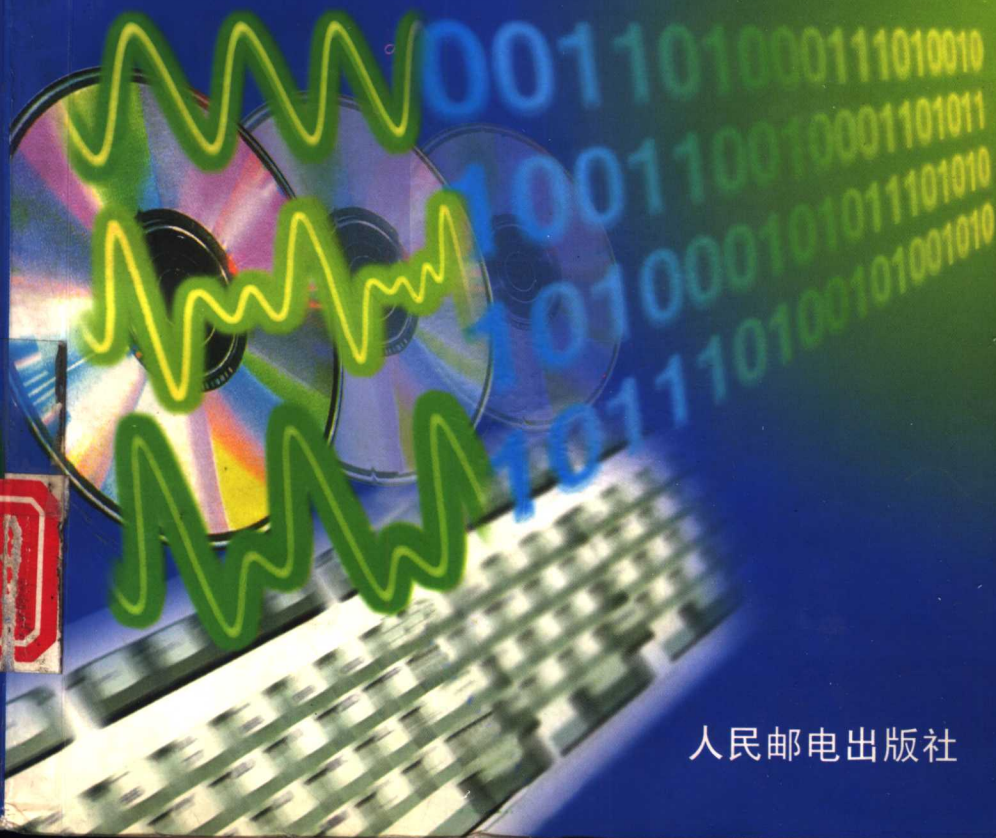


信源编码原理

周炯槃 丁晓明 编著



人民邮电出版社

信 源 编 码 原 理

周炯槃 丁晓明 编著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书从信息论出发,介绍信源编码的基本原理和方法。内容包括离散信源的无损编码(如赫夫曼编码、游程编码、算术编码、通用编码等),连续信源的限失真编码(如标量量化和矢量量化),相关信源的编码(如预测编码和变换编码)。除了介绍已付诸实用的一些编码方法外,还讨论了有发展前景和近期出现的编码方法及其原理(如 L-Z 码和小波变换等)。本书可用作高等院校通信及其相近专业研究生教材和教学参考书,也可供这一领域的研究工作者参考。

信源编码原理

恽炯荣 丁晓明 编著

责任编辑:高丕武

人民邮电出版社出版发行

北京朝阳门内南竹杆胡同 111 号

北京顺义向阳印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

*

开本·850×1168 1/32 1996 年 10 月 第 1 版

印张·8.25 1996 年 10 月 北京第 1 次印刷

字数 215 千字 印数·1—2 000 册

ISBN 7-115-06220-X/TN·1102

定价:15.00 元

前 言

信源编码从广义来说,就是把各种信源输出转换成易于处理的形式如二进制或其它数字信号,以利于在通信信道中传输,在磁介质、光盘存储,或在计算机中进行处理。从这种意义上看,它是一切通信系统和电子信息系统中不可缺少的部分,因而是一个历史悠久的课题。从古老的烽火告警、莫尔斯电报码,直到近代的矢量量化编码,都是信源编码的例子。自从 50 年代仙农信息论建立后,信源编码就在这一理论的指导下得到蓬勃的发展。而以压缩码率作为其主要目标,相继出现一些离散信源的最佳编码如赫夫曼码和算术码、连续信源的最佳量化和矢量量化、以及相关信源的预测编码和变换编码。这些编码方法虽有不少已在实际系统中应用(尤其是大规模集成电路出现后更是如此),但一般还是以代价较大而难于广泛采用,以致一度认为在大容量信道(如光缆)已得到广泛应用后,以高代价来压缩码率的信源编码已无必要。当然这方面的研究工作一直并无间断。其实,信源编码既是所有信息系统的一个必要的部分,随着数字部件的进展,经济上可行性将有所改善,其应用必将开展。90 年代以来,移动通信等无线接入和多媒体技术的大量引入,由于频带的限制,迫使人们采用压缩编码,又给信源编码技术注入新的动力。

在这种情况下,北京邮电大学自 1992 年起为研究生开设了信源编码原理的课程。当时虽有一些信源编码如语音编码、图象编码的教材,但整体性的、原理性的、适用于研究生的书尚未见到,因而就着手编写《信源编码原理》这一教材,经几年来的使用、修改、补充后形成了本书。其中实用的语音预测编码由丁晓明同志编写。由于信源编

码尚在发展,内含也相当广泛,所以在选材、结构和内容等方面必有不妥和错误之处,尚望读者指正。

周 炯 槃

1996 年 6 月于北京邮电大学

目 录

绪论

第一部分 离散信源编码

第一章 无损信源编码	9
1.1 信息熵和信源编码定理	9
1.2 赫夫曼编码	16
1.2.1 概述.....	16
1.2.2 赫夫曼编码的步骤	20
1.2.3 赫夫曼编码的推广	22
1.2.4 变长码的缺点和需采取的措施	27
1.3 游程编码.....	29
1.3.1 游程和游程序列	30
1.3.2 游程长度的概率特性.....	31
1.3.3 游程编码的实现	36
1.4 冗余位编码.....	37
1.4.1 概述.....	37
1.4.2 L-D 码	39
1.4.3 信息位标志码	44
1.4.4 非连“1”码	45
习题	48
第二章 算术编码	50
2.1 基本概念.....	50
2.1.1 积累概率的递推计算.....	51

2.1.2 代码长度	52
2.1.3 实现算术编码的一些问题	54
2.2 算术编码之例	55
2.2.1 二元独立序列的算术编码	55
2.2.2 编码效率	58
2.2.3 有限精度下的算术编码	60
2.3 一般马氏链信源的算术编码	63
2.3.1 编译码的计算公式	64
2.3.2 有限精度问题	67
2.3.3 进位差错的防止	69
2.4 自适应算术编码	71
习题	77
第三章 通用编码	78
3.1 概述	78
3.2 已知某些概率特性的编码方法	80
3.2.1 D 码	81
3.2.2 概率顺序码	84
3.3 E 码	87
3.3.1 最近间隔编码	87
3.3.2 最近队列编码	89
3.4 L—Z 码	91
3.4.1 分段编码	91
3.4.2 段匹配码	97
习题	101

第二部分 连续信源编码

第四章 限失真信源编码	103
4.1 率失真理论简述	104

4.2 最佳标量量化	109
4.2.1 递推算法	109
4.2.2 两个有解析解的特例	112
4.3 实际问题中的量化	118
4.4 提高压缩性能的探讨	125
4.4.1 后续数字处理	125
4.4.2 联合编码	127
习题	134

第五章 矢量量化技术..... 136

5.1 最佳矢量量化的基本算法	136
5.1.1 LGB 算法	136
5.1.2 利用训练序列时的算法	138
5.1.3 起始码书的产生	140
5.2 快速搜索问题	142
5.2.1 投影法	143
5.2.2 超立方体法	144
5.2.3 最小最大法	145
5.3 码书的构造	147
5.3.1 树形码书	147
5.3.2 分维量化	150
5.3.3 分级量化	152
5.3.4 乘积量化	154
5.4 内插矢量量化	155
5.5 格型量化	159
习题	164

第三部分 相关信源的编码

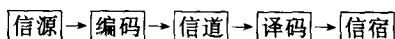
第六章 预测编码	165
----------------	-----

6.1	概述	165
6.2	预测方法	168
6.2.1	最佳预测	169
6.2.2	线性预测	173
6.2.3	自适应预测技术	176
6.3	差值编码	180
6.3.1	离散信源的差值编码	180
6.3.2	差分脉码调制	183
6.3.3	增量调制	187
6.4	线性预测声码器	192
6.4.1	语音产生机制与声码器	192
6.4.2	低延时码激励线性预测编码	195
6.4.3	300bit/s 声码器	197
习题		200
第七章	变换编码	201
7.1	基本原理	201
7.1.1	完备正交函数系	201
7.1.2	K-L 变换	205
7.1.3	二值正交函数系	209
7.2	离散变换	214
7.2.1	变换矩阵	215
7.2.2	连续正交函数的离散化	216
7.2.3	非连续正交函数的离散化	221
7.2.4	斜变换	224
7.2.5	多重变换	227
7.3	变换编码的评价参数	228
7.3.1	编码增益	228
7.3.2	块效应系数	230
7.4	子带编码和 LINC	231
7.4.1	子带编码	231

7.4.2	LINC 的无损反变换	234
7.4.3	复叠块变换	239
7.5	小波变换	241
7.5.1	多分辨分析和小波变换	242
7.5.2	正交小波函数系的构造	243
7.5.3	有限支撑小波的最佳选择	247
习 题		252
后 记		253

绪 论

通信技术在近代社会发展中具有十分重要的意义,而编码问题又是通信系统中的核心问题。所谓编码,广义地说就是信号的变换;这可根据下面的仙农通信系统模型来讨论。



上面模型中的信源和信宿是通信系统的服务对象,是预先规定的。设计一个通信系统就在于选择信道和设计编码和译码设备。一般地说,选择信道是有所限制的。移动通信只能选用无线信道,远距离尤其是国际通信常以选用卫星信道为好,至于大容量通信则往往采用同轴电缆、光缆或无线中继信道。开发新信道来促进通信发展当然也很重要,但这已是另一类问题了。从模型中可看出,编码部分就是把信源输出的信号变换成适宜于信道传送的信号;而译码部分就是编码的反变换。编码和译码常须统一考虑,两者可总称为编码问题。编译码器是决定通信系统性能的主要设备,所以编码问题就成为通信系统中的主要研究课题。这就是说,编码问题牵涉到信源到信宿间除信道外的所有设施。在数字通信中,编译码器可包括模数和数模变换,压缩编译码器,加密和解密设备,纠错检错编译码器,调制解调器以及多路复用设备等。在通信网中,还可包括信令或协议的产生,编译码和识别设施等。

研究编码问题是为了能设计使通信系统优化的编译码设备。一般地说,通信系统的性能指标主要是有效性、可靠性、安全性和经济性。优化就是使这些指标达到最佳。除了经济性外,这些指标正是信息论的研究对象。根据信息论的各种编码定理和上述通信系统的指

标, 编码问题可分解为三类: 一是信源编码, 二是信道编码, 三是密码, 今分别予以简述。

信源编码的主要目标是压缩每个信源符号的平均比特数或信源的码率。一般信源输出的每个符号所能载荷的信息量远大于该信源符号的实际信息量。例如英文字母有 26 个, 再加上空格共 27 个, 若用二进编码, 需要 5 位 (可代表 32 种符号), 即每个信源符号需要 5 bit。根据信息论的估算, 对于英文书籍或文章, 每个符号大概只需要 1.3 bit, 即约可压缩到 $1/4$ 。这就是说, 同样的信道或存储器, 用于经压缩后的信号可增加容量 4 倍, 提高了通信系统的有效性。当然, 要压缩到上述极限值 1.3 bit, 付出的代价是相当高的; 所以有人认为, 在大容量信道已存在并不断扩大的情况下, 研究信源编码似乎已无多大意义。其实这是一个技术和经济协调的问题。倘若压缩编码所付的代价远大于增加信道容量所需的费用, 一定要去压缩当然是没有意义的; 随着技术的发展, 压缩的代价可能会小于后者, 情况就完全不同了。50 年代提出的脉码调制 (PCM) 的语音编码方式, 当时是不现实的; 大规模集成电路出现后, 情况就起了变化。当前 64kbit/s 的 PCM 语音传送技术已成为普遍应用的方式。进一步压缩语音信号, 现在已有增量调制、差分脉码调制 (DPCM)、声码器等方法, 有的已在某些场合应用, 有的尚待技术进一步发展, 以使技术经济指标更合理。所以信源编码仍是一种有意义的研究课题, 值得加以重视。

信源编码可分为无失真信源编码和限失真信源编码。前者适用于离散信源或数字信号, 后者主要用于连续信源或模拟信号, 如语音图象等信号的数字处理。连续信源的每个样值所能载荷的信息量是无限大, 而数字信号的值则为有限, 不引入失真是不可能的。这类信号所对应的信宿一般是人, 后者当失真在某一限度以下时是不易被感觉到的, 因此是容许的。从提高通信系统的有效性这种意义上说, 信源编码器的主要指标是它的编码效率。这就是理论上能达到的码率与实际达到的码率之比。一般来说, 效率越高, 编译码器

的代价也将越大。

信道编码包括调制解调和纠错检错编译码。信道编码的主要目标是提高信息传送的可靠性。信道中的干扰常使通信质量下降,也可说使信息传送不可靠。对于模拟信号,这表现在收到的信号的信扰比下降;对于数字信号,这就是误码率增大。信道编码的主要方法是增大码率或频带,也就是增大所需的信道容量。这恰与信源编码相反。例如为了提高模拟信号的信扰比,可采用大频偏的调频方式,这类信号的频带将远大于一般的调幅或单边带信号,就需要更大容量的信道。对于数字信号,尤其是二进制信号,通常可在信息位之后,按一定的规律附加一些监督位。这样就可接收端检出错误并要求重发,或直接纠正某些差错。采用了检错或纠错措施后,显然可降低误码率,也就是提高了信息传送的可靠性。同时,由于增加了监督位,码率将有所扩展,因而将占用较大的信道容量。也有一些信道编码方法并不要求增大容量来提高可靠性,例如在数字调制技术中,相干解调的误码率可低于非相干解调,采用部分相应技术也有此等作用。近来提出的格状码调制(TCM)技术,把多电平调制和纠错码结合起来,在保持一定有效性的条件下,可较大地提高可靠性。用这些方法提高可靠性的代价是使设备复杂化。信道编码的理论基础是信息论中的信道编码定理。该定理指出,当传送的信息率低于信道容量时,误码可接近零。这就是说,理想的信道编码器应能在码率接近信道容量时,保证可靠通信。而现有技术还远未能达到这一目标。

复用技术也可认为是信道编码。从理论基础来说,这是另一类问题;它并不是为了提高可靠性,而是为了充分利用信道。这种技术在通信中有重要意义。新的复用方式尚在发展中,除了传统的频分复用、时分复用外,还可有码分复用、统计复用、多址接入复用等,所以也是一个值得注意的问题。

密码是通信系统中的另一类编码问题,其目的是提高通信系统的安全性。发送端的明文信息经变换后成为密文,当授权者收到

后,可用已具有的密钥正确地译成明文;对于非授权者,因没有密钥而无法取得该信息,这样就保证了通信的安全。安全性一般可用密钥量来衡量。编成密文通常不需要增大信道容量,例如在二进制信息流上叠加一密钥流。也有些密码要求占用较大的信道容量。近来发展起来的公开密钥体系对认证很有用,这就是从密文可判断发送者的身份,以免误认而造成损失,这也是安全性的一个方面。

在实际问题中,上述三类编码应统一考虑来提高通信系统的性能。这些编码的目标往往是相互矛盾的。提高有效性必须去掉信源符号中的冗余部分,此时信道误码会使接收端不能恢复原来的信息,也就是必须相应提高传送的可靠性,不然会使通信质量下降;反之,为了可靠而采用信道编码,往往需扩大码率,也就降低了有效性。安全性也有类似情况。编成密码,有时需扩展码位,这样就降低有效性;有时也会因失步而使授权用户无法获得信息,必须重发而降低有效性,或丢失信息而降低可靠性。从理论方面来说,若能把三种码合并成一种码来编译,即同时考虑有效,可靠和安全,可使编译码器更理想化,在经济上可能也更优越。这种三码合一的设想是当前众所关心的课题;但由于理论上和技术上的复杂性,要取得有用的结果,还是相当困难。

另一方面,三种编码的目标不同,原理不同,理论基础也不同。一般在探讨它们的原理时,往往在三门课程中进行讨论。在深入了解各自的原理的基础上,才能很好地实现三码合一。本书将只讨论信源编码原理,也就是不但集中讨论信源编码,而且以原理为主。具体实现方法,就不深入讨论,因为这应根据技术和元器件的发展,才能得到既经济又高效的编码译码设备。

现在来简述信源编码的发展过程,然后再说明本书的内容安排。

信源编码理论是信息论的一个重要分支。它的基础是信息论中的两个编码定理:无失真编码定理和限失真编码定理。前者是可逆编码的基础。可逆是指当信源符号转换成代码后,可从代码无失真

地恢复原信源符号。当已知信源符号的概率特性时,可计算它的符号熵 H ,这表示每个信源符号所载有的信息量。编码定理不但证明了必存在一种编码方法,使代码的平均长度可任意接近但不能低于符号熵,而且还阐明达到这目标的途径,就是使概率与码长匹配。其实采用概率匹配概念的编码方法,在信息论建立之前已经存在。例如莫尔斯电码中,用了三种码元,即点、划和空。用二进制符号表达,点是 10,共 2 bit,划是 1110,共 4 bit,空是 000,共 3 bit。英文字母 E 最常见,用一个点来表示;而 Q 是不常见的,用两划一点一划来表示。这样可使英文文本的代码总长度较短。但应指出,莫尔斯电码并没有做到概率完全匹配。例如“空格”的概率实际上最大,但用了 3 bit,比 E 的代码还长些,因此它不是最好的编码方法,也就是总的代码长度还可进一步减少。信源编码定理出现后,编码方法就趋向于合理化。从编码定理出发,先后提出了仙农码、费诺码和赫夫曼码。后者是有限长度的块码中的最好的码,亦即代码总长度最短的码。由此也可见理论的指导意义。

赫夫曼码在实际中已有所应用,但它仍存在一些块码所具有的缺点。例如概率特性必须精确地测定,它若略有变化,还需更换码表,以及对于二元信源,常需多个符号合起来编码,才能取得好的效果等。因此在实用中常需作一些改进,同时也就有研究非块码的必要性,算术码就是一种非块码,这是从整个序列的概率的匹配来进行编码的。其实此概念也是仙农首先提出的,后经许多学者改进,已逐渐进入实用阶段。

对概率特性未知或不确知的信源进行有效的编码,上述方法已无能为力。70 年代就有学者提出通用编码。测定信源的精确概率特性,尤其对高阶条件概率是非常困难的;何况有时信源的概率特性根本无法测定,或是否存在也不知道。例如地震波信号就是如此,因为无法取得大量实验数据。当信源序列是非平稳时,其概率特性随时间而变更,要测定这种信源的概率特性也近乎不可能。因此总希望能有一种编码方法,通用于各类概率特性的信源。现有的通用

编码大概可分为概率特性部分已知和完全未知两类；前者有最大小码等，后者有分段编码等。总的来说，这类编码尚不成熟，正在发展中。通用编码中最困难的问题是准则问题。这与概率匹配问题不同，此时已不能确定最佳的标准。当概率特性已知时，信源编码定理给出了上确界，达到这个界的就是最佳码。当概率特性未知时，就无法确定这个上界。一般只能认为概率特性是存在的，但未能测量而不确知而已。这样就可与该概率特性下的极限熵相比较，来确定某种通用编码是否渐近最佳。由此可见，通用编码不但在实用上而且在理论上都需要进一步探讨。

无失真编码或可逆编码只适用于离散信源。对于连续信源，编成代码后就无法无失真地恢复原来的连续值，因为后者的取值可有无限多个。此时只能根据率失真理论进行限失真编码。从率失真函数 $R(D)$ 出发的限失真编码定理虽给出了最佳编码的存在性，也就是保证平均失真小于 D 的情况下，最佳码的码率可以压缩到略大于 R ；但未能给出象概率匹配那样具体编码途径。限失真编码实际上就是最佳量化问题。最佳标量量化常不能达到率失真函数所规定的值。以后就提出矢量量化，这就是多个信源符号合成一个矢量并对它进行编码。从理论上说，在某些条件下，用矢量量化来编码可达到上述的 R 值，但在实现上还是非常困难，有待进一步的研究成果来改进。

对于有记忆信源，信息论中已证明，条件熵必不大于无条件熵，而且常远小于后者。这就是说，解除符号间的相关性可进一步压缩码率。以上这些编码方法，都以无记忆信源为目标，所以尚可改进。最简单的方法是多个符号合成一个新符号，并设新符号组成的序列是独立序列，就可用上述方法进行编码。这种方法并不理想；合并的符号数少时，新符号间的相关性不能解除；合并符号数多时，复杂性将大为提高，而且对实时处理十分不利。因此曾提出许多解除相关性的编码方法。比较有效的有预测编码和变换编码：前者是利用前几个符号来预测后一个符号的值，它与实际值之差，亦即预测误差

作为待编码的符号,这些符号间的相关性就大为减弱,这样可得高压缩比;后者是样值空间的变换,例如从时域变到频域,在某情况下,可减弱相关性,取得良好的压缩比。预测编码和变换编码已在实际中有所应用。从理论上说,怎样才能把有记忆信源转换成无记忆序列,尚无理想的方法,更没有不十分复杂而能实际应用的方法。

以上简述了根据仙农两个编码定理发展起来的各种信源编码方法,也就是从概率论形成的语法信息出发,去掉冗余而达到压缩码率的目的。倘若从更高层次的语义信息或语用信息出发,应能进一步压缩码率。这方面的理论不完整,也就难以形成较有效的编码方法。模式识别可认为属于这一类方法,发展也比较迅速。对于模式数较少的信源,如数字识别,控制信号识别等,已有一些实用系统。目前一般把模式识别作为另一学科而不属于信源编码的范畴;其实从信源编码的观点去研究模式识别,可能也是一种有效的方法。

根据上述信源编码发展过程,本书将分三个部分来介绍信源编码原理。

第一部分是关于离散信源的编码问题,也就是根据无失真编码定理来讨论各种编码方法。第一章在复习信息熵计算的基础上,介绍各种块码的编码方法,讨论它们的局限性和实现时将遇到的问题。第二章讨论典型的非块码——算术码。第三章讨论当前一些通用编码的方法。

第二部分是连续信源的编码问题。第四章在复习率失真理论的基础上,讨论有关标量量化的最佳算法和有关问题。第五章将介绍矢量量化的方法和发展。

第三部分是相关信源编码问题。第六章是预测编码。第七章是变换编码。

最后简述信源编码的发展趋势作为本书的结束。