地球物理数据处理基础

〔美〕J.F.克利尔波特

石油工业出版社

地球物理数据处理基础

——附石油勘探上的应用

〔美〕 J·F·克利尔波特

陈 玉 陈乾元 刘则仁 周继康 译

甘章泉 程乾生 校订

石油工业出版社

全书共十一章。前七章，扼要地叙述了数据处理的基本原理和方法：变换、单边函数、谱因式分解、分辨率、矩阵、最小二乘法及其在波形上的应用等；后四章讲述了波动方程数据处理，并着重介绍了波动方程在处理石油地震勘探资料中的应用。

本书可供地震勘探资料研究人员及有关院校师生参考。

JON F. CLAERBOUT

FUNDAMENTALS OF GEOPHYSICAL DATA PROCESSING

With Applications to Petroleum Prospecting

地球物理数据处理基础

——附石油勘探上的应用

陈 玉 陈乾元 郑则仁 周继康 译

甘章泉 程乾生 校订

（根据原石油化学工业出版社纸型重印）

石油工业出版社出版

（北京安定门外外馆东后街甲36号）

北 京 印 刷 二 厂 排 版

大厂回族自治县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 11 3/8 印张 251千字 印1—2,900

1983年5月北京新1版 1983年5月北京第1次印刷

书号：15037·2423 定价：1.20元

目　　录

译 者 的 话

原书于1976年出版。这是一本供大学地球物理系毕业生及从事地球物理数据处理的技术人员阅读的教科书。

全书共有十一章。前七章，扼要地叙述了数据处理的基本原理和方法。后四章，讲述了波动方程数据处理，并着重介绍了波动方程在处理石油地震勘探资料中的应用。这本书在一定程度上反映了美国大学有关专业的教学水平和近几年来在数据处理方面的部分研究成果。每节后面都附有练习，有些题目对于引导读者进行科学研究有启发作用。

本书在写作上，偏重于概念的描述，而不强调定义的明确性。书中常常用简单的特例验证一些重要的定理，但不注意证明的严格性和形式上的完整性。这就要求读者在阅读中细心一些。

本书由石油化学工业部石油地球物理勘探局北京数字处理会战指挥部组织翻译。参加翻译的同志有：陈玉、刘则仁、陈乾元、周继康。全书经北京大学数学力学系甘章泉和程乾生同志做了校订。

原文中一些明显的错误，译者作了更正，删去了一些不必要的词句，有些地方加了译注，供读者参考。由于译者水平所限，译文中有错误或不妥之处，望同志们批评指正。

一九七七年九月

引　　言

地球物理数据处理就是利用计算机分析地球物理资料。地球物理学的一个主要任务是在不可能直接打井的地方，进行地震、电法、磁法和重力勘探，对地下作间接测量以尽可能地确定地壳内部的结构。系统地应用物理定律和统计原理，通过计算机可以完成这些勘探资料的某些解释任务。在勘测效率很低取得资料不多时，能做到将观测结果与古典物理方程的已知解析解（调整其中的参数）相匹配就很满意了。而今天，勘测效率较高，能取得大量关于地壳的资料，远比用解析解作模型所能提供的资料多得多。海上反射地震勘探就是这样，一般每月能采集上兆位的数据资料。

对这大量的数据，我们一方面要作统计整理，另一方面又要计算多个参数的地壳模型的理论解。从一九五三年就开始利用数字计算机统计分析地球物理资料了[1]。以后，地球物理计算又取得了很大的进展[2]，有关文章中，解决了在多个平行的平缓地层（每层的物理性质可以任意预定）模型中，计算地震面波的问题。这样，就可以利用完整的地震波形来拟合任意的成层模型（成层的意思是，物理性质只是一维坐标的函数，通常是深度的函数）。这种方法在最近二十年中，有了广泛的发展。现在对于成层地壳模型，无论源的分布如何，都容易计算其地震和电磁的理论结果。事实上，近来发表的数学物理方面的文献中，都是研究成层介质模型，几乎很少讨论均匀介质了。

地震记录常常含有几百个振动，而多数振动是不需要解释的。精细的方法已发展到利用地震记录制作与之相适合的成层介质模型，而其层参数和数据可以有随机的变化。一个惊人的发现是，复杂的难予说明的爆炸地震记录，完全可以预先制作出来。甚至天然地震记录，在震源范围不大时，也可以预先制作出来。于是，数据分析中引入随机变量，通常主要是使资料与成层模型拟合得好些。

与上述研究成层介质的问题不一样，当前地壳研究中提出的多数问题，已是在证实大陆漂移的机理，掌握、了解天然地震和寻找石油及矿产等方面了。因此，今天地球物理数据处理的新领域，在于使野外资料与二、三维不均匀的地壳模型相符合。而为了进行这些研究，需要熟悉一些传统的基础教材。

地球物理数据处理是从研究时间域采样的滤波理论和谱分析开始的。因果律原理对数学上的限制是非常重要的，即使复杂的地壳模型也符合这个原理，并且计算的稳定性常常取决于其程序对这个原理符合的严格程度。为了使读者了解最小二乘法的一般原理，要复习一下分辨率、统计量和矩阵等基本概念，并为此举了大量例子。最小二乘法是使资料与理论模型一致的主要手段，同时，高分辨技术（极大熵函数）和通俗一点的技术（L_1范数和线性规划）同样也是很重要的。

本书在介绍了地球物理数据处理的一些基本概念之后，还从简单到复杂地介绍了一些地壳模型。其中，在连续性、因果关系和能量守恒等一般概念的基础上（没有引用更多的物理概态），研究了层状介质中的多次反射平面波。知道了介质的特点，便可计算波；反之，可以从波的计算了解介质。

然后，介绍更为一般的成层介质的数学物理计算理论，并研究偏微分方程的有限差分近似的主要特性。

最后几章，介绍波的外推和偏微分方程数据处理[3~8,36,37]。目前，地球物理界以外的科学家和工程师，还不大了解这些内容。其基本思想与全息学相似。在地面观测波场，是为了制作地下散射的二维或三维模型，但主要问题和所用的技术与全息学有很大差别。速度的不均匀性、绕射、干涉和多次波是地震波传播中普遍存在的特性，如果仅仅靠目察是很容易造成误解的。

有关波动方程数据处理的材料，不久之后还要再写。这种新方法在石油勘探方面的应用，肯定会很快地发展，目前已出现了许多研究成果。因此，最后几节中，我们把重点放在其主要的和基本的内容上，而不涉及它应用的细节。

我们希望，总有一天，能利用天然地震波的地震记录，了解十公里以下的地壳特征，获得其第一幅图片。

第1章 变　换

数据分析的第一步是学习如何用数字计算机表示和处理波形。通常认为时间、空间是连续的，但是，为了用计算机进行分析，必须将它们离散化。离散化也叫作数字化或采样。将连续函数离散化，乍看起来，好象是坏事，似乎由于我们采用的数据不一定都是能用解析式表达的函数，所以才不得不离散化。有了一些使用采样函数的体验之后，便会发现，阐明许多数学概念，用采样时间比连续时间容易。例如，本章引入的 Z 变换概念，它和付里叶变换是一回事。不过，对 Z 变换，有初等代数的基础就可以了解，而付里叶变换则需要相当的微积分知识。

1-1　采样数据和 Z 变换

研究如图1-1所示的时间函数。

要用计算机对这种观测到的时间函数进行分析，必须用某种方法，把数罗列出来，近似地表示它。通用的方法是，按等间隔的时间点求取或观测 $b(t)$。在这个例子中，连续函数可以近似地用下列向量表示

$$b_t = (\cdots 0, 0, 1, 2, 0, -1, -1, 0, 0, \cdots)$$

可以看出，时间点取得越密，近似程度就越高。此函数除了用向量表示之外，还可以用一个多项式表示，多项式的系数取为 $b(t)$ 在相邻时间点的值。此例中为

$$B(Z) = 1 + 2Z + 0Z^2 - Z^3 - Z^4 \qquad (1\text{-}1\text{-}1)$$

这个多项式称为 b_t 的 Z 变换。此多项式中，Z 是什么意思呢？并不是说 Z 应取某个数值，而是单位延迟算子。例如，$ZB(Z)=Z+2Z^2-Z^4-Z^5$ 可以画成图1-2，它的波形与图1-1相同，只是时间上延迟了一个单位。

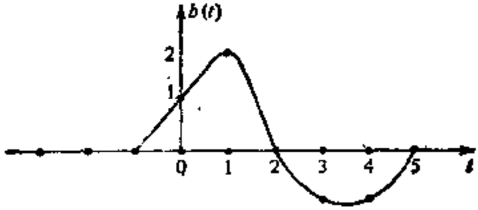

图 1-1

连续函数按相等时间间隔采样

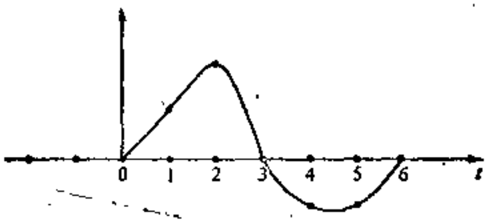

图 1-2

$ZB(Z)$ 的系数是将 $B(Z)$ 的系数后移一步得到的

我们知道，当 $B(Z)$ 乘以 Z^n 时，时间函数 b_t 就延迟了 n 个单位时间。延迟算子 Z 在分析波的时候非常重要，借助于它，①波可按指定的时间量，移动自己的位置。

延迟算子的另一个意义是，② 利用它可通过较简单的函数作成较复杂的函数。假如，$b(t)$ 代表声压力函数或一定距离处爆炸后观测到的地震记录，则 $b(t)$ 称为脉冲响应。若另一次爆炸是在第一次爆炸之后，$t=10$ 个单位时间，则其压力

函数 $y(t)$ 如图1-3所示。

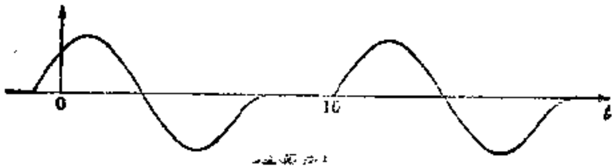

图 1-3

两次爆炸的脉冲响应

用 Z 变换来表示，为

$$Y(Z)=B(Z)+Z^{10}B(Z)$$

如果，第一次爆炸后，有一次爆聚（它与爆炸的区别仅在于记录的极性相反），强度为前一次的一半，则

$$Y(Z)=B(Z)-\frac{1}{2}Z^{10}B(Z)$$

若脉冲在时间上互相重叠〔$B(Z)$ 中 Z 的幂大于 10时，就是这种情况〕，则波形在重叠部分相加。假设它们仅是相加而无相互作用，则这种假设叫线性假设。这种线性假设在实际中通常都成立。在地震勘探中，我们看到，虽然地壳是一种由不同形状和种类的岩石组成的不均匀的凝合体，而当地震波（常指其振幅）在地壳中旅行时，它们互相不干扰，它们满足线性假设。非线性现象是大振幅的扰动引起的，而不是由于任何地质情况的复杂性。

现在，假定在 $t=0$ 时有一次爆炸，在 $t=1$ 时有一次 $\frac{1}{2}$ 强度的爆聚，在 $t=3$时又有一次强度为 $\frac{1}{4}$ 的爆炸。这一串事件构成“震源”的时间系列 $x_t=(1,-\frac{1}{2},0,\frac{1}{4})$。它的 Z 变换是

$$X(Z)=1-\frac{1}{2}Z+\frac{1}{4}Z^3$$

通过检波器观测这一串爆炸和爆裂得到的结果记为 y_t, y_t 的 Z 变换 $Y(Z)$ 为

$$Y(Z)=B(Z)-\frac{Z}{2}B(Z)+\frac{Z^3}{4}B(Z)$$

$$=(1-\frac{Z}{2}+\frac{Z^3}{4})B(Z)$$

$$=X(Z)B(Z) \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

这后一式子说明了线性系统理论的一个基本出发点：输出 $Y(Z)$ 可以表达为输入 $X(Z)$ 与脉冲响应 $B(Z)$ 的乘积。

线性系统的例子很多，大量的电子线路都是线性系统。将一个系统的输出再作为另一个系统的输入，就可形成复合线性系统。假如，有两个线性系统，分别由 $B(Z)$ 和 $C(Z)$ 表示。我们要问，如图 1-4 所示的组合而成的两个系统是不

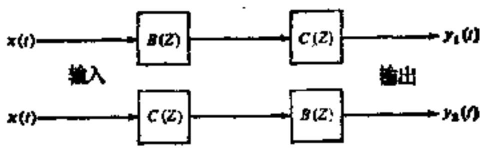

图 1-4

两个等效的滤波系统

是等效的？利用 Z 变换，可以断定这两个系统是等效的，因为多项式乘法是可交换的

$$Y_1(Z)=[X(Z)B(Z)]C(Z)=XBC \qquad (1\text{-}1\text{-}3)$$

$$Y_2(Z)=[X(Z)C(Z)]B(Z)=XCB=XBC \qquad (1\text{-}1\text{-}4)$$

下面讨论脉冲响应为 $B(Z)=2-Z-Z^2$ 的系统。这个

多项式可以作因式分解，$2-Z-Z^2=(2+Z)(1-Z)$，这样就得到如图 1-5 所示的三个等效系统。由于任何多项式都可

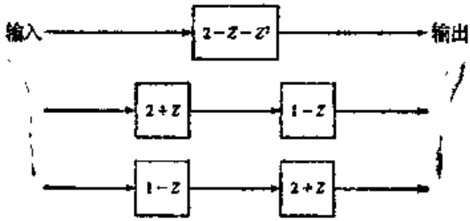

图 1-5

三个等效的滤波系统

作因式分解，因此，任何脉冲响应都可由双项滤波器作串联来模拟（Z 变换的脉冲响应对 Z 是线性的）。

两个 Z 变换相乘，在计算机中是怎样做的呢？滤波器 $2+Z$，在计算机中，是存好系数(2,1)，同样，$1-Z$ 表示为 $(1,-1)$。再看在一般情况下，是怎么计算的。对

$$X(Z)B(Z)=Y(Z) \tag{1-1-5}$$

$$(x_0+x_1Z+x_2Z^2+\cdots\cdots)(b_0+b_1Z+b_2Z^2)$$
$$=(y_0+y_1Z+y_2Z^2+\cdots\cdots) \tag{1-1-6}$$

等式两边 Z 的同幂项的系数相等，得

$$\begin{aligned}
y_0&=x_0b_0\\
y_1&=x_1b_0+x_0b_1\\
y_2&=x_2b_0+x_1b_1+x_0b_2\\
y_3&=x_3b_0+x_2b_1+x_1b_2\\
y_4&=x_4b_0+x_3b_1+x_2b_2
\end{aligned} \tag{1-1-7}$$

$$y_k=\sum_{i=0}^{2}x_{k-i}b_i \tag{1-1-8}$$

```
      DIMENSION X(LX),B(LB),Y(LY)
      LY = LX+LB-1
      DO 10 I=1,LY
10    Y(I) = 0.
      DO 20 I=1,LX
      DO 20 J=1,LB
20    Y(I+J-1) = Y(I+J-1) + X(I)*B(J)
```

图 1-6

褶积计算程序

(1-1-8)式称为褶积公式。那么，可以说，两多项式的积仍是一个多项式，它的系数用褶积求得。图1-6中列出了一段算褶积的Fortran程序，两端数据不足处充了零。读者要注意，$X(Z)$和$Y(Z)$不一定是严格意义下的多项式，它们可能同时包含Z的正、负幂，即可以是

$$X(Z)=\cdots\frac{x_{-2}}{Z^2}+\frac{x_{-1}}{Z}+x_0+x_1Z+\cdots$$

$$Y(Z)=\cdots\frac{y_{-2}}{Z^2}+\frac{y_{-1}}{Z}+y_0+y_1Z+\cdots \qquad (1-1-9)$$

$X(Z)$和$Y(Z)$中出现Z的负幂项仅仅表示，数据在$t=0$之前有定义。但在滤波器中，Z的负幂的作用就很不同了。从(1-1-8)可以看出，在时间k出现的输出y_k是当前的和过去的输入即$(x_i, i\leqslant k)$的线性组合。若滤波器$B(Z)$包含了b_{-1}/Z这样的项，则于时间k的输出y_k应是当前的和过去的输入及x_{k+1}的线性组合。x_{k+1}是一个在$t=k$时实际上还没有到达的输入。这种滤波器叫作物理上不可实现的滤波器，因为客观上，它并不能工作，对于还没有发生的事是不可能作出什么响应的。不过，在全部数据都已预先记录下来的情况下，物理上不可实现的滤波器有时可在计算机模拟中使用。

练　习

1. 设 $B(Z)=1+Z+Z^2+Z^3+Z^4$，试绘出 $B(Z)$ 的系数图，并绘$[B(Z)]^2$的系数图。

2. 若 $x_t=\cos\omega_0 t$（t 取整数值），$b_t=(b_0,b_1)$，$Y(Z)=X(Z)B(Z)$。记 $y_t=A\cos\omega_0 t+B\sin\omega_0 t$，问其中 A 和 B 等于什么？

$A=b_0+b_1\cos\omega_0$
$B=b_1\sin\omega_0$

3. 证明：当 $x_t=\cos\omega_0 t$，$b_t=(b_0,b_1\cdots,b_n)$时，y_t 总具有形式 $A\cos\omega_0 t+B\sin\omega_0 t$。

$y_t=\sum_{z=0}^{n}b_z x(t-z)=\sum b_z\cos\omega_0(t-z)=\left(\sum_{z=0}^{n}b_z\cos\omega_0 z\right)\cos\omega_0 t+\left(\sum_{z=0}^{n}b_z\sin\omega_0 z\right)\sin\omega_0 t$

1-2　Z 变换与付里叶变换

我们已经定义了 Z 变换是

$$B(Z)=\sum_t b_t Z^t \tag{1-2-1}$$

若用 $e^{i\omega}$ 替代 Z，便得“付里叶和”

$$B(Z)=B(e^{i\omega})=\sum_t b_t e^{i\omega t} \tag{1-2-2}$$

这与付里叶积分相象，对它作极限运算即得积分。从另一观点看，付里叶积分

$$B(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}b(t)e^{i\omega t}dt \tag{1-2-3}$$

当 $b(t)$ 不是时间的连续函数，而是通过 δ 函数（狄拉克 δ 函数）表示时

$$b(t)=\sum_k b_k\delta(t-k) \tag{1-2-4}$$

积分(1-2-3)便化为（1-2-2）了。以后，记 $B(\omega)=B(e^{i\omega})$。

上一节中，已知两个多项式相乘，就是对它们的系数作褶积。这一事实用付里叶变换的说法，则为：频率域的乘积对应于时间域的褶积。