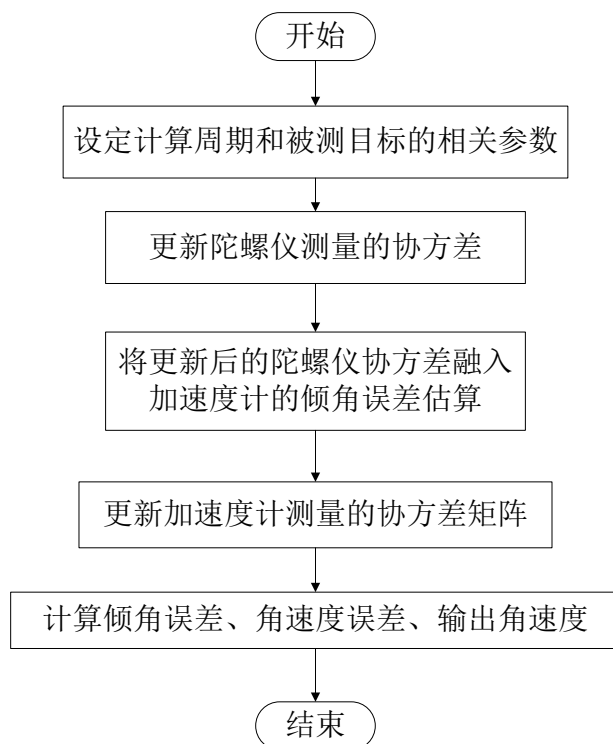


图 4-2 卡尔曼滤波流程

通过调整滤波器的参数，获得了较好的效果。通过将测试数据导入 MATLAB，使用绘图命令，得到加速度、角速度和角度的曲线，分别如图 4-3、图 4-4、图 4-5 所示。

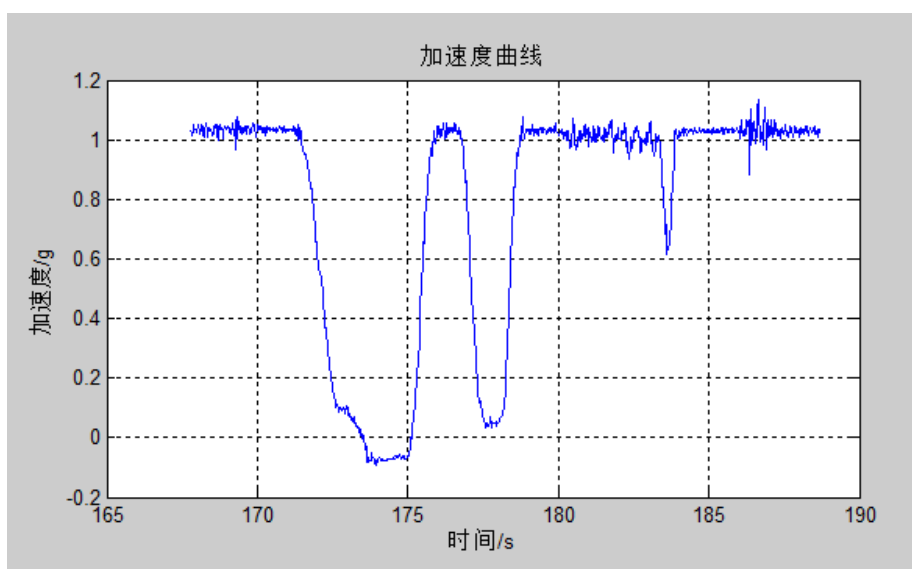


图 4-3 加速度曲线

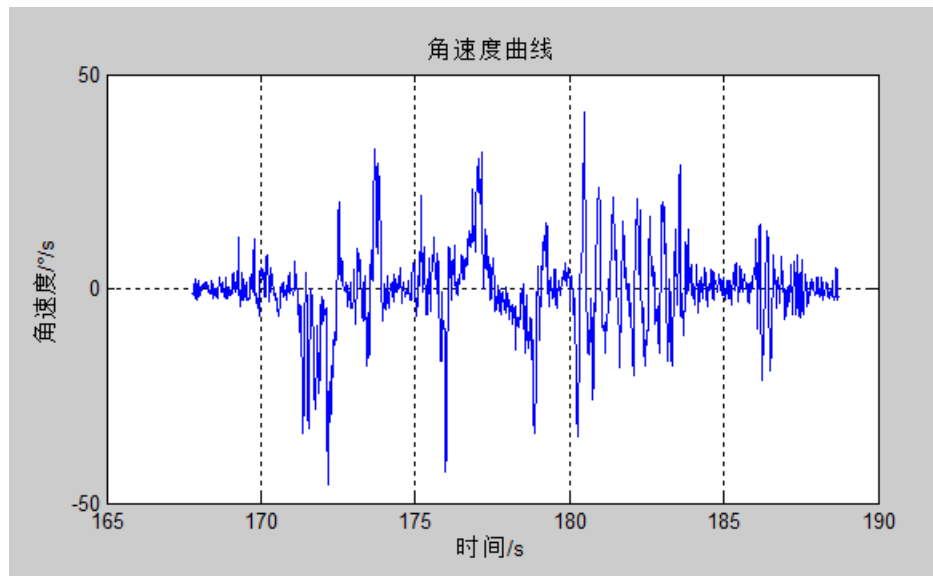


图 4-4 角速度曲线

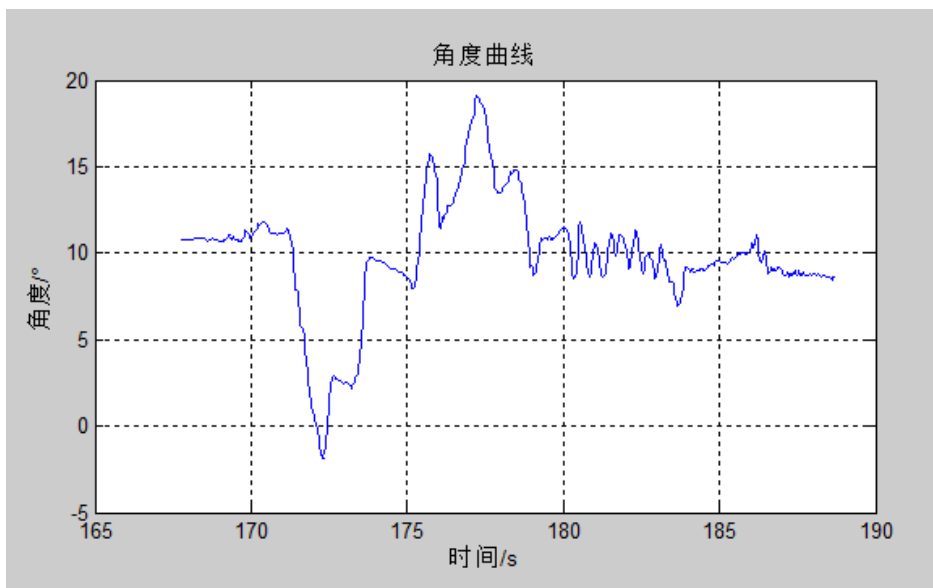


图 4-5 角度曲线

从以上图可以看出，加速度与加速度曲线的毛刺较多，说明实际中有大量的干扰存在，而通过中均值滤波和卡尔曼滤波之后，得到的倾角值变化平缓，符合实际情况。

4.3 运动控制

小车的运动主要为直立运动、直线运动和转向运动的叠加，在叠加的过程中，直线运动和转向运动应该尽可能少地影响直立运动，否则会导致小车失去平衡，无法完成指定动作。

其中，小车的直立运动采用 PID 控制算法，程序如下所示：

```
float PID(float ang_err,float kp,float ki,float kd)
{
    static float e_s=0,sum=0;
    //e_s 用于保存上一次的误差值，用于计算微分项。sum 用于计算累加和，
    计算积分项。
    float r;
    sum+=ang_err;
    //计算积分累加和
    r=kp*ang_err+ki*sum+kd*(ang_err-e_s);
    //从左至右分别是比例项、积分项、微分项
    e_s=ang_err;
    //保存这一次的误差值用于下一次微分计算
    return r;
}
```

程序中 k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 PID 的三个控制系数，通过调试选取最佳值，达到较好的控制效果； ang_err 为倾角偏差值，由传感器数据经数据融合后得到。程序的输出为电机初步的控制量，将此控制量送入电机驱动处理程序，最终得到 PWM 占空比和电机方向，输出至电机驱动模块，完成对电机的控制。

为了保证驾驶人员的安全，小车运行时应避免出现超速，由于本系统中没有速度反馈，无法直接测量小车的车速。本设计为了解决此问题，通过统计电机输入电压达到额定值的时间，当输入电压维持额定电压不变的时间超过设定的阈值时，便改变小车倾斜角度，使车体往后倾斜，实现小车的自动减速，同时并发出报警信号，提醒驾驶人员注意安全^[43]。

小车运动控制流程图如图 4-6 所示。

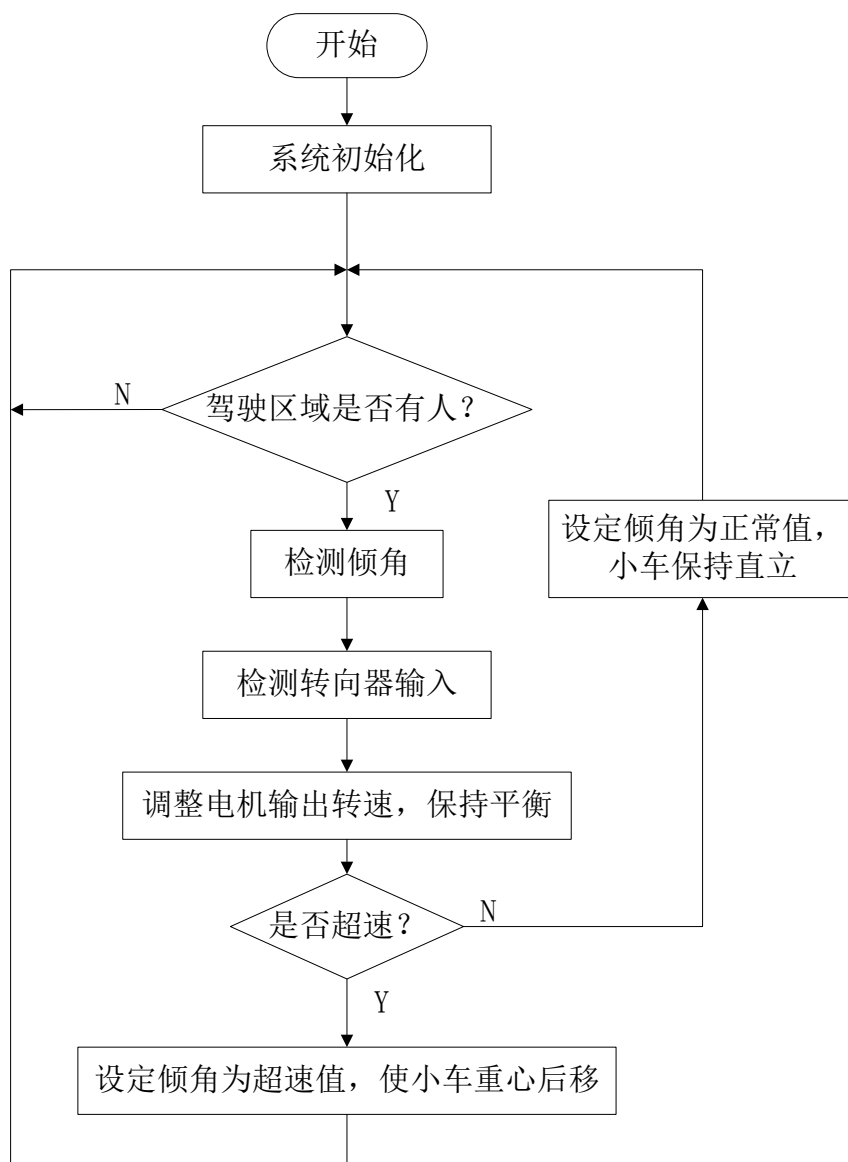


图 4-6 小车控制流程

4.4 上位机通讯

为便于对小车运行的状态进行实时监测和远程控制，本文为小车设计了无线通讯接口，并编写了上位机监控软件。

上位机可运行于普通计算机，使用时，计算机需要接入 T013 无线数传模块评估测试板，并将 S001 nRF2401 无线数据模块安装在测试板上的指定接口，最后插入电脑的 USB 接口，如图 4-7 所示。



图 4-7 无线通讯转接模块

当无线转接模块接入计算机后，系统会将此模块识别为一个串口设备（需要安装驱动程序），可作为普通串口设备来访问。当系统成功识别之后，运行上位机软件，软件运行界面如图 4-8 所示。



图 4-8 上位机监控软件界面

在软件界面中选择设备串口号，并设置波特率等参数，点击“连接”，当连接成功后，连接成功的指示灯会变成绿色，此时已经完成了上位机与下位机的

连接，软件向小车发送读取系统状态命令，小车收到命令后将所有监控数据发送至上位机，并实时显示。

当数据异常时，软件会及时给出报警信号，并可以通过点击软件中的“紧急停止”按钮，如果此时小车检测到驾驶人员正在驾驶区域，小车会自动减速，直至停车；如果小车没有检测到驾驶人员，则会立即停止电机运行，保护驾驶人员和设备。

4.5 综合调试

在实际调试过程中，首先对传感器功能模块进行单独调试。利用示波器同时测量加速度计与陀螺仪的输出曲线，如图 4-9 所示。

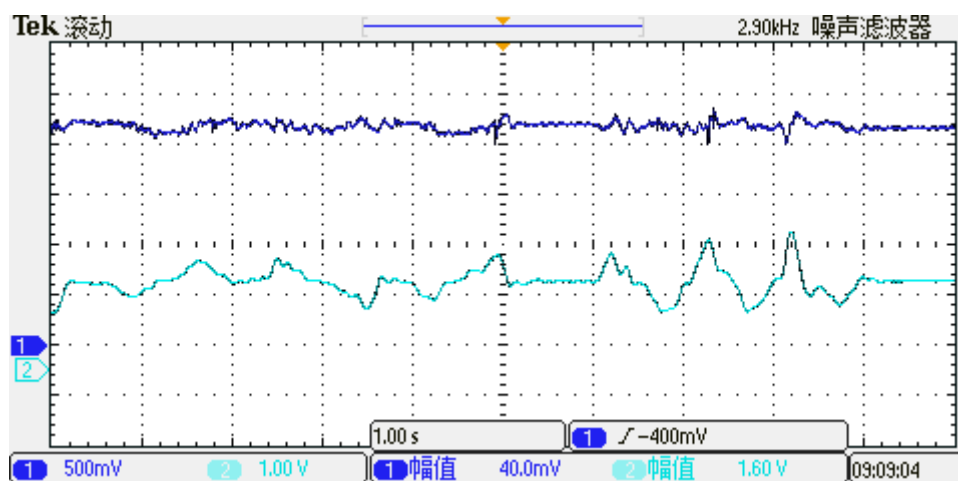


图 4-9 加速度计与陀螺仪输出曲线

图 4-9 中通道一为加速度计的输出曲线，通道二为陀螺仪的输出曲线。在调试过程中，通过改变控制板的姿态，模拟小车实际运行，从图中曲线变化趋势，可以发现加速度计本身扰动较大（在小车运行时，由于地面不平，车体的机械振动，加速度计的扰动会更加剧烈），而陀螺仪对于高频扰动具有较好的抑制效果，同时具有良好的动态性能。

加速度计与陀螺仪的输出信号通过协处理器内嵌的 ADC 完成模数转换，为了提高转换的效率，在采集中使用了 DMA 功能，ADC 以设定的采样频率对两路模拟量循环采集，并将结果直接存放于指定的内存区域，程序通过读取内存得到相应的数据，一定程度上降低了处理器的负荷。

在协处理器完成对加速度计与陀螺仪的数据读取操作后，通过 SPI 总线发送至主控制器，主控制器根据姿态数据，改变输出 PWM 的占空比，从而实现对电

机转速的控制。调试时，使用示波器观测左电机驱动信号，波形如图 4-10、图 4-11 所示。

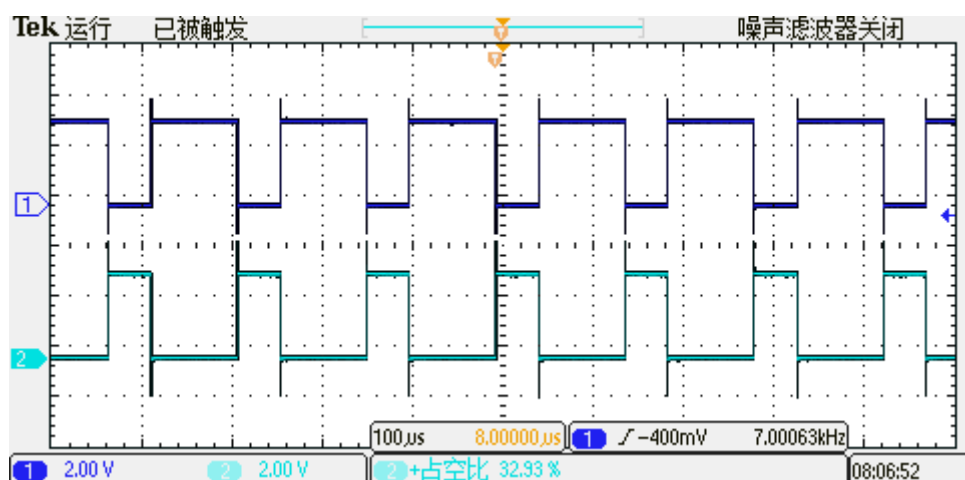


图 4-10 左电机驱动波形（占空比 33%）

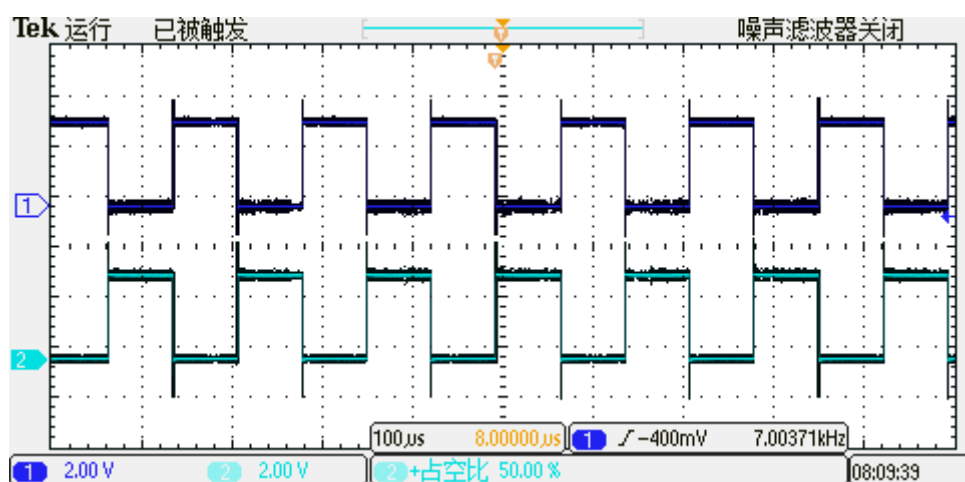


图 4-11 左电机驱动波形（占空比 50%）

图 4-10 与图 4-11 显示波形为左电机驱动电路中 H 桥左右两侧的驱动信号，两侧的驱动信号通过逻辑转换电路完成反相变换，通过波形可见逻辑转换电路工作正常。

将示波器探头分别连接左右电机的转速输入端 PWMR 和 PWML，改变转向电位器的输出，同时观测左右电机的驱动信号变化情况。当无转向信号时，左右电机驱动信号相同，即电机同时向前或向后运行，如图 4-12 所示。当转向信号有效时，左右电机驱动信号随着转向信号而改变 PWM 的占空比，如图 4-13 所示。

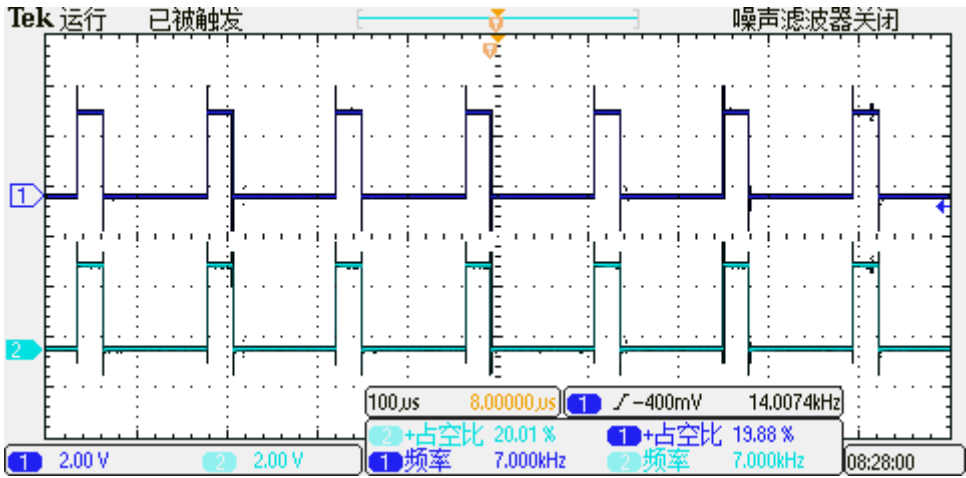


图 4-12 左右电机驱动信号波形（无转向信号）

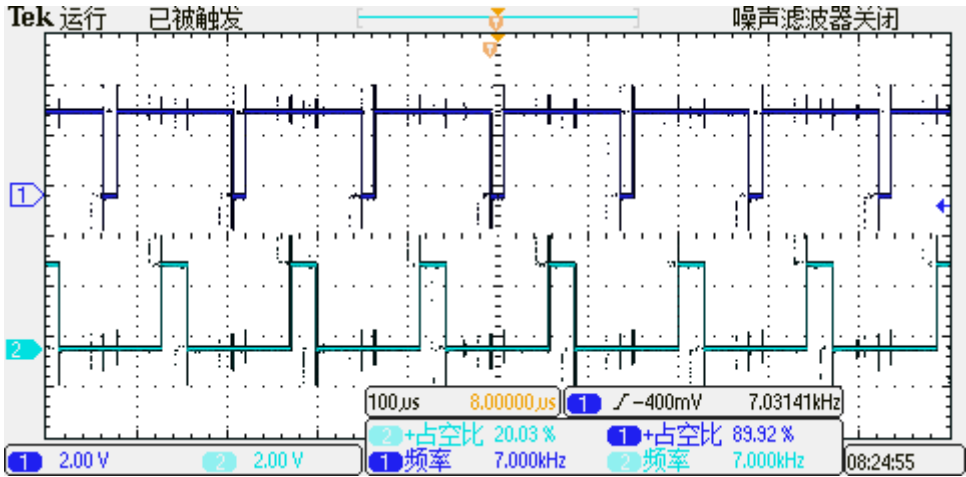


图 4-13 左右电机驱动信号波形（右转向信号）

通过各部分功能模块的软件编写，将程序代码下载至硬件控制平台中，实际调试，调整系统的相关参数，直至获得较好的控制效果。小车最终实现了载人直立运动，直线运动和转向运动，如图 4-14 所示。



图 4-14 小车载人测试

4.6 本章小结

本章从系统运行的各个环节出发，完成了电机驱动、传感器数据处理、小车运动控制和上位机通讯的软件设计，并且编写了上位机界面，便于系统的在线监控和调试工作的开展。

在电机驱动程序的设计时，充分考虑到影响电机运行的各种因素，并提出了解决方案，使电机控制更加精确。

在传感器的数据处理中运用了多重滤波，并发挥硬件平台的优势，合理分配计算任务，使数据更快更准地被控制算法所获取，及时调整，提高系统的响应能力。

在运动控制的程序设计中，通过反复测试，获取最佳的控制算法参数，以达到较好的控制效果^[42]。

上位机软件能实现系统状态数据的实时显示，并能对异常数据做出报警，在紧急情况下能实现小车的远程停车，保护驾驶人员与设备的安全。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文从课题背景和项目意义出发，对两轮自平衡小车的研究现状进行了深入调查，并且着重分析了国内外的几个案例，对电机、电机驱动、电池组、控制器、控制算法和机械结构等各方面进行了详细描述，并列出了部分器件的参数，提出设计需求，对本设计的方案选取提供了重要的参考价值。

为了选择一个合理的方案，本文先通过合理地简化，为两轮自平衡小车选取了合适本课题的控制模型，详细分析了小车的受力情况。再从系统控制器的选型出发，通过多方面对比，结合实际情况与设计需求，完成了电机、电源和姿态传感器的型号选择，最后考虑到本专业的特点，简单描述了小车主要的机械结构，完成了小车硬件从内到外的整体设计。结合系统硬件和小车模型，本文还提出了小车的几种基本运动，并初步给出了控制策略。

在提出了系统总体方案之后，本文从硬件设计和软件设计两个方面出发，完成了小车控制板和电机驱动板的设计与制作，控制程序编写和上位机监控软件的编写，具体如下：

在硬件设计中，充分考虑所选用器件的特点和设计需求，合理分配控制器资源，并留出了一定的裕量，完成了双处理器控制系统的设计；充分利用基本数字电路，完成了电机驱动信号的逻辑转换，更适用于控制程序的编写；在传感器信号输入通道中加入电压跟随器，提高信号驱动能力，实现了模数转换器与传感器之间的隔离，提高系统抗冲击能力。

在软件设计中，考虑到小车实际运行中可能处于的状态，灵活解决了硬件不易解决的问题，如在电机驱动控制程序中，对电池电压进行补偿处理、电机输入电压限幅处理等。在传感器数据处理中，采用了双重数字滤波，合理分配硬件资源，提高了姿态数据的准确性和系统对其变化的响应速度。在对控制算法参数的选取上采用多次测试取最优值的方案，达到较好的控制效果。

最后，通过编写上位机程序，并运行在计算机上，使小车的系统状态能实时显示在屏幕上，方便调试工作。

5.2 展望

本文实现了两轮自平衡小车的实际制作，并且完成了载人测试，上位机实时监测等功能，初步完成了设计目标，但仍然有不足和需要改进的地方：

（1）由于小车所选用的电机没有配备速度检测，也不便于自行安装，所以小车无法完成转速闭环控制，控制精度较差；

（2）小车的电机驱动模块无法实现制动时电量回收，所以续航能力较差；

（3）小车运动速度较快时，转向不太稳定，后期可以通过增加水平方向上的角速度检测，来保持车身稳定；

（4）小车车体自重较大，可考虑更换密度较低的材料，如铝合金；

（5）上位机软件目前只支持连接一台小车，后期可以充分利用 ZigBee 的多节点优势，实现多辆小车的同时监控。

致 谢

转眼间，三年的研究生生涯即将结束，在这充实而又短暂的时间里，首先，我要向我的授业恩师李志俊教授表示深深的谢意和崇高的敬意。是您真诚友善的建议，肯定了我重返学校的决心；是您无微不至的关怀，温暖了整个实验室的氛围；是您勤勉严谨的为人，树立了我人生成长中的榜样。学习中，李老师以扎实的学术功底和丰富的项目经验为我答疑解惑；生活中，李老师通过细小的事情教会我们做人的道理。在论文的撰写和课题的实现中，李老师提供了全面的指导和耐心的帮助，增强了我完成课题的信心。还要感谢李老师对我家庭的关心，我倍感温暖。

感谢沈克宇老师在我考研期间提供的帮助和在校期间专业学习上的指导，在此表示深深的谢意。感谢我的好友兼师兄周智锋在我返校学习道路上提供的各种帮助；感谢已毕业的师兄杨剑、曾光、王功庆、李广威、金先涛、李旺鹏、李振、李欣等，是你们的帮助使我在研究生期间快速成长；感谢一起走进实验室的贺义方、刘雪薇、沈明锋、黄诚、黎德刚和王龙龙，一起陪伴我走过美好的研究生生涯；感谢师弟师妹们对我的支持和祝福；感谢室友，是你们的支持与陪伴，让我的研究生生活丰富多彩。

感谢我的家人，是你们的支持，给了我这充实的时光，是你们的体谅、包容和关爱，让我拥有这美好的回忆。

最后再次感谢所有认识我和我所认识的老师、同学、朋友，是你们的帮助与支持，让我的研究生生涯一路走来，美好而充实。

凡胡荣

于武汉理工大学东院

参考文献

- [1] 王光林. 两轮电动车自平衡控制算法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [2] 俞晓峰. 基于 DSP 的两轮自平衡小车的设计与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [3] 张万英. 两轮自平衡机器人模糊 PD 控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [4] 袁帅. 两轮自平衡机器人系统的设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [5] 王晓宇. 两轮自平衡机器人的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [6] 王振宇. 两轮移动机器人平衡控制系统的研发 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [7] Nobuhiro Ushimi, Yuuki Aoba. Development of a Two - Wheels Caster Type of Odometer with a Dual Shaft for Omnidirectional Mobile Robots [J]. Procedia Engineering, 2012, 2(41): 163-169.
- [8] 钱华明, 夏全喜, 阙兴涛等. 基于 kalman 滤波的 MEMS 陀螺仪滤波算法[J]. 哈尔滨工程大学学报.2010,31(9):1217-1222.
- [9] 郜园园, 阮晓钢, 宋洪军等. 两轮自平衡机器人惯性传感器滤波问题的研究[J]. 传感技术学报.2010.23(5):697-700.
- [10] 孔祥宣. 自主式双轮动态平衡移动机器人的控制系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] 缪寿洪, 曹其新, 孔祥宣. 自行直立双轮移动机器人设计与实现[J]. 上海交通大学学报,2006,11(11): 1832-1835.
- [12] 刘雪薇, 李志俊, 凡胡荣等. 基于 FPGA 的直流电机转速控制系统设计[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2013,35(5):650-653.
- [13] H.K.Lam, T.H.Lee, F.H.F.Leung, P.K.S.Tam. Fuzzy Model Reference Control of Wheeled Mobile Robots[C]. The 27th Annual Conference IEEE Industrial Electronics Society. 2001,11(11-12): 570-573.
- [14] 吴广鑫. 坐式两轮自平衡车的系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [15] 曹志杰. 一种自平衡双轮移动机器人控制系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [16] 林文建, 钟航, 黎福海等.两轮自平衡机器人控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报.2013.27(8):750-759
- [17] CHIU C, CHANG C. Design and development of mamdani-like fuzzy control algorithm for a wheeled human conveyance vehicle control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics.2012,12:4774-4783.

- [18] 段其昌, 翁珏, 李丰兵. 一种新的两轮自平衡电动车控制方法[J]. 计算机应用研究, 2013, 12(12): 3678-3681.
- [19] 杨兴明, 余忠宇. 两轮移动倒立摆的开关切换模糊极点配置控制器设计[J]. 电路与系统学报.2012,17(4):58-62.
- [20] 阮晓钢, 赵建伟. 基于 PWM 伺服控制及 LQR 的两轮自平衡移动机器人[J]. 控制工程.2009,16(3):363-367.
- [21] 王泽荣, 龚海霞, 贾存良, 刘志鑫. 基于 MCF52255 的两轮自平衡巡线机器人设计[J]. 计算机技术与应用, 2013,3(3):127-129.
- [22] 梁丽娟. 基于机器人及军用导航系统的 MEMS 陀螺仪性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [23] 吉训生, 干寿荣. MEMS 陀螺仪随机漂移误差研究[J]. 宇航学报. 2006,7(4):640-642.
- [24] Lajevardizadeh Sh, Mohammad-ejad M, Pourmahyabadi. Performance Modeling of Ring Laser Gyro in Inertial Navigation System[J]. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering.2006,2(3):82-90.
- [25] Thomas Braunl, Jie Pan. Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot. The University of Western Australia School of Mechanical Engineering Final Year Thesis 2003. 1-10, 23-43.
- [26] 刘斌. 两轮自平衡小车软硬件研发与基于模糊线性化模型的变结构控制研究[D]. 西安电子科技大学, 2009.
- [27] 叶聪红. 本质不稳定两轮车辅助平衡装置的智能控制[D]. 西安电子科技大学, 2006.
- [28] 刘斌. 两轮自平衡小车软硬件研发与基于模糊线性化模型的变结构控制研究[D]. 西安电子科技大学, 2009.
- [29] Yeonhoon Kim, Soo Hyun Kim, Yoon Keun Kwak. Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 44(9): 25-46.
- [30] S.W. Nawawi, M.N. Ahmad, J.H.S. Osman. Development of a Two-wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot[C]. In proceeding of: Research and Development, 2007. SCORED 2007. 5th Student Conference.
- [31] 秦勇, 闫继宏, 王晓宇等.两轮自平衡机器人运动控制研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,40(5):721-726.
- [32] 张金学, 掌明. 两轮自平衡机器人的 LQR 实时平衡控制[J].自动化与仪表, 2013,5(5):5-9.
- [33] 赵鹏, 荆红莉. 基于 DSP 开发系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2012,6(4):147-149.
- [34] 高振, 罗秋凤. SPI 接口 CRC 算法在 DSP 数据通信中的应用[J]. 电子产品世界, 2011,1(2):46-48.

- [35] 向国菲, 佃松宜, 文雪峰. 基于 F28335 的小型化无刷直流电机伺服控制器的开发[J]. 自动化与仪器仪表, 2012,5(5):138-141.
- [36] JONG-HANN JEAN, CHIH-KAI WANG. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BALANCING CONTROLLER FOR TWO-WHEELED VEHICLES USING A COST-EFFECTIVE MCU[C]. Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Baoding, 12-15 July 2009:3329-3334.
- [37] Wen-June Wang, Cheng-Hao Huang. Model-Based Fuzzy Control Application to a Self-Balancing Two-Wheeled Inverted Pendulum[C]. 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009:1158-1163.
- [38] 段旭东, 魏衡华, 陈星. 基于 DSP 的二轮小车-倒立摆系统[J]. 控制工程. 2004,6(6): 521-524.
- [39] Plamen Petrov, Michel Parent. Dynamic Modeling and Adaptive Motion Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle for Personal Transport[C]. 2010 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems Madeira Island, Portugal, September 19-22, 2010:1013-1018.
- [40] 韩彬. 基于 DSP F2812 的无刷直流电机模糊控制系统的设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [41] 李发海, 王岩. 电机与拖动基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [42] Junfeng Wu, Yuxin Liang, Zhe Wang. A Robust Control Method of Two-Wheeled Self-Balancing Robot[C]. Strategic Technology (IFOST), 2011 6th International Forum on 22-24 Aug. 2011: 1031-1035.
- [43] 李潇. 基于变载荷的两轮自平衡机器人的智能算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [44] 杨兴明, 丁学明, 张培仁等. 两轮移动式倒立摆的运动控制[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版. 2005,28(11):1485-1485.
- [45] 秦永元, 张洪铎, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.

攻读硕士学位期间参加的科研情况

一、发表的论文

- [1] 刘雪薇, 李志俊, 凡胡荣等. 基于 FPGA 的直流电机转速控制系统设计[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2013,35(5):650-653.