



名次奖第一名

电动高尔夫球车永磁无刷直流电机

驱动系统研究

注册编号：MCHP16bitCDC0004

参赛队员：王 贵
余银辉
付 强

摘 要

在石油资源日益短缺的大背景下，如何减少交通对石油资源的不可循环的消耗以及对环境带来的压力，发展电动交通工具，特别是促进发展电动汽车(EV)是世界性的重大课题。在这其中，从轻型电动车(LEV)发展到微型电动汽车(CEV)，中国的电动交通事业的走出了一条具有自己特色的新路。

在这一背景下，本文结合具体的科研项目，对电动高尔夫球车的驱动系统展开研究，电动高尔夫球车驱动系统的某些指标与微型车非常接近，是一个更轻量级的微型电动汽车。对开发电动车驱动系统必须解决的关键问题：驱动电机的选型、驱动系统的构成、驱动的控制策略、再生制动等进行研究并应用于驱动系统控制器的开发实践。

该控制器以 dsPIC30F4011 为核心，充分发挥该系列处理器的强大数据处理能力、高速的运算能力以及其丰富的片内外设，以单 CPU 架构实现了集测量、转换、控制、保护、通信于一体的低成本而性能良好的无刷直流电机驱动系统。同时在系统设计中引入了业内一系列创新性成果和产品，取得了很好的效果。

关键词：微型电动汽车，永磁无刷直流电机，力矩控制，数字信号控制器

目 录

摘要	1
1 引言	1
2 系统方案	2
2.1 指标与约束	2
2.2 无刷直流电机的调速和制动方式	2
2.4 电机驱动控制策略	4
2.4.1 传统车辆的驱动响应	4
2.4.2 力矩控制策略及其在无刷直流电机中的实现	5
2.5 驱动系统构成	6
3 系统硬件设计	8
3.1 主控芯片的选择	9
3.2 主电路设计	9
3.3 驱动及驱动保护电路设计	10
3.3.1 驱动电路设计	10
3.3.2 功率驱动保护电路设计	11
3.4 其他外围电路	12
4 系统软件设计	13
4.1 更新电流参考	14
4.2 电平变化中断	14
4.3 AD 中断	15
4.4 其他程序模块	16
5 系统关键设计及创新	17
6 评测和结论	18
6.1 电流跟踪效果试验	18
6.2 转矩转速特性及效率实验	18
6.3 驱动系统的性能和特点	19
参考文献	20

1 引 言

传统汽车产业的巨大惯性和强大生命力使人们对电动汽车的研究工作重心产生了转移。目前，纯电动汽车的应用研究转向了以公交车为主的定点、定向运行车辆和社区用车及特定用途的微型车^{[1][2]}(LEV)。这类车辆具有一些共同的特点，比如都是由机构管理，在特定区域运行，车速不高等。我们可以针对这些特点对车辆的设计和管理进行优化，以降低成本和提高性能，抗衡传统内燃机型汽车。

这是确立本课题的一个背景，结合具体项目，最终研究对象确定为电动高尔夫球车永磁无刷直流电机驱动系统。高尔夫球车各项指标与微型电动汽车非常相近，其开发难度较之微型电动汽车要低。我们开发高尔夫球车这样一个更轻量级电动车的驱动系统希望能积累一定的经验并为下一步的微型电动汽车的改装和开发计划提供一个可以参照的范本。

众所周知，高尔夫场地高低起伏，这要求高尔夫球车驱动电机具有优良的过载性能；车速不高，意味着高尔夫球车驱动电机不需要很宽的调速范围。要满足这些要求，使用永磁无刷直流电机(BLDC)显得再好不过：在很大负载范围内，BLDC 都能获得极高的效率，只要它的转速仍然在基速以下。再者，它坚固，运行可靠，调速简单，而且若能改善位置传感器件的可靠性，它在整个运行寿期内免维护，这使它的吸引力更为出众^[3]。

随着数字信号处理技术和半导体制造技术的发展，数字信号处理器（DSP）与功率开关元件用于无刷直流电机驱动系统成为一种理想的方案。dsPIC30F4011 是 Microchip 公司推出的一款高性价比 DSC，专为电机控制领域应用设计，其高速的运算能力可以实现更为复杂和优越的控制策略，丰富的片内资源可以大大简化外围接口电路的设计。本课题的主要任务就是以其为主控芯片，设计一套性能可靠、优越、低成本的无刷直流电机驱动系统。主要内容有：

- ① 对无刷直流电机驱动系统的控制原理和策略做深入分析；
- ② 总体方案设计、硬件选型；
- ③ 系统的硬件电路和软件设计、调试；
- ④ 现场实验，记录运行数据和波形；
- ⑤ 分析实验结果，得出结论，并对系统提出改进意见。

2 系统方案

作为电动车辆的核心，驱动系统在驾驶员的控制下，高效率的将蓄电池的能量转化为车轮的动能，或者将车辆的动能反馈到蓄电池中。整车的运行性能和效率都很大程度上由其决定^{[4][5]}。不同的电动车开发有着不同的系统构成和控制策略。本章首先简单介绍无刷直流电机的调速和制动方式；然后详细分析驱动系统的控制策略；最后，确定所开发的电动高尔夫球车系统的构成和实现功能。

2.1 指标与约束

本设计的目标是一套适应高尔夫场地应用的驱动系统。主要工作是无刷直流电机控制器的设计。

所采用的原始车辆为雅马哈产双座电动高尔夫球车。他励直流牵引电机驱动，额定功率 2.5kW；能量来自四节串联的 12V 铅酸蓄电池，容量 120Ah；后桥驱动方式，牵引电机通过一级固定减速比减速器再经过差速器将能量传至车轮，减速比 10 : 1；轮胎参数为 18×8.5—8；高尔夫球车的整备质量为 650kg。

鉴于在车体上应用低压方案成本及安全等方面的优越性^[6]，行业内都倾向于使用 48V 这个电压等级^[1]。较低的电压将带来应对大电流的挑战。

通过综合市面上的多款双座电动高尔夫球车的相关数据并通过简单的指标框算我们制定了如下的一些约束和指标来指导设计工作的进行。

表 2.1 车辆的部分约束条件及指标

变量	值
最高车速/续驶里程/最大爬坡度	20km/h/80km/20%
整备重量	650kg
系统电压	48V
电池/容量/重量	铅酸蓄电池/120Ah/180kg
电机额定功率/峰值功率	2.2kW/5kW

2.2 无刷直流电机的调速和制动方式

本设计中，三相永磁无刷直流电机采用传统的三相桥式逆变器作为驱动电源，如图 2.1 所示。结合实际，图中的开关器件采用的是功率场效应管，蓄电池作为电源，而转子位置的获取则通过霍尔位置传感器。

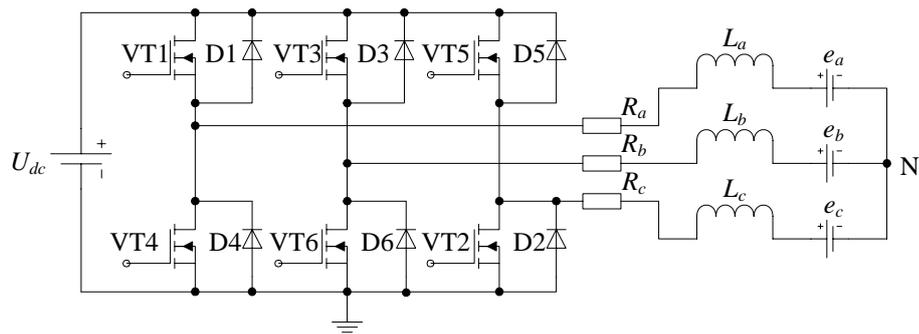


图 2.1 永磁无刷电机驱动系统

图 2.2 说明了二二导通方式下无刷直流电机的工作原理。当开关管如图 2.2 中所示正方向进行顺序切换时，电机逆时针旋转；当以反向顺序切换时，电机顺时针旋转。开关管切换的依据来自于转子的位置信息。众所周知，让逆变器输出方波要比输出正弦波要简单和容易的多，无刷直流电机的简单易用性就体现在这里。

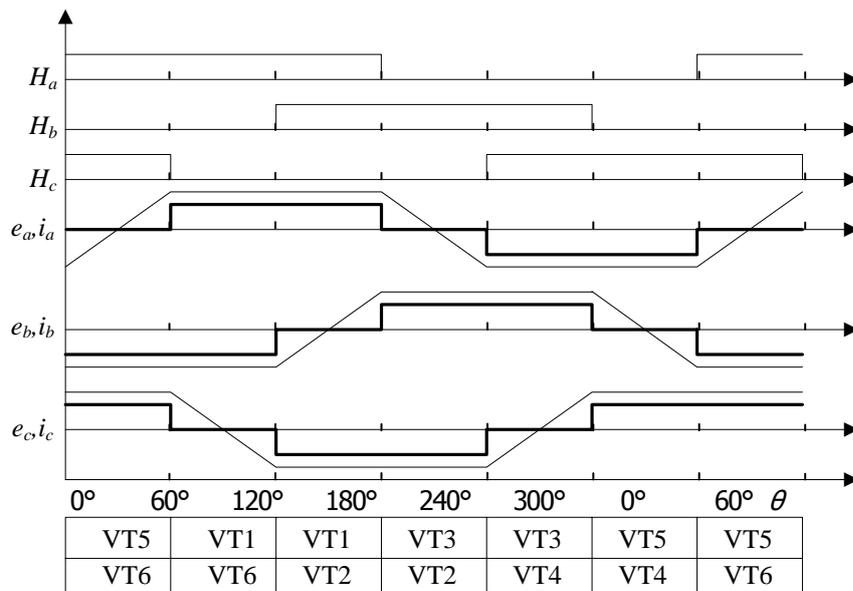


图 2.2 永磁无刷直流电机相电压、电流理想波形

本设计中采用了上桥臂调制、下桥臂长通即所谓的 H-PWM-L-ON 调制方式。该调制方式虽然六只开关管的开关损耗没有均匀分配，但实现简单，在某些低成本场合如上桥臂驱动电路由自举电容供电的场合，H-PWM-L-ON 方式是唯一能在全速度范围内使用的 PWM 调制方式，该调制方式如图 2.3 所示。

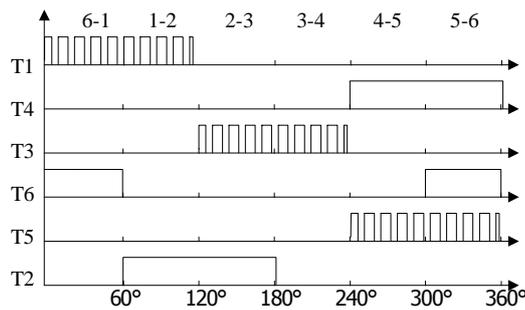


图 2.3 H-PWM-L-ON 调制方式

车辆的减速制动可以采用回馈制动的方式实现。在回馈制动方式下，电机进入发电机状态，将部分车体动能转换为蓄电池的储能，进入蓄电池的储能可被系统再次利用。

可以借助相电感这个储能元件作为桥梁来沟通电机与电源以实现能量的反向流动^[7]。分析过程与传统直流电机回馈制动的过程相类似。

为便于比较，逆变器开关管在电动与制动状态下的导通方式列于表 2.2。

表 2.2 无刷电机电动或制动方式下换向策略

策略		逆 ^① 时针		顺时针
		位置	电动	制动
段值	霍尔值			
1	4	VT1 PWM VT6 ON	VT4 PWM	VT3 PWM VT4 ON
2	6	VT5 PWM VT6 ON	VT2 PWM	VT5 PWM VT4 ON
3	2	VT5 PWM VT4 ON	VT2 PWM	VT5 PWM VT6 ON
4	3	VT3 PWM VT4 ON	VT6 PWM	VT1 PWM VT6 ON
5	1	VT3 PWM VT2 ON	VT6 PWM	VT1 PWM VT2 ON
6	5	VT1 PWM VT2 ON	VT4 PWM	VT3 PWM VT2 ON

电机逆时针旋转，电动车前进，顺时针旋转，电动车后退，后退时不再实施电气制动；段值与霍尔值一一对应，引入段值可以使超前滞后运行程序的编制更为容易。

2.4 电机驱动控制策略

对于电动车辆，一般继承已被人们广泛接受的传统内燃机车辆踏板式控制方式，对驾驶者的驱动意识，应具有与传统内燃机车辆一致或更优良的驱动响应^{[4][8]}。最普遍采用的电机驱动控制策略为力矩控制策略。

2.4.1 传统车辆的驱动响应

车辆的实际及理想原动机输出特性^[5]如图 2.4 所示。图 2.4(a)实线示意了三个加速踏板踏位，两个不同档位控制下的驱动特性，虚线示意了三个加速踏板踏

位控制下的不同档位驱动特性的外廓线。从图可见，行驶阻力不变条件下，不同的踏板踏位对应不同的行驶车速；行驶车速不变条件下，不同的踏板踏位对应不同的行驶驱动力矩。在任意档位下，每一加速踏板踏位均对应一定的驱动能力，加速踏板踏位的变化，必导致车辆行驶状态的变化。

2.4.2 力矩控制策略及其在无刷直流电机中的实现

本设计中采用的力矩控制策略为比例积分作用(PI 调节)的电流负反馈控制。

在电池组的有限电压供电下，对电动车驱动系统，若采用力矩控制策略，虽具有很好的加速特性，但其不同力矩输入指令下，力矩——转速特性的下降段却近似重合，这是由电机的恒功率特性决定的。车辆运行状态由电机驱动特性与行驶阻力特性的相交点确定，当车辆运行于电机输出特性重合区域时，对一定范围内输入力矩指令的变化，车辆的稳定行驶速度近乎相等，驾驶感觉将与传统内燃机汽车明显不同。由于本设计不涉及基速上调速的问题，对该问题的详细叙述显得不再必要。

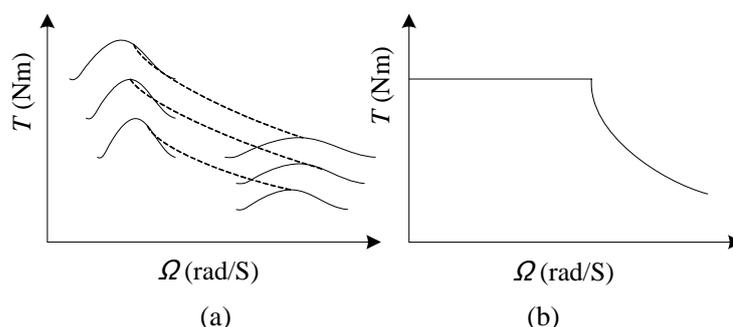


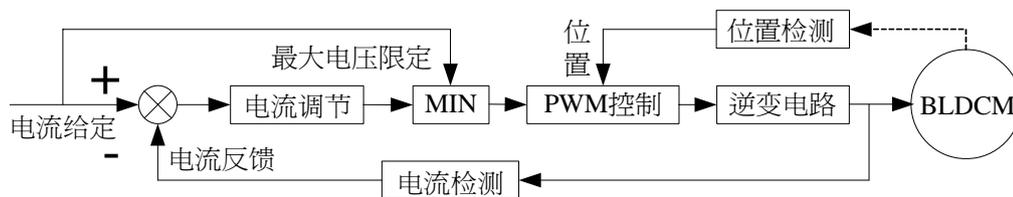
图 2.4 内燃机车辆的实际及理想驱动特性

力矩控制还带来“闭环失效^[9]”的问题：当负载力矩始终无法达到油门踏板给定力矩时，油门踏板踏位处于负载力矩值与最大给定力矩值之间的任何变动不会对车辆的运行状态造成丝毫的改变。如何解决这种“闭环失效”问题而又能充分利用力矩控制策略良好的加速特性？在大量的实际调试中，我们总结出了一种行之有效的方法：思路非常简单，即让油门踏板踏位不仅对应力矩的给定量，还将与电机绕组最大给定线电压相对应。此时，油门踏板踏位的任何改变必然导致最大给定线电压的改变也必然将改变电机的转速。这可以从无刷直流电机的调压调速特性得出。这里我称其为“最大力矩控制策略”。对应不同类型的电机，该策略可能要做必要的调整。

无刷直流电机的电磁转矩与相电流成正比，与直流电机的调速特性相似。因此，只需控制无刷直流电机的相电流，就可以控制无刷直流电机的转矩，对转矩

的闭环控制实际上就是对电机相电流的闭环控制^[9]。

从图 2.2 可以看出，由于三相电流对称，且为互差 120° 电角度的方波，将每相正电流联合起来就变成直流了，因而只需要使用一个电流调节器就可以对三相电流进行控制。“最大力矩控制策略”的电流控制结构如图 2.5 所示。



2.5 驱动系统构成

系统框图如图 2.6 所示。

电池组作为整个系统的能源，由四节 12V、120Ah 的铅酸动力电池串联而成。控制器控制核心选择的是微芯公司的电机控制专用芯片 dsPIC30F4011，并配有六英寸四级灰度 LCD 显示面板，逆变器采用分立式 MOSFET 器件搭建，驱动电动机来执行驾驶员的指令。

行驶过程中，驾驶者通过对加速、刹车踏板的操作经霍尔传感器传至控制器的模拟输入端，同时，控制器获得电机的电流、位置、转速信号，并实时检测电池组端电压，经过控制核心的处理、计算，发出控制指令驱动电机向合适的状态运行。

控制软件以并发方式(中断)来处理电流检测和控制、换相、故障保护等实时性要求很高的事件，并以不同频率来调度执行如车辆行驶方向确定、车辆状态迁移、与其他装置通信以及某些开关量的处理等慢速事件，来实施诸如车辆行驶方向控制、调速控制、驱动控制、再生制动控制等策略。同时，控制软件将驱动系统部分信息通过 CAN 通信方式上传至液晶显示屏，向驾驶者实时显示车速、里程、电压、电流、功率和系统的工作状态。

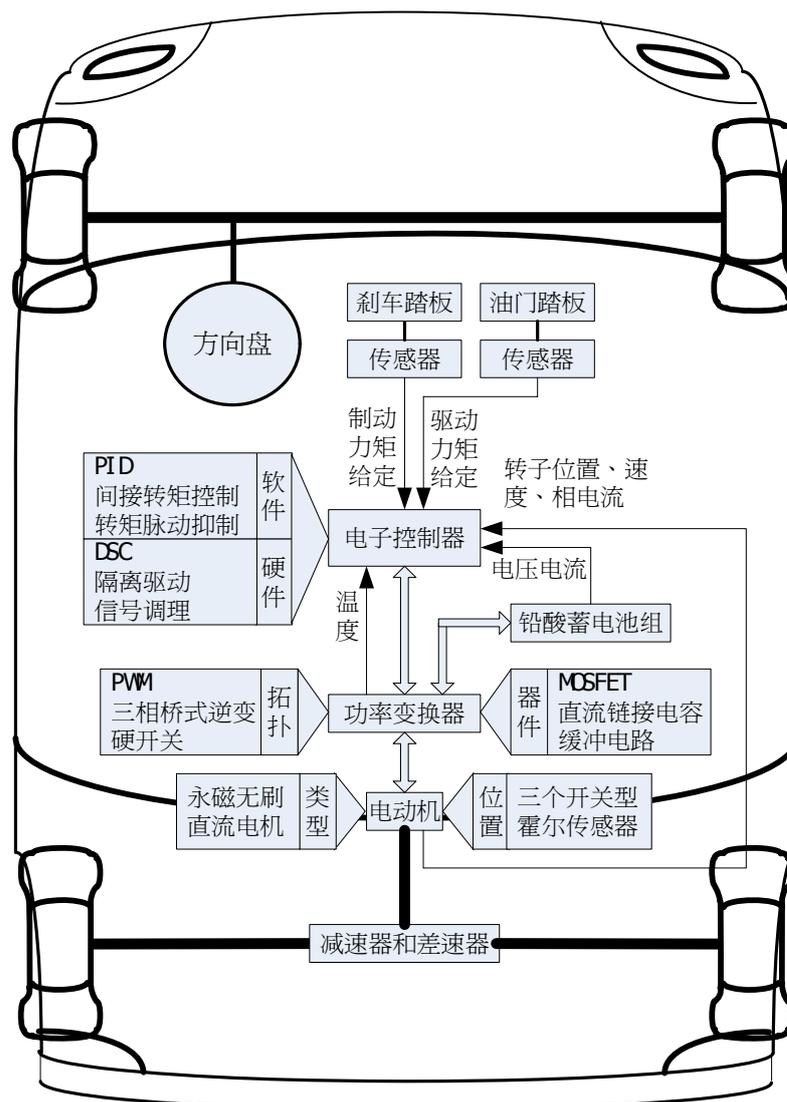


图 2.6 电动高尔夫球车电机驱动系统构成图

3 系统硬件设计

控制器硬件结构框图如图 3.1，主要包括 DSC、逆变器及其驱动电路、电流采样电路、位置信号采集电路、功率驱动保护电路、开关量输入输出电路、CAN 通信接口电路等部分。微控制器选择的是 Microchip 公司的 dsPIC30F4011。使用其内置的 10 位 A/D 转换器用于系统模拟量的采样和转换；档位信号、刹车信号、能量回馈信号等通过则直接连接到处理器的 I/O 口；特有的电平变化中断接口简化了转子位置信号的辨别，并借助内置定时器可以方便的获得电机转速；CAN 通讯模块则负责传送电机和驱动控制系统中的各状态量到液晶显示器，并与可能存在的其它设备进行数据通信。

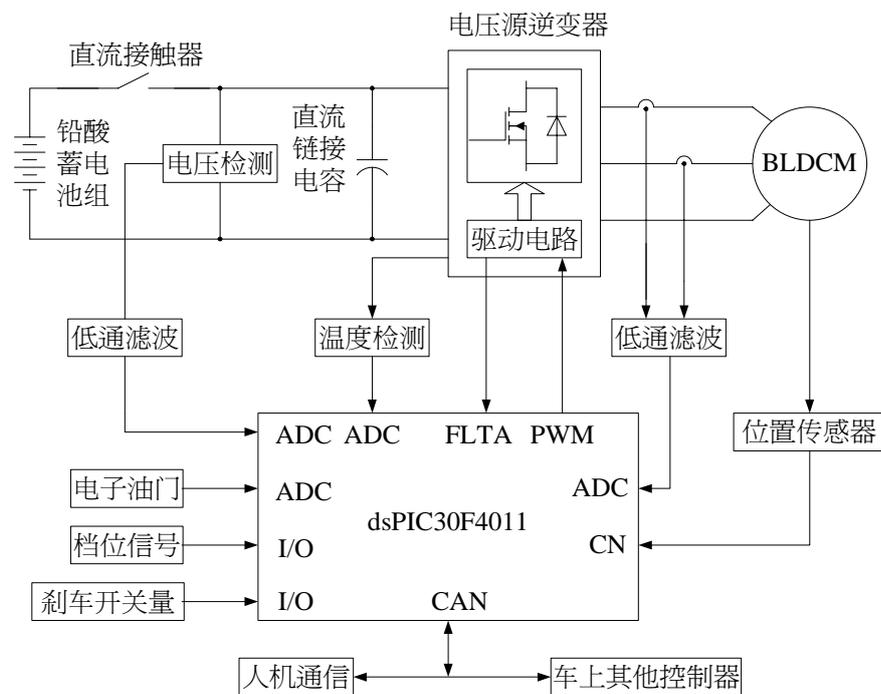


图 3.1 驱动系统硬件结构框图

图 3.2 为已焊接有器件的 PCB 板照片。



图 3.2 PCB 板照片

3.1 主控芯片的选择

在控制器设计中主要使用了芯片的如下外围模块资源^[10]:

① 电机控制 PWM 模块: PWM 工作于中间对齐方式, 调制频率选择为 10kHz, 文献[4]认为该频率可使能量密度、噪声及电磁干扰同时达到最优; 输出配置为独立模式, 且利用特殊事件触发器 SEVTCMP 使 A/D 采样在占空比有效的中间时刻同步, 该时刻被认为具有最小的地线耦合干扰, 有望获得准确的模拟量值;

② 8 路 10 位高速 A/D 转换通道: 用来在每个 PWM 周期中同时对母线电压、两组油门给定、两组刹车模拟量信号、两相电流、铝基板温度 8 个信号进行采样, 且采样与 PWM 时基同步;

③ 电平变化中断: 来自电机霍尔传感器的位置信号发生电平变化时会产生电平变化中断;

④ 定时器 4: 定时器 4 工作于周期计数模式, 以记录相邻两个电周期发生的间隔, 用来计算转速;

⑤ CAN 模块: 将关于电机和车辆的部分信息通过 CAN 通信送至上位仪表(液晶显示器), 并可接受来上位仪表的指令(触摸屏)。

3.2 主电路设计

电动汽车电机控制系统主电路原理图在第二章中已经给出(图 2.1), 包括电机、逆变器以及供电电源三大部分。其中驱动电机采用的是一个额定功率为 2.2kW 的永磁无刷直流电机; 电源来自于四节容量为 120AH 铅酸蓄电池组成的电池组; 三相桥式逆变电路采用分立式功率 MOSFET 搭建, 并引入了铝基板这种全新的散热方式。

在同类系统中, MOSFET 作为电压驱动型功率器件, 具有驱动功率小、工作频率高、价格低廉的优点, 业界都倾向于使用功率 MOSFET 作为开关器件。功率 MOSFET 具有正温度系数, 特别有益于器件并联使用, 为了达到最优的并联效果, 在设计中遵循了以下原则^{[11][12][13]}:

- ① MOSFET 的参数的一致性应较好，一般同一批次的即可满足要求；
- ② 在理论分析与实验的基础上确定适当的降额因子；
- ③ MOSFET 应装在同一块散热器上，且间距相同并保持良好的热耦合；
- ④ 慎重设计 MOSFET 驱动电路，尽可能减小驱动电路的输出电阻，最大程度发挥驱动电路的驱动能力；

⑤ 采用间接耦合并联各 MOSFET 栅极，以抑制潜在的功率震荡问题。

在各类型的混合功率 IC(IPM、IGBT 等)中铝基覆铜板^{[14][15]}(铝基板: AB)的应用非常普遍。铝基板是一种金属线路板材料，由铜箔、导热绝缘层及金属基板组成。

铝基板具有良好的导热性、电气绝缘性能和机械加工性能，采用表面贴装技术(SMT)，再辅之以普通散热器材，可获得极佳的散热效果；可有效的降低功率器件的运行温度，提高产品功率密度和可靠性，延长产品使用寿命；同时缩小产品体积，降低硬件及装配成本。

3.3 驱动及驱动保护电路设计

3.3.1 驱动电路设计

本设计中选用的 MOSFET 栅极集成驱动器为国际整流器(IR)公司生产的 IR21XX 系列高压浮动 MOS 栅极驱动集成电路。

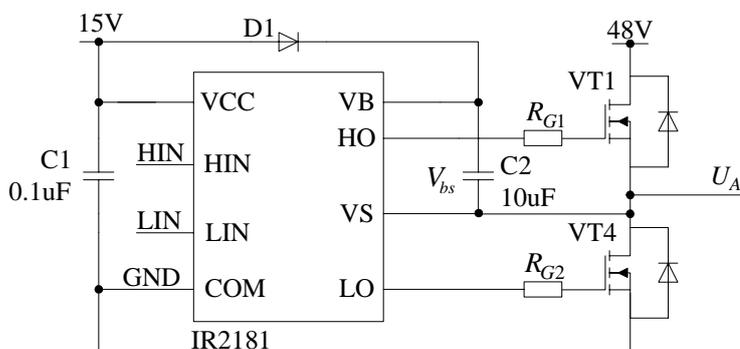


图 3.3 MOSFET 驱动电路

图 3.3 为 A 相桥臂 MOSFET 的驱动电路， V_{bs} 给集成电路高压侧驱动电路提供电源，是一个 15V 的悬浮电源。自举电路由快恢复二极管 HER307 和低泄漏电容 C2 组成。显然，下桥臂 MOSFET 或者其反并联二极管必须导通自举电容 C2 才能获得充电的机会，且在并联二极管续流过程中，充电回路会经过负载，这就说明这种自举电容供电方式有其应用局限，即需要负载回路有一个低阻通路。这也限制了某些 PWM 调制方式在本设计中的应用。

自举电容的大小可由以下公式获得：

$$C \geq \frac{2[2Q_g + \frac{I_{abs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f}]}{V_{cc} - V_f - V_{LS}} \quad (4.1)$$

在 MOSFET 的门极都串有 56Ω (图中的 R_{G1} 、 R_{G2}) 的电阻, 这主要是由驱动器件驱动能力决定的, 当然适当的门极电阻也可使各并联 MOSFET 的开通波形更加趋于一致^[52], 如果驱动电路的驱动能力足够强的话, 我们可以适当减小该电阻, 以加快 MOSFET 的开通过程。

3.3.2 功率驱动保护电路设计

功率驱动保护给功率变换器、驱动电机提供一个安全保障。当 dsPIC30F4011 器件的功率驱动保护引脚被外部拉低时, 对应的电机控制 PWM 所有的输出引脚都将被置为高阻态, 主电路能量的流通过程将被切断。

下图为 A 相电流 i_a 正向过流检测电路。代表相电流 i_a 的模拟信号连接于比较器的反相输入端, 而比较器的正相输入端电位则有电阻分压电路决定, 当电流 i_a 超过由电阻分压电路预定义的限值时, 比较器的电平将跳变为低, 串联入比较器输出端的二极管承受正压而导通, \overline{FLTA} 信号被拉低从而产生驱动保护信号。另有四路过流或过温信号则具有相同的电路结构。

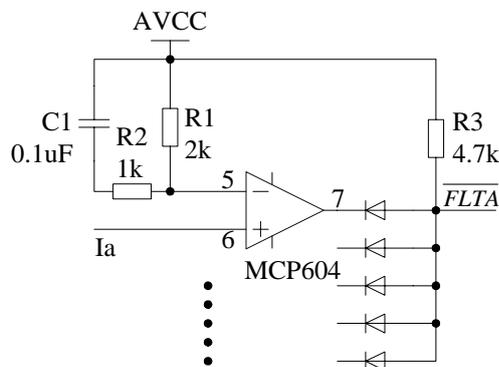


图 3.4 过电流及过温检测电路

五个过流过温信号通过线或连接至 \overline{FLTA} 引脚, 电流信号来自两个双极性电流传感器, 其输出电压范围为 $0.5V \sim 4.5V$, 每相电流采用两个过电流检测电路, 就可以在电流正向过流和负向过流时都能检测的到; 温度信号来自热敏电阻及普通电阻构成的分压电路的输出。

实际上, 对于已经实现良好电流控制的实际驱动系统来说, 过流或过温应不会或绝少产生, 而且本系统的软件设计中也增加了相应的过流过温检测程序, 该

故障模式检测电路是作为主保护的备用保护。它们存在的意义体现在系统调试中。

3.4 其他外围电路

其他的外围电路如模拟量检测电路、位置信号检测电路、开关量输入输出接口、CAN 通信接口、系统电源设计等都比较常规，这里我们略去不谈。

4 系统软件设计

图 4.1显示的是控制系统的主程序流程图，其工作过程是：系统上电(复位)后，首先配置DSC内核，再进行系统初始化，依次对片内的外设(包括IO口、电平变化中断引脚、定时器TMR4、电机控制PWM、CAN通信等)进行初始化。为了防止DSC在上电(复位)之前，油门踏板被踩下，在初始化的过程中加入了一段所谓的“防飞车”功能，直到油门给定归零后，系统才初始化AD为正常工作模式，依次启动外设并开中断允许。

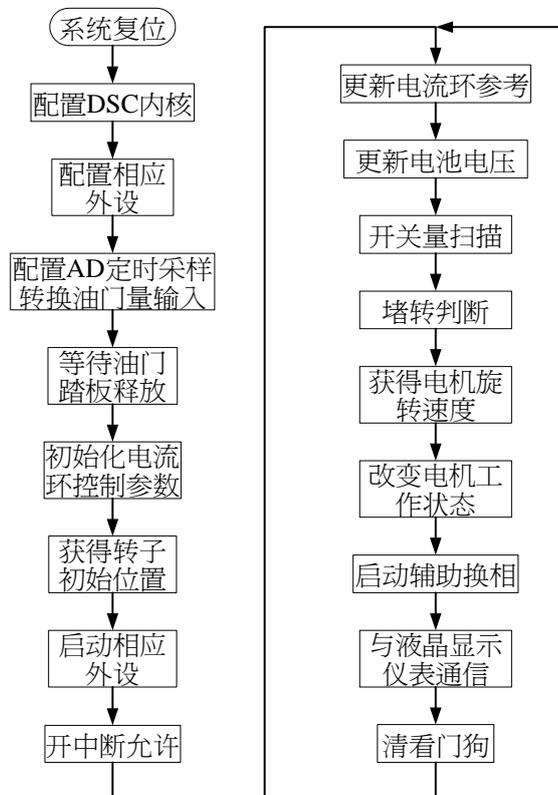


图 4.1 主程序流程图

在主体程序循环中，调度各子程序模块，在适当的时机进行更新电池电压、更新油门给定、状态迁移、CAN 通信数据传送等操作。两个并发程序包括电平变化中断和模数转换中断，后者具有最高的优先级，该中断子程序中每个 PWM 周期产生一次，并与 PWM 周期同步，主要完成各种保护功能的实现、进行电流 PI 计算并更新占空比、为其他的子程序的调度提供时基等；电平变化中断则负责电机的换相、电机转向的辨别以及转速的获取。

4.1 更新电流参考

在主程序循环中，更新电流参考子程序每隔 5ms 执行一次，由于针对电动运行及回馈制动运行均使用电流闭环措施，油门踏板踏位将提供两种类型的电流给定：驱动电流给定与制动电流给定，这是通过对油门踏板行程分段实现的：本设计中油门踏板采用的是霍尔位置传感器，5V 电源供电下将输出 1.1V~4.5V 的信号，1.1V~2.1V 范围对应的是制动电流给定，2.5V~4.5V 范围对应的是驱动电流给定，中间的电压范围为死区，以避免控制在电动和制动运行之间的震荡问题。

电动运行与回馈制动运行时，电流控制单元相对独立，便于针对两种运行状态的不同通过调节控制参数均能获得理想的效果。

当然针对电流给定也增加了给定积分的环节，以避免阶跃给定造成的电流响应过快的问题，提高高尔夫球车起动的稳定性。这在程序中就体现为定时缓慢增加电流给定。

4.2 电平变化中断

电平变换中断是控制系统中两个并发程序之一，其中断优先级较之 AD 中断优先级低，当连接到电平变化中断引脚的三个霍尔信号其中任一路信号电平发生跳变时产生电平变化中断。图 4.2 为电平变化中断的程序流程图。

在对位置信号进行检测时，加入了所谓的“2/3 判定”的抗干扰措施。即，连续对位置信号进行三次采样，若三次采样中有两次相同，则认为是一次正确的换相信息，否则，不予考虑，从中断服务程序返回。

若没有发生过流或过温故障，且电机运行状态已经迁移到驾驶员指令状态，将根据驾驶员的指令如前进、后退、回馈等以实施不同的换相策略。通过查阅换相表并加载输出改写寄存器 OVDCON 即可完成换相操作。换相表已在第二章列出。

无刷电机转子旋转的过程中，霍尔位置信号的输出会遵循一个固定的序列，这就给无刷电机转向的判别提供了极大的方便。

定时器 TMR4 用来记录相邻两个电周期之间的时间间隔，以便计算电机的转速或高尔夫球车的行驶速度，采用的是测周法。

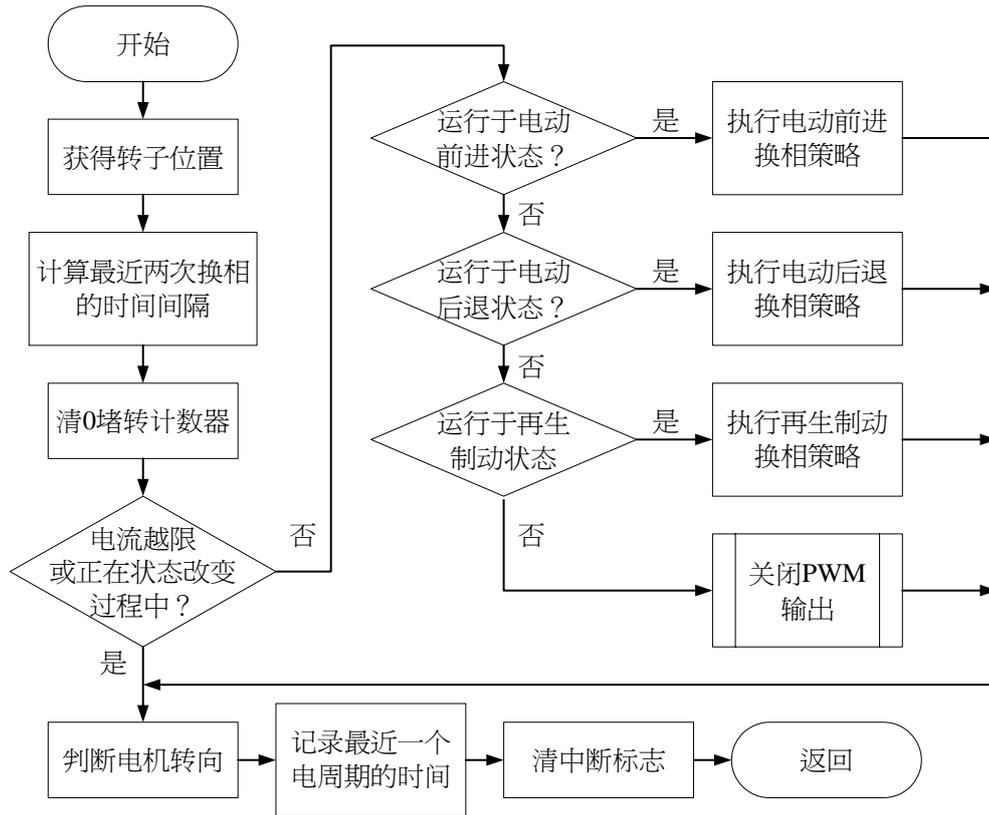


图 4.2 电平变化中断程序流程图

4.3 AD 中断

在 dsPIC30F 器件中，当 AD 由 PWM 触发转换时，在每个 PWM 周期只能获得最多四个转换结果。由于电流涉及到控制和保护功能，对其进行频繁采样，而其他模拟量则通过在 AD 中断服务程序中修改模拟量输入通道来获得采样转换的机会。为了避免意外的大电流烧毁功率器件，额外的软件过流保护是必须的，但在实际的产品中它不应该出现。若没有过流保护信号出现且电机运行状态已经迁移到驾驶员指令状态，将根据驾驶员的指令如电动或是回馈来实施不同 PI 控制策略。

PI 控制算法采用汇编语言编写，包括保护现场及返回也不过 30 条指令，效率非常高。执行 PI 算法时，CPU 工作在小数模式，所有参数及中间变量全部转换成 Q15 格式参与运算，这种模式不会出现高位丢失现象，程序更加可靠，存在的一个缺点是当误差量非常小的时候，当这些量与控制参数一起参与运算时有可能进一步被缩小甚至可能为零，在本设计的应用中，这种精度足以满足要求，而且还与死区 PID 思想不谋而合。

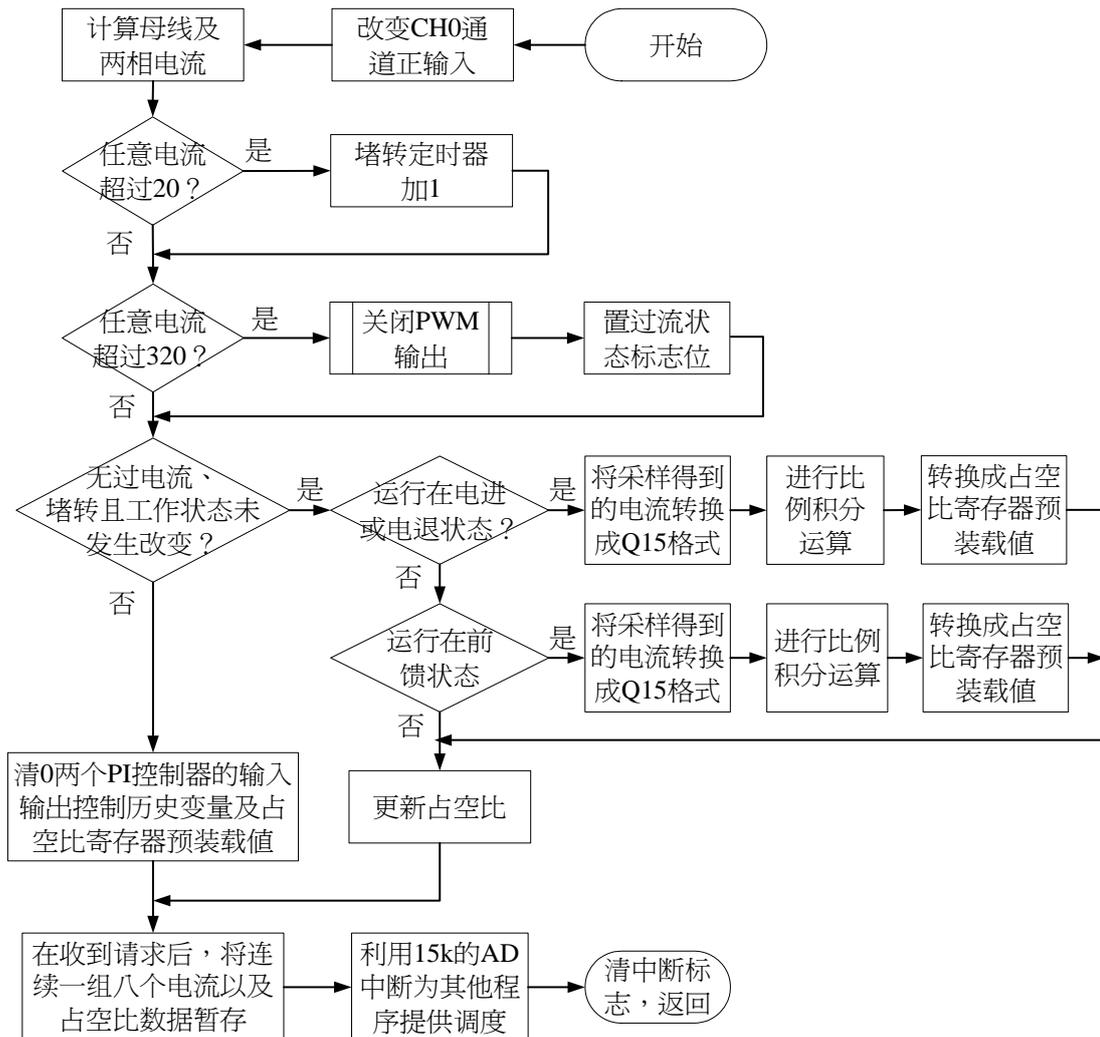


图 4.3 AD 中断服务程序流程图

图 4.3 为中断服务程序的流程图。当然 AD 中断服务程序还将为其他程序模块提供调度的时基，在程序中的表现为各程序定时器的自增操作。

4.4 其他程序模块

程序还设计了其他的诸如堵转判别程序、CAN 通信程序、开关量扫描程序等，在此就不一一赘述了。

5 系统关键设计及创新

本设计针对微型电动汽车驱动系统的要求，对电动高尔夫球车永磁无刷直流电机驱动系统的控制技术进行了研究和实践，系统中关键的设计和创新体现在以下几个方面：

① 改进的力矩控制策略：针对“闭环失效”问题提出了一种改进的力矩控制策略——最大力矩控制策略：通过在力矩给定信号上附加电机最大线电压限定信号，在传统力矩控制策略的“盲区”内，由油门踏板给定直接控制 PWM 输出占空比达到油门踏板踏位变化与电机驱动能力变化趋势相对应，显著提高了驾乘感受。该策略原理简单、实现简单，效果理想；

② 热设计：热设计在整个系统的设计中非常重要，由于该部分内容太多，篇幅太长，涉及到大量的计算和验算，难以尽述，在上文中只做了一个简单的交代。优秀的散热设计是系统可靠运行的保证。热设计中的一个重要方面就是引入了铝基板这种优秀的散热方式，它的引入不仅很好的解决了散热问题，而且采用功率 MOSFET 表面贴装的方式，器件引脚的寄生电感也可大大缩小，可谓一举两得；

③ 多重功率驱动保护：温度保护和补偿电路提供了恒定电流限幅高温时线性回落，在任何温度状况下都不会出现突然的功率减小；在每个 AD 中断周期中都会对相电流与危险电流进行比较，一旦超过限值，将产生一个速断的电流保护；此外，电路板上还有过温和过流比较电路，这些电路的输出信号与 dsPIC30F4011 的 $\overline{FLT_A}$ 、PWMxH、PWMxL 引脚以逻辑与方式连接。一旦出现过温或过流信号将关闭 PWM 信号及功率集成驱动器件 IR2181 的输出，切断功率注入通路，保护功率器件不因过载而损坏；

④ 辅助电气制动：车辆减速制动采用低速能量回馈制动的方式，回馈制动时也执行力矩控制策略，制动力矩的给定同样来自于油门踏板的踏位，通过对油门踏板踏位进行分段来实现驱动与制动力矩给定的复用。能量回馈制动是延长车辆续驶里程的有效途径。

6 评测和结论

6.1 电流跟踪效果试验

本设计中，对于比例积分作用的电流负反馈控制，我们对电流进行控制的目的是除了希望得到快速的力矩响应外，最主要是对最大电流的限制作用即电机相电流能在动态过程中不超过允许值。这是选择 K_p 、 K_i 值的主要依据。

图 6.1 显示的是额定状态下电池组输出电流(i_b)、A 相电流(i_a)以及 A 相端电压(u_a)的波形(i_b : ch1, i_a : ch2, u_a : ch4)。

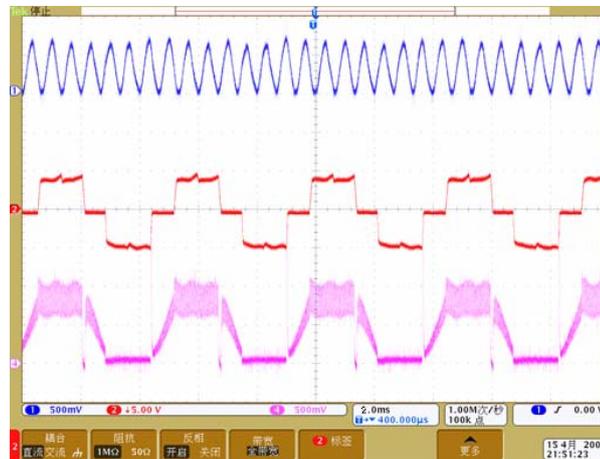


图 6.1 额定状态下电池组输出电流(i_b)、A 相电流(i_a)以及 A 相端电压(u_a)的波形

6.2 转矩转速特性及效率实验

图 6.2 显示在整个转速范围内均能实现较好的恒转矩特性，只是随着速度的增加输出的机械转矩会有轻微的减小。至少有两个可能的原因造成了这种减小：电机的机械损耗随速度的提高相应的也会增加，高速时换相转矩脉动及非换相相续流问题趋于严重^[16]。

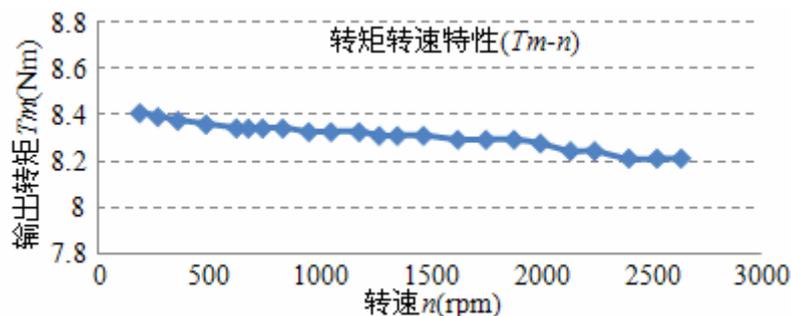


图 6.2 系统转矩转速特性曲线

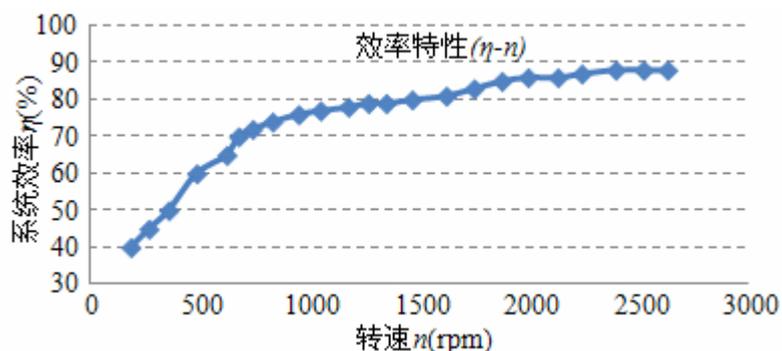


图 6.3 额定转矩输出时系统效率曲线

同时还测试了在额定转矩输出时系统在全速度范围内的效率特性。从图 6.3 可以看出系统在主要的速度范围内(1600~2600rpm)均具有较高的能量转换效率。

6.3 驱动系统的性能和特点

大量的台架及长距离的道路实验充分证明了该驱动系统工作可靠、性能良好，较好的达到了设计要求。驱动系统的主要性能和特点有：

- ① 控制器体积小、重量轻，散热性能优良，便于同驱动电机一体化设计；
- ② 过载能力强，可瞬时输出两倍于额定值的转矩值，最大爬坡度大于 20%；
- ③ 温度保护和补偿电路提供了恒定电流限幅高温时线性回落，在任何温度状况下都不会出现突然的功率减小；
- ④ 在经济时速范围(12~20km/h)内，驱动系统均能达到大于 80%以上的效率，水平路面上的续驶里程可达到 80km 左右；
- ⑤ 具有过电压和欠电压保护功能，允许的电源电压范围 41V~54V，利用电池组空载电压值来简单估算电池剩余能量，剩余能量信息显示在液晶面板上；
- ⑥ 减速制动时采用低速能量回馈制动策略，若刹车踏板被踩下，固定制动电流为最大值 50A，机械制动方式同时进行；
- ⑦ 控制器与液晶显示仪表通过 CAN 对等通信，也为其带来了与车辆其他模块协调工作的能力。

参 考 文 献

- [1] 中国经济报告课题组著. 中国轻型电动车发展战略研究课题报告[R]. 北京: 国务院发展研究中心, 2006
- [2] 孙逢春. 电动汽车发展现状及趋势[J]. 科学中国人. 2006, 3(1): 44-47
- [3] 汤蕴缪, 史乃著. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社. 2001
- [4] C.C.Chan. The State of Art of Electric and Hybrid Vehicles[J]. Proceedings of IEEE. 2002, 90(2): 247-275
- [5] 陈全世. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 2007
- [6] 刘碧军, 杨林, 朱建新, 樊晓松, 卓斌. 电动汽车高压电安全测试系统的研究[J]. 汽车工程. 2005, 27(3): 274-277
- [7] 程伟, 徐国卿, 王晓东. 电动汽车用永磁无刷电机回馈制动技术研究[J]. 电气传动. 2005, 35(11): 15-23
- [8] 谭徽. 应用于两轮电动车辆的永磁无刷直流电机的研究[D]. 上海: 上海大学出版社. 2000
- [9] 杨立勇. 电动汽车用永磁无刷直流电机控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学出版社. 2004
- [10] 刘和平等著. dsPIC 通用数字信号处理器原理及应用—基于 dsPIC30F 系列[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2007
- [11] 龙乐. 汽车用功率 MOSFET 及其封装[J]. 电子与封装. 2006, 6(2): 1-4
- [12] 飞兆半导体公司. 如何确定 MOSFET 的适用性[J]. 模拟器件. 2006(3): 39-40
- [13] 国际整流器公司. 应对高电流的挑战[J]. 电源技术. 2006(6): 80
- [14] 杨克涛, 傅仁利. 绝缘金属铝基板的制备及介电性能研究[J]. 山东陶瓷. 2006(29), 6: 3-6
- [15] 高春燕. 电动高尔夫球车他励直流电机驱动系统研究[D]. 重庆: 重庆大学. 2007
- [16] 邱建琪. 永磁无刷直流电机转矩脉动抑制的控制策略研究[D]. 浙江: 浙江大学. 2002