

基于 ARM 的开关磁阻电动机控制系统设计

常智¹,周婧¹,孔飞²

(1.北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100083;

2.大唐移动通信设备有限公司,北京 100083)

摘要:介绍一种小功率开关磁阻电动机控制系统的设计原理、实现方法和软、硬件构成。该系统基于高性能 32 位微控制器 AT91M55800A,集成了功率变换、电机转子位置检测、相电流检测、电机转速控制和操作显示。

关键词:开关磁阻电动机 滑模变结构控制 ARM AT91M55800A PWM

开关磁阻电动机 SRM 具有结构简单、调速范围宽、启动转矩大、效率高以及可方便实现四象限运行等优点。开关磁阻电动机调速系统 SRD 集开关磁阻电动机 SRM 与现代电力电子技术、控制技术于一体,兼有异步电动机变频调速系统和直流电动机调速系统的优点^[1]。目前,已应用于工业、家电、交通、纺织、航天等领域。

传统的 SRD 系统多以单片机或数字信号处理器 DSP 为主控芯片。由于单片机系统响应速度慢,系统数据的采集、处理速度和系统算法的复杂程度受到限制;而 DSP 成本高,工业级产品少,不利于在 SRD 系统实际应用中推广。本文介绍的系统是以 Atmel 公司的工业级低成本 ARM7TDMI 产品 AT91M55800A 为主控芯片实现数字调节系统。AT91M55800A 响应速度快,具有丰富的 I/O 口和片上资源,能产生多路脉宽调制 PWM 输出,使系统硬件简单、调整方便;易于移植操作系统,简化了系统软件开发难度,提高了系统实时性能。

1 SRD 系统构成与实现

基于 AT91M55800A 的开关磁阻电机调速系统由开关磁阻电机(8/6 极结构)、功率变换器、位置检测器、电流检测器以及以 AT91M55800A 为核心的控制器组成,系统结构框图如图 1 所示。

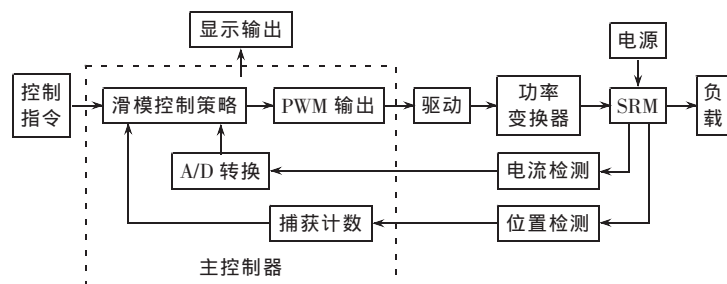


图 1 系统结构图

1.1 主控制器

本系统采用的控制器 AT91M55800A 具有如下特点^[2]:

(1)集成了 ARM7TDMI_ARM Thumb 处理器核,具有高性能的 32 位 RISC 体系结构,高代码密度的 16 位指令集和嵌入式 ICE;最高时钟频率 33MHz。

(2)8KB 片内 SRAM,32 位数据总线宽度,单时钟周期访问,完全可编程的外部总线接口,系统最大可扩展 64MB 存储器,可在单一存储器上建立操作系统和应用程序。

(3)片内集成 8 优先级向量中断控制器、3 个 USART、主从式 SPI 接口、6 通道 16 位定时/计数器(每个定时计数器都可以作为 PWM,便于控制电机)、实时时钟、8 通道 10 位 ADC 及 2 通道 10 位 DAC 等系统资源;

AT91M55800A 丰富的片内外资源和较高的性价比特别适于作开关磁阻电动机控制系统的微控制器。图 1 中虚线框内的部分即为 AT91M55800A 构成的开关磁阻电机调速系统主控制器的主要功能。图 2 是主控制器的硬件结构。主控制器完成 SRD 系统的所有控制调节算法,包括电流、转速控制,电机启动、换相等全部由软件控制,控制器直接输出 PWM 控制信号,经 MOSFET 驱动电路后控制功率变换器,以使电机转速和相电流达到系统要求。同时,主控制器还提供丰富的外围接口,以方便系统的应用与调试。

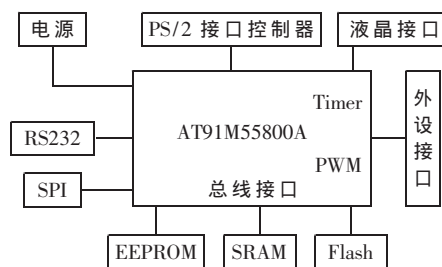


图 2 主控制器结构

1.2 功率变换器及其驱动

SRM 功率变换器设计的两个关键问题是:(1)SRM 功率变换器的结构设计;(2)主开关器件的选择及器件

定额的估算。

由于本系统是小功率 SRM 控制系统,为了体现典型 SRD 运行和控制特性以及相控独立性,主电路采用不对称半桥电路。这种电路结构不但可以避免常规变频器中上、下桥臂直通的故障隐患,而且也使得各相绕组在电气上保持独立,控制策略相对简单。为简化驱动电路,降低系统成本,主开关器件采用功率 MOS 场效应管 MOSFET。MOSFET 是一种单极型的电压控制器件,具有驱动电路简单、开关速度快、无二次击穿问题、安全工作区宽等优点。系统控制的 SRM 为 750W,额定电压 24V,采用蓄电池供电,因此 MOSFET 的 V_{DS} 至少为 30V, I_D 至少为 32A。为保留一定余度,系统选用 IRF1010,其导通电阻小,栅源电压和栅极电流远高于额定值,完全可保证系统正常运转。

图 3 是功率变换器中的主电路及驱动电路原理图。其中以 IR2110 为核心的电路构成主开关 Q1、Q2 的驱动电路。IR2110 是大功率 MOSFET 和 IGBT 专用驱动集成电路。IR2110 内部应用自举技术实现同一集成电路可同时输出同一桥臂上高压侧与低压侧的两个通道信号,使其特别适合于串联方式连接的高压 N 沟道功率 MOSFET 或 IGBT 的驱动。本系统所设计的不对称半桥电路,就属于这种连接方式,因而采用 IR2110 作为驱动芯片非常合适。

IR2110 本身不具有逻辑信号与功率信号的隔离功能,因而需要在输入控制信号和 IR2110 之间加入光耦隔离器件。由于控制信号开关频率较高,要求光耦器件有良好的跟随性,一般需选用快速光耦,如 TLP521。

电机为 8/6 级结构,功率变换器的控制输入采用 PWM 方式,则控制器至少需要产生 4 路 PWM 控制信号;主控制器 AT91M55800A 片内集成 6 通道 16 位定时/计数器(每个定时计数器可以作为 PWM,便于控制电机),每通道可产生两路频率相同、占空比不同的 PWM 控制信号,因而可采用其中的四路专用于电机 PWM 控制。

1.3 电流、位置检测器

为检测系统的相电流,系统采用磁场平衡式霍尔电流传感器(LME 模块)作为电流检测元件,其最大的优点

是测量精度高,响应时间短,并能实现电气隔离检测。

电流检测电路如图 4 所示。平衡式霍尔电流传感器将各相电路的电流转换为电压输出,经电压跟随其低通滤波后,输入到由 MAX125 构成的四路同步采样 ADC 单元,转换为数字信号后通过系统总线直接送入主控制器。

考虑到系统可能受到的扰动,在电流采样之前,加入四阶 Butterworth 低通滤波器。电机额定转速为 2000r/min,则电流信号频率为 200Hz 左右,滤波器的截止频率设定为 2kHz。

位置检测器是系统的关键所在。控制器必须实时捕捉转子的位置信号,由定时器的计数值计算出转子速度,以控制电机的换相和转速。系统采用光敏式转子位置传感器检测转子的位置,它由光电开关和转盘组成。转盘固定在转子轴上,其齿、槽分布与转子相同;两个光电开关相隔 75° ,分别固定在电机的定子极中心线左右两侧 37.5° 处。随着转子的运动,在一个转子角周期 60° 内,两个光电开关将产生为 15° 相位差、占空比为 50% 的方波信号,它组合成四种不同的状态,分别代表电机四相绕组不同的参考位置。由于光电开关输出有一定的上升和下降沿,其输出需通过门电路整形后才能被主控制器捕捉采集。位置检测电路原理图如图 5 所示。

为产生换相信号,可将两个光电开关产生的信号进行异或运算,得到周期为转角 15° 的信号,送入主控制器的外部中断检测端口,即可作为电机换相的信号。利用信号的变化和分辨不同的信号组合就可以获得转子速度以及位置信息。在光电开关的实际安装过程中,人为地将两个光电开关之间的角度增加 $2^\circ \sim 3^\circ$,即可提前获得换相信号,使系统够获得更多的运算处理时间,提高系统的性能。

1.4 键盘输入、液晶显示

为增加系统的可操作性,降低开发难度,系统采用 PS/2 接口的标准键盘作为输入设备,设计一个微处理器按照 PS/2 协议专门处理与标准键盘通信,并将键值以外中断的方式传送给主控制器进行键值处理。

系统液晶显示采用微科思博公司生产的 VK72B 智能彩色液晶显示模块,配合背光电源、对比度调整电路

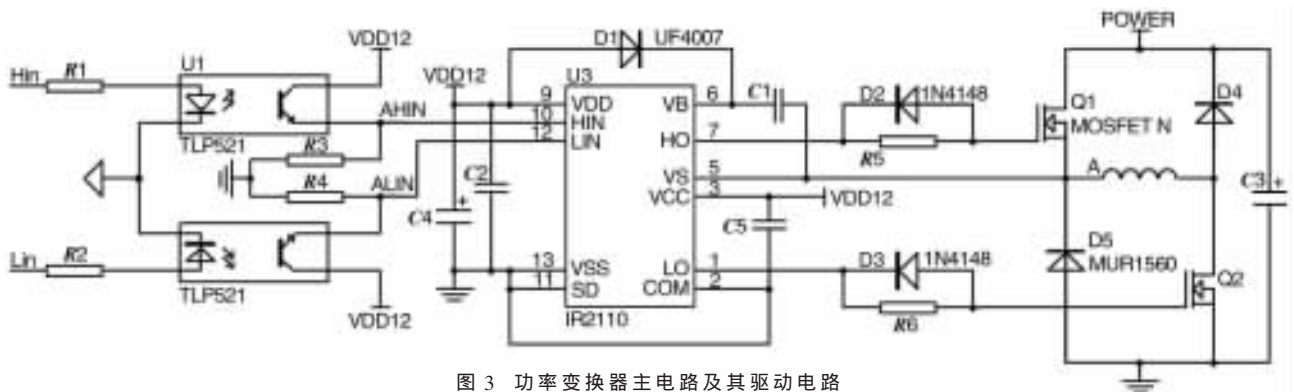


图 3 功率变换器主电路及其驱动电路

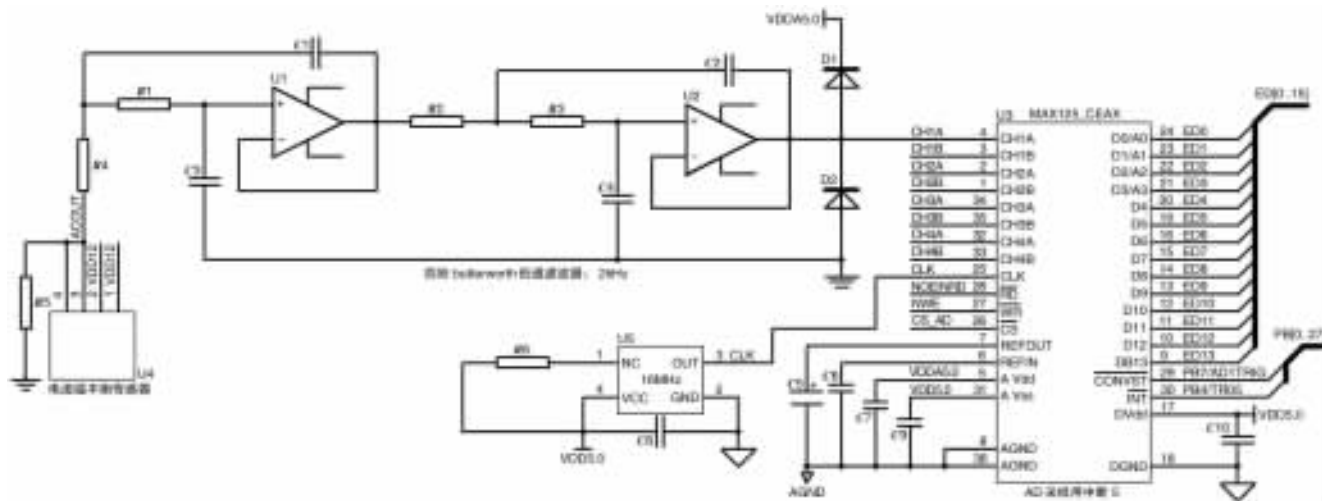


图 4 电流检测电路

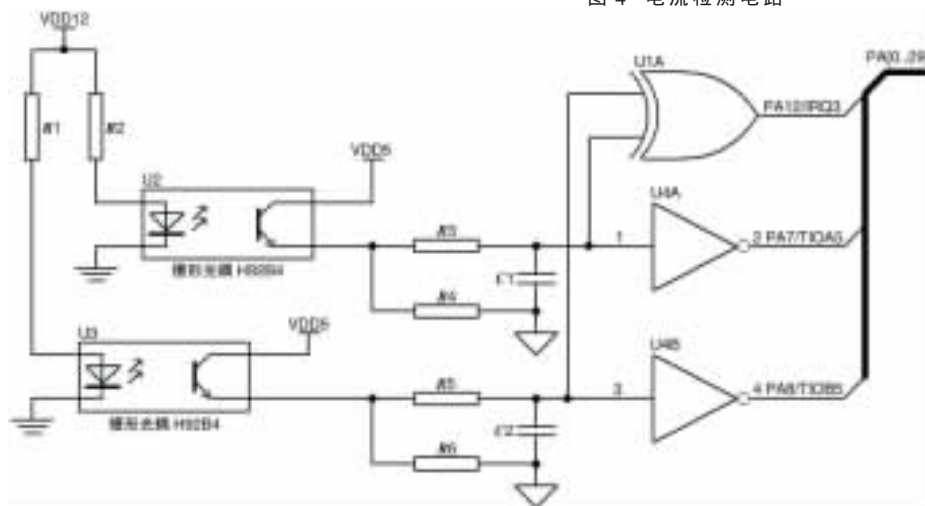


图 5 位置检测电路

等。该液晶模块自带 ASCII 二级字库，能控制 480×234 即 256 色 TFT 液晶显示，并提供并行总线控制接口。这既为系统提供了良好的控制界面，又提高了主控制器的工作效率，同时也降低了系统的设计开发难度。

2 软件设计

2.1 控制策略

分析 SRM 的固有机械特性可知，当电机运行在基速以下时，具有恒转矩特性；当电机运行在基速与第二临界转速之间时，具有恒功率特性；当电机运行于第二临界转速之上时，具有串励特性。

当 SRM 在低速工作特别是启动时，反电动势小，相电流上升快，为限制电流峰值，并取得恒转矩机械特性，系统必须采用电流斩波控制，即根据相电流的大小来控制相绕组两端的电压，以获得期望的电动特性；当 SRM 在基速之上时，旋转电动势较大，相电压导通时间较短，相电流较小。而随着转速的增大，转矩则以非线性的速度递减。为保证电机的恒功率特性，必须适当地对相电压开通和关断的时刻进行调整，这就需采用角度位置控

制方式，即根据电机实际转速与给定的差值，实时调整相电压开通和关断的时刻，以控制电机的转速与转矩。

综合以上分析，考虑到开关磁阻电机存在的转矩脉动和电机模型不精确等特点，系统可采用离散的滑模变结构控制律。滑模变结构控制方法在一定条件下可使系统的状态运动到适当选取的开关面，然后沿此开关面渐近运动到平衡点。系统一旦进入滑模运动，在一定条件下基本不受系

统参数变化的影响，并对外界干扰不敏感。开关磁阻电机利用滑模变结构的完全自适应性，只要选择合适的开关角，设计变结构控制律，就能降低电机转矩脉动，提高系统的鲁棒性。但变结构控制系统存在明显抖振。利用滑模稳定条件和李雅普诺夫稳定性来统一设计离散的变结构控制方法，可以在保持变结构控制优点的同时减弱系统的抖振^[4]。

系统通过定时器信号捕获单元对电机位置信号计数，计算出电机实际转速，利用其与速度设定值的差值，通过离散滑模变结构控制律，计算出系统的下一步控制输出量。但考虑到电机低速运转时的特点，系统引入相电流反馈，根据当前控制相的电流大小，对系统下一步控制输出量进行修正。最后将得到的系统输出量转换成相应的 PWM 输出占空比进行输出，从而完成电机的转速控制。

2.2 系统软件

针对系统的实时性要求、控制律的复杂性和硬件平台的特点，系统引入实时操作系统 $\mu\text{c}/\text{OS-II}$ 以提高整体性能。 $\mu\text{c}/\text{OS-II}$ 是源码开放的占先式实时内核，目前广泛应用于不同架构的微处理器上^[3]。采用基于操作系统的

(下转第 71 页)

(上接第 52 页)

软件平台,使得软件系统结构清晰、模块功能独立,便于维护和修改,最主要的是使高优先级的任务最先得到运行。

系统软件分为操作系统和应用程序两部分。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统内核主要完成对任务的管理和调度;应用程序主要完成系统的具体功能。根据磁阻电机的控制要求,应用程序分为六个任务:键盘输入、液晶显示任务、电流信号 A/D 采集、速度计算、电机相位切换、电机控制律。根据各个任务的重要性和实时性,给每个任务分配惟一的优先级,系统对任务的调度将使优先级最高的就绪任务处于运行状态。另外,系统还有 4 个中断程序:(1)100 μs 系统时钟节拍中断,其优先级最高;(2)转子位置检测脉冲中断,由定时器/计数器捕捉单元实现,用于转子位置状态信息更新和为转子速度计算提供时间基准;(3)电流信号采样结束中断,用于读入转换好的相电流值;(4)外部键盘输入中断处理程序,用于读入键盘输入键值。系统软件结构如图 6 所示。

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统首先屏蔽所有中断,调用系统初始化函数对系统硬件、软件初始化,接着调用 OSInit()函数对操作系统运行的环境进行初始化,即对系统的所有全局变量和数据结构进行初始化,同时创建空闲任务 OSTaskIdle,并赋之以最低的优先级和永远的就绪状态;然后系统根据功能要求调用 OSTaskCreate()函数创建相应的任务,最后调用 OSStart()函数启动操作系统。操作系统取得控制权后将打开中断,根据优先级对各个任务实时调度、管理,以实现开关磁阻电机的转速、电流控制。

目前,随着人们对开关磁阻电机控制要求的不断提

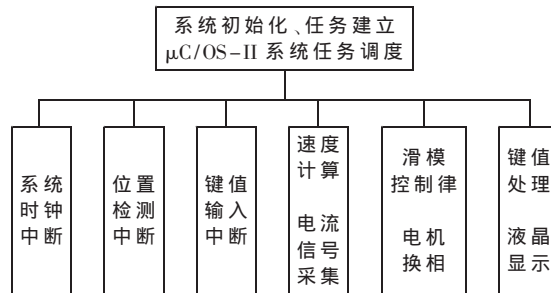


图 6 系统软件结构

高,开关磁阻电机控制系统的普及化与通用化是其发展的必然趋势。本文介绍的以 AT91M55800A 微控制器为核心的开关磁阻电机控制系统就是在这个发展潮流中的一次积极深入的探索。在此平台之上,本文还对开关磁阻电机的控制律和实时操作系统的应用进行了一定的研究,使得开关磁阻电机的控制更加可靠、高效和完善。

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,1995
- 2 马忠梅,徐英慧.AT91 系列 ARM 核微控制器结构与开发[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003
- 3 Labrosse J J 著,邵贝贝译.嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OSII}$ [M].北京:北京航空航天大学出版社,2003
- 4 Hulster D, Frederik, Kurt S. Advanced Nonlinear Modelling Techniques for Switched Reluctance Machines, Proceedings of the IASTED International Conference On Modelling, Simulation and Optimization, 2003

(收稿日期:2006-06-02)