

# 基于 ML4425 的无传感器无刷直流电机控制电路设计

季少武<sup>1</sup>,陈 晋<sup>2</sup>,戴 敏<sup>2</sup>,曹 杰<sup>2</sup>

(1. 江苏新潮科技集团有限公司,江苏 江阴 214434;

2. 东南大学机械系,江苏 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、质量轻、效率高和可靠性好等特点,设计开发了它的专用调速控制系统。首先分析了无传感器无刷直流电机的电路原理。接着以无传感器无刷直流电机专用调速控制芯片 ML4425 与 PIC 单片机为核心设计了硬件电路。详细介绍了电机调速控制电路、电机保护电路和系统调速信号检测的软件实现方法。

**关键词:**无传感器;无刷直流电机;ML4425

**中图分类号:**TM33 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2006)06-0139-04

## A Speed-adjustment Control System of Senseless

### Brushless DC Motor base on ML4425

Ji Shao-wu, CHEN Jin, DAI Min, CAO Jie

(1. Jiangsu Xinchao Technology Group Co., Ltd, Jiangyin 214434

2. Mechanical Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract:** Senseless brushless DC motor for aeromodelling is small, weightless, efficient and credible. A speed-adjustment control system of senseless brushless DC motor in aeromodelling is introduced in this paper. The control theory of senseless BLDCM is disserted in the first. The hardware design is based on ML4425 and PIC microcontroller. Motor speed-adjustment control circuits, motor protecting circuits and signal detecting software are discussed in detail.

**Key words:** sensorless, brushless DC motor (BLDCM), ML4425

## 0 引言

无刷直流电机(BLDCM)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,对于模型整体的质量有一定的限制,而对于控制器的质量更是以克来计量的。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,同时又要保证电机控制的可靠性。

在无传感器无刷直流电机的控制中,转子位置的判断、电机的启动及电流的换相均由控制系统完成,功能十分复杂,因而控制装置的硬件与软件设计十分繁琐<sup>[1]</sup>。文献 2 提出了使用 MC68HC908 GP32 芯片为核心的无传感器无刷直流电机控制应用策略;文献 3 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,同时在软件的编制上也有一定的难度。现介绍一种以无传感器无刷直流电机专用调速控制芯片 ML4425 与 PIC 单片机为核心的电机调速控制系统,ML4425 专用控制器的使用使系统控制电路十分简单,无须使用 DSP 等高端微控制器芯片,只需要使用普通的 PIC 单片机就能完成控制信号的接收等功能,软件编制也十分简单。

## 1 无传感器无刷直流电机控制原理

图 1 是无刷直流电机的电路原理图<sup>[4]</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  $-$

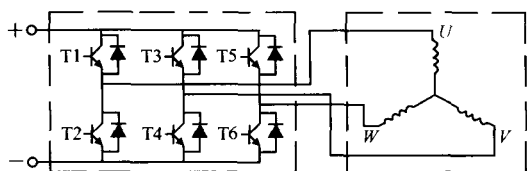


图1 无刷直流电机的电路原理图

$t = 120^\circ$  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 -

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。

在换相位置判断中,最常用的是反电势过零法,其工作原理如图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  $120^\circ$  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动势过零,再过  $30^\circ$  电角度就必须对功率器件进行换相。

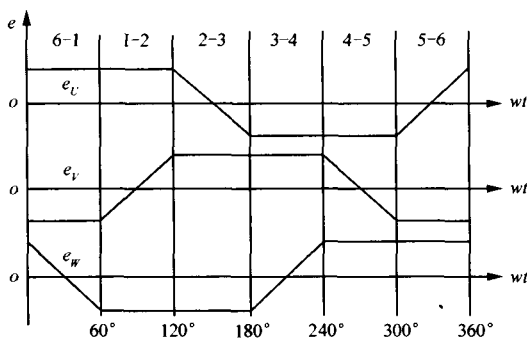


图2 反电势过零法的工作原理

由电机学原理<sup>[4]</sup>可得:三相反电势过零检测方程(以 U 相为例)为:

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

在对无传感器无刷直流电机进行控制中,需要解决的问题主要有:启动方法、反电势交换控制、PWM 速度控制、制动控制等。

## 2 系统总体设计

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 PIC 单片机作为系统控制核心,将有关电机的所有控制功能全部交给 ML4425 完成,在电机驱动部分使用 P 沟道 MOSFET 和 N 沟道 MOSFET 配合的驱动电路。系统硬件框图如图3所示。

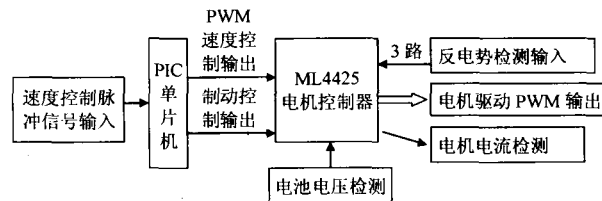


图3 系统硬件框图

由于专用电机控制芯片的使用,无论是从硬件电路上,还是软件编制上,单片机的工作量都大大地减轻了,因此在设计中使用了体积较小的 PIC 单片机 12C508 作为系统的微控制器。PIC 单片机主要完成电机速度控制脉冲信号的输入检测,并将之转化成 PWM 速度控制信号,输出给 ML4425 电机控制器,以控制实际电机的速度。有关电机的控制,全部由 ML4425 电机控制器完成;同时利用 ML4425 的欠压限流功能,实现对电机的保护。

### 2.1 电机控制电路设计

ML4425 是为三相无传感器无刷直流电动机驱动而设计的专用控制芯片,具有控制星形或三角形连接的无传感器无刷直流(BLDC)电机所需要的全部功能<sup>[5]</sup>。主要功能包括:起动电路、反电势换向控制、PWM 速度控制、制动控制和欠压限流保护等。ML4425 电机控制电路如图4所示。

a) 电机启动:平滑启动是衡量一个电机控制系统性能的重要指标之一。ML4425 控制器对电机启动主要分为两个步骤:校准复位和加速阶段。第一步是校准复位状态,当系统刚上电时,电动机处于静止状态,此时定子通一恒定的电流,将电机转子拉到一确定位置。电机完成校准复位后,引脚  $C_{at}$ (PIN17)由低电平跳变高电平,当电平达到 1.5V 时,ML4425 将以  $0.5\mu A$  的电流向阻容回路  $RC_{VCO}$  充电,使得片内压控振荡器(VCO)起振,系统进入开环升速状态。当电机的转速升至可产生足够大的反电势后,引脚  $C_r$ (PIN19)由低电平跳变为高电平 1.5V 时,芯片的反电势锁相环开始工作,系统进入闭环换相状态,整个启动过程结束。

b) PWM 速度控制:当电机的反电势可被

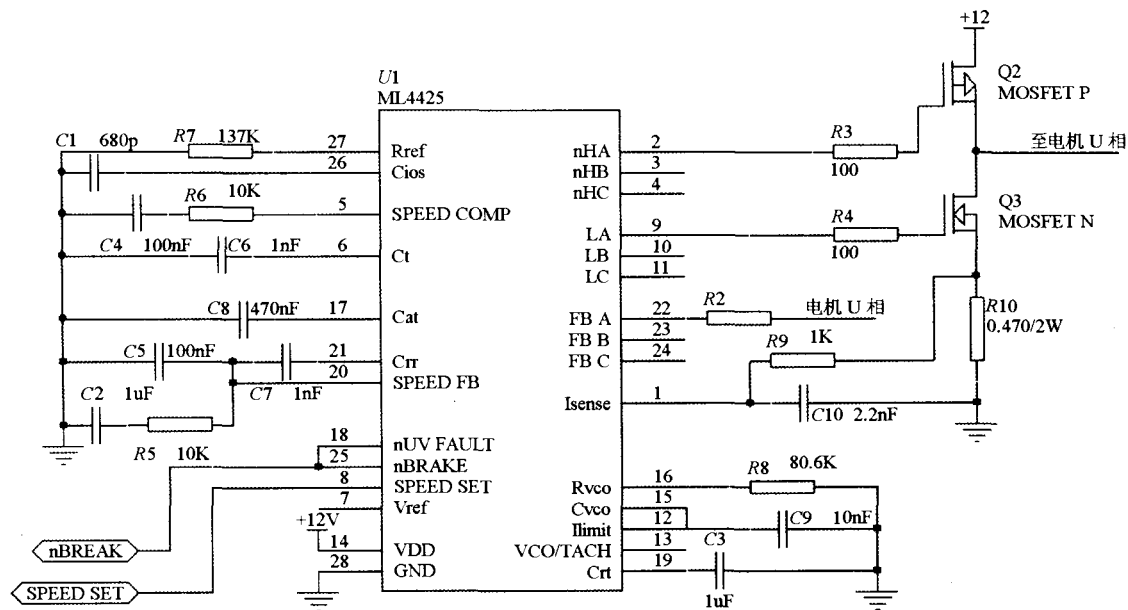


图 4 ML4425 电机控制电路图

ML4425 检测到后,通过 PWM 模式系统进入闭环运行状态。速度指令信号从 SPEED SET 引脚输入,在本设计中速度信号由微处理器 PIC12C508 控制。升速时,SPEED SET 端电压上升,其与速度反馈信号误差增大,经过误差放大器输出到 SPEEDCOMP 端,使得该端电压下降。下降的 SPEED COMP 电压与 PWM 斩波信号通过比较器后使输出的脉冲信号占空比增加,电机速度上升,同时连接误差放大器正向端的速度反馈信号随着电机转速上升而增加,当该信号接近 SPEED SET 电压时,电机开始稳速运行。电机的减速过程相反。由于调速过程为动态过程,电机速度的改变会引起 SPEED SET 电压的波动,从而影响电机的速度控制。这时可以在 SPEED COMP 端外接一电容,以稳定调速过程。

根据电机磁极的数目和最大运行速度,在本设计中,PWM 振荡器频率取 20kHz。该频率由  $C_t$  引脚的电容  $C_6$  决定。根据公式

$$C_t = \frac{1/f_{PWM} \times 50\mu A}{2.4V}$$

可知,在 PWM 振荡器频率取 20kHz 时, $C_6 \approx 1nF$ 。

电机的反电势信号由 FB A、FB B、FB C 引脚接入 ML4425 控制器,该反电势信号低于 ML4425 的电源电压 VDD 值,而相位传感的输入阻抗是 8kΩ。这就需要在电机反电势输入端串联一个电阻,该电阻的值它可由下式求得:

$$R = 670\Omega/V \times (V_{MOTOR} - 10V)$$

在实际电路中,使用的是 12V 的电机,因此,图 4 中的  $R_2$  取 1.3kΩ。

c) 电机驱动电路: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。在航模飞机中,一般使用的电机都是 12V 以下的,ML4425 可以直接驱动该类型的电机,无须增加其它的驱动电路。

d) 电机制动:ML4425 具有独立的电机制动功能。当制动引脚 nBRAKE (PIN25) 电位被拉低时,所有三个沟道驱动管都被接通,三个 P 沟道驱动管都被切断,可实现电机制动功能。在本设计中,nBRAKE 引脚与 PIC 单片机的 IO 相连,nBRAKE 引脚检测到单片机发出的低电平信号后就制动电机。

## 2.2 电机保护

a) 欠压保护功能:在航模电机控制中,需要对电池电压进行监测,当电池电压过低时,为了保证航模的安全,将限制电机启动。对于电池电压的检测,一般需要使用专门的 AD 电路,来实现对电池电压的检测。在本设计中,直接利用 ML4425 的电压保护功能,将电压状态显示输出引脚与制动引脚 nBRAKE 相连,当芯片内的电压检测电路监测到系统低压时,电源状态输出引脚 nUV FAULT (PIN18) 由高电平跳变为低电平,nBRAKE 检测到该跳变后强制芯片进入中断状态,关断高端功率 MOSFET 并开通低端功率 MOSFET,制动电机实现保护。

b) 限流保护功能:航模在实际使用中经常会

发生电机堵转的意外情况。电机堵转可能会造成电池与电机的烧毁。ML4425 的限流保护是通过电流 PWM 控制实现的,电流的 PWM 控制主要由电流阈值电压设置、电流采样、PWM 波生成等几个环节组成。当电流过大时,内部比较器输出低电平关断下桥开关元件,起到保护芯片及外部开关元件的作用。电流阈值电压由  $I_{\text{limit}}$  引脚输入。ML4425 内部有一个从 VREF 接出的分压器,设置的缺省电流限制阈值为 2.3V,可以在外部施加一个电压改变这个缺省值。本设计中将  $I_{\text{limit}}$  引脚悬空,使用缺省的电流门限值。当  $I_{\text{sense}}$  电流超过  $0.2 - I_{\text{limit}}$ ,控制器就会关闭输出驱动 LA、LB、LC 一个固定时间  $t_{\text{off}}$ ,实现对电机的过流保护。 $t_{\text{off}}$  时间由引脚  $C_{\text{ios}}$  的接地电容设定,应小于一个 PWM 调节周期。当 PWM 振荡器频率取 20kHz 时, PWM 调节周期为  $50\mu\text{s}$ ,那么  $t_{\text{off}}$  应该在 30~50 $\mu\text{s}$  之间。根据公式:

$$t_{\text{off}} = \frac{2.4\text{V} \times C_{\text{ios}}}{50\mu\text{A}}$$

在图 4 的电路中,  $C1$  应取 625~1 000pF 之间,本设计的电路中实际取值 680pF。

### 2.3 调速信号检测

如前所述, PIC 单片机主要完成电机速度控制脉冲信号的输入检测,并将之转化成 PWM 速度控制信号,输出给 ML4425 电机控制器,以控制实际电机的速度。

电机调速控制信号的周期通常在 1 100 $\mu\text{s}$  至 1 900 $\mu\text{s}$  之间。使用 PIC12C508 内部定时器作为检测调速信号的基准时钟。

程序检测调速控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。软件流程如图 5 所示。

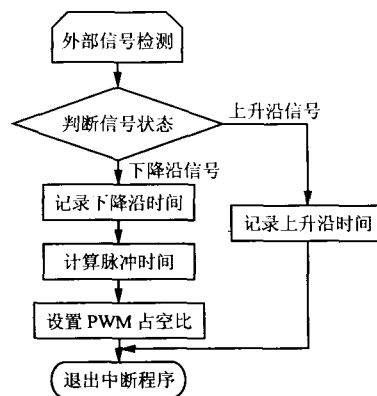


图 5 软件流程图

## 3 结束语

针对航模无传感器无刷直流电机控制系统的有关要求,采用 PIC 单片机结合 ML4425 设计了电机调速控制系统。由于充分利用 ML4425 硬件电路对电机调速控制的优势,不仅在电机的控制上取得了较好的效果,而且使软件的编制难度大大降低,缩短了系统的开发周期和开发难度。

### 参考文献:

- [1] 高国强,林成斌,王凤翔. 基于 ML4425 芯片的永磁无刷直流电机调速系统[J]. 沈阳工业大学学报, 2000, (6).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] ML4425 DATASHEET[EB/OL]. www.fairchildsemi.com

收稿日期: 2006-09-22

(上接第 138 页)

变  $N$  可以改变谐波分量次数,但不能消除谐波分量。 $N$  变大,谐波次数也增加,同时基波分量变大。

### 参考文献:

- [1] 李华德 主编. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 钱慧芳,等. 面积中心等效法研究[J]. 电气应用, 2005, (3):

103-105.

- [3] 金磐石,等. Intel 96 系列单片微型计算机应用详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992.
- [4] 张志勇 主编. 精通 matlab 6.5[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 张小虹 主编. 数字信号处理学习指导与习题解答[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

收稿日期: 2006-08-08