

基于 DSP 的交流异步电动机矢量控制系统的嵌入式设计

张伟¹, 党存禄¹, 刘媛², 杨建¹

(1. 兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 山东建筑大学 信电学院, 山东 济南 250101)

摘要: 交流异步电动机矢量控制技术基于 DSP 的嵌入式定时解决方案。系统以控制交流异步电动机为主, 应用数字信号微处理器 DSP(TMS320LF2407A)对系统进行嵌入式设计, 将嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的抢占式多任务调度机理移植到 DSP 中。

关键词: 交流异步电动机 矢量控制 数字信号处理 嵌入式实时操作系统

交流异步电动机调速系统的矢量控制技术是上世纪 70 年代迅速发展起来的一种新型控制技术, 它通过矢量的坐标变换使交流异步电动机获得如同直流电动机一样良好的动静态调速特性。由于交流异步电动机是非线性、强耦合、多变量的时变参数系统, 对其进行控制较为复杂, 通过普通的单片机难以实现较好的实时性和快速性控制的效果。随着数字信号处理器(DSP)的推出, 全面数字化的交流调速系统发展十分迅速。TMS320LF2407A 是 TI 公司专为电机控制设计的高性能、低价位的定点 DSP 芯片, 以 16 位定点 CPU 为内核, 配置了较完备的外围设备, 形成了真正的单芯片控制器。为了有效管理多任务并满足系统的实时性要求, 需要使用嵌入式实时操作系统。 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 是一个源代码开放的实时操作系统, 具有可剥夺实时内核、可移植性强、多任务、执行时间可确定性等特点。

1 矢量控制系统的基本原理

交流异步电动机的矢量控制系统是按磁场定向的矢量控制系统。其基本思想是模拟直流电动机控制, 在遵循磁势和功率不变的原则下, 利用坐标变换将交流电动机的三相系统等效为直流电动机的两相系统, 经过按转子磁场定向的同步旋转变换, 实现对定子电流励磁分量和转矩分量之间的解耦, 从而达到分别控制交流异步电动机的磁链和转矩的目的。

1.1 矢量坐标变换

Clarke 变换是将三相平面坐标系 $OABC$ 向两相平面直角坐标系 $O\alpha\beta$ 的转换。其变换和逆变换矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Park 变换是将两相静止直角坐标系 $O\alpha\beta$ 向两相旋转直角坐标系 OMT 的转换。其变换和逆变换矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & -\sin\varphi_s \\ \sin\varphi_s & \cos\varphi_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_M \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & \sin\varphi_s \\ -\sin\varphi_s & \cos\varphi_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, φ_s 为 M 轴与 α 轴的夹角。

1.2 转子磁链位置的计算

交流异步电动机的转子机械转速不等于转子磁链转速, 因此, 不能通过位置传感器或速度传感器直接检测到交流异步电动机的转子磁链位置, 而需要在 OMT 坐标系中, 通过对电动机的电流模型得出:

$$i_M = \frac{L_r}{R_r} \frac{di_d}{dt} + i_d \quad (5)$$

$$F_S = \frac{d\theta}{dt} = n + \frac{i_T}{\frac{L_r}{R_r} i_d \omega_n} \quad (6)$$

进行离散化处理, 得到下式:

$$i_{d(K+1)} = i_{dK} + K_r(i_{MK} - i_{dK}) \quad (7)$$

$$F_{S(K+1)} = n_{K+1} + K_t \frac{i_{TK}}{i_{d(K+1)}} \quad (8)$$

$$\theta_{K+1} = \theta_K + K F_{S(K+1)} \quad (9)$$

式中, K 为常数 327.68。

由式(7)、(8)、(9)即可求出转子磁链的位置 θ 。

1.3 矢量控制系统分析

该系统是采用转速和电流双闭环控制的矢量控制

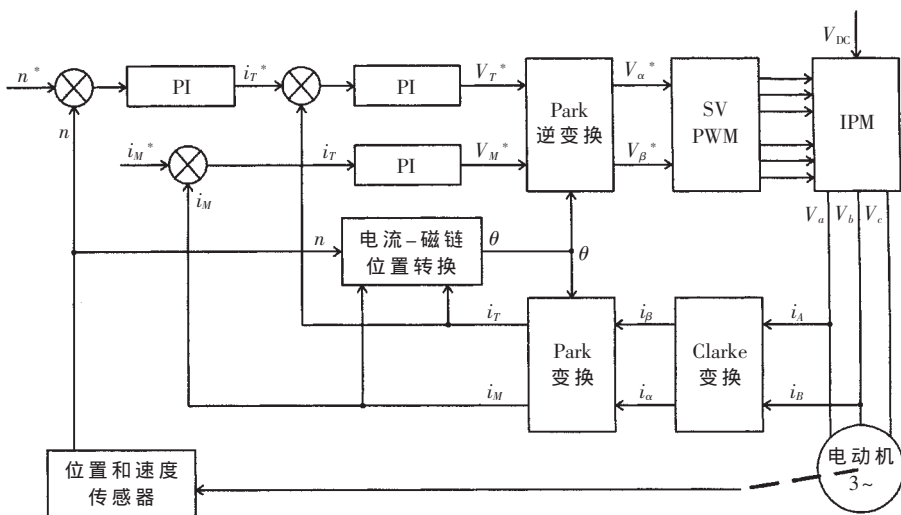


图1 交流异步电动机磁场定向矢量控制系统原理图

系统,原理图如图1所示。

通过霍尔传感器测量智能功率模块(IPM)输出的定子电流 i_A 、 i_B ，经过 DSP 的 A/D 转换器转换成数字量，并利用式 $i_C = -(i_A + i_B)$ 计算出 i_C 。通过 Clarke 变换和 Park 变换将电流 i_A 、 i_B 、 i_C 变换成旋转坐标系中的直流分量 i_M 、 i_T ， i_M 、 i_T 作为电流环的负反馈量。利用 1024 线的增量式编码器测量电动机的机械转角位移，并将其转换成转速 n 。转速 n 作为速度环的负反馈量。由于交流异步电动机的转子机械转速与转子磁链转速不同步，所以用电流-磁链位置转换模块求出转子磁链位置，用于参与 Park 变换和逆变换的计算。

给定转速 n^* 与转速反馈量 n 的偏差，经过速度 PI 调节器输出用于转矩控制的电流 T 轴参考分量 i_T^* 。 i_T^* 和 i_M^* (设为零值) 与电流反馈量 i_T 、 i_M 的偏差经过电流 PI 调节器，分别输出 M、T 旋转坐标系的相电压分量 V_M^* 、 V_T^* 。 V_M^* 、 V_T^* 再通过 Park 逆变换转换成 α 、 β 直角坐标系的定子相电压矢量的分量 V_α^* 、 V_β^* 。当定子相电压矢量的分量 V_α^* 、 V_β^* 和其所在的扇区数已知时，就可以利用电压空间矢量 SVPWM 技术，产生 PWM 控制信号来控制智能功率模块 6 个桥臂的通断。

以上过程可以采用软件实现，从而对交流异步电动机实施全数字实时控制。

2 系统的硬件设计

系统采用交-直-交电压源型变频电路，主电路由整流电路、滤波电路以及智能功率模块(IPM)逆变电路构成，控制电路以 DSP 芯片 TMS320LF2407A 为核心，辅以电流电压信号采集、速度检测、过压过流保护、人机接口

以及上位机通信等单元，从而构成功能齐全的全数字矢量控制系统。

该系统的参数由上位机通过 RS232 接口下传给下位机，DSP 负责采样各相电流、计算电动机的转速和位置，最后运用矢量控制算法得到电压空间矢量 SVPWM 控制信号，经过隔离光耦 HCPL4504，驱动逆变器功率开关器件；同时 DSP 还监控变频调速系统的运行状态，当系统出现短路、过流、过压、过热等故障时，DSP 将封锁 SVPWM 信号使电动机停机，并通过 LCD 进行显示。系统结构如图 2 所示。

下位机控制的核心芯片采用 TMS320LF2407A，其主频为 40MHz。关于该芯片的介绍，详见参考文献[3]。下面简述系统的主要硬件模块。

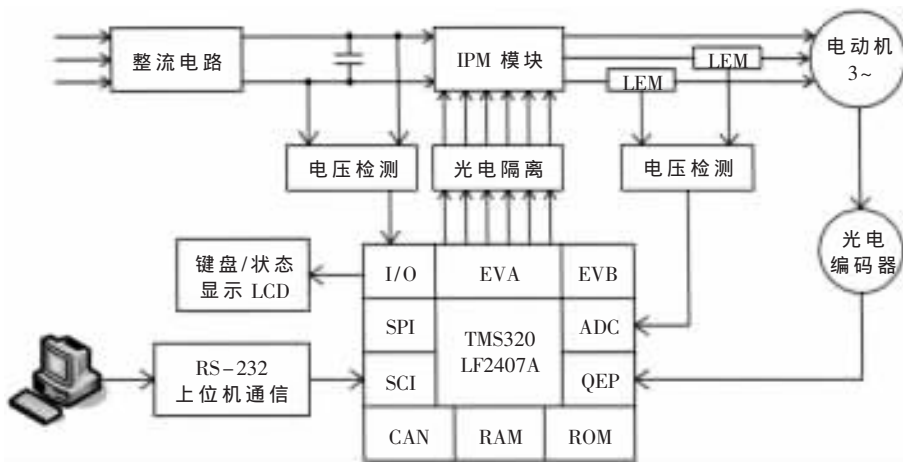


图2 系统结构图

2.1 智能功率模块 IPM

系统使用的 IPM 是三菱公司生产的 PM25RSA120。它由 7 个 IGBT 单元封装，额定电压为 1 200V，额定电流为 25A。IPM 与普通 IGBT 模块相比，在系统性能和可靠性上有进一步的提高，使设计和开发变得简单。由于 IPM 通态损耗和开关损耗都比较低，使得散热器尺寸减小，因而系统尺寸也减小。尤其是 IPM 集成了驱动和保护电路，使系统的硬件电路简单可靠，并提高了故障情况下的自保护能力。IPM 模块内置保护功能有：控制电源欠压锁定、过热保护、过流保护、短路保护。如果 IPM 模块中有一种保护电路动作，则 IGBT 栅驱动单元就会关断电流并输出一个故障信号。

2.2 电流信号采集模块

用 CSM025A 型号的磁平衡式霍尔电流传感器(简称 LEM)检测三相输出中的二相电流 i_A 、 i_B ，通过计算得出

第 3 相电流 $i_c = -(i_a + i_b)$, 从而获得实时的输出电流信号, 为矢量控制提供实时信号。因为 TMS320LF2407A 片内集成的模数转换模块 ADC 的输入必须为 0~3.3V, 所以应将 LEM 输出的电流信号通过采样电阻转换为符合要求的电压信号, 放大滤波后接 ADC 口。

2.3 转子位置检测模块

系统采用的增量式光电编码器每转可产生 1 024 个脉冲。其输出 A、B 信号线直接接入 DSP 的编码器接口 QEP1 和 QEP2 引脚。DSP 的正交编码器脉冲电路自动利用每个 A、B 信号脉冲的 4 个沿(2 个上升沿和 2 个下降沿)对输入信号 4 倍频, 这样就可以使每转得到 4 096 个脉冲, 提高了分辨率。此外, 还对电动机的运动方向进行判别, 由一个 16 位的计数器对脉冲信号计数, 并计算出当前时刻的转子位置角度。

2.4 人机接口模块

利用 DSP 的 I/O 口及中断方式, 管理点阵图形式 FYD12864-0402B 液晶显示器与 4 个按键, 实现菜单式人机交互。该模块可实现系统的参数设定、检测结果显示以及保护报警信号显示等功能。

3 系统软件设计

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 是一个内核很小的嵌入式实时操作系统, 整个代码可分为内核层和移植层, 从而更便于移植。它采用抢占式调度策略, 保证任务的实时性; 能够管理多达 64 个任务; 提供了邮箱、消息队列、信号量、内存管理、时间管理等系统服务。同时, 它又是一个开放源代码的操作系统, 使得该系统升级和日后的维护都非常方便。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的内核采用标准的 C 语言代码编写, 易于移植到各种微处理器上。

交流异步电动机矢量控制系统中的各种功能可以划分为不同优先级的任务, 通过实时操作系统实现对所有任务的调度管理, 解决在单任务中难以处理的实时性差的问题, 同时又可以增强系统工作的可靠性。

要将 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 应用于该系统, 必须先移植到 TMS320LF2407A 中。移植工作主要有以下几个部分: (1) 在 OS_CPU.H 中定义数据类型和开/关中断函数以屏蔽编译器和处理器; 定义堆栈的增长方向; 定义任务切换函数。(2) 在 OS-CPU.C 中, 用 C 嵌入汇编语言编写以下函数: OSTaskstkInit(), OSCtxSw(), OSStartHighRdy(), OSIntCtxSw(), OSTicksr(), OSTaskCreateHook(), OSTaskSwHook(), OSTaskDelHook(), OSTaskstatHook() 和 OSTimeTickHook()。任务的全部信息都保存在相对应的任务控制块和堆栈中, 因此任务的切换要处理任务控制块和堆栈。涉及任务控制块的工作是: (2) 保存被切换任务的堆栈指针到当前任务控制块; (2) 将当前任务控制块指向最高任务控制块; (3) 取出当前任务块存储的堆栈地址。

根据系统所要实现的功能, 可将整个系统划分为以下几个并行存在的任务: 信号采集、电动运行、再生制

动、状态显示。另外还设计了 2 个中断子程序, 用于实现 4 个按键的输入及智能功率模块 IPM 对短路、过流、过压、欠流、欠压等情况的保护功能。每个任务都分配了优先级和内存空间。任务越重要, 赋予的优先级应越高, 数值越小表示优先级越高。再生制动任务优先级设为最高, 因为该任务实时性最高, 若不能及时启动或过早结束均会对系统造成损害; 信号采集任务运行最频繁, 为其他任务提供可靠必需的参数, 故设其优先级为次高; 显示任务实现菜单和控制参数的显示, 人机交互, 对控制器性能没有直接影响, 优先级设为最低; 电动运行任务是常规状态, 优先级设为次低。该系统采用静态优先权, 即运行过程中任务优先权不变。各任务之间的通信通过信号量进行, 故应使 OS_SEM_EN=1。

在该嵌入式实时操作系统下编写的 DSP 软件流程非常简单易读, 其具体流程图如图 3 所示。

电动运行任务是系统中最主要的任务, 它接收邮箱或消息队列传递过来的消息, 实现控制算法的在线调节, 控制电机的加减速及匀速运行。其程序流程如图 4 所示。

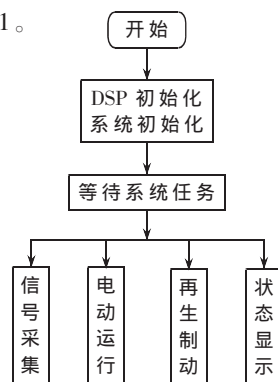


图 3 DSP 软件设计流程图

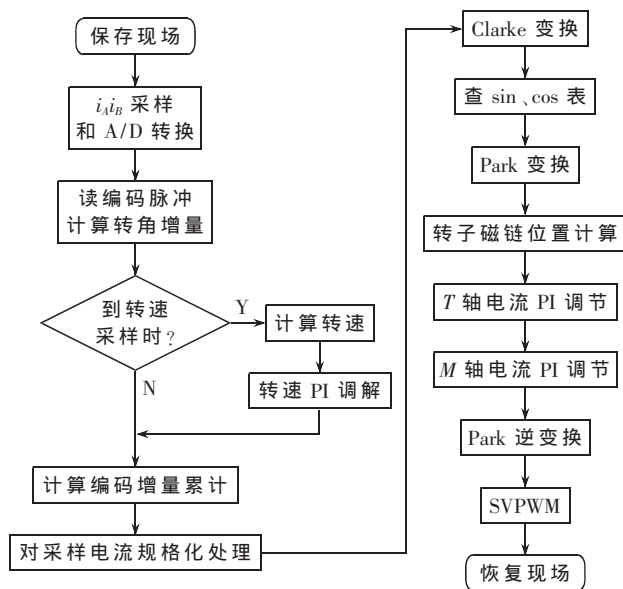


图 4 电动运行任务程序流程图

4 试验结果

系统的试验对象是一台鼠笼式交流异步电动机, 具体参数为: 额定功率 0.6kW、额定电流 2.75A、额定电压 220V、额定转速 1400r/min。分负载与空载两种情况做试验, 设定频率为 50Hz, 用数字示波器测量异步电机定子的相电流, 测量得到的相电流波形如图 5、图 6 所示。设定频率为 40Hz 时, 对从空载到负载的转速和相电流进

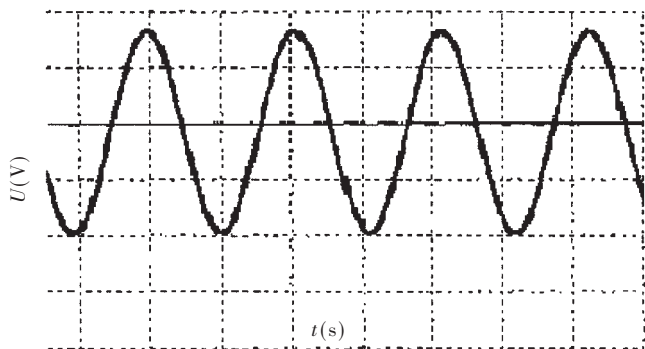


图5 空载设定频率为50Hz

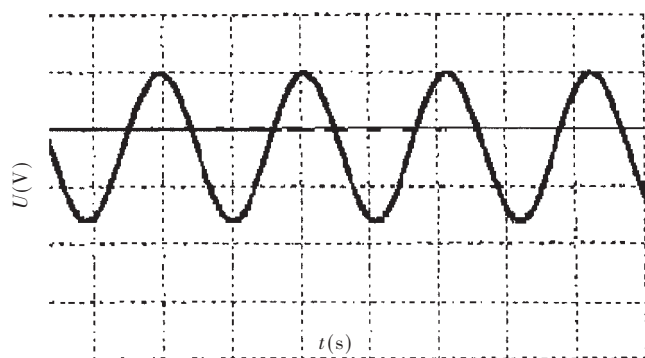


图6 负载设定频率为50Hz, 定子电流为2.5A

行观察, 波形如图7所示。

从示波器存储截图中可以看出, 在空载与负载的情况下, 调速范围宽、静差率小, 其性能优于一般的直流调速系统; 相电流几乎接近正弦波, 实现了恒转矩控制。当电动机的负载转矩突然增加时, 电动机的相电流和转速响应很快, 稳态误差接近4%。由此可见系统具有优良的动静态性能。

该系统给出了交流异步电动机矢量控制技术基于DSP的嵌入式实时解决方案。试验结果证明了交流调速

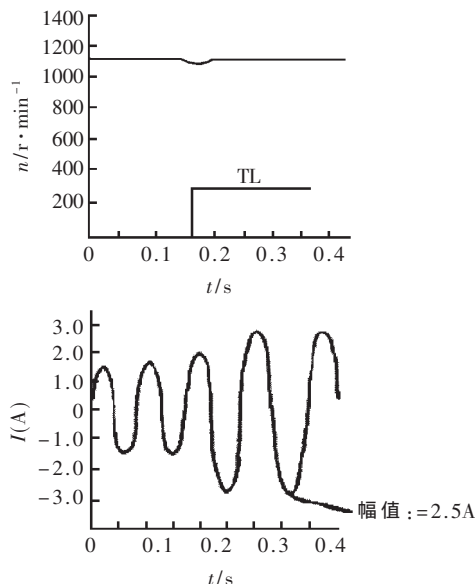


图7 负载突变的影响

系统在运用了矢量控制技术后, 具有动静态性能好、抗干扰能力强、保护功能完善等特点。此外, 将嵌入式实时操作系统移植到控制器中, 增强了系统的实时性及可靠性。

参考文献

- [1] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 马小亮. 大功率交-交变频调速及矢量控制技术(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 刘和平, 王维俊, 江渝等. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [4] Labrosse Jean J 著, 邵贝贝译. 嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS-II$ (第二版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] Texas Instruments. TMS320C2x/C2xx/C5x optimizing C compiler user's guide. 1999.

(收稿日期: 2006-11-04)