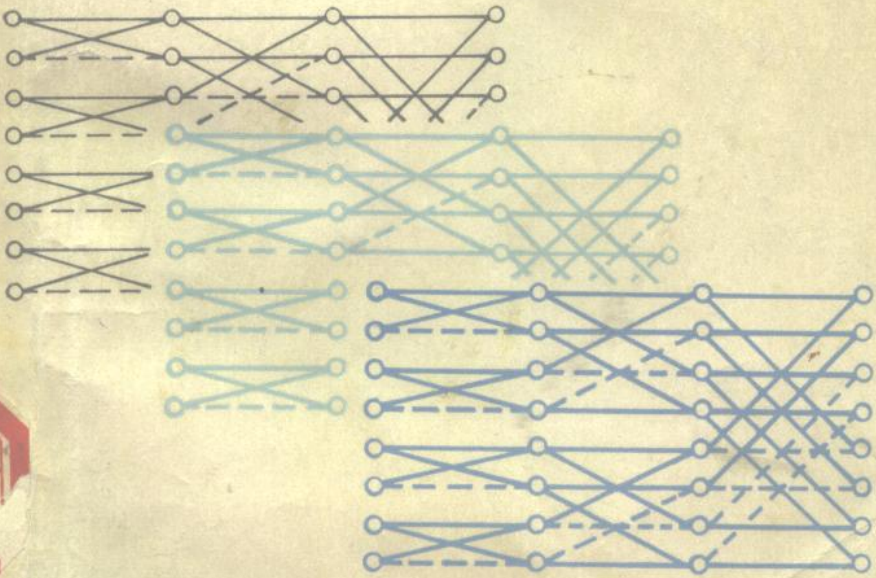
XINYUAN BIANMA

信源编码

张宏基 编著



人民邮电出版社

信 源 编 码

张 宏 基 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书主要叙述信源编码的一些基本定理，及其在文件传真、图像、话音编码的某些应用。

为了便于读者理解起见，书中以较大篇幅，介绍了有关定理和预备知识。

信 源 编 码

张宏基 编著

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32　　1980年1月第一版

印张：5 20/32 页数：90　　1980年1月天津第一次印刷

字数：126 千字　　印数：1——9,500册

统一书号：15045·总2340—无686

定价：0.54元

前　言

信源编码主要讨论的内容是：如何把模拟信号变成离散的代码，也就是通常所说的把模拟信号数字化。它是数字通信必不可少的编码。最近十几年，由于大规模集成电路和数字计算机的迅速发展，数字通信的应用日新月异，因此它的编码方法也层出不尽，种类繁多，不胜枚举。我们不仅没有必要，而且也不可能一一加以讨论。因此我们把信源编码归纳为三类：（1）匹配编码，（2）变换编码，包括预测变换和函数变换，（3）控制失真量的编码。希望通过文件传真、图象以及话音编码的讨论，达到给出信源编码梗概的目的。

自1949年仙农的信息论发表以来，至今30年，实践证明它是解决信源编码的有力工具，不少具体方法都因之而得到改进。本书力求利用信息论的一些基本概念，解释信源编码的主要原则，而不过分追求具体方法的讨论。这样安排，对原理的叙述比较方便，却难免带来一些片面性。书中主要内容，虽大都曾在各种课程分别试作教材使用，但一已管见，还远远谈不上成熟，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。下表将有助于了解本书结构：

预备知识——基本定理——
（第二章）　（第三章）

- 文件传真编码——着重匹配编码（第四章）
- 图像编码——着重变换编码（第五章）
- 话音编码——着重控制失真量编码（第六章）

作者

1979年1月于成都

目　录

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

$$f(t) = A\sin\omega t,\ A和\omega均为常数。$$

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。话音的幅度、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微秒测量一次话音的幅度，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 =…，－2，－1,0,1，2，…，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（P.C.M.）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。

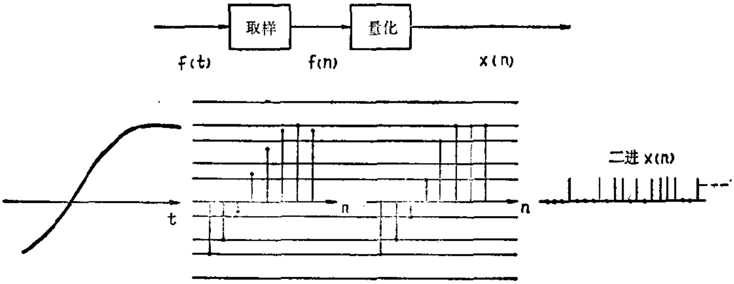


图 1·1 模-数转换示意图

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；最近十来年，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。从五十年代到七十年代，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。

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	0～5.5MHz	1.33MHz	8b	106.4Mb/S

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。

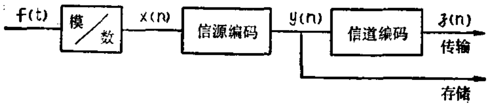


图 1·2　信源编码与信道编码

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、数字话音、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：

“鸟蛋的蛋白质很丰富”

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[注1]。

§1·3 信源编码的主要方法

大体上说，信源编码有三种主要的方法：一种叫做**概率匹配编码**（简称匹配编码）；一种叫做**变换编码**；还有一种叫做**识别编码**。下面分别介绍它们的简单概念。

（1） 匹配编码

它的概念很简单：根据编码对象的出现概率（即概率分布），分别给予不同长短的代码。出现概率越大的，所给代码长度越短。这样一来，代码的平均（概率平均）长度自然比较短，数码也就比较少。所谓匹配，就是代码长度与概率分布相匹配的意思。不难想像，如果各个代码的长度都是一样的，例如电传机的五位起止电码，那就谈不上与概率分布匹配的问题。所以代码的长、短不一（叫做不等长代码）是匹配编码的一种必要手段。可是不等长的代码，却往往不便于使用，它使传输、译码、存储都不方便。这是实际应用中应该解决的问题。

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：（1），假设它是一种大体上能代表信号概率分布的数学模式，例如正态分布，指数分布等；（2），根据实际信号，统计其概率分布。后者比较切合实际，而且可以免掉许多描述分布的数学公式，因此以后各章，我们都将采

注① 请参看王新梅编著：“纠错码浅说”，1976年版，人民邮电出版社

用这种办法。

匹配编码是信源编码中最基本又是最重要的一种方法。它的概念虽然简单，但还有必要作进一步的深入分析讨论，这将是第三章的主要内容。第四章实际上是匹配编码在文件传真的应用。

（2）**变换编码**

它先对信号进行变换，从一种信号（空间）变换为另一种信号（空间），然后针对变换后的信号进行编码。变换一般分为两大类：一类叫做预测变换；另一类叫做函数变换。

（a）**预测变换** 它根据信号的一些已知情况（比如信号幅度），预测信号即将发生的情况（幅度）。预测难免会有误差。现在，我们并不直接将信号编码，而是对预测的误差编码。如果预测比较准确，误差不大，那么预测变换就可以达到压缩数码的目的。预测应用的一个简单例子是文件传真。文件是白纸黑字的。前一个样是白，接着一个样也多半是白；前一个样是黑，接着的一个样也多半是黑。这就是说，条件概率

$$p(白/白)>p(黑/白)，p(黑/黑)>p(白/黑)。$$

因此，如果白已经发生，我们预测即将发生的是白；黑已经发生，我们预测即将发生的是黑。这样的预测将会大部分是对的，只要将小部分预测不对的编成码子就行了。

（b）**函数变换** 最熟悉的例子是付氏变换，它把一个离散的时间函数$x(n)$变成频率函数$X(\omega)$，编码针对$X(\omega)$而不是$x(n)$来进行。如果$X(\omega)$有某些特性可供利用，例如某些频率比较重要，或者某些频率的幅度比较大，那么我们就可以对某些频率多用些数码，另一些频率少用一些，使得总的数码减少一些。

付氏变换的运算次数太多，目前虽有快速付氏变换，能大大减少运算次数，但它需要复数运算，仍感使用不便。在离散函数变换中，常用的有余弦（Cosine）变换、沃尔什(Walsh)变换、黑尔(Haar)变换等，它们都有快速变换可供使用。

第五章将叙述这两类变换在图像编码中的应用。

（3）识别编码

设想我们现在希望把一页中文文件从甲地传到乙地。如果采用传真电报，即使是低标准，也要大约2×10^6比特的数码；如果改用“电报”，则只需大约 $1000\times9.5=9500$ 比特（一页1000字，每字9.5比特，见3.7节3.7—1式）。两者比较，传真的数码是“电报”的数码的200倍以上。仔细想想，传真之所以能改为“电报”，必须有一个识字的人，他把文件中的文字改为“电报”符号。如果我们有一部识字的机器，不是也可以用“电报”传输文件，从而大大压缩数码吗。这就是所谓识别编码的概念。当然，识别的用途非常广泛，不仅限于压缩数码。

识别编码目前主要用于印刷或打字机等有标准形状的文字、符号和数据的编码。至于手写体则因字体相差悬殊，机器识别的能力还没有达到令人满意的程度，尚处于试验阶段。不过，对于一些能规定写法的手写体，也已经能够实际使用。中文的单字很多，约略有 10000 个，很不容易规定一种大家都能遵守的写法，所以困难更大。

不言而喻，识别编码的关键在于如何识别。方法很多，有繁有简，下面举两种最简单的方法作为例子。一种叫做关联识别；另一种叫做逻辑识别。

关联识别　以数目字为例，它先定出0，1，2，…，9的样本，共10个。然后拿待识别的数字与这10个样本比较，

看它和哪一个的关联最强（即最象哪一个），而且和样本的差别不大于规定的数值，那么我们就认为它是哪一个数目字。现在的问题变成了如何制定样本和如何进行比较。图1·3是制定样本的一个例子。我们把标准形状的数目字分成m×k个小格子，m为行数，k为列数。图1·3把3字分成5×4个小格子。任一格子，如果它的黑色部分达到某一门限值，则用1代表它，否则用0代表。将第一行的末尾接着第二行的开头，一行接一行地写成一个序列，就是样本。用X^3代表3的样本，则根据图1·3，我们有

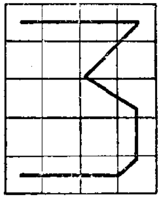


图 1·3　样本的例子

$$X^3 = \{ 11110010001100011111 \}$$

其他的样本X^0，X^1，X^2，X^4，…，X^9都用同一办法制定，即

$$X^j = \{ x_1^j, \cdots, x_n^j \}$$

其中，j＝0，1，…，9；x_1^j是1或0代表j这个样本的第1个格子是1还是0；x_n^j则代表最后的格子是1还是0；$n = m \times k$。

假设待识别的信号是

$$Y = \{ y_1, \cdots\cdots, y_n \},$$

其中，y_1，……，y_n都是0（白）或者1（黑）。现在我们拿Y与10个样本X^j比较。比较有好几种方法。其中常用的一种是把Y的序列与X^j的序列逐位进行模2加（记为⊕），即

$$x_i^j \oplus y_i = \begin{cases} 0，如果x_i^j与y_i两者相同 \\ 1，如果两者不相同 \end{cases}$$

在两个序列逐位模2加的结果中，1的个数就是不相同的格子数，叫做差别，记为D^j，