

基于双 DSP 的磁悬浮开关磁阻电机全数字控制器

赵楠,葛宝明

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要: 根据磁悬浮开关磁阻电机(SRM)对控制器硬件资源及实时性的要求,基于双 DSP 与双口 RAM,研制了磁浮 SRM 的全数字控制器。控制器以 2 片 DSP 为核心,来满足磁浮 SRM 旋转和悬浮功率变换器对 PWM 调制信号的需求,双口 RAM 用于实现 2 个 DSP 之间的信息实时共享,旋转控制用功率变换器采用传统不对称半桥电路,悬浮用功率变换器采用 2 块 IPM 模块,双 DSP 管理 3 套功率变换器以实现同时旋转控制和悬浮控制。制作了全数字控制器实验样机,进行了实验测试。实验结果表明,两 DSP 可协调工作,实时交换所需数据,能有效地完成对磁浮 SRM 的控制。

关键词: 磁悬浮技术; 开关磁阻电机; 数字控制

中图分类号: TM 301.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0065-05

0 引言

开关磁阻电机具有结构简单、坚固、工作可靠且效率高等优点,在高速运行方面具有独特的应用价值^[1]。磁浮开关磁阻电机(SRM)除了具有传统开关磁阻电机的结构简单、运行可靠等优点之外,更由于机械结构上不需要轴承支承转子,而具有无摩擦、无磨损、不需要润滑和密封、高速度、长寿命等一系列优点,因此在航空航天、能源、机械工业等方面都有十分广泛的应用前景。目前,国外,日本学者已初步掌握了开关磁阻电机的无轴承技术^[2~5];国内,南京航空航天大学、江苏大学、华中科技大学等院校也正在开展这方面的研究工作,并取得了一定的成果^[6~10]。

磁浮开关磁阻电机由于定子上同时具有主绕组和悬浮绕组,因而是一个带有耦合的非线性系统。同时,电机悬浮的气隙小,且转子的悬浮控制包括 6 个自由度,即 1 个旋转自由度、1 个轴向自由度和 4 个径向自由度。因此要使电机稳定运行,控制系统的设计非常重要。随着高性能 DSP 控制芯片的出现,全数字控制器的实现成为可能,一些经典控制理论和基于现代控制理论与智能控制策略的数字控制技术和控制思想得以在磁浮开关磁阻电机的控制中实现。

这里以 1 台 12/8 结构的磁浮开关磁阻电机为研究对象,简要介绍了其悬浮力产生的原理,并设计了包括功率变换器、驱动电路、DSP 主控单元、电流采样及预处理和位置采样及预处理等主要部分的全数字控制器。其中,DSP 主控制单元的设计充分考虑控制系统的可靠性、实时性以及 DSP 资源的

充分利用,采用由 2 片 TMS320F2407A 组成双 DSP 结构,其中一个 DSP 主要进行旋转控制,另一个 DSP 主要进行悬浮控制。在控制器设计的基础上,还阐述了基于 DSP 的数字控制实现方法,PI 参数调节与电流滞环调节相结合的双闭环控制方案。最后,通过实验证明了控制器的可靠性。

1 磁浮开关磁阻电机的绕组结构和悬浮原理

本项目研究的 12/8 磁浮开关磁阻电机采用图 1 所示的结构。电机每相定子绕组均有 2 套绕组,1 套为电机主绕组,另 1 套为悬浮力绕组,图 1 中仅给出了定子 A 相绕组的分布及其连接方式。电机主绕组 AA' 由 4 套分绕组串联而成,每个磁极的绕组匝数为 N_m ,绕组电流为 i_{ma} 。径向力绕组有 2 套绕组 $S_{A1}S'_{A1}$ 和 $S_{A2}S'_{A2}$,绕组电流分别为 i_{sa1} 和 i_{sa2} ,每个磁极的绕组匝数分别为 N_{s1} 和 N_{s2} ,其中每套绕组又由分别绕在相对定子齿上的 2 套分绕组串联而成。为便于分析,基于定子 A 相绕组结构可定义相互正交的坐标轴。同理,基于 B、C 相绕组分布可分别定义其各自的坐标轴,B、C 相绕组分别分布于距 A 相绕组 1/3 及 2/3 处,这一点与传统开关磁阻电机相同。对图 1 而言, x 和 y 分别被定义为沿水平方向与垂直方向的坐标轴。

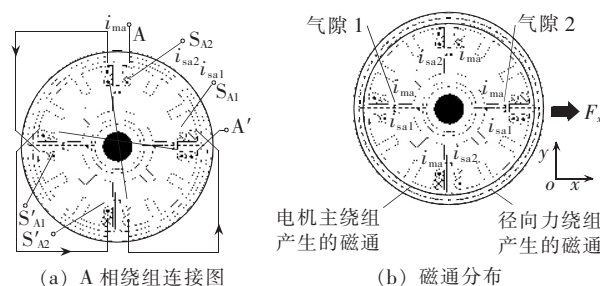


图 1 磁浮开关磁阻电机结构图

Fig.1 Structure of magnetic suspending SRM

按照图1(a)所示绕组接线及通电方式,能得到图1(b)所示磁通分布,实线为电机主绕组电流 i_{ma} 产生的4极磁通,虚线为径向力绕组电流 i_{sa1} 产生的2极磁通。显然,两组磁通迭加后,气隙2的磁通密度增加,而气隙1的磁通密度减小,导致作用在转子上的综合径向力与 x 轴正方向一致。当给径向力绕组 $S_{A1}S'_{A1}$ 通以负方向的电流时,将产生一个沿 x 轴负方向的径向力。当给径向力绕组 $S_{A2}S'_{A2}$ 通以电流 i_{sa2} 时,可以产生沿 y 轴方向的径向力。这样,通过控制定子A相绕组电流,可以产生任意方向的径向力。同样的原理被应用于B、C相,且B、C相的坐标分别超前和滞后A相 30° 。因此,通过坐标变换,可将它们产生的径向力变换到 x 、 y 轴,对电机转子受力在水平与垂直方向进行控制^[2-5]。

2 磁浮开关磁阻电机控制器的硬件设计

2.1 主绕组功率电路设计

实验中要控制的磁浮开关磁阻电机为三相电机,每相有1套主绕组、2套副绕组。其中,主绕组用于产生旋转转矩,并在悬浮控制时产生悬浮力的偏置磁场,与辅助绕组共同作用产生悬浮力。主绕组只需要单方向电流供电,电流大小变化,方向不变,这与传统的开关磁阻电机绕组中的电流控制是相似的。图2是所设计的主绕组功率电路,包括3部分,第I部分为电源供电电路,分为整流、滤波与电容充电电路,单相交流电源(相电压220 V、50 Hz)经全波整流电路,将交流电源转换为直流电源,以供功率变换电路使用;第II部分为过电压泄放电路,可实现制动能量泄放;第III部分为不对称半桥结构的主绕组功率变换电路。这个电路的特点是有效利用全部电源电压,相与相之间完成独立,不存在上、下桥臂直通的故障隐患^[1]。

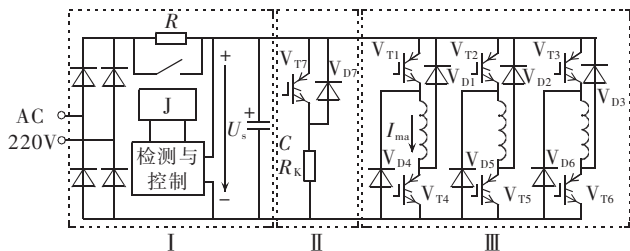


图2 主绕组功率主电路

Fig.2 Power circuit of main windings

2.2 悬浮绕组的功率电路设计

运行过程中,悬浮绕组需双向电流供电,以提供径向双向的悬浮力。悬浮绕组采用双极性的电源方式,图3为 x 轴副绕组功率电路,第I部分为交/直整流电源,采用2个电容串联提供双极性电压给绕组,电阻-接触器并联网络可防止电容开始充电时引起的过大浪涌电流。第II部分为功率变换器,其形式与典型的三相逆变电路相同,所以设计中采用富士公司的标准IPM智能功率模块6MBP50RA060。 y 轴的功率放大电路与 x 轴类似。

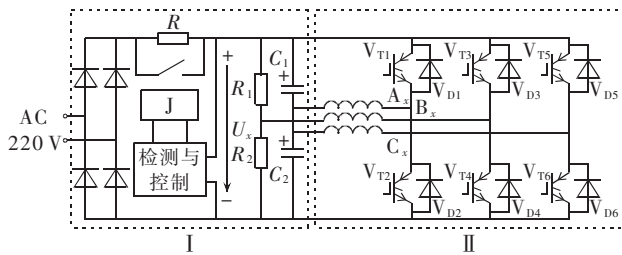


图3 x 轴悬浮绕组功率主电路

Fig.3 Power circuit of x -axis suspension windings

2.3 基于双DSP的控制板设计

磁浮开关磁阻电机核心控制板的主要任务包括:

- 为上述主、副绕组功率主电路提供足够的PWM驱动信号,共需要19路PWM信号(7路为主绕组功率变换器,12路为副绕组功率变换器);
- 检测轴向及径向的 x 、 y 方向转子位移;
- 检测转子位置,以实现换相运行及转速计算;
- 检测主绕组三相电流, x 轴副绕组三相电流, y 轴副绕组三相电流;
- 检测母线电压、主绕组相电压等;
- 故障信号反馈及保护输出;
- 读键盘值及显示等。

以上这些任务,如果都由一个DSP来完成,除了PWM输出引脚和A/D采样的资源明显不足之外,DSP在进行运算的同时,还要兼顾系统控制和数据输入、输出,并频繁地响应中断,这样必然会降低系统运行的效率,而且对悬浮力调节的实时性也达不到。因此,设计了用一个DSP主要进行旋转控制,另一个DSP作为悬浮控制的双DSP系统,2块DSP利用双口RAM进行实时数据交换。另外,每个DSP还有一个片外的单口RAM用来扩展程序存储空间。DSP与存储器之间用复杂可编程逻辑器件(CPLD)进行逻辑处理。系统总体结构如图4所示。

系统选择的DSP是TMS320LF2407A,它是美国TI公司1997年推出的一款适合于工业控制,尤其适用于电机控制的DSP芯片。该芯片的设计基于增强的哈佛结构,指令执行速度是30 MIPS,具有16位地址总线和16位数据总线,寻址范围高达64 K。此外,它还专门为电动机控制提供了一些独特的资源,如12路比较/PWM通道、双10位模数转换器(ADC)、可编程的死区控制单元、可编程的空间PWM控制方式、4个捕获单元(其中2个有正交编码器脉冲接口功能)、串行外设接口(SPI)、串行通信接口(SCI)等^[11-12]。

在控制器系统中,选择双口RAM CY7C026AV完成2个DSP之间的数据交换。CY7C026AV是CYPRESS公司生产的一种低功耗CMOS 16 K×16高速双口静态RAM,存取速度小于25 ns。它的2个端口具有独立、对称的控制信号线、地址线和数据线,允许2个CPU同时对存储器进行访问。但是,当2个CPU同时向一个地址单元中写数,或一个CPU向某一地址单元写数,而另一个CPU同时读该地址时,就会出现数据读写错误。为了避免这种冲突的发

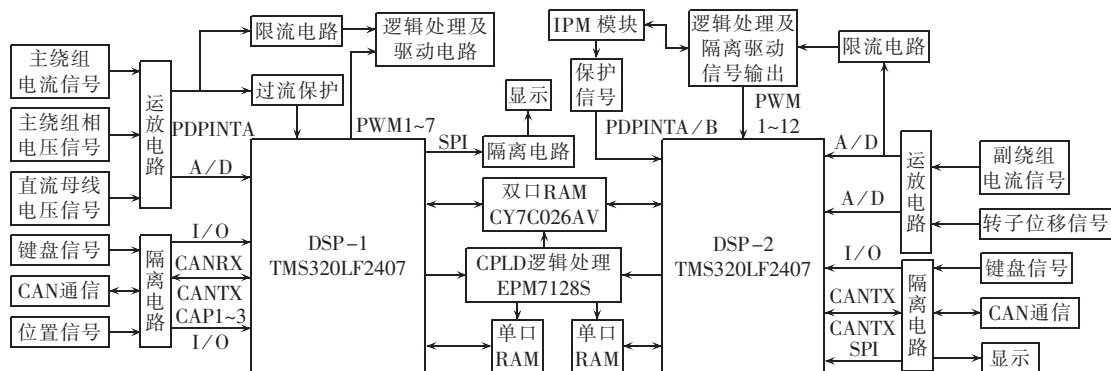


图 4 基于双 DSP 的磁浮开关磁阻电机控制器结构

Fig.4 Structure of double DSP digital controller for magnetic suspending SRM

生, CY7C026AV 提供了 3 种防冲突方式, 即插入等待状态方式、旗语操作方式和信箱中断方式。在 3 种工作方式中, 插入等待状态方式对于高速接口而言会影响数据的传送速率, 而且要求 CPU 具有插入等待状态的功能。旗语方式主要用于 2 个 CPU 共享存储空间时。在磁浮开关磁阻电机控制系统中, 双口 RAM 主要用于 2 个 CPU 之间交换数据, 如果采用前面 2 种方式, 交换的实时性很难用软件保证, 而中断方式则正好解决了这个问题。于是, 采用信箱中断的方式, 即 DSP1 在双口 RAM 中事先约定地址空间写入数据后, 再写 DSP2 的信箱; DSP2 根据中断及时从双口 RAM 中约定的地址空间读取数据^[13-14]。

CY7C026AV 与 2 个 DSP 芯片 TMS320LF2407A 及 CPLD 之间的接口电路如图 5 所示。

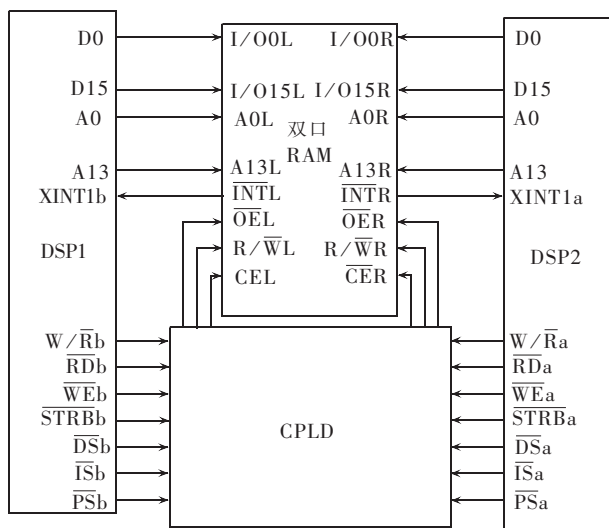


图 5 双 DSP、双口 RAM 与 CPLD 的硬件连接框图

Fig.5 Connections among DSPs, dual-port RAM and CPLD

其中, TMS320LF2407A 的数据线宽度为 16 位, 与 CY7C026AV 的数据线宽度恰好相同, 因此芯片之间的数据总线可直接相连。同时, TMS320LF2407A 的地址线为 16 位, 而 CY7C026AV 的地址线为 13 根, 则取 DSP 的低 13 根地址线与之相连, 双口 RAM 的 16 K 存储空间全部作为共享数据存储区, 相应分配的地址空间为 8000 H-BFFF H。

为了使整个系统中的 DSP、双口 RAM、SARAM 之间协调运行, 系统的逻辑控制选用 CPLD 实现。CPLD 选用 Altera 公司的 EMP7128S 芯片, 并采用 Altera 公司软件 Max+Plus II 进行仿真、综合和下载, 对 CPLD 的编程采用 VHDL 语言。CPLD 可以根据 DSP 的读、写数据存储器的地址范围, 输出对双口 RAM 的片选、读/写及输出使能控制信号。同时, 中断引脚 $\overline{\text{INT}}$ 接至 DSP 的 XINT1 引脚, $\overline{\text{BUSY}}$ 引脚经开关接至 DSP 的 READY 引脚, 便于产生中断和灵活控制。

2.4 驱动、采样和保护电路

控制系统的驱动电路采用基于光耦器件的隔离驱动电路, 既能正确、及时地传递信号, 又起到隔离保护作用。电流采样及预处理电路包括电流互感器和放大电路, 用于将线圈电流转化为可以被 DSP 芯片模数转换模块处理的电压信号。位置和位移采样及预处理电路包括光电位置传感器、位移传感器和放大电路, 将位置、位移信号转化成 DSP 芯片模数转换模块所能处理的电压信号。除此之外, 实际电路还采取了硬件保护。当检测到故障信号时, 封锁功率开关的驱动信号, 并通知 DSP 主控单元, 起到快速保护系统的作用。

3 控制器的实现

所设计的控制器由散热器、主绕组功率电路(包括整流模块、滤波电路、电阻-接触器并联网络及功率变换器)、副绕组功率电路(包括整流模块、滤波电路、电阻-接触器并联网络及双 IPM 模块)、主绕组功率变换器驱动电路与开关电源、副绕组功率变换器驱动电路与开关电源及基于双 DSP 的控制板组成。

控制器分 4 层, 第 1 层为基于双 DSP 的控制板, 第 2 层为副绕组功率电路电源、双 IPM 功率模块的隔离驱动电路及开关电源, 第 3 层为主绕组功率电路电源及其功率变换器驱动电路、开关电源, 第 4 层为散热器, 其上布置有 IPM 模块、IGBT 等功率元件。

4 硬件测试

悬浮与旋转控制过程中, 系统要将位移外环调节后的输出作为电流内环的给定, 并使电流环的输出能很好地跟踪电流给定。为了验证电流滞环控制

对给定电流的跟踪性能,用信号发生器产生电流环的给定信号,使电流环的输出跟踪给定信号。给定信号分别选三角波和正弦波,流程图见图 6。图 7(a)为跟踪三角波时的电流响应,其中下面的波形是给定三角波,幅值为 200 mV,上面的波形是电流响应波形。图 7(b)为跟踪正弦波时的电流响应,其中下面的波形是给定正弦波,幅值为 200 mV,上面的波形是电流响应波形。从实验结果可以看出,滞环控制的电流闭环可以很好地跟踪给定信号。

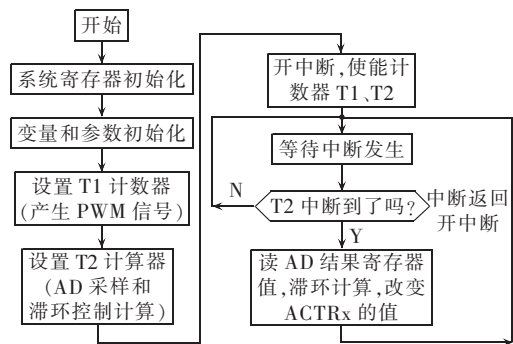
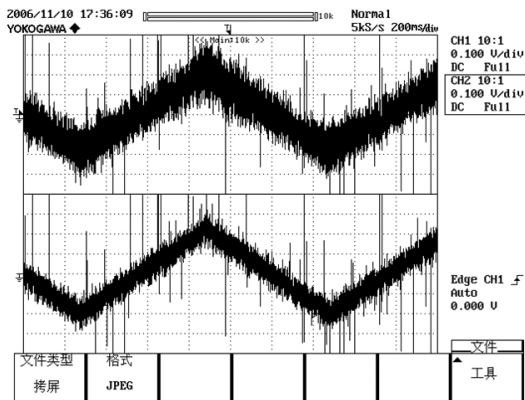
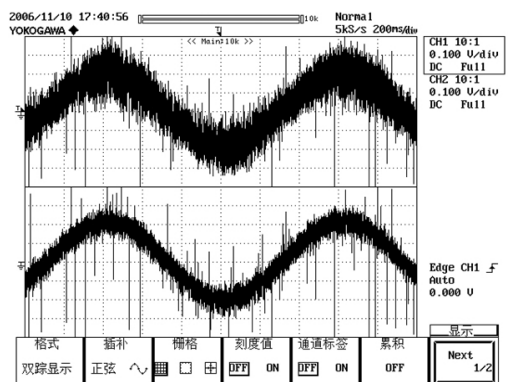


图 6 滞环控制子程序

Fig.6 Flowchart of hysteretic band control



(a) 跟踪三角波



(b) 跟踪正弦波

图 7 实验波形

Fig.7 Experimental results

2 个 DSP 之间通过双口 RAM 完成数据通信,协调工作是磁悬浮电机控制的关键。为了考察 3 个芯片的协调工作能力,令 DSP1 对 2 套磁悬浮控制绕组中的电流进行 A/D 采样,并根据采样结果和 2 个电流给定相差,利用 PI 控制算法,分别计算出各自的 PWM

控制信号占空比。将计算所得 2 个占空比数值写入双口 RAM 的指定地址空间,并写 DSP 2 的信箱,产生 DSP 2 的外部中断。DSP 2 响应中断,并在中断程序中从指定的双口 RAM 地址空间读取计算结果,用这个结果设置 DSP 2 的 2 个比较控制寄存器,通过 DSP 2 最终实现对 2 套悬控制绕组中的电流控制^[15-16]。图 8 为实验系统的结构示意图。实验程序中对双口 RAM 中指定地址的读、写操作是利用 C 语言的指针命令完成的。图 9 为 2 个 DSP 的程序流程图。

当使其中一个电流环给定为常数,而另一个电流闭环给定变化时,得图 10 所示电流响应结果。其

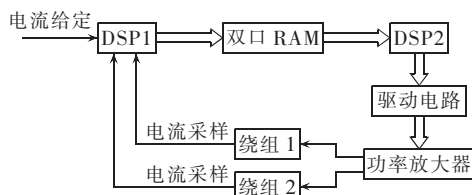


图 8 实验系统结构框图

Fig.8 Structure of experimental system

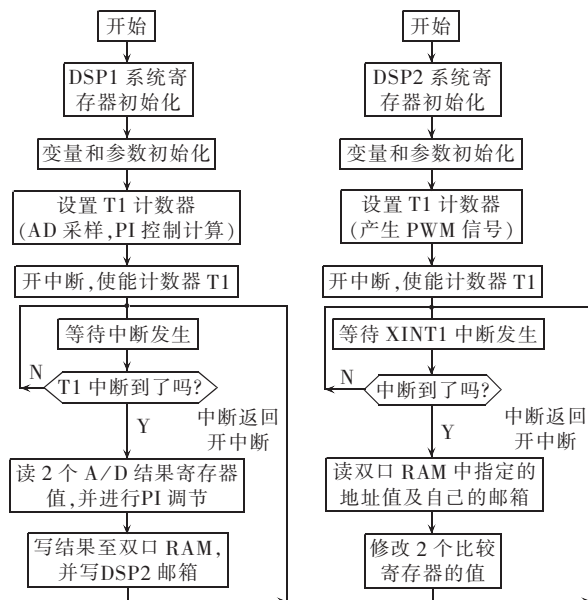


图 9 程序流程图

Fig.9 Flowchart of program

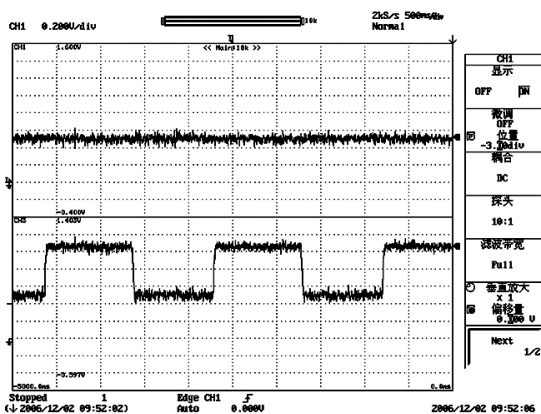


图 10 采样电阻上的电压波形图

Fig.10 Voltage waveform of sampling resistor

中,上边的曲线对应常数电流环给定(3 mA),下边的曲线对应给定变化时的电流响应(在 2 个常数间切换,切换频率为 1 kHz,2 个常数分别为 2.5 mA 和 1.5 mA)。可见,双 DSP 系统有效地完成了协调运行,不但运行稳定,且控制的精度较高。

5 结论

介绍了以 2 片 TMS320LF2407A DSP 芯片为核心的全数字控制器的设计,并通过电流滞环跟踪实验和 2 个 DSP 共同构成的电流闭环实验,证明了基于双 DSP 的控制器具有优良运行性能,为磁悬浮开关磁阻电机的悬浮、旋转控制奠定了硬件条件。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] TAKEMOTO M,CHIBA A,FUKAO T. A new control method of bearingless switched reluctance motors using square-wave currents[C]//Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 375-380.
- [3] TAKEMOTO M,SUZUKI H,CHIBA A,et al. Improved analysis of a bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37(1): 26-34.
- [4] TAKEMOTO M,CHIBA A,FUKAO T. A method of determining advanced angle of square-wave currents in a bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37(6): 1709-1720.
- [5] TAKEMOTO M,CHIBA A,FUKAO T. Radial force and torque of a bearingless switched reluctance motor operating in a region of magnetic saturation[C]//Industry Application Conference, 37th IAS Annual Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 35-42.
- [6] 杨钢,邓智泉,张媛,等. 无轴承开关磁阻电机实验平台的设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 97-103.
YANG Gang, DENG Zhi-quan, ZHANG Yuan, et al. The design and realization of experiment platform of a bearingless switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 97-103.
- [7] 邓智泉,杨钢,张媛,等. 一种新型无轴承开关磁阻电机数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 139-146.
- [8] LIU Guo-hai, SUN Yu-kun, SHEN Yue, et al. Dynamic decoupling control of bearingless switched reluctance motors based on neural network inverse system[C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China: World Pub Corp, 2005: 1811-1815.
- [9] 张亮,孙玉坤. 基于微分几何的磁悬浮开关磁阻电机径向力的变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 121-126.
ZHANG Liang, SUN Yu-kun. Variable-structure control of bearingless switched reluctance motors based on differential geometry[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 121-126.
- [10] 王宝国,王凤翔. 磁悬浮无轴承电机悬浮力绕组励磁及控制方式分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 105-108.
WANG Bao-guo, WANG Feng-xiang. Excitation and control analysis of levitation force winding for magnetic suspension bearingless motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 105-108.
- [11] 刘和平,严利平,刘学锋,等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.
- [12] 张雄伟,陈亮,徐光辉. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [13] 孙爱东,金宁德,赵鑫. 基于双口 RAM 的数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2006, 29(2): 90-94.
SUN Ai-dong, JIN Ning-de, ZHAO Xin. Design of data acquisition system based on dual-port RAM[J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(2): 90-94.
- [14] 黄正谨. CPLD 系统设计技术入门与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [15] 王晓明,王玲. 电动机的 DSP 控制—TI 公司 DSP 应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.
- [16] 陶永华,尹恰欣,葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

赵楠(1981-),女,辽宁辽阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: zhaonanlover@sina.com);

葛宝明(1971-),男,山西五寨人,教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动。

Dual-DSP digital controller of magnetic suspending switched reluctance motor

ZHAO Nan, GE Bao-ming

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To meet the requirements of magnetic suspending SRM(Switched Reluctance Motor) for the hardware resource and real-time performance of controller, a digital controller is designed based on two DSPs and dual-port RAM. DSPs provide PWM signals to power inverters, and the dual-port RAM is used to realize real-time data sharing between two DSPs. One power inverter for rotation control applies non-symmetrical semi-bridge structure, and two power inverters for suspension control adopt two IPMs. Three power inverters are all controlled by two DSPs. The prototype is made and tested, and the experimental results verify the cooperative work and real-time data exchange of two DSPs for effective control of magnetic suspending SRM.

This project is supported by the Ministry of Science and Technology Research Project(2004104051) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20060004027) and the Delta S&T Educational Development Program(DREG2005006).

Key words: magnetic suspension technique; switched reluctance motor; digital control