

基于 MEGA8 单片机的无传感器无刷直流电机控制系统设计

Design of Control System Based on MEGA8 Single Chip Computer
for Sensorless and Brushless DC Motor

曹 杰 史金飞 戴 敏

(东南大学机械系 南京 210096)

摘 要 针对航模用无传感器无刷直流电机具有体积小、重量轻、效率高及可靠性好等特点,设计开发了专用调速控制系统。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的阐述。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

Abstract Sensorless and brushless DC motor used for model aircraft features small size, weightless, efficient and credible. A dedicated speed-adjustment control system of the motor is designed and developed. The position detecting method for sensorless and brushless DC motor, PWM scheme, and startup strategy are analyzed in this paper. The hardware system is developed with MEGA8 single chip computer as the kernel. The schematics of critical control circuits are given and described in detail. The test results of controlling various model aircraft are illustrated.

Keywords Sensorless Brushless DC motor (BLDCM) Control system MEGA8

0 引言

无刷直流电机 BLDCM (brushless DC motor) 因具有快速、可控、高效率、高可靠性和体积小等优点,已经广泛应用于航模领域。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。在航模设计中由于电机功率的限制,对于模型整体的重量有一定的限制,而对于控制器的重量更是以克来计量。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。

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。本文将介绍一种以 MEGA8 单片机为核心的无刷直流电机控制系统,充分发挥了 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原理

目前常用的无刷直流电机控制方法可分为开环控制、转速负反馈控制和电压负反馈加电流正反馈控制

等 3 类。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。对于航模用的无刷直流电机,转速精度要求并不很高,使用开环控制方式就可满足要求。

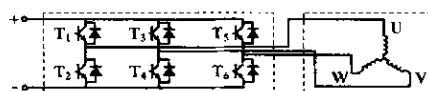


图 1 无刷直流电机的电路原理图

图 1 是无刷直流电机的电路原理图^[3]。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:

$wt = 0^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_1 \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow T_4 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 60^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_1 \rightarrow U \rightarrow W \rightarrow T_6 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 120^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_3 \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow T_6 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 180^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_3 \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow T_2 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 240^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_5 \rightarrow W \rightarrow U \rightarrow T_2 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 300^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_5 \rightarrow W \rightarrow V \rightarrow T_4 \rightarrow$ 电源 (-)
 $wt = 360^\circ$ 电流 电源 (+) $\rightarrow T_1 \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow T_4 \rightarrow$ 电源 (-)

由此可看出,只要转子在合适的位置及时准确地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。

1.1 无位置传感器无刷直流电机位置检测方法选择

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

用了反电动势过零法^[4]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 2 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,则此时此刻该绕组反电动势过零,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。

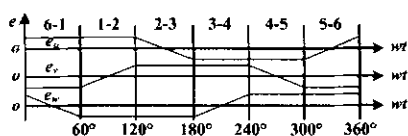


图 2 反电势过零法的工作原理

由电机学原理^[3]可得,三相反电势过零检测方程为(以 U 相为例)

$$e_U = u_U - \frac{1}{2}(u_V + u_W) \quad (1)$$

1.2 PWM 调制方式的选择^[5]

从图 2 可见,永磁无刷直流电机每 1 个周期由 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。因此有半桥载波和全桥载波两种 PWM 调制方式。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。但全桥载波时功率管的开关损耗是半桥载波方式的 2 倍。

目前,已经有很多 MCU 具有 PWM 输出功能。使用 MCU 自带的 PWM 功能不需要增加外围电路。硬件 PWM 不仅可以减少软件编制的难度,而且从速度和精度上讲,硬件 PWM 都是优于软件 PWM 的。

1.3 启动策略

启动方法分为硬件方式和软件方式两种。硬件方式因需要增加额外的电路,不适合于电路要求简单的航模控制领域。因此,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,因此采用外同步启动的方法。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 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通过简单的电路、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。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又可以使用软件程序实现的功能,在设计中将权衡两者的速度、精度和复杂程度作出合理的选择。

航模电机调速控制系统具有以下功能:电机速度控制信号的检测;三相直流无传感器无刷电机的调速控制;电池电压检测。

2.2 硬件设计

系统硬件框图如图 3 所示,其中虚线部分只在开发调试中使用。

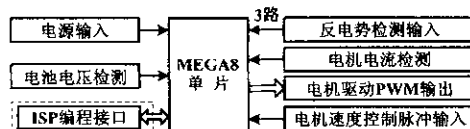


图 3 系统硬件框图

2.3 MEGA8 单片机简介

MEGA8 单片机内部集成了 8kB 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,价格与低档单片机相当,因此具有极高的性价比。当工作在 16MHz 时,具有 16MIPS (million instructions per second)的性能,完全可以适合无传感器无刷直流电机的控制需求。采用 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 3 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、调试时可以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。

2.4 反电势过零检测电路

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。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,降低了程序的实时性。实际上只需要根据式(1)确定反电势符号改变的時刻,就可以认为检测到了过零点。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。

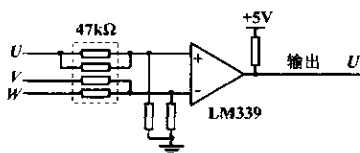


图 4 反电势检测电路

根据公式(1),当反电势为零时有 $2u_U = u_V + u_W$,从图中可见,在 u_U 从 $+$ \rightarrow $-$ 过程中输出 U 处产生一个下降沿脉冲,在 u_U 从 $-$ \rightarrow $+$ 过程中输出 U 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。

2.5 电机驱动电路

电机的驱动采用全桥驱动电路,使用 1 对 P 和 N 沟道的 POWER MOSFET 控制,其电路如图 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,一方面提高 PWM 的输出精度;另一方面也可以减少软件编程的难度。

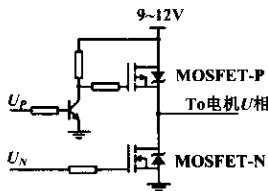


图 5 电机驱动电路

2.6 控制程序设计

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(转速最高可达 60000r/min),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 $1100\mu s \sim 1900\mu s$ 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 16MHz、定时器工作在 8 分频的模式下时,定时器的时间精度为 $0.5\mu s$,

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控制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。

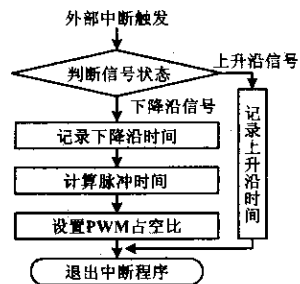


图 6 调速信号检测流程图

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。

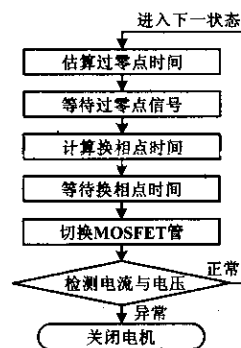


图 7 电机换相控制流程图

另外,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导致控制板电路无法正常工作。电机堵转可能造成电池与电机的烧毁。因此作者在设计控制程序时加入了如下保护措施:

①在电机启动之前,程序首先检测电池的电压。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;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 $1100\mu\text{s} \sim 1900\mu\text{s}$ 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 8a 所示。作为对比,国外 Phoenix 公司生产的 Phoenix-10TM 测试结果如图 8b 所示。图中, $1100\mu\text{s} \sim 1200\mu\text{s}$ 阶段为电机的外同步启动阶段, $1200\mu\text{s} \sim 1800\mu\text{s}$ 为反电势过零法调速控制阶段, $1800\mu\text{s}$ 以后为电机全速运转阶段。显然,作者设计的控制系统在调速控制阶段的线性度要好于 Phoenix-10TM,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更为平滑。

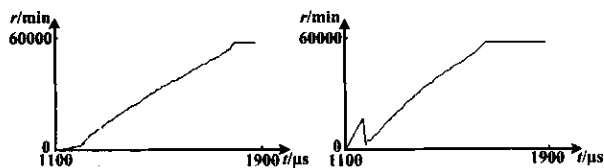


图 8 测试结果

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的兼容性。测试选用了市售的 4 款电机: 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、TOWER-PRO 外转子无刷 + 9047 桨直驱。测试时使用 7.4V2500mah 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 ~ 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。

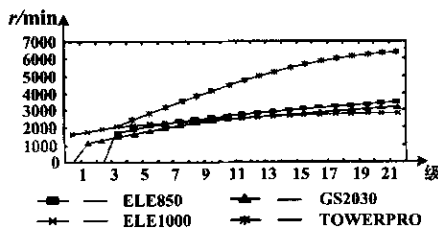


图 9 电机驱动测试结果

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,通过硬件和软件相结合的设计方法,由硬件电路搭建必要的外围电路,由软件实现电机调速控制,从而使系统在满足航模电机调速要求的情况下具有了更好的灵活性。

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. 电子技术, 200X(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. 微特电机, 2004(7)
- 3 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机. 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. 微特电机, 2004(9)
- 5 邱建琪,等. 电动自行车用永磁无刷直流电机电磁转矩控制. 微电机, 2004
- 6 ATMEGA8 Datasheet. www.atmel.com.

修改稿收到日期 2005-07-12。

第一作者曹杰,男,1978 年生,现为东南大学机械工程系在读博士生;主要研究方向为机械制造与自动化。

2005“SUPCON 在流程工业”有奖征文大赛圆满落幕

本刊讯 2005 年 11 月 30 日“SUPCON 在流程工业”有奖征文大赛颁奖典礼在上海海格 Settedolle 西餐厅隆重举行,主办方浙大中控和 Control Engineering China 杂志社的高层领导,与行业专家、论文专家评委、获奖作者以及行业媒体共聚一堂,分享收获的喜悦。

浙大中控副总裁裘峰先生和 Control Engineering China 出版人李治女士分别代表主办方致辞,介绍了活动的背景及成果。中国仪器仪表协会现场总线委员会卞正岗先生就国产自动化控制系统的地位和发展前景进行了透彻的分析,中国自动化学会过程控制及测量装置委员会主任委员范铠先生对本次论文的评审过程进行了介绍并对论文的质量进行评价,他称赞此次收集到的论文参与面广、涉及面广、理论研究与对策研究并举,富有实际意义。一、二、三等奖及优秀奖在颁奖典礼上现场揭晓,杭州电化集团有限公司的题为《ECS-100 控制系统在 4 万吨/年离子膜制碱引进装置上的应用》论文夺得本次征文大赛一等奖。

2005“SUPCON 在流程工业”征文大赛圆满落下帷幕,但精彩还将继续,2006 年征文活动已经启动,敬请关注!