

混合动力摩托车用无刷直流电机驱动系统研究^{*}

肖 平¹, 冯能莲^{2*}

(1. 安徽工程科技学院 机械工程系, 安徽 芜湖 241000; 2. 北京工业大学 环能学院, 北京 100022)

摘要:针对摩托车的环境污染问题,对能够实现节能减排的混合动力摩托车进行了研究。首先,在借鉴混合动力电动汽车研究成功经验的基础上,对混合动力摩托车的驱动系统进行了分析,并在此基础上完成了对 800 W 无刷直流电机驱动系统的研究,处理器选用 80C196KC16 位单片机,功率器件选用 MOSFET,驱动芯片选用 IR2101。在软件设计中采用了防脉冲干扰平均值软件滤波法和模糊 PI 控制算法,实现了闭环控制。试验结果表明,驱动系统可以满足混合动力摩托车的工作要求,为进一步进行混合动力摩托车的开发打下了基础。

关键词:混合动力;摩托车;无刷直流电机;驱动系统

中图分类号:TM301

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)04-0044-04

Research on the driving system of hybrid power motorcycle

XIAO Ping¹, FENG Neng-lian^{2*}

(1. Mechanic and Engineering Department, Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China;
2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Aiming at the problem of motorcycles environmental pollution, hybrid power motorcycle which could save energy and reduce emission of polluted air was studied. First of all, drawing lessons from the successful experience of hybrid electric vehicle, the driving system of hybrid power motorcycle was analyzed. On the basis of it, the research on driving system of brushless DC motor of 800 W was conducted. In hardware design, 80C196KC single chip microcomputer (SCM) was selected as the processor, MOSFET, as electron power tube and IR2101, as the driving CMOS chip respectively. In software design, closed loop control was achieved by software filtering algorithm of avoiding pulse disturbance and averaging and controlling algorithm of fuzzy PI. The experiment results indicate that the designed driving system could meet the working requirements of motorcycles and lay a solid foundation for further development of hybrid power motorcycle.

Key words: hybrid power; motorcycle; brushless DC motor; driving system

0 引 言

全球性的能源与环境问题促使各国汽车工业纷纷向着使用新能源、新动力方向发展。与汽车比较起来,虽然排量小但数量庞大的摩托车在这方面的发展却没有受到足够的重视。因此从环保的角度出发,参考混合动力电动汽车的成功经验,开发混合动力摩托车也十分有必要,且具有很高的可行性,也势必会为节约能源和降低排放发挥巨大作用^[1]。电机驱动系统是混合动力

摩托车的心脏,它的任务是在驾驶员的控制下,高效率地将蓄电池的能量转化为车轮的动能,或者将车轮上的动能反馈到蓄电池中^[2]。装在混合动力摩托车上的电机必须具有转矩和转速范围宽、低速和加速时输出转矩大、高速行驶时低转矩运行、电动机的操控性和稳定性好、动态响应快、功率密度高、坚固耐用等特点。永磁无刷直流电机采用交流方波供电以及离散转子位置反馈信号控制换相^[3],由于方波磁场与方波电流之间相互作用产生的转矩比正弦波大,因此,永磁无

收稿日期:2009-10-13

基金项目:安徽工程科技学院青年基金资助项目(2007YQ012zd)

作者简介:肖 平(1973-),男,安徽铜陵人,主要从事电动汽车方面的研究. E-mail: tlxp95@163.com

通信联系人:冯能莲,男,博士,教授. E-mail: fengnl@bjut.edu.cn

刷直流电机的功率密度大,且无刷直流电机具有动态响应快、控制性能好、体积小、重量轻等优点,因此无刷直流电动机非常适合应用在混合动力车辆中作为驱动源^[4-6]。

本研究的混合动力摩托车采用无刷直流电机作为驱动系统。

1 驱动系统的构成及控制方法

本研究中的混合动力摩托车,电池为水平铅蓄电池,单体电池容量 85 Ah,额定电压 48 V(单体电池电压 12 V × 电池数 4);驱动电机采用 800 W 无刷直流电机,发动机为 8 kW,发电机为交流发电机。摩托车由电动机单独驱动,发动机/发电机组只用来发电。当电池的剩余电量不足时,发动机/发电机组启动,并利用控制算法使发动机始终工作在最佳转速区,这样相比于普通摩托车来说,因其不受工况影响,排放特性大为改善,此时,电池相当于并联在发电机与电动机之间的“水库”,起到功率平衡作用。

1.1 电动机驱动系统基本构成

电动机驱动系统是电动摩托车三大关键技术之一,其主要功能是接收加速踏板、刹车和 PDR(停车、前进、倒车)的输出信号,经过信号处理,输入到电机控制器,控制功率电路的功率输出量,实现控制驱动电动机转速和转矩,再通过机械传动装置驱动车轮^[7]。其基本构成框图如图 1 所示。

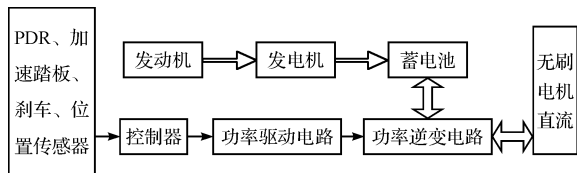


图 1 驱动系统结构框图

1.2 无刷直流电机调速方法

本研究设计的无刷直流电机控制系统采用电子换向器(逆变器)替代直流电动机的机械换向器,实现直流到交流的逆变,采用位置传感器控制绕组电流的切换控制,轮流导通 MOS 管来实现电机的连续运行。根据电机的电压平衡方程式:

$$U_s - \Delta U = E_a + IR \quad (1)$$

反电动势和转矩公式:

$$E_a = K_e \Phi n \quad (2)$$

$$T_a = K_T I \quad (3)$$

可以得到:

$$n = (U_s - \Delta U) / K_e - (RT_a) / (K_e K_T) \quad (4)$$

式中 U_s —端电压; ΔU —线路电压损耗; E_a —电机各相反电动势; I —各相相电流; R —回路等效电阻; K_e —电机电势常数; Φ —磁通量; n —电机转速; T_a —电机的转矩; K_T —电机的转矩常数。

这样,在保持转矩不变的情况下,要实现电机的调速在理论上就可以通过改变 K_e 、 R 、 U_s 来实现。但是,由于该电机是永磁体,所以改变 K_e 法行不通;而改变 R 的调速方法虽然设备简单、操作方便,但是它在调速过程中转速波动大,只能进行有级调速,且速度调节不平滑、损耗大,所以此法亦行不通;改变 U_s 的方法能平滑调节转速,调节范围大,并且能实现无级调速,调节过程中能耗小,所以本研究采用此法。本系统是通过调节逆变器功率器件的 PWM 触发信号的占空比来改变 U_s 从而实现无刷直流电动机的调速,系统的调速公式为:

$$U_s = k \cdot U_b \quad (5)$$

式中 U_s —两相通电绕组上的平均电压; k —PWM 占空比, $0 \leq k \leq 1$; U_b —电源电压。

通过改变 k 值可以改变电枢端电压的平均值,从而达到调速的目的,这就是利用 PWM 对无刷直流电机进行调速的原理^[8]。

2 系统设计及实现

2.1 电动机控制器

控制子系统的功能是接收驾驶员的操作指令、驱动子系统的状态信号等,并对这些信号进行处理运算,将电机下一步应该采取的动作以指令的方式传到驱动子系统^[9]。通过分析系统的功能和比较性价比等,本研究最终选用 INTEL 公司的 MCS96 系列单片机中的 80C196KC 作本系统的微控制器。其中 80C196KC 是采用 CHMOS 技术的高性能 16 位单片机,主频可运行到 20 MHz,具有丰富的外部接口资源,较高的可靠性。控制器部分的系统框图如图 2 所示。电路采用 HSO 口和 PWM 波发生器,以产生 6 路 PWM 输出,其中用 HSO 产生的 PWM 控制驱动桥的下桥臂 3 个功率管,用 PWM 波发生器发出的 PWM 波控制驱动桥的上桥臂的 3 个功率管。为了保护电机,过流保护和欠压保护是必要的,主回路电压和电流的检测是通过霍尔传感器来实现。主回路电流传感器转换率为 1 000 : 1,采样电阻为 100 Ω ,限制最大主回路电流为 20 A;主回路中电压传感器转换率为 2 000 : 1,采样电阻为 50 Ω ,限制主回路最低电压为 46 V。电机的转速信号是系统的另一个重要参数,将电机自带的位置传感器信号

引入单片机,其信号是一个幅值不超过 5 V 的方波信号,单片机采用高速输入口 HIS.0 进行捕捉。系统中使用 DC-DC 电源模块给控制器提供多种规格电源。为了防止电磁干扰,本研究采用了 TLP521-4 四路高性能光电隔离器件,其输入/输出隔离电压高达 2 500 V,当输入电流为 5 mA 时,电流传输比最小为 50%。

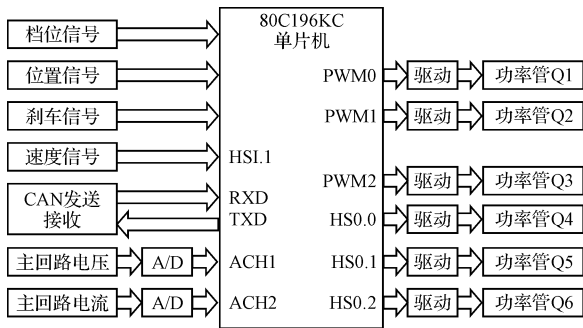


图 2 电机控制器系统框图

2.2 功率逆变电路

摩托车的前进、后退、驻车是通过电机的正转、反转、停转来实现的。而电机的正转、反转是根据电机的位置传感器给相应的功率管控制端施加 PWM 波,形成特定的相电流,从而产生特定的电磁转矩,使电机向着正向或反向转动;而电机的停转是使 6 路 PWM 波的占空比为 0,从而使电机的相电流和电磁转矩都为 0,电机停止转动。

功率逆变电路如图 3 所示。电路为三相全桥结构,无刷直流电动机以“两相导通三相六状态”方式运行,即每一状态中有两相绕组导通,电机每转过一周有 6 种磁势状态。这 6 种磁势状态互差 60° 电角度,形成跳跃式的旋转磁场。正转时(顺时针),6 只功率管(MOSFET) STP75NF75 的导通顺序为 $Q_1Q_2 \rightarrow Q_2Q_3 \rightarrow Q_3Q_4 \rightarrow Q_4Q_5 \rightarrow Q_5Q_6 \rightarrow Q_6Q_1 \rightarrow Q_1Q_2$,反转时(逆时针)导通顺序为 $Q_4Q_5 \rightarrow Q_3Q_4 \rightarrow Q_2Q_3 \rightarrow Q_1Q_2 \rightarrow Q_6Q_1 \rightarrow Q_5Q_6 \rightarrow Q_4Q_5$ 。从性价比的角度出发,本设计中的功率主电路开关管 $Q_1 \sim Q_6$ 均采用 MOSFET。 C_7 是一个相对容量较大的电解电容,它的主要作用是稳压和母线滤波。

由于 80C196KC 的驱动能力有限,为了使大功率的逆变桥开关管能够稳定快速的通/断,本研究使用了 MOS 栅极驱动器 IR2101 作为主功率元件的驱动电路。它集驱动、保护于一体,大大简化了电路结构。其主要特点包括:①可直接驱动 600 V 高压系统;②具有电流放大和过电流保护功能;③自动产生成上、下侧驱动必需的死区时间(2 μ s)。

2.3 系统软件设计

在软件设计中,本研究采用了 HSO、HSI、软件定

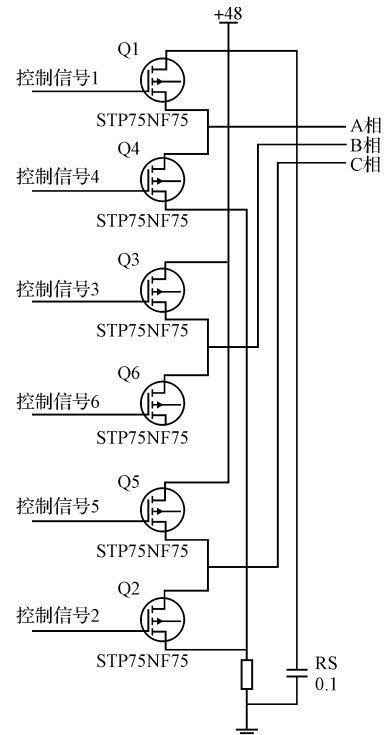


图 3 功率逆变电路图

时器、定时器溢出等中断。HSO 中断用来产生 3 路占空比可调的 PWM 波,从而实现对电机的调速;HSI 中断用来检测车轮的转速信号;软件定时器中断用来定时地对模拟量进行检测;定时器溢出中断用来捕捉速度脉冲 2 个相邻正向跳变之间定时器 1 复位的次数。

在软件设计中,本研究还采用了软件滤波和模糊 PI 控制算法。常用的软件滤波方法有算术平均值滤波法和移动平均滤波法。尽管这些方法都对采样点进行了 $1/n$ 处理,但其剩余仍然较大,因此,这些方法在这种场合就显得有些无能为力。所以,本研究采用了防脉冲干扰平均值滤波法。其原理是,对连续采样的 n 个数据进行排序,去掉其中最大和最小的两个数据(被认为是受干扰的数据),将剩下的数据平均。

为了对电机转速实现精确控制,本设计对电机转速采用模糊 PI 控制算法,其工作原理框图如图 4 所示。这种控制算法既克服了 PID 控制算法难以满足高精度、快响应的缺点,又克服了模糊控制算法难以消除稳态误差的缺点。该控制器的最大特点是在大偏差范围内利用模糊推理的方法调整系统的控制量 U ,以提高系统的响应速度,在小偏差范围内转换成 PI 控制,消除模糊控制难以克服的稳态误差,这样既可以获得很好的动态性能又可以做到调速系统的无静差。

软件的主程序主要实现如下功能:

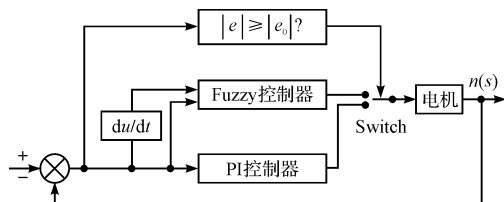


图4 模糊PI控制算法原理框图

(1) 循环检测蓄电池的电压是否正常,一旦发现异常现象立即关断无刷直流电机;

(2) 循环检测主回路电流,一旦发现异常现象立即关断无刷直流电机;

(3) 按照驾驶员的意图来控制无刷直流电机;主程序流程图如图5所示。

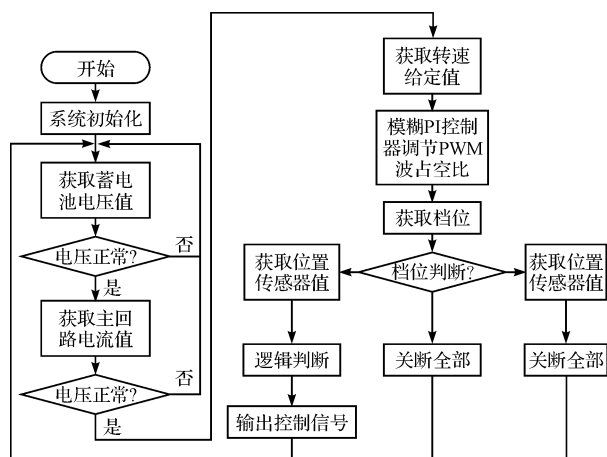
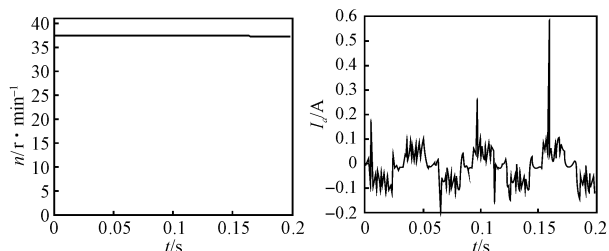


图5 主程序流程图

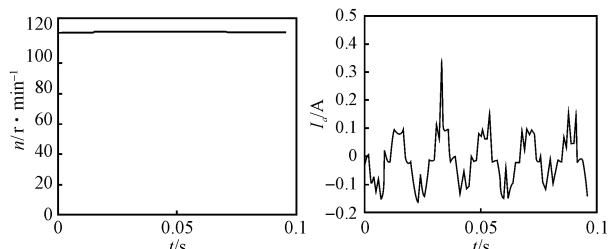
3 试验

为验证装有本系统的电动摩托车能否正常工作,笔者进行了台架试验。电动机空载时的试验结果如图6所示。其中,加速踏板开度为20%时电机转速对时间的曲线和a相电流对时间的曲线如图6(a)所示;加速踏板开度为40%时,电机转速对时间的曲线和a相电流对时间的曲线如图6(b)所示。

从图中可以看出,当加速踏板开度为20%时,电机的转速稳定在37.5 r/min;当加速踏板的开度为40%时,电机的转速稳定在120 r/min;同时,当电机转动时其相电流基本稳定,但是因为实验车机构的原因(车轮转动时有摩擦),相电流略有波动和跳变,且随转速的增大而幅度降低。由上述试验结果可知,本研究设计的电机控制系统基本能够实现对电机的控制。



(a) 加速踏板开度为20%



(b) 加速踏板开度为40%

图6 电机试验结果

4 结束语

笔者在对电动摩托车驱动系统以及无刷直流电机工作原理进行分析的基础上进行了软硬件设计,本研究设计的电机驱动系统的硬件具有结构简单、实施性强、抗干扰性好等特点。软件采用了软件滤波和模糊PI控制技术,使系统的工作更加可靠。在此基础上本研究进行了台架试验,其结果表明系统的软硬件工作稳定、可靠,控制算法与控制策略切实可行,为进一步对电动摩托车的研究打下了一个良好的基础。

参考文献(References):

- [1] 孙逢春. 电动汽车的现状与发展趋势[J]. 科学中国人, 2006(8): 44-47.
- [2] 郭建龙, 陈世元. 电动汽车驱动用电机的选择[J]. 汽车电器, 2007(1): 9-12.
- [3] 万静龙, 朱卫国, 孙虹. 永磁无刷直流电动机的仿真分析[J]. 机电工程技术, 2009, 38(4): 27-29.
- [4] RAHMAN Z, EHSANI M, BUTLER K L. An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for Ev and Hev Propulsion Systems[D]. SAE Technical Paper Series, 2001.
- [5] 王永益, 王家军, 庞全. 无刷直流电动机的模糊积分变结构控制[J]. 2008, 25(6): 11-14.
- [6] 张晓峰, 吕征宇. 新型混合动力自行车电力驱动系统的研制[J]. 机电工程, 2007, 24(11): 47-49.
- [7] 张希明, 陈立铭, 倪光正. 一种基于TM S320F2812的电动汽车电驱动系统[J]. 机电工程, 2008, 25(3): 61-63.
- [8] 谭成, 冯水仙, 张仲超. 无刷直流电机H/L-PWM-ON控制策略[J]. 机电工程, 2007, 24(5): 74-76.
- [9] KAM IYA K, OOISH IJO K. Development of In-wheel Motor System for Micro EV[C]. EVS 18 Berlin, 2001.

[编辑: 张翔]