

实时工业以太网 EtherCAT 通信系统实现

鹿海霞，王丹麟，杨卫民，沈珂婷，蔡一磊

(国电南京自动化股份有限公司研究院，江苏 南京 210003)

摘 要: 伴随着现场总线技术的发展，自动化控制系统对实时监控数据的传输性能要求越来越高。本文通过对 EtherCAT 实时工业以太网通信技术的研究，设计了基于 EtherCAT 技术的高速通信系统，介绍了通信系统主站、从站及配置工具的设计与实现。经实验验证，该通信系统实时数据传输响应时间为微秒级，可以满足自动化控制系统对实时监控数据快速传输响应的要求。

关键词: 通信系统；EtherCAT 主站；EtherCAT 从站；EtherCAT 配置工具

0 引言

20 世纪 80 年代产生和发展起来的现场总线技术，以全数字的通信方式代替模拟传输方式，控制系统与现场仪表之间不仅能传输生产过程测量信息和控制信息，还能够传输参数状态信息，使得工业企业的管理控制一体化成为可能。但是由于现场总线的互连、互通与互操作性问题很难解决，于是现场总线开始转向以太网。

实时以太网是常规以太网技术的延伸，可以满足工业控制领域实时数据通信的要求。目前主要的实时工业以太网标准有以下几种：Modbus / TCP、EtherNet / IP、Profinet、Powerlink、EtherCAT 以及我国研制的 EPA 等。EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) 是由德国自动控制公司 Beckhoff 开发的实时工业以太网技术，该技术以其配置简单、高速、高效率、简单、易于实现等优点为广大的产品研发者和生产厂商广泛接受。

1 EtherCAT 通信原理

如图 1 所示，EtherCAT 使用主从模式介质访问控制（MAC），主站发送以太网报文帧给各从站，从站从报文中提取或插入相关的用户数据，然后将该报文传输到下一个 EtherCAT 从站。最后一个 EtherCAT 从站发回经过完全处理的报文，并由第一个从站作为响应报文发送给主站控制单元。在此过程中主从站均无需对数据帧编码 / 解码，使得数据处理时间大大缩短，每个从站数据处理延迟仅为 500ns 左右。

EtherCAT 协议支持逻辑寻址命令，最大可寻址

4GB 字节的逻辑地址空间。主站为连接到网络上的每个从站分配一个唯一的逻辑地址，每个从站通过从站控制芯片的现场总线内存管理单元实现逻辑地址到从站本地物理存储地址的映射。因此可以根据控制系统的需要对每个 EtherCAT 的数据帧做合理的规划，实现在一个数据帧中对多个从站，多通道数据的读写。

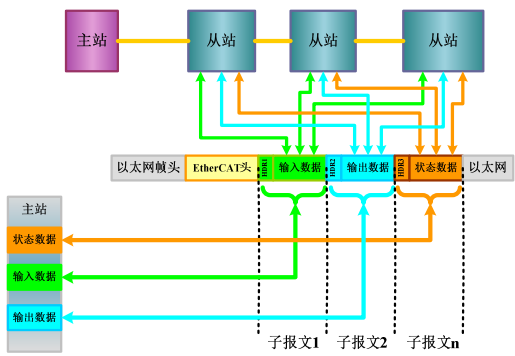


图 1 EtherCAT 实时数据通信原理

2 EtherCAT 通信系统设计

EtherCAT 通信系统包括 EtherCAT 主站、EtherCAT 从站以及 EtherCAT 配置工具。系统的总体结构如图 2 所示。

EtherCAT 配置工具生成包含主站、从站节点通信配置信息的描述文件(.xml)。EtherCAT 主站根据描述文件的信息，建立整个通信网络的连接，实现与 EtherCAT 从站节点之间的通信参数配置和实时数据通信。EtherCAT 从站实现数据采集与控制，与 EtherCAT 主站之间交换数据。

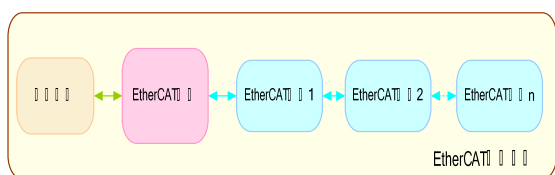


图2 系统总体结构图

2.1 EtherCAT 主站设计

2.1.1 EtherCAT 主站硬件设计

EtherCAT主站不需要专用的通讯处理器，只需使用带有以太网MAC的设备即可，完全采用软件方式实现协议。系统基于带有以太网MAC接口的普通工控PC机，采用网络接口卡实现数据的通信传输，传输介质使用100BASE-TX规范的5类UTP线缆。

2.1.2 EtherCAT 主站软件设计

EtherCAT主站软件实现与EtherCAT从站之间的数据通信处理功能，包括通信网络上各节点的初始化配置、状态机转换、周期性和非周期性数据通信及通信故障诊断处理等。EtherCAT主站软件架构图如图3所示。

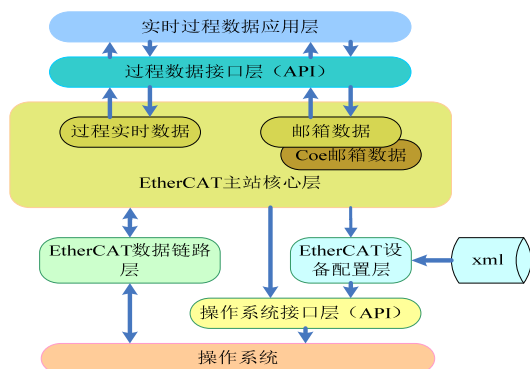


图3 EtherCAT 主站程序架构图

操作系统层：操作系统层调度和管理应用层任务，提供系统API函数实现应用程序与主站硬件设备之间的关联。

数据链路层：数据链路层实现网络驱动，对标准以太网协议进行了修改，实时数据由实时MAC接管通信控制，简化通信数据处理。非实时数据仍然可以在开放通道内按照原来的TCP/IP协议传输。

配置层：配置层实现通信网络和网络上所有通信设备配置信息的导入/导出配置管理。

核心层：核心层实现EtherCAT主站协议的通信和处理功能，包括过程实时数据通信和采用COE（CANopen over EtherCAT）邮箱机制的非实时数据通信及相应的报文解析处理，并为网络设备与应用程序提供函数接口。

应用层：EtherCAT主站核心层将实现的功能进行封装，数据应用层通过调用核心层API接口函数，对实时/非实时数据进行传输和逻辑分析运算。

2.2 EtherCAT 从站设计

2.2.1 EtherCAT 从站硬件设计

EtherCAT从站协议控制器选用Beckhoff公司的EtherCAT从站控制专用芯片ET1100。ET1100是一款强大的EtherCAT从站控制器ESC专用芯片，它具有4个数据收发端口、8个FMMU单元、8个SM、4KB控制寄存器、8KB过程数据存储器、支持64位的分布时钟。它可以不用微处理器控制，直接作为数字量输入/输出从站独立运行，也可以通过PDI接口由外部MCU控制其工作构成复杂功能的从站设备。

如图4所示，典型的EtherCAT从站协议控制电路通常只使用ET1100的两个端口，PORT0\PORT1，在构成星型拓扑结构需要时可以使用4个端口，构成多端口型的从站。通信帧在经由PORT0时进行数据处理，因此在从站设备顺序寻址的通信工作模式下应注意端口的使用顺序。

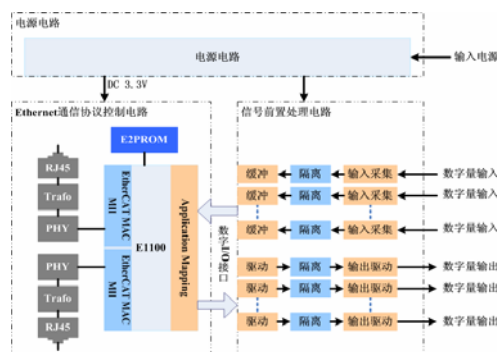


图4 ET1100直接构成的从站框图

由从站协议控制器ET1100直接构成的从站站点直接可以作为32位数字量输入/输出站点，由电源电路、通信协议控制电路和信号前置处理电路构成。ET1100自动处理状态机转换，从站的站点设备信息通过EtherCAT网络配置，存储在E2PROM中。数字量输入、输出信号通过过程数据通信映射到ET1100的数字I/O接口相应管脚，通过前置处理电路隔离输入/输出。

复杂功能的从站由电源电路、MCU电路、通信协议控制电路、数据采集控制电路4部分构成。如图5所示。MCU选用基于16/32位ARM7TDMI-S的LPC2292芯片，从站的站点设备信息通过EtherCAT网络配置，存储在E2PROM中，重要数据信息使用256K外部RAM或F-RAM存储。在EtherCAT从站工

作时，由MCU控制状态机的变化，进行数据采集、设备控制信号输出、逻辑处理、数据映射等工作，MCU通过PDI接收ET1100的中断信号和同步信号，实现与EtherCAT主站的邮箱数据通信、过程数据交互及从站同步对时等工作。

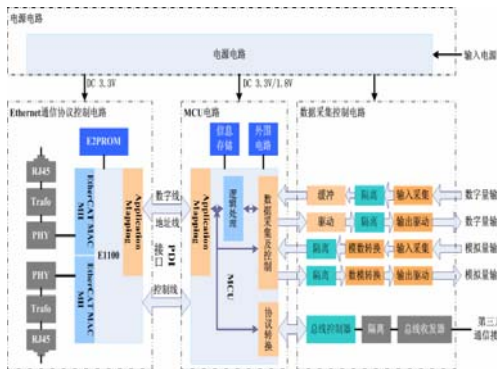


图5 MCU控制的从站框图

根据应用需求采用MCU配合不同数据采集控制电路方式，可以构成不同的从站设备类型，例如数字量采集从站、数字量控制从站、模拟量采集从站、模拟量控制从站，第三方总线协议/EtherCAT网关从站以及组合功能从站。

2.2.2 EtherCAT 从站软件设计

EtherCAT 从站以协议控制器（ESC）芯片为核心，ESC 实现数据链路层，完成数据的接收和发送以及错误处理。从站通过微处理器操作 ESC 芯片，实现应用层的协议。

从站应用层主要执行以下功能：硬件初始化及相关寄存器的初始化设置、从站通信状态机转换、COE（CANopen over EtherCAT）邮箱数据通信和周期性输入输出数据通信。

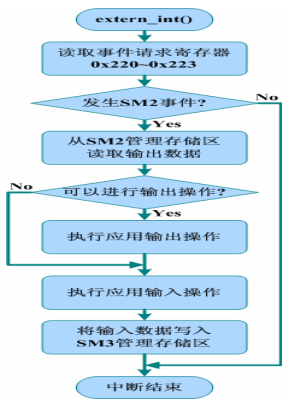


图 6 EtherCAT 从站周期性数据通信流程图

EtherCAT 主站和从站之间有 2 种数据交换形式，一种是周期性过程数据通信，一种是非周期性邮箱（mailbox）数据通信。非周期性邮箱数据通信

用来配置或读取从站的参数信息，周期性过程数据通信用来传输数据刷新率要求较高的输入输出数据，为了保证通信数据的快速响应，周期性过程数据通信采用中断实现，从站周期数据通信流程如图 6 所示。

2.2.3 EtherCAT 从站对象字典设计

EtherCAT协议使用对象字典实现参数信息配置和实时数据读写操作，每个对象字典有一个主索引和多个子索引。输出（RxPDO）的主索引为十六进制数据：0x1600，0x1601，…，0x16FF，每个输出主索引的子索引为：0x7xx0~0x7xxF；输入（TxPDO）主索引为十六进制数据：0x1A00，0x1A01，…，0x1AFF，每个输入主索引的子索引为：0x6xx0~0x6xxF。PDO数据以实体的方式进行读取，每个数据对应一个实体索引值。数据类型可以为整型、字节型或布尔型等。见表1。

从站控制器使用了存储同步管理通道SM(SyncManager)来保证EtherCAT主站与从站应用数据交换的一致性和安全性，在数据状态改变时产生中断通知双方。SM通道把存储空间组织为一定大小的缓冲区，缓冲区的数量和数据交换可通过对象字典0x1C00~0x1C4F配置。

表 1 EtherCAT 从站对象字典定义表				
RxPDO (输出数据)	0x1600	0x1601	...	0x16nn
输出实体	0x7000~x700F	0x7010~x701F	...	0x7nn0~x7nnF
TxPDO (输入数据)	0x1A00	0x1A01	...	0x1Ann
输入实体	0x6000~x600F	0x6010~x601F	...	0x6nn0~x6nnF
SM 类型	0x1C00			
过程数据通信	0x1C10~0x1C13			
SM PDO 分配				
SM 参数	0x1C30~0x1C33			

2.3 EtherCAT 配置工具设计

如图7所示，EtherCAT配置工具是一个图形化的界面，运行于PC机上。EtherCAT配置工具主要功能是调用设备描述，生成过程映像区描述和网络描述的XML文件，以供给EtherCAT主站软件使用。EtherCAT主站软件应用程序读取、解析XML文件，实现通信网络上主站、从站节点的配置管理和实时数据通信。

EtherCAT 配置工具也可实现监控功能，监测整个通信系统的实时输入数据、状态数据及配置数据的变化，控制实时输出数据的快速输出。

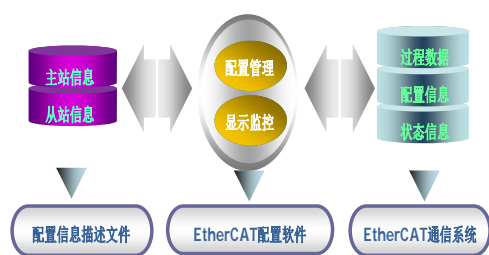


图 7 EtherCAT 配置工具框图

3 EtherCAT 通信系统的性能

为了测试系统的性能，采用wireshark网络封包分析软件截取EtherCAT网络通信报文。Wireshark是目前全世界最广泛的网络分组分析软件之一，其功能是截取网络分组，并尽可能显示出最为详细的网络分组数据，其前身为Ethereal。

主站分别与2个、3个、4个EtherCAT从站连接通信，每帧报文输入输出数据固定为600字节，采用wireshark各截取网络通信报文帧10万帧，计算出报文平均响应时间为212 μ s、215 μ s、220 μ s。

主站与4个EtherCAT从站连接通信，每帧报文输入输出数据各60、300、737字节，采用wireshark各截取网络通信报文帧10万帧，计算出报文平均响应时间为112 μ s、165 μ s、286 μ s。

可以看出从站数量的增加对系统报文响应时间的影响很小，随着通信数据量的增加系统报文响应时间会有所增加，最长1514字节的数据帧报文响应时间小于300 μ s，可以满足绝大多数控制系统对数据实时刷新的要求。

4 结论

实时工业以太网 EtherCAT 通信系统适用于电力自动化、矿山自动化、轨道交通自动化、城市公

用等自动化领域，可以实现分布式控制，生产流程自动化控制，微电网控制、运动控制、伺服控制以及楼宇自动化控制，满足上述系统对实时控制数据传输快速响应的要求，提升其系统的市场竞争力。

参考文献：

- [1] 王维建,将杰,尹中明.工业以太网EtherCAT技术的原理及其实现[A]. 2009第十届工业仪表与自动化学术会议[C].2009.307-309.
- [2] 郇极,刘艳强.工业以太网现场总线EtherCAT驱动程序设计及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [3] 王磊,李木国,王静,等. 基于EtherCAT协议现场级实时以太网控制系统研究[J]. 计算机工程与设计,2011, 32(7):2294-2297.
- [4] 向乾亮,辛志远,林继如,等.实时以太网EtherCAT技术在电力系统中的应用[J]. 继电器,2008, 36(11):42-45.
- [5] 施大发,王辉,梁晓,等. 基于EtherCAT的风力发电机组主控制系统设计[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2010,31(5):67-71.

作者简介：

鹿海霞（1976—），女，黑龙江齐齐哈尔人，工程师，从事通信系统研发设计工作，E-mail：lulu968313@163.com；

王丹麟（1979—），女，宁夏银川人，工程师，从事嵌入式硬件研发设计工作；

杨卫民（1966—），男，江苏镇江人，高级工程师，从事电力系统自动化管理工作；

沈珂婷（1987—），女，江苏无锡人，助理工程师，从事嵌入式软件研发设计工作；

蔡一磊（1987—），男，江苏南通人，助理工程师，从事嵌入式硬件研发设计工作。