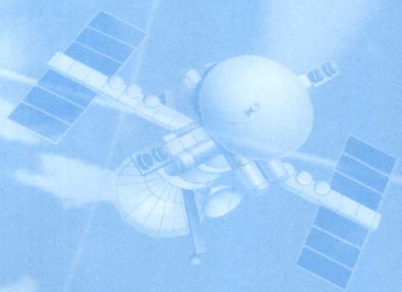
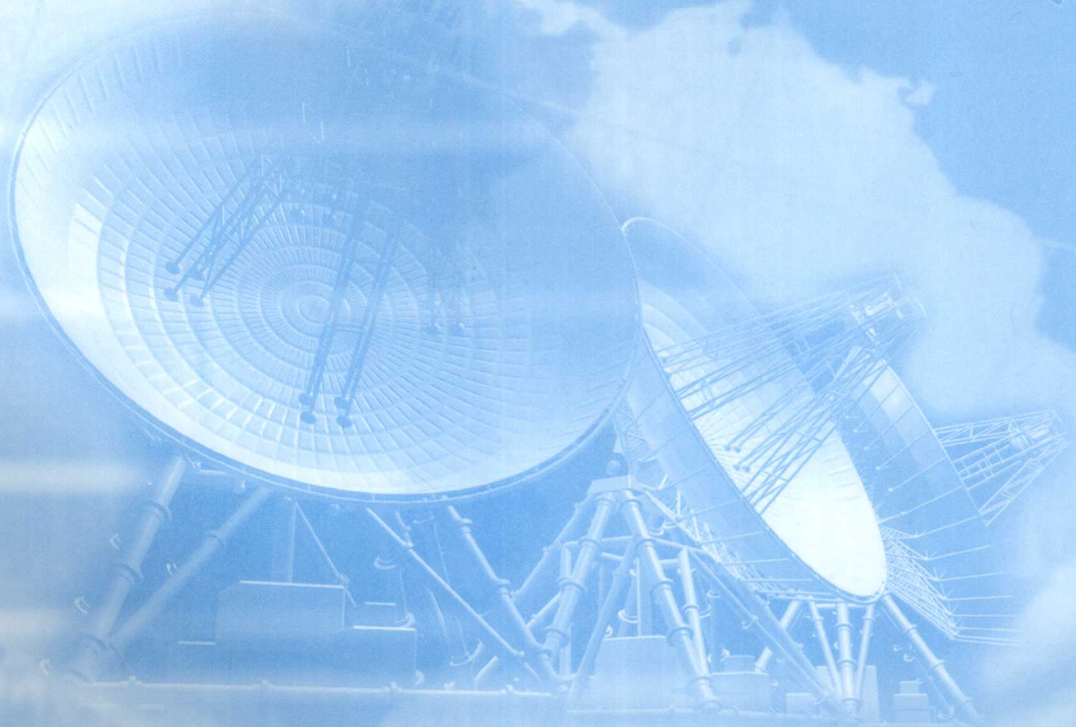
高等学校通信类教材

信道编码

（第三版）

刘玉君　编著





河南科学技术出版社

信 道 编 码

（第 三 版）

刘玉君 编 著

河南科学技术出版社

内 容 提 要

本书比较详细地论述了信道编码理论和主要纠错码类的编、译码原理。内容包括：数学预备知识；线性分组码、循环码、BCH 码和卷积码等主要纠错码类的编、译码原理，译码算法和实现方法；最后五章着重介绍纠突发错误编、译码技术，扰乱器，Turbo 码，LDPC 码和信道编码在通信信号加密和信息隐藏等方面的应用。本书可作为高等院校通信、计算机等专业的高年级本科生、研究生教材和参考书，也可供从事通信与计算机等工作的技术人员参考。

信 道 编 码

（第 三 版）

刘玉君 编著

责任编辑 李迎辉

河南科学技术出版社出版

解放军信息工程大学印刷厂印刷

787 × 1092 毫米 16 开本 30.5 印张 780 千字

1992 年 6 月第 1 版 2006 年 12 月第 3 次印刷

印数：5 001—10 000 册

ISBN 7-5349-1090-0/G · 252

定 价：43.00 元

前　言

信道编码是20世纪40年代末提出、60年代发展起来的一门提高数据传输可靠性的理论与技术，至今已有50余年的历史。随着数字通信的发展，特别是70年代以来，随着卫星通信和高速数据网的飞速发展，对数据传输的可靠性提出了越来越高的要求，因此，如何提高数据传输的可靠性已成为一个迫切需要解决的问题。

在有扰信道上传输数字数据时，所收到的数据将不可避免地含有差错。通常，用户提出一个差错率，当超出此差错率时，接收数据即不予使用。若采用信道编码技术，则可将差错减少到容许的限度以内。因此，信道编码是用来改善数字通信可靠性的一种信号处理技术。

代数理论为信道编码提供了理论基础，大规模集成电路和微型计算机的发展为信道编码技术的应用开拓了广阔的前景。我们将会看到，随着我国四化建设的飞速发展，信道编码技术将得到更加广泛的应用。

本书是在笔者所编著的《信道编码分析》和《信道编码》两套教材的基础上，经过多年试用和多次修改并加进了笔者多年来的研究成果编写而成的，这次修订再版，又增加了Turbo码、低密度校验码和信道编码在保密通信中的应用等三章，因此全书共分十二章，它们包括以下内容：

第一、二两章分别介绍了学习“信道编码”所需要的数学知识和信道编码理论中的一些基本概念。

线性分组码是信道编码中最基本的一类码，它有明显的数学结构，是讨论各类码的基础，因此，我们首先在第三章中介绍了线性分组码，并讨论了三个基本码限和两类基本线性分组码—汉明码和RM码。

为了使编、译码手续更为简单，多年来人们一直致力于分组码的研究，希望找到一种编、译码较易实现的分组码，而循环码就是这样的码。因此，我们在第四章介绍了循环码的基本理论及其编、译码实现电路。

BCH码是一类纠多个随机错误的循环码，它纠错能力强，构造方便，编码简单，译码也较易实现，在编码理论中起着重要作用。因此我们在第五章对BCH码作了较为详细的论述，对主要的译码算法的原理和实现方法作了系统介绍，特别对BCH码的迭代译码原理及译码算法的改进进行了深入的讨论，并对RS码的频域编、译码方法及其频谱特征作了简单介绍。

1954年里德（Reed）在译RM码时首先提出了大数逻辑译码的思想，以后许多编码工作者推广并发展了这一算法。1963年梅西（Massey）首先把大数逻辑译码算法予以系统化。因此，我们在第六章中对循环码的大数逻辑译码作了系统的介绍，并对软判决的大数逻辑译码，即APP算法作了推广工作，提出了L步APP门限译码算法。

卷积码是区别于分组码的又一种新型信道编码，它广泛应用于卫星通信中，因此，我们在第七章中详细论述了卷积码的有关概念，对卷积码的代数译码和维特比译码算法进行了较为深入的讨论，并用不变因子分解定理，从理论上彻底解决了非系统卷积码中由生成多项式

矩阵求解监督多项式矩阵和非系统卷积码的信息恢复等问题。

许多实际信道中所产生的错误大部分是突发性的，或是突发错误与随机错误并存的。针对这类信道，需要设计专门用来纠突发错误的码类。因此，我们在第八章着重讨论了针对突发错误的编码技术，其中包括各种交错技术，如矩阵交错、卷积交错以及伪随机交错等。

实际数字通信系统的设计通常都受待传送的数据序列统计特性的影响，为了改善数据序列的统计特性，需要调制前的预编码，这就构成了数字通信系统设计中的一种专门技术——扰乱技术。本书第九章首先简要介绍了与扰乱技术有关的线性移位寄存器和 m 序列理论，然后对几种主要扰乱器作了较为详细地讨论。扰乱技术已用于 PCM 数字通信和保密通信中，所以介绍这方面的有关内容对于读者拓宽知识面和理论联系实际都是有益的。

Turbo 码是由法国学者 C. Berrou 等人在 1993 年国际通信会议（ICC）上提出来的，它的基本思想是利用递归系统卷积码和交织技术结合在一起，设计一种新的编码方法，Turbo 码的发现标志着信道编码理论与技术研究进入了一个崭新的阶段。因此，我们这次修订，特别增加了 Turbo 码一章，把 Turbo 码的有关概念介绍给读者。

随着 Turbo 码研究的进一步深入，人们重新发现，Gallager 早在 20 世纪 60 年代提出的低密度校验（Low density parity check，LDPC）码也是一种具有渐进特性的非常好的码。在较长码长条件下，LDPC 码的译码性能同样可以逼近香农限，而且 LDPC 码还具有译码算法复杂度与码的长度呈线性关系、不采用交织器等特点。我们在第十一章讨论 LDPC 码的有关概念，重点介绍几种用代数方法构造的 LDPC 码，最后较详细讨论了 LDPC 码译码的和积算法。

在目前许多通信体制中，加密与纠错往往是分开进行的。一般来说，一个完整的加密系统，首先要对数据加密，然后再对加密后的数据进行信道编码，以便保证通信的安全性和可靠性。然而这样做的结果是通信系统的计算量增大，系统处理数据的能力降低，且系统设备复杂。要克服上述种种弊端，就必须设计一种既安全又可靠的新型加密系统，它应当有机地将加密与纠错结合起来，利用信道编码进行加密就满足这样的要求，我们在最后一章讨论了信道编码在保密通信中的应用，简要介绍了用信道编码构建加密系统和信道编码信息隐藏系统的原理和方法。

为了便于读者阅读，我们在书的最后，还对各章节部分习题，给出参考答案，以便读者演练习题时参考。

笔者由衷地感谢窦瑞华、聂涛、党明瑞等教授以及我院、系、教研室、教保处的领导和同志们对本书的写作和出版所给予的支持、鼓励和帮助。特别是窦瑞华教授在百忙中认真审阅了初稿全文，改正了其中一些错误，并提出了许多具体的修改意见，笔者再次表示深切谢意。在本书这次修改重印过程中，北京理工大学安建平教授对本书修改提出了许多建设性意见，我校宋惠元教授、张水莲教授和李静、刘建洲、巩克现、杜健等同志分别对部分章节进行了认真校对，胡春松、唐冬明、王伟祥、王天宇、严玉平和徐甫等同志为本书最后三章的编写工作提供了许多帮助，在此一并致谢。

由于笔者水平有限，书中缺点在所难免，敬请广大读者批评指正。

刘玉君

2006 年 12 月

于解放军信息工程大学

目　录

第一章　数学预备知识

信道编码理论与代数学有着密切的关系. 多项式、向量、矩阵运算以及近世代数的有关理论是研究信道编码必不可少的数学工具. 鉴于这些数学知识在有关教科书中都有详细论述,这里仅对本书常用到的一些主要数学概念,给以简要介绍.

1.1　整数的可除性

1.1.1　整除的概念

我们把 $1,2,3,\cdots,n,\cdots$ 称为自然数,并用 N 表示自然数全体所成的集合,即:

$$N = \{1,2,\cdots,n,\cdots\}.$$

显然,任意两个自然数的和与积仍然是自然数,但两个自然数相减就不一定是自然数,因为减法运算产生了零和负数. 通常我们把正整数、负整数的全体与零所成的集合称为整数集合,并用 Z 表示,即

$$Z = \{\cdots, -n,\cdots, -2, -1,0,1,2,\cdots,n,\cdots\}.$$

在整数集合 Z 中可以做加、减和乘法等运算,但除法不总是可以进行的,因为任意两个整数作除法,结果可能不再是整数.

定义 1.1　对于整数集合 Z 中任意两个数 a,b,且 $a\neq 0$,如果存在一个 $q\in Z$,使得 $b=aq$,则称 a 整除 b,记为 $a|b$. 否则称 a 不能整除 b. 若 $a|b$,也称 a 是 b 的因数,或 b 是 a 的倍数.

下面列举有关整除的一些性质.

1° 如果 $a|b$,则 $a|(-b)$, $-a|b$, $-a|(-b)$.

有了性质 1° ,我们今后只需考虑正整数和零的正因子和正倍数即可.

2° 如果 $a|b$ 及 $a|c$,则 $a|(mb+nc)$, $m,n\in Z$.

该性质还可以推广到有限个的情况,即

如果 $a|b_i, i=1,2,\cdots,n$,则

$$a\Big|\sum_{i=1}^{n}k_ib_i,\qquad k_i\in Z, i=1,2,\cdots,n.$$

3° 如果 $a|b, b|c$,则 $a|c$.

4° 如果 $a|b$,且 $b|a$,则 $a=b$.

5° 如果 $a|b, c\neq 0$,则 $ac|bc$.

6° 如果 $ac|bc$,则 $a|b$.

既然除法运算在整数集合中不总是可以进行的,那么用整数集合 Z 中一个非零整数去除 Z 中任一个整数,就有除得尽与除不尽两种可能. 下面定理给出了用 b 去除 Z 中任一个数 a 所得的结果,这就是带余除法定理.

定理 1.1　设 a,b 是整数集合 Z 中任意两个数,且 $a\neq 0$,则一定存在唯一的两个整数 q 和 r,使得

$$b = aq + r,\qquad 0\leqslant r < |a|. \tag{1.1.1}$$

1.1.2 最大公因数和最小公倍数

若 $a|b$,则 $-a|b$ 及 $a|(-b)$,因此我们只讨论正整数和零的正因数及正倍数.

定义 1.2 若 d 是 a 的因数,又是 b 的因数,则 d 称为 a 与 b 的公因数;若 m 是 a 的倍数,又是 b 的倍数,则 m 称为 a 与 b 的公倍数.

一般情况下,a 与 b 的公因数不是唯一的,它有有限多个,当然这些公因数中一定有一个最大的. 然而两个数的公倍数有无限多个,因为若 m 是 a 与 b 的公倍数,则 $2m,3m,\cdots$ 等也都是 a 与 b 的公倍数,a 与 b 的公倍数中一定有一个最小的.

定义 1.3 设 a 与 b 不全为零,如果有一个 d 满足

1° $d|a,d|b$;

2° 若 e 是 a 与 b 的公因数,则有 $e|d$,

我们就称 d 是 a 与 b 的最大公因数,记为 $d=(a,b)$,或者 $d=\mathrm{GCD}(a,b)$.

最大公因数是我们今后经常用到的,因此下面给出最大公因数的一些简单性质.

1° $d|a$ 与 $d|b$ 同时成立的充分必要条件是 $d|(a,b)$.

2° 设 $(a,b)=d$,则 $(ka,kb)=kd$;若 $k|a,k|b$,则

$$\left(\frac{a}{k},\frac{b}{k}\right)=\frac{(a,b)}{k}.$$

3° $(a,b)=d$ 的充分必要条件是 $\left(\frac{a}{d},\frac{b}{d}\right)=1$.

4° 如果 $(a,b)=d$,则一定存在一对整数 u,v,使得

$$ua+vb=d, \tag{1.1.2}$$

而且还可以进一步要求 u,v 适合条件

$$0\leqslant u<\frac{b}{d},\qquad 0\leqslant|v|<\frac{a}{d}.$$

其中 $a\cdot b\neq 0,a\neq b$,且适合上述条件的 u,v 是唯一的.

定义 1.4 设 a,b 不全为零,如果 a,b 的一个公倍数 m 具有如下性质:a 与 b 的任何一个公倍数都是 m 的倍数,则 m 叫做 a 与 b 的最小公倍数,记为 $m=[a,b]$ 或 $m=\mathrm{LCM}(a,b)$.

定义 1.5 如果两个数 a 与 b 的最大公因数是 1,即 $(a,b)=1$,则称 a 与 b 是互素的.

类似性质 4°,我们有

5° 如果 $(a,b)=1$,则存在一对整数 u 和 v 使得

$$ua+vb=1,$$

其中 $0\leqslant u<b,0\leqslant|v|<a(a\neq 0,b\neq 0$,且 a,b 不全为 1),而且 u,v 是唯一确定的.

6° 如果 $a|b\cdot c$,且 $(a,b)=1$,则 $a|c$.

7° 如果 $a|c,b|c$,且 $(a,b)=1$,则 $a\cdot b|c$.

8° 如果 $(a,c)=1,(b,c)=1$,则 $(a\cdot b,c)=1$.

定义 1.6 如果一个大于 1 的整数 a,除了 1 和它本身以外,没有其他因数,则 a 称为素数,大于 1 不是素数的数叫做合数.

素数有以下性质:

1° 对于一个素数 p 和任一个整数 a,$p|a$ 或者 $(p,a)=1$,两者必有且仅有其一成立.

2° 如果一个素数 $p|a\cdot b$,则 $p|a$ 或者 $p|b$.

定义 1.7 如果一个素数 $p|a$,则 p 叫做 a 的素因子.