

# 通信原理 (第7版)

## 学习辅导与考研指导

曹丽娜 樊昌信 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 通信原理(第7版)学习 辅导与考研指导

曹丽娜 樊昌信 编著

常州大学图书馆  
藏书章

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书与樊昌信、曹丽娜编著的《通信原理(第7版)》相配套,全书共13章,每章包括学习目标、复习主线或学习策略、内容提要、难点·疑点、重点·考点、典型例题、习题解答、试题精选与参考答案。附录A、附录B分别提供了多套本科期末试题及答案、硕士研究生入学考试题及答案。

本书可作为高等院校的通信工程、电子信息、计算机通信等专业的本科生学习参考书和考研指导书,还可以作为有关教师的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理(第7版)学习辅导与考研指导 / 曹丽娜,  
樊昌信编著. —北京:国防工业出版社, 2013. 10  
ISBN 978-7-118-08983-7

I. ①通… II. ①曹… ②樊… III. ①通信原理—  
研究生—入学考试—自学参考资料 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 240103 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 1/2 字数 544 千字

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

“通信原理”是电子与通信工程等专业的一门重要的专业基础课程,在整个课程体系中起着承前(前修课程)启后(后续课程)的作用,因而是诸多院校相关专业硕士研究生入学考试课程之一。该课程涉及的知识面广,且理论性和实践性都很强,初学者很难把握其主脉、领会其要点。本书编写的意图是:

- 整理知识,归纳结论;
- 梳理关系,引导主线;
- 剖析难点,解惑疑点;
- 强化重点,点击考点。

旨在帮助读者深入理解通信的基本概念,提高分析问题和解决问题的能力,轻松掌握分析方法和解题技巧,从容应对课程期末考试和硕士研究生入学考试。

本书是与樊昌信、曹丽娜编著的《通信原理(第7版)》相配套,同时参考其他相关教材而编写的一本学习辅导书和考研指导书。本书在《通信原理(第6版)学习辅导与考研指导》基础上,吸取了多所院校师生的反馈意见,每章增添了复习主线或学习策略,增加了例题和疑难问题的诠释,改编了部分习题,充实了各章的期末和考研试题。

每章包括学习目标、复习主线或学习策略、内容提要、难点·疑点、重点·考点、典型例题、习题解答、试题精选与参考答案。其中,“学习目标”指出了每章应掌握的基本内容;“复习主线或学习策略”可帮助读者梳理把脉每章的内容主线;“内容提要”归纳性和贯穿性地给出了每章的知识要点和重要公式(阴影标记);“难点·疑点”帮助读者剖析难懂点,提醒易错点;“重点·考点”给出了每章必须掌握的概念和考点;“典型例题”意在示范解题思路、分析方法和解题技巧;“习题解答”全解了《通信原理(第7版)》教材中的所有习题;“试题精选与参考答案”中精选了各章的历年期末和考研试题,可供读者及时巩固和检测每章的学习效果。附录A和附录B提供了6套本科期末试题及答案和研究生入学试题及答案,以帮助读者熟悉多种题型,了解命题动态。

本书可作为高等院校的通信工程、电子信息、计算机通信等专业的本科生学习参考书和考研指导书,还可以作为有关教师的教学参考书。

本书第1章~第11章及第13章由曹丽娜教授编写;樊昌信教授编写第12章,并审核全稿。鉴于作者水平有限,难免出现疏漏,恳请读者批评指正。编者的电子函件地址如下:

曹丽娜: [ccllna@163.com](mailto:ccllna@163.com)

樊昌信: [chxfan@xidian.edu.cn](mailto:chxfan@xidian.edu.cn)

编者

2013年5月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	3.3 重点·考点 .....	32
1.1 内容提要 .....	1	3.4 典型例题 .....	33
1.1.1 信息、消息与信号 .....	1	3.5 习题解答 .....	34
1.1.2 通信系统的组成 .....	1	3.6 试题精选与参考答案 .....	39
1.1.3 通信系统的分类 .....	3	3.6.1 试题精选 .....	39
1.1.4 通信方式 .....	3	3.6.2 参考答案 .....	40
1.1.5 信息及其度量 .....	3	第 4 章 信道 .....	42
1.1.6 主要性能指标——有效性和 可靠性 .....	4	4.1 内容提要 .....	42
1.2 难点·疑点 .....	5	4.1.1 信道定义与分类 .....	42
1.3 重点·考点 .....	6	4.1.2 信道模型 .....	43
1.4 典型例题 .....	6	4.1.3 恒参信道特性及其对信号 传输的影响 .....	43
1.5 习题解答 .....	8	4.1.4 随参信道特性及其对信号 传输的影响 .....	44
1.6 试题精选与参考答案 .....	10	4.1.5 信道噪声 .....	45
1.6.1 试题精选 .....	10	4.1.6 信道容量 .....	45
1.6.2 参考答案 .....	10	4.2 难点·疑点 .....	46
第 2 章 确知信号 .....	11	4.3 重点·考点 .....	47
2.1 内容提要 .....	11	4.4 典型例题 .....	48
2.1.1 信号分类 .....	11	4.5 习题解答 .....	49
2.1.2 确知信号的频域分析 .....	12	4.6 试题精选与参考答案 .....	51
2.1.3 确知信号的时域分析 .....	15	4.6.1 试题精选 .....	51
2.2 难点·疑点 .....	16	4.6.2 参考答案 .....	51
2.3 重点·考点 .....	18	第 5 章 模拟调制系统 .....	53
2.4 典型例题 .....	18	5.1 内容提要 .....	53
2.5 习题解答 .....	20	5.1.1 调制的定义、目的和分类 .....	53
第 3 章 随机过程 .....	25	5.1.2 幅度调制原理 .....	53
3.1 内容提要 .....	25	5.1.3 线性调制系统的抗噪声 性能 .....	57
3.1.1 随机过程的基本概念 .....	25	5.1.4 角度调制的原理 .....	59
3.1.2 平稳随机过程 .....	26	5.1.5 调频系统的抗噪声性能 .....	61
3.1.3 高斯随机过程 .....	27	5.1.6 模拟调制系统性能比较 .....	63
3.1.4 平稳随机过程通过线性 系统 .....	28	5.1.7 频分复用 .....	63
3.1.5 窄带随机过程 .....	28	5.2 难点·疑点 .....	64
3.1.6 正弦波加窄带高斯噪声 .....	29	5.3 重点·考点 .....	64
3.1.7 高斯白噪声和带限白噪声 .....	29	5.4 典型例题 .....	64
3.2 难点·疑点 .....	31	5.5 习题解答 .....	67



5.6	试题精选与参考答案	75	8.1.1	正交振幅调制	129
5.6.1	试题精选	75	8.1.2	最小频移键控	132
5.6.2	参考答案	76	8.1.3	高斯最小频移键控	133
<b>第6章</b>	<b>数字基带传输系统</b>	<b>78</b>	8.1.4	正交频分复用	134
6.1	内容提要	78	8.2	难点·疑点	136
6.1.1	数字基带传输系统	78	8.3	重点·考点	136
6.1.2	数字基带信号及其频谱特性	78	8.4	典型例题	136
6.1.3	基带传输码型	80	8.5	习题解答	137
6.1.4	基带传输和码间干扰	81	8.6	试题精选与参考答案	139
6.1.5	无ISI的基带传输特性	82	8.6.1	试题精选	139
6.1.6	部分响应系统	84	8.6.2	参考答案	140
6.1.7	无ISI基带系统的抗噪声性能	85	<b>第9章</b>	<b>数字信号的最佳接收</b>	<b>141</b>
6.1.8	眼图和均衡	86	9.1	内容提要	141
6.2	难点·疑点	87	9.1.1	最佳接收准则	141
6.3	重点·考点	88	9.1.2	二进制确知信号的最佳接收	142
6.4	典型例题	88	9.1.3	二进制随相信号的最佳接收	143
6.5	习题解答	90	9.1.4	匹配滤波器	144
6.6	试题精选与参考答案	100	9.1.5	实际接收机与最佳接收机的性能比较	145
6.6.1	试题精选	100	9.1.6	最佳基带传输系统	145
6.6.2	参考答案	101	9.2	难点·疑点	146
<b>第7章</b>	<b>数字带通传输系统</b>	<b>103</b>	9.3	重点·考点	147
7.1	内容提要	103	9.4	典型例题	148
7.1.1	数字调制的基本概念	103	9.5	习题解答	150
7.1.2	二进制数字调制原理	103	9.6	试题精选与参考答案	155
7.1.3	二进制数字已调信号的频谱与带宽	108	9.6.1	试题精选	155
7.1.4	二进制数字调制系统的抗噪声性能	109	9.6.2	参考答案	157
7.1.5	二进制数字调制系统的性能比较	109	<b>第10章</b>	<b>信源编码</b>	<b>159</b>
7.1.6	多进制数字调制原理	110	10.1	内容提要	159
7.2	难点·疑点	112	10.1.1	概述	159
7.3	重点·考点	114	10.1.2	抽样定理	159
7.4	典型例题	114	10.1.3	理想抽样和实际抽样	160
7.5	习题解答	117	10.1.4	脉冲编码调制	161
7.6	试题精选与参考答案	125	10.1.5	DPCM和ADPCM	166
7.6.1	试题精选	125	10.1.6	增量调制( $\Delta M$ 或DM)	166
7.6.2	参考答案	126	10.1.7	PCM与 $\Delta M$ 的比较	168
<b>第8章</b>	<b>新型数字带通调制技术</b>	<b>129</b>	10.1.8	时分复用	168
8.1	内容提要	129	10.2	难点·疑点	169
			10.3	重点·考点	170
			10.4	典型例题	171
			10.5	习题解答	172

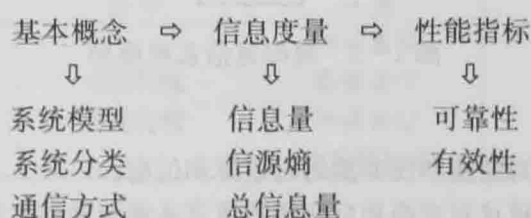
10.6	试题精选与参考答案	179	12.1.4	伪随机序列的其他应用	211
10.6.1	试题精选	179	12.2	难点·疑点	212
10.6.2	参考答案	181	12.3	重点·考点	214
<b>第 11 章</b>	<b>差错控制编码</b>	<b>182</b>	12.4	习题解答	214
11.1	内容提要	182	<b>第 13 章</b>	<b>同步原理</b>	<b>217</b>
11.1.1	差错控制的基本概念	182	13.1	内容提要	217
11.1.2	几种常用的检错码	183	13.1.1	同步简介	217
11.1.3	线性分组码	184	13.1.2	载波同步	218
11.1.4	循环码	186	13.1.3	位同步	220
11.1.5	卷积码	188	13.1.4	群同步	222
11.1.6	网格编码调制	189	13.1.5	扩谱通信系统的同步	224
11.2	难点·疑点	190	13.1.6	网同步	224
11.3	重点·考点	191	13.2	难点·疑点	224
11.4	典型例题	191	13.3	重点·考点	225
11.5	习题解答	193	13.4	典型例题	225
11.6	试题精选与参考答案	205	13.5	习题解答	227
11.6.1	试题精选	205	13.6	试题精选与参考答案	229
11.6.2	参考答案	206	13.6.1	试题精选	229
<b>第 12 章</b>	<b>正交编码与伪随机序列</b>	<b>208</b>	13.6.2	参考答案	229
12.1	内容提要	208	<b>附录 A</b>	<b>本科期末考试试题与参考答案</b>	<b>231</b>
12.1.1	正交编码	208	<b>附录 B</b>	<b>硕士研究生入学考试试题与 参考答案</b>	<b>241</b>
12.1.2	伪随机序列	209	<b>附录 C</b>	<b>常用数学公式</b>	<b>257</b>
12.1.3	扩展频谱通信	211			

# 第1章 绪 论

## 学习目标

- 信息、消息和信号的含义；
- 模拟信号与数字信号的区别；
- 通信系统的组成、分类和通信方式；
- 数字通信的优缺点；
- 信息度量的方法；
- 通信系统性能指标的定义、计算及其关系。

## 复习主线



## 1.1 内 容 提 要

### 1.1.1 信息、消息与信号

通信:利用电(或光)信号传输消息中所包含的信息。

信息:消息的内涵。

消息:信息的物理表现形式。其形式有多种,分为连续消息(如语音、音乐、温度等)和离散消息(如符号、文字、计算机数据等)两大类。

信号:消息的传输载体。消息携带在电信号的某个参量(如幅度、频率或相位)上。若电信号的该参量是连续取值的,则称为模拟信号,如电话机送出的语音信号;若该参量是离散取值的,则称为数字信号,如电报机、计算机输出的信号。

### 1.1.2 通信系统的组成

通信系统是指传递信息所需的一切技术设备和信道的总体。

#### 1. 一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

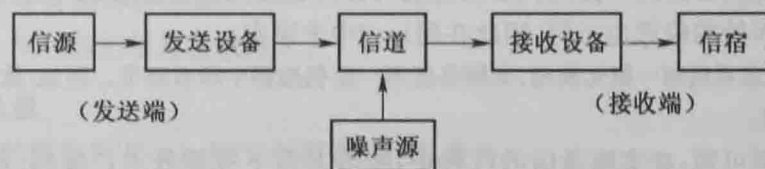


图 1-1 通信系统的一般模型

信源:把消息变换成原始电信号(基带信号),即完成非电量→电量的转换。例如:话筒(声音→音频信号)、



摄像机(图像→视频信号)。这些属于模拟信源,送出的是模拟信号。电传机(键盘字符→数字信号)、计算机等各种数字终端设备是数字信源,输出的是数字信号。

**发送设备:**将信源产生的原始电信号变换成适合在信道中传输的形式。变换方式有调制、放大、滤波、编码、多路复用等。

**信道:**传输信号的通道,即传输媒质。在给予信号通道的同时,信道也会对信号产生损耗和干扰。

**噪声源:**通信系统中各处噪声的集中表示。

**接收设备:**其功能与发送设备相反,目的是从受到减损的接收信号中恢复原始电信号。

**信宿:**传送消息的目的地。其功能与信源相反,即把原始电信号还原成相应的消息,如扬声器把音频信号还原成声音。

## 2. 模拟通信系统模型

利用模拟信号来传递信息的通信系统称为模拟通信系统,如图 1-2 所示。

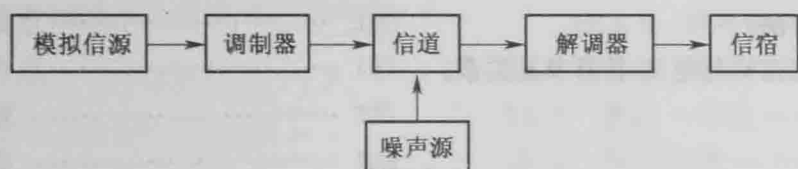


图 1-2 模拟通信系统模型

该系统包含两种重要变换:

- (1) 消息 $\rightleftharpoons$ 基带信号,完成这对变换和反变换的是信源和信宿;
- (2) 基带信号 $\rightleftharpoons$ 已调信号,完成这对变换和反变换的通常是调制器和解调器。

## 3. 数字通信系统模型

利用数字信号来传递信息的通信系统称为数字通信系统,如图 1-3 所示。

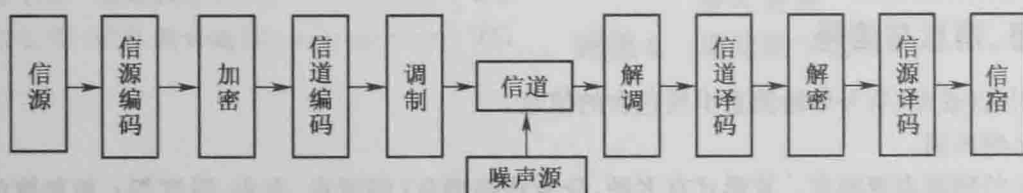


图 1-3 数字通信系统模型

信源和信宿可以是模拟的,也可以是数字的。

信源编码有两个基本功能:一是完成模/数转换,即把模拟信号转换成数字信号;二是将数字信号进行压缩处理,减小冗余,以提高信息传输的有效性。信源译码是信源编码的逆过程。

信道编码的功能是对发送的信息码元按一定的规则加入保护成分(监督元),组成所谓“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按相应的规则进行解码,从而发现或纠正错误,以提高通信系统的可靠性。

加密与解密的作用是为了提高所传信息的安全性。

调制的主要目的是使信号适应信道的特性。(详见第 7 章)。

同步是数字通信系统所必需的。按照同步的功能可分为载波同步、码元同步、群(帧)同步和网同步。不同功能的同步器在系统中所处的位置也不同,因此在图 1-3 中未画出。

**说明:**图 1-3 是数字通信系统的一般化模型,实际系统不一定包括图中所有环节。例如,数字基带传输系统(详见第 6 章)中,无需载波调制与解调。

由以上通信系统模型可知,在实施通信的过程中,将涉及以下关键技术:“编码、解码、调制、解调、同步”。在学习或复习过程中,应着眼于这些技术的原理、性能和应用。

## 4. 数字通信的优缺点

与模拟通信相比,数字通信具有以下主要优点:

- 抗干扰能力强,且无噪声积累(利用中继手段)。
- 传输差错可控(利用信道编码技术)。
- 便于进行信号处理、变换和存储,可以将来自不同信源的信号综合到一起传输。
- 易于集成,使通信设备小型化。
- 易于加密处理,且保密性好。

数字通信的缺点:

- 占用较大的传输带宽。
- 对同步要求高,因而系统较复杂。

需要说明,随着压缩编码技术、调制技术和集成电路的发展,以及宽带传输介质(如光纤)的使用,以上缺点已经弱化或克服。

### 1.1.3 通信系统的分类

通信系统的常见分类如表 1-1 所列(提示:同一个通信系统可以分属于不同的分类)。

表 1-1 通信系统的常见分类

按信道信号特征分类	按传输媒质分类	按传输方式分类	按通信业务分类	按工作波段分类	按复用方式分类
模拟通信 数字通信	有线通信 无线通信	基带传输 带通传输	电话通信 数据通信 图像通信 遥控通信等	长波通信 短波通信 微波通信 光通信等	频分复用 时分复用 码分复用 等

### 1.1.4 通信方式

通信方式是指通信的双方(或多方)之间的工作方式。常见分类如表 1-2 所列。

表 1-2 通信方式的分类

按传输的方向与时间关系分类	按数字码元传输的时序分类	按系统结构分类
单工通信 半双工通信 全双工通信	并行传输 串行传输	点到点通信(专线通信) 点到多点通信 多点之间通信(网通信)

单工:指单方向传输信息的工作方式,例如广播、遥控、无线寻呼等。

半双工通信:指通信双方都能收发信息,但不能同时进行收和发的工作方式,例如普通对讲机、问询等。

全双工通信:指通信双方可同时收发信息的工作方式,例如电话通信。

### 1.1.5 信息及其度量

对接收者来说,只有消息中不确定的内容才构成信息,而这种不确定程度可以用概率来描述。因此,消息中所含的信息量与消息发生的概率密切相关,而与消息的种类和重要程度无关。

不同形式的消息,可以包含相同的信息。

消息出现的概率越小,所包含的信息量就越大。

#### 1. 离散消息的信息量

设某离散消息  $x$  发生的概率为  $P(x)$ ,则它所携带的信息量为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.1-1)$$

信息量的单位与对数的底  $a$  有关:  $a=e$  时,单位为奈特(nit);  $a=10$  时,单位为哈特莱(Hartly);  $a=2$  时,单位为比特(bit, 简记为 b),此时有

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (\text{bit}) \quad (1.1-2)$$

对于等概信源,二进制的每个码元含 1bit 的信息量,  $M$  进制的每个码元含有  $\log_2 M$  bit, 这是因为每个  $M$  进制波形可用  $\log_2 M$  个二进制码元表示。

## 2. 离散信源的平均信息量

设离散信源为

$$\left[ \begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \dots, & x_M \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_M) \end{array} \right], \text{ 且 } \sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$$

则该信源中每个符号所含的平均信息量(又称熵)为

$$H(x) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{b/符号}) \quad (1.1-3)$$

熵的意义:表示信源的不确定性。当每个符号等概率( $P(x_i) = 1/M$ )独立出现时,不确定性最大,此时的熵有最大值,即

$$H_{\max} = \log_2 M \quad (\text{b/符号}) \quad (1.1-4)$$

## 3. 总信息量

设信源的熵为  $H(x)$ , 则该信源发送一条消息(含  $n$  个符号)的平均总信息量为

$$I = n \cdot H(x) \quad (\text{bit}) \quad (1.1-5)$$

### 1.1.6 主要性能指标——有效性和可靠性

通信的任务是快速、准确地传递信息,相应的评价指标是有效性和可靠性。有效性,指传输一定信息量所占用的信道资源(如信道带宽);可靠性,指传输信息的准确程度。这两者相互矛盾而又相互联系,通常也是可以互换的。

#### 1. 模拟通信系统

**有效性指标:**信号带宽。传送同样的消息(可用不同的调制方式)所占用的信道带宽越小,有效性越好。信号带宽小,占用的信道带宽就越小。例如,SSB 信号带宽只是 DSB 信号带宽的  $1/2$ ,故 SSB 系统的有效性比 DSB 的好。对于多路复用系统,在给定的信道带宽内,复用的用户路数越多,有效性就越好。

**可靠性指标:**输出信噪比  $S_o/N_o$ 。不同的通信业务,对信噪比  $S_o/N_o$  的要求也不同。

#### 2. 数字通信系统

(1) 有效性指标:频带利用率。它定义为单位带宽(每赫)内的传输速率,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz}) \quad \text{或} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz)}) \quad (1.1-6)$$

①  $R_B$  为码元传输速率(简称传码率,又称波特率),定义为单位时间(每秒)内传输码元的数目,单位为波特(Baud)。

注意:  $R_B$  与码元的进制数无关,仅取决于每个码元的持续时间(码元宽度)  $T_B$ , 即有

$$R_B = \frac{1}{T_B} \quad (\text{Baud}) \quad (1.1-7)$$

②  $R_b$  为信息传输速率(简称传信率,又称比特率),定义为每秒传输的平均信息量,单位为比特/秒(b/s 或 bps(bit per second))。

注意:  $R_b$  不仅与码元宽度有关,还与进制数  $M$  以及信源的统计特性有关。

③ 若设每个码元所含的平均信息量为  $H$ , 则  $R_b$  与  $R_B$  存在以下关系:

$$R_b = R_B \cdot H \quad (1.1-8)$$

由于在工程应用中,通常都默认为等概率,这时  $H = \log_2 M$ , 于是式(1.1-8)可写为

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1.1-9)$$

二进制( $M=2$ ), 有  $R_b = R_B$  (数值相等,单位不同)。

④ 若设每个二进制码元的持续时间为  $T_b$ , 则  $T_b$  与  $T_B$  有如下关系:

$$T_B = T_b \cdot \log_2 M \quad (1.1-10)$$

(2) 可靠性指标: 差错(概)率, 包括误码率和误信率等。

① 误码率: 指错误接收的码元个数在传输码元总数中所占的比例, 即

$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{传输的总码元数}} = \frac{N_e}{N} \quad (1.1-11)$$

② 误信率(误比特率): 指错误接收的比特数在传输总比特数中所占的比例, 即

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}} = \frac{I_e}{I} \quad (1.1-12)$$

③ 两者关系: 二进制时, 有  $P_b = P_e$ ;  $M$  进制时, 有  $P_b < P_e$ 。

## 1.2 难点·疑点

### 1. 模拟信号和数字信号的区别

按信号参量的取值方式不同, 信号分为模拟信号和数字信号。若信号参量是连续取值的, 则称为模拟信号; 若信号参量是离散(可数的、有限个)取值的, 则称为数字信号。

区别模拟信号和数字信号的关键, 是观察携带消息的信号参量(如幅值、频率、相位)的取值是连续的还是离散的, 而不是看时间。

例如:《通信原理(第7版)》中图1-1(b)所示的抽样信号, 尽管它在时间上是离散的, 但它仍属于模拟信号。又如:第7版教材中图1-2(b)所示的二相位信号(2PSK信号), 尽管该信号在时间上和幅度上都是连续变化的, 但它携带消息的参量是相位, 而相位参量只有两种取值, 因此它是数字信号。

### 2. 基带信号和频带信号的区别

无论是模拟信号还是数字信号, 都有基带信号和频带信号之分。基带信号是基本频带信号的简称, 通常是指信源产生的信号(如语音信号、图像信号等)。这种信号的频谱一般从零频率附近开始。频带信号是指经过(载波)调制后的信号, 即已调信号。这种信号有两个基本特征: 一是携带有基带信号的信息, 二是其频谱通常具有带通形式, 因而又称带通信号。

### 3. 比特率和波特率的区别

比特率  $R_b$ , 即信息速率——每秒传送的平均信息量或比特数, 单位为比特/秒(b/s)。它与码元宽度、码元进制及信源统计特性等因素有关。

波特率  $R_B$ , 即码元速率——每秒传送的码元个数, 单位为波特(Baud)。它仅与码元宽度有关。

为了便于理解, 我们可以用类比的方法区别波特和比特的概念。如用交通运输中的车辆类比波特, 乘客类比比特。一辆车可运载一个或多个乘客。车辆数(而不是乘客人数)确定了交通情况, 类似地, 波特数(而不是比特数)决定了所需的传输带宽。一辆车载运的乘客数越多, 说明运输效率越高, 类似地, 波特数一定时, 增加进制数, 比特率就越高, 说明传输效率越高。

因此, 波特率在数值上小于(多进制时)等于(二进制时)比特率; 波特率决定了传输带宽; 比特率反映了传输效率。

### 4. $R_b = R_B \log_2 M$ 的物理内涵

(1) 比特率  $R_b$  一定时, 增加进制数  $M$ , 可以降低  $R_B$ , 从而减小信号带宽, 节约频带资源, 提高系统频带利用率。

(2) 波特率  $R_B$  一定时(即带宽一定), 增加进制数  $M$ , 可以增大  $R_b$ , 从而在相同的带宽中传输更多的信息量。

可见, 从传输的有效性考虑, 多进制比二进制好。但从传输的可靠性考虑, 二进制比多进制好。

### 5. 误信率 $P_b$ 、误码率 $P_e$ 和进制数 $M$ 之间的关系

二进制时,  $P_b = P_e$ ;  $M$  进制时,  $P_b < P_e$ 。

可以证明: 当考虑一个特定的错误码元可以有  $(M-1)$  种不同的错误样式, 且这些错误样式以等概率出现,  $M$  为 2 的整数次方时, 误信率  $P_b$  和误码率  $P_e$  存在如下关系:

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e \quad (1.2-1)$$

在某些通信系统中,如第7章中采用格雷码的多相制系统中,错误码元中仅发生1bit错误的概率最大。这时,近似有

$$P_b \approx P_e / \log_2 M \quad (1.2-2)$$

6. 若已知比特率  $R_b$ , 则  $t$  秒内传送的总信息量为

$$I = R_b \cdot t \quad (1.2-3)$$

7. 若已知波特率  $R_B$ , 则  $t$  秒内发送的码元总数为

$$N = R_B \cdot t \quad (1.2-4)$$

8. 为什么  $M(>2)$  进制时,  $P_b < P_e$ ?

默认等概率时,  $M(>2)$  进制的的一个码元中含有  $\log_2 M$  比特。只有当一个码元中的  $\log_2 M$  比特全部出错时, 错误比特数  $I_e$  和错误码元数  $N_e$  的关系可表述为

$$I_e = N_e \log_2 M$$

此时, 由式(1.1-11)、(1.1-12)、(1.2-3)和(1.2-4)可知, 在波特率  $R_B$  和传输时间  $t$  一定时, 有

$$P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{N_e}{R_B \cdot t}$$

$$P_b = \frac{I_e}{I} = \frac{I_e}{R_b \cdot t} = \frac{N_e \log_2 M}{R_B \log_2 M \cdot t} = \frac{N_e}{N} = P_e$$

但在实际中, 当多进制的的一个码元错为另一个码元时, 它包含的  $\log_2 M$  bit 不一定全错。以八进制中的“000”码出错为例来解释: 当000错为001、010或100时, 仅发生1bit的错误; 当000错为011、110或101时, 仅有2bit的错误; 当000错为111时, 才有3bit的错误。故误信率小于误码率。

## 1.3 重点·考点

### 1. 概念

信号区别、模拟/数字通信系统原理框图及各部分功能, 通信系统的常见分类, 数字通信的特点, 各种通信方式的含义, 主要性能指标的定义等。考试的可能形式: 填空、简答题、画图题。

### 2. 计算

信息量、信源熵、总信息量的计算; 信息速率、码元速率、频带利用率、误码率、误信率的计算。

## 1.4 典型例题

例1-1 设有一个二进制离散信源(0,1), 每个符号独立发送。

(1) 若“0”、“1”等概率出现, 求每个符号的信息量和平均信息量(熵);

(2) 若“0”出现概率为1/3, 重复(1)。

解 (1) 由等概率独立条件可知,  $P(0) = P(1) = 1/2$ , 故每个符号的信息量为

$$I_0 = I_1 = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit})$$

平均信息量(熵)

$$H(x) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 1 \quad (\text{b/符号})$$

或用式(1.1-4)来计算:

$$H = \log_2 M = \log_2 2 = 1 \quad (\text{b/符号})$$

(2) 已知  $P(0) = 1/3$ , 且  $P(0) + P(1) = 1$ , 则  $P(1) = 2/3$ , 故每个符号的信息量分别为

$$I_0 = \log_2 \frac{1}{P(0)} = \log_2 3 = 1.584 \quad (\text{bit}); \quad I_1 = \log_2 \frac{1}{P(1)} = \log_2 3/2 = 0.585 \quad (\text{bit})$$



平均信息量(熵)

$$H = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 0.918 \quad (\text{b/符号})$$

评注:等概率时,每个二进制波形含 1bit 的信息量;

等概率时,信源的熵等于每个符号的信息量;

非等概率时,概率越小的符号,其信息量越大;

对比(1)和(2)可见,等概率时,信源熵有最大值  $H_{\max} = \log_2 M$ 。

例 1-2 已知某四进制离散信源(0,1,2,3)中各符号出现的概率分别为  $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$ ,且每个符号的出现都是独立的,试求:

(1) 信源的平均信息量(熵);

(2) 信源发送 200101020130201030012...消息的信息量。其中,0 出现 38 次,1 出现 25 次,2 出现 24 次,3 出现 13 次,共有 100 个符号。

解 (1) 由式(1.1-3)可得信源的熵

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= - \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \quad (\text{b/符号}) \end{aligned}$$

(2) 利用熵的概念,由式(1.1-5)可得这条消息的总信息量

$$I = n \cdot H = 100 \times 1.906 = 190.6(\text{b})$$

或用信息相加性概念来计算:

$$\begin{aligned} I &= 38 I_0 + 25 I_1 + 24 I_2 + 13 I_3 \\ &= 38 \log_2 8/3 + 25 \log_2 4 + 24 \log_2 4 + 13 \log_2 8 = 190.7 \quad (\text{b}) \end{aligned}$$

这时,每个符号的算术平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{190.7}{100} = 1.907 \quad (\text{b/符号})$$

评注:求一条消息( $n$  个符号组成)的总信息量,可用信息相加性的概念来计算,也可用熵的概念来计算,即  $I = n \cdot H$ 。

当消息序列较长时,用熵的概念计算更为方便。而且,随着消息序列长度的增加,两种计算结果之间差别将更小(参考并比较《通信原理(第 7 版)》中的例 1-2)。

例 1-3 对于同样以 2400b/s 比特率发送的信号,若 A 系统以 2PSK 调制方式传输时所需带宽为 2400Hz,而 B 系统以 4PSK 调制方式传输时的带宽为 1200Hz,试问哪个系统更有效?

解 两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。因为,真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率:

$$\text{A 系统} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2400}{2400} = 1 \quad \text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$$

$$\text{B 系统} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2400}{1200} = 2 \quad \text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$$

所以,B 系统的有效性更好。

例 1-4 设某数字传输系统传送二进制码元的速率为 1200 Baud,试求该系统的信息速率;若该系统改为传送八进制信号码元,码元速率不变,则这时系统的信息速率为多少?

解 (1) 传送二进制码元时的信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 M = R_B \log_2 2 = 1200 \quad (\text{b/s})$$

(2) 传送八进制码元时的信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 8 = 1200 \times 3 = 3600 \quad (\text{b/s})$$

评注:  $R_B$  一定时(即带宽一定),增加进制数  $M$ ,可以增大  $R_b$ ,从而在相同的带宽中传输更多的信息量。

例 1-5 设某四进制数字传输系统的每个码元的持续时间(宽度)为  $833 \times 10^{-6} \text{s}$ ,连续工作 1h 后,接收到 6 个错码,且错误码元中仅发生 1bit 的错误。试求:

(1) 该系统的码元速率和信息速率;



(2) 该系统的误码率和误信率(误比特率)。

解 (1) 码元速率

$$R_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{833 \times 10^{-6}} = 1200 (\text{Baud})$$

信息速率

$$R_b = R_B \log_2 M = 1200 \times 2 = 2400 \text{ (b/s)}$$

(2) 由式(1.2-4)可得 1h 内传送的码元总数

$$N = R_B \cdot t = 1200 \times 3600 = 432 \times 10^4 \text{ (个)}$$

由式(1.1-11)可得误码率

$$P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{6}{432 \times 10^4} = 1.39 \times 10^{-6}$$

由式(1.2-2)可得误信率

$$P_b \approx P_e / \log_2 M = 6.94 \times 10^{-7}$$

或者,先由式(1.2-3)算出 1h 内传送的信息量

$$I = R_b \cdot t = 2400 \times 3600 = 8.64 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

然后由式(1.1-12)来计算误信率

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}} = \frac{6}{8.64 \times 10^6} = 6.94 \times 10^{-7}$$

评注:多进制系统的误信率小于误码率。

## 1.5 习题解答

1-1 已知英文字母  $e$  出现的概率为 0.105,  $x$  出现的概率为 0.002, 试求  $e$  和  $x$  的信息量。

解  $e$  的信息量

$$I_e = \log_2 \frac{1}{P(e)} = -\log_2 P(e) = -\log_2 0.105 = 3.25 \text{ (bit)}$$

$x$  的信息量

$$I_x = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) = -\log_2 0.002 = 8.97 \text{ (bit)}$$

评注:概率越小,信息量越大。

1-2 设有 4 个符号,其中前 3 个符号的出现概率分别为  $1/4, 1/8, 1/8$ , 且各符号的出现是相互独立的。试计算该符号集的平均信息量。

解 各符号的概率之和等于 1, 故第四个符号的概率为  $1/2$ , 该符号集的平均信息量为

$$H = -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1.75 \text{ (b/符号)}$$

1-3 某信号源符号集由字母 A、B、C、D 组成,若传输每一个字母用二进制码元编码,“00”代替 A,“01”代替 B,“10”代替 C,“11”代替 D,每个二进制码元宽度为 5ms。

(1) 不同的字母是等可能出现时,试计算传输的平均信息速率;

(2) 若每个字母出现的可能性分别为

$$P_A = \frac{1}{5}, P_B = \frac{1}{4}, P_C = \frac{1}{4}, P_D = \frac{3}{10}$$

试计算传输的平均信息速率。

解 (1) 已知每个二进制码元宽度为 5ms, 又知一个字母由二个二进制码元组成,属于四进制符号,故一个字母的持续时间  $T_B = 2 \times 5\text{ms}$ 。因此,传送字母的符号速率为

$$R_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 100 \text{ (Baud)}$$

等概率时的平均信息速率

$$R_b = R_B \log_2 M = R_B \log_2 4 = 200 \text{ (b/s)}$$

(2) 平均信息量为

$$H = \frac{1}{5} \log_2 5 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{3}{10} \log_2 \frac{10}{3} = 1.985 \text{ (b/符号)}$$

非等概率时的平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H = 100 \times 1.985 = 198.5(\text{b/s})$$

评注:符号(或码元)速率仅与符号(或码元)持续时间有关;

等概率时才能获得最大信息速率,因为等概率时有最大熵。

1-4 一部电话机键盘上有 10 个数字键(0~9)。设发送数字 1 的概率为 0.3,发送数字 3 和 8 的概率分别为 0.14,发送数字 2,4,5,6,7,9 和 0 的概率分别为 0.06,试求:

- (1) 每键的平均信息量(熵);
- (2) 如果按键速率为 2 个/s,试计算传送的信息速率。

解 (1) 每键的平均信息量为

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^{10} P(x_i) \log_2 P(x_i) = -0.3 \log_2 0.3 - 2 \times 0.14 \log_2 0.14 - 7 \times 0.06 \log_2 0.06 \\ &= -3.32 \times (0.3 \lg 0.3 + 2 \times 0.14 \lg 0.14 + 7 \times 0.06 \lg 0.06) \approx 3.02(\text{b/键}) \end{aligned}$$

(2) 信息速率  $R_b = R_B \cdot H = 2 \times 3.02 = 6.04(\text{b/s})$

1-5 设某信源的输出由 128 个不同的符号组成。其中 16 个出现的概率为 1/32,其余 112 个的出现概率为 1/224。信源每秒发出 1000 个符号,且每个符号彼此独立。试计算该信源的平均信息速率。

解 每个符号的平均信息量

$$H = 16 \times \frac{1}{32} \log_2 32 + 112 \times \frac{1}{224} \log_2 224 = 6.405(\text{b/符号})$$

已知符号速率  $R_B = 1000 \text{ Baud}$ ,所以平均信息速率

$$R_b = R_B \cdot H = 1000 \times 6.404 = 6.405 \times 10^3(\text{b/s})$$

1-6 设二进制数字传输系统每隔 0.4ms 发送一个码元。试求:

- (1) 该系统的信息速率;
- (2) 若改为传送十六进制信号码元,发送码元间隔不变,则系统的信息速率变为多少(设各码元独立等概率出现)?

解(1) 已知码元宽度  $T_B = 0.4\text{ms}$ ,则码元速率  $R_B = 1/T_B = 2500 \text{ Baud}$ 。二进制时,信息速率等于码元速率,即

$$R_b = R_B = 2500(\text{b/s})$$

(2) 若码元间隔(码元宽度)不变,则码元速率也不变,仍为 2500 Baud,故十六进制时,信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 16 = 2500 \times 4 = 10000(\text{b/s})$$

评注:码元速率  $R_B$  仅与码元宽度有关,而与进制数及各符号出现的概率无关;码元速率  $R_B$  一定时,通过增加进制数  $M$ ,可以提高信息速率。

1-7 某信源符号集由 A,B,C,D 和 E 组成,设每一符号独立出现,其出现概率分别为 1/4,1/8,1/8,3/16 和 5/16。若每秒传输 1000 个符号,试求:

- (1) 该信源符号的平均信息量;
- (2) 1h 内传送的平均信息量;
- (3) 若信源等概率发送每个符号,求 1h 传送的信息量。

解 (1) 平均信息量(熵)

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{3}{16} \log_2 \frac{3}{16} - \frac{5}{16} \log_2 \frac{5}{16} = 2.23(\text{b/符号}) \end{aligned}$$

(2) 平均信息速率

$$R_b = R_B \cdot H = 1000 \times 2.23 = 2.23 \times 10^3(\text{b/s})$$

所以,1h 传送的平均信息量

$$I = R_b \cdot t = 2.23 \times 10^3 \times 3600 = 8.028 \times 10^6(\text{bit})$$

(3) 等概时的信源熵  $H_{\max} = \log_2 M = \log_2 5 = 3.32 \lg 5 = 2.33 \text{b/符号}$ ,此时平均信息速率最大。由式(1.1-6)可得 1h 传送的信息量

$$I = R_{b\max} \cdot t = (R_B \cdot H_{\max}) \cdot t = 1000 \times 2.33 \times 3600 = 8.352 \times 10^6(\text{bit})$$

评注:信源熵建立了信息速率与码元速率的关系。因此,当码元速率不变时,熵越大,信息速率就越大,在一定时间内传送的信息量也就越多。

1-8 设某四进制数字传输系统的信息速率为 2400b/s,接收端在 0.5h 内共收到 216 个错误码元,试计算该系统的误码率  $P_e$ 。

解 码元速率为

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} = \frac{2400}{\log_2 4} = 1200 \quad (\text{Baud})$$

0.5h(1800s)内传送的码元个数为

$$N = R_B \cdot t = 1200 \times 1800 = 2.16 \times 10^6 \quad (\text{个})$$

错误码元数  $N_e = 216$  个,因此误码率  $P_e$  为

$$P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{216}{2.16 \times 10^6} = 10^{-4}$$

## 1.6 试题精选与参考答案

### 1.6.1 试题精选

1. 出现概率越\_\_\_\_的消息,其所含的信息量越大。
2. 信源编码的目的是提高信息传输的\_\_\_\_性;信道编码的目的是提高信息传输的\_\_\_\_性。
3. 英文字母有 26 个,若每个字母在文章中出现次数均等,则每个字母的信息量为\_\_\_\_\_。
4. 某独立发送的二进制信源,“1”符号出现概率为 1/4,则“0”符号出现概率为\_\_\_\_\_,信源的平均信息量为\_\_\_\_\_。
5. 设每秒传送  $n$  个  $M$  进制的码元,则信息传输速率为\_\_\_\_\_。
6. 一个八进制数字传输系统,若码元速率为 2400Baud,则该系统的最大可能信息速率为\_\_\_\_\_。
7. 设在  $125\mu\text{s}$  内传输 256 个码元,则码元速率为,若该信码在 2s 内有 3 个码元产生错误,则误码率为\_\_\_\_\_。
8. 某离散信源每毫秒发出 4 种符号中的一个,各符号独立出现的概率分别为 1/8,1/8,1/4,1/2,该信源的平均信息量为\_\_\_\_\_平均信息速率为\_\_\_\_\_。
9. 设某四进制数字传输系统以 2400Baud 的速率传输信息,连续工作 100min 后,接收端出现 288bit 差错,则该系统的误比特率为\_\_\_\_\_。
10. 设一信源的输出由 256 个不同符号组成,其中 32 个出现的概率为 1/64,其余 224 个出现的概率为 1/448。信息源每秒发送 4800 个符号,且每个符号彼此独立。试求:
  - (1) 该信源发送信息的平均速率;
  - (2) 该信源最大可能的信息速率。

### 1.6.2 参考答案

1. 小
2. 有效;可靠
3. 4.7bit
4. 3/4; 0.81b/符号
5.  $n \log_2 M$
6. 7200b/s
7.  $2.048 \times 10^6$  Baud;  $7.32 \times 10^{-7}$
8. 1.75 b/符号; 1750b/s
9.  $P_b = \frac{288}{2400 \times \log_2 4 \times 6000} = 10^{-5}$
10. (1)  $H=7.4$  b/符号;(2) 等概率时,最大平均信息量  $H_{\max} = \log_2 256 = 8$  b/符号,最大可能的信息速率为  $R_{b_{\max}} = R_B \cdot H_{\max} = 4800 \times 8 = 38400$  b/s