

两轮自平衡电动车及其电机控制器设计

王陆军, 许勇

(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:两轮自平衡电动车的平衡原理源自倒立摆模型,为研制两轮自平衡电动车设计了一套两轮自平衡电动车的方案,并采用 MC33035 和 PIC18F4580 为主控芯片为两轮自平衡电动车设计了一个电机控制器,通过实验样车和控制器电路的设计、制作和实测实验,结果表明样车和控制器设计均结构简单、控制性能良好,能够满足两轮自平衡电动车下一步的研究使用要求。

关键词:两轮自平衡电动车;无刷直流电机;控制器

中图分类号:TM33,TP273

文献标识码:A

Design of Two-wheeled Self Balancing Electric Vehicle and Motor Controller

WANG Lu-jun, XU Yong

(Computer Science and Engineering Institute, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: A design of two-wheeled self balancing electric vehicle was given based on the theory of inverted pendulum. Also a controller was designed by using MC33035 and PIC18F4580. By the vehicle and the circuit's designing, production and debugging, it is proved that both the vehicle and controller are excellent systems with single structure and efficient controlling feature, can meet the requirements of further study.

Key words: two-wheeled self balancing electric vehicle; brushless DC motor; controller

1 引言

两轮自平衡电动车采用左右平行双轮布置的结构,可以承载站立在车体平台上的驾驶者,在保持平衡的状态下在多种路面上行驶。两轮自平衡电动车性能优越,但售价高昂,在美国的价格也要 5 000 美元左右,几乎可以购买一辆微型轿车。

本文给出了一个成本相对较低的两轮自平衡电动车设计方案,并使用 MC33035 和 PIC18F4580 设计了其控制器,该方案通过驱动 24 V 轮毂一体式三相无刷直流电机对两轮自平衡电动车的行进速度进行实时控制以实现车体平衡。

2 两轮自平衡电动车平衡原理

两轮自平衡电动车的平衡原理来自于倒立摆模型,倒立摆系统的动态方程如下:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\varphi}\cos\varphi - ml\dot{\varphi}^2\sin\varphi = F \\ (I+ml^2)\ddot{\varphi} + mgl\sin\varphi = ml\ddot{x}\cos\varphi \end{cases}$$

式中: φ 为倒立摆相对与垂直方向的角位移; x 为小车的位置; l 为摆长(摆杆转动轴心到杆质心的

长度); M 为小车的质量; m 为倒立摆末端的点质量; g 为重力常数;控制输入 F 为施加于小车上的力; b 为小车摩擦系数; I 为摆杆惯量^[1]。

由于两轮自平衡电动车的双轮平行布置在车体的左右两端,且载人时重心在双轮轴心正上方,所以它相当于一个倒立摆,是不稳定体,车体总是要向前或向后倾倒。当检测到车体向前倾斜时,通过让电机加速旋转来产生一个向前的加速度,这个加速度使得在双轮轴心上方的重心向后摆动,这就抵消了车体的向前倾斜,使车体的重心回到两轮中心轴的正上方,从而在竖直方向保持平衡。这一平衡是动态的,为保持车体竖直不倒,必须不断检测车体倾斜姿态,根据倾斜状况驱动电机前进或后退,来克服重心偏移现象,保持车体平衡。

3 两轮自平衡电动车设计方案

本文设计的两轮自平衡电动车设计框图见图 1,整车包括 6 大部分:传感器模块、运算模块、电机控制驱动模块、电机、蓄电池、车厢及其它附件。设计的总体要求是性能稳定、使用和维护方便、价

格低廉。

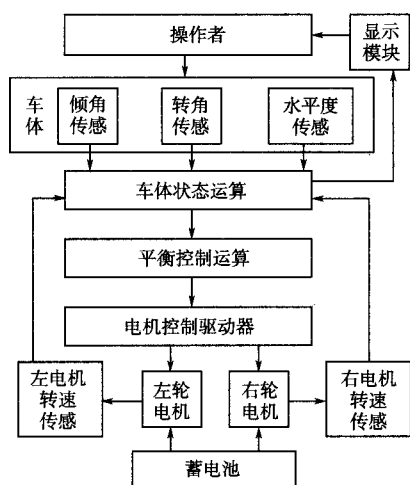


图 1 两轮自平衡电动车模块框图

Fig. 1 Block diagram of two-wheeled self balancing electric vehicle

3.1 传感器模块

两轮自平衡电动车的平衡运算最主要的参数是车厢体的倾斜角度,同时也需要倾斜角速度作运算参数,测量倾斜角度较好的方法一般是使用加速度计或陀螺仪。陀螺仪是用来测量角速度信号的,通过对角速度积分,即可得到角度值。陀螺仪动态性能极佳,不易受被测体速度和加速度影响,但它容易产生漂移误差,而很小的漂移经过积分都会得到很大的角度误差。因此,陀螺仪不适合单独使用。加速度计通过测量重力加速度的垂直分量,可以给出垂直方向的倾斜角度。而加速度计静态响应良好,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。可见,单独使用陀螺仪或加速度计都不理想,因此本设计方案同时使用一个陀螺仪和一个加速度计,对测量数据的融合计算,用陀螺仪补偿加速度计的动态误差,用加速度计补偿陀螺仪的漂移误差,从而可获得既具有高动态响应又精确稳定的测量数据。

转角传感测量小车的转动角,进而判断操作者的转向意图,从而向运算模块发出向左转或向右转弯的指令,本方案采用旋转变阻器作为转角传感器,安装在操作手柄与竖杆的连接处,它直接输出与操作手柄的转角成正比的电压值,在电动车行驶过程中,运算模块根据此电压值做出向左或向右的转弯决定,以及转弯角度。

水平度传感器用于辅助平衡运算,主要是测量到车体水平时向运算模块报告车体已处于平衡

状态。水平度数据使用加速度计来测量。

3.2 运算模块

PIC18F4580 是 Microchip 公司推出的一款高性能闪存型单片机,它采用 RISC 结构,最高可以在 40 MHz 的高速频率下工作,能够满足两轮自平衡电动车运算模块的性能需求^[2]。

运算模块包括车体状态运算和平衡控制运算 2 个部分。车体状态运算主要是将各传感器测量的数据加以融合得出车体倾斜角度值、倾斜角速度值以及行车速度等。平衡控制运算根据车体状态数据,计算保持平衡需要的行车速度和加速度,或者转弯所需要的左右电机速度变化值,向电机控制驱动模块发送控制指令。

运算模块相当于两轮自平衡电动车的大脑,它主要负责的工作是:控制电机的起停,向控制模块发出加速、减速、电机正反转和制动等速度控制信号,接收电机 Hall 信号进行车速度计算,并通过 RS-232 串口向 PC 发送车速数据以供存储和分析。另外,PIC18F4580 还接收车体平衡姿态数据,进行自平衡运算。运算模块用 C 语言编程,其程序工作流程如图 2 所示。

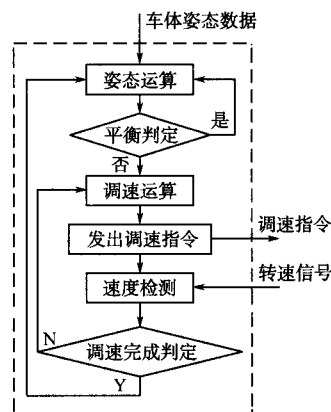


图 2 运算模块程序工作流程

Fig. 2 Flow chart of calculating module

3.3 电机方案

无刷直流电机自 1962 年面世以来,已广泛应用于各种调速驱动场合。无刷直流电机用电子换向器取代了普通直流电机的电刷和换向器,优点是效率高,启动转矩大,过载能力强,操作性能好,结构简单、牢固,免维护或少维护,体积小质量轻,适合用于两轮自平衡电动车。目前市售电动车的驱动电机类型主要为三相星型连接的永磁无刷直流电机^[3-4]。

电机方案有独立电机加齿轮传动方案与轮机

一体的轮毂驱动方案,目前国内的两轮自平衡电动车研究大都使用独立的直流电机、步进电机或伺服电机,配合齿轮传动,未见采用轮机一体的轮毂驱动方案。

轮毂驱动无刷直流电机将电机与车轮结合为一体,结构简单,效率高,启动转矩大,操作性能好,已经是目前电动自行车的标准配置,本设计采用轮毂驱动无刷直流电机。

轮毂驱动相对于传统驱动方式,取消了离合器、变速器、差速器等机构,电机直接做到车轮的轮毂中并与车轮同轴。这样,既完全消除了传动中的机械磨损与功率损耗,提高了传动效率,又有较小的体积、较轻的重量,较低的故障率,减少了维修维护,车轮空间也能得到有效利用。并且,选择轮机一体的带电机车轮已广泛用于市场上常见的电动自行车,价格低廉,易于购买和更换^[5]。

3.4 蓄电池

蓄电池的选择有铅酸蓄电池、镍氢电池、锂电池。锂电池价格昂贵,不适合于低成本电动车。镍氢电池用单个 1.2 V 的电池组合成所需电压,使用上不够方便,且其自放电较大,充满电放置几天不用也会由于自放电而又要充电,因此本方案也没有选择镍氢电池。铅酸蓄电池虽然体积偏大,重量较重,但具有技术成熟、价格低廉、安全性高等突出优点,近几年的技术发展已使其具有较高的容量,较大的放电能力,并做到了免维护使用,目前市上的电动自行车绝大多数都采用铅酸蓄电池。市售电动自行车采用 36 V 或 48 V 铅酸蓄电池供电,考虑到两轮自平衡电动车自身重量远低于电动自行车,且承载量不会超过 1 个人,速度限制在 15 km/h 以下,也不用于远距离行驶,因此本设计采用 2 节 12 V/10 A·h 电动自行车铅酸蓄电池串联组成 24 V 供电电源,既满足使用要求,又价格低廉,购买和更换都很方便。

3.5 车厢及其他附件

车厢的主要作用有:1)当作载物箱,用于安装蓄电池、传感器、控制电路板等零部件;2)作中轴连接左右 2 个车轮;3)作脚踏板用于载人。对车厢材料首先的要求具有较高的刚度,能承载足够的重量,其次是本身重量尽可能轻。因此选择角铝做为车厢骨架材料,能够兼顾刚度和自身重量的要求。扶手杆使用不锈钢管,中间可以穿行导线,以便传送转角传感器信号和其它控制信号。

4 电机控制器设计方案

4.1 控制器的设计

MC33035 是高性能第 2 代单片无刷直流电机控制电路集成芯片,它包含了开环、三相或四相电机控制所需的全部功能,以及附加了一些保护功能,能有效地控制无刷直流电机。

本文所设计的控制器由控制模块和驱动模块 2 个主要部分组成,其模块方框图见图 3。

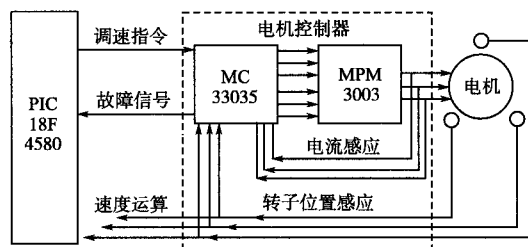


图 3 控制器模块框图

Fig. 3 Module diagram of controller

其中控制模块的核心是 MC33035。MC33035 主要负责的工作是:接收电机的 Hall 转子位置感应数据,通过逻辑运算得出三相 H 桥的 6 个 MOSFET 的开通和关断序列,并结合正反转开关、制动开关、电流检测电路发出相应的开关信号,接收 MC33039 的速度反馈信号以进行速度闭环控制,控制模块有多种故障监测和保护电路,如欠压保护、逐周期限流、过热保护,并有向外输出和显示故障信号的端口,十分方便微控制器的控制^[6]。

MC33035 本身只提供开环电机速度控制,要实现闭环控制,通常的做法是使用一个转速计产生一个电机反馈电压给 MC33035,但转速计价格较高,本设计方案使用一片价格低廉而性能优越的 MC33039 来获取转速数据并反馈给 MC33035,MC33039 的作用是收集电机霍尔信号转换成转速脉冲,向 MC33035 提供转速反馈以形成转速闭环控制。

驱动模块的核心是 MPM3003,它集成了 3 个 P 沟道 MOSFET 功率开关器件作为上桥臂和 3 个 N 沟道 MOSFET 功率开关器件作为下桥臂,允许的持续工作电流达 10 A,峰值电流达 25 A,它的主要作用是在控制模块的 PWM 信号控制下进行有序的开通与关断,给三相无刷直流电机的各相绕组接通 PWM 方波电流,从而驱动三相无刷直流电机,使电机按控制器发出的控制信号启停或按要求的方向和速度旋转。

电机控制和驱动模块的电路图见图 4。

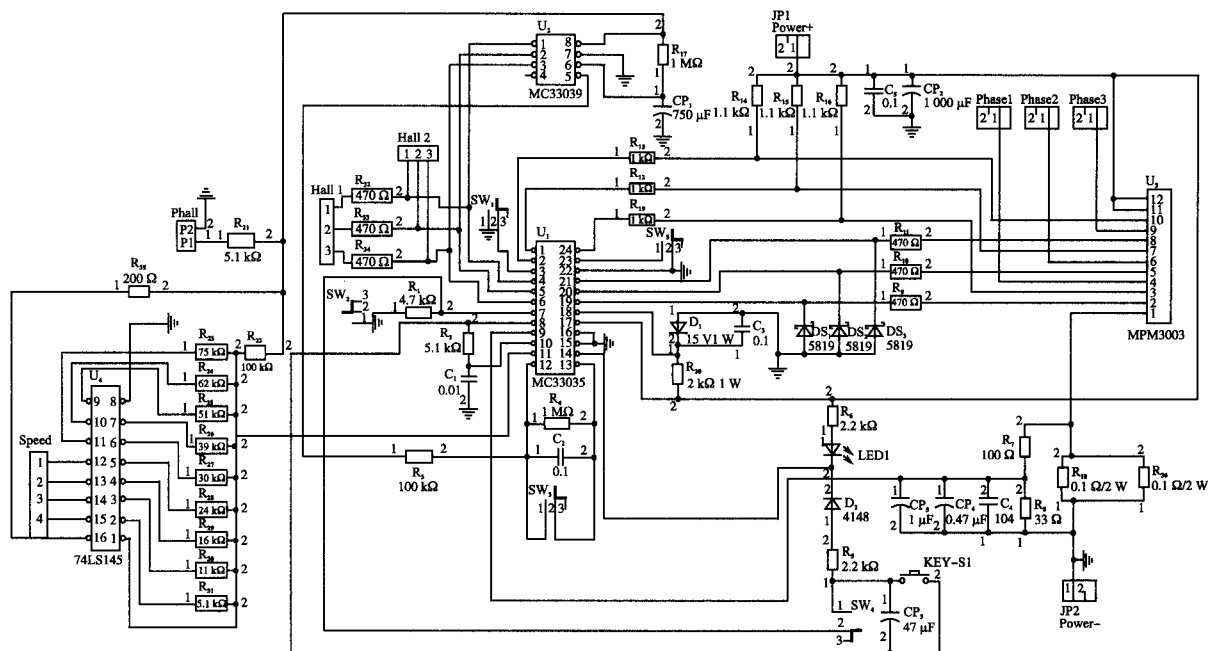


图 4 控制器电路图

Fig. 4 Circuit diagram of controller

4.2 调速原理

当 MC33035 接收到 PIC18F4580 发来的加速或减速信号时,其内部电路根据调速要求增加或减少 PWM 波占空比,以此改变供给每相绕组线圈的平均电压,从而改变每相绕组线圈的电流供应,使电机加速或减速。

当电机运行时,无论是在加速、减速,还是匀速运行,速度反馈芯片 MC33039 都实时接收电机 Hall 信号进行转速检测,并向 MC33035 实时反馈转速信号,供 MC33035 做转速闭环控制。

当检测到错误的电机转子位置信号、过流、欠压、芯片过热的任意一个故障信号时,MC33035将通过 Fault Output 引脚发出错误警报,使作为上位机的平衡运算模块及时获知故障信息,同时自动封锁本控制模块,经系统复位才能恢复正常工作。

5 实验

5.1 实验样车及控制器电路制作

依前述方案制作了实验样车及控制器电路。

本实验采用 Y 型连接的三相无刷直流轮毂一体式电机, Hall 传感器相位为 120° , 选定工作电压 24 V, 由 2 节 12 V 电动自行车铅酸蓄电池串联供电, 车厢尺寸长宽高为 $500\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 车轮外径 420 mm, 车轮间距 660 mm。

5.2 实测

在电机及控制器上电前,以手动方式转动电机,同时用示波器测量并记录电机霍尔传感器的 3 路输出信号,与 MC33035 的霍尔传感器真值表作对比。经对比实验所得真值表与理论真值表一致。

在确定了霍耳传感器与 MOSFET 开关真值表之后,进行了空载情况下的电机调速实测实验。实验方法是由 PIC18F4580 向控制器发出 6 个不同档次的调速信号,速度要求依次提高,并由 PIC18F4580 采集霍耳传感器电平变化来计算转速值,每隔 20 ms 通过串口向 PC 发送一次速度值,在 PC 端记录下此速度值以供分析。由于本电机控制和驱动模块是为两轮自平衡电动车而设计的,因此在计算速度时直接计算出车轮外径的滚动速度,单位是 mm/s,此速度值就是车体的行车速度。整理后将车速数据绘制成电机调速曲线如图 5 所示。

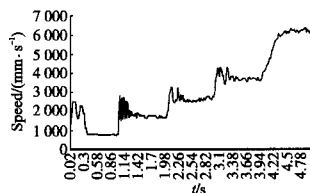


图 5 控制器电机调速数据

Fig. 5 Motor speed control data of controller

由图 5 可见,电机每次完成速度调整后均能快速进入稳定运行状态,从开始加速到达到目标

速度的时间不超过 0.1 s,速度调整稳定的时间不超过 0.3 s。之所以在每次调速开始时会出现相对较大的速度波动,主要原因有 2 个:一是空载实验时,没有负载可以消耗电机绕组电流突然加大带来的转矩波动,使转速突然增大,尤其是电机从停止状态启动到转动状态瞬间的超调速度较大,但由于控制模块具有转速闭环控制功能,使得电机能在 ms 级的时间内调整转速并快速进入稳定运行状态;二是由于车轮及轮胎质量不均匀,在转速改变过程中对转速的均匀性产生影响。然而,电动车实际运行时,负载对波动有阻尼作用,转速波动将会更小,调整时间也会更短,又由于此调整期间的转速波动的时间是 ms 级且能快速回调,且其波动值相对于电动车行走过程中遇到路面不平所造成的影响要小得多,因此实际运行时调整期的转速波动对电动车运行没有影响。

6 结论

设计和制作了两轮自平衡电动车实验用车及

其采用 MC33035 芯片和 PIC18F4580 芯片构成的控制器,并进行实测实验,实验说明本设计结构简单,调速性能好,保护功能齐全,能够满足两轮自平衡电动车的使用要求。

参考文献

- [1] 彭书华,李华德,曲永印,等. 免疫切换控制及其在倒立摆系统中的应用[J]. 电气传动,2009,39(8):32-35.
- [2] PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet [Z/OL]. <http://www.microchip.com>.
- [3] 刘刚,王志强,房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 郝允志,林毓培,薛荣生. 轻型电动车低功耗控制器设计[J]. 电气传动,2009,39(2):76-78.
- [5] 钱苗旺. 电动车用永磁无刷电动机比较综述[J]. 微特电机,2008,36(11):56-60.
- [6] Brushless DC Motor Controller MC33035 Data Sheet[Z/OL]. <http://www.onsemi.com>.

收稿日期:2011-01-18

修改稿日期:2011-05-28

~~~~~

(上接第 14 页)

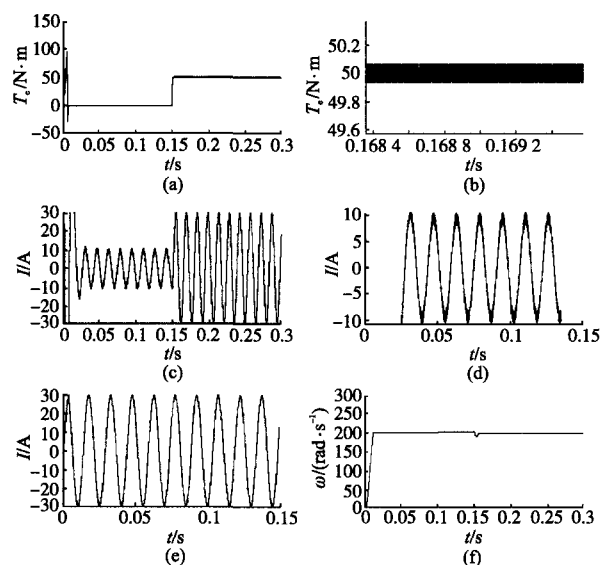


图 6 高速区系统仿真波形

Fig. 6 High-speed area system simulation waveforms

## 5 结论

本文在直接转矩控制原理的基础上,进行了异步电机 DTC 控制系统的数学建模,结合神经网络控制策略,通过在 Matlab/Simulink 环境下的仿真实验,验证了神经网络 DTC 方法在电力

牵引控制系统中的可行性和实效性。通过对该控制方案的扩展,使系统取得了较好的动态及稳态性能,也为其他电机运动控制系统的设计提供了参考。

### 参考文献

- [1] 陈伯时,陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 李凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 张志宝,谭国俊,吕现钊. 神经网络在开关磁阻电机建模中的应用[J]. 电机与控制应用,2009,36(2):23-24.
- [4] Fiorenzo Filippetti. Neural Network Aided On-line Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults[J]. IEEE Trans. on IA,1995,31(4):829-889.
- [5] 李成. 神经网络系统理论[M]. 西安:电子科技大学出版社,1993.
- [6] Hirokazu Tajima,HoriY. Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine[J]. IEEE Trans. on IA,1993,29(1):175-180.
- [7] 马东梅,金阳. 模糊逻辑和神经网络在传动领域中的应用[J]. 机床与液压,2005(12):23-24.
- [8] 支娜. 基于神经网络的无速度传感器交流调速系统的研究[D]. 西安:西安科技学院,2001.

收稿日期:2011-01-28

修改稿日期:2011-07-22