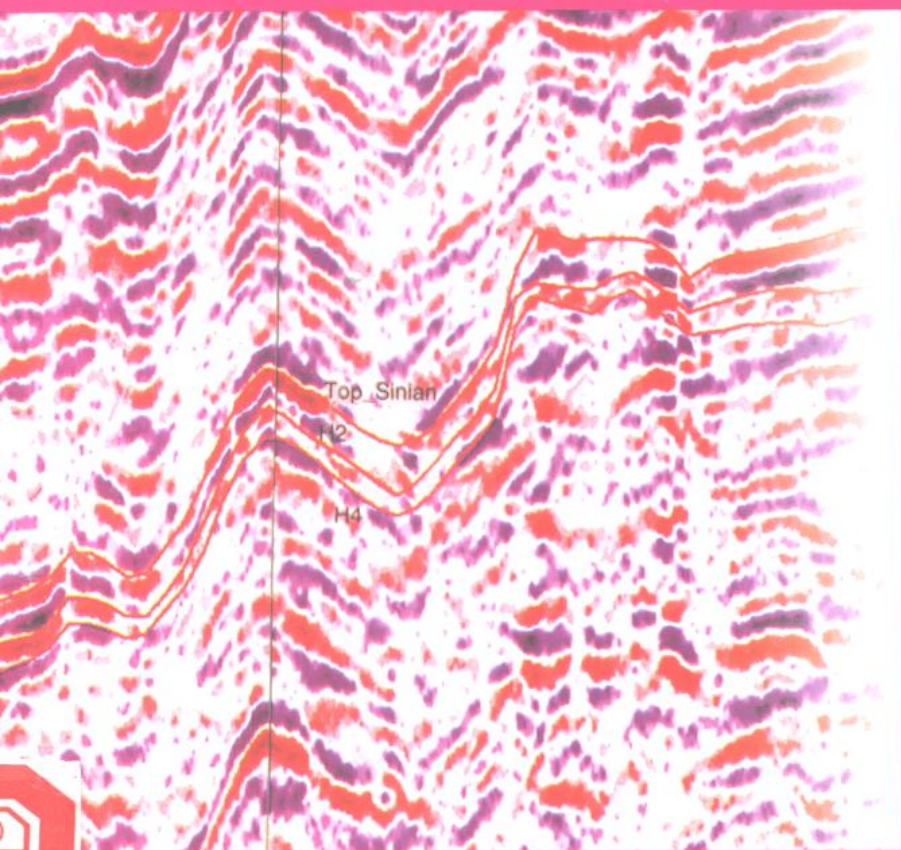


现代油气勘探理论  
和技术培训教材

中国石油天然气总公司勘探局 编

# 地震勘探新技术

八



石油工业出版社

|     |         |
|-----|---------|
| 登录号 | 135180  |
| 分类  | P631.16 |
| 种次号 | 068     |

现代油气勘探理论和技术培训教材·八

# 地震勘探新技术

中国石油天然气总公司勘探局 编

5971/26



石油大学0135066

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书为现代油气勘探理论和技术培训教材丛书之一,主要包括高分辨率地震勘探、三维地震勘探、地震资料储层预测、多波地震勘探、井间层析成像技术,共五章。其特点是着重概念,图幅较多,公式较少。

本书可供油气勘探科技人员及大专院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

地震勘探新技术/中国石油天然气总公司勘探局编.  
北京:石油工业出版社,1999.10  
现代油气勘探理论和技术培训教材  
ISBN 7-5021-2631-7

I. 地…

II. 中…

III. 地震勘探-新技术

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 39496 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开本 6.25 印张 160 千字 印 1—3000

1999 年 10 月北京第 1 版 1999 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2631-7/TE·2114

定价:18.00 元

# 《现代油气勘探理论和技术培训教材》

## 编 委 会

主 任 邓隆武

副主任 朱筱敏

委 员 (按姓氏笔划排序)

孙镇城 张厚福 张 霞 陆克政 李承楚 金之钧

赵澄林 尚作源 钟宁宁 欧阳健 周家尧 高德利

## 《地震勘探新技术》

著 者 李承楚 吴 律

## 序

石油工业的迅速稳步发展必须依靠先进的油气勘探理论和能切实解决生产难题的技术。中国数十年油气勘探实践已证明,油气勘探方面的理论发展和技术进步在深入油气勘探、增加油气储量、提高勘探效益等方面发挥着极为重要的作用。

自 1978 年以来,中国原油产量已超过亿吨,并保持稳步发展的势头,成为世界产油大国之一。中国油气资源是丰富的,但与世界石油资源平均探明程度和常规天然气资源平均探明程度相比,中国油气资源的探明程度还很低,所以油气资源勘探潜力还比较大。众所周知,对于具有复杂地质结构的中国含油气盆地,随着勘探程度的加深,油气资源勘探的难度越来越大。在本世纪末至下世纪初,中国石油工业的发展都将坚持“稳定东部、发展西部、油气并举,以及合理利用国外油气资源”的勘探战略。

为了贯彻实施中国石油工业发展的战略方针,使中国油气产量及储量处于世界前列,就必须发挥科学技术是第一生产力的作用,造就一大批既懂先进油气勘探理论,又熟悉现代油气勘探技术;既有丰富的油气勘探实践经验,又能从事石油勘探经营管理的油气勘探高级人才。为此,中国石油天然气总公司勘探局先后多次组织各油田的勘探处长、勘探公司经理和总地质师进行现代油气勘探理论和技术以及经营管理的继续教育。为了更好地提高油气勘探高级管理技术人才的油气勘探理论和技术水平,中国石油天然气总公司勘探局决定,成立《现代油气勘探理论和技术培训教材》编委会,公开出版相关系列教材。本套教材共计 11 册,包括 6 册油气勘探理论基础、4 册油气勘探技术和 1 册油气勘探经营管理。即第一册《现代地层学在油气勘探中的应用》、第二册《石油构造地质学》、第三册《储层沉积学》、第四册《层序地层学原理及应用》、第五册《石油地质学新进展》、第六册《石油地球化学进展》、第七册《油气资源评价技术》、第八册《地震勘探新技术》、第九册《油气钻探新技术》、第十册《测井新技术与油气层评价进展》和第十一册《油气勘探经营管理》。与其他教材相比,本教材着重反映国内外油气勘探新理论、新方法、新技术,结合国内外油气勘探实例分析,解决实际问题。希望这套教材的出版能在提高广大油气勘探技术和管理人才的油气勘探综合素质方面发挥积极的作用。

高瑞祺

1997 年 4 月

## 前 言

由于地震勘探工区越来越复杂,目的层更深,且向油田开发延伸,对地震勘探新方法、新技术的研究和应用更加迫切。三维和高分辨率地震勘探已是目前复杂地区的主要勘探方法,不仅在寻找更小的构造和异常地质体,还试图用于层序地层学和储层预测方面。地震资料储层预测技术也正在使地震资料的更多信息得到应用,试图用地震资料求取储层参数。多波地震勘探和井间层析成像技术是正在研究的新方法。多波地震勘探方法不仅利用纵、横波联合可直接找油气、确定储层参数,利用横波分裂还可求取裂隙参数。井间层析成像可用于油田开发。这些方法都处于研究、试验阶段。近年来,地震新方法新技术发展很快,内容也很广,本书只对几种主要方法技术作一简单介绍。高分辨率地震勘探这一章主要参考李庆忠、俞寿鹏有关这方面的专著。三维地震勘探主要参考马在田和国外的几本专著的有关章节。地震资料储层预测主要参考朱广生编写的有关地震资料储层预测的书。多波地震勘探主要是根据董敏煜负责的石油大学“八五”多波地震勘探科研项目的成果而编写的。井间层析成像是根据吴律负责的石油大学“八五”科研项目成果而编写的。

本书第一、二、三、四章由李承楚编写,第五章由吴律编写。全书由董敏煜审阅。

由于内容涉及面广,篇幅有限,有不当之处,请指正。

著者

1999年4月

# 目 录

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| <b>第一章 高分辨率地震勘探</b> .....   | (1)  |
| 第一节 高分辨率地震勘探概述.....         | (1)  |
| 第二节 地震勘探分辨率.....            | (3)  |
| 第三节 高分辨率地震勘探资料的采集.....      | (7)  |
| 第四节 高分辨率地震勘探资料处理.....       | (8)  |
| 第五节 高分辨率地震勘探资料解释 .....      | (19) |
| <b>第二章 三维地震勘探</b> .....     | (25) |
| 第一节 三维地震勘探概述 .....          | (25) |
| 第二节 三维地震勘探资料采集 .....        | (27) |
| 第三节 三维地震勘探资料处理 .....        | (29) |
| 第四节 三维地震勘探资料解释 .....        | (34) |
| <b>第三章 地震资料储层预测方法</b> ..... | (42) |
| 第一节 岩石物理性质 .....            | (42) |
| 第二节 地震反演 .....              | (50) |
| 第三节 岩性预测(纵、横波联合反演).....     | (52) |
| 第四节 储层参数预测 .....            | (53) |
| 第五节 烃类检测 .....              | (55) |
| 第六节 四维地震 .....              | (62) |
| <b>第四章 多波地震勘探</b> .....     | (63) |
| 第一节 多波地震勘探概述 .....          | (63) |
| 第二节 多波地震勘探的理论基础概述 .....     | (63) |
| 第三节 多波地震资料采集 .....          | (68) |
| 第四节 多波地震勘探资料处理 .....        | (71) |
| 第五节 多波地震资料解释和反演 .....       | (79) |
| <b>第五章 井间层析成像</b> .....     | (84) |
| 第一节 井间层析成像概述 .....          | (84) |
| 第二节 层析原理 .....              | (85) |
| 第三节 井间地震资料处理 .....          | (87) |
| 第四节 井间地震资料采集 .....          | (88) |
| 第五节 实例 .....                | (90) |
| <b>参考文献</b> .....           | (92) |

# 第一章 高分辨率地震勘探

## 第一节 高分辨率地震勘探概述

地震勘探技术成为勘探的主要物探技术，主要在于它精度高。随着勘探目标复杂程度的增加（目标变小、隐蔽、类型多），要求地震勘探有更高的精度，这就出现了高分辨率地震勘探。它比常规的地震勘探能分辨更薄、更小的目的层，因此受到地震勘探工作者和地质工作者的极大重视。高分辨率地震勘探技术发展也很快，成为目前复杂地区的主要地震勘探技术，不仅应用到勘探上，也应用到储层和油藏描述等方面。

国外高分辨率地震勘探发展很快，前苏联西伯利亚一条高分辨率处理后的剖面在1.9s左右地震波主频达到120Hz，在1.93s看到水平反射（李庆忠，1993），见图1-1。国内经过多年努力也达到了较高的水平，见图1-2。

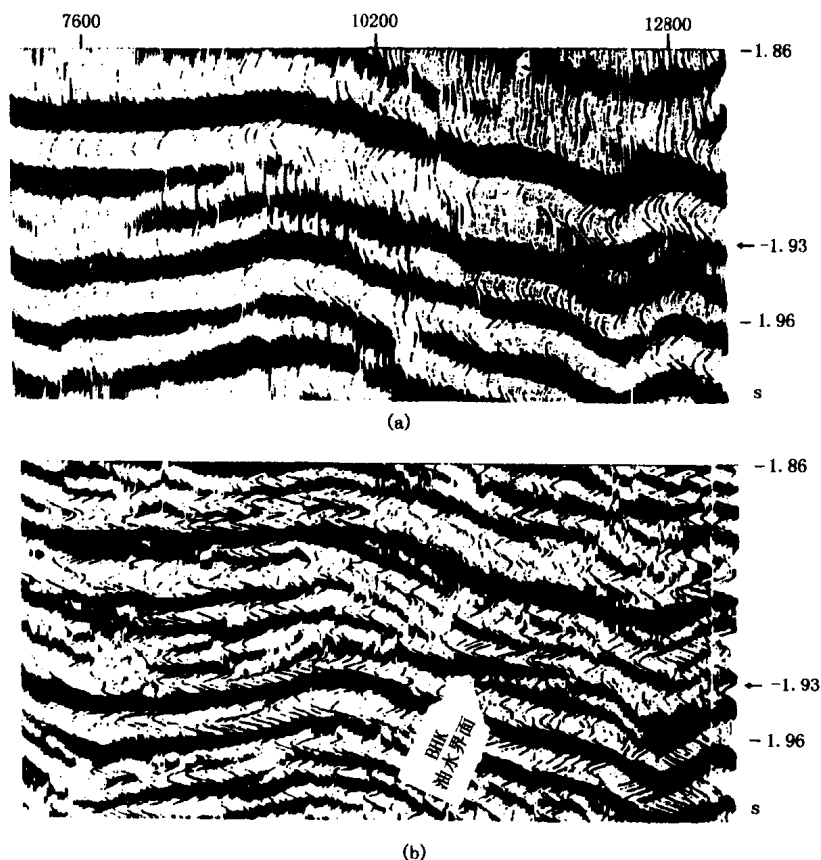


图 1-1 高分辨率勘探的例子

(a) 普通 24 次覆盖的水平叠加剖面。主频 55Hz，信噪比不错，但分辨率不够，看不到油水接触面。

(b) 采用时间场共深度面元叠加的结果（折合 360 次覆盖）。

主频 120Hz，可以明显看到 1.93s 处有产状水平的油水分界面，剖面已转化为合成波阻抗



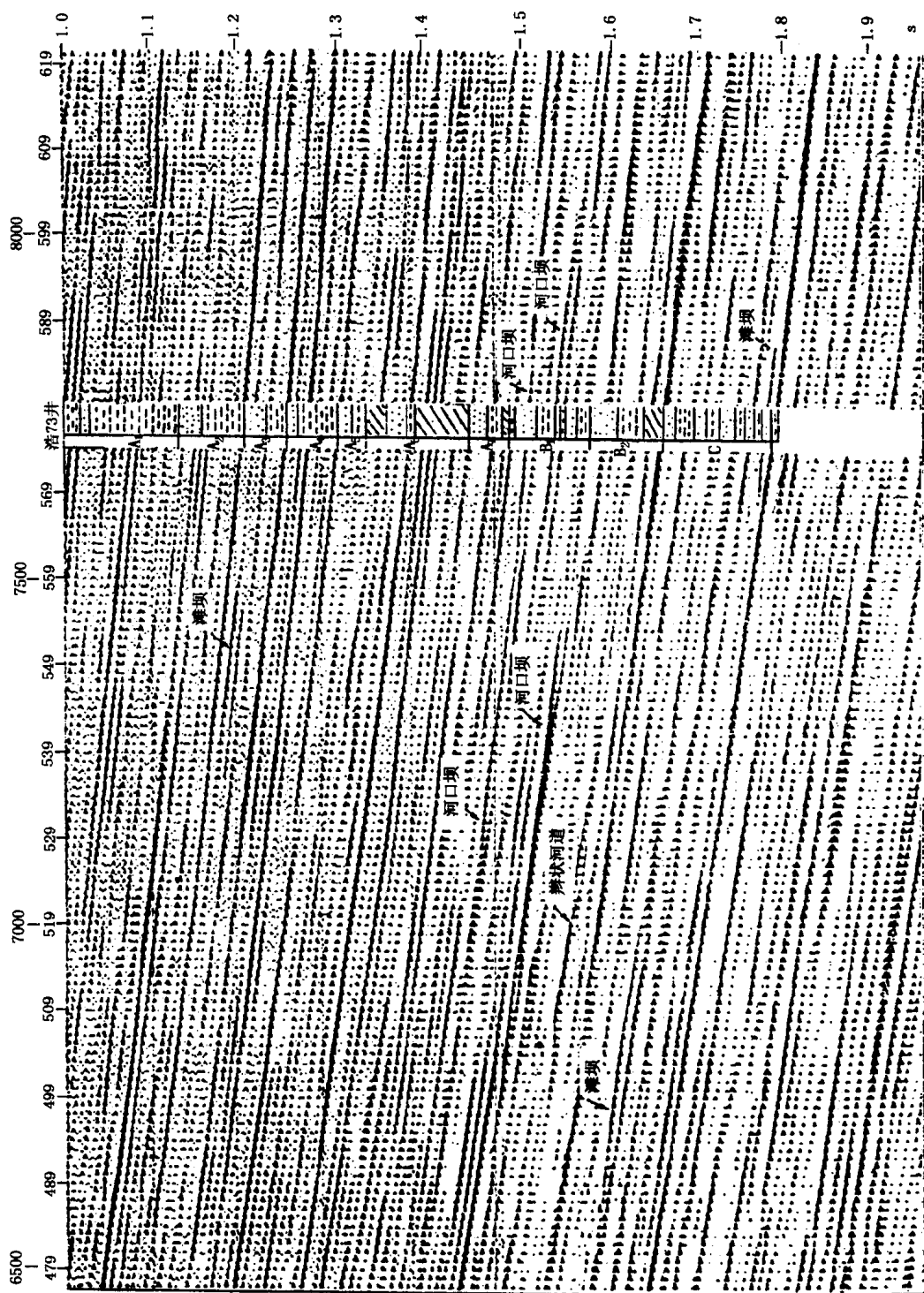


图 1-2 高分辨率剖面

本章主要介绍高分辨率的基本概念、采集、处理和解释。

## 第二节 地震勘探分辨率

地震勘探分辨率包括垂直分辨率和水平分辨率,只有垂直分辨率和水平分辨率都提高了,地震勘探的精度才提高了。

### 一、地震勘探分辨率的概念、准则

#### 1. 垂直分辨率的定义

垂直分辨率是指可分辨垂向地层厚度的时间,一般要用地震子波的延续时间来定义,见图 1-3。设一组地层中,某层的厚度为  $\Delta h$ , 速度为  $v_2$ ,

$\Delta t = \frac{2\Delta h}{v_2}$  为地震波在地层中传播的双程旅行时,即顶、

底面两个子波的到达时差。设地震子波延续时间为  $\Delta \tau$ , 那么当  $\Delta \tau > \Delta t$  时可分辨顶、底层; 见图 1-4, 当  $\Delta \tau < \Delta t$  时, 顶、底面的反射波叠加, 产生干涉现象;  $\Delta \tau$  减小, 叠加波形复杂, 难于分辨顶、底界面上产生的反射波。

#### 2. 分辨率的准则

各个地震子波彼此重叠到什么程度, 地震记录就不可分辨顶、底界面呢? 对此, 不同的学者有不同的准则, 这里只介绍最常用的瑞利 (Rayleigh) 准则: 即两个子波的到达时差  $\Delta t$  大于或等于地震子波的半个视周期时 (见图 (1-5(d))), 则这两个子波是可分辨的, 否则是不可分辨的 (见图 1-5(b))。由于子波的延续时间

可用波长  $\lambda = VT$  来表示, 所以, 当地层厚度为  $\frac{\lambda}{4}$  时,

顶、底反射波同相叠加, 振幅产生极大值, 这时的地层厚度叫调谐厚度, 这也是反射分辨率的极限 (俞寿朋, 1993)。

关于其它准则, 可参考有关书籍, 这里不再列举。

#### 3. 水平分辨率定义 (横向分辨率)

水平分辨率是指可分辨两个地质体之间的最小水平距离, 见图 1-6。

#### 4. 水平分辨率范围

一般用菲涅耳带来描述水平分辨率。根据物理地震学观点, 地面检波点接收到的反射信号不是来自一个点, 而是来自一个面上的所有绕射波叠加的结果, 见图 1-7。若  $\overline{OR_0} = h$ ,  $\overline{OR_1} = h + \frac{\lambda}{4}$ , 那么半径  $R_0R_1$  的范围是菲涅耳带, 小于这个范围记录到的反射波不可分辨, 大于这个范围反射波才可分辨, 它的半径  $\overline{R_0R_1} = L_1$  叫第一菲涅耳带半径, 见式 (1-1),  $\overline{R_0R_2}$ ,  $\overline{R_0R_3}$  表示第二、三菲涅耳带半径。

$$L_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \lambda h} \quad (1-1)$$

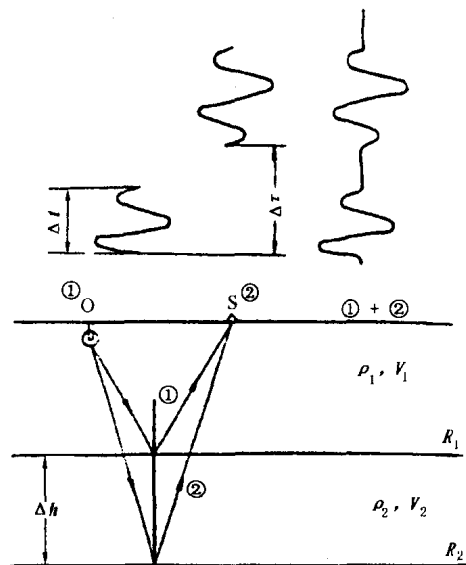


图 1-3 岩层较厚, 顶、底反射可以分辨

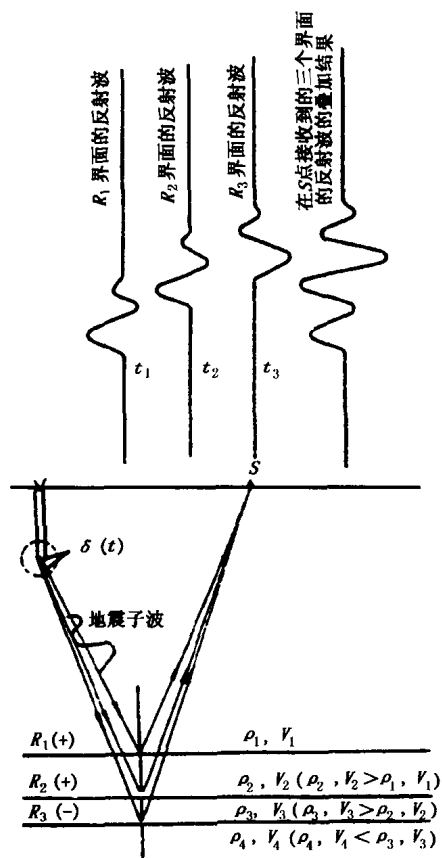


图 1-4 岩层较薄，三个反射波叠加，不易分辨

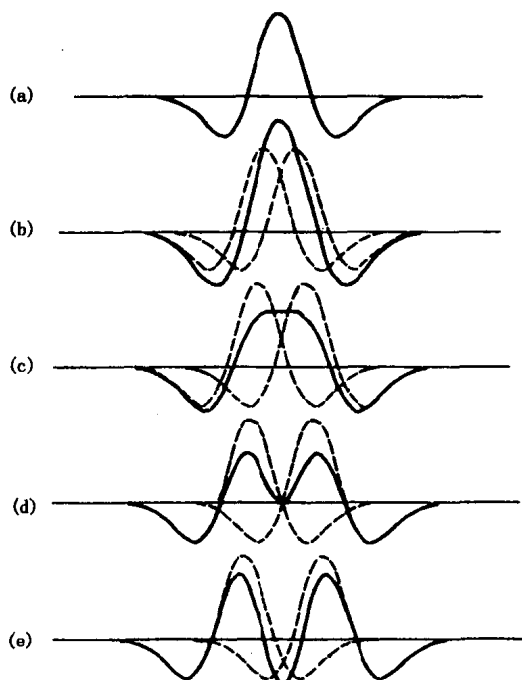


图 1-5 Rayleigh 准则和 Ricker 准则

- (a) 子波；(b) 两个子波到达时间差较小，不能分辨；  
(c) 时间差达到 Ricker 极限；  
(d) 时间差达到 Rayleigh 极限；  
(e) 时间差较大，易分辨

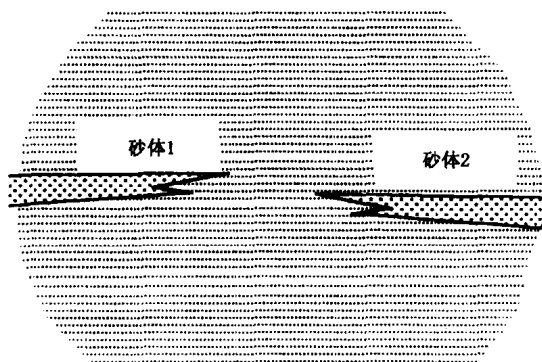


图 1-6 两个砂体之间的距离

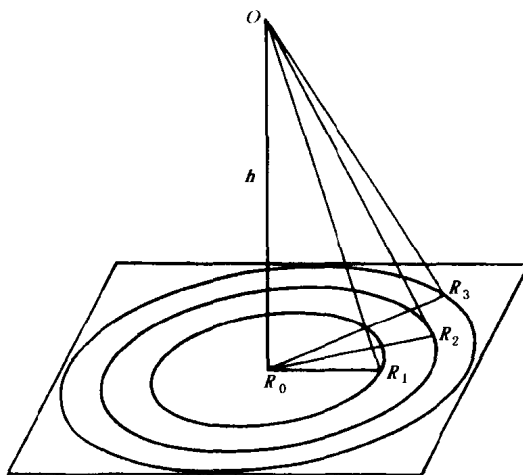


图 1-7 非涅耳带示意图

## 二、影响分辨率的因素

影响地震分辨率的因素很多，这里介绍一些主要因素。

### 1. 地震子波

#### 1) 地震子波延续时间

一般情况下，在解释地震剖面对比层位时，地震记录与测井曲线不能一一对应，与地质

柱状剖面也不完全符合，一个 1000m 的井段往往可以划分几百个薄层，一段 1s 长的记录却只有十几个波峰和波谷，而 1s 长的时间对应的厚度往往超过 1000m，因此每个波峰、波谷并不只代表某一个界面，而是多个界面反射波联合作用的结果，这是因为每个反射波都有延续时间，如图 1-8（俞寿朋，1993）中的  $R$  为反射系数，实际上地震子波有一定的延续时，见图 1-8 中 1~15，叠加以后形成记录道  $SS$ ， $SS$  是一个复杂的波形，无法分辨层位，如果每个反射波是一个尖脉冲，那么各个反射波就不会互相影响而分辨不出来。

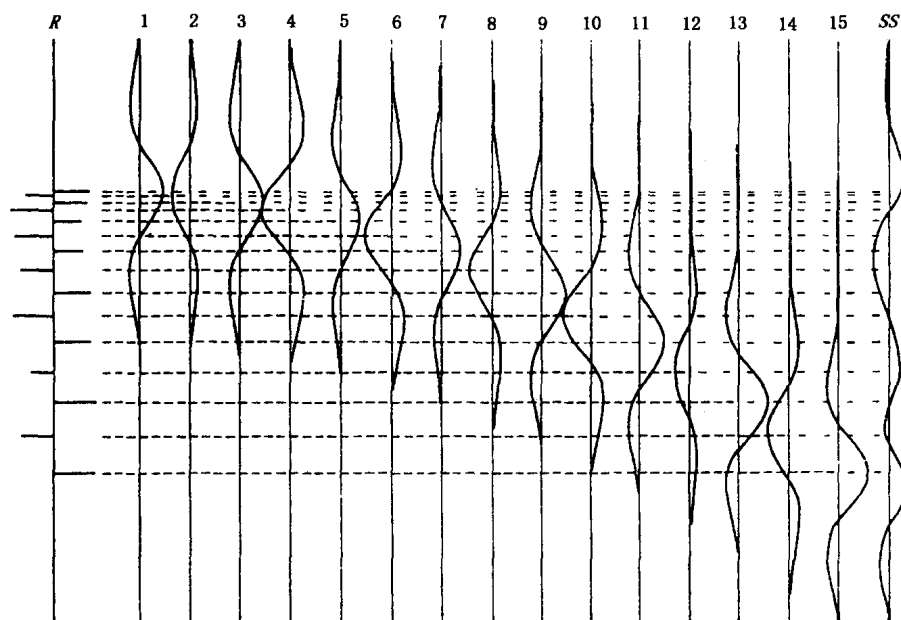


图 1-8 合成记录的简单制作过程

$R$ —反射系数序列；1~15—子波； $SS$ —合成记录

俞寿朋在《高分辨率地震勘探》一书中根据以上的论述得出了几点重要的结论，这些结论是：

- (1) 从地震记录上一般不能辨认出反射界面的位置，也看不出有多少反射界面；
- (2) 地震记录上不能看出子波的形状；
- (3) 地震记录上某个波峰、波谷不一定能代表某个反射界面；
- (4) 由波峰或波谷的幅度大小一般不能确定反射系数的大小和符号（极性）；
- (5) 压缩子波长度是提高纵向分辨率的关键。

以上的几点结论对了解地震记录的实质是至关重要的。

## 2) 地震子波的相位

相同的振幅谱，对应不同的相位谱，子波形状不同，经过研究得出的结论是：具有相同振幅谱的各种子波中，零相位子波的分辨率最高，见图 1-9。在频带 10~80Hz 时，零相位子波分辨率很高，见图 1-9 下部。但在同样频带内，混合相位子波和最小相位子波分辨率都不高（李庆忠，1993）。

## 2. 记录仪器设备和观测系统

在野外采集过程中，检波器、记录仪器设备、采样间隔、记录道数、覆盖次数、震源等都影响地震记录的分辨率。

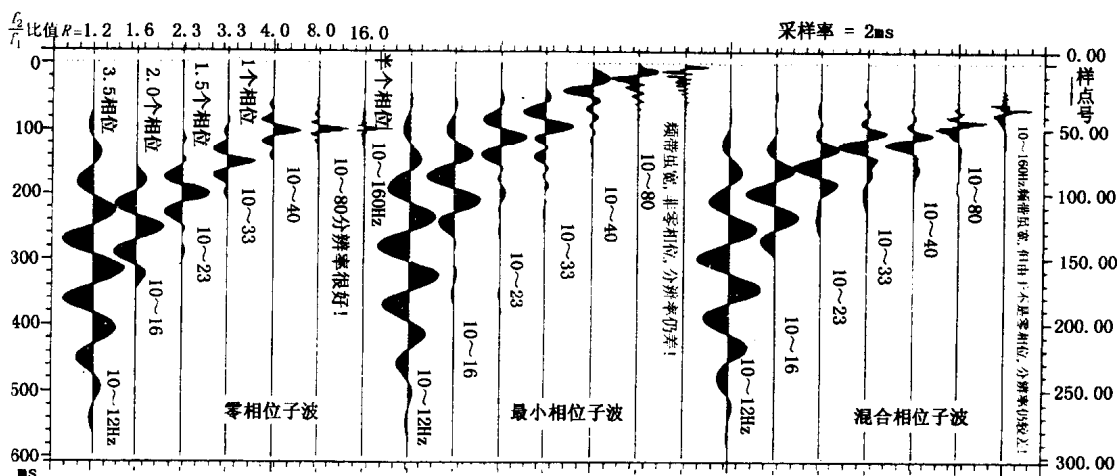


图 1-9 三组不同相位特性地震子波的波形图

### 3. 影响分辨率的地质因素

(1) 岩石的吸收作用。实际地震波的传播并不是完全弹性的，在地震波传播过程中，随着传播距离的增大，高频成分衰减，这个过程称为吸收衰减，它使地震波的分辨率降低。吸收衰减与地震波传播介质的物理性质有关，这种物理性质称为品质因数，用符号  $Q$  表示， $Q$  的表达式为

$$Q = \frac{E}{2\pi\Delta E} \quad (1-2)$$

式中， $E$  是总能量， $\Delta E$  是每振动一周期的能量损耗。

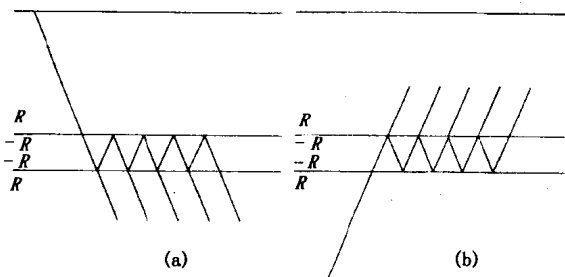


图 1-10 层间反射示意图

(a) 入射波；(b) 反射波

根据  $Q$  的表达式可知， $Q$  值越小，振幅衰减越厉害，不同的岩石的  $Q$  值不同。实际上， $Q$  值是在一个范围内，有的文献给出下列数据，风化岩石，含气砂岩  $Q$  值为 9，正常岩石  $Q$  值为 55 (李庆忠，1993)。

(2) 其它因素 (例如层间多次反射等)。实际地震工作中遇到的是层状介质，在各个小层之间要产生许多多次波，见图 1-10，这些地层大多是薄层，使各层之间的多次波产生叠加，降低了分辨率 (俞寿朋，1993)。

还有表层的影响。地震工区的表层都有低速层，速度在 300~800m/s，使地震波衰减严重，影响分辨率。

### 三、分辨率与信噪比的关系

地震记录上有各种噪声，例如面波、声波、随机干扰、多次波等等，这些噪声若不消除，会大大影响地震记录分辨率，所以谈到提高分辨率问题，首先要消除噪声，提高信噪比。在野外采集，室内处理中，消除噪声总是十分重要的事，对高分辨率地震勘探就更重要。如图 1-11，地震原始单炮记录上有各种干扰。

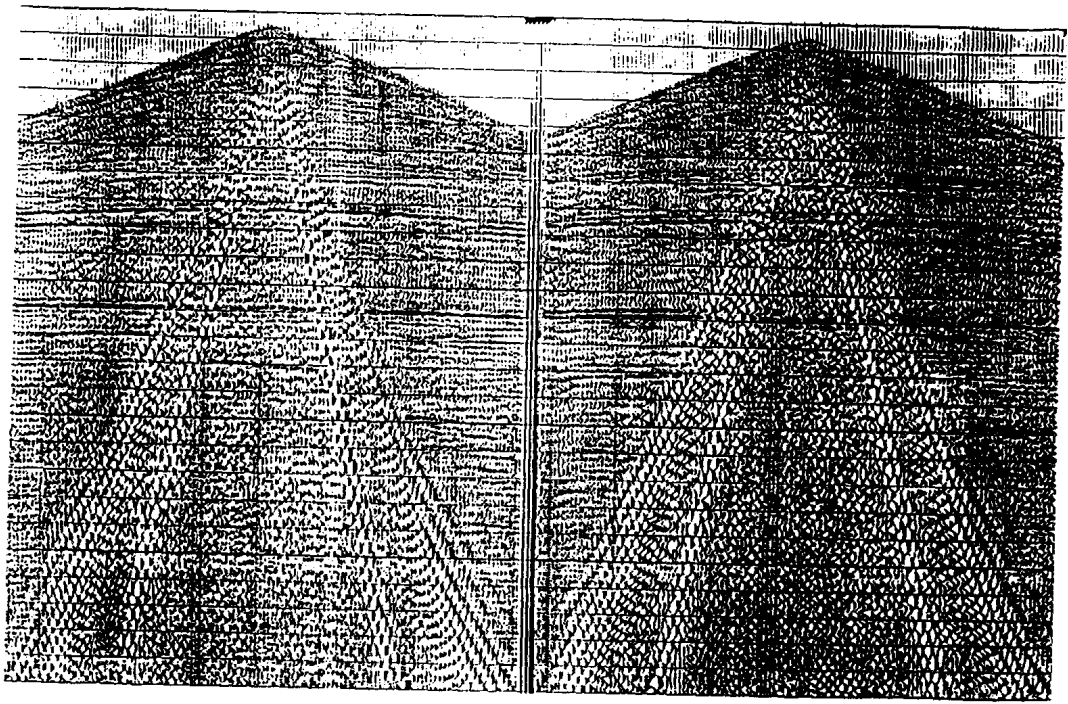


图 1-11 某测线原始单炮记录

### 第三节 高分辨率地震勘探资料的采集

高分辨率勘探首先在采集上要尽可能地扩展记录信号频谱的宽度和最大可能地提高信噪比，尤其是要保持高频成分，在野外的各个环节都要注意。

#### 一、地震波的激发

高分辨率地震对震源的要求有：比常规震源有更宽的频谱，在此频带范围内振幅谱向高频方向增强，性能稳定（俞寿朋 1993）。现在一般用两种震源。

##### 1. 可控震源

可根据需要设定扫描频带，通过非线性扫描提高高频成分，通过变频带扫描技术来达到理想的振幅谱。

##### 2. 炸药震源

炸药震源要控制好炸药量，炸药包的深度爆炸最好在吸收很小的介质中进行。

#### 二、接收

##### 1. 检波器

检波器要求灵敏度高，自然频率高，检波器的埋置十分重要，一定要与地面耦合好，近年来许多地区都是把检波器埋在地面以下几米深度处，以保证安置条件。

##### 2. 组合

组合会降低地震波的分辨率，但组合可压制噪声，要适当的减小组合内距，增加组合个数，选择好组合串接方式。

### 3. 采样间隔

采样间隔要尽量小,一般常规地震记录采样间隔是 4ms,高分辨率地震勘探要求采样间隔 2 ms 或 1ms, 0.5ms。

## 三、观测系统

### 1. 覆盖次数

覆盖次数要尽可能高。

### 2. 最大炮检距、最小炮检距

最大、最小炮检距都不要太大。

### 3. 共深度点点距

共深度点点距要小,所以检波器间距要小。

## 第四节 高分辨率地震勘探资料处理

### 一、高分辨地震资料处理内容

#### 1. 处理特点

在处理时,要保护高频成分和展宽频带,波形要统一,时间对齐,提高信噪比,压缩子波,零相位化,提高纵向分辨率,作好成象,提高横向分辨率(李庆忠,1993)。

#### 2. 处理内容

除了常规处理中必须做的处理外,有几个主要的处理内容,高精度动校正,静校正,高分辨率速度分析,反褶积处理,去噪处理,叠加和偏移处理,波阻抗反演或积分道。

### 二、高分辨率速度分析和动、静校正

#### 1. 高分辨率速度分析

速度分析一直在地震数字处理中至关重要,各种提取速度中有的用作处理中的参数,有的用来划分岩性,甚至计算孔、渗、饱参数等,因此提高速度的精度和分辨率都是很重要的。常规的速度分析是利用地震共反射点道集制作速度谱得到叠加速度,速度谱见图 1-12。可以看到速度谱的峰值较宽,叠加速度可以在一个相当的范围内选择,这样速度分辨率就不高。俞寿朋计算了这方面的例子见图 1-12,对同一共中心道集,速度从 2350m/s 到 2650m/s 变化,叠加结果没有多大的影响,这对分辨更薄的层是不利的,因此要做高分辨速度分析。国内外的许多学者在这方面进行了研究,俞寿朋先生介绍了一种国外研究的方法,通过理论计算,速度分析的分辨率大大提高,见图 1-13,原来不能分辨的两层清楚的分辨出来。

#### 2. 高精度动校正

动校正处理是将非零炮检距的道校正为零炮检距道。动校正有两个内容,一是计算动校正量,一般用双曲线公式;二是进行动校正,进行动校正是振幅往前搬家,常规动校正为了校正方便,将动校正量都变成采样间隔的整数倍,例如采样间隔是 4ms,计算某道某个  $t_0$  时的动校正量是 15ms,那么 动校正时就算此时的动校正量为 4 个采样间隔,这样动校正就产生误差,频率越高,误差就越大,俞寿朋先生进行了理论计算,见图 1-14,图中的 (f) 表示了产生的误差。

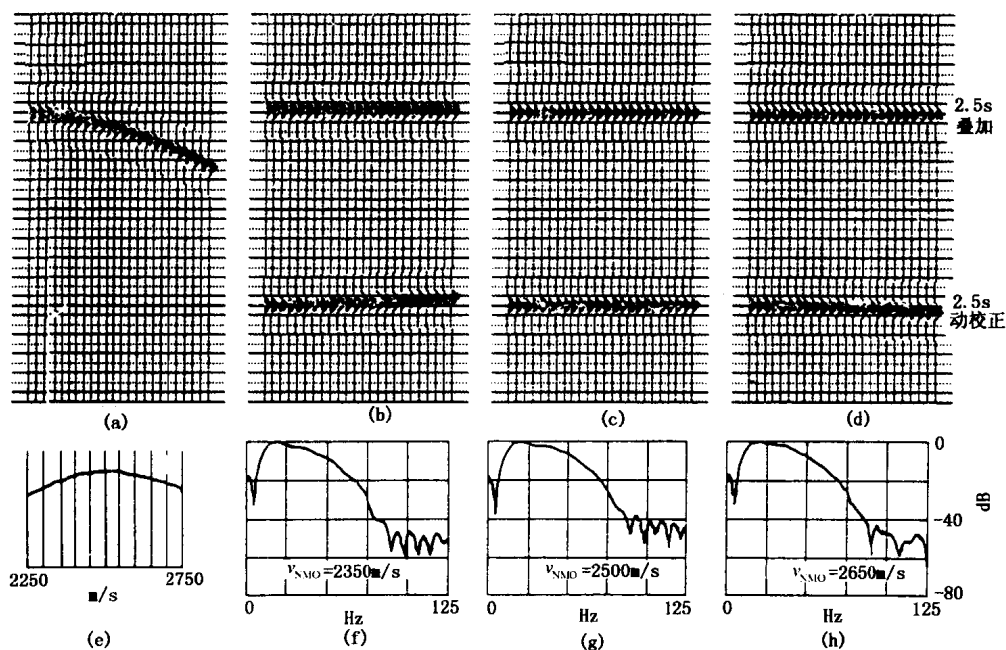


图 1-12 动校正速度影响的理论例子

(a) 为合成共中心点道记录；(b) 为速度谱；(c)，(d)，(e) 下部为不同速度的动校正结果，上部为叠加结果；  
(f)，(g)，(h) 为对应的叠加结果的指幅谱

提高动校正精度也必须从两个方面着手。一是更精确地计算动校正量，二是高精度动校正，目前在第二方面研究较实际，其方法是利用插值函数，根据动校正量要求精度加密采样点，以减小动校正的误差，俞寿朋先生又介绍了一种在地震记录振幅包络和瞬时相位上做时间内插，使误差显著减小，见图 1-15，图中的 (f) 表示误差为零。

### 3. 静校正

静校正正是校正由于地形起伏，地表低速带速度和厚度的横向变化所引起的时差，只与炮点、检波点的位置有关，在存在静校正量地区若不做静校正或静校正未作好，叠加效果变差 (见图 1-16 (a))。

静校正也是有两部分内容，一部分是要求取静校正量；一部分是做静校正。做静校正是根据静校正的时差正负将振幅往前或往后搬家，求取静校正量始终是研究的难点之一，随着复杂地表地区的勘探领域扩大，求取静校正量的方法很多，常规方法主要是用互相关法，由

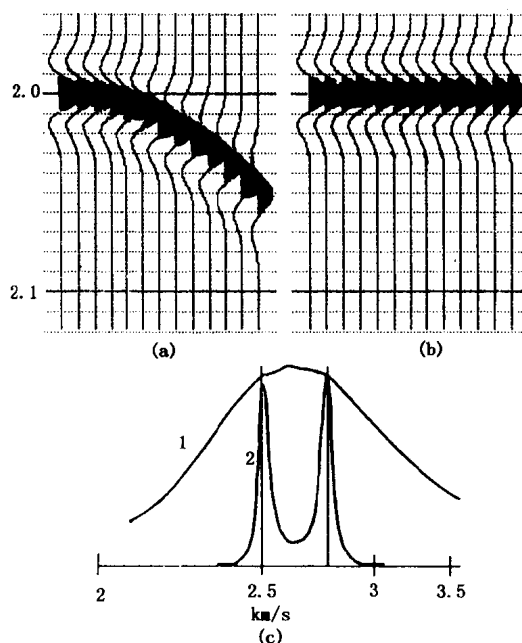


图 1-13 高分辨率速度分析

(a) 为合成记录，在 2.0s 处有两个反射叠合在一起；  
(b) 为动校正结果；(c) 为速度分析结果。  
1—常规速度分析；2—高分辨率速度分析



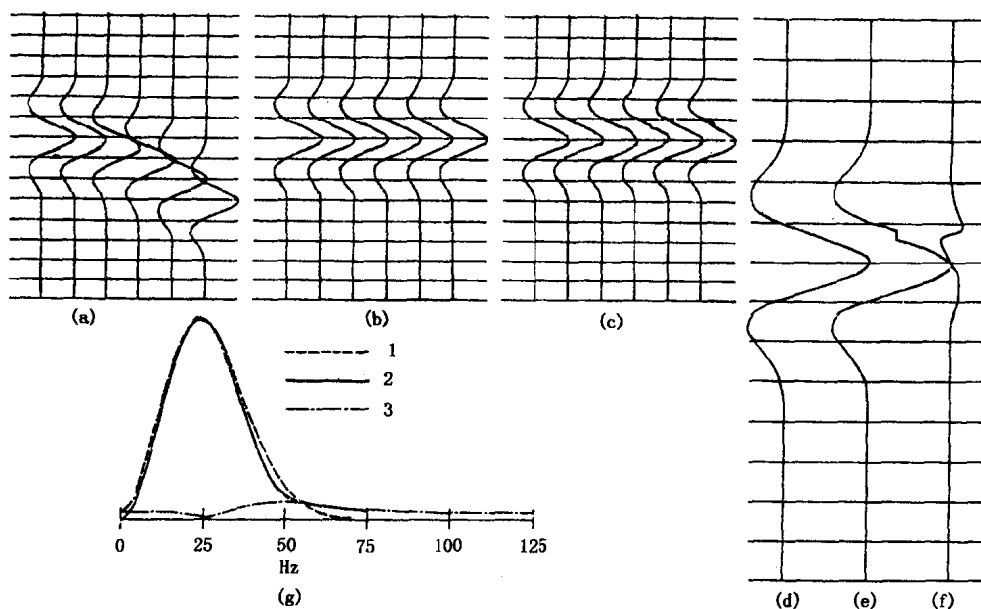


图 1-14 动校正理论记录

(a) 为理论记录；(b) 为理论计算的动校正记录；(c) 为常规动校正结果；(d), (e) 为 (b), (c) 的第 6 道的放大显示；(f) 为 (e) 对 (d) 的误差；(g) 中 1, 2, 3 为 (d), (e), (f) 的振幅谱

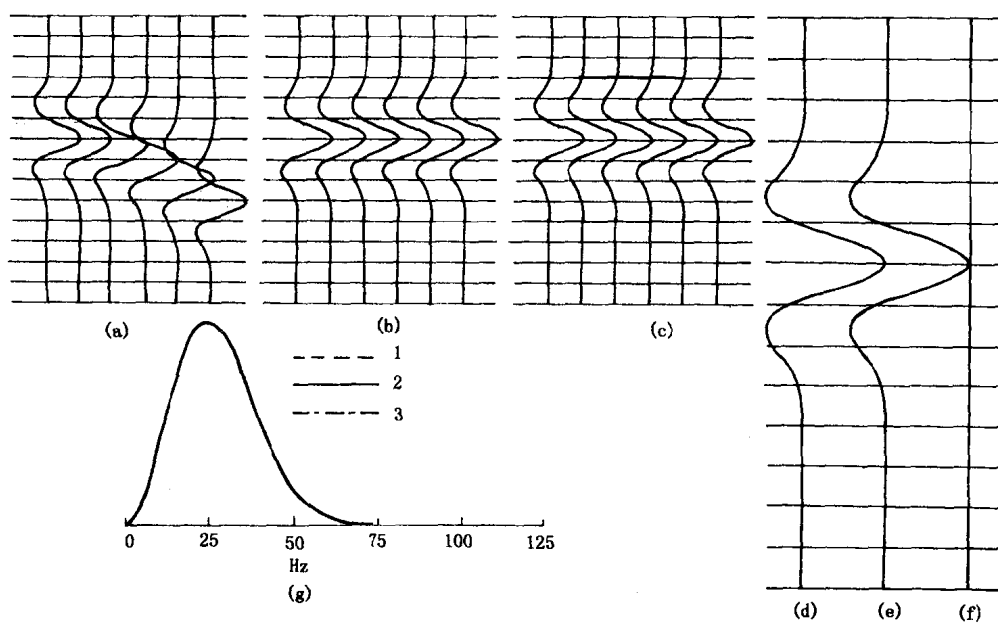


图 1-15 高精度动校正理论记录

除 (c) 为高精度动校正结果外, 其它与图 1-14 相同, 在 (g) 中 1, 2, 3 几乎完全重合

于其精度要影响到分辨率, 而且不同频率成分对静校正量精度要求不同, 高频成分要求更高的静校正精度, 若静校正的误差定为不超过  $1/4$  周期, 例如对  $10\text{Hz}$  的  $1/4$  周期为  $25\text{ms}$ , 即使  $10\text{ms}$  的静校正误差也可满足要求, 但对  $80\text{Hz}$  的  $1/4$  周期是  $3\text{ms}$  多一点, 而  $3\text{ms}$  的误差都