

# 编 码 理 论

张鸣瑞 邹世开 编著

北京航空航天大学出版社

# 编 码 理 论

张鸣瑞 邹世开 编著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书是论述信道编码的一本教科书，为工科类高等院校通信与电子系统学科、硕士研究生编写。本教材主要讨论纠错码的编译码原理、性能分析。全书共九章，内容包括：线性分组码和卷积码。线性分组码中主要介绍循环码、BCH码、RS码；卷积码中主要分析反馈大数逻辑译码、序列译码和维特比译码。各章附有适当的习题。

本教材物理概念清晰，系统性强，并注重工程应用。除可作高校有关专业教材或参考书外，还可供从事通信、控制、计算机等领域的有关科研人员学习和参考。

## 编 码 理 论

BIANMA LILUN

张鸣瑞 邵世开 编

责任编辑 杨昌书

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

机械工业出版社印刷厂排版

北京市通县觅子店印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张：9.5 字数：255 千字

1990年3月第一版 1990年3月第一次印刷

印数：4000册 定价：2.20元

ISBN 7-81012-147-2/TN·010

# 前 言

香农定理为实现通过有噪信道的可靠通信奠定了理论基础。近30余年以来,作为信息论的一个分支,信道编码已从理论研究走上了工程应用。随着大规模集成电路和计算机技术的发展,信道编码技术(亦称差错控制技术)在通信、计算机网络、工业自动监控等领域得到了广泛的应用。信道编码原理在许多学校的电子工程专业或通信理论专业的教学大纲中被列为必修或指选的课程。

近年来作者参阅了兄弟院校的关于编码原理的教材和一些其它著作(如西北电信工程学院王新梅教授编著的“纠错码”,北京邮电学院蔡宗蔚教授为教育部信息论和编码理论学习班编著的“编码基础”等),编写了“编码原理”和“编码理论在通信和导航中的应用”,并为研究生讲授了编码原理课。本书就是在此基础上编写的。在编写时,针对航空航天院校的专业特点,考虑到教学大纲中的学时安排为40学时,所以,在内容上主要研究了纠正随机错误的码,舍去了纠正突发错误码的内容。在掌握了信道编码的基本思想和基本方法以后,还可自学编码理论中更广泛的内容。在编写的过程中,力求以较少的数学论证将信道编码的基本原理、概念和方法叙述清楚、准确。

全书共九章,第一章的概述中,通俗地介绍信道编码的基本思想和它在通信系统中的地位。第二章简介必要的数学基础,主要是群、环、域以及域上多项式的基本概念,这是学习BCH码所必需的。关于线性空间和矩阵的基本知识在研究生的前修课中已经学过,就不再列入本章。第四章、第五章介绍了循环码。第六章研究BCH码和RS码,这一章是分组码的重点内容。第七章到第九章讨论卷积码的基本概念,代数译码、序列译码和维特比译码算法,简要分析了各种译码法的性能和特点。卷积码编译

码在航空航天通信领域中已是一项广为应用的标准技术。在论述中力求由浅入深，重点突出。每章都附有习题。

本书经航空部教材编审委员会审订，作为通信与电子系统学科硕士研究生教材。

本书第一、二、七、八、九章以及第三章的第八节由张鸣瑞执笔，其它各章由邹世开执笔。张鸣瑞对全书进行了审校。编写中得到北京航空航天大学电子工程系潘维翰和芦维扬教授的热情鼓励和关注。在此，表示深切感谢。

编写中定有错误和不妥之处，恳请批评指正。

编 者

1988年7月于北京航空航天大学

# 目 录

|                                          |        |
|------------------------------------------|--------|
| 第一章 概论                                   | ( 1 )  |
| § 1.1 信道编码在数字通信系统中的地位和作用                 | ( 1 )  |
| § 1.2 信道编码的基本思想和分类                       | ( 5 )  |
| § 1.3 差错控制的基本方式                          | ( 10 ) |
| § 1.4 最大似然译码                             | ( 13 ) |
| 第二章 数学补充知识                               | ( 15 ) |
| § 2.1 群、环、域的基本概念                         | ( 15 ) |
| § 2.2 有限域和有限域上的多项式                       | ( 18 ) |
| 第三章 线性分组码                                | ( 28 ) |
| § 3.1 一般概念                               | ( 28 ) |
| § 3.2 一致监督方程和一致监督矩阵                      | ( 29 ) |
| § 3.3 线性分组码的生成矩阵                         | ( 32 ) |
| § 3.4 线性分组码的编码                           | ( 37 ) |
| § 3.5 线性分组码的最小距离 $d_{\min}$ 、检错和纠错能力     | ( 38 ) |
| § 3.6 线性分组码的译码                           | ( 45 ) |
| § 3.7 线性分组码在 BSC 中的不可检测错误<br>概率 $P_e(E)$ | ( 53 ) |
| § 3.8 汉明码                                | ( 57 ) |
| § 3.9 线性码的码限                             | ( 59 ) |
| 第四章 循环码                                  | ( 68 ) |
| § 4.1 循环码的定义和生成多项式                       | ( 68 ) |
| § 4.2 $(n, k)$ 循环码的监督多项式和监督矩阵            | ( 74 ) |
| § 4.3 $(n, k)$ 循环码的编码                    | ( 75 ) |
| § 4.4 $(n, k)$ 循环码的译码                    | ( 82 ) |
| § 4.5 循环汉明码                              | ( 87 ) |
| § 4.6 缩短循环码                              | ( 91 ) |
| 第五章 循环码的捕错译码和大数逻辑译码                      | ( 94 ) |
| § 5.1 循环码的捕错译码                           | ( 94 ) |

|               |                      |         |
|---------------|----------------------|---------|
| § 5.2         | 改进的捕错译码法             | ( 99 )  |
| § 5.3         | 戈莱(Golay)码及其译码法      | ( 102 ) |
| § 5.4         | 循环码的大数逻辑译码           | ( 108 ) |
| <b>第六章</b>    | <b>BCH 码</b>         | ( 124 ) |
| § 6.1         | BCH 码的定义及其生成多项式      | ( 124 ) |
| § 6.2         | 二元 BCH 码的参数和作法       | ( 127 ) |
| § 6.3         | 多元 BCH 码和 RS 码       | ( 131 ) |
| § 6.4         | BCH 码的编码             | ( 133 ) |
| § 6.5         | BCH 码的译码             | ( 136 ) |
| § 6.6         | 非系统 RS 码的编码和译码       | ( 150 ) |
| § 6.7         | 纠错的实现                | ( 159 ) |
| 附录:           | 译 BCH 码求错位多项式迭代算法的证明 | ( 161 ) |
| <b>第七章</b>    | <b>卷积码基础</b>         | ( 176 ) |
| § 7.1         | 卷积码的基本概念             | ( 177 ) |
| § 7.2         | 卷积码的矩阵描述             | ( 189 ) |
| § 7.3         | 用延时算子表示卷积码           | ( 199 ) |
| <b>第八章</b>    | <b>卷积码的代数译码</b>      | ( 206 ) |
| § 8.1         | 伴随式计算与代数译码原理         | ( 206 ) |
| § 8.2         | 大数逻辑译码               | ( 217 ) |
| § 8.3         | 卷积码的距离特性             | ( 229 ) |
| <b>第九章</b>    | <b>卷积码的概率译码</b>      | ( 233 ) |
| § 9.1         | 维特比译码原理              | ( 233 ) |
| § 9.2         | 维特比译码的性能             | ( 244 ) |
| § 9.3         | 序列译码的原理-费诺算法         | ( 259 ) |
| § 9.4         | 叠式存储译码               | ( 287 ) |
| <b>主要参考文献</b> |                      | ( 296 ) |

# 第一章 概 论

本章主要介绍信道编码在数字通信系统中的地位和作用以及信道编码的一些基本概念。信道编码定理指出,在编码速率小于信道容量的条件下,通过编码可以使译码错误概率任意小,从而达到可靠通信。定理的证明采用了随机编码技术,给出的结果只说明存在一种编码方式。其误码率随着码长  $n$  的增长趋于任意小。但证明是非构造性的,它没有告诉我们如何构造实际上可实现的、具有上述性能的这类码的方法。信道编码(又称纠错编码、差错控制)就是为解决这一问题而产生的学科。它的目的是寻找在实际上易于实现且能达到有效而可靠通信的编译码方法。

## § 1.1 信道编码在数字通信系统中的地位和作用

任何一个具体的数字通信系统如通信、遥控遥测、计算机间的数据交换或存储都可以用图1.1.1所示的框图来表示。

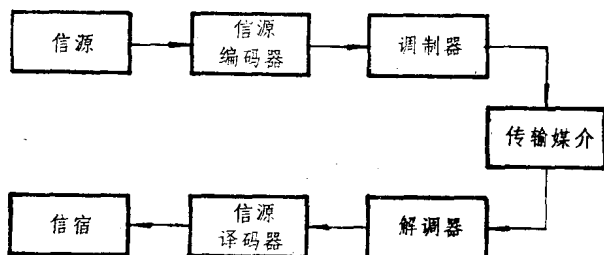


图1.1.1 数字通信系统框图

图中的信源可以是人或机器(例如数字计算机,遥测传感

器)。信源输出可以是连续波形,也可以是离散的符号序列。信源编码器将信源输出变换成二元数字序列,且称为信息序列 $m$ 。在调制器中,把输入的信息序列 $m$ 变换为适合于在实际信道中传输(或存储)的信号波形。这个信号进入实际的传输信道(或存储媒质),并受到干扰,实际的传输信道可能是由光缆或电缆构成的有线信道,也可能是高频无线线路、微波线路或卫星中继等构成的无线信道。存储媒质可以是磁带、磁盘、光盘等。无论是何种传输媒质,都受到不同性质的干扰,例如有线信道中的脉冲干扰,无线信道中的噪声和衰落。存储媒质的缺损也被看做是脉冲干扰。解调器的输入信号一般是受到干扰的混合波形,解调器的任务就是从有用信号和干扰的混合波形中恢复有用的信号,这个过程与调制器的过程相反。由于干扰的作用,解调器的输出信号不可避免地包含着差错,差错的多少不应超过系统所规定的数值。信源译码器把解调器输出的序列变换成为信源输出的估值,并把它送给宿(用户)。图1.1.1所示的数字通信系统并没有信道编码和信道译码的环节。为了明确信道编码在数字通信系统中的地位和作用,我们简要地介绍一下数字通信系统的主要技术指标。从工程实践中提出的主要技术指标有传输速率、差错率、可靠性与经济性等等。

## 一、传输速率

1. 码元传输速率 携带数据信息的信号单元叫做码元。每秒钟通过信道传输的码元数称为码元传输速率,单位是波特(Bd),简称波特率。码元传输速率又称调制速率。

2. 比特传输速率 每秒钟通过信道传输的信息量称为比特传输速率,单位是比特/秒(b/s),简称比特率。

这两种传输速率的定义不同,它们都是衡量系统传输能力的主要指标。对二进制来说,每个码元的信息含量为一比特,因此,二进制的码元传输速率与比特传输速度在数值上是相等的。对于 $M$ 进制来说,每一个码元的信息含量为 $\log_2 M$ 比特,因此,如果

码元传输速率为 $r$ 波特, 则相应的比特传输速率 $r_b$ 为

$$r_b = r \log_2 M \quad (\text{b/s})$$

实际系统所需要的比特传输率有高有低, 范围很宽。通常把 300 b/s 以下的波特率称为低速, 300~2400 b/s 的比特率称为中速, 2400 b/s 以上的比特率称为高速。

## 二、差错率

差错率是衡量传输质量的重要指标之一。它有以下几种不同的定义:

1. 码元差错率 指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例(平均值), 简称误码率。用符号 $p_e$ 表示。

2. 比特差错率 指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例(平均值)。用符号 $p_b$ 表示。在二进制传输系统中, 码元差错率就是比特差错率。

3. 码组差错率 指在传输的码组总数中发生差错的码组数所占的比例(平均值)。

系统的设计者和用户根据不同的应用场合对差错率有不同的要求。例如在电报传送时, 允许的比特差错率约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。而对计算机数据传送, 一般要求比特差错率小于 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 。在遥控指令和武器系统的指令传输中, 则要求有更小的误比特率或码组差错率。

## 三、可靠性

可靠性是衡量传输系统质量的又一重要指标。对于航空电子系统而言, 经常用平均无故障间隔时间来衡量。这一指标主要取决于系统中诸设备的质量。因此从设计传输系统的角度考虑, 应采用先进合理的技术, 采用高可靠的元器件和设备, 还应使设备的使用和维修尽可能的简单。在某些情况下, 对系统给予备份以提高可靠性。

在数字通信系统中信息的传输(或存储)所遇到的最主要的

问题是在传输过程中出现差错的问题。也就是传输可靠性的问题。在传输过程中产生不同差错的主要原因，是不同的传输系统有不同的性能以及在传输过程中干扰不同。不同的用户或不同的传输系统对于差错率的要求不同。如前所述，对数字电话来说，要求误比特率在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，但对于计算机网之间以及导弹控制系统的数据传输，却要求误比特率低于 $10^{-9}$ 。

降低误码率以满足系统的要求，通常有两种途径，一是降低信道（包括调制解调器、传输媒质）本身所引起的误码率，二是采用信道编码，在数字通信系统中增加差错控制设备。降低信道所引起的误码率的主要方法有：

1. 选择合适的传输线路，如有线线路中，电缆线路优于明线线路，光缆优于电缆。

2. 改进传输线路的传输特性或增加发送信号的能量。如进行相位均衡和幅度均衡以改进线路的群延时特性和幅频特性，当线路的传输衰减超过规定值时，增加中继放大器进行补偿等。在无线信道中，可以通过增加发射机功率、利用高增益天线以及低噪声器件等方法改善信道。

3. 选用潜在抗干扰性较强的调制解调方案。

在某些情况下，信道的改善可能较困难或者不经济，这就要采用信道编码，以便满足系统差错率的技术指标要求。应该注意的是，在采用信道编码时，要考虑信道差错率应满足一定的要

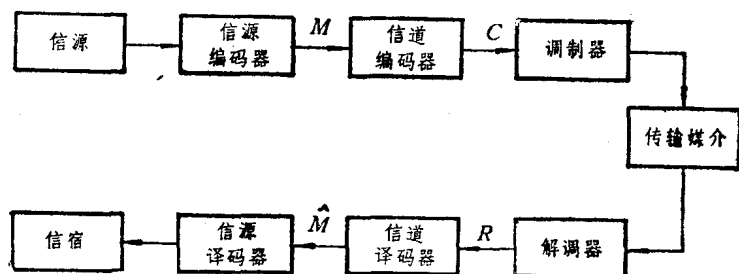


图1.1.2 有编码的数字通信系统框图

求, 否则有时不仅不能降低系统的差错率, 反而会使差错率增高。所以, 在设计差错控制设备时应与调制解调器统一考虑。例如, 根据CCITT标准, 若有线信道为专用线, 传输速率为  $300 \sim 1200$  (b/s) 时, 误码率应  $\leq 5 \times 10^{-5}$ 。而对卫星和微波中继信道来说, 信道所引起的误码率低于  $10^{-4}$  至  $10^{-5}$ 。

所以, 信道编码为系统设计者提供了一个降低系统差错率的措施。采用信道编码后的数字通信系统可用图 1.1.2 的框图表示。

## § 1.2 信道编码的基本思想和分类

### 一、信道的差错图样

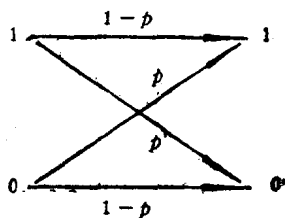
为了讨论信道编码的基本思想, 首先要了解信道中产生差错的特点。信道的结构组成包括图 1.1.2 中的调制器、传输媒质和解调器。数据在信道中传输时要受到各种干扰, 这些干扰是使数据产生差错的主要原因, 但是不论何种干扰所引起的差错, 不外乎有两种形式: 一是随机错误, 即数据序列中前后码元之间是否发生错误彼此无关, 产生这种错误的信道称为无记忆信道或随机信道, 例如卫星信道、深空信道等。另一种错误是突发性的, 即序列中一个错误的出现往往影响其它码元的错误, 即错误之间有相关性。由于目前应用最广的是二进制数字通信系统, 数据序列均以二进制码元符号 1 和 0 组成。设信道输入的发送序列为 000000 00..., 由于干扰, 信道输出的接收序列为 00100000..., 接收序列中的第三位发生了错误。这个错误的产生相当于信道中有一个差错序列 00100000..., 这个差错序列与发送序列逐位模 2 相加, 就得到了信道输出的接收序列, 我们称这个差错序列为信道错误图样。或者说发送序列与接收序列对应位的模 2 和就是信道的错误图样。这个例子是随机错误的表现情况。在突发错误的情况下, 若发送序列为 00100000..., 而接收序列为 10111000..., 这种错误

称为突发错误，突发错误的长度  $b$  等于第一个错误与最后一个错误之间的长度，该例中突发长度  $b$  等于 5。信道错误图样为 10111000…。显然信道错误图样中的 1 表示该位有错，0 表示没有错。产生突发错误的信道称为有记忆信道或突发信道，例如短波、散射、有线等信道。由于实际信道的复杂性，所呈现的错误不是单纯的一种，而且随机和突发性错误并存，只不过有的信道以某种错误为主。在进行信道编码的设计和应用时，必须针对这两类差错形式设计能够检测和纠正随机错误和突发错误的码。或者能同时纠正这两类错误的码。由上所述，信道错误图样完全反映了信道中产生差错的情况，在讨论信道编码时，我们可以不完全知道信道的物理特性，而只要研究信道错误图样中 0、1 的统计特性就可以了。

为了从数学上描述信道错误图样的这种 0、1 分布规律，就提出了用数字模型来描述信道错误图样的问题，这就是所谓的信道模型。关于信道的统计特性的详细论述可以参阅文献[1]，这里仅从分析信道编码的角度作一简述。

### 1. 二进制对称信道 (BSC)

如果信道对所传输的信号的影响是独立的，或者说调制器的判决输出只与在该时刻上所传输的信号有关，就称该信道是无记忆的。这时，离散输入的调制器、实际传输媒质和离散输出的解调器的全体可以用一个离散无记忆信道 (DMC) 模拟。DMC 可以用一组转移概率  $P(j/i)$  来描述，其中  $i$  表示调制器的输入符号， $j$  是解调器输出符号。如果  $i$ 、 $j$  是取自二进制的符号集，比如说取自集合  $\{0, 1\}$ ，而且  $P(0/0) = P(1/1)$ ， $P(1/0) = P(0/1)$  则称该信道为二进制对称信道，用 BSC 表示。它是最早提出的一种模型，如图 1.2.1 所示。



该信道模型中只有一个参数  $p$ ，

图 1.2.1 BSC 信道模型

它就是0错成1或1错成0的概率，也就是人们常说的误码率。由于BSC模型完全由一个参数确定，在进行统计和计算时特别简便，并且也基本上符合某些实际信道的差错特性，所以该信道模型用得较广泛，往往以它为基础来计算各种差错控制方式和各种纠错码的性能。

例如，对于长度为 $n$ 个码元的码字，码字没有差错的概率 $P(n, 0)$ ，至少出现一个差错的概率 $P(n, \geq 1)$ ，出现 $m$ 个差错的概率 $P(n, m)$ ，以及出现等于和大于 $m$ 个差错的概率 $P(n, \geq m)$ 分别为：

$$P(n, 0) = (1 - p)^n \quad (1.2.1)$$

$$P(n, \geq 1) = 1 - P(n, 0) \quad (1.2.2)$$

$$P(n, m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m} \quad (1.2.3)$$

$$P(n, \geq m) = \sum_{i=m}^n P(n, i) \quad (1.2.4)$$

式中 $C_n^m$ 是二项式系数，因此概率 $P(n, m)$ 服从二项式分布，当 $n$ 很大时近似为泊松分布，即

$$P(n, m) \approx (np)^m / m! \times e^{-np}$$

若 $n$ 很大，且 $np \ll 1$ ，则式(1.2.2)近似为：

$$P(n, \geq 1) \approx np \quad (1.2.5)$$

BSC模型虽然简单，但在有线和大多数无线信道中，错误往往以突发形式出现，即在信道错误图样中1的出现是密集而不是随机的。因此为了描述这种信道，有人对原来的BSC模型加以修正[2]，这样既保持了原来BSC模型计算简单的优点，又反映了实际信道中错误密集的情况，称这种信道模型为修正的二进制对称信道，简称GBSC模型。

GBSC模型由误码率 $p$ 和错误密集指数 $\alpha$ 确定。其中 $\alpha$ 反映了错误密集的情况， $\alpha$ 处在0和1之间；不同的信道 $\alpha$ 并不相同，它通常由实际测量决定。若 $\alpha = 0$ ，则认为错误不相关，也就是BSC情况，若 $\alpha = 1$ 说明错误完全相关。如果知道了 $p$ 和 $\alpha$ ，

则可以很容易地计算各种概率。下面我们不加推导地给出一些计算公式：

$$p(n, \geq 1) \approx n^{1-\alpha} p \quad (1.2.6)$$

$$p(n, 0) \approx 1 - n^{1-\alpha} p \quad (1.2.7)$$

$$p(n, \geq m) \approx \left(\frac{n}{m}\right)^{1-\alpha} p \quad (1.2.8)$$

上述公式仅当  $m/n < 0.3$  时才较准确。否则误差较大。据资料报导，有线电话信道的  $\alpha$  在 0.6 左右，短波和散射信道在 0.4 至 0.5 之间。

虽然 BSC 和 GBSC 模型比较粗糙，但计算和实测的结果表明，只要  $\alpha$  测定的比较准确，GBSC 模型还是比较符合实际信道差错情况的。

## 二、信道编码的基本思想

信道编码的编码对象是信源编码器输出的数字序列  $M$ ，又称信息序列（见图 1.1.2）。通常是由二元符号 1、0 组成的序列，而且符号 1 和 0 是独立等概的。所谓信道编码，就是按一定规则给数字序列  $M$  增加一些多余的码元，使不具有规律性的信息序列  $M$  变换为具有某种规律性的数字序列  $C$ ，又称为码序列。也就是说，码序列中信息序列的诸码元与多余码元之间是相关的。在接收端，信道译码器利用这种预知的编码规则来译码，或者说检验接收到的数字序列  $R$  是否符合既定的规则从而发现  $R$  中是否有错，或者纠正其中的差错。根据相关性来检测（发现）和纠正传输过程中产生的差错就是信道编码的基本思想。

通常数字序列  $M$  总是以  $k$  个码元为一组来传输的，如遥控系统中的每个指令字，遥测系统中的每一路数据，计算机中的每个字节等。我们称这  $k$  个码元的码组为信息码组，信道编码器按一定规则对每个信息码组附加一些多余的码元，构成了  $n$  个码元的码组（又称字）。这  $n$  个码元之间是相关的。确切地说，附加的  $n - k$  个多余码元为何种符号序列与待编码的信息码组有关。这

$n - k$  个码元称为该码组的监督码元或监督元。从信息传输的角度来说，监督元不载有任何信息，所以是多余的。这种多余度使码字具有一定的纠错和检错的能力，提高了传输的可靠性，降低了误码率。另一方面，如果我们要求信息传输速率不变，在附加了监督元后，必须减小码组中每个码元符号的持续时间，对二进制码而言就是要减小脉冲宽度，若编码前每个码脉冲的归一化宽度为 1，则编码后的归一化宽度为  $k/n$  ( $k < n$ ,  $k/n < 1$ )，因此，信道带宽必须展宽  $n/k$  倍。在这种情况下，我们是以带宽的多余度换取了信道传输的可靠性。如果信息传输速率允许降低，则编码后每个码元的持续时间可以不变。这时，我们以信息传输速度的多余度或称时间上的多余度换取了传输的可靠性。

### 三、信道编码的分类

1. 按照编码规则的局限性可分为分组码与卷积码。若编码的规则仅局限在本码组之内，即本码组的监督元仅和本码组的信息元相关，则称这类码为分组码。若本码组的监督元不仅和本码组的信息元相关，而且还和与本码组相邻的前  $N - 1$  个码组的信息元相关，则这类码称为卷积码。

在分组码中，每个待编码的信息码组由  $k$  个二进制码元组成，共有  $2^k$  个可能的不同的信息码组。信道编码器对每个信息码组独立地进行编码，所附加的  $n - k$  个码元中，每一个监督元取值为 1 还是 0，仅与该信息码组的  $k$  个码元为何有关。编码器输出一个长度为  $n$  的码组，又称码字，码字的数目也是  $2^k$  个，这  $2^k$  个码字的集合称为  $(n, k)$  分组码。由于分组码的每个码字只取决于相应的信息码组，所以编码器是无记忆的，可用组合逻辑电路来实现。 $k/n$  是一个重要的参数，经常用符号  $R$  表示， $R < 1$ ，且称作编码效率。

卷积码的编码器也是对  $k$  个码元的信息码组进行编码，并输出一个长为  $n$  个码元的码字。但每个码字可以附加的监督元不仅与此时刻输入到编码器的信息码组有关，还和与此时刻相邻的前

$N - 1$  个信息码组有关。因此编码器应含有  $N - 1 = m$  级存储器，每一级存储器存储前  $N - 1 = m$  个时刻中，每个时刻输入到编码器的  $k$  个信息元，所以卷积码编码器是有记忆的。它必须用序列逻辑电路来实现。 $N - 1 = m$  称为卷积码的编码存储。 $N$  称为卷积码的约束度。卷积码常用  $(n, k, m)$  表示。

2. 若编码规则可以用线性方程组来表示，则称为线性码，否则称为非线性码。例如电信中常用的等比码就是非线性码。

3. 按编码后每个码字的结构可分为系统码和非系统码。系统码的每个码字中，前  $k$  个码元与信息码组一致，而非系统码的码字没有这种结构上的特点。

4. 按纠正差错的类型可分为纠正随机错误的码和纠正突发错误的码。

5. 按码字中每个码元的取值可分为二元码或二进制码和多进制码。由于二进制码应用最广泛，我们仅讨论二元码。

### § 1.3 差错控制的基本方式

差错控制的方式基本上有两类：一类是接收端检测到传输的码字有错以后，收端译码器自动地纠正错误；另一类是收端接收到错误以后，通过反馈信道发送一个应答信号，要求发端重传收端认为有错误的消息，从而达到纠正错误的目的。较详细的区别如图1.3.1所示。

下面分别简介这些方式的主要过程和优缺点。

#### 一、前向纠错 (FEC)

这种方式是发端的信道编码器将信息码组编成具有一定纠错能力的码。收端信道译码器对接收码字进行译码，若传输中产生的差错数目在码的纠错能力之内时，译码器对差错进行定位并加以纠正。

前向纠错方式主要优点是，不需要反馈信道，适用于一点发