

定量测井声学

唐晓明 郑传汉 著
赵晓敏 译

DINGLIANG

CEJING

SHENGXUE

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

定量测井声学

唐晓明 郑传汉 著
赵晓敏 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书首先回顾了自 20 世纪 60 年代以来声波测井仪器的发展过程, 综述了声波测井的最新进展, 介绍了声波测井的基本理论, 特别是多极子声波在多层介质中的激发、传播、数值模拟以及声波测井常见的基本波形特征, 还详细介绍了阵列声波数据的几种处理方法, 描述了怎样将熟知的线性预测理论从频率域变换到时间域, 得到声速的双波匹配反演方法。本书还着重介绍了声波的渗透率测井理论以及声波对地层各向异性的测量和应用。

本书可作为石油物探、地球物理、应用物理(声学)等相关专业的大专院校师生、研究和技术开发人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

定量测井声学/唐晓明, 郑传汉著, 赵晓敏译.

北京: 石油工业出版社, 2004. 12

ISBN 7-5021-4853-1

I. 定…

II. 唐…

III. 声波测井

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 117560 号

定量测井声学

唐晓明, 郑传汉著, 赵晓敏译

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.25

字数: 287 千字 印数: 1—2000 册

定价: 35.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

译者的话

声波测井是一门基础理论、仪器研制、数据处理、资料解释各个环节紧密结合的应用科学技术，在石油测井和物探上有着广泛的应用。该技术近年来发展很快，已由常规的声速测井发展到能够测量地层的多种物性参数，包括渗透率、波的能量衰减、反射及透射、地层的各向异性等，测量精度及分辨率也大大提高。通过声波测井，人们能够探测储层的位置，估算油气储量及饱和度、流通性，判断地应力状态及其方位，研究地层裂隙的方位及发育程度，推断井周围地层的变化，以及地层界面的延伸形态等。测量的手段也由过去的单极子测井发展到偶极子横波测井、正交偶极子各向异性测井以及四极子测井，测量的过程从常规的电测井发展到今天的随钻测井。

对于这样一门发展迅速、应用广泛、很有潜力的测井技术，有必要把它的过去、现状、发展方向以及它的理论、方法和实际应用向不同背景的读者加以系统地介绍。《定量测井声学》正是近年来这方面不可多得的专著。该书的英文版已由世界著名的 Elsevier 科技出版社作为地球物理勘探丛书之一在 2003 年第四季度向全世界发行。因此，译者特意将该书译为中文，以飨国内同行及有关读者。

《定量测井声学》共分六章。

第一章回顾了自 20 世纪 60 年代以来声波测井仪器的发展过程，综述了声波测井的最新进展，并结合实例加以介绍。

第二章详细介绍了声波测井的基本理论，特别是多极子声波在多层介质中的激发、传播、数值模拟以及声波测井常见的基本波形特征。如多极子波在裸眼井、套管井中的传播特征，特别是最近在随钻测井中采用的四极子声波的传播特征，都将加以描述。第二章最后讲述了声波在地层中常见的各向异性——横向各向异性介质中的传播。这一结果为第五章中由测井声波估算地层的各向异性提供了理论基础。

第三章详细介绍了阵列声波数据的几种处理方法，描述了怎样将熟知的线性预测理论从频率域变换到时间域，得到声速的双波匹配反演方法。该方法与子阵列重复叠加方法相结合，极大地提高了速度剖面的分辨率。该方法在薄油气储层的分析中有着重要的应用。在第三章中，通过对阵列中波的频散进行分析，导出了“阵列声波慢度为波的频散曲线在谱域上的加权平均”这一重要定理。由该定理可导出校正偶极子声波频散效应的简便方法，还可以导出第五章中由斯通利波求解地层各向异性的快捷反演方法。第三章的最后部分介绍了从测井声波中估计地层弹性波衰减的一种稳定可靠的最新方法。

第四章介绍了声波的渗透率测井理论。通过分析孔隙地层中的 Biot 慢波与井中斯通利波的影响，导出了一种既简单而又足够精确的简化理论，可以用来快捷地模拟或反演井中斯通利波与渗透率的相互作用。在处理斯通利波的传播中，获得了一种有效的波场分离方法，既可以压制波的反射及噪声等对斯通利波的影响，又可以提取出反射波。该方法在探测含气地层和裂隙方面十分有用。同时，为了将渗透率的影响与其他因素（如地层弹性、井径变化等）相区别，发展了一种快速的方法，用来真实地模拟斯通利波在不规则井径和非均匀地层中的传播。由声波得到的渗透率可以与从其他方法（如核磁共振、岩心测量）得到的渗透率

相互比较，对地层作出综合解释。本章中介绍和分析不同方法得到的渗透率在地层含气、有裂隙及泥饼情况下的异同。特别是本章中提出的一种泥饼模型，有助于解决这个多年的疑难问题。

第五章着重于声波对地层各向异性的测量和应用。利用各向异性介质中波传播的最基本特征——横波分裂这一现象，发展了一套波形匹配反演方法，提高了从正交偶极子测井中提取各向异性的精度和可靠性。各向异性的测量与裂隙地层和地应力作用下的地层中的横波传播理论相结合，极大地开拓了正交偶极子测井的应用范围。例如，本章中有关裸眼井和套管井中天然和人工（水压致裂）裂隙的测量，地应力方位的测量等，都有实例介绍和说明。本章的最后介绍了由斯通利波反演地层（水平和垂直向）各向异性的一种快速而有效的方法。

第六章总结了本书的重要结果，并介绍了声波测井的其他一些重要应用。如井周围速度结构的层析技术和应用，井外地层界面反射波的偏移成像及实例，以及声波测井的最新领域——随钻测井仪器的发展，存在的问题以及今后的发展方向等。

该书理论严谨深入、前呼后应，波形数据处理方法独特新颖、依据可靠，应用举例丰富、图文并茂。该书适合于不同背景、不同兴趣的读者。可作为石油物探、地球物理、应用物理（声学）等相关专业的大专院校的教师和学生（特别是研究生）以及从事测井、物探、地质等有关研究和技术开发人员的参考用书。

前 言

声波测井是石油勘探工业中专业性很强的一个领域。它是一门多学科的应用技术，包括基本理论、仪器的设计和制造以及测量数据的处理和解释等。它已成为油储勘探、储量评估、完井及油气开采等方面不可缺少的工具。早期的测量采用模拟信号技术测量声波的到时，这种测量的目的在于确定声波在仪器探头之间的传播时间（或慢度），并研究它与地层孔隙度的关系，由此判断油储的位置并估计其储量。20世纪70年代晚期，“数字化时代”的到来使得“全波”声波测井成为可能。所谓“全波”声波测井是指将测井仪器上所有接收器接收到的全部声波信号进行数字化，然后加以处理和解释。而处理和解释“全波”声波信号的需要导致了許多新的理论研究和定量分析及处理方法的发展。

近年来，声波测井领域中的定量分析及解释方法有了长足的发展。这种发展是声波测井服务市场的需要，也是许多大学及工业界科研部门多年努力研究的结果，并且与计算机技术的高度发展密切相连。从严格的理论和数值模拟的结果导出的分析方法，与先进的反演理论和计算方法相结合，产生了用于快速计算机和工作站上的计算程序或处理软件，这就使得声波数据的快速高效率处理成为可能，甚至可以在测井现场进行数据的实时分析处理。

人们研究了各种不同地层井中声波的传播。地层可以是弹性地层、孔隙地层、可具有非均匀性，甚至可以是各向异性地层。井中复杂的波动现象包括声波能量的激发、声源能量在各振型上的分配、套管及水泥层的影响、地层渗透率和各向异性的影响以及井对各种地层参数及变化的声波响应情况。井中声波的传播理论在以前发表的有关科技文章及专著中已有记载，如“Underground Sound”（White, 1983），“Acoustic Waves in Boreholes”（Paillet 和 Cheng, 1990），这些理论为定量分析全波测井数据提供了可靠的理论基础。本书的重点在于在声波理论和实际声波数据之间建立起一座桥梁，以期把对井中波动现象的理论分析用来从实测的声波波形数据中提取地层的各种信息。

正确的处理声波数据是确定地层声学参数的关键。声波测井条件下，声波信号通常被各种噪声所干扰，例如数据的量化误差、粗糙的井壁及地层界面的反射及散射、不同振型之间的相互干扰及转换等，这些噪声干扰使得声波测井数据的处理工作变得繁重而复杂。声波数据处理的一些具体要求是处理结果的精度、可靠性、分辨率以及处理过程的效率如何，声波阵列数据处理的关键是尽量压制噪声干扰，同时最大限度地加强并利用数据中的信息。人们已经发展了几种方法来从数字化的阵列声波数据中提取地层的声学参数（如速度、衰减、各向异性等），可以比较精确地确定油储地层的力学、声学、岩石物理学性质。本书将详细讨论这些方法以及它们的优点和不足之处。

全波分析的一个重要结果是从斯通利波的波形数据来计算地层的渗透率。斯通利波是测井声波在低频域内的主要振型。由于这个波在井液中传播，而且对井壁界面的情况非常敏感，它是三十多年以来人们一直用来作为计算地层渗透率的手段之一。不幸的是，早期的理论研究并未给出令人满意的结果，原因有两个：第一，早期的测井仪器激发不出低频斯通利波（ $<4\text{kHz}$ ）；第二，斯通利波除了受渗透率的影响以外，还受其他一些与渗透率无关的因素的影响。这些非渗透率效应包括数据噪声、地层/井径变化、井壁处的泥饼、介质内耗

散或非弹性衰减以及地层各向异性等。因此，解决该挑战性课题的关键是如何把渗透率产生的效应与其他非渗透率效应区分开来。随着理论研究的深入以及现代测井仪器已可获得低频斯通利波，近几年来这方面已有了很大的进展。在处理上利用弹性理论模拟计算渗透率为零时的波形，将理论模拟结果与实测数据进行比较，那么二者之差就应该与地层渗透率的影响有关。利用这种方法得到的渗透率曲线与从其他途径（如核磁共振、岩心测量等）测量得到的渗透率曲线相当一致。

偶极子声波测井技术的发展引导出声波测井的一些新的应用。偶极子声波测井是确定软地层中的横波速度的需要，特别是在世界各地深海油储的勘探中，这一技术更是十分必要。然而，该技术产生的很多重要的应用是以前未曾想到的。偶极子横波测井除了可以测量软地层中的横波速度以外，其测量具有的方向性对地层性质的方位变化也很敏感。偶极子横波的方向性更被用来进一步发展了正交偶极子测井技术，从而可以确定井壁周围地层横波环向各向异性。正交偶极子技术开创了声波测井新的应用领域，通过测量环向各向异性，人们可以分析地层的应力场、探测裂隙、甚至进行套管外面水压致裂效果的评估。本书将讨论正交偶极子声波测井的应用。

除了测量环向横波各向异性以外，声波测井还可以确定竖直向相对于水平向的横波各相异性，即横向各向异性（TI）。TI各向异性存在于很多沉积岩石中，并在油储地震勘探中开始起着重要的作用。虽然横波（单极子或偶极子）沿竖直井的传播只能测量竖直方向的横波速度，但是，斯通利波却对水平向传播的横波速度很敏感，因此可以用来确定水平向横波速度。本书将介绍通过声波测井数据确定横波 TI 各向异性的理论和方法。地层的各向异性性质对地震勘探来说比较重要，它告诉人们在地震成像处理中要不要考虑各向异性的影响。

未来几年中，我们期待声波测井技术的进一步发展及产生更多的应用。有些重要的应用已见端倪，这在第六章中将有所讨论。值得一提的是人们已经开始研究声波的随钻测井。随钻测井技术要求更复杂的理论和数值模拟，在测量数据的分析处理及解释方面需要更多的探索和研究。来自学术界以及工业界持续不断的努力投入和支持才能保障声波测井技术不断地发展。

目 录

第一章 声波测井的应用和最新进展	(1)
1.1 声波测井概念及测井仪器发展概述	(1)
1.2 地层弹性波特性的测量及应用	(5)
1.3 渗透率测量	(12)
1.4 地层各向异性的测量及其应用	(14)
1.5 由斯通利波确定横波横向各向同性 (TI)	(18)
第二章 弹性波在井中的传播	(20)
2.1 井中声波点源	(20)
2.2 地层弹性波动解	(22)
2.3 井壁边条件	(23)
2.4 全波理论地震图	(24)
2.5 井中振型分析	(27)
2.6 同心层状地层的理论模拟	(31)
2.7 同心层状地层和套管井中的声波测井理论地震图	(35)
2.8 随钻测井多极子声波传播的模拟	(39)
2.9 波衰减的模拟	(42)
2.10 横向各向同性介质中的声波测井.....	(43)
第三章 通过阵列声波测井数据计算弹性波速及衰减	(51)
3.1 频域方法	(51)
3.2 时间域的方法	(54)
3.3 提高分辨率	(59)
3.4 井径补偿	(63)
3.5 频散效应及其校正	(65)
3.6 计算声波衰减	(70)
第四章 地层渗透率的声波测井——理论、方法及应用	(75)
4.1 渗透孔隙地层中的测井声波传播理论	(75)
4.2 通过井中的斯通利波计算渗透率	(86)
4.3 地层渗透率的声波测井和核磁共振测井的联合解释	(99)
第五章 各向异性地层中的声波测井——理论、方法和应用	(108)
5.1 测井环境中的各向异性	(108)
5.2 确定横波各向异性的正交偶极子声波测井分析方法	(109)
5.3 正交偶极子各向异性测量在裸眼及套管井中裂隙分析方面的应用	(120)
5.4 正交偶极子各向异性测量在地层应力分析中的应用	(130)
5.5 确定地层横波的横向各向同性 (TI) 参数	(144)
第六章 总结、相关课题以及前景展望	(152)

6.1 总结	(152)
6.2 相关课题与前景展望	(153)
致谢.....	(162)
参考文献.....	(164)

第一章 声波测井的应用和最新进展

1.1 声波测井概念及测井仪器发展概述

声波测井是地球物理测井的主要方法之一。地球介质的声波特性如速度、衰减等与岩石种类及地层流体性质紧密相关，因此，测量地球介质的速度及衰减可以提供重要的介质及其变化信息。声波测井中，测井仪器置于井内，声波由仪器内部的声源产生并沿井壁传播，最后被同一仪器中的接收换能器接收（图 1-1）。测井时，测井仪器由电缆连接而上下移动。该电缆既被用来拉动仪器本身，同时又用来为仪器提供电源并传导数据。这种测井叫做电缆测井。测井数据经过处理可提供井壁周围介质的声学性质的连续曲线。

当仪器在井中连续向上（或向下）移动时，地层的声学参数可以通过处理测井声波数据而获得。井中声波是由井中声源发射，并由一系列接收换能器记录得到的。

早期声波测井仪器通常使用两个接收换能器（图 1-2），其间的距离已知。因此，通过测量两个换能器接收到的信号之间的到时差可以计算介质中 P 波（又称压缩波或纵波）的慢度（即波速的倒数）。

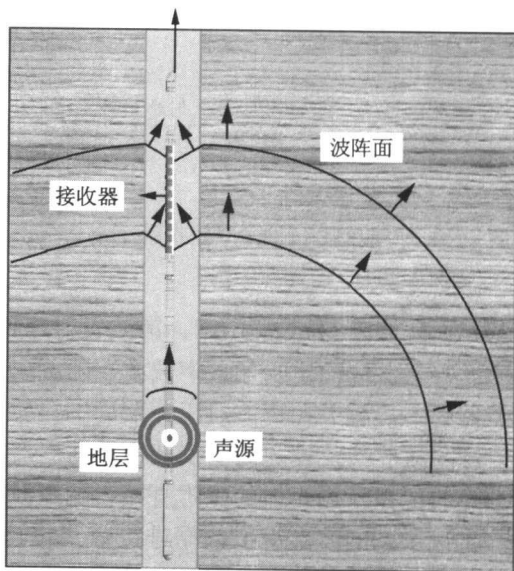


图 1-1 声波测井仪器探测地层声学性质的示意图

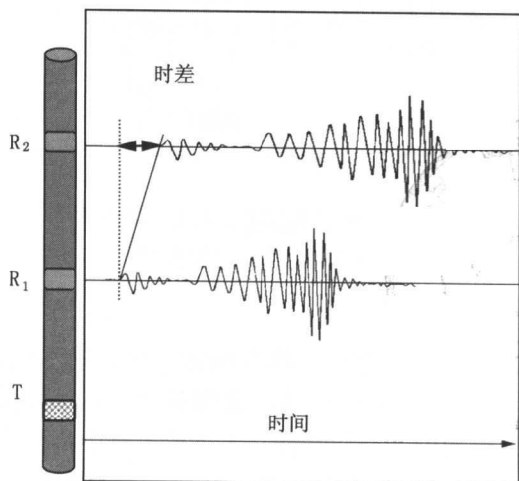


图 1-2 早期的双接收器声波测井仪

后来人们发现井径的变化（变大或变小）会影响声波到时的测量，从而发明了一种井径补偿声波测井仪。这种仪器从原来的单发双接收换能器型改进成双发双收型，其中一组发射—接收器换能装置 $T'R_2R_1$ 相对于另外一组发射—接收器换能装置 TR_1R_2 来说方向正好相反，其原理如图 1-3 所示。图中，上半部分井径较小，下半部分井径较大，中间有一个井径的跃变。双发双收型仪器中，第一组发射—接收装置 $T'R_2R_1$ 的声波发射源 T' 位于接收换能器 R_2 和 R_1 的下方，由于声波在井壁固体中的传播距离加长，两换能器之间的到时差将小于井壁为常数时的到时差。而另一组发射接收装置 TR_1R_2 的发射源 T 位于接收换能器 R_1 和 R_2 的上方，

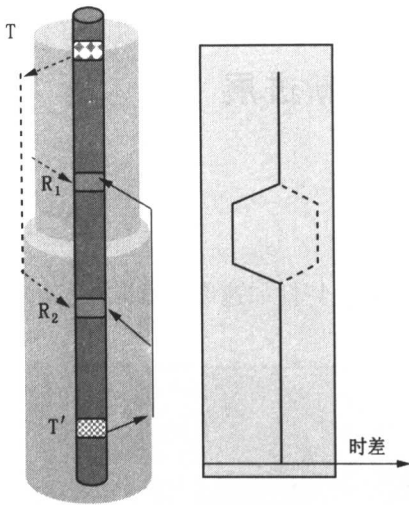


图 1-3 早期的利用两套双接收器系统进行井径校正的图示

其记录到的两接收换能器之间的到时差将大于井壁为常数时的计数，原因是声波在井中液体里的传播距离加长。因此，如果将两组发射—接收装置记录到的时间差求和再平均，那么由于井壁直径变化造成的测量误差就会得到一定程度的补偿。然而，这种井径补偿测井仪有一些很严重的缺陷。例如，当井壁表面很粗糙或存在裂隙带时，声波信号将衰减严重，初动很难识别，结果使得很多早期声波测井资料存在所谓的“周期缺失”现象。这种现象便是由于初动标识不准造成的。为了克服这种双发双收型仪器的弱点，人们发明了阵列型声波测井仪。

声波阵列测井的基本原理是利用阵列的大量重复的信息来弥补由于各种可能的测量误差造成的信息损失。由于要从有大量重复信息的阵列数据中提取有用的信息，阵列数据必须经过数字化处理，从而要求声波波形资料必须数字化地记录下来。最早的数字声波阵列测井仪始于 20 世纪 70 年代。一般的声波阵列有 4~12 个接收换能器，换能器之间间隔 0.5ft。声波发射源到第一个接收换能器的距离一般是 6~12ft，视所需要的穿透深度而定。如果声波波速随着离井壁的径向距离增大，那么，声波发射源到接收换能器的距离越大，声波对于井壁周围介质的穿透距离就越深。另外，声波测井仪中的声波发射源与接收换能器之间要安装声波隔离器，又称隔声体，它的作用是消除或削减声波沿仪器本身的传播。隔声体的优劣直接影响声波波形的数据质量。

将记录到的波形模拟数据进行数字化转换以后，声波信号的复杂性逐渐显露出来。除去前面提到的弹性纵波以外，声波源还同时产生很多其他声波信号。图 1-4 给出了弹性纵波波速和横波波速均大于井中流体介质的声波波速时，声波换能器接收到的各种声波信号。首先到达的是弹性纵波 (P)，其后是横波 (S)，再后面是一大串导波。导波有两种不同的振型组成，一种是所谓的伪瑞利波 (Pseudo-Rayleigh)，它与限制在井壁附近的声能有关，而且只有当井外介质的横波速大于井内流体波速时存在。另外一种斯通利波 (Stoneley)，它是一种井壁导波。关于这两种导波的详细情况将在本书第二章中给出。

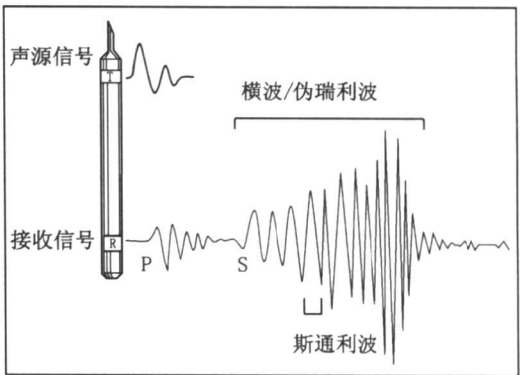


图 1-4 地层横波速度大于井中流体速度的地层中的声波振相

阵列式声波测井仪有一个很大的优势，那就是不同的振型到达接收换能器的时间不同，如图 1-5 所示，各种振型的到时偏移也不同。声波测井数据处理时，这些不同的到时偏移可用来分析各种波的传播特性，从而进一步得到井壁周围的介质特性。本书第三章中将详细讨论阵列测井数据的各种处理方法。这些方法大致可以划分为两大类：频域方法和时域方法。频域方法可用来分析各种波型的传播及频散特征，时域方法则用来从测井声波数据中有

— 2 —

效的提取井壁周围的介质性质。

阵列式声波测井的另一个优势体现在井径补偿可由阵列数据的不同组合及处理而实现。采集数据时，可以将声波数据分为声源阵列和接受器阵列，再将二阵列的结果求平均，这样就可以有效的补偿由井径变化带来的误差。详细的数据组合方法及其结果将在第三章中讨论。

传统的声波测井仪使用的声源通常是一个井中的压力脉冲源。声源的辐射一般是各向同性的，至少在井的横截面内是如此。这种声波源称为单极子源 (Monopole)。在单极子测井中，井中换能器接收的纵波和横波均为沿井壁传播的首波 (临界反射波)，因此只有当地层中的横波波速大于井中流体声速时，横波才会被井内换能器接收。这种地层通常称为快速地层 (“Fast” Formation)。当地层内的横波波速小于井内流体波速时，单极子源发射的横波信号在井壁上无法满足临界折射条件，故而井内换能器接收不到横波。这种地层称为慢速地层 (“Slow” Formation)。通常人们说慢速地层中没有横波就是这个道理。然而，很多地方的地球介质都是慢速介质，特别是在像美国墨西哥湾这样的深海地区，介质的孔隙度很大，且胶结程度不好，其横波波速可以远远小于井内流体波速。

为确定慢速地层中的横波波速，人们发明了偶极子 (Dipole) 声波测井仪。横波测井原理是由 J. E. White (1967) 最先提出的，当时 White 提出了所谓的“呼啦” (Hula) 波测井模式。后来到 1980 年，“呼啦”测井概念由 Kitsunozaki 加以阐述。20 世纪 70 年代末，美国美孚公司的 J. Zemanek 开创了横波测井应用的先例。横波测井的最初结果是由 Zemanek 等人 (1984) 发表的。当时他们用的是一种能够弯曲振动的板状声源 (Bender) 在液体中激发一种指向性向位移，这种指向性向位移在井壁介质中产生弯曲波 (Flexural Wave)，此弯曲波沿井壁传播最后被另一个能够弯曲振动的板状换能器接收。在高频情况下，该弯曲波是与斯通利波相关的界面导波，因而在快速与慢速介质中都存在 (这与前面提到过的单极子情况下的临界折射横波不同)。弯曲振动声源产生的弯曲波具有频散特征，其低频时的最大传播速度为井壁地层中的横波速度。这种指向性向位移源通常称为偶极子源。偶极子源可用于探测各种地层 (快速地层/慢速地层) 中的横波速度。

为了有效地进行声波测井测量，人们通常把偶极子换能器与单极子换能器结合起来形成多极子声波测井仪 (图 1-6)。多极子声波测井仪中，消声对于偶极子声波波型的检测质量非常关键。偶极子源发射时，井壁地层及井内仪器同时被激发并产生弯曲或者挠曲振动。由于仪器的挠曲波为低频波，非常难以消除或被衰减掉，结果会使得地层介质的挠曲横波被严重干扰。因此，没有很好的隔声或消声设备的测井仪的适用范围非常有限。地层介质传来的挠曲横波与仪器的挠曲波混在一起，使得介质的挠曲横波难以辨认甚至不可能被辨认。测井工业界人士曾为这个偶极子测井仪的隔声问题努力了十几年，现在大家已基本公认，较好的

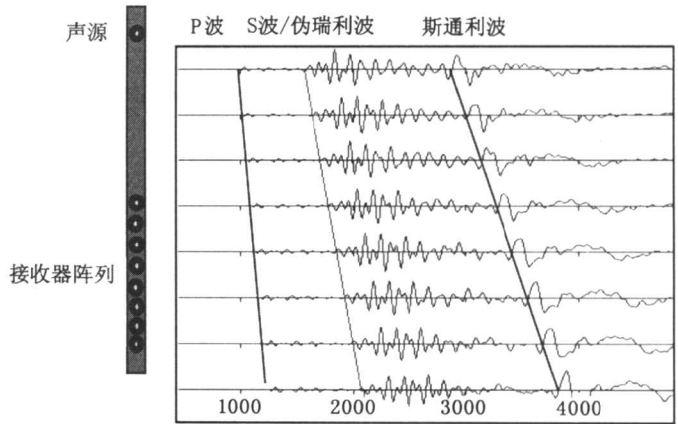


图 1-5 跨过接收器阵列的声波及时偏移
不同振相的传播速度不同，因此偏移的程度也不同

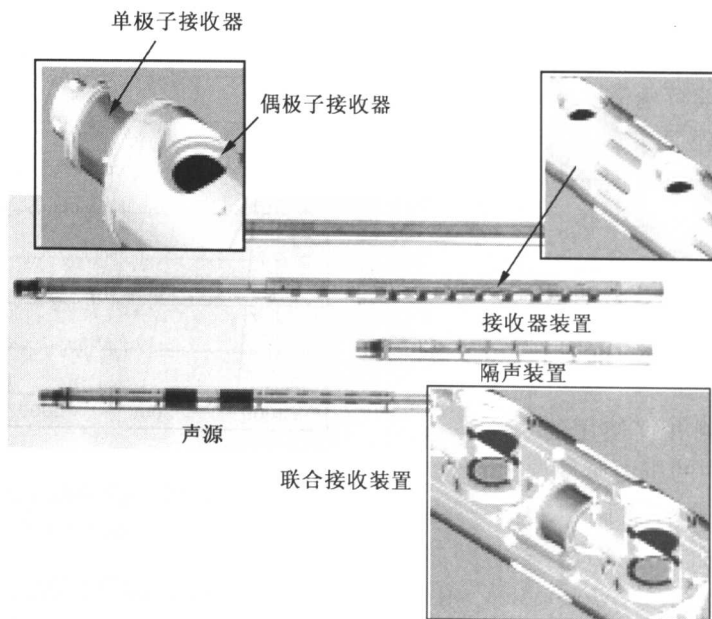


图 1-6 包括单极子和偶极子声源和接收器的多极子声波测井仪

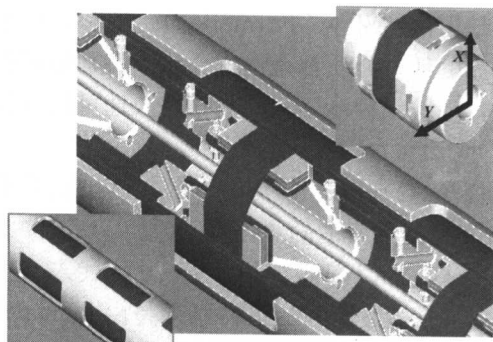


图 1-7 正交多极子声波测井仪器的接收器设计

该接收器有四个单元，其输出按激发振幅（偶极子或单极子）来组合。利用这种设计，可以纪录单极子、偶极子、正交偶极子声波数据，注意各接收器之间还有隔声设计

隔声途径是使用软性物质（如橡胶）将换能器与仪器壳体，以及换能器与换能器之间隔离开来（Cowles 等，1994；图 1-7）。

偶极子源还有一个优势：因为它是指向性发声，因此可以用来测量波速随角度的变化。这一事实导致了正交偶极子测井仪器的诞生。正交偶极子测井仪由两组指向互相垂直的偶极子发射和接收系组成，分别指向卡迪尔坐标的 X、Y 方向（图 1-7）。当偶极子源沿 X 或 Y 方向激发时，位于仪器两面的两个偶极子接收单元将分别记录到一个正向和负向位移。计算此二位移之差事实上相当于将接收到的每一个单元声信号加倍（因二者的极性相反）。另外，这个求差的过程还能消除或削减那些两接收单元上极性相同的信号（如单极子波信号）。图 1-7 中所示的正交偶极子接收系统也可以用作单极子系统。单极子源发射时，系统中的四个接收单元将接收同样的压力信号。因此，要想得到单极子波型数据，只需将图中四个接收单元的信号相加即可。这一结果又导致了正交多极子声波测井仪的诞生。有了这种正交多极子仪器，只需要进行一次测井测量，便可同时得到单极子、偶极子以及正交偶极子声波数据。采集并处理正交偶极子声波数据可以用来确定横波环向各向异性特征，并进一步获得井壁周围地层的各向异性信息，特别是在地层裂隙特征的研究及地应力的测量中有着广泛的应用。这些重要结果将在本书第五章中详细介绍。

子接收系统也可以用作单极子系统。单极子源发射时，系统中的四个接收单元将接收同样的压力信号。因此，要想得到单极子波型数据，只需将图中四个接收单元的信号相加即可。这一结果又导致了正交多极子声波测井仪的诞生。有了这种正交多极子仪器，只需要进行一次测井测量，便可同时得到单极子、偶极子以及正交偶极子声波数据。采集并处理正交偶极子声波数据可以用来确定横波环向各向异性特征，并进一步获得井壁周围地层的各向异性信息，特别是在地层裂隙特征的研究及地应力的测量中有着广泛的应用。这些重要结果将在本书第五章中详细介绍。

在接下来的几章中，本书将介绍近几年来全波测井及偶极子测井的最新进展及其应用，包括测井理论、测量方法和一些测井结果及应用实例。

1.2 地层弹性波特性的测量及应用

现代阵列声波测井中，地层的纵波（P）及横波（S）的慢度（速度的倒数）剖面是通过单极子或偶极子发射—接收系统测量得到的。声波阵列波形数据的时域内处理一般采用相干叠加方法，如波形相似法或 n 次方根法，还有时域的波形反演/匹配方法。波速剖面的确定可以有不同的分辨率，视所用的波形数据组合的跨度间隔而定，由阵列跨度 3.5ft 到换能器的间隔 0.5ft 不等。本书第三章中将讨论各种不同的数据处理方法以及如何提高慢度剖面的分辨率。从偶极子测井数据中提取的横波波速通常会受偶极子测井仪器产生的弯曲波的频效应的影响。第三章中介绍了一种频散校正的简单方法。

地层弹性波波速在石油勘探中的应用广泛。它可以被用来测定油气田的位置，估计油气储量，推算油气田的形状，并给出油气开采的最佳完井方案。除了地层的 P 波和 S 波速度以外，单极子、偶极子测井的波形数据还可以提供一些其他的地层特征参数。地层的声波测井孔隙度（Acoustic Porosity）便是其中之一。其他重要参数还有 P 波、S 波的衰减、地层的渗透率、横波各向异性及方向性、裂隙密度及排列方向、地应力等。本书将着重介绍各个参数的确定方法以及这些方法所需要的前提和假设。

1.2.1 地层孔隙度估算

多数沉积地层岩石含有孔隙或具有渗透性。油气储层中的碳氢化合物通常储存在孔隙岩石的孔隙中。因此，地层孔隙度的估算是油气储层估算的重要内容。地层的孔隙度、孔隙内流体的种类以及孔隙的饱和程度都会影响孔隙介质中的弹性波波速。早期的孔隙度估算是根据 Wyllie 方程，其理论根据是假定地层内弹性波的传播时间是由两部分求和组成，一部分是波在岩石骨架中的传播，另一部分是波在岩石孔隙中的流体中的传播。Wyllie 方程如下

$$S = (1 - \phi)S_m + \phi S_f \quad (1-1)$$

式中 ϕ ——孔隙度；

S ——测到的地层纵波慢度（传播时间除以传播距离）；

S_m ——岩石骨架的慢度；

S_f ——孔隙内流体波速的慢度（流体可以是油、气或者重油）。

Wyllie 方程可以看成是岩石孔隙度和慢度之间的经验公式，其中岩石骨架的慢度 S_m 视岩性而定（如砂岩或石灰岩等）。后来人们为了扩大岩石孔隙度与慢度之间的关系的应用范围，对 Wyllie 方程进行了不同形式的修正。例如，Wyllie 方程中的 $(1 - \phi)$ 项可以变为 $(1 - \phi)^n$ ，其中指数项的指数 n 由岩性确定。孔隙度 ϕ 也可以分解成两项，其中一项与可以流动的液体（如油，水，气）有关，另一项与孔隙内不可流动的物质（如孔隙表面的泥质）有关。无论采用何种估算公式，地层慢度都是岩石孔隙度估算的一个关键参数。

1.2.2 地震勘探中的应用

石油地震勘探中，声波测井得到的弹性波速度剖面为将地震时间剖面转换为深度剖面所需要的速度模型提供了一种约束或是限制。地震时间剖面与理论地震图的比较是一种常用的方法。通常，理论地震图是通过计算一个地震子波与一个地层反射剖面的褶积而获得，其中

的地震子波的频率范围要与相关的地震数据相吻合。而反射剖面则须由波速及密度来计算出声阻抗（波速×密度），再在每一个深度上计算垂直入射时的反射系数。对于两层介质来说，这个反射系数就是两层介质内的阻抗之差除以两个阻抗之和。比较经过深度偏移处理过的地震反射波与理论计算出来的地震反射波，就可以识别主要的反射事件，并由此调节地层速度，完成将地震记录从时间剖面到深度剖面的转换。

声波测井曲线的另一个重要应用是研究地震波振幅随测距的变化（AVO）。地震波的反射系数（进而反射波的振幅）随波的人射角及声阻抗而变化，同时受两地层中纵、横波速度的影响。通过研究地震剖面的 AVO 响应，通常可以估计反射地层内 P 波、S 波的速度及其变化，从而得到地层内的岩石物理性质。P 波、S 波速度的测井曲线有助于揭示井所在地层的地震波 AVO 变化，并区分这种变化是由地层中的油、气所造成还是由 P 波、S 波速度变化所造成。

1.2.3 地层的力学性质

弹性波速度还可以用来估算地层的力学性质，从而使人们能更好的选择完井及采油程序。利用 P 波、S 波速度和地层密度的测井曲线，可以计算地层的体积弹性模量（Bulk Modulus）、剪切弹性模量（Shear Modulus）、杨氏模量（Young's Modulus）以及柏松比（Poisson's Ratio），这些都是确定地层力学性质的重要参数。但要注意，从声学测井得到的这些物理模量是动态模量，它们与决定岩石长期变形的静态模量可能非常不同（Cheng、Johnson, 1981），但是在某种程度上也可以用来预估岩石静态参数。而地层的力学性质在估算井的稳定性、出砂的可能性、裂隙强度以及其他有关油储产量及开发参数时至关重要。

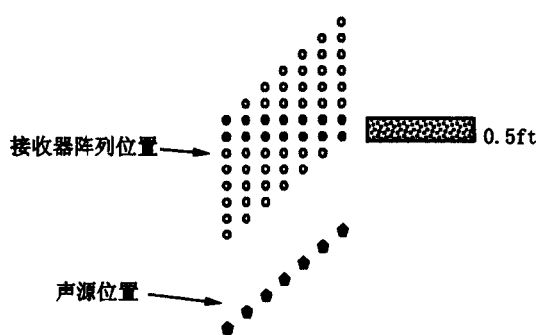


图 1-8 地层的覆盖间隔与接收换能器间隔相等时的位形

利用八接收器阵列声波测井仪在七个相邻深度上进行测量，就得到七组双收子阵列，其跨度为 0.5ft，且跨过相同的地层间隔。这种组合方式得到的波形数据经过适当分析处理，可以获得最大的声波慢度纵向分辨率

1.2.4 提高地层慢度曲线的分辨率

对地层进行评估时，通常需要定量估计地层中薄、夹层的声学性质及岩性，目的是更好地估计油气储量以及油储的性质。一般的声波测井资料处理可以得到相当于接收换能器阵列跨度上的地层平均慢度（通常为 3.5ft 或 1.067m），而有些更小尺度的薄地层可能会分辨不清。为了提高慢度剖面的纵向分辨率，人们进行了多方面的探索。阵列声波测井提高分辨率采用的方法如下：将阵列数据化分成一系列子阵列，利用子阵列对同一深度间隔进行覆盖式测量，该深度间隔与子阵列跨度相等。能够使用这种方法的原因是：在现代声波测井仪器中，声源发射的阵列波形在测井移动时（移动步长等于相邻接收换能器之间的间隔，一般为 0.5ft 或 0.1524m）被反复接收。因此，一

系列相继声源位置上的不同接收波阵列会有重叠。薄地层的慢度分析就是利用这些相互重叠的阵列数据中信息的重复性来改进结果的纵向分辨率，同时提高地层慢度计算的精度（Zhang 等，2000）。图 1-8 给出数据处理时地层的覆盖间隔与接收换能器间隔相等（0.5ft 或 0.1524m）时的位形，这种位形具有最高的分辨率（含有八个接收换能器的阵列式声波测井仪的全部可能的数据组合形式及其适用条件将在本书第三章中给出）。对有相同深度跨

度的波形数据，进行双波匹配 (Pair-wise Match) 反演方法得到该跨度地层的慢度。与传统的阵列处理方法相比较，这种方法极大的改进了慢度剖面的分辨率。图 1-9 中给出了一个改进声波测井纵向分辨率的实例，下面介绍一下该实例的具体情况。

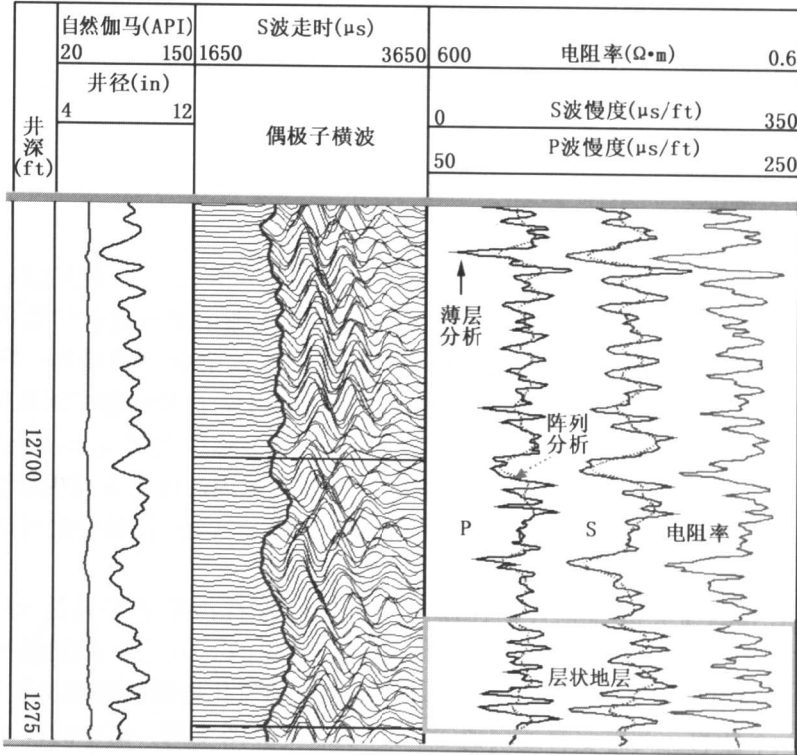


图 1-9 层状地层中利用薄层处理方法 (实线) 和阵列方法 (虚线) 得到的 P 波、S 波慢度曲线的比较 (第三道)

图 1-9 中将传统的声波测井阵列处理 (虚线) 与薄层分析处理 (实线) 的 P 波、S 波慢度曲线进行了比较。相应的偶极子横波波形 (接受器 1) 在第二道中给出，自然伽马射线 (Gamma) 测井曲线和井径 (Caliper) 曲线在第一道中给出。与阵列分析结果相比，利用 0.5ft 作为处理间隔的薄层分析方法给出的 P 波、S 波慢度剖面的分辨率大大提高。为了验证薄层分析得到的高分辨率的可信度，图中第三道给出了分辨率为 1ft 的电阻率剖面 (右边的曲线)。图 1-9 中给出的三种剖面上地层变化特征的相关特性吻合得相当好，从而验证了薄层分析提高分辨率的可靠性。提高后的慢度分辨率使得传统测井资料处理中被忽略的某些地层特征被识别出来，如图 1-9 中位于 X0750 ft 附近的地层特征。P 波、S 波慢度分辨率的提高也可以改进岩性分析以及波速比与慢度交汇图的分析结果，这个问题下面还要详细讨论。

1.2.5 利用 P 波、S 波慢度测量进行岩性分析

地层孔隙内的碳氢化合物 (油和气) 可以较大地改变 P 波慢度，因此可以通过慢度测量来加以识别。慢度的改变可由 Gassmann 方程来模拟

$$K = K_d + \frac{(1 - K_d/K_s)^2}{\phi/K_f + (1 - \phi)/K_s - K_d/K_s^2} \quad (1-2)$$

式中 K ——岩石总体的体积变形模量；

K_s ——岩石颗粒的变形模量；

K_d ——干燥岩石的体积模量；

ϕ ——孔隙度；

K_f ——孔隙中流体的体积模量。

孔隙流体对 P 波速度的影响由下式计算：

$$v_p = \sqrt{(K + 4\mu/3)\rho} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——岩石密度；

μ ——剪切模量，剪切模量受孔内流体的影响较小。

对于含较轻的碳氢化合物或气体的孔隙岩石（如砂岩）来说， K_f 值可以远远小于水的体积模量，这时 P 波速度会下降，慢度将提高。这种由孔隙中碳氢化合物造成的速度或慢度变化在高孔隙度岩石中尤为突出。当这种变化足够强时，单单 P 波慢度一项就足以探测到碳氢化合物的影响。然而，在许多砂岩、页岩交替地层中，这种孔隙中碳氢化合物造成的变化往往与岩性变化混在一起。这种情况下，利用纵、横波速度之比 v_p/v_s 得到的结果会更好些。原因是当 P 波和 S 波速度随岩性变化时，P 波对孔隙内流体比 S 波更加敏感，而两波速之比能抵消（至少是部分抵消）地层变化的影响。因此， v_p/v_s 比的变化可以更好的显示孔隙流体而非岩性的影响。

一个行之有效的研究碳氢化合物性质及其含量的岩石物理学工具是 v_p/v_s 比与 Δt_p (Brie 等, 1995) 或 Δt_s (Williams, 1990) 的交会图，这里的 Δt_p 、 Δt_s 分别是纵波和横波的慢度。这种交会图中数据交会的趋向揭示了相应地层内碳氢化合物的影响及其含量。图 1-10a 中给出了一个砂岩、页岩交替地层的 $v_p/v_s - \Delta t_p$ 交会图实例。图中的慢度数据由阵列分析得到（阵列跨度为 3.5ft）。该图以及图 1-10b 中的页岩、饱和砂岩、干燥/含气砂岩的趋向曲线由 Brie 等人（1995）提出的方法得到。此二图中显示大多数数据点都在页岩和饱和砂岩趋向曲线附近，只有少量数据表现出从饱和砂岩的趋向曲线向干燥/含气砂岩趋向线倾斜的趋势，表示孔隙内流体为轻流体（如轻油、含气等）。这一点可以从方程（1-1）、（1-2）中看到：当孔隙内流体模量减小时，P 波速度减小（慢度增大），而 S 波速相对来说不受影响。结果导致 v_p/v_s 比随着交会图上 P 波慢度的增大而变小（图 1-10）。对于储气地层，该比值下降幅度与气体的含量有关。这时，干燥砂岩趋向线与饱和砂岩趋向曲线之间的数据点反映砂岩中液体的饱和度，人们可以由此定量地分析孔隙中的流体饱和度（Brie 等, 1995）。但是， v_p/v_s 比值与饱和度之间的定量关系还取决于一些其他因素，如气、油、或重油的性质，及孔隙中这些多相介质（油、气等）混合所遵循的规律。目前这个课题仍在研究中。

应用高分辨率的 P 波、S 波慢度曲线可以更好的勾画出交会图上 v_p/v_s 与 Δt_p 或 Δt_s 的相关性，尤其是对砂岩、页岩交替的地层更是如此。图 1-10b 与图 1-10a 基本相同，所不同的是图 1-10b 中用的是高分辨率的 P 波、S 波慢度数据（数据处理间隔即子阵列的跨度为 0.5ft）。与图 1-10a 相比，图 1-10b 中从饱和砂岩区到干燥/含气岩区的整个区域中的数据走向更加集中，涵盖的区域更加广泛，标示出不同砂岩区间的孔隙流体不同的饱和程度。这个例子说明高分辨率的声波慢度曲线可用来更好地确定地层碳氢化合物及其饱和程度。