

大连理工大学

硕士学位论文

电动摩托车无刷直流驱动电机的控制方法

姓名：邹喜

申请学位级别：硕士

专业：电机与电器

指导教师：孙建忠

20070618

摘 要

电动摩托车具有零排放、低噪声等优点，是真正的绿色环保轻型交通工具，它以方便、快捷等特点被越来越多的人所接受，成为大中城市公共交通的理想补充。而无刷直流电动机以其控制简单、可靠性高、输出转矩大等优点，被大量地用作电动摩托车驱动电机。本文主要研究基于 AVR 单片机的电动摩托车控制技术。

首先，分析了电动摩托车的发展趋势，以及无刷直流电动机能在电动摩托车驱动领域得到广泛应用的原因，并探讨了电动摩托车无刷直流驱动电机的控制方法。

其次，在分析无刷直流电动机工作原理的基础上，构造了无刷直流电动机的数学模型，确立了通过 PWM 调节改变电枢电压的大小来调节转速的控制策略。

第三，采用 ATMEL 公司的 ATmega88 单片机为控制核心，设计了包括电流检测与保护、位置信号检测、功率开关管驱动、电源转换和电压采样与欠压保护等一系列硬件电路，充分利用了 ATmega88 单片机成本低、功能丰富、运算能力强等优点，简化了控制电路，提高了控制系统的可靠性，降低了控制成本。

第四，采用 C 语言编写了控制程序，完善了控制功能，实现了软、硬件控制方法的结合。使用 ICC-AVR 集成开发环境和 SL-ISP 在线编程，降低了开发成本；采用模块化设计方法设计控制程序，提高了程序的可维护性。完成的功能模块主要包括启动与换相模块、电动机转速调节模块、过电流与堵转保护模块、欠电压保护模块和定速巡航模块等。

最后，对开发的控制系统进行了调试，并对实验结果进行了分析。结果表明，控制系统运行可靠、实时性好，证明 ATmega88 单片机适合用作电动摩托车驱动电机的控制芯片。

关键字：电动摩托车；无刷直流电机；AVR 单片机；PID 算法

Control of Brushless DC Motor for Electric-Motorbike

Abstract

Electric-motorbike has been broadly adopted as complementation for public traffic in big cities, for its convenience and rapidness. Besides, electric-motorbike has zero release and low noise, helpful to environment protection and peaceful life. It deserves recommendation. And Brushless DC Motor (BLDC Motor) is largely used for Electric-motorbike driving, as it is simple to control, highly reliable and provides high output torque.

Firstly, the developmental trend of electric-motorbike is discussed, the reasons that BLDC motor largely used in electric-motorbike driving are explained, and controlling means of electric-motorbike are discussed, too.

Secondly, based on the working principle of BLDC motor, the mathematical model is established and the strategy for adjusting speed by changing the armature voltage through PWM is confirmed.

Thirdly, Using ATmega88, which is produced by ATMEL Corporation, as the core of the control system, design a series of circuits, such as current detecting and protecting circuit, position signal detecting circuit, MOSFET driving circuit, power converting and sampling circuit, under-voltage protecting, etc, fully upon the advantages of ATmega88, like low cost, abundant functions and strong operating ability, which simplifies the circuit, enhances the reliability and reduces the cost of the system.

Fourthly, Compose program with C language, optimizes the control function and merges the controlling means both by program and circuit. Use ICC-AVR integrated development environment and SL-ISP on-line programming, reducing the cost of development. Design the program into modules, enhancing its readability. The accomplished modules are start-up and phase-changing module, speed adjusting module, over-current protection module, under-voltage protection module and stable-speed-travel module.

Finally, debug the control system and analyze the results. It indicates that the system works effectively. ATmega88 is proved applicable to be used as the central chip on the control system of BLDC motor for electric-motorbike.

Keywords: Electric-motorbike; BLDC; AVR-MCU; PID

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。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，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 郑磊 日期： 2007.6.17

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 邹喜

导师签名： 孙建

2007 年 6 月 17 日

1 绪论

1.1 课题的背景与意义

目前,环境问题的紧迫性已受到越来越广泛的关注,环境保护和能源节约已成为新世纪全球两大重点问题,各国政府都在不遗余力地采取措施克服工业发展给环境和能源造成的破坏。

汽车工业的发展加速了这一现代化交通工具进入普通家庭的步伐,然而大量化石燃料的使用,造成了全球气温升高和空气污染等问题,也使石油资源的消耗量大幅增加。资料表明,按照目前的使用速度,全世界的石油蕴藏量只能维持不到 100 年。而作为最主要的战略资源,石油的保有量是各国政府着力解决的问题,如果石油使用过多地依赖进口,必然在战略上受制于人^[1]。

根据国务院与清华大学 2001 年的一份报告显示,尽管目前我国仍然是一个以燃煤为主要能源构成的国家(燃煤占燃烧使用能源的 70%~75%),空气污染仍以煤烟型污染为主,但随着我国经济的持续高速增长和城市化进程的逐步加快,机动车保有量大幅增加,因此造成的环境污染也越来越严重。在抽样调查的北京、上海、广州等几个大城市,燃煤污染已基本上得到了控制,但是以机动车排放污染为特征的光化学烟雾污染逐步加重,代表机动车空气污染特征的氮氧化物和臭氧超标严重,空气质量严重恶化,出现煤烟与机动车尾气混合污染。

因此,寻找低排放或者零排放的技术和可再生资源称为各大公司争相投入的一个课题。代用燃料和使用新型能源的交通工具的出现正顺应潮流^[2]。

摩托车作为一种现代化的交通代步工具,具有方便、快捷等优点,但是随着摩托车保有量的增加,城市环境污染和能源紧缺等问题变得日益严重。在这种情况下,摩托车在大中城市的发展受到了很大限制,于是电动摩托车的推广应用和技术开发便提上了议程。

以蓄电池作为能源的电动摩托车具有操作简单、骑乘舒适、维护方便、污染小和噪声低等优点。既可以作为普通市民上下班的代步工具,又可以作为老年人的休闲用车,是名副其实的绿色环保交通工具,也是大中城市公共交通必不可少的补充。

在人口众多的亚洲国家,交通状况普遍不够良好,而且经济条件大多不能满足汽车的普及,自行车、摩托车等轻便的交通工具仍然占主要地位。随着电源技术的飞速进步,用蓄电池作为驱动能源的电动自行车、摩托车等得到了应用。这类轻型无污染的“绿色交通工具”越来越得到人们的青睐。尤其是电动摩托车集合了普通燃油摩托车速度快和

电动自行车轻便安全的特点，将具有越来越广阔的市场前景。

与传统的燃油摩托车相比，电动摩托车具有很多优点：一是零排放、低噪声。电动摩托以电作为驱动能源，运行时不排出任何废气。而且，由于没有发动机工作时的噪声，其整体噪声也明显低于燃油摩托车。这对于注重环境保洁与安静的未来社会来说，无疑是一种值得推广的交通工具。

1.2 电动摩托车的发展概况与趋势

1.2.1 电动摩托车的相关技术

与电动摩托车相关的技术主要有两方面，一是蓄电池技术，二是电动机技术。

电池是电动摩托车的核心，其发展程度直接决定了电动摩托车的技术水平。近十几年来，二次电池技术发展速度非常迅速，密封免维护铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、高分子聚合物锂离子电池、锌空电池、燃料电池等可谓齐头并进，有的在制造工艺上有重大改进，有的在材料特性上取得较大发展，有的在研究上出现重大突破，总之让人们看到了美好的前景。现阶段，适合电动摩托车使用的电池主要有3种：铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池^[1]。

电动机是电动摩托车的另一个重要部件，目前在电动摩托车驱动领域，直流电机的应用范围比交流电机要广泛，主要有直流电动机和开关磁阻电动机两种。

直流电动机电动摩托车所使用的直流电动机大多是高效稀土永磁电动机，其中又分为有刷高速电机、无刷低速电机和有刷低速电机3种。

有刷高速电机一般为盘式转子电机，电机的输出转速一般在3000r/min以上，与减速器和超越离合器及壳体一起组成电动轮毂。这种电机控制系统简单、成本低、过载能力强、系统可靠性好，但是由于需要换向器（整流子）和电刷，存在着机械磨损，影响了电机的效率。

无刷低速电机没有电刷和传动齿轮，所以不存在电刷的机械磨损，运行中几乎没有噪音。与有刷高速电机相比，无刷低速电机的转矩较小，爬坡能力弱。另外，由于无刷低速电机绕组电阻较大，功率损耗也大，使得电机效率比较低。因此，采用新型功率电子器件和新型控制技术，进一步提高无刷低速电机的性能，仍将是无刷直流电动机的发展趋势。

有刷低速电机技术最近发展比较快，它的工作原理与低速无刷电机相似，但以电刷代替了无刷低速电机的电子换向电路，所以对控制系统的要求大大降低，由于它是在低转速状态下工作，所以电刷使用寿命延长。

1.2.2 无刷直流电动机控制技术

可靠性高,实时性好是对电动机控制系统的基本要求。

最初的电动机控制都是采用分立元件的模拟电路,后来随着电子技术的进步,基础电路甚至电机控制专用集成电路被大量在电机控制中引用,这些电路大多为数模混合电路,它大大提高了电机控制器的可靠性、抗干扰能力,又缩短了新产品的开发周期,降低了研制费用,因而近年来发展很快。

目前国内外对无刷直流电机控制方法的研究已趋成熟^[4],针对无刷直流电机的专用集成控制器也早已投放市场,目前世界上几乎所有的大半导体厂家都提供自己的电机控制专用集成电路。各厂家之间无统一标准,因而产品极其分散,又不断有新产品出现,为满足一次设计的需求,往往要花很大的力气和时间去收集整理资料。当前电动机产品越来越趋于多样化、复杂化,现有的专用集成电路难以能满足苛刻的新产品开发要求。

无刷直流电机控制器可采用电机控制专用 DSP (如 TI 公司的 TMS320C24X 系列、AD 公司的 ADMCxx 系列),也可采用单片机+无刷直流电机控制专用集成电路的方案。前者集成度高,电路设计简单,运算速度快,可实现复杂的速度控制算法,但由于 DSP 的价格高而不适合于小功率低成本的无刷直流电机控制器。后者虽然运算速度低,但只要采用适当的速度控制算法,依然可以达到较高的控制精度,适合于小功率低成本的无刷直流电机控制器^[5]。

ATMEL 公司的 AVR 单片机是一种高性能的单片机。与其他单片机相比,AVR 采用哈佛结构(并行体系结构,不同于传统的冯·诺依曼结构)、流水线操作等技术,因而多应用在寻址能力、计算速度等方面要求比较高的场合,所以电机控制可以使用 AVR 单片机。本文用于设计电动摩托车无刷直流驱动电机的控制器的主控制芯片,就是 AVR 系列的 ATmega88 单片机。

1.3 本论文的主要工作

本论文结合电动摩托车无刷直流驱动电机的结构特点,设计控制系统的硬件电路,使用 ATMEL 公司的 ATmega88 单片机作为核心控制器件,结合 C 语言编程,使受控电机实现以下功能:

1) 启动与换相:在电动机上电后实现快速平稳启动,保证电动机换相的准确性和连续性,使电动机运行在稳定状态;

2) 速度调节:通过电动车手柄给定的速度要立即体现到电动机转速上,对速度调节的要求为快速响应,准确定位;

3) 欠电压、过电流(堵转)保护:电机运行过程中有可能出现堵转现象(比如在爬行

坡度较大的路面或者负载超过电机承受范围),引起主电路电流过大,这时应该给予电路保护暂停相关器件的工作;另外由于电动车使用的是车载蓄电池,长时间使用会造成电源供给不足,同样也应该暂停电机工作,待电池充电以后再开启。

(4) 刹车:电动摩托车的制动系统有别于机械制动,这一功能也可以通过电路控制来实现。

2 无刷直流电动机的数学模型

2.1 无刷直流电动机的工作原理

图 2.1 为无刷直流电动机系统的工作原理图^{[6][7]}。电动机主体的电枢绕组为三相星形连接，位置传感器与电动机本体同轴，控制电路对位置信号进行逻辑变换后产生驱动信号，驱动信号经驱动电路隔离放大后控制逆变器的功率开关管，使电动机的各相绕组按一定的顺序工作。

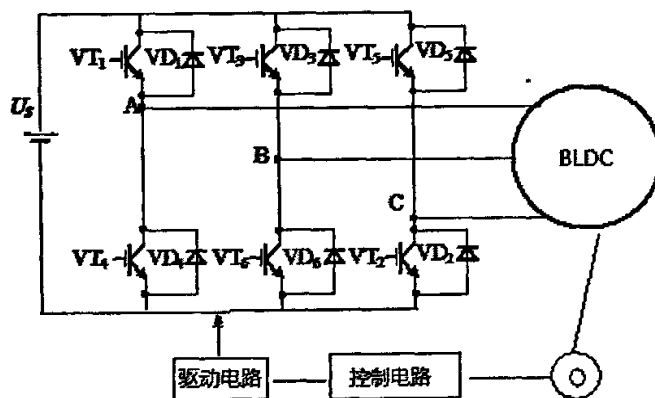


图 2.1 三相无刷直流电动机系统

Fig.2.1 Three-phase BLDC Motor System

2.2 三相无刷直流电动机主电路简介

目前，无刷直流电动机的电机本体大多采用三相对称绕组，由于三相绕组既可以是星形连接，也可以是角形连接，同时功率逆变器有桥式和非桥式两种，因此，无刷直流电动机的主电路主要有星形连接三相半桥式、星形连接三相桥式和角形连接三相桥式三种形式。

三相半桥主电路虽然结构简单，但电机本体的利用率很低，每相绕组只通电 $1/3$ 周期， $2/3$ 周期处于关断状态，绕组没有得到充分利用，在整个运行过程中转矩脉动也比较大。

图 2.2 所示为一种常见的星形连接三相桥式主电路：

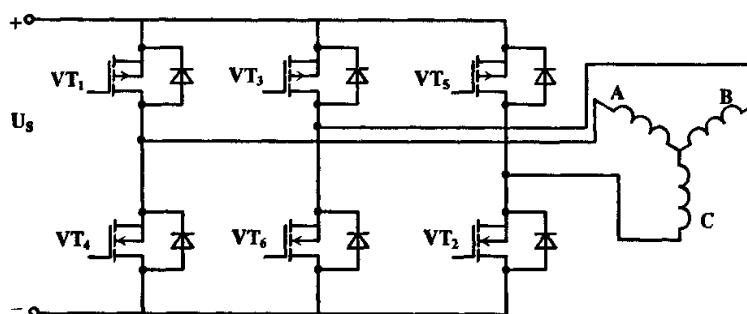


图 2.2 星形连接三相桥式主电路

Fig.2.2 Star Connection Three-phase Bridge Rectifier

图中，上桥臂 3 个开关管 VT₁、VT₃、VT₅ 是 P 沟道功率 MOSFET，栅极电位低电平时导通；下桥臂 3 个开关管 VT₂、VT₄、VT₆ 是 N 沟道功率 MOSFET，栅极电位高电平时导通。这种逆变器电路利用 P 沟道 MOSFET 和 N 沟道 MOSFET 导通规律的互补性，简化了功率开关管的驱动电路。位置检测器的 3 个输出信号通过逻辑电路控制这些开关管的导通和截至，其控制方式有两种：二二导通方式和三三导通方式。

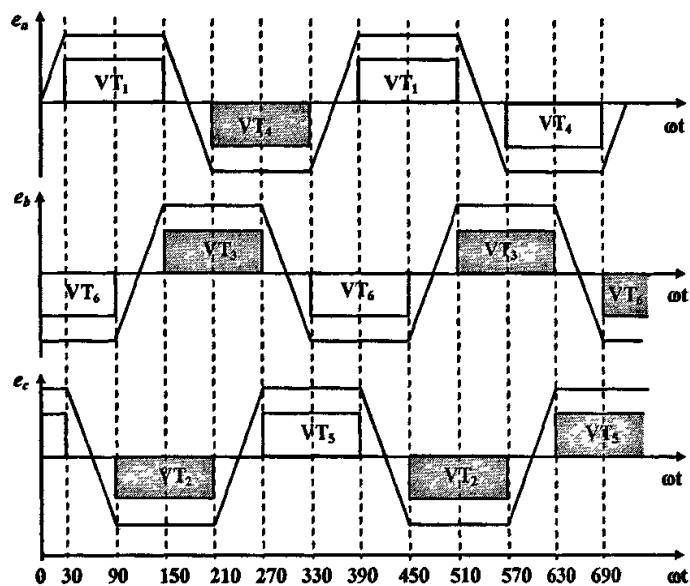


图 2.3 三相绕组的反电势波形及其二二导通方式下的开关管导通规律

Fig.2.3 Three-phase-windings' Back Elector-motive Force

(1) 二二导通方式

二二导通方式是指在任一瞬间使两个开关管同时导通。这种工作方式又称为两相导通星形三相六状态方式。电机的瞬时电磁转矩可由电枢绕组的电磁功率求得：

$$T_e = \frac{E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c}{\Omega} \quad (2.1)$$

式中 E_a 、 E_b 、 E_c ——A、B、C 三相绕组的反电动势；

i_a 、 i_b 、 i_c ——A、B、C 三相绕组的电流；

Ω ——转子的机械角速度。

可见，电磁转矩取决于反电动势的大小。在一定的转速下，如果电流一定，反电动势越大，转矩越大。

下图给出了无刷直流电动机三相绕组的反电动势波形及其二二导通方式下的开关管导通规律。为了使电机获得最大转矩，在二二导通方式下，开关管的导通顺序应为： $VT_1VT_2 \rightarrow VT_2VT_3 \rightarrow VT_3VT_4 \rightarrow VT_4VT_5 \rightarrow VT_5VT_6 \rightarrow VT_6VT_1$ 。在这种工作方式下，每个电周期共有 6 种导通状态，每隔 60° 电角度工作状态改变一次，每个开关管导通 120° 电角度。

由此可见，如果忽略换相过程的影响，当梯形波反电动势的平顶宽度大于等于 120° 电角度的时候，电机的转矩脉动为 0。因此，无刷直流电动机在设计时，应尽可能增大磁极的极弧系数，以获得足够宽的磁密分布波形，从而得到平顶部分较宽的反电动势波形。

(2) 三三导通方式

三三导通方式是指在任一瞬间使三个开关管同时导通。如图 2.4 所示，各开关管导通顺序为 $VT_1VT_2VT_3 \rightarrow VT_2VT_3VT_4 \rightarrow VT_3VT_4VT_5 \rightarrow VT_4VT_5VT_6 \rightarrow VT_5VT_6VT_1 \rightarrow VT_6VT_1VT_2$ 。

由此可见，三三导通方式也有 6 种导通状态，同样也是每隔 60° 改变一次导通状态，每改变一次工作状态换相一次，但是每个开关管导通 180° ，导通的时间增加了。

在三三导通方式下，各相绕组不是在反电动势波的平顶部分换相，而是在反电动势的过零点换相。因此，在电枢电流和转速相同的情况下，三三导通方式下平均电磁转矩比二二导通方式下要小，同时瞬时电磁转矩还存在脉动，如果假定气隙磁密在空间呈正弦分布，则合成电磁转矩是单相电磁转矩的 1.5 倍。

比较两种通电方式可见：在二二导通方式下，每个管子均有 60° 电角度的不导通时间，不可能发生直通短路故障。而在三三导通方式下，因每个管子导通时间为 180° 电角度，一个管子的导通和关断稍有延迟，就会发生直通短路，导致开关器件损坏。并且，两相导通三相六状态工作方式很好地利用了方波气隙磁场的平顶部分，使电机出力大，

转矩平稳性好。所以两相导通三相六状态工作方式最为常用。

角形连接的二二导通方式和三三导通方式分别与星形连接的三三导通方式和二二导通方式相似。所不同的是，在星形连接二二导通方式下，两通电绕组为串联；而角形连接三三导通方式下，两通电绕组为并联。

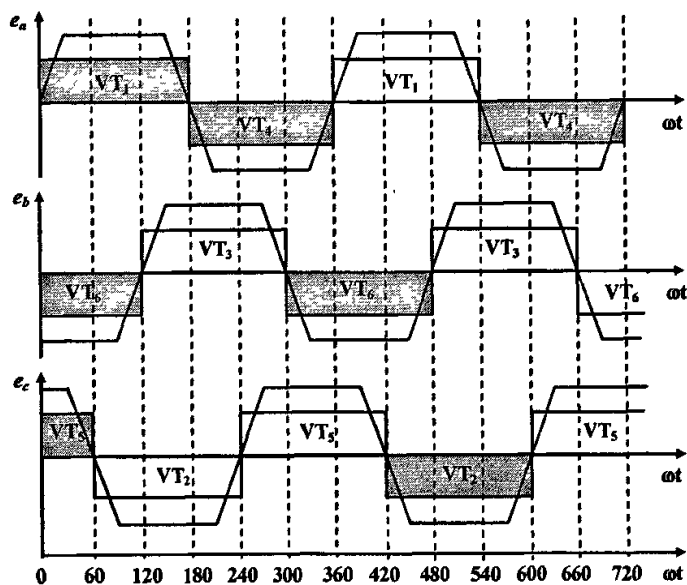


图 2.4 三相绕组的反电动势波形及其三三导通方式下的导通规律

Fig.2.4 Three-phase-windings' Back Electromotive Force

2.3 无刷直流电动机的数学模型

综合上述分析可知，两相导通星形三相六状态工作方式控制简单、性能最好，所以这种工作方式最为常用。下面就以两相导通星形三相六状态方式为例，构造无刷直流电动机的数学模型^[8]。

由于无刷直流电动机的气隙磁场、反电动势以及电流是非正弦的，采用直、交轴坐标变换已不是有效方法。因此我们直接利用电动机本身的相变量来建立数学模型。

为了简明起见，做如下假设：

- (1)电动机的气隙磁感应强度在空间呈梯形(近似为方波)分布。
- (2)定子齿槽的影响忽略不计。
- (3)电枢反应对气隙磁通的影响忽略不计。
- (4)忽略电机中的磁滞和涡流损耗。

(5)三相绕组完全对称。

由于转子的磁阻不随转子位置的变化而变化，因此定子绕组的自感和互感为常数，则相绕组的电压平衡方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

式中 u_a 、 u_b 、 u_c ——定子相绕组电压(V)；

i_a 、 i_b 、 i_c ——定子相绕组电流(A)；

e_a 、 e_b 、 e_c ——定子相绕组电动势(V)。

r ——每相绕组的电阻(Ω)；

L ——每相绕组的自感(H)；

M ——每两相绕组间的互感(H)。

由于三相绕组为星形连接， $i_a+i_b+i_c=0$ ，因此 $M i_a + M i_b + M i_c = 0$ ，所以上面的方程式可以变为：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

由此可得无刷直流电机的等效电路如图 2.5 所示。图中， U_s 为直流侧电压， $VT_1 \sim VT_6$ 为功率开关器件， $VD_1 \sim VD_6$ 为续流二极管， $L_M = L - M$ ，图中标出的相电流和相反电动势的方向为其正方向。

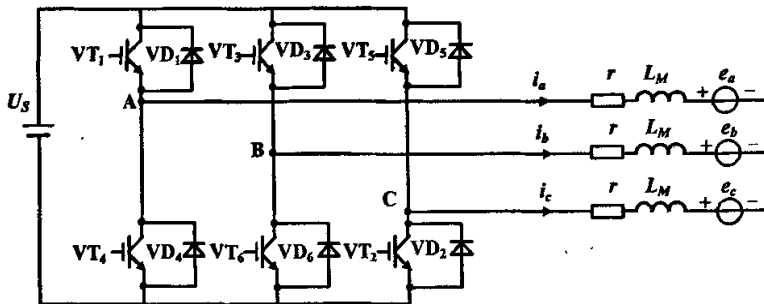


图 2.5 无刷直流电机的等效电路
Fig.2.5 Equivalent Circuit of BLDC Motor

式(2.3)所代表的是一个等价地实现相间磁路关系解耦的相电压模型。但由于电机的中性点是悬空的,各相之间仍不可避免地存在电路上的耦合关系。由于中性点电位不可直接测取,因而相电压实际上是未知量,已知量为直流侧线电压,所以该模型还不能直接求解相电流的变化规律。

对于两相导通星形三相六状态无刷直流电动机,在不考虑开关器件换流过程的理想情况下,每个元件导通 $1/3$ 周期,任何瞬间只有两个功率开关管导通。但当计及功率开关管换流过程的影响时,则每个器件的导通时间将稍大于 120° 电角度,每种运行状态中将包含只有两个功率开关管导通的单流模式及同时有两个开关管和一只续流二极管导通的换流模式。但每种状态下的两个导通模式总的延续时间仍未 $1/3$ 周期。一个完整运行周期仍有六种不同状态。

逆变器功率开关管元件的换流过程取决于电机的负载情况,其持续时间未知,需要在仿真中计算出来。稳态运行时,逆变器功率开关管将按 $VT_1 \sim VT_6$ 的顺序依次每隔 $1/6$ 周期换流一次,使得每个 60° 运行区间内系统的状态呈现某种形式的重复或对称性。因此,只要对任一个 60° 区间的运行状态进行仿真分析,就可以获得一个完整运行周期内所需的全部信息。

我们以开关管从 VT_1 、 VT_2 导通切换到 VT_2 、 VT_3 导通,即从电机 A-C 相通电换到 B-C 相通电为例来进行分析。

在换相过程中, VT_1 关断,但 A 相绕组的电流不能突变,经 VD_4 续流,形成了 A 相 \rightarrow C 相 $\rightarrow VT_2 \rightarrow VD_4 \rightarrow$ A 相的续流回路。同时, VT_2 、 VT_3 导通,形成了电源 $\rightarrow VT_3 \rightarrow$ B 相 \rightarrow C 相 \rightarrow 电源的回路。依据基尔霍夫定律,可得换相过程中的电路方程为:

$$\begin{cases} L_M \frac{di_a}{dt} + ri_a + e_a - (L_M \frac{di_c}{dt} + ri_c + e_c) = 0 \\ L_M \frac{di_b}{dt} + ri_b + e_b - (L_M \frac{di_c}{dt} + ri_c + e_c) = U_s \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

续流结束后,换相完成,电路方程变为:

$$\begin{cases} L_M \frac{di_b}{dt} + ri_b + e_b - (L_M \frac{di_c}{dt} + ri_c + e_c) = U_s \\ i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

式(2.4)和(2.5)构成了无刷直流电动机的线电压模型。考虑电路的初始条件,并利用数值方法进行方针计算,就可以得到无刷直流电动机的相电流和电磁转矩^[9]。

通过数字仿真可以得到无刷直流电动机的相电流和电磁转矩波形，但计算较复杂，且得出的控制参数与性能之间的关系也不够直观。

为了简化分析，假设不考虑开关器件动作的过渡过程，并忽略电枢绕组的电感。这样，无刷直流电动机的电压方程可以简化为：

$$U_s - 2U_T = E + 2rI_a \quad (2.6)$$

式中 U_T ——开关器件的管压降；

I_a ——电枢电流；

E ——线电动势，即电机的反电动势。

对于星形三相六状态无刷直流电机，任一时刻都有两相绕组导通，故电机的反电动势为：

$$E = 2E_m = \frac{2pW_\varphi}{15\alpha_i} \Phi_\delta n = C_e \Phi_\delta n \quad (2.7)$$

式中 C_e ——电机的电动势常数。

电枢绕组的电流为：

$$I_a = \frac{U_s - 2U_T - E}{2r} \quad (2.8)$$

在任一时刻，电机的电磁转矩由两相绕组的合成磁场和转子磁场相互作用产生，则：

$$T_e = \frac{2E_m I_a}{\Omega} = \frac{EI_a}{\Omega} = \frac{4pW_\varphi}{\pi\alpha_i} \Phi_\delta I_a = C_r \Phi_\delta I_a \quad (2.9)$$

式中 C_r ——电机的转矩常数；

Ω ——转子的机械角速度。

电机的转速为：

$$n = \frac{U_s - 2U_T - 2rI_a}{C_e \Phi_\delta} \quad (2.10)$$

空载转速为：

$$n_0 = \frac{U_s - 2U_T}{C_e \Phi_\delta} = \frac{U_s - 2U_T}{\frac{2pW_\varphi}{15\alpha_i} \Phi_\delta} = 7.5\alpha_i \frac{U_s - 2U_T}{pW_\varphi \Phi_\delta} \quad (2.11)$$

电动势系数为：

$$K_e = \frac{E}{n} = C_e \Phi_\delta = \frac{2pW_\varphi}{15\alpha_i} \Phi_\delta \quad (2.12)$$

转矩系数为：

$$K_T = \frac{T_e}{I_a} = C_T \Phi_\delta = \frac{4pW_\varphi}{\pi\alpha_i} \Phi_\delta I_a \quad (2.13)$$

2.4 本章小结

通过对无刷直流电动机三种控制电路的分析可知，在两相导通三相六状态方式下，开关管不可能发生直通短路故障。并且，这种工作方式很好地利用了方波气隙磁场的平顶部分，使电机出力大，转矩平稳性好。所以两相导通三相六状态工作方式最为常用。

无刷直流电动机与一般的直流电动机一样，具有良好的调速控制性能，可以通过调节电枢端电压实现无级调速。

3 控制系统的硬件电路

以 ATmega88 单片机为控制核心的无刷直流电动机控制系统^[10]框图如图 3.1 所示。

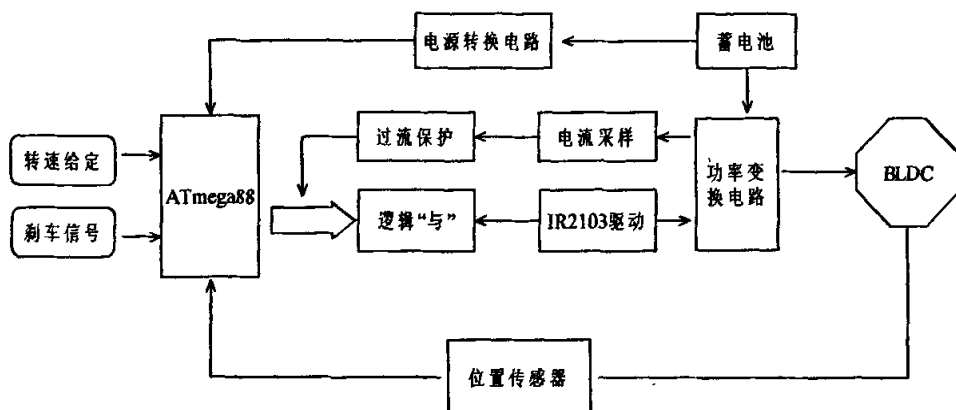


图 3.1 无刷直流电动机控制系统框图

Fig.3.1 Diagram of BLDCM Control System

手柄处得到的电压值作为给定转速，是速度环调节的依据。

刹车信号送往单片机，引起单片机中断函数运行，实现刹车。

位置传感器送回单片机的位置信号是换相的依据，指导单片机 I/O 口发出功率管驱动信号。

主电路中的电流实时监控，与 PWM 信号相“与”以便发生过电流现象时及时断开主电路，起到保护作用。

电源转换电路执行电压采样功能，判断系统是否欠电压^[6]。

3.1 ATmega88 引脚设置

ATmega88 是美国 ATMEL 公司生产的 AVR 系列单片机的一款，ATmega88 提供的功能足以满足电动摩托车驱动电机的控制要求^[11]。ATmega88 的功能引脚设置如图 3.2 所示。

引脚 1 是在调试电路中使用的复位按钮，负责在电机出现异常情况的时候重新启动控制程序，其外部连接开关按钮，在主程序中设置为低→高电平跳变引发复位的模式。在实际应用的电路图中，这个引脚不会被使用，仅仅在调试阶段的电路图中使用它。

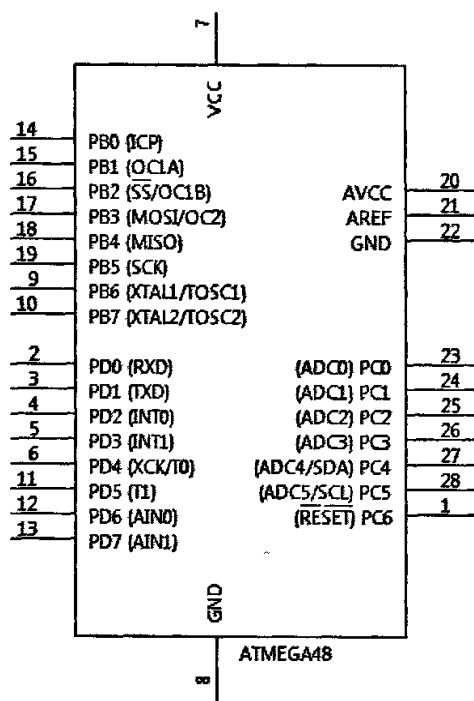


图 3.2 ATmega88 引脚功能图

Fig.3.2 ATmega88 Pins' Function Diagram

引脚 2、3、6、11、12、13，也就是 PORTD 端口的 0、1、4、5、6、7 引脚，用作输出开关管的控制信号。这六个引脚上的信号值受位置信号控制，是实现正确换相的保证。

引脚 4 接受刹车信号。

引脚 7 是单片机电源引脚，使用电源转换电路得到的 5V 电压。

引脚 9、10 间接外部晶振。

引脚 14、15、16 负责采集转子位置传感器信号，确定转子位置，提供换相依据。与前面提到的 PORTD 的六个端口保持一进一出的关系，在主程序中实现电机换相。ATmega88 的所有引脚都有复用功能，14 脚还兼用作定时/计数器 T/C1 的输入捕捉功能，即括号内的 ICP 功能。

引脚 17、18、19 在线编程时用于编程电路，将 PC 中的程序写入单片机^[12]，编程电路如图 3.3 所示：

引脚 20、21、22 为模/数转换器 ADC 的电源 AVCC、参考电压 AREF 和解耦电容的连接引脚。电路中 AREF 与 AVCC 连在一起，使用 5V 电压，ADC 内部有一个 1.1V

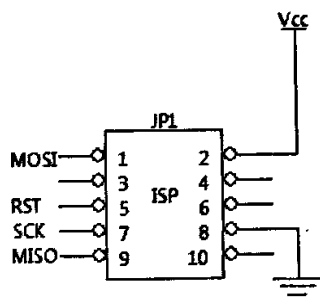


Fig.3.3 Programming Circuit

引脚 23 为手柄给定电压的采样引脚，作为调速的依据。

引脚 25 为主电路电流的采样引脚，用于判断是否需要过电流保护。

3.2 位置信号检测电路

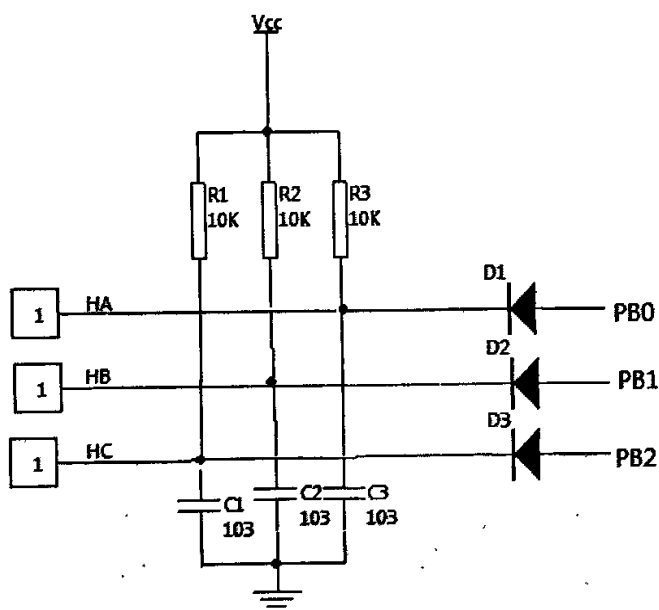


Fig.3.4 Hall Signal Sampling Circuit

本文采用的电机的 3 个霍尔元件依次相差 120° 电角度安装在定子侧，分别位于三相绕组的轴线上；电机转子每转过 60° ，其中一个霍尔元件上的信号发生一次跳变，如果用 HA、HB、HC 分别代表这 3 个霍尔信号，则 HA、HB、HC 组成的位置信号可构成 8 组状态(000-111)，其中 HA、HB、HC 同为高电平或者同为低电平的状态是不存在的，所以位置信号的实际状态共有 6 组(001-110)，分别对应于转子的 6 个位置^[13]。

在 ATmega88 单片机中，将 HA、HB、HC 3 个信号连接到 PORTB 端口的 PB0、PB1、PB2 引脚上，通过对 PORTB 寄存器中的数据作与 0x03 的“按位与运算”，可得到 6 个不同的结果，有了这 6 个值，就可以给定各个开关管的触发信号，根据需要控制其通断。霍尔信号的采集电路如图 3.4 所示：

3.3 电流检测与保护电路

电动车超负载运行(比如爬行在坡度较大的路段)时可能发生过大电流现象，长时间处于这种状态会危害电动机的使用寿命甚至直接损坏电动机，因此在出现过流时需要在控制程序中对其进行保护(软件保护)。

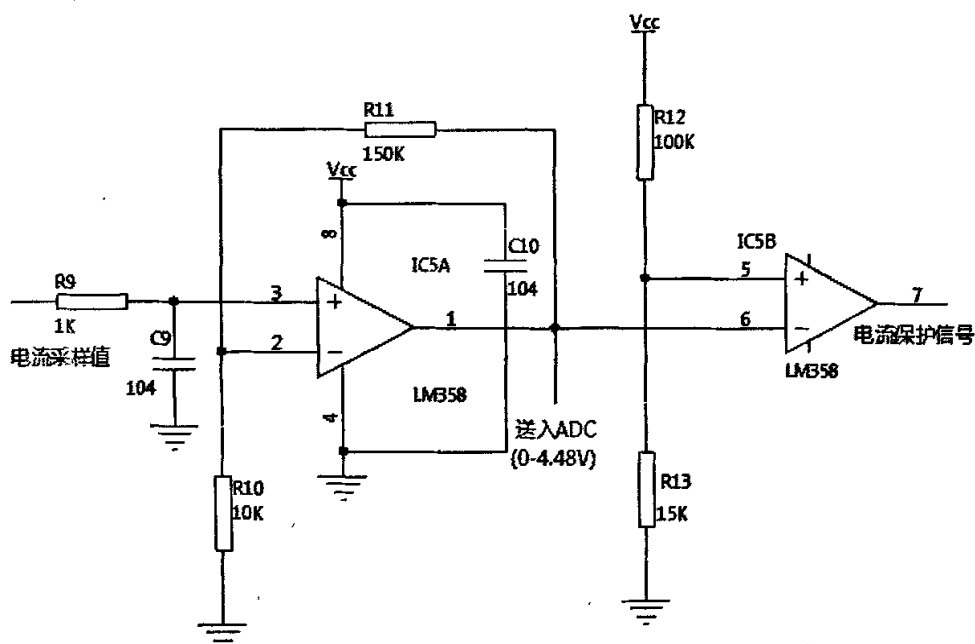


图 3.5 过流保护原理图

Fig.3.5 Over-current Protecting Schematic Diagram

根据要求,电机“过流”分两种情况,一是在电动机高速旋转时,主电路电流超过额定电流 12A 的 1.5 倍(18A);二是在电动机低速旋转时,电流大于 28A。所以在电路设计的时候引入一个“硬件过流保护模块”,当主电路的电流超过 28A 时,产生过流保护信号,关断功率开关管。

将主电路中得到的电流采样值送入 LM358 中放大,得到 0-5V 范围的值。结合图 3.10 来说:当放大器 LM358 的输入引脚 3 处的电压达到 0.28V 时(即流过主电路的电流为 28A 的时候),经过 LM358 放大 16 倍,可以在输出引脚 1 得到一个约为 4.5V 的电压,将这个电压送入 ATmega88 的 ADC 引脚(参考电压为 5V),转换为数字量后的大小约为 0x398,因此在程序中可以设置一个变量存储该 ADC 的数值,若大于 0x398 则中断单片机的工作,即实现“软件保护”。同时利用 LM358 的余下引脚接成反相比较器,当 6 脚的值大于 5 脚的参考值($V_{cc}=5V$, 5 脚电压约为 4.5V)时,7 脚输出低电平,通过 74LS11 的“与运算”后,使每相功率开关管的控制信号 HIN 都为 0,关闭所有的上桥 MOSFET,这样电机的电源供给就被切断,起到保护的作用,这是“硬件保护”。

3.4 功率开关管驱动电路

无刷直流电动机通过改变直流侧电压的大小来调节速度,在控制电路中,改变直流侧电压的大小是采用改变主电路开关管的开通、关断时间比,间接改变加在电动机定子绕组上的直流电压平均值来实现的。

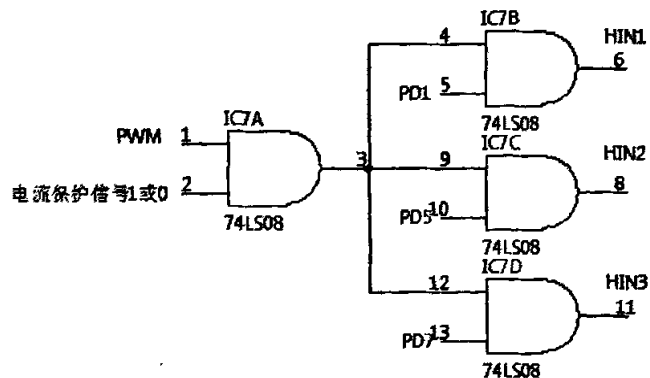


图 3.6 MOSFET 驱动信号产生电路

Fig.3.6 MOSFET Driving Signal Generating Circuit

本文设计的功率电路中,所有的开关管都采用 N 沟道金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET)P75NF75,针对这样的 MOSFET,有专门的驱动芯片比如 IR2103 控制其导通

与关断^[14]。

图 3.6 所示的电路是驱动芯片 IR2103 的输入信号产生电路。74LS08 是一个二输入四与门，输出的三个信号 HIN1、HIN2 和 HIN3 都为 IR2103 的输入信号，这个电路的作用将 PWM 信号、电流保护信号以及开关管的上桥控制信号相“与”，用 PWM 信号控制星形链接三相桥式电路的每一个上桥导通时间。

由于星形链接三相桥式电路的工作原理决定了每个导通时刻必然存在一个上桥开关管和一个下桥开关管的同时导通，这样也就让 PWM 信号控制了整个桥式电路的导通时间比。

HIN1、HIN2、HIN3 送入 IR2103 芯片中，与下桥的三个控制信号一起驱动 MOSFET，电路图如图 3.7 所示。

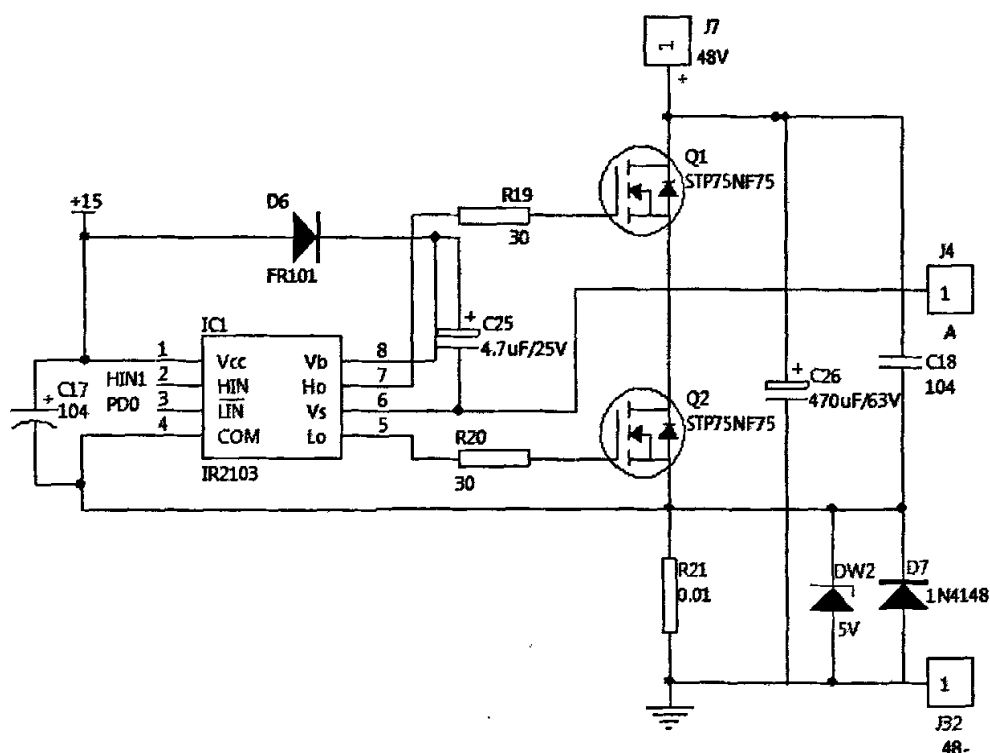


图 3.7 单相驱动电路

Fig.3.7 Single-phase Driving Circuit

IR2103 的输出端 Ho 和 Lo 分别用于提供 A 相上、下桥(Q4、Q5)的驱动信号，当 IR2103 的输入端 HIN 和 LIN 同为高电平时，Ho 为高电平 Lo 为低电平，对应地 Q4 导通 Q5 关

断,主电路电流流入 A 相(从另一导通相流出);当 HIN 和 LIN 同为低电平时, Ho 为低电平 Lo 为高电平,对应地 Q4 关断 Q5 导通,主电路电流从 A 相流出(来自另一导通相);当 HIN 和 LIN 反相时 Ho 和 Lo 均为低电平, Q4 和 Q5 都关断,电流不经过 A 相(导通相为 B、C 两相)。这样就能保证在任意时刻主电路均有两相保持导通,结合正确的导通时序(按 Q1Q6→Q6Q3→Q3Q2→Q2Q5→Q5Q4→Q4Q1→Q1Q6 的顺序依次导通),电机就可实现持续平稳运转。注意,这里只给出了 A 相的示意图, B、C 两相与此类似。

图中的 HIN1 和 PD0 是 A 相功率开关管的控制信号,其中 HIN1 是 PD1、PWM 和电流硬件保护的输出值相“与”的结果(通过一块 74LS11 芯片将这 3 个信号相“与”), PWM 用于控制上桥 MOSFET 的导通时间, PD1 和 PD0 来自单片机 PORTD 端口的 1、0 引脚, PD1PD0、PD5PD4、PD7PD6 分别作为 A、B、C 三相功率管的控制信号,找出这三个值与前面提到的 HA、HB、HC 信号组的关系,就可以正确地实现电机换相。

3.5 电源转换与电压采样电路

电动摩托车在运行时,电源全部来自车载蓄电池。蓄电池提供的是一个 48V 的直流电压,而在控制电路中,包括单片机在内的许多器件都需要 5V 的驱动电压, MOSFET 的驱动芯片 IR2103 则需要 15V 的电源供电,因此必须设计一个电源转换电路,使电压幅值降低到我们需要的范围。

在控制程序中还要实时监控蓄电池电压的大小,当欠电压情形出现的时候及时给予保护。一般情况下,单片机 ADC 端口的基准电压也只有 5V,因此还需要将 48V 电压值线性分压到 5V 范围以内,便于 ADC 采样。

图 3.8 示出了从 48V 蓄电池电压获得 5V 控制器件驱动电压的原理^[15]:

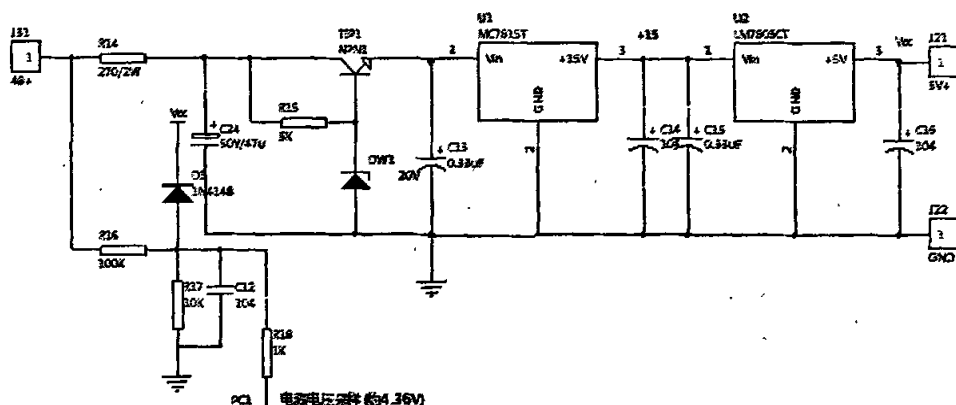


图 3.8 电源转换电路

Fig.3.8 Power Converting Circuit

由上图可以看出，电压转换电路的核心器件是两个稳压器 7815 和 7805。图中三极管 NPN1 使用功率晶体管 TIP41C，电路导通时其处于放大状态，基极和发射极之间存在一个 2V 的电压降，它和稳压管 DW1(20V)一起作用，使得稳压器 7815 的输入端电压保持在 18V 左右，这样 7815 能工作于最理想的状态，输出稳定的 15V 电压，IR2103 的电源引脚就可以接到这里。

7815 得到的 15V 电压作为 7805 的输入电压，经其转换得到稳定的 5V 电压供单片机和 ADC 电源引脚使用。

R16 和 R17 组成的分压电路使蓄电池的电压降低到 0~5V 的范围以供采样电阻 R18 交付单片机 ADC 引脚进行电压的采样、判断。

3.6 其他电路

本文描述的所有与“采样”相关的功能，均通过 ATmega88 单片的具有 A/D 转换功能的引脚及其对应的寄存器来完成。硬件电路的任务是将电压等模拟信号传送到相应端口(引脚)，由于 ATmega88 单片机的 A/D 转换采用 5V 的基准电压，也就是将所有模拟信号转化为 0~5V 电压所对应的数字量，因此采样电路的最终目的，必须将被采信号转换到 0~5V 的范围。

图 3.9 所示为转速给定电路，电动摩托车的调速依据是手柄的转动位置，手柄实质上是一个普通的电位器，这个电位器通过旋转改变分压大小。在实验电路板中，用一个 10k Ω 的电位器来代替，输出电压经过 1k Ω 的采样电阻送往单片机的 ADC 引脚，转换成速度的数字量形式^[16]。

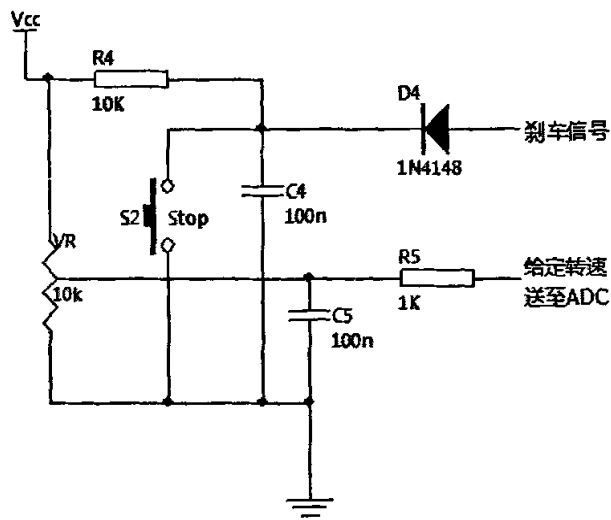


图 3.9 给定转速采样电路

Fig.3.9 Required Speed Sampling Circuit

在上图中还可以看到一个按钮开关，这是对刹车信号的模拟，当开关按下时，相当于给出低电平的刹车信号。实际电动摩托车上的刹车信号是通过手闸给出的，同样设计成低电平信号。

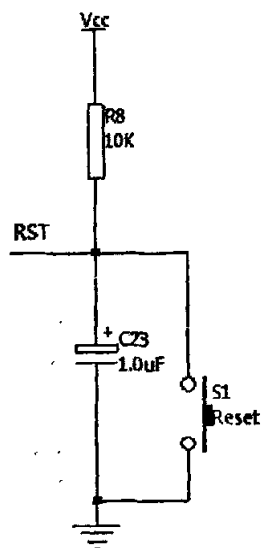


图 3.10 系统复位电路

Fig.3.10 System Reset Circuit

系统调试的时候有可能出现程序错误、设备故障等意外因素，这个时候需要重新启动单片机中的程序，ATmega88 单片机提供了自复位功能，其 PORTC 端口的 PC6 引脚可以复用做系统的复位引脚，给定一个低电平系统即自动复位。所以在这里接一个开关按钮构造复位电路，如图 3.10 所示：

在调试的过程中，电机出现突然停转或转动异常的情况时，按下 Reset 按钮并保持，待电机平静后松开按钮，就能重新启动电机。当然在设置系统的复位条件时，应该设置为“低电平→高电平”的 RST 信号引发复位产生。

通过实验发现，在电路长时间工作后，某些容量较大的电容中会积累电荷，使局部电路处于非正常的带电状态，如果这时断开电路主电源，再按下此复位键，可以促进电容快速释放掉其中的电荷。

3.7 本章小结

硬件电路是控制系统的基础，所有的控制程序都编写在硬件电路的基础上。位置信号检测电路是保证电机正确换相，正常运转的前提；电流检测结果的准确性是确保硬件过电流保护起作用的条件，在电流检测电路中，合理选择了放大器的反馈电阻值，当过电流现象发生时，电流采样值在 4.48V 左右，经过比较器得到一个低电平信号，可以成功实施硬件保护。

4 控制系统的软件设计

本章主要研究控制系统的软件部分，结合控制核心 ATmega88 单片机的各引脚功能以及外围电路，对不同的控制目标采用模块化设计。

4.1 控制方法概述

无刷直流电动机工作在由位置检测器控制逆变器开关通断的“自控式”变频方式下，逆变器的变频是自动完成的，并不需要控制系统加以干预及控制。要控制电机的转速就应该控制电机的转矩，调节直流侧电压即可调节转速。

采用 PWM(Pulse-Width Modulation, 脉宽调制)调节方式，通过改变 PWM 控制脉冲的占空比来调节输入无刷直流电动机的平均直流电压，以达到调速的目的^{[17][18]}。

本文所涉及的无刷直流电机，采用转速、电流双闭环控制，速度为外环，电流为内环。控制原理图如下：

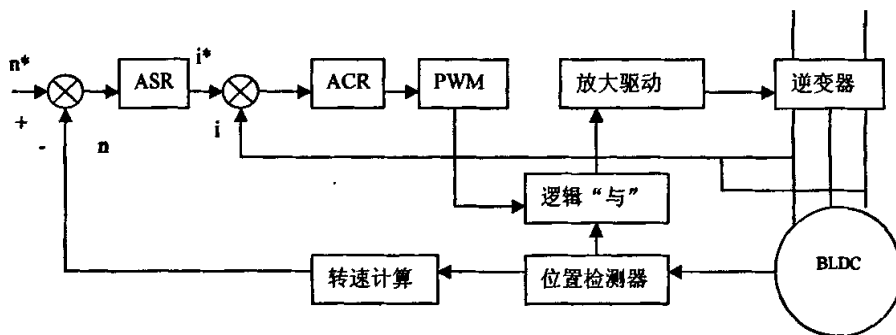


图 4.1 无刷直流电动机的控制原理图

Fig.4.1 Control Schematic Diagram of BLDC Motor

在图 4.1 中，ASR 和 ACR 分别代表转速调节单元和电流调节单元，采用数字 PI 算法。速度给定信号 n^* 与速度反馈信号 n 送给速度调节单元 SR，速度调节单元的输出作为电流信号的参考值 i^* ，与电流信号的反馈值 i 一起送至电流调节单元 CR，电流调节单元的输出作为电压参考值与给定载波比较后，形成 PWM 调制波，控制逆变器的实际输出电压。逻辑“与”单元的任务是把换向信号和 PWM 信号结合起来，送到逆变器的驱动电路^[19]。

4.2 控制系统中 PID 控制算法的实现

4.2.1 PID 算法的控制原理

在模拟控制系统中, 控制器最常用的控制规律是 PID 控制。PID 控制器是一种线性控制器, 它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (4.1)$$

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, 对被控对象进行控制, 故称 PID 控制。其控制规律为:

$$u(t) = K_P[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (4.2)$$

或写成传递函数形式:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \quad (4.3)$$

式中 K_P ——比例系数;

T_I ——积分时间常数;

T_D ——微分时间常数。

简单来说, PID 控制器各校正环节的作用如下:

(1)比例环节 及时成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。

(2)积分环节 主要用于消除静差, 提高系统的无差度。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。

(3)微分环节 能反映偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在偏差信号值变得太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减少调节时间^[20]。

在单片机控制系统中, 试用的是数字 PID 控制器, 数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。适用于电动机控制的是增量式 PID 控制算法。由于无刷直流电动机具有较好的动态性能, 一般只需要通过 PI 算法就能获得较好的控制效果。

4.2.2 增量式 PID 算法

式中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

称式(4.8)为增量式 PID 控制算法^[21]。

4.3 控制程序设计

4.3.1 主程序流程

AVR 系列单片机提供的中断程序调用方式可以用于解决换相、测速、电流检测、电压检测等功能，主程序的主要作用是初始化器件、启动电机和调速功能：

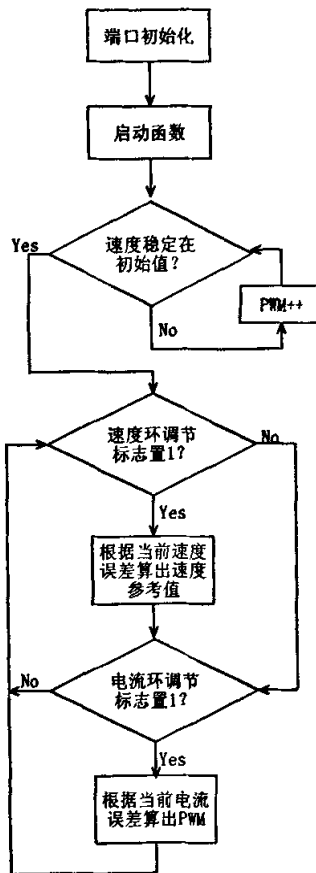


图 4.2 控制系统主程序

Fig.4.2 Main Flow Chart of Control System

图 4.2 所示即为主程序的流程图，初始化端口包含的工作很多，包括设置相应引脚的数据传输方向，给定各寄存器的初始值，设置 T/C 的工作模式、触发信号沿、工作频率，设置 ADC 的采样引脚、触发信号沿、采样频率等，初始化“看门狗”等^[22]；而主

由于单片机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此式(4.2)中的积分项和微分项不能直接使用，需要进行离散化处理。按模拟 PID 控制算法的公式(4.2)，现以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t ，以和式代替积分，以增量代替微分，则可作如下近似变换：

$$\begin{cases} t \approx kT \quad (k=0,1,2,\dots) \\ \int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{cases} \quad (4.4)$$

式中 T ——采样周期。为了简化，将 $e(kT)$ 写成了 $e(k)$ 的形式，即省去了 T 。

显然，上述离散化的过程中，采样周期必须足够短，才能保证足够的精度。将式(4.4)带入(4.2)中，可得离散的 PID 表达式为：

$$u(k) = K_P\{e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (4.5)$$

或

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (4.6)$$

式中 k ——采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$

$u(k)$ ——第 k 次采样时刻的单片机输出值；

$e(k)$ ——第 k 次采样时刻输入的偏差值；

$e(k-1)$ ——第 $k-1$ 次采样时刻输入的偏差值；

K_I ——积分系数， $K_I = K_P T / T_I$ ；

K_D ——微分系数， $K_D = K_P T_D / T$ 。

根据递推原理：

$$u(k-1) = K_P e(k-1) + K_I \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (4.7)$$

用式(4.6)减式(4.7)可得：

$$\begin{aligned} e(k) - e(k-1) &= K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &= K_P \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (4.8)$$

程序最主要的作用是速度调节,控制两个闭环进行循环反复的运算,使速度趋近给定值。

4.3.2 启动与换相

换相是电机持续稳定运转的前提。与传统直流电机采用由电刷组成的换向器进行电流换相不同,无刷直流电机有专门的由位置传感器(霍尔元件)和换相开关(MOSFET)组成的换相电路完成这一功能。

电动机的启动和换相基于同样的原理,即根据转子位置传感器传递来的位置信号确定桥式电路开关管的导通逻辑^[6],换相原理如表 4.1 所示。

表 4.1 位置信号与控制信号的对应关系
Tab.4.1 The Relationship of Position Signal and Control Signal

| HA、HB、HC | PD7...PD0 | 导通 MOSFET |
|----------|-----------|-----------|
| 001 | 1011**00 | Q2Q3 |
| 010 | 0010**11 | Q1Q6 |
| 011 | 0011**10 | Q3Q6 |
| 100 | 1100**10 | Q4Q5 |
| 101 | 1110**00 | Q2Q5 |
| 110 | 1000**11 | Q1Q4 |

电动机启动之初,也就是电路通电的时候,PWM 引脚输出寄存器中的初始 PWM 值,同时循环检测三个位置传感器信号的某一个输入引脚,如果检测不到信号变化,说明电动机没有转动,这时视为 PWM 初始值太小不足以启动电动机,让 PWM 做自加运算,直至电机转动。

解决换相问题只是完成了电机控制的第一步,电机控制的主要任务是对电机转速的调节。

4.3.3 电动机转速调节

直流电机转速取决于电枢电压的大小,调节电枢电压就可以调节转速。

通常采用 PWM 调节方式,通过改变 PWM 控制脉冲的占空比来调节输入无刷直流电机的平均直流电压,以达到调速的目的。对于用在电动摩托车上的电动机而言,转速精度要求不是很高,采用数字 PI 算法就可以达到要求^[23]。

PI(比例、积分)控制算法常用于需要对变化的条件进行校正的闭环控制系统。PI 的基本概念是根据实际测量值与设定值之间的偏差 $e(t)$ 按比例-积分的函数关系进行线性组合构成控制量 $u(t)$,然后用 $u(t)$ 对控制对象进行控制。

电动摩托车通过旋转手柄来改变骑行速度，正如传统的动力摩托车靠手柄控制油门的开合一样。手柄实际上是一个电位器，它的作用是提供转速的给定值。在控制电路中通过单片机的 ADC 引脚对手柄输出电压进行采样，ATmega88 单片机的 ADC 通道为 10 位，故 0-5V 电压分别对应 0-1023 的数字量。按照实验电机的要求，转速最大值控制在 500r/m，因此 1023 对应的转速就应该是 500r/m，这样在程序中就可以通过一个系数 500/1023 把数字量转换为转速。当然，这里所说的 5V 和 500r/m 都是理论值，程序设计过程中要结合实际电路手柄电压能达到的最大值以及电机满转速度来确定数字量转换为转速时需要的系数。

转速的给定值(简称为“给定转速”)是通过 ADC 对手柄电压采样得到的。在编写调速程序段代码的时候还需要实际转速的值，这个值有可能是不停变化的，ATmega88 包含一个具有输入捕捉功能的 16 位定时/计数器，这个定时/计数器就可用于帮助我们测出电机的实际转速来。

根据霍尔元件的工作原理，当电机转子每转过一对极(N-S-N 或 S-N-S)，位置传感器传递回来的信号会发生一次“低-高-低”或“高-低-高”的跳变，反过来说，当一个电机的转子极对数为 n 时，如果检测到某一相的霍尔信号发生一次上述跳变，则可推断电机转过了 $1/n$ 圈，如果能够记录下转过这 $1/n$ 圈的时间，则电机的转速就可以通过一个最简单的除法运算获得。正好定时/计数器可以帮助我们完成这一任务。由 ATmega88 的引脚分布图可以看出，14 引脚实际上是一个普通端口 PORTB 与 T/C1 的输入捕捉功能复用引脚，开启 T/C1 之后，设置其为高电平触发(或者低电平触发也一样)，当其检测到 ICP 引脚为高电平时，从 0 开始计数，在下一个高电平到来时，T/C1 会自动把当前计数值赋给专用的 ICP 寄存器，我们可以在程序中调用 ICP 寄存器中的数值，结合系统频率将这个数值转换为时间单位，就可以计算出过去 $1/n$ 圈电机的转速是多少。要保证持续计算转速，只要在每个 ICP 引脚检测到高电平时重置 T/C1 让其继续从 0 开始下一轮计数就行了。

速度的调节分为两个阶段来完成^[24]。如下图 4.3 所示，给定转速通过对手柄电压采样得到，电机的实时转速通过除法计算得到，第一阶段的 PI 运算就是前面提到的“速度环”，得到的结果是电流增量，第二阶段的 PI 运算是“电流环”，得到的结果为占空比增量，与前一次的占空比相加作为本次输出占空比值，控制每一相的上桥 MOSFET 导通时间。

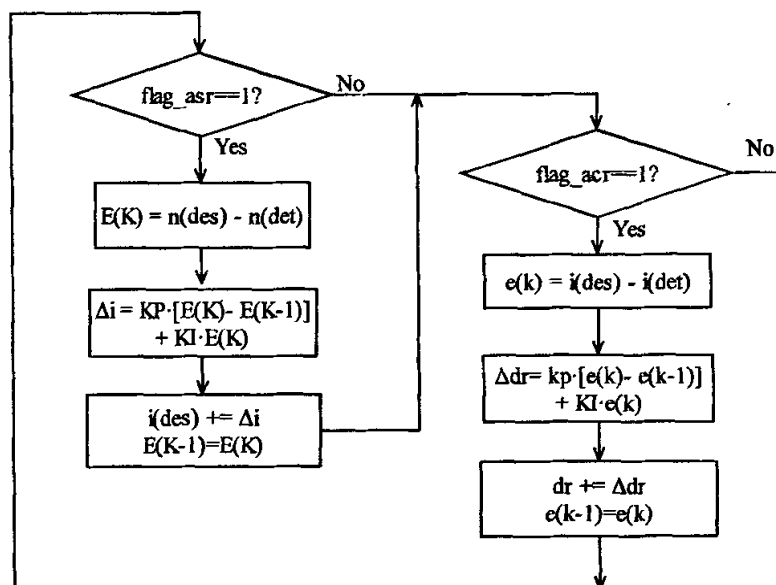


图 4.3 速度调节原理

Fig.4.3 The Principle of Speed Adjusting

其中 flag_asr 和 flag_acr 分别代表速度环和电流环的调节标志，当他们置 1 的时候进入下面的 PI 运算， $E(K)$ 代表速度环的偏差， $e(k)$ 代表速度环的偏差， k 和 $k-1$ 分别代表本次和上一次的数值。

4.3.4 过电流、欠电压保护

电源电压、主电路电流、给定转速这三个量都要经过 A/D 转换后变为数字量处理，对这三个量分别通过 ADC 的三个不同的通道来处理。因此要合理的分配三个量的采样周期，以保证 A/D 转换的合理有序。

过电流的情况最危险，所以要保证电流的实时监控，而且电流环作为速度调节的内环，要提高调速的及时性就需要增大内环的调节频率，要求对电流的 A/D 转换要尽量快；给定转速作为速度调节的外环，可以适当慢于内环电流环的调节频率；电压采样值的作用只是用于判断是否过电压，而且就算欠电压情况成立，短时间内也不会对电动机造成大的损害，所以电压采样的频率不需要很高。

设置 ADC64 分频，每个采样周期对主电路电流进行一次采样/转换，然后电流每采样 500 次时，对给定转速进行一次采样/转换，在这个基础上，当给定转速每采样 40 次时，对电源电压进行一次采样/转换。三者的采样周期比大概为 $104\mu\text{s}:52\text{ms}:1.04\text{s}$ ，满足系统的控制要求。

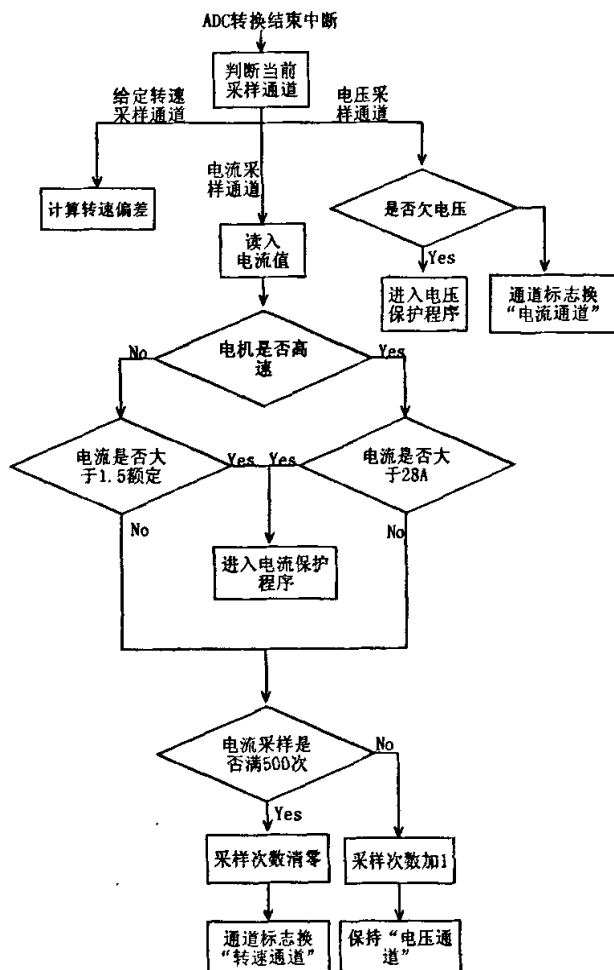


图 4.4 ADC 转换结束中断程序流程图

Fig.4.4 Flow Chart of ADC-converting-over Interrupt Process

另一方面，电动车的驱动电机采用蓄电池供电，骑行时间过长会发生欠电压现象，出现欠电压现象以后要及时切断电动机的电源供给，待蓄电池充电完成之后再使用。这两项保护措施要体现在硬件电路中，并且在编写控制程序的时候也要作相应的处理。

欠压保护的实现方法更简单，参考图 3.5，只需在电源(48V 蓄电池)的接入点用两个分压电阻将电压转换到 0-5V 的范围，然后送入 ADC 转化为数字量，在程序中循环比较，当出现该值小于 0x30C(对应电压小于 42V)并持续 5 秒以上，则认为“欠压”成立，立即停止单片机工作。

4.3.5 定速巡航功能

这是一个比较人性化的设计,传统的燃油摩托车要保持匀速行驶必须扭住油门手柄不放,时间久了手部会有酸痛感,电动摩托车设置了一个“定速巡航”功能,当给定转速手柄在某个位置保持一段时间(6秒左右)后,电动车确认经入“定速巡航”模式,以当前转速匀速行驶,此时松开手柄车速也不会降下来。

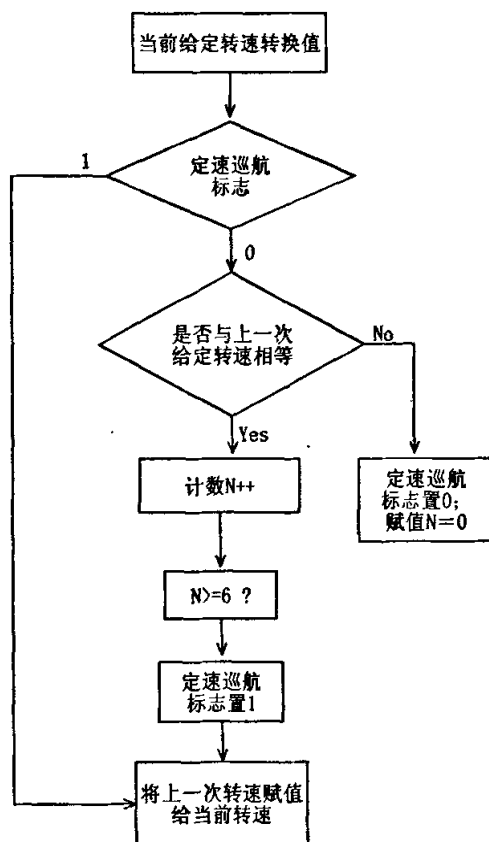


图 4.5 “定速巡航”原理

Fig.4.5 Principle of “Steady-speed-travel”

实现此功能需要在程序中增加一段代码,在对给定转速循环采样的过程中,每得到一个采样值都对其进行判断,检验其是否与上一次的采样值相等(考虑到数字采样的精确度高,而手动操作不可避免的存在不确定性,这里不能用得到的数字量直接相比,而应该判断前后两次采样值的误差是否在可忽视的范围内,即“近似相等”),如果近似相等,并且这种近似相等的状态维持达到6秒,则认定“定速巡航”状态成立,这时松开手柄,单片机在其后的每一次给定转速采样时都会舍弃当前实际采样值,而沿用“定

速巡航”状态发生时的那个值。电动机保持匀速行驶，直至下一次大幅度变速取消“定速巡航”。

“定速巡航”部分的工作其实也是在 ADC 转换结束中断程序中完成的，属于图 4.4 中“当前采样通道”为给定转速采样通道的子流程中完成的部分，在每个给定转速采样/转换之后，都要对转换值进行分析，判断其是否与上一次的转换结果相等(实际上是两者的偏差不超过某个特定的范围，这在前面已经分析过)，如果相等的条件满足，还需要判断这个状态保持了多长时间，如果超过 6 秒钟，则判断“定速巡航”状态成立，电动车保持当前速度匀速行驶，及时松开转速手柄也不改变行驶速度。

退出“定速巡航”状态的标志是手柄给定的速度值从零回到匀速值以上，表明驾驶员放弃当前速度，重新调速。

4.3.6 刹车

刹车函数在软件的实现方法上很简单。对于星形连接的三相绕组来说，若让每相电路的上桥开关管导通而下桥关闭，则可起到能耗制动的作用。利用这个原理，在接到刹车信号以后，只要将寄存器 PORTD 的 7、6、5、4、1、0 六个位全置 1 就可以实现刹车了^[25]。

4.4 本章小结

电动摩托车无刷直流电动机控制系统的主流程是双闭环——速度环和电流环反复调节的过程，运用 PI 算法使转速无限趋近手柄的给定转速，比例参数和积分参数选取得当，保证转速调节的精度，而换相、转速计算、欠电压保护、过电流保护、定速巡航、刹车等功能都由 ATmega88 的中断向量调用中断函数来完成，ATmega88 单片机内置的 26 个中断向量保证了所有功能的实现。

5 实验结果分析

电源转换电路和转子位置信号检测电路可以很直观地测试其是否正常：

1) 电源转换电路：参考图 3.8，系统上电，用万用表测量稳压管 7815 的输入端和输出端电压，输入端稳定在 18V 左右，输出端稳定在 15V 左右，可判断 7815 工作正常；再测量 7805 的输出端，电压值维持在 5V 左右，可判断 7805 也处于正常工作状态。整个电源转换电路工作正常。

2) 转子位置信号检测电路：参考图 3.4，电动车断电情况下，转动车轮，用示波器探针分别检测二极管 D1、D2、D3 阳极电位，波形呈现高-低变化，证明位置信号检测电路正常。

转速调节是电动机控制器的主要任务，其精度是检验一个控制器是否合格的一项重要指标，若能将转速转换为电压，就可以用示波器直观地观察速度的变化规律。美国国家半导体(NS)出品的 LM2907 芯片是一种频率-电压转换器，可用于测量电机转速。

LM2907 为集成式频率 / 电压转换器，芯片中包含了比较器、充电泵、高增益运算放大器，能将频率信号转换为直流电压信号。当充电泵把从输入级输入的频率转换为直流电压时，需外接定时电容 C1、输出电阻 R1 以及积分电容或滤波电容 C2，当第一级输出的状态发生改变时（这种情况可能发生在输入端上有合适的过零电压或差分输入电压时），定时电容在电压差为 $V_{CC}/2$ 的两电压值之间被线性地充电或放电。定时电容上的电荷变化量 ΔQ 为 $C1 \times V_{CC}/2$ ，泵入电容中的平均电流或流出电容中的平均电流为：

$$\Delta Q/T = i_c(AVG) = f_{IN} \times C1 \times V_{CC}$$

式中 f_{IN} ——输入信号的频率。

输出电路把这一电流准确地送到负载电阻（输出电阻）R1 中，R1 电阻的另一端接地，这样滤波后的电流被滤波电容积分后得到输出电压 V_o ：

$$V_o = V_{CC} \times f_{IN} \times C1 \times R1 \times K$$

其中 K 为增益常数，典型值为 1。电容 C2 的值取决于纹波电压的大小和实际应用中所需要的响应时间。

定时电容 C1 可为充电泵提供内部补偿，为了获得准确的转换结果，其值应大于 500pF，太小的电容值会在 R1 上产生误差电流，特别在应用在低温条件下更是如此。LM2907 引脚 3 的输出电流是内部固定的，因此 $V_o/R1$ 值必须小于或等于此固定值。如

果 R1 太大, 将会影响引脚 3 的输出阻抗, 频率/电压转换的线性度也会变差。此外, 还要考虑输出纹波电压以及 R1 对 R2 值的影响, 引脚 3 的纹波 (V_{RIPPLE}) 可用下式计算:

$$V_{RIPPLE} = \frac{VCC}{2} \times \frac{C1}{C2} \times (1 - VCC \frac{VCC \times f_{IN} \times C1}{I_2})$$

R1 的选择与纹波无关, 但响应时间, 即输出 Vout 稳定在一个新值上需要的时间会随着纹波值的增加而增加, 因此必须在纹波、响应时间和线性度之间仔细地进行权衡。另外, 器件所允许的输入信号的最大频率由 VCC、C1 和 I2 决定。

本文使用的速度曲线测量电路如图 5.3 所示。

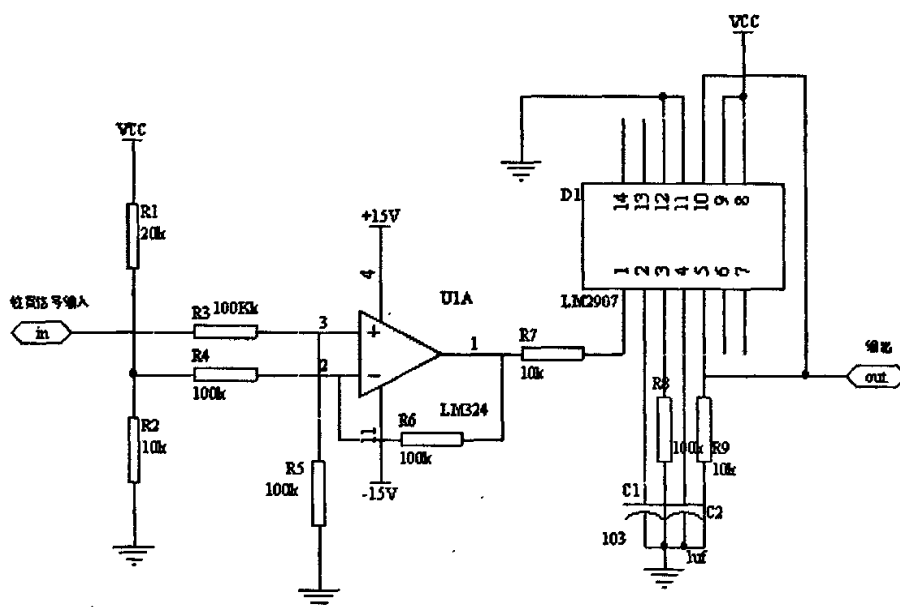


图 5.1 速度测量电路

Fig.5.1 Speed Measuring Circuit

测速电路的输入是一路位置信号, 输出是转速。

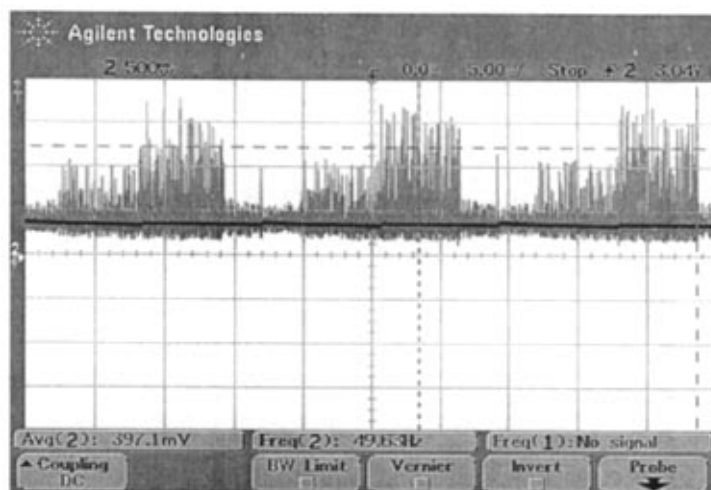


图 5.2 定速状态下转速变化

Fig.5.2 Speed versus time on steady-speed condition

图 5.2 所示为定速状态下的速度波形，可以看出，在换相点上速度似乎受到一点微小的影响，但很快就会回复到稳定的状态。

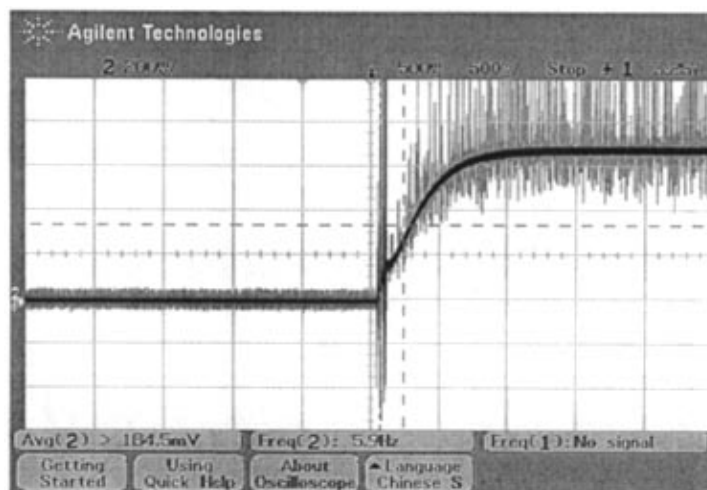


图 5.3 空载启动速度变化

Fig.5.3 Speed versus time while No-load Start-up

图 5.3 所示为电动机空载启动过程中的速度变化波形。从中可以看出，启动的过程是平滑的，而且启动时电机的加速度较大，符合平滑、快速的启动要求。

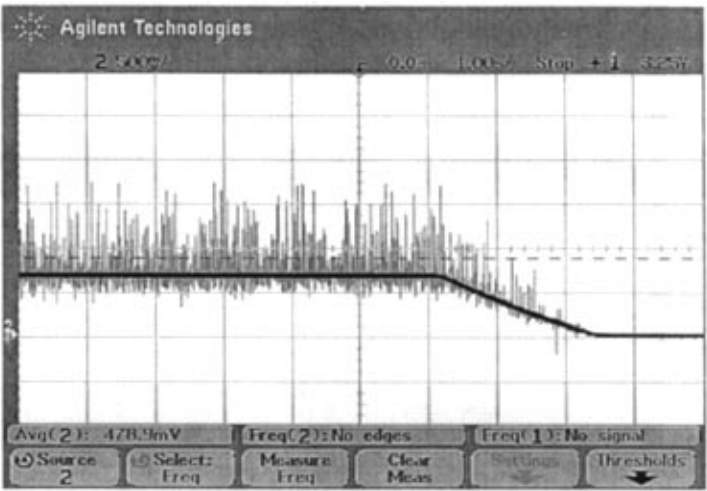


图 5.4 刹车速度波形

Fig.5.4 Speed Waveform While Brake

图 5.4 所示为电动车刹车时电机的速度变化波形。从图中可以看出，在接到刹车信号以后，电动机要经过大约 2 秒左右的时间才能完成制动，而这只是空载状态下的数值，因此采用能耗制动的方法刹车尚待改进。

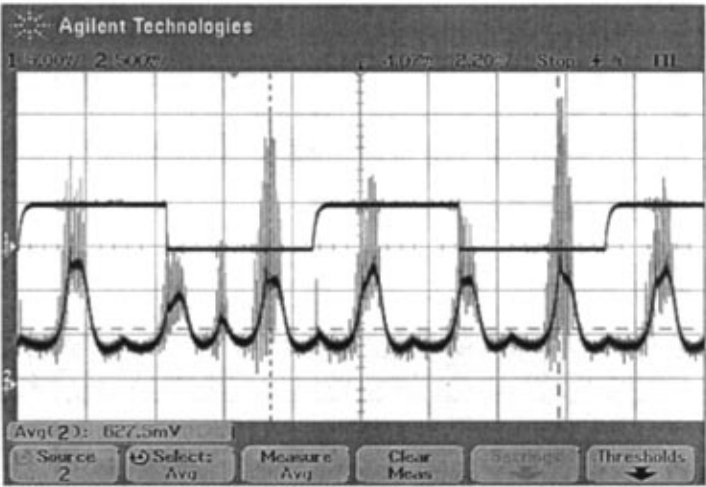


图 5.5 位置信号和电流波形

Fig.5.5 Position Signal and Current Waveform

图 5.5 所示为单相转子位置信号和主电路的电流波形。



图 5.6 电机实物图

Fig5.6 BLDC Motor Picture

图 5.6 所示为电动机的实物照片。

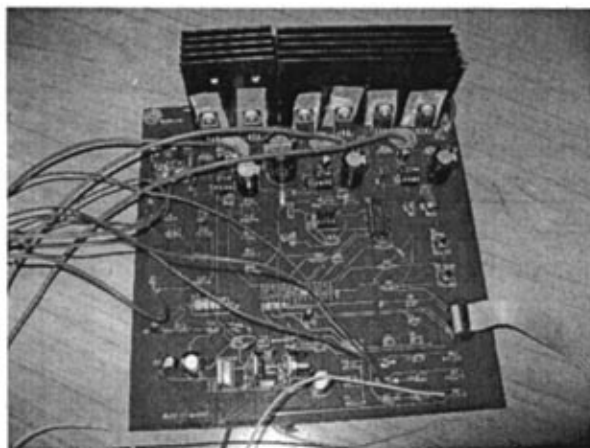


图 5.7 控制电路板

Fig.5.7 Printed Circuit Board

图 5.7 所示为实验用控制电路板。

结 论

AVR 单片机的运算能力强大, 外设接口丰富, 片上集成的 PWM 发生器、AD 转换等功能, 结合软件算法和硬件电路, 能够出色地完成无刷直流电动机的控制任务, 而且简化了外围控制电路的结构。在速度调节方面, 采用了速度与电流的双闭环控制策略, 大大提高了速度调节的精确性和稳定性。

本论文主要完成的工作有:

(1)分析了无刷直流电动机的特点(包括构造特点和运行特点)及控制规律, 简述了电动摩托车行业的发展现状和趋势。

(2)结合无刷直流电动机的工作原理, 构造出了无刷直流电动机的数学模型, 为构建电动机控制系统的框架打下理论基础。

(3)结合电动摩托车的各项功能要求, 提出了具体的控制策略, 绘制各部分的电路图, 并对可能采用的算法进行初步设计。

(4)根据系统的控制策略, 围绕 ATmega88 单片机设计了相应的硬件电路、编写相应的 C 语言控制程序。

(5)分析总结实验结果, 指出存在的问题。

通过实验调试, 采用 ATmega88 单片机控制电动摩托车无刷直流驱动电机的可行性得到验证, 而且控制成本低、效果理想。

在实验过程中也发现了一些问题尚待改进:

通过数学模型计算得到的 PI 参数与实际可用值之间存在差异, 影响模型准确性的因素很多。电流采样电阻的精度会直接影响电流采样值, 进而影响内环——电流环调节的准确度。

参考文献

- [1] 卢广锋. 21 世纪汽车与环境保护. 山东农机, 2001, 2: 5-7
- [2] 陈清泉. 电动车辆技术发展概论及前景展望. 电动车辆研究与开发. 1998, 4: 22-24
- [3] 卢国琦. 铅酸电池的原理与制造. 天津: 天津大学出版社, 1998
- [4] Chan C. C. An overview of power electronics in electric vehicles. IEEE transaction on industrial electronics, 1997, 44(1): 23-25
- [5] 龚金国. 基于 DSP 的无刷直流电机数字控制系统的设计与实现: (硕士学位论文). 西安: 西安理工大学, 2005
- [6] 孙建忠, 白凤仙. 特种电机及其控制. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- [7] 张琛. 直流无刷电动机原理与其应用. 北京: 机械工业出版社, 1996
- [8] 卢靖华, 郭伟. 无刷直流电机控制及其等效电路. 微特电机. 1994, 2: 18-22
- [9] 高徐娇, 赵争鸣, 照强. 永磁同步电机的结构与其电磁参数关系分析. 清华大学学报(自然科学版). 2001, 41(9): 44-47
- [10] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [11] ATmega8(L). ATMEL Corporation. Manul 2486J-AVR-02/03
- [12] 耿德根, 宋建国, 马潮等. AVR 高速嵌入式单片机原理与应用(修订版). 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
- [13] 高妙. 无刷直流电机调速系统中的电子换向器. 电机与控制应用. 2006, 33(3): 40-42
- [14] IR2103(S) Manual. International IOR Rectifier. Data Sheet NO. PD60045-N
- [15] Fairchild semiconductor. LM7805/7815 Data Sheet 400018. December, 2005
- [16] 骆骄. 基于 AVR 单片机的电动自行车控制系统研究: (硕士学位论文). 大连: 大连理工大学, 2005
- [17] 王正建. 电动汽车驱动电机与控制方法. 机电工程技术, 2001, 5: 30-32
- [18] Hamed S. A. Performance evaluation of three-phase variable-speed DC drive systems with uniform PWM control. IEEE Trans. Power Electr, 1997, 12: 228-242
- [19] 孙力军, 孙雷, 张春喜等. 无刷直流电机 PWM 调制方式的研究: 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11 (2): 120-123
- [20] 俞忠原, 陈一民. 工业过程控制计算机系统. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- [21] 汪海燕, 李娟娟, 张敬华. 自适应模糊 PID 控制的无刷直流电机及方针. 微电机. 2003, 36(4): 14-17
- [22] 沈文. AVR 单片机 C 语言开发入门指导. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [23] 孙剑波, 龚世纓, 董亚晖. 永磁无刷直流电机调速系统的仿真研究. 微电机. 2001, 34(2): 19-23
- [24] 胡庆波, 吕征宇. 新型无刷直流电机速度闭环控制计数: 浙江大学学报, 2007, 41(2): 282-286
- [25] 谭徽. 应用于两轮电动车辆的永磁无刷直流电机的研究: (博士学位论文). 上海: 上海大学, 2000

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

邹喜、孙建忠，电动摩托车无刷直流驱动电机的控制，属于本论文第 3 章内容，大连理工大学研究生院网络学刊，2007 年 5 月。

致 谢

感谢我的导师孙建忠教授在我两年的研究生生涯里给我的细心指导和鼓励，孙老师严谨的治学态度和实事求是的科研精神让我在这两年受益非浅，并将一生伴随我的工作和生活，资我借鉴和鼓励。感谢杨振强老师和王永兴老师在我的实验过程中给我给我无私的指导和帮助。感谢我的父母和妹妹，他们给我的关心和支持，让我远在他乡也能倍感亲情，是他们支持和鼓励着我走到今天。

电动摩托车无刷直流驱动电机的控制方法

作者：[邹喜](#)

学位授予单位：[大连理工大学](#)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1093045.aspx