



圣才考研网

www.100exam.com

【圣才考研】—考研考博专业课辅导中国第一品牌

国内外经典教材辅导系列·理工类

# 樊昌信《通信原理》

(第6版)

笔记和课后习题 (含考研真题) 详解

主编：圣才考研网

www.100exam.com

赠

140元大礼包

100元网授班 + 20元真题模考 + 20元圣才学习卡

详情登录：圣才考研网首页的【购书大礼包专区】，刮开本书所贴防伪标的密码享受购书大礼包增值服务。

特别推荐：樊昌信《通信原理》名师讲堂[高清视频]

中国石化出版社

HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

教·育·出·版·中·心

国内外经典教材辅导系列·理工类

**樊昌信《通信原理》(第6版)**  
笔记和课后习题(含考研真题)详解

主编：圣才考研网

[www.100exam.com](http://www.100exam.com)



中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书是樊昌信《通信原理》(第6版)的学习辅导书。本书基本遵循教材第6版的章目编排,共分14章,每章由三部分组成:第一部分为复习笔记,总结本章的重难点内容;第二部分是课(章)后习题详解,对教材第6版的所有习题都进行了详细的分析和解答;第三部分为考研真题详解,精选近年考研真题,并提供了详细的解答。

圣才考研网([www.100exam.com](http://www.100exam.com))提供全国所有高校各个专业的考研考博辅导班(保过班、面授班、网授班等)、樊昌信《通信原理》等国内外经典教材名师讲堂(详细介绍参见本书书前彩页)。购书享受大礼包增值服务【100元网授班+20元真题模考+20元圣才学习卡】。本书特别适用于参加研究生入学考试指定考研参考书目为樊昌信《通信原理》的考生,也可供各大院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

樊昌信《通信原理》(第6版)笔记和课后习题(含  
考研真题)详解/圣才考研网主编. —北京:中国石化  
出版社,2012.6  
(国内外经典教材辅导系列)  
ISBN 978-7-5114-1620-9

I. ①樊… II. ①圣… 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(2012)第118145号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者  
以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: [press@sinopec.com](mailto:press@sinopec.com)

北京后沙峪印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米16开本13.5印张4彩插318千字

2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷

定价:35.00元

# 《国内外经典教材辅导系列》

## 编 委 会

主编：圣才考研网(www.100exam.com)

编委：王 琳 刘会峨 邸亚辉 赵国会 傅芬贵  
东方飞 冯汉方 黄骅港 公积发 封都亭  
丰国云 刘一方 管贷方 飞山东 李于燕

# 序 言

我国各大院校一般都把国内外通用的权威教科书作为本科生和研究生学习专业课程的参考教材,这些教材甚至被很多考试(特别是硕士和博士入学考试)和培训项目作为指定参考书。为了帮助读者更好地学习专业课,我们有针对性地编著了一套复习资料,并提供配套的名师讲堂和题库。

樊昌信《通信原理》是我国高校采用较多的经典教材之一,也被众多高校(包括科研机构)指定为考研参考书目。作为该教材的学习辅导书,本书具有以下几个方面的特点:

1. 整理名校笔记,浓缩内容精华。每章的复习笔记以樊昌信《通信原理》为主,并结合国内外其他相关教材对各章的重难点进行了整理,因此,本书的内容几乎浓缩了经典教材的知识精华。

2. 解答课后习题,解析知识难点。本书以樊昌信《通信原理》为基本依据,参考了该教材的国内外配套资料和其他教材的相关知识对该教材的课(章)后习题进行了详细的分析和解答,并对相关重要知识点进行了延伸和归纳。

3. 精选名校考研真题,提供详细答案。为了强化对重要知识点的理解,本书精选了名校近年考研真题,并提供了详细的解答。所选考研真题基本体现了各章的考点和难点,特别注重联系实际突显当前热点。

圣才考研网([www.100exam.com](http://www.100exam.com))是圣才学习网旗下的考研考博专业网站,提供全国所有院校各个专业的考研考博辅导班(保过班、面授班、网授班等)、樊昌信《通信原理》等经典教材名师讲堂、考研题库(在线考试)、全套资料(历年真题及答案、笔记讲义等)、考研教辅图书等。购书享受大礼包增值服务【100元网授班+20元真题模考+20元圣才学习卡】。

你想免费代理:圣才考研网的14万余份考研考博真题(含详解)、全国500余所院校专业考研辅导课程和194种经典教材名师讲堂(课程和题库)吗?圣才考研网创业网站是中国第一家提供考研考博资源产品的教育“淘宝店”,一个完全属于自己的创业网站:自选网站名称、拥有独立后台、自己收费开课。(创业网站的详细介绍参见本书书前彩页,咨询电话:18001260136,咨询QQ:540421935)

考研辅导: [www.100exam.com](http://www.100exam.com)(圣才考研网)

官方总站: [www.100xuexi.com](http://www.100xuexi.com)(圣才学习网)

圣才学习网编辑部

# 目 录

第1章 绪论 .....	( 1 )
1.1 复习笔记 .....	( 1 )
1.2 课后习题详解 .....	( 5 )
1.3 名校考研真题详解 .....	( 7 )
第2章 确知信号 .....	( 9 )
2.1 复习笔记 .....	( 9 )
2.2 课后习题详解 .....	( 12 )
2.3 名校考研真题详解 .....	( 15 )
第3章 随机过程 .....	( 16 )
3.1 复习笔记 .....	( 16 )
3.2 课后习题详解 .....	( 22 )
3.3 名校考研真题详解 .....	( 31 )
第4章 信道 .....	( 35 )
4.1 复习笔记 .....	( 35 )
4.2 课后习题详解 .....	( 39 )
4.3 名校考研真题详解 .....	( 41 )
第5章 模拟调制系统 .....	( 44 )
5.1 复习笔记 .....	( 44 )
5.2 课后习题详解 .....	( 51 )
5.3 名校考研真题详解 .....	( 63 )
第6章 数字基带传输系统 .....	( 70 )
6.1 复习笔记 .....	( 70 )
6.2 课后习题详解 .....	( 76 )
6.3 名校考研真题详解 .....	( 93 )
第7章 数字带通传输系统 .....	( 99 )
7.1 复习笔记 .....	( 99 )
7.2 课后习题详解 .....	( 105 )
7.3 名校考研真题详解 .....	( 116 )
第8章 新型数字带通调制技术 .....	( 122 )
8.1 复习笔记 .....	( 122 )
8.2 课后习题详解 .....	( 125 )
8.3 名校考研真题详解 .....	( 126 )

<b>第9章 模拟信号的数字传输</b> .....	(128)
9.1 复习笔记 .....	(128)
9.2 课后习题详解 .....	(137)
9.3 名校考研真题详解 .....	(144)
<b>第10章 数字信号的最佳接收</b> .....	(151)
10.1 复习笔记 .....	(151)
10.2 课后习题详解 .....	(155)
10.3 名校考研真题详解 .....	(161)
<b>第11章 差错控制编码</b> .....	(164)
11.1 复习笔记 .....	(164)
11.2 课后习题详解 .....	(170)
11.3 名校考研真题详解 .....	(184)
<b>第12章 正交编码与伪随机序列</b> .....	(188)
12.1 复习笔记 .....	(188)
12.2 课后习题详解 .....	(190)
12.3 名校考研真题详解 .....	(193)
<b>第13章 同步原理</b> .....	(194)
13.1 复习笔记 .....	(194)
13.2 课后习题详解 .....	(198)
13.3 名校考研真题详解 .....	(200)
<b>第14章 通信网</b> .....	(203)
14.1 复习笔记 .....	(203)
14.2 课后习题详解 .....	(205)
14.3 名校考研真题详解 .....	(206)

# 第1章 绪论

## 1.1 复习笔记

### 一、通信系统概述

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。信息是消息中包含的有效内容，而信号则是消息的载体。消息携带在电信号的某一参量上，若电信号的该参量是离散取值的，则称为数字信号；若该参量连续取值，则称为模拟信号。

#### 1. 通信系统的一般模型

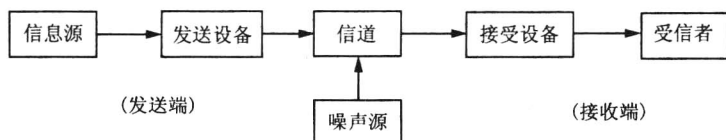


图 1-1 通信系统的一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示，其各部分的作用如下：

(1) 信息源(简称信源)的作用是把各种消息转换成原始电信号(基带信号)，即完成非电量 - 电量的转换。

(2) 发送设备的作用是将信源和信道匹配起来，转换成适合于在信道中传输的信号。变换方式有多种，如调制、放大、滤波、编码等。

(3) 信道是指传输信号的通道，可分为有线和无线两大类。信道既给信号以通路，也会对信号产生损耗和干扰。

(4) 噪声源是信道中的噪声及分散在通信系统其它各处的噪声的集中表示。

(5) 接收设备的作用是将信号放大和反变换(如译码、解调等)，其目的是从受到减损的接收信号中正确恢复出原始电信号。

(6) 受信者(简称信宿)是传送消息的目的地，其功能与信源相反，即把原始电信号还原成相应的消息，如扬声器等。

#### 2. 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统，其模型如图 1-2 所示。

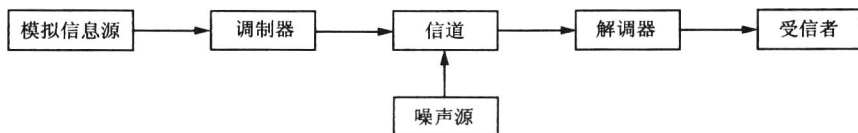


图 1-2 模拟通信系统模型

该系统包含两种重要的变换：

(1) 消息 ↔ 基带信号，完成这种变换和反变换的设备是信源和信宿；

(2) 基带信号 ↔ 已调信号，完成这种变换和反变换的设备通常是调制器和解调器。



经过调制以后的信号称为已调信号，它应有两个基本特征：①携带有信息；②适合在信道中传输。

### 3. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统，如图 1-3 所示。

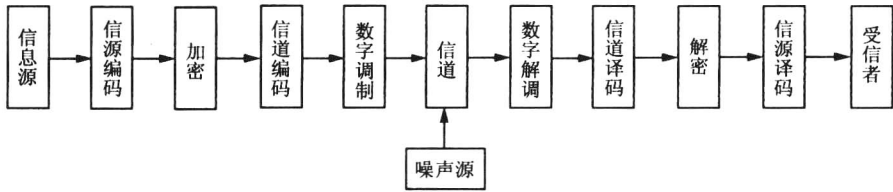


图 1-3 数字通信系统模型

(1) 信源和信宿：可以是模拟的，也可以是数字的。

(2) 信源编码与译码

信源编码有两个基本功能：①提高信息传输的有效性，即通过某种数据压缩技术设法减少码元数目和降低码元速率；②完成模/数(A/D)转换。信源译码是信源编码的逆过程。

(3) 信道编码与译码：信道编码器对传输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”；接收端信道译码器按相应的规则进行解码，从中发现错误或纠正错误，提高通信系统的可靠性。

(4) 加密与解密：加密是为了提高所传信息的安全性。在传输重要信息时，按照某加密算法，即密钥，对明文进行加密，使其变成密文后再发送出去。接收时，利用密钥进行解密，从而恢复原来的信息。

(5) 数字调制与解调：数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适合在信道中传输的带通信号。数字解调是数字调制的逆过程。

(6) 同步：同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。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。

应当注意：图 1-3 是数字通信系统的一般化模型，实际的数字通信系统不一定包括图中的所有环节，例如数字基带传输系统(详见第 6 章)中无需调制和解调；有的环节由于分散在各处，图 1-3 中也没有画出，例如同步。此外，模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输。

### 4. 数字通信的优缺点

(1) 优点

① 抗干扰能力强，且噪声不累积。数字通信系统中传输的是离散取值的数字波形，接收端的目标不是精确地还原被传输的波形，而是从受到噪声干扰的信号中判决出发送端所发送的是哪一个波形。

② 传输差错可控。在数字通信系统中，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 便于用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理、变换和存储。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。

④ 易于集成，使通信设备微型化，重量轻。

⑤ 易于加密处理，且保密性好。

(2) 缺点

- ①占用较大的传输带宽。
- ②由于对同步要求高，因而系统设备复杂。

## 二、通信系统分类与通信方式

### 1. 通信系统的分类

通信系统的类别可从不同的角度来划分，如表 1-1 所示。

表 1-1 通信系统的分类

按通信业务分类	按信号特征分类	按传输媒质分类	按工作波段分类	按信号复用方式分类	按传输方式分类
电话通信 数据通信 图像通信 遥控通信等	模拟通信 数字通信	有线通信 无线通信	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	基带传输 带通传输

### 2. 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，其常见分类如表 1-2 所示。

表 1-2 通信方式的分类

按消息传递的方向与时间关系分类	按数据代码排列的时序分类	按系统结构分类	按同步方式分类
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)	同步通信 异步通信

(1)单工通信：指消息只能单方向传输的工作方式。例如，广播、遥测、遥控、无线寻呼等。

(2)半双工通信：指通信双方都能进行收或发消息，但不能同时进行收发消息的工作方式。例如，使用同一载频的普通对讲机，问询及检索等。

(3)全双工通信：指通信双方都可同时进行收发消息的工作方式。例如，电话通信、计算机之间的高速数据通信等。

(4)并行传输：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的工作方式。

(5)串行传输：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的工作方式。

注意：一种通信方式可以具有多种类型，如广播电视既是一种单工通信方式，也是一种点到多点的通信方式。

## 三、信息及其度量

信息是指消息中包含的有效内容，或者说是受信者预先不知且待知的内容。消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关，消息出现的概率越小，则消息中包含的信息量就越大。

离散消息  $x$  出现的概率  $p(x)$  与它所携带的信息量  $I$  之间的关系式：

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x)$$

信息量的单位与对数的底  $a$  有关。如果  $a=2$ ，则信息量的单位为比特(bit)，可简记为  $b$ ；如果  $a=e$ ，则信息量的单位为奈特(nat)；如果  $a=10$ ，则信息量的单位为哈特莱(Hartley)。通常广泛使用的单位为比特。

设信源输出  $n$  个统计独立的符号  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，它们出现的概率分别是  $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ ，则信源中每个符号的平均信息量计算公式：

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号})$$

假设信源中有  $M$  个符号，当信息源的每个符号等概率出现时，信源具有最大熵：

$$H_{\max} = \log_2 M \quad (\text{bit/符号})$$

设某信源的熵为  $H(x)$ ，当该信源发送  $m$  个符号时，所发送的总信息量为：

$$I = m \cdot H(x) \quad (\text{bit})$$

#### 四、通信系统主要性能指标

1. 通信系统的指标：有效性、可靠性、适用性、经济性、标准性、可维护性等。

2. 模拟通信系统：有效性用传输带宽来衡量，传送同样的消息所需的带宽越小，通信的有效性就越好；可靠性用输出信噪比来衡量，输出信噪比越高，通信质量就越好。

3. 数字通信系统：有效性用传输速率和频带利用率来衡量；可靠性用差错率来衡量。

##### (1) 传输速率和频带利用率

传输速率可以用码元传输速率或信息传输速率表示。

①码元传输速率  $R_B$ ，简称码元速率、传码率，又称波特率。其定义为单位时间(每秒)传输码元的数目，单位是波特(Baud)。码元速率仅仅表征单位时间传送码元的数目，而没有限定码元是何种进制。因此，只要知道每个码元的持续时间(码元长度) $T$ (秒)，即可得

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{Baud})$$

②信息传输速率  $R_b$ ，简称信息速率、传信率，又称比特率。其定义为单位时间(每秒)内传递的信息量，单位是比特/秒(bit/s)。

$R_b$  与  $R_B$  的关系：设每个码元所含的平均信息量为  $H$ ，则有

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{b/s})$$

每个码元等概率时， $H = \log_2 M$  (即  $M$  进制的每个码元携带  $\log_2 M$  比特的信息量)，则有

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

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

二进制( $M=2$ )时，有  $R_b = R_B$ 。

③频带利用率。在比较不同通信系统的有效性时，单看它们的传输速率是不够的，还应考虑所占用的频带宽度，因为两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。所以，真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率，它定义为单位带宽(每赫)内的传输速率，即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz})$$

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

## (2) 差错率

差错率可以用误码率和误信率表示。

①误码率  $P_e$  定义为:

$$P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

即指错误接收的码元数在传输总码元数中所占的比例。误码率越低,则数字通信系统的可靠性越高。

②误信率(误比特率)  $P_b$  定义为:

$$P_b = \frac{\text{错误接收比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

即指错误接收的比特数在传输总比特数中所占的比例。

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

## 1.2 课后习题详解

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: 字母  $e$  的信息量:  $I_e = -\log_2 P(e) = 3.25(\text{bit})$

字母  $x$  的信息量:  $I_x = -\log_2 P(x) = 8.97(\text{bit})$

1-2 某信息源符号集由 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。试求该信息源符号的平均信息量。

解: 根据平均信息量公式可得, 符号集 {A, B, C, D, E} 的平均信息量为:

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

1-3 设有四个符号, 其中前三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对独立的。试计算该符号集的平均信息量。

解: 由概率归一性知, 第四个符号的出现概率为 1/2, 则该符号集的平均信息量为:

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1.75(\text{bit/符号})。 \end{aligned}$$

1-4 一个由字母 A、B、C、D 组成的字, 对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码, 其中 00 代替 A, 01 代替 B, 10 代替 C, 11 代替 D, 每个脉冲宽度为 5 ms。

(1) 若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) 一个字母对应两个二进制码元, 所以属于四进制符号, 不同字母等可能出现时, 平均信息量达最大熵值  $H(x) = \log_2 N = \log_2 4 = 2(\text{bit/符号})$

且根据题意可知, 编码后每个字母的持续时间是  $T = 2 \times 5 \text{ ms} = 10 \text{ ms}$ , 故每个字母的传输速率为:

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

则传输的平均信息速率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 200 (\text{bit/s})$ 。

(2) 不同字母出现概率不同时, 平均信息量为:

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= - \frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{10} \log_2 \frac{3}{10} = 1.985 (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

则传输的平均信息速率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 100 \times 1.985 = 198.5 (\text{bit/s})$ 。

**1-5** 国际摩尔斯电码用“点”和“划”的序列发送英文字母, “划”用持续 3 个单位的电流脉冲表示, “点”用持续 1 个单位的电流脉冲表示; 且“划”出现的概率是“点”出现概率的 1/3。

(1) 计算“点”和“划”的信息量;

(2) 计算“点”和“划”的平均信息量。

解: (1) 由概率归一性及已知条件可得, “点”和“划”出现的概率分别为  $P_1 = 0.75$  和  $P_2 = 0.25$ 。

“点”的信息量:  $I_1 = -\log_2(P_1) = 0.415 (\text{bit})$

“划”的信息量:  $I_2 = -\log_2(P_2) = 2 (\text{bit})$

(2) “点”和“划”的平均信息量:  $H = P_1 I_1 + P_2 I_2 = 0.81 (\text{bit/符号})$ 。

**1-6** 设一信息源的输出由 128 个不同符号组成, 其中 16 个出现的概率均为 1/32, 其余 112 个出现的概率均为 1/224。信息源每秒发出 1000 个符号, 且每个符号彼此独立。试计算该信息源的平均信息速率。

解: 该信息源的平均信息量为:

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= - 16 \times \frac{1}{32} \log_2 \frac{1}{32} - 112 \times \frac{1}{224} \log_2 \frac{1}{224} = 6.405 (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

根据题意可知, 码元速率  $R_B = 1000 (\text{Baud})$ , 则该信息源的平均信息速率为:

$$R_b = R_B \times H(x) = 6405 (\text{bit/s})$$

**1-7** 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 2400 B, 试求该系统的信息速率; 若该系统改为传送 16 进制信号码元, 码元速率不变, 则此时该系统的信息速率为多少(设各码元独立等概率出现)?

解: 传送二进制码元时, 信息速率为:  $R_b = R_B \times \log_2 2 = 2400 (\text{bit/s})$ ;

传送 16 进制码元时, 信息速率为:  $R_b = R_B \times \log_2 16 = 9600 (\text{bit/s})$ 。

**1-8** 若题 1-2 中信息源以 1000 B 速率传送信息。

(1) 试计算传送 1 h 的信息量;

(2) 试计算传送 1 h 可能达到的最大信息量。

解: (1) 由题 1-2 得平均信息量为:  $H(x) = 2.23 (\text{bit/符号})$

则平均信息速率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 2230 (\text{bit/s})$

则传送 1h 的信息量为:  $I = R_b \times T = 2230 \times 3600 = 8.028 \times 10^6 (\text{bit})$

(2) 信息源符号等概出现时, 信息源达最大熵, 此时

$$H(x) = \log_2 5 = 2.32 \text{ (bit/符号)}$$

则平均信息速率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 2320 \text{ (bit/s)}$

传送 1h 可能达到的最大信息量为:  $I = R_b \times T = 2320 \times 3600 = 8.352 \times 10^6 \text{ (bit)}$ 。

**1-9** 如果二进制独立等概信号的码元宽度为 0.5 ms, 求传码率  $R_B$  和传信率  $R_b$ ; 若改为四进制信号, 码元宽度不变, 求  $R_B$  和独立等概时的  $R_b$ 。

解: (1) 传送二进制独立等概码元, 平均信息量达最大熵

$$H(x) = \log_2 2 = 1 \text{ (bit/符号)}$$

因传码率为:  $R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} = 2000 \text{ (Baud)}$

故传信率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 2000 \text{ (bit/s)}$ 。

(2) 传送四进制独立等概码元, 平均信息量达最大熵

$$H(x) = \log_2 4 = 2 \text{ (bit/符号)}$$

且传码率不变:  $R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} = 2000 \text{ (Baud)}$

则传信率为:  $R_b = R_B \times H(x) = 4000 \text{ (bit/s)}$ 。

**1-10** 已知某四进制数字传输系统的传信率为 2400 b/s, 接收端在 0.5 h 内共收到 216 个错误码元, 试计算该系统的误码率  $P_e$ 。

解: 根据题意可知, 该四进制系统的传码率为

$$R_B = \frac{R_b}{H(x)} = \frac{R_b}{\log_2 M} = \frac{2400}{\log_2 4} = 1200 \text{ (Band)}$$

则 0.5h 内传送的码元数目为:  $N = 1200 \times 0.5 \times 3600 = 2.16 \times 10^6 \text{ (个)}$

错误码元数  $N_e = 216$  个, 故该系统的误码率为:  $P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{216}{2.16 \times 10^6} = 10^{-4} = 0.01\%$ 。

## 1.3 名校考研真题详解

### 一、填空题

1. 通信系统中, 发出待传送信息的主体称为信源, 该信息的接受者称为信宿, 而传送信息的通道称为( )。[北科 2011 研]

**【答案】**信道

**【解析】**通信系统主要由信源、信道、信宿组成, 信源的作用是将各种可能的消息转换成原始电信号, 信道负责传送由原始电信号转换而来的信号, 信宿的作用则是将复原的原始电信号转换成相应的消息。

2. 信源编码是降低信号中( )的编码, 目的是提高通信系统的( ); 信道编码是增加信号中( )的编码, 目的是提高通信系统的( )。[南京大学 2010 研]

**【答案】**信息冗余度; 有效性; 信息冗余度; 可靠性。

**【解析】**信源中存在一些不必要传送的信息, 因此信源也就存在进一步压缩其信息速率的可能性, 信源编码是降低信号中的信息冗余度, 提高系统的有效性; 由于实际信道存在噪声和干扰的影响, 使得信息在传送过程中出现差错, 信道编码则是依靠增加信息冗余度, 提高系统的可靠性。

3. 一离散信源输出二进制符号, 在( )条件下, 每个二进制符号携带 1 比特信息量; 在( )条件下, 每个二进制符号携带的信息量小于 1 比特。[北科 2010 研]

【答案】等概; 不等概。

【解析】离散信源的熵  $H(X) = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i)$ 。若  $X$  为离散二进制信源, 且等概时, 信源的熵  $H(X)$  达到最大值为  $-\log_2 \frac{1}{2} = 1$ ; 当信源  $X$  不等概率时, 信息熵  $H(X) < 1$ 。

4. 数字通信系统中, 传输的信息速率与系统带宽的比值称为( )。[北科 2011 研]

【答案】频带利用率

【解析】单位带宽内的传输速率称为频带利用率, 而传输速率用码元速率  $R_B$  与信息速率  $R_b$  表示, 故单位带宽内的传输信息速率也为频带利用率, 即  $\eta_b = \frac{R_b}{B}$  (bit/(s · Hz))。

## 二、选择题

1. 十六进制数字信号的传码率是 1200 B, 则传信率为( ); 如果传信率不变, 则八进制传码率为( )。[南邮 2010、2009 研]

A. 1600 b/s, 1200 B

B. 1600 b/s, 3200 B

C. 4800 b/s, 2400 B

D. 4800 b/s, 1600 B

【答案】D

【解析】十六进制数字信号的传信率为:  $R_b = R_B \log_2 16 = 4800$  b/s;

传信率不变, 则八进制传码率为:  $R_B = \frac{R_b}{\log_2 8} = \frac{4800}{3} = 1600$  B。

2. 一个事件的发生概率越( ), 所含信息越( )。[南邮 2009 研]

A. 高; 高

B. 大; 大

C. 大; 丰富

D. 小; 大

【答案】D

【解析】一个事件  $x$  发生的概率为  $P(x)$ , 则它所携带的信息量为:  $I = -\log_2 P(x)$ , 由此可知: 一个事件发生的概率越小, 信息量越大。

## 三、计算题

已知一个信源:

$X_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$P_i$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$

试求: 信源熵  $H(X)$  的值。[北科 2011 研; 南京大学 2010 研]

解: 信源熵:  $H(X) = -\sum P(x_i) \log_2 P(x_i)$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\
 &= 1.75 \text{ (bit/符号)}
 \end{aligned}$$

# 第2章 确知信号

## 2.1 复习笔记

### 一、信号的分类和概述

#### 1. 确知信号和随机信号

确知信号是可以预先知道其变化规律的信号，可以用确定的时间函数、图形或曲线来描述。例如，振幅、频率和相位都是确定的正弦波，即为一个确知信号。随机信号又称为不确定信号，不能用一个或几个确定的时间函数来描述。例如，通信系统中的热噪声，即为一个随机信号。

#### 2. 周期信号和非周期信号

确知信号可分为周期信号和非周期信号。若信号  $s(t)$  满足：

$$s(t) = s(t + T_0) \quad -\infty < t < +\infty$$

则称  $s(t)$  为周期信号。满足上述条件的最小  $T_0$  称为信号的周期，将  $\frac{1}{T_0}$  称为信号的基频。

非周期信号是指不具有重复性的信号，例如，符号函数、单位冲激信号、单位阶跃信号等。

#### 3. 能量信号和功率信号

(1) 若信号的能量是一个正的有限值，即

$$0 < E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt < \infty$$

则称此信号为能量信号。

特征：信号的振幅和持续时间均有限，非周期性，例如，单个矩形脉冲。

(2) 若信号的平均功率是一个正的有限值，即

$$0 < P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s^2(t) dt < \infty$$

则称此信号为功率信号。

特征：信号的持续时间无限，例如，直流信号、周期信号和随机信号。

### 二、确知信号的频域特性

#### 1. 功率信号的频谱

设  $s(t)$  是一个周期为  $T_0$  的周期功率信号，若它满足狄利克雷条件，则可展开成指数型傅里叶级数：

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi n f_0 t}$$

即功率信号可以分解为谐波频率为  $n f_0$ ，复振幅为  $C_n$  的指数信号  $e^{j2\pi n f_0 t}$  的线性组合。

其中，傅里叶级数的系数为：

$$C_n = C(n f_0) = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} s(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt$$



式中,  $f_0 = 1/T_0$ ;  $n$  为整数,  $-\infty < n < +\infty$ 。

傅里叶系数  $C_n$  反映了信号中各次谐波的幅度值和相位值, 因此称  $C_n$  为功率信号的频谱。

## 2. 能量信号的频谱密度

设  $s(t)$  为一个能量信号, 则将其的傅里叶变换  $S(f)$  定义为它的频谱密度:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$S(f)$  的傅里叶反变换即为原信号:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df$$

即能量信号可以分解为无数个频率为  $f$ , 复振幅为  $S(f) df$  的指数信号  $e^{j2\pi ft}$  的线性组合。

能量信号的频谱密度  $S(f)$  和周期性功率信号的频谱  $C_n$  的异同:

- (1)  $S(f)$  是连续谱,  $C_n$  是离散谱;
- (2)  $S(f)$  的单位是伏/赫 (V/Hz),  $C_n$  的单位是伏 (V);
- (3)  $S(f)$  和  $C_n$  的负频谱和正频谱的模偶对称, 相位奇对称。

借助典型信号的频谱和傅里叶变换的性质, 可以有效地求取频谱密度。一些常用的信号傅里叶变换对, 如表 2-1 所示。傅里叶变换的基本性质, 如表 2-2 所示。

表 2-1 常用的信号傅里叶变换对

信号	$f(t)$	$F(w)$
1. 冲激函数	$\delta(t)$	1
常数	1	$2\pi\delta(w)$
周期性冲激串	$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$	$w_1 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(w - nw_1), w_1 = \frac{2\pi}{T}$
2. 三角函数	$e^{jw_0 t}$	$2\pi\delta(w - w_0)$
余弦函数	$\cos w_0 t = \frac{1}{2} [e^{jw_0 t} + e^{-jw_0 t}]$	$\pi [\delta(w - w_0) + \delta(w + w_0)]$
正弦函数	$\sin w_0 t = \frac{1}{2j} [e^{jw_0 t} - e^{-jw_0 t}]$	$\frac{\pi}{j} [\delta(w - w_0) - \delta(w + w_0)]$
3. 门函数	$G(t) = \begin{cases} A &  t  \leq \tau/2 \\ 0 &  t  > \tau/2 \end{cases}$	$A\tau \text{Sa}\left(\frac{w\tau}{2}\right)$
周期性脉冲串	$\sum_{t=-\infty}^{\infty} G(t - nT)$	$Aw_1 t \sum_{t=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{nw_1\tau}{2}\right) \delta(w - nw_1)$
4. 三角波	$T(t) = \begin{cases} -\frac{A}{\tau}  t  + A &  t  \leq \tau \\ 0 &  t  > \tau \end{cases}$	$A\tau \text{Sa}^2\left(\frac{w\tau}{2}\right)$
5. 阶越函数	$u(t)$	$\pi\delta(w) + \frac{1}{jw}$
6. 指数函数	$e^{-a t }$	$\frac{2a}{a^2 + w^2}$

表 2-2 傅里叶变换的基本性质

性质		时间函数	频谱密度函数	物理含义
微分	时域	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	$(jw)^n F(jw)$	例如: 谐振电路实现微分鉴频
	频域	$(-jt)^n f(t)$	$\frac{d^n F(jw)}{dw^n}$	