

21世纪高职高专信息类专业系列教材

# 数字通信原理



主 编 强世锦  
副主编 曾晓宏  
唐德礼  
主 审 张学礼

重庆大学出版社

21 世纪高职高专信息类专业系列教材

---

# 数字通信原理

主 编 强世锦  
副主编 曾晓宏 唐德礼  
主 审 张学礼

重庆大学出版社

# 前 言

本书是 21 世纪高职高专信息类专业系列教材之一,根据教育部高职高专培养目标和对本课程的基本要求编写而成,经过系列教材编委会审定。

本书参考学时为 80 学时,主要内容包括:第一章,绪论,简要介绍数字通信系统的组成和分类、主要技术和性能指标;第二章,该课程所涉及的一些相关的预备基础知识;第三章,信源编码和时分复用;第四章,数字基带传输的基本原理,并对扰码和解扰、差错控制编码作了一些初步阐明;第五章,介绍了几种常用的调制传输技术;第六章,同步及数字复接;第七章,对各类数字通信系统作了一些简介;第八章,简要介绍了现代通信网的结构与特点。

本书在编写过程中,注意了以下几方面:

1. 经典内容与反映新技术及其发展趋势相结合。在注意通信系统的整体性的前提下,阐明各组成部分的工作原理和技术要求,尽可能地选用具有代表性的例子来加深理解。

2. 教材的可实施性。避免繁琐的数学公式推导,力求从结论上深入浅出地阐明其物理概念。

3. 随着大规模集成电路的不断发展,注重数字通信的工作原理和信号流程图,着重强调各类技术指标的物理意义和实用性,尽可能地回避分离电路的介绍。

4. 全书的图形、符号和术语,尽量采用现行国标;每章后均附有小结和思考题,并尽量选用具有典型意义的习题。

在本系列教材中,信号与系统中已对各类信号的时域和频域作了讨论,但考虑该课程涉及到的相关内容较多,又是学习的难点,故本教材单独在第二章中对有关内容作了一些回顾和提炼,并添加了一些随机信号的基本概念,供教学参考。

数字通信原理是一门理论性较强的课程,为了加深理解,本教材可与配套的实验教材结合使用。

本书第一、二、三、四章由强世锦(武汉职业技术学院)编写;第五章由魏节敏(贵州大学职业技术学院)编写;第六章由曾晓宏(重庆电子职业技术学院)编写;第七、八章由唐德礼(十堰职业技术学院)编写;全书由强世锦统稿。张学礼副教授(武汉职业技术学院)在百忙之中仔细审阅了全书原稿,并提出了许多宝贵的修改意见。

## 2 ◀ 数字通信原理

本书为高等职业技术学院通信类、电子(包括光电子)类的专业理论课教材,也可供相关专业的大中专学生、工程技术人员参考。

本教材在内容选择上力求既能适应当前通信发展的现状,又能较好地跟踪未来通信发展的新动向,在写法上力求条理清楚,深入浅出,理论联系实际。突出物理概念,避免繁琐的公式推导,使文字通俗易懂,适宜自学,便于教学。但由于编者水平有限,缺点错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2001年6月

# 总 序

当今世界,科学技术的发展日新月异。在这空前的技术发展进程中,电子信息技术以其独特的渗透力和亲和力,正在迅速地改变着我们周围的一切。利用现代电子信息技术来改变我们的生活与学习,改造传统的各行各业,已成为当今社会人们的共识。

教育在我国社会主义建设发展进程中所具有的战略地位和基础作用已被越来越多的人所认识。职业技术教育、特别是高等职业技术教育在近二十年来得到了长足的发展,“高等教育法”、“职业教育法”的颁布与实施,使我国高等职业教育步入了法制轨道,国家与社会的进步与发展,需要高等职业教育,技术的进步与发展,也需要高等职业教育,高等职业教育成为世界教育发展的共同趋势。

在我国国内,高等职业教育毕竟是一种新型的教育类型,发展历史不太长,在教育观念、教育体制、教育结构、人才培养模式、教育内容、教学方法、教材、教法诸方面,有不少问题需要研究与探索。重庆大学出版社从促进高等职业教育发展战略的角度,于1999年邀请国内三十余所长期开办电子信息类专业的学校,开展对电子信息类高职、高专教材的开发研讨。与会学校有独立设置的职业技术学院、高等专科学校、职业大学、普通高校中的职业技术学院、多年试办高职班的重点中专学校。大家一致认为,我国高等职业教育的教材建设非常薄弱,基本上没有自己的教材,从而导致针对性、适应性差。从电子信息类专业角度看,缺乏成体系的系统教材,从而导致不同层次教材的交叉重复现象严重;再者,现行教材中缺乏对新技术、新工艺、新产品相关内容的介绍。因此,开发适应新世纪高等职业技术教育的教材就成为当务之急,它总的原则应是:根据培养应用型、技能型人才目标,从职业岗位对专业知识的需要来确定教材的知识深度及范围,坚持“必须、够用”的原则;同时注意知识的应用价值在教材中的科学体现,力求构筑具有高职特色的理论知识体系;基本概念、基本原理以讲明为度,同时将一些内容相近的部分进行合并。另外,针对高

职业教育培养技能型、现场型人才的目标,把训练职业能力的实践技术体系方面的内容,与理论知识体系有机地结合起来,力求在这方面采用先解决有无问题,再解决提高与系统性问题的原则,我们在一开始就力求站在一个较高起点上,先从电子信息类教材开发做起,然后再进一步开发其他专业大类的应用型高职教材。

经过近一年的努力,电子信息类高职、高专系列教材就要与大家见面了。本系列教材的编写原则、编写体例均是根据教育部高职高专培养目标并由参与系列教材编写的全国三十余所相关院校经过数次研讨、反复论证确定的。尽管我们对它报有较高的期望,但这毕竟是一个新生事物,是一种尝试,成功与否,这条路我们会一直走下去。为了我们共同的高职教育事业,欢迎大家在使用过程中,指出它的不足,以利于我们今后的工作。

编委会

2000年7月

· 系列教材编委会 ·

主任单位:

重庆电子职业技术学院

副主任单位:

武汉职业技术学院  
邢台职业技术学院  
陕西工业职业技术学院  
贵州大学职业技术学院

编委(以姓氏笔画为序):

才大颖	王晓敏	王兆其	王柏林
刘真祥	刘业厚	刘建华	朱新才
李传义	吕何新	张学礼	张明清
张洪	张中洲	张国勋	张西怀
李永平	杨滨生	林训超	赵月望
涂湘循	唐德洲	徐民鹰	曹建林
程迪祥	樊流梧	黎省三	

# 目录

1	第一章 绪论
1	第一节 通信技术的发展与信息社会
3	第二节 通信系统的组成和分类
13	第三节 数字通信系统的主要性能指标
16	小结
17	习题与思考题
18	第二章 预备基础知识
18	第一节 信号分析的基础知识
23	第二节 概率论的基础知识
26	第三节 随机信号的描述
35	第四节 消息、信号、信息及其度量
38	第五节 语声的功率密度分布和听觉频率特性
39	小结
39	习题与思考题
41	第三章 模拟信源数字化与编码
42	第一节 抽样定理
47	第二节 模拟信号的量化
59	第三节 脉冲编码调制(PCM)
70	第四节 自适应差分脉码调制(ADPCM)
79	第五节 时分多路复用通信
84	第六节 数据压缩技术简介
86	小结
87	习题与思考题
89	第四章 数字信号的基带传输
90	第一节 数字信号传输的基本理论
96	第二节 PCM 信号的再生中继传输



106	第三节 中继传输性能的分析
113	第四节 基带传输的常用码型
117	第五节 扰码与解扰
125	第六节 PCM 中继传输系统的测量
128	第七节 差错控制编码
153	小结
154	习题与思考题
156	第五章 数字信号的调制传输
156	第一节 概论
158	第二节 二进制数字信号的调制与解调
172	第三节 四相调相系统
183	第四节 其他调制方式
190	第五节 各种调制方式的信道频带利用率及 误码性能比较
194	小结
195	习题与思考题
196	第六章 同步与数字复接
197	第一节 载波同步
204	第二节 位同步
212	第三节 帧同步
219	第四节 网同步
225	第五节 数字复接原理
240	小结
242	习题与思考题
243	第七章 数字通信系统简介
243	第一节 传输信道分类
245	第二节 数据传输信道分析
247	第三节 数字微波中继通信
254	第四节 数字卫星通信
265	第五节 移动通信系统
274	第六节 数字光纤通信

282	小结
283	习题与思考题
284	第八章 现代通信网简介
284	第一节 通信网的基本结构
286	第二节 综合业务数字网(ISDN)简介
294	第三节 个人通信和个人通信网简介
296	小结
297	习题与思考题
298	参考文献

# 第一章

# 绪论

## 本章要点

- 通信系统的组成及分类
- 数字通信的主要特点和主要技术
- 数字通信的性能指标

## 第一节 通信技术的发展与信息社会

人类生活在信息的海洋里,离不开信息的交流与传递。通信就是克服距离上的障碍,迅速而准确地交换和传递信息。信息常以某种方式依附于物质载体,藉以实现存储、交换、处理、变换和传输。人们要让信息在时域和空域上转移和转换,从此方传送到彼方,从前一时推移到后一时,从一种形式转移到另一形式,这就须要有装载信息的媒体。所谓媒体就是一种传送信息的手段,或装载信息的物质,如话音、磁盘、磁带、声波、电波等都可作为信息的媒体。通信技术的发展历史则是人们长期寻求如何利用各种媒体实现迅速而准确地传递更多的信息到更远处的历史。通信技术伴随着人类经济和文化的发展不断取得进步,尤其在近代社会,通信技术的发展速度可谓一日千里。

早在远古时代,人们曾利用烽火、狼烟、金鼓、旗语作为表现信息和传递信息的手段,其表现能力极为有限。语言是人类通信的重要媒体,当它作用于人与人的关系时,它是表达相互反应或传递信息的中介;当它作用于人和客观世界的关系时,它是人认知事物的工具,是文化信息的载体。文字是语言等信息的书写符号,是人

人与人之间交流信息的约定俗成的视觉符号系统。由于文字的发明,能传送的信息种类飞速增加,借助这种文字媒体,人们可以把各种信息准确无误地传送到遥远的地方。印刷术的发明使得向多人传送相同信息的手段发生了划时代的变化,它使书刊大批量印刷成为可能,使得信息流传远方,世代相传。此外,人们传达情感的手段还有绘画和雕刻等方式,它成了古代人超越时间向现代人传递信息的媒体。

在 W. 希尔伯特指出了电的存在以后,科学家对电引起的各种现象进行了研究,逐步使其达到实用水平。继 1848 年莫尔斯发明的电报之后,陆续诞生了多种利用电的媒体,信息传送的数量、速度及范围等方面都有了迅速的发展。1876 年 A. G. 贝尔发明了电话;1896 年 G. 马可尼成功地发明了无线电报。随着电子管、晶体管的发明,实现了把被衰减的电信号放大,能把电报、电话传送到更遥远的地方。马可尼通信方式发展成无线电广播,进一步又发明了传送图像、照片、文件等信息的传真和电视广播等通信方式。

计算机的发明在现代通信技术的各种媒体中占有独特的地位。计算机在当今社会的广泛领域里不仅作为各种信息处理设备而使用,而且它与通信相结合,使电信业务更加丰富,这些新业务有可视图文(Videotext)、图文电视(Teletext),这是一种新的记录型媒体;还有电子信箱(E-mail),它包括文字、语音、图形信函。新的实时型媒体有电子会议(Tele-Conferencing),有计算机、语音、视像会议等形式,还有交互式电视,它可为用户提供许多视像节目。由此可见,在近代,媒体有了迅速的发展,并将导致 21 世纪成为发达的信息社会,其中多媒体通信将支撑未来信息社会的发展。这种新的通信业务同时存在着语音、文字、图形、图像、音响和视像等多种媒体,因此,其想像力十分丰富。

社会对通信技术的须要越来越迫切,又大大推动了通信科学的发展。从 20 世纪 30 年代开始,尤其是 50 年代之后人们逐步对通信实践中遇到的问题展开了深入的理论研究,并获得了可喜的进展。在通信理论上,先后形成了过滤和预测理论、仙依信息论、纠错编码理论、信源统计特性理论、信号保真度理论、调制理论、信号检测理论等等。在通信的体制上,由于电子管的更加完善,晶体管的出现以及集成电路的问世,不仅更加促进像电话通信那样的模拟通信的高速发展,而且于 20 世纪中叶对电报通信方式有了重大的突破,出现了具有广阔前景的数字通信方式。在通信的种类上,相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、激光通信、移动通信和计算机通信等等。在通信的对象上,突破了人与人之间进行通信的范畴,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。现代通信正朝着以适应知识密集型信息化社会各种通信要求方向发展。进入 70 年代以来,世界上先进国家已完全掌握了在各种传输介质(微波、各种电缆、卫星、光纤等)中传输数字信号的技术。

从语言的产生,文字的创造,印刷术的发明到电报、电话的电气通信时代到来,

从指南针的发明到全球定位导航系统,从无绳电话、可视电话等各种多功能电话机、袖珍寻呼机、传真机到各种数据通信系统、会议电视系统、高清晰度电视等的使用,直到今天电子计算机的普及和微波、卫星、光纤、移动通信技术的飞速发展,人类通信产生了革命性的突变,从根本上改变了传统的信息传输手段。人类每时每刻通过已建成的覆盖全球的各种通信网,包括地面的、海底的、空间的,在不同地域、不同群体之间大量地交换和传递着海量信息,以满足当今社会对通信的更加广泛、快捷、可靠、大容量、多方式的信息交换和传递要求。

现代通信系统是信息时代的生命线。以信息为主导地位的信息化社会又导致通信新技术的大力发展,传统的通信网已不适应现代通信的要求,为了给用户提供更越来越多、越来越快的信息服务,通信技术正在大踏步地走向智能化和网络化。各单项技术汇流成综合业务数字网络(ISDN-Integrated Service Data Network),开辟了网络时代的新纪元,是当前国际竞争的一个热点。由于数字通信具有一系列优点,在20世纪80年代,各国都相继投入大量资金来改建通信线路,使其逐步成为综合数字网(IDN),即除用户线以外,进入本地区交换机以后的信息传输、交换都将以数字形式进行,它可以方便地实现各种业务的处理和交换,到80年代末、90年代初出现综合业务数字网(ISDN)的发展高潮。窄带ISDN将迅速走向宽带化(Broadband)、智能化(Intelligent)和个人化(Personal),标志着信息传输技术进一步走向成熟。宽带综合业务数字网(B-ISDN)、多媒体终端技术(MMT)、综合移动卫星通信(M-SAT)、个人通信网(PCN)以及智能通信网(IN或AIN)等相继问世,使世界信息和通信市场得到空前的繁荣。世界各国都把信息网络为主体的信息基础设施的建设作为新的国策。

## 第二节 通信系统的组成和分类

### 一、通信系统的组成

传递或交换信息所需的一切技术设备的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图1-1所示。

通信系统由以下几部分组成:

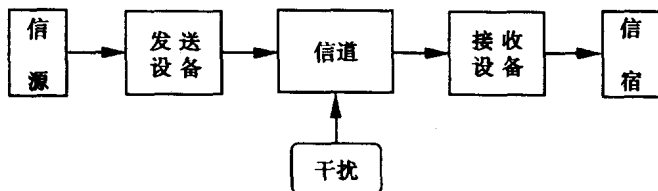


图 1-1 通信系统的一般模型

### 1. 信源和信宿

信源是发出信息的源,信宿是传输信息的归宿点。

信源可以是离散的数字信源也可以是连续的(或离散的)模拟信源。模拟信源(如电话机、电视摄像机)输出连续幅度的模拟信号;离散数字信源(如电传机、计算机)输出离散的数字信号。数字信号与模拟信号的区别是根据幅度取值上是否离散而定。模拟信号与数字信号有明显区别,但两者之间,在一定条件下是可以互相转换的。

### 2. 发送设备

发送设备的基本功能是信源和传输媒介匹配起来,即将信源产生的消息信号变换为便于传送的信号形式,送往传输媒介。变换方式是多种多样的,在须要频谱搬移的场合,调制是最常见的变换方式。发送设备还包括为达到某些特殊要求而进行的种种处理,如多路复用、保密处理、纠错编码处理等等。

### 3. 信道

信道是指传输信号的通道,从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介,可以是无线的,也可以是有线的,有线和无线均有多种传输媒介。信道即给信号以通路,也要对信号产生各种干扰和噪声,传输媒介的固有特性和干扰直接关系到通信的质量。

### 4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,即进行解调、译码、解码等等。它的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始消息来,对于多路复用信号,还包括解除多路复用,实现正确分路。

以上所述是单向的通信系统,但在多数场合下,信源兼为信宿,通信的双方须要随时交流信息,因而要求双向通信,电话就是一个最好的例子。这时,通信的双

方都要有发送设备和接收设备,如果两个方向用各自的传输媒介,则双方都可独立进行发送和接收。但若共用一个传输媒介,则用频率或时间分割的办法来共享。

此外,通信系统除了完成信息传递之外,还必须进行信息的交换。传输系统和交换系统共同组成一个完整的通信系统,乃至通信网络。

现代交换系统都使用自动交换机,能自动接续电话呼叫或数据呼叫。电话机数量的增多,以及全国自动电话网的建设,对交换系统功能与容量的要求越来越高。当前程控数字交换机正处在迅猛发展之中。

## 二、通信系统的分类

### 1. 按通信的业务和用途分类

根据通信的业务和用途分类,有常规通信、控制通信等。其中常规通信又分为话务通信和非话务通信,话务通信业务主要是电话信息服务业务、语音信箱业务和电话智能网业务。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进行。未来的综合业务数字通信网中,各种用途的消息都能在一个统一的通信网中传输、交换和处理。控制通信则包括遥测、遥控、遥信和遥调通信等,如雷达数据通信和遥测、遥控指令通信等。

### 2. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和调制传输。

基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话、数字信号基带传输等。

调制传输是对各种信号变换方式后传输的总称。调制的目的有以下几个方面:

#### (1) 便于信息的传输

调制过程可将信号频谱搬移到任何须要的频谱范围,便于与信号传输特性匹配。如无线传输必须将信号载在高频上才能使其易于以电磁波的形式在自由空间辐射出去。又如在数字电话中将连续信号变换为脉冲编码调制信号,以便在数字系统中传输。

#### (2) 改变信号占据的带宽

调制后的信号频谱通常被搬移到某个载频附近的频带内,其有效带宽相对于

载频而言是一个窄带信号,在此频带内引入的噪声较小,从而提高了通信系统的抗干扰性。

### (3) 改善系统性能

由信息论的观点可以证明,有可能用带宽增加的方式来换取信噪比的提高,从而提高通信系统的可靠性。各种调制方式有不同的带宽。各种调制方式正是为了达到这些目的而发展起来的。调制方式很多,表 1-1 给出一些常见的调制方式。

表 1-1 常见的调制方式及用途

调制方式		用途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		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
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK, DPSK, QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM, MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	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、光纤通信
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM, CVSD 等	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM, APC, LPC 等	中、低速数字电话

### 3. 按传送信号的特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分成两类,即模拟通信系统和数字通信系统。



#### 4. 按信号的复用方式分类

传送多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用、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谱范围;时分复用是用脉冲调制方式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系统中。

#### 5. 按传输媒介分类

通信系统可为有线(包括光纤)和无线通信两大类。表1-2中列出常用的传输媒介及其主要用途。

表1-2 常用传输媒介

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3Hz ~ 30kHz	$10^8 \sim 10^4$ m	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30 ~ 300kHz	$10^4 \sim 10^3$ m	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线、通信
300kHz ~ 3MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3 ~ 30MHz	$10^2 \sim 10$ 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 ~ 300MHz	10 ~ 1m	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
300MHz ~ 3GHz	100 ~ 10cm	特高频 UHF	波导、分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3 ~ 30GHz	10 ~ 1cm	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 ~ 300GHz	$1 \sim 3 \times 10^{-4}$ cm	极高频 EHF	波导、毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \sim 10^7$ GHz	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm	紫外、可见光、红外	光纤、激光空间传播	光通信