

新编《信息、控制与系统》系列教材

Industrial Data Communication and Control Networks

工业数据通信与控制网络

阳宪惠 编著

Yang Xianhui

徐用懋 魏庆福 审

Xu Yongmao Wei Qingfu



TUP
清华大学出版社



Springer

工业数据通信与控制网络

主编 阳宪惠

清华大学出版社

内 容 提 要

本书力图全面展现工业数据通信与控制网络的技术概貌,从介绍网络、通信的基础知识入手,较深入地描述了多种现场总线各自的技术特点、规范、通信控制芯片、接口电路以及控制网络的设计与应用,详细讨论了基于 FF, CAN, Profibus, LonWorks 以及工业以太网的控制网络技术与系统,介绍了已被列入 ISO, IEC 国际标准的 13 种现场总线。全书从不同角度共涉及有发展前景和实力的控制网络技术约 20 种,并介绍了工业数据交换中的 OPC 技术,反映了工业数据通信与控制网络领域近年来的技术发展。

全书图文并茂,立足应用。可作为大专院校自动化、电机、机械、石油化工等专业中与测量控制应用相关的课程的教材和教学参考书,也可作为控制网络系统设计和应用人员的培训教材。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

工业数据通信与控制网络/阳宪惠著. —北京:清华大学出版社,2003
(新编《信息、控制与系统系》列教材/郑大钟,王一玲主编)
ISBN 7-302-06292-7

I. 工… II. 阳… III. 数据通信—控制网络教材 IV. TN919.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007619 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.com.cn>

责任编辑: 马幸兆

印 刷 者: 北京国马印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 31.5 **字数:** 648 千字

版 次: 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06292-7/TP·4757

印 数: 0001~5000

定 价: 45.00 元

新编《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

信息、控制与系统学科是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的一门新兴技术科学。在人类探索自然和实现现代化的进程中,信息、控制与系统学科的理论、方法和技术始终起着重要的和基础的作用。基于信息、控制与系统科学的自动化的发展和应用水平在一定意义上是一个国家和社会的现代化程度的重要标志之一。本系列教材是关于信息、控制与系统学科所属各个领域的基本理论和前沿技术的一套高等学校系列教材。

本系列教材所涉及的范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、智能控制、过程和运动控制、传感技术、系统工程、机器人控制、工业自动化、计算机控制和仿真、网络化系统、电子技术等方面。主要读者对象为自动控制、工业自动化、计算机科学与技术、电气工程、机械工程、化工工程和热能工程等系科有关的高年级大学生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

10 多年前,清华大学出版社会同清华大学自动化系,曾经组编出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了较大的社会影响,其中多数著作获得过包括国家级教学成果奖和部委优秀教材奖在内的各种奖励,至今仍为国内众多院校所采用,并被广大相关领域科技人员作为进修和自学读物。我们现在组编的这套新编《信息、控制与系统》系列教材,从一定意义上说,就是先前那套教材的延伸和发展,以反映近些年来学科的发展和在科学研究与教学实践上的新成果和新进展,以适应当前科技发展和教学改革的新形势和新需要。列入这套新编系列教材中的著作,大多是清华大学自动化系开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上的新编著的教材,也有部分原系列教材的更新和修订版本。这套新编系列教材总体上仍将保持原系列教材求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新近进展,力求做到学科先进性和教学适用性统一。需要说明的是,此前我们曾以《信息技术丛书》为名组编这套教材,并已出版了若干种著作。现为使“书”和“名”更为相符,这些已出版的著作将在重印或再版时列入这套新编系列教材。

我们希望,这套新编系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和教学适用的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会
2002 年 6 月

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

顾 主 编	问 编 委	李衍达	吴 澄	边肇祺	王桂增		
		郑大钟					
		徐文立	王 雄	萧德云	杨士元	肖田元	
		张贤达	周东华	钟宜生	张长水	王书宁	
		范玉顺	蔡鸿程				
责任编辑		王一玲					

前 言

工业数据通信与控制网络是近年来发展形成的自控领域的网络技术,是计算机网络、通信技术与自控技术结合的产物。随着自动控制、计算机、通信、网络等技术的发展,企业的信息集成系统正在迅速壮大,将覆盖从现场控制到监控、市场、经营管理的各个层次以及从原料采购到生产加工的各个环节,并将一直延伸到成品储运销售乃至世界各地市场的供需链全过程,以适应企业管理控制一体化的应用需求。企业信息系统的发展对工业数据通信的开放性、底层控制网络的功能及性能都提出了更高的要求,也促进了该项技术的发展。

现场总线作为当今自动化领域的热点技术,已逐渐为人们所认知。《现场总线技术及其应用》一书自 1999 年出版,至今已 5 次印刷,发行近两万册,从一个侧面反映了该项技术的发展势头。本书是《现场总线技术及其应用》一书的姐妹篇,它扩充了许多自 1998 年以来新近出现和有发展前景的技术内容,例如工业以太网、汽车内部网络、第 3 代 LonWorks 技术、控制网络中的互联网技术等,并囊括了已被列入 ISO, IEC 国际标准的 13 种现场总线以及其他一些有影响、有实力的控制网络技术。随着技术的不断发展,该领域的技术内容不断丰富,已形成较为完整的工厂底层网络系统与控制系统,不再局限于通信标准与通信技术。鉴于“现场总线”一词无论是中文还是英文,都难以完整地表达控制网络现今的技术内涵,因而本书冠名《工业数据通信与控制网络》。希望本书能对我国工业数据通信与控制网络领域的研究开发与技术培训起到积极的推动作用。

全书共分 11 章。第 1,2,3,4,6,9,10,11 章由清华大学阳宪惠编写;第 8 章由航天信息股份有限公司的陈懿、徐琳华、孙葆青编写;第 5 章的 2~4 节、第 6 章的第 10 节和第 7 章主要章节的内容取自《现场总线技术及其应用》一书的相关章节,原编写者分别是清华大学的张文学、杨佃福、邓丽曼。重庆英特莱科技有限公司万定钦高级工程师对 6.10.3 节进行了改编。上述编著者近年来都在工业数据通信与控制网络领域从事研究开发工作,收集整理了大量国内外资料,本书是编著者成果的集中体现。

本书在编写过程中,得到了清华大学徐用懋教授、中国航天科工集团公司魏庆福教授的关心与指导,他们对全文作了认真审阅,并提出了修改意见。空军指挥学院张自维教授参与了本书的部分编写整理工作。本书还得到了清华大学自动化系的有关领导、专家学者以及清华大学 985 教材编写基金的支持,在此一并致以诚挚的谢意。

由于编著者水平有限,工业数据通信与控制网络技术正处于发展之中,本书编写中的缺陷在所难免,恳请读者批评指正。

阳宪惠
2003 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工业数据通信与控制网络概述	1
1.1.1 控制网络与现场总线	1
1.1.2 工业数据通信	2
1.1.3 早期的总线技术	3
1.2 网络集成式控制系统	6
1.2.1 控制系统的新型结构	6
1.2.2 网络集成式控制系统的特点	7
1.2.3 控制系统对网络的要求	9
1.3 控制网络在企业网络系统中的地位与作用	9
1.3.1 企业网络系统的层次结构	9
1.3.2 控制网络的地位与作用	10
1.3.3 控制网络与上层网络的连接方式	11
1.4 控制网络的发展与标准化	13
第 2 章 数据通信基础	15
2.1 工业数据通信系统的基本组成	15
2.1.1 数据通信系统是硬软件的结合体	15
2.1.2 广义通信系统模型	15
2.1.3 发送与接收设备	16
2.1.4 传输介质	16
2.1.5 通信软件	17
2.2 通信系统的性能指标	18
2.2.1 有效性指标	18
2.2.2 可靠性指标	19
2.2.3 通信信道的频率特性	20
2.2.4 介质带宽	20
2.2.5 信道容量	21
2.2.6 信噪比对信道容量的影响	21
2.3 数据编码	22

2.3.1	数字编码波形	23
2.3.2	模拟数据编码	26
2.4	数据传输方式	27
2.4.1	串行传输和并行传输	27
2.4.2	同步传输与异步传输	28
2.4.3	位同步、字符同步与帧同步	29
2.5	通信线路的工作方式	30
2.5.1	单工通信	30
2.5.2	半双工通信	30
2.5.3	全双工通信	30
2.6	信号的传输模式	31
2.6.1	基带传输	31
2.6.2	载波传输	31
2.6.3	宽带传输	31
2.6.4	异步转移模式 ATM	31
2.7	差错控制	32
2.7.1	差错的检测方法	32
2.7.2	差错的纠正方法	33
2.7.3	CRC 检错码的工作原理	33
2.7.4	自动重发	35
第 3 章	控制网络基础	37
3.1	计算机网络	37
3.2	控制网络	38
3.2.1	控制网络的节点	38
3.2.2	控制网络的任务与工作环境	39
3.2.3	控制网络的实时性要求	39
3.3	网络拓扑	40
3.3.1	环形拓扑	41
3.3.2	星形拓扑	41
3.3.3	总线拓扑	42
3.3.4	树形拓扑	42
3.4	网络的传输介质	43
3.4.1	双绞线	43
3.4.2	同轴电缆	43
3.4.3	光缆	44

3.4.4 无线通信	46
3.5 网络传输介质的访问控制方式	46
3.5.1 载波监听多路访问/冲突检测	47
3.5.2 介质访问控制的令牌方式	48
3.5.3 时分复用	51
3.6 网络互联	51
3.6.1 网络互联的基本概念	51
3.6.2 网络互联规范	52
3.6.3 网络互联与操作系统	52
3.6.4 控制网络互联	53
3.7 网络互联的通信参考模型	53
3.7.1 开放系统的互联参考模型	53
3.7.2 OSI 参考模型的功能划分	54
3.7.3 几种典型控制网络的通信模型	55
3.8 网络互联设备	57
3.8.1 中继器	57
3.8.2 网桥	58
3.8.3 路由器	60
3.8.4 网关	61
第 4 章 通用串行端口的数据通信	63
4.1 串行通信	63
4.1.1 串行通信帧的起始、停止位	63
4.1.2 连接握手	64
4.1.3 确认	64
4.1.4 中断	65
4.1.5 轮询	65
4.1.6 差错检验	65
4.2 EIA-232-D 的接口标准	67
4.2.1 接口的机械特性	67
4.2.2 接口的电气特性	67
4.2.3 接口的功能特性	68
4.2.4 EIA-232-D 的规程特性	68
4.2.5 DB-9 连接器	70
4.2.6 EIA-232-D 端口的直接连接	70
4.3 EIA-485	71

4.3.1	EIA-485 的技术参数	71
4.3.2	EIA-485 的内部电路	72
4.4	EIA-485 的端口连接	73
4.4.1	EIA-485 的半双工连接	73
4.4.2	EIA-485 的全双工连接	75
4.4.3	EIA-232 到 EIA-485 端口的转换	75
4.5	EIA-485 的网络连接	76
4.5.1	网络的机械电气接口	76
4.5.2	网络拓扑	77
4.5.3	添加地线	77
4.5.4	电气隔离	77
4.5.5	屏蔽与接地	79
4.6	485 网络的主从式通信管理	79
4.6.1	主从协议	79
4.6.2	通用串行协议	80
4.6.3	Modbus 与 Modbus Plus	81
第 5 章	CAN 通信技术与汽车内部网络	84
5.1	CAN 与汽车网络简介	84
5.2	CAN 通信技术	86
5.2.1	CAN 的通信参考模型	86
5.2.2	CAN 的报文传送与帧结构	87
5.2.3	错误类型和界定	94
5.2.4	位定时与同步	95
5.2.5	CAN 总线介质装置	97
5.3	CAN 通信控制器	101
5.3.1	CAN 通信控制器 82C200	101
5.3.2	SJA1000CAN 通信控制器	113
5.3.3	Intel 82527CAN 通信控制器	117
5.3.4	带有 CAN 通信控制器的 CPU	119
5.4	CAN 总线收发器与 I/O 器件	123
5.4.1	CAN 总线收发器 82C250	123
5.4.2	CAN 总线 I/O 器件 82C150	126
5.5	SAE J1939 汽车内部网络	127
5.5.1	汽车内部网络	127
5.5.2	SAE J1939 规范	127

5.5.3	J1939 的物理连接与网络拓扑	129
5.5.4	J1939 报文帧的格式与定义	129
5.5.5	ECU 的设计说明	132
5.5.6	多网段车辆网络与网络管理	135
第 6 章	FF 通信技术与控制网络	137
6.1	FF 的技术特色	137
6.1.1	FF 的主要技术	137
6.1.2	通信系统的主要组成部分及其相互关系	140
6.1.3	协议数据的构成与层次	142
6.1.4	FF 网络通信中的虚拟通信关系	142
6.2	物理层及控制网络的物理连接	145
6.2.1	物理层的功能	145
6.2.2	物理层的结构	146
6.2.3	传输介质	146
6.2.4	FF 的物理信号波形	147
6.2.5	基金会现场总线的信号编码	147
6.2.6	H1 网段的拓扑结构	149
6.3	FF 的链路活动调度	150
6.3.1	链路活动调度器 LAS 及其功能	150
6.3.2	通信设备类型	151
6.3.3	数据链路协议数据单元 DLPDU	152
6.3.4	链路活动调度器的工作过程	154
6.3.5	数据传输的连接方式	155
6.3.6	链路时间	156
6.4	总线访问子层的功能与服务	157
6.4.1	FF 通信关系中的端点角色	157
6.4.2	通信传输路径与触发策略	159
6.4.3	通信关系的建立方式	160
6.4.4	端点的综合特性	161
6.4.5	总线访问子层的服务及其参数	162
6.4.6	总线访问子层的协议数据单元	164
6.5	现场总线报文规范子层	165
6.5.1	对象字典	166
6.5.2	虚拟现场设备	168
6.5.3	联络关系管理	170

6.5.4	变量访问对象及其服务	170
6.5.5	事件服务	171
6.5.6	“域”的上载或下载服务	172
6.5.7	程序调用服务	172
6.5.8	FMS 协议数据单元及其编码	173
6.6	网络管理	175
6.6.1	网络管理者与网络管理代理	175
6.6.2	网络管理代理虚拟现场设备	177
6.6.3	NMA 对象与相应的对象服务	177
6.6.4	通信实体	180
6.7	系统管理	181
6.7.1	系统管理概述	181
6.7.2	系统管理的作用	184
6.7.3	系统管理信息库 SMIB 及其访问	185
6.7.4	SMK 状态	186
6.7.5	系统管理服务 and 作用过程	187
6.7.6	地址与地址分配	191
6.8	功能块应用进程	193
6.8.1	功能块的内部结构与功能块连接	193
6.8.2	功能块应用进程中的用户应用块	196
6.8.3	块参数	197
6.8.4	功能块服务	202
6.8.5	功能块的对象字典	203
6.8.6	功能块的应用进程	204
6.9	设备描述与设备描述语言	205
6.9.1	设备描述	205
6.9.2	设备描述的参数分层	206
6.9.3	设备描述语言	207
6.9.4	设备描述 DD 的开发	208
6.9.5	CFF 文件	210
6.10	FF 通信控制器与网卡	211
6.10.1	FF 通信控制器的功能	211
6.10.2	基金会现场总线通信控制器芯片	213
6.10.3	基于 FB3050 通信控制器的网卡设计	229
6.11	FF 的网络布线与安装	233
6.11.1	H1 网段的构成	233

6.11.2	总线供电与网络配置	235
6.11.3	网络的连接长度	237
6.11.4	网络的接地、屏蔽与极性	239
6.11.5	H1 网络的常见故障及检测工具	240
6.12	FF 应用系统	242
6.12.1	FF 应用系统的设计	242
6.12.2	FF 应用系统的组态	243
6.12.3	FF 应用系统的投运	245
6.12.4	H1 与其他异构网段的集成应用	246
第 7 章	PROFIBUS	248
7.1	概述	248
7.1.1	PROFIBUS 基本特性	249
7.1.2	PROFIBUS-DP	254
7.1.3	PROFIBUS-PA	262
7.1.4	PROFIBUS-FMS	265
7.2	PROFIBUS 通信协议	268
7.2.1	PROFIBUS 与 ISO/OSI 参考模型	268
7.2.2	PROFIBUS 设备配置	270
7.2.3	面向连接的数据交换顺序图	291
7.3	PROFIBUS 的实现	295
7.3.1	DP 从站单片的实现	296
7.3.2	智能化 FMS 和 DP 从站的实现	296
7.3.3	复杂的 FMS 和 DP 主站的实现	297
7.3.4	PA 现场设备的实现	297
7.4	PROFIBUS 控制器 ASPC2	298
7.4.1	概述	298
7.4.2	功能概要	299
7.4.3	引脚描述	303
7.4.4	ASIC 接口	306
7.4.5	处理器接口	311
7.4.6	串行总线接口	315
7.4.7	封装(P-MQFP100)	317
7.4.8	举例	317
7.4.9	PROFIBUS 接口	319
7.5	PROFINet	322

第 8 章 LonWorks 控制网络	325
8.1 LonWorks 技术概述及应用系统结构	325
8.1.1 LonWorks 控制网络的基本组成	326
8.1.2 LonWorks 节点	327
8.1.3 路由器	328
8.1.4 LonWorks internet 连接设备	329
8.1.5 网络管理	329
8.1.6 LonWorks 技术的性能特点	331
8.2 LonWorks 网络中分散式通信控制处理器——神经元芯片	332
8.2.1 处理单元	332
8.2.2 存储器	334
8.2.3 输入输出	334
8.2.4 通信端口	337
8.2.5 时钟系统	339
8.2.6 睡眠-唤醒机制	339
8.2.7 Service Pin	340
8.2.8 Watchdog 定时器	340
8.3 通信	340
8.3.1 双绞线收发器	340
8.3.2 电力线收发器	345
8.3.3 其他类型介质	348
8.3.4 路由器	348
8.4 LonWorks 通信协议——LonTalk	354
8.4.1 LonTalk 协议概述	354
8.4.2 LonTalk 协议的物理层通信协议	357
8.4.3 LonTalk 协议的网络地址结构及对大网络的支持	357
8.4.4 LonTalk MAC 子层	359
8.4.5 LonTalk 协议的链路层	361
8.4.6 LonTalk 协议的网络层	361
8.4.7 LonTalk 协议的传输层和会话层	361
8.4.8 LonTalk 协议的表示层和应用层	362
8.4.9 LonTalk 协议的网络管理和网络诊断	362
8.4.10 LonTalk 协议的报文服务	362
8.4.11 LonTalk 网络认证	363
8.5 面向对象的编程语言——Neuron C	363

8.5.1	定时器	364
8.5.2	网络变量	364
8.5.3	显式报文	366
8.5.4	调度程序	368
8.5.5	附加功能	368
8.6	LonWorks 的互操作性	369
8.6.1	LonMark 协会	369
8.6.2	收发器和物理信道准则	370
8.6.3	应用程序准则	370
8.7	LonWorks 节点开发工具	375
8.7.1	LonBuilder 多节点开发工具	375
8.7.2	NodeBuilder 节点开发工具	375
8.8	LNS 网络操作系统	376
8.8.1	概述	376
8.8.2	LNS 网络工具	378
8.9	应用系统	380
8.9.1	LonWorks 技术在楼宇自动化抄表系统中的应用	380
8.9.2	LonWorks 技术在炼油厂原油罐区监控系统中的应用	383
8.9.3	LonWorks 在某铝电解厂槽控机中的应用	385
第 9 章	工业以太网	390
9.1	工业以太网简介	390
9.1.1	工业以太网与以太网	390
9.1.2	工业以太网解决非确定性问题的措施	392
9.1.3	以太网的通信帧结构与数据封装	393
9.2	以太网的物理层与 MAC 子层	395
9.2.1	IEEE802.3 与以太网	395
9.2.2	以太网物理层	395
9.2.3	以太网和 IEEE802 的帧格式	396
9.3	TCP/IP 协议组	398
9.3.1	TCP/IP 协议组的构成	398
9.3.2	IP 协议	399
9.3.3	用户数据报协议	403
9.3.4	传输控制协议 TCP	404
9.3.5	简单网络管理协议 SNMP	406
9.4	EtherNet/IP	408

9.4.1	EtherNet/IP 的通信参考模型	408
9.4.2	CIP 的对象与标识	409
9.4.3	EtherNet/IP 的报文种类	411
9.4.4	EtherNet/IP 的技术特点	411
9.5	高速以太网 HSE	412
9.5.1	HSE 的系统结构	412
9.5.2	HSE 与现场设备间的通信	412
9.5.3	HSE 的柔性功能块	414
9.5.4	HSE 的链接设备	415
9.6	基于 Web 技术的远程监控	415
9.6.1	Web 技术简介	415
9.6.2	基于 Web 的远程监控系统	417
9.6.3	Web 嵌入式工控节点及其远程监控	418
9.6.4	Web 服务器独立式远程监控系统	419
第 10 章	几种控制网络的特色技术	421
10.1	ControlNet	421
10.1.1	并行时间域多路存取	421
10.1.2	ControlNet 的 MAC 帧结构	422
10.1.3	通信调度的时间分片方法	423
10.1.4	ControlNet 的虚拟令牌	424
10.1.5	ControlNet 的显性报文与隐性报文	425
10.2	WorldFIP	425
10.2.1	WorldFIP 技术简介	425
10.2.2	WorldFIP 通信	426
10.2.3	WorldFIP 的通信控制器	427
10.2.4	新一代 FIP	430
10.3	Interbus 的通信特色	430
10.3.1	Interbus 简介	430
10.3.2	识别周期与数据传输工作周期	431
10.3.3	Interbus 的数据环单总帧协议	432
10.3.4	Interbus 的总线适配控制板	433
10.4	ASI 控制网络	434
10.4.1	ASI 的网络构成	434
10.4.2	ASI 的主从通信	435
10.4.3	ASI 的报文格式	436

10.4.4	主节点的通信功能	436
10.4.5	从节点的通信接口	438
10.5	DeviceNet	440
10.5.1	DeviceNet 技术简介	440
10.5.2	DeviceNet 的通信参考模型	441
10.5.3	DeviceNet 的物理层和物理媒体	441
10.5.4	DeviceNet 的对象模型	442
10.5.5	DeviceNet 的连接与连接标识	442
10.5.6	DeviceNet 的通信方式	444
10.5.7	DeviceNet 的设备描述	445
10.6	几种总线技术简介	446
10.6.1	SwiftNet	446
10.6.2	HART	447
10.6.3	智能分布式系统 SDS	450
10.6.4	Seriplex	451
10.6.5	消费电子总线 CEBus 与 X-10	451
10.6.6	光总线	452
10.7	蓝牙无线微微网	454
10.7.1	蓝牙技术简介	454
10.7.2	蓝牙微微网与主从设备	455
10.7.3	蓝牙协议和应用行规	456
10.7.4	蓝牙设备的通信连接	457
10.7.5	蓝牙设备的状态与状态转移	459
10.7.6	蓝牙的安全管理	460
10.7.7	蓝牙基带控制器芯片 MT1020A	460
10.7.8	蓝牙应用系统	462
10.8	控制网络的比较与选择	463
第 11 章	工业数据通信中的 OPC 技术	465
11.1	OPC 技术简介	465
11.2	COM/DCOM	466
11.3	OPC 服务器的对象与接口	467
11.3.1	OPC 服务器对象	467
11.3.2	OPC 接口	468
11.4	OPC 服务器的类型	471
11.4.1	OPC 数据访问服务器	471