

中国海洋大学

硕士学位论文

单轴双轮自平衡代步车的研究与设计

姓名：张吉昌

申请学位级别：硕士

专业：光学工程

指导教师：郑荣儿;程凯

20090601

# 单轴双轮自平衡代步车的研究与设计

## 摘 要

本课题旨在研制一种单轴双轮自平衡代步车。该系统是一种两轮左右平行布置的单人电动车,像传统的倒立摆一样,本身是一个自然不稳定体,必须施加强有力的控制手段才能使之稳定。由于它的行为与火箭飞行以及两足机器人行走有很大的相似性,因而对其进行研究具有重要的理论和实践意义。

自平衡代步车由踏板、车把和两个平行的轮子组成,除了开关按钮,没有任何加速、减速和刹车控制装置。内置了轮毂电机的车轮平行地安装在踏板两侧,电源和驱动控制电路安装在踏板下方。系统以姿态传感器(陀螺仪、加速度计)来监测车身所处的俯仰状态和状态变化率,通过高速中央处理器计算出适当数据和指令后,驱动电动机产生前进或后退的加速度来达到车体前后平衡的效果。驾驶者只需身体往前倾或后倾,代步车就会根据俯仰的方向前进或后退,而速度则与驾驶人身体倾斜的程度呈正比。车体的转弯通过车把的左右倾斜角度来控制,不同的倾斜角度对应电机不同的速度差。原则上,只要打开电源且能保持足够运作的电力,车上的人就不用担心有倾倒跌落的可能,这与一般需要靠驾驶人自己进行平衡的滑板车等交通工具大大不同。该系统灵活性强且结构简单、操作容易,可作为大众在多种场合的代步工具。

对于姿态检测系统而言,单独使用陀螺仪或者加速度计,都不能提供有效而可靠的信息来保证车体的平衡。本文采用一种简易互补滤波方法来融合陀螺仪和加速度计的输出信号,补偿陀螺仪的漂移误差和加速度计的动态误差,得到一个更优的倾角近似值。

控制技术是运动控制的核心,在实际生产实践中应用最普遍的是各种以 PID 为代表的基本控制技术。按照偏差的比例、积分和微分进行控制的调节器,简称为 PID 调节器,是连续系统中技术成熟且应用广泛的一种调节器。本文对系统用到的 PID 控制技术做了相应的研究,从理论上分析了变积分的 PID 控制技术的优势,并在系统的实际测试中获得了良好的效果。

**关键词:** 自平衡; 陀螺仪; 加速度计; 简易互补滤波; PID 控制

# The Design of the Self-balancing Two Wheeled Vehicle

## Abstract

In this thesis, a two-wheeled vehicle with the characteristic of self-balancing was developed. For the prototype design, the vehicle is arranged by two paralleled wheels and powered by electric motor, which is an unstable object needed force to keep balance, just as the traditional 'inverted pendulum'. Since the action principle is similar to rocket flying and robot walking, this research is meaningful for the theory and practice.

This self-balancing vehicle is composed of a pedal, a handle and two paralleled wheels. As the whole system, there is no control device, such as accelerator, retarder and brake, except one button for turning on/off. In the system, two inner hub motors are mounted on the both sides of pedal, and the battery with the drive-control circuit is positioned under the pedal. According to the inertial sensor (gyroscope, accelerometer), the monitoring data of pitching state and state changing are input into the MCU (Micro Control Unit) calculation for the acceleration commands to drive the motor forward/backward for the balance keeping. As a result, the vehicle would move forward or backward with the pitching of rider, and the velocity would be proportional to the tilt angle. For turning, different velocities of two motors would be carried out by the tilt angle of handle. In principle, as long as the power was adequate, the rider won't fall down which differ from the manual- balanced scooter. Above all, it is a vehicle of simple-structured, flexible and easy-controlled, which could be served as a convenient traveling tool to meet variety needs about transportation.

For the posture monitoring system, the information solely depends on the gyroscope or the accelerometer couldn't make sure the balance of vehicle. So the signals from the gyroscope and accelerometer were integrated by a simple method of complementary filtering for an optimal angle to compensate the gyroscope drift error and the accelerometer dynamic error.

Control technique is the core of vehicle movement, which is typical with PID (Proportion Integration Differentiation) technique in practice. PID moderator is a technology-matured moderator for wide application in continuous system, which based on deviation proportion, integration and differentiation. In this thesis, PID control technique was detailed investigated in theory, especially for the advantages of PID variational integration, and finally well-performance was achieved in the application.

Key words: self-balance; gyroscope; accelerometer; simple complementary filtering;

PID

## 独 创 声 明

本人声明所呈交的学位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。据我所知，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，也不包含未获得 注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空 或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。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谢意。

学位论文作者签名：张吉昌

签字日期：2009年6月4日

## 学位论文授权使用授权书

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，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权学校可以将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、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：张吉昌

导师签字：刘荣儿 程凯

签字日期：2009年6月4日

签字日期：2009年6月4日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

# 1 绪论

## 1.1 课题背景

近年来,随着移动机器人研究不断深入、应用领域更加广泛,所面临的环境和任务也越来越复杂。机器人经常会遇到一些比较狭窄,而且有很多大转角的工作场合,如何在这样比较复杂的环境中灵活快捷的执行任务,成为人们颇为关心的一个问题。单轴双轮自平衡机器人概念就是在这样的背景下提出来的,进而增添载人功能就出现了双轮共轴自平衡代步车的概念。

## 1.2 研究现状

近年来,国内外多家科研单位和企业以及自平衡代步车的爱好者都对自平衡理论的发展做出了许多的有益的贡献,大大推进了自平衡技术的发展,同时也出现了一批有代表性的自平衡机器人和载人代步车作品。

2002年,美国Lego公司的Steve Hassenplug设计了如图1.1所示的两轮自平衡传感式机器人Legway。这个设计引入了电机的差动驱动方式,它可以工作在倾斜面甚至不规则表面上,可遥控操作。通过对电动机进行遥控,Legway可以在前行,后退和转弯时保持平衡,可以实现零半径转弯和U型回转<sup>[1]</sup>。

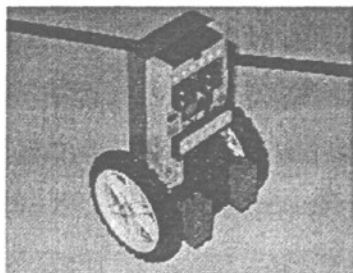


图1.1 Legway

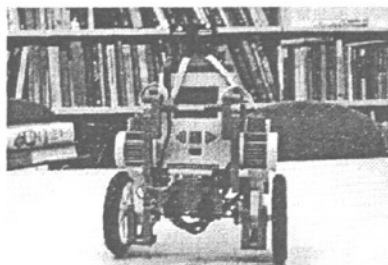


图1.2 NXTway

2007年,日本早稻田大学的Ryo Watanabe在Legway的启发下设计制作了NXTway,如图1.2所示。

2002年,三洋电机展示了可依靠上体倒立来保持平衡的双轮行走机器人“FLATHRU”,如图1.3所示,大小为602×463×564mm,重20kg。移动速度方面,平地行走时最大30cm/S,可搬运重量最大为10kg,运行时间约为1小时。车轮中嵌有一个输出功率为90W的直流电动机,头部则嵌入了两个相同的电动机。为了检测上体的平衡情况,使用了3个陀螺仪和1个3轴加速度传感器。



图1.3 日本三洋电机的双轮行走机器人

深圳固高科技有限公司研制的教学用自平衡小车，如图1.4所示，大小为260mm×450mm×730mm，使用85W减速比10:1的直流伺服电机，最大移动速度1.6m/s，24V镍氢电池供电，电源持续工作时长大于1.5小时，最大爬坡角度20度。

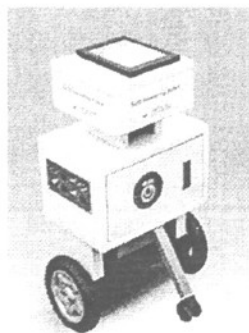


图1.4 深圳固高科技教学用自平衡小车

2002年，美国Segway公司开发了世界上第一部能够自平衡的两轮电动车，时速高达20km/h，如图1.5所示。该电动车把人们从传统的“三点平衡”和以低重心、大而稳的底盘设计来避免倾斜的束缚中解脱出来，通过检测车体的角度和角速度，用适当的回复转矩来避免倾斜摔倒。Segway使用的是航空级陀螺仪、一组倾斜传感器、一套复杂的“直觉软件”、一个加速度计、十个微处理器、两个镍氢电池组、一台电动机和每秒检测一百多次驾驶者重心的传感器。

Segway共有五个陀螺仪传感器，其中三个来检测前、后和左右方向的倾斜，另外两个传感器作为冗余，以增加安全性。传感器收集的信息被传送到主控芯片，它由两个电子控制器电路板构成，电路板包括一个微处理器的集群（德州仪器的DSP芯片），这种集群的运算效率是普通PC的三倍，以保证车身能得到及时而高度精确的微调来防止倾倒。如果一个电路板出了毛病，另一个会立即接管所有的功能，以便让驾驶者能够安全地停下。在最高层次，主控芯片运行“直觉软件”控制Segway，软件会实时分析所有信息，调整电动机的速度。

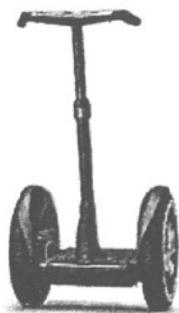


图1.5 美国Segway公司产品

2007年, 美国麻省理工学院的几名学生设计制作出了一台自平衡小车, 如图1.6所示。中心处理器采用的PIC单片机, 主程序采样频率达100Hz, 传感器采用惯性元件陀螺仪和加速度计。



图1.6 麻省理工学院学生的 DIY Segway

以上是国内外两轮自平衡机器人和自平衡代步车的研究现状。这些机器人和代步车对本课题的研究提供了很好的指导作用, 为下面的研究工作提供了很好的参考。

### 1.3 本文的研究内容

本文的主要研究内容包括:

- 1) 传感器数据融合: 采用一种简易互补滤波算法, 将加速度计和陀螺仪检测到的车体姿态信息进行数据融合, 得到可靠的倾角及变化率信息;
- 2) 电机控制算法研究: 对 PID 控制方法进行详细的研究和介绍, 把变积分 PID 控制方法应用在自平衡车系统中, 并检验控制方法的有效性。
- 3) 惯性传感器的应用: 对系统中用到的惯性元件(陀螺仪和加速度计)及其使用方法进行详细的介绍和研究;



4) 电机驱动器和系统控制器设计: 设计制作出适合单轴双轮自平衡小车的无刷电机驱动器, 设计制作系统控制器用以控制传感器检测车体姿态, 通过状态反馈控制, PID 控制等算法, 驱动无刷电机使代步车实现动态自平衡;

5) 系统软件设计与实验研究: 编制适合自平衡系统的控制软件, 通过单轴双轮自平衡代步车样机实际测试, 检验相应算法的有效性, 不断改进算法。

## 2 传感器数据融合与PID控制技术

### 2.1 传感器数据处理方法

为进行实时控制，代步车系统控制器必须对工作环境和任务有足够的了解，这样就离不开相应的传感器。机器人姿态检测系统中通常使用的传感器为惯性传感器，代步车系统用到的惯性传感器有加速度计和陀螺仪，另外还要用到直流无刷电机中自带的霍尔元件，他们分别用于检测车身倾斜角、倾斜角速度和车体实时速度。这三种信号主要反应了机器人的位姿和运动状态。本节主要讨论如何对来自惯性传感器的数据进行融合处理，以得到最优的车体姿态信息。

#### 2.1.1 加速度计数据处理

为实现代步车平衡和运动控制，首先必须得到足够精确的机器人车身倾角信息。根据两轮自平衡机器人的应用环境，一般选择加速度计和陀螺仪两种传感器来采集代步车的姿态信息。

加速度计可以测量动态和静态的线性加速度，静态加速度的一个典型例子就是重力加速度，用加速度计来直接测量物体静态重力加速度可以确定倾斜角度。

当加速度传感器静止时，加速度传感器仅仅输出作用在灵敏轴上的重力加速度值，即重力加速度的分量值。加速度传感器输出值和重力之间的关系如图2.1所示。

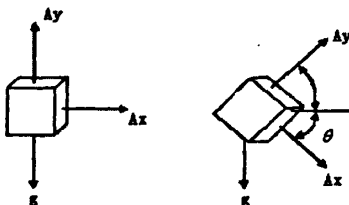


图2.1 双轴加速度计的灵敏轴与重力场

加速度计输出与重力的关系可表示为

$$A_x = g \cdot \sin \theta \quad (2.1)$$

$$A_y = g \cdot \cos \theta = g \cdot \sin(90^\circ - \theta) \quad (2.2)$$

式中 $A_x$ 和 $A_y$ 为加速度计 $x$ 灵敏轴和 $y$ 灵敏轴的输出； $g$ 为重力加速度； $\theta$ 为倾斜角度，可见 $\theta$ 通过反三角函数很容易求得。式子也可以由正切来表示：

$$\theta = \tan^{-1}(A_x / A_y) \quad (2.3)$$

通过上式即可得到倾斜角度值。在自平衡小车系统中,由于车体倾斜角度小于 $30^\circ$ ,所以可以采用正切三角函数近似得到下式,

$$\theta \approx A_x / A_y \quad (2.4)$$

由于三角函数的计算会占用微控制器大量的时间,所以可用上式近似计算,可大大提高微控制器的采样速率。

加速度计动态响应慢,不适合跟踪动态角度运动;如果期望快速的响应,又会引入较大的噪声。再加上其测量范围的限制,使得单独应用加速度计检测车体倾角并不合适,需要与其它传感器共同使用。

### 2.1.2 陀螺仪数据处理

两轮自平衡机器人控制系统除了需要实时的倾角信号,还要用到角速度以给出控制量。理论上可以对加速度计测得的倾角求导得到角速度,但实际上这样求得的结果远远低于陀螺仪测值的精度,陀螺仪具有动态性能好的优点。

陀螺仪的直接输出值是相对灵敏轴的角速率,角速率对时间积分即可得到围绕灵敏轴旋转过的角度值。由于系统采用微控制器循环采样程序获取陀螺仪角速率信息,即每隔一段很短的时间采样一次,所以采用累加的方法实现积分的功能来计算角度值:

$$angle_n = angle_{n-1} + gyro_n \cdot dt \quad (2.5)$$

式中  $angle_n$  为陀螺仪采样到第  $n$  次的角度值;  $angle_{n-1}$  为陀螺仪第  $n-1$  次采样时的角度值;  $gyro_n$  为陀螺仪的第  $n$  次采样得到的瞬时角速率值;  $dt$  为主循环程序运行一遍所用时间。可见,用陀螺仪输出值积分计算角度,要求处理器运算速度足够快,采样程序应尽量简练,程序循环一遍所用时间  $dt$  越小,采样频率越高,最后积分得到的角度值才能越精确。

陀螺仪是用来测量角速度信号的,通过对角速度积分,能得到角度值。但由于温度变化、摩擦力和不稳定力矩等因素,陀螺仪会产成漂移误差。而无论多么小的常值漂移通过积分都会得到无限大的角度误差。因而,也不能单独使用陀螺仪作为本机器人倾角传感器。

综上所述,对于姿态检测系统而言,单独使用陀螺仪或者加速度计,都不能提供有效而可靠的信息来保证车体的平衡。陀螺仪虽然动态性能良好,能够提供瞬间的动态角度变化,不受加速度变化的影响,但是由于其本身固有的特性、温

度及积分过程的影响,存在累积漂移误差,不适合长时间单独工作;加速度计静态响应好,能够准确提供静态的角度,但受动态加速度影响较大,不适合跟踪动态角度运动<sup>[35]</sup>。为了克服这些困难,采用一种简易互补滤波方法来融合陀螺仪和加速度计的输出信号,补偿陀螺仪的漂移误差和加速度计的动态误差,得到一个更优的倾角近似值。

### 2.1.3 传感器数据融合

传感器数据融合是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理,从而产生新的有意义的信息,而这种新信息是任何单一传感器所无法获得的<sup>[40]</sup>。

对于加速度计,需要采用滤波算法除去短时性快速变化的信号,保留长时性缓慢变化的信号,所以对加速度计应用低通滤波算法。一种常用的方法是给变化较快的角度信号乘上一个较小的权重系数,以削弱突变信号对整体产生的影响<sup>[45]</sup>,如式(2.6)所示。

$$angle_n = 0.97 \cdot angle_{n-1} + 0.03 \cdot \theta_{ACCE} \quad (2.6)$$

式中  $angle_n$  为第  $n$  次滤波后的角度;  $angle_{n-1}$  为第  $n$  次滤波前的角度,  $\theta_{ACCE}$  为第  $n$  次加速度计采样测定的角度值。

下面举例说明,加速度计传感器输出信号的倾角值由  $0^\circ$  突变为  $10^\circ$ ,则倾角估计值按照表 2.1 步骤逐次变化。

表 2.1 加速度计低通滤波

采样次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
滤波角度(度)	0.00	0.30	0.74	1.17	1.58	1.99	2.38	2.76	3.12	3.48	3.82

如果传感器停留在  $10^\circ$ ,滤波后角度值会在一段时间后逐渐增大到  $10^\circ$ 。这段时间的长短依赖于滤波常数和循环程序的采样速率(程序循环一次所用时间)。

对于陀螺仪,情况正好相反,应用高通滤波方法处理陀螺仪数据,来抑制陀螺仪积分的漂移。针对加速度计和陀螺仪的姿态检测系统滤波器结构如图 2.2 所示。

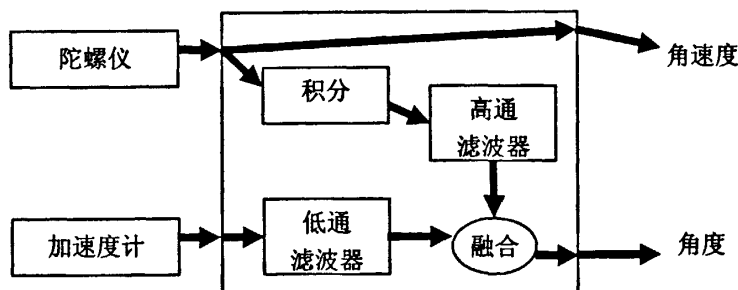


图 2.2 简易互补滤波器设计

简易互补滤波器可表示为

$$angle_n = a_{gyro} \cdot (angle_{n-1} + gyro_n \cdot dt) + a_{acce} \cdot \theta_{acce} \quad (2.7)$$

式中  $a_{gyro} = \frac{\tau}{\tau + dt}$  为陀螺仪的高通滤波系数， $a_{acce} = \frac{dt}{\tau + dt}$  为加速度计的低通滤波系数。 $\tau$  为滤波器的时间常数。对于低通滤波而言，变化周期大于时间常数的信号可以完整的通过；变化周期小于时间常数的信号被过滤掉；高通滤波刚好相反。 $\tau$  这个时间常数，是更相信陀螺仪还是更相信加速度计的一个界限值。变化周期比  $\tau$  短的，陀螺仪积分的角度更让人相信，而加速度计噪声被过滤掉；变化周期比  $\tau$  长的，加速度计测定的角度值比陀螺仪更重要，因为此时陀螺仪会发生漂移了。

针对陀螺仪的高通滤波和针对加速度计的低通滤波两部分恰好可组成一个互补滤波器。可以看到，两个滤波系数相加结果为 1，所以滤波结果是一个比较精确的、线性的角度估计值。

在大多情况下，滤波器通常是按照这样的顺序设计的<sup>[45]</sup>。首先选取时间常数  $\tau$ ，然后用  $\tau$  来计算滤波系数。比如，如果陀螺仪平均每秒漂移  $1^\circ$ ，那就可以选取时间常数  $\tau = 1s$ ，这样就可以保证每秒的漂移量不会超过  $1^\circ$ 。但该常数值越小，通过的加速度计噪声就越多。所以必须找到一个最为合适的中间值，找到该值最好的办法是实验测试。采样频率也是一个重要的数值。例如，程序的更新时间（循环一次所用时间）为 25ms，如果选定时间常数为 0.8s，则滤波系数应该这样计算：

$$a_{gyro} = \frac{0.8}{0.8 + 0.025} = 0.97, \quad a_{acce} = 1 - a_{gyro} = 0.03$$

所以滤波器为：

$$angle = 0.97 \cdot (angle + gyro \cdot 0.025) + 0.03 \cdot \theta_{acce} \quad (2.8)$$

通过表 2.2 可以看出增加了陀螺仪高通滤波的效果。假设系统以  $90^\circ/s$  的角速

度从 0 旋转到  $10^\circ$ ，然后静止不动，角度评估值按表 2.2 步骤逐次变化：

表 2.2 加速度计和陀螺仪的互补滤波

循环次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
滤波角度(度)	0.00	2.48	4.89	7.23	9.50	9.51	9.53	9.54	9.55	9.57	9.58

程序循环一次用时 25ms，计算可知，前四次采样时系统角速度为  $90^\circ/\text{s}$ ，此时针对陀螺仪的高通滤波起主要作用，可以看出角度评估值从 0 快速增加到  $9.50^\circ$ ；程序运行至第五次时，系统已转至  $10^\circ$  保持不变，从此时开始后六次采样角速度值都是 0，这时仅有针对加速度计的低通滤波起作用，角度值缓慢增加。

这样，利用加速度计输出来消除陀螺仪的漂移，使最终得到倾角估计更为精确。这就是传感器数据融合中典型的状态估计问题。状态估计的目的对目标过去的状态进行平滑、对现在的状态进行滤波和对未来的状态进行预测。

## 2.2 PID 控制技术

控制技术是运动控制的核心，各种先进控制技术的研究不断推动着运动控制的发展，比如自适应控制技术和以神经网络和模糊控制为代表的智能控制技术，但在实际生产实践中应用最普遍的还是各种以 PID 为代表的基本控制技术。按照偏差的比例、积分和微分进行控制的调节器，简称为 PID 调节器，是连续系统中技术成熟且应用广泛的一种调节器。本节将对系统用到的 PID 控制技术做相应的研究，传感器将车体的角度和运动速度等信息传递给系统控制器，控制器经分析处理运用 PID 控制技术，将目标命令传递给电机驱动器来完成系统的闭环控制。

### 2.2.1 PID 控制技术的应用现状

在电机伺服系统的控制中，经典的 PID 控制以其结构简单、鲁棒性强以及现场对其的广泛使用积累了丰富的经验等原因对无刷直流电动机进行控制，所以一直占有很重要的地位。PID 的引入保证了在学习期间系统响应的快速性，稳定了闭环控制器，补偿了由逆控制器引起的控制误差<sup>[11][19]</sup>。

PID 控制器就是将偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 通过线性组合构成控制量，用这一控制量对被控对象进行控制。PID 算法是目前工业过程控制中应用最广泛的控制算法，在我国，约有 90% 的控制回路使用 PID 控制算法，在日本，

PID 算法的使用率也达 84.5%。目前的各种单回路控制仪表和工业控制组态软件中，毫无例外地具有 PID 控制功能。PID 算法得到如此广泛的应用，是因为它具有如下优点：

- 1) 算法简单，易于实现；
- 2) 可以在很宽的操作条件内保持较好的鲁棒性，对于控制对象模型参数小范围变化不敏感；
- 3) 基于线性控制理论，具备许多成熟的稳定性分析方法，有较高的可靠性；
- 4) 不要求了解控制对象的精确数学模型。利用许多成熟的参数整定方法，可以根据控制对象的实际响应曲线来计算 PID 控制器的参数；
- 5) 允许工程技术人员以一种简单直接的方式来调节控制系统，以达到希望得到的控制性能，如上升时间、最大超调量和稳态误差等。

### 2.2.2 模拟 PID 和数字 PID 控制

PID 控制又可分为两大类，一个是模拟 PID 控制，一个是数字 PID 控制。

在模拟控制系统中，控制器最常用的控制方法是 PID 控制。图 2.3 所示为模拟 PID 控制系统原理框图。

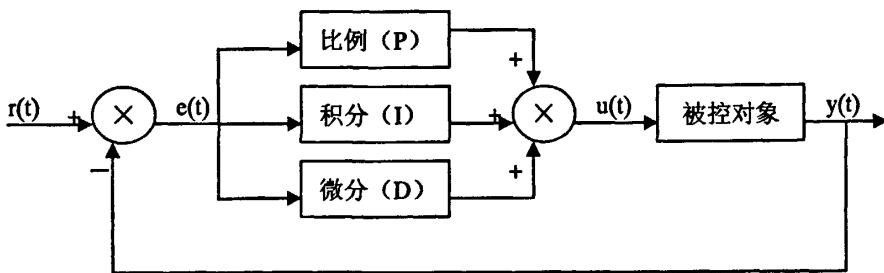


图 2.3 模拟 PID 控制系统原理框图

图中  $r(t)$  是给定值， $y(t)$  是系统的实际输出值， $e(t)$  是给定值与实际值的偏差，可得

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.9)$$

所以模拟 PID 控制器的控制规律为

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] + u_0 \quad (2.10)$$

式中  $K_p$  为比例系数， $T_i$  为积分系数， $T_d$  为微分系数， $u_0$  为控制常数。

简单说来, PID 控制器各校正环节的作用如下:

比例环节即时成比例地反映控制系统的偏差信号  $e(t)$ , 偏差一旦发生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。控制作用的强弱取决于比例系数  $K_P$ ,  $K_P$  越大, 控制越强, 但过大的  $K_P$  会导致系统震荡, 破坏系统的稳定性。

积分环节的作用是把偏差的积累作为输出。在控制过程中, 只要有偏差存在, 积分环节的输出就会不断增大, 直到偏差  $e(t)=0$ , 输出的  $u(t)$  才可能维持在某一常量, 使系统在给定值  $r(t)$  不变的条件下趋于稳态, 因此积分环节能消除系统输出的静态误差。但积分环节也会降低系统的响应速度, 增加系统的超调量。积分作用的强弱取决于积分时间常数  $T_I$ ,  $T_I$  越大, 积分作用越弱, 反之则越强。

微分环节的作用是阻止偏差的变化。它是根据偏差的变化趋势(变化速度)进行控制。偏差变化得越快, 微分控制器的输出就越大, 并能在偏差值变大之前进行修正。微分作用的引入, 将有助于减小超调量, 克服振荡, 使系统趋于稳定, 特别对高阶系统非常有利, 它加快了系统的跟踪速度。但微分的作用对输入信号的噪声很敏感, 对那些噪声较大的系统一般不用微分, 或在微分作用之前先对输入信号进行滤波。

在计算机控制系统中, 使用的是数字 PID 控制器, 这里只介绍增量式 PID 控制算法, 它是指数字控制器的输出只是控制量的增量  $\Delta u_k$ 。

将连续的模拟量进行离散化处理, 则可得

$$u_k = K_P \left[ e_k + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_D}{T} (e_k - e_{k-1}) \right] + u_0 \quad (2.11)$$

$$\text{则 } u_{k-1} = K_P \left[ e_{k-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T} (e_{k-1} - e_{k-2}) \right] + u_0 \quad (2.12)$$

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (2.13)$$

数字 PID 控制器与模拟 PID 控制器相比, 具有非常强的灵活性, 可以根据试验和经验在线调整参数, 因此可以得到更好的控制性能, 在本系统中采用数字 PID 控制器。

### 2.2.3 积分分离的 PID 算法

在普通的 PID 数字控制器中引入积分环节的目的, 主要是为了消除静差、提高精度。但在过程的启动、结束或大幅度增减设定值时, 短时间内系统输出有很



大的偏差,会造成 PID 运算的积分积累,致使算得的控制量超过执行机构可能最大动作范围对应的极限控制量,最终引起系统较大的超调,甚至引起系统的振荡。引进积分分离 PID 控制算法,既保持了积分作用,又减小了超调量,使得控制性能有了较大的改善。其具体实现如下:

- 1) 根据实际情况,人为设定一个阈值  $a>0$ ;
- 2) 当  $|e(k)|>a$  时,也即偏差值  $|e(k)|$  比较大时,采用 PD 控制,可避免过大的超调,又使系统有较快的相应;
- 3) 当  $|e(k)|\leq a$  时,也即偏差值  $|e(k)|$  比较小时,采用 PID 控制,可保证系统的控制精度。

写成计算公式,可在积分项乘一个系数  $\beta$ ,  $\beta$  按下式取值:

$$\beta = 1, \text{ 当 } |e(k)| \leq a;$$

$$\beta = 0, \text{ 当 } |e(k)| > a.$$

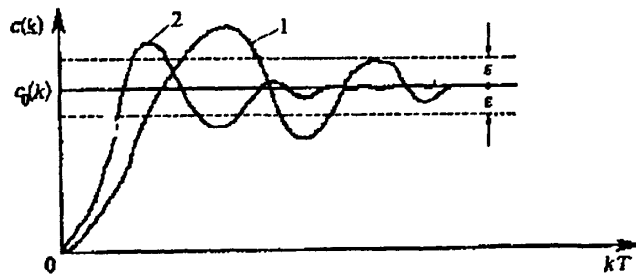


图 2.4 积分分离 PID 控制效果

1 普通 PID 控制 2 积分分离 PID 控制

由图 2.4 可见,采用积分分离 PID 控制算法使得控制系统的性能有了较大的改善。

#### 2.2.4 PID 控制器参数的确定

在数字 PID 控制中,采样周期相对于系统的时间常数来说,一般是很短的。此时,其参数可按模拟 PID 控制器中的方法来选择。

在电机控制中,首先要求系统是稳定的。在给定值变化时,被控量应当能够迅速、平稳的跟踪,超调量要小。在各种干扰下,被控量应能保持在给定值附近。此外控制变量不宜过大,避免系统经常过载。显然,要同时满足上述要求是很困难的,但必须根据具体情况,满足主要方面,并适当兼顾其他方面。

在选择 PID 控制器参数前,应首先确定调节器的结构,以保证被控系统的稳定,并尽可能消除稳态误差。对于电机控制系统而言,一般常选用 PI 或者 PID 控制器结构。PID 参数的选择有两种可用的方法:理论设计法及实验确定法。理论设计法确定 PID 控制参数的前提是要有被控对象准确的数学模型,这在电机控制中往往很难做到。因此,实验确定法来选择 PID 控制参数便成为经常采用且行之有效的方法。

凑试法是通过模拟或闭环运行观察系统的响应曲线(如阶跃响应),然后根据各调节参数对系统响应的大致影响,反复凑试,改变参数,以达到满意的响应,从而确定 PID 控制器参数<sup>[20]</sup>。

在凑试时,可以参考控制参数对控制过程的影响趋势,对参数按先比例、后积分、再微分的次序反复调试。具体的整定步骤如下:

1) 调节器参数积分系数  $S_0=0$ ,实际微分系数  $k=0$ ,控制系统投入闭环运行,由小到大改变比例系数  $S_1$ ,让扰动信号作阶跃变化,观察相应的系统响应,直到获得反应快、超调小的响应曲线,得到满意的控制过程为止。

2) 如果在比例调节的基础上系统的静差达不到设计要求,则必须加入积分环节。取比例系数  $S_1$  为当前的值乘以 0.83,由小到大增加积分系数  $S_0$ ,同样让扰动信号作阶跃变化,根据响应曲线的好坏反复改变比例系数和积分系数,使在保持系统良好动态性能的情况下,稳态误差得到消除,由此得到相应的整定系数,求得满意的控制过程。

3) 积分系数  $S_0$  保持不变,改变比例系数  $S_1$ ,观察控制过程有无改善,如有改善则继续调整,直到满意为止。否则,将原比例系数  $S_1$  增大一些,再调整积分系数  $S_0$ ,力求改善控制过程。如此反复试凑,直到找到满意的比例系数  $S_1$  和积分系数  $S_0$  为止。

4) 若使用比例积分调节器消除了稳态误差,但动态过程经反复调整仍不令人满意,则可加入微分环节,构成比例积分微分调节器。引入适当的实际微分系数  $k$  和实际微分时间  $T_D$ ,此时可适当增大比例系数  $S_1$  和积分系数  $S_0$ 。和前述步骤相同,微分时间的整定也需反复调整,直到控制过程满意为止。

应该指出,所谓“满意”的调节效果,是随不同的对象和控制要求而异的。此外,满意的参数也不是唯一的。这是由于 PID 调节器的参数对控制质量的影响

不十分敏感,在比例、积分、微分三部分产生的控制作用中,某部分的减小往往可由其他部分的增大来补偿。因此,从应用角度看,只要系统响应的主要指标达到设计要求,那么选定的控制器参数即为满意的控制参数。凑试法简单可靠,但需要有一定现场运行经验,整定时易带有主观片面性。当采用 PID 调节器时,有多个整定参数,反复试凑的次数增多,不易得到最佳整定参数。

### 2.2.5 采样周期的选择

数字 PID 是模仿连续系统 PID 调节器,在近似离散化的基础上,通过计算机实现数字控制的。这种控制方式要求采样周期远小于系统的时间常数,这是采用数字 PID 控制器的前提。采样周期越小,数字控制效果就越接近于连续控制。但采样周期的选择受到多方面因素影响的,在电机微机控制软件设计中它是一个重要参数。实际选用采样周期时,必须从需要和可能两方面综合考虑,一般要考虑下列因素:

1) 从调节品质和数字 PID 算法要求来考虑,采样周期应取得小些。一般而言,控制精度要求越高,则采样周期越短。采样周期应比控制对象的时间常数小得多,否则采样信号无法反应系统的瞬变过程。

2) 为了使连续信号采样后输入到计算机而不丢失任何信息,仍可复原为模拟信号,应根据香农(Shannon)采样定理,采样周期只需满足下列关系式:  $T < \frac{1}{2f_{\max}}$

式中,  $f_{\max}$  为被采样信号的最高频率。由于  $f_{\max}$  很难准确知道,所以按上式的香农定理选择采样周期,实际去用的  $f_{\max}$  还要放大 4-6 倍。

3) 从控制系统的动态性能和抗干扰性能来考虑,要求采样周期短些。这样给定值的改变可以迅速地通过采样得到,而不致在控制中产生大的延迟。此外,对低频扰动,采用短的采样周期可以设法迅速得到校正,并产生较小的最大偏差。

4) 从执行元件的响应速度和要求来看,有对需要输出信号保持一定的时间。如果执行元件响应速度慢,那么过短的采样周期往往没有必要。

5) 从微机控制在一个采样周期内完成一定的运算工作量来考虑,一般要求采样周期大些,以充分保证微机的实时运算和处理时间。

6) 从微机本身的精度考虑,过短的采样周期是不合适的。此外,在用积分项消除静差的控制算法中,如果采样周期太小,将会使积分部分的增益  $T/T_1$  过低。

当偏差小到一定限度以下时，增量算法中的  $T/T1$  就有可能受计算精度的限制而始终为零，积分部分起不了消除静差的作用。

### 3 系统硬件结构

根据单轴双轮自平衡代步车的功能特征，一般选择陀螺仪和加速度计两种惯性传感器来采集车体的姿态信息，直流无刷电机自带的霍尔元件采集车体速度信息。控制单元采用微控制器完成数据采集与处理、车体姿态判断、直流无刷电机控制及其他外围的控制等功能。系统硬件结构如图 3.1 所示。

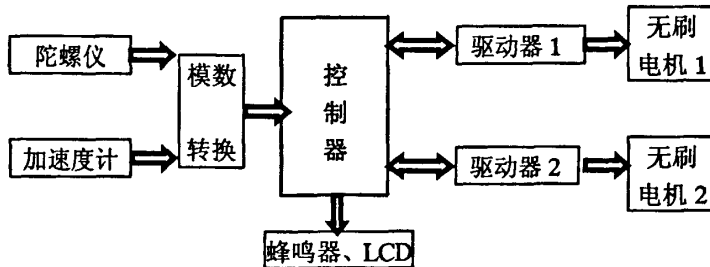


图 3.1 系统硬件结构图

#### 3.1. 直流无刷电动机

长期以来，在调速领域内传统的直流电动机以其优良的转矩控制特性占据主导地位。由于直流电动机均采用机械方式换向，在电刷和换向器之间存在机械摩擦，由此带来了噪声、火花等缺点。为了取代有刷直流电动机电刷换向器结构的机械接触装置，人们对此进行了长期的探索。

早在 1917 年，Boliger 就提出了用整流管代替有刷直流电机的机械电刷，从而诞生了无刷直流电机的基本思想。二十世纪 30 年代，人们开始研制以电子换相来代替电刷机械换相的无刷直流电动机，但还只是处于实验室研究阶段，没有推广使用。1955 年，美国 D.Harrison 等人首次申请了用晶体管换向线路代替有刷直流电动机机械电刷的专利，标志着现代无刷电机的诞生。近 40 多年来，由于电机本体及其相关学科的迅猛发展，“无刷直流电机”的概念已由具有电子换向的直流电机发展到泛指一切具有有刷直流电机外部特性的电子换向电机。无刷直流电机真正进入实用阶段是从 1978 年开始的，二十世纪 80 年代在国际上开展了深入的研究，先后研制成方波和正弦波无刷直流电机。在 10 多年的时间里，无刷直流电机在国际上已得到较为充分的发展。我国无刷直流电机的研制工作始于二十世纪 70 年代初期，主要集中在一些科研院所和高等院校。限于我国元器件水平及相关理论与实践相结合的程度还比较低，尤其是制造工艺和加工设备距离国际水准差距

较大,所以目前我国无刷电机的综合水平仍低于国际水平,有待进一步地研究和开发<sup>[21]</sup>。

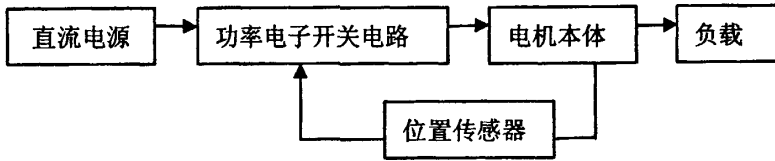


图 3.2 直流无刷电机原理框图

无刷直流电机是指无机械电刷和换向器的直流电机,又称无换向器直流电机,它以电子换向器代替机械电刷和换向器实现直流电机的换相。无刷直流电动机系统实际上是一个由电动机本体、功率逻辑开关电路和位置传感器组成的一个闭环系统,无刷直流电动机的控制方法和运行方式因电动机本体的绕组型式不同而各异。

由前述可知,无刷直流电机既具备交流电机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点,又具备有刷直流电机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多特点,同时克服了有刷直流电机由于机械电刷和换向器的存在所带来的噪声、火花、无线电干扰以及寿命短等弊病,且降低了制造成本,简化了电机的维修。故无刷直流电机在当今国民经济各个领域,如航空航天、数控机床、机器人、电动汽车、医疗器械、仪器仪表、化工、轻纺、计算机驱动器以及家用电器等方面得到了广泛的应用。

一体化电动车轮专门用作电动自行车的驱动轮,内部含有三相直流无刷电机。一体化电动车技术成熟,市场使用量大,容易控制成本,而且装配简单,本系统采用的是电动车用无刷直流电机。

### 3.2 电机驱动器

现代电机的驱动放大技术与电子技术的发展有着密切的关系。电子技术、电子器件的成就,极大地推动了电机驱动放大技术的进步。

可以说,电机功率的驱动放大是伺服系统的核心,它用来转换电功率并驱动伺服电机运动。一个合适的伺服放大器至少应当具有以下特性:

- 1) 电系统与电机线圈之间的功率在电压、电流和频率上的匹配;
- 2) 高性能和高稳定性;

3) 易于设置和调整;

4) 不仅放大器自身具有电路保护, 且对与其相连接的电机也具有保护措施;

现代直流电机的驱动放大几乎都是采用晶体管功率放大器来实现的。晶体管放大器系统可以分为两种类型: 线性放大器和开关型放大器。线性放大器几乎毫无例外地采用晶体管, 线性地提供所需的直流电流。而开关型放大器可采用晶体管, 也可采用普通晶闸管(可控硅)。在开关型放大器中, 输出级的功率器件工作在迅速地非导通状态到完全导通状态。当处于非导通状态时, 功率器件不消耗能量; 而完全导通时功率器件上的压降很小, 这样避开了工作在线性放大区域, 因此功率输出级的损耗就很小。目前, 线性放大器一般仅在小功率的场合有所应用, 而大量采用的是开关型放大器。本系统驱动器的制作采用的是场效应管实现功率放大。

下面分别具体介绍电机驱动器各个功能部分。

### 3.2.1 电源部分

电源部分提供三种电压供给电路板使用。一路是供给驱动部分功率管的 48V 直流电源, 直接从蓄电池处获得; 一路是供给三相电机专用控制芯片 IR2130 的 15V 电源, 经过一个专用 48V 转 15V 的 DC-DC 隔离变压器输出直流电压; 一路是供给 MCU 系统和霍尔电路部分的 5V 电源, 由一个三端稳压器 7805 稳压输出 5V 电压。电压转换电路如图 3.4 所示。

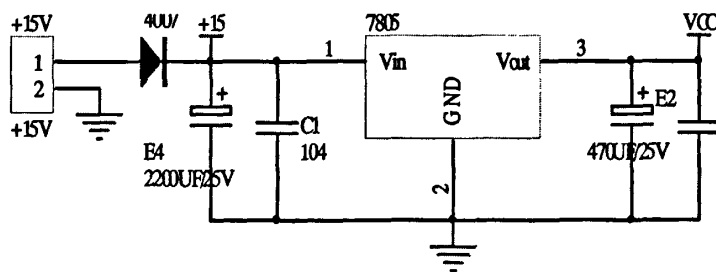


图 3.4 5V 直流稳压电路

### 3.2.2 功率元件部分

场效应管(MOSFET)是70年代中期才发展起来的电压控制型的新型半导体电力电子器件, 目前仍处在加快提高半导体技术和降低成本的阶段。其伏安容量达到1000V/25A或500V/150A。这种开关元件的优点是由于它是多数载流子导电, 故不存在少数载流子的存储效应, 有较高的开关速度, 可以高达25MHz; 具有较

宽的安全工作区而不会产生热点,而且它具有正的电阻温度系数,易于并联使用;具有高可靠性;过载能力强,短时过载电流一般为额定值的四倍;有较高的开启电压,一般 10V 左右,因而有较高的噪声容限和抗干扰能力;它是电压控制型器件,具有高输入阻抗,故驱动功率小,驱动电路简单而又低廉;可以不带缓冲器工作。它的缺点是额定工作电压低,内阻大,导通压降随漏极电流的增加线性增大,只适用于高频小功率的应用场合。目前,场效应管已广泛应用于电机调速、不间断电源、开关电源、电子开关、汽车电器等方面,在高频、低压和小功率领域内尚无竞争对手<sup>[46]</sup>。

无刷直流电动机的速度调节采用通过改变 PWM 信号的占空比来控制输入到电机绕组的电压,因此功率管必须有较高的开关频率,一般选用频率高于听觉频率 20KHz 的 PWM 波来控制开关管的通断。从上所述得知,晶闸管和电力晶体管都不能满足要求,而功率场效应晶体管能达到要求,功率场效应晶体管是一种单极型电压控制器件,它不但有自关断能力,而且具有驱动功率小、工作速度高、无二次击穿、安全工作区宽等优点。因此在本系统中选择意法半导体公司的功率场效应晶体管 75NF75 作为功率开关器件。75NF75 场效应管漏极击穿电压  $V_{DS}$  可达 75V,漏极额定电流  $I_D$  可达 75A,通态电阻  $R_{DS}$  小于 0.011 $\Omega$ 。各项参数符合本系统对功率管的要求。功率管桥式驱动电路如图 3.5 所示。

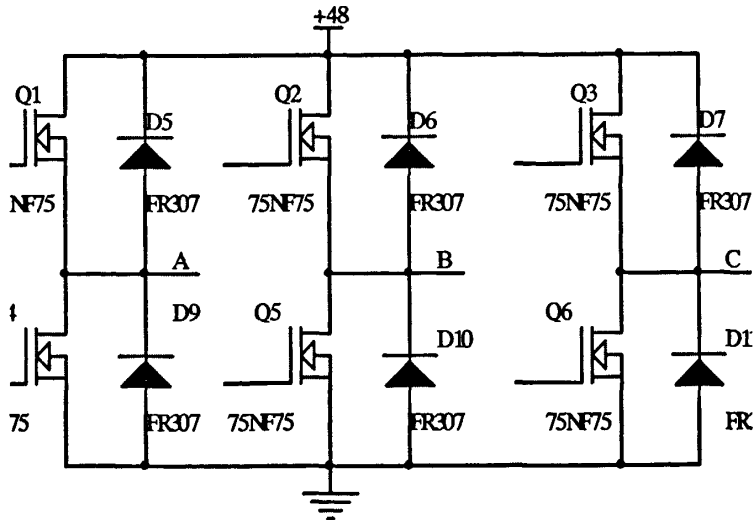


图 3.5 三相桥式驱动电路

图 3.5 中 D5、D6、D7、D9、D10 和 D11 是六只续流二极管,它们为电机绕



组的反电势提供通路, 如果该电势加在功率场效应晶体管, 会损坏功率场效应晶体管, 并接的续流二极管与反电势形成续流电路, 保护功率场效应晶体管, 续流二极管选用反应速度快而且反向耐压高的超快恢复二极管。从驱动芯片输出信号端到功率场效应晶体管的门极之间加了一个电阻, 其作用是限制电流信号, 同时起阻尼作用。

### 3.2.3 功率管驱动芯片

IR2130是美国国际整流器公司推出的专用三相桥式电路驱动芯片, 其主要参数如下:

- 1) 可直接驱动工作在母线电压不超过600V电路中的MOS器件;
- 2) 具有电流放大和过电流保护功能;
- 3) 自动产生上、下侧驱动所必需的死区时间(2 $\mu$ s);
- 4) 具有欠压锁定功能并能指示欠压和过电流状态;
- 5) 输入端具有噪声抑制功能。

IR2130 可用于驱动工作在母线电压不超过 600V 电路中的 MOS 器件, 最大输出正向峰值驱动电流为 250mA, 而反向峰值驱动电流为 500mA。它可对同一桥臂上、下两个功率 MOS 器件的栅极驱动信号产生 2ps 的互锁延时时间。内部设有一个线性放大器, 可用于电流信号的放大。IR2130 的保护功能十分强大, 内部设有过电流、过电压、欠电压、逻辑识别保护以及封锁和指示环节。一旦外电路发生过电流或桥臂直通, 即电流检测单元送出的信号高于 0.5V 时, 内部比较器迅速翻转, 使故障逻辑处理单元输出低电平, 一方面封锁输出, 使 IR2130 的输出全为低电平, 保证六个被驱动的 MOS 关断; 另一方面, 经引脚 8 输出一低电平信号, 可用于封锁脉冲或声光报警。当工作电源欠电压时, 同样封锁六路输出为低电平, 并使引脚 8 为低电平。再有当高压侧某路自举电源欠压时, 则该路的驱动信号检测器迅速动作, 封锁该路输出。IR2130 的另一重要保护功能是逻辑保护, 即当同一桥臂上、下功率开关器件对应的输入信号都为高电平时, 封锁该两路栅极驱动信号, 防止直通现象发生。它巧妙运用了自举技术形成悬浮的高压侧电源, 因而只用一路电源即可驱动三相桥式逆变电路中的六个功率 MOS。电路设计还保证了内部三个通道中的高压侧驱动器与低压侧驱动器可单独使用, 亦可只用其内部的三个低压侧驱动器, 并且输入信号与 TTL 及 CMOS 电平兼容, IR2130 的外围电路

如图 3.6 所示。

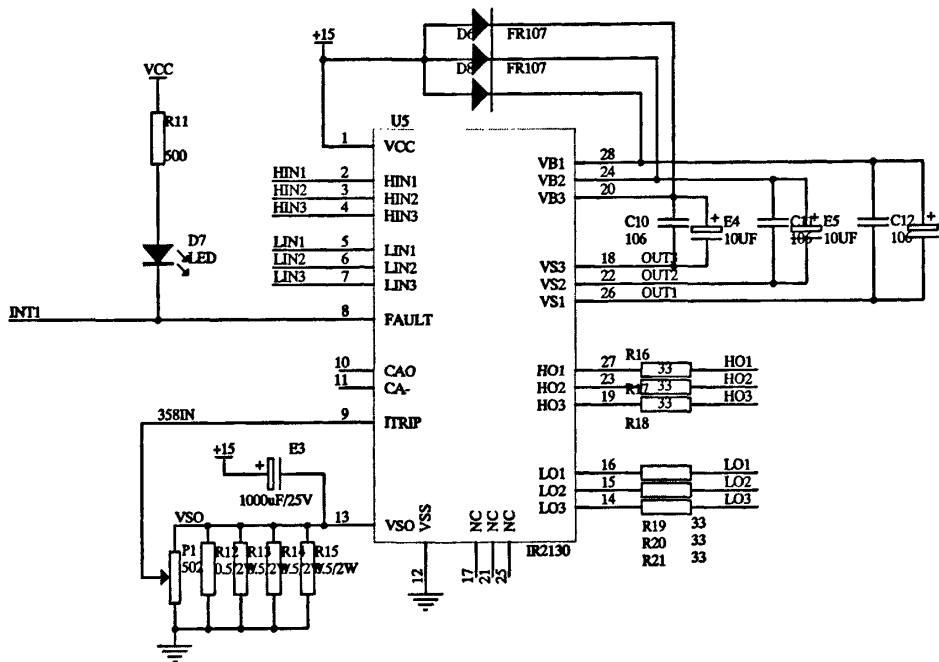


图 3.6 IR2130 硬件电路

### 3.2.4 过流检测电路设计

电流检测电路是为了防止电机过载、起动或异常运行时由于电流过大而对控制电路、功率场效应管和电动机本体的损害而设计的。在主电路上串联一个采样电阻,通过将采样电阻的两端电压与设定的电压进行比较来确定主电路电流是否过流,过流信号一方面经模数转换送给 MCU 进行处理,另一方面送到 PWM 输出通道的与门和与非门来封锁功率场效应管的开关信号,使其关断功率场效应管,从而保护了主电路。电流信号检测电路如图 3.7 所示。R9 为 0.05Ω 采样电阻,将电流信号转化为电压信号。采样所得电压经电阻 R7 和 R8 分压后,将 R8 上电压值送到 MCU。电容 C4 的作用是滤去电阻两端电压的高频干扰信号,防止过电压检测电路误动作,保证稳定的电流采样波形。

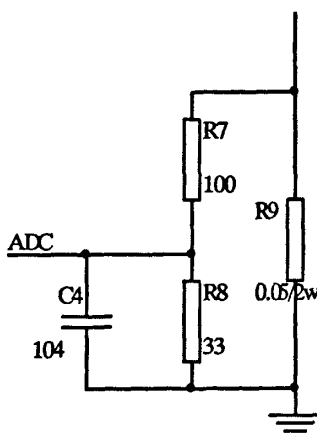


图 3.7 过流检测电路

### 3.2.5 硬件设计中的抗干扰措施

本系统中同一块电路板上存在模拟（48V 和 15V）和数字（MCU 系统）电路信号，电动机的运行本身会产生强烈的电磁干扰，无刷电机驱动部分的逆变器中包含的大功率半导体元件以开关方式工作，这必然会产生大量高频谐波。如果对这些信号电路不进行抗干扰措施，就会影响霍尔传感器输送到 MCU 的位置信号和三路 PWM、电平输出的功率场效应管的开关信号，使整个系统的工作受到影响，甚至系统不能工作，严重的会导致功率场效应管误导通而烧毁，因此必须注意硬件系统的抗干扰问题<sup>[46]</sup>。

设计中采用如下几个措施来提高硬件电路的抗干扰能力：

1) 为了防止电路板上模拟电路部分对数字电路部分的干扰，将模拟地与数字地分开设计，整个电路板上仅有一点连接在一起，最大限度阻止模拟电路中的干扰信号窜入数字电路；

2) 在霍尔位置信号的输入通道上加滤波小电容，消除由于电磁干扰而产生的毛刺，避免电机控制中产生逻辑错误；

3) 从电磁兼容性 EMC 方面考虑，在硬件的布局和布线上采取了一些提高系统抗干扰能力的措施：印刷电路板尺寸不能太大，否则印制线过长，阻抗增加，抗噪声能力下降，也不可太小，否则散热不好，且邻近导线容易受到干扰；按照电路信号的流程安排元件的位置顺序，使布局便于信号流通并使信号尽量保持一致的方向。系统电源线和地线尽量短而宽，不同的电源，尽量从布局上分开，地线尽可能的铺开；系统时钟晶振电路尽量靠近 MCU，且时钟元件附近不敷设模拟电

路；在电源和地之间加去耦电容；印刷电路板走线，均走直线或  $135^\circ$ ；充分考虑功率场效应管的散热问题，加散热片，功率场效应管之间保持适当距离。

系统的硬件设计从减少干扰源、降低噪声藕和噪声接收上考虑，提高了系统的抗干扰性能和可靠性。

### 3.3 陀螺仪

#### 3.3.1 陀螺仪介绍

iMEMS微机械陀螺仪是ADI公司正在发展的动态信号处理解决方案的一部分。iMEMS陀螺仪在严峻的工作条件下比其它陀螺仪的可靠性高、功耗低、易于使用、尺寸小、成本低。其内核采用独特的表面微机械加工工艺，该工艺已为汽车安全系统、消费类和工业应用制造了两亿多只传感器。iMEMS产品采用了创新的设计方法，通过在同一硅片上集成微机械单元和电子单元电路，提高了传感器的性能。

ADIS系列陀螺仪增加了校准和调整、专用接口、数字IO、无线链路、嵌入式智能信息和可编程能力、电源管理以及模拟信号调理等功能。

ADIS16100是一款具有SPI数字输出接口和模拟电压输出接口的陀螺仪，量程达 $\pm 300^\circ/\text{S}$ ，灵敏度为 $0.244^\circ/\text{S}/\text{LSB}$ ，内部具有温度传感器，具有参考电压输出，工作电源电压 $4.75\sim 5.25\text{V}$ ，工作电流 $7\text{mA}$ ，温度范围 $-40\sim +85^\circ\text{C}$ 。

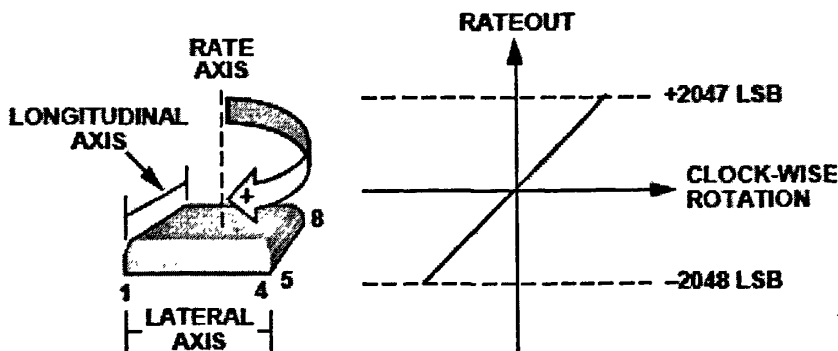


图3.8 陀螺仪ADIS16100的灵敏轴方向与输出特性

从图3.8陀螺仪的输出特性曲线可以看出，陀螺仪的满量程的输出值是 $-2048\sim +2047$ ，线性对应角速率 $-300\sim +300^\circ/\text{S}$ ，在量程范围内陀螺仪输出信号电压值与角速度成正比，角速率为0时数字输出值为0。

而对于陀螺仪的模拟电压输出接口，在工作电压 $5\text{V}$ 时，陀螺仪角速度为0对应

输出信号电压值2.5V，陀螺仪顺时针旋转（从上部看）时输出信号电压为正值，陀螺仪逆时针旋转时输出信号电压为负值。

### 3.3.2 陀螺仪应用电路

陀螺仪 ADIS16100 的引脚分布如图 3.9 所示。

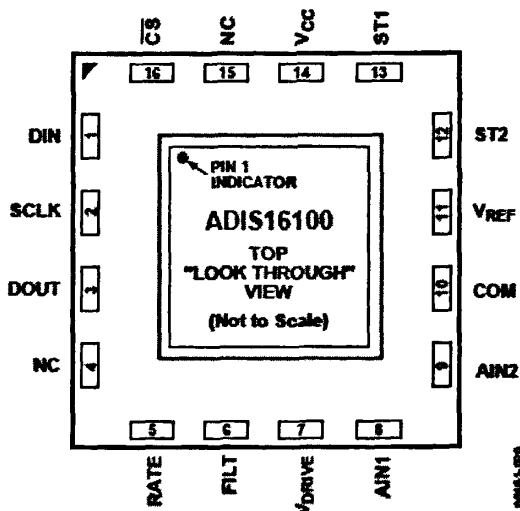


图 3.9 陀螺仪 ADIS16100 引脚分布

表 3.1 陀螺仪 ADIS16100 引脚功能

引脚序号	符号	功 能
1、2、3、16	SPI	数字 SPI 接口
5	RATE	模拟电压输出口
6	FILT	带宽控制
7	Vdrive	SPI 接口电路电源电压
8、9	AIN	外部模拟输入通道
10	COM	参考地
11	REF	参考电压输出
12、13	ST	自检
14	VCC	电源电压
4、15	NC	空脚

设计电路板时应注意：传感器下面应铺大面积地线；模拟信号输出引脚 RATE

通过一个  $0.1\mu\text{F}$  电容连接到 FILT 引脚；Vdrive 引脚和地之间使用一  $0.1\mu\text{F}$  电容。陀螺仪的电路如图 3.10 所示。

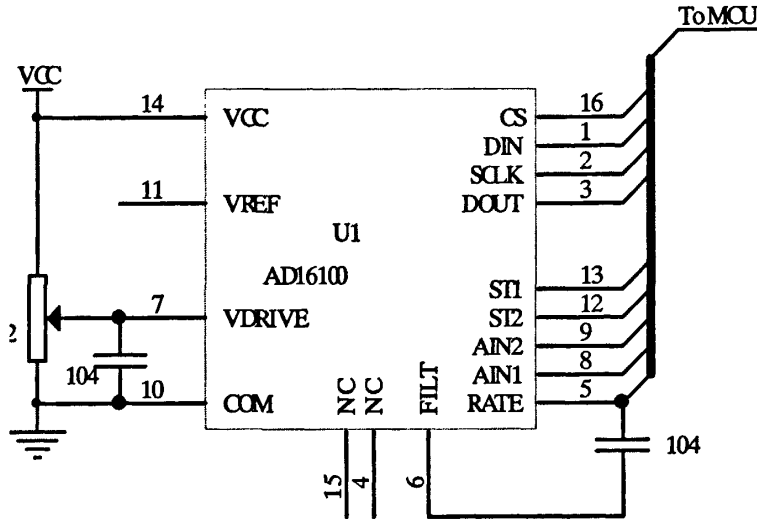


图3.10 陀螺仪ADIS16100应用电路

### 3.4 加速度计

#### 3.4.1 加速度计简介

MMA7260是美国Freescale公司推出的一款低成本单芯片三轴加速度传感器。该微型电容式加速传感器融合了信号调理、单极低通滤波器和温度补偿技术，并提供了四种加速度测量范围。MMA7260的主要特性如下<sup>[36]</sup>：

- 1) XYZ三轴方向的感应功能；
- 2) 可选的加速度范围： $\pm 1.5g$ 、 $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$  和  $\pm 6g$ ；
- 3) 低电流消耗： $500\mu\text{A}$ ；
- 4) 休眠模式： $3\mu\text{A}$ ；
- 5) 低电压运行： $2.2 \sim 3.6\text{V}$ ；
- 6) 快速启动时间： $1\text{ms}$ ；
- 7) 低噪音：达到更高的分辨率、更高的精确度；
- 8) 超小体积： $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 1.45\text{mm}$  QFN封装；
- 9) 高灵敏度： $800\text{mV/g} @ 1.5g$ 。

由于MMA7260加速度传感器可准确测量三轴向下降、倾斜、移动、定位、撞击和震动，因此在HDD保护、MP3 播放器、游戏、便携式电子设备中得到了广泛

的应用。

MMA7260的引脚配置如表3.2所示。

表3.2 MMA7260引脚功能描述

引脚序号	符 号	功能描述
1	g-Select1	输入逻辑电平,选择灵敏度的级别
2	g-Select2	输入逻辑电平,选择灵敏度的级别
3	VDD	电源输入
4	VSS	电源地
5-11	NC	悬空
12	Sleep Mode	休眠模式
13	ZOUT	Z 方向输出电压
14	YOUT	Y 方向输出电压
15	XOUT	X 方向输出电压
16	NC	悬空

MMA7260有四种可选加速度范围，分别对应不同的灵敏度，以适应不同的应用环境和系统要求，功能选择方法见表3.3所示。

表3.3 灵敏度选择功能表

g-Select2	g-Select1	量程	灵敏度
0	0	1.5g	800mV/g
0	1	2g	600mV/g
1	0	4g	300mV/g
1	1	6g	200mV/g

3.4.2 加速度计应用电路

加速度计工作电压为2.2V-3.6V，采用LM1117三端稳压器，将5V电压变为3.3V稳定电压为其供电。

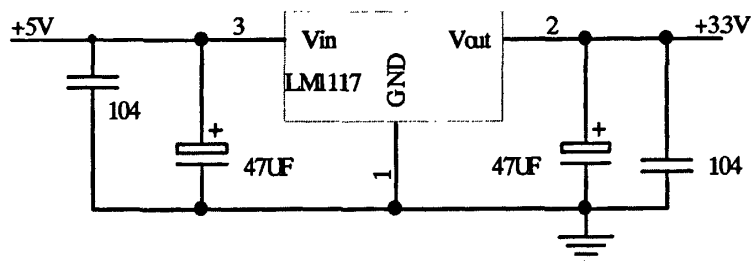


图3.11 3.3V稳压电路

灵敏度选择采用双跳线，可任意选择4种灵敏度；加速度计输出经过一个1K电阻和0.1μF电容的RC滤波电路减小噪声。

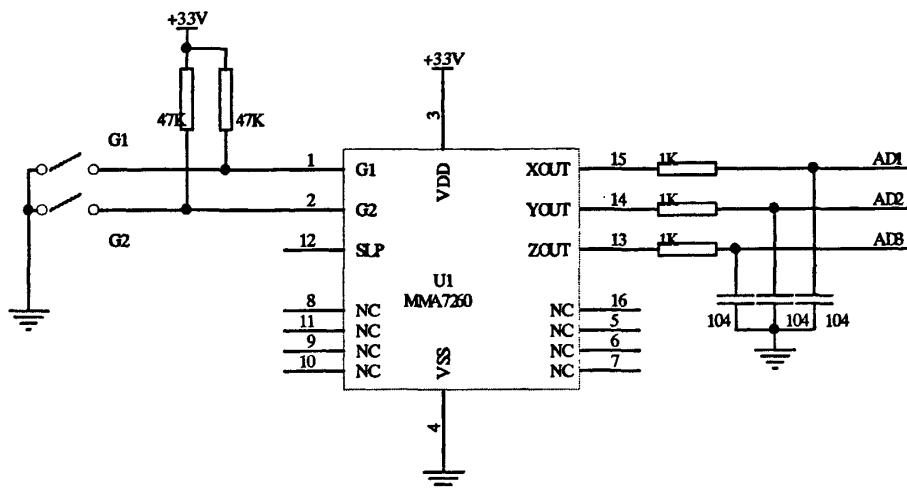


图3.12 加速度计MMA7260应用电路

## 3.5 控制器

### 3.5.1 AVR ATmega16L 单片机简介

1997年，ATMEL挪威设计中心的A先生与V先生出于市场考虑，充分发挥起Flash技术优势，推出全新的精简指令集（RISC）单片机，简称AVR<sup>[47]</sup>。几年来AVR单片机已形成系列，其ATtiny、AT90与ATmega分布对应低、中、高档产品。

本设计中采用的AVR ATmega16L单片机是一款高性能、低功耗的8位RISC结构单片机，主要资源如下：

- 1) 支持JTAG端口仿真和编程；
- 2) 32个IO口，8通道10位AD转换器；

3) 16K字节的FLASH存储器，1K字节的SRAM，32个通用寄存器，512字节的EEPROM存储器；



- 4) 20个中断源, 每个中断有独立的中断向量入口地址;
- 5) 2个8位定时/计数器, 1个16位定时/计数器, 有四个通道的PWM;
- 6) 硬件USART、SPI和基于字节处理的I<sup>2</sup>C接口;
- 7) ATmega16L工作电压2.7V-5.5V, 工作频率0-8MHz。

AVR ATmega16L单片机作为嵌入式高效微控制器, 无需额外的程序存储器、数据存储器、PWM控制专用芯片, 大大简化了系统的硬件, 其内部看门狗电路及相应指令控制提高了系统的可靠性和安全性, 因此本设计中的控制器和无刷电机驱动器均采用ATmega16L制作。

ATmega16L具有2个8位定时/计数器, 1个16位定时/计数器, 带捕捉、比较功能, 有四个通道的PWM, 本设计中主要用到16位定时器/计数器。16位的定时器/计数器可以实现精确的程序定时(事件管理)、波形产生和信号测量。其主要特点如下:

- 1) 真正的16位设计(即允许16位的PWM);
- 2) 2个独立的输出比较单元;
- 3) 双缓冲的输出比较寄存器;
- 4) 一个输入捕捉单元;
- 5) 输入捕捉噪声抑制器;
- 6) 比较匹配发生时清除寄存器(自动重载);
- 7) 无干扰脉冲, 相位正确的PWM;
- 8) 可变的PWM周期;
- 9) 频率发生器;
- 10) 外部事件计数器;
- 11) 4个独立的中断源。

通用同步和异步串行接收器和转发器(USART)是一个高度灵活的串行通讯设备。主要特点为:

- 1) 全双工操作(独立的串行接收和发送寄存器);
- 2) 主机或从机提供时钟的同步操作;
- 3) 高精度的波特率发生器;
- 4) 支持5、6、7、8或9个数据位和1个或2个停止位;

- 5) 硬件支持的奇偶校验操作、数据过速检测、帧错误检测;
- 6) 噪声滤波, 包括错误的起始位检测, 以及数字低通滤波器;
- 7) 三个独立中断: 发送结束中断, 发送数据寄存器空中断, 及接收结束中断;
- 8) 多处理器通讯模式;
- 9) 倍速异步通讯模式。

### 3.5.2 RS485 通信

由于 RS232 接口标准出现较早, 难免有不足之处, 主要有以下四点:

- 1) 接口的信号电平值较高, 易损坏接口电路的芯片, 又因为与 TTL 电平不兼容故需使用电平转换电路方能与 TTL 电路连接;
- 2) 传输速率较低, 在异步传输时, 波特率为 20Kbps;
- 3) 接口使用一根信号线和一根信号返回线而构成共地的传输形式, 这种共地传输容易产生共模干扰, 所以抗噪声干扰性弱;
- 4) 传输距离有限, 最大传输距离 50 米左右。

针对 RS232 的不足, 于是就不断出现了一些新的接口标准, RS485 就是其中之一, 它具有以下特点:

- 1) RS485 的电气特性: 逻辑“1”以两线间的电压差为 + (0.2-6) V 表示; 逻辑“0”以两线间的电压差为 (0.2-6) V 表示。接口信号电平比 RS232 降低了, 就不易损坏接口电路的芯片, 且该电平与 TTL 电平兼容, 可方便与 TTL 电路连接;
- 2) RS485 的数据最高传输速率为 10Mbps;
- 3) RS485 接口是采用平衡驱动器和差分接收器的组合, 抗共模干扰能力增强, 即抗噪声干扰性好;
- 4) RS485 最大的通信距离约为 1219m, 最大传输速率为 10Mb/S, 传输速率与传输距离成反比, 在 100Kb/S 的传输速率下, 才可以达到最大的通信距离, 如果需传输更长的距离, 需要加 485 中继器。RS485 总线一般最大支持 32 个节点, 如果使用特制的 RS485 芯片, 可以达到 128 个或者 256 个节点, 最大的可以支持到 400 个节点。

因 RS485 接口具有良好的抗噪声干扰性,长的传输距离和多站能力等上述优点就使其成为首选的串行接口。由 RS485 接口组成的半双工网络,一般只需二根连线,所以 RS485 接口均采用屏蔽双绞线传输。

在要求通信距离为几十米到上千米时,广泛采用 RS485 串行总线标准。RS485 采用平衡发送和差分接收,因此具有抑制共模干扰的能力。加之总线收发器具有高灵敏度,能检测低至 200mV 的电压,故传输信号能在千米以外得到恢复。RS485 采用半双工工作方式,任何时候只能有一点处于发送状态,因此,发送电路须由使能信号加以控制。RS485 用于多点互连时非常方便,可以省掉许多信号线。应用 RS485 可以联网构成分布式系统,其允许最多并联 32 台驱动器和 32 台接收器。

但 RS232、RS485 只能代表通讯的物理介质层和链路层,如果要想实现数据的双向访问,就必须自己编写通讯应用程序。在 RS232 或 RS485 设备联成的设备网中,如果设备数量超过 2 台,就必须使用 RS485 做通讯介质,RS485 网的设备间要想互通信息只有通过“主 (Master)”设备中转才能实现,这种设备网中只允许存在一个主设备,其余全部是从 (Slave) 设备。

SP481、SP483 和 SP485 是美国知名半导体制造商 Sipex 公司基于差分信号传输原理的 RS485/422 通信专用芯片。该系列为半双工收发器,性能完全满足 RS485 和 RS422 规范。它们的 BiCMOS 设计可实现低功耗操作,但不影响其它特性。SP481 和 SP485 满足 RS485 和 RS422 规范,数据传输速率高达 5Mbps。另外,SP481、SP483 含有低功耗关断模式。SP483 通过限制内部的电压变化速度来降低 EMI,它满足 RS485 和 RS422 规范,数据传输速率高达 250kbps<sup>[26]</sup>。

表 3.4 SP485R 芯片引脚描述

引脚序号	符号	功能
1	RO	接收器输出
2	/RE	接收器输出使能
3	DE	发送器输出使能
4	DI	发送器输入
5	GND	地

6	A	同相发送器输出/接收器输入
7	B	反相发送器输出/接收器输入
8	VDD	供电电压

本系统控制器与两无刷电机驱动器之间的通信采用的RS485硬件电路接口芯片是Sipex公司的SP485R，SP485R芯片是一款高性能的RS485收发器，而且包含更高的ESD保护和接受器输入阻抗高达150K。理论上，接收器的高输入阻抗可以使400个收发器接到同一条传输线上又不会引起信号的衰减。本设计中传输距离不超过1米，这能够很好满足数据传输的需求。SP485R的芯片引脚功能如表3.4所示，其硬件电路如图3.13所示。

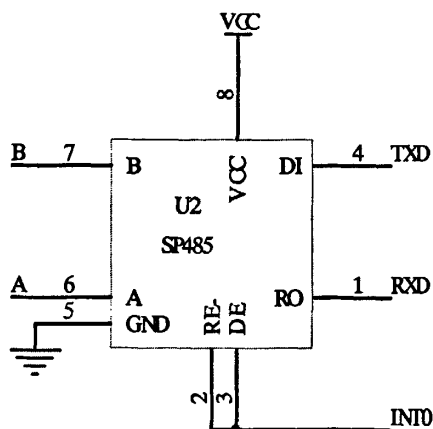


图 3.13 SP485 硬件电路

### 3.5.3 复位电路

单片机系统有时会出现一些不可预料的现象，如在调试过程中就曾遇到无规律可循的死机、程序跑飞等，而用仿真器调试时却无此现象发生或极少发生此现象。有时在关闭电源后的短时间内再次开启电源，单片机可能会工作不正常。这些现象，都可认为是由于单片机复位电路的设计不当引起的<sup>[48]</sup>。本文中针对单片机系统采用了一种改进的积分型复位电路，可保证系统稳定工作。

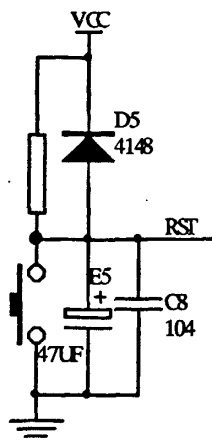


图 3.14 单片机复位电路设计

### 3.5.4 模数转换电路

本系统中采用模数转换芯片TLC2543来采集陀螺仪、加速度计、转把电位器等传感器的模拟电压信号送给控制器处理分析。

TLC2543是可选择11个输入通道、12位、开关电容、逐次逼近的模数转换器ADC每一器件具有三个控制输入口（芯片选择，输入输出时钟以及地址输入）和一个串行三态输出口，能与主处理器或外围设备的串行接口通信。器件允许来自主机的高速数据传送。除了高速转换器和多用途的控制能力外，器件还具有片内14通道多路转换器，它可选择11个输入通道或3个内部自测试电压中的任一个采样保持功能。在转换结束时，转换结束（EOC）输出变为高电平以指示转换完成。组合在器件中的转换器的特点包括易于实现比率转换的差分高阻抗基准输入端，定标以及模拟电路与逻辑和电源噪声的隔离。开关电容设计允许在整个工作温度范围内实现低误差的转换，TLC2543转换时间为10us，具有内部采样与保持、片内系统时钟、单极性或双极性输出运用、可编程MSB或LSB在前以及可编程的掉电(低功耗)方式等特点。TLC2543可通过对输入寄存器中数据长度编程，选择8、12或16时钟长度的输入序列。从而实现串行8、12或16位长度的数据输出。因为转换器具有12位的分辨率，建议选12位的数据长度。本系统中应用的也是12位数据长度方式。

TLC2543的引脚功能如下：

- 1) AIN0~AIN10: 模拟量输入端，11路输入信号由内部多路器选通；
- 2) CS: 片选端。在CS端由高变低时，内部计数器复位。由低变高时，在设定

的时间内禁止DATAINPUT和IO CLOCK;

3) DATA INPUT: AD转换结果的三态串行输出端。CS为高时处于高阻状态,CS为低时处于激活状态;

4) DATA OUTPUT: AD转换结果的三态串行输出。CS为高时处于高阻状态,CS为低时处于激活状态;

5) GND: 地, GND是内部电路的地回路端。除另有说明外,所有电压测量都相对GND而言;

6) IO CLOCK: 输入输出时钟端。IO CLOCK接收串行输入信号并且完成以下的四个功能: 第一是在IO CLOCK的前8个上升沿, 8位输入数据存入输入数据存储器; 第二是在IO CLOCK第四个下降沿, 被选通的模拟输入电压开始向电容器充电, 直到IO CLOCK的最后一个下降沿为止; 第三是将前一次的转换数据输出到DATA OUT, 在IO CLOCK的下降沿时数据开始发生变化; 第四是IO CLOCK最后一个下降沿, 将转换的控制信号送到内部状态控制位;

7) REF+: 正基准电压端。基准电压的正端被加到REF+, 最大输入电压范围由加于本端与REF-端的电压差决定;

8) REF-: 负基准电压端。基准电压的低端被加到REF-;

9) VCC: 电源。

可以使TLC2543工作在与SPI协议兼容的模式下, 直接与微控制器的SPI接口连接, 这样可大大简化软件编程, 方便了系统设计。TLC2543的硬件电路设计如图3.15所示。

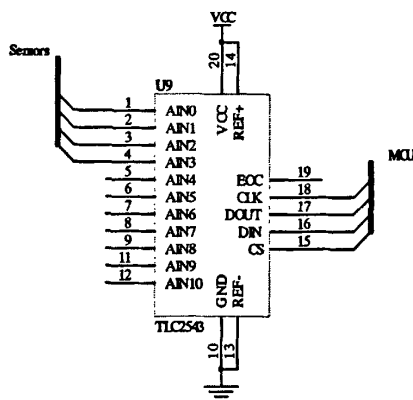


图 3.15 模数转换器 TLC2543 应用电路

## 4 系统软件设计与实际测试

硬件控制电路为系统的功能及实时性提供基本保证,系统控制策略的实现主要体现软件设计上。系统的编程采用 C 语言,避免了用汇编语言编程周期长,易出错,难以维护的弱点,整个程序可读性好,模块化的结构设计,层次清晰。

### 4.1 系统软件功能模块划分

程序的执行过程包括以下几个部分:系统的上电初始化与自校准、进行必要的寄存器、变量初值及中断向量的安装,然后进入主循环程序,响应处理系统各中断请求,系统数据处理程序等。程序大致可分为下列功能模块:

- 1) 初始化及主循环程序;
- 2) AD采样及计算程序;
- 3) 实时转速计算程序;
- 4) PWM占空比调节程序;
- 5) 故障处理程序。

### 4.2 软件功能模块设计

#### 4.2.1 初始化和主循环模块

系统硬件的初始化包括:

(1) ATmega16L 单片机的 IO 引脚配置,用到的寄存器有 IO 端口方向寄存器 DDRx、端口数据寄存器 PORTx、端口输入引脚地址 PINx(x 是指 A、B、C、D 四组 IO 端口),闲置悬空的 IO 引脚设置为上拉输入;

(2) 定时器/计数器寄存器配置,包括控制寄存器 TCCRn、数据寄存器 TCNTn、输出比较寄存器 OCRn、输入捕捉寄存器 ICRn 等;

(3) 串行通信接口 USART 寄存器配置,包括数据寄存器 UDR、控制和状态寄存器 UCSRA、波特率寄存器 UBRRL 和 UBRRH。

系统变量初始化包括:陀螺仪和加速度计信号值 AD 转换获得的角度、滤波后系统的估计角度、转把信号角度、系统给无刷电机的 PWM 信号等等。

上电初始化完成后,控制程序进入主循环,开中断。主循环程序中,系统不断检测更新车体的姿态信息,根据车体当前状态计算出适合电机驱动信号在中断程序中送给无刷电机,维持车体动态平衡。如图 4.1 所示。

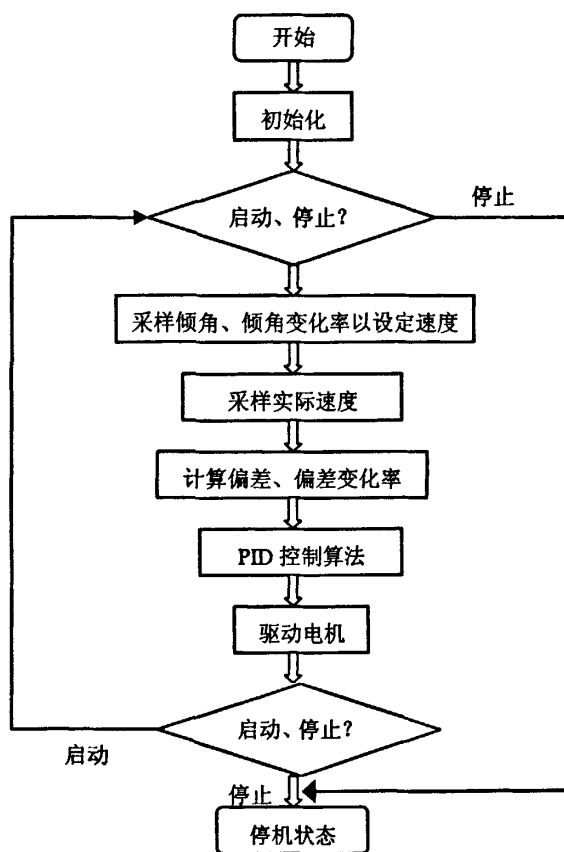


图 4.1 主循环程序流程

#### 4.2.2 AD 采样及采样数据滤波处理模块

系统设计一个函数 `GetVolt()` 完成 TLC2543 的 AD 转换功能，陀螺仪、加速度计、转把分别调用该函数获取 AD 采样值。`VoltGyro` 为陀螺仪电压信号值，`Voltx`、`Volty`、`Voltz` 分别为加速度计三灵敏轴的电压输出信号值，`VoltTurn` 为转把的电压信号值。

```
VoltGyro = GetVolt( 0x10 );
```

```
Voltx    = GetVolt( 0x20 );
```

```
Volty    = GetVolt( 0x30 );
```

```
Voltz    = GetVolt( 0x40 );
```

```
VoltTurn = GetVolt( 0x50 );
```

采样所得电压信号值分别经各自的换算关系得到标准单位的角度信号值。该数据经简易互补滤波算法处理可得到最优系统姿态角度估计。在实际完成的代步车



系统中，主程序循环周期约为 30ms，经多次实验，在  $T_s=1.5s$  可获得最佳平衡效果，此时  $a_{gyro}=0.98$ ， $a_{acce}=0.02$ 。滤波算法程序如下：

```
Angle = 0.98 * ( Angle + GyroVel * ( float ) dt * 0.000000136 );
```

```
Angle += AngleAcce * 0.02 ;
```

#### 4.2.3 PID 算法模块和电机驱动模块

系统采用变积分的 PID 控制算法，分别以  $5^\circ$  和  $10^\circ$  作为积分临界点。PID 模块部分程序流程如图 4.2 所示。

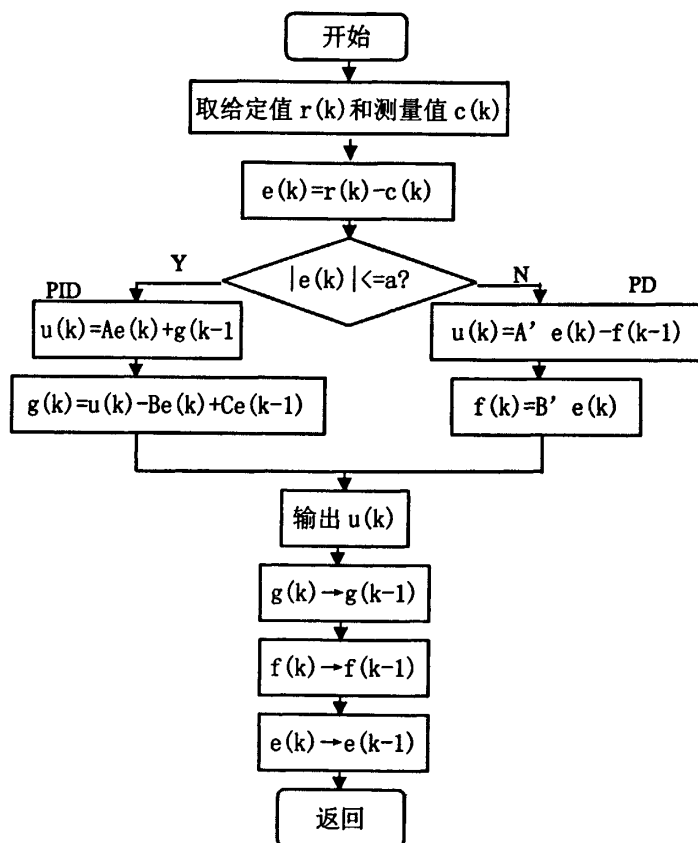


图 4.2 变积分 PID 控制方法程序框图

主要程序如下：

```
if( (Angle > -5) && (Angle < 5) )
```

```
    Angle_I += Angle;
```

```
else if( (Angle > -10) && (Angle <= -5) )
```

```

    Angle_I += ( 10 + Angle ) / 5 * Angle ;
else if( (Angle >= 5 ) && (Angle < 10 ) )
    Angle_I += ( 10 - Angle ) / 5 * Angle ;
else
    Angle_I += 0 ;
AngleD = Angle - Angle_last;
PWM_PRE = (KD * AngleD + KP * Angle + KI * AngleI) ;

```

其中 Angle 是车体角度估计值, AngleD 为角度微分量, AngleI 为角度积分量, KD 为微分系数, KI 为积分系数, KP 为比例系数。

#### 4.2.4 系统软件保护程序

在由单片机构成的微型计算机系统中, 由于单片机的工作常常会受到来自外界电磁场的干扰, 造成程序的跑飞, 而陷入死循环, 程序的正常运行被打断, 由单片机控制的系统无法继续工作, 会造成整个系统的陷入停滞状态, 发生不可预料的后果, 所以出于对单片机运行状态进行实时监测的考虑, 便产生了一种专门用于监测单片机程序运行状态的芯片, 俗称“看门狗”, 可使单片机在无人状态下实现连续工作。

看门狗, 又叫 watchdog timer, 是一个定时器电路, 一般有一个输入, 叫喂狗, 一个输出到 MCU 的 RST 端, MCU 正常工作的时候, 每隔一段时间输出一个信号到喂狗端, 给 WDT 清零, 如果超过规定的时间不喂狗 (一般在程序跑飞时), WDT 定时超过, 就会给出一个复位信号到 MCU, 使 MCU 复位, 防止 MCU 死机。看门狗的作用就是防止程序发生死循环, 或者说程序跑飞。

在系统运行以后也就启动了看门狗的计数器, 看门狗就开始自动计数, 如果到了一定的时间还不去看门狗, 那么看门狗计数器就会溢出从而引起看门狗中断, 造成系统复位。所以在使用有看门狗功能的芯片时要注意去看门狗。在主程序的运行过程中, 我们要在定时时间到之前对定时器进行复位。如果出现死循环, 或者说 PC 指针不能回来, 那么定时时间到后就会使单片机复位。

本系统中采用软件看门狗技术, 它是用软件的方法实现看门狗的功能。用定时器来对主程序的运行进行监控。对定时器设定一定的定时时间, 当产

生定时中断的时候对一个变量进行赋值，而这个变量在主程序运行的开始已经有了一个初值，设定的定时值要小于主程序的运行时间，这样在主程序的尾部对变量的值进行判断，如果值发生了预期的变化，就说明定时器中断正常，如果没有发生变化则使程序复位。

#### 4.3 系统实际测试分析

简易互补滤波的效果可以通过图 4.3 得到一个十分直观的认识。图中横轴为时间轴，纵轴为角度轴。在实际完成的代步车样机系统中，主程序循环周期约为 30ms，经多次实验，在  $\tau = 1.5\text{s}$  可获得最佳平衡效果，此时  $a_{gyro} = 0.98$ ， $a_{acce} = 0.02$ 。图 4.3 是根据实际测试中得到的数据绘制而成。

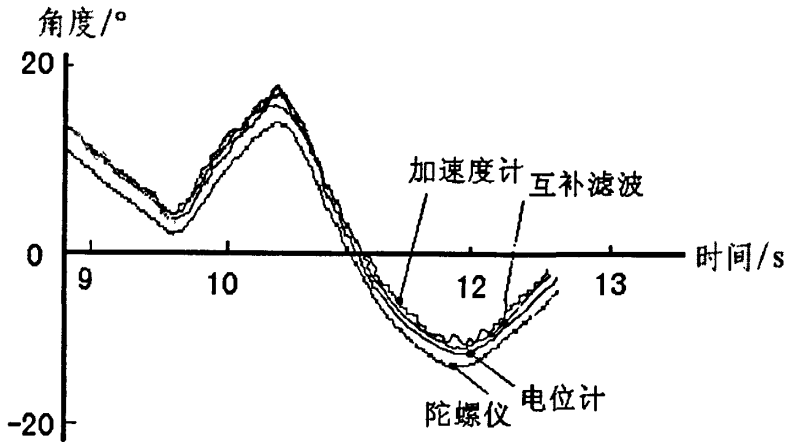


图 4.3 基于互补滤波的传感器数据融合曲线图

从图 4.3 可以看到，随着检测系统工作时间的增长，陀螺仪积分得到的角度值逐渐偏离真实角度值，尤其在大角度时更加明显，这是陀螺仪积分的漂移造成的；加速度计输出的角度值在有些地方存在快速的微小波动，这增加了姿态检测的不稳定性。采用简易互补滤波对两传感器进行数据融合后，两个问题都得到了较好的解决，滤波后的角度估计值已十分接近由电位计测量得到的真实角度值，角度曲线也变得平滑了。可见，该滤波方法非常有效地融合了两个传感器的数据。

## 5 结束语

单轴双轮自平衡代步车是轮式移动机器人的重要分支，也是一种全新的、有着重大理论变革的代步工具。由于它的行为与火箭飞行以及两足机器人行走有很大的相似性，因而对其进行研究具有重要的理论和实践意义。而代步车结构简单、移动轨迹灵活易变等优点，使其在场地面积较小或要求灵活运输的场合十分适用，作为一款节能环保的电动车，也为未来环保轻型车的发展提供了一种新的思路。

本文以单轴双轮自平衡系统为研究对象，对其传感器、传感器数据融合方法、系统控制器、PID 电机控制算法等进行了研究。本文主要完成了以下工作：

1) 对系统中用到的惯性传感器陀螺仪和加速度计进行了详细介绍，并分别对其采样所得数据进行了分析，通过简易互补滤波算法进行了数据融合，得到一个最优的车体姿态近似值；

2) 对 PID 控制方法进行了详细的研究和介绍，把变积分 PID 控制方法应用在自平衡车系统中，有效的改善了电机控制的效果，为实现系统的稳定控制做好了准备；

3) 详细介绍了控制器的硬件设计和软件设计，分析了各个控制模块的具体功能及其实现方法；

4) 通过系统的实际测试应用，表明运用互补滤波算法对传感器进行数据融合所得到的结果是切实有效的，明显提高了动态环境下的姿态检测精度，以达到整车系统精确控制的要求。

## 参考文献

- [1] 袁泽睿. 两轮自平衡机器人控制算法的研究. 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文. 2006.6:2~15
- [2] 陈亮. 差速转向轮式移动机器人的导航信号检测与定位研究. 西安理工大学硕士学位论文. 2005:3~4
- [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. 2001.3:1~2
- [4] 黄永志, 陈卫东. 两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现. 机器人 2004, 26(1): 40~44.
- [5] 李红美, 李智, 高飞. 平衡的杰作—赛格威 HT 两轮平台电动车. 电器工业, 2002, 6: 19~21.
- [6] 曹彬. 数字式 PID 控制算法在直流无刷电机中的应用. 江苏电器. 2007 增刊: 1~2
- [7] 高勇, 周忠海, 张锡阳, 廉月仙, 张照文. PID 算法在直线电动机控制中的应用研究. 中国水运. 第 5 卷第 3 期 2007 年 3 月: 2~3
- [8] 陶永华. 智能控制技术与应用.[M]. 基础自动化. 1997.4.3.
- [9] 山田博著. 小型精密电机的基础和应用. 北京: 机械工业出版社. 1988.
- [10] 祝轩, 侯榆青, 彭进业, 李岩, 吴涛. 基于单神经元 PID 控制器的闭环控制系统. 西北大学学报(自然科学版). 2004 年 8 月第 34 卷第 4 期: 1~3
- [11] Kim Gauen, Jade Alberkrack. Three piece solution for brushless motor controller design EJ3.
- [12] 赵杰, 王晓宇, 秦勇, 蔡鹤皋. 基于 UKF 的两轮自平衡机器人姿态最优估计研究. 机器人. 2006 年 11 月. 第 28 卷第 6 期: 1~3
- [13] 陈杨钟, 刘士荣, 俞金寿. 基于非线性滤波的移动机器人位姿估计. 华东理工大学学报(自然科学版). 2007 年 8 月: 1~3
- [14] 毕贞法, 邓宗全. 两轮并列式月球车的性能及其稳定性分析. 哈尔滨工程大学学报. 第 27 卷第 4 期 2006 年 8 月: 2~3
- [15] 王玫, 王永泉, 张炎华. 自适应滤波器在微型姿态确定系统中的应用. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版). 第 22 卷第 2 期 2006 年 4 月: 2~3
- [16] SHUSTER M D. A survey of Attitude Representation[J]. the journal of the Astronautical Science, 1993, 41(4): 439 - 517.
- [17] YANG Y. Tightly Integrated Attitude Determination Methods for Low Cost Inertial Navigation; Two Antenna GPS and GPS Magnetometer [D]. California: Dept. of Electrical Engineering, University of California, Riverside, CA June, 2001.
- [18] 杨理践, 尹增亮, 高松巍. 组合导航系统在管道地理位置测量中的应用. 沈阳工业大学学报. 第 28 卷第 4 期 2006 年 8 月: 2~3
- [19] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社. 2001

- [20] 丛爽, 李泽湘. 实用运动控制技术. 电子工业出版社
- [21] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社. 2001
- [22] 王积伟, 陆一心, 吴振顺. 现代控制理论与工程[M], 高等教育出版社. 2003. 2.
- [23] 尔桂花, 窦日轩. 运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社. 2002.
- [24] 晁盛远, 王凯, 刘富勇. 直流无刷电机系统的建模与仿真. 计算技术与自动化. 第27卷第2期2008年6月
- [25] 李小艳. PWM 控制技术在直流无刷电机调速系统中的应用. 火控雷达技术. 2006 年 12 月. 第 35 卷
- [26] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2002
- [27] 谢运祥. IR2130 驱动器及其在逆变器中的应用. 微电机. 2001 年第 34 卷第二期.
- [28] 毕庆, 张纯江, 闫朝阳. 高性能六输出 MOS 栅极驱动器 IR2130 及应用. 信息技术. 2000 年第 3 期: 2~3
- [29] 曹任贤, 茆美琴, 许沐华. 六输出高压驱动器 IR2130 的应用. 国外电子元器件. 1996 年第 9 期: 2~3
- [30] 王巍, 徐长智, 赵采凡. 陀螺加速度计输出装置设计与测试. 导弹与航天运载技术. 1995.3: 1~3
- [31] 沙占友, 王彦朋, 张永昌. 单片偏航角速度陀螺仪的原理与应用[J]. 传感器世界. 2004 年 09 月.
- [32] 韩宏, 吴嘉澍. 基于加速度计的数字式倾角仪的设计[J]. 传感器技术. 2005.24(4): 48~50
- [33] 毛强. 基于 MEMS 技术的倾角传感器的研制[J]. 计算机测量与控制. 2006.14(10): 1428~1430
- [34] 苏中, 李擎. 线加速度计的技术与发展综述. 传感器世界. 1995.9.
- [35] Data Sheet.  $\pm 300^\circ/\text{sec}$  Yaw Rate Gyro with SPI Interface. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADIS16100.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16100.pdf)
- [36] Data Sheet.  $\pm 1.5\text{g}$ - $6\text{g}$  Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer. [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7260QT.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf)
- [37] 陈亮, 黄玉美, 林义忠, 史恩秀, 高峰. 陀螺仪角速度的检测与处理[J]. 传感器与微系统. 2006.25(4): 58~59
- [38] 秦勇, 臧希喆, 王晓宇, 赵杰, 蔡鹤皋. 基于 MEMS 惯性传感器的机器人姿态检测系统的研究[J]. 传感技术学报. 2007.20(2): 298~301
- [39] Albert-Jan Baerveldt, Robert Klang. A Low cost and Low weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter //Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Engineering Systems[C]. Sweden, 1997: 391~395
- [40] 孙华, 陈俊风, 吴林. 多传感器信息融合技术及其在机器人中的应用. 传感器技术. 2003.22
- [41] Bauzil G, Briot M, Ribes P. A navigation subsystem using ultrasonic sensors for the mobile

- robot Hilare [ A ] . 1st Int Conf on Robot Vision and Sensory Control[C] .  
tanford2upon2Avon ,U K,1981 :47 - 58.
- [42] Alonzo Kelly. Adaptive prediction for autonomous vehicles [ R ] .Technical Report ,  
CMU2RI2TR294218 , CS of CMU , 1994 : 1 -30.
- [43] 高勤, 李志强, 都学新.一种新型自适应卡尔曼滤波算法.现代雷达, 2001.12:1~3
- [44] DeLuca A , Oriolo G, Samson C. Robot motion planning and control [ A ] . Laumond J2P.  
Feedback Control of a Nonholonomic Car2like Robot [M] . [http :// www. laas. fr/ ~jp1/](http://www.laas.fr/~jp1/book2toc.html)  
book2toc. html , Springer2Ver2 lag , 1998.
- [45] The Balance Filter. [web.mit.edu/first/segway](http://web.mit.edu/first/segway).
- [46] 孙环忠. 客车外摆门控制系统研究与开发.东南大学硕士学位论文.2004.3:19~21
- [47] Atmel. 具有 16KB 系统内可编程 Flash 的 8 位微控制器数据手册
- [48] 包国彬, 张建民, 刘赢. 单片机复位电路的设计与分析.光电技术应用.第 20 卷第 3  
期.2005.6: 3~4
- [49] 袁旭军, 庄松林. 单片机复位电路的可靠性分析.电子技术应用.2002 年第 11 期:2~3
- [50] 史艳琼, 杨国诗. 常见的几种单片机复位电路分析.淮南师范学院学报.2004 年第 3 期第 6  
卷:2~3
- [51] 史艳琼, 杨国诗. 常见的几种单片机复位电路分析. 淮南师范学院学报. 2004年第3期第6  
卷(总第25期): 1~2
- [52] 黎晖, 魏光辉, 汤小慷. 单片机复位电路的可靠性与抗干扰分析.兵工自动化.2007.第二  
十六卷第二期: 1~3
- [53] 张军涛. 单片机复位电路的设计探讨.工业科技. 2004 年(第 33 卷)第 4 期: 1~3
- [54] TLC2543 datasheet. Texas Instruments.
- [55] 张智辉, 丘春玲, 田地. 12 位 A / D—TLC2543 与 87C51 的接口应用.测控自动化.2004  
年第 20 卷第 4 期:1~2
- [56] 张秀松, 顾家蓓, 范美芳. AT91RM9200 与 TLC2543 的接口应用.福建电脑.2007 年第 3  
期:1~2
- [57] 沈志刚, 唐文彦, 张军. TMS320VC5402 与 TLC2543 的接口设计.电子技术.2002 年第 3  
期:2~3
- [58] 邓勇, 刘琪. 串行 AD 转换器 TLC2543 与 TMS320C25 的接口及编程.微处理机.第 1  
期.2000 年 2 月:1~2
- [59] SP485R datasheet. Sipex: 1~5
- [60] 游永健. RS-485 总线在电力数据采集系统中的应用.电力电子.2006 年第 6 期: 1~3
- [61] 赵蕾, 石磊. 门禁系统的 RS422 / RS485 总线解决方案.单片机与嵌入式系统应用.2008  
年第 9 期:1~2
- [62] 梁建军, 宿德平. RS485 总线接口在测井仪中的应用.石油仪器.2008 第 22 卷第 3 期:3~4

- [63] 盛琥, 李春生. 基于 485 总线的温度监控系统设计.舰船电子工程.2008 年第 2 期:2~3
- [64] 胡宏亮, 刘敬彪, 章雷挺, 沈炜.基于 C8951F020 的生物取样监控系统设计.计算机系统应用.2008 年第 9 期:2~3
- [65] 衣磊, 谭跃刚, 陈国良. 基于 RS485 总线的生箔机控制系统设计.机械与电子.2008 (9): 1~3
- [66] 赵孟文, 袁朝辉. 实时控制中的多串口通信技术. 西安航空技术高等专科学校学报. 第 26 卷第 5 期 2008 年 9 月:2~3
- [67] 王效杰. 基于变结构控制的两轮自平衡小车系统设计与实现.西安电子科技大学硕士论文.2006.1:5~6
- [68] 蔡侨伦. DSP 主控之两轮机器人平衡与两轮同步控制.台湾国立中央大学硕士论文.2004



## 致 谢

感谢程凯老师三年来对我的悉心指导，程老师不仅在专业技能上不遗余力地言传身教，更加从生活上对学生关怀备至。三年的相处，程老师身上认真负责和精益求精的工作态度，都让我受益匪浅，这必将深刻地影响我整个工作生涯。感谢在程老师的帮助下，我们获得的一个个实践机会，让我的专业技能和动手能力得到了极大的提高。

感谢郑荣儿老师，她一丝不苟的治学态度和平易近人的为师之道给我留下深刻印象。她身上所显现出来的为人处事的方式、做人治学的道理，使我受益良多。

实验室的杨江波、洪南、沈铭、赵希勇等以及已经毕业的师兄师姐们，都给予了我很多的关心和帮助，大家既是工作、学习伙伴，也是生活上的朋友，在此一并表达谢意。

感谢我的家人，你们是我不断前进的动力，使我所做的一切事情都有了更深一层的意义。

## 作者个人简历

张吉昌，1982 年 12 月 01 日出生于山东省德州市。

2001 年 9 月考入中国矿业大学应用物理学专业，2005 年 7 月本科毕业获得理学学士学位。

2006 年 9 月考入中国海洋大学信息科学与工程学院光学工程专业攻读硕士学位至今。

## 发表的学术论文

- [1] 张吉昌, 程凯, 郑荣儿. 单轴双轮自平衡车姿态检测方案设计. (已录用, 《中国海洋大学学报》自然科学版, 2009. 6)

# 单轴双轮自平衡代步车的研究与设计

作者：[张吉昌](#)  
学位授予单位：[中国海洋大学](#)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1503662.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1503662.aspx)