

# 航模直流无刷无感电机调速控制系统设计

戴 敏, 曹 杰, 史金飞

(东南大学 机械工程系, 江苏 南京 210096)

**摘要:**针对航模用无传感器无刷直流电机的特点,设计开发了其专用调速控制系统。首先分析了无传感器无刷直流电机的位置检测方法、PWM 调制方式和启动策略等控制原理。接着以 MEGA8 单片机为核心设计了硬件系统,对几个关键控制电路给出了原理图并进行了详细阐述。最后还给出了系统控制多种航模用电机的测试结果。

**关键词:**无位置传感器;无刷直流电机;控制系统;MEGA8

**中图分类号:**TM301 **文献标识码:**B **文章编号:**1000-8829(2006)07-0030-04

## Design of a Speed-Adjustment Control System for Senseless Brushless DC Motor

DAI Min, CAO Jie, SHI Jin-fei

(Mechanical Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** A speed-adjustment control system of senseless brushless DC motor in aeromodelling is introduced. Some basic theories, such as methods of position detection, PWM control and starting policy of senseless BLDCM are disserted in the first. The hardware design is based on MEGA8 microcontroller. Some key control circuits are discussed. Finally, a test result of controlling multi-sensorless BLDCM in aeromodelling is specified.

**Key words:** senseless; brushless DC motor(BLDCM); control system; MEGA8

航模用无刷直流电机(BLDCM)具有体积小、重量轻、效率高和可靠性高等优点,由于航模领域的特殊性,对于电机的控制系统也提出了一些特殊的要求,其中最重要的就是要求控制系统的体积小、质量轻。这就要求设计者在设计控制电路时必须使用较少的元器件和较简单的电路。

关于无传感器无刷直流电机控制系统的研究很多,其中文献[1]提出了使用 MC68HC908GP32 芯片为核心的无传感器无刷直流电机控制应用策略;文献[2]提出了一种基于 DSP 的无传感器无刷直流电机控制方法,借助于 DSP 的强大运算处理能力,完全由软件实现反电势过零检测换相和开环起动。这些方法均能实现对电机的控制,但是在电路设计上都比较复杂,与航模用无刷电机控制系统电路设计简单的要求相矛盾。本设计是以 MEGA8 单片机为核心的无刷直流电机控制系统,该系统充分发挥 MEGA8 单片机的特点,外围控制电路十分简单。

### 1 无传感器无刷直流电机控制简介

目前常用的无刷直流电机控制方法可分为 3 类:

开环控制,转速负反馈控制和电压负反馈加电流正反馈控制。其中开环控制方式适合于转速精度要求不高的场合,转速负反馈方式适合于机械特性要求比较硬、转速精度比较高的场合,而电压负反馈电流正反馈方式则应用于动态性能要求比较高的场合。航模用的无刷直流电机对于转速精度要求并不很高,使用开环控制方式就可满足要求。

图 1 是无刷直流电机的电路原理图<sup>[3]</sup>。采用二相导通星形三相六状态控制策略时,其工作过程如下:

- $t = 0^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T1  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  T4  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 60^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T1  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  T6  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 120^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T3  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  T6  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 180^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T3  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  T2  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 240^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T5  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  T2  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 300^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T5  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  T4  $\rightarrow$  电源  $-$
- $t = 360^\circ$  电流:电源  $\rightarrow$  T1  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  T4  $\rightarrow$  电源  $-$

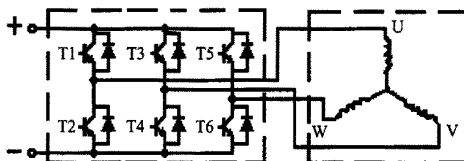


图 1 无刷直流电机的电路原理图

由此可看出,只要转子在合适的位置及时准确地

收稿日期:2005-12-06

作者简介:戴敏(1977—),女,江苏泰兴人,在读博士研究生,主要研究方向为机械制造及其自动化技术。

切换相应的开关管进行换流,电机就能平稳旋转并获得最大的转矩。

## 2 系统设计

### 2.1 总体设计

如前所述,在航模电机调速控制系统中,对设计者最大的挑战就是如何使用简单的电路,较少的元器件,在有限的空间里设计出高效、可靠的控制系统。因此作者选用了 MEGA8 单片机作为系统控制核心,在电机驱动部分使用 P 沟道和 N 沟道配合的全桥驱动电路。对于一些既可以使用硬件电路实现,又可以使用软件程序实现的功能,在设计中将权衡两者在实现中的速度、精度和复杂程度,做出合理的选择。

航模电机调速控制系统具有以下功能:

- ①电机速度控制信号的检测;
- ②三相直流无传感器无刷电机的调速控制;
- ③电池电压检测。

### 2.2 硬件设计

系统硬件框图如图 2 所示(其中虚线部分只在开发调试中使用)。

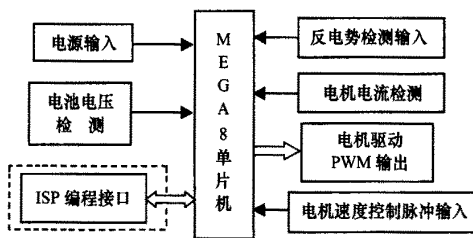


图 2 系统硬件框图

#### 2.2.1 MEGA8 单片机简介

MEGA8 单片机内部集成了 8 KB 的 FLASH,具有丰富强大的硬件接口电路,但由于采用了小引脚封装,所以价格与低档单片机相当,因此具有极高的性价比。当工作在 16 MHz 时,具有 16MIPS 的性能,完全可以适合无传感器无刷直流电机的控制需求。带 TQFP 封装的 MEGA8 单片机具有 2 通道 8 位 A/D 转换,可以胜任电池电压检测这种对精度没有苛刻要求的功能。

MEGA8 最多有 23 个可编程的 I/O 口,可任意定义 I/O 口的输出和输入方向。输出时为推挽输出,驱动能力强,可直接驱动大电流负载。输入口可定义为三态输入、带内部上拉电阻输入,具有一定的灵活性,且可以简化外部电路。

另外,MEGA8 支持 ISP 功能,在程序设计、调试时很方便地对器件进行在线编程、修改,而不需要使用专用设备。

#### 2.2.2 反电势过零检测电路设计

无位置传感器无刷直流电机控制的一个关键点就是电机转子位置信息的检测与估计。作者在设计中使

用了反电势过零法<sup>[4]</sup>对转子位置进行检测。该方法具有线路简单、技术成熟、成本低廉等优点,当然也存在电机不转及转速很低时,反电势无法检测的缺点。对于这些不足,作者使用了软件优化等方法予以克服。

反电势过零法的工作原理如图 3 所示:在任何时刻,电动机三相绕组只有两相导通,每相绕组正反相分别导通 120°电角度。通过测量三相绕组端子及中性点相对于直流母线负端(或正端)的电位,当某端点电位与中性点电位相等时,则此刻该相绕组反电势过零,再过 30°电角度就必须对功率器件进行换相。据此可设计过零检测及移相(或定时)电路,从而得到全桥驱动 6 个功率器件的开关顺序。

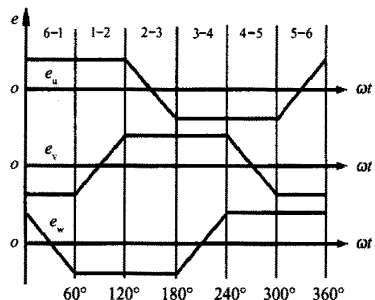


图 3 反电势过零法的工作原理

由电机学原理<sup>[3]</sup>可得:三相的反电势过零检测方程为(以 U 相为例)

$$e_u = u_u - \frac{1}{2}(u_v + u_w) \quad (1)$$

MEGA8 具有 AD 转换电路,可以直接将待检测的电路接入 ADC 端口,检测电压的值,但是对于反电势过零法而言,要获得的并不是具体的反电势电压值,而只是反电势的过零点,因此如果直接使用 MEGA8 的 AD 功能,虽然在电路上是简化了,但是在软件的编制上却带来了很大的问题,首先 AD 采样不仅使软件程序编制复杂,而且运行 AD 采样将占用过多的 MCU 运行时间,降低程序的实时性。而实际上只需要根据式(1)确定反电势符号改变的时点,就可以认为检测到过零点。因此在设计中采用了专门的过零点检测电路,使用简单的硬件电路解决软件 AD 采样和电压比较的复杂过程。实际电路如图 4 所示(U 相电路)。当截止相 U 反电势到达过零点时,LM339 将产生一个脉冲。

根据式(1),当反电势为零时有  $2u_u = u_v + u_w$ ,从图中可见,当  $u_u$  从  $+$   $\rightarrow$   $-$  过程中, outputU 处产生一个下降沿脉冲,当  $u_u$  从  $-$   $\rightarrow$   $+$  过程中, outputU 处产生一个上升沿脉冲。单片机通过检测脉冲的变化,即可得到过零点的位置。

#### 2.2.3 电机驱动电路设计

对于永磁无刷直流电机,从图 3 中可见,每一个周

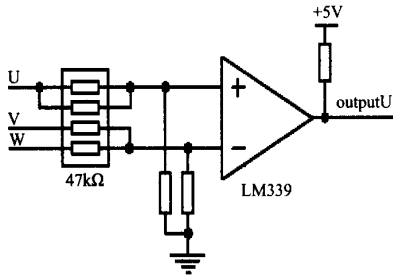


图4 反电势检测电路(U相)

期由6个60°的扇区组成,每个元件导通120°,即在两个连续的扇区中导通。因此有2种PWM调制方式:半桥载波和全桥载波。对于永磁直流电机而言,无论是上半桥载波还是下半桥载波,截止相都会产生续流,导致其余两相电流产生波动,电机转速越高,相应的波动也就越大。而采用全桥载波,则始终有两相导通,截止相不会产生续流,电流波动和转矩脉动都较小。当然全桥载波也有不足之处,全桥载波时功率管的开关损耗是半桥载波方式的2倍。

在本设计中电机的驱动采用全桥驱动电路,使用一对P沟道和N沟道的POWER MOSFET控制。电路如图5所示。MEGA8单片机具有3个硬件PWM通道,可以实现任意<16位、相位和频率可调的PWM脉宽调制输出,因此在设计中直接使用硬件PWM功能。从速度和精度上来讲,硬件PWM都优于软件PWM,而且使用硬件PWM不仅不需要增加外围电路,还可以减少软件编程的难度。

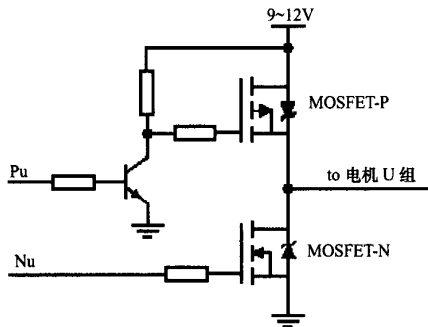


图5 电机驱动电路(U相)

## 2.3 软件设计

### 2.3.1 电机启动策略

对于电机的启动,作者在设计中使用了软件启动法:在电机静止和低速运行时,其反电势为零或极低,无法检测,因此采用外同步起动的办法。在电机启动时,先在某相加电压,然后检测过零点,若检测到过零点,就提前切换,如果检测不到就延时一段时间再切换。以此来使电机转速逐渐升高,当反电势足够大时,则进入正常运转方式。

### 2.3.2 调速控制程序

由于使用反电势过零法实现电机的驱动,电机的

控制将完全依赖于MEGA8的控制程序。当电机高速运转时(最高可达60 000 r/min),电机的换相必须在很短的时间内完成。这就要求电机控制程序的算法简短、精确并高效。

电机调速控制信号的周期通常在1 100~1 900 μs之间。程序使用MEGA8内部定时器作为检测调速信号的基准时钟。当MEGA8工作在16 MHz,定时器工作在8分频的模式下时,定时器的时间精度为0.5 μs,程序检测控制信号的精度达到0.5%。

电机调速控制信号的检测在外部中断程序中完成,如图6所示。外部中断程序检测调速信号的上升沿与下降沿,根据基准时钟计算出脉冲时间,然后设置PWM的占空比。

电机的换相控制在程序主流程中完成,如图7所示。程序以三相六状态循环的方式工作。当进入一个状态的控制阶段时,程序首先根据上一次换相的时间,估算本次过零点时间,然后等待检测反电势过零点。当检测到准确的过零点时间后,程序计算出本次换相点理论时间(30°换相时间)。随后根据设置的参数对换相时间做修正,以发挥电机的最大工作效率。当换相时间到达时,程序切换MOSFET管的通断状态,然后进入下一状态的控制阶段。

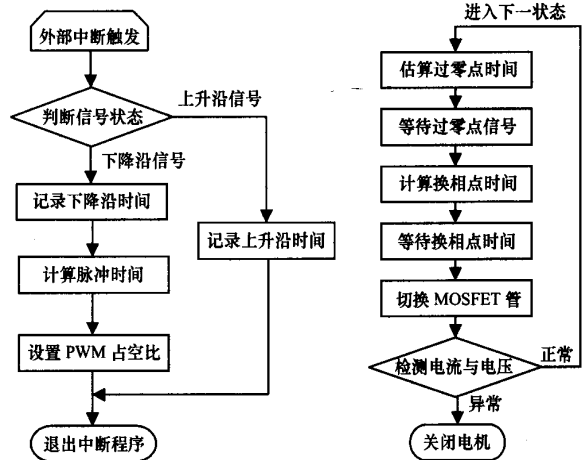


图6 调速信号检测流程图

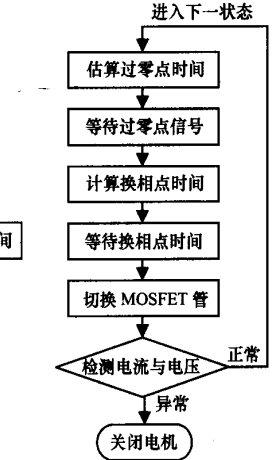


图7 电机换相控制流程图

### 2.3.3 软件保护措施

航模在实际使用中经常会发生电池电压过高或过低、控制信号中断、电机堵转等意外情况。电池电压过高或过低可能会导致控制板电路无法正常工作。电机堵转可能会造成电池或电机的烧毁。因此作者在设计控制程序时加入了很多的保护措施:

①在电机启动之前,程序首先会检测电池的电压。如果电池电压过低或过高,程序会发出报警。

②程序通过一个定时器中断检测控制脉冲信号的输入情况。如果在一定时间内没有信号输入,程序将关闭电机以防发生意外情况。

③程序在每次换相结束后,都会检测电池的当前电压与电机的工作电流。当电机发生堵转时,通过电机的电流会陡然上升,软件将立即关闭电流输出以防止电池或电机的损坏。

④程序启动 MEGA8 中的看门狗功能,用以外部干扰导致软件发生异常时自动启动。

### 3 电机测试

作者对无传感器无刷直流电机控制系统进行了两项测试。一项为线性度测试,另一项为电机驱动测试。

线性度测试使用了某航模公司提供的电调专用测试仪。测试仪可产生从 1 100 ~ 1 900  $\mu\text{s}$  的连续信号,并能自动记录下电机的转速变化曲线。控制系统测试结果如图 8 所示。图中,1 100 ~ 1 200  $\mu\text{s}$  阶段为电机的外同步启动阶段。1 200 ~ 1 800  $\mu\text{s}$  反电势过零法调速控制阶段。1 800  $\mu\text{s}$  以后为电机全速运转阶段。测试结果显示作者设计的控制系统在调速控制阶段具有较好的线性度,并且在从外同步启动阶段向反电势过零法控制阶段过渡时也较平滑。

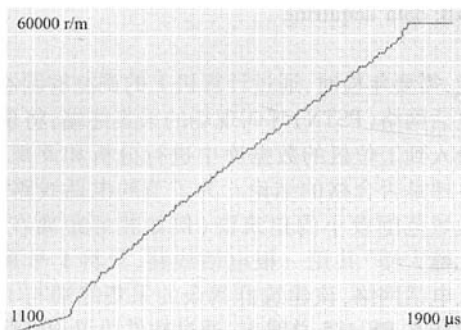


图 8 电机控制系统测试结果

电机驱动测试的目的是要考验控制系统与无传感器无刷直流电机兼容性。测试选用了市售的 4 款电机,即 ELE850:7.3 雷达减速器 + 9047 桨,GS2030:7.14 减速器 + 9047 桨,ELE1000:9 减速器 + 9047 桨,TOWERPRO:外转子无刷 + 9047 桨直驱。测试时使用 7.4 V 2 500 mah 锂电池作为控制板的驱动。使用 4VF 发射机/接收机提供电机速度控制脉冲。测试时人工操作 4VF 发射机发出 1 至 22 级速度控制信号,在每一级信号下测量电机的实际转速。测试结果如图 9 所示。测试结果表明,控制系统对 4 款电机均能良好地驱动。

### 4 结束语

针对航模无传感器无刷直流电机控制系统的特点要求,采用 MEGA8 单片机设计的电机控制系统,使用硬件和软件相结合的设计方法,使用硬件电路搭建必要的外围电路,主要使用软件来实现电机调速控制,使

系统在满足航模电机调速要求的情况下,具有更好的灵活性。

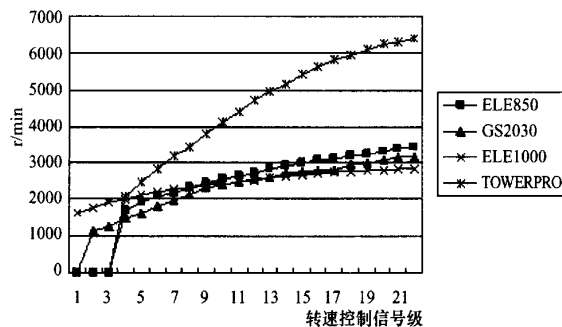


图 9 电机驱动测试结果

### 参考文献:

- [1] 奉华成,皮佑国,吴效明. MC68HC908GP32 在无刷无传感器型直流电机控制中的应用[J]. 电子技术,2002,(12).
- [2] 王微子,等. 基于 DSP 的无位置传感器无刷直流电动机调速系统[J]. 微特电机,2004,(7).
- [3] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [4] 罗隆福,杨艳,吴素平. BLDCM 无位置传感器换相检测和开环起动的软件实现[J]. 微特电机,2004,(3).

(上接第 25 页)

(3)该方法主要适合于单根裂缝的计算。

(4)如果进一步提高采集系统和处理过程的自动化、程序化,不仅可以对高处、危险处等人无法靠近的地方进行检测,也可以实时跟踪裂纹尖端的发展<sup>[9]</sup>,从而提高现场的工作效率。

### 参考文献:

- [1] 姚继涛,马永欣,等. 建筑物可靠性鉴定和加固——基本原理和方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 侯宝隆,蒋之峰. 混凝土的非破损检测[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [3] Kim K S, Kang K S, Kang Y J, Cheong S K. Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35 (8): 639 - 643.
- [4] Vogel H J, Hoffmann H, Roth K. Studies of crack dynamics in clay soil. I: Experimental methods, results, and morphological quantification[J]. Geoderma, 2005, 125: 203 - 211.
- [5] 陆玲,陈国明,戴扬. 水下结构物裂缝特征定量分析与测量[J]. 计算机测量与控制,2004,(1):10 - 12.
- [6] 施树明,初秀民,王荣本. 沥青路面破损图像测量方法研究[J]. 公路交通科技,2004,(7):12 - 16.
- [7] 耿飞,钱春香. 图像分析技术在混凝土收缩裂缝定量测试与评价中的应用研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,(6):773 - 776.
- [8] 刘宝琛. 实验断裂,损伤力学测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [9] 王蕾,宋文忠,韩桃. 目标自动跟踪系统半实物仿真平台设计[J]. 测控技术,2003,24(3):64 - 67.