

电子通信类专业  
学习及考研辅导丛书

# 通信原理

## 学习及考研辅导

海欣 主编 丁金学 唐家鹏 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

TN911/116

2008

电子通信类专业学习及考研辅导丛书

# 通信原理

## 学习及考研辅导

海欣 主编

丁金学 唐家鹏 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

通信原理是高等院校开设的专业基础课程,同时也是全国高等院校相关专业的硕士入学考试必考课程。为了帮助广大学生进行系统复习,我们根据“通信原理”课程教学基本要求编写了本书。

全书共分为11章,每一章均由知识要点、知识点详解、真题及例题解析、自我测试4部分组成。本书各章首先通过知识要点和知识点详解对本章内容作了高度概括和叙述。真题及例题解析中例题大都选自国内重点高等院校和科研院所历年考研真题,并作了详细分析和解答。自我测试中均有参考答案,可通过练习以检测学习效果,进一步提高解题能力。本书最后还给出了重点高等院校的硕士研究生入学考试题,并给出了部分答案。

本书可作为相关专业学生报考硕士学位研究生学习用参考书及复习指导书,也适合于高等院校相关专业的学生自学使用,同时可作为高等院校教师的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习及考研辅导/海欣主编. —北京:国防工业出版社,2008.7

(电子通信类专业学习及考研辅导丛书)

ISBN 978-7-118-05757-7

I. 通... II. 海... III. 通信理论—高等学校—教学参考资料 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 074597 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 486 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

通信原理是高等院校相关专业开设的技术基础课程,它是所有相关后续专业课程的基础,同时也是高等院校相关专业硕士研究生入学考试课程。为了帮助广大的考研学生学习和提高,特别是进行系统复习,我们根据高等工科院校“通信原理”课程教学基本要求编写了本书。

由于高等院校众多,水平不同,要在有限的篇幅内完成对各类专业课程有针对性的指导是相当困难的。为了解决这方面的问题,我们经过反复讨论,并征求了大量一线教师的意见,将一些通用原则和方法的指导放在首位,并结合大量相关实例进行了讲解。

本书共分 11 章,每章内容包括:

(1) 知识要点 对于每章的重要知识,尤其是在历年真题中经常出现的重要考点作了总结和提示,读者可以根据提示有所侧重地进行复习。

(2) 知识点详解 结合知识要点提示,再对每一章的知识要点进行详细的讲解,使读者可以快速地把握知识要点,提高复习效率。在总结部分还添加了一些解题技巧,更加有利于读者复习。

(3) 真题及例题解析 该部分针对典型考研真题分析中提出的相应考点,帮助读者筛选出相关真题,结合高等院校通信原理历年真题进行全面的讲解,并在最后给出规律性的总结,更加方便读者去把握考点,更好地应对考研。

(4) 自我测试 在每一章的后面给出了部分自我测试题,并附有参考答案,读者可通过练习以检测学习效果,进一步提高解题能力。

在本书的附录给出了部分高等院校最新通信原理硕士研究生入学考试真题,对于报考硕士研究生的考生来说,这无疑是最宝贵的资源。

通信原理考题的具体类型并不是很多,因此在选择例题和习题的过程中,我们主要针对典型题型和一些具有代表性的真题进行了总结,并选择了一些高等工科院校的最新试题。目的是使读者了解和掌握不同类型题目的解题方法和技巧,以便扩大解题思路,培养分析和解决实际问题的能力。

本书力求科学性、先进性、指导性,既能促进高等工科院校学生更好地学习通信原理,又不脱离大多数一般院校的实际,提供切实可行的参考实例。本书可作为相关专业学生报考硕士研究生的学习用参考书及复习指导书,也适合于高等院校相关专业的学生自学使用,同时可作为高等院校教师的教学参考书。

在收集和整理历年考研真题和笔记的过程中,得到了清华大学、上海交通大学、北京邮电大学、北京科技大学、东南大学、同济大学、西安交通大学、西北工业大学、浙江大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、天津大学、中国科学技术大学、华中科技大学、华南理工大学、中国科学院等高等院校和科研院所的教师及研究生的热情帮助,在此向他们表

示衷心感谢。

本书由海欣主编,丁金学、唐家鹏编著,另外曹二皇、梁帆、张樱枝、王菁、夏金玉、石良臣、温正、周懿、李旭升等也参与了部分章节的编写工作。同时由北京航空航天大学一线授课教师对该书进行了认真仔细的审阅,并提出了许多极为宝贵的修改意见,对提高本书质量起了很大的作用,在此致以衷心的感谢!

由于作者水平有限,编写时间较短,书中欠妥及错误之处在所难免,希望读者和同仁能够及时指出,共同促进本书质量的提高。

读者在使用本书时,若出现关于本书的相关疑问以及碰到难以解答的问题,可以到为本书专门提供的海欣考研论坛提问或直接发邮件到编者邮箱,编者会尽快给予解答。另外,该论坛还提供了其他高等院校部分真题的参考答案,读者可以到相关栏目下载。

编者邮箱:kaoyanshu@126.com

海欣考研论坛网址:www.haixin.org/kybbs

编者

2008年5月于北京

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
知识要点 .....	1
1.1 知识点详解 .....	1
1.1.1 通信系统的基本概念 .....	1
1.1.2 信息及其度量 .....	4
1.1.3 通信系统的主要性能指标 .....	5
1.2 真题及例题解析 .....	6
1.3 自我测试 .....	11
<b>第 2 章 随机信号分析</b> .....	13
知识要点 .....	13
2.1 知识点详解 .....	13
2.1.1 随机过程的基本概念 .....	13
2.1.2 平稳随机过程 .....	14
2.1.3 高斯随机过程 .....	15
2.1.4 窄带随机过程 .....	16
2.1.5 宽带随机过程 .....	17
2.1.6 正弦波加窄带随机过程 .....	18
2.1.7 随机过程通过线性系统 .....	19
2.2 真题及例题解析 .....	19
2.3 自我测试 .....	32
<b>第 3 章 信道</b> .....	36
知识要点 .....	36
3.1 知识点详解 .....	36
3.1.1 信道的定义和分类 .....	36
3.1.2 信道的数学模型 .....	37
3.1.3 恒参信道特征及其对信号传输的影响 .....	38
3.1.4 随参信道的特性及其对信号传输的影响 .....	39
3.1.5 信道容量 .....	40
3.2 真题及例题解析 .....	41
3.3 自我测试 .....	47
<b>第 4 章 模拟调制系统</b> .....	50
知识要点 .....	50

4.1	知识点详解	50
4.1.1	调制的目的、定义和分类	50
4.1.2	幅度调制(线性调制)的一般原理	51
4.1.3	线性调制信号的解调	53
4.1.4	线性调制系统的抗噪声性能	54
4.1.5	角度调制的原理	57
4.1.6	调频信号的解调及抗噪声性能	58
4.1.7	频分复用(FDM)技术	58
4.2	真题及例题解析	59
4.3	自我测试	87
<b>第5章</b>	<b>数字基带传输系统</b>	<b>91</b>
	知识要点	91
5.1	知识点详解	91
5.1.1	数字基带传输系统	91
5.1.2	数字基带信号及其频谱特征	92
5.1.3	基带传输的常用码型	92
5.1.4	基带脉冲传输与码间干扰	93
5.1.5	无码间干扰的基带传输特性	93
5.1.6	部分响应系统	95
5.1.7	无码间干扰基带系统的抗噪声性能	96
5.1.8	眼图	97
5.1.9	时域均衡	97
5.2	真题及例题解析	98
5.3	自我测试	123
<b>第6章</b>	<b>正弦载波数字调制系统</b>	<b>127</b>
	知识要点	127
6.1	知识点详解	127
6.1.1	数字信号的频带传输系统	127
6.1.2	二进制数字调制解调原理	128
6.1.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	133
6.1.4	多进制数字调制系统	137
6.1.5	改进的数字调制系统	141
6.1.6	时频调制方式	142
6.2	真题及例题解析	142
6.3	自我测试	167
<b>第7章</b>	<b>模拟信号的数字传输</b>	<b>173</b>
	知识要点	173
7.1	知识点详解	173
7.1.1	抽样定理	173

7.1.2	脉冲振幅调制	174
7.1.3	模拟信号的量化	175
7.1.4	脉冲编码调制	176
7.1.5	差分脉冲编码调制系统	178
7.1.6	增量调制	179
7.1.7	时分复用	180
7.1.8	数字电话系统帧结构和传码率	180
7.2	真题及例题解析	181
7.3	自我测试	192
<b>第8章</b>	<b>数字信号的最佳接收</b>	<b>197</b>
	知识要点	197
8.1	知识点详解	197
8.1.1	最佳接收准则	197
8.1.2	确知信号的最佳接收	198
8.1.3	随相信号的最佳接收	200
8.1.4	匹配滤波器	201
8.1.5	最佳基带传输系统	202
8.2	真题及例题解析	202
8.3	自我测试	229
<b>第9章</b>	<b>差错控制编码</b>	<b>235</b>
	知识要点	235
9.1	知识点详解	235
9.1.1	纠错编码基本原理	236
9.1.2	常用的简单编码	236
9.1.3	线性分组码	237
9.1.4	循环码	239
9.2	真题及例题解析	240
9.3	自我测试	253
<b>第10章</b>	<b>正交编码与伪随机序列</b>	<b>256</b>
	知识要点	256
10.1	知识点详解	256
10.1.1	正交编码	256
10.1.2	伪随机序列	257
10.1.3	伪随机序列的应用	260
10.2	真题及例题解析	260
10.3	自我测试	266
<b>第11章</b>	<b>同步原理</b>	<b>268</b>
	知识要点	268
11.1	知识点详解	268



11.1.1	载波同步的方法 .....	268
11.1.2	载波同步系统的性能 .....	270
11.1.3	位同步的方法 .....	271
11.1.4	位同步系统的性能 .....	272
11.1.5	群同步的方法 .....	273
11.1.6	群同步系统的性能 .....	273
11.1.7	网同步的概述 .....	273
11.2	真题及例题解析 .....	274
11.3	自我测试 .....	280
<b>附录 A</b>	<b>研究生入学考试试题选编 .....</b>	<b>282</b>
	北京交通大学 2006 年 .....	282
	北京交通大学 2007 年 .....	284
	北京科技大学 2006 年 .....	289
	北京科技大学 2007 年 .....	290
	北京邮电大学 2006 年 .....	292
	北京邮电大学 2007 年 .....	296
	南京邮电大学 2006 年 .....	301
	南京邮电大学 2007 年 .....	303
	中国科学院研究生院 2007 年 .....	306
	河北大学 2007 年 .....	307
	浙江工业大学 2006 年 .....	310
	湖北工业大学 2007 年 .....	311
<b>附录 B</b>	<b>部分研究生入学考试试题参考答案 .....</b>	<b>314</b>
	北京交通大学 2006 年参考答案 .....	314
	北京交通大学 2007 年参考答案 .....	316
	北京邮电大学 2006 年参考答案 .....	318
	北京邮电大学 2007 年参考答案 .....	320
	南京邮电大学 2006 年参考答案 .....	323
	南京邮电大学 2007 年参考答案 .....	325
	<b>参考文献 .....</b>	<b>328</b>

# 第1章 绪论

---

## 知识要点

通信,就是信息的传输与交换。在现代社会,通信技术与信息产业已经是发展最快的领域之一,并与传感、计算技术紧密结合,成为整个社会的高级“神经中枢”。

通信技术已经成为社会发展的不可缺少的重要资源。本章是通信原理的入门基础知识,虽然简单,但对于整个通信系统的理解却非常重要。

1. 通信的基本概念;
  2. 通信的模型;
  3. 通信系统的分类及通信方式;
  4. 数字信号与模拟信号的区别;
  5. 信息及其度量;
  6. 通信系统的主要性能指标。
- 

## □ 1.1 知识点详解

### 1.1.1 通信系统的基本概念

#### 1. 通信、消息、信息、信号

**通信:**消息(或信息)的传输和交换的全过程。实现通信的方式很多,利用“电”来传递消息的方式称为“电通信”,简称电信。

**消息:**信息在数学层上的外延,它将抽象的待传送的信息从数学实质上加以分类:一类为离散型的,称做离散消息,指消息的状态是可数的或离散型的,比如符号、文字或数据等;另一类为连续型的,称做连续消息,是指状态连续变化的消息,例如,连续变化的语音、图像等。

**信息:**消息的内涵,是一个广泛而又抽象的哲学概念,主要指消息中所包含的受信者原来不知道而待知的东西。

**信号:**是信息在物理层上的外延,主要是指信息的电的表示形式,或者说是与信息一一相对应的电量或光量。

**数字信号:**离散消息被载荷在电信号的某一离散取值的参量上,这样的信号就是数字信号。

**模拟信号:**消息被载荷在电信号的某一连续取值的参量上,这样的信号就是模拟信号。

## 2. 通信系统的一般组成

实现消息传递所需的一切技术设备的总和就叫做通信系统。

### 1) 一般模型

通信系统的一般模型如图 1-1 所示。其中各个部分的作用如下。

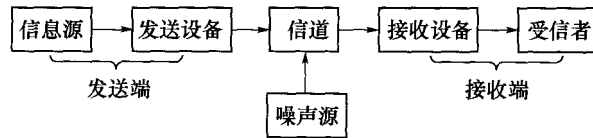


图 1-1 通信系统的一般模型

**信源:**是信息源的简称,它的作用是把消息转换成原始的电信号。

**发送设备:**将信源与信道相匹配,就是把信源发出的电信号转换成适合在信道上传输的信号。

**信道:**是信号传输的通道,主要分为有线和无线两大类。有线信道一般包括明线、同轴电缆、波导以及光纤等;无线信道可以是大气、真空、海水等。

**噪声源:**噪声源不是人为加入的,而是信号在整个通信系统中传输时的各种设备以及信道中噪声和干扰的总和。

**接收设备:**接收设备的任务是从带干扰的接收信号中正确地恢复重现出相应的原始信号,也即进行与发送设备相对应的反变换,达到正确得到原来所传信号的目的。

**信宿:**信宿是信息传输的最终目的和归宿,通常称为受信者。其作用就是将原来的信号转换成相应的消息。

图 1-1 所示的一般模型反映了通信系统的共性。根据所研究的对象以及所关心的问题不同,图 1-1 中各个小模块的内容将会有所不同,因而也可以将其变换以不同的形式来表示更具体的通信系统。

### 2) 模拟通信系统模型

利用模拟信号来传递信息的系统称为模拟系统。其模型如图 1-2 所示。

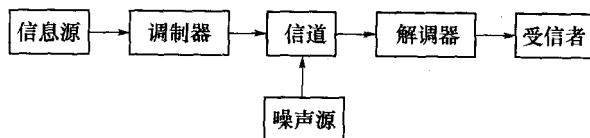


图 1-2 模拟通信系统模型

该系统中有两种重要的变换:连续消息与基带信号的相互变换,完成这种变换的是信源和信宿;另一种是基带信号与已调信号的相互变换,通常是由调制器和解调器完成。

### 3) 数字通信系统的模型

利用数字信号来传递消息的系统称为数字通信系统。其模型如图 1-3 所示,其中图 1-3(a)和图 1-3(b)分别对应于频带和基带数字通信系统的一般模型。图 1-3 中各个部分的作用如下。

**加/解密器:**主要是对信号进行加密和解密的处理,从而保证通信系统的安全性,使信

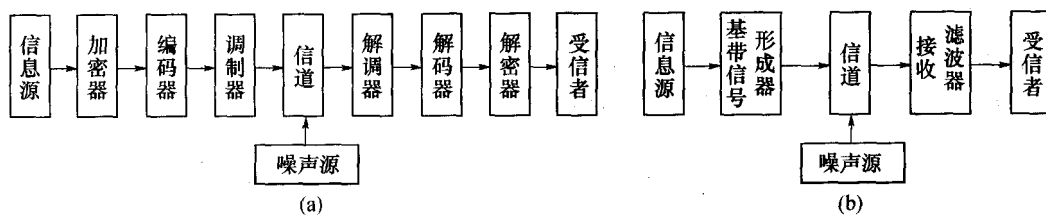


图 1-3 数字通信系统的模型

(a) 频带数字通信系统的一般模型；(b) 基带数字通信系统的一般模型。

息不致被窃取。

**编/解码器:**主要是一个将信号进行数字化和模拟化的过程,也就是在信源处的时候将模拟信号转换为数字信号,在信宿端把数字信号转化为模拟信号。

**调制/解调器:**主要是将信号进行频谱搬移的过程,调制就是要把原来的信号的频谱搬移到适合信道传输的频率上,而解调则是把信号从搬移后的频率处再搬回到原来的频率处。这样就保证了信号有效的传输。

**基带信号形成器:**主要功能是将信号进行数字化,使其变为适合在信道中传输的信号。

**接收滤波器:**主要功能是将信号进行模拟化,并将其变为适合受信者接收的信号。

### 3. 数字通信的主要特点

数字系统已经是现代通信系统的主流。与模拟系统相比,数字通信系统有许多优点,主要表现在以下几个方面:

- (1) 数字传输抗干扰能力强,尤其在中继时,数字信号可以再生,从而消除噪声的积累;
- (2) 传输差错可以控制,从而改善了传输质量;
- (3) 便于使用现代数字信号处理技术来对数字信息进行处理;
- (4) 数字信息易于做高保密性的加密处理,从而保证了信息传输的安全性;
- (5) 数字通信可以综合传送各种消息,增加了系统的利用率,使通信系统的功能加强。

但是数字系统也有它自己的不足,主要表现为:

- (1) 占用的带宽较大;
- (2) 在收发端的信息发送与接收要保持节拍一致,也就是需要同步。

### 4. 通信系统的分类

(1) 按消息的物理特征不同可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。

(2) 按是否采用调制可以把通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输是未经调制直接传送;频带传输是对各种信号调制后传输的总称。

(3) 按信号特征(信道中传输的是模拟信号还是数字信号)的不同通信系统还可以分为模拟通信系统和数字通信系统两类。

(4) 按传输媒介,通信系统可以分为有线(包括光纤)和无线两类。

(5) 按信号的复用方式,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。频分复用是通过频谱搬移的方法使不同的信号在不同的频段上传输；时分复用是利用抽样或脉冲调制的方法使不同的信号占据不同的时间分别进行传输；码分复用则是利用一组相互正交的码字的码组来携带多路信号的传输方式。

### 5. 通信方式

在点对点的通信中,根据消息传送的时间和方向不同,通信方式可以分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种。

单工通信是指消息只能单向传输的工作方式。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但是不能收发同时进行的通信方式。

全双工通信就是指通信双方都能收发消息,并且双方都可以同时进行消息收发的工作方式。

## 1.1.2 信息及其度量

通信的目的在于传递信息,每一个消息信号必定包含有接收者所需要知道的信息,消息以具体信号的形式表现出来,而信息则是抽象的、本质的内容。只有消息中的不确定的内容才构成信息,所以信息就是对这种不确定性的定量描述。

### 1. 信息量的计算

事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述。消息出现的可能性越小,则消息中所包含的信息量就越大;当消息出现的概率为 1 时,则它传递的信息量为 0;若干独立事件构成的消息所含的信息量等于各个消息所含信息量的线性叠加,即信息具有相加性。传输信息的多少,用信息量去衡量。

综上所述,某离散消息  $x$  发生的概率为  $P(x)$ ,其所携带的信息量为

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

当对数底  $a$  取 2 时,信息量的单位为比特(bit);当  $a$  取  $e$  时,信息量的单位为奈特(nit);当  $a$  取 10 时,信息量的单位为哈特莱(hart)。

### 2. 离散信源的平均信息量的计算

对于由一连串符号所构成的消息,可根据信息相关性概念计算整个消息的信息量,但当消息很长时,可用平均信息量的概念来计算。

所谓平均信息量就是指信源中每个符号所含信息量的统计平均值。统计独立的  $N$  个符号的离散信息源的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2 p(x_i) (\text{bit/symbol})$$

由于  $H$  同热力学中的熵形式一样,故通常又称之为信息源的熵。其单位为 bit/symbol。可以证明,信息源的最大熵发生在每个符号等概独立出现时,此时最大熵为

$$H(x) = \log_2 N (\text{bit/symbol})$$

### 3. 连续信息的平均信息量

连续信息的平均信息量可以用概率密度来描述。平均信息量为

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

式中:  $f(x)$  为连续消息出现的概率密度。

### 1.1.3 通信系统的主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。从研究消息的传输来说,通信的有效性和可靠性是通信系统的主要性能指标。

有效性是指在给定信道内所传输的信息内容的多少,主要是指消息的传输“速度”问题,而可靠性只指接收信息的准确程度,主要是指消息的传输“质量”问题。

这两个方面是既矛盾又相互联系的。衡量数字通信系统的有效性的主要性能指标是传输速率、频带利用率;而可靠性的指标主要是差错率。

#### 1. 传输速率

(1) 码元传输速率( $R_B$ ):码元传输速率简称传码率,又称为码元速率或符号速率,表示每秒钟传递的码元的数目,单位为波特,可记为 Baud 或 B。

(2) 信息传输速率( $R_b$ ):信息传输速率简称传信率,又称为信息速率、比特率、数码率,主要用来表示每秒钟传递的信息量(比特数)的多少,单位为比特/秒,记为 bit/s。一般每个等概出现的二进制码元规定含有 1bit 信息量。

若信源的码元速率为  $R_B$ ,熵为  $H$ ,则该信源的平均信息速率为

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

等概时,则有

$$R_b = R_B \log_2 N \text{ (bit/s)}$$

或

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

式中:  $N$  为符号的进制数。

#### 2. 频带利用率

在比较不同通信系统的效率时,只看它们的传输速率是不够的,还应该看这个传输速率下所占的信道的频带宽度。因为传输速率越高,所占用的信道带宽就越宽,因此真正能体现出信息的传输效率的指标应该是频带利用率,即单位频带内的传输速率。

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

对二进制传输可以表示为:  $\eta = \frac{R_b}{B} \text{ (bit/(s \cdot Hz))}$

#### 3. 可靠性指标

衡量数字通信系统的可靠性指标可用信号在传输过程中出错的概率来描述,即差错率。差错率越大,表明系统可靠性越差。差错率常用误码率和误信率表示。

误码率(也称做误符号率)可表示为

$$P_e = \frac{\text{单位时间内错误接收的码元数}}{\text{单位时间内传输的总码元数}}$$

误信率(也称作误比特率)可以表示为

$$P_b = \frac{\text{单位时间内错误接收的比特数}}{\text{单位时间内传输的总比特数}}$$

在二进制时有:

$$P_e = P_b$$

## □ 1.2 真题及例题解析

【例1】已知两个二进制随机变量  $X$  和  $Y$  服从下列联合分布。试求信源熵  $H(X)$ 、信宿熵  $H(Y)$ 、条件熵  $H(X|Y)$  及联合熵  $H(X, Y)$ 。(北京科技大学 2007 年)

$$P(X = Y = 0) = P(X = 0, Y = 1) = P(X = Y = 1) = \frac{1}{4}$$

【解】根据熵的求导公式可得：
$$H(x) = \frac{1}{2} \times 2 \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

$$H(y) = \frac{1}{2} \times 2 \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

所以条件熵为

$$\begin{aligned} H(x|y) &= - \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 P(x=i, y=j) \log_2 P(x=i|y=j) \\ &= - \frac{1}{4} \times 4 \times \log_2 \frac{1}{2} = 1 \text{ bit} \end{aligned}$$

其中 
$$P(x=i, y=j) = \frac{1}{4}, P(x=i|y=j) = \frac{1}{2}$$

联合熵为：
$$H(x, y) = H(x) + H(x|y) = 2 \text{ bit}$$

【例2】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，00 代替 A，01 代替 B，10 代替 C，11 代替 D，每个脉冲的宽度为 5ms。

(1) 不同的字母是等概出现时，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： $p_A = 1/5, p_B = 1/4, p_C = 1/4, p_D = 3/10$ 。试计算传输的平均信息速率。(北京邮电大学 2005 年)

【解】(1) 由公式  $H(x|y) = - \sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i)$  得每个字母的信息量为

$$H(x) = \left( - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} \right) \times 4 = 2 \text{ bit/symbol}$$

又由于每个脉冲的宽度为 5ms，每个字母用 2 个脉冲表示，所以字母的传输速率为：

$$R_s = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 100 \text{ (symbol/s)}$$

平均信息速率为：
$$R_b = R_s \cdot H(x) = 2 \times 100 = 200 \text{ (bit/s)}$$

(2) 在如题所述的概率下，每个符号的平均信息量为

$$H = - \frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{10} \log_2 \frac{3}{10} = 1.985 \text{ (bit/symbol)}$$

故而平均信息速率为 
$$R_b = R_s \cdot H(x) = 1.985 \times 100 = 198.5 \text{ (bit/s)}$$

【注释】本题中四个字母构成四进制符号，每个符号由两个脉冲构成，故而一个符号的持续时间即码元宽度为  $2 \times 5 \text{ ms}$ 。

【例 3】某信息源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现的概率分别为  $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$ 、 $3/16$ 、和  $5/16$ 。试求:

(1) 该信息源符号的平均信息量;

(2) 若信息源以 1000Baud 速率传送信息, 则传送 1h 的信息量为多少? 传送 1h 可能达到的最大信息量是多少?

【解】(1) 该信息源符号的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i = - \left( \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{3}{16} \log_2 \frac{3}{16} + \frac{5}{16} \log_2 \frac{5}{16} \right) \\ = 2.23 \text{ (bit/symbol)}$$

(2) 平均信息速率为:  $R_b = R_B \times H = 1000 \times 2.23 = 2.23 \times 10^3 \text{ (bit/s)}$

则传送 1h 的信息量为:  $I = R_b \times T = 2.23 \times 10^3 \times 3600 = 8.028 \times 10^6 \text{ (bit)}$

当信息源的每个符号等概出现时, 信息源的熵最大, 此时:

$$H = \log_2 5 = 2.322 \text{ (bit/symbol)}$$

传送 1h 可能达到的最大信息量为:

$$I = R_B \cdot H \cdot T = 1000 \times 2.322 \times 3600 = 8.359 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

【例 4】设信息源符号“0”和“1”组成, 且统计独立。如果消息传输速率是 1000symbol/s, 且“0”出现的概率为  $3/8$ , “1”出现的概率为  $5/8$ , 此信道误码率为 0.02。试求:

(1) 该信道的信息传输速率  $R$ ?

(2) 该信道的信道容量  $C$ ? (南京邮电大学 2004 年)

【解】(1)  $x$  的熵为:  $H(x) = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{5}{8} \log_2 \frac{5}{8} = 0.53 + 0.42 = 0.95$

$$Y \text{ 端: } P(0) = \frac{3}{8} \times 0.98 + \frac{5}{8} \times 0.02 = 0.38$$

$$P(1) = \frac{5}{8} \times 0.98 + \frac{3}{8} \times 0.02 = 0.62$$

$$H(y) = \sum_{i=0}^1 P(y_i) \log_2 P(y_i) = -0.38 \log_2 0.38 - 0.62 \log_2 0.62 = 0.958 \text{ (bit/symbol)}$$

$$H(y|x) = \frac{3}{8} \times 0.98 \times \log_2 0.98 + \frac{3}{8} \times 0.02 \times \log_2 0.02 +$$

$$\frac{5}{8} \times 0.98 \times \log_2 0.98 + \frac{5}{8} \times 0.02 \times \log_2 0.02$$

$$= 0.98 \times \log_2 0.98 + 0.02 \times \log_2 0.02 = 0.14 \text{ (bit/symbol)}$$

互信息为:  $I(Y, X) = [H(y) - H(y|x)] = 0.818 \text{ bit/symbol}$

所以:  $R = 1000 \times [H(y) - H(y|x)] = 818 \text{ bit/s}$

(2) 信道容量即为此信道传输的最大互信息速率, 当  $x, y$  等概时  $I(y, x)$  最大。

$$I(y, x) = H(y) - H(y|x) = 1 - H(y|x) = 0.86 \text{ bit/symbol}$$

故而信道容量为:  $C = 0.86 \times 1000 = 860 \text{ bit/s}$



【例 5】某信源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现的概率分别为  $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$ 、 $3/16$  和  $5/16$ ; 信源以 1000Baud 速率传送信息。

(1) 求传送 1h 的信息量;

(2) 求传送 1h 可能达到的最大信息量。(北京航空航天大学 2007 年)

【解】(1) 信源熵为

$$H(x) = -\frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{2}{8}\log_2 \frac{1}{8} - \frac{3}{16}\log_2 \frac{3}{16} - \frac{5}{16}\log_2 \frac{5}{16} = 2.23 \text{ (bit/symbol)}$$

平均信息速率为:  $R_b = R_B \cdot H(x) = 1000 \times 2.23 = 2.23 \times 10^3 \text{ (bit/s)}$

1h 传输的信息量为:  $I = R_b \times T = 2.23 \times 10^3 \times 3600 = 8.028 \times 10^6 \text{ (bit)}$

(2) 等概时信源熵最大, 即

$$H_{\max} = 5 \times \left( -\frac{1}{5}\log_2 \frac{1}{5} \right) = -\log_2 \frac{1}{5} = 2.322 \text{ (bit/symbol)}$$

1h 传输的最大信息量为:

$$I_{\max} = 2.322 \times 1000 \times 3600 = 8.359 \times 10^6 \text{ (bit)} = 8.359 \text{ (Mbit)}$$

【注释】本题主要考查信息量的知识, 且等概时信源熵最大, 也即信息量最大, 即  $P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = \frac{1}{5}$  时, 信息量最大。

【例 6】设某离散无记忆信源的输出由四种不同的符号组成, 它们的出现概率分别为  $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$ , 则此信源平均每个符号包含的信息熵为多少? 若信源每毫秒发出一个符号, 那么此信源平均每秒输出的信息量为多少? (北京邮电大学 2005 年)

【解】由信息熵的计算公式可得

$$H(x) = -\frac{1}{2}\log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{8} = 1.75 \text{ bit/symbol}$$

由于是每毫秒发出一个符号, 所以符号传输速率为

$$R_b = \frac{1}{0.001} = 10^3 \text{ symbol/s}$$

所以每秒输出的信息量为:  $I(x) = H(x) \cdot R_b = 1.75 \times 10^3 = 1.75 \text{ Kbit/s}$

【例 7】对一最高频率分量是 4kHz 的模拟信号以奈奎斯特速率抽样, 已知抽样结果是一个独立平稳随机序列。现将每个抽样值量化为五个离散电平之一, 已知这五个电平构成的符号集  $\{X\}$  的概率特性如下, 求这个离散信源每秒传送的平均信息量。(北京邮电大学 2004 年)

$$\begin{pmatrix} X \\ P(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} & \frac{1}{16} \end{pmatrix}$$

【解】该模拟信号的最高频率分量  $f_H = 4 \text{ kHz}$ , 由奈奎斯特抽样定理得抽样速率为

$$f_{\text{sm}} = 2f_H = 8 \text{ kHz}$$

因而符号速率是  $8000 \text{ symbol/s}$ 。

每个符号的平均信息量为