

现代通信新技术系列教材

储钟圻 主编

数字通信导论



4.3



 机械工业出版社
China Machine Press

现代通信新技术系列教材

数字通信导论

主编 储钟圻

参编 储钟圻 薛蔚芝 周 燕 李志平

主审 归绍升



机械工业出版社

本书系统地介绍了数字通信的基础知识、基本概念、基本原理及数字通信系统的组成,为通信系统的学习打下牢固的理论基础。

全书共分9章。第1章绪论;第2章信源编码;第3章信道编码;第4章数字调制与解调;第5章信道与噪声;第6章定时与同步;第7章数字信号的传输;第8章数字信号最佳接收;第9章通信的加密。

本书内容适应当前通信的发展,突出基本概念、基本原理,并注重吸收现代通信新技术和新概念,注重知识的归纳和总结。

本书叙述深入浅出,适用面宽,可作为高等院校通信专业的教材,也可供相应的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信导论/储钟圻主编. —北京:机械工业出版社,2002.5

现代通信新技术系列教材

ISBN 7-111-10186-3

I. 数… II. 储… III. 数字通信-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第022960号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:周娟 版式设计:霍永明 责任校对:韩晶

封面设计:陈沛 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002年8月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·9.25印张·359千字

0 001-4 000册

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

《现代通信新技术系列教材》编委会

上海高级专家协会电子电讯专业委员会 编

名誉主任委员	张 煦		
主任委员	陆 铭		
副主任委员	归绍升	周 娟	储钟圻
委 员	(按姓氏笔划为序)		
	归绍升	宋文涛	周 娟
	陆 铭	施鼎钊	胡思明
	张 煦	屠基道	储钟圻
	薛蔚芝		
主 编	储钟圻		
副 主 编	薛蔚芝		
主 审	归绍升		
编 写 人 员	储钟圻	朱立伟	陈建铭
	胡家骏	殷宗敏	周政利
	姜 淳	秦菊茹	施鼎钊
	桑逾芳	胡思明	薛蔚芝
	李志平	周 燕	甘川文
	黎滨洪		

薛蔚芝

序

现代通信新技术系列教材是通信领域中专业性强、覆盖面广的一套教材。

现代通信技术是现代电子信息技术的重要领域，在现代社会中，人类活动所需的各种信息，主要依靠现代通信技术与设施来处理、存储和传输，通信技术交织成覆盖全球的电信网络，是现代社会的神经系统。

历年来在大学从事通信课程的教学实践，结合通信部门从事实际工作的教师，还有具有丰富的设计与施工经验的工程技术人员，共同整理而编写而成。

这套教材是在阅读国内外专家、学者发表的大量论文和著作的基础上，分析和归纳撰写的。

当今世界，通信科学技术突飞猛进，作为人才培养的园地，教材建设，显得格外重要，我乐意为出版社出新书作序言，并向读者推荐。

张煦

2002年1月24日

上海交通大学教授
中国科学资深院士

前 言

数字通信已成为现代信息传送的重要手段，人类社会的生存和发展无时无刻都离不开信息的获取、传递、处理、控制和利用。特别是人类已迈入 21 世纪，信息的传播更显得重要。

数字通信导论是一门理论性强、知识面广的教材。作者在参考大量同类书籍及多年教学、科研实践的基础上编写的。它系统地介绍了数字通信的基本概念和原理，着重基本理论和数学分析方法的论述，是现代通信学科的基础教材。

本书由储钟圻编写第 4、6、8 章，薛蔚芝编写第 2、3 章，周燕编写第 5、7 章，李志平编写第 1、9 章，全书由储钟圻统稿，并担任本书主编。

限于编者水平，书中难免存在错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

序	
前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 消息、信息与信号	1
1.3 模拟信号与数字信号	2
1.4 模拟通信与数字通信	2
1.5 数字通信系统的组成	3
1.6 数字通信系统的特点	4
1.6.1 数字通信系统的主要 优点	4
1.6.2 数字通信系统的主要 缺点	5
1.7 数字通信系统的主要性能 指标	5
1.7.1 传输速率	5
1.7.2 差错率	6
1.7.3 功率利用率和频带利 用率	6
1.7.4 数字通信系统的可靠性	6
1.7.5 数字通信系统的有效性	7
1.7.6 数字通信系统的经济性	7
1.8 数字通信网	7
1.9 数字通信系统的应用与 发展	8
第 2 章 信源编码	10
2.1 信源	10
2.1.1 无记忆信源	10
2.1.2 定长码	11
2.2 信源编码	11
2.3 话音信号的主要特性	12
2.3.1 话音信号的幅度概率 密度	12
2.3.2 话音信号的功率密度谱	13
2.3.3 话音信号的动态范围	13
2.3.4 衡量话音信号传输质量的 直观指标	13
2.3.5 话音信号的数字化及其 还原	14
2.4 抽样的概念	14
2.4.1 抽样原理	14
2.4.2 抽样定理	14
2.4.3 抽样后序列的频谱	15
2.4.4 抽样信号的保持	15
2.4.5 低通型抽样定理	16
2.4.6 带通型抽样定理	17
2.4.7 抽样门	17
2.5 量化的概念	21
2.5.1 抽样信号的量化	21
2.5.2 量化噪声	22
2.5.3 量化信噪比	23
2.5.4 非均匀量化	24
2.5.5 压扩特性	25
2.5.6 常用量化方法	28
2.6 编码的概念	29
2.6.1 信源编码	30
2.6.2 编码原理与解码	30
2.6.3 电视信号的编码	39
第 3 章 信道编码	41
3.1 信道编码的概念	41

3.2	信道编码的基本定理	41	4.3.1	线性调制信号分析	77
3.3	差错控制编码	43	4.3.2	双边带振幅键控信号 (DSB-ASK)	79
3.3.1	差错控制编码的分类	44	4.3.3	单边带振幅键控信号 (SSB-ASK)	81
3.3.2	差错控制的常用方式	44	4.3.4	残留边带振幅键控信号 (VSB-ASK)	83
3.3.3	码组结构与检错、纠错 能力	46	4.3.5	正交双边带振幅调制 (QAM)	85
3.3.4	最小距离 d_0 与纠错 能力的关系	48	4.3.6	线性调制信号的产生	86
3.3.5	编码效率	49	4.3.7	线性调制信号的解调	87
3.3.6	差错控制系统的性能	50	4.3.8	二进制振幅键控 (2ASK) 信号的频谱与带宽	90
3.4	常用的简单差错控制 编码	50	4.3.9	线性调制系统的抗噪声 性能	91
3.4.1	奇偶监督码	51	4.4	频率键控系统 (FSK)	96
3.4.2	行列监督码	51	4.4.1	二进制频移键控信号的 产生	97
3.4.3	恒比码	51	4.4.2	2FSK 信号的频谱与带宽	98
3.4.4	正反码	52	4.4.3	2FSK 信号的解调	99
3.5	线性分组码	52	4.4.4	2FSK 信号的频率建立 过程	100
3.5.1	校验矩阵与生成矩阵	53	4.4.5	2FSK 系统的抗噪声 性能	103
3.5.2	线性分组码的纠、检错 能力	56	4.5	相位键控系统 (PSK)	106
3.5.3	校验矩阵与最小距离的 关系	59	4.5.1	绝对相移键控与相对相移 键控	106
3.5.4	线性分组码的伴随式	60	4.5.2	二进制相移键控信号的 产生	108
3.5.5	线性分组码的译码	60	4.5.3	2PSK 信号的频谱与 带宽	109
3.5.6	汉明码	61	4.5.4	二进制相移键控信号的 解调	110
3.5.7	增余汉明码	62	4.5.5	二进制相移键控系统的抗噪 声性能	111
3.5.8	循环码	63	4.6	二进制数字调制系统抗噪声 性能的比较	115
3.6	卷积码	70	4.7	多进制及改进型数字调制	
3.6.1	卷积码编码	70			
3.6.2	卷积码解码	71			
第4章	数字调制与解调	72			
4.1	概述	72			
4.2	数字调制的基本方式	72			
4.2.1	振幅调制 (AM)	73			
4.2.2	频率调制 (FM)	74			
4.2.3	相位调制 (PM)	75			
4.3	振幅键控系统 (ASK)	77			

系统	116	5.5.3 信号无失真传输的条件	139
4.7.1 多进制数字调幅	117	5.6 变参信道及其对数字信号传	
4.7.2 多进制数字调频	118	输的影响	140
4.7.3 多进制数字调相	118	5.6.1 变参信道的多径传播对数字	
4.7.4 最小频移键控		信号的影响	141
(MSK)	123	5.6.2 多径传播对码元传输的影	
4.7.5 幅相键控 (APK)	125	响	142
4.7.6 平滑频率调制		5.6.3 选择性衰落	143
(TFM)	127	5.6.4 分集接收	144
第 5 章 信道与噪声	130	5.7 信道噪声	145
5.1 概述	130	5.7.1 噪声的来源与类型	145
5.2 信道的种类与模型	130	5.7.2 有限频带白噪声与噪声网络	
5.3 有线信道	130	模型	146
5.3.1 明线	131	5.7.3 噪声系数与窄带噪声的测	
5.3.2 双绞线	131	量	149
5.3.3 对称电缆	132	第 6 章 定时与同步	151
5.3.4 同轴电缆	132	6.1 定时和同步的基本概	
5.3.5 光导纤维	133	念	151
5.4 无线信道	133	6.2 锁相环 (PLL) 的基本原理	
5.4.1 极长波信道	134	及其特性	152
5.4.2 超长波信道	134	6.2.1 模拟锁相环	153
5.4.3 特长波信道	134	6.2.2 数字锁相环	157
5.4.4 甚长波信道	135	6.3 载波同步	161
5.4.5 长波信道	135	6.3.1 插入导频法	162
5.4.6 中波信道	135	6.3.2 直接提取载波法	163
5.4.7 短波信道	135	6.3.3 载波同步的性能及相位误差对	
5.4.8 超短波信道	135	解调信号的影响	167
5.4.9 微波信道	136	6.4 位同步	168
5.4.10 流星余迹通信信道	137	6.4.1 外同步法 (插入导频	
5.4.11 红外线通信信道	137	法)	169
5.4.12 激光通信信道	137	6.4.2 自同步法 (直接提取位同	
5.5 恒参信道及其对数字信号		步法)	170
传输的影响	138	6.4.3 位同步相位误差对性能的	
5.5.1 恒参信道等效四端网络的		影响	171
频率响应	138	6.5 帧同步	172
5.5.2 恒参信道等效四端网络的时		6.5.1 起止式同步法	173
间响应	138		

6.5.2	加高式(或加宽式)同步法	173	关码和预编码	204	
6.5.3	连贯式插入法	174	7.6.4	部分响应波形的一般表示式	205
6.5.4	间隔式插入同步码法	178	7.7	理想数字基带传输系统的抗噪声性能	206
6.5.5	帧同步系统的性能	178	7.8	多电平码基带传输的抗噪声性能	210
6.5.6	帧同步的保护	181	7.9	基带系统测量工具——眼图	213
6.6	数字通信网的网同步	184	7.10	均衡原理	215
6.6.1	主从同步法	184	7.11	扰码与解扰	217
6.6.2	相互同步法	185	第8章	数字信号最佳接收	220
6.6.3	码速调整法	186	8.1	统计描述与最佳准则	220
6.6.4	水库法	187	8.1.1	接收端信号和干扰的统计描述	220
第7章	数字信号的传输	188	8.1.2	最佳接收准则	223
7.1	概述	188	8.2	确知信号的最佳接收——相干接收	226
7.2	数字信号传输的基本理论	190	8.2.1	二进制确知信号的最佳接收	226
7.2.1	数字信号及分析	190	8.2.2	二进制确知信号最佳接收机的性能	228
7.2.2	信道传输对信号波形的影响	193	8.2.3	二进制确知信号的最佳形式	232
7.2.3	数字信号传输的基本准则	195	8.2.4	多进制确知信号的最佳接收机及其性能	233
7.3	数字信号基带传输系统的构成	196	8.3	随机相位信号的最佳接收——非相干接收	237
7.4	基带信号的传输与码间干扰	198	8.3.1	二进制随相信号的最佳接收机	237
7.5	基带传输中码间干扰的消除	199	8.3.2	二进制随相信号的最佳接收机性能	241
7.5.1	奈奎斯特第一准则(取样值无失真传输)	199	8.3.3	多进制随相信号的最佳接收	244
7.5.2	奈奎斯特第二准则(转换点无失真)	200	8.4	起伏信号的最佳接收	246
7.5.3	奈奎斯特第三准则(脉冲波形面积保持不变)	201	8.5	实际接收机与最佳接收机的	
7.6	部分响应基带传输系统	202			
7.6.1	部分响应波形	202			
7.6.2	差错传播	203			
7.6.3	部分响应基带传输系统的相				

性能比较	248	9.2.1 密码体系的模型	270
8.6 匹配滤波器	250	9.2.2 完全保密	271
8.6.1 匹配滤波器的原理	250	9.2.3 实际保密	272
8.6.2 匹配滤波器的实现问题	255	9.3 密码体制	272
8.6.3 匹配滤波器在最佳接收中的 应用	260	9.3.1 序列密码体制	272
8.7 基带系统的最佳化	262	9.3.2 分组密码	273
8.7.1 最佳基带系统的概念	262	9.3.3 公开密钥密码	273
8.7.2 理想信道下的最佳基带系 统	262	9.4 认证、签名技术	274
8.7.3 非理想信道下的最佳基带 系统	265	9.5 扩频	275
第9章 通信的加密	268	9.6 跳频	277
9.1 密码技术的一般概念	268	9.7 通信的加密技术	279
9.2 密码技术的内容	270	9.7.1 语音保密通信系统	280
		9.7.2 图像保密通信系统	283
		9.7.3 数据保密通信系统	284
		9.7.4 通信网的保密通信系统	284
		参考文献	285

第 1 章 绪 论

1.1 引言

我国古代利用烽火台进行联络，后来人们用鼓声、旗语等作为通信手段，这是最初的数字通信实例。

1835 年，斯密尔·莫尔斯 (Samuel Morse) 发明了电报系统，1844 年，世界上第一个实用公共电报开始发送。直到 1876 年，亚历山大·格来哈姆·贝尔 (Alexander Graham Bell) 发明了电话，才开始使用模拟通信系统。经过整整一个世纪后，到 1976 年，又由数字通信逐步取代模拟通信。

1.2 消息、信息与信号

消息是指物体的客观运动和人们的主观思维，是以语言、文字或图像等方式来描述的。人们是通过消息的形式来了解和认识事物的运动状态的，因而，也就得到了消息。例如，电话中的话音、电视中的画面图像等都称为消息。消息传输过程中的最大特点是它的出现具有不确定性或者说是随机性，即收信者在收到消息之前是不知道消息的具体内容。

信息是对事物运动状态的不确定性的描述。信息是抽象的，必须借助于载体，以便于人们进行信息的交换、传递和储存，这个载体就是消息。信息量的大小与消息发生的概率有密切的关系。信息量可用消息发生概率的倒数来表示。在信息论中定义信息量为

$$I = \log \frac{1}{P(X)} = -\log P(X) \quad (1-1)$$

式中 I ——消息所含有的信息量；

$P(X)$ ——消息发生的概率。

式中，对数的底数决定着量度信息的单位。若取 2 为底，则信息量的单位为比特 (bit)；若取 e 为底，则单位为奈特 (nit)；若取 10 为底，则单位为哈特 (hart)。利用对数换底公式，可求得三种单位之间的换算关系为

$$1\text{nit} = 1.44\text{bit} \quad 1\text{hart} = 3.22\text{bit}$$

信号是用来携带信息的载体，应具有某种可以感知的物理参量，如电压、电流或光波的强度和频率等。信号又可分为模拟信号和数字信号两大类。

1.3 模拟信号与数字信号

任何电信号的波形都可以用幅度和时间两个参量来描述。

1. 模拟信号

模拟信号的主要特征是其幅度变化是连续的，可取无限个值。如图 1-1 所示的电话信号波形，各瞬间的幅度无法用有限个数值表示。

2. 数字信号

数字信号的主要特征是离散的，并且只能取有限个数值或者描述为状态函数。如图 1-2 所示的电报信号波形，其幅度只有 0 和 1 两个数值，没有其他状态。

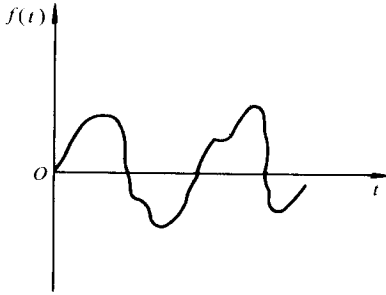


图 1-1 电话信号波形

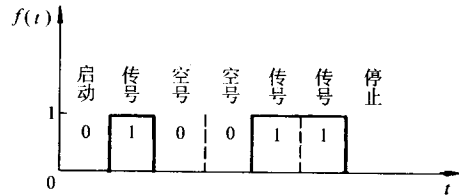


图 1-2 电报信号波形

1.4 模拟通信与数字通信

1. 模拟通信

利用模拟信号作为载体而传递信息的通信方式称为模拟通信。

2. 数字通信

利用数字信号作为载体而传递信息的通信方式称为数字通信，如古代的烽火台、交通道口使用的红灯、绿灯、电报等。

任何信息既可用模拟方式进行传输，也可用数字方式进行传输。例如电话信号，过去用模拟方式，而现在可通过数字化手段将模拟信号变成数字信号再传输，这就是数字电话。音乐、电视等信号亦可数字化。相反，数字信号经数/模变换后，也可在模拟信道上传输。

模拟信号数字化的方法很多，如脉冲编码调制（Pulse Code Modulation——PCM）、增量调制或 ΔM （Delta Modulation——DM）、差分脉冲编码调制（Differential PCM——DPCM）等。

通信数字化是通信现代化的一个重要标志。

1.5 数字通信系统的组成

数字通信系统的组成的模型如图 1-3 所示。

1. 信源与信宿

信源是信息发出源，按其性质分为有离散信息源，如电报、数据等；另一种是连续的模拟信息源，如电话等。信宿是信息的归宿，可以是受信者或是机器（如计算机）。

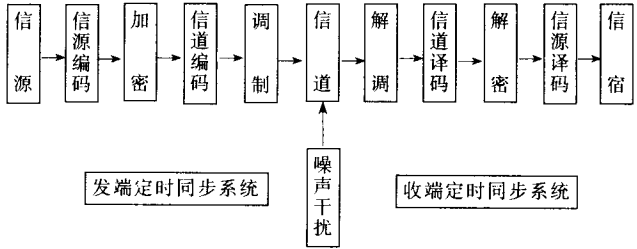


图 1-3 数字通信系统的组成

2. 信源编码与信源译码

信源编码是对信源发出的连续或离散的模拟信号进行处理，产生周期性符号序列，即对模拟信号进行取样、量化及编码，使之变为数字信号，实现模/数转换。信源译码是信源编码的逆过程。

3. 加密与解密

加密是根据通信需要保密的手段，采用复杂的密码序列对信源编码输出的数码序列进行人为的“搅乱”，这一过程称为加密。解密是加密的逆过程。

4. 信道编码与信道译码

信道会受到各种噪声干扰，引起信号失真，导致误码。为了能够自动检出错误或纠正错误，可采用检错编码或纠错编码，称为信道编码。信道译码是信道编码的逆过程。

5. 调制与解调

编码输出的数字信号是未经调制的基带信号，对于大多数信道来说，要求信号传输限定在特定的频率范围内，因而必须对基带信号进行调制，其目的是使传输的数字信号频谱与信道匹配。解调是将收到的调制信号还原成原数字信号，也就是调制的逆过程。调制与解调方式的选择，对通信的质量是非常关键的，它的选择应根据信号的特点、信道的特性以及不同的干扰环境来考虑。

6. 信道与噪声干扰

信道是信号传输的通路（即传输媒质）。不同的信道具有不同的特性，信道对整个系统具有决定性的影响。以传输媒质分类，可分为有线信道和无线信道；以多路复用方式分类，可分为频分信道和时分信道；以传输信号的形式分类，可分为模拟信道和数字信道。因此，当数字信号通过信道时，往往会发生振幅失真和相位失真，从而引起波形失真。除失真外，信号的功率也由于信道的损耗而下降。信道中的噪声可分为高斯噪声（也称正态噪声）和脉冲噪声（也称突发噪

声)。数字通信系统设计的主要目标，是设法消除因信道引起的信号失真及尽可能抑制和减小噪声的干扰。

7. 同步系统

它是数字通信系统的重要组成部分，也是与模拟通信系统的主要区别之一。同步是数字通信系统中收、发双方严格共同的时间标准。如果收、发之间失去同步的话，整个系统就不能正常工作，必须把同步捕捉回来，才能正常工作。

1.6 数字通信系统的特点

近年来，数字通信在理论上和技术上都有突飞猛进的发展，这和它具有的特点是分不开的。在早期的莫尔斯电报中，传输的就是数字信号，但数字通信的原理在 20 世纪 30 年代后期才提出，由于当时的技术条件的限制，不能得到快速的发展。直到 20 世纪 50 年代后期，小容量、短距离的数字通信设备才获得应用。近 10 年来，由于对大容量信息高速传输需要的日益增长，各种规模集成电路及毫微秒脉冲技术的发展，促进了数字通信的迅速发展。

1.6.1 数字通信系统的主要优点

数字通信与模拟通信相比有如下优点：

1. 抗干扰能力强，传输精度高

由于模拟信号在传输过程中噪声干扰是叠加在模拟信号上，接收端难以把信号和噪声分开，所以模拟通信的抗干扰能力较差。而数字信号通常传输的是二元数字信号，它的取值仅是有、无脉冲两种情况，其波形并不包含所传送的信息。在接收端对每一信号码元进行采样判决时，只要采样时刻的噪声绝对值与判决电平相比不超过某个门限值，就不会形成错判。此外，数字通信还可采用具有检错或纠错功能的信道编码，从而提高了系统的抗干扰性。由于数字信号的抗干扰能力强，在类似的信道条件下，数字通信的传输精度比模拟通信高得多。

2. 可采用再生中继实现远距离高质量的通信

远距离模拟通信系统中的噪声是积累的，因而随着通信距离的增加，传输质量也随之下降。而数字通信传送的是二元数字信号，采用再生中继的方法将在传输过程中信号所受到的噪声干扰加以消除，再生出纯净的原始信号波形。远距离的数字通信，可经过多次再生中继实现高质量的传输。

3. 能适应各种通信业务

各种信息，都可以变换为统一的二元数字信号进行传输。把数字信号传输技术与数字程控交换技术结合，还可组成统一的综合业务数字网（ISDN）。对来自各种不同信息源的信号自动地进行变换、综合、传输、处理、储存和分离，实现各种综合的业务入网。

4. 便于自动化、智能化

由于数字通信所传输的信号与数字电子计算机所采用的数字信号完全一致，所以可以很方便地与计算机进行接口连接，构成复杂的、远距离的、大规模的、灵活多样的系统，使数字通信系统趋向于自动化、智能化。

5. 易于加密

数字信号可用各种极其复杂规律的密码进行加密，只要用简单的逻辑电路就能实现，从而使通信具有高度的保密性。

6. 设备可集成化、微型化

数字电路比模拟电路容易集成化，从而做到微型化，将对数字通信系统产生极大的影响。

1.6.2 数字通信系统的主要缺点

1. 占用频带宽

数字通信所占用的带宽比模拟通信要宽得多，以一路电话为例，模拟电话通常只占 4kHz 带宽，而数字电话却占用 64kHz。它是模拟电话所占带宽的 16 倍，所以数字通信是以这一代价换来的。

2. 系统和设备比较复杂

数字通信系统和设备一般都比较复杂，末端装置种类繁多。

但近年来迅速发展的频带压缩技术及集成技术、将使得以上两个缺点显得不太重要了。

1.7 数字通信系统的主要性能指标

通信的有效性和可靠性是评价通信系统的两个最重要的指标。对数字通信系统来说，通信的有效性是指传输速率；通信的可靠性主要是指传输的差错概率，其次还有功率利用率、频带利用率和系统的可靠性、经济性等指标。

1.7.1 传输速率

1. 码元传输速率

它是指单位时间内所传输的码元数目，单位为波特 (baud)。这里的码元可以是二进制的，也可以是多进制的。码元传输速率又称为信元速率，记作 R_B 。

2. 比特传输速率

又称信息速率 (或数码率)，指的是每秒钟传输的信息量，记作 R_b ，其单位是比特/秒 (bit/s 或 bps)。在信息论中，定义为信源发出信息量的度量单位是比特。一个二进制码元，即一个“1”或一个“0”就是一个比特。

3. 消息传输速率

又称消息速率，它是指每秒所传输的消息数，记作 R_m ，其单位随消息单位而异的。例如，传输文字时，其单位是字/s。

码元速率、信息速率和消息速率三者有着不同的定义。信号是携带信息的，

信息含于消息之中。比特速率和码元速率之间的关系主要决定于携带信息的数字信号是几进制（几元制）。如果是二进制信号，且两个信号出现的概率是相等的，则每个二进制信号所含的信息量为 $\log_2 2 = 1\text{bit}$ 。

1.7.2 差错率

1. 码元差错率

亦称误码率，是指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例，习惯上用 P_e 表示。

2. 比特差错率

它是指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例，用 P_{eb} 表示。如 $P_{eb} = 10^{-2}$ ，就是每传送 100 个 bit，发生一个比特的差错。在二进制中，比特差错率等同码元差错率。在多元制中，可由码元差错率求得比特差错率。

3. 误字率和误句率

误字率是指在传输的总字数中所发生的错误字数所占的比例。误句率是指在传输的总句数中发生的错误句数所占的比例。

1.7.3 功率利用率和频带利用率

功率利用率是指比特差错率小于某一规定值时所要求的最低归一化信噪比来衡量。所要求的信噪比越低，则功率利用率就越高；反之，则越低。

频带利用率是指单位频带内所传输的信息速率。在频带宽度相同的条件下，比特传输速率越高，则频带利用率就越高；反之，则越低。

功率利用率和频带利用率的性能指标都主要决定于调制解调方式。在选择调制解调方式时，应考虑二者兼顾。如果在某些系统中，主要是功率受限，则考虑提高功率利用率而降低频率利用率。若系统中是频率受限，则提高频带的利用率，适当降低功率利用率。

1.7.4 数字通信系统的可靠性

在数字通信系统中，存在着各种噪声的干扰，接收到的数字码元可能会发生错误，使通信受到影响。可靠性指标主要用误码率 P_e 和误信率 P_b 来衡量。

1. 误码率

它是指通信过程中，系统传错码元数与所传输码元总数之比，即传错码元的概率

$$P_e = \frac{\text{传错码元数}}{\text{传输码元总数}} \quad (1-2)$$

2. 误信率

又称误比特率，是指传错信息的比特数与所传输信息总比特数之比，即

$$P_b = \frac{\text{传错信息的比特数}}{\text{传输信息总比特数}} \quad (1-3)$$