



高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

工业通信网络 技术和应用

主编 许勇



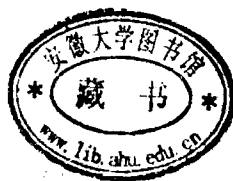
西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

工业通信网络技术和应用

主编 许 勇

参编 梁 勇 于新业



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍通信技术在现代工业企业中的发展和应用的基础知识。全书共分为 8 章。第 1 章介绍工业通信的特点和基本情况；第 2 章则深入讨论工业通信系统所需要的基础知识；在第 3 章介绍了计算设备和元件之间实际的总线接口技术知识；第 4 章开始介绍工控机与测控仪器接口总线；第 5 章中系统介绍了工业设备之间常用的通信技术；第 6 章则是与工业设备联网相关的工业现场总线介绍；第 7 章重点介绍了 CAN Bus 及其在汽车上的应用，同时也介绍了汽车联网的相关技术；第 8 章介绍工业以太网技术及应用。

通过系统讲述工业通信领域的主要内容，并且以汽车联网的应用为重点介绍工业通信系统的实现手段和技术细节，本书为从事和学习工业设备通信技术的读者提供了尽可能有用的内容。

本书适合自动化、控制、电子工程和检测技术等专业的本科生及研究生使用，也适合从事相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业通信网络技术和应用/许勇主编. —西安：西安电子科技大学出版社，2013 1
高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2958-2

I ① 工… II ① 许… III ① 工业—通信网—高等学校—教材
IV. ① TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 011532 号

策 划 邵汉平

责任编辑 邵汉平 段 蕾

出版发行 西安电子科技大学出版社（西安市太白南路 2 号）

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 23.5

字 数 560 千字

印 数 1~3000 册

定 价 40.00 元

ISBN 978-7-5606-2958-2 / TN

XDUP 3250001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

信息技术和通信技术的发展，给工业自动化生产方式和生产系统带来了深刻的变化。工业设备之间的通信技术和工业网络技术发展极快，企业的自动化生产逐步走向综合自动化。现代企业的自动化系统，实际上成为一个生产监控管理组件通过通信互相联系的集成系统。

随着工业系统走向分布化和网络化，通信技术和网络技术成为工业自动化技术的核心内容之一。通信是信息的交换，而工厂生产管理系统和生产控制单元之间，控制中心与各种生产设备之间的信息流通道成为工业企业的命脉。对通信技术和数据传输的理解也是学生学习和理解将来需要面对的生产系统的基础。

现代自动化系统发展极快，分布式控制系统除了在传统的制造业得到大力发展以外，还延伸到了许多新的领域，如商业领域里的售货机、金融服务业的 ATM、运输业的物流设备、汽车和火车、居住小区建筑的门禁监控系统等等。以嵌入式处理器为核心的智能设备和模块越来越多地出现，几乎社会生活生产各个领域都有分布的自动化设备在为人们服务和工作，完成着信息采集、处理、传输以及优化控制等功能。人们对设备之间的通信和控制有了更高的要求，特别是速度、精度、可靠性以及可维护性等。由此，对设备通信网络的要求很快超出了现有现场总线的能力，要求更快、更灵活、更多样、更开放也更可控。

目前的设备间通信，除了传统现场总线的特点，还出现以下的新趋势：

- (1) 自动化系统的内容扩大，对信息交换的内容要求也在多样化；
- (2) 随着监控系统的普及，传输多媒体信息的要求增加，网络传输的带宽要求也在增加；
- (3) 形式多样化，各种形式的无线通信用于设备通信，比如 RFID 技术和传感器网络的普及；
- (4) 应用环境和场合多元化，随着物联网概念的广泛传播，设备通信技术的研究和发展成为通信技术的热点。

反映到对高校教学的要求，特别是对于电子工程和自动化专业的本科生及研究生教学，就必须在教学中反映这个现实，教材也需要充实和更新，以适应时代与技术的发展。

本书就是要在“现场总线”课程内容的基础上，覆盖更基础和应用更广泛的工业通信技术内容，反映工业自动化技术应用现实，使得我们的课程能帮助学生在将来的工作实践中合理地、有效地解决设备间的信息交换问题，能有效地设计和应用现代工业通信系统。

本书可作为高等院校自动化及电子工程相关专业本科或研究生的教材，高职、高专用作教材时可适当节选，也可作为广大工程技术人员学习工业通信基础理论及应用系统的参考书。

本书共分 8 章，梁勇负责编写第 4 章，于新业负责编写第 8 章，其余各章由许勇编写；许勇负责全书通稿。本书在编写过程中得到很多技术人员和机构的帮助，桂林电子科技大学汽车电子研究室和桂林电子科技大学信息科技学院汽车电子专业的老师和同学们参与了本书的准备和校对工作，在此向他们表示衷心的感谢。此外，作者还参考了大量国内外文献资料，对原作者和原整理者也一并表示诚挚谢意。

本书的课堂教授时间建议至少 48 学时，所有内容完全讲授需要 72 学时。根据不同专业和不同的层次要求，选用章节和学时分配可以不同。实验和课程设计学时可以根据实验室硬件条件另行安排。

工业通信网络技术内容广泛而且发展迅速，我们尽量在提供系统的基本技术知识的基础上，介绍实际有用的内容。力有未逮之处，欢迎大家提出批评建议。

作 者

2012 年 6 月

目 录

第 1 章 工业通信概论 1	2.5 工业通信系统的可靠性59
1.1 信息和通信的原理..... 1	2.5.1 常用的差错控制技术.....59
1.1.1 信息和信息的度量..... 1	2.5.2 工业现场的干扰及对系统的影响和 电磁兼容性.....61
1.1.2 信息的交换——通信..... 4	2.5.3 硬件抗干扰技术..... 65
1.2 通信系统的基本概念..... 5	2.5.4 通信系统的接地和电源..... 71
1.2.1 通信系统的基本模型..... 5	第 3 章 总线接口技术介绍 74
1.2.2 通信系统的分类..... 6	3.1 总线概述..... 74
1.2.3 模拟通信系统和数字通信系统..... 9	3.1.1 总线和总线规范..... 74
1.3 工业通信系统概要..... 12	3.1.2 总线的分类..... 76
1.3.1 工业通信系统的发展..... 12	3.1.3 总线的组成和性能指标..... 79
1.3.2 工业通信网的要求和特点..... 17	3.1.4 总线的工作过程..... 81
1.3.3 工业通信系统的发展趋势..... 19	3.2 常用的内部总线..... 84
1.3.4 常用的工业通信系统..... 21	3.2.1 I2C 总线..... 85
1.3.5 常用的现场总线技术..... 23	3.2.2 SPI 总线..... 88
1.4 通信协议和协议参考模型..... 29	3.2.3 UART/SCI 总线..... 91
1.4.1 通信协议概述..... 29	3.2.4 其他通用串行总线..... 92
1.4.2 OSI 参考模型中的有关术语..... 30	3.3 PC 总线..... 93
1.4.3 通信系统互连参考模型..... 32	3.3.1 PC 总线概述..... 94
第 2 章 数据通信原理及基础 37	3.3.2 早期的 PC 系列总线..... 97
2.1 通信系统概述..... 37	3.3.3 PCI 总线..... 100
2.1.1 通信系统的基本概念..... 37	3.3.4 新一代 PC 总线..... 103
2.1.2 数据传输信道..... 39	3.3.5 其他计算机系统总线..... 111
2.1.3 接口和接口标准..... 40	3.4 显卡和显卡的通信接口..... 116
2.2 信号与数据的传输..... 40	3.4.1 显卡的发展..... 116
2.2.1 信号..... 40	3.4.2 显卡与系统的连接..... 118
2.2.2 数据的传输..... 43	第 4 章 工控机与测控仪器接口总线 128
2.3 信道及其主要技术指标..... 46	4.1 概述..... 128
2.3.1 信道基础知识..... 46	4.2 早期的工控机总线技术..... 129
2.3.2 数据通信系统的性能指标..... 47	4.2.1 STD 总线..... 130
2.3.3 工业通信传输媒体..... 50	4.2.2 PC/104 总线..... 131
2.4 信号的传输..... 53	4.2.3 VME 总线..... 133
2.4.1 通信线路的连接方式..... 53	4.2.4 1553B 总线..... 137
2.4.2 数据传输的同步技术..... 55	4.3 CompactPCI..... 141
2.4.3 信道的多路复用..... 58	

4.3.1 CompactPCI 的出现.....	141	6.2.4 现场总线控制系统中的功能模块	238
4.3.2 CompactPCI 总线标准.....	142	6.3 LonWorks	242
4.4 测量仪器总线	146	6.3.1 LonWorks 的技术特点.....	242
4.4.1 电子测量仪器和测量仪器总线 的发展	147	6.3.2 LonWorks 的技术构成.....	243
4.4.2 传统的测试总线	150	6.3.3 LonWorks 网络的节点.....	245
4.4.3 PXI 总线.....	156	6.3.4 LonWorks 支持软件系统组件.....	248
4.4.4 LXI 总线.....	161	6.4 Profibus 技术及其应用.....	249
4.4.5 未来的趋势——混合总线的 测试系统	168	6.4.1 Profibus 概述	249
第 5 章 工业通信用技术	171	6.4.2 Profibus 的通信协议.....	251
5.1 串行通信技术及其发展	171	6.4.3 Profibus 的实现.....	259
5.1.1 串行通信接口标准(EIA/RS 系列)....	171	6.4.4 PROFINet	262
5.1.2 RS-485 总线	175	6.4.5 应用系统	268
5.2 高速串行接口总线	178	6.5 其他常用现场总线	276
5.2.1 高速串行总线的出现	178	第 7 章 CAN Bus 和汽车网络	280
5.2.2 FireWire 串行总线(IEEE 1394).....	179	7.1 汽车电子技术及通信	280
5.2.3 USB 接口总线.....	182	7.1.1 简述	280
5.2.4 IEEE 1394 和 USB 的比较及 USB 的发展.....	190	7.1.2 汽车通信网络标准	282
5.3 工业无线技术	193	7.1.3 车辆的内部通信	283
5.3.1 无线通信基础	193	7.1.4 车辆的外部通信	283
5.3.2 无线局域网技术	197	7.2 CAN 总线基础.....	284
5.3.3 常用无线网络协议	201	7.2.1 CAN 总线概述	284
5.3.4 射频识别技术(RFID)及其应用.....	214	7.2.2 CAN 协议	286
5.4 电力线通信技术	216	7.2.3 CAN 通信系统组成.....	292
5.4.1 电力线通信技术介绍	216	7.2.4 CAN 的应用层.....	294
5.4.2 电力线通信技术原理	218	7.3 车辆网络协议 SAE J1939.....	297
5.4.3 电力线通信面临的特殊问题	220	7.3.1 J1939 协议概述	297
5.4.4 电力线通信的应用	222	7.3.2 J1939 协议的物理层和数据链 路层	300
第 6 章 常用的工业现场总线	224	7.3.3 J1939 应用层	302
6.1 现场总线概述	224	7.4 其它常用的汽车总线通信技术	308
6.1.1 现场总线的本质和特点	224	7.4.1 车辆诊断和诊断通信	308
6.1.2 现场总线的标准化	225	7.4.2 低速总线 LIN 通信.....	318
6.1.3 现场总线的发展趋势	227	7.4.3 汽车线控技术和 FlexRay.....	319
6.2 基金会总线(FF).....	229	7.4.4 其他协议	323
6.2.1 基金会总线概述	229	7.5 车辆无线通信技术.....	324
6.2.2 FF 通信模型的组成及相互关系.....	231	7.5.1 GPS 及其应用	324
6.2.3 FF 的系统组成.....	236	7.5.2 车辆的远程通信和 GPRS 技术	329
		7.6 车联网技术及其发展	333
		7.6.1 车联网的组成	334

7.6.2 车联网应用及功能扩展	338	8.3 以太网的工业应用	355
第 8 章 工业以太网技术及应用	341	8.3.1 应用系统	355
8.1 以太网基础	341	8.3.2 工业以太网在控制领域中的应用	356
8.1.1 以太网和工业以太网的发展	341	8.3.3 工业以太网系统组网	357
8.1.2 以太网通信协议	343	8.4 嵌入式 Web 技术在控制系统中的	
8.1.3 工业以太网的应用层	345	应用研究	362
8.1.4 以太网的组件	348	8.4.1 传统控制系统与 Web 控制	
8.2 工业以太网的发展	350	系统比较	362
8.2.1 以太网的优点	350	8.4.2 嵌入式 Web 技术在工业现场中	
8.2.2 以太网应用于工业现场存在的		的具体实现方式	364
主要问题	351	8.4.3 嵌入式 Web 技术发展展望	366
8.2.3 工业以太网技术的发展	352	参考文献	368

第1章

工业通信概论

信息和通信技术的发展,给工业自动化生产方式和生产系统带来了深刻的变化,企业的制造生产逐步走向综合自动化,现代企业的自动化系统,实际上成为一个生产监控管理组件通过通信互相联系的集成系统。

现代的分布式控制系统除了传统的制造业得到大力发展以外,还延伸到了许多新的领域。例如,以嵌入式处理器为核心的智能设备和控制器现在广泛应用于商业领域里的售货机、金融服务业的ATM(Automatic Teller Machine,自动柜员机)、运输业的物流设备、汽车和火车、居住小区建筑的门禁监控系统等。几乎在社会生活生产的各个领域都有自动化设备在为人们服务和工作,完成着信息采集、处理、传输以及优化控制等功能。相应地,对自动化设备之间的通信、控制,在速度、精度、可靠性以及可维护性方面都有了更高的要求。

随着自动化系统走向分布化和网络化,通信技术和网络技术就成为自动化技术的核心内容之一。通信是信息的交换,而工厂生产管理系统和生产控制单元之间,控制中心与各种生产设备之间的信息流通道成为工业企业的命脉。对通信技术和数据传输的理解也是认识和掌握生产系统的基础。

1.1 信息和通信的原理

信息通常是指对客观事物状态变化的描述,依赖于具体的客观事实。人们通过信息认识与理解客观的事物和系统,进而控制和管理客观事物和系统。

通信就是信息的传递,通信过程就是信息的发送方(信源)通过信道把信息传送到接收方(信宿)的过程。

1.1.1 信息和信息的度量

1. 信息论介绍

对于信息的含义,不同的人有不同的理解,在不同的语境里也有不同的意义。但被较广泛地接受的还是来自信息论的创始人香农(C.E.Shannon)的说法:“信息是人们对事物了解不确定性的减少或消除”,以及控制论创始人维纳(N.Weiner)的说法:“信息是人与外界相互作用的过程中,同外部世界相互交换的内容的名称”。而在工业自动化系统领域,“信息是对象状态的映射,通常以经过加工的数据形式出现。它对接收者有用,对决策或行为有现实或潜在的价值”。

现代通信技术的发展导致了关于现代通信技术的理论——信息论的诞生。香农为解决

通信技术中的信息编码问题，把发送信息和接收信息作为一个整体的通信过程来研究，提出通信系统的一般模型，同时建立了信息量的统计公式，奠定了信息论的理论基础。1948年香农发表的《通信的数学理论》一文，成为信息论诞生的标志。

香农创立信息论，也是在前人研究的基础上完成的。比如哈特莱(R.V.Hartley)在1922年发表名为《信息传输》的文章，首先提出消息是代码、符号，而不是信息内容本身，使信息与消息区分开来，并提出用消息可能数目的对数值来度量消息中所含有的信息量，为信息论的创立提供了思路。

信息论还研究信道的容量、消息的编码与调制的问题以及噪声与滤波的理论等方面的内容，也研究语义信息、有效信息和模糊信息等方面的问题。

信息方法具有普适性，信息概念具有普遍意义，它已经广泛地渗透到社会的各个领域。信息论可以分成两种：狭义信息论与广义信息论。狭义信息论是关于通信技术的理论，是用数理统计的方法研究信息处理、信息变换和信息传输的科学，研究信息源、信宿、信道及编码等问题。广义信息论则超出了通信技术的范围来研究信息问题，把信息定义为物质在相互作用中表征外部情况的一种普遍属性，它是一种物质系统的特性以一定形式在另一种物质系统中的再现。广义信息论以各种系统、各门科学中的信息为对象，广泛地研究信息的本质和特点，以及信息的取得、计量、传输、存储、处理、控制和利用的一般规律。如今，信息论概念及方法已经推广和应用于其他学科，如生物学、医学、管理科学等，人们也称广义信息论为信息科学。

2. 信息的特征

我们综合目前的研究，归纳出了信息的三个主要特征，具体如下：

(1) 信息是客观世界事物状态的反映，或者说是客观事物在人的精神领域的一种映射。从本质上讲，人们所谓的信息，就是人的大脑细胞簇中互相关联的对外界事物的记忆，所以信息具有主客体二重性：信息本身表征信源客体的存在方式和运动状态的特性，具有客体性和绝对性；但接收者(信宿)所获得的信息量和价值的大小，与信宿主体的背景有关，表现了主体性和相对性。但是，问题还可以进一步深化。信息可以经过人，以外在的形式表现为客观存在，异化为外在世界的部分。

(2) 信息有不同的存在形式。数据就是信息存在的一种形式，数据可以是数字，也可以是文字、声音和图形等。以数据形式存在的信息可以在现代信息技术中得到最有效的处理和应用。数据总是在一定程度上具有结构化的特征，因而可以使用结构化的手段收集、存储、传输、处理和使用。非数据形式的信息也是存在的，比如人的大脑里存储的信息和关联(这些关联本身也是信息)。在现有的技术水平下，非数据信息是很难管理的。当人们想要对某些信息进行管理的时候，一般需要将其整理为数据。

(3) 信息的产生、存在和流通依赖于物质和能量。信息本身可以量化研究。信息在流通过程中消耗能量，但信息量不损耗反而增加。因为信息流通使得客观世界状态的复杂程度在增加。

在工业环境下，信息通常反映生产系统及其系统组件的状态，包括静止状态和运动状态。信息主要以数据的形式存在，以信号为载体。

3. 信息的度量

信息反映的是物体(事物)的状态,信息可以消除人们对事物状态认识的不确定性,信息的度量就和事物状态的难度确定相关。对信息的量化研究是深入理解通信系统性能指标的基础。

信息量的大小是通过信息对不确定性的消除程度来衡量的。信号是消息的载体,而信息是其内涵。下面举一个工业自动化系统中常见的电机转速的例子。

一个变频调速电机的转速有很多可能的值(转速有多种状态),那么知道了一个电机的确定转速,就等于排除了其他多种可能的转速,所以该电机某个时刻的确定转速这个信息的信息量就比较大;而如果对象是个只有一个挡的电扇电机,通电后电机状态也只有转与不转两种,转速还是一定的,没有什么不确定性,则该电机某个时刻的确定转速这个信息的信息量就比较小。

根据概率论知识,事件的不确定性可用事件出现的概率来描述。事件发生的可能性越小,概率就越小;反之,概率越大。因此,消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小,消息中包含的信息量就越大。假设 $P(x)$ 是一个消息发生的概率, I 是从该消息获悉的信息量,根据上面的认知,显然 I 与 $P(x)$ 之间的关系反映为如下规律:

(1) 消息中的信息量是消息出现概率的函数,即

$$I=I[P(x)] \quad (1-1)$$

(2) $P(x)$ 越小, I 越大;反之, I 越小。且 $P(x) \rightarrow 1$ 时, $I \rightarrow 0$; $P(x) \rightarrow 0$ 时, $I \rightarrow \infty$ 。

(3) 若干个互相独立的事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量之和,也就是说,信息具有相加性,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots]=I[P(x_1)]+I[P(x_2)]+\cdots \quad (1-2)$$

1948年,对于可能状态是离散的而且等概率的系统,香农在其狭义信息论中用一个简单的公式来计算系统状态信息的信息量:

$$I=\log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x) \quad (1-3)$$

信息量的单位与对数底数 a 有关。当 $a=2$ 时,信息量的单位为比特(bit); p 为系统信息状态出现的概率, p 反映的是系统可能状态的数量。

哈特莱首先提出采用消息出现概率的对数作为离散消息的信息度量单位。所以 $a=10$ 时,信息量的单位叫哈特莱,是十进制单位。当 $a=e$,即采用自然对数时,信息量的单位为奈特(nat)。众所周知,由于二进制在电子和通信领域的广泛应用,目前使用的单位主要是比特。比如一个简单开关电路有“开”和“关”两个状态,而每种状态发生的概率都是0.5,则其确定状态作为一个事件,而信息量就是 $I=\text{lb}(1/0.5)=\text{lb}(2)=1(\text{bit})$,即一个比特。

再用一个简单的例子来理解香农的信息量计算公式。一个地区出现了两件事:一个村“六月下雨”,而另一个村“六月下雪”。这两件事的信息量从人们的反应和关注度可以感性地知道,但也可以用香农公式来定量计算。

因为六月下雨的可能性比较大,如果该地区平均8个村中就有一个六月下雨,显然“六月下雨”的概率是 $1/8=0.125$ 。用香农公式可以计算出“六月下雨”这一信息的信息量为

$$I_1 = \text{lb}\left(\frac{1}{0.125}\right) = \text{lb}(8) = 3 \text{ bit}$$

也就是说，这件事的信息量为 3 比特。

再比如考虑事件“六月下雪”，这种情况出现的可能性比较小，1000 个村里也难有一次，假设 1024 个村中会有一次，则发生的概率是 $1/1024$ ，即 2^{-10} 。这样，该事件的信息量为

$$I_2 = \text{lb}\left(\frac{1}{2^{-10}}\right) = \text{lb}(2^{10}) = 10 \text{ bit}$$

这件事的信息量为 10 比特，信息量显然大了很多。

当然，信息量的大小只是一种度量，并不直接决定信息本身的价值和重要性，但在很多情况下，信息的信息量还是影响了信息的价值和重要性。

另外，香农的信息论还研究了系统状态是连续的，而且所有可能状态的概率不均匀的情况下信息量的计算。

1.1.2 信息的交换——通信

通信(Communication)就是信息的传递，通信过程就是信源通过信道把信息传送到信宿的过程。

信息流的主体为信息，而信源、信道、信宿则是决定信息流畅通与否的三大要素。信息源，即信息的来源，其质量关系到所获取的信息是否准确、可靠。信道就是信息传播的途径和通道。信宿就是信息的接收者，不同结构的信宿对信息的提供方式有不同的要求，应根据接收对象的特点选择信息的提供方式。

信息本身不能孤立存在，信息的交换也必然是通过信息载体的交换进行的。信息以各种方式依附于一定的载体，在各个信源与信宿之间流动。信息的流动便形成了信息流。人们可以用语言、文字、数据或图像等不同的形式来表达信息。古代的烽火台、消息树和驿马传令，现代社会的文字、书信、电报电话、广播电视、互联网以及企业中的设备情况和控制命令发送等都是信息交流的具体表现形式。

从古至今，人类的社会活动总是离不开消息的传递和交换，通信是人与人之间交流信息的手段。语言是人类通信的最简单的方式，人类早期只是用语言和手势直接进行通信，交流信息。“仓颉造字”则使信息传递摆脱了直接形式，同时扩大了信息的存储形式，可算是一次信息技术的革命，因为信息由此也具有了物化的载体，从此异化成为客观世界的一部分。印刷术的发明，扩大了信息的传播范围和容量，也是一次信息技术进步。但真正的信息革命则是从电报、电话、电视等开始，到互联网的出现这一系列的现代通信技术创造发明，它们加快了信息的传播速度，增大了信息传播的容量，同时也在急剧增加人类所创造的信息总量本身。

实现通信的方式很多，但目前的通信越来越依赖利用“电”来传递消息。由于电通信迅速、准确、可靠，且不受时间、地点、距离的限制，因而近百年来得到了迅速发展和广泛应用。当今自然科学领域涉及“通信”这一术语时，一般均是指“电通信”。广义地讲，光通信也属于电通信，因为光也是一种电磁波。在本书中，通信均指电通信，但原理也可以推广到所有广义的通信系统。

在信息系统中，信息的流通大致分为信息的获取、信息的传输、信息的处理和信息处理结果的输出等四个步骤，而通信系统则是完成信息传输的系统。

1.2 通信系统的基本概念

1.2.1 通信系统的基本模型

通信把消息从某地有效地传递到另一地，是消息传递的全过程。信息源(也是发送终端)需要把各种消息转换成原始电信号，发送设备对原始信号完成某种变换，使原始电信号适合在信道中传输。信道是指信号传输的通道，提供了信源与信宿之间在电气上的联系。信宿(也称接收终端)将复原的原始电信号转换成相应的消息，接收设备负责把接收到的信号转换回原始电信号。

通信系统的任务是用信号来传递信息。信号是形式，是信息的载体；信息是指消息中所包含的有意义的内容。在很多实际系统中，信号还需要经过处理，得到信息的表示形式——数据。

通信系统由完成通信过程的所有要素和技术设备组成。由上述内容可知，其基本组成有以下三个要素，即通信三要素：

- (1) 信源：信息的发送者，其作用是把各种消息转换成原始信号。很多时候，非电量信号需要先转换成电信号。
- (2) 信宿：信息的接收者，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。
- (3) 信道：信息传输的途径，以传输媒体和相关通信设施为基础。信道既给信号以通路，也产生影响，还可能附加噪声等各种干扰。

考虑了发送器和接收器以后的数据通信系统模型如图 1-1 所示。

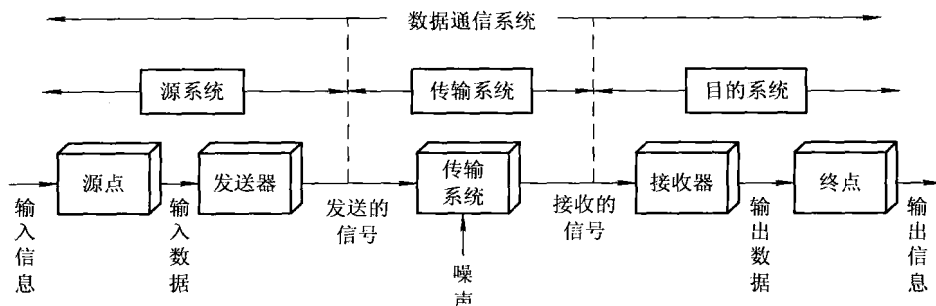


图 1-1 数据通信系统模型

图 1-1 概括地描述了一个通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，可称之为通信系统的一般模型。实际中根据不同的应用环境，该模型中的各个组件(小方框)的内容和作用可以有所不同，因而也相应地有不同形式的通信模型。

信源产生的原始电信号也称为消息信号或基带信号。信源可分为模拟信源和数字信源。模拟信源(如电话机、普通温度传感器)输出连续幅度的模拟信号，数字信源(如计算机、电机转数测量计)输出离散的数字信号。

信源产生的消息或者信号可能并不适合传输(比如功率不够,不能满足信道的能量需求),所以需要发送设备改变信号形式以适合信道传输。发送设备的基本功能就是匹配信源和信道,即将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号。变换方式是多种多样的,信号的功率放大就是最常见的变换方式,其次,信号调制或者编码也是常见的变换方式。

信道是指传输信号的物理媒介。在无线信道中,信道可以是自由空间或者大气,在有线信道中,信道可以是明线、电缆或光纤。有线和无线信道均有多种物理媒质,媒质的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。根据研究对象的不同,可以对实际的物理媒质建立不同的数学模型,以反映传输媒质对信号的影响。

接收设备的基本功能是匹配信道和信宿,通常就是完成发送设备的反变换,即进行解调、译码、解码等。它的任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带信号,对于多路复用信号,还包括解除多路复用、实现正确分路等等。

信宿是传输信息的归宿点,其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

除了这些要素以外,通信系统组件本身也产生信号,系统工作的环境也产生信号。这些都是所谓的非工作信号,对系统需要传送的信号有影响和干扰,人们把这些非工作信号统称为噪声。噪声源不是人为加入的设备,而是通信系统中各种设备以及信道中所固有的,是人们所不希望的。

根据来源,噪声可分为内部噪声和外部噪声,外部噪声往往是从信道引入的。一般为了便于分析,把噪声源视为各处噪声的集中表现而抽象地加入到信道中,而不特别标注各个组件产生的噪声。

这样的模型适合绝大部分的通信系统,在特殊情况下,可以简化或者扩展。比如两个人面对面对话时,信源(说话者)产生的消息或者信号可以不加变换地传输到信宿(听话者),可以直接理解接收,所以并不需要发送设备来做信号变换和反变换。

1.2.2 通信系统的分类

通信系统的分类有多种方法,下面介绍几种主要的分类方法。

(1) 通信系统按通信业务可分为话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位,它属于人与人之间的通信。近年来,非话务通信发展迅速。非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达,因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统的基础设施进行。此外,还有遥测、遥控、遥信和遥调等控制通信业务。

传统上,不同的通信任务由不同的通信系统完成,而未来的趋势是很多用途的消息都可能在一个统一的通信网中传输,比如综合业务数字通信网。

(2) 通信系统按调制方式可分为基带传输和频带传输。

调制是指按被传输的基带信号的变化规律改变被调载波的某一参数,如信号的幅度、频率、相位等。根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话。虽然基带数字信号可以在传输距离相对较近的情况下直接传送,但如果要远距离传输,特别是在无线或光纤信道上传输时,则必须经过调制才能在信道中传输。频带传输就是对各种信号调制后传输的总称。对这些信号可以采用相干解调或非相干解调还原为数字基带信号。对高斯噪声下的信号检测,一

般用相关器接收机或匹配滤波器实现。

理论上，数字调制与模拟调制在本质上没有什么不同，均属于正弦波调制。但是，数字调制是调制信号为数字型的正弦波调制，而模拟调制则是调制信号为连续型的正弦波调制。

调制方式有很多，其中有三种基本的调制方式：幅移键控(Amplitude-shift keying, ASK)、频移键控(Frequency-shift keying, FSK)和相移键控(Phase-shift keying, PSK)。它们分别对应于用载波(正弦波)的幅度、频率和相位来传递数字基带信号，所以也可以分别简称为调幅(Amplitude Modulation, AM)、调频(Frequency Modulation, FM)和调相(Phase Modulation, PM)。

还有一些调制技术不用正弦波做载波，而用任意脉动信号，比如脉幅调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)、脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)、脉码调制(Pulse Code Modulation, PCM)等。

表 1-1 列出了一些常见的调制方式和用途。

表 1-1 常见的调制方式和用途

		调制方式	用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调制	广播
		抑制载波双边带调幅	立体声广播
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		相位键控 PSK、DPSK、QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM	军用、民用电话
差分脉码调制 DPCM		电视电话、图像编码	
脉冲数字调制	数字调制	相位键控 PSK、DPSK、QPSK 等	数据传输、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
其他语言编码方式 ADPCM、APC、LPC		中低速数字电话	

其中不常见的缩写有：VSB(Vestigial Sideband, 残留边带调幅)^①、ADPCM(Adaptive Differential Pulse Code Modulation, 自适应差分脉码调制)、APC(Adaptive Predictive Coding, 自适应预测编码)、LPC(Linear Predictive Coding, 线性预测编码)。

(3) 通信系统按工作波段可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的波段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输介质

频率范围	波长	符号	传输媒质	用途
3 Hz~30 Hz	10^7 m~ 10^8 m	极低频 (ELF)	有线电对长波无线电	水下通信, 远程导航
30 Hz~300 Hz	10^6 m~ 10^7 m	超低频 (SLF)	有线电对长波无线电	水下通信
300 kHz~3 kHz	10^5 m~ 10^6 m	特低频 (ULF)	有线电对长波无线电	远程通信
3 kHz~30 kHz	10^4 m~ 10^5 m	甚低频 (VLF)	有线电对长波无线电	音频、电话、数据终端 长距离导航、时标
30 kHz~300 kHz	10^3 m~ 10^4 m	低频 (LF)	有线电对长波无线电	导航、信标、电力线 通信
300 kHz~3 MHz	10^2 m~ 10^3 m	中频 (MF)	同轴电缆、短波无线电	调幅广播、移动陆地通 信、业余无线电
3 MHz~30 MHz	10 m~ 10^2 m	高频 (HF)	同轴电缆、短波、无线电	移动无线电话、短波广 播定点军用通信、业余无 线电
30 MHz~300 MHz	1 m~10 m	甚高频 (VHF)	同轴电缆、米波、无线电	电视、调频广播、空中 管制、车辆、通信、导航
300 MHz~3 GHz	10 cm~100 cm	特高频 (UHF)	波导、分米波、无线电	微波接力、卫星和空间 通信、雷达
3 GHz~30 GHz	1 cm~10 cm	超高频 (SHF)	波导、厘米波、无线电	微波接力、卫星和空间 通信、雷达
30 GHz~300 GHz	1 mm~10 mm	极高频 (EHF)	波导、毫米波、无线电	雷达、微波接力、射电 天文学
10^5 GHz~ 10^7 GHz	3×10^{-4} cm~ 3×10^{-6} cm	紫外、可见 光、红外	光纤、激光空间传播	光通信

^① 残留边带调制 VSB 是一种幅度调制法(AM), 在双边带调制的基础上, 通过设计滤波器, 使信号一个边带的频谱成分原则上保留, 另一个边带频谱成分只保留小部分(残留)。该调制方法既比双边带调制节省频谱, 又比单边带易于解调。根据调制电平级数的不同, VSB 可分 4-VSB, 8-VSB, 16-VSB 等。其中的数字表示调制电平级数。如 8-VSB, 每个调制符号可携带 3 比特信息。VSB 的优点是技术成熟, 便于实现, 对发射机功放的峰值均比要求低; 不足的是抗多径和符号间干扰所需的均衡器相当复杂。由于 VSB 抗动态多径的能力差, 迄今为止, ATSC 只将其用于地面传输的固定接收和部分地区的便携接收。目前, 美国 ATSC 数字电视地面传输采用的就是残留边带调制方式。

其中,工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{f (\text{Hz})} \quad (1-4)$$

式中: λ 为工作波长; f 为工作频率; c 为光速。

(4) 按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

(5) 通信系统按传输介质可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输介质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

(6) 按信号复用方式分类。传输多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同的信号。传统的模拟通信中都采用频分复用,随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用越来越广泛,码分复用主要用于空间通信的扩频通信中。

另外,通信还有其他一些分类方法,如按系统服务对象,通信系统有服务大众的公共通信系统和特定群体的专用通信系统,工业通信系统通常是专用通信系统;按接受设备的运动状态,通信系统可分为移动通信系统和固定通信系统;按通信方式的不同,通信系统可分为单工、单双工、双工通信系统等。

本章首先按信道中传输信号的不同,介绍模拟通信系统和数字通信系统,其他概念在以后遇到时解释。

1.2.3 模拟通信系统和数字通信系统

1. 模拟信号和数字信号

信源发出的消息虽然有多种形式,但总体来讲可分为两大类:一类称为连续消息;另一类称为离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或是不可数,如语音、活动图片、水库的水位和锅炉的温度等。离散消息则是指消息的状态是可数的或离散的,如计数器的输出、工件的个数等。

消息的传递是通过它的物质载体——电信号来实现的,即把消息寄托在电信号的某一参量上(如连续波的幅度、频率或相位,脉冲波的幅度、宽度或位置)。按信号参量的取值方式不同,可以把信号分为两类,即模拟信号和数字信号。

凡信号参量的取值是连续的或取无穷多个值的,且直接与消息相对应的信号,均称为模拟信号,如电话机送出的语音信号、电视摄像机输出的图像信号等。模拟信号有时也称连续信号,这种连续是指信号的某一参量可以连续变化,或者说在某一取值范围内可以取无穷多个值,而不一定在时间上也连续,如图 1-2(a)所示的脉冲调幅(Pulse Amplitude Modulation, PAM)信号。图 1-2(b)所示的信号是对图(a)所示的模拟信号按一定的时间间隔 T 抽样后的抽样信号,由于其波形在时间上是离散的,它又叫离散信号。但此信号的幅度仍然是连续的,所以仍然是模拟信号。传统的广播、电话、传真、电视等信号都是模拟信号。