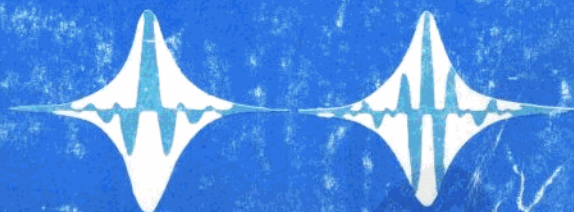


实用高分辨率地震勘探 数据采集技术

钱 绍 瑚 编著



中国地质大学出版社



实用高分辨率地震勘探 数据采集技术

钱绍瑚 编著

中国地质大学出版社

内 容 提 要

本书是根据作者近十年来从事高分辨率地震勘探理论研究和生产实践的总结。书中较系统地阐述了高分辨率地震勘探的基本原理,系统地讨论和分析了高分辨率地震勘探中数据采集的高频信息可激发性、高频信息可记录性、高频干扰可压制性等有关的基本概念和方法技术,具有较强的理论性和实用性。

本书可供地震勘探工作者、地质人员及有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用高分辨率地震勘探数据采集技术/钱绍瑚编著. —武汉:中国地质大学出版社,1998.4

ISBN 7-5625-1296-5

I. 实…

II. 钱…

III. 地震勘探-高分辨率-数据采集-技术方法

IV. P315.61

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 刘先洲 责任校对 熊华珍 封面设计 余 辉

印 刷 武汉测绘院印刷厂

经 销 湖北省新华书店

开本 850×1168 1/32 印张 6 字数 140 千字

1998年4月第1版 1998年4月第1次印刷 印数 1—1 000 册

ISBN 7-5625-1296-5/P·478 定价:12.00 元

前 言

地震勘探至今已有 70 多年的历史。前 30 年,地震勘探的方法技术主要致力于提高地震资料的信噪比,以寻找构造油气田为主要目标,我们把这种勘探称为常规地震勘探,它为寻找大中型油气田作出了重要贡献。随着勘探与开发的深入发展,这种规模大、储量多、产量高的油气田,现在已经不多了。为了适应国民经济发展对油气的需求,除深入开展构造型油气田的精细勘探与开发外,急需寻找地层岩性圈闭型的油气田,要求地震勘探技术必须从过去的构造勘探向岩性勘探发展。为达此目的,地震勘探必须大幅度地提高分辨率。尤其对我国陆相碎屑岩沉积的盆地,多为砂、泥岩薄互层的沉积、储层具有厚度小、体积小、横向变化大的特点,单层厚度有的只有 1~5 m。有的为砂层组,厚度一般为 5~15 m。常规地震勘探无法分辨出这些薄层,因为常规地震勘探中一个地震反射同相轴就反映了 30~50 m 厚的地层。为使地震勘探为储层预测服务,国内外提出了“高分辨率”地震勘探方法。国外在 50 年代就有少数学者从理论上对地震勘探的分辨率进行了研究,但工业界把高分辨率地震作为一项关键技术来研究不过是近十来年的事情。我国在 1986 年,石油部科技情报所、石油物探局情报所、地矿部石油物探研究所等相继编写了有关高分辨率勘探的专题情报,1987 年 9 月中国地球物理学会召开了高分辨率地震勘探的学术讨论会,这些对我国开展高分辨率地震的试验起到了极大的推动和促进作用。在我国“七五”期间,石油部和地矿部都立项进行高分辨率地震勘探技术的攻关研究。石油部攻关的技术指标为对 3 km 以上深度,把反射

波主频比目前勘探方法提高一倍左右(即把主频提高到 40 Hz 左右、带宽 10~80 Hz 这样一个数量级),能分辨大约 10~20 m 薄层,可用于寻找幅度为 10~15 m 的构造、查明 10~20 m 的断层及寻找非背斜油气藏。通过攻关,达到了预定的技术指标,使我国的地震勘探水平上了一个新的台阶,取得了实质性的进展。石油部该项目负责人,我国地球物理学家俞寿朋在总结报告中认为,应推广攻关成果,全面提高地震勘探技术水平。地矿部该项目负责人,我国地球物理学家欧庆贤撰文呼吁“迅速普及应用高分辨率地震勘探方法技术,应当列为提高我国地震勘探生产技术和解决地质问题能力的最为基础性的、关键性的内容”。

在“七五”期间,除参加立项攻关的单位外,其他许多油气地震勘探单位,也都做了一些试验和研究工作,人们已清醒地认识到,高分辨率地震勘探是当今物探最先进的技术与发展方向,如果把握不住时机,不立足该项技术,就会落伍,就会在竞争中失去市场。

在“七五”期间,就高分辨率采集的方法技术而言,主要在如何选取排列等参数上下功夫,提出了诸如“四高四小”(即高采样率、高宽频带接收、高覆盖次数、高频检波器和小道距、小偏移、小组内距、小药量)、“四小两高”等工作方法。

在高分辨率地震勘探技术的攻关研究中,特别值得一提的是 1993 年俞寿朋和李庆忠院士分别编写了有关高分辨率地震勘探的专著,它们填补了国内外在这个领域无专门书籍的空白。书中从理论到实践系统地讨论了整个地震勘探过程中的分辨率问题,对我国在该领域的攻关研究起到了举足轻重的指导和推动作用。李庆忠院士在专著中提出了高分辨率地震勘探是个系统的观点,并认为石油物探今后的发展方向和主要任务恐怕首先是提高地震勘探的分辨率。没有足够的分辨率,我们很难在储层研究和油藏描述方面有所作为。“八五”期间,高分辨率地

震虽没有立项研究,但试验研究工作在向纵深发展。其主要标志之一是人们已认识到,要采集到高频信息,除选取最佳排列参数外,还必须选用先进的仪器以及相应的配套技术。这期间,国内已开始酝酿研制高分辨率数字地震仪。1991年美国 and 法国相继生产了新一代24位地震仪,围绕高分辨率地震勘探到底应选何种仪器等问题开展了一些讨论。标志之二是在1995年,李庆忠等根据理论研究和实际试验的结果,指出了小药量是高分辨率地震中的一个“误区”,在高分辨率地震勘探中应使用比常规勘探还要大的药量。标志之三是对高分辨数据采集提出了高频信息可记录性、高频干扰可压制性两大问题,这是对采集技术的高度总结和概括,使方法技术攻关研究的方向更加明确。在这期间提出的“高低截”、“大增益”等提升高频的方法,深埋检波器的技术、无风或小风施工的做法等都收到了明显的效果。这时在河南油田,物探局所做的高分辨率地震剖面,2.0 s处的反射波主频达80 Hz,中原油田使3.0 s处的反射波主频约达60 Hz。但这与储层预测与油藏描述对高分辨率的要求还不能相适应。为使地震勘探尽快进入开发领域,石油天然气总公司在“九五”期间,又把“高分辨率地震勘探技术”列为重点科技攻关项目,其攻关的技术目标是使2.0 s处反射的主频达120~150 Hz,能分辨5或4 m厚的地层,使3.0 s的反射波主频达80~100 Hz,能分辨10~8 m厚的地层。经过一年多的攻关,已取得了一定的进展,在高分辨率二维勘探的基础上,中原与胜利油田开展了高分辨率三维地震勘探的试验,中原油田还采用了可变面元观测系统,深入开展了激发条件方面的试验研究。如中原油田在激发深度及岩性的选取上采用了双井微测井技术,在激发方式上做了低爆速、细长药柱震源的试验,收到了很好的效果,并提出了高频信息可激发性的观点。它与高频信息可记录性、高频干扰可压制性一起构成了高分辨率采集技术中的三大关键问题,是多年来实

实践的总结,既具理论意义,又具实用价值。

高分辨率地震勘探是以常规地震勘探为基础的,但它又不同于常规勘探。回顾十来年高分辨率地震勘探的攻关研究,不突破原有的一些框框约束、不抛开一些传统的观念,就很难有所前进、有所发现。高分辨率地震与常规地震是一对矛盾,地震勘探中信噪比和分辨率也是一对矛盾,矛盾的双方既统一又斗争,推动着事物的进展。我们要用马克思主义的科学认识论和哲学思想,不断地去思考,特别要进行理论结合实际的研究,实践离不开科学理论的指导。对于比常规地震勘探难得多的新研究领域,不提出一些新理论、新方法、新技术,就很难取得新的进展,只有不断开拓进取,大胆创新,才能不断前进。

自1986年起,笔者就密切关注高分辨率地震勘探,并开始编写有关的讲义,后有幸与中原油田地调处协作进行高分辨率地震勘探技术的试验,这些年来我们一起讨论问题、一起试验、协作攻关,也得到了俞寿朋、李庆忠、陈祖传等专家的指教,受益匪浅,该书的出版正是这些年来协作攻关的结果。在该书编写中力求做到有较强的系统性和逻辑性,做到既有理论,又有实例,力求做到深入浅出,通俗易懂,概念明确,重点突出,使其具有较好的可读性与实用性。书中许多实例都是中原油田地调处提供的,在此向地调处的领导、工程技术人员、一线的工人师傅致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误与不妥之处,恳请批评指正。

编 者

1998年1月

目 录

第一章 高分辨率地震勘探的基本原理	(1)
第一节 分辨力与分辨率	(1)
第二节 纵波的垂向分辨率	(2)
第三节 横波的垂向分辨率	(20)
第四节 信号的频带宽度与分辨率的关系	(27)
第五节 噪声和分辨率	(34)
第六节 横向分辨率	(36)
小 结	(40)
第二章 震源对分辨率的影响	(42)
第一节 虚反射对激发子波和分辨率的影响	(43)
第二节 炸药震源爆炸机制及激发条件对分辨率的 影响	(58)
小 结	(89)
第三章 地震仪器对分辨率的影响	(91)
第一节 地震勘探对地震仪器的基本要求	(91)
第二节 地震仪器的发展概况	(94)
第三节 地震仪的数据采集系统	(103)
第四节 地震仪的畸变、噪声、共模抑制、串音和动态 范围	(108)
第五节 高分辨率地震勘探中仪器因素的选取及地 震仪的发展方向	(127)
第六节 地震检波器	(139)
小 结	(141)

第四章 地层吸收衰减模型的制作及其补偿	(143)
第一节 地层吸收衰减模型制作的原理.....	(143)
第二节 地层吸收衰减模型建立的方法.....	(145)
第三节 地层对地震波吸收衰减的补偿方法——仪器因素的技术论证.....	(152)
小 结	(158)
第五章 高分辨率地震勘探中接收条件的选取	(159)
第一节 最大炮检距的选取.....	(160)
第二节 覆盖次数等参数的选取.....	(164)
第三节 检波器的组合及埋置条件.....	(165)
第四节 可变面元三维观测系统.....	(168)
第五节 高分辨率地震勘探采集参数的选取.....	(173)
小 结	(176)
参考文献	(178)

第一章 高分辨率地震勘探的基本原理

在常规的地震勘探中,一般地震信号的频带宽度为 $20\sim 50$ Hz,这时一个反射同相轴(或称为一个“胖”波)反映(概括)了 $30\sim 50$ m 的地层厚度。对于纵向上小于该厚度的地层,或横向上小于该范围的储集体,在地震剖面上是反映不出来的。因此,常规地震勘探只能寻找那些具有一定规模的构造油气田,它不可能查明地质构造的细节。而当前油气勘探与开发的迫切任务是要寻找地层岩性油气藏,要求地震勘探能确定储集层的垂向厚度以及它向四周延伸的范围,即查明小断层、小构造、小砂体等。

在国内,多年油气勘探与开发的实践表明,在以陆相碎屑岩沉积为主的盆地中,许多储集层或砂体的体积都很小,要用地震勘探方法完成这些任务,是一个新的难题,是油气勘探对地震勘探提出的一种新的挑战和要求。为适应储层横向预测和油气藏描述的需要,地震勘探必须大大提高勘探精度,而高精度的关键是要大幅度提高地震勘探的分辨率。因此,在 70 年代之后就提出了高分辨率地震勘探,它是在常规地震勘探的基础上发展起来的,但也有其与常规地震勘探不同的理论与方法技术。

什么是高分辨率地震勘探,它与常规地震勘探有什么不同,在这一章里我们要讨论有关地震勘探分辨率的基本原理与概念以及影响分辨率的因素。

第一节 分辨力与分辨率

分辨力是指区分两个靠近物体的能力。分辨能力的强弱—

般有两种表示方法：一种是用距离来表示，如果两个物体间的距离大于某个特定距离时可以辨认出是两个分离的物体，而小于这个特定距离就不再能辨认出是两个物体，则把这个特定的距离表示为分辨率。在日常生活中一个典型的例子，是当人们检查视力时，受检查人的视力实际上就是不同人双眼的分辨力。两个物体间的距离的大小，可以从纵向横向两个方向来度量，如果分辨的垂向距离及横向延伸的范围越小，则分辨能力越强。另一种是用时间信息来表示分辨力，在地震勘探中，地震剖面是用时间信息来显示的，分辨能力的强弱常用反射同相轴的时间间隔大小来度量，即时间间隔越小，分辨能力越强，反之，分辨能力就越弱。如果时间间隔用 T_0 来表示，定义它的倒数 ($R_0 = 1/T_0$) 为分辨率。

在地震勘探中根据获取的速度参数，可以把时间间隔转换为距离，当 T_0 越小，距离也越小，或者说地层的垂向厚度及横向地质体的长度越小，分辨率 R_0 的数值也就越大，可以说分辨率也越高。

在地震勘探中，根据垂向和横向分辨地质体的程度，把分辨率分为垂向与横向两种。

垂向分辨率，也叫纵向分辨率和时间分辨率，它是指沿地层垂直方向所能分辨的最薄地层的厚度，在地震勘探中主要是要提高纵向分辨率。

横向分辨率，也叫水平分辨率和空间分辨率，它是指沿地层横向所能分辨的最小地质体的宽度。

第二节 纵波的垂向分辨率

目前，定义垂向分辨率一般采用两种方法，一种是用薄层顶底反射波的时差来定义分辨率；另一种是用零相位子波来讨论

垂向分辨率,它包括维代斯(Widess)准则,瑞雷(Rayleigh)准则和雷克(Ricker)准则。

一、用薄层顶底反射波能否被分开来讨论纵波的垂向分辨率

在 70 年代之前,人们用薄层顶底反射波的时差来判别其厚度,即在地面同一点接收薄层顶底两个反射波的时差与波延续时间的比值大小来定义垂向分辨率。当比值大于或等于 1 时,两个波能分开,就说有较高的分辨率;比值小于 1 时,两波不能分开,即薄层无法分辨。

如图 1-1,有一个水平薄层,厚度为 Δh ,层速度为 V_n ,薄层顶底反射界面分别为 R_1 与 R_2 ,对应于 R_1 与 R_2 的自激自收子波分别为 $b_1(t)$ 与 $b_2(t)$ (为了讨论问题的方便,图中把波的射线拉开了)。设两个子波具有相同的波形,其延续时间为 Δt ,两个子波的时间差为 $\Delta \tau$,即为波在薄层内传播的回声时间($\Delta \tau = 2\Delta h/V_n$)。随着地层厚度的变化, $\Delta \tau$ 与 Δt 的相对关系会出现两种情况:第一种情况,当 Δh 较大时,可使 $\Delta \tau \geq \Delta t$ (即 $\Delta \tau/\Delta t \geq 1$),这时 $b_1(t)$ 与 $b_2(t)$ 两个子波在时间上可分辨;第二种情况,当 Δh 较小时,会出现 $\Delta \tau < \Delta t$ (即 $\Delta \tau/\Delta t < 1$),这时两个子波发生干涉,形成复合波,如图 1-2 所示,已无法从时间上来分辨哪个是 R_1 界面的波形,哪个是 R_2 界面的波形了。这个复波实际上是厚度很小的薄层顶底界面反射子波的叠加。

为了提高垂向的时间分辨率,应使 $\Delta \tau$ 大于或等于 Δt ,其办法不外乎两种,即增大 $\Delta \tau$ 或缩短 Δt 。当 Δt 一定时,要增大 $\Delta \tau$,则要减小波在薄层内传播的速度。有人认为横波可以做到这一点,因为横波传播的速度比纵波低,但横波具有频率低于纵波的特点(有的情况下横波的分辨率并不比纵波高,在后面我们再专门讨论这个问题)。另一种途径,当 $\Delta \tau$ 一定时,缩短地震子波的

延续时间 Δt , 即所谓改造子波的办法, 这也是目前高分辨率地震勘探中采用的主要做法, 设想把子波的延续时间由原来一个周期缩短为二分之一周期, 则可使 $\Delta\tau \geq \Delta t$, 这时薄层的两个子波就可以分开了, 如图 1-3 所示。

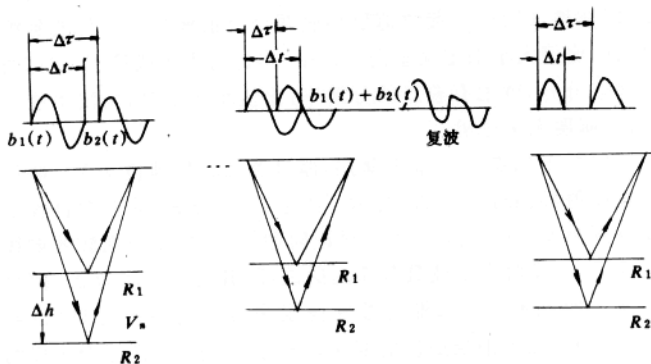


图 1-1 地层较厚时,
两个波可以分辨

图 1-2 地层较薄,
两个波不能分辨

图 1-3 波延续时间
短, 两波可分辨

假设两个子波的时差等于波的延续时间, 即

$$\Delta\tau = \Delta t = \frac{2\Delta h}{V_n} \quad (1-1)$$

可得

$$\Delta h = \frac{V_n \Delta t}{2} \quad (1-2)$$

地震波的延续时间的长短与地震波的频率及延续时间内包含的相位数有关, 设 Δt 等于 n 个视周期, 即 $\Delta t = nT^*$, 代入上式, 可得到有关厚度的分辨率公式

$$\Delta h = \frac{V_n \cdot n T^*}{2} = \frac{V_n \cdot n}{2 f^*} = \frac{n \lambda^*}{2} \quad (1-3)$$

式中, λ^* 为视波长。

从上式可知, 当波的延续时间为一个视周期时 ($\Delta t = T^*$), 则分辨地层的厚度值为二分之一视波长 ($\Delta h = \lambda^* / 2$); 当波的延续时间为半个视周期时 ($\Delta t = T^* / 2$), 则分辨薄层的厚度值为四分之一波长 ($\Delta h = \lambda^* / 4$)。同时, 也可以说当时间分辨能力为半个视周期时, 则分辨地层厚度的能力为 $\lambda^* / 4$, 这时的地震子波已趋近于尖脉冲, 它是比较理想的划分薄层厚度之分辨率。

从式(1-3)可知, Δh 与 $n T^*$ 成正比, 波的延续时间越短, 周期越小, 波形越窄, 则 Δh 值越小, 垂向分辨率越高, 所以可以说垂向分辨率主要决定于地震子波的延续时间。这正如 Knapp 所认为的“垂向分辨率应该用地震子波脉冲的时间延续度来定义”; 我国地球物理学家李庆忠先生称这种对垂向分辨率的定义为“严格的分辨率”, 也可把它称为 Knapp 准则。

众所周知, 尖脉冲具有理想的分辨率。为了进一步讨论有关分辨率的概念, 一些学者用接近尖脉冲的零相位子波来讨论纵波的垂向分辨率, 因为在地震信号中零相位子波与其他形式的子波相比具有较高的分辨率。

二、用零相位子波来讨论垂向分辨率

1. 零相位子波的概念

零相位子波一般是对称于中心点的, 中心点为零时间, 如图 1-4 所示。图中 b 为主周期的宽度, 在主周期内的波形为主瓣, 主周期外的波形为旁瓣(或叫尾振); 主周期内的最大振幅称为主峰振幅。当主周期越小、主峰振幅越大、尾振越小时, 分辨能力越高。一般认为影响子波分辨能力的因素有三个:

(1) 主波峰(中央波瓣)的宽度可用 b 或 $2T$ (主瓣的零点时

间间隔)来表示,宽度越窄,分辨能力越高。

(2)边峰比,指边峰与主峰振幅的比值,比值越小越有利于提高分辨率。

(3)边侧振荡(尾振),尾振的振幅越小,越有利于提高分辨率。

2. 维代斯准则

当地震信号出现调谐振幅时,垂向厚度的分辨率为四分之一视波长,当地层厚度再变薄时,已不能用时差来确定薄层厚度,只能用振幅信息来确定地层厚度,这就是维代斯准则。

该准则实际上是用薄层的振幅响应来讨论垂向分辨率,用楔形地层模型的物理模拟实验可以得到地震信号相对振幅大小与薄层厚度关系的记录。假设在均匀介质中夹有另一种介质的楔形地层,如图 1-5,均匀介质中的波速设为 V_1 ,楔形地层中的波速为 V_2 ,且 $V_1 > V_2$,当楔形地层的厚度从大逐渐减小直到尖灭时,如果不考虑透射损耗、层内多次波和地震信息中噪声的影响,这时模型上下界面

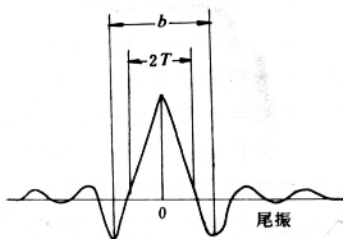


图 1-4 零相位子波

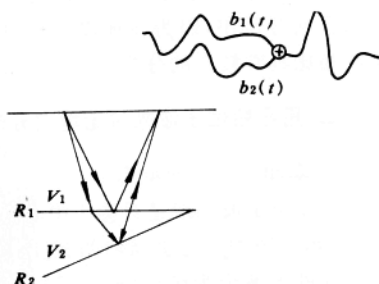


图 1-5 楔形模型的调谐效应

反射系数数值相等,符号相反。上界面反射系数为负值,下界面反射系数为正值。当地层厚度较大时,上下界面初至相反的反射子波在时间上可分辨。随厚度变小,两波逐渐靠拢,当两者的时差为二分之一视周期时,两波必然同相叠加。上界面子波 $b_1(t)$ 的第二个相位与下界面子波 $b_2(t)$ 的第一个相位同相,出现相互加强,使复合波的合成振幅比单个子波增大一倍,如图中所示,这种叠后的振幅称为调谐振幅。设两个波的时差为 $\Delta\tau$,有

$$\Delta\tau = \frac{T^*}{2} = \frac{2\Delta h}{V_2} \quad (1-4)$$

可得

$$\Delta h = \frac{V_2 T^*}{4} = \frac{V_2}{4f^*} = \frac{\lambda^*}{4} \quad (1-5)$$

从上式可知,当两波时差为 $T^*/2$ 时,出现调谐振幅,而对应的地层厚度为 $\lambda^*/4$,此厚度称为调谐厚度。定义调谐振幅所对应的地层调谐厚度为垂向分辨率。

当地层厚度小于 $\lambda^*/4$ 时,两个子波叠后的波形和振幅又会发生什么变化呢? 图 1-6 表示了当地层厚度变化时两个波相互干涉的情况。图左侧用波长表示地层的相对厚度,当层厚等于一个波长时($\Delta h = \lambda$),楔形地层顶底的反射子波是相互分开的;当地层厚度变小时,两个反射会发生相互干涉。如果用 ΔT 表示这两个反射的主极值间的时间间隔,用 ΔA 表示它们波峰与波谷之间的相对振幅,则可以作 ΔA 与 ΔT 的关系曲线,如图 1-7 所示。在这个模型对应的二张图上可以看出:

(1) 当 $\Delta h = \lambda^*/4$ 时,在波形图上会出现调谐振幅;在 ΔT 与 ΔA 的关系图上可找出调谐厚度所对应的地层实际厚度。

(2) 当层厚减小到调谐厚度以后, ΔT 已不再发生变化,波形趋于稳定,则地层厚度的变化不是包含在波形变化之中,而是包含在振幅变化之中。也就是说,在这种情况下,只能用振幅信

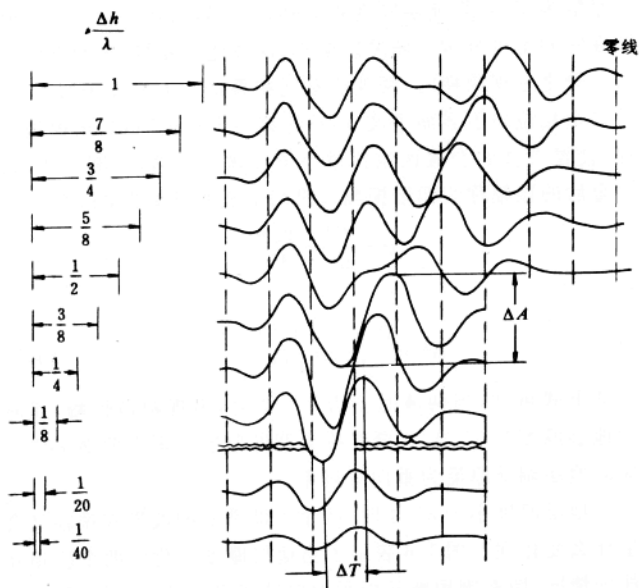


图 1-6 薄层干涉的分辨率研究

息来确定地层厚度。

3. 瑞雷准则 (Rayleigh Criterion)

它是指当两个子波的时差大于或等于子波的半宽度(半个视周期)时,两个子波在时间上可分辨,瑞雷把子波的半宽度称为垂向分辨率的极限,这就是瑞雷准则,它所对应的薄层厚度为 $1/4$ 个主波长。

4. 雷克准则 (Ricker Criterion)

它是指当两个子波的时差大于或等于子波主极值两侧拐点