

石家庄经济学院资助

物探数字信号分析与处理技术

WUTAN SHUZI XINHAO FENXI YU CHULI JISHU

王俊茹 编著

地 质 出 版 社

物探数字信号分析与处理技术

王俊茹 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书共分14章,主要讲述数字信号处理的基本概念、原理及方法。内容主要包括物探数字信号的分析、变换及处理技术,如频谱分析、信号的频谱及频谱定理、离散时间傅立叶变换与 Z 变换、快速傅立叶变换、相关分析;还包括了部分数字处理技术,如数字滤波处理、反滤波处理,主要介绍反 Q 滤波、同态反滤波、最小熵反滤波;递归滤波器的简单设计,声阻抗曲线技术、复数道分析技术,包括瞬时强度、瞬时频率和瞬时相位;层析成像技术,包括透射层析、反射层析及折射层析技术等。书中对涉及到的各种变换作了介绍,如傅立叶变化、 Z 变换、希尔伯特变换、拉冬变换、小波变换技术等。

本书可作为勘查技术与工程、地球信息科学与技术及地球物理勘查有关专业的本科生选用,也可作为地球物理勘探工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物探数字信号分析与处理技术/王俊茹编著. —北京:
地质出版社, 2009. 9
ISBN 978 - 7 - 116 - 06331 - 0

I. 物… II. 王… III. ①地球物理勘探-数字信号-信
号分析②地球物理勘探-数字信号-信号处理 IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 178401 号

责任编辑: 祁向雷 李丛蔚

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张: 10.25

字 数: 240 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2009 年 9 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 06331 - 0

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

目前,地球物理勘探技术在矿产资源、石油天然气勘查、工程勘查中的应用越来越广泛,为了突出有效信息,压制干扰,提取深部矿产生的弱信号,就需要对物探野外采集的数据进行必要的高分辨率数据处理。同时随着计算机的快速发展和广泛应用,以及数字技术的发展,都大大促进了数字信号处理的发展。为了适应信息科学的发展,满足勘查技术与工程专业、地球信息科学与技术及地球物理勘探专业信息处理基础课程的教学及科技人员的需要,特地编写此书,作为信号处理的基础教材,旨在深入地讨论数字信号处理的基本概念、原理和方法。

编著此书是在我从事地球物理勘探教学、科研 30 余年,并集我 20 余年教授物探数字信号处理课的经验而成。我于 20 世纪 80 年代曾主编《普通物探教程》,1997 年主编了《工程物探教程》,2002 年受河北省教育厅出版基金资助,编著了《工程与环境地震勘探技术》专著。

本书经石家庄经济学院教材建设委员会讨论审议通过,获石家庄经济学院资助公开出版。

80 年代以来一直主讲地球物理勘探本科专业物探数值计算及勘查技术与工程本科专业的数字信号处理课,目前还讲授地球信息科学与技术专业数字信号处理课。目前,还教授硕士研究生的物探数据处理课。由于以上原因,使编写本书的风格和内容阐述方面,通俗易懂,深入浅出,既适合教学,也适合自学。

本书深入讲述数字信号处理的基本概念、原理和方法,内容比较广泛。包括信号分析和处理,主要以地震信号分析为主,包括连续信号与系统,信号的频谱及频谱定理,离散时间信号和系统,离散傅立叶变换与 Z 变换,快速傅立叶变换,递归滤波器的设计,相关分析,小波变换技术等;另外针对本书是作为物探专业课的后续教材的特点,作为物探专业课的补充,还将数字滤波、反滤波、声阻抗曲线技术、复数道分析技术、地震层析技术作为本书物探数字处理的内容。

在编著本书的过程中,曾得到核工业部航测遥感中心张吉恒高工的大力支持,他参编了本书的第九章;石家庄经济学院矿产普查与勘探专业四位研究生曹朋军、焦海燕、于沙沙、蔡萍萍分别参与本书的第十三章、第十四章、第八章、第十一章的编写。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

王俊茹

2009 年 8 月 5 日

目 次

前 言

第一章 绪论	(1)
第二章 连续信号与系统	(5)
第一节 信号的基本概念	(5)
第二节 信号的特性	(6)
第三节 信号的分类	(6)
第四节 信号分量	(9)
第五节 几种常用的基本信号	(10)
第六节 单位脉冲函数—— δ 函数	(13)
第七节 连续时间系统	(14)
第八节 线性时不变系统的两个重要性质	(16)
第九节 系统的稳定性和因果性	(18)
第三章 信号的频谱及频谱定理	(19)
第一节 周期信号及其离散线谱	(19)
第二节 非周期信号及连续谱	(23)
第三节 频谱定理	(33)
第四节 傅氏级数与傅氏积分, 离散频谱与连续频谱	(39)
第四章 离散时间信号和系统	(41)
第一节 连续时间信号的采样	(41)
第二节 采样定理	(44)
第三节 采样信号的重构及内插公式	(45)
第四节 几种典型的时间序列及序列的运算	(46)
第五节 离散时间系统	(50)
第六节 线性移不变系统的两个重要性质	(50)
第七节 线性移不变系统的因果性和稳定性	(52)
第八节 常系数线性差分方程	(53)
第五章 离散时间傅氏变换与 Z 变换	(56)
第一节 离散时间傅氏变换	(56)

第二节	离散信号的 Z 变换	(58)
第三节	Z 变换的性质	(60)
第六章	离散傅立叶变换	(64)
第一节	离散傅立叶级数	(64)
第二节	离散傅立叶变换	(66)
第三节	离散傅氏变换的性质	(68)
第七章	快速傅立叶变换	(77)
第一节	快速傅立叶变换	(77)
第二节	基数为 2 的 FFT 算法	(83)
第三节	实序列的 FFT 算法	(89)
第四节	快速褶积	(93)
第八章	相关分析	(95)
第一节	相关函数, 相关与褶积	(95)
第二节	相关函数的性质	(97)
第三节	多道相关	(100)
第四节	相关滤波	(102)
第九章	数字滤波	(104)
第一节	数字滤波概述	(104)
第二节	频率域快速数字滤波方法	(108)
第三节	时间域上的快速数字滤波方法——递归滤波	(113)
第十章	反滤波处理技术	(121)
第一节	反 Q 滤波	(121)
第二节	同态反滤波	(124)
第三节	最小熵反滤波	(129)
第十一章	声阻抗曲线技术	(133)
第一节	声阻抗曲线技术的概念	(133)
第二节	声阻抗曲线技术的基本原理	(134)
第三节	声阻抗曲线技术的资料处理方法	(134)
第十二章	复数道分析技术	(136)
第一节	复数道分析原理	(136)
第二节	离散的希尔伯特变换	(138)
第三节	复数道特征参数的计算和分析	(139)
第四节	高分辨率地震特征参数的计算和应用	(140)

第十三章 地震层析技术 (143)

 第一节 层析成像的理论基础 (143)

 第二节 地震透射层析成像 (146)

 第三节 地震反射层析成像 (149)

 第四节 地震折射层析成像 (152)

第十四章 小波变换技术简介 (154)

 第一节 连续小波变换 (154)

 第二节 离散小波变换与应用 (155)

参考文献 (157)

第一章 绪 论

1. 信号分析的基本概念

信号分析是物探数据处理技术的基础。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。现代通信与互联网的迅速崛起,构筑了现代信息高速公路,使我们进入高度信息化、数字化的时代。因此,大量的数据与信号需要及时传输并进行有效处理,滤掉干扰以提取蕴涵在数据与信号中的有效信息。物探数字信号处理就是在信号分析的基础上,通过数字的方式,研究如何正确而快捷地处理信号,最大限度地压制干扰、以提取有用的地球物理场信息,为寻找矿产资源及解决工程地质问题服务的理论知识。对于地球物理勘查专业,数字信号处理是地震勘探、重力勘探、磁法勘探、电法勘探及放射性勘探数字处理的基础和必备知识。

例如,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、空气枪或其他振动振源)是地壳表层介质的输入信号,它经过地层介质的传播,在地层波阻抗界面上反射或折射,然后在地面或海水中被接收,这就是地层介质的输出信号。它们共同组成了一个系统,这个系统恰似一个通信系统。所不同的是,通信系统的目的是要消除干扰,恢复原信号;而地震勘探不仅要消除干扰,恢复原信号,还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。

地震勘探的发展大致经历了三个阶段:①光点照相记录阶段。②模拟磁带记录阶段。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。磁带信号可以重放,如果记录不理想可以重新处理。这阶段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。③20世纪60年代中期至现在,进入数字磁带记录阶段。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记录与处理。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。此阶段记录的动态范围可达 10^7 倍,道数可达数千道甚至上万道,出现了多种处理手段,如滤波、反滤波、偏移成像、小波变换等。

不仅地震勘探如此,其他物探仪器和记录方式也都进入了数字化时代。野外采集的数据可以直接进行简单处理,同时也可以传输至计算机进行处理,这就要求我们熟悉计算机处理技术,掌握数字信号分析的理论和方法,提高物探资料数据处理的技术和水平。

2. 数字信号处理技术

数字信号处理就是通过计算机对离散数字所表示的序列进行有效处理。归纳起来,数字信号处理的研究范畴大致可归纳为以下两个主要方面:

(1)滤除数字记录中与有用信号干涉叠加在一起的噪声或干扰,增强有用信号的能量,这就是数字滤波。如地震勘探中的频率滤波,就是增强信号中的有用分量,滤除干扰成分,提取有用信息。

(2) 各类转换算法。分离两个或多个依照某种方式组合在一起的信号, 突出有用信息, 便于对它们进行分析和识别。如用重、磁勘探中的导数换算分离叠加异常; 用位场延拓突出区域或局部异常; 用分量换算消除正常场影响; 用多个变量对异常进行综合解释等。

自 17 世纪发明微积分以来, 数字信号处理技术就用连续变量函数和微分方程来建立各种表示物理现象的模型。20 世纪的内插方法等一些经典数值分析技术, 为数字信号处理奠定了理论基础。同样在 18 世纪, 拉普拉斯所发展的 Z 变换为数字信号处理奠定了数学基础。

20 世纪 60 年代中期, 渐渐开始出现了较为定型的数字信号处理理论。当时人们已经看到了集成电路工艺的发展潜力, 并相信以数字元件构成较完善的信号处理系统是完全可以实现的。数字信号处理的重大进展之一, 应该是由库里图基 1965 年发表的快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transforms), 它使数字信号处理从理论到应用发生了重大转折。实际在此之前, 人们已经掌握了利用计算机进行谱分析的原理, 但由于计算所需的时间太长, 实际应用起来有许多困难, 而巧妙的快速傅立叶变换使计算速度提高了两个数量级。

3. 模拟信号数字化处理的过程

首先将模拟信号转换为数字信号, 然后利用数字方法进行处理, 最终再还原成模拟信号, 具体见下图所示:

输入 $x_a(t)$ → 前置滤波器 → A/D 转换器 → $x(n)$ → 离散时间系统 → $y(n)$ → D/A 转换器 → 重构模拟信号 → $y_a(t)$ 输出

该过程是一个典型数字信号处理系统。 $x_a(t)$ 为输入模拟信号, 进入前置滤波器的作用是将输入信号中高于某一频率成分的分量进行滤除, 防止信号出现假频。然后进入模拟-数字转换器, 以一定间隔进行采样, 采样后的信号称为离散时间信号, 它仅仅表示在一些离散时间点上的值, 采样的构成就是对模拟信号的时间进行量化的过程。接着在 A/D 转换器的保持电路中将采样信号变成数字信号 (一般采用有限位二进制码), 这样, 所能表示的信号幅度就受到一定限制。例如 3 位码, 只能表示 $2^3 (=8)$ 种不同的信号幅度 (状态), 并称这些幅度为量化电平。当离散时间信号幅度与量化电平不相同, 就要以最接近的一个量化电平来近似它。所以, 经过 A/D 转换器后, 不仅时间而且信号幅度都被量化了, 这种信号就是数字信号。

数字信号是一些离散数的序列。每个数都用有限位二进制数码来表示, 用 $x(n)$ 表示数字信号序列。接下来, 让 $x(n)$ 通过数字信号处理系统的核心部分, 即数字信号处理器。按照预先设计的要求, 用处理器对数字信号序列 $x(n)$ 进行加工、处理, 得到所希望的输出数字信号 $y(n)$ 。随后, 再让 $y(n)$ 通过数字-模拟转换器, 将数字序列反过来转换成模拟信号, 这些信号在时间点上的幅度应该等于序列 $y(n)$ 中相应序号所代表的数值大小。最后还需要经过一个模拟滤波器, 以滤除掉不必要的高频分量, 平滑成所需的模拟输出信号 $y_a(t)$ 。上述就是一个典型的数字信号处理系统的工作过程。

4. 数字信号处理的研究领域

数字信号处理的研究范围, 离散时间线性时 (移) 不变系统 (Linear Time Invariant System) 理论和离散傅立叶变换 (DFT) 是数字信号处理领域的理论基础。而数字滤波和数字频谱分析是数字信号处理的两个最基本的分支。

(1) 数字滤波。数字滤波可划分为无限长单位冲激响应 (IIR) 数字滤波器和有限长

单位冲激响应（FIR）数字滤波器两部分，具体包括它的数学逼近问题、综合分析问题（滤波器结构、运算字长的选择）以及具体的硬件或计算机软件的实现问题等。

（2）频谱分析。频谱分析包括：确定型信号的频谱分析，主要采用离散傅立叶变换（DFT）方法来进行分析；随机信号的频谱分析，利用现代频谱分析方法，信号建模的谱分析。

（3）二维和多维信号处理。应是最新发展的领域；现在许多图像处理的应用问题都需要用到二维信号处理技术。如视频编码、医学图像、航空摄影的增强与分析、卫星气象照片的分析，甚至从月球和深层空间探测来的视频传输信号的增强等都属于这一类情况。同样，在航空重力、磁测、伽马能谱测量、地震勘探和核试验监测等方面都需要分析多维数据，都要用到多维信号处理技术。

（4）信号建模的谱分析。基于离散傅立叶变换和信号建模的谱分析也属于数字信号处理范畴，内容很多，但其基本概念和理论还是与离散傅立叶变换的应用有关。此外，还有各种频谱分析方法，也都是基于特定的信号模型。例如，最大熵谱分析方法（Maximum Entropy Method）是以离散信号处理的基本原理为基础的。信号建模在数据压缩和编码中也起着重要的作用，这些方法基本上是用差分方程来描述的。

小波变换和自适应信号处理都是非常重要的前缘论题。小波分析（Wavelet Analysis）作为一种强有力的信号分析工具，是 Morlet 于 20 世纪 80 年代初在分析地球物理信号时提出来的，它是泛函分析、傅立叶分析、样条理论、调和分析、数值分析等多个学科相互交叉的结晶。目前，小波分析是信号处理中的研究热点，它不仅在理论上已取得了许多突破性的进展，而且也在语音信号处理、图像分析、地震信号分析、数据压缩等领域中得到了广泛的应用。小波分析是一种多尺度的信号分析方法，是分析非平稳信号的有力工具。它克服了短时傅立叶变换固定分辨率的弱点，既可分析信号的概况，又可分析信号的细节。

自适应滤波（Adaptive Filtering）代表一种特殊的时变系统，且在某种意义上是非线性的系统。该类系统具有广泛的应用，而且对它们的分析与设计已形成了一套很有效的技术。同样，这些技术也都是以离散时间信号处理的基本原理为基础。

5. 数字信号处理的重要特点

数字信号处理系统之所以备受青睐，得到了越来越广泛的应用，是因为该系统具有适应性高、可靠性高、集成性高、精确度高、性能指标高、具时分复用性，可进行二维或多维处理等特点。

可靠性高：数字系统只有两个信号电平，所以受周围环境的温度以及噪声的影响就会较小。而模拟系统则不同，由于各元器件都有一定的温度系数，而且电平是连续变化的，所以易受温度、噪声、电磁感应等因素的影响。

集成性高：众所周知，数字部件有高度规范性，可以大规模集成生产，产品的成品率高。特别是低频信号，例如地震波分析，需要过滤几赫兹到几十赫兹的信号，超低频大地电磁测量也是如此。如果用模拟网络处理时，电感器、电容器的数值、体积和重量都非常大，性能也达不到要求。

精确度高：由模拟滤波器构成的模拟网络中，其精确度由元器件决定。模拟元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上，而数字系统只要 14 位字长的存储器就可以达到精度要求。

性能指标高：例如对信号进行频谱分析，模拟频谱仪在频率低端只能分析到 10 Hz 以

上的频率，且难于做到高分辨率。但在数字频谱分析中，已经能做到 10^{-3}Hz 的谱分析。在有限长冲激响应数字滤波器中，可以做到具有准确的线性相位，这在模拟系统中是很难达到的。

时分复用性：是指利用数字信号处理器可以同时处理几个通道的信号，如地震勘探。它的框图见图 1-1。由于某一通道信号的相邻两采样值之间存在着一定的空隙时间，因而可以在同步器的控制下，在此时间空隙中输入其他通道的信号。所有这些通路的信号都利用同一个信号处理器，后者在同步器的控制下，算完一个通道信号后，再算另一个通道的信号。这样，处理器运算速度越高，能处理的通道数目也就越多。

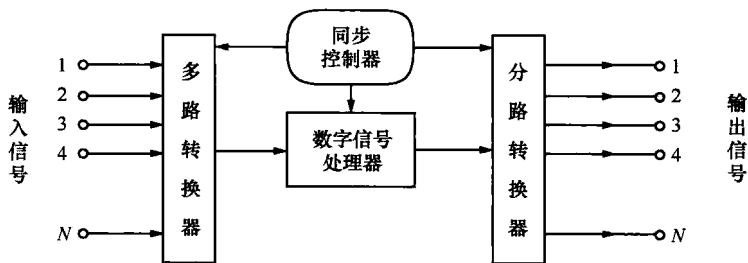


图 1-1 时分多路复用数字信号处理系统

二维与多维处理：利用庞大的存储单元，可以存储一帧或数帧图像的信号，实现二维甚至多维信号的处理，包括二维或多维滤波、二维及多维谱分析等。

数字信号处理系统也有其局限性。例如，数字系统的速度还不是非常高；A/D 转换器、硬件的速度只在几十兆赫以下，不能处理很高频率的信号；系统比较复杂，价格昂贵。

数字信号处理的显著优点，使其应用的领域日益扩大。目前，数字信号处理已在地震、声学工程、雷达、通信、语音、图像处理、地球物理勘探等领域得到广泛的应用。同时，在对信号进行数据处理时，若有严格的时间限制（如地球物理数据处理、图像处理等），可以先把数据记录下来，然后用大型计算机进行非实时处理。这样可以提高处理效率，降低成本。另外数字信号处理还可用于设计和模拟，如在电磁波采集器件设计中，就要用到快速傅立叶变换技术；在实施一个系统之前，可以用计算机进行模拟，验证其正确性等。还可以对信号进行实时处理，目前对音频信号已实现实时处理。

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。本书主要阐述数字信号处理的原理和方法。为了了解该内容，首先需要了解连续信号处理的一般原理。

第二章 连续信号与系统

第一节 信号的基本概念

信号是用来传输信息的，是信息的载体，是反映信息的物理量。一定的信号可以表达某种信息。如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；以后出现的电报、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，实现了无线电通信、电视、电传等。

在地震勘探中，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，在地面或井中被检波器接收，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，可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、天然气的目的。这里所用的是弹性波信号。

信号的类型多种多样，这些信号有的是相关的，有的是独立的，各有其不同的性质。但是信号都有一个共同的表现形式，即都是时间的函数。若将物理量与时间的变化关系描绘成图形，就是所谓的信号波形。信号只是消息或信息传输的一种形式，而信息则是信号的具体内容。因此我们所提取的地层介质的有效信息就寄寓在变化的波形之中。

图 2-1-1 就是一个实测的地震信号波形。该波形反映出两个反射层的反射。它将地面的振动信号通过检波器转换为电信号后，传输到地震仪的记录系统中。由于电信号具有更便于测量、传输、转换和处理等优点，因此，在地球物理勘探的实际数据采集中，均是通过专门仪器将非电信号转换为电信号进行传输。例如地震勘探的检波器就是将振动信号转换为电信号进行传输；地球物理勘探的瞬变电磁测量、探地雷达测量、质子磁力仪、数字重力仪，放射性勘探仪器等，也均是转换为电信号记录下来，并在接收端或经过处理后

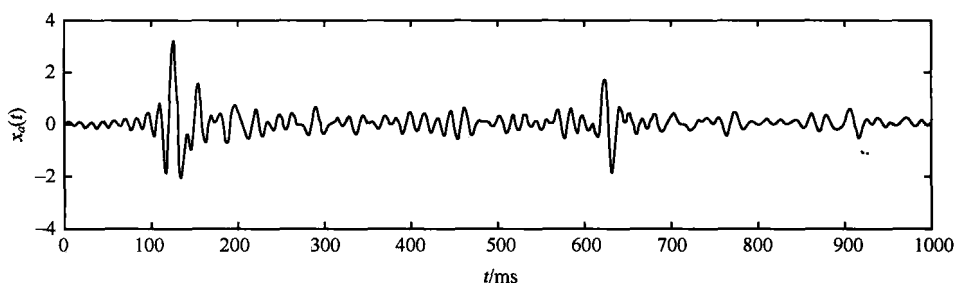


图 2-1-1 地震信号波形图

还原为原始的信息。将原始的信息结合地质资料进行分析研究,解释推断出地下岩土介质的性质和资源环境等分布情况,达到解决地质问题的目的。

在地球物理勘探中,采集来的信号经常是多变量的函数。例如地震记录上,地震波形既是空间变量的函数(如波剖面图),又是时间变量的函数(如由检波器接收到的随时间变化的振动图形);在磁法勘探中,沿剖面的磁场强度分布可表示为随空间 x 变化的一维函数 $f(x)$;磁场强度等值线图就是变量 x 和 y 的二维函数 $f(x,y)$;活动图像信号可表示为空间变量 x 、 y 和时间变量 t 的函数 $f(x,y,t)$,如三维地震勘探波形记录图。

第二节 信号的特性

信号特性包括时间特性和频率特性。所谓时间特性就是在时间域对信号进行分析,即信号是时间 t 的函数,它具有一定的波形。目前地震勘探对波形的分析主要是研究信号波形出现时间的先后,波形的延续时间长度,波形的周期、频率,以及对波形进行的分解和合成。目前还可以研究随机波形的相关分析和波形的相似程度,如地震勘探中利用波形的相干性进行相干加强处理,研究波形的互相关以求取道间时差进行剩余时差静校正等;将可控源的扫描信号与实测记录做互相关分析检测有效信号出现的时间,进行相关滤波等。

信号的频率特性是对时间域信号进行傅立叶变换求其频谱,是信号分解的过程。如对地震记录道图形进行傅立叶变换,可以获得振幅谱和相位谱,振幅谱表示该时间信号包括哪些谐波分量的振幅;相位谱则表征各谐波分量在时间原点所具有的初相位。利用振幅谱和相位谱可以确定信号的分解波形和合成波形。时间域和频率域反映了对信号的两个不同观测面,用两者表示信号是等价的。不同的时间特性对应着不同的频率特性,它们具有单值对应关系。

第三节 信号的分类

信号 $x(t)$ 的分类方法多种多样,工程上主要有五种分类方法:

1. 连续时间信号和离散时间信号

按照 $x(t)$ 是否随时间 t 连续取值分类,把信号分为连续时间信号和离散时间信号。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。因此,模拟信号可以看做是连续时间信号的一个特例。

与连续时间信号相对应的是离散时间信号。离散时间信号是指仅在某些不连续的规定瞬时给出函数值,在其他时间没有定义,即作为独立变量的时间变量被量化了。同样,离散时间信号的振幅值既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。数字信号是指利用一组数值来表示变量,而每个数值是用“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。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。

2. 确定信号和随机信号

按照 $x(t)$ 是否可以预知分类，把信号分为确定信号和随机信号。确定信号是预先可以知道其变化规律的信号，是时间 t 的确定函数。例如正、余弦信号波形函数，地震勘探中的多次反射波等。随机信号是不能预先知道其随时间变化规律的信号，含有不可预测的概念，不能用单一时间函数表示出来。所谓随机信号，是指一些不规则的信号，应用概率和统计的方法对这类信号的分析。例如，从地下地层反射回来的地震信号，其出现的时间和信号的强度都是随机的。这种信号的基本特性用其能谱分布及其参数的概率分布来表征。

3. 周期信号和非周期信号

按照 $x(t)$ 是否按一定时间重复出现对信号进行分类。

(1) 周期信号

周期信号是指按一定的时间间隔周而复始，且无始无终的信号。如周期信号

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{任意整数} \quad (2-3-1)$$

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。函数、振动、信号一般不严格区分，泛指同一个概念。

从式 (2-3-1) 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

$$f(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2-3-2)$$

就传送消息来说，周期信号是不经济的，因为只在一个周期内信号起着传送消息的作用，其他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

$$\bar{f} = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{2a} \int_{-a}^a f(t) dt \quad (2-3-3)$$

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 (2-3-3) 又可写为

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2-3-4)$$

对于周期信号，有以下积分等式：

$$\int_0^T f(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (2-3-5)$$

其中 t_0 为任意实数，

如果令 $t_0 = -T/2$ ，则式 (2-3-4) 可写为

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2-3-6)$$

周期信号的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

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt \quad (2-3-7)$$

平均功率简称为功率。一般来说，周期信号都是功率信号。功率信号的平均功率为有限值，而总能量为无限大。

(2) 非周期信号

非周期信号又称脉冲信号，是指在时间上不具有周而复始的特点，且为无始无终的信号。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。

一个脉冲信号平方的积分，无论是电压或电流信号，都代表加到单位电阻上的能量，所以电压信号或电流信号的平方称为能量信号。信号的能量总是大于零的，所以

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt < \infty \quad (2-3-8)$$

在分析信号时，常用信号的平方来代替原信号。

对于非周期信号，可能出现三种情况，持续时间有限的信号为能量信号，即上述的脉冲信号，如图 2-3-1 (a)；持续时间无限、幅度有限的非周期信号为功率信号，如图 2-3-1 (b)；持续时间无限、幅度也无限的非周期信号为非功率非能量信号，如图 2-3-1 (c)。

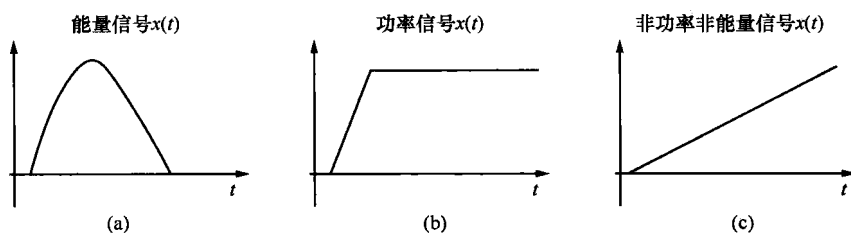


图 2-3-1 三种非周期信号

4. 实信号和复信号

按照 $x(t)$ 是否等于它的复共轭 $x^*(t)$ 对信号分类。实信号 $x(t) = x^*(t)$ ，它是实函数；复信号 $x(t) \neq x^*(t)$ ，它是一个复函数，即

$$x(t) = x_1(t) + jx_2(t) \quad (2-3-9)$$

其中 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 都是实函数，实际信号一般都是实信号，但是为了简化运算，常引用复信号，并以实部或虚部表示实际信号。

5. 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。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 $\sqrt{2} \approx 1.4$ ， $f(t)$ 可近似地看为周期等于 10π 的周期信号；若取 $\sqrt{2} \approx 1.41$ ， $f(t)$ 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，

$f(t)$ 的近似周期将随之逐渐趋于无限大。由此可知, 概周期信号的周期是不存在的, 只有近似的周期, 并且这类近似的周期是随着近似的程度而改变的。

概周期信号的特点在于: 这种信号不满足周期性, 这一点与周期信号不同。但这种信号具有平均功率, 这一点与非周期信号不同。在地球物理勘探中所遇到的信号可以看成是以上这五种信号的组合。

第四节 信号分量

信号可分为直流分量和交流分量; 偶分量和奇分量; 正弦分量和脉冲分量等, 分别叙述如下:

1. 直流分量和交流分量

任何一种功率信号, 包括周期信号、概周期信号和随机信号在内, 都可分解为直流分量和交流分量。信号的平均值即信号的直流分量, 因为它不随时间变化, 因此直流分量可记为

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2-4-1)$$

从原信号中去掉直流分量即得信号的交流分量, 即

$$\tilde{f} = f(t) - \bar{f}$$

信号的平均功率

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [\tilde{f}(t) + \bar{f}]^2 dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \bar{f}^2 dt + \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{f}^2(t) dt + \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{f}(t) \bar{f} dt \end{aligned}$$

因为 $\bar{f}$ 与时间 t 无关, 而 $\tilde{f}(t)$ 的均值等于零, 所以有

$$p = \bar{f}^2 + \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{f}^2(t) dt \quad (2-4-2)$$

说明一个信号的平均功率等于直流功率和交流功率之和。根据直流分量和交流分量来计算信号功率, 可使计算简单, 物理意义清楚。

2. 偶分量和奇分量

偶分量定义为

$$f_e(t) = f_e(-t)$$

奇分量定义为

$$f_o(t) = -f_o(-t)$$

因为任何信号都可以看成是偶分量和奇分量之和, 即

$$f(t) = f_e(t) + f_o(t)$$

而

$$f(-t) = f_e(-t) + f_o(-t) = f_e(t) - f_o(t)$$

以上两式相加得偶分量表达式

$$f_e(t) = \frac{f(t) + f(-t)}{2} \quad (2-4-3)$$

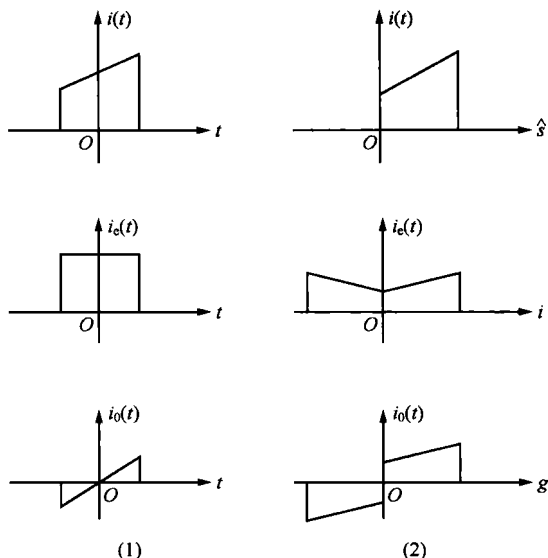


图 2-4-1 信号的偶分量和奇分量

两式相减得奇分量表达式

$$f_o(t) = \frac{f(t) - f(-t)}{2} \quad (2-4-4)$$

因此, 已知信号 $f(t)$ 可通过式 (2-4-3) 和 (2-4-4) 分别求出偶分量 $f_e(t)$ 和奇分量 $f_o(t)$ 。图 2-4-1 是信号的偶分量和奇分量

不难证明

$$\bar{f}^2(t) = \bar{f}_e^2(t) + \bar{f}_o^2(t) \quad (2-4-5)$$

说明一个信号的平均功率等于它的偶分量功率和奇分量功率之和。此结论同样适用于非周期信号。

3. 正弦分量和脉冲分量

任意两个不同频率的正弦信号可以叠加成一个比较复杂的信号, 如图 2-4-2 所示。许多不同振幅、频率和初相角的正弦信号, 则可以叠加成更加复杂的信号。因此, 对任意信号应用傅立叶变换可以分解成许多不同振幅、频率和初相角的正弦信号之和, 这就是信号的频谱分析。

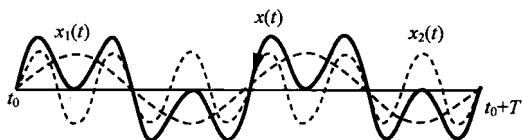


图 2-4-2 两个正弦信号的叠加

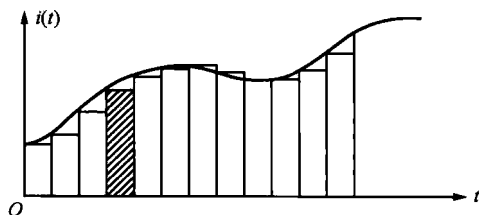


图 2-4-3 信号的脉冲分量

一个信号还可以分解为许多相邻的窄脉冲, 如图 2-4-3 所示。

第五节 几种常用的基本信号

1. 正弦信号

正弦信号常用以下形式的时变函数描述:

$$f(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (A > 0, \omega_0 > 0)$$

式中: A 为信号振幅; ω_0 为角频率; φ 为初相角。图 2-5-1 为正弦信号的波形。显然, 正弦信号的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2-5-1)$$