

# 基于 EtherCAT 的高性能交流伺服控制系统设计

阮倩茹,王辉,施大发,梁晓

湖南大学电气与信息工程学院,长沙 410082

**摘要** 高性能伺服控制系统已从模拟控制发展到全数字控制,性能不断提高,在军用和民用方面具有广阔的应用前景。基于现场总线网络的伺服控制系统因其高可靠性、快速性和稳定性,成为伺服运动控制系统的发展趋势。本文针对高性能伺服控制系统在控制现场需要多个伺服电机并联,组网困难,实时性要求高等使用特点,引入实时以太网 EtherCAT 技术。阐述了 EtherCAT 的组成、工作原理及报文协议,设计了基于 EtherCAT 的高性能伺服控制系统,利用 EtherCAT 从站接口控制器 ET1100 和 DSP 芯片 TMS320F2812 开发了 EtherCAT 从站设备,构建了一主多从的 EtherCAT 网络结构,并给出了系统硬件和软件的设计方案,实现伺服系统的位置控制和实时数据传输。

**关键词** EtherCAT;高性能伺服系统;TMS320F2812;从站控制器

**中图分类号** TP273

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)20-0058-04

## Design of the High-performance AC Servo Control Systems Based on EtherCAT

RUAN Qianru, WANG Hui, SHI Dafa, LIANG Xiao

*Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*

**Abstract** High-performance servo control system has been developed from analog control to digital control, with performance being improved and with a broad application in military and civilian areas. The servo control system based on fieldbus with high reliability, speed and stability becomes the development trend of servo motor control systems. This paper discusses the difficulty of organizing the net structure and the rigorous real-time requirement in the scene of high-performance servo control system, and proposes to use the Ethernet for control automation technology. On the data link layer, EtherCAT adopts a real-time soft core, and uses independent channels for the process data transmission, which improves the real-time quality of the system. The EtherCAT's architecture, the working principle and the communication protocol are reviewed in this paper, high-performance AC servo control systems are designed based on EtherCAT, together with a slave device by using EtherCAT slave controller ET1100 and DSP TMS320F2812, which can achieve an accurate position control by using the EtherCat structure of one-master and more-slaves. The hardware and software design of the servo system is given, which realizes the real-time data transmission and position control.

**Keywords** Ethernet for control automation technology; high-performance servo system; TMS320F2812; EtherCAT slave controller

### 0 引言

随着现代电力电子技术、交流可变速驱动技术、计算机等技术的发展,困扰交流伺服系统的电机控制复杂、调速性

能差等问题取得突破性进展。交流伺服系统已成为当代高性能伺服系统的主要发展方向,并将逐渐取代直流伺服系统。基于工业以太网的运动控制器在工业机器人、数控机床和机

收稿日期:2010-06-02;修回日期:2010-10-12

基金项目:湖南省科技计划项目(2010FJ3119);湖南省教育厅科学研究项目(09C1160)

作者简介:阮倩茹,硕士研究生,研究方向为电力电子与自动化装备,电子信箱:rqr1986@163.com;王辉(通信作者),教授,研究方向为电力电子、控制理论与控制工程,电子信箱:hwang1960@163.com

电一体化加工和测试设备中获得了广泛应用。以太网通信速度快、数据量大等特点使运动控制性能得到了极大的提升,但传统以太网的介质访问控制方式——带有冲突检测的载波侦听多路访问机制 CSMA/CD 是一种非确定性的介质访问控制方式,不能满足工业现场的实时性要求。针对这种情况,德国倍福公司开发了一种新的实时以太网技术 EtherCAT,它基于标准的以太网技术,采用灵活的网络拓扑结构,具有配置简单、有效数据率高、全双工、易于实现等特性<sup>[1]</sup>。将该网络引入伺服控制系统,在控制器和多轴伺服驱动器之间通过 EtherCAT 帧进行数据通信,大大提高了控制器和驱动器之间的数据传输速度及可靠性,同时也提供了精确的多轴同步功能<sup>[2]</sup>。EtherCAT 由倍福公司于 2003 年提出,并于 2007 年 12 月成为国际标准,是 IEC61158 和 IEC61784 中定义的第 12 种通信协议标准。在国外,德国倍福、美国 NI 等自动化设备公司先后推出了一系列支持 EtherCAT 技术应用的通信驱动设备,并逐步进入国内市场,但国内对 EtherCAT 产品和技术的开发和应用尚处于起步阶段。

本文以交流永磁同步电机伺服控制为背景,研究了基于 EtherCAT 的高性能交流伺服控制系统,并给出了系统软硬件设计方案和基于 ET1100 从站控制器与 DSP 控制器的接口设计方法。

## 1 实时以太网 EtherCAT 技术

### 1.1 EtherCAT 技术原理

EtherCAT 是一种实时以太网现场总线技术,采用了主从介质访问方式,主站控制所有从站发送或接收数据。在一个通信周期中,主站发送数据帧,从站在数据帧经过时读取相关报文中的输出数据。同时,从站的输入数据插入到同一数据帧的相关报文中。当该数据帧经过所有从站并完成数据交换后,由 EtherCAT 系统的末端从站将数据帧返回<sup>[3]</sup>,如图 1 所示。整个过程中,报文只有几纳秒的时间延迟。发送和接受的以太网压缩了大量的设备数据,可用数据率达 90% 以上。

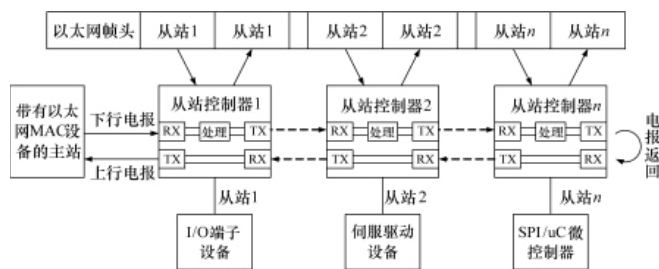


图 1 EtherCAT 工作原理

Fig. 1 EtherCAT working principle

### 1.2 EtherCAT 协议

EtherCAT 是用于过程数据的优化协议,以标准以太网技术为基础,使用一个特殊的以太网帧类型 0x88A4,从而可以将控制数据直接写入以太网帧内,并可以与遵守其他协议的

以太网帧在同一网络中并行。EtherCAT 帧结构如图 2 所示。EtherCAT 不仅能在单个子网中应用,而且通过 EtherCAT UDP 可将 EtherCAT 协议封装为 UDP/IP 数据报文,因此任何以太网协议堆栈的控制均可编址到 EtherCAT 系统中。EtherCAT 协议包括几个 EtherCAT 报文,每个报文都服务于一块逻辑过程映像区的特定内存区域,该区域最大可达 4GB,由 FMMU 寄存器和 SM(Sync Manager)寄存器定义。

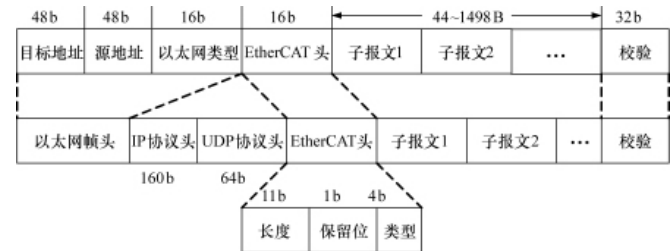


图 2 EtherCAT 帧结构

Fig. 2 EtherCAT frame structure

## 2 基于 EtherCAT 高性能交流伺服控制系统设计

### 2.1 高性能全数字交流伺服系统组成

图 3 为一个典型的全数字伺服系统框图。全数字伺服系统采用位置控制、速度控制和力矩控制的三环结构。系统硬件由电源单元、功率逆变和保护单元、检测器单元、数字控制器单元和接口单元组成<sup>[4]</sup>,其中数字控制器是全数字伺服系统的核心部分,三环系统构成、电机控制算法实现、系统调节器计算和脉宽调制波的发出均由数字控制器完成。

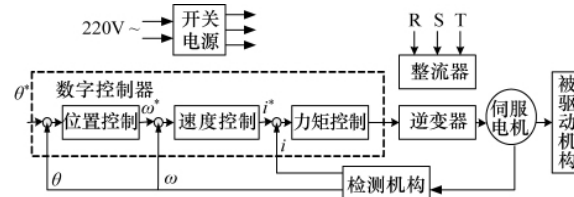


图 3 全数字伺服系统结构框图

Fig. 3 Digital servo system structure

### 2.2 基于 EtherCAT 技术的高性能伺服控制系统

伺服控制网络建构在控制器与多轴伺服电机驱动器之间,可通过一主多从方式实时、同步地传送运动命令和接收运动状态,实现多轴之间的同步协调控制。本文设计了一主多从的 EtherCAT 网络结构,基于从站接口控制器 ET1100 和 DSP 芯片 TMS320F2812 开发了 EtherCAT 从站设备,利用 DSP 芯片 TMS320F2812 的运动控制模块进行电机位置控制,利用同步串行接口与从站接口控制器 ET1100 进行数据通信。系统结构如图 4 所示。

由图 4 可知,带有 MAC 接口的 PC 机为系统主站,通过编程对从站及其运行方式进行配置。此外,主站周期性地通过 EtherCAT 网络发送带有从站控制器命令的数据帧,实现对各个交流伺服子系统的控制,从而实现各个伺服电机的位置

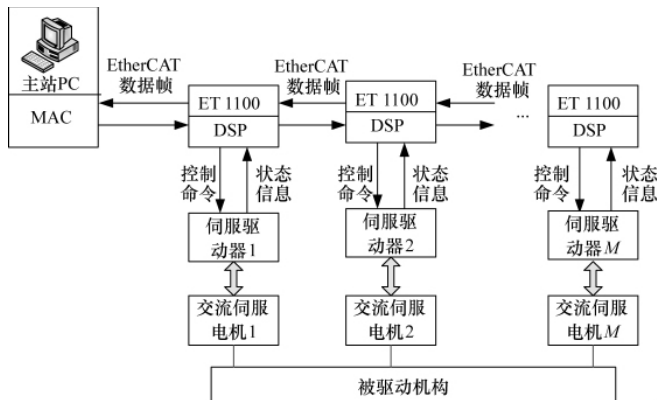


图 4 基于 EtherCAT 高性能伺服控制系统框图

Fig. 4 Block of diagram of high-performance servo control systems based on EtherCAT

控制、速度调节、数据采集等控制要求,同时,各从站控制器在控制周期能通过插入相应报文反馈到主站的 PC 机。由于 EtherCAT 技术良好的网络性能和数据传输能力,系统能够有效地对伺服系统状况进行实时监控,大大提高了系统的数据传输效率。

### 3 基于 EtherCAT 高性能交流伺服控制系统的从站实现

#### 3.1 基于 ET1100 的从站控制器硬件设计

EtherCAT 从站控制器 ESC 是通过专用硬件实现的,它实现 EtherCAT 物理层与数据链路层的协议。ESC 通常具有两个 MAC 地址,可以很容易地扩展为两个网口,目的是便于实现级联,构成各种拓扑结构。ESC 与主机设备之间的接口方式根据过程数据接口 PDI 的形式确定<sup>[5]</sup>,如表 1 所示。其中,I/O 方式无需主机 CPU;SPI 方式用于数据量较小的过程数据设备,如数据采集监控等;微处理器方式适用于现场控制,尤其

是数据量较大的复杂设备。在本系统中,从站控制器采用倍福公司的 ET1100。由于电机采用 TMS320F2812 控制,其接口规范可选择微处理器方式,对 ET1100 自带的 EEPROM 进行编程后选择配置<sup>[6]</sup>。F2812 与 ET1100 的硬件接口如图 5 所示。

表 1 ESC 接口规范

Table 1 Interface mode of ESC

PDI 形式	功能
I/O 方式	32 输入/32 输出
	24 输入/8 输出
	16 输入/16 输出
	8 输入/24 输出
微处理器方式	8~32 位微处理器
SPI 方式	串行总线接口

伺服控制器 F2812 实现 EtherCAT 对交流伺服电机的具体控制和数据反馈,通过 PDI 接口与 ET1100 连接,读取和写入 ET1100 缓冲区的数据。ET1100 带有两个 MII 接口,它们在硬件上实现了 EtherCAT 协议的数据链路层,外扩的两个物理层芯片实现了工业以太网的物理层。网络接口由 PHY 和网络变压器组成,其中网络变压器的作用是实现隔离和阻抗匹配。EEPROM 通过 PC 接口编程,用于保存从站配置数据和从站描述数据。

#### 3.2 从站控制软件流程图

下位机主要对 DSP 进行从站应用层程序设计,分为位置控制程序和从站接口程序。位置控制程序为周期性控制数据和反馈数据的数据传输,本设计采用中断方式进行,程序流程图如图 6 所示。当 F2812 完成初始化后,系统进入周期性运行状态,等待 EtherCAT 帧的到来。当数据帧到达 ET1100 之后,ET1100 向 DSP 发出中断,DSP 响应中断后读取 ET1100

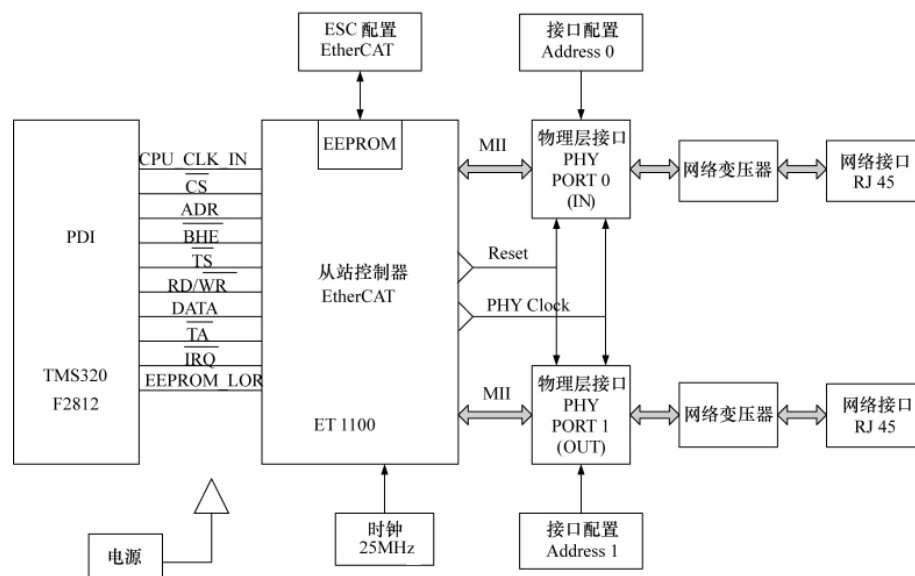


图 5 基于 ET1100 的 EtherCAT 从站硬件结构图

Fig. 5 Block diagram of ESC based on ET1100

