



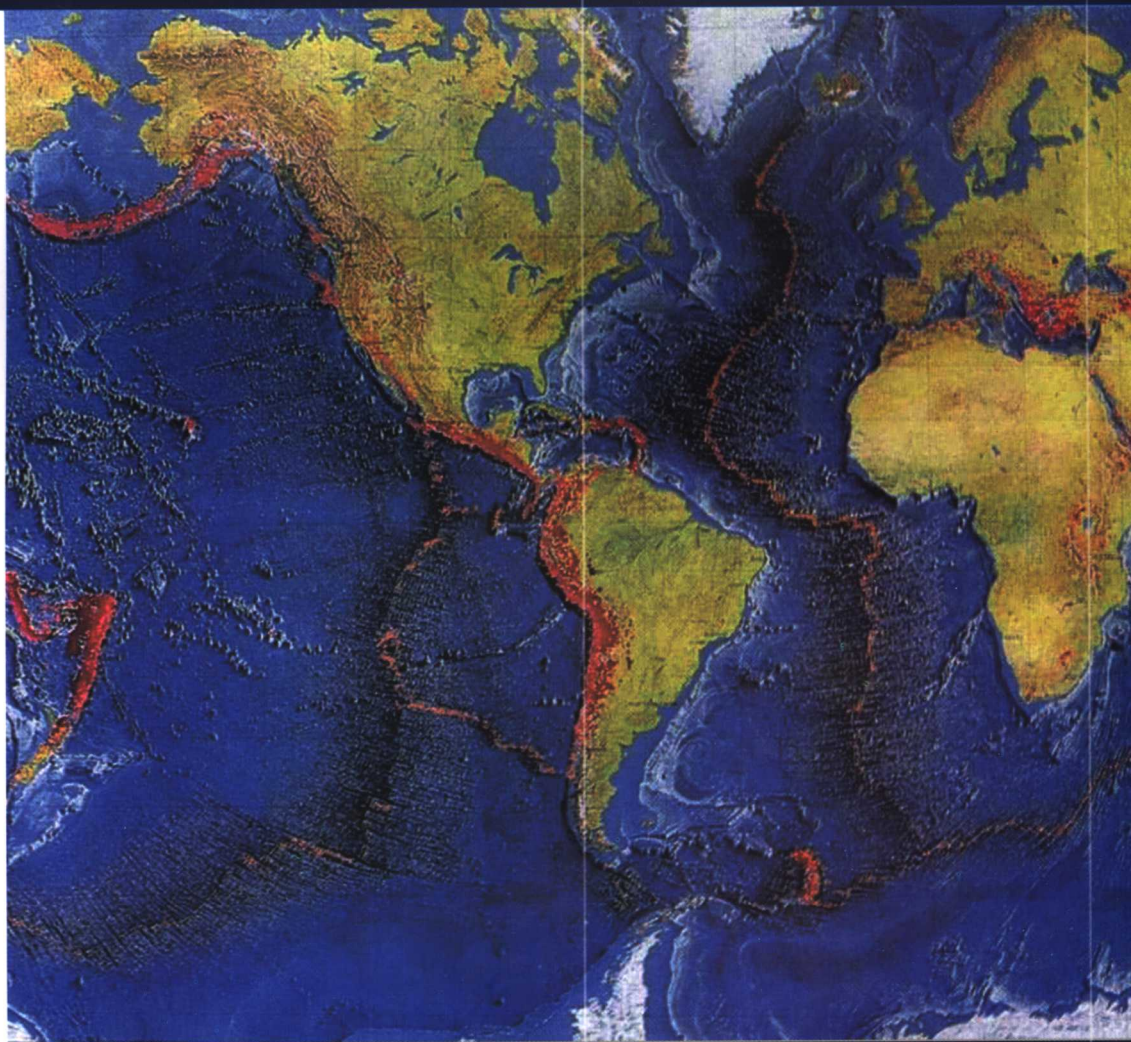
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

地震波理论与方法

Theory and Methods of Seismic Waves

■ 孙成禹 编著



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

地震波理论与方法

Theory and Methods of Seismic Waves

孙成禹 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震波理论与方法/孙成禹编著. —东营:中国石油大学出版社,2007.7

ISBN 978-7-5636-2444-7

I. 地… II. 孙… III. 地震波 IV. P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 099509 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 地震波理论与方法

作 者: 孙成禹

责任编辑: 袁超红(电话 0546—8396214)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392563,8392791)

开 本: 185×260 印张: 17.25 字数: 440 千字

版 次: 2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

内容简介

本书是为地球探测与信息技术等专业硕士研究生编写的教材。全书内容共分 9 章,主要介绍了弹性理论基础、理想介质中的波、层状介质中的波、黏弹性介质中的波、各向异性介质中的波、孔隙介质中的波以及积分地震学等地震波传播的相关理论;阐述了包括 AVO 分析技术、品质因子提取、积分法地震偏移、有限差分 and 有限元法求解波动方程等常用地震技术的基本原理和方法;最后一章还简要介绍了多维傅立叶变换、格林函数法、变分法等常用的数学物理方法以及弹性动力学的相关基本原理。

全书以基本概念和基本理论为出发点,叙述力求通俗易懂、提纲挈领、简洁明了。本书除可作为地球探测与信息技术专业硕士研究生的教材外,也可供地球物理和矿产勘探类研究生、高年级本科生以及从事地球物理勘探的科技人员参考。

本书是中国石油大学(华东)组织编写的系列教材之一,是在2004年3月校内胶印教材《地震波动力学理论》的基础上经多次试用后修订而成的。本书可供地球探测与信息技术专业硕士研究生在学习地震波动力学学位课时使用,也可供固体地球物理专业研究生、勘查技术与工程和地球物理学等专业高年级本科生以及从事地球物理勘探科研工作的人员参考。

地震波动力学理论是地球探测与信息技术专业硕士研究生的学位课,也是专业基础课。自20世纪80年代以来,随着地震偏移成像和烃类直接检测等技术的发展,地震技术逐渐从勘探领域渗透到开发领域,引起了广大科技工作人员的极大兴趣。同时,地震波理论和方法在这一时期也得到了迅速发展,成为人们学习和研究地震新方法、新技术的重要理论基础。本课程旨在帮助读者巩固已有的地震波基础理论和系统了解复杂介质中的地震波传播特点,在此基础上逐步学会利用弹性动力学的原理和方法解决与地震勘探有关的理论和实际问题。

地震波动力学理论是本科生和研究生都普遍反映较为难学的一门课。数学推导繁琐,概念抽象,掌握起来相对困难。学习时不仅要求读者具有较好的数理基础知识,同时还要掌握地震勘探的基本原理、信号分析和地震资料处理的基础知识及地震资料解释的相关内容;既要掌握书中的有关理论推导,学会研究理论问题的方法,又要注意联系实际,理解其内在的物理含义。

近几年来,我国的研究生教育发展迅速,研究生招生规模逐年扩大。随着国家能源战略的制定和实施,越来越多的外专业考生来我校攻读地球探测与信息技术专业硕士学位。考虑到研究生生源专业分布不一,为了便于学生学习,本书在取材上力求广泛,以地震波基础理论为主线,将油气田勘探开发中的一些实用技术的原理渗透其中。全书以基本概念和基本理论为出发点。为方便读者学习,全书力求做到叙述通俗易懂、提纲挈领、简洁明了。感兴趣的读者可以在此基础上进一步学习和研究。

全书内容共分9章。第1~2章为弹性动力学的经典理论,是学习地震波理论的基础。其中的大部分内容已在大学期间学习过,但考虑到学习者的基础参差不齐,同时也为了后续章节叙述的方便,仍将这部分内容纳入书中。第3章介绍层状介质中的波。层状介质模型是目前地震勘探中使用最普遍的模型,多种实用技术都是建立在层状介质模型基础上的。作为理论与应用的结合,本章讲述了AVO技术的基本原理和主要方法,并给出了一些算例。同时,这部分内容也是大学期间学习的回顾和延伸,为后续章节起到了承上启下的作用。第4~6章着重介绍了不同复杂介质中波的基本特点,包括黏弹性介质中的波、各向异性介质中的波和孔隙介质中的波。这是在近20年来地震波理论研究飞速发展、地震波动力学信息在地震勘探中所起作用越来越大的形势下,为研究并利用复杂介质中地震波信息而设立的。书中只是讲解了一些基本的原理和方法,没有覆盖目前该领域研究的所有成果。感兴趣的读者可以根据自己

的研究方向,在此基础上进行更为深入的学习和研究。第7章为地震波的积分理论。这是一个相对独立的内容。本章除了介绍经典的克其霍夫积分解外,还介绍了积分法地震偏移和波动方程反演的原理和方法,以此实现不同课程之间的沟通。另外,随着计算机技术的发展和普及,波动方程的数值解法成为目前研究不同介质中地震波场特征的重要途径。为此,本书第8章简要介绍了波动方程的有限差分数值解法和有限元数值解法的基本原理。本书第9章还介绍了弹性动力学研究中经常用到的一些重要的原理和方法,可作为读者进一步学习和研究时备查的基本工具。

在编写本书时,作者对一些文献中的相关内容都进行了适当的修正,一些章节的内容由作者重新进行了推导,目的是方便读者阅读。另外,作者还重点参考了杜世通教授在1996年为大学生编写的教材《地震波动力学》,例如第7.6节等就取自该书。作者师从杜先生多年,自己对地震波理论的每一点了解,都无不是受益于杜先生的教诲。对杜先生的言传身教和给予的亲切关怀,在此表示最衷心的感谢!

本书的编写得到了中国石油大学(华东)研究生院、教务处、地球资源与信息学院及地球物理系有关领导、专家的大力支持和帮助,谨向他们表示诚挚的谢意!感谢印兴耀教授、李振春教授、王永刚教授等给予的热情关心和指导!感谢中国石油大学(华东)“十一五”教材出版基金的资助和中国石油大学出版社为本书出版给予的鼎力支持!感谢中国石油大学(华东)研究生院王学彩老师协助完成了本书前期的编纂工作!课题组的研究生张玉华、李胜军、倪长宽、魏红斌、邢飞鹏、万学娟、张玉亮、宫同举、肖云飞等协助完成了部分文字的录入和校对工作,并绘制了部分图件,在此谨向他们一并致谢!

由于本人学疏才浅,加以时间仓促,文中表述定有错误和不当之处,欢迎各位读者及专家同仁予以指正,谢谢!

作 者

2007年2月于东营

变量符号表

本书中用到的变量、符号和算子数量较多,类型各异,且同一变量在不同环境下可能用不同符号表示。为方便读者阅读,除特殊说明外,本书中所用变量和算子所代表的物理含义约定如下。

u	位移矢量	v_g, U	群速度
u, v, w	位移分量	ϕ_g	群角
u, U	固相位移和流相位移	v	波面速度
e, ϵ	固相体变和流相体变	v_{NMO}	动校正速度
E	应变张量	Z	P 波阻抗
e_{ij}	应变分量	C	速度
T	应力张量	v_P	P 波速度
T	应力矢量	v_S	S 波速度
σ_{kk}	正应力分量	γ	纵横波速度比($\gamma = \frac{v_P}{v_S}$)
τ_{ij}	切应力分量	ρ	密度
E	弹性模量(杨氏模量)	ω	圆频率
ν, σ	泊松比	k	波数
λ, μ	拉梅常数	λ	波长
K	体变模量	φ, ϕ	纵波位
C	刚性系数矩阵	ψ	横波位
C_{ij}, C_{ijkl}	刚性系数	Q, q	作用力
θ	相对体变	F	体力
ω	旋转角位移	F_φ	体力的标量位
W	功	F_ψ	体力的矢量位
E	机械能密度	α	吸收系数
E_P	位能密度	Q	品质因子
E_K	动能密度	A	衰减矢量
T	动能	P	传播矢量
V	位能	Λ	立体角
I	能流密度	θ	相位角
M_e	单元体质量矩阵	ϕ	极化角
K_e	单元体刚度矩阵	ϵ, γ, δ	各向异性系数
δ	狄拉克函数	$\sin, \cos$	正弦和余弦函数
v	相速度	$\tan, \cot$	正切和余切函数
$(l, m, n), (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$	方向余弦	$\sinh, \cosh$	双曲正弦和双曲余弦函数
		$\tanh, \coth$	双曲正切和双曲余切函数

n^0	方向 n 的单位矢量	$\exp$	以 e 为底的指数函数
j	虚数单位(等于 $\sqrt{-1}$)	Re	取实部
i, j, k	单位坐标矢量	Im	取虚部
x_1, x_2, x_3	单位坐标矢量	PV	取复数的主值
$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$	哈密尔顿矢量算子	$J(r)$	贝塞尔函数
grad	梯度算子	$H(r)$	汉克尔函数
div	散度算子	$f \leftrightarrow F$	傅立叶变换对
		δ	变分算子
		rot	旋度算子

外国人名对译表

对于一些多次提到,且在本学科及相关学科中广为所知的外国人名,本书正文中采用了其中文译名。对于仅在某些专业文献中出现,目前尚无通行译法的外国作者名,本书保留了其外文名。书中中译人名的中英文对照如下。

英 文	中 文	英 文	中 文
Bessel	贝塞尔	Kirchhoff	克其霍夫
Biot	毕奥	Knott	诺特
Boltzmann	玻耳兹曼	Kronecker	克罗内克
Born	波恩	Lagrange	拉格朗日
Cauchy	柯西	Lamé	拉梅
Cramer	克莱姆	Laplace	拉普拉斯
D'Alembert	达朗贝尔	Love	拉夫
Darcy	达西	Maxwell	马克斯威尔
Dirac	狄拉克	Navier	纳维尔
Dirichlet	狄利赫勒	Neumann	牛曼
Euler	欧拉	Newton	牛顿
Fermat	费玛	Pascal	帕斯卡
Fourier	傅立叶	Poisson	泊松
Fresnel	菲涅耳	Rayleigh	瑞雷
Gassmann	噶斯曼	Snell	斯奈尔
Gauss	高斯	Sommerfeld	索墨菲尔德
Green	格林	Stokes	斯托克斯
Hamilton	哈密尔顿	Stoneley	斯通利
Hankel	汉克尔	Taylor	泰勒
Helmholtz	亥姆霍兹	Voigt	佛格特
Hilbert	希尔伯特	Weyl	维尔
Hooke	虎克	Wyllie	维利
Huygens	惠更斯	Young	杨氏
Kelvin	开尔文	Zoeppritz	佐普里兹

绪 论	1
第1章 地震波理论基础	7
1.1 应变分析	7
1.2 应力分析	12
1.3 应力与应变的关系	16
1.4 弹性波动方程	21
1.5 弹性波的能量	25
第2章 理想介质中的波	31
2.1 平面波的达朗贝尔解	31
2.2 平面极化波	34
2.3 理想介质中的球面波和柱面波	37
2.4 球面波的合成与分解	44
2.5 球面波的复变函数积分	50
第3章 层状介质中的波	59
3.1 平面波在自由表面上的反射	59
3.2 平面波在弹性界面上的反射与透射	63
3.3 反射透射理论与 AVO 分析技术	72
3.4 平面波在层状介质中的传播	81
3.5 垂向不均匀介质中的波	86
3.6 层状介质中的面波	92
第4章 黏弹性介质中的波	101
4.1 黏弹性介质的基本特点	101
4.2 线性黏弹性模型	106
4.3 线性黏弹性介质中的平面波	112
4.4 平面波在黏弹性界面上的反射和透射	117
4.5 品质因子的提取与应用	124
第5章 各向异性介质中的波	129
5.1 各向异性介质概述	129

5.2	介质各向异性的类型	131
5.3	横向各向同性介质的基本特点	136
5.4	横向各向同性介质中波的传播特征	140
5.5	弱各向异性和椭圆各向异性	149
5.6	各向异性介质中波的反射和透射	154
第6章	孔隙介质中的波	162
6.1	孔隙介质的一般理论	162
6.2	噶斯曼理论	167
6.3	毕奥双相介质理论中的基本波	170
6.4	双相介质中波的特点	176
6.5	平面波在双相介质分界面上的反射和透射	179
6.6	油气储层地球物理模型简介	184
第7章	积分地震学	189
7.1	波动方程的克其霍夫积分解	189
7.2	泊松积分和瑞雷积分	192
7.3	克其霍夫绕射公式	197
7.4	菲涅耳带	200
7.5	有限平界面的绕射问题	202
7.6	声波方程的速度反演	207
第8章	波动方程的数值解法	211
8.1	波动方程的有限差分数值解法	211
8.2	波动方程有限差分法的若干问题	217
8.3	有限元法概述	221
8.4	波动方程的有限元数值解法	224
8.5	波动方程有限元数值模拟算例	228
第9章	弹性动力学中的常用方法	233
9.1	多维傅立叶变换	233
9.2	格林函数法	236
9.3	变分法	241
9.4	哈密尔顿原理	254
9.5	虚功原理	259
参考文献		263

绪 论

机械振动在地球介质中的传播形成地震波。地震波动力学理论是以弹性理论为基础,研究地震波的产生机理和传播特点,以及在传播过程中振动形式转化和能量分配规律的一门学科。它是从事地震学和勘探地震学理论方法研究的重要基础。它突出强调的是波与介质之间的关系。地震波传播理论涉及了天然地震、人工地震探测与信息技术等众多领域。

对弹性动力学问题的研究已有数百年的历史,其中最重要的发展标志是 19 世纪 20 年代初法国力学家、工程师纳维尔(C. L. M. H. Navier)提出的弹性体平衡和运动方程。这一弹性体运动理论的创立大大推动了弹性波问题的研究。经过 180 多年的发展,弹性体运动理论至今已形成了数学上非常严密和完善的理论体系及方法,研究方向也逐渐从对均匀、各向同性、完全弹性、纯固相介质中波的分析转向对非均匀、各向异性、黏弹性、双相介质中波的研究。弹性体运动理论对地震科学、地球物理学、声学、光学及材料工程等学科的发展产生了较大的影响,并成为这些学科的重要组成部分。

0.1 弹性体和弹性波

根据对外力作用反应的不同,自然界中的物体可划分为刚体、弹性体和塑性体。若一个物体在外力作用下发生平移或转动,并且可沿着力的作用方向无畸变地传递力的作用,这个物体就称为刚体。当一个物体受到外力作用时,在它的内部质点间发生位置的相对变化而使其形状改变,这称为应变。处于应变状态的物体,为了抵抗外力和保持其平衡状态,在内部质点间产生内力作用,这称为应力。此时物体处于应力应变状态。当外力作用取消后,物体的应力应变状态立刻消失并恢复物体的原有形状,这类物体称为弹性体。当外力作用停止后,有些物体不能完全恢复其原有形状而保留一定的形变,这类物体称为塑性体或不完全弹性体。

弹性物体处于未形变的自然状态时,内部各质点在相互作用下处于相对平衡位置,此时它的能量最低。如果其中某个质点因受到扰动或外力作用而产生了附加的能量,就会打破原有的平衡,该质点就会偏离平衡位置而与其相邻的质点之间发生相对位置变动。为了维护自身的平衡,质点之间要产生附加内力——应力。应力使该质点在其平衡位置附近振动,并引起周围质点随之发生位移和振动,于是振动就会在弹性体内逐渐由近及远地传播开来,且伴有能量的传递。在振动所到之处,位移、应变及应力都会发生变化。把由于扰动或外力作用而引起的位移、应变及应力在弹性体内的传播过程称为弹性波。

在弹性波传播过程中的某个瞬间,介质内已被扰动区域和未被扰动区域之间的界面称为波阵面,其传播速度称为波速。波速是扰动信号在弹性体内的传播速度,它与弹性体内质点本身振动的速度是不相同的。

质点振动方向与波传播方向平行的波称为纵波;质点振动方向与波传播方向垂直的波称为横波。根据波阵面几何形状的不同,又可把波分为平面波、球面波及柱面波等。

地震勘探方法是通过研究人工激发的机械振动在地球介质中的传播规律,借此来推断地

下地质结构的。地震震源的作用给地球介质岩层施加外力,使之发生形变。这种情况下既可能发生弹性应变,也可能发生使岩石破碎、永久形变的非弹性应变。哪种形变占优势,取决于一系列因素,其中主要的是震源作用力的大小、作用时间及岩石的性质。

一般来说,远离震源处,震源作用力微小,作用时间短暂,除了一些特殊岩相(如干沙)外,岩石均表现为弹性体。因此,在岩石中产生的机械振动可以看成是弹性介质中的弹性振动,地震波可以看成是在岩层中传播的弹性波。弹性理论是研究弹性波的理论基础,也是学习和研究地震波传播规律的理论基础。

地震波动力学中区分两大类波:体波和面波。弹性波传播时,在到达弹性体边界之前,边界的存在对弹性波的传播没有影响,如同在无界弹性体内传播一样,可以在三维空间中向任何方向传播,这类波称为体波。当体波传播到两个不同弹性体的分界面上时,一般将发生向原来弹性体内的反射和穿过分界面向另一弹性体内的透射。在有些情况下,还会发生沿分界面传播的波,这类波称为面波。

地震波的特性既与震源特性有关,也与弹性体的性质有关。研究地震波特性与震源特性的关系问题,称为地震波的激发问题。不考虑震源与波的相互关系,只考虑弹性体性质对波特性的影响问题,称为地震波的传播问题。

地球介质的构造是十分复杂的,整个地壳一般不能视为弹性体。例如,在较深部位,岩石所受的围压大、温度也高,表现出明显的塑性和黏性形变性质。岩石在漫长的地质时期内,即使应力保持不变,其形变也会随时间的增长而不断增加。但是,在短时间外力作用下,离外力作用地点(如地震勘探中的人工爆炸点)较远处,可以把地层近似地看成是弹性体。实践表明,这种近似性还是很好的。因此,有关地层中的地震波问题就可以用弹性波理论来研究和解释。在地层中按弹性波规律传播的地震波,遇到界面、断层时会发生反射和透射现象。根据反射、透射的结果,可以探索地球内部的构造情况、探测地下矿藏的位置等。

地震波传播理论总体上可分为微分理论和积分理论。微分理论是基于连续介质微分体积元弹性动力学等原理建立起来的一套理论体系,其发展十分迅速、内容十分丰富。积分理论是基于惠更斯原理、菲涅耳和克其霍夫积分等原理建立起来的另一套理论体系。两种理论体系具有本质的一致性。

地震波动力学理论的核心是弹性波动方程。波动方程是地震学以及与之相关的各分支领域所要研究的核心内容。无论是理论正反演还是实际应用,波动方程的地位都极为重要。因此,本书将从波动方程的建立入手,介绍各类介质中波动方程解的具体形式及其延伸内容。

0.2 弹性动力学的基本假设

客观事物总是多种多样的。作为一门学科,要探讨一般性的规律,势必要抓住所讨论范围内事物的本质方面而忽略一些次要因素,把实际事物理想化,进行科学抽象。这样就离不开以实践为依据的假设。作为地震波理论基础的经典弹性动力学对所研究物体的材料及形变特征所作的基本假设有以下 6 项。

1. 物体是连续的

即假定构成物体的材料在物体所占形体内是没有空隙、连续分布的。因此,物体内的位移、应变及应力等力学量都可以是空间坐标的连续函数。在弹性动力学中,它们还可以是时间的连续函数。由于在形变过程中材料都是连续分布的,所以形变后物体内的质点与形变前物

体内的质点是一一对应的。

实际上,构成物体的材料都是由分子组成的。由于分子的大小及分子间的距离与物体的尺寸相比是很微小的,所以连续性假设不会引起显著的误差。一方面,对于物体中的“质点”,应把它理解为仍然包含着大量分子的一个物质微元,从而能对其中分子运动进行统计平均,以得到表征微元宏观现象的力学量;另一方面,此微元的尺度比所研究问题的宏观尺度要充分小,以致可以把微元内每种力学量都看成是均匀分布的常量。这样,在数学上才能把此微元当作一个点来处理。

2. 物体是线性弹性的

即假定物体是完全弹性的。物体受到外力后就产生形变,卸除外力后物体完全恢复原状,应力与应变之间是单值对应关系。同时还假定应力与应变之间呈线性关系,即在简单受力的试验条件下,材料服从虎克定律。应力与应变之间呈线性关系的弹性体称为线性弹性体。

3. 物体是均匀的

即假定物体是由同一种均匀材料构成的。物体内各点处材料的力学性质都是相同的,即表征材料性质的量,如密度、弹性模量及泊松比等,都是与空间坐标无关的常数。

实际上,一个物体内的材料不一定是均匀的,但在差别不大时就可以认为是均匀的。在讨论地层中的弹性波时,可以把地层视为层状结构。不同地层是由不同材料构成的,而同一地层可以认为是由同一种均匀材料构成的。

4. 物体是各向同性的

即假定物体内每一点处所有方向的力学性质都是相同的。不具备这种性质的物体是各向异性的。对某一种材料来说,它由细小的晶粒所组成,但由于晶粒细小而且各个晶粒方向是杂乱无章的,按材料的平均性质可以认为它是各向同性的。有些材料,尤其是某些岩体,具有明显的不均匀性和各向异性。此时,上述第3和第4两项假设不再适用,而应该根据实际情况进行研究。

符合以上4项假设的物体被称为理想弹性体。弹性理论通常限于讨论均匀各向同性完全弹性介质。但目前随着研究领域的扩大,人们对非均匀和各向异性介质中波传播问题的研究也进一步深入。我们将非理想介质统称为复杂介质。本书第3~6章将讨论复杂介质中波的传播问题。

5. 物体的位移和应变都是微小的

即假定物体形变时其内部各点的位移都远小于物体原来的尺度,应变和转角都远小于1。应用这项假设可以使问题得到很大简化。

首先,应变与应力在弹性体内各点处一般是不相同的,所以它们都是位置点坐标的函数。但是,形变是相对于未形变的自然状态而言的,而应力则是与形变后的状态相联系的,因此直观地说,应变是点在形变前坐标 (x, y, z) 的函数,应力是点在形变后坐标 (x', y', z') 的函数。在这项小形变假设下,此种区别就是非本质的,因为应力在形变前点的位置 (x, y, z) 与在形变后点的位置 (x', y', z') 的差比起应力自身的值来要小得多。因此,应力在形变后点 (x', y', z') 处的值就可以用在形变前点 (x, y, z) 处的值来代替。于是,在描述形变及应力并探讨其变化规律时都使用点在形变前的坐标 (x, y, z) ,而且仍按弹性体形变前的几何形状和尺寸进行分析。

其次,应变和转角的二次及以上的幂或乘积项都可以略去不计,从而使弹性动力学中的方程都简化为线性方程。

再次,在小变形情况下,可以认为弹性体变形前后的密度是近似相等的,即在变形过程中密度是常数。

6. 物体无初应力

即假定物体在受外力作用之前处于无应力的自然状态。

以上述 6 项基本假设为基础而建立起来的弹性力学称为线性弹性力学。

0.3 地球介质的特性

地震波与介质是一对关联体,作为载波的介质可以视为系统。地震波的传播规律和特点与介质因素和界面因素有密切的关系。介质总体可以分为单相和非单相两种情况;界面总体可以考虑为自由界面和弹性界面两种情况,并且需要考察界面两侧介质的性质。

目前,地震勘探的大部分工作都是在沉积岩地区进行的。相对于火成岩、变质岩地区来说,沉积岩地区具有沉积稳定、横向变化缓慢、成层性好等特点。但是,它们经受了长时期的地壳运动,地层会出现各种各样的褶皱、断裂、剥蚀、风化等现象,从而使相对简单的地球介质有时会变得十分复杂。为此,有必要从实际地球介质的性质、结构、形状等特征出发,在各种不同的条件下进行相应的理想化,以对物体进行简化。

对地下介质的简化大致分为以下几种:

1. 理想弹性介质与黏弹性介质

地震勘探通常都在远离震源处进行观测和接收地震波,因此除震源附近的介质外,绝大部分地带的岩石都可近似看作理想弹性体来研究。这种理想化的目的在于:在弹性力学中,许多问题的讨论都是基于理想弹性介质的假设,有了地球介质的这种理想化假设前提,就可以把弹性力学中的许多基本理论直接引申应用到地震勘探范畴中来,从而简化对问题的讨论。

当然,建立理想弹性介质的物理模型可以在一定范围内近似满足实际介质的要求,但单纯应用理想弹性介质有时并不能解释许多复杂的实际问题。通过对大量观测结果的分析,人们发现地震波在岩层中传播时有吸收作用,即吸收激发脉冲的某些频率成分,使它的能量发生损耗。因此,实际岩石既有弹性,又表现出像黏性流体那样的黏滞性。通常把这样的物体称为黏弹性体。从理想弹性介质模型到黏弹性介质模型,使理想化了的模型向实际模型跨了一大步。

2. 各向同性介质和各向异性介质

从固体的性质来说,在弹性理论研究中通常把固体分为各向同性和各向异性两类。凡弹性性质与空间方向无关的固体都称为各向同性介质;反之则称为各向异性介质。岩石弹性性质的方向性取决于组成岩石、矿物质点的空间方向性,矿物质点的排列结构以及岩石成分等。矿物质点的方向性由矿物晶体的结构来决定,但从晶体的线度来看,它远小于地震波波长,因此由晶体引起的各向异性完全可以忽略不计。对矿物质点的排列结构来说,沉积条件较稳定的沉积岩大都由均匀分布的矿物质的集合体所组成,即使在横向上有变化,也是极其缓慢的,较少表现出岩石各向异性的性质。岩石成分对各向异性有较大的影响。

综上所述,把实际的地球介质视为各向同性介质,其实忽略了岩石或矿物的晶体线度、排列结构和岩石成分等因素。

在地震勘探中,现在的大部分理论都是建立在各向同性介质基础上的。若讨论各向异性介质,则这些理论不再适用,必须作相应的修改。目前,国内外许多学者正致力于各向异性理论的研究,并在实际应用中取得了初步成效,建立了一系列针对各向异性介质的理论和方法,

如多波多分量地震勘探等。

3. 均匀介质、层状介质和连续介质

根据由弹性性质定义的地震波传播速度的空间分布规律,可以把固体介质分为均匀介质和非均匀介质两大类。均匀介质是指在空间每个点上速度相同的介质,即速度值不随空间坐标而变化;反之,速度值是空间坐标的函数的介质称为非均匀介质。在非均匀介质中,速度值相同的点可以构成一个区域。于是,整个介质被分成若干个区域。每个区域内的介质可视为均匀的。速度不同的介质区域的交界处称为界面或速度分界面。界面可以是平面,也可以是曲面。如果非均匀介质中介质的性质表现为成层性,则称这种介质为层状介质。界面间的间隔称为该层的厚度。界面的弯曲程度和地层的厚度都是相对的概念。与地震波波长相比,地层有厚层和薄层之分,界面有理想界面和复杂界面之分。

沉积岩地区的岩层一般成层性很好。不同岩性决定的这种成层性往往具有不同的弹性性质,因此岩层的岩性分界面与岩层的弹性性质分界面非常一致。

层状介质(水平、倾斜和弯曲界面)模型是地震勘探中最常用的介质模型。但它们只是实际介质的一种近似。不少地区,特别是沉积旋回比较明显的地区,往往有很多薄层地层。这时可以认为波速沿地层沉积方向是连续渐变的。称波速是空间连续变化函数的介质为连续介质。它是层状介质的极限过程。

根据大量实际地震和测井资料可知,速度 v 随深度连续变化的规律可用近似关系式表示为

$$v = v_0(1 + \beta z)^{1/n}$$

式中, v_0 为深度 $z=0$ 时的波速(称为起始速度),通常取 $v_0=1\ 880\text{ m/s}$; β 为速度的变化率,在华北地区取 $\beta=0.000\ 26\text{ /m}$; $n=1$ 表示速度随深度呈线性变化(称为线性连续介质), $n \neq 1$ 表示速度随深度呈非线性变化(称为非线性连续介质)。

有些实际探区存在着好几套岩性不同的地层,而每一套地层内又是由沉积旋回较明显的薄层组成。这时可建立层状连续介质模型,即将各套地层看作层状介质,而将每一套地层内看作连续介质。

4. 单相介质和双相介质

对实际介质按上述各种物理模型进行简化时都只考虑了岩相的单一性,如砂岩相、泥岩相、灰岩相等。把建立各种物理模型时只考虑单一岩相的介质称为单相介质。实际上,许多岩体往往由两部分组成。一部分构成该岩体骨架,称为基质;另一部分由各种流体或气体充填的孔隙组成。如含油砂岩可以认为是由球状砂粒的基质和石油流体充填的孔隙组成。由于地震波经过岩石基质和流体孔隙时传播的速度是不一样的,因此从波速上来讲,这种岩体实际上是由两种岩相组成的,故把这种岩体称为双相介质。现在也有不少学者在对双相介质的理论进行研究。双相介质的模型研究表明,地震波在双相介质中传播时会产生快慢波。这是很有理论价值的,但目前这一理论与实际应用还有一定的距离。

以上从不同角度讨论了地球介质的分类问题。在地震勘探中,由于在远离震源观测,深部岩石受力小且作用时间短,加上又忽略了岩层的静压力,所以可近似把地下介质视为均匀的、各向同性的完全弹性介质。于是我们可以把弹性力学中的有关理论应用到地震勘探中来。

0.4 对地震波理论的认识

总而言之,科学技术的进步,特别是人类对能源、资源和环境发展需求的与日俱增,将会不

断地促进地震波传播理论及应用技术持续向前发展,这是地震波传播理论及应用技术发展的外在动力;同时,随着人类对整体科学研究的不断深入,地震波传播理论内涵的知识空间也在逐渐地向外拓展,这是地震波传播理论及应用技术发展的内在动力。

地震波理论博大精深,所涵盖的内容广泛而复杂,需要人们长期不懈地努力探索和发展。即使是对现在已有的前人的研究成果,仍然需要作深入的认识和总结,这是进一步发展的基础。如不均匀介质、黏弹性介质、各向异性介质、孔隙介质及更为复杂的复合介质和不规则地质体中的地震波传播理论及其反演方法始终需要重点关注,这是需要致力于重点研究的重要前沿课题,也是资源、环境、工程地球物理和地球探测等领域亟待解决的问题。

波动方程始终是地震波传播理论的核心内容。能够适应或接近介质实际情况的波动方程的研究仍然是复杂而艰难的工作,例如对考虑温度和压力因素的波动方程的研究。对复杂构造模型三维多波多分量波场进行正演理论和反演方法的研究也是需要关注并致力发展的课题,随着计算机技术和应用数学的发展,这个问题将会得到进一步的解决。地震波传播非线性问题的研究同样存在复杂性和艰巨性,这也是需要较长时间并给予耐心面对和加以解决的问题。

地震学及地震波传播理论在百余年的发展进程中,为人类的地震预报、防灾减灾、地球探测、石油等矿产的勘探开发、环境工程探测等方面都发挥了积极的作用。今天的技术应用得益于昨天的理论研究,没有今天的理论研究就没有明天的技术应用。随着科学技术和经济建设快速发展,人们越来越重视并投身于基础理论的研究。正像在人类历史上地震学始终发挥着不可或缺的作用一样,我们相信地震波传播理论将会持续不断地向前发展,为人类探索自然和文明进步做出不可磨灭的贡献。

在介绍弹性理论的文献中,许多都使用张量记号来表示有关的运算关系。这些记号可以使公式表达变得更加简洁,如求和算子(重复下标表示求和)、求导算子(下标逗号表示求导)、旋转算子(下标替换方向表示符号)等。对于没有学习过张量分析的读者来说,这些记号不容易掌握,以这些记号表达的公式也不易看懂。为了便于广大读者阅读和理解,本书基本上没有采用这些记号,仅在个别章节中采用了克罗内克(Kronecker)算子 δ_{ij} 和在变量上部加一点号 $(\cdot)$ 表示对时间求导的记法。也就是说,本书中没有关于张量记号的约定。

本书首先根据弹性理论建立理想弹性介质中的波动方程,讨论理想介质中地震波的传播特点,以及半空间、两个半空间和层状介质中波的反射和透射问题;在此基础上,介绍黏弹性、各向异性和双相介质中波的传播特点;然后对积分地震波理论进行简要阐述,并对波动方程的数值解法进行原理性介绍;本书的最后介绍了弹性动力学中常用的几种重要原理和方法,供读者参考。