

高等学校通用教材

编码理论

赵琦 刘荣科 编著



北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材

代 简 容 内

编 码 理 论

赵 琦 刘荣科 编著

编 者 简 介

赵琦，北京航空航天大学教授，长期从事编码理论的教学和科研工作，主持多项科研项目，发表多篇学术论文。刘荣科，北京航空航天大学教授，长期从事编码理论的教学和科研工作，主持多项科研项目，发表多篇学术论文。

北京航空航天大学出版社

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材,主要介绍了编码理论的基本知识。全书共8章,主要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;最后对Turbo码和LDPC码做了专题讨论。各章原理的叙述力求突出概念和思路,尽量除去烦琐的数学推导,设计与应用尽量采用实例分析;同时,给出了具体的实现电路,剪系统性强,并注重工程应用,为工程化实现提供基础。这对于需要获得编码理论基础知识的学生和在这些领域从事研究的工程技术人员将是有益的。

本书可以作为高等院校有关专业的本科生和研究生教材,也可供从事通信、控制、计算机等相关领域的有关科研人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

编码理论/赵琦等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-81124-544-8

I. 编… II. 赵… III. 编码理论 IV. 0157.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第000175号

编 码 理 论

赵 琦 刘荣科 编著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>, E-mail: bhpressell@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787 mm×960 mm 1/16 印张:19.75 字数:442千字

2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷 印数:4 000册

ISBN 978-7-81124-544-8 定价:30.00元

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 50 余年来,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。随着超大规模集成电路和计算机技术的迅速发展,信道编码技术在通信、计算机网络、工业自动控制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工程专业的教学大纲中被列为必修或指定选修课程。

作者参阅了关于编码理论的教材和一些其他著作(如北京航空航天大学张鸣瑞教授和邹世开教授编著的《编码理论》,西安电子科技大学王新梅教授和肖国镇教授编著的《纠错码原理与方法》等),并针对航空航天院校的专业特点,考虑到教学大纲的学时安排,内容上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。

编码理论是一门理论与应用关系十分密切的学科,从它的产生背景、发展与应用内容等方面均与电子、通信、计算机技术的发展密切相关,并得到一系列的重要应用。尤其与近代网络通信、数据加密与安全技术、多媒体技术密不可分。因此,结合当今编码理论研究与应用的发展编写了本教材,以期能适应我国科学技术和教学发展的要求。

全书共 8 章。在第 1 章的概述中,通俗地介绍了信道编码的基本思想和它在通信系统中的地位。第 2 章介绍了线性分组码。第 3 章介绍了必要的数学基础,这是学习 BCH 码所必需的知识。第 4 章介绍了循环码。第 5 章研究了 BCH 码和 RS 码,这一章是分组码的重点内容。第 6 章讨论了卷积码的基本概念、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。第 7、8 两章主要研究 Turbo 码和 LDPC 码。本书对纠错编码的实际应用具有指导作用。各章后面都有一些难易程度不等的习题,可供读者选用。书末有较详细的参考文献,可供阅读时参考。

本书由赵琦、刘荣科编写,其中,第 1 至第 6 章由赵琦编写,第 7、8 两章由刘荣科编写。在编写过程中,始终得到张鸣瑞教授和邹世开教授的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免有不妥和错误,敬请读者指正。

编 者

2008 年 10 月于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪 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	3
1.3 信道错误图样、信道模型和码的分类	4
1.3.1 信道错误图样	4
1.3.2 信道模型	4
1.3.3 信道编码的分类	5
1.4 差错控制的基本方式	6
1.5 最佳译码与最大似然译码	8
第 2 章 线性分组码	10
2.1 线性分组码引论	10
2.1.1 基本概念	10
2.1.2 分组码的码率	11
2.1.3 汉明(Hamming)距离和汉明重量	11
2.2 线性分组码的监督矩阵和生成矩阵	12
2.2.1 监督矩阵	12
2.2.2 生成矩阵	14
2.3 对偶码	16
2.4 线性分组码的编码	18
2.5 线性分组码的译码	19
2.5.1 伴随式和错误检测	19
2.5.2 标准阵列译码	22
2.6 线性码的纠检错能力与码的最小距离 d_{\min} 的关系	26
2.7 完备码和汉明码	28
2.7.1 完备码	28
2.7.2 汉明码	29
2.7.3 扩展汉明码	30
2.8 线性码在 BSC 中的不可检测错误概率 $P_u(E)$	30
2.8.1 利用码长 n 和最小距离 d_{\min} 计算 $P_u(E)$	30

2.8.2	由 (n, k) 线性码的重量分布求 $P_u(E)$	31
2.8.3	利用 (n, k) 码的重量分布与其对偶码的重量分布间的关系求 $P_u(E)$	31
2.8.4	(n, k) 线性码未检出错概率的上限	32
2.9	线性码的码限	33
2.9.1	汉明限	35
2.9.2	普洛特金限	36
2.9.3	瓦尔沙莫夫—吉尔伯特限	37
	习 题	39
第 3 章 抽象代数补充知识		41
3.1	群、环、域的基本概念	41
3.1.1	群的定义	41
3.1.2	环的定义	42
3.1.3	域	42
3.1.4	子 群	43
3.1.5	循环群	43
3.2	有限域上的多项式	44
3.2.1	有根域的加法运算	44
3.2.2	二元域上的多项式	45
3.2.3	最小多项式	48
第 4 章 循环码		50
4.1	基本概念	50
4.1.1	循环码的定义	50
4.1.2	循环码的生成多项式和生成矩阵	51
4.2	循环码的监督多项式和监督矩阵	54
4.2.1	循环码的监督多项式	54
4.2.2	循环码的监督矩阵	55
4.3	系统循环码的编码	56
4.3.1	系统码的构成	56
4.3.2	$n-k$ 级编码器	58
4.3.3	k 级编码器	60
4.4	循环码的一般译码原理	62
4.4.1	接收矢量伴随式的计算	62

4.4.2	循环码通用译码法(梅吉特译码法).....	65
4.4.3	循环汉明码.....	66
4.4.4	缩短循环码.....	68
4.5	循环码的捕错译码.....	69
4.5.1	捕错译码原理.....	70
4.5.2	捕错译码电路.....	72
4.5.3	改进的捕错译码法.....	74
4.5.4	戈莱(Golay)码及其译码.....	76
4.6	循环码的大数逻辑译码.....	81
4.6.1	大数逻辑译码原理.....	81
4.6.2	最大长度码.....	88
4.6.3	差集码.....	90
	习 题.....	93
第5章 BCH码和RS码		95
5.1	BCH码的定义及其距离限.....	95
5.1.1	BCH码的定义.....	95
5.1.2	BCH码的距离限.....	96
5.2	二元BCH码的参数和作法.....	97
5.2.1	二元BCH码的参数.....	97
5.2.2	二元BCH码的作法.....	98
5.3	多元BCH码和RS码.....	105
5.4	BCH码的译码.....	106
5.4.1	由接收多项式 $R(x)$ 计算伴随式 S_j	107
5.4.2	用伯利坎普迭代算法并由伴随式 S_j 求差值位置多项式 $\sigma(x)$	108
5.4.3	求 $\sigma(x)$ 的倒数根确定错误位置.....	115
5.4.4	计算错误值.....	116
5.4.5	译码算法的改进.....	119
5.5	RS码的编码.....	120
5.6	非系统RS码的编码和译码.....	122
5.6.1	MS多项式的定义.....	122
5.6.2	非系统RS码的编码.....	124
5.6.3	非系统RS码的译码.....	125
5.7	BCH码的纠错/纠错译码.....	129

5.8	$GF(2^m)$ 域元素的计算电路及其在 BCH 码和 RS 码编译码中的应用	132
5.8.1	$GF(2^m)$ 域元素的加法运算	133
5.8.2	$GF(2^m)$ 域元素的乘法运算	134
5.8.3	在 $GF(2^m)$ 域上的“普通基比特串行乘法电路”[I]	141
5.9	纠错的实现	153
5.10	BCH 码和 RS 码的应用	154
5.10.1	(82,61)BCH 码的应用	154
5.10.2	(248,128)RS 码的应用	155
	习 题	155
第 6 章	卷积码基础	156
6.1	卷积码的基本概念	156
6.1.1	卷积码的生成序列、约束度和约束长度	156
6.1.2	系统码形式的卷积码	160
6.1.3	卷积码的编码	161
6.2	卷积码的矩阵描述	166
6.2.1	卷积码的生成矩阵	166
6.2.2	卷积码的监督矩阵	171
6.3	用延时算子表示卷积码	173
6.4	卷积码的代数译码	177
6.4.1	伴随式的计算	177
6.4.2	代数译码的基本原理	181
6.4.3	大数逻辑译码	185
6.4.4	卷积码的距离特性	194
6.5	卷积码的概率译码	196
6.5.1	卷积码的树状图、状态图和篱状图描述	196
6.5.2	维特比译码原理	200
6.5.3	维特比译码的性能	207
6.5.4	删余卷积码	218
6.5.5	序列译码的原理——费诺算法	220
6.6	卷积码的应用	232
	习 题	233
第 7 章	Turbo 码	235
7.1	Turbo 码的编码	235

7.2	交织器	238
7.2.1	分组交织器	239
7.2.2	卷积交织器	242
7.2.3	随机交织器	243
7.2.4	码匹配交织器	244
7.3	Turbo 码的译码	244
7.3.1	Turbo 码的译码器组成	244
7.3.2	Turbo 码的译码算法	246
7.4	Turbo 码性能分析	251
7.5	多进制 Turbo 码	253
7.5.1	多进制 Turbo 码的编码	253
7.5.2	多进制 Turbo 码的译码	254
7.5.3	多进制 Turbo 码的硬件结构	256
7.6	Turbo 码的应用	264
	习 题	265
第 8 章	LDPC 码	267
8.1	LDPC 码的性质及其 Tanner 图	267
8.1.1	LDPC 码性质和分类	267
8.1.2	Tanner 图	268
8.2	LDPC 码构造基本方法	269
8.2.1	随机构造法	270
8.2.2	系统代数构造法	272
8.2.3	码率兼容的 LDPC 码的构造	274
8.3	LDPC 码的编码	275
8.3.1	线性分组码通用编码	275
8.3.2	LU 分解	276
8.3.3	高斯消去法	276
8.3.4	准循环 LDPC 高效编码方法	277
8.4	LDPC 码的译码	278
8.4.1	位翻转译码算法	279
8.4.2	置信传播算法	280
8.4.3	对数域的置信传播算法	283
8.5	密度进化理论(Density Evolution Theory)	286

8.5.1	LDPC 码的性能和门限值的关系	286
8.5.2	密度进化的算法	287
8.6	多进制 LDPC 码	288
8.6.1	多进制 LDPC 码校验矩阵的构造方法	289
8.6.2	多进制 LDPC 码的译码算法	291
8.7	LDPC 码编译码器结构	294
8.7.1	基于 Log-BP 算法原理的硬件结构	294
8.7.2	QC-LDPC 的部分并行译码结构	296
8.7.3	基于矩阵分裂的 QC-LDPC 码的硬件结构	298
8.8	LDPC 码的应用	300
	习 题	301
	参考文献	303

第 1 章 绪 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。

1.1 信道编码在数字通信系统中的地位和作用

信道编码是为了保证通信系统的传输可靠性,克服信道中的噪声和干扰而专门设计的一类抗干扰技术和方法。编码理论始创于 1948 年,香农(Shannon)在他的开创性论文《通信的数学理论》(A mathematical theory of communication)中指出:任何一个通信信道都有确定的信道容量 C ,如果通信系统所要求的传输速率 $R < C$,则存在一种编码方法,当码长 n 充分大并应用最大似然译码 MLD(Maximum Likelihood Decoding)时,信息的错误概率可以达到任意小。这就是著名的有噪信道编码定理,它奠定了纠错编码理论的基石。但是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。这正是信道编码(又称纠错编码、差错控制)要解决的问题。信道编码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。

典型的数字通信系统框图如图 1.1.1 所示。

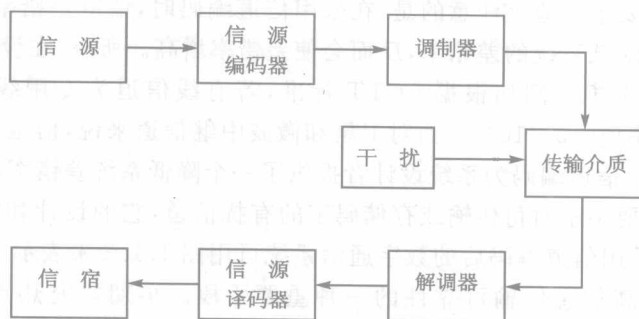


图 1.1.1 数字通信系统框图

信息的产生或发送者称为信源,一般称信源产生的信息为消息。图 1.1.1 中信源输出可以是连续波形,也可以是离散的序列。信源编码器将信源输出变换成二元数字序列,称为信息序列。在调制器中,把输入的信息序列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中(或存储媒质)会受到干扰,例如有线信道中的脉冲干扰,无线信道中的噪声和衰落等。实际的传输信道可能是由光缆或卫星中继等构成的有线信道;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。存储介质可以是磁带、磁盘、光盘等。无论是何种传输介质,都受到不同性质的干扰。解调器的输入信号一般是受到干扰的混合波形,解调器的任务是从有用信号和干扰的混合波形中恢复出有用的信号,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,并把它送给信宿,即消息的接收者。

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的差错问题,也就是传输的可靠性问题。在传输过程中产生不同差错的主要原因,是不同的传输系统性能不同以及在传输过程中干扰不同。

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、传输介质)本身所引起的误码率;二是采用信道编码,即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,信道差错率应满足一定的要求,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 CCTT 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。

信道编码器主要用来对付传输或存储码字的有扰信道,它的设计和实现问题是本书主要讨论的问题之一,采用信道编码后的数字通信系统可用图 1.1.2 来表示。

信道编码是提高信息传输可靠性的一种重要手段。早期研究热点是以 BCH 码和 RS (Reed-Solomom) 码为代表的分组码和卷积码;20 世纪 80 年代以后的研究热点是网格编码和代数几何码;现今的研究热点为 Turbo 码和 LDPC (Low-Density Parity-Check Codes) 码。

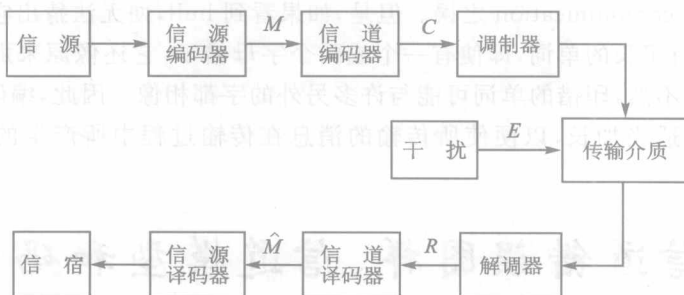


图 1.1.2 有编码的数字通信系统框图

1.2 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 , 通常是由符号 1、0 组成的序列, 而且符号 1 和 0 是独立的等概率的。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 变换为具有某些规律性的数字序列 C , 又称为码序列。也就是说, 码序列中信息序列的各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 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, 遥测系统中的每一种数据, 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(又称码字)。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的能力, 提高了传输的可靠性, 降低了误码率。

另一方面, 如果要求在附加了监督元后信息传输速率不变, 则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, 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, 则以信息传输速度的多余度换取了传输的可靠性。

为什么将消息数字适当增加些多余数字, 就会提高消息在传输过程中的抗干扰能力呢? 这是用基本常识可以想象的。比如, 见到一个英语字母组合的单词 communication, 立即就可以

想象到是英语单词 communication 之误。但是,如果看到 hull,便无法猜出它是 hall 或 hell 之误。原因很简单,对于长的单词,即使有一个或两个字母错了,它还像原来那个字多于像其他的字。短的单词则不然,印错的单词可能与许多另外的字都相像。因此,编码的基本思想就是将原来的消息数字适当加长,以便使所传输的消息在传输过程中所产生的错误容易辨认并纠正。

1.3 信道错误图样、信道模型和码的分类

1.3.1 信道错误图样

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他码元的错误,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 00000000...,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,因此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 10111000...。显然信道错误图中的 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并存,或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,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。

1.3.2 信道模型

信道模型是指用数学模型来描述信道错误图样中的 0、1 分布规律。关于信道的统计特性的详细论述可以参阅文献[3],这里以二进制信道模型为例,设发送端以等概率发送信息 0 和 1,经信道传输,由于信道噪声或干扰的影响,分别以概率 $1-p_0$ 和 $1-p_1$ 接收 0 和 1,因此, p_0 和 p_1 分别是 0 错成 1 和 1 错成 0 的概率,也称为转移概率。转移概率可以用 $p(j/i)$ 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, 如果取自集合 $\{0, 1\}$ 、而且 $p(0/0) = p(1/1)$, $p(0/1) = p(1/0)$, 则称该信道为二进制对称信道, 用 BSC 表示, 信道可用图 1.3.1 所示的简单模型表示。否则称信道为不对称信道。若 $p(0/1) = p(1/0) = 0$, 则称为 Z 信道。通常 BSC 是一种无记忆信道, 所以也称随机信道, 它说明数据序列中出现的错误彼此无关。

如果信道的输入是二进制符号, 而输出是离散的 q ($q = p^m \geq 2$) 进制符号, 如图 1.3.2 所示, 且 $p(i/1) = p(q-1-i/1)$, $i = 0, 1, \dots, q-1$, 则这种信道称为离散无记忆信道, 用 DMC 表示, 显然 BSC 是 DMC 的一种特殊情况。



图 1.3.1 BSC 信道模型

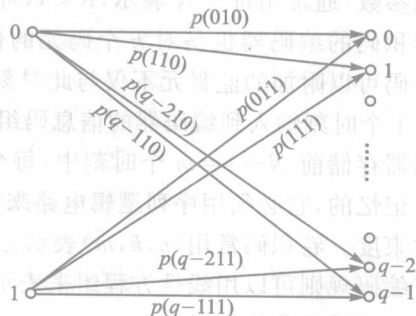


图 1.3.2 DMC 信道模型

在做删除判决情况下, 信道可用图 1.3.3 所示的模型表示, 称为二进制删除信道, 用 BEC 表示, 一般它也是对称信道。图 1.3.3 中, p_e 为信道的转移概率, q 为删除概率, 在有删除处理情况下, 信道的转移概率 p_e 一般很小, 可以忽略, 因此, 图 1.3.3 所示的模型可以用图 1.3.4 代替, 称之为二进制纯删除信道。应当指出, 当码元作删除处理时, 它在序列中的位置是已知的, 只是不知道值是 1 还是 0, 所以对这种 BEC 信道的纠错要比 BSC 信道容易。

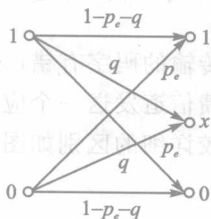


图 1.3.3 二进制删除信道

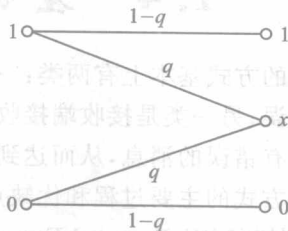


图 1.3.4 二进制纯删除信道

1.3.3 信道编码的分类

按照编码规则的局限性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 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,通常用符号 R 表示, $R < 1$,称为编码效率。

卷积码的编码器也是对 k 个码元的信息码进行编码,并输出一个长为 n 个码元的码字。但每个码可以附加的监督元不仅与此时此刻输入到编码器的信息码组有关,还与此时此刻相邻的前 $N-1$ 个时刻输入到编码器的信息码组有关,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。

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。

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 个码元与信息码一致,而非系统码的码字没有这种结构上的特点。

按纠正差错的类型可分为纠正随机错误码和纠正突发错误的码。

按码字中每个码元的取值可分为二进码或二进制码和多进制码,由于元码应用最广泛,这里仅讨论二进码。

1.4 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,接收端译码器自动地纠正错误;另一类是接收端接收到错误以后通过反馈信道发送一个应答信号,要发端重传接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 1.4.1 所示,下面分别介绍这些方式的主要过程和优缺点。

1. 前向纠错(FEC, Forward Error Correction)

这种方式是发端的信道编码器将信息组编成具有一定纠错能力的码,接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。

前向纠错方式的优点是不需要反馈信道,适用于一点发送、多点接收的广播系统,译码延时固定,较适合于实时传输系统,但是这种方式要求预先确定信道的差错统计特性,以便选择

合适的纠错码,否则难于达到误码率的要求。在计算机集成电路广泛应用的今天,编译码的实现并不复杂,这种方式正在广泛应用于通信系统中,如深空和卫星信道。

2. 检错重传 (ARQ, Automatic Repeat reQuest)

检错重传方式有三种基本的类型:等待式 ARQ (Stop-and-wait)、退 N 步 ARQ (go-back-N) 和选择重传 (Selective-repeat)。等待式 ARQ 中,发送端发送一个码字给接收端并等待从接收端来的应答信号,若应答信号是否定的,则发端就重传该码字,一直继续到发端收到一个肯定回答为止。例如 IBM 的同步通信规约与航空电子综合化系统中都采用了这一方式。

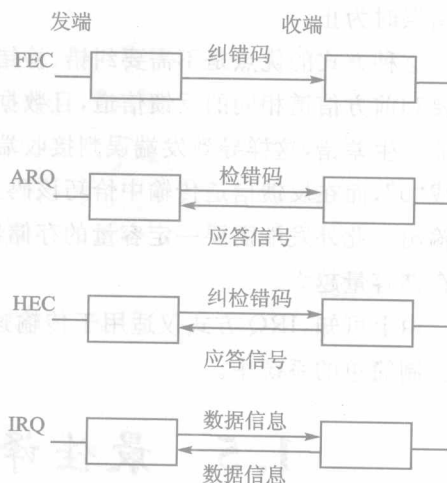


图 1.4.1 差错控制的基本方式

检错重传方式的主要优点是只需要少量的多余码元(一般为总码元的 5%~20%)就能获得极低的输出误码率,并且所使用的检错码基本上与信道的差错统计特性无关,对各种信道的不同差错特性,有一定自适应能力,只要设计得好都能达到设计中所要求的误码率,这是该种方式的重大优点。此外该方式的检错译码器和 FEC 的纠错译码器相比,其成本和复杂性均要低得多。此种方式的主要缺点是必须有反馈信道,因而不能用于单个传输系统,也难以用于同步系统,并且实现控制比较复杂。此外当信道干扰增大时,整个系统可能处在重传循环中,因而通信效率降低,在某些情况下甚至不能通信,并且由于反馈重传的随机性,收端送给用户的数据信息也是随机到达的,因此不大适于实时传输系统。

3. 混合差错控制 (HEC, Hybrid Error Correction)

这种方式是 FEC 与 ARQ 方式的结合,发端发送同时具有自动纠错和检错能力的码组,收端接收到码组后检查差错情况,如果差错在码的纠错能力范围内,则自动地进行纠正。如果信道的干扰很严重,错误很多,超过了码的纠错能力,但能检测出来,则经反馈信道请求发端重发这组数据。因此如同检错重传系统一样,也有以上所述的几种工作方式。

HEC 方式具有 FEC 与 ARQ 方式的优点,避免了 FEC 方式所需的复杂译码器及不能适应信道差错变化的缺点,还能克服 ARQ 方式信息连贯性差、有时通信效率低的缺点,因此这种方式特别适用于环路延迟大的高速传输系统(如卫星通信)中。

4. 信息反馈 (IRQ, Information Repeat reQuest)

此方式也称回程校验方式,收端把收到的数据原封不动地通过反馈信道送回到发端,发端比较发的数据与反馈来的数据,从而发现错误,并且把错误的消息再次传送,直到发端没有发