基于 TMS320F2812 的船用异步电动机直接转矩控制系统

鲍秋燕 周涛
（江苏海事职业技术学院，南京 211107）

摘 要：直接转矩控制（DTC）是一种高性能的交流调速控制技术，数字信号处理器（DSP）的飞速发展促进了 DTC 的数字化。文中介绍了直接转矩控制的基本原理及 TMS320F2812 DSP 的特点，给出了以 TMS320F2812 DSP 为核心的异步电动机直接转矩控制系统的设计方案及软硬件的实现，同时对直接转矩控制系统进行了实验和仿真，验证了直接转矩控制技术的优良性能。

关键词：直接转矩控制（DTC） TMS320F2812 DSP 异步电动机
中图分类号：TM341 **文献标识码**：A **文献分类号**：1003-4862（2010）010-0020-05

Design of the Direct Torque Control System for Shipping Asynchronous-motor Based on the DSP TMS320F2812

Bao Qiuyan, Zhou Tao
(Jiangsu Maritime Institute , Nanjing 211107, China)

Abstract: *At present, direct torque control is the most excellent control technology for induction-motor. With the development of digital signal processor, it will be easy to realize the digital DTC. In this paper, it introduces the basic principle of direct torque control and the character of TMS320LF2812 DSP. At the same time, it gives the software and hardware design of DTC system for asynchronous-motor based on TMS320LF2812 DSP. With experimentation and simulation, it proves that the character of DTC is good.*

Key words: *direct torque control; TMS320F2812 DSP; asynchronous motor;*

1 引言

七十年代以前船舶电动机主要是指直流电动机，但是直流电动机调速系统体积大、维护量大，调速过程中能量浪费严重。而交流电动机尽管具有输出功率大、结构简单、成本低、体积小、运行可靠、维护量小等优点，但限于当时的技术限制，调速困难，应用较少。但是随着现代控制理论和电力电子技术的发展，交流调速系统的性能已经可以与直流调速系统相媲美，交流电动机系统已经成为船用电动机系统的主流。

直接转矩控制技术是继矢量控制技术之后发展起来的一种新型、高性能变频调速技术，是一种较先进的交流电动机控制理论。它利用空间矢量的分析方法直接在定子坐标系下计算与控制异步电动机的转矩和定子磁链，通过两点式调节(Bang-Bang 控制)产生 PWM 信号，直接对逆变器的开关状态进行最佳控制，不需要解耦异步电机数学模型，对电机参数不敏感，控制系统相对简单，具有快速的速度和转矩响应，并且微处理器的飞速发展促进了直接转矩控制系统控制性能的提升，通过微处理器实现的直接转矩控制系统完全可以有效地实现船用交流电机的最优控制。

2 直接转矩控制原理及系统结构

2.1 控制原理

直接转矩控制(DTC)的基本思想是通过磁链调节器保持定子磁链的幅值为额定值，以便充分利用电动机，转子磁链幅值由负载决定，利用定

收稿日期：2010-07-12
作者简介：鲍秋燕（1982-），女，硕士生。研究方向：电力电子与电力传动。

子电压空间矢量来控制定子磁链的平均运行速度，以改变定子磁链和转子磁链之间磁通角 θ 的大小，从而改变异步电动机的转矩，实现对转矩的直接控制，如图 1 所示。

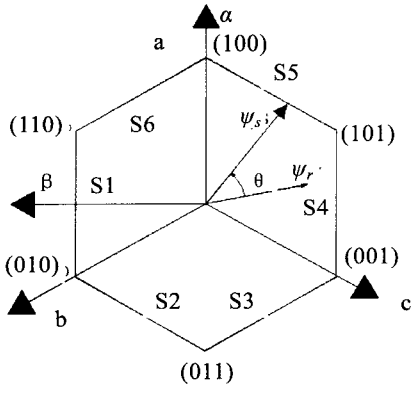

图 1 定转子磁链矢量

直接转矩控制技术采用空间矢量的分析方法在正交定子坐标系(α-β 坐标系) 下对异步电动机进行分析和控制。定子磁链和电磁转矩估算在 DTC 算法中占有重要地位。在 α-β 坐标系下，异步电动机的定子磁链空间矢量和电磁转矩计算公式分别为：

$$\psi = \int (u_s - R_s i_s)\mathrm{d}t \tag{1}$$

和 $$T_e = \frac{3}{2}(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) = \frac{1}{Lc}\frac{3}{2}|\psi_s||\psi_r|\sin\theta \tag{2}$$

定子磁链写成分量形式为:

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_\alpha - R_s i_{s\alpha})\mathrm{d}t \tag{3}$$

和 $$\psi_{s\beta} = \int (u_\beta - R_s i_{s\beta})\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：$\psi_{s\alpha}$、$\psi_{s\beta}$、u_α、u_β、i_α、i_β 分别为定子磁链，定子电压和定子电流在两相静止坐标 α-β 中的分量。

定子磁链空间矢量的运动受定子电压空间矢量的控制，在有效电压矢量的作用下，定子磁链便沿着有效电压矢量的作用方向进行运动，速度正比于定子电压矢量的幅值，通过零电压矢量的介入，便可以控制定子磁链的平均运行速度。

2.2 系统结构

系统结构如图 2 所示。

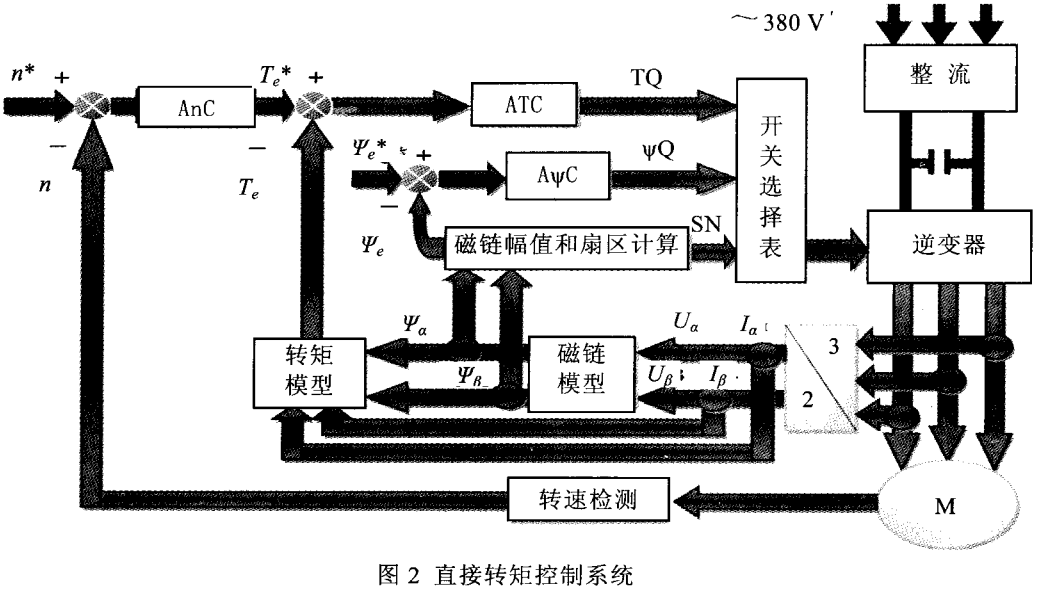

图 2 直接转矩控制系统

直接转矩系统有功率单元、检测单元和控制单元三部分组成。功率单元是系统的主回路，它完成电能的转变，为电动机运行提供能量；检测单元，完成所有控制所需参数的测定，为直接转矩控制提供必要的参数；控制单元，依据控制策略结合检测环节的数据完成对逆变器的适时控制，使逆变器输出当前电动机运行所需的电压状态，以驱动电动机达到控制要求。

3 直接转矩控制系统的硬件实现

系统硬件电路由主电路和控制回路两部分组成。

主电路有整流电路、软启动电路、滤波电路、能耗制动电路、逆变电路五部分组成；控制回路由电压电流检测电路、转速检测电路、信号调理电路和控制器单元构成。

3.1 主电路

主电路完成的是交-直-交的电能转换。见图3。交流到直流通过二极管整流器实现，由 D1～D6 组成；直流电压依靠大电容 C_d 实现，C_d 同时兼有无功功率交换的作用。直流到交流的转变则是依靠 PWM 逆变器，由 D7～D12 组成。D7～D12 六个 IGBT 管子构成三个逆变桥臂组成逆变回路，由 VL 这个 IGBT 单元和制动电阻构成制动回路。IGBT 驱动电路，由 6N137 光电隔离单元和 IR2110 芯片驱动单元组成。IR2110 采用+25 V 电源供电，COMS 和 TTL 电平兼容、并且具有闭锁和死区控制，可以直接驱动两路 25 A/1200 V 的 IGBT。 6N137 是典型的光电隔离器件，能够隔离高低压，实现对前级控制器的隔离保护。

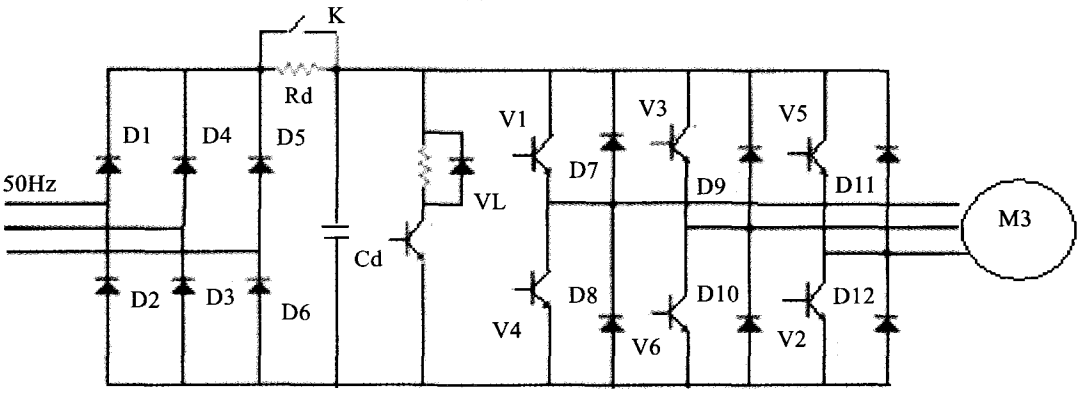

图 3 DTC 系统主电路

大电容 C_d 在通电瞬间产生过大的充电电流，为了避免这个大电流，在整流器和滤波电容间的直流回路上串入限流电阻 R_d。通上电源时，先限制充电电流，再运用延时继电器 K 将其短路，以免长期接入时影响变频器的正常工作，并产生附加损耗。

由于二极管整流器不能为异步电机的再生制动提供反向电流的通路，所以用电阻吸收制动能量。减速制动时，异步电机进入发电状态，首先通过逆变器的续流二极管向电容 C_d 充电，当中间直流回路的电压升高到一定的限制值时，通过泵升限制电路使开关器件导通，将电机释放的动能消耗在制动电阻上。为了便于散热，制动电阻器单独装在变频器机箱外边。

二极管整流电流波形具有较大的谐波分量，使电源受到污染。为了抑制谐波电流，对于容量较大的 PWM 变频器，在输入端设有进线电抗器，还可用来抑制电源电压不平衡对变频器的影响。

3.2 控制回路

TMS320F2812 是美国 TI 公司一种专为电机控制而设计的 32 位定点数字信号处理器。主频最高可达 150 MHz，内核包含事件管理器 EVA 和 EVB 模块和 16 通道 A /D 接口以及 eCAN 通信模块，特别适合电机控制的实现。TMS320F2812 可以完全使用高级语言(C 语言)来开发，能够快速地实现复杂的算法设计，大大缩短了软件开发周期，TMS320F2812 的优良控制性能完全能够满足 DTC 控制系统的要求[7]。

3.2.1 TMS320F2812 电源及复位电路设计

TMS320F2812 内核由 1.8 V，外围电路由 3.3 V 供电，系统有上电顺序要求，一般要求 3.3 V 先上电，1.8 V 随后上电.系统采用 TI 公司的电源芯片 TPS75433 提供 3.3 V 电源和系统复位信号，电源芯片 TPS75201 提供 1.8 V 电源.用 3.3 V 作为电源芯片 TPS75201 的使能输入，保证了系统上电顺序。

3.2.2 PWM 信号的产生

通过配置寄存器 COMCONA，使能空间矢量 PWM 模式。设置 CMPR1 为 0x0C00、CMPR2 为 0x3C00、CMPR3 为 0XFC00 之后，三个比较单元可以产生六路具有可编程死区的 PWM 信号，运用空间适量 PWM 模式使得电动机运行中转矩的改变比较平滑。控制信号经过 6N137 隔离，之后输入 IR2110 驱动主电路逆变环节的 IGBT，得到平滑的电压矢量，实现逆变输出驱动异步电机。

3.2.3 AD 电路设计

采样交流电压时，选用霍尔电压传感器 CHV-25NP-600a；采样定子两相电流时选用霍尔电流传感器 CHB-25NP。电压、电流传感器均是电流输出型的，输出的电流信号经过信号调理电

路得到 TMS320F2812 中 A\D 单元要求的 0～3.0 V 之间的电压信号，直接将这个电压信号输入到 TMS320F2812 的 ADINx 引脚上，利用 TMS320F2812 内部的 A\D 转换功能得到电压电流的数字量。

3.2.4 给定和显示电路设计

给定和显示功能的实现是依靠 TMS320F2812 和芯片 CH452 之间的配合完成的。

CH452 是 LED 显示驱动和键盘扫描控制芯片，CH452 内置时钟振荡电路，可以动态驱动 8 位数码管或者 64 位 LED，具有 BCD 译码、闪烁、移位、段位寻址、光柱译码等功能；同时还可以进行 64 键的键盘扫描；CH452 通过可以级联的 4 线串行接口或者 2 线串行接口与单片机等交换数据；并且可以对单片机提供上电复位信号。

CH452 的四线串口和 TMS320F2812 的 SPI 通讯协议兼容，可以实现转速等参数的给定和重要数据的显示。

4 直接转矩控制系统的软件实现

控制程序分为主程序与中断服务子程序两大部分。主程序主要完成系统初始化、启动停止等指令查询、显示、采用查询方式测定转速；T1 中断主要完成读取 A/D 采样、3/2 变换、转矩磁链计算、扇区确定、开关表选择、PWM 产生等。

5 试验结果

5.1 仿真结果

系统进行了模拟试验，在仿真平台 MATLAB7.0 中，采用异步电动机模型，其参数为：额定功率为 1.5 kW、额定电压 380 V、额定转矩 T_e=2.0 n·m、 Rs =4.2 Ω、极对数 P= 1、频率变化范围是 5～50 Hz。

图 4 为磁链轨迹，图 5 为转矩波形。

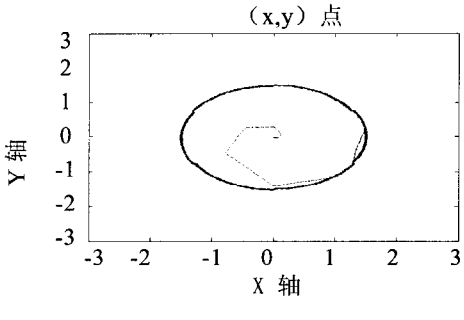

图 4 磁链轨迹

从图 4 中能够看到磁链按照圆形的轨迹运动，磁链幅值恒定。恒定的磁链幅值能够保证电动机的充分利用；转矩波形图中能够看到，起动转矩是额定转矩的 4.5 倍，较大的起动转矩能够保证电动机在带载或者重载情况下正常起动。

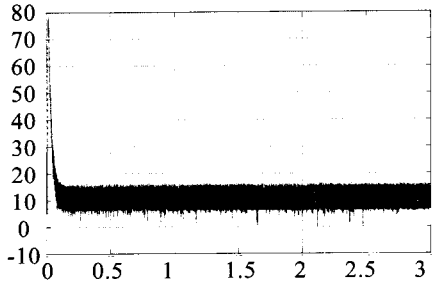

图 5 转矩波形

5.2 实际结果

下面是电机运行在 2460 rpm 时，通过 ccs 采集到的一些波形数据：

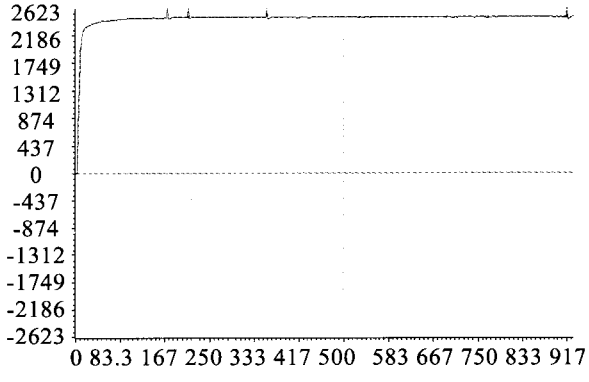

图 6 转速波形

图 6 为异步电动机运行在 2460 rpm 时的转速波形，可以看到，DTC 控制系统经过合理设计、调节 PI 参数后，电机转速无超调、响应迅速、运行平稳、稳定误差在±10 rpm 以内。

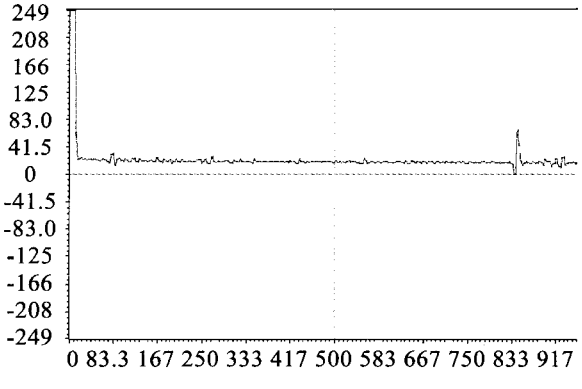

图 7 给定转矩波形

给定转矩是给定转速与实际转速的差值经过比例积分后得到的结果。从波形图 7 中能够看出，

在起动的初始阶段，给定转矩值比较大，以克服定子的静摩擦力以起动电机；正常运行阶段只需要维持电机运行就行了，这个阶段给定转速和实际转速之间的差值减小，给定转矩随之减小。

图8是异步电动机运行在2460 rpm时的转矩波形。与转矩给定波形图比较后可以看出，实际转矩较好的跟随了给定转矩的变化。在起动初始阶段，要克服静摩擦力，使电动机转动起来，此时的转矩比较大，由图8中的数据可以看出，起动转矩是稳定运行时转矩的3倍；电机稳定运行后，维持电机的运行就可以了，所以不需要太大的力矩。

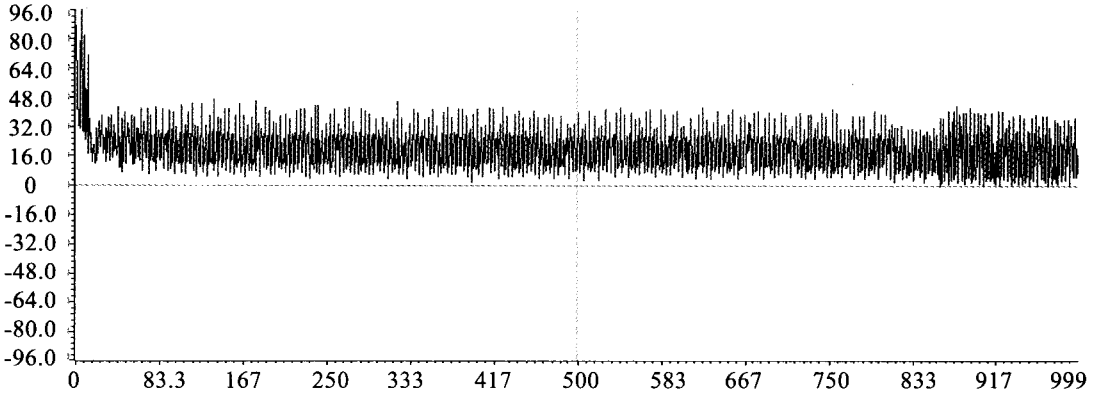

图8 电磁转矩波形

在转矩调节环节，转矩采用的是 bang-bang 控制，所以实际转矩是有波动的，如图8中所示。但是也正是因为采用 bang-bang 控制，转矩才能够稳定在一个较小的范围之内。减小转矩调节器的容差可以减小转矩波动的范围，容差越小转矩波动越小，但是受开关管开关频率的影响，容差不能无限小下去。

电机运行之初，首先需要建立定子磁链，由图9接近圆形磁链可以知道，磁链幅值基本保持不变，电动机利用比较充分，为转矩的控制打下了基础。

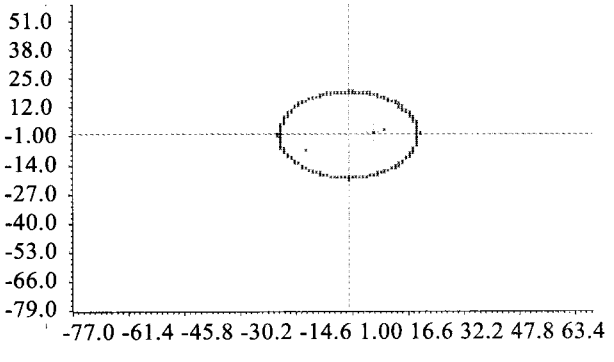

图9 定子磁链轨迹

总之，采用直接转矩后，转速响应快、转矩基本维持恒定、电机磁场接近圆形、谐波小、损耗低、完全实现了船用电机高性能运行的目标。

6 结束语

试验表明系统具有控制精度高、启动转矩大、转矩响应快的优点，实现了船用交流电动机的高性能调速，由于 TMS320F2812 具有丰富的外设和高速的运算性能，使船用交流电动机直接转矩控制系统的硬件结构大为简化，可实现交流异步电动机的单片控制，满足了船用交流电动机变频控制的要求。TMS320F2812 内部集成 CAN、SPI、SCI、I2C 等通信模块，适应当前船舶控制网络化、智能化的发展方向。

参考文献:

[1] 李华德. 交流调速控制系统. 北京：电子工业出版社, 2003.

[2] 刘和平. 数字信号处理器. 北京：机械工业出版社, 2007.

[3] 王晓明. 电动机的 DSP 控制. 北京：北京航空航天大学出版社, 2004.

[4] 许科军. TMS320x281x DSP 原理与应用. 北京：北京航空航天大学出版社, 2006.

[5] 王潞钢. DSP C2000 程序员高手进阶. 北京：机械工业出版社.

[6] 安红战等. 基于 DSP 的异步电动机直接转矩控制系统的实现. 机械制造与自动化,2007（3）.

[7] 杨北辉等. 基于TMS320F2812的矿用电机车直接转矩控制系统. 湖南工程学院学报.