



新工科暨卓越工程师教育培养计划电子信息类专业系列教材  
普通高等学校“双一流”建设电子信息类专业特色教材  
丛书顾问/ 郝 跃

XIANCHANG ZONGXIN YU GONGYE YITAIWANG

# 现场总线与工业以太网

■ 编 著 / 李正军 李潇然



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

新工科暨卓越工程师教育培养计划电子信息类专业系列教材

# 现场总线与工业以太网

李正军 李潇然 编著

华中科技大学出版社

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书秉承“新工科”理念,从科研、教学和工程实际应用出发,理论联系实际,全面、系统地讲述了现场总线、工业以太网及其应用系统设计。

本书首次尝试在国内教科书中详细讲述 CAN FD 高速现场总线和在机器人等运动控制领域广泛应用的 EtherCAT 工业以太网。

本书共 10 章,主要包括:现场总线与工业以太网概述, CAN 现场总线, CAN FD 现场总线, CAN FD 应用系统设计, PROFIBUS-DP 现场总线, EtherCAT 工业以太网, EtherCAT 从站控制器 ET1100, 基于 ET1100 的 EtherCAT 从站硬件设计, EtherCAT 主站与伺服驱动器控制应用协议, EtherCAT 从站驱动程序与开发调试。全书内容丰富,体系先进,结构合理,理论与实践相结合,尤其注重工程应用技术。

本书是编者在教学与科研实践经验的基础上,结合现场总线与工业以太网技术的发展编写而成的。

本书可作为各类高等院校自动化、机器人、自动检测、机电一体化、人工智能、电子与电气工程、计算机应用、信息工程等专业的本科教材,也可作为其他相关专业的研究生教材,还可作为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的业务参考书。

### 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. —武汉:华中科技大学出版社,2021.4  
ISBN 978-7-5680-6918-2

I. ①现… II. ①李… ②李… III. ①总线-自动控制系统②工业企业-以太网 IV. ①TP273  
②TP393.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 057247 号

### 现场总线与工业以太网

Xianchang Zongxian yu Gongye Yitaiwang

李正军 李潇然 编著

策划编辑:祖 鹏 王红梅

责任编辑:刘艳花

封面设计:秦 茹

责任校对:李 弋

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉开心印印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:26.75

字 数:646 千字

版 次:2021 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:78.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 编 委 会

顾问 郝 跃(西安电子科技大学)

编委 (按姓氏笔画排名)

万永菁(华东理工大学)

王志军(北京大学)

方 娟(北京工业大学)

尹宏鹏(重庆大学)

尹学锋(同济大学)

刘 爽(电子科技大学)

刘 强(天津大学)

刘有耀(西安邮电大学)

孙闽红(杭州电子科技大学)

杨晓非(华中科技大学)

吴怀宇(武汉科技大学)

张永辉(海南大学)

张朝柱(哈尔滨工程大学)

金湘亮(湖南师范大学)

赵军辉(华东交通大学)

胡立坤(广西大学)

柳 宁(暨南大学)

姜胜林(华中科技大学)

凌 翔(电子科技大学)

唐朝京(国防科技大学)

童美松(同济大学)

曾以成(湘潭大学)

曾庆山(郑州大学)

雷鑑铭(华中科技大学)

经过二十多年的发展,现场总线已经成为工业控制系统中重要的通信网络,并在不同的领域和行业得到了广泛的应用。近几年,无论是在工业生产、电力传输、交通运输,还是在机器人等运动控制领域,工业以太网都得到了迅速发展和应用。

在汽车行业,由于人们对数据传输带宽增加的需求,传统的 CAN 总线由于带宽的限制难以满足这种增加的需求。此外,为了缩小 CAN 网络(最大为 1 Mbit/s)与 FlexRay(最大为 10 Mbit/s)网络的带宽差距,BOSCH 公司于 2011 年推出了 CAN FD 方案。

CAN FD(CAN with Flexible Data-Rate)现场总线具有可变速率且数据长度最大可以为 64 字节的特点,克服了 CAN 现场总线通信速率低且数据长度最大只有 8 字节的缺点。CAN FD 现场总线在工业控制及汽车行业得到了广泛的应用。

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,支持多种设备连接拓扑结构。EtherCAT 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 是一项高性能、低成本、应用简单、拓扑灵活的工业以太网技术,并于 2007 年成为国际标准。EtherCAT 技术协会(EtherCAT Technology Group,ETG)负责推广 EtherCAT 和对该技术的持续研发。

EtherCAT 扩展了 IEEE 802.3 以太网标准,满足了运动控制对数据传输的同步实时要求。它充分利用了以太网的全双工特性,并通过“On Fly”模式提高了数据传输的效率。

EtherCAT 工业以太网技术在全球多个领域得到了广泛应用,如应用于机器控制设备、测量设备、医疗设备、汽车和移动设备以及无数的嵌入式系统中。

本书共分 10 章。第 1 章介绍了现场总线与工业以太网,以及国内外流行的现场总线与工业以太网;第 2 章详述了 CAN 控制器局域网的技术规范、CAN 通信控制器、CAN 收发器和 CAN 智能测控节点的设计实例;第 3 章详述了 CAN FD 通信协议和 CAN FD 控制器 MCP2517FD;第 4 章详述了 CiA601 规范、CAN FD 高速收发器、CAN FD 收发器隔离器件和 MCP2517FD 的应用程序设计;第 5 章详述了 PROFIBUS 通信协议、PROFIBUS 通信控制器 SPC3 和 ASPC2,以及网络接口卡和 PROFIBUS-DP 从站的设计;第 6 章讲述了 EtherCAT 工业以太网、EtherCAT 物理拓扑结构、EtherCAT 数据链路层、EtherCAT 应用层、EtherCAT 系统组成及 KUKA 机器人应用案例;第 7 章首先介绍了 EtherCAT 从站控制器的功能与通信协议,然后详述了 EtherCAT 从站控制器的 BECKHOFF 解决方案、EtherCAT 从站控制器 ET1100、EtherCAT 从站控

制器的数据链路控制、EtherCAT 从站控制器的应用层控制、EtherCAT 从站控制器的存储同步管理、EtherCAT 从站信息接口(SII)和 EtherCAT 分布时钟;第 8 章详述了基于 ET1100 的 EtherCAT 从站总体结构,微控制器与 ET1100 的接口电路设计,ET1100 的配置电路设计,EtherCAT 从站以太网物理层 PHY 器件,10/100BASE-TX/FX 的物理层收发器 KS8721、ET1100 与 KS8721BL 的接口电路,直接 I/O 控制 EtherCAT 从站硬件电路设计;第 9 章讲述了 EtherCAT 主站分类、TwinCAT3 EtherCAT 主站、IgH EtherCAT 主站、IEC 61800-7 通信接口标准、CoE、CANopen 驱动和运动控制设备行规;第 10 章讲述了 EtherCAT 从站驱动和应用程序代码包架构、EtherCAT 从站驱动和应用程序的设计实例、EtherCAT 通信中的数据传输过程、EtherCAT 主站软件的安装和 EtherCAT 从站的开发调试。

本书是编者科研实践和教学的总结,书中实例取自编者二十年的现场总线与工业以太网科研攻关课题。对本书中所引用的参考文献的作者,在此一并向他们表示真诚的谢意。由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者不吝指正。

编 者

2020 年 12 月

华中科技大学出版社

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>1 现场总线与工业以太网概述</b>        | (1)   |
| 1.1 现场总线概述                   | (1)   |
| 1.2 工业以太网概述                  | (9)   |
| 1.3 现场总线简介                   | (16)  |
| 1.4 工业以太网简介                  | (27)  |
| 习题 1                         | (43)  |
| <b>2 CAN 现场总线</b>            | (44)  |
| 2.1 CAN 的特点                  | (44)  |
| 2.2 CAN 的技术规范                | (45)  |
| 2.3 CAN 独立通信控制器 SJA1000      | (55)  |
| 2.4 CAN 总线收发器                | (67)  |
| 2.5 CAN 总线节点的设计实例            | (70)  |
| 习题 2                         | (73)  |
| <b>3 CAN FD 现场总线</b>         | (74)  |
| 3.1 CAN FD 通信协议              | (74)  |
| 3.2 CAN FD 控制器 MCP2517FD     | (84)  |
| 3.3 微控制器与 MCP2517FD 的接口电路    | (110) |
| 习题 3                         | (110) |
| <b>4 CAN FD 应用系统设计</b>       | (112) |
| 4.1 CiA601 工作草案              | (112) |
| 4.2 CAN FD 高速收发器             | (119) |
| 4.3 CAN FD 收发器隔离器件           | (124) |
| 4.4 MCP2517FD 的应用程序          | (128) |
| 习题 4                         | (188) |
| <b>5 PROFIBUS-DP 现场总线</b>    | (189) |
| 5.1 PROFIBUS 概述              | (189) |
| 5.2 PROFIBUS 的协议结构           | (191) |
| 5.3 PROFIBUS-DP 现场总线系统       | (193) |
| 5.4 PROFIBUS-DP 的通信模型        | (201) |
| 5.5 PROFIBUS-DP 的总线设备类型和数据通信 | (214) |
| 5.6 PROFIBUS 通信用 ASICs       | (222) |
| 5.7 PROFIBUS-DP 从站通信控制器 SPC3 | (227) |
| 5.8 主站通信控制器 ASPC2 与网络接口卡     | (241) |
| 5.9 PROFIBUS-DP 从站的设计        | (243) |
| 习题 5                         | (251) |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| <b>6 EtherCAT 工业以太网</b>              | (252) |
| 6.1 EtherCAT 概述                      | (252) |
| 6.2 EtherCAT 物理拓扑结构                  | (254) |
| 6.3 EtherCAT 数据链路层                   | (255) |
| 6.4 EtherCAT 应用层                     | (256) |
| 6.5 EtherCAT 系统组成                    | (259) |
| 6.6 EtherCAT 工业以太网在 KUKA 机器人中的应用案例   | (263) |
| 习题 6                                 | (264) |
| <b>7 EtherCAT 从站控制器 ET1100</b>       | (265) |
| 7.1 EtherCAT 从站控制器概述                 | (265) |
| 7.2 EtherCAT 从站控制器的 BECKHOFF 解决方案    | (278) |
| 7.3 EtherCAT 从站控制器 ET1100            | (284) |
| 7.4 EtherCAT 从站控制器的数据链路控制            | (314) |
| 7.5 EtherCAT 从站控制器的应用层控制             | (319) |
| 7.6 EtherCAT 从站控制器的存储同步管理            | (320) |
| 7.7 EtherCAT 从站信息接口                  | (324) |
| 7.8 EtherCAT 分布式时钟                   | (329) |
| 习题 7                                 | (331) |
| <b>8 基于 ET1100 的 EtherCAT 从站硬件设计</b> | (332) |
| 8.1 基于 ET1100 的 EtherCAT 从站总体结构      | (332) |
| 8.2 微控制器与 ET1100 的接口电路设计             | (333) |
| 8.3 ET1100 的配置电路设计                   | (338) |
| 8.4 EtherCAT 从站以太网物理层 PHY 器件         | (339) |
| 8.5 10/100BASE-TX/FX 的物理层收发器 KS8721  | (341) |
| 8.6 ET1100 与 KS8721BL 的接口电路          | (346) |
| 8.7 直接 I/O 控制 EtherCAT 从站硬件电路设计      | (348) |
| 习题 8                                 | (352) |
| <b>9 EtherCAT 主站与伺服驱动器控制应用协议</b>     | (353) |
| 9.1 EtherCAT 主站的分类                   | (353) |
| 9.2 TwinCAT 3 EtherCAT 主站            | (355) |
| 9.3 IgH EtherCAT 主站                  | (362) |
| 9.4 IEC 61800-7 通信接口标准               | (366) |
| 9.5 CoE                              | (368) |
| 9.6 CANopen 驱动和运动控制设备行规              | (381) |
| 习题 9                                 | (383) |
| <b>10 EtherCAT 从站驱动程序与开发调试</b>       | (385) |
| 10.1 EtherCAT 从站驱动和应用程序代码包架构         | (385) |
| 10.2 EtherCAT 从站驱动和应用程序的设计实例         | (389) |
| 10.3 EtherCAT 通信中的数据传输过程             | (406) |
| 10.4 EtherCAT 主站软件的安装                | (410) |
| 10.5 EtherCAT 从站的开发调试                | (412) |
| 习题 10                                | (418) |
| <b>参考文献</b>                          | (419) |

# 现场总线与工业以太网概述

现场总线技术经过二十多年的发展,现在已进入稳定发展期。近几年,工业以太网技术的研究与应用得到了迅速的发展,其以应用广泛、通信速率高、成本低廉等优势引入工业控制领域,成为新的热点。本章首先对现场总线与工业以太网进行概述,讲述现场总线的产生、现场总线的本质、现场总线的特点、现场总线标准的制定、现场总线的现状和现场总线网络的实现;再讲述以太网技术、工业以太网技术、工业以太网的通信模型、工业以太网的优势、实时以太网和实时工业以太网模型分析;然后介绍比较流行的现场总线 FF、CAN、DeviceNet、LonWorks、PROFIBUS、CC-Link、ControlNet;最后介绍常用的工业以太网 EtherCAT、SERCOS、Ethernet POWERLINK、PROFINET 和 EPA。

## 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,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)技术也融入工业测控系统中。

按照 IEC(国际电工委员会)对现场总线一词的定义,现场总线是一种应用于生产现场,并在现场设备之间、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。现场总线作为工业数据通信网络的基础,建立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,还有一种开放式、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,因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一种信号标准,那就是 4~20 mA 的模拟信号标准。20 世纪 70 年代,数字式计算机引入测控系统中,当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,微处理器被嵌入各种仪器设备中,形成分布式控制系统。在分布式控制系统中,各微处理

器被指定一组特定任务,通信由一个带有附属“网关”的专有网络提供,网关的程序<sup>①</sup>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具备了诸如自动量程转换、自动调零、自校正、自诊断等功能,还提供了故障诊断、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、与安全相关系统测试的记录、环境监视需求的增加都要求仪表能在当地处理信息,并在必要时允许访问和被管理,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链路,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。现场总线主要用于控制、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,在其上还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,基于现场总线的现场总线控制系统(FCS)将是继分散控制系统(DCS)之后的又一代控制系统。

### 1.1.2 现场总线的本质

因为现场总线的标准实质上并未统一,所以现场总线也有不同的定义。现场总线的本质含义主要表现在以下 6 个方面。

#### 1. 现场通信网络

现场通信网络是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. 现场设备互联

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联,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气力,而希望选用各制造商生产的性价比最优的产品,并将它们集成在一起,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。现场设备互联是基本的要求,而只有实现互操作性,用户才能自由地集成 FCS。

<sup>①</sup> 本书涉及的名称、地址和程序中所含英文字母不区分大小写。

#### 4. 分散功能块

FCS 废弃了 DCS 的输入/输出单元和控制站,并把 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,流量变送器不仅有流量信号变换、补偿和累加输入功能块,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,内含输出特性补偿功能块,还有 PID 控制和运算功能块,甚至有阀门特性自检验和自诊断功能块。由于功能块分散在多台现场仪表中,并可统一组态,因此可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. 通信线供电

通信线供电允许现场仪表直接从通信线上摄取能量,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,所以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。

#### 6. 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气力。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。

### 1.1.3 现场总线的特点

#### 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、马达之间均为一对一的物理连接。

现场总线控制系统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,而且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。FCS 与 DCS 结构对比如图 1-1 所示。

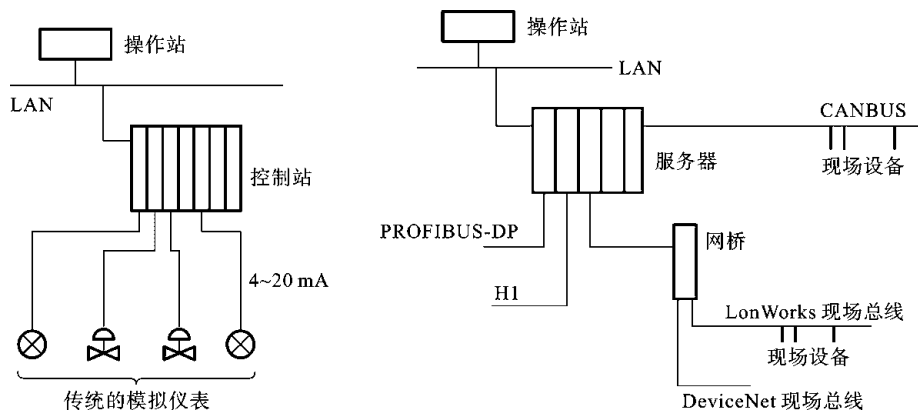


图 1-1 FCS 与 DCS 结构对比

由于采用数字信号替代模拟信号,一对电线上可传输多个信号,如运行参数值、多个设备状态、故障信息等,同时又可为多个设备提供电源,因此现场设备以外不再需要模拟/数字转换器、数字/模拟转换器。这样就为简化系统结构、节省硬件设备、节省连接电缆、节省各种安装与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 与 DCS 的详细对比

| 名称   | 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,又能对设备进行参数调整,还可以预测或寻找故障,工作状况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价比最高的现场设备和仪表,并将不同品牌的仪表互联。即使某台仪表出现故障,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(4~20 mA DC),但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、控制和运算的功能                                    | 模拟仪表只具有检测、变换、补偿等功能                                        |
| 控制   | 控制功能分散在各台智能仪表中                                                                | 所有的控制功能集中在控制站中                                            |

2. 现场总线的技术特点

1) 系统的开放性

系统的开放性是指通信协议公开,不同厂家的设备之间可进行互联以实现信息交换,现场总线开发者致力于建立统一的工厂底层网络的开放系统。这里的开放性是指对相关标准的一致性、公开性,强调对标准的共识与遵从。一个开放系统可以与任何遵守相同标准的其他设备或系统相连。一个具有总线功能的现场总线网络系统必须是开放的,开放系统把系统集成的权利交给了用户,用户可按自己的需要把来自不同供应商的产品组成大小随意的系统。

2) 互可操作性与互用性

互可操作性是指实现互联设备间、系统间的信息传送与沟通,可实现点对点、一点对多点的数字通信。互用性是指不同厂家生产的性能类似的设备因进行互换而实现互用。

3) 现场设备的智能化与功能自治性

现场设备的智能化与功能自治性是指将传感测量、补偿计算、工程量处理与控制等功能分散到现场设备中,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。

#### 4) 系统结构的高度分散性

现场设备本身可完成自动控制的基本功能,使得现场总线构成一种新的全分布式控制系统的体系结构。现场总线从根本上改变了 DCS 集中与分散相结合的集散控制系统体系,简化了系统结构,提高了可靠性。

#### 5) 对现场环境的适应性

作为工厂网络底层的现场总线工作在现场设备前端,是专为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功能,并可满足本质安全防爆要求等。

### 3. 现场总线的优点

现场总线和技术特点,特别是现场总线系统结构的简化,使控制系统从设计、安装、投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

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、隔离等功能单元及其复杂接线;还可使用工业控制 PC 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,还可以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接多个设备,因此电缆、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,可节省 60% 以上的安装费用。

#### 3) 节省维护开销

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,因此用户可以查询所有设备的运行和诊断维护信息,以便分析故障原因并快速排除故障,这样就缩短了维护、停工时间。同时因系统结构简化、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提供的设备来集成系统,避免因选择某一品牌的产品而“框死”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,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

由于现场总线设备具有智能化、数字化特性,与模拟信号相比,现场总线从根本上提高了测量与控制的准确率,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,所以现场总线减少了信号的往返传输,提高了系统工作的可靠性。

此外,由于现场总线的设备标准化和功能模块化,因此其还具有设计简单、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。国际电工委员会(IEC)、国际标准协会(ISA)自1984年着手现场总线标准的制定工作,但统一的标准至今仍未完成。

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。

- (1) IEC 61158-1,总论与导则。
- (2) IEC 61158-2,物理层服务定义与协议规范。
- (3) IEC 61158-300,数据链路层服务定义。
- (4) IEC 61158-400,数据链路层协议规范。
- (5) IEC 61158-500,应用层服务定义。
- (6) IEC 61158-600,应用层协议规范。

IEC 61158 Ed.4标准包含的现场总线类型如下。

- (1) Type 1,IEC 61158(FF的H1)。
- (2) Type 2,CIP现场总线。
- (3) Type 3,PROFIBUS现场总线。
- (4) Type 4,P-Net现场总线。
- (5) Type 5,FF HSE现场总线。
- (6) Type 6,SwiftNet被撤销。
- (7) Type 7,WorldFIP现场总线。
- (8) Type 8,INTERBUS现场总线。
- (9) Type 9,FF H1以太网。
- (10) Type 10,PROFINET实时以太网。
- (11) Type 11,TCnet实时以太网。
- (12) Type 12,EtherCAT实时以太网。
- (13) Type 13,Ethernet Powerlink实时以太网。
- (14) Type 14,EPA实时以太网。
- (15) Type 15,Modbus-RTPS实时以太网。
- (16) Type 16,SERCOS I、SERCOS II现场总线。
- (17) Type 17,VNET/IP实时以太网。
- (18) Type 18,CC-Link现场总线。
- (19) Type 19,SERCOS III现场总线。
- (20) Type 20,HART现场总线。

每种现场总线都有其产生的背景和应用领域。现场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现场

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。

### 1.1.5 现场总线的现状

世界上许多公司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,影响开放性和可互操作性。因此,国际电工技术委员会、国际标准协会开始着手标准统一的工作,减少现场总线协议的数量,以达到单一标准协议的目的。各种协议标准统一的目的是达到国际上统一的现场总线标准,以实现各家产品的互操作性。

#### 1. 多种现场总线共存

现场总线在 IEC 61158 中采用了 8 种协议类型以及其他一些现场总线。每种现场总线都有其产生的背景和应用领域。现场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现场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。随着时间的推移,占有市场 80% 左右的现场总线将只有六七种,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. 每种现场总线均有其应用领域

每种现场总线均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现场总线,往往会根据需要进一步向其他领域发展。如 PROFIBUS 在 DP 的基础上又开发出 PA,以适用于流程工业。

#### 3. 每种现场总线均有其国际组织

大多数现场总线均成立了相应的国际组织,力图在制造商和用户中创造影响,以获得更多方面的支持,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. 每种现场总线均有其支持背景

每种现场总线均以一个或几个大型跨国公司为背景,公司的利益与现场总线的发展息息相关,如 PROFIBUS 以 Siemens 公司为主要支持,ControlNet 以 Rockwell 公司为主要背景,WorldFIP 以 Alstom 公司为主要后台。

#### 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不止一个现场总线组织,有些甚至参加 2~4 个现场总线组织。道理很简单,装置是要挂在系统上的。

#### 6. 各种现场总线大多将自己作为国家或地区标准

各种现场总线大多将自己作为国家或地区标准,以加强自己的竞争地位。现在的情况是,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。这 3 种总线于 1994 年成为并列的欧洲标准 EN50170,其他总线也都形成各组织的技术规范。

## 7. 协调共存

在激烈的竞争中,现场总线标准出现了协调共存的前景。这种现象在欧洲标准制定时就出现过,欧洲标准 EN50170 在制定时将德国、法国、丹麦 3 个标准并列于一卷之中,形成欧洲的多现场总线的标准体系,后又将 ControlNet 和 FF 加入欧洲标准体系。各重要企业除了力推自己的现场总线产品之外,也都力图开发接口技术,将自己的现场总线产品与其他现场总线相连接,如施耐德公司开发的设备能与多种现场总线相连接。在国际标准中,也出现了协调共存的局面。

## 8. 以太网引入工业领域

以太网引入工业领域成为新的热点。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,这些供应商销售各自的 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,以太网的市场占有率将持续增加。FF 现场总线正在开发高速以太网,这无疑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,从这个意义上讲,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,只要网络中所处理的要素是通过共同的路径进行通信的。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 的 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、接口的电气与机械特性、信号传输速率等。现场总线有两种编码方式:Manchester 和 NRZ。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,NRZ 编码采用频带传输。现场总线调制方式主要有 CPFSK 和 COFSK 两种。现场总线传输介质主要有有线电视、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(MAC)层和逻辑链路控制(LLC)层。MAC 层是对传输介质传送的信号进行发送和接收控制,LLC 层是对数据链路进行控制,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,而从站只有响应主站访问的权利。

关于 MAC 层,目前有以下三种协议。

(1) 集中式轮询协议:其基本原理是网络中有主站,主站周期性地轮询各个节点,被轮询的节点允许与其他节点通信。

(2) 令牌总线协议:这是一种多主站协议,主站与主站之间以令牌传送协议进行工作,持有令牌的站可以轮询其他站。

(3) 总线仲裁协议:其机理类似于多机系统中并行总线的管理机制。

### 3. 应用层

应用层可以分为两个子层:上面的子层是应用服务层,它为用户提供服务;下面的子层是现场总线存取层,它用于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,统计加入网络失败的装置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。

## 1.2 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)中,它以无源电缆作为总线来传送数据,在 1000 m 的电缆上连接了 100 多台计算机,并以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。以太网的发展如表 1-2 所示。

表 1-2 以太网的发展

| 标准及重大事件         | 时 间    | 内容(速度)            |
|-----------------|--------|-------------------|
| Xerox 公司开始研发    | 1972 年 | —                 |
| 首次展示初始以太网       | 1976 年 | 2.94 Mbit/s       |
| 标准 DIX V1.0 发布  | 1980 年 | 10 Mbit/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(100 Mbit/s) |
| 千兆以太网           | 1998 年 | —                 |
| 万兆以太网           | 2002 年 | —                 |