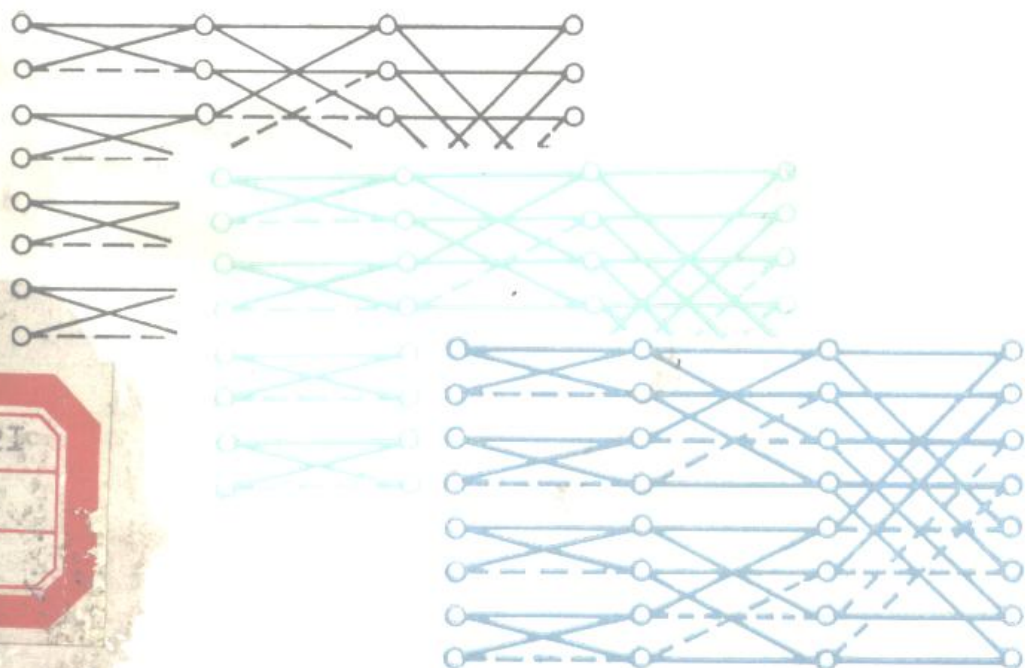


XINYUAN BIANMA

信源编码 修订本

张宏基 编著



121

人民邮电出版社

信 源 编 码

(修订本)

张 宏 基 编 著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书主要叙述信息论中有关信源编码的一些基本定理，及其在文件传真、图象和话音编码方面的某些应用。

为了便于读者理解，书中以较大篇幅介绍了有关定理和预备知识。

DWL 20/21

信 源 编 码

(修 订 本)

张宏基 编著

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河南邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

开本：787×1092 1/32

1987年8月 第 一 版

印张：6 8/32 页数：100

1987年8月 河南第1次印刷

字数：140千字

印数：1-2,500册

统一书号：15045·总3394—无6414

定价：1.30元

2019198

前 言

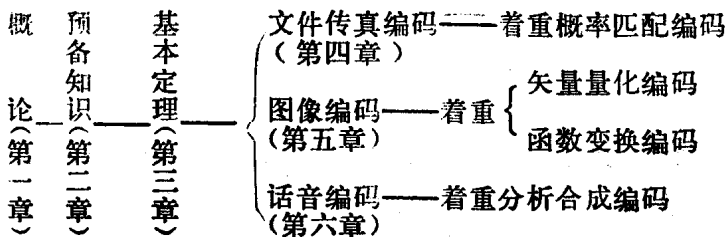
信源编码主要讨论的内容是：如何以最少的数码代表信源发出的信号。它是数字通信和信息存储必不可少的手段。最近由于大规模集成电路和数字网的迅速发展，数字通信的应用日新月异，所以信源编码的方法也层出不穷，种类繁多，不胜枚举。我们没有必要，也不可能一一加以讨论。因此本书将按信息论的基本定理，把信源编码归纳为两类：（1），无失真编码；（2）有失真编码。在这两类中，各选择最有代表性和最有生命力的两种编码方法作为基础内容。其中无失真编码，我们选择概率匹配编码和函数变换编码；至于有失真编码，则选择新近发展起来的矢量量化编码和分析合成编码。

信源编码的主要理论是信息论。本书力求将信息论的基本概念全部统一在不肯定程度上，从而使信息论的抽象定理，即使不加证明，也很容易被接受。这样做，概念清楚，运用方便。对于各种编码的讨论，我们着重解释其原理，不过分追求具体方法的说明。这样的安排，叙述比较方便，但却难免带来一些片面性。一己管见，远远谈不上成熟，诚恳地希望读者提出宝贵意见。

为了不要求读者事先具备信息论的知识，我们从最基本的直观概念出发，说明了有关信源编码的几个基本定理，然后介绍它们的实际应用。

这次修订，根据读者意见，把过去认为叙述过于简单之处加以适当说明；增加了部分新的内容。

下表将有助于了解本书结构。



编著者

1985年12月于成都

目 录

第一章 概 论	(1)
§ 1.1 连续信号与离散信号	(1)
§ 1.2 信源编码和信道编码	(4)
§ 1.3 信源编码的主要方法	(6)
§ 1.4 失真量与数码率的关系	(11)
第二章 不肯定程度	(15)
§ 2.1 不肯定程度的概念	(15)
§ 2.2 不肯定程度的定理	(19)
§ 2.3 信息量的定义	(21)
§ 2.4 二态检验定理	(24)
§ 2.5 延长信号的不肯定程度	(26)
§ 2.6 马尔科夫信源的不肯定程度	(33)
第三章 编码的基本定理	(38)
§ 3.1 编码器的数学描述	(38)
§ 3.2 单义代码的存在定理	(40)
§ 3.3 非续长代码的构成方法	(45)
§ 3.4 信号与代码的对应关系	(48)
§ 3.5 最佳的二进编码	(50)
§ 3.6 信源编码的基本定理	(56)
§ 3.7 中文电报举例	(63)
§ 3.8 有失真编码定理	(67)
第四章 文件传真编码	(76)
§ 4.1 分辨率和压缩比	(76)

§ 4.2	极限压缩比	(80)
§ 4.3	空码编码	(85)
§ 4.4	长度编码的极限压缩比	(88)
§ 4.5	长度编码	(92)
§ 4.6	二维轮廓编码	(97)
§ 4.7	相对轮廓编码	(101)
本章小结		(105)
第五章 图像编码		(109)
§ 5.1	图像编码概述	(109)
§ 5.2	图像预测编码	(111)
§ 5.3	矢量量化	(113)
§ 5.4	图像矢量量化举例	(118)
§ 5.5	离散变换的矩阵表示法	(122)
§ 5.6	沃尔什变换	(125)
§ 5.7	哈德曼变换	(130)
§ 5.8	黑尔变换	(134)
§ 5.9	快速变换	(137)
§ 5.10	余弦变换	(140)
§ 5.11	二维变换的性质及其编码	(143)
第六章 话音编码		(151)
§ 6.1	话音编码概述	(151)
§ 6.2	话音预测编码	(154)
§ 6.3	预测参数的计算	(164)
§ 6.4	预测参数的量化、编码	(169)
附 录		(176)
附录 1	不肯定程度的推导	(176)
附录 2	汉字相对轮廓编码举例	(183)

附表1 $H(p, q)$ 函数表..... (185)
附表2 (190)

第一章 概 论

§ 1.1 连续信号与离散信号

我们常用的信号有连续与离散两种。连续信号最常用而又最简单的表示方法是时间函数 $f(t)$ 。例如，一个正弦波振荡器的输出幅度可以写成

$$f(t) = A \sin \omega t$$

A 和 ω 均为常数。随着时间 t 的连续变化，振荡器的输出幅度 $f(t)$ 也连续地起伏变化。这种时间函数使用得十分广泛。语音的幅度、电视的亮度、电容上的电压等，都可以用 $f(t)$ 表示。

不过，在实际应用中，我们往往不必了解 $f(t)$ 连续变化的全部过程，只要知道特定时间的 $f(t)$ 值就够了。例如，每125微秒测量一次语音的幅度，每0.125微秒观察一次电视的亮度等。这些离散的 $f(t)$ 值，我们用 $f(n)$ 表示， $n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ ，其实 n 就是上面所说的特定时间。例如， $n = 2$ ，就是指第2个125微秒，第2个0.125微秒等。

$f(n)$ 虽然在时间上是离散的，但它能取的值仍然是连续的。换句话说，自变量是离散的，从变量是连续的，所以我们称它为时间离散的函数。如果用数字显示的仪器来显示 $f(n)$ ，那么它能显示的值也是离散的，这就成了自变量和从变量都是离散的信号了。这种信号叫做离散信号，用 $x(n)$ 表示。

我们知道，一个连续的信号 $f(t)$ ，只要它的频带有所限制和允许一定的失真，往往可以变成 $f(n)$ 和 $x(n)$ （说明见1.4节）。图1·1的脉冲编码调制（PCM）就是一种很典型的方法。把 $f(t)$ 变成 $f(n)$ 叫做取样，把 $f(n)$ 变成 $x(n)$ 叫做量化。从 $f(t)$ 变成 $x(n)$ 的整个过程叫做模/数变换。反之，把 $x(n)$ 变成 $f(t)$ 叫做数/模变换。

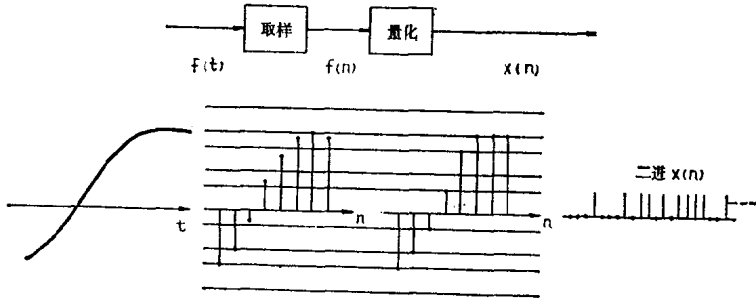


图 1·1 模-数转换示意图

我们通常把连续信号 $f(t)$ 叫做模拟信号，离散信号 $x(n)$ 则叫做数字信号（一般都是指只用0，1表示的二进制信号）。 $f(t)$ ， $f(n)$ ， $x(n)$ 都可用作通信。目前有两大类通信系统：一类是采用 $f(t)$ 作传输信号的模拟通信系统，例如广播、电视、载波电话等，就是这一类；另一类是采用 $x(n)$ 的数字通信系统，例如电报、数据、数字传真、数字电话等。早期的通信，除电报外都用模拟信号；最近十年来，数字通信系统已经有了很大的发展。

本来绝大部分的物理量（电流、电压、亮度、灰度等）常常是连续变化的，测量它们所用的传感器，其输出也通常是模拟信号，何必要变成数字信号？况且目前已经使用着大量的模

拟系统，为什么还要另建数字系统？要完满地回答这些问题是困难的，因为它牵涉的范围很广。不过，我们可以从数字系统是最近才发展起来的这一事实，得到一些答案。

六十年代后半期以来，大规模集成电路成批投产。从五十年代到八十年代，数字电路的重量、体积、功耗、成本等都降低了几个数量级，而运算速度、使用寿命、可靠性等却提高了很多。这就为数字系统提供了极其有利的条件。另一方面，数字计算机的飞跃发展，又对数字系统提出了迫切要求。目前，图形识别，语音识别，工厂的自动控制，宇宙飞行的指挥，雷达数据处理，自然灾害的预报，科学实验的模拟……，无一不需要使用数字计算机。有了大量的数字系统，计算机才可能充分发挥作用。有了需要，又有了可能，正是近年来数字系统得以大大发展的客观原因。

数字信号 $x(n)$ 是用二进符号(0和1)来表达的信号。一个符号叫一个比特(bit, 简写为b)，每秒的二进符号个数叫做数码率(比特/秒, 千比特/秒, 兆比特/秒)。表1·1给出了在实际应用中，各种信源的带宽和经模/数变换后常用的数码率。如果我们以1Hz传送2比特计算，不论哪一种信源，传送数字信号所需的频带都比模拟信号的宽好几倍，甚至十几倍。数码率

表1·1

信 源	频 带	取 样 率	量 化	数 码 率
普通电话	300~3400Hz	8kHz	8b	64kb/s
广 播	40~15000Hz	32kHz	13b	416kb/s
可视电话	0~500kHz	1056kHz	6b	6.336Mb/s
60路超群	312~552kHz	576kHz	11b	6.336Mb/s
黑白电视		10MHz	6b	60Mb/s
彩色电视	0~5.6MHz	1.33MHz	8b	106.4Mb/s

高，不仅对传输不利，而且使存储和处理也增加了困难。这不能不说是数字信号的一个严重缺点。

不过，在没有集成电路之前，数字系统发展的主要障碍还不是数码率的高低，因为首先要解决的是数字电路的体积、重量、功耗、成本等问题。但当这些问题已经被集成电路基本解决，数字系统已经具有实用价值的时候，数码率太高的问题就显得突出了。信源编码的主要任务就是如何用比较简单的办法来降低数码率。可以预言，随着信源编码的进展，数字信号的应用必将更加广泛。

§ 1.2 信源编码和信道编码

上一节我们曾提到数码率太高是数字信号的一个严重缺点，信源编码的主要任务就是如何用比较简单的办法把数码率降低。

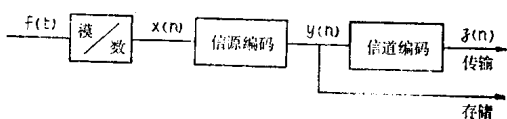


图 1·2 信源编码与信道编码

要解决这个问题，可以采用图1·2的办法。在模/数变换之后，通过信源编码把 $x(n)$ 的数码尽量压缩，使 $y(n)$ 的数码率小于、甚至远远小于 $x(n)$ 的数码率。在存储大量信号（如文件、图纸、数字语音、数据资料等）时，用经过压缩后的信号 $y(n)$ ，可以节省存储容量；但 $y(n)$ 的抗干扰能力低，不宜于直接用作传输。信道编码的主要目的就是增加信号的抗干扰能力，使之能应付信道的干扰。

图1·2只画出了一般情况。在实际应用中,往往根据具体情况而采用不同的办法。例如:信道容量有富裕,干扰也不太严重时可直接传送 $x(n)$;对于某些要求不高的数字电话,也可以不经信道编码,而用 $y(n)$ 作为传输信号;有时却又相反,虽然没有干扰,也不必传输,但仍要进行信道编码。例如为了可以从不同的要求查阅存储的资料,我们必须给这些资料编上特殊的号码。这种编号方法,原理上和信道编码是完全一样的。

信道编码之所以能增加抗干扰能力,不论它采用什么方法,归根到底都要增加数码。我们为了压缩数码,进行信源编码,结果丧失了抗干扰能力;为了提高抗干扰能力,进行信道编码,结果增加了数码。一减一增,何必多此一举?

让我们先举一个例子来说明为什么压缩数码会牺牲抗干扰能力。例如我们拾到一张纸条,上面写着:

“鸡蛋的蛋白质很丰富”。

我们很容易把缺少的笔画补上,写成:

“鸡蛋的蛋白质很丰富”。

这说明汉字具有“抗干扰”能力,即使受到“干扰”,残缺了一些,也可以恢复其笔划;但这也说明了汉字有“多余”的笔划,正是这种多余才使汉字能抗干扰。信源编码的所谓压缩数码,其实就是相当于把多余笔划去掉。当然,去掉得越多,就越经不起缺、漏。多余笔划虽可抗干扰,但往往效果不是很好的,例如:

“鸡蛋的蛋白质很丰富”

全句只鸡字缺了很少的一点点,但我们却仍无法知道原句的第一个字是鸡、是鸭还是鹅。信道编码相当于用更有效的办法,增加“多余”的笔划。

一般的信号都有大量“多余”,它可以抗干扰但效果不好,

所以要先把它去掉，然后用更有效的办法增加“多余”。这就是有信源、信道两次编码的原因。

上面提到“多余”时，不仅没有说明它有多少，甚至连什么是“多余”也是含糊不清的。可是信源编码和“多余”的关系非常密切，所以我们将在第二章中详细说明“多余”是什么及如何给“多余”定量等问题。至于信道编码则不属本书范围。

§ 1.3 信源编码的主要方法

什么是编码？我们将在§ 3.1节中详细解释，这里先介绍几个名词。

信源编码器的输入（见图1·2），一般指的是图1.1中的 $x(n)$ 。这里的 n 是离散化的时间，如果不考虑时间的话，我们就可以把它写成 x 。它是连续信号 $f(t)$ 经取样变成 $f(n)$ 再量化而得到的。如果采用8 bit量化，那么一共有 $2^8 = 256$ 个量化层，分别用1, 2, ..., 256去代表它们。再用 x_i 代表 x 的值是第 i 层， $i = 1, 2, \dots, 256$ 。因为这些层都是用8个二进符号写出来的，所以 x_i 也是由8个二进符号组成的）。 x （表示 x_1, x_2, \dots, x_{256} 中任意一个）经编码后得到的 y （见图1·2）还是一串二进符号，不过要求代表 y 所用的二进符号平均个数少于代表 x 的8。这就是所谓数码压缩，也就是信源编码的主要目的。

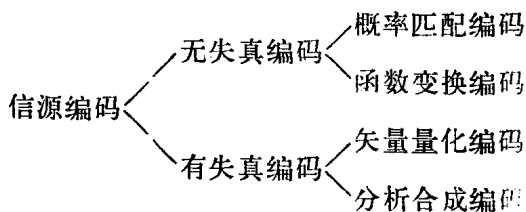
现在我们用 m 个 y ，即 y_1, y_2, \dots, y_m ，去代表 n 个 x ，即 x_1, x_2, \dots, x_n 。令

$$Y = \{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$$

Y 叫做代码，它是一个集合。 Y 的元素 y （即 y_1, y_2, \dots, y_m 中的任意一个）叫做码字。如果 $m < n$ ，那么不可能每一个 x 都有一

个不同的码字 y 与之对应，有些 x 将会没有对应的码字或者和另外的 x 共用一个码字。这样的编码就会产生失真，反之则有可能不产生失真。

信源编码的具体方法，种类繁多，不胜枚举；而且日新月异，层出不穷。不论从哪个角度去分类都会觉得不全面、不理想，可是为了便于叙述，总得分分类。下面我们从失真的角度将信源编码分为两大类：一类是无失真编码，即经编码解码后不会产生失真的编码；另一类是有失真编码，即容许产生一定量失真的编码。无失真常用的方法有概率匹配编码和函数变换编码；有失真常用的方法是矢量量化编码和分析合成编码。为了清楚起见，我们列成下表。



下面分别介绍它们的简单概念。

(1) 概率匹配编码

它的概念很简单：根据编码对象 x_1, x_2, \dots, x_n 的出现概率（即概率分布），分别给予不同长短的码字。出现概率越大，所给码字长度越短。这样一来，码字的平均长度就自然比较短了，代表码字的二进符号个数也就比较少了。所谓匹配，就是代码长度与概率分布相匹配的意思。如各码字的长度都是一样的，就叫等长代码，例如电传机的五位起止码就属这类。不难想象，等长代码只能和均匀概率分布匹配。虽然实际信号很少有这样的分布，但由于使用方便或者因为概率分布无法决定，

等长代码还是需要的。码字的长、短不一（叫做不等长代码）是匹配编码的必要手段，可是它使用不方便，编码、传输、译码、存储都不方便。

要进行匹配编码就得先知道信号的概率分布，一般确定概率分布的方法有两种：一种是认为它大体上符合某类数学模式，例如正态分布、指数分布等；另一种是根据需要编码的实际信号统计其概率分布。后者比较切合实际，编码效果也比较好。我们采用后者，它使本书免掉许多描述分布的数学公式。

匹配编码是信源编码中最基本又最重要的一种方法，第三章将从理论上加以分析研究。第四章则主要是它在文件传真方面的应用。

（2） 函数变换编码

信源编码使用的都是离散函数变换。用一个变换矩阵将一个数字序列变成另一个数字序列，叫做一维离散变换；用两个变换矩阵将一个数字矩阵变成另一个数字矩阵叫做二维离散变换。变换矩阵由某种离散的函数序列组成，常用的有沃尔什（Walsh）函数、黑尔（Haar）函数、余弦（cosine）函数等。变换矩阵用什么函数组成就叫什么变换。

二维变换后的矩阵往往能反映变换前的矩阵的某些重要特性，例如余弦和沃尔什变换能反映频率的成分及其变化，黑尔变换能反映突变的情况等。根据这些特性，编码时可以给矩阵的重要区域多分配些数码，不重要的区域则少给些，从而达到压缩数码的目的。

第五章将以图像编码为例，说明函数变换的方法。

(3) 矢量量化编码

矢量量化是最近才发展起来的一种编码技术，目前已显示出不少优越性。它既可用于语音编码，也可用于图像编码。矢量量化与声码器相结合的编码，能以150b/s（比特/秒）的数码率得到可懂的话音。矢量量化对图像的编码，将数码率压低到0.7bpp（图像编码的数码率，一般用每像素的平均二进制符号个数，即bpp表示），仍然可以得到失真不大的图像。这些都是其他编码方法不易办到的

矢量量化（Vector Quantization简称为VQ）实质上是将§ 1.1节提到的一维量化推广成K维量化。它的输入 x （见图1-3）是 K 个实数构成的矢量。为了送进计算机，这 K 个实数一般是用二进制写成的实数，它们可以是图像的灰度，语音的样值，声码器的参数等。

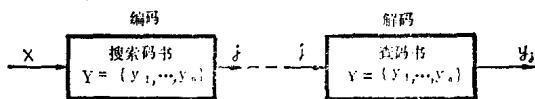


图 1-3 矢量量化示意图

矢量量化包括编码和解码两部分。编码在发送端，解码在接收端。发送端和接收端各有一本同样的码书 Y 。

$$Y = \{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

码书 Y 的元素 y 叫做码字，也叫代表矢量。当输入 x 时，编码器将 x 与码书中的各码字比较，看它和哪一个码字最接近，比方说 y_j ，因为接收端也有一本同样的码书，编码器只要输出码字的注脚号数 j 就行了。解码器可以根据 j 从码书中查出 y_j 。编码