



980575

高 等 学 校
工 科 电 子 类 规 划 教 材

GH

传输原理

詹道庸 编

西安交通大学出版社

高等学校工科电子类规划教材

传 输 原 理

詹道庸 编

西安交通大学出版社

内容简介

本书是全国高等学校工科电子类应用电子技术专业(大专)的统编教材,主要讲述了模拟信号和数字信号的传输原理。全书共分6章,内容包括:绪论、信道、连续波模拟调制及其信号传输、脉冲模拟调制及其信号传输、脉冲数字调制及其信号传输、数字基带传输、连续波数字调制及其信号传输、同步原理、差错控制编码等。各章附有思考题和习题,书后附有部分习题答案。

本书论述由浅入深,概念清楚,重点突出,有利于教学。本书可作为大专院校应用电子技术专业和相近专业的教材,也可供夜大、电大、职大相近专业学生使用。

(陕)新登字 007 号

高等学校工科电子类规划教材

传输原理

詹道庸 编

责任编辑 问向荣

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码 710049)

西安兴庆印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.375 字数:445 千字

1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN7-5605-0730-1/TN·45 定价:14.50 元

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由应用电子技术(大专)专业教材编审委员会征稿、推荐出版,责任编委丁钟琦教授。

本教材实施的参考时数为 72 学时。主要讲述模拟信号和数字信号的传输原理,但侧重于数字信号的传输原理。全书由四部分组成:第一部分(1~4 章)介绍通信的基本概念及模拟信号的传输原理;第二部分((5~7 章)讨论模/数变换及数字信号的传输原理;第三部分(8 章)讨论同步原理;第四部分(9 章)论述差错控制编码原理。各章均设有有一定数量的思考题与习题,书后附有部分习题答案。使用本教材时,可根据不同的教学要求灵活讲授。例如:如果当教学要求只有 54 学时,则可不讲目录中有“*”号章节的内容。在实施过程中尚需配合一定数量的示教和实验。

本教材由西安电子科技大学詹道庸编写,西安交通大学闻懋生教授担任主审。责任编委及主审人对本教材提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免会存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

1995 年 3 月

目 录

第1章 绪论

1.1 概述	(1)
1.2 传输系统的组成	(1)
1.3 传输系统的分类及传输方式	(3)
1.4 信息及其度量	(5)
1.5 传输系统的主要性能指标	(8)
1.6 通信的发展	(10)

第2章 信道

2.1 概述	(13)
2.2 信道模型	(13)
2.3 恒参信道	(16)
2.4 随参信道	(20)
2.5 信道的加性噪声	(26)
2.6 信道容量的概念	(29)

第3章 连续波模拟调制及其信号传输

3.1 概述	(32)
3.2 幅度调制的原理及抗噪声性能	(32)
3.3 非线性调制(角度调制)的原理及抗噪声性能	(45)
3.4 各种模拟调制系统的比较	(55)
3.5 频分复用(FDM)	(57)
3.6 复合调制及多级调制的概念	(58)

第4章 脉冲模拟调制及其信号传输

4.1 概述	(63)
4.2 抽样定理	(63)
4.3 脉冲振幅调制(PAM)	(69)
4.4 脉冲宽度调制(PDM)	(72)
4.5 脉冲位置调制(PPM)	(74)
4.6 时分复用(TDM)	(78)
4.7 TDM-PAM 信号的信道带宽	(79)
4.8 PAM 系统的抗噪声性能	(80)
4.9 PDM 系统的抗噪声性能	(81)

4.10 PPM 系统的抗噪声性能	(85)
第 5 章 脉冲数字调制及其信号传输	
5.1 概述	(88)
5.2 脉冲编码调制(PCM)的原理	(88)
5.3 增量调制(ΔM)的原理	(101)
5.4 PCM 系统和 ΔM 系统的抗噪声性能	(108)
5.5 脉冲数字调制在多路数字电话系统中的应用	(112)
第 6 章 数字基带传输	
6.1 概述	(119)
6.2 数字基带信号及其频谱特性	(120)
6.3 基带传输的码型	(123)
6.4 基带脉冲传输与码间干扰	(126)
6.5 具有理想低通特性的基带传输系统	(128)
6.6 等效理想低通特性的基带传输系统	(130)
6.7 部分响应系统	(135)
6.8 无码间干扰的基带传输系统的抗噪声性能	(139)
6.9 眼图	(142)
6.10 时域均衡	(143)
6.11 扰码和解扰	(148)
第 7 章 连续波数字调制及其信号传输	
7.1 概述	(157)
7.2 二进制振幅键控系统的原理	(158)
7.3 二进制频移键控系统的原理	(162)
7.4 二进制相移键控系统的原理	(168)
7.5 二进制振幅键控系统的抗噪声性能	(175)
7.6 二进制频移键控系统的抗噪声性能	(183)
7.7 二进制相移键控系统的抗噪声性能	(188)
7.8 二进制数字调制系统的性能比较	(194)
7.9 多进制数字调制系统	(195)
第 8 章 同步原理	
8.1 概述	(211)
8.2 载波同步	(211)
8.3 位同步	(214)
8.4 群同步	(225)

第9章 差错控制编码

9.1 概述	(234)
9.2 差错控制编码的基本原理	(235)
9.3 常用的简单编码	(239)
9.4 线性分组码	(241)
9.5 循环码	(246)
9.6 卷积码	(254)
附录一 通信发展简史.....	(263)
附录二 随机信号分析的有关知识.....	(264)
附录三 随机脉冲序列的谱分析 ^[1]	(269)
附录四 Q函数和误差函数 ^[10]	(273)
附录五 常用三角公式.....	(275)
附录六 傅立叶变换.....	(276)
英文缩写名词对照表.....	(278)
部分习题答案.....	(280)
参考资料目录.....	(285)

第 1 章 绪论

1.1 概述

通信是信息的传输与交换。在当今信息社会,通信与传感、计算技术紧密结合,成为整个社会的高级“神经中枢”。没有通信,人类社会是不可想象的。一般来说,社会生产力水平要求社会通信水平与之相适应。若通信的水平跟不上,社会成员之间的合作程度就受到限制,社会生产力的发展也必然最终地受到限制。可见,通信是十分重要的。

本教材主要讨论通信的重要组成部分——信息的传输原理。为了方便起见,在深入讨论上述内容之前,先简要讨论传输系统的有关基础知识及其性能指标。

1.2 传输系统的组成

1.2.1 传输系统模型

通信的目的是传递消息。消息具有不同的形式,例如:符号、文字、语声、音乐、数据、图片、活动图象等等。因而,根据所传递的消息的不同,目前通信业务可分为电报、电话、传真、数据传输及可视电话等。如果从广义的角度来看,广播、电视、雷达、导航、遥测、遥控等也可列入通信的范畴。

实际上,无论何种点对点通信,均是把发送端的消息传递到接收端。可见,消息的传输原理是通信原理的重要组成部分。

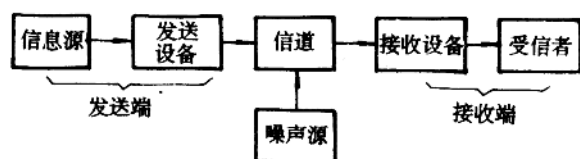


图 1.1 传输系统模型

通常,点对点通信的传输系统可由图 1.1 所示的模型加以概括。

图中,信息源(也称发送端)的作用是把各种可能消息转换成原始电信号。为了使这个原始信号适合在信道中传输,由发送设备对其完成某种变换,然后再送入信道。信道是指信号传输的通道。在接收端,接收设备的功能与发送设备的功能相反,即从接收信号中恢复出相应的原始信号,而受信者(也称信息宿或收终端)是将复原的原始信号转换成相应的消息。图中的噪声源是信道中的噪声以及分散在传输系统其它各处噪声的集中表示。

上述模型概括地反映了传输系统的共性。根据我们所讨论的对象及所关心的问题不同,将使用不同形式的更具体的传输系统模型。传输原理的讨论就是围绕系统的模型而展开的。

1.2.2 模拟传输与数字传输系统模型

如上所述,通信中传输的消息是多种多样的,可以是符号、文字、语声、图象等等。各种不同的消息可以分成两类:一类称作离散消息或数字消息;另一类称作连续消息或模拟消息。离散消息是指消息的状态是可数的或离散型的,比如符号、文字、数据等;连续消息则是其状态连续变化的消息,比如,连续变化的语声、图象等。

为了进行传递,各种消息需要转换成电信号。由图 1.1 的传输系统模型可见,消息与电信号之间必须建立单一的对应关系,否则,在接收端就无法复制出原来的消息。通常,消息被载荷在电信号的某一参量上。如果电信号的该参量携带着离散消息,则该参量必将是离散取值的。这样的信号称为数字信号。例如,电传机输出的信号就是数字信号。如果电信号的该参量连续取值,则称这样的信号为模拟信号。例如,普通电话机输出的信号就是模拟信号。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把传输系统分成模拟传输系统和数字传输系统两类。

应当指出,我们也可以先把模拟信号转换成数字信号(这种变换称作模拟-数字变换),在数字传输系统中传输,在接收端再进行相反的变换(数字-模拟变换),以还原出模拟信号。下面对上述两类传输系统模型分别加以说明。

模拟传输系统正如图 1.1 表明的那样需要两种变换。首先,发送端的连续消息要变换成原始电信号,接收端收到的电信号要反变换成原连续消息。这里所说的原始电信号,通常具有频率很低的频谱分量,一般不宜直接传输。因此,模拟传输系统中常需要进行第二种变换,即将原始电信号变换成其频带适合信道传输的信号,并在接收端进行反变换。这种变换和反变换通常称为调制和解调。经过调制后的信号称为已调信号。它应有两个基本特征:一是携带有消息,二是适应在信道中传输。通常,我们把发送端调制前和接收端解调后的信号称为基带信号。因此,原始电信号又称基带信号。而已调信号则称为频带信号。

有必要指出,消息从发送端传递到接收端并非仅经过以上两种变换,系统内还可能有滤波、放大、变频、辐射等过程。本书只着重讨论上述两种变换和反变换,其余过程被认为都是足够理想的,而不予讨论。

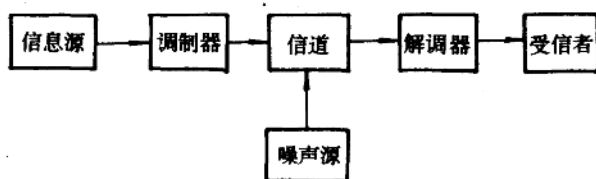


图 1.2 模拟传输系统模型

于是,一般的模拟传输系统模型可由图 1.1 略加改变而成,如图 1.2 所示。这里的调制器与解调器分别代表图 1.1 中的发送设备与接收设备。

那么,数字传输系统的模型是怎样的呢?正如前面指出的,数字传输的基本特征是,它传输的信号是“离散”或“数字”的,从而,使数字传输有许多特点。比如,对于上面提到的第二种变换,在模拟传输系统中强调变换的线性特性,即强调已调参量与基带信号成比例;而在数字传输系统中,则强调已调参量与基带信号之间的一一对应性。

此外,数字传输还有以下突出的问题:第一,数字信号传输时,信道噪声或干扰所造成的差错,原则上都是可以控制的。这是通过差错控制编码等手段来实现的。为此,在发送端需要增加一个编码器,而在接收端相应地需要一个解码器;第二,当需要保密时,可以有效地对基带信号进行人为“搅乱”(即加上密码),称为加密,此时,在接收端就需要进行解密;第三,由于数字传输系统传输的是一个接一个按节拍传送的数字信号单元(即码元),因而,接收端必须按与发送端相同的节拍接收,否则,会因收发节拍不一致而造成混乱,使接收性能变坏。另外,为了表述消息内容,基带信号都是按消息内容进行编组的(相当于写文章要有标点符号那样),因而码组的规律在收发之间也必须一致,否则在接收时,消息的正确内容就无法恢复。在数字传输系统中,通常把节拍一致称为“位同步”或“码元同步”,而把编组一致称为“群同步”“帧同步”、“句同步”或“码组同步”。可见,数字传输系统中还必须有一个同步问题。

综上所述,点对点的数字传输系统模型一般地可用图 1.3(a)表示。图中,同步环节没有示出,因它的位置往往不是固定的。当然,实际上的数字传输系统并非一定要如图 13(a)所示的那样包括所有的环节。比如,调制与解调、加密与解密、编码与解码等环节究竟采用与否,还取决于具体设计方法及要求。例如,本书将要详细讨论的数字基带传输系统,它的模型中就不包括调制与解调

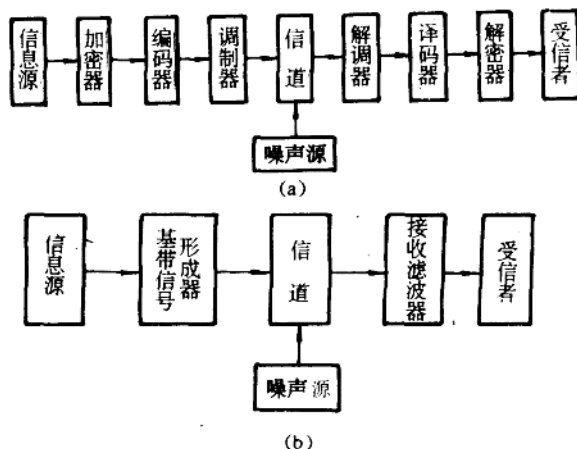


图 1.3 数字传输系统模型

环节,如图 1.3(b)所示。另外,数字传输系统中传送的消息一般都是离散型的,但也可以是连续型的。如果需要在数字传输系统中传送模拟消息,则在发送端的信息源中应包括一个模-数转换装置,而在接收端的受信者中应包括一个数-模转换装置。

由以上两种传输系统模型的分析可以看出,数字传输与模拟传输相比,更能适应对传输系统越来越高的要求:第一,数字传输的抗干扰能力强,尤其在中继时,数字信号可以再生而消除噪声的积累;第二,传输差错可以控制,从而改善了传输质量;第三,便于使用现代数字信号处理技术来对数字信息进行处理;第四,数字信息易于作高保密性的加密处理;第五,数字的传输系统可以综合传输各种消息,使传输系统的功能增强。当然,数字传输系统的上述优点,都是用比模拟传输系统占据更宽的系统频带而换得的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,而一路数字电话可能要占据 20~60kHz 的带宽。因此,数字传输系统的频带利用率不高。在系统频带紧张场合,这一缺点显得十分突出。然而,随着社会生产力的发展,有待传输的数据量急剧增加,传输的可靠性要求越来越严,保密性要求也越来越高。因而,实际中往往宁可牺牲系统频带而采用数字传输。至于在系统频带富裕的场合,比如毫米波通信、光通信等,数字传输几乎成了唯一的选择。

毫无疑问,模拟传输系统将按照模拟信号传输的特点来进行设计,而数字传输系统则按照数字信号传输的特点来设计。然而,考虑到现在仍有不少是模拟传输系统这一事实,因此就有一个尽可能利用现有模拟传输系统来传输数字信号的任务。这就要对该系统进行改造,或者加装数字终端设备。

1.3 传输系统的分类及传输方式

1.3.1 传输系统的分类

传输系统有不同分类方法。这里从传输系统模型的角度讨论其分类。

1. 按调制方式分类

前面已经指出,根据是否采用调制,可将传输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。频带传输是对各种信号调制后进行传输

的总称。常见的一些调制方式如表 1-1 所示。

表 1-1

调制方式			用途举例
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		单边带调制 SSB	载波通信、短波无线电通信、数据传输
		双边带调制 DSB	立体声广播
		残留边带调制 VSB	电视广播、传真、数据传输
	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	振幅键控 ASK	数据传输
		频移键控 FSK	数据传输
		相移键控 PSK	数据传输
		其它高效数字调制 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	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	市话中继线、卫星、空间通信
		增量调制 DM(ΔM)	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图象编码
		其它编码方式 ADPCM 等	中速数字电话

2. 按传输信号特征分类

前面已经指出,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把传输系统分成模拟传输系统和数字传输系统两类。

3. 按传输媒介分类

按传输媒介,传输系统可分为有线(包括光纤)和无线两类。

4. 按传送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;时分复用是用采样或脉冲调制方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。

1.3.2 传输方式

按消息传送的方向与时间关系,传输方式可分为单工、半双工及全双工三种。

所谓单工是指消息只能单方向传输的工作方式,如图 1.4(a)所示。例如,遥测、遥控就是单工传输方式。

所谓半双工是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发的工作方式,如图 1.4(b)所示。例如,使用同一载频工作的无线电对讲机就是按这种方式工作的。

所谓全双工是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式,如图 1.4(c)所示。例如,普通电话就是一种最常见的全双工工作方式。

在数字通信中,按照数字信号码元排列方法不同,有串序传输与并序传输之分。

所谓串序传输是将数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输,如图 1.5(a)所示。如果把数字信号码元序列分割成两路或两路以上的数字信号码元序列同时在信道中传输,则称为并序传输,如图 1.5(b)所示。

一般远距离数字传输大都采用串序传输方式,因为这种方式只需占用一条通路。并序传输在近距离数字传输中有时也会遇到,它需要占用两条或两条以上的通路,比如,使用多条导线传输。

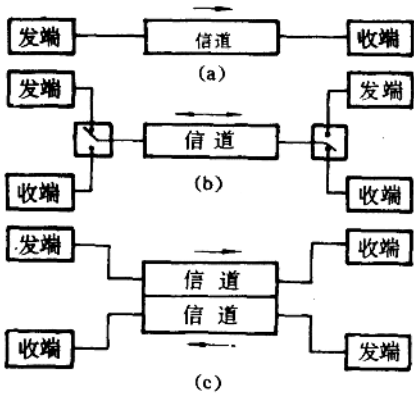


图 1.4 传输方式示意图

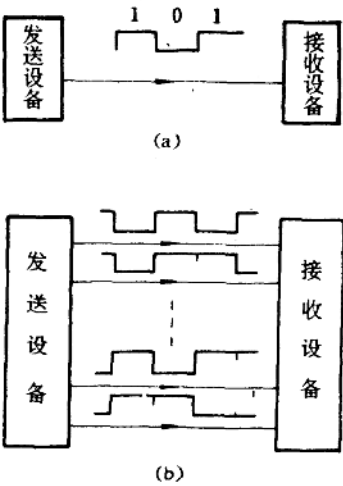


图 1.5 串序和并序传输方式

1.4 信息及其度量

通信的目的在于传递信息。为了便于今后对传输系统的主要性能作定量的分析,对信息这个术语的含义以及它的定量描述作扼要的讨论是十分必要的。

信息一词在概念上与消息的意义相似,但它的含义更普遍化、抽象化。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容。这就是说,不同形式的消息,可以包含相同的信息。例如,分别用语言和文字发送的天气预报,所含信息内容相同。如同运输货物多少采用“货运量”来衡量一样,传输信息的多少使用“信息量”来衡量。现在的问题是信息如何度量。

已经指出,消息是多种多样的。因此,度量消息中所含的信息量的方法,必须能够用来度量任何消息的信息量,而与消息种类无关。另外,消息中所含信息量的多少也应与消息的重要程度无关。

在一切有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但是对于接收者而言,某些消息比另外一些消息却含有更多的信息。例如,若一方告诉另一方一件非常可能发生的事件:“今年冬天的气候要比去年冬天的更冷些”,比起告诉另一方一件很不可能发生的事件:“今年冬天的气候将与去年夏天的一样热”来说,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为在接

收者看来,前一事件很可能发生,不足为奇,而后一事件却极难发生,听后使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义。而且,我们还可以看出,对接收者来说,事件愈不可能发生,愈是使人感到意外和惊奇,信息量就愈大。

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。亦即事件出现的可能性愈小,则概率就愈小;反之,则概率就愈大。据此,我们得到:消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关。消息出现的概率愈小,则消息中包含的信息量就愈大。如果事件是必然的(概率为1),则它传递的信息量应为零;如果事件是不可能的(概率为0),则它将有无穷的信息量。如果我们得到不是由一个事件构成,而是由若干个独立事件构成的消息,这时我们得到的总的信息量就是若干个独立事件的信息量的总和。

综上所述可以看出,为了计算信息量,消息中所含的信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 间的关系式应当反映如下规律:

- (1) 消息中所含的信息量 I 是出现该消息的概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1.4-1)$$

- (2) 消息的出现概率愈小,它所含的信息量愈大;反之信息量愈小,且当 $P(x)=1$ 时, $I=0$ 。

- (3) 若干个互相独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots \quad (1.4-2)$$

不难看出,若 I 与 $P(x)$ 间的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.4-3)$$

就可满足上述要求。

信息量的单位的确定取决于上式中对数底 a 的确定。如果取对数的底 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit);如果取 e 为对数的底,则信息量的单位为奈特(nit);若取 10 为底,则信息量的单位称为十进制单位,或叫哈特莱。上述三种单位的使用场合,应根据计算及使用的方便来确定。通常广泛使用的单位为比特。

下面讨论等概率出现的离散消息的度量。若需要传递的离散消息是在 M 个消息之中独立地选择其一,且认为每一消息的出现概率是相同的。显然,为了传递一个消息,只需采用一个 M 进制的波形来传送。也就是说,传送 M 个消息之一这样一件事与传送 M 进制波形之一是完全等价的。 M 进制中最简单的情况是 $M=2$,即二进制。而且,任意一个 M 进制波形总可以用若干个二进制波形来表示。因此,用“ $M=2$ ”时的波形定义信息量是恰当的。我们定义传送两个等概的二进制波形之一的信息量为 1,单位为“比特”。该定义就意味着式(1.4-3)变为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{2}} = \log_2 2 = 1(\text{bit}) \quad (1.4-4)$$

这里选择的对数是以 2 为底,在数学运算上比较方便。同时,在数字传输中,常以二进制传输方式为主,因而这也是恰当的。按式(1.4-4)的定义,对于 $M>2$,传送每一波形的信息量应为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{M}} = \log_2 M(\text{bit}) \quad (1.4-5)$$

若 M 是 2 的整幂次,比如 $M=2^K (K=1,2,3,\cdots)$,则式(1.4-5)可改写成

$$I = \log_2 2^K = K(\text{bit}) \quad (1.4-6)$$

式(1.4-6)表明, $M(M=2^K)$ 进制的每一波形包含的信息量,恰好是二进制每一波形包含信息量的 K 倍。由于 K 就是每一个 M 进制波形用二进制波形表示时所需要的波形数目,故传送每一个 $M(M=2^K)$ 进制波形的信息量就等于用二进制波形表示该波形所需要的波形数目 K 。

综上所述,只要在接收者看来每一传送波形是独立等概出现的,则一个波形所能传递的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} \quad (\text{bit}) \quad (1.4-7)$$

或

$$I = \log_2 M \quad (\text{bit}) \quad (1.4-8)$$

式中 M 是传送的波形数;

P 是每一波形出现的概率。

但应强调指出,上述结论仅在每一波形独立等概传送的条件下才是成立的。

现在再考察非等概的情况。设离散信息源是一个由 n 个符号组成的集合,称为符号集。符号集中的每一个符号 x_i 在消息中是按一定概率 $P(x_i)$ 独立出现的。又设符号集中各符号出现的概率为

$$\left(\begin{matrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_n) \end{matrix} \right), \quad \text{且有} \quad \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ 。于是,每个符号所含信息量的统计平均值(即平均信息量)为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[-\log_2 P(x_1)] + P(x_2)[-\log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_n)[-\log_2 P(x_n)] \\ &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned} \quad (1.4-9)$$

H 同热力学中的熵形式相似,通常又称为信息源的熵,单位为 bit/符号。显然,当 $P(x_i) = 1/n$ (等概条件时的概率值)时,式(1.4-9)即成为式(1.4-8)。用平均信息量来计算消息的信息量是很有用的。

若传送一个消息的符号总数为 m ,则该消息所含的信息量为

$$I = mH \quad (\text{bit}) \quad (1.4-10)$$

[例 1.4.1] 一信息源由 4 个符号 0, 1, 2, 3 组成。它们出现的概率分别为 $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$, 且每个符号的出现都是独立的。试求某个消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

在此消息中, 0 出现 23 次; 1 出现 14 次; 2 出现 13 次; 3 出现 7 次; 共有 57 个符号。其中, 出现 0 的信息量为

$$23 \log_2 8/3 \approx 32.55 \quad (\text{bit})$$

出现 1 的信息量为

$$14 \log_2 4 = 28 \quad (\text{bit})$$

出现 2 的信息量为

$$13 \log_2 4 = 26 \quad (\text{bit})$$

出现 3 的信息量为

$$7\log_2 8 = 21 \quad (\text{bit})$$

故该消息的信息量为

$$I = 32.55 + 28 + 26 + 21 = 107.55 \quad (\text{bit})$$

平均(算术平均)一个符号的信息量应为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{107.55}{56} \approx 1.89 \quad (\text{bit/符号})$$

若用熵的概念计算,根据式(1.4-9)有

$$H = -\frac{3}{8}\log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2 \frac{1}{8} \\ \approx 1.905 \quad (\text{bit/符号})$$

则该消息所含的信息量为

$$I = 57 \times 1.905 \approx 108.59 \quad (\text{bit})$$

以上两个结果略有差别的原因是它们平均处理方法不同。前一种按算术平均的方法,结果可能存在误差。不过,这种误差将随消息中符号数的增加而减小。

顺便指出,根据式(1.4-9)可知,不同的离散信息源可能有不同的熵值。无疑,我们期望熵值愈大愈好。可以证明,在式(1.4-9)成立的条件下,信息源的最大熵发生在每一符号等概率出现时,即 $P(x_i) = 1/n (i=1, 2, \dots, n)$, 而最大熵值等于 $\log_2 n (\text{bit/符号})$ 。

以上讨论了离散消息的度量。同样,关于连续消息的信息量可用概率密度来描述。可以证明,连续消息的平均信息量(相对熵)为

$$H_1(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_2 f(x) dx \quad (1.4-11)$$

式中 $f(x)$ 是连续消息出现的概率密度。

关于信息量的进一步讨论已超出本书的范围。有兴趣的读者,可参考信息论有关专著。

1.5 传输系统的主要性能指标

在设计或评述一个传输系统时,往往涉及传输系统的主要性能指标,否则就无法衡量其质量的优劣。性能指标也称质量指标,它们是对整个系统综合提出或规定的。

传输系统的性能指标涉及其有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等等。如果考虑所有这些因素,则传输系统的设计要包括很多项目,系统性能的评述工作也很难进行。不过,从辩证的观点来看,任何过程如果有多种矛盾的话,其中必有一种是主要的,起着主导的、决定的作用,其它则处于次要和服从的地位。尽管对传输系统可有名目繁多的实际要求,但对研究消息的传输来说,有效性与可靠性是主要的矛盾。这里所说的有效性主要是指消息传输的“速度”问题,而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。显然,这二者是相互矛盾的。这对矛盾通常只能依据实际要求取得相对的统一。例如,在满足一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速度;或者,在维持一定有效性下,使消息传输质量尽可能地提高。

在模拟传输系统中,消息传输速度主要决定于消息所含的信息量和对连续消息(即信息源)的处理。处理的目的在于使单位时间内传输更多的消息。从信息论观点来说,消息传输速度可用单位时间内传送的信息量来衡量。模拟传输系统还有一个重要性能指标,即均方误差。

它是衡量发送的模拟信号与接收端恢复的模拟信号之间误差程度的质量指标。均方误差越小,说明恢复的信号越逼真。

顺便指出,在实际的模拟传输中,上述误差是由两方面原因造成的,第一,由于信号在传输时叠加上噪声而产生的误差,一般称为加性干扰产生的误差;第二,由于信道传输特性不理想产生的误差,一般称为乘性干扰产生的误差。第一种干扰是始终存在的,不管信号有无;第二种干扰则随信号的消失而消失。对于由乘性干扰产生的误差,常常还用更具体的性能指标来表述。例如,用于电话系统还有保真度、可懂度、清晰度等质量指标。由加性干扰产生的误差,通常用信号噪声比这一指标衡量。在后面的讨论中,我们主要研究加性干扰的影响,故认为在模拟传输系统中均方误差的大小最终将完全取决于接收端输出的信号平均功率与噪声平均功率之比(简称输出信噪比);如果在相同的条件下,某个系统的输出信噪比最高,则称该系统传输质量最好,或称该系统抗信道噪声(或干扰)的能力最强。

在数字传输系统中,主要的性能指标有两个,即传输速率和差错率。为了表明这两个指标的概念,有必要先说明数字传输系统中信号是怎样表示的。

如前所述,由于数字传输系统中传输的是离散信号,因此,这些离散值就可以用数字表示。在计算机和数字通信中最适用的是二进制数字,即“0”和“1”。

在数字传输中,若离散信号的状态只有两种,则可以用一位二进制数字来表示;若离散信号多于两种,则可用若干位二进制数字来表示。当然,除了采用二进制外,还可采用多进制,比如用 N 进制。这里的 N 是大于 2 的一个正整数。 N 进制与二进制是可以相互表示的。比如,当 $N=4$ 时,则 N 进制的每一位数字可以用两位二进制数字去表示;反之亦然。原则上, N 进制的数字可用 $\log_2 N$ 个二进制数字去表示。但要注意,当 $\log_2 N$ 不为整数时,则应取大于此值的第一个整数。

在数字传输中,常用时间间隔相同的符号来表示一位二进制数字。这个间隔被称为码元长度,而这个时间间隔内的信号称为二进制码元。同样, N 进制的信号也是等长的,并被称为 N 进制码元。

有了上述知识,我们就可方便地介绍关于传输速率及差错率的概念。

传输速率通常以码元传输速率来衡量。码元传输速率又称码元速率或传码率。它被定义为每秒钟传送码元的数目,单位为“波特”,常用符号“B”表示。例如,若某系统每秒钟传送 4 800 个码元,则该系统的传码率为 4 800 波特或 4 800B。但应注意,码元速率仅仅表征单位时间内传送码元的数目,而没有限定此时的码元是何种进制。考虑到同一系统的各点上可能采用不同的进制,因此在给出码元速率时,必须说明码元的进制和该速率在系统中的位置。设二进制码元速率为 R_{B_2} , N 进制码元速率为 R_{B_N} ,且有 $2^k = N$ ($k=1, 2, 3, \dots$),则二进制与 N 进制的码元速率有如下转换关系式

$$R_{B_2} = R_{B_N} \log_2 N \quad (\text{B})$$

传输速率还可用信息传输速率来表征。信息传输速率又称为信息速率或传信率。它被定义为每秒钟传送的信息量,单位是比特/秒,或记为 bit/s(或写成 bps)。例如,若某信息源每秒钟传送 1 200 个符号,而每一符号的平均信息量为 1bit,则该信息源的信息速率为 1 200bit/s(或 bps)。今后,在无特别声明的情况下,每个二进制码元规定含有 1bit 信息量。这意味着式(1.4-4)得到满足时的情况。于是,码元速率与信息速率在数值上存在一定的关系:在二进制下,码元速率与信息速率在数值上相等,只是单位不同;在 N 进制下,设信息速率为 R_b (bit/s),

码元速率为 $R_{h_N}(B)$, 则有

$$R_b = R_{h_N} \log_2 N \quad (\text{bit/s}) \quad (1.5-1)$$

或

$$R_{h_N} = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (B) \quad (1.5-2)$$

例如, 若某八进制系统的码元速率为 1 200B, 则该系统的信息速率为 3 600bit/s。

现在讨论数字传输系统的另一性能指标——差错率。它是衡量系统正常工作时传输消息可靠程度的重要性能指标。差错率有两种表述方法: 误码率及误信率。

误码率又称误符号率, 是指错误接收的码元数在传送总码元数中所占的比例。更确切地说, 误码率即是码元在传输系统中被传错的概率。它可以表示为

$$P_b = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.5-3)$$

所谓误信率, 又称误比特率, 是指错误接收的信息量在传送信息总量中所占的比例。或者说, 它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。它可以表示为

$$P_b = \frac{\text{错误的比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.5-4)$$

1.6 通信的发展^①

前面已经指出, 信息传输是通信的重要组成部分。因此, 在深入讨论传输原理以前, 简要回顾一下通信技术的发展过程是必要的^[17]。

通信是随着生产力的发展而相应地发展的。在原始社会, 人们要交流的信息数量很少, 范围很小, 距离也很近, 因此, 采用的通信方式是手势、叫声、面部表情这样一些无语言方式。随着社会生产力的发展, 要求人们互相合作的程度提高了, 于是逐渐出现了语言通信。语言与手势相比, 可以表达更丰富的信息量。不过, 语言通信只限于面对面交流信息, 通信的距离和速度都很有限。随着生产力的进一步发展, 人类活动的领域不断扩大, 面临的问题也越来越复杂。不仅要求在更大的范围以更快的速度来传递信息, 而且还要求积累经验, 传播知识(信息), 以便更好地解决生产中某些较复杂的问题。于是, 文字就被创造出来了, 用它记录和存贮信息, 实现信息在时间上和空间上的转移。这一期间, 烽火通信、文字书信先后发展起来。到了近代, 由于工业、航海、贸易的兴起和发展, 人们互相联系的范围越来越大。为了适应这种需要, 电话、电报便应运而生。进入 20 世纪, 人类活动的领域已经进入宇宙范围。由于大工业的发展, 国际交流和贸易活动的迅猛增加, 对通信提出了更高的要求。在这些需要的推动下, 20 世纪的通信技术出现了巨大的飞跃。许多新的发明创造, 诸如通信卫星、光导纤维、大规模集成电路、计算机和微型计算机、可视电话、数据库、分组交换网等等, 在这一时期相继问世。微波中继通信、光纤通信、卫星通信及移动通信等现代通信方式的发展也十分迅速。

展望未来, 通信技术将会更迅速地发展, 并不断地以崭新的发现和发明, 开拓出新的领域, 改变自己的面貌。其间最引人注目的是以下十大趋势: (1) 人与人之间的通信将扩展成为人与人、人与机器、机器与机器以及机器与自然物之间的通信。(2) 以听觉为主的通信技术将发展成

^① “通信的发展简史”见附录一。