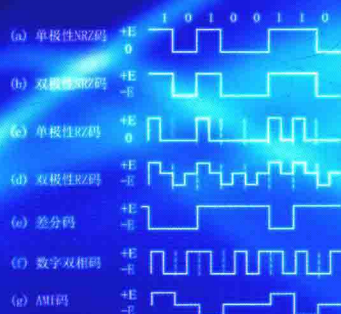


高职高专“十三五”规划教材

XIANDAI TONGXIN YUANLI

现代通信原理

赵新亚 胡国柱 主编



化学工业出版社

高职高专“十三五”规划教材

现代通信原理

赵新亚 胡国柱 主 编
王 媛 李 佳 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书旨在全面介绍现代通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。其内容主要包括：通信系统的基本概念、信道与噪声、模拟调制、模拟信号的数字传输、数字基带传输、数字信号的频带传输、差错控制编码、同步系统。全书共 8 章，每章前有内容提要，每章后附有本章小结、习题。全书内容丰富，讲述由浅入深、简明透彻、概念清楚、重点突出，既便于教师组织教学，又适合学生自学。

本书可作为高职高专院校通信、电子、计算机应用等专业教材，也可以作为成人高等学校有关专业参考教材，还可供专业工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代通信原理/赵新亚, 胡国柱主编. —北京: 化学工业出版社, 2017. 7

高职高专“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-29852-2

I. ①现… II. ①赵…②胡… III. ①通信原理-高等职业教育-教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124597 号

责任编辑: 王听讲

文字编辑: 张绪瑞

责任校对: 王素芹

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 244 千字 2017 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书的编写目的是提供一本适合高职学生使用的通信原理教材。本书全面介绍了通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。全书共 8 章, 内容主要包括: 通信系统的基本概念、信道与噪声、模拟调制、模拟信号的数字传输、数字基带传输、数字信号的频带传输、差错控制编码、同步系统。为了便于教学, 每章之前有内容提要, 每章后附有本章小结、习题, 也便于自学。

通信原理是高职高专电子信息类通信技术专业的一门核心技术基础课, 在本书的编写中考虑了以下的原则和特点。

(1) 符合高职高专教育特点。本书以应用为目的, 以必需、够用为原则; 以讲清概念、强化应用为教学重点, 以满足学生未来可持续发展的需求。

(2) 讲述由浅入深、简明透彻、概念清楚、重点突出。本书着重基本概念、基本原理阐述, 减少不必要的数学推导和计算。书中采用精炼、通俗易懂的文字, 结合图形、表格、照片多种直观的表达方式, 便于学生轻松地学习知识。

(3) 全书内容丰富、编排连贯、系统性强。本教材的编排体系是: 先介绍基础知识, 后系统介绍专业知识; 先模拟通信系统, 后数字通信系统。本书参考学时为 64 学时, 书中内容可根据课程设置的具体情况、专业特点和教学要求的侧重点不同进行自由取舍、灵活讲授。我们将为使用本书的教师免费提供电子教案等教学资源, 需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

本书既适用于高职高专层次各类高校的通信、电子、计算机应用等专业作为教材, 也可以作为成人高等学校有关专业参考教材, 还可供专业工程技术人员参考。

本书由沈阳职业技术学院赵新亚、辽宁机电职业技术学院胡国柱担任主编, 大连职业技术学院王媛、西安职业技术学院李佳担任副主编。赵新亚编写了第 1、4 (部分)、8 章, 胡国柱编写了第 5~7 章, 王媛编写了第 2、3 章, 李佳编写了第 4 章 (部分)。贵州电子信息职业技术学院吴政江、淄博职业学院杨林、常州信息职业技术学院姚裕宝和桂林航空工业学院嵇建波参加了全书编写工作。全书由赵新亚统稿。

沈阳职业技术学院赵敏教授担任本书的主审, 对本书进行了仔细查阅, 并提出了宝贵意见和修改建议, 在此表示感谢。

限于编者水平, 书中难免存在疏漏和不足, 恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 通信系统的基本概念	1
1.1 通信的基本概念	1
1.2 通信系统的组成	2
1.2.1 通信系统的一般模型	2
1.2.2 模拟通信系统	3
1.2.3 数字通信系统	3
1.2.4 数字通信系统的主要特点	5
1.3 通信系统的分类及通信方式	5
1.3.1 通信系统的分类	5
1.3.2 通信方式	6
1.4 信息及其度量	7
1.5 通信系统主要性能指标	9
1.5.1 有效性指标的具体表述	10
1.5.2 可靠性指标的具体表述	11
本章小结	11
习题	12
第 2 章 信道与噪声	13
2.1 信道概念及分类	13
2.1.1 信道的基本概念	13
2.1.2 信道的分类	14
2.1.3 信道的数学模型	19
2.2 信道容量	22
2.3 信道的加性噪声	25
2.4 通信中的常见噪声	26
2.4.1 白噪声	26
2.4.2 高斯噪声	27
2.4.3 高斯型白噪声	29
2.4.4 窄带高斯噪声	29
本章小结	31
习题	31

第3章 模拟调制	33
3.1 幅度调制(线性调制)的原理	33
3.1.1 幅度调制的一般模型	35
3.1.2 常规双边带调幅(AM)	35
3.1.3 抑制载波双边带调幅(DSB)	38
3.1.4 单边带调制(SSB)	40
3.1.5 残留边带调制(VSB)	42
3.2 线性调制系统的抗噪声性能分析	44
3.2.1 通信系统抗噪声性能分析的一般模型	44
3.2.2 相干解调与包络检波的抗噪声性能分析	45
3.3 角度调制(非线性调制)的原理与抗噪声性能分析	51
3.3.1 角度调制的基本概念	51
3.3.2 窄带调频与宽带调频	52
3.3.3 调频信号的产生与解调	55
3.3.4 调频系统的抗噪声性能	57
3.4 各种模拟调制系统的比较	61
3.5 频分复用(FDM)	62
本章小结	64
习题	64
第4章 模拟信号的数字传输	66
4.1 概述	66
4.2 抽样定理	67
4.3 脉冲振幅调制(PAM)	68
4.4 模拟信号的量化	70
4.4.1 量化的基本原理	70
4.4.2 均匀量化	71
4.4.3 非均匀量化	72
4.5 脉冲编码调制(PCM)	75
4.5.1 常用的二进制编码码型	75
4.5.2 基于A律13折线的码位安排	77
4.5.3 逐次比较型编码原理	78
4.5.4 译码原理	80
4.5.5 PCM性能	81
4.6 增量调制	81
4.6.1 简单增量调制	82
4.6.2 增量调制的过载特性	83
4.7 时分复用(TDM)	84
本章小结	85
习题	86

第 5 章 数字基带传输	87
5.1 数字基带信号的码型	87
5.1.1 数字基带信号的码型设计原则	87
5.1.2 数字基带信号的常用码型	88
5.1.3 数字基带信号的频谱特性	91
5.2 基带传输系统的脉冲传输与码间串扰	94
5.2.1 数字基带传输系统的工作原理	94
5.2.2 码间串扰	95
5.2.3 码间串扰的消除	96
5.2.4 无码间串扰的基带传输系统	96
5.3 眼图	99
5.3.1 眼图的概念	99
5.3.2 眼图形成原理	99
本章小结	100
习题	101
 第 6 章 数字信号的频带传输	 103
6.1 数字幅度调制	103
6.1.1 2ASK 信号的调制原理及实现方法	103
6.1.2 2ASK 信号的解调	104
6.1.3 2ASK 信号的功率谱及带宽	105
6.1.4 2ASK 信号的抗噪声性能	106
6.2 数字频率调制	109
6.2.1 2FSK 信号的调制原理及实现方法	109
6.2.2 2FSK 信号的解调	110
6.2.3 2FSK 信号的功率谱及带宽	112
6.2.4 2FSK 信号的抗噪声性能	113
6.3 数字相位调制	116
6.3.1 2PSK 信号的调制原理	116
6.3.2 2DPSK 信号的调制原理	117
6.4 二进制数字调制系统性能比较	119
6.5 多进制数字调制	120
6.5.1 多进制数字幅度调制 (MASK)	120
6.5.2 多进制数字相位调制 (MPSK)	121
6.5.3 多进制数字频率调制 (MFSK)	121
本章小结	122
习题	122
 第 7 章 差错控制编码	 124
7.1 概述	124
7.1.1 信源编码与信道编码的基本概念	124

7.1.2 纠错编码的分类	125
7.1.3 差错控制方式	125
7.1.4 纠错编码的基本原理	126
7.2 简单的差错控制编码	127
7.2.1 奇偶监督码	127
7.2.2 行列监督码	128
7.2.3 恒比码	128
7.3 线性分组码	128
7.3.1 线性分组码的基本概念	128
7.3.2 汉明码	130
7.4 循环码	131
7.4.1 循环码的特性	131
7.4.2 循环码的生成多项式和生成矩阵	131
7.4.3 循环码的编码与译码方法	133
7.5 卷积码	134
7.5.1 卷积码的基本概念	134
7.5.2 卷积码的编码与译码	135
本章小结	136
习题	136

第8章 同步系统 137

8.1 同步的概念及分类	137
8.2 载波同步	138
8.2.1 直接法	138
8.2.2 插入导频法	140
8.3 码元同步	141
8.3.1 外同步法	142
8.3.2 自同步法	142
8.3.3 码元同步误差对于误码率的影响	144
8.4 群同步	145
8.4.1 集中插入法	145
8.4.2 分散插入法	147
8.4.3 群同步性能	149
8.4.4 起止式同步	150
本章小结	150
习题	151

部分习题答案 152

参考文献 153

第 1 章

通信系统的基本概念

【内容提要】本章主要介绍通信相关基础知识，包括通信的基本概念、通信系统的组成、通信系统的分类与通信方式、信息及其度量以及通信系统的主要性能指标，以使学生对通信的相关术语和本课程所要研究的内容有初步了解。这些概念是学习通信原理与技术的基础。

1.1 通信的基本概念

通信是指不在同一地点的双方或多方之间进行的迅速有效的信息传递。在当今高度信息化的社会，信息和通信已成为现代社会的“命脉”。信息作为一种资源，只有通过广泛地传播与交流，才能产生利用价值，促进社会成员之间的合作，推动社会生产力的发展，创造出巨大的经济效益。而通信作为传输信息的手段或方式，与传感技术、计算机技术相互融合，已成为 21 世纪国际社会的和世界经济推动力。

实现通信的方式和手段很多，如古代的消息树、烽火台和击鼓传令，现代社会的电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、因特网、数据和计算机通信等，这些都是信息传递的方式和信息交流的手段。

通信的目的是传递消息中所包含的信息。消息是物质或精神状态的一种反映，在不同时期具有不同的表现形式。例如，话音、文字、音乐、数据、图片或活动图像等都是消息 (message)。人们接收消息，则关心的是消息中所包含的有效内容，即信息 (information)。通信中信息的传递是通过信号来进行的，例如：红绿灯信号、狼烟、电压、电流信号等，信号是信息的载体。在各种各样的通信方式中，利用电信号来承载消息的通信方式称为电通信。如今，在自然科学领域涉及“通信”这一术语时，一般是指“电通信”。广义来讲，光通信也属于电通信，因为光也是一种电磁波。本书中讨论的通信均指电通信。由于电通信方式具有迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离限制的特点，因此，100 多年来得到了飞速的发展和广泛的应用。今天，我们正亲眼目睹一个重大的发展成就，这就是包括话音、数据和视频传输在内的个人通信业务的出现和应用，而通信卫星和光纤网络正为全世界提供高速通信业务。事实上，现代电信新世纪的曙光正在到来。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统的一般模型

实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒介的总和称为通信系统。对于电通信来讲，首先要把消息转变成电信号，然后经过发送设备，将信号送入信道，在接收端利用接收设备对接收信号作相应的处理后，送给信宿再转换为原来的消息。这一过程可用图 1-1 所示的通信系统一般模型来概括。



图 1-1 通信系统一般模型

图 1-1 中，各部分的功能简述如下。

1) 信息源

信息源（简称信源）的作用是把待传输的消息转换成原始电信号。如电话系统中电话机的话筒可看成是信源。根据消息的种类不同，信源可分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出的是连续的模拟信号，如话筒（声音→音频信号）、摄像机（图像→视频信号）；而数字信源输出的是离散的数字信号，如电传机（键盘字符→数字信号）、计算机等各种数字终端。信源输出的信号称为基带信号，其特点是信号的频谱从零频附近开始，具有低通形式，如语音信号为 300~3400Hz，图像信号为 0~6MHz。根据原始电信号的特征，基带信号可分为模拟基带信号和数字基带信号。

2) 发送设备

发送设备的作用是将信源产生的原始电信号（基带信号）变换成适合于在信道中传输的信号，即将信源和信道特性相匹配，使其具有抗信道干扰的能力，并且能够具有足够的功率以满足远距离传输的需要。因此，发送设备涵盖的内容很多，可能包含变换、放大、滤波、编码、调制等过程。

3) 信道

信道是一种物理媒质，是信号传输的通道，可分为无线和有线两种形式。在无线信道中，信道可以是自由空间；在有线信道中，信道可以是明线、电缆和光纤。信道既给信号以通路，也会对信号产生各种干扰和噪声。信道的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。

4) 噪声源

噪声源是信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。噪声通常是随机的，形式多样的，它的出现干扰了正常信号的传输。

5) 接收设备

接收设备的功能与发送设备相反，其目的是从带有干扰的接收信号中恢复出原始电信

号。此外，它还要尽可能地减小在传输过程中噪声与干扰所带来的影响。

6) 受信者

受信者是消息的目的地，其功能与信源相反，即把原始电信号还原成相应的消息，如扬声器等。

图 1-1 描述的是通信系统的一般模型，反映了通信系统的共性。按照信道中传输的信号是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1.2.2 模拟通信系统

信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，其模型如图 1-2 所示。这里将通信系统一般模型中的发送设备和接收设备分别用调制器和解调器代替。

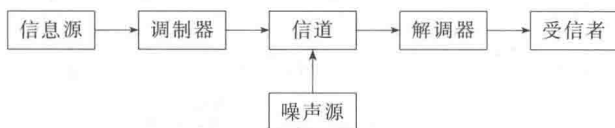


图 1-2 模拟通信系统模型

模拟通信系统主要包括两种重要变换。第一种变换是，在发送端把连续消息变换成原始电信号（信源完成）和在接收端将原始电信号恢复成最初的连续消息（受信者完成）。由于信源输出的原始电信号具有频率较低的频谱分量，有些信道可以直接传输原始电信号，而以自由空间作为信道的无线电传输却无法直接传输这种信号。因此，模拟通信系统中常常需要进行第二种变换，即在发送端将基带信号变换成适合在信道中传输的信号（由调制器完成），并在接收端进行反变换（由解调器完成）。经过调制以后的信号称为已调信号，它有两个基本特征：一是携带有信息；二是适应在信道中传输。由于已调信号的频谱通常具有带通形式，因而已调信号又称为带通信号（也称为频带信号）。

应该指出，实际通信系统中消息从发送端到达接收端，除了上述的两种变换外可能还有滤波、放大、天线辐射等过程。对于信号传输而言，上述两种变换会使信号发生质的变化，而其他过程只是对信号进行放大和改善信号特性等，在通信系统模型中一般被认为是理想的而不予讨论。

1.2.3 数字通信系统

信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。数字通信系统可进一步细分为数字频带传输通信系统、数字基带传输通信系统、模拟信号数字化传输通信系统。

1) 数字频带传输通信系统

数字通信的基本特征是，它的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性，同时强调已调参量与代表消息的数字信号之间的一一对应关系。

另外，数字通信中还存在以下突出问题。第一，数字信号传输时，信道噪声或干扰所造成的差错，原则上是可以控制的，这是通过所谓的差错控制编码来实现的。于是，就需要在发送端增加一个编码器，而在接收端相应需要一个解码器。第二，在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，人为地将被传输的数字序列扰乱，即加上密码，这种处理过

程称为加密。在接收端利用与发送端相同的密码对收到的数字序列进行解密，恢复原来信息。第三，数字通信传输是按一定节拍一个接一个传送数字信号，因此接收端也必须有一个与发送端相同的节拍接收信息，否则就会因收发节奏不同而造成混乱。同步过程就是使收发两端的信号在时间上保持步调一致，保证数字信号的有序、准确、可靠传输。按照同步的功用不同，分为载波同步、位同步、群（帧）同步和网同步，故数字通信中还必须有“同步”这个重要问题。

综上所述，点对点的数字频带传输通信系统模型如图 1-3 所示。

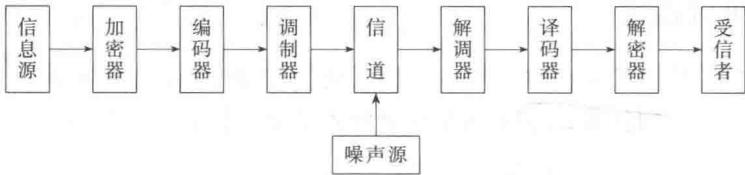


图 1-3 数字频带传输通信系统的模型

需要说明的是，图 1-3 中，调制器/解调器、加密器/解密器、编码器/译码器等环节，在具体通信系统中是否全部采用，要取决于具体设计条件和要求。但在一个系统中，如果发送端有调制/加密/编码，则接收端必须有解调/解密/译码。通常把有调制器/解调器的数字通信系统称为数字频带传输通信系统。

2) 数字基带传输通信系统

与频带传输系统相对应，把没有调制器/解调器的数字通信系统称为数字基带传输通信系统，如图 1-4 所示。

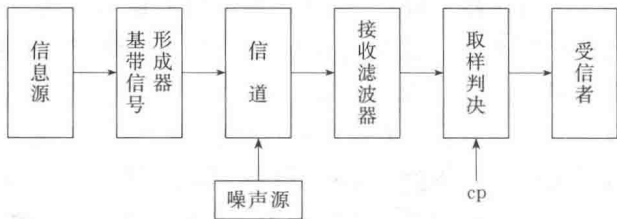


图 1-4 数字基带传输通信系统的模型

图 1-4 中，基带信号形成器可能包括编码器、加密器以及波形变换等，接收滤波器亦可能包括译码器、解密器等。

3) 模拟信号数字化传输通信系统

上面介绍的数字通信系统中，信源输出的信号均为数字基带信号，实际上，在日常生活中大部分信号（如语音信号）为连续变化的模拟信号。那么要实现模拟信号在数字通信系统中的传输，则必须在发端将模拟信号数字化，即进行模/数（A/D）转换；在接收端需进行相反的转换，即数模（D/A）转换。实现模拟信号数字化传输的系统如图 1-5 所示。



图 1-5 模拟信号数字化传输通信系统的模型

1.2.4 数字通信系统的主要特点

目前,无论是模拟通信还是数字通信,在不同的通信业务中都得到了广泛的应用。但数字通信的发展速度已明显超过模拟通信,成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信具有以下一些优点。

1) 抗干扰能力强

数字通信系统中传输的是离散取值的数字波形,接收端的目的是在受到干扰的信号中判断出传输的是哪一个波形,而不需要还原被传输的整个波形。以二进制为例,信号的取值只有两个,接收端只要能正确判决发送的是两个状态中的哪一个即可。

在远距离传输时,如微波中继通信,数字通信系统可采用多个中继站,在每个中继站利用数字通信特有的抽样判决再生的接收方式使信号再生,只要不发生错码,再生后的信号仍然像信源发出的信号一样,可以使噪声不积累。而模拟通信系统中传输的是连续变化的模拟信号,它要求接收机能够高度保真地重现原信号波形,一旦信号叠加上噪声后,即使噪声很小,也很难消除。

2) 差错可控

数字通信系统中,可通过信道编码技术进行检错与纠错,降低误码率,提高传输质量。

3) 易加密

与模拟信号相比,数字信号易于加密处理,且保密性好。

4) 易与现代技术相结合

与现代数字信号处理技术相结合对数字信息进行处理、变换、存储。这种数字处理的灵活性表现为可以将来自不同信源的信号综合到一起传输。

数字通信的缺点是占用带宽较大。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据 20~60kHz 的带宽。另外,由于数字通信对同步要求高,因而系统设备复杂。但是,随着光纤等大容量传输媒质的使用、数据压缩技术及超大规模集成电路的出现,数字系统的这些缺点已经弱化,数字通信的应用必将会越来越广泛。

1.3 通信系统的分类及通信方式

1.3.1 通信系统的分类

通信的目的是传送信息,按照不同的分类方法,通信可分成许多类别,下面介绍几种常用的分类方法。

1) 按传输媒质分类

按传输媒质,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。所谓有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信等,其特点是媒质看得见,摸得到。所谓无线通信是依靠电磁

波在空间传播达到来传递消息的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

2) 按信号特征分类

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。

3) 按工作波段分类

按通信设备的工作频率不同，通信系统可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。表 1-1 列出了通信中使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-1 频段划分及典型应用

频率范围/Hz	名 称	典 型 应 用
3~30	极低频(ELF)	远程导航、水下通信
30~300	超低频(SLF)	水下通信
300~3000	特低频(ULF)	远程通信
3000~30000	甚低频(VLF)	远程导航、水下通信、声呐

4) 按调制方式分类

根据信道中传输的信号是否经过调制，可将通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如市内电话、有线广播；频带传输是对各种信号调制后再送到信道中传输的总称。

5) 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愈来愈广泛，码分复用多用于空间通信的扩频通信和移动通信系统中。

6) 按通信者是否移动分类

通信系统还可以按照收发信者是否移动分为移动通信系统和固定通信系统。移动通信是指通信双方至少有一方是在移动过程中进行信息交换的。移动通信具有建网快、机动灵活等特点，能够使用户随时随地快速可靠地进行信息交换，因此其发展迅速，容量不断递增。

1.3.2 通信方式

通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号传输方式。

1) 按消息的传递方向与时间分类

对于点与点之间的通信，按消息传递的方向与时间关系，通信方式可分为单工、半双工和全双工通信。

所谓单工通信，是指消息只能单方向传输的工作方式，如图 1-6(a) 所示。通信的双方中只有一方可以进行发送，而另一方只能接收。如广播、遥控、无线寻呼等。

所谓半双工通信，是指通信双方都能收发消息，但不能同时进行收和发的工作方式，如图 1-6(b) 所示。如对讲机等。

所谓全双工通信,是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式,其信道必须是双向信道,如图 1-6(c)所示。电话是全双工通信一个常见的例子,通话的双方可同时进行说和听。

2) 按数字信号排序分类

在数据通信(主要是计算机或其他数字终端设备之间的通信)中,按数据代码排列的方式不同,可分为并行传输和串行传输。

所谓并行传输,是将代表信息的数字信号码元序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输。例如,计算机送出的由“0”和“1”组成的二进制代码序列,可以每组 n 个代码的方式在 n 条并行信道上同时传输。这种方式下,一个分组中的 n 个码元能够在一个时钟节拍内从一个设备传输到另一个设备,如图 1-7(a)所示。

并行传输的优势是节省传输时间,速度快。此外,并行传输不需要另外的措施就实现了收发双方的字符同步。缺点是需要 n 条通信线路,成本高,一般只用于设备之间的近距离通信,如计算机和打印机之间数据的传输。

所谓串行传输,是将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输,如图 1-7(b)所示。远距离数字传输常采用这种方式。

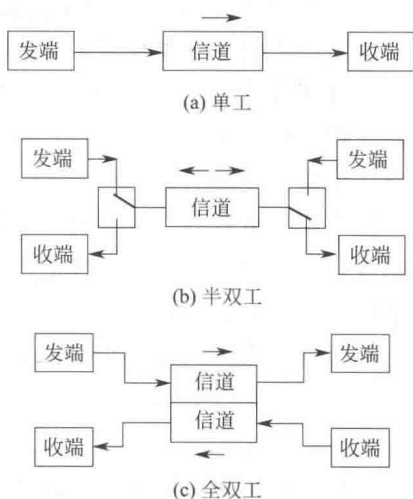


图 1-6 单工、半双工和全双工通信方式示意图

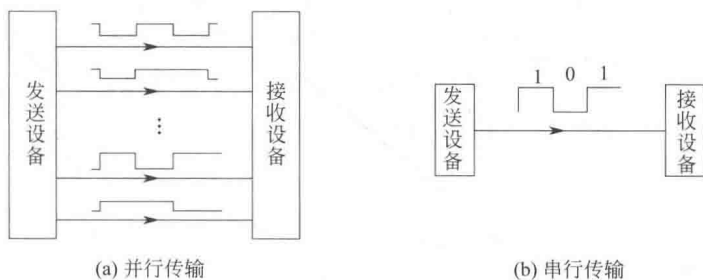


图 1-7 串行和并行传输方式

1.4 信息及其度量

通信的根本目的在于传输消息中所包含的信息。信息是指消息中所包含的有效内容,或者说收信者预先不知而待知的内容。不同形式的消息,可以包含相同的信息。例如,用语音和文字发送的天气预报,所含信息内容相同。传输信息的多少可直观地使用“信息量”来衡量。

消息是多种多样的。因此度量消息中所含信息量的方法,必须能够用来度量任何消息,而与消息的种类无关。同时,这种度量方法也应该与消息的重要程度无关。

在一切有意义的通信中,对于接收者而言,某些消息所含的信息量比另外一些消息更

多。例如，“某客机坠毁”这条消息比“今天下雨”这条消息包含有更多的信息。这是因为，前一条消息所表达的事件极不可能发生，它使人感到惊讶和意外；而后一条消息所表达的事件很有可能发生，不足为奇。这表明，对接收者来说，信息量的多少与接收者收到消息时感到的惊讶程度有关，消息所表达的事件越不可能发生，越不可预测，就会越使人感到惊讶和意外，信息量就越大。

概率论告诉我们，事件的不确定程度可以用其出现的概率来描述。因此，消息中包含的信息量多少与消息所表达事件的出现概率密切相关。事件出现的概率越小，则消息中包含的信息量就越大，反之则越小。

根据以上认知，消息中所含的信息量 I 与消息发生概率 $P(x)$ 的关系应当反映如下规律。

(1) 消息 x 中所含的信息量 I 是该消息出现的概率 $P(x)$ 的函数，即

$$I = I[P(x)]$$

(2) 消息出现的概率 $P(x)$ 越小， I 越大；反之， I 越小。且当 $P(x) = 1$ 时， $I = 0$ ； $P(x) = 0$ 时， $I = \infty$ 。

(3) 若干个互相独立事件构成的消息 $(x_1, x_2, \dots)$ ，所含信息量等于各独立事件 $x_1, x_2, \dots$ 信息量之和，也就是说，信息具有相加性，即

$$I[P(x_1) \cdot P(x_2) \cdot \dots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \dots$$

可以看出，若 I 与 $P(x)$ 之间的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \tag{1.4-1}$$

则可满足上述三项要求。所以我们定义公式(1.4-1)为消息 x 所含的信息量。

信息量 I 的单位取决于式(1.4-1)中对数的底 a 的取值

- $a = 2$ 单位为比特 (bit)，可简写为 b
- $a = e$ 单位为奈特 (nat)，可简写为 n
- $a = 10$ 单位为哈特莱 (Hartley)

通常广泛使用单位比特，即

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \text{ (b)} \tag{1.4-2}$$

【例 1-1】 设一个二进制离散信源，以相等的概率发送数字“0”或“1”，计算信源输出的每个符号的信息量。

解：二进制等概率时 $P(0) = P(1) = \frac{1}{2}$

根据式(1.4-2)，有

$$I(0) = I(1) = -\log_2 \frac{1}{2} = 1 \text{ (b)}$$

即二进制等概率时，每个符号所含信息量相等，为 1b。在工程应用中，习惯把一个二进制码元称为 1b。

同理，对于离散信源，若 N 个符号等概率 ($P = 1/N$) 出现，且每一个符号的出现是相互独立的，即信源是无记忆的，则每个符号所含的信息量相等，为

$$I(1) = I(2) = \dots = I(N) = -\log_2 P = -\log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N \text{ (b)} \tag{1.4-3}$$

式中, P 为每一个符号出现的概率; N 为信源中所包含的符号数目。若 N 是 2 的整幂次, 比如 $N=2^K (K=1,2,3,\dots)$, 则式(1.4-3)可改写为

$$I(1)=I(2)=\dots=I(N)=\log_2 N=\log_2 2^K=K(\text{b}) \quad (1.4-4)$$

式中, K 是二进制符号数目, 也就是说, 传送每一个 $N(N=2^K)$ 进制符号的信息量就等于用二进制符号表示该 N 进制符号所需的符号数目。

【例 1-2】 试计算二进制符号不等概时的信息量 [设 $P(0)=P$]。

解: 由 $P(0)=P$, 有 $P(1)=1-P$

根据式(1.4-2), 有

$$I(0)=-\log_2 P(0)=-\log_2 P(\text{b})$$

$$I(1)=-\log_2 P(1)=-\log_2 (1-P)(\text{b})$$

可见, 不等概时, 每个符号所含的信息量不同。

计算消息的信息量, 常用到平均信息量的概念。平均信息量 $H(x)$ 定义为每个符号所含信息量的统计平均值, 即等于每个符号的信息量乘以各自的出现概率再相加。

设离散信源是由 N 个符号组成的集合, 其中每个符号 $x_i (i=1,2,3,\dots,N)$ 按一定的概率 $P(x_i)$ 独立出现, 即

$$\begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_N \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_N) \end{bmatrix} \quad \text{且有 } \sum_{i=1}^N P(x_i)=1$$

则每个符号所含信息量的平均值为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_N)[- \log_2 P(x_N)] \\ &= \sum_{i=1}^N P(x_i)[- \log_2 P(x_i)](\text{b/符号}) \end{aligned} \quad (1.4-5)$$

由于 H 同热力学中的熵形式相似, 故通常又称它为信息源的熵, 其单位为 b/符号。显然, 当每个符号等概率独立出现时, 式(1.4-5)即成为式(1.4-3), 此时信源的熵有最大值。

【例 1-3】 设由 5 个符号 A、B、C、D、E 组成的离散信源, 它们出现的概率分别为 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/16$, 试求信源的平均信息量 $H(x)$ 。

解: 根据式(1.4-5), 有

$$\begin{aligned} H(x) &= \frac{1}{2} \left[-\log_2 \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{4} \left[-\log_2 \frac{1}{4} \right] + \frac{1}{8} \left[-\log_2 \frac{1}{8} \right] + \frac{1}{16} \left[-\log_2 \frac{1}{16} \right] + \frac{1}{16} \left[-\log_2 \frac{1}{16} \right] \\ &= \frac{1}{2} + \frac{2}{4} + \frac{3}{8} + \frac{4}{16} + \frac{4}{16} = 1.875(\text{b/符号}) \end{aligned}$$

以上我们讨论了离散消息的度量。关于连续消息的信息量可以用概率密度函数来描述。可以证明, 连续消息的平均信息量为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_a f(x) dx$$

式中, $f(x)$ 为连续消息出现的概率密度。

1.5 通信系统主要性能指标

在设计和评价系统时, 需要建立一套能反映系统各方面性能的指标体系。性能指标也称质量指标, 它是从整体系统上综合提出的。