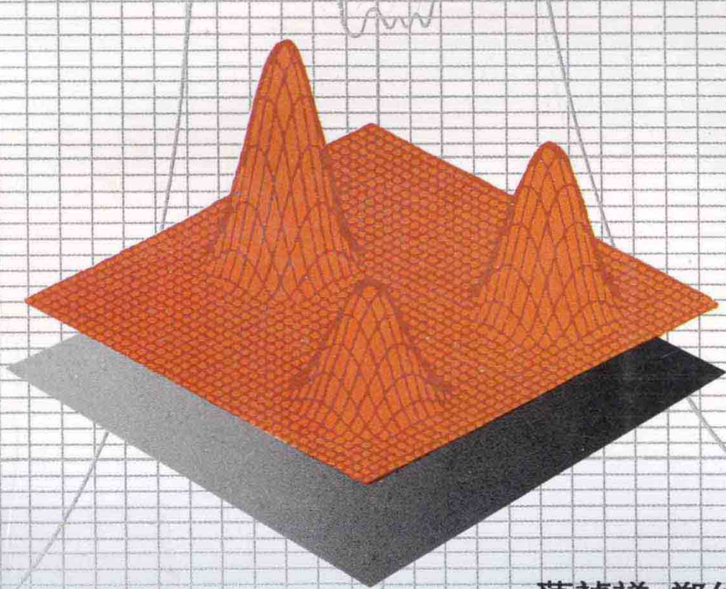
科学与工程计算丛书

地震波数值模拟与偏移成像

DIZHENBO SHUZHI MONI YU PIANYI CHENGXIANG



范祯祥 郑仙种 编著

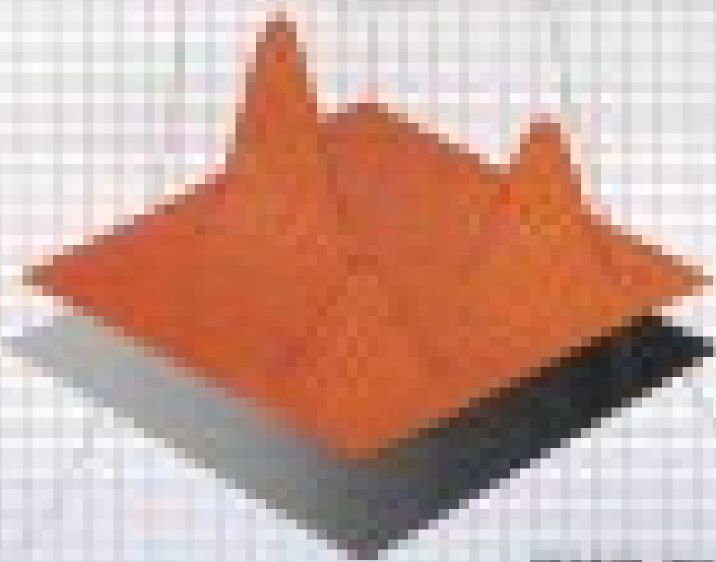
河南科学技术出版社

SECS

科学与工程计算丛书

地震波数值模拟与偏移成像

DIZHENBO SHUZHI MONI YU PIANYI CHENGXIANG



科学与工程计算丛书

地震波数值模拟与偏移成像

范祯祥　　郑仙种　编著

河 南 科 学 技 术 出 版 社

豫新登字 02 号

科学与工程计算丛书
地震波数值模拟与偏移成像
范祯祥　郑仙种　编著
责任编辑　冯英
河南科学技术出版社出版发行
国防科学技术大学印刷厂印刷
850×1168 毫米　32 开本　11.125 印张　278 千字
1994 年 12 月第 1 版　　1994 年 12 月第 1 次印刷
印数 1—1000 册
ISBN 7-5349-1276-8／T・266
定价：6.40 元

《科学与工程计算丛书》编辑委员会

代　序

为促进我国科学与工程计算事业的发展，1988 年 7 月，中国核学会计算物理学会在青岛举办了全国计算物理学术研讨会。会议期间，经有关专家商议，决定出版一套《科学与工程计算丛书》，得到了许多著名科学家的热情关心和支持。经过两年多的筹备，正式开始了这套丛书的编辑出版工作。

计算机是一种延伸、强化人的思维的工具。当世界上第一台计算机 ENIAC 诞生时，冯·诺伊曼就预言这一新工具所拥有的巨大潜力和对人类社会的深远影响。在过去的 40 多年里，计算机迅猛发展，其应用范围从国防尖端部门扩大到科学技术和国民经济建设的各个领域，计算机已经给人类社会带来了一场深刻的技术革命，计算机的发展和计算方法的进步极大地提高了人们的计算能力，从而引起了科学方法论上的巨大变革，使计算成为科学研究的第三手段，对研究的定量化起到了特殊重要的作用。"实验、理论、计算"三位一体是现代科学研究的基本模式，三者既相对独立，又互相补充，互相依赖 。人们在计算机上可充分利用数值计算来模拟现实世界的各种过程，部分替代实验或作为实验的补充，检验理论模型的正确性，尤其是还能呈现现实生活中无法重复或无法进行实验的现象，或模拟耗资巨大的实验工程，探索新的奥秘。由于有了计算这一强有力的手段，大大增强了人们科学研究的能力，促进了不同学科之间的交叉渗透，缩短了基础研究到应用开发的过程，加速了把科学技术转化为生产力的进程。

在计算机的发展和数值计算的广泛应用的推动下，科学与

工程计算（简称科学计算）作为一门工具性、方法性和边缘交叉性的新学科，已经开始了自己的发展。它既包含了在各种科学与工程领域中逐步发展起来的计算性学科分支，如计算数学、计算物理、计算力学、计算化学以及计算地震学等计算工程学，又包括经济科学、医学、生物学和系统科学等发展中所需要的计算理论。计算方法则是它们联系的纽带和共性的基础。科学计算就其本质而言，是要解决现代科学与工程中提出的大规模、非线性、非均匀和几何形状非规则的复杂问题，是数学理论和计算艺术的高度结合，是复杂系统的数值计算或模拟。计算机的性能与算法水平的乘积是衡量计算能力高低的指标。

我国在科学与工程计算领域已有了一支较高水平的、能打硬仗的队伍。这支队伍在我国计算机水平相对落后的条件下，以其智力优势和拼搏精神为我国的国防建设和经济建设作出了重大贡献，积累了丰富的实践经验，急需加以总结、提高、推广和交流。编写《科学与工程计算丛书》，正是为了适应这种形势的需要，它的出版将会填补我国这方面的空缺。

这套丛书是采用″众人拾柴火焰高″的集资方式创办的，由于丛书的涉及面极广，故不设主编，由常务编委轮流担任执行主编。丛书作者都是奋战在教学和科研第一线的专家学者，他们为发展我国的科技事业不辞劳苦，呕心沥血，无私奉献。谨向他们表示崇高的敬意。

可以期望，《科学与工程计算丛书》的出版发行，必将有力地推动我国科学计算事业的发展。

《科学与工程计算丛书》编委会

1990 年 8 月

序

这是一本粘弹介质地震波模拟专著。它应用有限元数值计算模拟任意地质形态与任意岩性组合介质中地震波的传播，以检验地震地质解释模型的正确性。在模拟过程中对波传播范围进行自适应计算和相应的近似算法，使达到经济实用水平。适用于油田储集层分布与煤田陷落体预测。

作者应用地面、井中录测的地质、地球物理资料，在模拟逼近过程中加以智能干预，在一定程度上克服了地质模型的多解性。在过去用常规方法做模型验证的数百条实际地震剖面解释中，原来解释的地质模型基本正确的仅占 1／3 弱，基本不正确的占 1／3 强。经本书介绍的粘弹波模型检验修正后，基本正确的约占 60% 以上。其中对岩性多变与结构复杂地层中地震波传播特性缺乏认识，是造成错误地质解释的重要原因。这说明地质解释的模型检验是重要的。

中国地球物理学会理事长

翁文波

1993 年 3 月 17 日

绪　言

地震波的数值模拟是研究地下地层分布的基础工作。含油、气储层是非均匀各向异性的具有固体状态与流体状态的三维三相介质。建立在均匀各向同性纯固体基础上的岩石弹性理论与波动传播理论，难以逼真描绘地震波在含油、气地层中传播的复杂物理现象。为此，我们从实际应用出发，研究横向各向同性的非均匀的粘弹介质与双相弹性介质中地震波传播的数值模拟方法与应用软件，以研究地震波在地层中传播的物理机制及其与含油、气地层的定量关系。

现行的地震勘探技术主要适用于研究地下地层的结构状态，而研究地下地层的物理性质及其中含流体的性状需借助地震波参数反问题的实现。它在数学上属于高阶双曲型偏微分方程反问题。在工程学科中归之为系统辨识问题。但是由于实际地震波的复杂性与采集的不完整性，特别是反问题本身的不适定性，使直接应用反问题方法于实际地震波将难以稳定求解。为此，我们将地震波反问题看成是非线性最优拟合问题。用拟合方法得到的解虽不唯一，且存在局部极值等问题，但可利用多种先验地质知识，在最优拟合过程中加以多重约束，以求取实用的满意解；而且用标量或失量方程拟合均可得相应方程的反问题解，使目前条件难以有效实现的地震波参数反问题得以满意的实现。所以，研究地震波传播的数值模拟，认识它的物理背景，是研究发展反问题的基础工作。

地震波在地层中的传播，是一个十分复杂的物理过程。要

从地震波记录中识别地下反射地层的物理性质，必须综合利用地面、井中录、测的物性参数及相应的地质、地球物理资料，以及实验室的参数测定，在先验地质知识智能干预下，首先通过地震波的数值模拟，修正地震地质解释方案。在此基础上进行地震波的最优拟合约束反演。用以预测含油、气地层的横向分布。为地质钻探与油、气开发提供科学依据。

在数值模拟方法中，波动方程有限元解法最适宜于地震波的模拟。它有四个特点。其一，适宜于模拟任意地质形态；其二，能处理波动方程强间断解的特点，可模拟任意岩性组合的地质剖面；其三，在模拟过程中可改变计算步长以节省计算工作量；其四，可以任意三角形逼近地层界面，以保证复杂地层形态模拟的逼真性。但是，它的严重缺点是运算量极大，所需计算机内存量极大，不是一般计算机设备所能承受的。因此，计算成本极高，致使实际应用受到严重限制。

据我国目前计算机技术的现实条件，在保证有限元法主要特点的前提下，我们研制成功相应的近似算法。并成功地在模拟过程中对波场范围采取自适应计算，以避免计算地震波采集中记录不到的波场。经过一系列软件技巧的改进，使计算工作量与内存需要量大幅度缩减，使有限元地震波模拟软件达到了实用水平。

在地震勘探中，对采集的地震波记录进行旨在提高信噪比的数据处理，得到近似于自激自收的水平叠加时间剖面与相应的偏移时间剖面。并据此进行地震地质解释，用来判断地下含油、气储层的空间分布。其中先验地质知识与地震解释经验起了重要作用。但在地震资料特别是测井资料贫乏地区，同一地震资料常有多种地质解释方案。集中反映了客观存在的地震地质解释中的多解性。我们对 600 多条实际地震剖面进行数值模拟分析，发现其中仅有 1／3 弱的解释方案基本符合实际地震

剖面，约有 1／3 强的解释方案则基本不符合。其中，对地震记录上波的性质缺乏正确认识，是造成错误地质解释的主要原因。因此，应用地震波的数值模拟识别波的性质，验证与修正地质解释方案，是十分必要的基础工作。

在地震波数值模拟中，波传播的瞬时波场是值得开拓利用的重要信息。虽然在地面采集的地震资料中，由于缺乏可用于检验对比的实际记录波场，未能发挥应有的作用，但在井间地震探测中，预计将是验证地质异常体分布的重要信息。地震波的波场分析有助于识别波的性质，特别是其中的波传播能量场，在反射界面上形成了反差很大的能量峰值，起到了自动圈闭地质异常体与层位检测的作用，而且对地质分层的分辨率，约可达到 1／20 波长，高于地面记录地震剖面的分辨率五倍以上。地震波传播能量场的重要特点，值得进一步在数值模拟与参数反演中研究应用。

本书主要论述作者多年来从事的“地震波数值模拟与参数反演”基础应用研究成果，集作者多年来试验研究中的研究报告与部分已发表的论文，经研究整理编著而成。书中数学式由郑仙种重新研究推导并统一符号。这些研究成果分成《地震波的数值模拟与偏移成像》、《地震波的参数反演》两册先后出版。作者从事这项研究始于 1978 年，由范祯祥、郑仙种合作进行。1976 年美国哥伦比亚大学郭宗汾教授主持的应用地球物理实验室，在邓玉琼教授与龚钟教授合作下，从事有限元法解弹性方程的研究工作，在 1981 年取得重要研究成果，并成功应用于研究太平洋海流方向问题上。1981 年 6 月到 1983 年 11 月期间，范祯祥应郭宗汾教授邀请到哥伦比亚大学研究访问，研究学习有关地震波有限元弹性方程模拟与参数反演问题。1984 年到 1988 年期间，在郭、邓二位教授提供科研报告及有关源程序的基础上，范祯祥主持的研究小组在国内研究发

展了粘弹方程有限元法地震波数值模拟技术，并达到了实际应用水平，获得石油部1989年科技进步一等奖，1990年国家科技进步二等奖。该项目主要完成者有范祯祥、严昌言，主要参加者有柯本喜、郭茅、范书蕊、田振平。主要协作者有中国科大的薛鑫恒、刘儒勋、李百浩、张韵华、徐文俊、徐果明；哈工大的郭宝琦、刘家琦、冯英浚、吴从昕及古学进等19位先后参加研究的研究生；中国科学院计算中心的张关泉、范尚武等。他们对本书的贡献均已列入各章参考文献中。在此致以谢意。

本书是在翁文波老师不断鼓励与指导下写成的。在研究过程中不断受到翁老师的具体指点与严格要求，促使我们健康发展。在研究工作的全过程中，陆邦干总工程师的大力支持，保证了项目的顺利完成。谨在此表示敬意。

本书出版得到国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国石油天然气总公司、大庆石油管理局的联合资助（重大油储项目三级课题），在此表示衷心的感谢。

本书经上海同济大学教授、中国科学院学部委员马在田先生，中国科学院计算中心研究员张关宗先生审阅指正，谨在此致以谢意。

本书内容如有不妥之处，敬请读者多加批评、指正。

作　者

1993年2月

目　录

第一章　地震波传播理论与运动方程

机械振动在弹性介质中传播的过程，称为弹性波。地震波则是机械振动在岩石中的传播过程。在一定的条件下，如温度、压力、作用力大小适当，岩石具有弹性性质，可视为弹性体，从而地震波可视为在岩石中传播的弹性波。

1.1　地震波在弹性介质中传播的运动方程

1.1.1　应变分析与几何方程

在外力作用下，弹性体会产生变形，我们来研究在变形后其内部各点的位移及其应变状态。

在弹性体内任取一点 P，在直角坐标系中 P 点的初始位置为向径 $\mathbf{r}=(x,\ y,\ z)^T$。变形后 P 点位移到 P^* 点,记 P^* 点的向径为 $\mathbf{r}^*=(x^*,\ y^*,\ z^*)^T$，这里 $\mathbf{r}^*=\mathbf{r}^*(\mathbf{r})$。如果记 $\mathbf{u}(\mathbf{r})=\mathbf{pp}^*=\mathbf{r}^*-\mathbf{r}$，则称 $\mathbf{u}(\mathbf{r})$为 P 点的位移向量(或位移场)。对应弹性体内不同点，$\mathbf{u}(\mathbf{r})$的三个分量值是随着点的坐标而变化的，所以可以把位移向量 $\mathbf{u}$ 写成

$$\mathbf{u}=(u(x,\ y,\ z),\ v(x,\ y,\ z),\ w(x,\ y,\ z))^T,$$

并假定分量 u、v、w 为二阶连续可微函数。

现考虑 P 点的一个邻近点 Q,Q 点在变形后位移至 Q^* 点。这里 Q 点和 Q^* 点的向径分别为 $\mathbf{r}+d\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}^*+d\mathbf{r}^*$，同时把 Q 点的位移向量 $\overline{QQ^*}$ 表示为 $\mathbf{u}(\mathbf{r}+d\mathbf{r})=\mathbf{u}(x+\Delta x,\ y+\Delta y,\ z+\Delta z)$。如果记 $\Delta\mathbf{u}=\mathbf{u}(\mathbf{r}+d\mathbf{r})-\mathbf{u}(\mathbf{r})$，则称 $\Delta\mathbf{u}$ 为 Q 点对 P 点的相对位移(如图 1.1)。

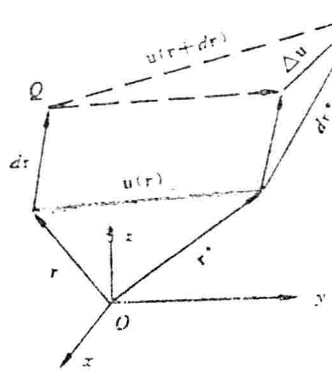


图 1.1 相对位移示意图

如果 Q 点离 P 点很近时，$\Delta\mathbf{u}\approx d\mathbf{u}=(du,\ dv,\ dw)^T$。所以 Q 点对 P 点的相对位移 $\Delta\mathbf{u}$ 的三个分量可以通过以下公式来计算

$$
\begin{aligned}
du &= \frac{\partial u}{\partial x}dx+\frac{\partial u}{\partial y}dy+\frac{\partial u}{\partial z}dz,\\
dv &= \frac{\partial v}{\partial x}dx+\frac{\partial v}{\partial y}dy+\frac{\partial v}{\partial z}dz,\\
dw &= \frac{\partial w}{\partial x}dx+\frac{\partial w}{\partial y}dy+\frac{\partial w}{\partial z}dz.
\end{aligned}
\tag{1.1.1}
$$

若记

$$d\mathbf{u}=\begin{bmatrix} du \\ dv \\ dw \end{bmatrix},\quad d\mathbf{r}=\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix},\quad A=\begin{bmatrix} \dfrac{\partial u}{\partial x} & \dfrac{\partial u}{\partial y} & \dfrac{\partial u}{\partial z} \\ \dfrac{\partial v}{\partial x} & \dfrac{\partial v}{\partial y} & \dfrac{\partial v}{\partial z} \\ \dfrac{\partial w}{\partial x} & \dfrac{\partial w}{\partial y} & \dfrac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}, \tag{1.1.2}$$

则(1.1.1)式可简记为

$$d\mathbf{u}=A\,d\mathbf{r}. \tag{1.1.3}$$

我们把(函数)矩阵 A 称为 P 点的位移梯度。所以由关系式(1.1.3)得知，P 点的任意邻近点 Q 对于 P 点的相对位移 $d\mathbf{u}$ 完全由 P 点的位移梯度 A 所决定。

如果从 P 点的向径 $\mathbf{r}=(x,\ y,\ z)^T$ 出发的一小线元 $d\mathbf{r}$，变形后移至 P^* 点的向径 $\mathbf{r}^*=(x^*,\ y^*,\ z^*)^T$ 出发的小线元 $d\mathbf{r}^*$，由以上讨论可知，它们之间有如下关系式:

$$\mathbf{r}^*=\mathbf{r}+\mathbf{u}(\mathbf{r}),\quad d\mathbf{r}^*=d\mathbf{r}+d\mathbf{u}=(I+A)\,d\mathbf{r}. \tag{1.1.4}$$

式中 $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 为 P 点的位移向量，A 为 P 点的位移梯度，I 为三阶单位矩阵。我们称

$$e_{\mathbf{n}}=\frac{|d\mathbf{r}^*|-|d\mathbf{r}|}{|d\mathbf{r}|}=\frac{|d\mathbf{r}^*|}{|d\mathbf{r}|}-1 \tag{1.1.5}$$

为 P 点在 $\mathbf{n}$ 方向上小线元 $d\mathbf{r}$ 的伸长度。由于方向 $\mathbf{n}$ 的任意性，故可把弹性体内一点在各方向上的小线元的伸长度的全体 $\{e_{\mathbf{n}}\}$ 称为 P 点的应变状态。

在小变形的情况下，位移向量 $d\mathbf{u}$ 很小，即 du，dv，dw 很小，因此在计算伸长度时可略去其乘积项，则有