

工程与环境物探 新方法新技术

王兴泰 主编

地质出版社



登录号	99624
分类号	P631
种次号	059

工程与环境物探新方法新技术

王兴泰 主编

万明浩 孙仁国 李大心 刘学伟
 陈海鸣 陈森鑫 余钦范 张献民 编著
 易 兵 黄嘉正 程志平

(按姓氏笔划顺序)

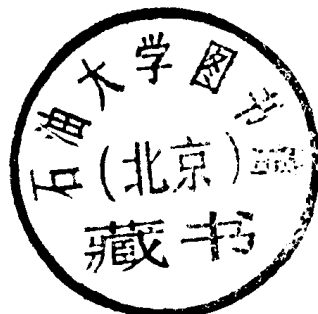
S236/19



200840983



009316538



地质出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程与环境物探新方法新技术/王兴泰主编.-北京:地质出版社,1996.12
ISBN 7-116-02291-0

I. 工… I. 王… III. ①建设工程-地质勘探-方法②环境工程-地质勘探-方法
N. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 22450 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:陈军中 曹玉

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:16.875 字数:405000

1996 年 12 月北京第一版·1996 年 12 月北京第一次印刷

印数:1—800 册 定价:25.00 元

ISBN 7-116-02291-0

P·1719

1
6
2
天

前 言

本书是根据地质矿产部“地球物理基础及勘探方法”课程教学指导委员会 1994 年贵阳会议的决定，邀请和委托了六所院校共十余位作者联合编写而成。该书主要是为了满足高等院校应用地球物理专业高年级的教学需要而编写的，同时也可供相关专业的研究生参考。编者也希望本书能够对目前正在或准备从事工程与环境地球物理工作的专业技术人员有所帮助。

应用地球物理手段来解决工程与环境地质问题是近年来地球物理学发展的一个新的前沿领域。80 年代以来，随着我国大规模经济建设和国土整治的迫切需要，工程与环境物探获得了迅速发展。先后引进和开发了一系列用于工程与环境地质调查的新方法新技术，研制了一批先进设备，开发了软件，培训了人材。到目前为止，无论就项目的地质效果还是方法技术水平的提高，工程与环境物探都发展到了一个新阶段。此外，工程物探作为一种重要的测试和监测手段，也得到了工程界的普遍关注。在这些领域，相当一部分物探分支方法已经超出了经典的地球物理范围；就世界范围来说，由于城市化进程的加快，这种情况仍有不断扩大的趋势。也可以说，正是这些不断被开拓的新领域给工程与环境物探注入了强大的生命力。

然而，由于工程与环境物探的研究内容和应用领域的特殊性，它也始终面临着严峻的挑战。工程物探在工程勘察等领域的地位和作用，与目前能源和金属矿物探的技术发展水平相比还有一定的差距，缩小这一差距也还需要付出相当大的努力。也可以说，工程与环境物探是一门针对性很强的应用技术，也是一门受多种因素制约的综合学科。从这种角度来看，它的发展既有很大难度，也有较大潜力。

本书根据教学需要以及工程与环境物探目前的研究和发展现状，选取了其中较为重要的十类方法，分别就其基本原理、方法技术及应用效果等有关问题进行了概括性地介绍，相应地把它列为十章，各章之间相对独立，读者可根据需要选择其中任意一章开始阅读。

本书第一至第四章介绍了以弹性波理论为基础的四类物探分支方法及其应用技术。第五至第八章介绍了以电磁场为基础的物探分支方法及其应用技术。第九章介绍了利用综合测井方法进行水文工程参数测试的原理和方法。第十章则概括性地介绍了环境地质调查的内容以及综合地球物理方法在环境地质调查中的应用。

上述这些主要应用于工程与环境地质调查领域的地球物理分支方法近年来得到了广大地球物理工作者的广泛关注，获得了迅速发展，取得了一定的社会效益。尽管关于上述内容的研究论文已经很多，但多数都分散在各种学术刊物上，系统学习它们还是比较费时费力。我们编写本书也是想为应用地球物理专业高年级的学生及初学者提供一些方便。

本书第一章由刘学伟（长春地质学院）编写；第二章由黄嘉正（中国地质大学、武汉）编写；第三章由易兵（长春地质学院）编写；第四章由万明浩（上海同济大学）编写；第五章由王兴泰、孙仁国（长春地质学院）编写；第六章由程志平（桂林工学院）编写；第

七章由张献民（河北地质学院）编写；第八章由李大心（中国地质大学、武汉）编写；第九章由陈森鑫（长春地质学院）编写；第十章由陈晦鸣、余钦范（中国地质大学、北京）编写。全书由长春地质学院王兴泰负责主编。本书大部分内容是编者多年来从事和研究该项工作的概括性总结，同时也参考和吸收了国内外同行专家的研究成果及实际工作经验。从这一点来看，本书是各位编者以及书后所引参考文献的各位作者集体劳动的成果。借此机会，对本书各章编者及所引参考文献的作者表示诚挚地谢意。

本书在编写过程中得到了地质矿产部“地球物理基础及勘探方法”课指会主任委员于汇津教授、副主任委员张桂青教授和余钦范教授，以及全体委员的关心和支持。本书初稿完成后，在课指会 1995 年上海会议上全体委员进行了初审，委员们提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并向他们表示衷心的感谢。本书第二稿完成后，承蒙长春地质学院李舟波教授和成都理工学院于汇津教授审阅。审稿中提出了许多宝贵的意见。在此对他们的辛勤劳动表示深深地谢意。

由于编者水平及工作经验所限，书中不当及疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

1995. 12.

目 录

前 言

第一章 高分辨率浅层地震勘探的有关问题	1
第一节 基本原理	1
一、分辨率	1
二、子波分辨率与其频率成分的关系	2
三、分辨率与信噪比之间的关系	7
四、地震记录的有效频带	13
五、高保真去噪问题	13
六、大地滤波作用	16
第二节 数据采集	18
一、地震波的激发	18
二、地震波的接收	20
第三节 数据处理	24
一、提高信噪比	25
二、提高分辨率	30
三、影响分辨率的常规处理的有关环节	33
第四节 应用	34
一、在工程地质调查中的应用	34
二、在水文地质调查中的应用	36
三、探测古河道	38
参考文献	39
第二章 瑞雷波勘探	41
第一节 引言	41
第二节 瑞雷波勘探的理论基础	42
一、瑞雷面波的形成	42
二、自由表面瑞雷面波的特征	44
三、层状介质中的瑞雷波	45
四、瑞雷波勘探原理	45
第三节 瑞雷波勘探的仪器设备	47
一、仪器的基本配置	47
二、GR-810型面波探测仪	48
三、RL-1型瑞雷波勘探系统	48
第四节 瑞雷波勘探的资料采集	49
一、稳态激振法	49
二、瞬态激振法	50
第五节 瑞雷波勘探的资料处理	52

正工程

一、资料的整理	52
二、提高信号质量的处理	52
三、瑞雷波传播速度的确定	52
四、瑞雷波的速度函数	55
第六节 瑞雷波勘探的资料解释与应用	56
一、岩土体特性研究中的解释应用	56
二、工程、环境检测与监测中的解释应用	59
参考文献	61
第三章 常时微动及其在工程中的应用	63
第一节 引言	63
一、微动及其分类	63
二、常时微动的研究现状	63
第二节 常时微动的基本性质	64
一、常时微动的成因	64
二、常时微动的性质	67
第三节 常时微动的测量及资料解释方法	69
一、测量方法	69
二、资料处理及解释	69
第四节 常时微动与结构物振动特性测试	71
一、利用常时微动测试结构物振动特性的原理和方法	71
二、测试方法技术	72
三、关于建筑物振动特性的一些规律	72
第五节 常时微动的实际应用	76
一、地基分类	76
二、常时微动与建筑物抗震设计	80
三、常时微动与砂土液化	83
四、场地土层放大特性的估算	83
五、地基构造的推算	84
六、在滑坡地质调查中的应用	84
参考文献	85
第四章 桩基无损检测	86
第一节 引言	86
第二节 桩的垂直静荷载试验	87
一、桩的工作形式及破坏模式	88
二、桩的垂直静荷载试验	88
三、按静荷载试验确定桩的极限荷载和屈服荷载	90
四、单桩容许承载力的确定	91
第三节 高应变动力测桩	93
一、高应变动力试桩的基本原理	94
二、高应变动力试桩法确定单桩承载力	97
三、高应变动力试桩法检测成桩质量	101

四、高应变动力试桩法的应用实例	103
第四节 低应变动力测桩	104
一、低应变动测方法	104
二、低应变动测对桩身质量分类评价标准	104
三、低应变动测配合静荷载试验是桩基检测的方向	106
参考文献	107
第五章 高密度电阻率法及其应用技术	108
第一节 引言	108
第二节 高密度电阻率法的基本原理及系统结构	109
一、基本原理	109
二、系统结构	112
第三节 野外工作方法技术	113
一、高密度电阻率法的野外工作	113
二、高密度电阻率法的测量系统	115
第四节 高密度电阻率法的资料处理及正演模拟	117
一、资料处理	117
二、正演模拟	119
第五节 高密度电阻率资料的反演	122
一、佐迪 (Zohdy) 方法简介	122
二、高密度电阻率资料的层析成像	122
第六节 在工程与环境地质调查中的应用	126
一、在山西平定某采空区探测中的应用	126
二、在地裂缝探测中的应用	127
三、在松花江斜拉吊桥桥墩选址中的应用	128
四、在回填土地探测中的应用	131
参考文献	131
第六章 瞬变电磁法及其在工程中的应用	132
第一节 瞬变电磁法的基本理论	132
一、均匀大地的瞬变电磁响应	132
二、水平导电薄层的瞬变电磁响应	138
三、水平层状大地的瞬变电磁响应	140
四、局部良导体的瞬变电磁响应	144
第二节 瞬变电磁法的野外工作方法	148
一、几种常用装置及其特点	148
二、工作装置和回线大小选择	149
三、野外工作布置和测量	149
四、质量检查和评价	150
第三节 瞬变电磁法的资料整理和解释	151
一、资料整理	151
二、资料解释	151
第四节 瞬变电磁法在工程和环境地质调查中的应用	155

一、工程与环境物探中 TEM 的应用实例	155
二、瞬变电磁法的技术特点和存在的问题	159
参考文献	159
第七章 地下管线探测技术	160
第一节 地下管线的种类及探测方法	160
一、地下管线的种类	160
二、探测方法	161
第二节 用频率域电磁法探测地下管线	162
一、基本原理	162
二、建立电磁场的方法	162
三、最佳工作频率的选择	165
四、管线位置及埋深的确定	166
五、工作方法技术	167
六、应用实例	171
第三节 用脉冲时间域探地雷达探测地下管线	173
一、基本原理	173
二、野外工作方法	173
三、应用实例	174
第四节 其它物探方法在管线探测中的应用	176
一、红外线辐射法	176
二、超声波法	176
三、水声法	177
四、甚低频电磁法	177
参考文献	177
第八章 脉冲时间域探地雷达	178
第一节 引言	178
第二节 脉冲时间域探地雷达的基本原理	178
一、电偶极源的电磁场	179
二、电磁波的传播特点	180
三、一维探地雷达合成记录	182
第三节 探地雷达的野外工作方式	183
一、测量方式	183
二、探地雷达的技术参数	185
三、探地雷达仪器	188
四、探地雷达测量的设计	189
第四节 探地雷达的数据处理与资料解释	191
一、探地雷达的数据处理	191
二、雷达图像的增强处理	194
三、探地雷达的资料解释方法	195
第五节 探地雷达的应用	197
一、在工程地质勘察中的应用	197

二、在地基基础施工中的应用	200
参考文献	204
第九章 水文工程参数测井	205
第一节 引言	205
第二节 岩土层弹性波传播速度的测定	205
一、地震测井	206
二、声波测井	211
第三节 岩土层密度的测定	215
一、散射 γ 测井原理	215
二、 γ - γ 测井的刻度	217
第四节 岩土层含水量的测定	217
一、中子测井基本原理	218
二、氢元素特有的中子性质	218
三、中子测井确定含水率的方法	218
四、用电阻率测井确定土层的含水饱和度 (S_w)	219
第五节 岩土层孔隙度的测定	219
一、孔隙度的概念	219
二、确定孔隙度的测井方法	219
第六节 地层水矿化度的确定	222
一、利用自然电位测井资料求地层水矿化度	222
二、利用电阻率和孔隙度测井组合求地层水矿化度	223
第七节 含水层的动态分析及水文地质参数的测定	223
一、同位素示踪测井	223
二、流量测井	225
参考文献	236
第十章 环境地质调查中的地球物理方法	237
第一节 环境地质调查的内容	237
一、环境地质调查的主要范畴	237
二、我国当前环境地质调查的主要内容	238
三、环境地质调查的特点	239
第二节 地球物理方法在环境地质调查中的应用基础	240
一、环境地质调查的地球物理基础	240
二、地球物理方法在环境地质调查中应用的有效性	242
第三节 环境地质调查中地球物理方法的应用	245
一、大环境地质调查	245
二、现代环境地质变迁的调查	252
参考文献	259

第一章 高分辨率浅层地震勘探的有关问题

在工程及水文地质调查领域中,经常需要解决详细划分第四纪地层,确定目的层的深度、厚度、起伏形态和横向分布,探测异常体等地质问题,以及寻找溶洞、断层及断层破碎带。在煤田勘探中,需要追踪煤层,查找煤层间断的原因,确定断层及煤层厚度,圈定采空区边界等。为了精细地解决上述地质问题,必须采用高分辨率地震勘探技术。

目前,浅层高分辨率地震勘探已经取得了很大进展。在时间剖面上,0.2s处的反射波主频已达到1000Hz。在这样的高分辨率时间剖面上,小断层、小构造及岩性的变化都十分清楚。在理论上,人们已经认识到影响分辨率的各种因素,知道了提高分辨率所要采取的措施。其次,在野外数据采集方面,宽频带、可控震源、高频检波器、高采样率和大动态范围的记录仪器,以及采集站的应用都为提高分辨率创造了必要条件。在数据处理方面,出现了许多提高信噪比和分辨率的方法,取得了较好的处理效果。在解释方面,也发展了一系列解释方法和配套技术。

目前高分辨率地震勘探有待解决的主要问题如下。

1. 在采集阶段,降低野外噪声特别是高频噪声。
2. 解决强低频信号与弱高频信号被同时记录的问题。
3. 叠前分离强高频随机噪声与弱高频信号的问题。
4. 高保真处理问题。
5. 克服常规处理各环节对分辨率的不良影响。
6. 在理论上研究岩层对地震波的吸收的机制及低速带的作用。

尽管高分辨率地震勘探资料处理已经有了很大的进展,但它仍以水平叠加技术为主线。叠加技术在常规地震勘探的教科书中已有详细论述,这里不讨论。本章将着重讨论有关高分辨率的基本理论问题,水平叠加技术的各个环节对分辨率的影响,以及提高分辨率所要解决的特殊问题。因此,读者在阅读本章之前,应学过常规地震勘探的基本理论。

第一节 基本原理

地震勘探的分辨率分为垂向分辨率和横向分辨率两种。垂向分辨率是指沿垂直方向所能分辨的最薄地层的厚度;横向分辨率是指沿水平方向所能区分的最小地质体的尺寸。

在浅层地震勘探中,所要解决的大多数地质问题是地层的划分、查明小断层等,在解决这些地质问题过程中,地震记录的垂直分辨率显得尤为重要。在以后各节中,除非特殊说明,分辨率都是指垂直分辨率。

一、分辨率

关于地震记录的分辨率,可用图1-1来说明。由于在接收点R处所得到的记录是来自两个反射界面的反射波叠加的结果。因此,当振动的延续时间 Δt 小于两组反射波的时差 τ

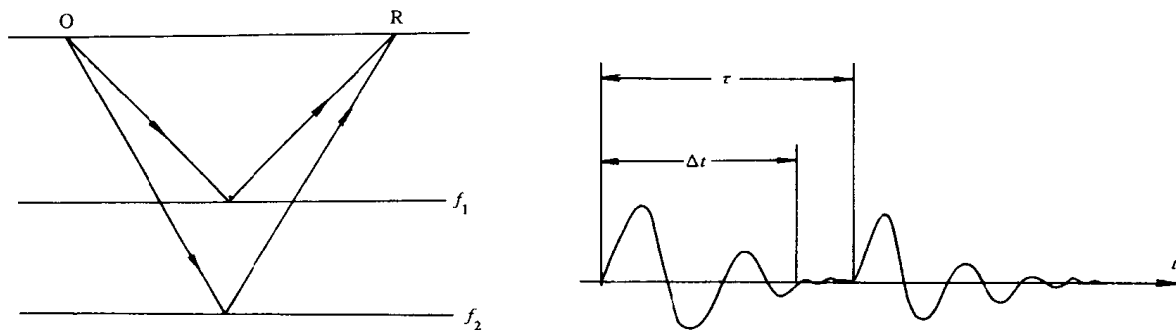


图 1—1 接收点 R 所记录到的地震记录是两个反射波叠加的结果

时，在地震记录上能够清晰地分辨出来自不同界面的两组反射，这时称这两个反射界面是可分辨的。当 Δt 大于 τ 时，两组反射构成了一组复合波，在地震记录上便无法区分这组复合波是来自一个反射界面还是来自两个反射界面，如图 1—2 所示。这时称这两个反射界面是不可分辨的。

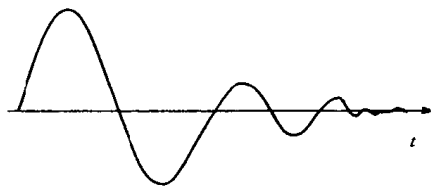


图 1—2 接收到的薄地层的复合波

由以上讨论可知，在地震记录上，两个反射界面可分辨与否取决于 τ 与 Δt 的比值。两组反射的时差 τ 是由地层的厚度和地震波传播速度决定的。这两个因素是客观存在的，是无法改变的。反射子波的振动持续时间 Δt 与其频带宽度和频率成分有关，而这些因素又取决于激发条件、接收条件以及地层对地震波的吸收。此外，通过信号处理也可以改变反射子波持续时间 Δt 。高分辨率地震

勘探的主要任务就是压缩反射子波的振动持续时间。从野外数据采集到室内处理，分析影响子波持续时间的每一个环节，克服这些影响因素，压缩子波的持续时间，从而达到提高分辨率的目的。

以上通过图 1—1 直观地说明了分辨率的概念。为了理论分析的方便，加之地震记录的褶积模型已得到广泛的承认，通常人们常用子波的分辨率来描述地震记录的分辨率。怎样定义子波的分辨率这仍是一个未解决的问题。常用的描述子波分辨率的准则有三个^[1]。

Rayleigh 准则如图 1—3 所示。该准则用波峰到波谷的距离表示分辨率极限 ($B/2$)。

Ricker 准则^[2]是用子波主瓣的两个拐点之间的宽度表示分辨极限。如图 1—4。

Widess 准则^[3]是用子波主频波长的 $1/8$ 作为分辨率的极限。

考虑问题的出发点不同，定义子波的分辨率也就不同。但地震记录的分辨率受子波的分辨率的制约，这是事实。子波在时间域的分辨率受三个方面的控制，即子波中央主瓣宽度，旁瓣比和旁瓣相位数。一般地说，子波主瓣宽度越窄，旁瓣能量越小，旁瓣相位数越少，子波的分辨率就越高。

二、子波分辨率与其频率成分的关系^[4]

根据信号分析理论，子波的主瓣宽度、旁瓣能量以及相位数，与子波的频带宽度、高低频成分有密切关系。认识这些关系对于高分辨率地震数据采集和处理十分重要。

地震子波比较复杂，要在理论上研究子波的主瓣宽度、旁瓣能量与频率的关系是比较

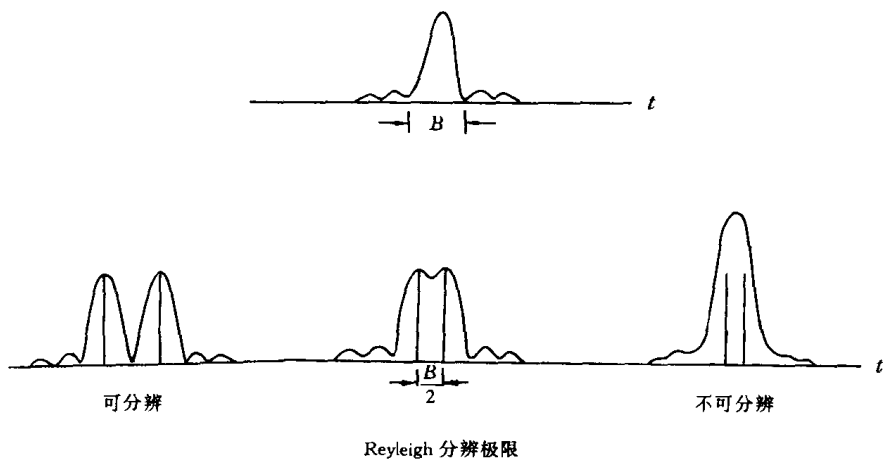


图 1—3 子波分辨率的 Rayleigh 准则

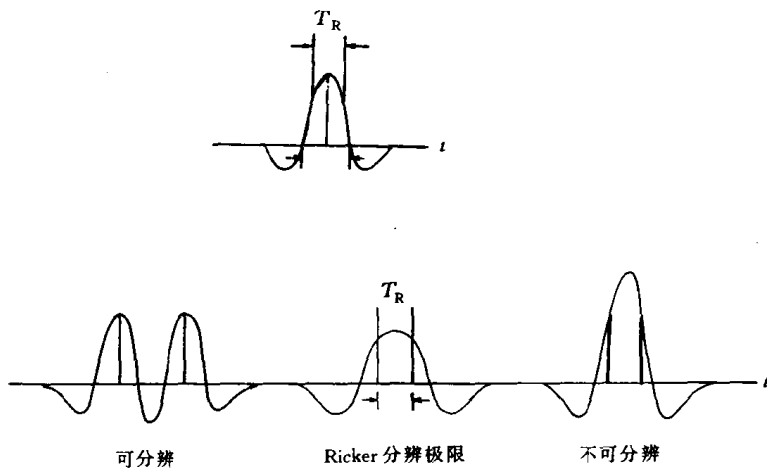


图 1—4 子波分辨率的 Ricker 准则

困难的。为简单起见，对脉冲函数进行带通滤波，滤除其低频和高频成分，考查其波形的变化，以了解主瓣宽度、旁瓣能量与频率成分的关系。

(一) 子波主瓣宽度与其频率成分的关系

对 $\delta(t)$ 脉冲进行带通滤波，于是输出为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} 1 \cdot F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (1.1.1)$$

其中 $F(f)$ 是带通滤波器的频率响应。

带通滤波器可以用两个高截频分别为 f_2 和 f_1 的低通滤波器之差来实现。因此

$$y(t) = y_2(t) - y_1(t) \quad (1.1.2)$$

这里 $y_2(t)$ 和 $y_1(t)$ 分别是高截频为 f_2 与 f_1 ($f_2 > f_1$) 的低通滤波器的脉冲响应。它们的表达式为^[5]:

$$y_2(t) = \frac{\sin 2\pi f_2 t}{\pi t} \quad (1.1.3)$$

$$y_1(t) = \frac{\sin 2\pi f_1 t}{\pi t} \quad (1.1.4)$$

于是

$$y(t) = \frac{\sin 2\pi f_2 t - \sin 2\pi f_1 t}{\pi t} \quad (1.1.5)$$

由三角函数的和差化积公式，上式可写为：

$$y(t) = \frac{2\cos\pi(f_1 + f_2)t \cdot \sin\pi(f_2 - f_1)t}{\pi t} \quad (1.1.6)$$

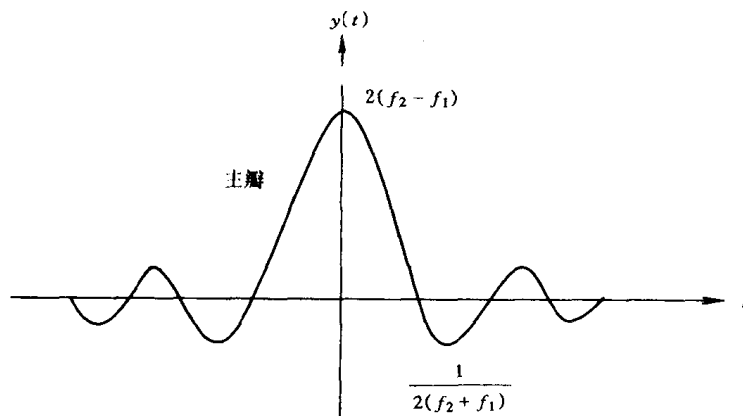


图 1—5 子波主瓣和尾振

其波形如图 1—5 所示。当 $t=0$ 时， $y(0) = 2(f_2 - f_1)$ 为子波的最大峰值。下面考察子波 $y(t)$ 的零点。由式 (1.1.6) 可知，当 t 取下列各值时， $y(t) = 0$ 。令 $\pi(f_2 + f_1)t = m\pi + \frac{\pi}{2}$ ，则

$$t = \frac{m + \frac{1}{2}}{f_2 + f_1}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1.7)$$

又令 $\pi(f_2 - f_1)t = n\pi$ ，则

$$t = \frac{n}{f_2 - f_1}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1.8)$$

显然, $t = 1/2 (f_2 + f_1)$ 是绝对值最小的零点。

定义主瓣为子波 $y(t)$ 在靠近原点的两个零点之间的部分。这两个零点之间的距离为主瓣宽度, 主瓣两旁部分为旁瓣。显然主瓣宽为:

$$\text{主瓣宽} = \frac{1}{f_2 + f_1} \quad (1.1.9)$$

由上式可以看到, 频率 f_1 和 f_2 越高, 主瓣越窄。这表明, 当保持带宽不变时, 随着通带向高频端移动, 主瓣变窄。

把上式改写为:

$$\text{主瓣宽} = \frac{1}{f_1 + B + f_1} = \frac{1}{2f_1 + B} \quad (1.1.10)$$

其中 B 为子波带宽, $B = f_2 - f_1$ 。

由 (1.1.10) 式知, 当保持低截频不变时, 随着带宽的增加, 主瓣变窄。这说明子波的频带越宽, 分辨率越高。

(二) 旁瓣相位数与频率成分的关系

由 (1.1.7) 和 (1.1.8) 可以看到, 零点之间的间隔与 $(f_2 + f_1)$ 和带宽 $(f_2 - f_1)$ 密切相关。频率越高, 带宽越宽, 在单位时间内零点就越多, 即旁瓣的振荡频率就越高, 其相位数越大。

(三) 旁瓣比与频率成分的关系

定义旁瓣比为旁瓣能量与主瓣能量之比。

定义主瓣能量为:

$$E_{\pm} = 2 \int_0^{\frac{1}{2(f_1+f_2)}} |y(t)|^2 dt \quad (1.1.11)$$

定义旁瓣能量为:

$$E_{\text{旁}} = 2 \int_{\frac{1}{2(f_1+f_2)}}^{+\infty} |y(t)|^2 dt \quad (1.1.12)$$

根据 Parseval 定理, 子波的总能量

$$\begin{aligned} E &= \int_{-\infty}^{+\infty} |y(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |Y(f)|^2 df \\ &= 2 \int_{f_1}^{f_2} df = 2(f_2 - f_1) \end{aligned} \quad (1.1.13)$$

显然,

$$E = E_{\pm} + E_{\text{旁}} \quad (1.1.14)$$

下面考察主瓣能量

$$E_{\pm} = 2 \int_0^{\frac{1}{2(f_1+f_2)}} \frac{4 \cos^2 \pi(f_1+f_2)t \cdot \sin^2 \pi(f_2-f_1)t}{\pi^2 t^2} dt \quad (1.1.15)$$

把上式中的三角函数展开为幂级数并略去高阶项有：

$$E_{\pm} \geq \frac{8}{\pi^2} \int_0^{\frac{1}{2(f_1+f_2)}} \frac{(1 - a^2 \frac{t^2}{2})^2 (bt - \frac{b^3 t^3}{6})^2}{t^2} dt \quad (1.1.16)$$

其中 $a = \pi(f_1+f_2)$, $b = \pi(f_2-f_1)$

展开 (1.1.16) 式分子多项式，并提取公因式 bt ，舍去高阶项，经化简得^[4]：

$$E_{\pm} \geq 8 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi^2}{18} \right) \frac{(f_2 - f_1)^2}{f_1 + f_2} \quad (1.1.17)$$

下面讨论该不等式的意义。

1. 当 f_1 减小时，该不等式右边增加。因此，由该不等式知主瓣能量也随之增加。
2. 考察旁瓣比：

$$\frac{E_{\text{旁}}}{E_{\pm}} = \frac{E}{E_{\pm}} - 1 \quad (1.1.18)$$

考虑到式 (1.1.13) 和不等式 (1.1.17) 有：

$$\begin{aligned} \frac{E}{E_{\pm}} &\leq 2(f_2 - f_1) \frac{1}{c} \cdot \frac{f_1 + f_2}{(f_2 - f_1)^2} \\ &= \frac{2}{c} \frac{f_1 + f_2}{f_2 - f_1} \end{aligned} \quad (1.1.19)$$

其中，常数 $c = 8 \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi^2}{18} \right)$ 。

把不等式 (1.1.19) 改写为：

$$\frac{E}{E_{\pm}} \leq \frac{2}{c} \cdot \frac{2f_1 + B}{B} \quad (1.1.20)$$

由上式知，当频宽不变时，随着 f_1 的减小，旁瓣比降低。这表明子波的低频成分在减小旁瓣比方面起重要作用。

3. 由不等式 (1.1.20) 知，随着频宽的增大，旁瓣比减小。

下面讨论旁瓣比与高频成分的关系。把式 (1.1.15) 中的三角函数展开成幂级数，并略去高阶项，只保留第一项有：

$$E_{\pm} = 8(f_2 - f_1)^2 \int_0^{\frac{1}{2(f_1+f_2)}} dt$$

$$= \frac{4(f_2 - f_1)^2}{f_1 + f_2} \quad (1.1.21)$$

于是：

$$\begin{aligned} \frac{E_{旁}}{E_{主}} &= \frac{E}{E_{主}} - 1 \\ &\geq \frac{f_1 + f_2}{2(f_2 - f_1)} - 1 \end{aligned} \quad (1.1.22)$$

由上述不等式知，当频宽不变时，随着频率 f_1 和 f_2 的增加，旁瓣比增大。其意义在于，在不增加频带宽度的条件下，一味的提高高频，不但不能提高分辨率，反而降低分辨率。

综上所述，有如下结论：

1. 随着频带宽度的增加，子波主瓣宽度减小，旁瓣比减小。其意义在于频带越宽，子波的分辨率越高。
2. 低频成分在减小旁瓣比方面起重要作用。这表明要提高分辨率必须保留低频成分。
3. 随着带宽增加，旁瓣的振荡频率增大，但旁瓣能量减小。
4. 当频宽不变时，随着频率的增加，旁瓣的振荡频率增大，且旁瓣比增大。反映在地震剖面上就是同相轴增多。这即意味着在不增加频带宽度的条件下，高频不但不能提高分辨率，反而降低分辨率。
5. 随着频率的提高，子波主瓣宽度减小。
6. 高频既有利于提高分辨率又不利于提高分辨率，关键是带宽。在保护低频的条件下，提高高频，从而展宽了带宽，这样才能提高分辨率。

尽管以上只就子波的相位为零相位，振幅谱为常数的情况证明了子波的频带宽度、高低频成分对子波波形的影响，但所得结论对于定性了解频宽、高低频成分对子波波形的影响这一目的而言，可以推广到一般情况。

三、分辨率与信噪比之间的关系

在无噪声的情况下，地震记录的分辨率取决于子波的分辨率。子波的分辨率与其频带宽度、高低频成分有密切关系。一般地说，子波的频带越宽，高低频丰富，子波的主瓣越窄，旁瓣比越小，其分辨率也就越高。除了这些因素之外，噪声也影响地震记录的分辨率，噪声对地震记录分辨率的影响表现在三个方面。首先，噪声本身降低了记录的分辨率。其次，当噪声存在时，反褶积在提高分辨率的同时，大大降低了记录的信噪比。为了维持一定的信噪比，分辨率的提高受到限制。为了减小噪声的影响，在反褶积之前必须先进行去噪处理。然而，现有绝大多数去噪方法都具有滤波的性质，这些方法在去噪的同时，也损失了反射信号的低频或高频成分，使反射波的频带变窄，结果导致分辨率的降低。为了深入研究噪声对分辨率的影响，下面给出含噪记录分辨率的定义。

(一) 在有噪声情况下，地震记录分辨率的定义

Widess 给出了一种含噪记录分辨率的定义^[6]。考虑到下文论证的需要，这里对其进行了修改。

设地震记录为：