

声波测井 新技术及应用实践

赵立新 陈科贵 王文文 喻克全 著



石油工业出版社

声波测井新技术及应用实践

赵立新 陈科贵 王文文 喻克全 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍声波测井的新技术及应用实践。内容包括声波测井的原理和发展历程,全波列测井技术的发展,声波测井在流体识别方面的应用,在裂缝性地层中的应用,最后对声波测井的发展提出建设性的建议。本书的主要特色是不但总结了声波的运动学(速度)信息在流体识别方面的研究和应用,而且也总结了利用声波的动力学(能量、频率)以及岩石力学参数等信息在流体识别方面的丰富研究成果。

本书适合石油勘探、石油工程相关人员及大专院校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

声波测井新技术及应用实践 / 赵立新等著.
北京:石油工业出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5021-9155-9

I. 声…

II. 赵…

III. 声波测井

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 147919 号

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.com.cn

编辑部:(010) 64523736 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:22

字数:529 千字

定价:98.00 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

前 言

通常,声速测井或声幅测井只记录和利用滑行纵波首波的速度(时差)或幅度信息,对携带有大量地层信息的后续波则没有记录和利用。声波全波列测井与普通的声速测井和声幅测井不同,它记录了更多的地球物理信息,如声速(纵波、横波、斯通利波)、幅度和频率等。因此,利用声波全波列测井资料更能准确地计算出岩石地球物理参数。声波全波列测井在油气储层评价、流体性质识别和工程应用方面的作用越来越大,尤其是近年来多源距、多极子阵列声波测井的出现,不但使得测井提供的地层信息更丰富,信息质量和精度更高、用途更广,而且野外施工效率也获得了更大的提高。我国在20世纪80年代末至90年代初开始从斯伦贝谢公司引进声波全波列测井仪器的商业服务,当时的主要目的是用于孔隙度的计算、碳酸盐岩及复杂岩性的裂缝评价、气层识别、岩石力学参数评价和井壁工程方面的应用等。经过二十多年阵列声波和多极子声波仪器的现场使用,录取了大量测井质量比较高的全波列测井资料,但目前对这些资料的深入应用研究还处于起步阶段。

目前,对声波全波列测井资料的应用研究仍主要局限于速度方面,而对声波幅度和频率的应用研究非常少。本书中大部分研究成果是以南海某海域所采集的全波列测井资料为研究靶区,将南海地区丰富的声波全波列测井资料所携带的地层信息充分挖掘出来,并针对海上油气田储层的特点和流体性质特征,通过对声波全波列资料的精细分析和处理,从中提取出对油气储层评价和流体性质识别有用的信息(声波速度、幅度和频率等),并把这些信息资源与常规测井资料相结合,开展了如下几方面的研究:

- (1) 利用提取的波列属性(振幅和频率)开展了地层流体性质定性识别方法研究;
- (2) 利用提取的速度属性信息开展了储层物性评价及流体性质的关系研究;
- (3) 利用波列属性开展了储层含水饱和度计算方法的探索研究;
- (4) 利用斯通利波开展了碎屑岩储层渗透率计算方法的应用研究;
- (5) 利用波列信息开展了裂缝性致密地层的裂缝识别和储层评价方法研究。

本书第5至10章的内容是这方面的研究和应用情况的分析和总结。这些内容主要是笔者近年来开展的一些有关全波列测井研究项目的研究成果,不但涵盖了全波列纵横波速度方面的最新应用研究成果,而且比较系统地阐述了利用全波列测井中所包含的大量动力学方面的信息(如能量衰减、频谱等)进行流体性质识别和储层物性(孔隙度、渗透率)以及流体饱和度定量计算方面的最新研究成果。

为了达到利用声波全波列测井进行储层评价和流体性质识别的目的,笔者选择储层埋深不同的几个气藏作为研究靶区,通过理论分析,并在已有的全波列评价技术基础和前人所做的大量研究工作的基础上,对全波列测井的适用范围、应用特点、评价精度进行了分析研究,并结合试油测试以及其他测井资料,利用较少的测试和实验数据开展相关研究,对现有的计算模型进行了改进和完善,扩展了声学信息解决地质问题的能力,

提高了油藏参数的描述精度,为低阻气层和低渗气层的有效识别做出了重要贡献。同时,为了能使广大技术和研究人员系统地了解整个声波测井的起源和发展历史以及声学测井的各种测井原理、基本解释方法,编写了第2章和第4章的内容,其中第2章简要回顾了声波测井的发展历程,第4章介绍了目前常用测井方法的基本测量原理和基本解释方法。为了广大技术人员和学者更能系统地掌握声波测井的理论基础和为今后进一步深入地开展声波测井信息方法研究和应用提供参考,也使该出版物内容体现出基础理论研究和实际应用相互依赖和相互促进的效果,编写了第3章。第3章系统论述了岩石弹性的理论基础和孔隙介质声波的传播特性和规律,以便于研究人员对基础理论方面的知识检索和查询。在本书的编写过程中西南石油大学开展该项目研究的老师和学生做了大量的研究工作,中海石油有限公司湛江分公司勘探部和研究院的有关技术人员提供了大量的基础资料和帮助,中国科学院声学研究所王秀明研究员、陈浩副研究员以及张秀梅博士在百忙中审阅了大部分稿件并提出了宝贵修改意见,中国海洋石油总公司总地质师、中海石油有限公司执行副总裁、勘探部总经理朱伟林先生以及勘探部副总经理米立军先生和总地球物理师王守君先生对作者和项目研究人员开展声波测井的地质应用研究给予了积极支持和鼓励,中海油田服务股份有限公司油田技术事业部的有关领导对本书的出版提供了大力支持,有关专家也对全波列数据的格式转换提供了技术指导,在此对他们付出的辛劳和贡献以及支持表示衷心的感谢。本书的部分研究内容是中海石油有限公司科研项目“成像测井在勘探开发和钻井工程中的应用研究”子课题南海西部地区全波列测井流体性质识别方法研究的科研成果,中国海洋石油总公司科技发展部和有限公司勘探部对项目管理和顺利实施做了大量工作,另外本书也体现了项目全体研究人员的智慧和心血,在此对他们的辛勤劳动表示深深的谢意。本书在编写过程中,得到国家“973”课题“中国陆块海相成钾规律及预测研究”子课题2011CB403002、2011CB403005的资助。

孔隙介质的地球物理传播规律十分复杂,地下介质本身不但是非均质的也是各向异性的,也并非是完全弹性的,目前的测量手段不论是宏观还是微观的也都需要进一步完善,目前人们对地下地球介质的波动传播规律的认识还十分肤浅,地球科学中的地震波动理论博大精深,知识面也非常宽泛,笔者所涉及的研究领域只是巨大知识冰山之一角,本专著仅是抛砖引玉,研究认为,声学信息流体识别在中孔中渗地层流体识别效果良好,但在低孔低渗和超低孔低渗地层的流体识别效果由于测量信息精度和分辨率在目前的技术条件下不够高,流体识别效果和方法也同样还需要继续完善,特别是复杂岩性复杂孔隙结构的低孔低渗和超低孔低渗凝滞气层和气水同层的识别和定量评价还不令人满意。另外,高频声学信息对地层的径向探测深度都普遍较浅,测量信息易受钻井液侵入和井眼附近由于钻井造成的蚀变带的影响,流体识别效果明显受侵入和钻井的影响,其相应的测量信息的钻井液侵入校正和补偿方法也需要深入探索研究。作者希望有更多的地球科学爱好者和有识之士发现和揭示更多、更有价值的理论和应用方面的成果。限于笔者水平,书中肯定存在的不少错误,敬请读者提出宝贵意见。本书引用了前人的大量研究成果和文献,有些引用在书中有关章节做出了引用标记,有些引用在书末列出了参考文献名称和作者,有些内容的参考文献可能由于著者工作疏忽没有被列出,敬请原谅。前言部分由赵立新执笔编写,第1章、3.7、4.4、5.1、7.2由王文文编写,3.1至3.6、3.8、

7.4 至 7.6、8.4 至 8.7、9.3 至 9.6、10.8、第 11 章由赵立新编写，第 2 章、4.1 至 4.3、5.2、7.1、7.3、8.1 至 8.3、8.8、9.1、9.2 由陈科贵编写；第 6 章、10.1 至 10.7 由喻克全编写；全书由赵立新负责统稿。

赵立新

2012.5.2

目 录

第 1 章 波动和声以及井孔中的波	1
1.1 波动和声	1
1.2 井孔中的波的应用及发展简述	9
1.3 井中声波点源	11
第 2 章 声波测井发展历程及测量方法技术成果回顾	14
2.1 声波测井的主要方法简述	14
2.2 声波测井发展历程回顾	15
2.3 声波测井方法研究进展及成果回顾	16
2.4 国内外声波测井仪器发展概述	18
2.5 岩石孔隙介质声学研究方向和研究成果回顾	21
第 3 章 岩石弹性力学基础及孔隙介质波速传播	22
3.1 岩石学简述	22
3.2 孔隙流体的声波性质	31
3.3 岩石弹性力学基础	38
3.4 岩石声学简述	49
3.5 岩石中声波速度及其影响因素	54
3.6 岩石中波的衰减及其影响因素	61
3.7 几种常用理论解释模型	66
3.8 岩石物理特性和沉积微观结构之间的联系——理论和模型	70
第 4 章 井中声学参数测量原理及基本解释方法	85
4.1 声波速度测井	85
4.2 声波幅度测井	94
4.3 长源距声波全波列测井	99
4.4 几种多极子阵列声波测井仪结构及其应用介绍	103
第 5 章 全波列测井波形特征快速定性分析	129
5.1 数据解编和基本处理流程及数据输入输出格式	129
5.2 全波列测井原始记录波形分析	136
第 6 章 全波列测井速度、衰减、频谱信息定量提取与处理技术	165
6.1 主要处理方法简述	165

6.2 滤波方法介绍	176
第 7 章 全波列测井波形能量衰减、频谱信息定量分析解释及应用实践	193
7.1 波列振幅和衰减的基本概念及波列属性参数	193
7.2 频谱信息在变质岩岩性和微构造识别方面的应用	198
7.3 频谱随不同含气饱和度的变化	208
7.4 典型区块和典型井频率信息分布图	210
7.5 纵波幅度与孔隙度关系	212
7.6 典型井全波列幅度和频率信息成果图分析	215
第 8 章 速度属性信息与储层物性及流体性质关系研究与实践	222
8.1 速度与泊松比统计结果	222
8.2 纵横波速度与孔隙度的关系	223
8.3 纵横波速度的关系	243
8.4 纵横波速度与含水饱和度的关系	251
8.5 纵波速度与泥质含量的关系	255
8.6 纵横波速度比与纵波时差的关系	257
8.7 纵横波速度比与泊松比的关系	264
8.8 岩心波速实验	267
第 9 章 海域碎屑岩动态弹性力学参数与流体模量气水识别方法研究与实践	270
9.1 定性识别气层的基本原理	270
9.2 利用岩石动态力学参数定性识别气层	270
9.3 利用计算出的流体模量定性识别气层	274
9.4 某地区实钻井动态弹性模量参数及流体模量处理成果应用实践	288
9.5 岩石力学参数及流体模量识别流体研究成果结论	306
9.6 泥质砂岩双重孔隙各向异性弹性模型油水识别	306
第 10 章 声学测井信息在裂缝性地层中的基本解释方法及应用	312
10.1 裂缝性储层的特点	312
10.2 裂缝性储层的钻井液侵入特性	313
10.3 裂缝性储层的声波测井响应特征	314
第 11 章 声学测井方法面临的挑战及今后未来技术发展的几点建议	336
11.1 面临的挑战	336
11.2 发展方向	337
11.3 对声波测井未来技术发展的几点建议	338
参考文献	339

第 1 章 波动和声以及井孔中的波

波动是一种重要而普遍的运动形式，如声波、电磁波信号、光波等。本章着重以机械波为对象讲述波的概念，并运用运动学和动力学知识初步研究波动的基本概念和基本规律，最后对井孔声波作一些专门讨论。

1.1 波动和声

1.1.1 波的基本概念

1.1.1.1 波是振动状态的传播

1.1.1.1.1 基本概念

振动状态在介质中的传播称作波动，简称波。波是物质运动的一种很普遍的运动形式。机械振动在介质中的传播称为机械波。

波的存在条件：一是要有振源（波源），二是要有传播振动的媒质。但并不是一切波动的传播都需要空间存在媒质，电磁波或光波就可以在真空中传播。

1.1.1.1.2 机械波的分类

按振动传播的机制分类：弹性波、非弹性波。

按媒质内质点振动方向与波传播方向的关系分类：横波、纵波。

波的实质：物理学中所研究的波动实际上是一定物理量的周期变化在空间的传播过程。

1.1.1.2 横波和纵波

纵波：波在媒质中各质点振动的方向和波传播的方向平行。液体、气体和固体均可传播纵波，见图 1.1 (a)。

横波：波在媒质中传播时，媒质中各质点振动的方向与波传播的方向垂直，见图 1.1 (b)。

在一般的情况下横波是在具有剪切弹性的固体中形成的。只有当固体内发生剪切形变、产生剪切弹性力时，才有可能使各小体元振动的方向与传播方向垂直。

对柔软的绳而言，不能产生剪切力，但抖动沿水平方向张紧的绳也可以产生横波。这是由于绳中的每一小体元在离开平衡位置后所受

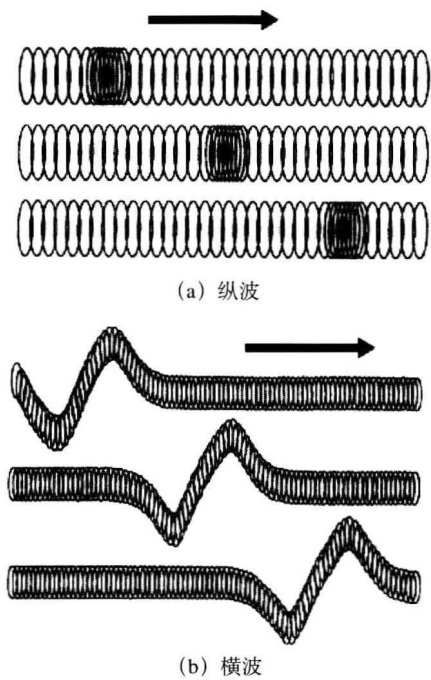


图 1.1 固体中传播的两种弹性波

的两端的张力方向不在一条直线上，在其合力作用下产生指向平衡位置的加速度，而在平衡位置的体元所受两端张力的合力使它离开平衡位置。由此可知，张紧的柔软的绳上的横波是因绳内各体元两端在张力不在一条直线上而传播的。

由于液体和气体不具备剪切弹性，又不能产生张力，所以不能传播横波。

1.1.1.3 波的几何描述的几个概念

(1) 波面：当波传播时，同位相各点所组成的面。

(2) 波前：是离波源最远也即“最前方”的波面。

(3) 波射线：与波面垂直且表明波传播方向的线。

(4) 平面波与球面波：按波前形状对波进行分类，波振面是平面的波动称为平面波，波振面是球面的波动称为球面波。

1.1.2 平面简谐波

1.1.2.1 平面简谐波方程

1.1.2.1.1 平面简谐波

在平面波传播过程中，媒质中体元均按余弦（或正弦）规律运动的波称为平面简谐波。

1.1.2.1.2 平面简谐波的运动学方程

设一列平面简谐波沿 x 轴方向传播，为简单起见，选坐标原点 $x=0$ 处体元位相为零的时刻为计时起点，于是 $x=0$ 处体元的运动规律为：

$$y = A \cos \omega t$$

式中 A ——振幅；

ω ——圆频率（波源的圆频率）。

x 处体元的运动学方程为：

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (1.1)$$

将式 (1.1) 变换为：

$$\begin{aligned} \text{即：} \quad y &= A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \cos \frac{\omega}{v} (vt - x) = A \cos (\omega t - kx) \\ y &= A \cos (\omega t - kx) \end{aligned} \quad (1.2)$$

同理，若波的传播方向与 x 轴正向相反，则：

$$y = A \cos (\omega t + kx) \quad (1.3)$$

式中 k ——角波数，简称波数；

v ——波的传播速度。

式 (1.1)、式 (1.2)、式 (1.3) 刻画出在传播平面简谐波的媒质中任意体元的运动规律，称为平面简谐波方程。

1.1.2.2 平面简谐波的振动图线与波形图线

(1) 若研究媒质中平衡位置在 $x=x_0$ 的体元的振动状态，则自变量 $x=x_0$ 为常量，波方程

转化为该体元的运动学方程：

$$y = A \cos(\omega t - kx_0) \quad (1.4)$$

由上面的方程可画出平衡位置在 x_0 处体元振动的位移—时间图线。

(2) 将波方程中的变量 t 取定某一数值 t_0 ，则变量 y 仅为坐标 x 的函数：

$$y = A \cos(\omega t_0 - kx) \quad (1.5)$$

这条曲线通常被称为波形图线。

1.1.2.3 频率、周期、波长、波速、波数的相互关系

1.1.2.3.1 简谐波的周期性

位移对时间的周期性用振动周期 T 表示，周期的倒数为频率 f 。位移对空间的周期性用波长 λ 反映出来。沿波传播方向两相邻同位相点间的距离叫做简谐波的波长。

1.1.2.3.2 反映简谐波周期性的各物理量与波速之间的相互关系

设 x_1 、 x_2 两点相距一个波长，当 x_2 点获得与 x_1 点相同的振动状态时，实际上 x_1 点的振动已经过了一个周期，即振动传播一个波长需要一个周期的时间。

波长的另一个定义为：振动在一个周期内传播的距离。以 v 表示波速，根据波长的定义有：

$$\lambda = vT \quad (1.6)$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (1.7)$$

结论：平面简谐波的两种周期性是通过波速将它们联系起来的。

1.1.2.3.3 波数 k

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.8)$$

波数表示 2π 长度上完整波的数目，所以又称作空间角频率。

1.1.2.4 平面简谐波方程的其他形式

1.1.2.4.1 平面简谐波方程的四种表示式

$$y = A \cos(\omega t \mp kx) \quad (1.9)$$

$$y = A \cos 2\pi \left(ft \mp \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1.10)$$

$$y = A \cos 2\pi v \left(t \mp \frac{x}{f} \right) \quad (1.11)$$

$$y = A \cos k(vt \mp x) \quad (1.12)$$

1.1.2.4.2 平面简谐波方程的一般形式

以上所得到的平面简谐波方程的四种形式都是在选择坐标原点处体元的初位相为零的条件下得到的。若初位相不等于零，则原点处体元的运动方程为：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (\varphi \text{ 为原点的初位相})$$

平面简谐波的方程为:

$$y = A \cos(\omega t \mp kx + \varphi) \quad (\text{一般形式})$$

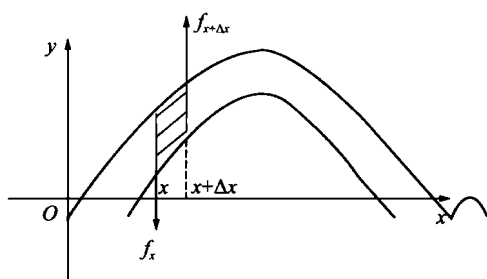
负号表示波传播方向与 x 轴正向相同, 正号表示相反。

1.1.3 波动方程与波速

1.1.3.1 平面弹性横波的波动方程

图 1.2 表示横波某瞬时的波形图, 取位于 x 、 $x + \Delta x$ 处两波面所围的体积元为隔离体, 该横波体积元两侧受剪切力 f_x 和 $f_{x+\Delta x}$ (重力与剪切力相比可忽略不计)。

将图 1.2 阴影部分放大, 在体元内 x 处取厚为 dx 的一小薄层媒质, 其剪切应变为:



$$\tan \varphi = \frac{dy}{dx} \quad (1.13)$$

由于形变很小, 遵从虎克定律:

$$\frac{f_x}{S} = \frac{dy}{dx} \Big|_x N$$

式中 S ——所取薄层的横截面积;

N ——媒质的剪切模量。

图 1.2 当波传播时媒质内某体元的受力和形变

已知体元的 y 坐标是 (x, t) 的函数, 讨论某瞬时的情况, t 视为定值, 式 (1.13) 应

改写为 y 对 x 的偏导数, 即 $f_x = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_x NS$ 。同理可在 $x + \Delta x$ 处取一薄层媒质得到

$f_{x+\Delta x} = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} NS$, 则体元所受的合力为:

$$f_{x+\Delta x} - f_x = \left[\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_x \right] NS$$

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_x = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_x \Delta x$$

将此式代回上式得:

$$f_{x+\Delta x} - f_x = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_x \Delta x NS \quad (1.14)$$

体积元在此合力作用下要产生加速度 $\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}$, 根据牛顿第二定律有:

$$f_{x+\Delta x} - f_x = \Delta m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

$$\Delta m = \rho S \Delta x$$

式中 Δm ——体元的质量;

$S \Delta x$ ——体元的体积。

比较式 (1.14) 与式 (1.15) 得：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Delta x NS = \rho S \Delta x \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

即：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{N}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

这就是平面横波的波动方程。

此方程使用于在均匀各向同性媒质中传播的一切平面横波，不仅是平面简谐横波。

1.1.3.2 平面弹性纵波的波动方程

对媒质中传播的这种波，同理可得出波动方程：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{Y}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

式中 ρ ——媒质的密度；

Y ——杨氏模量。

1.1.3.3 张紧的柔软线绳上传播的横波

波动方程为：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

式中 T ——线绳所受张力；

ρ ——绳的线密度（单位长度的质量）。

1.1.3.4 波速

决定波速 v 大小的主要是媒质的性质和状态。以平面简谐波的波方程为基础，推导波速方程如下。根据平面简谐波的波方程：

$$y = A \cos k(vt - x)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -Ak^2 v^2 \cos k(vt - x) \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos k(vt - x) \quad (1.19)$$

代入平面简谐波波动方程得：

$$v_s = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$$

$$\text{同理 } v_p = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}, \quad v_{\text{线}} = \sqrt{\frac{T}{\rho}}。$$

1.1.4 平均能流密度、声强与声压

1.1.4.1 波的能量

1.1.4.1.1 动能 $E_K - E_0$

$$\begin{aligned}y &= A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \\u &= \frac{dy}{dt} = -A\omega \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \\dE_K &= \frac{1}{2} \rho dV u^2 = \frac{1}{2} \rho dV \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)\end{aligned}\quad (1.20)$$

1.1.4.1.2 势能 $E_P - E_0$

$$\begin{aligned}dE_P &= \frac{1}{2} N dV \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \\&= \frac{1}{2} N dV \frac{A^2 \omega^2}{v^2} \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)\end{aligned}\quad (1.21)$$

对于横波而言 $v = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$ ，则有：

$$dE_P = \frac{1}{2} \rho dV \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)\quad (1.22)$$

1.1.4.1.3 总能 E

$$dE = \rho dV \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)\quad (1.23)$$

体元的总能量不是常数，是随时间而变化的，在零和最大值之间按周期变化。

1.1.4.2 能量密度

1.1.4.2.1 定义

单位体积媒质所具有的波动能量为：

$$\varepsilon = \frac{dE}{dV} = \rho \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)\quad (1.24)$$

1.1.4.2.2 平均能量密度

波的能量密度是随时间而变化的。平均能量密度就是能量密度在一周期内的平均值：

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon} &= \frac{1}{T} \int_0^T \rho \omega^2 A^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) dt = \rho \omega^2 A^2 \left[\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) dt \right] \\&= \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2\end{aligned}\quad (1.25)$$

1.1.4.3 平均能流密度

1.1.4.3.1 能量的传播速度

能量的传播速度与波速相同。

1.1.4.3.2 平均能流密度（或波的强度）

平均能流密度的大小等于单位时间内通过与波传播方向垂直的单位面积的能量，其方向沿波传播方向，用 I 表示：

$$I = \bar{\epsilon} v = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 v \quad (1.26)$$

1.1.4.3.3 对球面波的研究

设球面波两波面的面积分别为 S_1 和 S_2 ，两个波面的能流密度分别等于 I_1 和 I_2 ，如果不计媒质吸收的能量，则 $I_1 S_1 = I_2 S_2$ ，即：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (1.27)$$

用 A_1 、 A_2 表示波面 S_1 、 S_2 上的振幅：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{1}{2} \rho \omega^2 A_1^2 v}{\frac{1}{2} \rho \omega^2 A_2^2 v} = \frac{A_1^2}{A_2^2} \quad (1.28)$$

比较式 (1.27) 与式 (1.28) 得：

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (1.29)$$

1.1.4.4 声强与声强级

(1) 声强 I ：就是声波的平均能流密度的大小。

(2) 标准声强 I_0 ：即 10^{-12}W/m^2 的声强，通常把 1000Hz 频率下的这一最低声强作为测定声强的标准。

(3) 声强级 I_L ：声强 I 与标准声强 I_0 之比的对数称 I 的声强级：

$$I_L = \lg \frac{I}{I_0} (\text{B}) = 10 \lg \frac{I}{I_0} (\text{dB})$$

1.1.4.5 声压、声强与声压的关系

1.1.4.5.1 声压

在有声波传播的介质中，某一点在某一瞬时的压强 p 与没有声波时压强 p_0 的差，叫做该点处该瞬时的声压， $dp = p - p_0$ 。

1.1.4.5.2 声强和声压的关系

$$I = \frac{p_{\max}^2}{2Z}$$

$$p_{\max} = \rho v \omega A$$

$$Z = \rho v$$

式中 $p_{\max}$ ——声压的振幅；
 A ——声波位移的振幅；
 Z ——波阻抗。

1.1.5 波的叠加和干涉、驻波

1.1.5.1 波的叠加原理

若媒质中同时传播着几列波，则在各列波相遇处体元的位移等于各列波单独传播时在该处所引起的位移的矢量和。应该指出，波的叠加原理仅在波的强度不大时（即波动方程为线性时）才成立。

1.1.5.2 波的干涉

1.1.5.2.1 干涉现象

在空间某些点处振动始终加强，而在另一些点处振动始终减弱或完全抵消，这种现象称为干涉。

1.1.5.2.2 相干条件

两列波具有相同的振动方向、相同的频率，在每一点引起的分振动具有固定的位相差。

1.1.5.2.3 相干波和相干波源

能产生相干现象的波称为相干波，相应的波源称为相干波源。

1.1.5.3 驻波

1.1.5.3.1 定义

振幅相同而传播方向相反的两列简谐相干波叠加而得到的合成波称为驻波。

1.1.5.3.2 驻波方程

设一列波沿 x 轴正方向传播，另一列波沿 x 轴负方向传播，选取共同的坐标原点和计时起点：

$$y_1 = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.30)$$

$$y_2 = A \cos(\omega t + kx) \quad (1.31)$$

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) \\ &= 2A \cos kx \cos \omega t = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \cos \omega t \end{aligned} \quad (1.32)$$

即：

$$y = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \cos \omega t \quad (1.33)$$

1.1.5.4 弦与空气柱的本征振动

1.1.5.4.1 弦振动

在弦上可以形成的驻波振动叫做弦的固有振动（本征振动），它们的频率叫做固有频率（本征频率）：

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho_{\text{线}}}} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

1.1.5.4.2 空气柱的振动

(1) 两端都是敞开的空气柱。

本征振动的波长为：

$$\lambda_n = \frac{2l}{n} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

式中 l ——管长。

$n=1$ 时的波长为基波波长， $n=2, 3, \dots$ 给出各谐波波长。

本征振动的频率为：

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2l} v \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

$n=1$ 为基频， $n=2, 3, \dots$ 给出各谐频率。

(2) 管的一端封闭另一端敞开。

本征振动的波长为：

$$\lambda_n = \frac{4l}{n} \quad (n=1, 3, 5, \dots)$$

式中 l ——管长。

$n=1$ 时的波长为基波波长， $n=3, 5, \dots$ 给出各谐波波长。

本征振动的频率为：

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{4l} v \quad (n=1, 3, 5, \dots)$$

$n=1$ 为基频， $n=3, 5, \dots$ 给出各谐频率。

1.2 井孔中的波的应用及发展简述

井孔声学的发展和油田的声波测井技术的发展有紧密的联系。声波测井技术在石油工业中的应用已经有半个世纪的历史。在 1971 年以前，测井仪器测量井外地层中纵波在井深方向传播的声速，由此可以划分地层，校正地面物探的结果。另外一项重要的应用是测量地层的孔隙度。岩层的孔隙度对于地层的含油气量的多少和油气产能的高低至关重要。大量实验和理论证明，声波在孔隙地层中传播的纵波速度 v_p 满足 Wyllie 时间平均公式：

$$\frac{1}{v_p} = \frac{1-\phi}{v_{mp}} + \frac{\phi}{v_f} \quad (1.34)$$

式中 v_{mp} 和 v_f ——地层骨架的纵波速度和孔隙中流体的声速；

ϕ ——地层的孔隙度。