

高等学校教学用书

地震勘探信号分析

董敏煜 编

石油大学出版社

38166

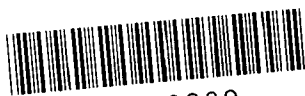


00282543

地震勘探信号分析

董敏煜 编

SY78/02



200299809



石油大学出版社

内 容 提 要

本书属于地球物理专业信号数字处理的基础课程教材, 主要包括: 连续信号富氏级数、富氏积分、连续型滤波器、离散信号、Z变换、离散富氏变换、快速富氏变换及离散型滤波器设计等。重点在离散系统的信号分析。

本书适用于勘查地球物理专业的本科生、研究生, 亦可供从事资料处理的技术人员参考。



地震勘探信号分析

董敏煜 编

*

石油大学出版社出版

山东省 东营市

石油大学印刷厂印刷

山东省新华书店发行

*

开本850×1168 1/32 印张15 字数388千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数: 1—3 000册

ISBN7—5636—0019—1/TE·08

定价: 3.54元

前 言

本书是石油大学编写的“地震勘探原理”、“地震勘探仪器”、“地震信号分析”、“地震勘探资料数字处理方法”等一套教材之一，是为勘查地球物理专业和矿场地球物理专业本科三年级学生开设“信号分析的数学方法”课程而编写的。全书共十五章，约30万字，讲授时数为80至100学时。

本书的主要内容是有关连续时间信号和离散时间信号分析的数学方法及其在滤波方面的应用，为学习“地震勘探资料数字处理方法”和“矿场地球物理资料数字处理方法”打下坚实的基础。

本书是编者在教学和实践工作的基础上写成的。李承楚副教授编写了第六章并帮助全书的编纂整理工作。全部稿件由牟永光教授主审，在此一并表示谢意。

由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者予以指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 连续信号与系统	3
§ 1-1 信号的定义	3
§ 1-2 信号的分类	4
§ 1-3 信号分量	9
§ 1-4 几种常用基本信号	12
§ 1-5 一种广义函数—— δ 函数	16
§ 1-6 系统	18
§ 1-7 线性时不变系统的两个重要性质	21
§ 1-8 系统的稳定性和因果性	25
习题 一至四	27
第二章 富氏级数和线谱	30
§ 2-1 富氏级数	30
§ 2-2 离散谱的概念	41
§ 2-3 离散谱	44
习题 五至六	48
第三章 富氏积分和连续谱	50
§ 3-1 富氏积分和富氏变换	50
§ 3-2 复时间函数	54
§ 3-3 奇偶性	59
§ 3-4 因果时间信号	63
§ 3-5 几种常用信号的频谱	65
习题 七至八	74
第四章 频谱定理	76

§ 4-1	线性	76
§ 4-2	对称	78
§ 4-3	尺度展缩	80
§ 4-4	时移	82
§ 4-5	频移	84
§ 4-6	时域微分	87
§ 4-7	时域积分	88
§ 4-8	频域微分	90
§ 4-9	共轭	91
§ 4-10	翻转	92
§ 4-11	时域褶积	92
§ 4-12	频域褶积	94
§ 4-13	乘积	94
§ 4-14	巴什瓦等式	95
习题 九至十二		96
第五章 富氏级数与富氏积分的关系		101
§ 5-1	连续谱抽样定理	101
§ 5-2	关于富氏积分定理的证明——吉布斯现象	104
§ 5-3	系统函数	108
习题 十三		110
第六章 相关分析		111
§ 6-1	相关系数	111
§ 6-2	相关函数	118
§ 6-3	相关函数和功率谱	120
§ 6-4	相关函数的性质	122
§ 6-5	随机干扰及其相关函数的特点	128
习题 十四		130
第七章 连续型滤波器		132
§ 7-1	滤波器的定义	132

§ 7-2	滤波器的类型	133
§ 7-3	理想振幅畸变滤波器	136
§ 7-4	理想振幅畸变滤波器存在的问题及其 克服方法	142
§ 7-5	任意振幅畸变滤波器	149
§ 7-6	几种常用的振幅畸变滤波器	155
§ 7-7	全通滤波器	156
§ 7-8	任意相位畸变滤波器	159
§ 7-9	相关滤波	167
习题 十五		169
第八章 拉普拉斯变换		170
§ 8-1	引言	170
§ 8-2	从富里叶变换到拉普拉斯变换	172
§ 8-3	拉氏变换与富氏变换的关系	175
§ 8-4	拉氏变换的收敛条件 (存在定理)	176
§ 8-5	几种常用信号的拉氏变换	178
§ 8-6	拉氏变换的一些基本定理	180
§ 8-7	拉普拉斯反变换	197
§ 8-8	零点与极点	207
§ 8-9	褶积积分	209
§ 8-10	双边拉氏变换——指数变换	212
§ 8-11	拉氏变换的应用	214
习题 十六至十九		223
第九章 离散时间信号和系统		227
§ 9-1	采样过程	227
§ 9-2	采样过程的数学描述	228
§ 9-3	理想采样信号的频谱	230
§ 9-4	采样定理	232
§ 9-5	采样的恢复及采样内插公式	235

§ 9-6	几种典型的时间序列	237
§ 9-7	离散时间系统	243
§ 9-8	线性移不变系统的两个重要性质	244
§ 9-9	线性移不变系统的因果性和稳定性	249
§ 9-10	差分方程	251
习题	二十至二十五	255
第十章	离散时间富氏变换与Z变换	260
§ 10-1	离散时间富氏变换	260
§ 10-2	Z变换	263
§ 10-3	Z反变换	274
§ 10-4	Z变换的性质	283
§ 10-5	系统函数	295
§ 10-6	FIR系统与IIR系统	310
习题	二十六至三十二	311
第十一章	离散富氏变换	318
§ 11-1	离散富氏级数及性质	318
§ 11-2	离散富氏变换(DFT)	326
§ 11-3	离散富氏变换的性质	331
§ 11-4	频率采样理论	346
§ 11-5	分段褶积法	351
习题	三十三至三十五	353
第十二章	数字滤波器的结构	357
§ 12-1	数字网络的表示法	357
§ 12-2	IIR数字网络的结构	361
§ 12-3	FIR数字网络的结构	369
§ 12-4	几种网络结构的比较	378
习题	三十六至三十八	383
第十三章	IIR滤波器的设计方法	388
§ 13-1	IIR滤波器设计的特点	388

§ 13-2	直接法	390
§ 13-3	脉冲响应不变法	393
§ 13-4	双线性变换法	400
§ 13-5	原型变换—高通、带通和带阻滤波器变换 的例子	604
习题	三十九至四十一	414
第十四章	FIR 滤波器的设计	417
§ 14-1	线性相位FIR 滤波器的特点	417
§ 14-2	窗口法	426
§ 14-3	频率采样法	436
习题	四十二至四十三	440
第十五章	快速富里叶变换 (FFT)	442
§ 15-1	DFT运算的特点	442
§ 15-2	按时间抽取	443
§ 15-3	按频率抽取	453
§ 15-4	IDFT 的快速算法 (IFFT)	458
§ 15-5	快速褶积	459
§ 15-6	任意基数的快速算法	460
§ 15-7	实序列运算	463
习题	四十四至四十六	466
参考书目		467

绪 论

信号分析是地震勘探数字处理技术的基础，它是近二十年来迅速发展起来的一门新兴学科。如果说，连续信号分析是一种经典理论的话，则数字信号处理就是经典理论的应用和发展。在现代数字计算机处理信息时代，后者具有更重要的实际意义。

众所周知，地震勘探可以看成是一个通信系统，地表或海水中的激发（炸药、电火花、空气枪或其它振动振源）是地壳表层介质的输入信号，它经过地层介质传播，在地层波阻抗界面上反射或折射，然后在地面或海水中接收，这就是地层介质的输出信号。它们共同组成一个系统，这个系统恰似一个通信系统，如图0-1所示。所不同的是，通信系统的目的是要消除干扰，恢复原信号，例如无线电传输。而地震勘探不仅要消除干扰，恢复原信号，而且要通过激励信号在地层中传播的性质来了解地层通道的情况。因此从某种意义上说，地震勘探比一般通信系统更为复杂。

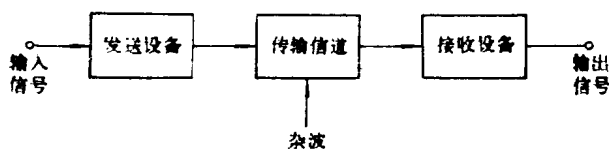


图0-1 通信系统方框图

地震勘探的发展大致经历了三个阶段：

①30至40年代末，光点照相记录仪。激发振动经地层传播后，在地面由检波器将机械振动变成电流（或电压）脉冲，用检流计的光点偏移记录在照相纸上。这种记录方法有几个缺点：

(1)不能记录很多道，一般24道；(2)抗干扰能力差，一般选择好滤波挡，把振动记录下来后不能再重新处理；(3)动态范围小，不能恢复出真振幅值；(4)只能用人工进行解释。

②50至60年代中，模拟磁带记录仪。振动激发后，经地层传播，并经检波器变成电流（或电压）信号，通过调频、调幅或调宽后，记录在磁带上。这时，磁带信号可以重放，记录不好，还可以重新处理。这一时期还出现了多次覆盖技术，大大提高了抗干扰能力。记录的动态范围增大，可以对记录做多种处理。这个时期的处理工作是用模拟计算机进行的。

③60年代中至现在，数字磁带地震仪。将电流（或电压）信号用二进制数码记录在磁带上，用数字计算机对信号进行处理。这是地震勘探的一次深刻革命。它大大提高了地震勘探的精度与效率。记录的动态范围可达 10^5 ，道数可达数千道，出现了多种处理手段，如滤波、反滤波、偏移成像等。并由二维向三维发展。

学习这门课程需要有基本的微积分和复变函数的预备知识。

第一章 连续信号与系统

§ 1-1 信号的定义

信号是用来传输消息的。一定的信号可以表达某种信息。我国古代长城上的烽火台，就是利用烽火来传递边疆警报的。这种光信号的传输，构成了最原始的光通信系统。许多古城里的钟鼓楼，是利用击鼓鸣金来报送时刻或传达命令，这是声信号的传输。以后出现了电报、电话，将点、划、空不同的组合作为代码，传输字母或数字，或将声信号（语言）转变为电信号沿导线传送，这是最初的电信号传输。再后又致力于研究用电磁波传送无线电信号，实现了无线电通讯、电视、电传等。在地震勘探中，则是利用爆炸、空气枪、电火花或重锤等作为震源，在地下介质中激发地震波（弹性波），这种波在地下介质中传播，经过地层界面（波阻抗界面或速度界面）的透射、反射或折射，在地面或井中用检波器接收，转换成电信号（模拟的或数字的）记录在磁带上，通过模拟或数字信号处理，以了解地壳的构造或岩性变化，达到寻找和勘探有用矿物或石油与天然气的目的。这里所用的是弹性波信号。

可见信号的类型是多种多样的，但在实际应用中常将各种物理量，如声波动、光强度、弹性波的位移或速度等转变为电信号，以利于传输或记录，然后再在接收端或经过处理后还原为原始的消息。因此，信号只是消息或信息传输的一种形式，而消息则是信号的具体内容。

由于电子计算机的快速发展，目前信号的处理工作，多用电子计算机完成。因此，本书主要阐述数字信号处理。为了了解数

字信号处理的原理和方法，首先需要了解连续信号处理的一般原理。

§ 1-2 信号的分类

信号可以分为两大类：一类是连续时间信号，一类是离散时间信号。

连续时间信号是指在连续时间范围内所定义的信号，即在所讨论的时间间隔内，对于任意时间（除若干不连续点之外）都有确定的振幅值，但信号的振幅值可以是连续值，也可以是离散值。当信号在时间上和振幅值上都取连续值时，称为模拟信号或连续信号。如正弦函数、阶跃函数、以及由传声器所产生的信号都属于模拟信号。“模拟”这个名词是由模拟计算演变来的。因此，模拟信号可以看作是连续时间信号的一个特例。实际上这两个名词可以通用，只有在与“数字”相提并论时，才用“模拟”这个名词。一般以采用“连续时间信号”为宜。

与连续时间信号相对应的是离散时间信号。离散时间信号是指只在某些不连续的规定瞬时给出函数值，在其它时间没有定义。即做为独立变量的时间变量被“量化”了（“量化”是指利用一组数值来表示变量的过程）。同样，离散时间信号的振幅值可以是连续值也可以是离散值。当离散时间信号的振幅值是连续值时，又称为抽样信号。抽样信号可以理解为在离散时间下对模拟信号的抽样。如果信号在时间上和振幅值上都是离散值，即在时间上和振幅值上都被量化了，则称为数字信号。数字信号总是可以用一序列的数来表示。而每个数是用“0”或“1”的有限个二进制数码来表示。“离散时间信号”和“数字信号”这两个名词经常通用。通常“离散时间”多被用于理论问题的讨论，而“数字”则习惯于被用来讨论硬件和软件设备问题。关于离散时间信号的一些理论也适用于数字信号，所以这两个名词无需严格

区分。本书将采用“连续(时间)信号”和“离散(时间)信号”这两个名词。

信号按其随时间变化的特点又可以分为周期信号, 概周期信号, 非周期信号和随机信号四类。在 seismic 勘探中所遇到的信号可以看成是这四种信号的组合。

1. 周期信号

所谓周期信号是指依一定的时间间隔周而复始, 且无始无终的信号。图 1-1 所示的就是几种简单的周期信号。

周期信号可定义为

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{任意整数} \quad (1-2-1)$$

满足上式关系的最小 T 值, 称为信号的周期。最常见的周期信号是正弦信号或余弦信号, 它们分别用下列形式的时变函数描述:

$$f(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad \left. \vphantom{f(t)} \right\} \quad (1-2-2)$$

或 $f(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$

式中 A ——振幅;

f_0 ——频率, 单位时间内的周期数, 赫兹;

φ ——相对于时间原点的初始相角, 弧度。频率 f_0 同周期 T (秒) 之间有下列关系式:

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (1-2-3)$$

由于正弦函数和余弦函数的波形相同, 只是初始相角相差 $\pi/2$, 所以一般总称为简谐函数或简谐振动, 在信号处理中又称为简谐信号。以后不加说明, “函数”、“振动”和“信号”在本书中通用。且正弦信号和余弦信号(简谐信号)有时又忽略其初始相角, 简称为正弦或余弦信号。

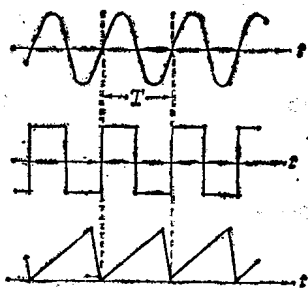


图1-1 周期信号

从式 (1-2-1) 可知, 只要给出周期信号在任一周期内的变化过程, 便可以知道这个信号在任何时刻的数值, 所以周期信号又可以在一个周期内定义, 记为

$$f(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1-2-4)$$

就传送消息来说, 周期信号是不经济的, 因为只有一个周期内信号起着传送消息的作用, 其它时间的信号都是在重复已知的消息。但是在分析无线电路或通信系统的工作特性时, 周期信号却是经常被采用的。它常常是信号分析的基本信号。

由于周期信号在全部时间内周而复始地出现, 且是无始无终的, 所以它对时间的无穷积分将等于无限大或不定值。但是, 它对时间的平均值却是存在的。信号的平均值定义为

$$\bar{f} = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{2a} \int_{-a}^a f(t) dt \quad (1-2-5)$$

由于周期信号在一个周期内的平均值应与其在全部时间内的平均值相等, 所以式 (1-2-5) 又可写为

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1-2-6)$$

对于周期信号, 有下述积分等式:

$$\int_0^T f(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (1-2-7)$$

其中 t_0 为任意实数, 参见图 1-2。因为 $f(t)$ 是以 T 为周期的周期

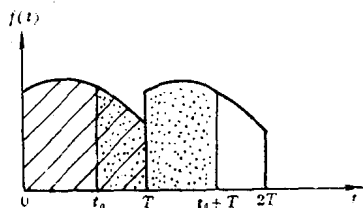


图1-2 以 T 为周期的函数 $f(t)$

函数, 所以, 从 0 到 T 的积分 (相当于图中打斜线部分的面积)

应当与从 t_0 到 $t_0 + T$ 的积分(相当于图中打点部份的面积)相等。
这可证明如下:

$$\text{因为} \quad \int_0^T f(t) dt = \int_0^{t_0} f(t) dt + \int_{t_0}^T f(t) dt$$

$$\text{而} \quad \int_0^{t_0} f(t) dt = \int_0^{t_0} f(t+T) dt$$

令 $s = t + T$, 则

$$\int_0^{t_0} f(t) dt = \int_T^{t_0+T} f(s) ds$$

所以

$$\int_0^T f(t) dt = \int_T^{t_0+T} f(t) dt + \int_{t_0}^T f(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

证毕。如果令 $t_0 = -T/2$, 则式 (1-2-6) 又可写成

$$\overline{f} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (1-2-8)$$

以后经常采用此积分式。

周期信号平方在一个周期内积分的平均值, 无论是电流或电压信号, 都代表在单位电阻上损耗的平均功率, 因此周期信号的平均功率记为

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt \quad (1-2-9)$$

平均功率又简称为功率。

2. 非周期信号——脉冲信号

非周期信号是指在时间上不具有周而复始且无始无终的信号。如果一个信号, 虽然在一定时间间隔上具有周而复始的性质, 但却不是无始无终的, 这种信号也称为非周期信号, 例如一个正弦信号段等, 所以非周期信号又称为脉冲信号或有限长信号。一个无限长信号, 如果不是周而复始的, 例如一个指数衰减信号, 也是非周期信号。图1-3示出了几种非周期信号——脉冲信

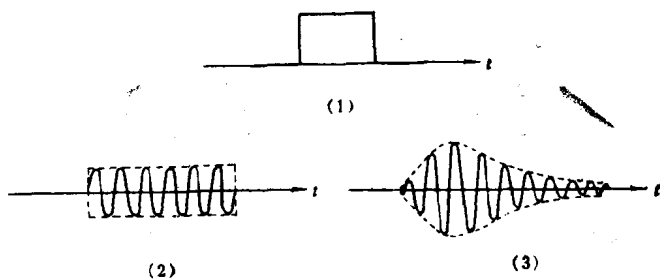


图1-3 非周期信号——脉冲信号

号的图形。一个脉冲信号平方的积分，无论是电压或电流信号，都代表加到一单位电阻上的能量。信号的能量总是大于零的，所以

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty \quad (1-2-10)$$

信号的能量有着重要的物理意义，因此在分析信号时，常用信号的平方来代替原信号。电压信号或电流信号的平方称为能量信号。

3. 概周期信号

有限个周期不成公倍数的周期信号之和，构成了概周期信号。严格地讲，概周期信号并不满足式(1-2-1)所定义的周期条件。例如，概周期信号

$$f(t) = \cos t + \cos \sqrt{2}t$$

是由两个不同频率的周期信号组成。由于我们不能严格地找到 $f(t)$ 的周期，所以 $f(t)$ 不能称为周期信号。若近似地取 $\sqrt{2} = 1.4$ ，那么 $f(t)$ 便可近似地看为周期等于 10π 的周期信号；若要求更准确一些，取 $\sqrt{2} = 1.41$ ，那么 $f(t)$ 的周期将从 10π 增加到 200π 。逐步提高准确程度，即增加 $\sqrt{2}$ 的近似数的位数， $f(t)$