

无刷直流电机方波正弦波复合驱动器设计

谭亚丽¹, 郭志大²

(1. 西安交通大学城市学院 电气与信息工程系, 陕西 西安 710018;

2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

摘要:针对无刷直流电机方波驱动出力大, 正弦波驱动转矩脉动和噪声小的特点, 设计了基于霍尔传感器信号的无刷直流电机方波与正弦波复合驱动器。在不改动硬件电路的前提下, 利用软件编程实现了无刷直流电机的方波驱动与正弦波驱动以及两种驱动方式间的动态切换。实验结果表明, 无刷直流电机运行稳定, 切换方式灵活。该设计的方波正弦波复合驱动器可以有效拓宽无刷直流电机在高精度、低噪声环境下的应用。

关键词:无刷直流电机; 方波驱动; 正弦波驱动

中图分类号: TM351

文献标识码: A

Driver Design of BLDCM with Trapezoidal and Sinusoidal Compound Excitation

TAN Ya-li¹, GUO Zhi-da²

(1. Department of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University City

College, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Automation Department,

Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710129, Shaanxi, China)

Abstract: For brushless DC motor (BLDCM), the pulse torque and noise is large with trapezoidal excitation and low with sinusoidal excitation. A BLDCM driver with trapezoidal and sinusoidal compound excitation based on hall sensor signals was presented. Without modifying hardware circuit, the compound driver for BLDCM separately with trapezoidal or sinusoidal excitation or the dynamic switching between these two methods were realized using only the software programming. The experimental results show that BLDCM run table and the switching mode is reliable. The compound driver proposed has extended the application of BLDCM with high accuracy and low noise.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); trapezoidal excitation; sinusoidal excitation

无刷直流电机以其体积小、效率高、寿命长、易于维护等优点, 广泛应用于家电、医疗器械、航空航天等各个领域。无刷直流电机一般采用方波驱动, 出力大, 但转矩脉动和噪声也比较大, 影响着无刷直流电机在高精度、低噪声环境下的应用。近年来, 国内外相关文献对无刷直流电机的正弦波驱动进行了研究, 当无刷直流电机采用正弦波驱动时, 电机的转矩脉动和噪声要小于方波驱动^[1-3]。因此, 本文针对无刷直流电机方波驱动出力大, 正弦波驱动转矩脉动和噪声小的特点, 设计了无刷直流电机方波正弦波复合驱动器, 实现了无刷直流电机的方波驱动和正弦波驱动, 以及两种驱动方式的动态切换。

1 控制系统整体设计

无刷直流电机方波正弦波复合驱动器系统整体结构如图 1 所示。由图 1 可看出系统的组成与传统的无刷直流电机控制电路基本一致。驱动模式由外部的驱动模式按键状态决定, 可以通过驱动模式按键来实现驱动方式的动态切换。其中, 电机控制系统处理器采用微芯公司的 dsPIC 30F4011 数字信号控制器, 通过对 dsPIC 30F4011 进行编程实现无刷直流电机的方波与正弦波的复合驱动。控制器产生的 PWM 信号经光电隔离后传给 IR2130 驱动芯片。IR2130 具有独特的自举电路, 一片 IR2130 就可以驱动一套典

型的三相 H 桥式逆变电路。

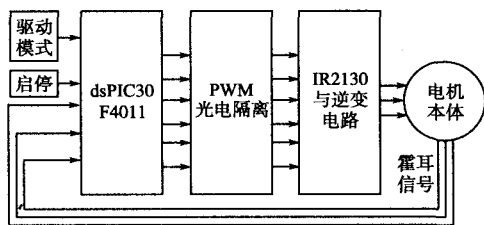


图 1 方波正弦波复合控制系统框图

Fig. 1 System schematic construction of BDLCM driver with trapezoidal and sinusoidal compound excitation

2 方波驱动

无刷直流电机的方波驱动模式根据霍耳信号的 6 个状态控制电机绕组的导通与关断,相对正弦波驱动而言控制更加简单。一般采用两两导通模式,即每一时刻两相导通,每相导通 120° (电角度)。dsPIC30F4011 中集成了专门针对电机控制的 PWM 模块(MCPWM),可以方便地控制各种电机。无刷直流电机的控制主要是根据霍耳信号进行换相,而 dsPIC30F4011 中的 PWM 输出改写寄存器(OVDCON)可以很方便地控制 PWM 的输出,通过修改 OVDCON 寄存器的值可以很容易地实现无刷直流电机的换相。表 1 给出了无刷直流电机方波驱动时的 OVDCON 换相表,采用下斩上不斩的 PWM 方式。考虑到正弦波驱动时采用三三导通模式,此处采用互补的 PWM 控制上下桥臂。

表 1 方波驱动换相表

Tab. 1 The phase switch with trapezoidal excitation

霍耳(ABC)	010	011	001	101	100	110
OVDCON	0420	0120	0108	1008	1002	0402
导通绕组	AB	AC	BC	BA	CA	CB

注:OVDCON 栏的数字均为 16 进制;导通绕组栏方向规定:AB 表示电流从 A 相流入,B 相流出。

3 正弦波驱动

无刷直流电机的转子位置一般是通过霍耳传感器来检测的。方波驱动时只需几个离散的转子位置点即可,但要实现电机的正弦驱动,必须知道转子的准确位置。因此,如何根据霍耳信号来计算转子位置是实现无刷直流电机正弦波驱动的关键之一。

3.1 转子位置检测与扇区细分

无刷直流电机位置检测为霍耳元件,其输出脉冲波形是占空比为 50% 的方波信号。霍耳信

号脉冲波形的上升沿和下降沿代表着 0 和 180° (电角度)。因此,可以通过测量霍耳信号的上升沿和下降沿之间的时间差来计算电机的转速,并对扇区进行细分。如图 2 所示,设前次捕获的霍耳信号时间为 T_D (双沿捕捉,对应电机 180° 电角度), 180° (电角度) 的细分数设为 N ,则有:

$$\begin{cases} N \times P_\Delta = D_{180} \\ N \times t_\Delta = T_D \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_Δ 为每次递增的相角量; D_{180} 表示 180° (电角度); t_Δ 为 PWM 的周期。

由式(1)可推出每次递增的相角量为: $P_\Delta = t_\Delta \times D_{180} / T_D$ 。因为 PWM 的频率固定且在程序初始化时就已知了,所以 t_Δ 实际上是个常量值。在 PWM 的周期中断中进行相角的累加计算(即每产生一次 PWM 周期中断时,电压空间矢量的相角增加 P_Δ),并按照 SVPWM 的方式进行占空比计算并实时更新 PWM 占空比。如此一来就可保证每一个 T_D 周期内电压空间矢量的相角增加 180° 。每次霍耳信号的捕获中断(双沿捕捉)进行电压空间矢量的扇区选择,根据所选的扇区刷新电压空间矢量的相角值,以此保证电压空间矢量的相角累加是在每个扇区初值相角的基础上进行的,使电压空间矢量的相角累积误差降到最小。

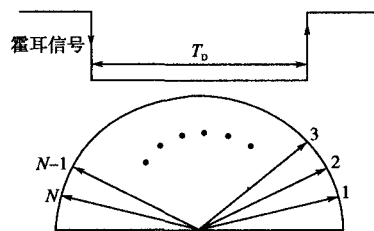


图 2 扇区细分图

Fig. 2 Sector subdivision figure

3.2 SVPWM 的产生

本文中无刷直流电机的正弦波驱动采用 SVPWM 调制方式,由霍耳信号来进行扇区选择。图 3 给出了霍耳信号与扇区以及相电压之间的关系。

dsPIC30F4011 具有 DSP 高速运算的特点,同时具有专门针对电机控制的 PWM 模块,可以很方便地产生 SVPWM。SVPWM 产生的总体思路为:在每次 PWM 的周期中断中,进行电压空间矢量的相角累加,然后根据电压空间矢量的相角判断所在的扇区,根据所在扇区计算各路 PWM 的占空比。关于 SVPWM 占空比的方法,

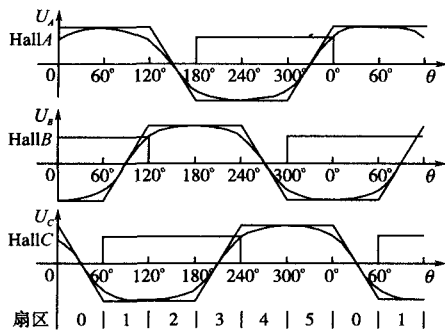


图3 霍尔信号与相电压以及扇区关系图
Fig. 3 Relationship between hall sensor signal phase voltage and sector

很多文献都有详细的说明^[4-5],这里就不在叙述。

4 驱动方式的切换

无刷直流电机方波驱动时采用两两导通方式,每一时刻只有2个功率管是导通的;而无刷直流电机的正弦波驱动采用三三导通模式,每一桥臂的上下2个功率管是互补导通的,每一时刻有3个功率管处于导通状态。因此,要实现无刷直流电机的方波与正弦波两种驱动方式的动态切换,就必须考虑每个时刻功率管的导通状态以及当前电机的转子位置。本文中采用软件编程的方法实现两种驱动方式的动态切换。软件切换的全部工作量都由 dsPIC30F4011 完成。由图2可得方波驱动和正弦波驱动时对应绕组的导通表,如表2所示。

表2 方波与正弦波驱动时对应绕组导通表

Tab. 2 Conduction table with trapezoidal and sinusoidal excitation

霍尔(ABC)	010	011	001	101	100	110
扇区	0	1	2	3	4	5
方波驱动	A	+	+	/	-	-
	B	-	/	+	+	/
	C	/	-	-	/	+
正弦波驱动	A	+	+	+-	-	-
	B	-	-	+	+-	-
	C	+-	-	-	+	+

注: +表示电流从绕组流入, -表示电流从绕组流出, /表示关断相, +-表示电流先进后出。

由表2可看出,方波驱动与正弦波驱动每一时刻有两相绕组导通状态是相同的。单纯从绕组导通状态来讲,方波与正弦波驱动方式的切换只是一相绕组的导通状态由导通到关断或由关断到导通。实现无刷直流电机方波与正弦波两种驱动方式动态切换的整体思路为:同时进行方波PWM和正弦波 SVPWM 的计算,但同一时刻只

有一种 PWM 形式输出有效,至于选择哪种 PWM 进行输出,由外部的驱动模式按键的状态决定。考虑到正弦波驱动时电压空间矢量的相角与实际电机转子位置存在误差,当检测到外部按键变化需要进行切换时,并不立即进行切换,而是等到霍尔信号发生跳变时才进行驱动模式的切换。因为每一次霍尔信号的跳变,表示电压空间矢量到达6个基本电压矢量中的一个,都会进行一次电压矢量相角位置的校准,如此一来可使每一次切换时,电压矢量相角与转子位置误差最小。

5 实验结果

本次试验的无刷直流电机绕组为星型连接。在实验过程中,逆变器母线电压恒定为28V,采用电机转速闭环控制,转速恒定为486 r/min。用电流钳将电机的相电流信号转成电压信号,再通过示波器来观察电机在不同驱动模式下的电流波形。

图4为电机不同驱动模式下的电流波形。图4中,示波器中上路方波信号为电机霍尔C的输出信号波形,下路波形为实验电机C相的相电流波形。将图4b的波形与图3中C路的波形对比分析可知,实验中电机正弦波驱动实验结果与理论分析所得波形接近,从而验证了前述理论分析的正确性。

图5为不同驱动模式动态切换的实验波形。由图5可看出电机可以在方波驱动模式与正弦波驱动模式间任意切换。

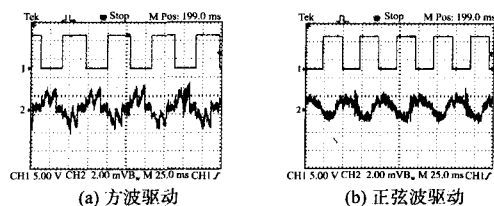


图4 不同驱动模式下的电流波形

Fig. 4 Current waves with different driving mode

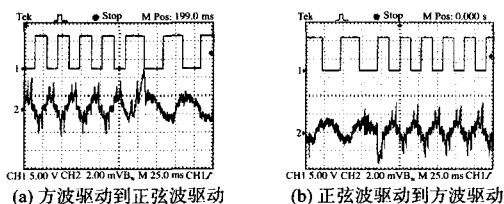


图5 不同驱动方式的动态切换

Fig. 5 Dynamic switching with different driving mode

(下转第56页)

同步带轮转一圈移动架移动的位移为 142.24 mm, 10 细分时所需要的脉冲数为 2 000, 这样拖动一定位移所需的脉冲数就可以简单的算出。再假设针筒的内径为 10 mm, 设置为 10 细分时, 则要吸取 2 mL 的样液需要的脉冲数 n 可以计算为

$$n = \frac{v}{0.004 \pi r^2} = \frac{2\,000}{0.004 \times 3.14 \times 5^2} = 6\,370$$

3 控制系统的软件设计

FPX-C60T 型 PLC 的编程软件用的是 FP-WIN GR, 其具有 3 种编程模式(梯形图模式、逻辑图模式、指令模式), 可以进行联机调试, 监控寄存器和继电器的状态, 随时改变 PLC 的状态(编程/运行)。利用此 PLC 提供的高速计数器控制/脉冲输出控制指令 F0(MV), 高速计数器/脉冲输

出经过值的写入和读出指令 F1(DMV), 脉冲输出(带通道指定)F171(SPDH), 数据传输指令, 数据比较指令及一些特殊功能指令, 可较方便地实现对步进电机的精确定位和调速控制。截取的部分梯形图如图 3 所示。在此梯形图中可以清楚地看到初速度、最大速度、加减速时间、目标值(脉冲数量)等参数。

4 结论

本自动加样仪自动控制系统使用松下 FPX-C60T 型 PLC, 控制其完成各种规定的工序动作, 实现了加样仪加样过程中的移动、取针、加样等的自动化, 可以简化控制线路, 节省成本, 提高了工作效率。不但省略了许多繁琐的中间控制环节, 还大大提高了可靠性和精确性, 达到了理想的效果。

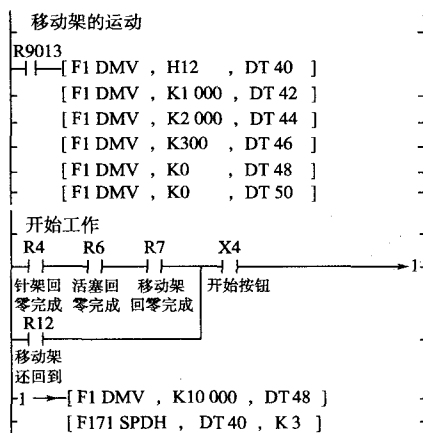


图 3 部分梯形图

Fig. 3 The part of PLC ladder diagram

参考文献

- [1] 赵燕. 可编程控制器原理与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [2] 松下电工中国有限公司. FP 系列编程手册[Z]. 2004.
- [3] 松下电工中国有限公司. FP 系列编程手册(补充版)[Z]. 2007.
- [4] 松下电工中国有限公司. FPX 用户手册[Z]. 2005.
- [5] 潘晓玲. 松下 FP0 型 PLC 在自动控制系统中的应用[J]. 机电一体化, 2001, 7(5): 71-72.
- [6] 刘乘, 李晓刚. PLC 在包装机械上的应用[J]. 包装工程, 2004, 25(2): 51-53.

收稿日期: 2010-10-12

修改稿日期: 2010-12-20

~~~~~

(上接第 13 页)

综上所述, 本文设计的无刷直流电机方波/正弦波复合驱动器, 将无刷直流电机的方波驱动与正弦波驱动集成在一个控制器, 实现了无刷直流电机方波驱动与正弦波驱动, 以及两种驱动方式间的动态切换, 具有一定的工程应用价值和实际意义。

### 6 结论

本文研究了无刷直流电机方波驱动与正弦波驱动复合控制问题, 详细讨论了两种控制模式下, 无刷直流电机的运行特点以及模式的切换。为验证理论分析结论, 本文设计了基于霍耳信号的无刷直流电机方波与正弦波复合驱动器。实验结果表明, 本文所设计的无刷直流电机方波驱动与正弦波驱动复合驱动方法切换方式灵活, 电机

运行平稳可靠。

### 参考文献

- [1] 王宗培, 韩光鲜, 程智, 等. 无刷直流电机的方波与正弦波驱动[J]. 微电机, 2002, 35(6): 3-6.
- [2] 李建军, 邹继斌, 徐永向. 无刷直流电动机噪声分析及其抑制[J]. 微特电机, 2009, 37(3): 12-14.
- [3] 胡邦南. 基于 dsPIC30F3013 的永磁同步电动机正弦波驱动[J]. 微特电机, 2007, 35(10): 32-34.
- [4] 杨贵杰, 孙力, 崔乃政, 等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 79-83.
- [5] 程善美, 付中奇. 基于 dsPIC30F6010 空间矢量 PWM 的实现[J]. 电力电子技术, 2006, 40(6): 113-114.

收稿日期: 2010-09-24

修改稿日期: 2010-12-15