

“十三五”普通高等教育规划教材

工业以太网现场总线

EtherCAT 驱动程序设计及应用

郁极 刘艳强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”普通高等教育规划教材

工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用

郇 极 刘艳强 编著

机械工业出版社

EtherCAT 是一种应用于工厂自动化和流程自动化领域的实时工业以太网现场总线协议, 已经成为工业通信网络国际标准 IEC 61158 和 IEC 61784 的组成部分。本书内容包括: 实时工业以太网技术进展、EtherCAT 系统组成原理、EtherCAT 协议、从站专用集成电路芯片 ET1100 介绍、EtherCAT 从站硬件设计实例、EtherCAT 伺服驱动器控制应用协议 CoE 和 SoE、Windows 操作系统下 EtherCAT 主站驱动程序设计、基于微处理器的 EtherCAT 从站驱动程序设计和开发实例。

本书可作为工业自动化类和计算机控制专业教材或教学参考书, 亦可作为 EtherCAT 系统开发技术人员的工具书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用 / 郇极, 刘艳强编著.
—北京: 机械工业出版社, 2019. 3
“十三五”普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-63260-3

I. ①工… II. ①郇… ②刘… III. ①工业企业-以太网-总线-程序设计-高等学校-教材 IV. ①TP393.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 147058 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李文轶 责任编辑: 李文轶
责任校对: 张艳霞 责任印制: 郇敏

北京富生印刷厂印刷

2019 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm · 14.25 印张 · 353 千字

0001-2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-63260-3

定价: 45.00 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

现场总线在连接数字伺服驱动器、传感器以及 PLC 等设备的控制系统中已经获得广泛应用,实时工业以太网(Real Time Ethernet, RTE)是当前现场总线技术的一个重要发展方向。目前,国际上有多种实时工业以太网协议,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)制定了以下两个与实时工业以太网相关的标准。

(1) IEC 61158:工业通信网络——现场总线规范(Industrial communication networks-Fieldbus specifications);

(2) IEC 61784:工业通信网络——行规规范(Industrial communication networks-Profiles)。

EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology)是一种基于以太网的实时工业现场总线通信协议和国际标准。它具有高速和高数据有效率(data ratio)的特点,支持多种物理拓扑结构。从站使用专用的从站控制芯片,主站使用标准的以太网通信控制器。

EtherCAT由德国BECKHOFF自动化公司于2003年提出,2007年12月成为国际标准,是IEC 61158和IEC 61784中定义的第12种通信协议标准。

虽然国际标准的颁布已有一段时间,国外采用EtherCAT技术的自动化设备已经开始进入国内,但国内对EtherCAT产品与技术的开发和应用尚处于起步阶段。为了支持EtherCAT技术在国内的应用与发展,有必要对其系统原理、协议内容、特别是软/硬件设计方法,进行系统全面的介绍。

本书的章节安排如下:

第1章为EtherCAT概述,简要介绍实时工业以太网的现状、EtherCAT特点及其系统组成原理。

第2章介绍EtherCAT协议,包括系统组成、数据帧结构、报文寻址、通信服务、分布式时钟、通信模式、状态机和通信初始化以及应用层协议等。

第3章介绍实现EtherCAT数据链路控制的专用集成电路芯片及其基本功能,着重介绍了BECKHOFF公司的ET1100芯片。

第4章介绍EtherCAT硬件设计,给出了使用ET1100实现的微处理器操作的EtherCAT从站和直接I/O控制EtherCAT从站的硬件设计实例。

第5章介绍了EtherCAT伺服驱动器控制应用协议,包括CoE和SoE两种,着重介绍周期性过程数据通信和非周期性数据通信的报文格式。

第6章介绍Windows操作系统下EtherCAT主站驱动程序设计,着重介绍系统初始化和周期性数据传输的C++程序实现,给出了关键的程序流程图和主要程序源代码。

第7章介绍基于微处理器的EtherCAT从站驱动程序设计,除了给出基本的程序框架以外,着重介绍EtherCAT接口初始化和周期性数据处理的程序实现方法。

本书第2章、第3章和第5章的内容是根据国际标准IEC 61158、IEC 61784和德国BECKHOFF自动化有限公司的ET1100芯片手册等文献进行整理与汇编的,其中根据作者的

理解，添加了一些图、表，使内容更清晰、准确。此外，作者还对一些参考文献中性能数据不完全的地方进行分析和测定，对一些说明、术语做了翻译和一致性处理，并设计了本书的章节顺序。本书介绍的硬件设计实例和驱动程序示例是以作者多年开发经验为基础的，其中作者对部分原理图和程序源代码做了必要的组织和整理。本书可作为工业自动化类和计算机控制专业研究生教材或教学参考书，亦可作为 EtherCAT 协议开发技术人员的工具书。

在本书的撰写过程中，力求体系合理，概念准确，条理清晰，用词规范。但由于作者水平所限，对于书中疏漏及不妥之处，欢迎广大读者予以批评指正。

作者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 实时工业以太网概述	1
1.2 EtherCAT 协议概述	3
第2章 EtherCAT 协议	5
2.1 EtherCAT 系统组成	5
2.1.1 EtherCAT 主站组成	5
2.1.2 EtherCAT 从站组成	6
2.1.3 EtherCAT 物理拓扑结构	7
2.2 EtherCAT 数据帧结构	8
2.3 EtherCAT 报文寻址和通信服务	10
2.3.1 EtherCAT 网段寻址	10
2.3.2 设备寻址	11
2.3.3 逻辑寻址和 FMMU	13
2.3.4 通信服务和 WKC	15
2.4 分布时钟	16
2.4.1 分布时钟描述	16
2.4.2 传输延时和时钟初始偏移量的测量	17
2.4.3 时钟同步	18
2.5 通信模式	19
2.5.1 周期性过程数据通信	19
2.5.2 非周期性邮箱数据通信	22
2.6 状态机和通信初始化	23
2.7 应用层协议	25
2.8 EtherCAT 主站实施和功能分类	26
第3章 EtherCAT 从站控制芯片	30
3.1 ESC 芯片概述	31
3.1.1 ESC 芯片种类	31
3.1.2 ESC 芯片存储空间	31
3.1.3 ESC 芯片特征信息	35
3.2 ESC 芯片——ET1100	37
3.2.1 ET1100 引脚定义	37
3.2.2 物理通信端口	41
3.2.3 PDI 接口	44

3.2.4	配置信号引脚	50
3.2.5	其他引脚	51
3.3	ESC 数据链路控制	53
3.3.1	ESC 数据帧处理	53
3.3.2	ESC 通信端口控制	54
3.3.3	数据链路错误检测	56
3.3.4	ESC 数据链路地址	57
3.3.5	逻辑寻址控制	58
3.4	ESC 应用层控制	58
3.4.1	状态机控制和状态	58
3.4.2	中断控制	61
3.4.3	看门狗控制	63
3.5	同步管理	64
3.5.1	同步管理器概述	64
3.5.2	缓存类型数据交换	66
3.5.3	邮箱数据通信模式	67
3.6	从站信息接口	69
3.6.1	EEPROM 中分类数据	70
3.6.2	EEPROM 访问控制	71
3.6.3	对 EEPROM 操作的错误处理	73
3.7	分布时钟操作	74
3.7.1	分布时钟信号	74
3.7.2	分布时钟的初始化	79
3.7.3	同步信号的配置	81
3.8	显式设备标识 ID	81
3.8.1	ID 请求机制——带有应用控制器和 ID-选择器的复杂从站	83
3.8.2	直接 ID 机制——没有微控制器的简单从站	84
3.8.3	使用设置站点别名和遗留模式	84
3.9	主站对 ESC 操作过程示例	86
3.9.1	数字量输入/输出配置和通信示例	86
3.9.2	邮箱配置和通信示例	87
第 4 章	EtherCAT 硬件设计	90
4.1	EtherCAT 从站 PHY 器件选择	90
4.2	微处理器操作的 EtherCAT 从站硬件设计实例	91
4.2.1	ET1100 的接线	92
4.2.2	ET1100 配置电路	92
4.2.3	MII 接线	95
4.2.4	微处理器接口引脚接线	97
4.3	直接 I/O 控制 EtherCAT 从站硬件设计实例	98

第 5 章 EtherCAT 伺服驱动器控制应用协议	102
5.1 CoE (CANopen over EtherCAT)	102
5.1.1 CoE 对象字典	103
5.1.2 周期性过程数据通信	104
5.1.3 CoE 非周期性数据通信	105
5.1.4 应用层行规	115
5.2 SoE (SERCOS over EtherCAT)	121
5.2.1 SoE 状态机	122
5.2.2 IDN 继承	122
5.2.3 SoE 过程数据映射	124
5.2.4 SoE 服务通道	127
第 6 章 EtherCAT 主站驱动程序设计	133
6.1 数据定义头文件	134
6.2 网卡操作相关类的定义和实现	140
6.2.1 基于 NDIS 的网卡驱动程序	140
6.2.2 CEcNpfDevice 类	143
6.2.3 CNpfInfo 类	145
6.2.4 获得计算机网卡信息	146
6.2.5 打开网卡	147
6.2.6 发送数据帧	150
6.2.7 接收数据帧	151
6.2.8 关闭网卡	154
6.3 从站设备对象定义和实现	156
6.3.1 CEcSimSlave 类的定义	156
6.3.2 CEcSimSlave 类的实现	158
6.4 主站设备对象定义和实现	160
6.4.1 CEcSimMaster 类的定义	160
6.4.2 初始化和启动 CEcSimMaster 数据对象	162
6.4.3 配置从站设备对象	163
6.4.4 状态机运行	166
6.4.5 发送非周期性 EtherCAT 数据帧	168
6.4.6 发送周期性 EtherCAT 数据帧	170
6.4.7 接收 EtherCAT 数据帧	176
6.5 主站实例程序	178
6.5.1 通信配置初始化	180
6.5.2 周期性运行控制	183
第 7 章 从站驱动程序设计	185
7.1 从站驱动程序头文件 ec_def.h	185
7.2 从站基本操作	194

7.3	从站驱动程序总体结构	196
7.4	从站周期性数据处理	199
7.4.1	同步运行模式	199
7.4.2	自由运行模式	201
7.5	从站非周期性事件处理	202
7.6	从站状态机处理	203
7.6.1	状态机处理流程	204
7.6.2	检查 SM 通道设置	207
7.6.3	启动邮箱数据通信	213
7.6.4	启动周期性输入数据通信	214
7.6.5	启动周期性输出数据通信	216
7.6.6	停止 EtherCAT 数据通信	217
参考文献		219

第1章 概述

将计算机网络中的以太网技术应用于工业自动化领域，构成工业控制以太网，简称工业以太网或以太网现场总线，是当前工业控制现场总线技术的一个重要发展方向。与使用传统技术的现场总线相比，以太网现场总线具有以下优点：

- 传输速度快，数据容量大，传输距离长；
- 使用通用以太网元器件，性价比高；
- 可以接入标准以太网网段。

1.1 实时工业以太网概述

实时工业以太网（Real Time Ethernet）是常规以太网技术的延伸，以便满足工业控制领域对实时性数据通信的要求。目前，国际上有多种实时工业以太网协议，国际电工委员会 IEC 制定了以下两个与实时工业以太网相关的标准。

1) IEC 61158：工业通信网络——现场总线规范（Industrial communication networks - Fieldbus specifications）。

IEC 61158 是 IEC 制定的现场总线国际标准，1999 年发布了第 1 版，包括 8 种现场总线协议。随着实时以太网技术的发展，IEC 61158 也新增了实时以太网的标准，2007 年 12 月出版的 IEC 61158 第 4 版中包括了 10 种工业以太网协议标准，如表 1-1 所示。其中 Type2 CIP（Common Industry Protocol）包括 DeviceNet、ControlNet 现场总线和 Ethernet/IP 实时工业以太网。

2) IEC 61784：工业通信网络——行规规范（Industrial communication networks - Profiles）。

IEC 61784 是 IEC 制定的与 IEC 61158 中现场总线标准对应的行规规范，其中第一部分 IEC 61784—1 为传统现场总线的应用行规族（Communication Profile Family, CPF），第二部分 IEC 61784—2 为基于 ISO/IEC 8802—3 的实时工业以太网 CPF。表 1-1 中也同时列出了 CPF 与 IEC 61158 中技术名称的对应关系。

表 1-1 IEC 61158 第 4 版现场总线类型

类型编号	技术名称	CPF	支持的组织和公司	分类
Type 1	TS61158		IEC	现场总线
Type 2	CIP	CPF2	CI（美）、ODVA（美）、Rockwell（美）	DeviceNet、ControlNet 和 Ethernet/IP
Type 3	Profibus	CPF3	PI、SIEMENS（德）	现场总线
Type 4	P-NET	CPF4	Process Data（丹麦）	现场总线
Type 5	FF HSE	CPF1	FF、Fisher-Rosemount（美）	高速以太网

(续)

类型编号	技术名称	CPF	支持的组织和公司	分类
Type 6	Swift Net	CPF7	SHIP STAR、Boeing (美)	被撤销
Type 7	WorldFIP	CPF5	WorldFIP 协会、Alstom (法)	现场总线
Type 8	INTERBUS	CPF6	INTERBUS Club、Pheonix contact (德)	现场总线
Type 9	FF H1	CPF1	FF (美)	现场总线
Type 10	PROFINET	CPF3	PI、SIEMENS (德)	实时以太网
Type 11	TC-net	CPF11	Toshiba (日)	实时以太网
Type 12	EtherCAT	CPF12	ETG、BECKHOFF (德)	实时以太网
Type 13	Ethernet PowerLink	CPF13	EPSG、B&R (奥地利)	实时以太网
Type 14	EPA	CPF14	浙大中控等 (中国)	实时以太网
Type 15	Modbus-RTPS	CPF15	MODBUS、IDA (美)	实时以太网
Type 16	SERCOS I、II	CPF16	IGS (德)	现场总线
Type 17	V N E T /IP	CPF10	Yokogawa (日)	实时以太网
Type 18	CC-Link	CPF8	三菱 (日)	现场总线
Type 19	SERCOS III	CPF16	IGS (德)	实时以太网
Type 20	HART	CPF9	HART 通信基金会 (美)	现场总线

以太网的介质访问控制 (Media Access Control, MAC) 方式采用带有冲突检测的载波侦听多路访问机制 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CD), 这是一种非确定性的介质访问控制方式, 不能满足对工业现场总线的实时性要求。目前, 市场上已有的实时工业以太网根据不同的实时性和成本要求使用不同的实现原理, 大致可以分为以下三种类型, 如图 1-1 所示。

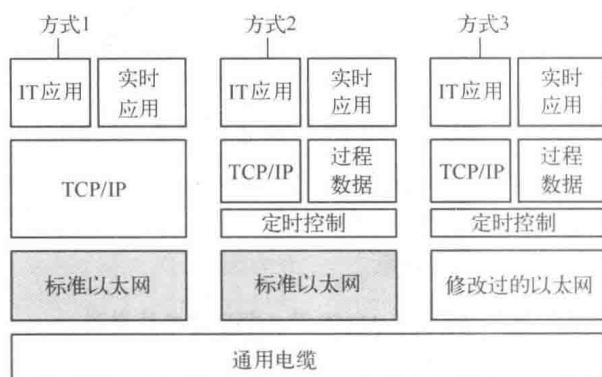


图 1-1 以太网通信模型

1) 基于 TCP/IP 的实现, 如图 1-1 中方式 1。

协议仍使用 TCP/IP 协议栈, 通过上层合理的控制来应对通信中非确定性因素。此时, 实时网络可以与商用网络自由通信。常用的通信控制手段有: 合理调度, 减少冲突的可能性; 定义数据帧的优先级, 为实时数据分配最高的优先级; 使用交换式以太网等。使用这种方式的典型协议有 Modbus/TCP、Ethernet/IP 等。但这种方式不能实现优良的实时性, 只适

用于对实时性要求不高的过程自动化应用。

2) 基于以太网的实现,如图 1-1 中方式 2。

方式 2 仍然使用标准的、未修改的以太网通信硬件,但是不使用 TCP/IP 来传输过程数据。引入了一种专门的过程数据传输协议,使用特定以太类型的以太网帧传输。TCP/IP 协议栈可以通过一个时间控制层分配一定的时间片来使用以太网资源。典型协议有 Ethernet Powerlink、EPA (Ethernet for Plant Automation)、PROFINet RT 等。这种方式可以实现较好的实时性。

3) 修改以太网的实现,如图 1-1 中方式 3。

为了获得响应时间小于 1 ms 的硬实时,对以太网协议进行了修改。从站由专门的硬件实现。在实时通道内采用实时 MAC 方式以接管现有的通信控制方式,彻底避免报文冲突,简化通信数据的处理。非实时数据仍然可以在开放通道内按照原来的协议传输。典型协议有 EtherCAT、SERCOS-III、PROFINet IRT 等。

1.2 EtherCAT 协议概述

EtherCAT 是由德国 BECKHOFF 自动化公司于 2003 年提出的实时工业以太网技术。它具有高速和高数据、有效率的特点,支持多种设备连接的拓扑结构。从站节点使用专用的控制芯片,主站使用标准的以太网控制器。

EtherCAT 的主要特点如下:

1) 适用广泛:任何带商用以太网控制器的控制单元都可作为 EtherCAT 主站,从小型的 16 位处理器到使用 3 GHz 处理器的 PC 系统,任何计算机都可以组成 EtherCAT 控制系统。

2) 完全符合以太网标准:EtherCAT 可以与其他以太网设备及协议并存于同一总线,以太网交换机等标准结构组件可以用于 EtherCAT。

3) 无需从属子网:复杂的节点或只有 2 位的 I/O 节点都可以用作 EtherCAT 从站。

4) 高效率:最大化利用以太网带宽进行用户数据的传输。

5) 刷新周期短:可以达到小于 100 μ s 的数据刷新周期,可以用于伺服技术中底层的闭环控制。

6) 同步性能好:各从站节点设备可以达到小于 1 μ s 的时钟同步精度。

目前,EtherCAT 已经被纳入多种国际相关标准,并成为多个国家的国家标准,举例如下:

1) IEC 61158 中的 Type12;

2) IEC 61784 中的 CPF12 (通信行规集 12);

3) IEC 61800 中,EtherCAT 支持 CANopen DS402 和 SERCOS;

4) ISO 15745 中,EtherCAT 支持 DS301;

5) GB/T 31230.1~.6-2014 《工业以太网现场总线 EtherCAT》,中国国家标准;

6) KSC 61158 中的 Type12,韩国国家标准。

EtherCAT 支持多种设备连接拓扑结构:线形、树形或星形结构,可以选用的物理介质有 100Base-TX 标准以太网电缆或光缆。使用 100Base-TX 电缆时站间距离可以达到 100 m。整个网络最多可以连接 65535 个设备。使用快速以太网全双工通信技术,构成主从式的环形

结构，如图 1-2 所示。

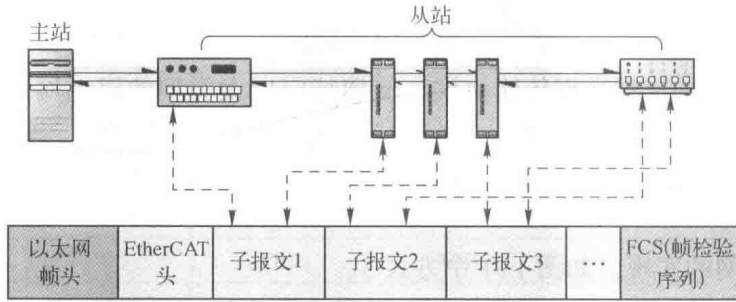


图 1-2 EtherCAT 运行原理

从以太网的角度看，一个 EtherCAT 网段可被简单地看作一个独立的以太网设备。该“设备”接收并发送以太网报文。然而，这个“设备”并没有以太网控制器及相应的微处理器，而是由多个 EtherCAT 从站组成。这些从站可直接处理接收的报文，并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，然后作为响应报文由第一个从站发送给控制单元。这个过程利用了以太网设备能够独立处理双向传输（Tx 和 Rx）的特点，并运行在全双工模式下，发出的报文又通过 Rx 线返回到控制单元。

报文经过从站节点时，从站识别出相关的命令并做出相应的处理。信息的处理在硬件中完成，延迟时间约为 100~500 ns（取决于物理层器件），通信性能与从站设备控制微处理器的响应时间是相互独立的。每个从站设备有最大容量为 64 KB 的可编址内存，可完成连续的或同步的读/写操作。多个 EtherCAT 命令数据可以被嵌入到一个以太网报文中，每个数据对应独立的设备或内存区。

从站设备可以构成多种形式的分支结构，独立的设备分支可以放置于控制柜中或机器模块中，再用主线连接这些分支结构。

EtherCAT 大大提高了现场总线的性能，例如，控制 1000 个开关量输入和输出的刷新时间约为 30 μ s。单个以太网帧最多可容纳 1486 B 的过程数据，相当于 12000 位数字开关量的输入和输出，刷新时间约为 300 μ s。控制 100 个伺服电动机的数据通信周期约为 100 μ s。

EtherCAT 使用一个专门的以太网数据帧类型定义，用以太网数据帧传输 EtherCAT 数据包，也可以使用 UDP/IP 协议格式传输 EtherCAT 数据包。一个 EtherCAT 数据包可以由多个 EtherCAT 子报文组成，如图 1-2 所示。EtherCAT 从站不处理非 EtherCAT 数据帧，其他类型的以太网应用数据可以被分段打包为 EtherCAT 数据子报文在网段内透明传输，以实现相应的通信服务。

第 2 章 EtherCAT 协议

2.1 EtherCAT 系统组成

EtherCAT 是一种实时工业以太网技术，它充分利用了以太网的全双工特性。使用主从模式介质访问控制（MAC），主站发送以太网帧给各从站，从站从数据帧中抽取数据或将数据插入数据帧。主站使用标准的以太网接口卡，从站使用专门的 EtherCAT 从站控制器（EtherCAT Slave Controller, ESC）。EtherCAT 物理层使用标准的以太网物理层器件。

从以太网的角度来看，一个 EtherCAT 网段就是一个以太网设备，它接收和发送标准的 ISO/IEC 8802—3 以太网数据帧。但是，这种以太网设备并不局限于一个以太网控制器及相应的微处理器，它可由多个 EtherCAT 从站组成，如图 2-1 所示。这些从站可以直接处理接收的报文，并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，并将其作为响应报文由第一个从站发送给控制单元。

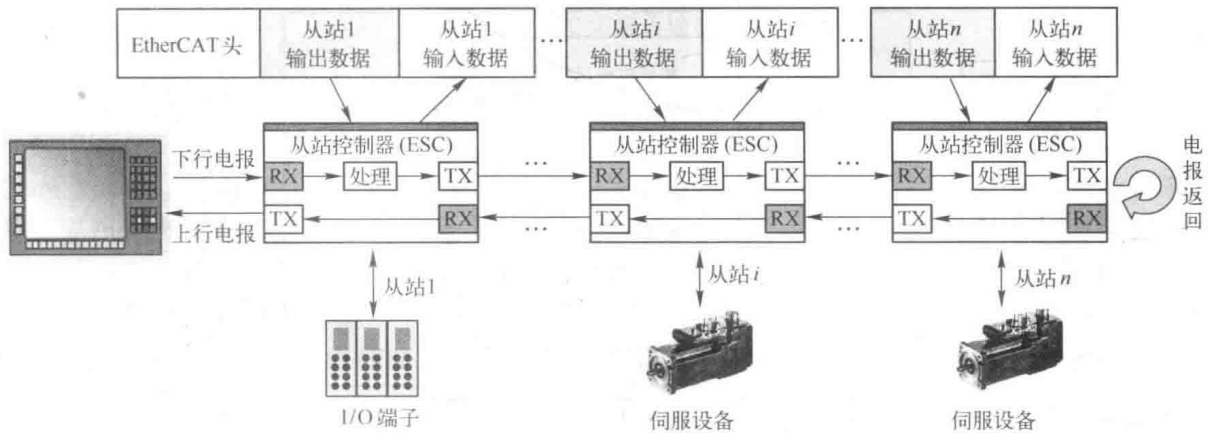


图 2-1 EtherCAT 运行原理

2.1.1 EtherCAT 主站组成

EtherCAT 主站使用标准的以太网控制器，传输介质通常使用 100BASE-TX 规范的 5 类非屏蔽双绞线（UTP, Unshielded Twisted Pair）线缆，如图 2-2 所示。通信控制器完成以太网数据链路的介质访问控制（Media Access Control Twisted Pair, MAC）功能，物理层（PHY）芯片实现数据的编码、译码和收发，它们之间通过一个 MII（Media Independent Interface, 介质无关接口）接口交互数据。MII 是标准的以太网物理层接口，定义了与传输介质无关的标准电气和机械接口，使用这个接口将以太网数据链路层和物理层完全隔离开，使以太网可以方便地选用任何传输介质。隔离变压器实现信号隔离，提高通信的可靠性。

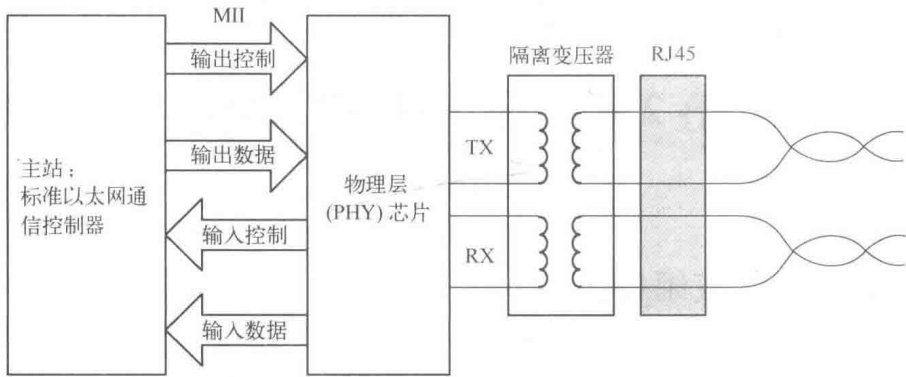


图 2-2 EtherCAT 物理层连接原理图

在基于 PC 的主站中，通常使用网络接口卡（Network Interface Card, NIC），其中的网卡芯片集成了以太网通信控制器和物理数据收发器。而在嵌入式主站中，通信控制器通常被嵌入到微处理器中。

2.1.2 EtherCAT 从站组成

EtherCAT 从站设备同时实现通信和控制应用两部分功能，结构如图 2-3 所示，由以下 4 部分组成。

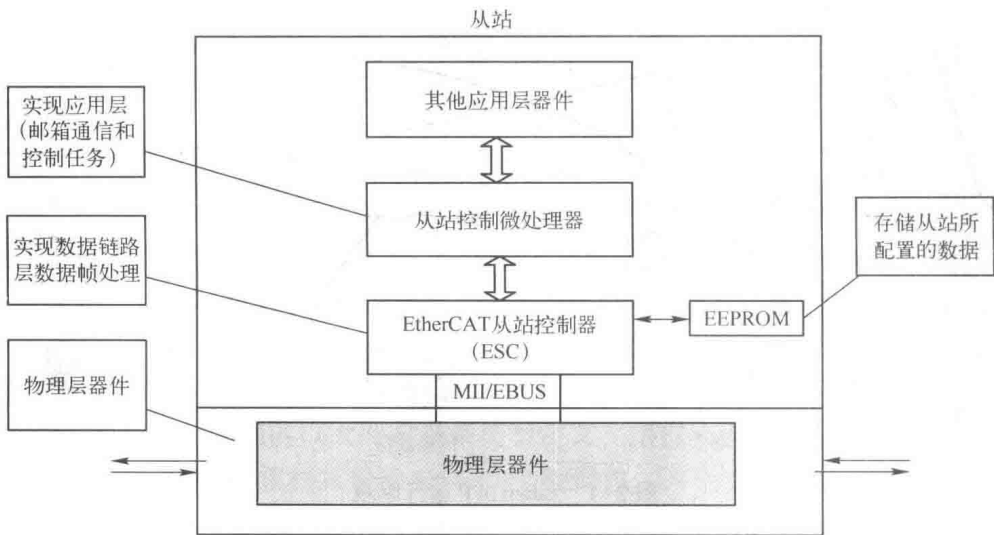


图 2-3 EtherCAT 从站组成

(1) EtherCAT 从站控制器

EtherCAT 从站通信控制器负责处理 EtherCAT 数据帧，并使用双端口存储区实现 EtherCAT 主站和从站本地应用的数据交换。各个 ESC 按照各自在环路上的物理位置顺序移位对数据帧进行读/写处理。在报文经过从站时，ESC 从报文中提取发送给自己的输出命令数据，将其存储到内部存储区，并将输入数据从内部存储区写到相应的子报文中。数据的提取和插入都是由数据链路层硬件完成的。

ESC 具有 4 个数据收发端口，每个端口都可以收发以太网数据帧。数据帧在 ESC 内部

的传输顺序是固定的，如图 2-4 所示。通常，数据从端口 0 进入 ESC，然后按照端口 3→端口 1→端口 2→端口 0 的顺序依次传输。如果 ESC 检测到某个端口没有外部链接，则自动闭合此端口，将自动数据回环并转发到下一端口。一个 EtherCAT 从站设备至少使用两个数据端口，使用多个数据端口可以构成多种物理拓扑结构。

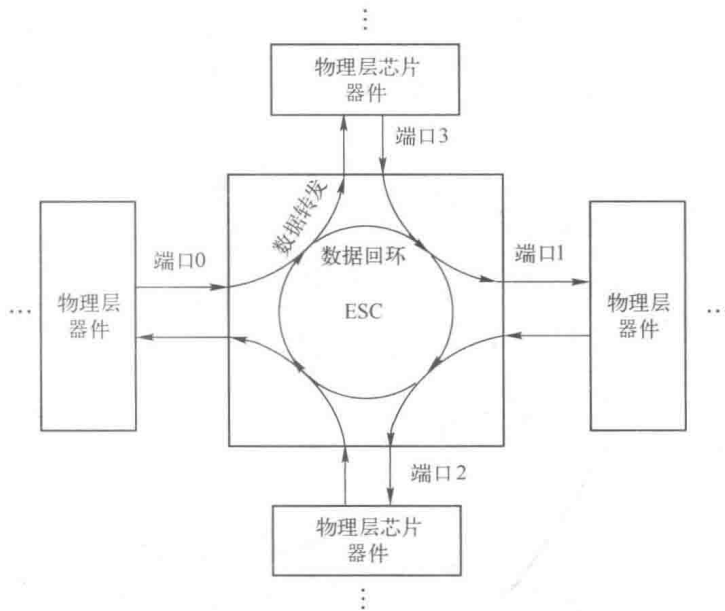


图 2-4 ESC 数据传输顺序

ESC 使用两种物理层接口模式：MII 和 EBUS。MII 是标准的以太网物理层接口，使用外部物理层芯片，一个端口的传输延时约为 500 ns。EBUS 是德国 BECKHOFF 公司使用 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 标准定义的数据传输标准，可以直接连接 ESC 芯片，不需要额外的物理层芯片，从而避免了物理层的附加传输延时，一个端口的传输延时约为 100 ns。EBUS 最大传输距离为 10 m，适用于距离较近的 I/O 设备或伺服驱动器之间的连接。

(2) 从站控制微处理器

从站控制微处理器负责处理 EtherCAT 通信和完成控制任务。微处理器从 ESC 读取控制数据，实现设备控制功能，并对设备的反馈数据进行采样，并将其写入 ESC 后，由主站读取。通信过程完全由 ESC 处理，与设备控制微处理器响应时间无关。从站控制微处理器性能选择取决于设备控制任务，可以使用 8 bit、16 bit 的单片机及 32 bit 的高性能处理器。

(3) 物理层器件

从站使用 MII 接口时，需要使用物理层 (PHY) 芯片和隔离变压器等标准以太网物理层器件。使用 EBUS 时不需要其他任何芯片。

(4) 其他应用层器件

针对控制对象和任务需要，微处理器可以连接其他控制器件。

2.1.3 EtherCAT 物理拓扑结构

在逻辑上，EtherCAT 网段内从站设备的布置构成一个开口的环形总线。在开口的一端，主站设备直接或者通过标准以太网交换机传入以太网数据帧，并在另一端接收经过处理的数

据帧。所有的数据帧都被从第一个从站设备转发到后续的节点。最后一个从站设备将数据帧返回到主站。

EtherCAT 从站的数据帧处理机制允许在 EtherCAT 网段内的任一位置使用分支结构，同时不打破逻辑环路。分支结构可以构成各种物理拓扑，如线形、树形、星形、菊花链形，以及各种拓扑结构的组合，从而使设备连接和布线非常灵活方便。EtherCAT 线形拓扑结构如图 2-5 所示，主站发出数据帧后的传输顺序如图 2-5 中的数字标号所示。图中从站 8 使用了 ESC 的 4 个端口，构成星形拓扑。

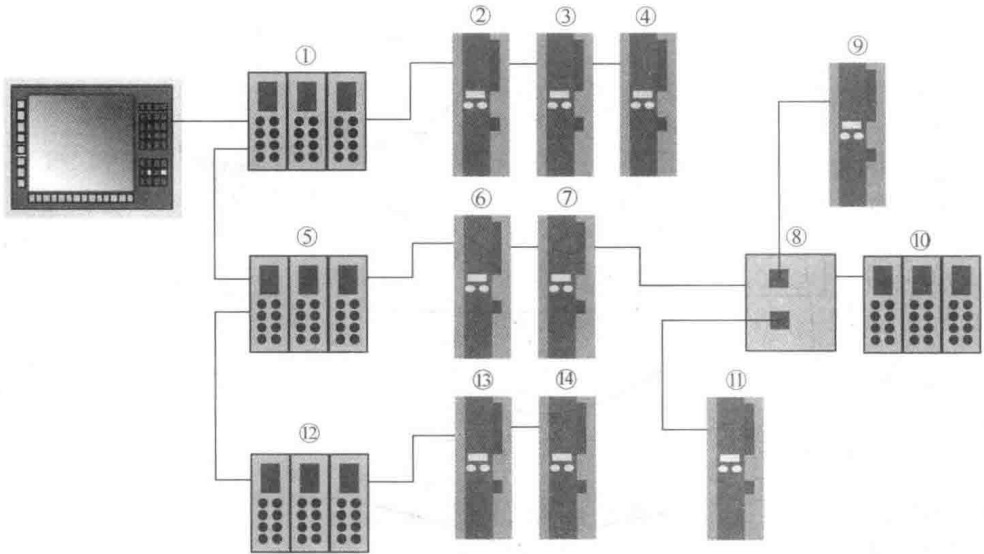


图 2-5 EtherCAT 线形拓扑结构

2.2 EtherCAT 数据帧结构

EtherCAT 数据通过以太网数据帧的形式传输，数据帧中使用帧的类型为 0x88A4。EtherCAT 数据包括 2 B 的数据头和 44~1498 B 的数据。数据区由一个或多个 EtherCAT 子报文组成，如图 2-6 所示，每个子报文对应独立的设备或从站存储区域。表 2-1 给出了 EtherCAT 数据帧结构定义。

表 2-1 EtherCAT 帧结构定义

名称	含义
目的地址	接收方 MAC 地址
源地址	发送方 MAC 地址
帧类型	0x88A4
EtherCAT 头：长度	EtherCAT 数据区长度，即所有子报文长度总和
EtherCAT 头：类型	1 表示与从站通信，其余数据保留
FCS (Frame Check Sequence)	帧校验序列