

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材

现场总线与 工业以太网

Fieldbus and Industrial Ethernet

李正军 李潇然 编著



配套数字资源



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材

现场总线与工业以太网

Fieldbus and Industrial Ethernet

李正军 李潇然 编著
佟为明 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科重点规划教材。

本书是作者在教学与科研实践经验的基础上，结合二十多年现场总线与工业以太网技术的发展编写而成的。全书共 8 章，主要内容包括现场总线与工业以太网概述、网络通信与网络控制器、CAN 现场总线、PROFIBUS 现场总线、CC-Link 现场总线、无线传感网络与物联网技术、嵌入式网络与以太网控制器、工业以太网及其应用技术。

全书内容丰富，体系先进，结构合理，理论联系实际。

本书可作为高等院校各类电子与电气工程、自动化、机电一体化、计算机应用、信息工程、自动检测等专业的本科教材，也适用于从事现场总线与工业以太网控制系统设计的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现场总线与工业以太网 / 李正军, 李潇然编著. —北京: 中国电力出版社, 2018.8

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材

ISBN 978-7-5198-1798-5

I. ①现… II. ①李… ②李… III. ①总线-自动控制系统-高等学校-教材②工业企业-以太网-高等学校-教材 IV. ①TP273②TP393.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 038656 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 乔 莉 (010-63412535) 夏华香 (huaxiang-xia@sgcc.com.cn)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 王英磊

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 8 月第一版

印 次: 2018 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 18

字 数: 440 千字

定 价: 49.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

经过二十多年的发展，现场总线与工业以太网已经成为计算机控制系统设计中重要的工业控制通信网络，并在不同的领域和行业得到了越来越广泛地应用。近几年，无线传感网络与物联网（IoT）技术也融入到工业测控系统中。

本书共 8 章。第 1 章介绍了现场总线与工业以太网的发展趋势、企业网络信息集成系统以及国内外流行的现场总线与工业以太网；第 2 章介绍了网络通信与网络控制器，包括 netX 网络控制器、Anybus CompactCom 嵌入式工业网络通信技术；第 3 章详述了 CAN 控制器局域网的技术规范、CAN 独立通信控制器、CAN 总线收发器、CAN 智能测控节点的设计实例，以 PMM2000 电力网络仪表为例，讲述了现场总线与工业以太网的应用；第 4 章详述了 PROFIBUS 通信协议、PROFIBUS 通信控制器 SPC3 和 ASPC2 及网络接口卡、PROFIBUS-DP 从站智能节点的设计实例；第 5 章讲述了 CC-Link 现场总线，包括 CC-Link 现场网络概述、CC-Link/CC-Link/LT 通信规范、CC-Link 通信协议、CC-Link IE 网络、CC-Link 产品的开发流程、CC-Link 产品的开发方案及未来可视化工厂的解决方案 e-F@ctory；第 6 章讲述了无线传感网络与物联网技术，包括无线传感器网络概述、短距离无线通信技术、物联网技术、ZigBee 无线传感网络和蓝牙通信技术；第 7 章讲述了嵌入式网络与以太网控制器，以具有 SPI 接口的以太网控制器 ENC28J60 和内嵌以太网协议栈的以太网控制器 W5200 为例，讲述了以太网控制器与微控制器的接口设计；第 8 章讲述了 EPA、SERCOS、EtherCAT 和 Ethernet POWERLINK 工业以太网及其应用技术。

本书由山东大学李正军、李潇然编写。本书是作者科研实践和教学的总结，书中实例取自作者二十多年来的现场总线与工业以太网科研攻关课题。本书由哈尔滨工业大学佟为明主审，提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心地感谢。同时，感谢本书中所引用的参考文献的作者。

限于编者水平，加上时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝指正。

编 者

2018 年 5 月

目 录

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 前言 | |
| 第 1 章 现场总线与工业以太网概述 | 1 |
| 1.1 现场总线概述 | 1 |
| 1.2 以太网与工业以太网概述 | 8 |
| 1.3 企业网络信息集成系统 | 13 |
| 1.4 分布式系统 | 17 |
| 1.5 常见现场总线简介 | 20 |
| 1.6 工业以太网简介 | 26 |
| 习题 | 32 |
| 第 2 章 网络通信与网络控制器 | 33 |
| 2.1 网络通信基础 | 33 |
| 2.2 现场控制网络 | 41 |
| 2.3 网络硬件 | 43 |
| 2.4 网络互联 | 46 |
| 2.5 通信参考模型 | 47 |
| 2.6 netX 网络控制器 | 53 |
| 2.7 Anybus CompactCom 嵌入式工业网络通信技术 | 59 |
| 习题 | 67 |
| 第 3 章 CAN 现场总线 | 68 |
| 3.1 CAN 的技术规范 | 68 |
| 3.2 CAN 独立通信控制器 SJA1000 | 80 |
| 3.3 CAN 总线收发器 | 90 |
| 3.4 CAN 总线节点设计实例 | 93 |
| 3.5 CAN 总线智能测控节点的设计 | 95 |
| 3.6 PMM2000 电力网络仪表及其应用 | 97 |
| 习题 | 100 |
| 第 4 章 PROFIBUS 现场总线 | 101 |
| 4.1 PROFIBUS 概述 | 101 |
| 4.2 PROFIBUS 的协议结构 | 103 |
| 4.3 PROFIBUS-DP 现场总线系统 | 104 |

| | | |
|--------------|------------------------------|-----|
| 4.4 | PROFIBUS-DP 的通信模型 | 113 |
| 4.5 | PROFIBUS-DP 的总线设备类型和数据通信 | 124 |
| 4.6 | PROFIBUS 传输技术 | 131 |
| 4.7 | PROFIBUS-DP 从站通信控制器 SPC3 | 133 |
| 4.8 | 主站通信控制器 ASPC2 与网络接口卡 | 143 |
| 4.9 | PROFIBUS-DP 从站的设计 | 145 |
| | 习题 | 147 |
| 第 5 章 | CC-Link 现场总线 | 148 |
| 5.1 | CC-Link 现场网络概述 | 148 |
| 5.2 | CC-Link/CC-Link/LT 通信规范 | 151 |
| 5.3 | CC-Link 通信协议 | 152 |
| 5.4 | CC-Link IE 网络 | 154 |
| 5.5 | CC-Link 产品的开发流程 | 158 |
| 5.6 | CC-Link 产品的开发方案 | 162 |
| 5.7 | 未来可视化工厂的解决方案 e-F@ctory | 167 |
| 5.8 | CC-Link 现场总线的应用 | 170 |
| | 习题 | 172 |
| 第 6 章 | 无线传感网络与物联网技术 | 173 |
| 6.1 | 无线传感器网络概述 | 173 |
| 6.2 | 短距离无线通信技术 | 179 |
| 6.3 | 物联网技术 | 184 |
| 6.4 | 蓝牙通信技术 | 193 |
| 6.5 | ZigBee 无线传感网络 | 203 |
| | 习题 | 208 |
| 第 7 章 | 嵌入式网络与以太网控制器 | 209 |
| 7.1 | TCP/IP 协议的体系结构 | 209 |
| 7.2 | 嵌入式网络协议栈 | 212 |
| 7.3 | 以太网控制器 ENC28J60 与 LwIP 协议的实现 | 213 |
| 7.4 | 以太网控制器 W5200 与数据通信 | 218 |
| | 习题 | 222 |
| 第 8 章 | 工业以太网及其应用技术 | 223 |
| 8.1 | EPA | 223 |
| 8.2 | SERCOS | 241 |
| 8.3 | EtherCAT | 252 |
| 8.4 | Ethernet POWERLINK | 269 |
| | 习题 | 278 |
| | 参考文献 | 280 |

第 1 章 现场总线与工业以太网概述

1.1 现场总线概述

现场总线 (fieldbus) 自产生以来, 一直是自动化领域技术发展的热点之一, 被誉为自动化领域的计算机局域网, 各自动化厂商纷纷推出自己的现场总线产品, 并在不同的领域和行业得到了越来越广泛的应用, 现在已处于稳定发展期。近几年, 无线传感网络与物联网 (IoT) 技术也融入到工业测控系统中。

按照 IEC 对“现场总线”一词的定义, 现场总线是一种应用于生产现场, 在现场设备之间、现场设备与控制装置之间实行双向、串行、多节点数字通信的技术。这是由 IEC/TC65 负责测量和控制系统数据通信部分国际标准化工作的 SC65/WG6 定义的。它作为工业数据通信网络的基础, 沟通了生产过程现场级控制设备之间及其与更高控制管理层之间的联系。它不仅是一个基层网络, 而且还是一种开放式、新型全分布式控制系统。这项以智能传感、控制、计算机、数据通信为主要内容的综合技术, 已受到世界范围的关注而成为自动化技术发展的热点, 并将导致自动化系统结构与设备的深刻变革。

1.1.1 现场总线的产生

在过程控制领域中, 从 20 世纪 50 年代至今一直都在使用着一种信号标准, 那就是 4~20mA 的模拟信号标准。20 世纪 70 年代, 数字式计算机引入到测控系统中, 而此时的计算机提供的是集中式控制处理。20 世纪 80 年代微处理器在控制领域得到应用, 微处理器被嵌入到各种仪器设备中, 形成了分布式控制系统。在分布式控制系统中, 各微处理器被指定一组特定任务, 通信则由一个带有附属“网关”的专有网络提供, 网关的程序大部分是由用户编写的。

随着微处理器的发展和广泛应用, 产生了以 IC 代替常规电子线路, 以微处理器为核心, 实施信息采集、显示、处理、传输及优化控制等功能的智能设备。一些具有专家辅助推断分析与决策能力的数字式智能化仪表产品, 其本身具备了如自动量程转换、自动调零、自校正、自诊断等功能, 还能提供故障诊断、历史信息报告、状态报告、趋势图等功能。通信技术的发展, 促使传送数字化信息的网络技术开始广泛应用。与此同时, 基于质量分析的维护管理、与安全相关系统的测试记录、环境监视需求的增加, 都要求仪表能在当地处理信息, 并在必要时允许被管理和访问, 这些也使现场仪表与上级控制系统的通信量大增。另外, 从实际应用的角度, 控制界也不断在控制精度、可操作性、可维护性、可移植性等方面提出新需求。由此, 导致了现场总线的产生。

现场总线就是用于现场智能化装置与控制室自动化系统之间的一个标准化的数字式通信技术, 可进行全数字化、双向、多站总线式的信息数字通信, 实现相互操作以及数据共享。现场总线的主要目的是用于控制、报警和事件报告等工作。现场总线通信协议的基本要求是响应速度和操作的可预测性的最优化。现场总线是一个低层次的网络协议, 在其之上还允许

有上级的监控和管理网络，负责文件传送等工作。现场总线为引入智能现场仪表提供了一个开放平台，基于现场总线的分布式控制系统（FCS），将是继 DCS 后的又一代控制系统。

1.1.2 现场总线的本质

由于标准实质上并未统一，所以对现场总线也有不同的定义。但现场总线的本质含义主要表现在以下几方面：

(1) 现场通信网络。用于过程以及制造自动化的现场设备或现场仪表互联的通信网络。

(2) 现场设备互连。现场设备或现场仪表是指传感器、变送器和执行器等，这些设备通过一对传输线互连，传输线可以使用双绞线、同轴电缆、光纤和电源线等，并可根据需要因地制宜地选择不同类型的传输介质。

(3) 互操作性。现场设备或现场仪表种类繁多，没有任何一家制造商可以提供工厂所需的全部现场设备，所以，互相连接不同制造商的产品是不可避免的。用户不希望为选用不同的产品而在硬件或软件上花很大力气，而希望选用各制造商性能价格比最优的产品，并将其集成在一起，实现“即接即用”；用户希望对不同品牌的现场设备统一组态，构成所需要的控制回路。这些就是现场总线设备互操作性的含义。现场设备互连是基本要求，只有实现互操作性，用户才能自由地集成 FCS。

(4) 分散功能块。FCS 废弃了 DCS 的输入/输出单元和控制站，把 DCS 控制站的功能块分散地分配给现场仪表，从而构成虚拟控制站。例如，流量变送器不仅具有流量信号变换、补偿和累加输入模块，而且有 PID 控制和运算功能块。调节阀的基本功能是信号驱动和执行，还内含输出特性补偿模块，也可以有 PID 控制和运算模块，甚至有阀门特性自检验和自诊断功能。由于功能块分散在多台现场仪表中，并可统一组态，供用户灵活选用各种功能块，构成所需的控制系统，实现彻底的分散控制。

(5) 现场设备的智能化与功能自治性。它将传感测量、补偿计算、工程量处理与控制等功能分散到现场设备中完成，仅靠现场设备即可完成自动控制的基本功能，并可随时诊断设备的运行状态。

(6) 通信线供电。通信线供电方式允许现场仪表直接从通信线上摄取能量，对于要求本征安全的低功耗现场仪表，可采用这种供电方式。众所周知，化工、炼油等企业的生产现场有可燃性物质，所有现场设备都必须严格遵循安全防爆标准。现场总线设备也不例外。

(7) 开放式互连网络。现场总线为开放式互连网络，它既可与同层网络互联，也可与不同层网络互联，还可以实现网络数据库的共享。不同制造商的网络互联十分简便，用户不必在硬件或软件上花太多精力。通过网络对现场设备和功能块统一组态，把不同厂商的网络及设备融为一体，构成统一的 FCS。

(8) 对现场环境的适应性。工作在现场设备前端，作为工厂网络底层的现场总线，是专为在现场环境工作而设计的，它可支持双绞线、同轴电缆、光缆、射频、红外线、电力线等，具有较强的抗干扰能力，能采用两线制实现送电与通信，并可满足安全防爆要求等。

1.1.3 现场总线的特点和优点

1. 现场总线的结构特点

现场总线打破了传统控制系统的结构形式。

传统模拟控制系统采用一对一的设备连线，按控制回路分别进行连接。位于现场的测量变送器与位于控制室的控制器之间，控制器与位于现场的执行器、开关、电动机之间均为一

对一的物理连接。

现场总线控制系统由于采用了智能现场设备,能够把原先 DCS 系统中处于控制室的控制模块、各输入输出模块置入现场设备,加上现场设备具有通信能力,现场的测量变送仪表可以与阀门等执行机构直接传送信号,因而控制系统功能能够不依赖控制室的计算机或控制仪表,直接在现场完成,实现了彻底的分散控制。现场总线控制系统(FCS)与传统控制系统(如 DCS)结构对比如图 1-1 所示。

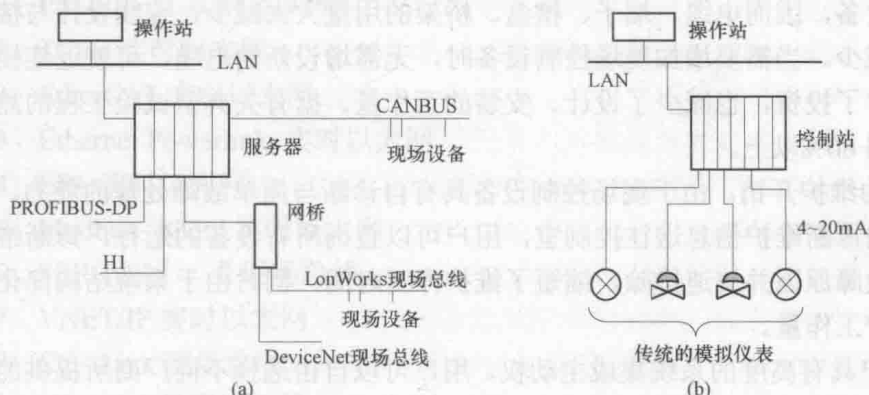


图 1-1 FCS 与 DCS 结构比较

(a) FCS; (b) DCS

由于采用数字信号替代模拟信号,因而可实现一对传输线上传输多个信号,如运行参数值、多个设备状态、故障信息等,同时又为多个设备提供电源,现场设备以外不再需要模拟/数字、数字/模拟转换器件。这样就为简化系统结构、节约硬件设备、节约连接电缆与各种安装、降低维护费用创造了条件。表 1-1 为 FCS 与 DCS 的详细对比。

表 1-1

FCS 和 DCS 的详细对比

| | FCS | DCS |
|------|---|---|
| 结构 | 一对多:一对传输线接多台仪表,双向传输多个信号 | 一对一:一对传输线接一台仪表,单向传输一个信号 |
| 可靠性 | 可靠性好:数字信号传输抗干扰能力强,精度高 | 可靠性差:模拟信号传输不仅精度低,而且容易受干扰 |
| 失控状态 | 操作员在控制室既可以了解现场设备或现场仪表的工作状况,也能对设备进行参数调整,还可以预测或寻找故障,始终处于操作员的远程监视与可控状态之中 | 操作员在控制室既不了解模拟仪表的工作状况,也不能对其进行参数调整,更不能预测故障,导致操作员对仪表处于“失控”状态 |
| 互换性 | 用户可以自由选择不同制造商提供的性能价格比最优的现场设备和仪表,并将不同品牌的仪表互连。即使某台仪表故障,换上其他品牌的同类仪表照样工作,实现“即接即用” | 尽管模拟仪表统一了信号标准 4~20mA DC,可是大部分技术参数仍由制造厂自定,致使不同品牌的仪表无法互换 |
| 仪表 | 智能仪表除了具有模拟仪表的检测、变换、补偿等功能外,还具有数字通信能力,并且具有控制和运算的能力 | 模拟仪表只具有检测、变换、补偿等功能 |
| 控制 | 控制功能分散在各个智能仪表中 | 所有的控制功能集中在控制站中 |

2. 现场总线的优点

由于现场总线的以上特点,特别是现场总线系统结构的简化,使控制系统从设计、安装、货运到正常生产运行及检修维护,都体现出优越性。

(1) 节省硬件数量与投资。由于现场总线系统中分散在设备前端的智能设备能直接执行多种传感、控制、报警和计算功能,因而可减少变送器的数量,不再需要单独的控制器、计算单元等,也不再需要 DCS 系统的信号调理、转换、隔离技术等功能单元及其复杂接线,还可以用工控 PC 机作为操作站,从而节省了一大笔硬件投资,由于控制设备的减少,还可减少控制室的占地面积。

(2) 节省安装费用。现场总线系统的接线十分简单,由于一对双绞线或一条电缆上通常可挂接多个设备,因而电缆、端子、槽盒、桥架的用量大大减少,连线设计与接头校对的工作量也大大减少。当需要增加现场控制设备时,无需增设新的电缆,可就近连接在原有的电缆上,既节省了投资,也减少了设计、安装的工作量。据有关典型试验工程的测算资料,可节约安装费用 60%以上。

(3) 节约维护开销。由于现场控制设备具有自诊断与简单故障处理的能力,并通过数字通信将相关的诊断维护信息送往控制室,用户可以查询所有设备的运行,诊断维护信息,以便早期分析故障原因并快速排除,缩短了维护停工时间,同时由于系统结构简化、连线简单而减少了维护工作量。

(4) 用户具有高度的系统集成主动权。用户可以自由选择不同厂商所提供的设备来集成系统。避免因选择了某一品牌的产品而限制了设备的选择范围,不会为系统集成中不兼容的协议、接口而一筹莫展,使系统集成过程中的主动权完全掌握在用户手中。

(5) 提高了系统的准确性与可靠性。由于现场总线设备的智能化、数字化,与模拟信号相比,它从根本上提高了测量与控制的准确度,减少了传送误差。同时,由于系统的结构简化,设备与连线减少,现场仪表内部功能加强;减少了信号的往返传输,提高了系统的工作可靠性。

此外,由于它的设备标准化和功能模块化,因而还具有设计简单、易于重构等优点。

1.1.4 现场总线标准的制定

数字技术的发展完全不同于模拟技术,数字技术标准的制定往往早于产品的开发,标准决定着新兴产业的健康发展。

IEC TC65(负责工业测量和控制的第 65 标准化技术委员会)于 1999 年底通过的 8 种类型的现场总线作为 IEC 61158 最早的国际标准。

最新的 IEC 61158 Ed.4 标准于 2007 年 7 月出版。

IEC 61158 Ed.4 标准由多个部分组成,主要包括以下内容:

IEC 61158-1 总论与导则

IEC 61158-2 物理层服务定义与协议规范

IEC 61158-300 数据链路层服务定义

IEC 61158-400 数据链路层协议规范

IEC 61158-500 应用层服务定义

IEC 61158-600 应用层协议规范

IEC 61158 Ed.4 标准包括的现场总线类型如下:

Type 1 IEC 61158 (FF 的 H1)

Type 2 CIP 现场总线

Type 3 PROFIBUS 现场总线

- Type 4 P-Net 现场总线
- Type 5 FF HSE 现场总线
- Type 6 SwiftNet 被撤销
- Type 7 WorldFIP 现场总线
- Type 8 INTERBUS 现场总线
- Type 9 FF H1 以太网
- Type 10 PROFINET 实时以太网
- Type 11 TCnet 实时以太网
- Type 12 EtherCAT 实时以太网
- Type 13 Ethernet Powerlink 实时以太网
- Type 14 EPA 实时以太网
- Type 15 Modbus-RTPS 实时以太网
- Type 16 SERCOS I、II 现场总线
- Type 17 VNET/IP 实时以太网
- Type 18 CC-Link 现场总线
- Type 19 SERCOS III 现场总线
- Type 20 HART 现场总线

每种总线都有其产生的背景和应用领域。总线是为了满足自动化发展的需求而产生的，由于不同领域的自动化需求各有其特点，因此在某个领域中产生的总线技术一般对这一特定领域的满足度高一些，应用多一些，适用性好一些。

工业以太网的引入成为新的热点。工业以太网正在工业自动化和过程控制市场上迅速增长，几乎所有远程 I/O 接口技术的供应商均提供一个支持 TCP/IP 协议的以太网接口，如 Siemens、Rockwell、GE Fanuc 等，他们销售各自的 PLC 产品，但同时提供与远程 I/O 和基于 PC 的控制系统相连接的接口。

1.1.5 现场总线的现状

国际电工技术委员会/国际标准协会 (IEC/ISA) 自 1984 年起着手现场总线标准工作，但统一的标准至今仍未完成。同时，世界上许多公司也推出了自己的现场总线技术。但太多存在差异的标准和协议，会给实践带来复杂性和不便性，影响开放性和可互操作性。因而在最近几年里开始标准统一工作，减少现场总线协议的数量，以达到单一标准协议的目标。各种协议标准合并的目的是为了达到国际上统一的总线标准，以实现各家产品的互操作性。

1. 多种总线共存

现场总线国际标准 IEC 61158 Ed.4 中采用了 20 种协议类型。每种总线都有其产生的背景和应用领域。随着时间的推移，占有市场 80% 左右的总线将只有六七种，而且其应用领域比较明确，如 FF、PROFIBUS-PA 适用于冶金、石油、化工、医药等流程行业的过程控制，PROFIBUS-DP、DeviceNet 适用于加工制造业，LonWorks、PROFIBUS-FMS、DeviceNet 适用于楼宇、交通运输、农业。但这种划分又不是绝对的，相互之间又互有渗透。

2. 每种总线各有其应用领域

每种总线都力图拓展其应用领域，以扩张其势力范围。在一定应用领域中已取得良好业绩的总线，往往会进一步根据需要向其他领域发展。如 PROFIBUS 在 DP 的基础上又开发出

PA, 以适用于流程工业。

3. 每种总线各有其国际组织

大多数总线都成立了相应的国际组织, 力图在制造商和用户中创造影响, 以取得更多方面的支持, 同时也想显示出其技术是开放的。如 WorldFIP 国际用户组织、FF 基金会、PROFIBUS 国际用户组织、P-Net 国际用户组织及 ControlNet 国际用户组织等。

4. 每种总线均有其支持背景

每种总线都以一个或几个大型跨国公司为背景, 公司的利益与总线的发展息息相关, 如 PROFIBUS 以 Siemens 公司、ControlNet 以 Rockwell 公司、WorldFIP 以 Alstom 公司为主要支持者。

5. 设备制造商参加多个总线组织

大多数设备制造商都积极参加多个总线组织, 有些公司甚至参加 2~4 个总线组织。道理很简单, 装置是要挂在系统上的。

6. 多种总线均作为国家和地区标准

每种总线大多数将自己作为国家或地区标准, 以加强自己的竞争地位。现在的情况: P-Net 已成为丹麦标准, PROFIBUS 已成为德国标准, WorldFIP 已成为法国标准。上述 3 种总线于 1994 年成为并列的欧洲标准 EN50170, 其他总线也都形成了各组织的技术规范。

7. 工业以太网引入工业领域

工业以太网的引入成为新的热点。工业以太网正在工业自动化和过程控制市场上迅速增长, 几乎所有远程 I/O 接口技术的供应商均提供一个支持 TCP/IP 协议的以太网接口, 如 Siemens、Rockwell、GE Fanuc 等, 他们销售各自的 PLC 产品, 但同时提供与远程 I/O 和基于 PC 的控制系统相连接的接口。从美国 VDC 公司调查结果也可以看出, 在今后 3 年, 以太网的市场占有率将达到 20% 以上。FF 现场总线正在开发高速以太网, 这无疑大大加强了以太网在工业领域的地位。

1.1.6 现场总线网络的实现

现场总线的基础是数字通信, 通信就必须有协议, 从这个意义上来说, 现场总线就是一个定义了硬件接口和通信协议的标准。国际标准化组织 (ISO) 的开放系统互联 (OSI) 协议, 是为计算机互联网而制定的 7 层参考模型, 它对任何网络都是适用的, 只要网络中所要处理的要素是通过共同的路径进行通信。目前, 各个公司生产的现场总线产品没有一个统一的协议标准, 但是各公司在制定自己的通信协议时, 都参考 OSI 7 层协议标准, 且大都采用了其中的第 1 层、第 2 层和第 7 层, 即物理层、数据链路层和应用层, 并增设了第 8 层即用户层。

1. 物理层

物理层定义了信号的编码与传送方式、传送介质、接口的电气及机械特性、信号传输速率等。现场总线有 Manchester 和 NRZ 两种编码方式, 前者同步性好, 但频带利用率低, 后者刚好相反。Manchester 编码采用基带传输, 而 NRZ 编码采用频带传输。调制方式主要有 CPFSK 和 COFSK。现场总线传输介质主要有有线电缆、光纤和无线介质。

2. 数据链路层

数据链路层又分为两个子层, 即介质访问控制层 (MAC) 和逻辑链路控制层 (LLC)。MAC 功能是对传输介质传送的信号进行发送和接收控制, 而 LLC 层则是对数据链进行控制,

保证数据传送到指定的设备上。现场总线网络中的设备可以是主站，也可以是从站，主站有控制收发数据的权利，而从站则只有响应主站访问的权利。

3. 应用层

应用层可以分为两个子层，上面子层是应用服务层（FMS 层），它为用户提供服务；下面子层是现场总线存取层（FAS 层），它实现数据链路层的连接。

应用层的功能是进行现场设备数据的传送及现场总线变量的访问。它为用户应用提供接口，定义了如何应用读、写、中断和操作信息及命令，同时定义了信息、句法（包括请求、执行及响应信息）的格式和内容。应用层的管理功能在初始化期间初始化网络，指定标记和地址。同时按计划配置应用层，也对网络进行控制，统计失败和检测新加入或退出网络的装置。

4. 用户层

用户层是现场总线标准在 OSI 模型之外新增加的一层，是使现场总线控制系统开放与可互操作性的关键。

用户层定义了从现场装置中读、写信息和向网络中其他装置分派信息的方法，即规定了供用户组态的标准功能模块。事实上，各厂家生产的产品实现功能块的程序可能完全不同，但对功能块特性描述、参数设定及相互连接的方法是公开统一的。信息在功能块内经过处理后输出，用户对功能块的工作就是选择“设定特征”及“设定参数”，并将其连接起来。功能块除了输入输出信号外，还输出表征该信号状态的信号。

1.1.7 现场总线技术的发展趋势

发展现场总线技术已成为工业自动化领域广为关注的焦点，国际上现场总线的研究、开发，使测控系统冲破了长期封闭系统的禁锢，走上开放发展的征程，这对我国现场总线控制系统的发展是个极好的机会，也是一次严峻的挑战。现场总线技术是控制、计算机、通信技术的交叉与集成，涉及的内容十分广泛，应不失时机地抓好我国现场总线技术与产品的研究与开发。

自动化系统的网络化是发展的大趋势，现场总线技术受计算机网络技术的影响是十分深刻的。现在网络技术日新月异，发展十分迅猛，一些具有重大影响的网络新技术必将进一步融合到现场总线技术之中，这些具有发展前景的现场总线技术有：

- (1) 智能仪表与网络设备开发的软硬件技术。
- (2) 组态技术，包括网络拓扑结构、网络设备、网络互联等。
- (3) 网络管理技术，包括网络管理软件、网络数据操作与传输。
- (4) 人机接口、软件技术。
- (5) 现场总线系统集成技术。

总体说来，自动化系统与设备将朝着现场总线体系结构的方向前进，但由于这一技术所涉及的应用领域十分广泛，几乎覆盖了所有连续、离散工业领域，如过程自动化、制造加工自动化、楼宇自动化、家庭自动化等。大千世界，众多领域，需求各异，一个现场总线体系下可能不止容纳单一的标准。另外，从以上介绍也可以看出，几大技术均具有自己的特点，已在不同应用领域形成了自己的优势。加上商业利益的驱使，它们都各自正在十分激烈的市场竞争中求得发展。

1.2 以太网与工业以太网概述

1.2.1 以太网技术

20 世纪 70 年代早期, 国际上公认的第一个以太网系统出现于 Xerox 公司的 Palo Alto Research Center (PARC), 它以无源电缆作为总线来传送数据, 在 1000m 的电缆上连接了 100 多台计算机, 并以曾经在历史上表示传播电磁波的以太 (Ether) 来命名, 这就是如今以太网的鼻祖。以太网发展的历史见表 1-2。

表 1-2 以太网的发展简表

| 标准及重大事件 | 标志内容, 时间 (速度) |
|-----------------|---------------------------|
| Xerox 公司开始研发 | 1972 年 |
| 首次展示初始以太网 | 1976 年 (2.94Mbit/s) |
| 标准 DIX V1.0 发布 | 1980 年 (10Mbit/s) |
| IEEE 802.3 标准发布 | 1983 年, 基于 CSMA/CD 访问控制 |
| 10 Base-T | 1990 年, 双绞线 |
| 交换技术 | 1993 年, 网络交换机 |
| 100 Base-T | 1995 年, 快速以太网 (100Mbit/s) |
| 千兆以太网 | 1998 年 |
| 万兆以太网 | 2002 年 |

IEEE 802 代表 OSI 开放式系统互联七层参考模型中一个 IEEE 802.n 标准系列, IEEE 802 介绍了此系列标准协议情况, 主要描述了此 LAN/MAN (局域网/城域网) 系列标准协议概况与结构安排。IEEE 802.n 标准系列已被接纳为国际标准化组织 (ISO) 的标准, 其编号命名为 ISO 8802。以太网的主要标准见表 1-3。

表 1-3 以太网的主要标准

| 标准 | 内容描述 |
|--------------|-----------------------------|
| IEEE 802.1 | 体系结构与网络互联、管理 |
| IEEE 802.2 | 逻辑链路控制 |
| IEEE 802.3 | CSMA/CD 媒体访问控制方法与物理层规范 |
| IEEE 802.3i | 10 Base-T 基带双绞线访问控制方法与物理层规范 |
| IEEE 802.3j | 10 Base-F 光纤访问控制方法与物理层规范 |
| IEEE 802.3u | 100 Base-T、FX、TX、T4 快速以太网 |
| IEEE 802.3x | 全双工 |
| IEEE 802.3z | 千兆以太网 |
| IEEE 802.3ae | 10Gbit/s 以太网标准 |
| IEEE 802.3af | 以太网供电 |
| IEEE 802.11 | 无线局域网访问控制方法与物理层规范 |
| IEEE 802.3az | 100Gbit/s 的以太网技术规范 |

1.2.2 工业以太网技术

人们习惯将用于工业控制系统的以太网统称为工业以太网。如果仔细划分,按照国际电工委员会 SC65C 的定义,工业以太网是用于工业自动化环境、符合 IEEE 802.3 标准、按照 IEEE 802.1D “媒体访问控制 (MAC) 网桥”规范和 IEEE 802.1Q “局域网虚拟网桥”规范、对其没有进行任何实时扩展 (Extension) 而实现的以太网。通过采用减轻以太网负荷、提高网络速度、采用交换式以太网和全双工通信、采用信息优先级和流量控制以及虚拟局域网等技术,到目前为止可以将工业以太网的实时响应时间做到 5~10ms,相当于现有的现场总线。采用工业以太网,由于具有相同的通信协议,能实现办公自动化网络和工业控制网络的无缝连接。

商用以太网设备与工业以太网设备比较,见表 1-4。

表 1-4 商用以太网和工业以太网的比较

| 项目 | 工业以太网设备 | 商用以太网设备 |
|---------|--|----------|
| 元器件 | 工业级 | 商用级 |
| 接插件 | 耐腐蚀、防尘、防水,如加固型 RJ45、DB-9、航空插头等 | 一般 RJ45 |
| 工作电压 | 24V DC | 220V AC |
| 电源冗余 | 双电源 | 一般没有 |
| 安装方式 | DIN 导轨和其他固定安装 | 桌面、机架等 |
| 工作温度 | -40~85℃或 -20~70℃ | 5~40℃ |
| 电磁兼容性标准 | EN 50081-2 (工业级 EMC) EN 50082-2 (工业级 EMC) | 办公室用 EMC |
| MTBF 值 | 至少 10 年 | 3~5 年 |

工业以太网即应用于工业控制领域的以太网技术,它在技术上与商用以太网兼容,但又必须满足工业控制网络通信的需求。在产品的设计时,在材质的选用、产品的强度、可靠性、抗干扰能力、实时性等方面满足工业现场环境的应用。一般而言,工业控制网络应满足以下要求。

(1) 具有较好的响应实时性。工业控制网络不仅要求传输速度快,而且在工业自动化控制中还要求响应快,即响应实时性好。

(2) 可靠性和容错性要求。能安装在工业控制现场,且能够长时间连续稳定运行,在网络局部链路出现故障的情况下,能在很短的时间内重新建立新的网络链路。

(3) 力求简洁。减小软、硬件开销,从而降低设备成本,同时也可以提高系统的健壮性。

(4) 环境适应性要求。包括机械环境适应性(如耐振动、耐冲击)、气候环境适应性(工作温度要求为 -40~85℃,至少为 -20~70℃,并要耐腐蚀、防尘、防水)、电磁环境适应性或电磁兼容性 EMC 应符合 EN50081-2/EN50082-2 标准。

(5) 开放性好。由于以太网技术被大多数的设备制造商所支持,并且具有标准的接口,系统集成和扩展更加容易。

(6) 安全性要求。在易爆可燃的场合,工业以太网产品还需要具有防爆要求,包括隔爆、本质安全。

(7) 总线供电要求。即要求现场设备网络不仅能传输通信信息,而且要能够为现场设备提供工作电源。这主要是从线缆铺设和维护方便考虑,同时总线供电还能减少线缆,降低成本。IEEE 802.3af 标准对总线供电进行了规范。

(8) 安装方便。适应工业环境的安装要求,如采用 DIN 导轨安装。

1.2.3 工业以太网通信模型

工业以太网协议在本质上仍基于以太网技术,在物理层和数据链路层均采用了 IEEE 802.3 标准,在网络层和传输层则采用被称为以太网“事实上的标准”的 TCP/IP 协议簇(包括 UDP、TCP、IP、ICMP、IGMP 等协议),它们构成了工业以太网的低四层。在高层协议上,工业以太网协议通常都省略了会话层、表示层,而定义了应用层,有的工业以太网协议还定义了用户层(如 HSE)。工业以太网与 ISO/OSI 模型分层对照如图 1-2 所示。

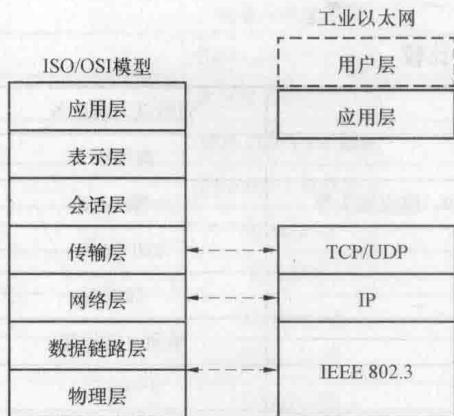


图 1-2 工业以太网与 ISO/OSI 模型分层对照

工业以太网与商用以太网相比,具有以下特征:

(1) 通信实时性。在工业以太网中,提高通信实时性的措施主要包括采用交换式集线器、使用全双工(full-duplex)通信模式、采用虚拟局域网(VLAN)技术、提高服务质量(QoS)、有效的应用任务的调度等。

(2) 环境适应性和安全性。首先,针对工业现场的振动、粉尘、高温和低温、高湿度等恶劣环境,对设备的可靠性提出了更高的要求。工业以太网产品针对机械环境、气候环境、电磁环境等需求,对

线缆、接口、屏蔽等方面做出专门的设计,符合工业环境的要求。

在易燃易爆的场合,工业以太网产品通过包括隔爆和本质安全两种方式来提高设备的生产安全性。

在信息安全方面,利用网关构建系统的有效屏障,对经过它的数据包进行过滤。同时随着加密解密技术与工业以太网的进一步融合,工业以太网的信息安全性也得到了进一步的保障。

(3) 产品可靠性设计。工业控制的高可靠性通常包含三方面内容:

- 1) 可使用性好,网络自身不易发生故障。
- 2) 容错能力强,网络系统局部单元出现故障,不影响整个系统的正常工作。
- 3) 可维护性高,故障发生后能及时发现和及时处理,通过维修使网络及时恢复。

(4) 网络可用性。在工业以太网系统中,通常采用冗余技术以提高网络的可用性,主要有端口冗余、链路冗余、设备冗余和环网冗余。

1.2.4 工业以太网的优势

以太网发展到工业以太网,从技术方面来看,与现场总线相比,工业以太网具有以下优势:

(1) 应用广泛。以太网是目前应用最为广泛的计算机网络技术,受到广泛的技术支持。几乎所有的编程语言都支持 Ethernet 的应用开发,如 Java、Visual C++、Visual Basic 等。这些编程语言由于使用广泛,并受到软件开发商的高度重视,具有很好的发展前景。因此,如

果采用以太网作为现场总线，可以保证有多种开发工具、开发环境供选择。

(2) 成本低廉。由于以太网的应用广泛，受到硬件开发与生产厂商的高度重视与广泛支持，有多种硬件产品供用户选择，硬件价格也相对低廉。

(3) 通信速率高。目前以太网的通信速率为 10、100、1000Mbit/s 和 10Gbit/s，其速率比目前的现场总线快得多，以太网可以满足对带宽有更高要求的需要。

(4) 开放性和兼容性好，易于信息集成。工业以太网因为采用由 IEEE 802.3 所定义的数据传输协议，它是一个开放的标准，从而为 PLC 和 DCS 厂家广泛接受。

(5) 控制算法简单。以太网没有优先权控制意味着访问控制算法可以很简单。它不需要管理网络上当前的优先权访问级。还有一个好处是：没有优先权的网络访问是公平的，任何站点访问网络的可能性都与其他站相同，没有哪个站可以阻碍其他站的工作。

(6) 软硬件资源丰富。大量的软件资源和设计经验可以显著降低系统的开发和培训费用，从而可以显著降低系统的整体成本，并大大加快系统的开发和推广速度。

(7) 不需要中央控制站。令牌环网采用了“动态监控”的思想，需要有一个站负责管理网络的各种家务。传统令牌环网如果没有动态监测是无法运行的。以太网不需要中央控制站，它不需要动态监测。

(8) 可持续发展潜力大。由于以太网的广泛使用，使它的发展一直受到广泛的重视和大量的技术投入，由此保证了以太网技术不断地持续向前发展。

(9) 易于与 Internet 连接。能实现办公自动化网络与工业控制网络的信息无缝集成。

1.2.5 实时以太网

为了满足高实时性能应用的需要，各大公司和标准组织纷纷提出各种提升工业以太网实时性的技术解决方案。这些方案建立在 IEEE 802.3 标准的基础上，通过对其和相关标准的实时扩展提高实时性，并且做到与标准以太网的无缝连接，这就是实时以太网 (Realtime Ethernet, RTE)。

根据 IEC 61784-2-2010 标准定义，实时以太网，就是根据工业数据通信的要求和特点，在 ISO/IEC 8802-3 协议基础上，通过增加一些必要的措施，使之具有实时通信能力：

(1) 网络通信在时间上的确定性，即在时间上，任务的行为可以预测。

(2) 实时响应适应外部环境的变化，包括任务的变化、网络节点的增/减、网络失效诊断等。

(3) 减少通信处理延迟，使现场设备间的信息交互在极小的通信延迟时间内完成。

按照 IEC/TC65/SC65C 的定义，实时以太网属于工业以太网。

IEC 国际标准收录的工业以太网见表 1-5。

表 1-5 IEC 国际标准收录的工业以太网

| 技术名称 | 技术来源 | 应用领域 |
|-------------|------------------------|-----------|
| Ethernet/IP | 美国 Rockwell 公司 | 过程控制 |
| PROFINET | 德国 Siemens 公司 | 过程控制、运动控制 |
| P-NET | 丹麦 Process-Data A/S 公司 | 过程控制 |
| Vnet/IP | 日本 Yokogawa 横河 | 过程控制 |
| TC-net | 东芝公司 | 过程控制 |