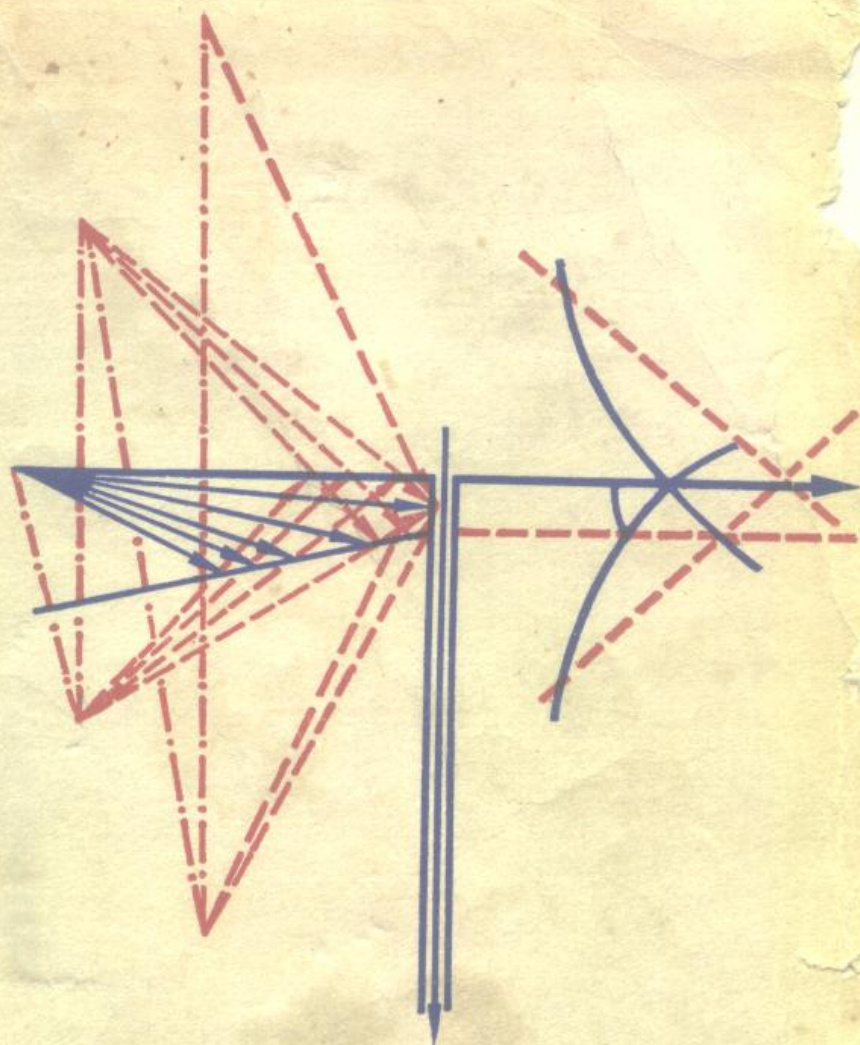


垂直地震剖面



〔苏〕E. I. 加尔彼林 著

石油工业出版社

垂直地震剖面

【苏】E. I. 加尔彼林 著

朱光明 肖慈珣 余惠宁等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是关于垂直地震剖面法在目前能见到的唯一的一本专著。作者为苏联科学院院士E. I. 加尔彼林。俄文原版于1971年在莫斯科出版。英文版由勘探地球物理协会1974年组织翻译, 向西方推广。中文版是根据英译本再译的。

本书不仅对垂直地震剖面法的方法作了系统介绍, 而且还在大量实验资料的基础上提出了许多新的观点。

全书共分两部分: 第一部分有五章, 系统介绍了垂直地震剖面法的基本原理、仪器、野外工作方法和垂直剖面上波的运动学和动力学特点, 以及波的对比和资料解释方法。特别在第五章, 还专章讨论了识别波的一个灵敏参数——质点运动轨迹。第二部分也有五章, 根据地表特别是垂直地震剖面观测的大量实际资料, 系统讨论了实际介质中直达波、反射波、首波、折射波, 以及横波和各种转换波的形成和传播的规律。

本书可供地球物理工作者、地质人员及高等院校有关专业师生参考。

余惠宁翻译第三、四、五章; 肖慈珣翻译第六、七章; 朱光明翻译第一、二、八、九、十章和前言、结束语。全书由朱光明和肖慈珣校订并经包吉山、贺振华进行了审阅。

Vertical Seismic Profiling

E. I. Gal'perin

Originally Published in Russia by Nedra Moscow, 1971

Translation © 1974 by The Society of Exploration Geophysicists, Published 1974.

Printed in the United States of America

垂 直 地 震 剖 面

[苏]E. I. 加尔彼林 著

朱光明 肖慈珣 余惠宁等译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 107/8印张 278千字 印1—2,600

1983年2月北京第1版 1983年4月北京第1次印刷

书号: 15037·2391 定价: 1.35元

目 录

52464/03

著作中用的符号.....	(1)
译成英语时所用的其它名称和缩写.....	(2)
英译本序.....	(3)
引论.....	(5)
第一部分 垂直地震剖面	(9)
第一章 垂直地震剖面法原理	(9)
井中地震观测.....	(10)
垂直地震剖面法的基本特点	(15)
第二章 仪器和观测方法	(22)
垂直剖面上观测的不需要的波.....	(22)
垂直地震剖面法仪器	(33)
观测方法.....	(38)
第三章 垂直剖面波的运动学特点	(51)
均匀介质中波的运动学特点.....	(52)
层状介质中波的时距曲线	(59)
水平剖面和垂直剖面的综合时距曲线	(81)
第四章 垂直地震剖面中波的对比	(87)
垂直地震剖面中波的对比的特点.....	(87)
直达波	(91)
反射波.....	(100)
首波与曲射线折射波.....	(104)
横波与转换波	(108)
改善垂直剖面上波的对比的一些方法.....	(108)
第五章 质点运动的轨迹	(131)
位移向量的方向	(132)
地震波穿过低速带时质点运动方向的改变	(137)

垂直剖面中质点运动方向变化的某些规律.....	(143)
质点运动方向的实验研究.....	(150)
位移调节方向接收法 (COR - I)	(159)
第二部分 实际介质中的地震波	(171)
第六章 直达波的激发和传播	(175)
研究方法	(175)
激发条件对直达波的影响	(178)
直达波的形状	(187)
地震脉冲在实际介质中的传播	(191)
第七章 纵反射波和多次波	(196)
沿垂直剖面的纵反射波和多次波	(199)
速度增加的单个薄层介质中的反射波和多次波	(208)
高速碳酸盐岩剖面中的反射波和多次波	(218)
弱速度差的剖面上部的波场	(228)
VSR与反射波法的有效性	(242)
第八章 大间距时地震记录前部所观测到的波	(250)
高速薄层的波	(253)
地台区碳酸盐岩剖面上的波	(265)
厚层的波	(270)
剖面上部对大距离观测的影响 (折射波对比法)	(280)
第九章 横波和转换波	(287)
横波	(289)
转换反射波和下行透射波	(299)
转换上行透射波	(304)
第十章 垂直地震剖面法的勘探能力和进一步发展 ..	(317)
垂直地震剖面法的勘探能力	(318)
垂直地震剖面法在方法研究方面的能力	(325)
垂直地震剖面法的今后发展	(329)
结论	(330)
参考文献	(334)

著作中用的符号①

- H** 观测点深度
h 炸药包深度
 H_r 射线路径穿透的最大深度
 H_V 井中剖面的界面深度(沿铅垂方向)
 H_N 炮点到界面的距离(沿法线方向到界面的距离 $H_N = l \sin \varphi + H_V \cos \varphi$)
Q 炸药量
 l 炮点到垂直剖面(也即到井口)间的距离, 当炮点位于界面下倾方向时(相对于井口), 取正号
L 沿着界面, 从井到炮点在界面上射影之间的距离 ($L = l \cos \varphi - H_V \sin \varphi$)
 v_p 纵波传播速度
 v_s 横波传播速度
 v_0 初速度
 v_{av} 平均速度
 v_{avN} H_V 和观测点H之间地层的平均速度
 v_a 视速度
 v_b 界面速度
 v_{LR} 层速度
 β 速度增加的系数
p 斯耐尔定律确定的参数:
 当 $\varphi = 0$ 时, $p = \sin i_0 / v_0 = \sin i_1 / v_1 = \sin i_n / v_n$;
 当 $\varphi \neq 0$ 时, $p = \sin i_1 / v_1 = \sin i_2 / v_2$
 φ 界面倾角。界面上倾, 角取正值。角度定义的范围是
 $0 \leq \varphi \leq \pm 90^\circ$ ②

① 参看图13——译者注(译成中文时译者注)。

② 应为 $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ——译者注。

- i 折射波在界面上的人射角(按从法线到入射线之间的角度计算, 由 0 到 $\pi/2$)
- i_0 射线从震源出射时的射线角
- i_H 剖面上H点处射线路径的角度
- i_{CR} 临界角($i_{CR} = \arcsin v_n / v_{n+1}$, 这里 v_n 是剖面上第 n 层的速度, $v_n < v_{n+1}$)
- ψ 地震检波器相对于水平方向的倾斜角
- d_n 第 n 层的厚度
- m 多次波的级次, 由最下层界面上的反射次数确定
- λ 波长
- f 振动频率

描述波场时, 还引用了下面的符号:

- t_P, t_S 直达纵波和横波(也称为到达时)
- t_P^1, t_S^1 界面 1 反射的纵波和横波
- t_P^{101}, t_S^{101} 相继从界面 1, 0, 1 上反射的多次反射波
- t_{CV}^1, t_{CV1} 在界面 1 上形成的转换反射波和转换透射波
- t_{HD1} 界面 1 的首波
- t_{RR} 折射波

译成英语时所用的其它名称和缩写:

- | | | | |
|-------|-----------|----------|---------|
| AOA | 放大器自控 | PSA | 地震极性分析 |
| ODR | 调节方向接收 | SP | 炮点 |
| OMRRW | 折射波对比法 | SWL | 超声和声波测井 |
| DSS | 深部地震探测 | t_{BT} | 结晶基底的波 |
| EOA | 放大器指控 | t_T | 套管波 |
| MCTTC | 转换旅行时距曲射法 | VSP | 垂直地震剖面 |
| MRLW | 反射波法 | ZLV | 低速带 |

英 译 本 序

在查明地下岩层的各种手段之中，没有哪一种能与钻井相竞争。一旦在有意义的地质剖面上钻成了一口井，就有机会最终验证地表测量的“地下真实性”，并可达到单独由地表测量所达不到的精度。所有细心的石油生产者都想用某种方式利用这种机会。但是强大的经济和心理因素妨碍这种机会的充分利用。如果一口井是生产井，日常的井下测量会影响生产，另外，更重要的或许是，每次井下操作有给井带来破坏的威胁。如果井是干的，投资者可能不会再把额外的钱花在一个已经付出了高昂代价的失败活动上，尤其当他的有限土地所有权因为干井已宣告废弃，且所获得的地下资料主要为租有邻近土地的竞争者们感兴趣时，他更不愿这样做。因为这些原因，所以在美国一般都不能利用已钻过的井进行充分的勘探。诚然已经有一套广泛的测井方法，并且对测井资料解释已经有了丰富的经验。而且，地表震源和井下检波器除了已用于计算给定深度的（垂向）平均速度外还一直用于勾划盐丘界面。但是，仍然没有一种方法能普遍用于把地表和作为辅助方式的井下测量结合起来，也还没有把地表地球物理方法扩展到三维。

在苏联，已经发展了一种方法，这种方法一般能用于直接地把井中检波器垂直排列所得到的丰富的地震记录和地表排列所得到的通常的反射记录紧密结合在一起。这种结合所用的专门装备、标准的野外工作方法，以及解释的理论基础合在一起就是通常所说的垂直地震剖面（Vertical Seismic Profiling，简称VSP）。为了更好地描述地下结构，苏联石油工业部门支持VSP的发展，并希望试验出能在广泛的各种各样地质区域使用的新方法。

从这本书论述的基本原理和初步的野外经验来看，垂直地震剖面法有很多独特的优点：在介质内部点上观测，地震噪声水平较低，且三分量运动与单个的切变波或压缩波之间有更简单的关系；VSP记录能给出地表剖面所观测的反射与产生每一反射的界面或薄层序列之间的可靠关系；能识别多次波；通过直接观测可以得到共深度点叠加所需要的平均速度。VSP的主要好处是改善了在一个面积之内地表剖面所得到的地震记录的解释。

在《垂直地震剖面》这本书中，E. I. 加尔彼林博士已让我们周密地看到了一种新的勘探方法。希望这本书在译成英语之后，在世界其它地区的找油中，能加速这种方法的应用。

A. J. 赫尔蒙特博士受勘探地球物理协会(SEG)翻译委员会和勘探地球物理协会执行委员会委托翻译了这本书。特别感谢J. W. 亨利先生，他远远超出他作为SEG出版经理的正常业务，对本书进行了编辑加工，也要特别感谢R. W. 华德博士，他最后帮助完成了定稿。还要衷心感谢梅兹杜纳鲁克娜娅、克丽伽，特地制作了本书所用的原始图件。

编辑 J. E. 怀特
莫斯科 1973. 11.

引 论

地震调查在石油和天然气地球物理勘探的各种方法中占着主要的地位。绝大多数油气田都是根据地震勘探法所选定的构造进行钻井而发现的。在矿场地质中，地震调查能从地质填图过渡到研究含矿地层以及控制这些矿层的构造。地震勘探队的数目每年都在增加。

最近10~15年期间，地震勘探所需要的仪器、观测方法和处理资料的手段都已取得了重大的进展。很明显，这是由于地震波传播的动力学理论的发展以及在野外条件和模型实验情况下对较宽频率范围的地震波进行实验研究的结果。但是，地震调查每年都要遇到一些更为复杂的问题，这就需要增加勘探深度并同时改善调查的细节和精度。地震方法勘探能力的增长与解决这些问题所遇到的困难相比仍然较慢。最近，这种情况经常妨碍地震勘探的地质效果尽快地改进。

地震调查和资料解释的主要困难是与传播地震波的实际介质的复杂性有关的。最近几年的研究结果表明，随着对介质研究得越仔细，就越显示出介质的复杂性、不均匀性和薄层结构。地震记录上所观测到的波型特征是出现大量不同类型的波以及它们所造成的很宽的干涉带。

当勘探深度增加时，有效波的强度急速地减小。如果缺乏从强的规则干扰和不规则干扰的背景中识别有效波的客观方法，就会使成果的可靠性降低。

不对实际介质中的地震波进行仔细的实验研究，地震方法的进一步改善是不可想像的。虽然，在地震波的理论方面（以及各种计算方案的实现方面）原则上已经取得了进展，但是实际介质中地震波的形成和传播的物理过程的研究却没有紧紧跟

上。反映实际模型特点的严密的原理也还没有提出来。

直到最近，地震波的实验研究仍然以更仔细地分析通常是在地表观测的波场为基础。当介质情况简单时，这种方法是十分有效的。而当地震地质条件复杂时，因为地表观测的波的运动学和动力学方面的资料不能充分说明波的形成和传播的物理过程，因而总是不能找到唯一确定地震记录上波的性质的可靠标准。还有，对所观测资料解释的主要方法实际上也常常存在分歧。由于这些原因，目前对波场剖面上各种类型的不均匀性的影响还没有能有一个清楚的理解。虽然观测系统设计得很复杂（这将导致地震调查费用的增加），但地质解释的真实性常常仍然值得怀疑。

在探索克服这些困难的各种办法中，似乎当务之急就是从根本上转向对波场中传播的各种波的类型的实验研究，并继续调查某些特殊波的真正形成过程；也就是从整体上研究波的形成。这个过程就导致主要由地表观测转移到介质内部观测——井中观测。长期以来，虽然井中地震观测已一直用于地震勘探的生产实践，但是这些观测的大多数只是在井中测量井口附近激发的波到达井内观测点的初至时间，调查的领域也基本上限于研究波的平均速度。现在，必须通过在介质内部一些点上进行观测来根本改善研究地震波的技术。最有前途的方法不仅是利用记录上的初至波，而且还利用记录上的续至波。这种方法的效果和收益可与 1930 年地面观测中所发生的类似转变^① 相比拟。

1959 年，苏联科学院大地物理研究所支持的有关这方面的野外工作导致了垂直地震剖面法（VSP）的创立。就其物理手段和方向来说，VSP 可看成是 G. A. 甘布尔采夫多年期间所设想的对实际介质中地震波实验研究原理的进一步发展。在方法发展的过程中，第一台仪器系统已经产生，野外方法和观测技术

^①由只记录初至波到追踪续至波——译者注。

得到了发展，并设计了资料解释的模式。该方法已经在不同类型的地质构造地区进行了实验研究：例如，在沉积剖面由速度随深度增加而速度差很小的薄层组成的地台区（古比雪夫地区），在基底深度变化很大的高速厚层的碳酸盐岩地区（伏尔加格勒地区），还有在基底较浅的陆相沉积地区（克拉斯诺达尔地区），粗屑陆相沉积的弯曲厚层（北天山）以及砂质粘土薄层组成的地层（克拉斯诺达尔）等等。

这些调查表明，地表观测所得到的地震记录上的波场比人们所想像的要复杂得多，而且在很多情况下这种复杂性都是由剖面上部引起的。这些调查不仅可用以研究地震波在各种不同构造类型的介质中传播的特点，而且还能阐明和评价VSP方法的基本功能。可以确信，VSP方法比地表观测能够更可靠和更单一的识别波的性质。VSP方法还能适用于波的地层对比和估计地震勘探的可能性，以使人们可以在各种具体的地质条件下选择最佳的观测方式。所有这些问题，实质上都决定地震调查的效果，并在地震勘探实践中起着主导的作用。看来，地表观测与VSP相结合似乎是最有前景的。

现有的成果表明，对于包括在整个波场中的各种类型波的意义的一些理论上和实际上都重要的提法以及地震调查的勘探潜力都必须批判性地重新评价。这些观测基本上是在地震波频带范围内进行的，但是，很多材料对于了解深部地震探测和天然地震中所观测的波场特征也是有用的。

本书是为描述VSP法而著的，它通过对实际介质中主要类型的地震波的研究，阐明VSP方法的功能。书的第一部分（方法部分）讨论了VSP法的基本要点：仪器问题，观测方法，运动学和波的对比等。书中特别注意研究了介质中质点运动的方向。与地表观测不同，对VSP来说，质点运动方向的研究或许可以用来对资料进行一系列定性处理。

本书的第二部分仔细研究了纵反射-折射波的形成和传播的某些特点。这些波是地震调查方法的主要基础。还仔细研究

了横波和转换波（反射和折射两者）。注意点集中于剖面上部波场的研究。因为在反射波法（MRLW）^①、折射波对比法（CMRRW）、和深部地震探测法（DSS）通常所用的震源-检波器距离内，不论是介质内部点上或者是地表，所观测到的波场都受到剖面上部强烈的影响。这些影响在很多情况下限制了地震调查的能力，但是它们往往又没有得到足够的重视。

这本书是关于VSP的第一本专著，在本书中，作者的目的是不是企图对该方法的各个方面都进行严格的研究。事实上，在方法发展的初期，这是很难办到的。指出关于对实际介质中地震波传播的物理过程进行研究新的可能性似乎更有意义。因此，在描述的波场中，必须善于引用决定波场基本规律的研究材料。我们认为，在很多情况下，只用定性的结果仍然能充分阐明VSP方法的本质和估计地震调查的勘探能力。本书利用了作者和其他研究者分散发表在各个文献中的材料。

方法的显著前景吸引了很多专家，最近两三年期间已经又作了大量的VSP工作。很遗憾，在本书准备过程中未能把最近调查的成果全部融合在一起。

本书是根据苏联科学院大地物理研究所（IPE AS USSR）与乌克兰、乌兹别克和哈萨克共和国以及古比雪夫，克拉斯诺达尔和伏尔加格勒地区等地球物理勘探托拉斯联合进行工作所得到的观测材料编辑的。野外工作和资料处理有很多人参加。特别应提到A. V. 福罗洛夫、R. M. 加尔彼林、和I. M. 穆佐伊卡，他们在方法创立过程中作出了重大的贡献。

我还要借此机会，表示对G. L. 彼得拉欣、I. L. 涅塞索夫、A. I. 博格丹诺夫、B. Ya. 格尔岑斯基和D. K. 奥泽罗夫的感谢，他们审阅了手稿，并提出了很多有益的建议。

①见“译成英语时所使用的其它名称和缩写”——译者注。

第一部分

垂直地震剖面

第一章 垂直地震剖面法原理

地震解释的主要困难是与波场的复杂性、分析波场缺乏可靠的准则以及难以辨认记录上波的性质等因素有关。在这种情况下，仅仅扩大所利用的波的种类，不能解决所有的问题，因为每一种特定的方法都有一些影响其效果的特殊困难。当然，在某些情况下，也可以利用所有这些具有特殊勘探能力的测量手段。

在地震反射波法中，随着穿透深度增加，不可避免地要求从规则和不规则的不需要波的背景中提取出弱讯号。在规则类型的不需要波中，各种类型的多次反射特别重要，人们虽然作了很大努力，仍然不能将这些波压制掉，有时甚至从地震记录上识别它们也不可能。因此，对于大部分地区，多次反射是限制反射波法的勘探效果和穿透深度的主要原因。除此之外，很多地区因为剖面上部的地震噪声很强也会使记录上完全看不到有效波。这些地震噪声的性质往往并不清楚。应用复杂的方法

①书中“剖面上部”是指从地表到第一个反射标准层之间的地层沉积（本书作者注，下同）。

向观测系统通常会损失勘探的细节和降低方法的分辨能力，因而难以研究代表大范围地台区主要勘探目标的(缓)倾斜构造。

在折射波对比法中，关于所记录的波的性质还没有一致的看法。现有的资料表明，这里起主要作用的不是首波，而是曲射线折射波和大入射角时的反射波（阿维布赫等人，1963；阿列克谢也夫，1960）。这种情况由于速度水平方向变化规律的资料不充分而更加复杂化。这些规律在曲射线折射波的资料处理中起着重要的作用。

因为利用纵波存在着一些困难，以及原则上横波和转换波具有许多人所共知的优点，所以横波和转换波法一直在积极研究中。但是，在给定的地质条件下，利用这些优点往往并不可能。这或许就是横波和转换波法远没有得到广泛应用以及它们的某些改进方案仍处在试验阶段的原因。

直到现在，横波法的主要困难仍在于其激发方式。另外，关于纵波和横波的速度资料不充分以及纵波和横波（振幅）的比值范围可能很宽，也使横波和转换波所获得的资料难以解释。

转换透射波法的主要困难是缺乏一个（以问题的物理学为基础的）能在多层介质中识别同一层的纵波和横波的准则。

对于所有这些方法，解释的复杂性在很大程度上都取决于剖面上部对波场的强烈影响。不管是地震勘探，或者是深部地震探测和地震学，在解释的困难方面都具有相同的特点；地壳深部探测由于观测系统不完全，困难更多。

为了克服上面列举的困难，有必要研究一些能更可靠地分析地震记录上的波型的方法。首先，人们必须学会对各种波的生成和传播过程以及波场形成的方式的研究方法。这就促使我们不得不从主要是在地面观测转变到在介质内部点上，即在井中进行观测。

井中地震观测

井中地震测量已经进行了约三十五年，它已被看成是整个

地震测量中必不可少的一部分。井中地震测量可分为两大类：一类可作为解决问题的辅助方法，另一类可作为研究所利用波的频率的手段。迄今为止，井中地震观测主要是用于测量波的传播速度，也考虑要解决某些构造问题。与此同时，发展了两种不同的变种：地震测井和井中地震勘探。

井中速度测量是利用不同成因和不同频段的波来实现的。根据频率不同发展了两种地震测井方式，一种是用地震频率，另一种是用声频，不同频率决定了不同的测量的精度和详细程度。

地震测井

地震测井既可以记录直达波（纵波和横波），也可以记录折射波。

直达纵波测井是最广泛使用的一种井中地震观测形式。利用井中观测测定纵波速度是关于方法研究问题方面（瓦尤茨基，1937；甘布尔采夫，1937，1938；波则列夫，1957）以及解释技巧和精度方面（博格丹诺夫，1960；波则列夫，1957；迪克斯，1945）许多论文研究的课题。地震测井资料的解释是以水平层状的介质模型为基础的。当前地震波平均速度资料的最可靠的来源之一就是地震测井。在地震资料解释中这种资料（特别对于反射波法）是必不可少的。最近几年，出现了一种趋向，就是从利用单个地震检波器转向采用多点观测系统。其目的之一是为了通过测量层速度和平均层速度来改善测定介质速度的精度，另一方面也为了提高方法的分辨能力。

折射波地震测井不太流行。在特殊情况下，折射波地震测井能提高速度测量的精度（依万诺夫，1957；瑞克，1958）。这种测井要求炮点布置在离井很远处，因为在这样的距离上激发，（垂直剖面上的）初至波才可能是位于井深处以下的界面上的折射波。

直达横波测井的原理是在最近几年当需要根据波速详细划分剖面时提出的（彼德尼柯娃等，1959；兹哈丁，1960）。与

纵波测井不同，为了记录横波，通常要使用三分量仪器进行观测。对于SH-型的横波人们已经进行了研究，这种横波是由特殊的打桩机和安装在起重机上的活动装置所组成的定向震源（通常是水平方向的撞击）激发的（布罗多夫，1967；阿诺尼莫斯，1962）。除此之外，最近几年定向爆炸也用来激发横波（波则列夫等，1967）；定向爆炸大大地增加了勘探深度。因为横波记录有可能研究不同结构介质中横波速度变化的规律，所以它有可能大大改善横波和转换波资料解释的可靠性和精度。

有时在井中地震观测中人们还应用所谓“逆地震测井法”（通常称为鱼雷观测或鱼雷测井）。这时，观测实际上在地表进行，而激发位于井内不同的深度。通常，进行这种观测只是为了研究剖面上部，对于整个地震观测来说它们并不具有重要的价值。

研究井中速度剖面 and 构造实际介质的速度模型的可能性受到地震波频率范围的严格限制。大家都知道，即使由纵垂直时距曲线可以求得平均速度，但测定层速度仍非常困难，特别是对于速度差小的介质。同样对于高速薄层也很困难。因此，利用通常的地震测井方法来阐明地震界面的性质和研究过度层实际上是不可能的。针对这种情况，人们试图采用小排列进行高频观测来提高精度和详细程度。在这方面，首创性的工作是由瓦尤茨基（1937）和奥斯特洛夫斯基（1944）完成的。后者把弹性波震源（雷管）放在紧靠由两个检波器组成的探头附近。随后，不同的研究者又利用电火花（舍吉叶夫等人，1963），压电效应（黎兹尼钦科，1956）和电磁换能器等作为能源。但是，很遗憾，大多数的这些努力都还没有脱离试验阶段，虽然这些途径的正确性是毋庸置疑的。

井中地震勘探

与地震测井不同，井中地震勘探用于解决单独的地质问题，特别是确定井邻近地段陡倾构造的细节，井中地震勘探最经常