

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

地球物理资料数字处理

石油工业出版社

27824

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

地球物理资料数字处理

陆邦干 范伟粹 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书侧重介绍地球物理数据数字处理方法的发展,阐述了资料输入和输出之间的互关关系及针对某一给定的野外资料如何正确选择处理方法和有关参数。

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。

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

地球物理资料数字处理

陆邦干 范伟粹 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲 36 号)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 7印张 161千字 印1—1,800

1987年1月北京第1版 1987年1月北京第1次印刷

书号: 15037·2649 定价: 1.40元

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。

前 言

本文原为作者应加拿大勘探地球物理学家协会 1967 年组织的数字处理基础研习班之需而作的简短讲稿, 1968 年扩充成为该会的连续培训教材。多年来, 讲稿屡经修改、补充, 增添了许多反映数字数据处理新发展的内容。地球物理勘探是一个发展极快的领域, 因而有一个使知识赶上最新发展的问題。

现在看来, 基本的数据增强处理方法, 已发展到一个新的高度, 研究工作日益集中到解释方面的问题上。解释人员更加直接地进行干预, 已是常规处理程序的内容之一。地震学方法已能发现原先看不到的圈闭。新的显示方法(其中许多是彩色显示方法)打开了数据显示的新局面。所有这一切活动的目标, 都是要提高我们找油找气的能力, 并以之弥补油气可发现量的日益减少。近十年来, 世界上发现的一些大油田, 正是勘探技术进一步提高的证明。

作者讲稿的出版, 为的是把有关地球物理数据处理的新、老资料综合在一起, 将这方面的知识变为对处理方法物理性质的理解。弄清输入和输出之间的因果关系, 就能更好地了解处理的结果为何不尽一致, 如何针对某一给定的野外资料而选择处理的方法及有关的参数。

为了避免严格的数学讨论, 作者侧重讲的是发展。对专门以找油为业的广大对象而言, 十二小时的讲课无法全面深入地讨论各种问题。幸而有很多精彩的著述, 资料收罗得详尽, 材料又发挥得充分。在这方面, 尤其是对一些具体的问题来说, 作者引用的参考文献是很有用处的。要了解总的背景情况, 作者列出了建议阅读的书目, 首先一本是鲁宾逊·特雷特尔·里德(Robinson Treitel Reader)讲基本发展的书, R·E·谢里夫(Sheriff)编著的《勘探地球物理百科辞典》, 对大部分在用的专门术语下了明确的定义, 而且往往还作了基本的综述。布雷斯韦尔(Bracewell)的《傅里叶变换及其应用》一书是深入浅出地介绍傅里叶变换的好读物, 而 V·W·李的《通信理论》一书, 全面阐述了这一领域的各种问题。

引言

地质学家和地球物理学家在石油勘探工作中有着共同的目标。二者都力图找出由多孔隙储集层形成油气圈闭的地下地质异常。找到含油气远景对象往往是不够的：地质学家和地球物理学家还必须说服管理部门去钻探它，并且期待着最终发现一个新的油气藏。

地质学家和地球物理学家虽然有着共同的兴趣和目标，但是他们的职业倾向却不相同。由于勘探工作者的专业不同，他们作为解释基础的基本数据就有些差别，因而他们发展的技能往往也迥然不同。

今天，勘探工作大多是以某种间接测量的方式或者说是以遥感著称的方式为基础，对地下地质情况的研究不是依靠直接观察岩石，而往往是靠有关的测井资料，再加上少量岩芯和岩样分析资料进行推导。

在面积很大的区域内，地震方法可能是唯一的信息来源。当然，对于地下勘探来说，地震方法几乎是唯一有效的手段，因为它首先不需要钻很深的井眼。因此，地球物理工作者倾向于越来越多地依靠地震反射波法，以之作为他主要的工作数据来源。反射波法是测量剖面中某些特定反射面的可对比的反射时间，用它绘制构造图并不理想。因为如要使之有效，反射面必须是连续的。所以地球物理工作者及其助手即数据处理人员，都力求在整个勘探地区内获得清晰而连续的反射层，那样才能绘出连续的构造图，并结合绘制等厚图来说明层间厚度变化。如果一个反射面不是连续的，那么它在绘制构造图时就可能被人忽略，以后就不可能绘出完整的远景对象的图件。所有这些条件就使地球物理工作者形成了一种“层饼”地质学的概念，而这种概念忽视了常见的事实，那就是在任何的沉积盆地中，在任一大的距离内，沉积条件不发生变化是极其罕见的。

地质工作者大量地接触地下剖面，这些地下剖面是以地质层顶界面和测井曲线为基础的。地质家根据等厚线间距和其他标准绘制剖面图，而且一般能够很成功地说明沉积物沉积时的地形和条件。他还可以用岩芯和岩样来测定岩性，或者用一套测井曲线相当精确地估计岩性。这些工作的结果往往引出了开发该盆地的成功结论，并能确定地下剖面中发生相变的局部地区，而相变对于油气聚集来说是很重要的。

目 录

前言

引言

一、基本波动理论	1
1. 沉积旋回性	1
2. 基本波动理论	2
3. 傅里叶变换	6
4. 傅里叶谱	9
5. 一般关系	11
6. 数据处理	11
7. 快速傅里叶变换	16
二、基本原理	18
1. 信号原理	18
2. 模型概念	19
3. 反射系数	21
4. 地震模型	22
5. 系统模型	26
6. 大地滤波器	28
7. 基本的数字运算	28
8. 自相关	33
9. 合成地震记录	34
三、数据采集	40
1. 地震数据采集	40
2. 地震波能量的控制	41
3. 记录仪器	43
4. 二进制增益控制	45
5. 设计上的几点考虑	47
6. 浮点记录	49
7. 增益补偿	52
8. 地质因素考虑	58
9. 结论	61
四、迭加	63
1. 共深度点迭加	63
2. 向量运算	63
3. 符号位记录	64

4. 可控震源符号位记录	66
五、频率滤波	72
1. 地震信号的组成	72
2. 带通滤波器	72
3. 时变性质	73
六、反褶积	80
1. 概论	80
2. 基本模型	80
3. 反褶积模型	82
4. 相位问题	91
5. 最小相位	91
6. 子波处理	93
7. 同态反褶积	94
8. 频率域反褶积	95
9. 一般性讨论	95
10. 压制多次反射	98
11. 实际工作中的问题	100
12. 应用阶段	102

一、基本波动理论

1. 沉积旋回性

沉

地质工作者和地球物理工作者有着共同的勘探目标。他们都力求测量和描述同样的地下剖面。他们从同样的地下剖面测量不同的物理特性。

他们进行的测量中，有些可以非常接近（与其他测量比较而言）。例如，地质学家最常用的声波测井是测量声波通过地下剖面的时差。地震反射波法基本上也是（在地面上）测量声波累积传播时间。要对比不同测量方法的结果和确定其相互关系，需要某种分析方法。因而，某一测量方法包含的信息能够用另一种方法的术语来表示（或者用绝对的地质术语来表示）。归根到底，要靠地质，而不是地球物理来确定沉积层的来源和聚集，并提出人们所要寻找的油气聚集条件及其圈闭条件。

某个盆地沉积地质的描述往往是以某种模式为基础，或者以某一特定的剖面的研究为基础。在不知情的局外人看来，地下沉积剖面不过是各种岩石的无规则的排列。而实际上，有一种地震信号的反褶积就是以下述假设为基础的，那就是：地下沉积剖面的层序完全是随机的。不过这种情况实际上却很少见，多数沉积剖面是沉积旋回（周期）的结果。

在另一方面，许多地球物理学家（虽然他们应该了解得更清楚）常常倾向于按厚的单元“层饼”层序来模拟沉积剖面，这些层序在地层界面处有连续的反射。地震标准层常用来制作构造图和等厚图，然后按主要的地质特征进行解释。这种解释主要着眼于构造，而且除沉积过程最粗略的结果外，其他一切都略而不计。

为了全面了解沉积地层的特性，要对整个剖面进行近乎连续的地层分析，包括查明对岩石的性质和层面，以便确定整个剖面发育过程中各个阶段最可能存在的条件。

一般认为，在任何沉积剖面的发育中旋回现象都起着重大的作用。在许多剖面中（如果不是一切剖面的话），常常可以观察到延续时间较长和较短的两种旋回及其有关现象。此种过程连续不断地发生。今日地表上的任何一点都只不过是开始以来的连续地质过程的目前状况的体现，而且变化一直会延续到将来。

影响沉积作用的旋回现象可能在海岸线一带表现得最明显，只要海岸线存在一天，波浪反复的作用就将循环不断地发生。在小湖的边缘部分，波浪可能作短暂的、柔和的拍打，而在面向大海的海岸上，波浪则可能是来势更猛、持续时间更长的冲击。

波浪将随着潮汐的涨落移向海岸较高和较低的部分，不管其他事件是否会发生，它每天都将进、退两次。测量此种合成效应，就能显示交替涨落循环的较长周期及其受波浪作用形成的周期短得多的振动发生的调节变化。

要把这种想法推广到在周期或多或少相同时发生的一系列其他循环现象，是件很容易的事。月的循环影响着潮汐的涨落，而地球围绕太阳的运行所产生的季节变化可能引起沉积速度的变化。

太阳的斑点似乎是循环移动的，并且影响到降雨和沉积。这个过程通过冰川旋回和主要地质年代的循环，尤其是通过大陆漂移的循环而不断地发生。所有这些变化都直接影响沉积

过程，改变着沉积物的类型及其沉积数量。由此而形成的顺序，便是某一特定时间内存在过的各种条件特定的结合的历史记录。即使有些重要条件在全部历史过程中只发生过一次（例如地球本身的存在），也可能是在我们目前无法测量的极其漫长的周期中产生的一套顺序的循环。

沉积剖面（它代表着某些旋回过程之总和）的此种基本模式与已知的条件非常合拍，而且得到普遍地承认。幸运的是，信号理论的一个领域即谐和分析，也非常适合于此种系列的测量、研究和分析。我们现在就可以详细讨论这一点，以便确定它应用于地质和地球物理方面是何等有用。

2. 基本波动理论

任何一种连续经常出现的旋回（周期）现象，都可以用一正弦或余弦波的图形表示。而每一周期则用振幅和波长这两个术语描述。振幅是每一周期上升或下降到距某一中值基线的峰值。波长是一个全周期中一峰至另一峰之距离。如用时间测量波长，则称之为振动周期。周期性经常以频率表示。例如，家用电流一般是以每秒 60 赫的频率振动。此种周期现象能延续至无限长的时间，但为便于分析，一般只测量某一离散时间段。

如果用一连续的余弦波绘制振动图形，可以只按振幅和频率的上述定义建立任何一段时间之内的周期波。

要精确地描述某段时间内的周期组成，必须确定它的另一个特征，也就是周期中时序开始的那一点。按一般规定是，周期期分量的角相位是相对某一任意标准点（通常是信号时序开始的一点）而言的。

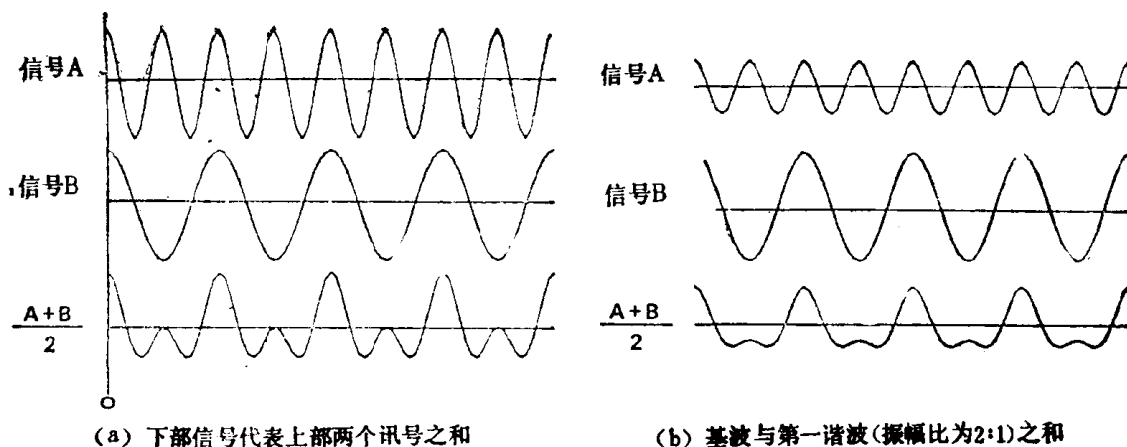


图 1.1 两个不同频率的简单相加

(a) 两个频率加在一起，产生外形不同于两者的信号； (b) 改变分量中某一部分的振幅，立即影响到输出的形状

频率、振幅和相位这三个坐标即足够描述每个频率成分的组成。如周期时序为已知或认为它将无限地继续下去，采样时间的长短，只要保证能确定可靠即可，而且将来也能有用。

由此产生了与采样所载信息有关的信息论的另一值得注意之点。测量的采样长度必须保证能对振幅和频率作出可靠的测量。离散时间采样的长度将限制能可靠地测定的最低频率成分。

复杂的信号由许多元波之和组成，这些元波各有其恒定的振幅和频率，并从一定的相位

角开始。而某一特定的连续波只是许多简单的周期成分之总和，这一点在考查时可能不甚明显。如果把频率不同的成分（即使数量较少）相加在一起，也可能产生较为复杂的信号，而各个成分的性质在合成信号中可能非常之模糊。

例如，两种频率（其中一为基本频率，另一为大于该基本频率一倍的谐波频率）可以加在一起，产生出形状与原来的两种频率都不同的信号（图 1.1 (a)），而改变任一成分的振幅，就立即会影响输出的形状（见图 1.1 (b)）。

为将更多的频率加在一起，就会产生更为复杂的信号。表示某一时间间隔内有 2、4、8 个周期的各频率之本身也是周期性的，即在该时间间隔内重复输出波形两次（图 1.2 (a)）。如果频率为 2、4、8 周期/秒（更准确地说是 2、4、8 赫），所得的信号将在半秒时间内是周期性的，即各成分在此最短时间内将完成一个或一个以上的全周期。由此得出另一个事实，即一组周期性的成分之和的输出本身在该时间间隔内（各成分的波长在其中均匀地分开）也是周期性的。

而另一些频率（例如 6、7、8 赫的频率，见图 1.2 (b)）之和只在满一秒钟的时间内（亦即各成分准确完成整数个周期的最短时间）才是周期性的。这三个成分之和像地震道的一部分。如果加上一大批频率，以及（或者）改变各成分的振幅，那就可以得到更为复杂的信号。

除改变信号成分的振幅和频率之外，每个成分的相位也可以改变。只要成分的相位略有变化（见图 1.3），任何一种复合信号的形状也会起很大变化。但要注意的是，相位的变化不会改变信号的周期性（见图 1.3 和图 1.4）。信号的特征（即峰值）在时间上可能有变化，但特征之间的相对时差（周期）却不会变化。改变某一地震记录的成分相位，可能改变反射时间，是同一地区内不同地震勘测的闭合差来源。单位脉冲响应的相位移动是地震反射出现典型的不对称形状的原因。

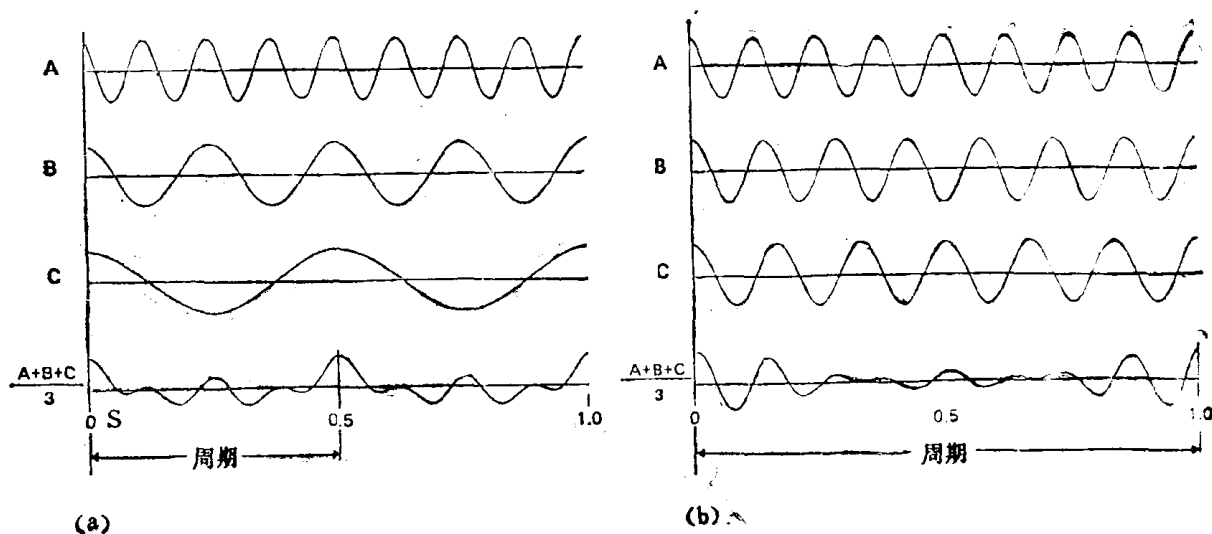
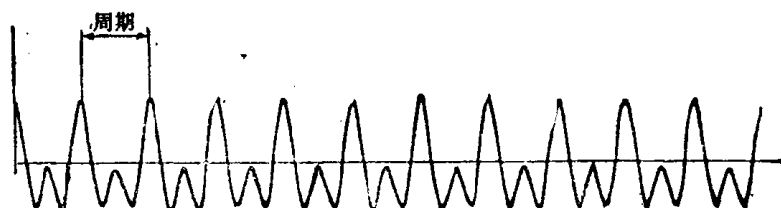


图 1.2 三种频率的简单合成信号

(a) 表示某一时间间隔内有 2、4、8、个周期的各频率本身是周期性的，则它们的和也是周期性的，且在该时间间隔内重复两次；(b) 另一些频率，如 6、7、8 赫的各频率之和只在满一秒钟的时间内（即各成分精确完成整数个循环的最短时间）才是周期性的

数量较少的频率之和产生的信号与地震信号相同。实际上，任何一个连续信号，都可以把具有某种振幅和相位的一组单个频率成分之和来近似它。图 1.5 中的示例为部分井中声波测井曲线。一组频率之和产生了很相似的测井曲线。只是细部比原始测井曲线差，因为测井曲线的正常频率都大大高于 100 赫（近似时采用的最高频率）。而且，频率的分布也不均匀。如果加上一些中间插入的频率可使测井曲线的近似结果更好。直流成分是重建工作中所必需的，但未在图中表示。地震信息通常在零轴附近振动，但测井曲线上各值均为正值，因而它具有正的非零的代数平均值（即具有直流成分）。



基本频率加上同相的谐波

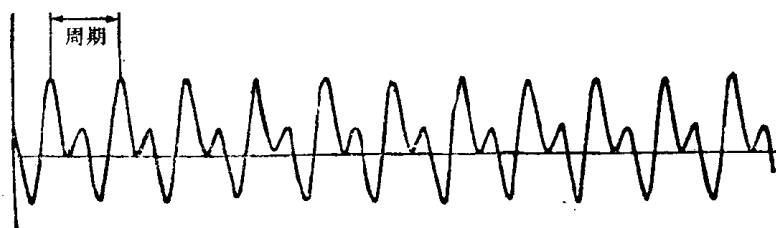


图 1.3 相位移动的作用（2 种频率）

只要成分的相位略有变化，任何一种合成信号的形状都会大变。但相位变化不会改变信号的周期

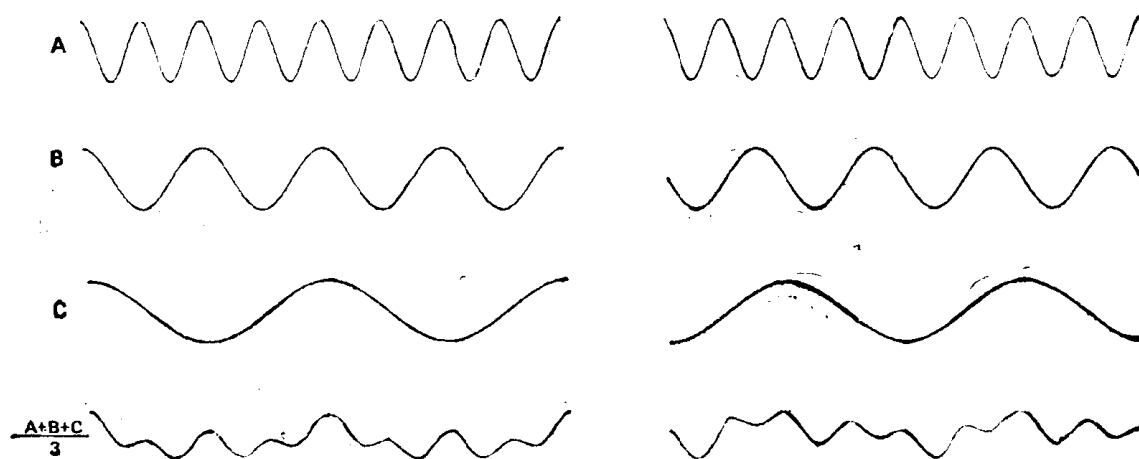


图 1.4 相位移动的作用（3 种频率）

相位变化不会改变信号的周期

图 1.6 提供一个更好的例子。顶部记录了一条未经处理的野外地震道。其下为一系列

单个的频率成分，这些成分相加后可以产生地震信号道。

每一频率成分均按其在野外地震道中相同的相对振幅绘出（但为图示起见，各振幅已按比例增至一定的常量）。每一频率成分均有相对的相位（在零时参考线上看到）。

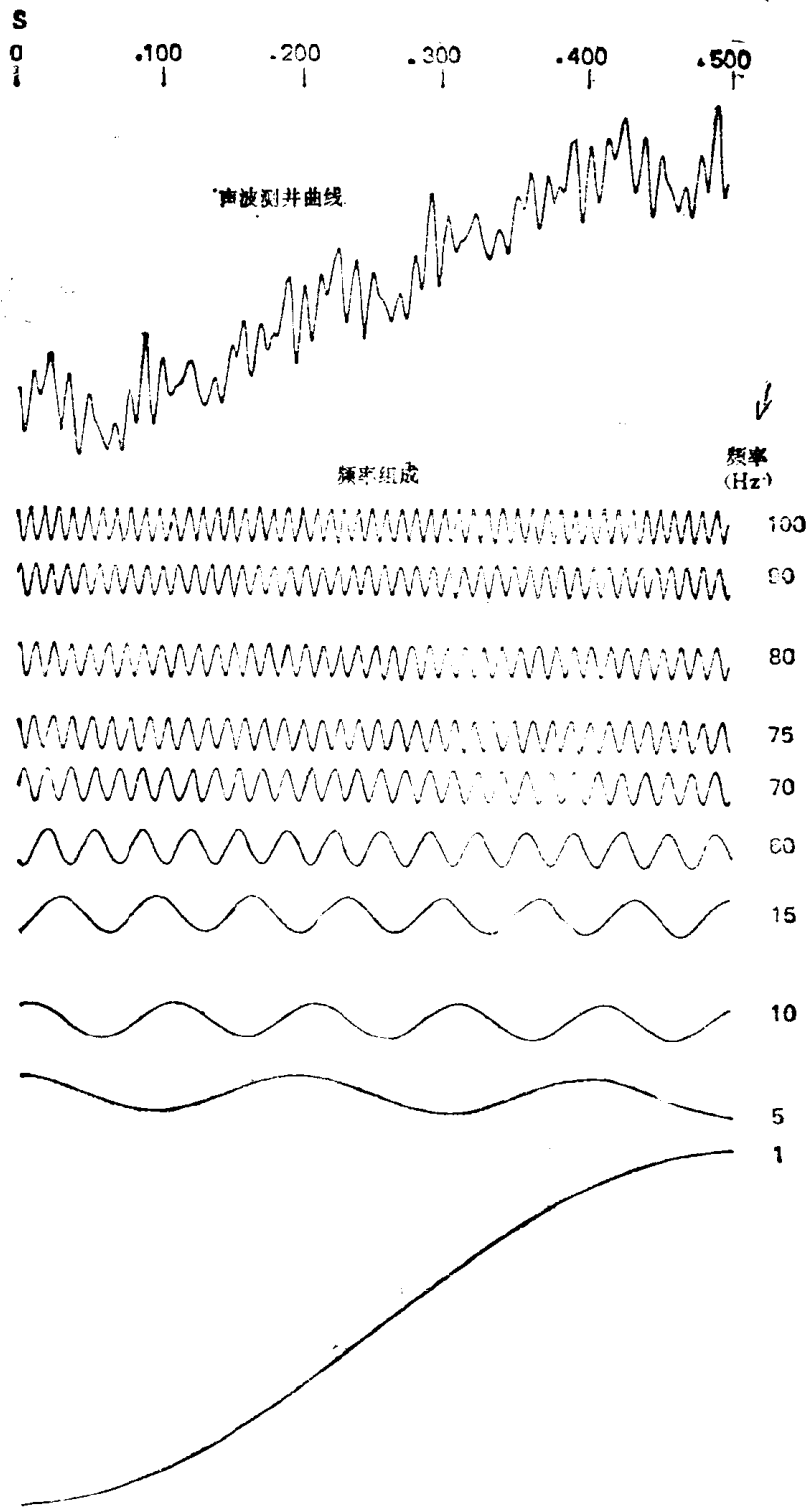


图 1.5 一组频率之和产生与测井曲线很近似的曲线

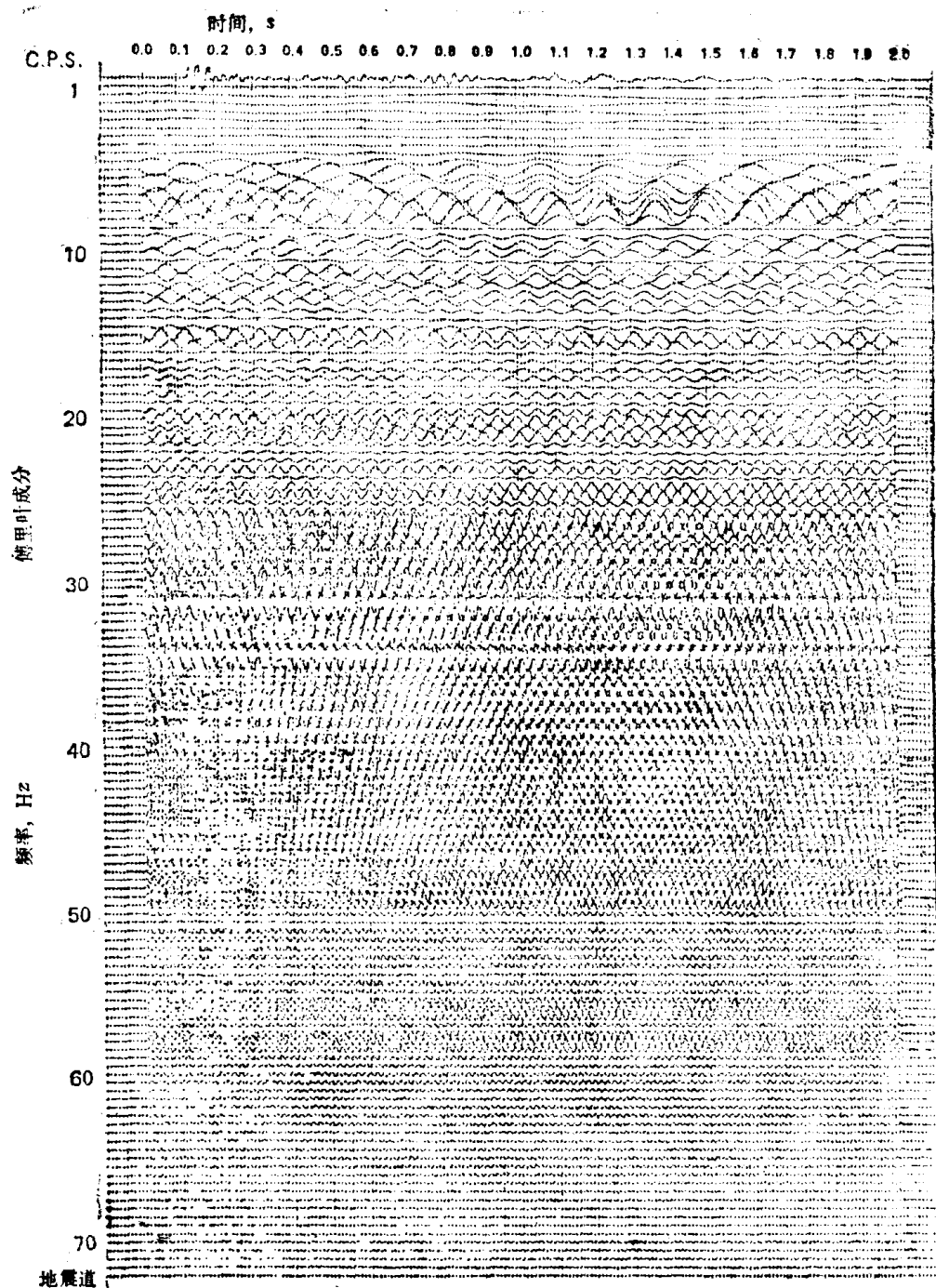


图 1.6 顶部为一条未经处理的野外地震道，其下为一组单个频率成分，这些成分之和产生地震信号道

所有的单个频率成分按照结果指示的振幅和相位关系相加在一起后，就将等于该图顶部的单一地震道。

3. 傅里叶变换

对某一给定的信号所含的频率范围内每一频率的振幅和相位作出完整的规定，就形成该信号的傅里叶变换。这是信号的频率域描述。傅里叶变换的计算完全是可逆的，亦即变换的每一方都能由另一方导出。同一信号时间域的描述和频率域的描述为一变换对。

从图 1.6 所示可以得出一些有趣的看法。除少数成分例外，凡是近于 30 赫的频率均有最大的振幅。而频率超过 30 赫，振幅逐渐减小。低于 30 赫时，振幅又以较快但不规则的速度下降。这种响应在许多地区的地震资料中颇有代表性，说明大地对地震能量产生响应的频带是比较窄的。还有一点值得注意的是：即使地震道含低频成分多（它可能是噪音），也没有低于 5 赫的频率。这种现象很可能是野外滤波器或地震检波器响应造成的结果。相当于此处的反射系数的频谱至少会从零扩展到 250 赫。

地震信号带宽有限，会使某些处理运算简化，但缺少高的频率又会严重地限制薄层的确

定。图 1.6 中 5 赫至 10 赫的能量带振幅较强。这说明了另一个常见的问题。可能含有大量噪音成分的较低频率，其所带能量往往要比记录上其余的频率大得多。如果仪器的动态范围受到限制，则必须使信号衰减到该仪器动态范围水平以内。如果这个条件确实具备，则很弱的信号成分（尤其是高频）就会消失。

在野外用模拟滤波法消除低的频率，是确保其余的信号不被压制的一个办法。但另一方面，由于地震信号原本就已受到带宽的严重限制，所以为了记录必须尽可能加宽频带。目前较好的一个办法是趋向于利用加速度检波器而不是利用一般的地震检波器。频率越高，地震加速度检波器的响应就越大，而一般的地震检波器响应通常是平的。对响应的任何必要的校正都可以用反褶积去完成；而且通过数字处理（不是野外滤波器处理），可以更有选择地消除不要的频率。若要记录下野外所有有用的频率，加大带宽同增加仪器的动态范围一样的重要。但是，记录带宽大于地震信号的带宽也是没有什么意义的。

信号的带宽很少能够非常尖锐地确定，但不管如何该带以外的能量大部分应是噪音。

各频率成分的振幅值可能变化很大，这一点是显而易见的。有些频率成分的振幅接近于零，而其相邻成分的振幅却可能大得多。这些频率/振幅关系会产生一种谱形特征或“特征”（该特征与时间域地震道的特征一样重要）。

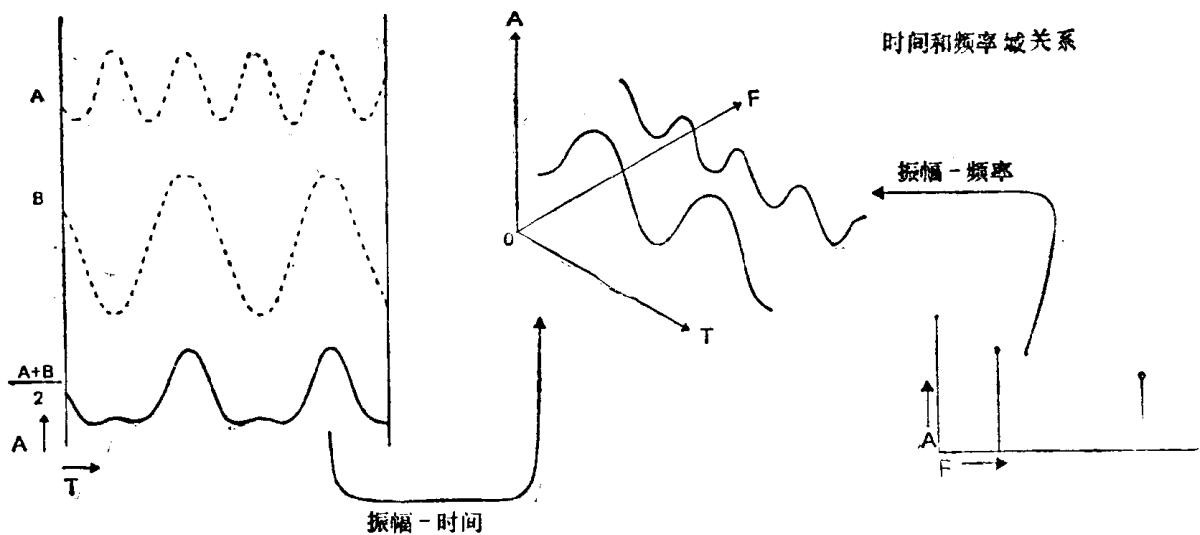


图 1.7 以频率表示的振幅图示法是方便得多的一个方法

要理解傅里叶变换往往还要理解某些看来显然荒谬的难点。比如，随着反射时间的增加，高的地震频率消失，这已是公认的现象。然而，在傅里叶变换中，一切频率成分的振幅

都是稳定不变的。问题的答案就在于相位关系。尽管每一频率成分在信号长度范围内具有不变的振幅，但在该道上出现低频反射（例如 1.2 秒附近），这是由于在这部分记录上一系列低频成分处于同相位而形成的。常见的情况是（尤其是在浅层情况下），相同的低频成分会有相移，即不同相，因而在相加时互相抵销了。另一方面，出现在地震记录的较早（浅层）部分，高频成分由于同相位而占据主导地位。但是随着深度加大，它们又会发生相移。

这种变换只能给该道提供一个很粗的近似，但它能以相当高的准确度确定该道。我们考察的频率范围为 1 赫至 70 赫。频率增量约为半赫。只把较窄的频带相加，或以较大的频率增量（步长）相加，能提供一条可以辨认的地震道，但这种地震道的精度较低。傅里叶变换是一种曲线拟合程序，在不断增多系数的条件下，会拟合得越来越好。

这就导致了另一种及须了解的现象，亦即与考察的信号上选择零时间参考点有关的现象。

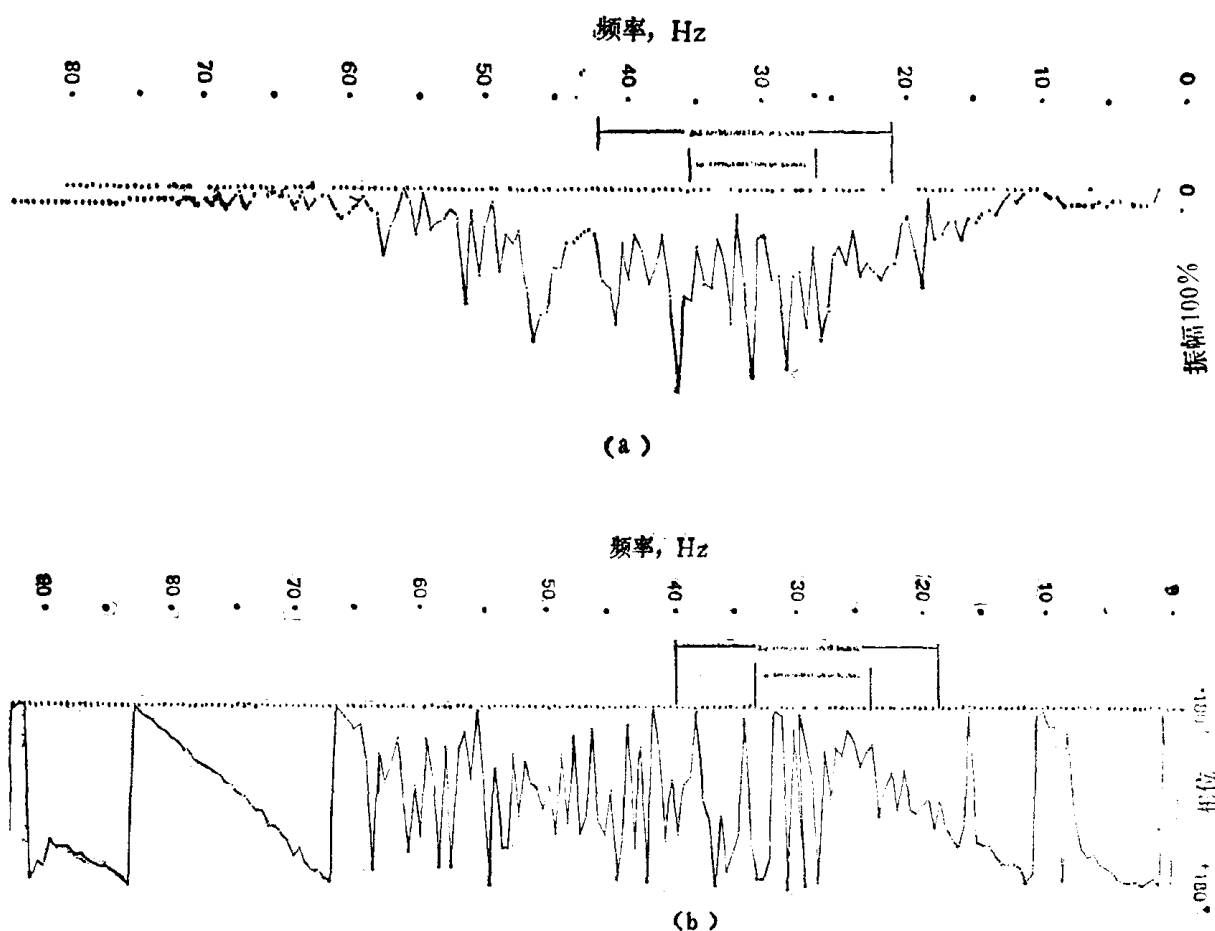


图 1.8 地震道信号的全变换，包括它的振幅谱（振幅是频率成分的函数）和相位谱（相位是频率成分的函数）

(a) 地震道振幅谱；(b) 地震道相位谱

象。就本例（野外实际道）而言，零参考点就是时断信号。在炸药爆炸的瞬间与最近的地震检波器上第一个地震波到达时间之间约为 130 毫秒，这因该时间间隔内地震道的零振幅而很容易看出。但以同一零振幅为基准的每一频率振动时，其振幅在全部时间内均不变。而且，会有这样的相位关系，即所有的频率之总和正好在初至出现前的区域内抵销为零。如果

由于某种原因有些频率未参与相加时，总和即不再为零，而且从零至初至的时间内必将有剩余振动。这是将频率成分的一部分从谱中除去的带通滤波的一种常见效应。带通滤波器可以除去噪音，但它也会因总和中剩余的频率较少而产生某些副作用。

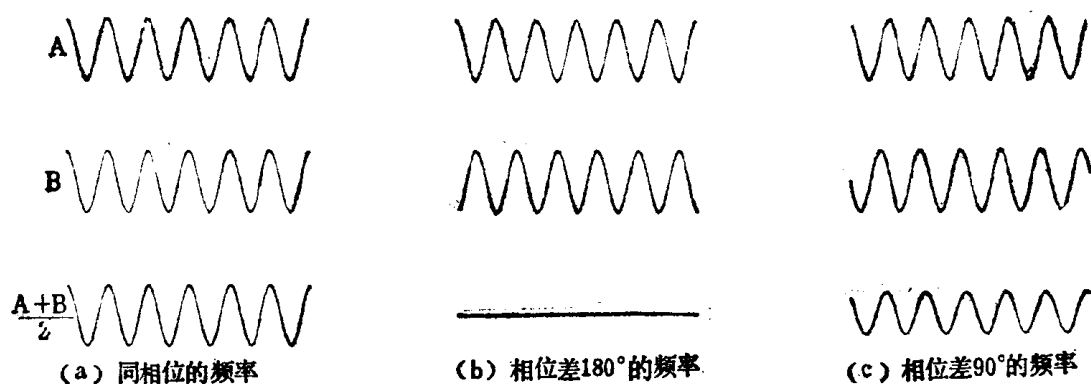


图 1.9 不同相位关系的相同频率之和可等于一单波

(a) 如该两个信号相加，其结果在频率和相位方面均与源信号相同，但振幅要大一倍。归一化（即除以 2）可使输出与输入相等；(b) 如源信号中之一相移 180° （相对另一信号而言），则两个信号之数值将相等，但极性相反。当两个信号相加后，所得振幅即为零；(c) 如某一信号相对于另一信号（二者频率和振幅相同）而有相移时，得出的输出将是两个输入道的相位平均值。输出的振幅将明显地略小于同相的相同两波之和

4. 傅里叶谱

采取这种形状的图式能较好地说明傅里叶变换的性质，但实用价值较小。更为方便的一种方法是以频率表示的振幅谱图（见图 1.7）。振幅谱只是傅里叶变换的一个部分。而全变换是由将振幅作为频率函数的谱（见图 1.8 (a)，在该例中，绘出的振幅已平方过，是为了突出相互关系）和与之有关的相位谱（图 1.8 (b)）所构成。相位谱描述一个信号所含各频率成分的相位。两个谱合在一起，提供了信号在频率域的总描述。相同的信号可用振幅与时间的函数在时间域中予以描述。

把一个信号分离为它的组成成分进行分析是进行分析和运算的有效方法。傅里叶变换完全是线性的，对任何信号从时间域或频率域加以说明都是同样正确的。在上述两个域中的某一方面所作的任何运算都必然有另一方面的对应运算。但某一方面的有些运算要比另一方面较易完成和（或）易于理解。很重要的一点是，要彻底弄清各变换之间存在的关系，因为这些关系并不总是清楚的，而且也不是所有有关的考虑都能说明问题。

需要注意的是，确定地震道变换中每一个频率成分时只有振幅和相位的单一值。实际上，每一频率成分都能用单个的向量（其长度等于按相位角标明的振幅）来表示。人们可以完全想象到的是，记录下来的信号可能由许多不同来源的部分所组成，而它们的频率有时却相同。例如，一个地震道包含地震震源的信号、风噪音、工业电干扰和随机噪音，都有共同的频率成分。

地震道上的多能源效应可用下法说明。选择两个相同的能源，其频率与相位相同。如此两个信号相加，则其结果将与源信号的频率及相位相同。归一化（即除以 2）将使输出和输