

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.013

开关磁阻电动机实验平台的开发与研究*

俞泉辰,王家军*

(杭州电子科技大学 自动化学院,浙江 杭州 310018)

摘要:为研究开关磁阻电动机的运行特性与调速性能,在分析开关磁阻电动机的基本原理与控制方式的基础上,设计了基于数字信号处理器 TMS320F2812 的四相 8/6 极开关磁阻电动机实验平台,详细介绍了该平台硬件电路的原理、特性和软件程序的功能、流程;最后,基于所开发的实验平台对开关磁阻电动机进行了多项实验研究。研究结果表明,所开发的实验平台的软、硬件设计具有正确性和有效性,同时也证明了在速度 PID 控制下,开关磁阻电动机具备优异的调速性能。

关键词:开关磁阻电动机;数字信号处理器;电压斩波控制

中图分类号:TH39;TM352

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)05-0600-07

Development and research on experimental platform of switched reluctance motor

YU Xiao-chen, WANG Jia-jun

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the operation characteristics and speed control performance of switched reluctance motor(SRM), based on the principle and control methods of SRM, an experimental platform of four-phase 8/6 SRM was designed on the basis of the digital signal processor—TMS320F2812. The principle and features of the hardware circuit as well as the function and process of the software program were introduced in detail. Finally, multiple experiments on SRM were done based on the developed experimental platform. The results indicate that the software and hardware design of the experimental platform is correct and effective. Meanwhile, it is also proved that switched reluctance motor has excellent speed control performance under speed PID control.

Key words: switched reluctance motor(SRM); digital signal processor; chopped voltage control

0 引 言

开关磁阻电动机调速系统(SRD)是继传统交、直流调速系统之后逐步发展起来的新一代调速系统,如今在许多电动机驱动领域都得到了广泛的应用。与交流电动机相比,开关磁阻电动机(SRM)的结构更简单、成本更低廉、控制更灵活,因此引起了国内外专家与学者的广泛关注^[1-3]。然而特殊的双凸极结构和开关式的供电方式使得 SRM 的磁链、电流等高度非线性化,转矩脉动问题也尤为严重,这不仅增加了控制难度,还

制约了其应用场合。因此,开展开关磁阻电动机的研究工作对于在现实中推广其应用具有非常重要的意义。

本研究将以数字信号处理器 TMS320F2812 作为控制核心,采用电压斩波控制方法,设计四相 8/6 极开关磁阻电动机实验平台,实现开关磁阻电动机的速度闭环控制,并给出部分实验结果。

1 开关磁阻电动机简介

1.1 开关磁阻电动机的结构与运行原理

开关磁阻电动机的结构与运行原理都与传统的交直

收稿日期:2013-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273086);浙江省新苗计划资助项目(2013R407072)

作者简介:俞泉辰(1988-),男,浙江杭州人,主要从事开关磁阻电机控制方面的研究。E-mail:378165186@qq.com

通信联系人:王家军,男,博士,教授,硕士生导师。E-mail:wangjiajun@hdu.edu.cn

流电动机有着很大的区别。SRM 的定、转子均为凸极结构,即双凸极结构,并且绕组仅安装在定子极上,不存在转子绕组,以四相 8/6 极 SRM 为例,其结构如图 1 所示。

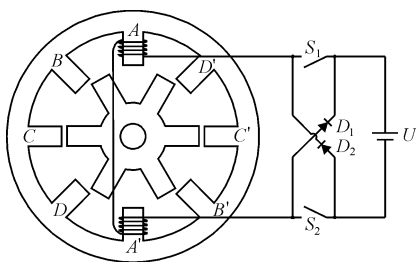


图 1 四相 8/6 极 SRM 典型原理图(只画出一相)

在运行原理方面,传统交直流电动机通过载导体在磁场中受到电磁力的牵引而旋转,而开关磁阻电动机则遵循“磁阻最小原理”,即磁通永远沿着磁阻最小的路径闭合,通过磁力线扭曲产生的磁阻性质的电磁转矩使电机转动^[4-5],所以,对四相 8/6 极 SRM 而言,若以 A-B-C-D-A 的顺序依次对各相通电,则转子会以顺时针方向旋转;反之,如果以 A-D-C-B-A 的顺序依次对各相通电,那么转子就会以逆时针方向旋转。

由此可见,相较于其他电动机,SRM 的功率变换电路更为简单,但控制 SRM 时通常需要用到位置反馈信号。因此,完整的开关磁阻电动机调速系统一般由电源、开关磁阻电动机、控制器、功率变换器、位置检测和电流检测等部分组成。

1.2 开关磁阻电动机的控制方式

针对 SRM 控制过程中的可控变量,开关磁阻电动机的控制方式可分为角度位置控制、电流斩波控制和电压斩波控制 3 种,本研究采用电压斩波控制方式。该方式是在固定开通角与关断角不变的前提下,使主开关器件工作于 PWM 模式^[6-7],固定脉冲频率,通过对脉冲占空比的调节来控制绕组电压的平均值,从而实现对绕组电流的控制。按续流方式不同,电压斩波控制又分单管斩波与双管斩波,单管斩波方式在续流时只关断上、下两个开关器件的其中一个,绕组电压为零,如图 2(a)所示。

双管斩波方式在续流时将上、下两个开关器件同时关断,绕组承受负电压,如图 2(b)所示。由图 2 可

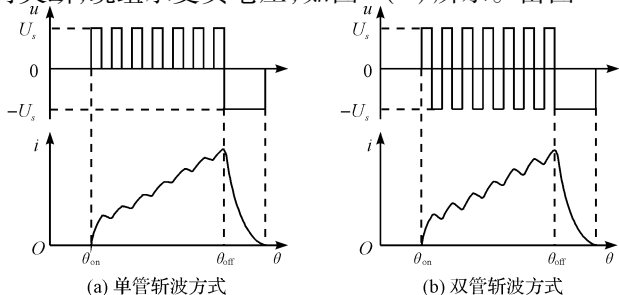


图 2 电压斩波控制方式下绕组电压与电流波形

见,单管斩波方式下绕组电流波动更小,系统运行效率也更高,因此本研究选用单管斩波方式。

2 实验平台的硬件设计

本研究所设计的四相 8/6 极开关磁阻电动机实验平台的硬件系统如图 3 所示。系统包括功率驱动电路、控制电路、上位机、开关磁阻电动机、光电编码器、隔离变压器与调压器等部分。其中,控制电路以 32 位定点数字信号处理器(DSP)TMS320F2812 为核心,负责实现控制策略,协调和指挥整个系统的工作;为降低调试难度,提高系统的可靠性,功率驱动电路采用分块设计,包括整流电路、功率变换主电路、光隔与触发电路、电流检测电路等 4 个部分,主要实现功率变换以及各类检测功能。

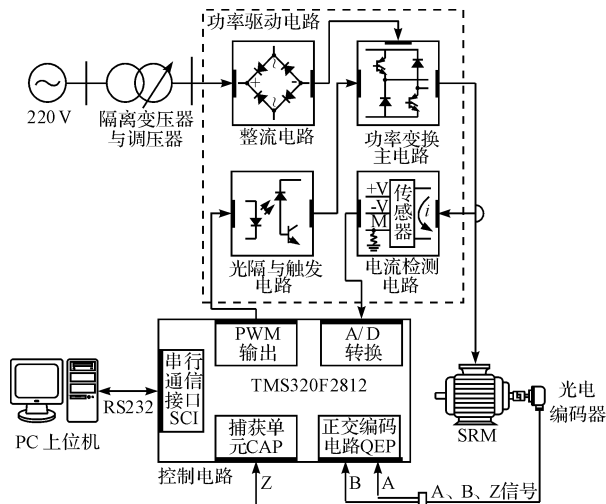


图 3 硬件系统整体结构

硬件系统的设计思路为:先用隔离变压器与调压器对交流电源调压,然后通过整流电路转换为直流电供给功率变换主电路中的直流母线。DSP 输出 PWM 信号,经过隔离后触发功率变换主电路中的开关器件,进而驱动 SRM。电动机的位置信号由光电编码器检测得到,其中正交信号 A 和 B 从正交编码电路 QEP 输入 DSP,用于计算 SRM 的位置与转速信息,Z 信号经捕获单元 CAP 输入,用于检测电动机的零位置。电流检测电路负责检测各相的绕组电流,检测信号经过 A/D 转换后反馈给 DSP,DSP 的 SCI 模块通过 RS232 串行接口与上位机相连,实现对系统的实时状态监测与指令下达等功能。

2.1 整流电路

整流电路包括整流、滤波、稳压等环节,能将输入的工频交流电转换为平滑、稳定,不受负载变化的影响的直流电。

本研究所设计的整流电路如图 4 所示,在交流输入端接入了电磁干扰滤波器,由 C_1 、 C_2 、 R_1 、 LT 组成,

它能有效抑制进线端的电磁干扰,其中 R_1 为放电电阻,能够解决电源断开后因 C_1 放电而导致 L、N 两端长时间带电的问题,LT 为共模电感;BR 为整流桥,比分立的整流二极管拥有更强的散热能力; C_3 为滤波电容,选用可靠性好、损耗小的聚丙烯电容; C_4 、 C_5 为大容量电解电容,起稳压与能量回收的作用;发光二极管 D_3 作为电源指示灯,电阻 R_2 为其限流。

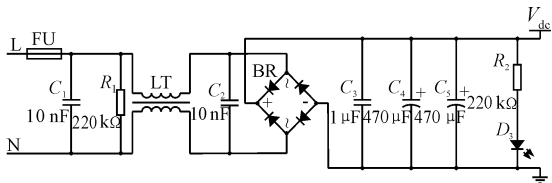


图 4 整流电路原理图

2.2 功率变换主电路

功率变换主电路是整个功率驱动电路中最为核心的环节,它首先要起到开关作用,并且在开关模式下向电动机提供运行所需要的能量,同时还需要为绕组提供能量回馈路径。

当前适用 SRM 的功率变换电路有很多^[8-9],本研究选择结构最简单、可靠性最高的不对称半桥回路,以分立元器件的形式设计功率变换主电路,以 A 相为例,功率变换主电路原理图如图 5 所示。主开关器件选择 IGBT 单管 SGH15N60RUF,因为 IGBT 驱动简单、耐压高、更适用于大功率场合;续流二极管选择超快速恢复二极管 MUR1560,其恢复时间仅为几十纳秒,能满足快速退磁的需求;图中,HA、LA 分别为 A 相上臂和下臂的栅极触发端,从光耦与触发电路接收触发信号,EA 为 A 相上臂的悬浮地;输出端 IA 串联电流检测电路后连接 A 相正端,而 AN 直接与 A 相负端相连; $R_3 \sim R_5$ 组成分压采样电路以测量母线电压值,ADC0 直接连接 DSP 的 A/D 接口,3 V 稳压二极管 D_4 能有效保护 DSP 不被烧坏。

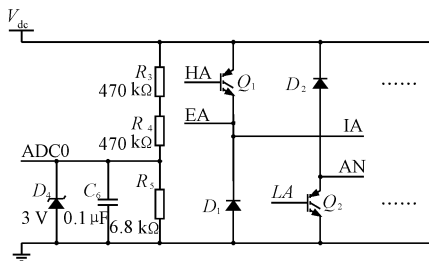


图 5 功率变换主电路原理图(只画出一相)

2.3 光隔与触发电路

光隔与触发电路分为光耦隔离和栅极触发两部分,由于功率变换电路选择不对称半桥回路,每一相的上下两个桥臂需要分开控制,理论上驱动四相 8/6 极开关磁阻电动机时,光耦隔离和栅极触发电路各需要 8 路。

单路光耦隔离电路的原理图如图 6 所示,核心器件是高速、高共模比光电耦合器 HCPL4504,它能将主、副两边的强弱电信号完全隔离,大大提高了电路的可靠性与抗干扰能力。 R_6 可为光耦内部的发光二极管限流,副边的 C_7 、 C_8 分别为去耦合与去噪声电容, R_7 为上拉电阻。

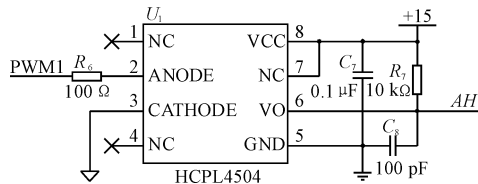


图 6 光耦隔离电路原理图

栅极触发电路的原理图如图 7 所示。该电路以栅极驱动集成芯片 IR2110 为核心,IR2110 具有成本低、集成度高、驱动能力强、安全可靠等诸多优点,并且仅用一块 IR2110 即可驱动同一相的两个开关器件,使栅极触发电路的数量减少了一半;同时,本研究采用外部自举电路驱动,减少了触发电路的电源数量,大大降低了电路的制作成本。电路中 R_8 、 R_9 为栅极驱动电阻, C_9 和 D_5 为自举电容和自举二极管,结合图 5 与图 7 可知,以 A 相为例,AH、AL 均为经过隔离后的 PWM 信号,当上臂关断,下臂导通时,上臂悬浮地接 GND, N 点电位为 0 V, M 点通过 D_5 与 +15 V 电源相连,自举电容充电,两端电压为 +15 V;而当上臂导通时,EA 与 V_{dc} 相连, N 点电位变为 V_{dc} ,但此时由于有 C_9 的存在, M 点电位变为 $V_{dc} + 15 V$, D_5 承受反压而关断,从而保护了 +15 V 电源,同时,短时间内自举电容中储存的电荷能在 +15 V 电源对上臂关断的情况下保证上臂的继续导通,使功率变换电路继续安全、可靠地运行。

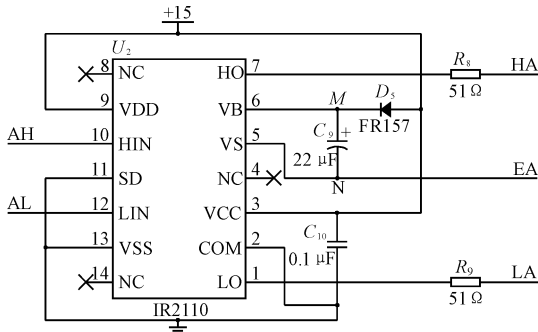


图 7 栅极触发电路原理图

2.4 电流检测电路

本研究选用闭环霍尔传感器 CSM025A 检测开关磁阻电动机每一相的绕组电流,它使用 $\pm 15 V$ 电源,能在高度绝缘的条件下测量直流、交流、脉冲以及各种不规则波形的电流,并且提供了 5 种通过改变接线方

式可调的匝数比^[10],以控制输入电流和输出电流之间的比值,精确度和可靠性都很高。

以 A 相为例,单相电流检测电路的原理图如图 8 所示。此时的接线方式将设定匝数比为 5:1 000,额定输入电流为 5 A,额定输出电流为 25 mA。由于 DSP 的 A/D 模块只针对电压信号进行转换,并且输入范围为 0~3 V,超过 3 V 或者输入负压都将烧毁 DSP,本研究首先将输出的电流信号通过 51 Ω 精密电阻 R_{10} 接地转换为电压信号 AD1,然后以双运算放大器 LM358 为核心设计电压调理电路,将转换得到的电压信号 AD1 提升 1.5 V (V_g),确保电流检测电路最终的输出信号 ADC1 在 0~3 V 范围内,然后再输入 DSP。

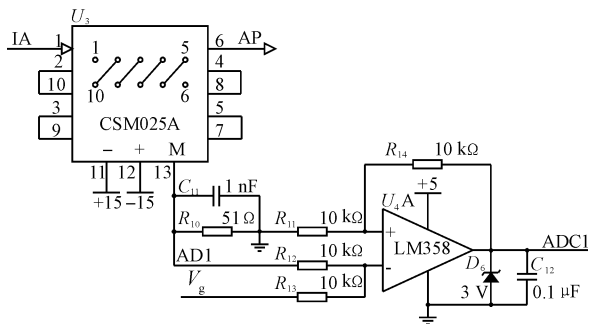


图 8 电流检测电路原理图(只画出一相)

2.5 位置信号的检测

位置检测的目的是确定 SRM 定、转子之间的相对位置关系,以此来控制各相绕组的通断,所以开关磁阻电动机对位置检测环节的要求很高。本研究选择 3 600 线的增量式旋转光电编码器,在 DSP 正交编码电路 QEP 的 4 倍频作用下可以达到每转 14 400 个脉冲,确保了位置检测的精度。

光编的 A、B 两路正交脉冲经 QEP 入 DSP,通过计算即可得到当前转速,然而仅凭这两路脉冲信号只能获得电动机相对于初始时刻转过的角度,无法得到其绝对位置,所以必须设定参考零位置。SRM 的零位置通常选择某一相的最大电感位置或最小电感位置,由于转子轴“D”形切口正对了一个转子凸极,本研究以“转子轴切口对准定子 A 相正端凸极”为零位置,此时 A 相电感达到最大值,而电动机在转至零位置时光编恰好能输出 Z 脉冲,利用捕获单元 CAP 对其进行捕获,综合 A、B 信号即可获得电动机任意时刻的绝对位置。

3 实验平台的软件设计

本研究所设计的四相 8/6 极开关磁阻电动机实验平台的软件系统由下位机 DSP 控制程序和上位机操作界面组成。其中,下位机控制程序包括主程序和中

断子程序两部分,主程序由各类外设初始化子程序、转子位置角计算子程序和换相子程序等部分组成;中断子程序包括 A/D 转换中断、数据接收中断、转速控制中断、零位置中断等。上位机操作界面以 LabVIEW 为开发环境,实现串口通信、数据显示、指令发送等功能。

3.1 主程序

在主程序中首先需要完成对系统的设定,以及对事件管理器、GPIO、SCI、A/D 等外设的初始化,配置中断入口,然后进入无限循环等待中断,其流程如图 9 所示。

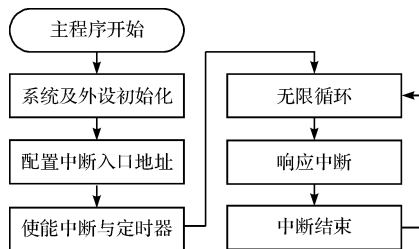


图 9 主程序流程图

在无限循环等待中断的过程中,主程序还将完成启动与换相的工作,具体流程图如图 10 所示。在找到零位置前,增量式光电编码器无法检测电动机的绝对位置,所以本研究首先使用调压器将电源电压控制在 5 V 左右并采用定时换相,每触发一相调用一次延时函数,产生 0.1 s 左右的延时,然后再次判断零位置是否找到,若仍未找到则触发下一相,如此不断地重复判断、换相、延时 3 个步骤,让开关磁阻电动机先以低速转动起来。在 SRM 转动经过零位置,捕获单元首次捕捉到 Z 脉冲后,系统由定时换相转为逻辑换相,即不断读取 QEP 的时钟源的计数值($T2CNT$),通过计算得到当前转子位置角 θ ,然后根据 θ 以及开关角进行换相,同时逐步升高电源电压,使 SRM 正常运行。

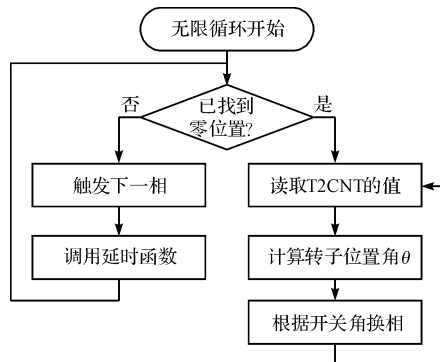


图 10 无限循环流程图

3.2 零位置中断程序

光电编码器输出的 Z 脉冲由 CAP3 输入 DSP,所以零位置中断由 CAP3 产生。零位置中断的流程图如图 11 所示,其主要功能有两个:首先是将 $T2$ 计数值清

零,避免计数值溢出同时减小误差;其次是在首次产生零位置中断时将启动标志位置 1,表示开机找“零”过程已完成,主程序开始进行逻辑换相。

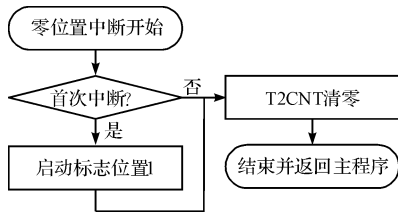


图 11 零位置中断流程图

3.3 A/D 转换中断程序

DSP 通过输出 PWM 波控制各相绕组的通断,所以绕组电流在很大程度上受到 PWM 波的影响,为了减小采样时的电流波动,提高测量精度,本研究选择在每个 PWM 波形的中心点进行 A/D 转换。T1 周期中断刚好发生在 PWM 波形的中心,所以 A/D 转换由 T1 周期中断启动,其流程如图 12 所示,主要包括读取结果、滤波、还原 3 个过程。

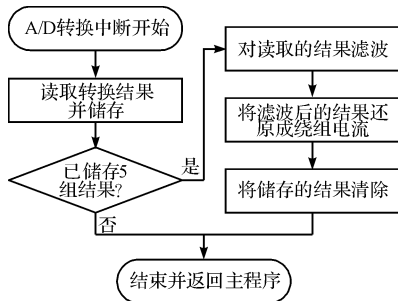


图 12 A/D 转换中断流程图

A/D 转换中断程序首先要完成对转换结果的读取,读取结果的实质是将结果寄存器中存放的转换结果(数字量)读取成相应引脚的输入电压(模拟量)。为测得精确的绕组电流,本研究在读取结果后采用“中位值平均滤波法”对结果进行滤波,即对同一相的绕组电流连续采样 5 次,去掉 5 个结果中的最大值与最小值,然后计算其余 3 个中位值的算术平均值,通过这种方法可有效消除脉冲干扰引起的采样误差。由于电流检测电路中包含了电流电压转换以及电压调理两个环节,最后还必须将滤波后的转换结果从 A/D 转换的输入电压还原为所测的绕组电流,两者的关系为:

$$I_k = \frac{V_{IN} - V_g}{R_T} \quad (1)$$

式中: I_k —绕组电流, V_g —电压调理电路中的偏置电压值, R_T —电流电压转换时所选用的精密电阻阻值。

本研究中 V_g 为 1.5 V, R_T 为 51 Ω 。

3.4 转速控制中断程序

电动机的转速特性可以直接反映出其性能的优劣,

所以转速控制至关重要。转速控制中断由频率为 1 kHz 的定时器 4 周期中断启动,其流程图如图 13 所示。

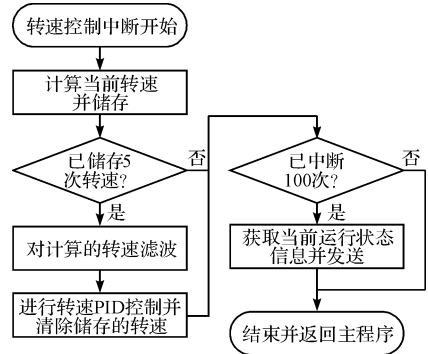


图 13 转速控制中断流程图

每次进入转速控制中断都将首先计算当前转速,本研究采用频率法,即利用相邻两个转速控制中断所读取的 T2 计数值之差 ΔN 来计算光编 A、B 信号脉冲的频率,从而换算得到电动机的转速。由于本研究使用的光电编码器在 QEP 电路 4 倍频作用下将达到每转 14 400 个脉冲, ΔN 与电动机转速 n 之间的关系为:

$$n = \frac{60\Delta N}{14\,400T_c} = 4.167\Delta N \quad (2)$$

式中: T_c —转速控制中断的周期,本研究中选为 10^{-3} s。

同时,电动机的正反转状态可以通过读取 T2 状态位 T2STAT 直接得到。完成 5 次测量后,本研究采用“算术平均滤波法”对转速滤波以降低测量误差,然后通过 PID 算法对转速进行控制。PID 控制器的传递函数为:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_p}{T_i s} + k_p T_d s \quad (3)$$

式中: $U(s)$, $E(s)$ —控制器的输入与输出信号; k_p , T_i , T_d —比例系数、积分时间常数、微分时间常数。

然而在实际设计控制算法时通常采用离散 PID,对式(3)作 Z 变换并离散化^[11]即可得离散 PID 的表达式:

$$u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

式中: $K_p = k_p$; $K_i = k_p T_s / T_i$; $K_d = k_p T_d / T_s$; T_s —采样周期。

对于转速 PID 控制而言,其输入量 e 为给定转速与实际转速之间的偏差量,又因为主开关器件工作于 PWM 模式,输出量 u 用于控制 PWM 波的占空比,从而间接控制绕组电压的平均值。本研究使用事件管理器的比较单元输出 8 路对称 PWM 波,所以 PWM 占空比由相应的定时器计数周期 TxPR 和比较单元比较值 CM-PRn 决定,而 TxPR 一般在初始化事件管理器时对其赋值并且不再改动,所以本研究将 PID 控制的输出量 u 直接赋值给 CM-PRn,并在赋值之后对比较值进行限幅,以

此将 PWM 占空比限制在 20% ~ 80% 之间。

3.5 数据接收中断程序

除了查询方式之外,SCI 的发送和接收还可以通过中断进行控制。当 SCI 采用查询方式发送或接收数据时,往往需要不断地查询相应缓冲寄存器的就绪标志。考虑到系统并不需要频繁接收给定数据,SCI 模块只需在每次调速过程中从上位机接收一次给定数据即可,这种情况下如果仍使用查询方式接收数据,显然会大大降低程序的运行效率,所以本研究采用查询方式发送,中断方式接收的组合,利用 SCI 接收中断接收并更新给定转速与 PID 参数,其流程图如图 14 所示。

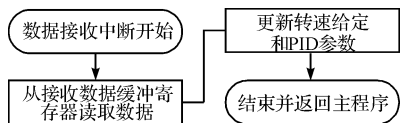


图 14 数据接收中断流程图

3.6 上位机操作界面

LabVIEW 的函数库包括数据采集、串口控制、数据显示等。本研究设计的上位机操作界面如图 15 所示,主要包括数据显示区、数据发送区以及串口控制区 3 个区域。数据显示区提供了电动机转速、转子位置角、开关角的数值显示,转速波形显示和 PWM 占空比的仪表显示以及其上、下限的指示灯提示等;数据发送区由 4 个输入控件与 1 个按钮控件组成,负责通过串口向 DSP 发送给定转速与 PID 参数;串口控制区主要实现 I/O 口指定,波特率、数据比特、停止位设置等功能。

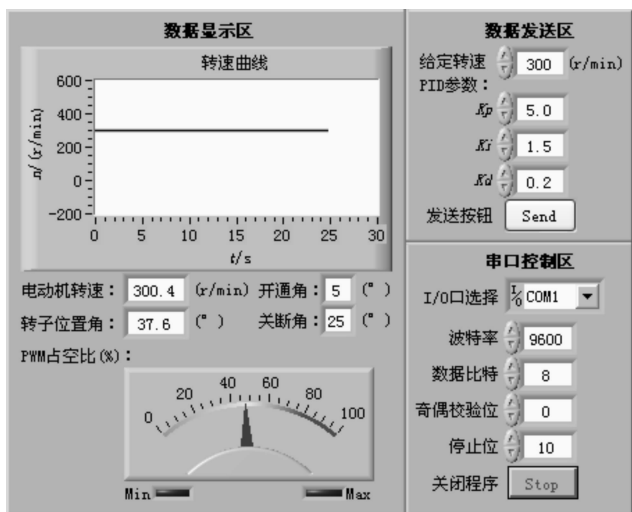


图 15 上位机操作界面

4 实验结果与分析

本研究首先在开环条件下对系统的软硬件进行了测试和验证,测试条件为:电源电压 10 V, PWM 占空比

60%,最终实验结果如图 16 所示。从图 16 中可以看出,由于硬件部分采用了光电耦合器 HCPL4504,单相上、下桥臂 PWM 信号与开关管驱动信号在逻辑上刚好相反,且隔离后的 PWM 信号通过驱动芯片 IR2110 能正确地触发 IGBT,得到稳定的相电压。因此,开环实验验证了系统软、硬件设计的正确性和有效性。

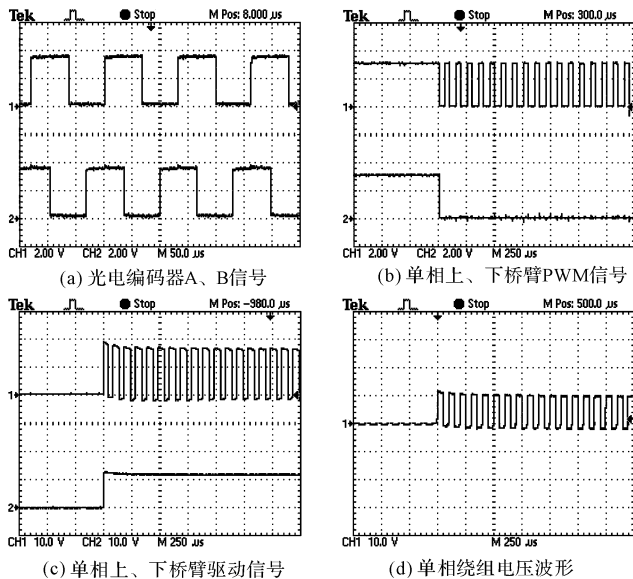


图 16 开环验证实验结果图

其次,为研究开关角与绕组电流之间的关系,本研究采集的不同开关角下的相邻两相绕组的电流波形如图 17 所示。实验结果证明,改变开通角能使绕组电流波形的宽度、峰值等发生明显的改变,适当减小开通角可使绕组电流有充足的上升时间,提高 SRM 产生的电磁转矩,增加电动机出力,但是开通角也不能太小,过分减小开通角容易使绕组电流过大,噪声和震动增加,影响电动机的稳定性。相比之下,关断角控制只影响绕组电流波形宽度,不影响峰值,所以对绕组电流的作用较弱,通常只作为辅助控制方式,用于调节 SRM 的运行效率,因为适当增大关断角能增加各相的供电时间,提高转矩,但如果关断过晚,该相就可能会产生负转矩,大大降低电动机的效率。根据结果,本研究选择开通角 5°,关断角 25°作为最优开关角。

最后,本研究在最优开关角下进行了闭环调速实验,初始条件为:给定转速 300 r/min,电源电压 15 V, PID 参数为 $K_p = 2, K_i = 0.5, K_d = 0.1$ 。实验过程为: 0 ~ 5 s 为启动阶段,在系统运行 7 s 和 12 s 时分别将给定转速改变为 500 r/min 与 400 r/min, 15 s ~ 20 s 之间让系统稳定运行,最后进行扰动实验,在系统运行 23 s 左右时突然增加负载转矩,4 s 后撤除,再在 33 s 时突然降低电源电压至 7.5 V, 4 s 后恢复。不同阶段的转速波形如图 18 所示,可见开机找“零”的过程只持续

1 s左右,十分短暂,启动后整个调速系统运行稳定,转速响应具备快速性和准确性,并且系统抗干扰能力强,说明 PID 算法能根据转速偏差,通过改变 PWM 波占空比来改变绕组电压平均值,从而间接调节绕组电流的大小,实现对转矩和转速的有效控制。

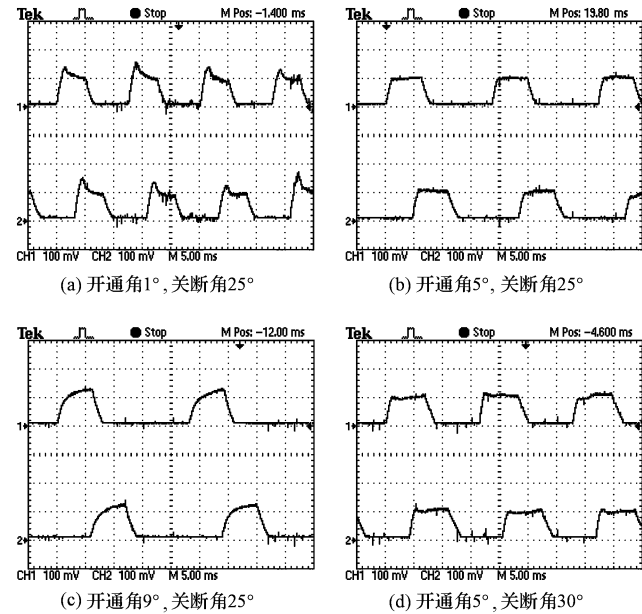


图 17 不同开关角下的绕组电流波形

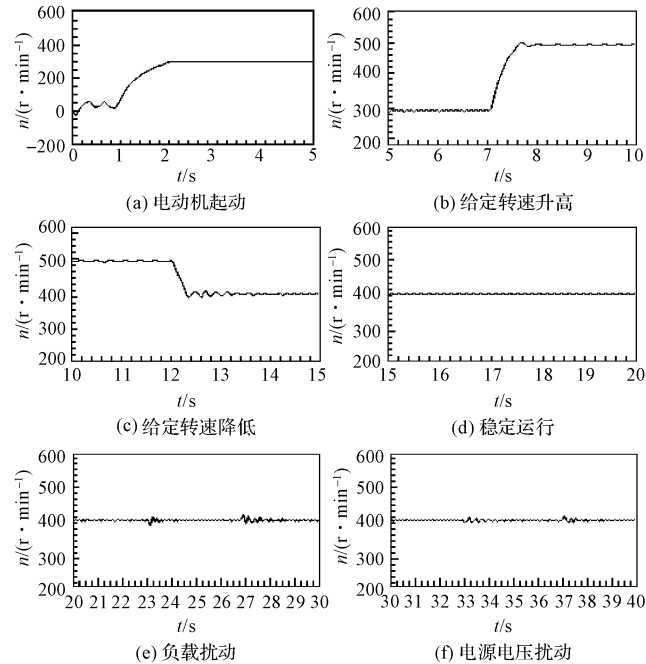


图 18 调速实验结果图

5 结束语

本研究首先分析了开关磁阻电动机的基本原理和控制方法,在此基础上开发了四相 8/6 极开关磁阻电动机实验平台;详细介绍了实验平台硬件系统的组成、特点、原理以及各元器件的功能和选型等;同时介绍了实验平台的软件部分,给出了 DSP 控制程序中主程序和中断子程序的具体功能与流程;最后,基于所开发的开关磁阻电动机实验平台进行了多项实验,通过开环实验验证了系统软硬件设计的正确性,同时研究并分析了开关角与绕组电流之间的关系;通过闭环调速实验证明了 PID 控制的有效性以及系统调速性能的优越性。

参考文献 (References):

- [1] 詹琼华. 开关磁阻电动机[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1992.
- [2] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [3] LAWRENSON P J, STEPHENSON J M, FULTON N N, et al. Variable-speed switched reluctance motors [J]. **IEEE Proceedings B: Electric Power Applications**, 1980, 127 (4):253-265.
- [4] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [5] SOARES F, COSTA B P J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment [J]. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 2001, 37(3):989-1009.
- [6] 谭国俊, 蒯松岩, 何凤有. 电压斩波控制的开关磁阻电机非线性仿真分析[J]. **系统仿真学报**, 2006, 18(2):478-481.
- [7] 王洪诚, 陈刚, 王钰涵, 等. 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. **兵工自动化**, 2013, 31(6):70-73.
- [8] AHN J W, LIANG J, LEE D H. Classification and analysis of switched reluctance converters [J]. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, 2010, 5(4):571-579.
- [9] CHANG H C, LIAW C M. An integrated driving/charging switched reluctance motor drive using three-phase power module [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2011, 58(5):1763-1775.
- [10] 王子涛, 王家军, 郭超. 基于 TMS320LF2812 的永磁同步交流伺服系统[J]. **机电工程**, 2012, 29(9):1050-1054.
- [11] 韩安太, 刘峙飞, 黄海. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

俞泉辰, 王家军. 开关磁阻电动机实验平台的开发与研究[J]. **机电工程**, 2014, 31(5):600-606.

YU Xiao-chen, WANG Jia-jun. Development and research on experimental platform of switched reluctance motor [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(5):600-606.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>