

# 混合励磁同步电机控制系统设计与信号处理

郭新军<sup>1</sup>, 黄明明<sup>1</sup>, 郭健<sup>2</sup>

(1.河南工程学院, 电气信息工程学院, 河南 郑州 451191;

2.南京航空航天大学, 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**首先给出了混合励磁同步电机(HESM)控制系统的总体设计方案,然后以相电流信号处理电路为例,阐述了模拟电压信号处理电路的设计原理。对比较重要的模拟信号,提出了包括多通道采样、数字校正及采用提高电路板电磁兼容性的印制电路板设计方法。最后,通过实验验证了所提设计方法的正确性和有效性。

**关键词:**混合励磁同步电机; 信号处理; 多通道采样; 数字校正

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2014)07-0032-04

## The Control System Design for Hybrid Excitation Synchronous Motor and Signal Processing Technology

GUO Xin-jun<sup>1</sup>, HUANG Ming-ming<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>2</sup>

(1. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** Firstly, the overall design for the hybrid excitation synchronous motor (HESM) control system is presented. Then, the design principles of analog voltage signal processing circuits are introduced by analyzing the a phase current signal processing circuit. According to some important analog signals, the multi-channel sampling technology, digital correction technology and the design methods of print circuit board for improving electromagnetic compatibility are presented. Lastly, the correctness and validity of the proposed design method are proved by the experiment.

**Keywords:** hybrid excitation synchronous motor; signal processing; multi-channel sampling; digital correction

**Foundation Project:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51307082); the Education Department of Henan Province Science and Technology Research Projects (No.13B470936)

## 1 引言

HESM 综合了永磁同步电机(PMSM)效率高、转矩密度大及电励磁同步电机调磁方便的优点,是一种具有低速大转矩特性的宽调速电机,在电动汽车、机床及伺服控制等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。在电机结构上, HESM 仅比 PMSM 多一个电流可控的励磁绕组, 后者目前已有比较成熟的控制技术和产品, 因此在基本的控制原理与方法上, 前者可充分借鉴后者已有的成果<sup>[2]</sup>。

HESM 的控制策略根据其电磁特性大致可分为两类:①是隐极式 HESM, 由于其交轴与直轴电感相等, 无论是在低速区还是高速区, 均采用  $i_d=0$  的矢量控制模式, 如文献[3-4]所述, 但这种控制方法未考虑  $d$  轴电流在高速区的弱磁调速能力,

限制了 HESM 的转速提高;②凸极式 HESM, 交、直轴电感不相等, 在整个调速区间, 均应考虑  $d$  轴电流的调磁作用, 需合理分配其交、直轴电流与励磁电流分量, 可采用基于矢量控制的常规或智能铜耗最小化控制方法, 使 HESM 实现电机效率最优化运行, 如文献[5-6]所述。上述文献主要从控制理论和方法上进行阐述, 然后通过实验进行验证, 但未涉及 HESM 控制系统的硬件电路设计及信号处理等方面。

这里首先给出了 HESM 控制系统的总体设计方案, 然后介绍了模拟信号处理电路的设计与工作原理, 提出了几种提高测量精度与抗电磁干扰的设计方法。最后, 通过实验证明了所设计电路、信号测量方法及数字校正技术的有效性。

## 2 HESM 控制系统总体方案设计

关于 HESM 控制系统的控制策略与控制方法, 在文献[5-6]中有较详细的论述, 以下重点介绍系统硬件电路设计与信号处理技术。图 1 为 HESM 控制系统的总体方案设计。按其电路功能大致可分为 5 个模块。

**基金项目:**国家自然科学基金(51307082);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13B470936)

**定稿日期:**2014-02-12

**作者简介:**郭新军(1968-),男,河南长葛人,硕士,副教授,研究方向为电力电子及通信技术。

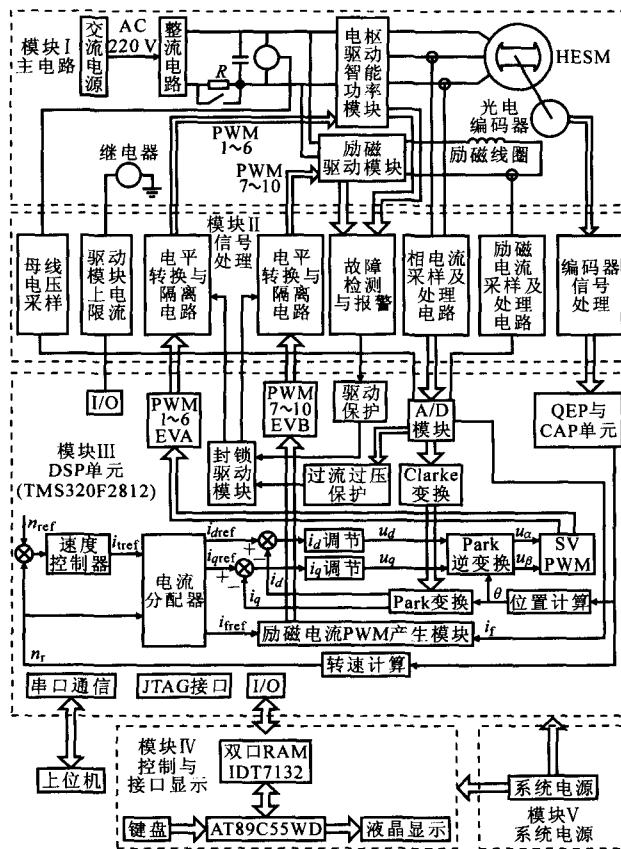


图 1 HESM 控制系统框图

Fig. 1 The block diagram of the HESM control system

**模块 I:** 该模块为控制系统主电路, 包括整流、滤波、电枢驱动电路和励磁驱动电路等, 后两者分别给电机提供电枢电流与励磁电流。在主电路中, 还包含一个上电保护电路, 在主电路上电瞬间, 由于电容两端电压为零, 为限制其充电电流, 继电器断开, 主电路通过继电器的旁路电阻对电容充电; 当直流母线电压超过设定阈值电压后, 继电器闭合, 短接旁路电阻, 避免其因长时间通过大电流而烧坏。

**模块 II:** 该模块主要功能是进行各种模拟或数字信号处理, 包括对从电流、电压霍尔传感器、温度传感器及光电编码器等输出的信号进行滤波、放大、电压偏置、限幅等处理工作, 强电、弱电电路之间信号传输时进行光电隔离、电平转换等处理。

**模块 III:** 该模块为数字信号处理器 DSP 单元, 包括 TMS320F2812 片内所有硬件资源, 其功能是完成所有输入到 DSP 内部的数字和模拟信号处理, 以及进行各种复杂的运算处理, 其具体内容主要有 A/D 转换、正交编码脉冲信号处理、串口通信和 JTAG 接口通信等。此外, 当电机出现故障时, DSP 应响应故障信号并及时做出相应处理。

**模块 IV:** 该模块为控制与接口显示电路, 主要

功能是完成各种控制操作及人机接口通信。包括按键控制电路和液晶显示模块电路, 两者均由单片机 AT89C55WD 控制, 单片机与 DSP 之间的通信或数据交换通过双口 RAM IDT7132 完成。

**模块 V:** 该模块为系统电源, 提供系统所需不同电压等级电源, 包括 -15V, -5V, 1.8V, 3.3V, 5V, 15V, 24V 等电压等级的电压源。

### 3 模拟信号处理电路

HESM 控制系统设计中, 模拟信号处理电路包括相电流、励磁电流、母线电压及模拟参考转速信号处理电路等。由于这些电路结构和原理类似, 下面仅给出 a 相电流信号处理电路, 如图 2 所示。

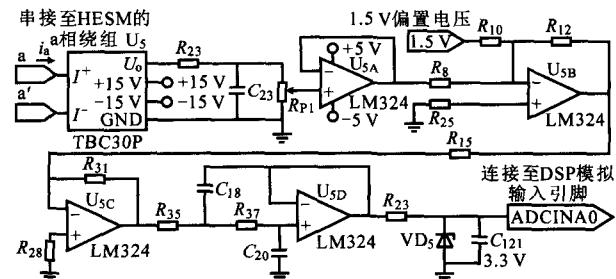


图 2 模拟信号处理电路

Fig. 2 The analog signal processing circuit

**电路原理简述:** 经霍尔电流传感器 TBC30P, 将来自 a 相电流信号转换为电压信号后, 首先做低通滤波, 然后经电位器  $R_{P1}$  分压, 使正常情况下相电流转换后对应电压信号限制在 -1.5~1.5V, 然后通过电压跟随器  $U_{5A}$  隔离输出。由于 TMS320F2812 只能接受 0~3V 间的电压信号, 因此还需在电路上增加一个 1.5V 的偏置电压, 将电压信号变化范围平移到允许范围。该部分电路由元件  $R_8, R_{10}, R_{12}, R_{25}, U_{5B}, R_{15}, R_{28}, R_{31}, U_{5C}$  等构成。经过电压偏置后得到的信号, 由于电源波动及其他电磁干扰的影响, 为保证信号品质, 还需做一个低通滤波将高频干扰信号过滤掉(在实际控制中, 主要高频干扰分量集中在 10 kHz 左右, 即逆变器功率管的开关频率), 该滤波器设计为二阶低通滤波器, 由元件  $R_{35}, C_{18}, R_{37}, C_{20}, U_{5D}$  构成。最后, 将相电流信号通过一个 3V 的限压保护电路, 使 DSP 不至于因过压而损坏, 该限压电路由元件  $R_{23}, C_{121}$  和  $VD_5$  构成。

### 4 模拟信号的测量与校正及抗干扰技术

在实际工程设计中, 模拟信号的处理往往比数字信号更为复杂, 不同情况往往需采用不同的处理方法。在电磁干扰比较严重、对信号品质又要求很高的环境中, 一般需采用多种手段相结合的方式

才能得到较理想的结果。如针对 HESM 控制系统的电枢电流、励磁电流、母线电压及模拟转速给定信号等,除了在模拟电路中进行放大、滤波及限幅等处理外,为提高采样信号精度以实现 HESM 的精确控制,还需做进一步处理,处理方法有:

**方法一** 对同一信号应用多通道采样技术。通过 DSP 对模拟电压信号进行测量时,受器件本身温度变化、零点漂移、电源波动及各种电磁干扰的影响,经 A/D 转换后所得数字量在不同时刻会产生一定误差,一般为 1~20 mV 之间。这种看似微小的电压变化,对模拟转速给定信号而言,会产生每分钟零至几十转的随机转速波动;对于相电流采样信号,当 HESM 做低速、空载运行时,由于电流很小,这个误差也会影响电机运行的稳定性。因此对重要的、要求精度较高的模拟信号,采用多通道对同一模拟信号进行采样、A/D 转换,然后对各通道转换值取平均值,可有效提高检测信号的稳定性和精确性。TMS320F2812 具有 16 路 A/D 转换通道,基本上能满足信号多通道采样的需求。

**方法二** 采用数字校正技术。在 HESM 驱动电路中,通过霍尔传感器,可对初级电压或电流信号进行测量,统一转换为电压信号后,经放大、电压偏置、滤波及限幅等处理,送入 TMS320F2812 中,经其内部的 A/D 转换器将模拟电压信号转变为数字信号。上述各个环节都会出现一定误差,信号经过的处理环节越多,累积的误差也就越大,最终所得到数字量的精确性和可靠性就会大大下降。因此,要提高信号的测量精度,需采用合理的校正技术。在 HESM 驱动控制系统硬件电路调试过程中,所采用的数字校正方法简述如下:在传感器初级的电流、电压检测范围内,从小到大依次施加电流或电压,用高精度数字万用表测得初级的电流或电压值,将其转换为对应的数字量(采用 Q15 格式),即可得到近似的理想数字量。转换公式为:

$$y=\text{int}(kx2^{15}/3), k=\alpha_1\alpha_2 \quad (1)$$

式中:  $\text{int}()$  表示对括号中表达式的值进行取整;  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为传感器初、次级的比例系数及后级放大电路的比例系数;  $x$  为传感器初级的电流或电压值; 3 表示 TMS320F2812 的 A/D 转换参考电压为 3 V; 乘以  $2^{15}$  表示 A/D 转换值采用 Q15 格式。

通过实时在线电路仿真,采用软件 CCS3.3 可将保存在 A/D 转换结果缓冲寄存器  $\text{RESULT}_n$  中的数字量调出,然后将 DSP 转换所得数字量与实测量的理想转换值进行线性拟合,可得一个校正公式。应用上述方法可得 a 相电流采样校正公式为:

$$i_{a,\text{correct}}=\text{int}(1.0354i_{a,\text{cal}}-2863) \quad (2)$$

式(2)是由表 1 中数据线性拟合所得。该式可应用 Excel 表格通过“添加趋势线”和选中选项中“显示公式”得到,也可直接应用最小二乘法进行线性拟合获得。将 DSP 的 A/D 转换值通过式(2)校正后,即可得较精确值  $i_{a,\text{correct}}$ ,如表 1 所示。

表 1 a 相电流检测与校正数据

Table 1 Detection and correction data of a phase current

$i_a/A$	$i_{a,\text{cal}}/\text{Q15}$	$i_{a,\text{ideal}}/\text{Q15}$	$i_{a,\text{correct}}/\text{Q15}$
0	2 688	0	-80
0.1	2 960	164	202
0.2	3 200	328	450
0.5	3 536	819	798
1	4 400	1 638	1 693
1.5	5 056	2 457	2 372
2	5 920	3 276	3 267
2.5	6 688	4 095	4 062

$i_a$  为 a 相电流用标准表实测精确值;  $i_{a,\text{cal}}$  为 DSP 对 a 相电流采样信号做 A/D 转换后未校正数字量;  $i_{a,\text{ideal}}$  为由标准表所得实测模拟量直接算得的理想数字量;  $i_{a,\text{correct}}$  为校正后数字量。

图 3 为 a 相电流测量值校正过程实验结果。

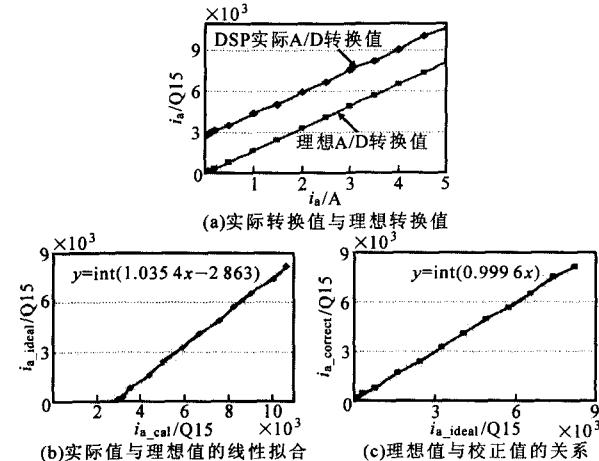


图 3 a 相电流的数字校正

Fig. 3 The digital correction of the a phase current

根据表 1 可得 a 相电流经 DSP 转换后的数字量与对应的理想转换值数字量曲线, 数字量为 Q15 格式, 如图 3a 所示。显然, 未经处理的 A/D 转换值和理想转换值之间有较大误差。将实际转换值与理想转换值进行线性拟合, 得到理想值与实际值的线性关系, 如图 3b 所示。应用式(2)进行计算, 得到校正后的电流数字量, 校正值与理想值基本成线性关系, 误差很小, 完全能满足 HESM 控制系统对高精度信号测量的需要。

**方法三** 在 HESM 控制电路的 PCB 设计过程

中,采用提高电路电磁兼容性的设计方法。提高电路板的电磁兼容性主要从两个方面考虑:①对产生干扰或易受干扰的电路应用合理的覆铜与接地技术,隔离干扰信号传播途径,PWM1~6 信号线易产生电磁干扰,用地线环绕隔断其干扰信号发射途径,a 相电流信号检测电路易受干扰,采用地线环绕方式进行保护;②将模拟地与数字地分开,然后使用磁珠单点相连,该方法可有效避免数字电源电压波动对模拟电路信号的干扰。

## 5 HESM 驱动实验结果分析

图 4 为实验波形。

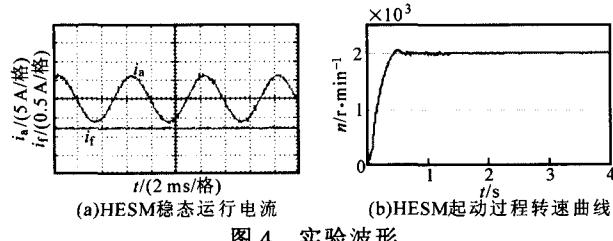


Fig. 4 Experimental waveforms

图 4a 负载  $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电机转速  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 励磁电流  $i_f = -0.7 \text{ A}$ , a 相电流为正弦波, 幅值 6 A。由于电机工作在弱磁运行状态, 电枢电流包括起弱磁作用的  $d$  轴分量和提供转矩的  $q$  轴分量两部分, 相电流波形比较平滑, 谐波较小。图 4b 负载  $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 电机设定转速  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。转速在上升

过程中有一个较小的超调,  $0.6 \text{ s}$  左右电机进入稳定运行区, 转速波动很小, 运行较平稳。

## 6 结 论

首先给出混合励磁同步电机控制系统总体设计方案, 然后介绍了模拟电压信号处理电路的设计原理。此外, 为增加混合励磁同步电机控制系统运行的可靠性和准确性, 提出几种有效提高混合励磁同步电机控制系统中模拟和数字信号处理质量的方法。最后, 通过实验验证了所提方法的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] C C Chan, K T Chau, J Z Jiang, et al. Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1996, 43(2): 331–339.
- [2] 王伟华, 肖 曦, 丁有爽. 永磁同步电机改进电流预测控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 50–55.
- [3] 李哲然, 李叶松, 李新华. 连续极永磁电机弱磁控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 124–132.
- [4] 朱婷婷, 邓智泉, 王 宇. 并列式混合励磁磁通切换型电机及其电流矢量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 140–148.
- [5] 黄明明, 林鹤云, 金 平, 等. 新型混合励磁同步电机分区控制系统分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 120–125.
- [6] 黄明明, 郭新军, 周成虎, 等. 一种新型电动汽车宽调速驱动系统设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 228–233.

(上接第 31 页) 下, 电压空间矢量软起动器的起动电流比斜坡升压软起动器的起动电流小。根据现场实验测试情况可知, 所提出的基于正弦波电压空间矢量的软起动方法和所研制的软起动器可有效降低起动电流, 提高起动转矩。

表 1 实验数据  
Table 1 The experimental data

负载率/%	$I_f/A$	$I_s/A$	$S_r$	$S_v$
0	32	26	成功	成功
5	38	26	成功	成功
10	41	27	成功	成功
15	41	27	成功	成功
20	42	28	成功	成功
25	62	28	失败	成功

$I_f$  为斜坡升压软起动电流值;  $I_s$  为电压空间矢量软起动电流值;  $S_r$  为斜坡升压方法电机起动情况;  $S_v$  为电压空间矢量方法电机起动情况。

## 8 结 论

基于正弦波电压空间矢量的软起动器的控制策略降低了起动电流, 提高了起动转矩。将该新型软起动器与斜坡升压软起动器效果进行了比较, 实验结果表明: 基于正弦波电压空间矢量的软起动器可启动带有一定负载或较大惯性负载的电动机, 而且电流保持在较小的值。

## 参 考 文 献

- [1] 成开友. 基于单片机的电机保护与软起动控制[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(2): 155–157.
- [2] 戴圣伟, 王 欣, 李燕林, 等. 三相异步电机的智能软启动[J]. 电机技术, 2012, 40(10): 30–32.
- [3] 余洪明, 章克强. 软启动器实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 喻金钱, 俞 斌. STM32F 系列 ARM Cortex-M3 核微控制器开发与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.