

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

# 实用地震资料处理

纳比尔.A.摩根著

2

石油工业出版社

P.1

11

石油工业出版社  
PDF

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

# 实用地震资料处理

纳比尔·A·摩根 著

陈俊生 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

反射地震资料处理的目的在于最大限度地压制噪声,以最大可能的分辨率把反射波显示在地震剖面上,这只有随着电子计算机在地震勘探中的应用才得以实现。本书则是在此基础上,比较全面地讲述了地震信号的分析,地震波速度的确定,一般处理程序及与之相应的相关、褶积、反褶积、数字频率滤波、滤波、偏移等处理手段。

这套丛书共分十册,可做为一般地球物理勘探及地质人员的培训教材,也可供有关院校师生参考。

Nabil A. Morgan

## SEISMIC DATA PROCESSING FOR THE PRACTICING EXPLORATIONIST

1980年1月

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

### 实 用 地 震 资 料 处 理

纳比尔·A·摩根 著

陈俊生 译

石油工业出版社出版

(北京安门内外馆东胡同79号)

轻工出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 7 $\frac{1}{2}$ 印张 184千字 印1—2,000

1985年7月北京第1版 1985年7月北京第1次印刷

书号: 15037·2538 定价: 1.40元

科技新书目: 102-180

## 出版说明

美国勘探地球物理学家协会 (S.E.G) 编写了一套培训地球物理勘探人员的教材。我们选择了其中十册翻译出版, 供我国物探技术人员和地质人员自学进修时参考。这套书统称为《美国勘探地球物理学家协会进修丛书》, 其内容有:

《实用地震数据采集技术》

《地球物理资料数字处理》

《实用地震资料处理》

《波动方程偏移引论》

《褶积模型》

《合成声测井和地层圈闭》

《双相介质中波的传播》

《重力勘探应用》

《井中重力测量的解释与应用》

《地球物理勘探遥感原理》

今后还要从这套培训教材的新书中挑选出版。!

# 目 录

一、引言	( 1 )
二、处理顺序	( 2 )
§1 引言	( 2 )
§2 处理顺序	( 2 )
三、信号分析述评	( 7 )
§1 系统	( 7 )
§2 离散时间信号	( 8 )
§3 傅里叶分析	( 10 )
§4 相关	( 15 )
§5 褶积	( 22 )
§6 假频	( 25 )
§7 迭加	( 26 )
四、数字频率滤波	( 28 )
§1 引言	( 28 )
§2 滤波器设计的因素	( 28 )
§3 最佳滤波器选择	( 31 )
§4 频率波数滤波	( 34 )
五、地震波速度	( 38 )
§1 引言	( 38 )
§2 速度的确定	( 38 )
§3 速度分析技术	( 45 )
§4 速度精度	( 49 )
六、静校正	( 55 )
§1 引言	( 55 )
§2 基准面静校正	( 55 )
§3 剩余静校正	( 60 )
七、反褶积	( 64 )
§1 引言	( 64 )
§2 反褶积的必要性	( 64 )
§3 反褶积滤波器设计	( 65 )
§4 时间和频率域反褶积	( 68 )
§5 信号和噪声的考虑	( 69 )
§6 多项式除法反褶积	( 71 )
§7 统计法反褶积	( 73 )
§8 反褶积的实际应用——最佳反褶积滤波器	( 74 )

# 目 录

八、 偏移.....	( 77 )
§1 引言.....	( 77 )
§2 偏移原理.....	( 78 )
§3 偏移技术.....	( 82 )
九、 特殊处理.....	( 94 )
§1 子波处理.....	( 94 )
§2 振幅处理.....	( 97 )
§3 频率处理.....	( 111 )

## 一、引言

电子计算机对地震勘探最重要的影响在于资料处理。当引入数字记录和高速数字计算机后，数字处理的全部潜力才得以发挥。

算术运算计算机执行加、减法运算。乘法和除法是通过加法与存储单元移位的结合完成的。时间校正只是简单地把实际记录的代表采样时间的数字移动到代表校正过的时间位置上。迭加则是通过把每一存储单元内的对应于相同时间的所有数字相加到输出记录上实现的。

反射地震资料处理的目的是，要得到地震剖面式的直观显示，他们表示出每个反射点地下界面的反射图形。这样做，可以解释出一条深至地质标准层或其以下的明确的地质剖面。

地震资料处理起源于数学家和电子工程师。他们在第二次世界大战期间和其后，曾致力于改善雷达、无线电、电话系统的信噪比。在这些应用中，输入端的信号波形是已知的，只需要在输出端从噪声中把他们提取出来。

地震勘探中的噪声，一般定义为无用信号。噪声被分成随机噪声或“环境”噪声，以及相干噪声或“规则”噪声两类。组成随机噪声的异常，它们的振幅和相位是随机分布的。另一方面，相干噪声呈现出规则的图案。多次反射、虚反射和气泡振荡便属于相干噪声。资料处理的目的是压制这些噪声。资料处理的另一个目的，是以最大可能的分辨率把反射波显示在地震剖面上。震源发出的子波在地层中传播时，它的振幅和频率发生畸变。反射子波的重叠增加了反射序列的模糊性。利用计算机作资料处理正是想要解决这种反射问题。另外，在地震资料处理中，计算机还完成许多其他的运算，诸如速度分析，相对振幅确定，频率分析和偏移等等。

## 二、处理顺序

### §1 引言

地震资料处理给解释人员提供的地震剖面，应服从为发现油气藏而进行的地质解释的需要。因此，在处理阶段就应该尽可能的消除随机噪声和相干噪声，并以尽可能高的分辨率显示出反射波来。

当处理资料时，勘探工作者还要努力分析那些有助于解释资料的有价值的参数，如地震波速度、振幅和波形等。

地震资料处理必须遵循正确的、始终如一的步骤。但这些步骤在不同的处理中心可能存在细节上和顺序上的差异，然而其输出基本上是相同的。

在处理顺序这一节里，所要讨论的是地震资料处理的一般顺序，对所提到的一些概念，尚不能进行详尽的阐述。在这节里，只作些简要的解释，更为详尽的讨论留在以后的章节里进行。

### §2 处理顺序

显然，处理工作从收到野外队的磁带开始。一同交来的还有操作员的报告，记有详细的测线和炮点号，野外观测系统，野外问题等等。通常还包括第二份报告，它记述了高程和计算出的用于这些资料的野外静校正值。野外静校正值是移动每一道以消除地形和近地表低速带影响所需的差异时间。

一般，把顺序分成三个阶段（图2.1）——预处理，处理分析和处理。预处理的目的是为处理分析编辑和准备数据。处理分析包括试验，借此选择在处理阶段使用的最佳参数。因此，处理仅是简单地应用所选择的参数。处理的产品是最终迭加剖面，为解释人员提供了一个可以借以进行有益推论的基础。

#### 1. 预处理

图2.2是一种可能的预处理步骤的方框图。接收到的野外记录磁带是多路编排格式的。多路编排是把不同道上的资料转换进一个单独道，以压缩的方式加以排列，这样便于存储。在野外是这样做的，先记录每个道的第一个采样值，接着是各道的第二个采样值，依次类推。在资料按道序读入之前，需要解编，这实质上是多路编排的反演。

可按顺序显示出各记录道，且对极性反转和大的猝发噪声进行编辑。有些程序允许用自动编辑代替人工编辑。

为了找出被压制的初至波，可以显示并观察典型记录。初至波压制是在为消除包含有噪声的记录前端的强振幅而进行编辑时完成的。这对设计可靠的反褶积滤波器，以及在以后的处理过程中避免迭加噪声是有用的。

对记录还需要检查，以便找出那些尚未被野外检波器、炮点组合等空间滤波消除掉的“漏网”的地滚波和面波。有一种称作 F-K 滤波的方法可以抑制这种噪声，在第四章再作详细介绍。



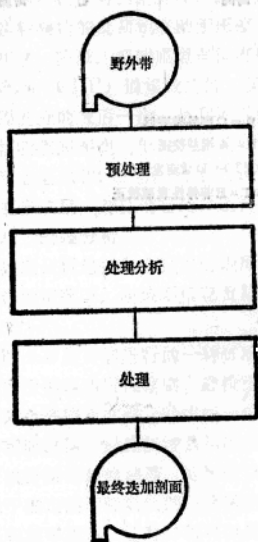


图 2.1 地震资料处理的主要步骤

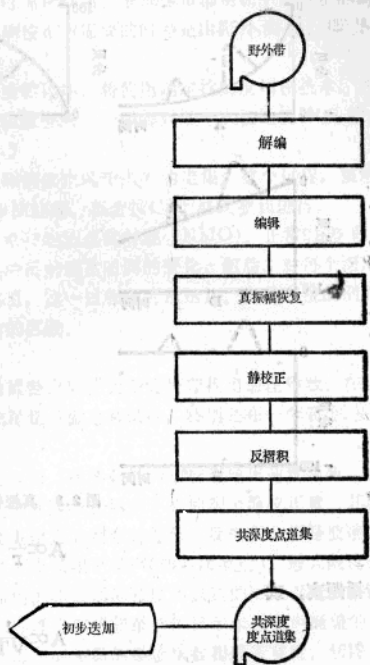


图 2.2 地震资料的预处理步骤

预处理的下一步是反射记录的真振幅恢复 (TAR)。此时，我们尽量保留仅由反射强度造成的相对振幅。记录时应用一种可恢复的增益，把增益恢复资料的巨大动态范围进行了压缩。这就要求对所加增益、球面发散和非弹性衰减的影响加以校正。

图 2.3A 是以分贝表示的振幅，即  $20 \log(\text{振幅})$  与检波点上反射时间的关系图。这个能量已经转换为电压，并通过了记录仪。实线表示由于球面发散和非弹性衰减引起的振幅衰减。如果接收到了反射，它将以一个异常能量出现，如图上虚线所示。由于仪器对这个输入的调制，所以输出是平的，如图 2.3C 示。增益  $G(t)$  的作用见图 2.3B，它与检波点的作用互为倒数。在磁带上的数据并不能表明振幅的变化，如图 2.3C 那样，没有显示出反射能量。

真振幅恢复的第一步是消除所施增益的影响，只需把磁带上的数据按分贝数减去增益  $G(t)$  即可。这就产生了一组与检波点处的数值随时间的分布相同的数值 (图 2.3A)。

在从零时到最大记录时间内，使用一个比例尺作显示，数值的范围显得太大了，这是我们在野外使用放大器增益的一个原因。对球面发散和非弹性衰减进行校正之后，数值的范围减小了。球面发散是解释由于波在离开震源向外传播时波前扩展造成的振幅衰减所用的术语。振幅衰减 (A) 与传播距离成反比，

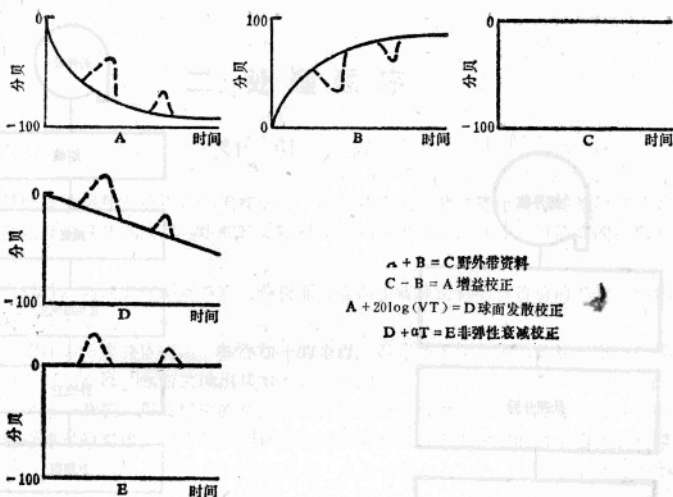


图 2.3 真振幅恢复

$$A \propto \frac{1}{r}$$

$r$  是传播距离, 或

$$A \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$$

$V$  是平均速度。由此可见, 对球面发散作校正, 要求把数据 (资料) 乘上时变函数  $VT$ , 或把以分贝为单位的  $VT$  与数据简单相加 (图 2.3D)。这项校正消除了大的陡坡, 并使下弯的曲线变成了一条有反射振幅叠合于其上的直线。反射能量仍然存在, 因为球面发散校正只是纯数学的, 并不包含对任何反射能量进行校正, 它仅仅补偿了背景中振幅的衰减。

如图 2.3D 示, 仍然有一随时间变化的线性偏离, 振幅变化是很大的。应用非弹性衰减校正可消除其影响。振幅的非弹性衰减是吸收的结果, 那是由于弹性能量因摩擦产生热耗散的缘故。试验和理论研究表明, 这种衰减是指数形式的频率与传播时间的一次函数, 即

$$A \propto e^{-\alpha T}$$

$\alpha$  是非弹性衰减系数:

$$\alpha = \pi f / QV$$

$Q$  是吸收系数,  $f$  是地震频率,  $V$  是地震波速度。由此可见, 我们可以用函数  $e^{\alpha T}$

乘以数据或简单地把数据加上以分贝为单位的  $\alpha T$  对非弹性衰减进行校正。这是真振幅恢复处理的最后一步。校正的结果使能量分布如图 2.3E 所示。振幅已经平衡了, 保留了相对反射振幅。球面发散校正所用的速度和非弹性衰减系数是根据地震资料或工区内前人的资料估算的。

静校正——在预处理阶段要应用静校正。静校正在于消除高程 风化层厚度或风化层速

度变化的影响。目的是确定在没有风化层或低速层物质、全部测量都是在平面（基准面）进行时应当观测到的反射波至时间。对每道作静校正所需要的时差是由野外测量、即井口观测，或小折射导出的。

选前反褶积——为了消除测得的震源子波的影响，将使用确定性的反褶积技术，如果可能，应尽量在资料仍是野外记录格式的初期阶段使用。一般都要做一次初始统计反褶积处理，这种初始的反褶积有助于压缩子波。

在这一阶段，把地震道选排成代表炮点和接收点的中点处的道集。这个过程，被称为抽共深度点（CDP）道集或选排。任何进一步的处理，都会按CDP格式顺利进行。

预处理的最后一步，是利用近似的速度函数校正正常时差（NMO），正常时差即随炮点、接收点间距离（炮检距）的变化而发生的反射到达时间的变化。然后，对每个深度点的共深度点道求和，产生一个经过迭加的输出道。这一过程称为预迭加。由此产生的剖面可认为是初步成果，并且用它选择进行处理分析的区段。

## 2. 处理分析

处理分析包括在选择出的观测区段内做试验，以便为最终处理找出最佳参数。在实际条件允许的情况下，应该不惜花费精力和时间尽量多做这种试验，特别是在一个新区更应如此。

图 2.4 是可能进行的一种试验分析的方框图。速度分析为动校正导出速度函数。速度函数也用于偏移和岩性鉴别。静校正分析在于估算静校正后剩下的剩余静校正量。其输出是一个剩余静校正文件，给出每一炮点和接收点位置的剩余时差值。反褶积分析是要确定最佳反褶积滤波器。最佳滤波器指的是能最大限度降低相干噪声（如多次反射），最大限度地提高反射波分辨率的滤波器。它们是以每一道所用的滤波器的长度和点数的形式确定的。滤波分析在于确定能增强资料的数字频率滤波器，即增强那些能最佳地显示未被噪声掩盖的反射波的某些频率通带。这种分析可以提供使用的每一滤波器的最佳次数和通带宽度。切除分析为的是减少远炮检距噪声，从而提高迭加剖面的信噪比。设计出了能把地震道切除一部分的各种切除函数。切除部分随炮检距增加而增大。然后把切除函数应用于共深度点道集，并把这些道迭加。通过对切除过的迭加剖面进行对比，可以找出资料的最佳切除函数。

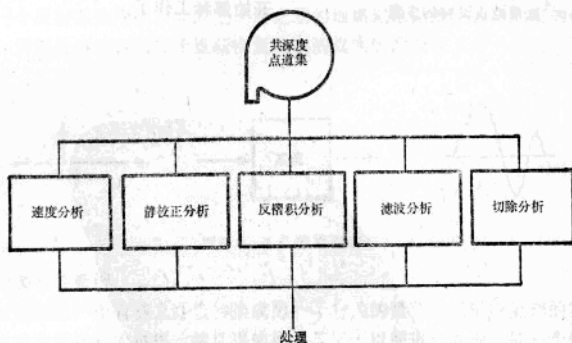


图 2.4 处理分析框图

### 3. 处理

一种可能的处理程序示于图2.5。在试验阶段估算出的所有参数都用于共深度点道集记录。

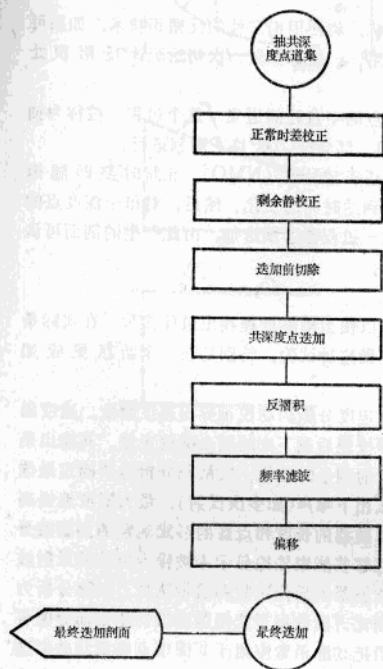


图2.5 处理地震资料的步骤

动校正量是根据所选择的速度函数计算出来的，并据以对诸道进行校正。对于没有取得速度资料的地震道，则根据已知速度函数的规律，用内插的办法进行校正。剩余静校正处理包括调用剩余炮点和接收点文件，并且移动一些道。用选择出的切除函数进行迭加前切除。这就按比例缩小或切除了远炮检距噪声。接着做共深度点迭加。这时把各共深度点道相加，其输出按信噪比的大小标定。如果信噪比较好，我们通常使用的比例因子等于  $1/n$ ， $n$  是相加的地震道的数目；即输出或迭加道是输入道的直接平均。当信噪比较差时，比例因子可以用  $1/\sqrt{n}$ 。不同的处理人员可能选用其他各种各样的比例因子。再往下是反褶积。这时应用的是处理分析中选定的最佳反褶积滤波器。频率滤波只是简单地滤除经滤波分析试验中得到的带通滤波。然后，资料显示成最终迭加剖面。最终迭加并不见得就是最后成果。勘探人员将对它进行分析，并可能决定是否对它做偏移处理。偏移是把反射点移向它们在地下正确位置的过程。偏移之后，最终迭加剖面要进行显示，并且记带。此时，解释人员就可以开始解释工作了。

### 三、信号分析述评

#### §1 系 统

##### 1. 脉冲

脉冲，通称为尖脉冲德耳塔函数或狄拉克函数。它是带宽接近零、高度接近无穷大时单位面积脉冲的极限。它仅仅在一个瞬间有值（图3.1）。

$$\delta(t) = \infty, \quad t=0$$

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

它具有单位能量

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

脉冲包含了同一能级的所有频率成分，并且具有零相位。在用数字形式时，脉冲仅在零时间具单位值，否则，无值。

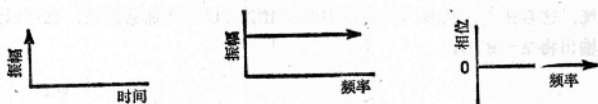


图3.1 脉冲的特征

##### 2. 脉冲响应

系统的脉冲响应是当输入为一个脉冲时，该系统的输出如图3.2。在反射地震勘探中，一个脉冲冲击一个系统，在此情况下是冲击地层。理想的条件下，我们应该记录地层的脉冲响应，它是一个反射系数序列。实际上，所记录的地震记录是地层脉冲响应的一种受到“污染”的变型。资料处理的目的在于重新恢复地层的真实脉冲响应。



图3.2 系统的脉冲响应

##### 3. 变换和线性系统

变换的过程是把一个有意义的量转换成另一个有关的量值，以适应处理的需要。例如，地面的振动被检波器转变成电压，然后再转换成数字，以便进行处理。另一个例子，一个数值，为了便于数学运算，可把它变换成对数形式。傅里叶变换是把时间域的函数变换成频率域的函数。

如图 3.3 示, 变换可视为是一对有关的量。线性系统的输出是以线性形式与输入相关联的: 没有包括二次项在内。如果  $r(t)$  是一个系统对一个输入函数  $e(t)$  的响应, 则

$$e_1(t) \rightarrow r_1(t)$$

和

$$e_2(t) \rightarrow r_2(t)$$

在线性系统里, 组合输入函数的总响应是单个输入、输出的线性组合 (称之为迭加原理),

$$e_1(t) + e_2(t) \rightarrow r_1(t) + r_2(t)$$

也可以写成

$$K_1 e_1(t) \rightarrow K_1 r_1(t)$$

$K_1$  是常数 (定比原理)。

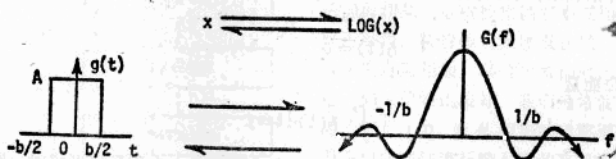


图 3.3 变换

如图 3.4 示, 处理的顺序并不影响一系列线性系统的输出。理想地是大多数地震处理均使用线性系统。这意味着, 例如, 对特定的地震道既可以在迭加前滤波, 也可以先迭加后滤波。它们的输出将是一致的。

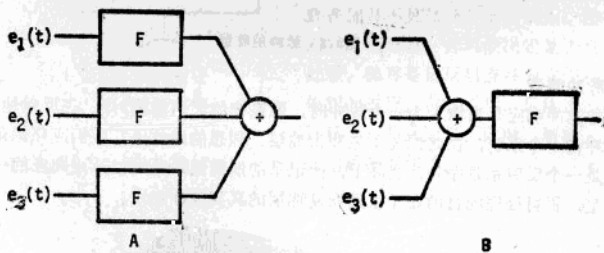


图 3.4 迭加原理 (假定 + 和 F 处理是线性的, 则输出 A 和 B 相同)

## §2 离散时间信号

信号, 可定义为传送信息的时间函数, 这里所说的信息通常是指物理系统的状态或特性。连续的时间信号, 在数学上用连续的时间函数来表示。然而, 离散的时间信号, 由离散时间函数定义。因此, 自变量仅仅取离散值, 即离散时间信号表示为时间序列。因变量, 即信号振幅, 也是离散的。

数字地震处理涉及的数字信号, 时间和振幅都是离散的。离散时间信号可以是对连续时间信号采样引起的, 也可以是直接由某些离散时间过程产生的。数字信号处理系统具有许多

引人注目的优点，例如，它们能够使用数字计算机以极大的适应性进行数据处理。使用它们能模仿模拟系统。更重要的是，用它可以实现模拟装置无法完成的信号变换。因此，当需要进行精巧处理时，信号的数学表示是最理想的。

在一个离散时间系统里，一个数列 $X$ ，其数列中的第 $n$ 个数表示为 $X(n)$ ，形式上可写成

$$X = \{X(n)\}, \quad -\infty < n < \infty$$

图3.5表示一些数列的例子。单位脉冲，即单位采样数列（如图3.5A示），可定义为

$$S(n) = 0, \quad n \neq 0$$

$$S(n) = 1, \quad n = 0$$

可以把单位阶跃数列 $u(n)$ （图3.5B）数学上定义为

$$u(n) = 1, \quad n \geq 0$$

$$= 0, \quad n < 0$$

一个余弦（原文为正弦——译注）数列如图3.5C示，取值形式为

$$A \cos(W_0 n + \phi)$$

如果对所有的 $n$ 值，都有  $X(n) = X(n+N)$ ，则数列  $X(n)$  是以  $N$  为周期的周期性数列。当实数  $2\pi/W_0$  是整数时，余弦数列的周期为  $2\pi/W_0$ 。参数  $W_0$  是余弦函数的频率， $\phi$  是相位。

功率数列定义为

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |X(n)|^2$$

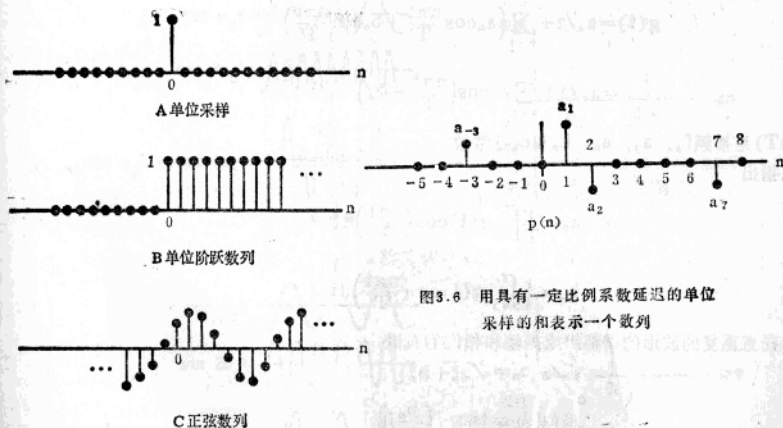


图3.6 用具有一定比例系数延迟的单位采样的和表示一个数列

图3.5 数列的例子

两个数列的积与和在计算机里是分别以逐个采样值的乘积与求和来执行的，

$$x \cdot y = \{x(n) \cdot y(n)\}$$

和

$$x + y = \{x(n) + y(n)\}$$

一个数列  $x$  与一比例因子  $\alpha$  相乘, 可写作

$$\alpha \cdot x = (\alpha \cdot x(n))$$

如果

$$x(n) = x(n - n_0)$$

则说数列  $x$  延迟 (时移) 的, 其中  $n_0$  是一个整数。

一般情况下, 把一个数列表示为一些具有一定比例系数的延迟的采样之和。如图 3.6 示, 数列  $P(n)$  可以表示为

$$P(n) = a_3 S(n+3) + a_1 S(n-1) + a_2 S(n-2) + a_7 S(n-7)$$

更一般的情况是, 一个任意的数列表示为

$$X(n) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} X(K) S(n-K)$$

### §3 傅里叶分析

傅里叶分析, 包括傅里叶级数和傅里叶积分。

#### 1. 傅里叶级数

不管如何复杂的任意周期函数, 都可以看作是正弦波 (或余弦波) 的相加。这些正弦或余弦波的频率是“基频”的倍数。那些频率是基频的整数倍的频率成分称为谐波。傅里叶级数用三角级数表示为

$$\begin{aligned} g(t) &= a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{n\pi t}{T} \right) \\ &= a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos \left( \frac{n\pi t}{T} - \phi_n \right) \end{aligned}$$

$1/(2T)$  是基频  $f_0$ ,  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  和  $c_n$  是常数。

可以指出

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T g(t) \cos \left( \frac{n\pi t}{T} \right) dt$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T g(t) \sin \left( \frac{n\pi t}{T} \right) dt$$

任意重复的波形的谱都组成振幅和相位的线谱

$$\text{振幅 } c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\text{相位 } \phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right)$$

图 3.7 是傅里叶级数的例子。图 3.7A 表示合成时间函数与它的周期性时间分量的关系。图 3.7B 描述了相应的振幅和相位谱。振幅谱和相位谱合在一起, 唯一地确定了它们的合成波形。反过来, 任何重复的波形都规定一对谱。

图 3.8 表示用余弦和正弦波逼近一个重复方波的过程:

$$g(t) = 0, \quad -T < t < -T/2$$



$$g(t) = A, \quad -T/2 < t < T/2$$

$$g(t) = 0, \quad T/2 < t < T$$

求傅里叶级数里的常数项，我们得到

$$a_n = \frac{2A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$$

$$a_0 = A$$

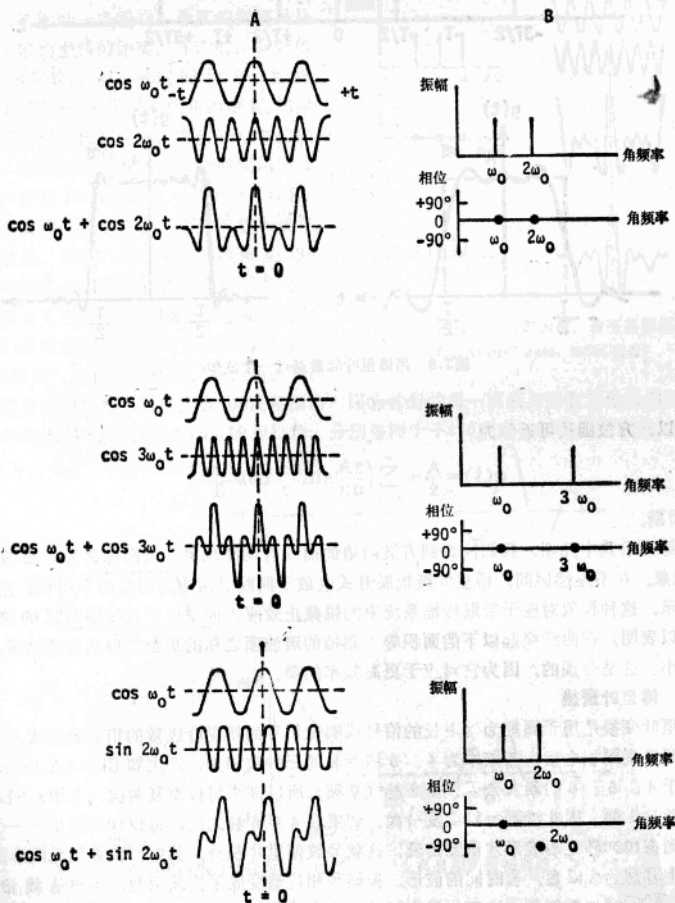


图3.7 波形的合成和它们相应的谱

(根据Anstey, 1966, 经SSC公司同意)