

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.10.022

基于 DSP 的永磁同步电机的矢量控制

张森, 石航飞, 陈志锦, 周旭, 杨凯
(中国兵器工业第五八研究所数控事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为实现永磁交流同步电机的位置控制, 提出一种基于 DSP2806 为控制器核心的位置控制方案。以 PMSM 矢量控制理论为基础, 详细介绍了其硬件组成及软件设计。试验结果表明: 该系统运行稳定可靠, 能有效实现电机的位置控制。

关键词: DSP2806; 矢量控制; PMSM
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DSP-Based Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control

Zhang Sen, Shi Hangfei, Chen Zhijin, Zhou Xu, Yang Kai
(Dept. of CNC Engineering, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to realize the position control of permanent magnet AC synchronous motor, the author put forwards a position control program based on the DSP2806. On the basis of PMSM vector control theory, introduces the design of hardware and software in detail. The results show that the program can efficiently realize the position control with stable running of the whole system.

Keywords: DSP2806; vector control; PMSM

0 引言

交流伺服控制系统由于其快速的转矩响应和高性能的工作能力, 在国民经济各部门以及军工、航天、航空等科技领域应用广泛, 因其伺服的对象种类甚多, 所以技术性能和经济性要求也较高。而矢量控制技术可以使交流电机获得等同于直流电机的优良的控制性能, 是实现伺服电机位置控制的比较成熟的技术。其中, 永磁交流同步电机由于体积小、结构简单、电机的效率及功率密度较高, 是一种性能很好的伺服电机, 因此笔者选其作为研究对象。

1 永磁同步电机的矢量分析

1.1 永磁同步电机简介

交流电机是一个非线性、强耦合的多变量系统。对于一般三相交流电机, 采用坐标变换, 将三相交流绕组等效为两相互垂直的交流绕组或旋转的两相直流绕组, 变换后系统变量之间互相解耦, 从而使系统分析和控制大为简化。

分析正弦波电流控制的调速永磁同步电机时, 最常用的方法是 $dq0$ 轴数学模型, 它不仅可用于分析正弦波永磁同步电机的稳态运行性能, 还可用于分析电机的瞬态性能。由交流同步电机的数学模型可以得到电磁转矩方程^[1]如下(式中各量为瞬态值):

$$M_e = \varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd} \quad (1)$$

永磁同步电机采用 $dq0$ 轴系转子磁链定向控制, 并使纵轴电流 $i_{sd} = 0$ 的电流矢量控制方法。 $i_{sd} = 0$ 时, 从电机端口看, 相当于一台他励直流电机, 定子电流中只有横轴分量, 且定子磁链空间矢量与永磁体磁链空间矢量正交。

$i_{sd} = 0$ 时, 电机电磁转矩与横轴电流分量成正比, 即

$$M_e = \varphi_f i_{sq} \quad (2)$$

根据电机方程所确定的电磁关系, 一定的转矩和转速对应于一定的 i_{sd} 和 i_{sq} , 通过对这两个电流的控制, 使实际的 i_{sd} 和 i_{sq} 跟踪相应的给定值, 实现了对电机转矩和转速的控制。这种电流矢量控制方法对电动机稳态运行和瞬态运行的控制都是适用的。而且由于位于 d 、 q 轴的电流分量相互正交, 使对转矩的控制和对磁场的控制实现了解耦, 便于实现各种先进的控制策略。

1.2 坐标系变换

为简化和求解同步电机的数学方程, 必须运用电机坐标变换理论对同步电机自然坐标轴系的基本方程进行线性变换, 从而实现电机数学模型的解耦。常用坐标变换有 Park 变换、Park 逆变换以及 Clark 变换。各坐标系之间的关系及 $dq0$ 轴系与 $\alpha\beta0$ 轴系关系分别如图 1、图 2。

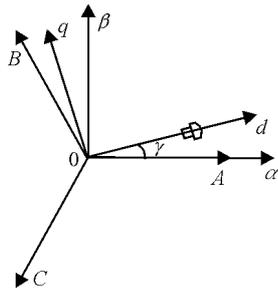


图 1 同步电机常用的各坐标系关系

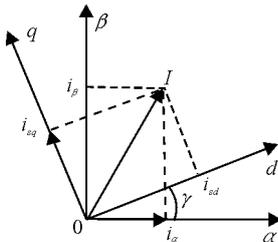


图 2 dq0 轴系与 alpha beta0 轴系关系图

从矢量合成的角度推导，一个旋转矢量可以从一个三相坐标系(ABC)变换到两相坐标系($\alpha\beta$)，此称为 Clark 变换。写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

而从 $\alpha\beta$ 轴系到 dq 轴系的坐标变换称为 Park 变换，反之为 Park 逆变换。由图 2 可以推导出如下的 Park 变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

同理可得 Park 逆变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

2 PMSM 矢量控制原理

矢量控制的目的是改善转矩控制性能，最终实施仍然落实到对定子电流或电压(交流量)的控制上。由于在定子侧的各个物理量，包括电压、电流、电动势、磁动势等都是交流量，其矢量在空间以同步转速旋转，调节、控制和计算都不太方便。因此，需要借助坐标变换，使得各个物理量从静止坐标系($\alpha\beta$ 轴系)转换到转子同步旋转坐标系(dq 轴系)，然后，在转子同步旋转坐标系上进行观察，电动机的各个空间矢量都变成了静止矢量，电流电压都成了直流量，可以根据转矩公式，找到转矩和被控矢量的各个分量之间的关系，实时计算出转矩控制所需要的被控矢量的各个分量值，即直流给定量。按照这些给定量进行实时控制，就可以达到直流电动机的控制性能。由于这些直流给定量在物理上是不存在的，是虚构的，因此，还必须再经过坐标的逆变换过程，从旋转坐标系回到静止坐标系，把上述的直流给定量变换成实际的交流给定量，在三相定子坐标系上对交流量进行控制，使其实际值等于给定值。

如图 3，永磁同步电机矢量控制系统由下面几部分组成：转子磁极位置检测和速度计算模块、速度环，电流环控制器、坐标变换模块、SVPWM 模块、整流和逆变模块。

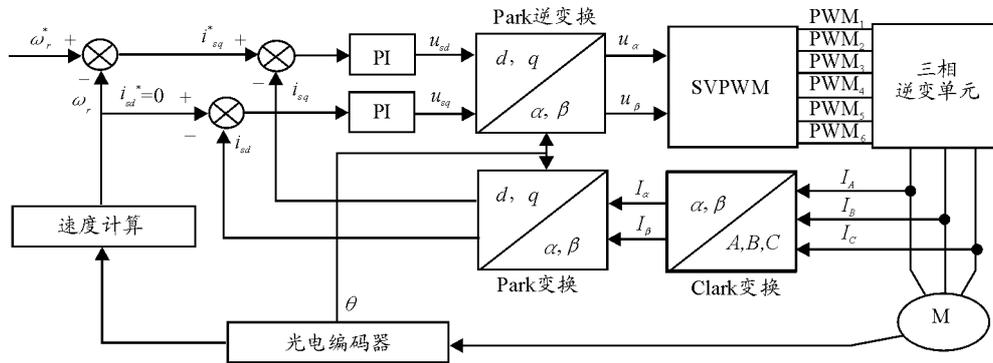


图 3 PMSM 矢量控制原理图

系统控制过程为：速度指令信号与检测到的转子速度反馈信号相比较，经速度控制器的调节，输出 i_{sq}^* 指令信号，作为 q 轴电流控制器给定信号， d 轴电流控制器的给定信号为零，采用 $i_{sd} = 0$ 控制策

略。电流采样得到的三相定子电流 I_A 、 I_B 、 I_C 通过 Clark 变换转化为 $\alpha\beta$ 坐标系两相电流 I_α 、 I_β 通过 Park 变换后，转化为 dq 旋转坐标系的电流值 i_{sd} 、 i_{sq} ，分别是 d 轴和 q 轴电流调节器的反馈输入。

轴和 q 轴电流的给定和反馈之间的偏差分别输入到 d 轴和 q 轴的电流控制器, 经过控制器的调节后输出电压 u_{sd} 、 u_{sq} , 再经过 Park 逆变换分别转化为 $\alpha\beta 0$ 坐标系轴电压 u_α 、 u_β , 然后调节 SVPWM 模块, 输出六路 PWM 信号驱动 IGBT 产生频率和幅值可变的三相正弦电流输入电机。

按转子磁链定向电机矢量控制系统需要提供电机转子的位置信号 θ 或速度信号 ω 。目前的系统一般使用光电编码器来得到转子磁极位置信息和速度信息。对于永磁同步电机, 由 $i_s = i_{sd} + ji_{sq}$ 知, i_s 的

大小和相位只取决于 i_{sd} 和 i_{sq} 。即矢量控制是通过对两个电流分量的分别控制来实现的。

3 硬件组成及实现

3.1 位置控制系统

永磁同步电机的位置控制系统, 是一个包含电流环、速度环以及位置环的三闭环复杂控制系统, 其控制方框图如图 4。系统硬件平台主要由主电路、控制电路和保护电路组成。系统采用了电流采样电阻、光电编码器等传感器件。系统以 32 位定点 DSP 芯片 TMS320F2806 作为核心处理器。

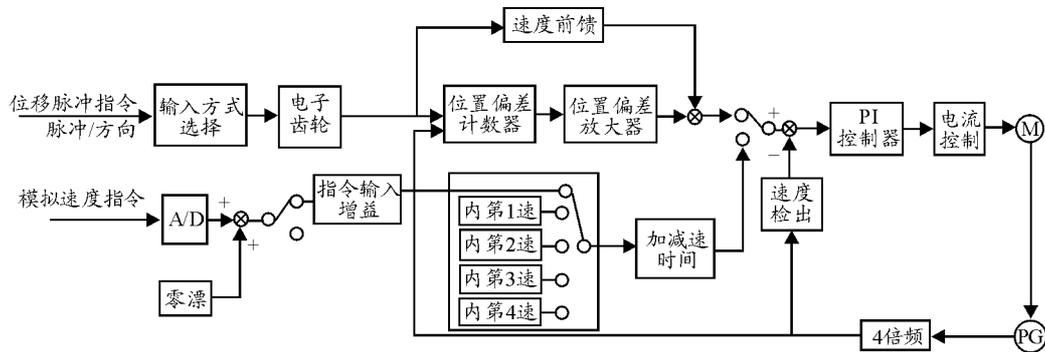


图 4 电机控制系统方框图

3.2 控制电路组成

TI 公司的 32 位定点 DSP 芯片 TMS320F2806, 具有很强的数字信号处理能力, 以及强大的事件管理能力和嵌入式控制功能, 特别适用于有大量数据处理的测控场合。DSP2806 通过接收外围电路送来的电流、转速和位置信号来实现对永磁同步电机的闭环控制。通过电机当前的电流、速度以及位置结合外部位置或速度命令, 最后将计算所得到的 PWM 波形送出给 IPM 驱动模块。控制电路框图如图 5。

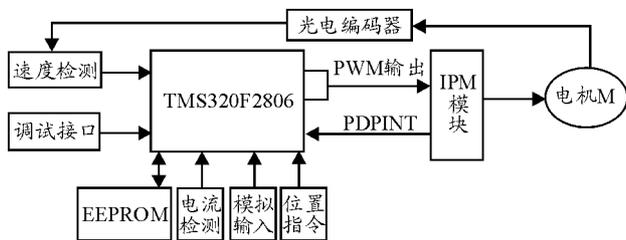


图 5 硬件组成电路

硬件电路主要由 DSP2806、IPM 模块、电流及母线电压检测电路、保护电路、整流滤波电路以及调试接口等组成, 考虑到硬件成本, 设计中未使用 FPGA 模块。

4 系统软件设计

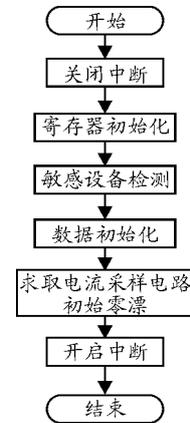


图 6 初始化程序

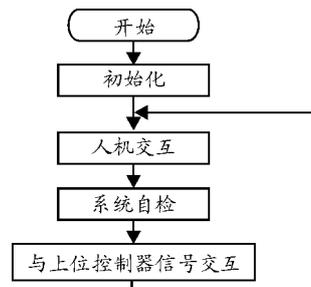


图 7 主程序

系统软件主要实现了对电机的控制、人机界面

以及系统自诊断等功能。控制程序分初始化程序，主程序，中断服务子程序模块。初始化程序是系统上电后最先执行的程序段，该段程序的主要功能是完成对系统的初始设置。主程序是系统完成初始化后，进入工作后状态永久执行的死循环。控制系统的中断共有以下几种：定时器下溢中断、编码器 Z 脉冲捕获中断、外部保护中断。

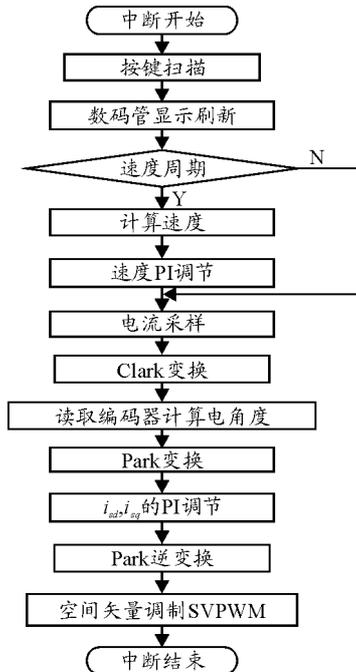


图 8 定时器下溢中断服务子程

定时器中断服务子程序是系统的核心部分。定时器的定时周期即为系统的控制周期。该子

(上接第 57 页)

因此，反舰导弹末制导雷达不可能在绝对隐蔽的状态中工作，但仍然可以通过改进末制导雷达的性能来降低末制导雷达被侦察概率，提高干扰条件下末制导雷达的效能。在干扰条件下计算反舰导弹末制导雷达效能参数远没有这么简单。例如当敌实施模拟式干扰时，产生的干扰特征在时域、空域和能量域上，都与反舰导弹末制导雷达的有用信号特征非常相似。反舰导弹末制导雷达在这种干扰环境下工作，其工作能力虽然不会遭到破坏，但有可能将反舰导弹欺骗(牵引)到错误的方向上去，可能会导致反舰导弹完全失效。一般情况下，在敌方施放模拟式干扰条件下，反舰导弹末制导雷达的使用效能不仅取决于己方兵力设备的构成和特性，而且还取决于敌方兵力设备的构成和特性，当然也与环境等其他因素有关系。

参考文献:

[1] 刘隆和, 曲爱华. 海军战术导弹抗干扰技术基础[M].

程序实现的是对电机的实时控制。外部保护中断主要针对智能功率模块 IPM。IPM 的报警信号接入 DSP 芯片的 PDPINT 引脚，当 IPM 报警后会在该引脚上产生一个边沿跳变，从而触发中断。该中断的作用主要是为了保护智能功率模块 IPM。系统软件实现流程如图 6~图 8。

5 结束语

实验结果表明：系统运行稳定可靠，证明该方案能有效地实现永磁同步电机的位置控制。随着电机控制技术的不断成熟与发展，将进一步提高对电机的控制性能。

参考文献:

[1] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
 [2] 王莉, 彭小兵, 严仰光. 基于TMS320F240的PMSM矢量控制系统的实现[J]. 电气自动化, 2005(3): 12-13.
 [3] 杨凯. 交流永磁同步电机低速控制研究[D]. 绵阳: 中国兵器工业第五八研究所, 2011.
 [4] 赵葵银, 吴俊, 崔海波. 基于DSP的全数字交流位置伺服控制系统[J]. 伺服技术, 2002: 23-24.
 [5] 秦忆. 现代交流伺服系统[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
 [6] 郭庆鼎, 王成元. 交流伺服系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
 [7] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
 [8] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987: 14-16.
 [9] 黄洪旭, 张居泉, 徐晖. 雷达抗干扰能力评估的现状设想[J]. 航天电子对抗, 2001(1): 25-28.
 [10] 张远新, 江言林. 反舰导弹抗干扰技术发展和运用[J]. 飞航导弹, 2008(8): 34-36.
 [11] 周颖, 王雪松, 徐振海, 等. 雷达电子战效果及效能评估的一般思考[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(5): 617-620.
 [12] 罗金亮, 夏德安. 雷达网抗干扰效能分析[J]. 兵工自动化, 2007, 26(10): 43-45.
 [13] 郭万海, 赵晓哲. 舰载雷达效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 30-37.
 [14] 刘晓东. 雷达抗干扰效能评估指标体系及方法研究[D]. 电子科技大学硕士论文, 2008.
 [15] 沈丹璐, 常文革. 反舰导弹末制导段抗干扰性能评估方法探讨[J]. 雷达科学与技术, 2005(2): 15-17.
 [16] 李波涛, 李明, 吴顺君. 雷达抗干扰效能评估方法探讨[J]. 现代雷达, 2006, 28(11): 16-19.
 [17] 焦彦华. 主被动复合制导雷达性能评估研究[D]. 国防科技大学硕士学位论文, 2004.