

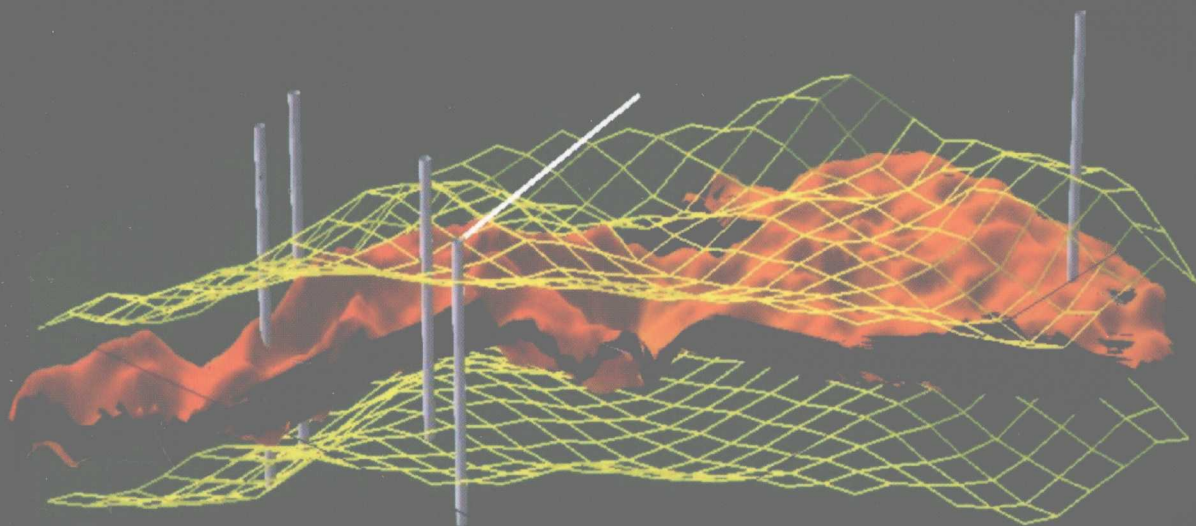
〔挪〕 Per Avseth 〔美〕 Tapan Mukerji, Gary Mavko 著  
李来林 等译 陈小宏 校

# 定量地震解释

## Quantitative Seismic Interpretation

Applying Rock Physics Tools to  
Reduce Interpretation Risk

应用岩石物理工具降低解释风险



CAMBRIDGE

石油工业出版社

# 定量地震解释

〔挪〕 Per Avseth

〔美〕 Tapan Mukerji, Gary Mavko

著

李来林 等译

陈小宏 校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分7章,包括岩石物理概述、岩石物理解释、统计岩石物理学、定量地震解释常用技术、实例研究、工作流程和指导、动手练习等内容。介绍了定量地震解释的基本原理、岩石物理模板的作用、定量地震解释实例、定量地震解释流程、定量地震解释指导及用于定量地震解释的练习数据。该书是地球物理工作者和地质人员不可多得的一本好书,其中译本的出版,将对国内定量地震解释工作起到引导和推动作用。

尽管本书的定量解释是从岩石物理模板出发,以减少多解性的思路开展工作,但该书的出版一定会对未来的定量地震解释提供帮助,同时,该书提供了动手练习的数据。因此,该书既可以作为地震解释人员的参考书,也可以作为石油高等院校相关专业的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

定量地震解释/ (挪)阿伍赛斯(Avseth, P.), (美)穆科尔基(Mukerji, T.), (美)梅维科(Mavko, G.)著; 李来林等译. —北京:石油工业出版社, 2009. 4

书名原文: Quantitative Seismic Interpretation

ISBN 978-7-5021-7081-3

I. 定… II. ①阿… ②穆… ③梅… ④李… III. 地震勘探-地质解释 IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第044673号

*Quantitative Seismic Interpretation* (ISBN 978-0-521-81601-4) by Per Avseth, Tapan Mukerji, and Gary Mavko first published by Cambridge University Press 2005

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Petroleum Industry Press 2009

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Petroleum Industry Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

---

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

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

---

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 18

字数: 461千字 印数: 1—1000册

---

定价: 68.00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

在项目研究过程中，友人赠送了一本书，英文名字为 *Quantitative Seismic Interpretation*，即《定量地震解释》，见到后如获至宝。定量地震解释，这是许多地震工作者梦寐以求的目标，总算找到了。然此定量非彼定量，要想实现真正意义上的定量地震解释还有很长的路要走。但从这本书上我们看到了定量地震解释的思想和希望。他山之石，可以攻玉，一些从事或关心地震解释的人员可以从这本书上学到很多值得我们思考和回味的东西。

定量地震解释，名字虽然起的响亮，但正标题下面还有一个副标题，英文名字为 *Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk*，译为：“应用岩石物理工具降低解释风险”。因此，副标题应是该书的核心标题，也是该书的核心内容。

《定量地震解释》体现了西方人做解释的思路。他们从最基本的岩石物理成分做起，分析岩性、岩石成分、不同成分的含量、胶结程度、分选程度等，把这些微观问题与成岩、沉积等宏观地质问题联系起来，建立了各种统计岩石物理模型，并把这些因素和地震弹性参数（纵波速度、横波速度、密度）联系起来，在实践（实验室岩石物理分析）的基础上，建立了描述它们之间关系的“完整”数学模型，并用于地震和地质解释。科学的一个重要意义就是能够从实践上升到理论，并且可以重复。而一种客观事物，一旦能够用数学描述，则它离科学也就近了。

地球物理问题是非常复杂的问题，究其原因是在地下地质情况复杂和由其导致的地球物理特征的多解性。地球物理方法利用数学模型描述地下的地质情况，但没有任何数学模型能精确描述地下地质体。因此，所有的模型都是在假设前提下得到地下的真实近似，由此产生的误差留在了地震数据中。正如本书中所说：“所有模型都是错误的，但有些是可用的”。因此，地球物理解释人员必须清楚眼前所看到的地震图像，并不代表地下唯一的地质情况，对地震图像必须去伪存真。要达到此目的，地震和地质的结合乃至与其他学科的结合是必不可少的，利用多学科联合进行定量地震解释能够降低多解性，也是地震解释未来发展的趋势。

反演过程和反演结果一样重要。所有地球物理反问题的求解都是依据正问题的研究而产生，没有一个地球物理方法会直接用实际数据或所谓的井资料来验证它的正确性（实际是不可验证的）。其道理很简单：首先理论数据要比实际数据单一，且已知，我们能够立即获得新方法的正确性；其次，实际数据包含了太多的不确定性，我们无法一一知道它们对结果的影响，因而无法验证新方法的正确性。这也是为什么有些反演方法刚开始轰轰烈烈，而最后却悄无声息的原因。没有理论上对地球物理方法的深入研究（过程），就不会产生有生命力的、革命性的地球物理应用。

因此，反演时既应重视它的理论基础，同时又应重视它的过程，而不应仅仅看重它的结果或者符合程度。反演不仅仅是一种方法，更是一种过程，一种方法论，一种世界观。应该尝试建立反演的规范流程（岩石物理基础、模板、校正、预测、反演结果的统计概率分析、解释），并在此基础上不断发展，达到降低风险或某种程度定量化的可能。

对于地球物理问题，正如本书中引用弗雷德里克·尼采所言：“没有事实，只有解释”，

因为我们对某些地下“永远”不可知。普拉特说：“找油的人几乎绝不可能知道他们所碰到的所有（地下）情况。”因此，对地下探索是解释人员永远的课题，所谓定量解释，正如本书的副标题，只是降低解释的风险罢了。

尽管如此，我们还是想从本书中找到定量解释的影子，并希望这个影子通过我们不懈的努力，逐渐清晰起来，直到有一天可以把本书的副标题去掉。虽然这可能需要几代甚至十几代地球物理人的努力，但这是值得期待的。也许这个过程会很漫长，不过没关系，一切都在追求之中。

本书中相的定义是指具有某类地震属性特征（在地震属性特征上能够区分开）的地质相，而不仅仅指岩相，比如水砂岩、油砂岩、纯砂岩是三种不同的相，而不是三种岩相。

希望本书的翻译出版，能够对国内反演、解释工作起到推动作用，并提升地震反演、解释水平。

由于参与本书翻译的人员水平所限，难免有不妥之处，敬请批评指正。

译者

2009年2月12日

# 内容简介及作者介绍

地震数据分析是储层描述和地下孔隙流体监测的关键技术之一。在 3D 地震数据处理取得极大进步的同时，对岩石特性的地震数据定量解释仍然面临着许多挑战。

《定量地震解释》展示了如何利用地震属性来预测油藏参数，如岩性、孔隙度、流体特性。它说明了岩石物理模型与地震数据、沉积学信息和随机技术的多学科联合是如何比单一技术更优越。本书作者为使用测井和地震数据进行定量解释、不确定性估计，以及为地下储层描述提供了一种综合的方法和一些实用工具。他们阐明了这些新方法的优点，同时指出了有关这些方法的限制和传统缺陷。

本书是为研究生、本科生和在石油地球科学及勘探地震学领域工作的专业人员编写的，对那些有意从浅层地震中寻求定量地下描述的环境地球物理学家也是有益的。本书包括实例研究和问题集。读者还可以从剑桥大学相关网站上获得对这些方法的练习和理解。

Per Avseth：挪威卑尔根 Norsk Hydro 研究中心高级地球物理学家。获得挪威技术学院应用石油地球科学硕士学位，加利福尼亚斯坦福大学地球物理学博士学位。研究兴趣包括应用岩石物理学、AVO 分析、定量地震勘探和储层描述。在应用定量地震解释方法方面具有广泛的国际经验，并在 Norsk Hydro 任教。

Tapan Mukerji：与斯坦福大学斯坦福岩石物理学项目有关的研究人员，在斯坦福大学获得了地球物理博士学位。研究兴趣包括：波传播、统计岩石物理、地震储层描述中的应用岩石物理学和统计方法、裂缝探测、4D 监测、浅地表环境应用。在把前沿应用研究和教学相结合方面富有经验。是《岩石物理手册》(Cambridge, 1998) 的合著者，教授工业课程。2000 年获得美国勘探地球物理学家学会 (SEG) Karcher 奖。

Gary Mavko：合作指导了斯坦福岩石物理学和井筒地球物理项目 (SRB)。SRB 是由 25 人组成的一个研究团队，从事地质材料中与波传播有关问题的研究工作。1977 年获得斯坦福大学地球物理学博士学位。1984 年，在熵地球物理公司 (Entropic Geophysical) 成立之初，作为反射地震处理团队的创业者，他加入了该公司，最终成为研发副总裁。现为斯坦福大学教授 (研究员)。《岩石物理手册》(Cambridge, 1998) 的合著者，受邀指导许多工业课程。2001 年获得美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 荣誉会员奖。

# 前 言

每年新发现石油越来越难，越来越有风险，也越来越昂贵，一个很自然的结果就是它的有限性。如同 M. King Hubbert 峰值所指示的那样，新发现和产量递减不可避免。然而需求仍在继续，这迫使我们转向更深的水域，更复杂的储层，更小、更隐蔽的油田。

处理这种复杂性和风险的关键一直是不同石油技术的有效综合。工作站、可视化软件及地质统计学有助于我们处理巨量数据。也许更重要的是宝贵的人才队伍，他们要把专门的技术综合起来，挖掘不同的数据。在准备“定量地震解释”时，我们的目标是帮助阐明储层描述，岩石物理在综合数据和地球物理专门技术及地质学中的强大作用。

本书的目的是使地震和储层描述之间的联系更为定量。我们大多数的例子使用的是振幅信号和阻抗，但是我们考虑定量地震解释时包括任何地震属性的使用，有特定的模型把这些属性和岩石物理特性相关联。我们的方法是介绍基本的岩石物理关系，这些关系有助于定量岩石物理信号和流体特性。由于岩石特性是地质过程的结果，因此我们以定量各种地质趋势的地震信号开始。我们还充分采纳概率和地质统计学工具，作为处理必然不确定性的定量工具，这种不确定性贯穿于所有定量方法中。在一个风险环境中，定量、管理和了解不确定性是生存的关键。

多年来，岩石物理研究重点在物理特性上。在不同的实验室条件下，通过仔细测量波的传播，我们不可思议地开发了灵巧的模拟岩石声学特性的类似物，寻找制作包含流体的颗粒和孔隙模型的方法。我们知道如何依据矿物、孔隙度、纵横比和颗粒接触来确定地震速度参数。我们了解孔隙压力和应力如何影响速度、衰减和他们的各向异性。我们理解为什么（高频）实验室速度与（低频）野外速度不同。当孔隙流体变化时，我们能对速度如何变化做出极好的预测。

令人吃惊的是，在过去几十年期间，岩石物理某些最重要的突破不仅来自于数学的帮助，而且来自于重新发现的岩石地质物理学。控制弹性响应的岩石结构参数能够与沉积成熟度、压实和成岩作用的印记相联系。孔隙纵横比已退让给诸如颗粒分选这样的参数；线性阻抗—孔隙度趋势让位于速度—孔隙度平面内砂岩—泥岩的“循环”交会，反映了沉积周期的变化。定量地质约束可以通过地球物理平面（速度与孔隙度； $v_p$  与  $v_s$ ）定义相关轨迹，基于物理的模型适于用参数表示。

岩石物理最强有力的应用之一就是外推。在井的位置，假设数据质量很好，我们几乎可以知道“答案”。岩屑、岩心和测井资料会告诉我们有关岩性、孔隙度、渗透率和流体的情况。问题经常是当我们远离井时，我们想知道会发生什么。这是岩石物理“如果……会怎么样？”的作用。使用岩石物理性质，地质上我们可以推断离开井位置可能存在的似是而非的情况，探索地震信号可能如何变化。当我们希望了解在井中没有出现的流体和岩相地震信号时，岩石物理性质是特别有用的。对于统计模型，如聚类分析或神经网络，这样的外推对于扩展训练数据是至关重要的。如果孔隙流体变化会怎么样？如果岩性变化会怎么样？如果沉积环境变化又会怎么样？

另一个令人兴奋的进展就是统计岩石物理学的出现。基于模拟的定量解释成果是统计岩石物理学的主要信息之一。地球物理学家和地质学家倾向于躲避（甚至轻蔑）统计学。不知何故，我们感到统计方法正在放弃物理学，甚至混淆物理学。但是，随机方法并没有抛弃物理学。它们仅仅是提出了某些没有用经典物理建立模型的真实性和不均匀性。你最后一次看到带有误差标志的地震剖面是什么时候？不久之前，在听了一场随机模拟报告后，我们的一个同事给出了评论“你想要的只是编辑随机数吗？”非常感谢，这些误解正在（逐渐）消失。仅仅因为我们还没有完美的图像和速度估计算法并不意味着我们应该停止做解释，去等待完美的数据。由于数据有缺陷和不完美，在不确定性面前，需要做出决定。当有质量较好的数据时，人们能够更改先前的解释，降低有关的不确定性。对统计方法的抱怨之一是统计方法需要大量数据。更多的数据有助于统计，这是事实。但是，缺乏数据的方案也是不确定性最大的那些方案。正是这种缺少数据的情况，从随机方法中获得了最大的益处，因为它定量并减少了不确定性。

“定量”并不意味着没有不确定性。我们同样强调，不确定性估计和概率总是主观的。在定量解释中，主观信息起着重要的作用。“主观”和“定量”并不是互相排斥的。

不确定性和风险遍及我们对储层的决策中。不确定性的一个来源是对毫无希望的复杂现实做模型近似。岩石既可以是非线性的，也可以是非弹性的或各向异性的。然而，许多地震分析都作近似假设，使缺陷留在了地震图像中。另一个不确定性的来源是解释的基本非唯一性。假设各向同性、线性、弹性的最理想反演至多产生三个参数： $v_p$ ， $v_s$  和密度，我们仍然在努力获得这三个参数。除  $v_p$ ， $v_s$  和密度外，也许我们能够用合适的模型估计一些有关  $Q$  和各向异性的事情。我们大多数工作所依据的波动方程仅仅依赖于这几个参数。然而，有许多对岩石的未知：矿物、孔隙度、孔隙形状、颗粒大小分布、有角性、填充、孔隙流体、饱和度、温度、孔隙压力、应力等。所以，即使有理想的数据，我们也有大量的不确定性需要描述，并需要用最佳的地质应用来降低不确定性。

第 1 章对岩石物理进行了简介，岩石物理旨在发现并了解地震观测（速度、波阻抗、振幅）和岩石特性（岩性、孔隙度、渗透率、孔隙流体、温度和应力）之间的关系。我们引入了弹性特性限的概念，说明当我们在速度—孔隙度平面内描述沉积和成岩趋势时，它们也可以作为有效的内插器。我们对流体替换给出了广泛的讨论，并探索当区分岩性、压力和饱和度影响时，横波信息所起的特殊作用。

第 2 章集中在砂岩、泥岩和泥质砂岩沉积与成岩趋势的岩石物理联系上。我们引入许多特殊模型描述碎屑岩的速度—孔隙度特性，并用一些野外例子来阐明。我们建立沉积相和岩石物理特性之间的重要联系，研究在砂岩和泥岩岩石物理中作为成岩过程函数的深度趋势，最后，把这些信息一起放在特定盆地岩石物理模板（RPT）中，用于测井和地震数据分析。

第 3 章集中在统计岩石物理上。对各种统计分类技术做了简介，说明如何把岩石物理模型和现代计算机统计相接合，来帮助我们超越单独对统计学和物理学的使用。我们说明蒙特卡洛模拟如何帮助我们定量地震属性岩石物理解释的不确定性。我们还讨论导出了扩展、外推训练数据分布的概念。第 3 章中描述的用于蒙特卡洛模拟和统计分类技术的 Matlab™ 函数可以从本书的网站上下载。关于统计分类技术的详细讨论，我们推荐两本极好的书，《统计知识原理：数据挖掘、推论和预测》(The Elements of Statistical Learning: Data Mining,



*Inference, and Prediction*)(Hastie, Tibshirani 和 Friedman, 2001) 和《模式分类》(*Pattern Classification*)(Duda, Hart 和 Stork, 2001)。《用洞察力决策》(*Decision Making with Insight*)(Savage, 2003) 以一种娱乐的方式突出了在定量建立模型中忽略不确定性的缺陷。

第 4 章汇编了一套定量地震解释中最常用的技术, 包括由本书作者所做的最新贡献。我们以说明定量地震解释中的一些常见缺陷, 以及地震技术如何解决多解性、如何提供烃类探测能力开始。振幅随偏移距变化 (AVO) 的分析是当今工业界最常见的定量技术, 我们对许多 AVO 问题给出一个总体评价, 范围涉及波的传播理论、处理和采集影响及不同的方法到 AVO 信息解释。本章还包括对从近、远偏移距阻抗反演中提取岩石特性的不同方法给出总体评述。我们强调了各种技术有关的缺陷, 但也肯定了它们对获得岩石和流体特性的很大潜力。我们把讨论从确定性技术扩展到概率 AVO 分析, 这是一种储层特性地震预测技术。也给出了由岩石物理深度趋势和 RPT 分析地震应用约束的 AVO 新技术。最后, 我们对定量地下储层特性的地震模型正演技术作一个简短评价。

第 5 章描述了不同的研究实例。使用地震数据, 前几章中描述的概念被系统地用于对岩性和孔隙流体的预测。尽管所有的例子是用碳酸碎屑沉积体系说明, 但所使用的模型和工作流程完全可以用于其他问题, 如碳酸盐岩、水合物、裂缝储层和浅层水文资料现场描述。而且, 我们不只讨论静态储层描述, 还把这些方法扩展到包括时移地震。

第 6 章推荐了在油田储层勘探、评价、开发和管理不同阶段应用定量地震解释方法所使用的特定流程。之所以包括这些流程, 是希望这些方法能够吸引每一个从事常规地球物理数据解释的人。

第 7 章提供了问题集和一个扩展的储层描述项目, 在网址上提供了一个地震数据和测井数据的例子。我们强调解决这些问题的价值。学习的最好方式就是实践。提供实际的、练习的经验, 我们希望练习数据集例子和 Matlab 函数会有助于读者更好地了解这些技术。我们相信网址上的资源将有助于使本书适合于教学。

定量地震解释是对其他工作的补充。对于更深入特定岩石物理问题的讨论, 我们推荐《岩石物理手册》(*The Rock Physics Handbook*)(Mavko 等, 1998)、《孔隙介质声学》(*Acoustics of Porous Media*)(Bourbié 等), 以及《岩石物理引论》(*Introduction to the Physics of Rocks*)(Guéguen 和 Palciauskas, 1994)。我们希望把你的注意力吸引到《三维地震解释》(*3-D Seismic Interpretation*)(Bacon 等, 2003) 及《三维地震数据解释》(*Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data*)(Brown, 1992) 上来。更倾向于地质的讨论可以在《沉积学和地层学原理》(*Principles of Sedimentology and Stratigraphy*)(Boggs, 1987) 中找到。有关 AVO 技术更好的讨论在《依赖于偏移距的反射率: AVO 分析和理论实践》(*Offset-Dependent reflectivity: Theory and Practice of AVO of AVO analysis*)(Castagna 和 Backus (eds), 1993) 中可以找到, 反演方法的讨论可以在《地球物理反演中的全局最优方法》(*Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*)(Sen 和 Stoffa, 1995) 中找到。我们感到 Yoram Rubin 的工作特别有价值, 其中包括《应用随机水文地质》(*Applied Stochastic Hydrogeology*)(Rubin, 2003)。

感谢 Norsk Hydro, Statoil 和 Total 允许出版本书中使用的许多野外数据, 感谢 Norsk Hydro 对 Per Avseth 为这本书工作所做的慷慨支持。特别要感谢 Aart-Jan van Wijngaar-

den, Harald Flesche, Susanne Lund Jensen, Erik Ødegaard, Johannes Rykkje, 和 Norsk Hydro 的 Jorunn Aune Tyssekvam, DONG 的 Tor Veggeland 对本书所作的贡献。我们还要感谢 Jon Gjelberg, Tom Dreyer, Ivar Sandø, Erik Holtar, Toril Dyreng, Ragnhild Ona, Hans Helle, 和 Norsk Hydro 的 Torbjørn Fristad 对本书中技术和例子有价值的反馈和讨论。感谢全体教员、学生、工业界的会员及斯坦福大学岩石物理和井筒地球物理项目的朋友们许多有价值的意见和见识。我们感到与 jack Dvorkin, Jef Caers, Biondo Biondi, Henning More, Mario Gutierrez, Ran Bachrach, Joeidsvik, Nizar Chemingui, Ezequiel Gonzalez, 和 Youngseuk Keehm 的讨论特别有价值。Arild Jørstad 在早期一个统计岩石物理模型建立项目中和我们一起工作过, 当时我们研究了在岩石物理模型建立和统计分类中应用蒙特拉洛模拟技术的方法。我们一直受惠于 Amos Nur 的工作, 不论过去还是现在, 是使岩石物理发展到今天的程度。

我们希望本书对你有益的。

# 目 录

<b>1 岩石物理概述</b> .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 映射孔隙和岩相的速度—孔隙度关系 .....	(2)
1.3 流体替换分析 .....	(11)
1.4 压力对速度的影响 .....	(17)
1.5 横波信息的特殊作用 .....	(21)
1.6 岩石物理“如果……会怎么样?”：流体和岩性替换 .....	(29)
1.7 所有模型都是错的……有一些是有用的 .....	(30)
<b>2 结构、岩性和压实的岩石物理解释</b> .....	(34)
2.1 引言 .....	(34)
2.2 岩石物理特性和沉积微观结构之间的联系：理论和模型 .....	(36)
2.3 实例：北海浊积体系微结构的岩石物理解释 .....	(49)
2.4 把岩石物理与岩性和沉积环境相关联 .....	(56)
2.5 实例：北海浊积体系中的地震岩相 .....	(58)
2.6 岩石物理深度趋势 .....	(63)
2.7 实例：北海油田岩石物理深度趋势和异常 .....	(67)
2.8 岩石物理模板：岩性和流体预测工具 .....	(72)
2.9 讨论 .....	(75)
2.10 结论 .....	(76)
<b>3 统计岩石物理学：联合岩石物理、信息论和统计学降低不确定性</b> .....	(78)
3.1 引言 .....	(78)
3.2 为什么要定量不确定性? .....	(78)
3.3 统计岩石物理工作流程 .....	(87)
3.4 信息熵：一些简单例子 .....	(92)
3.5 蒙特卡洛模拟 .....	(94)
3.6 统计分类和模式识别 .....	(96)
3.7 讨论和概述 .....	(115)
<b>4 定量地震解释常用技术</b> .....	(117)
4.1 引言 .....	(117)
4.2 地震振幅定性解释 .....	(117)
4.3 AVO 分析 .....	(124)
4.4 波阻抗反演 .....	(157)
4.5 地震模型正演 .....	(171)
4.6 定量地震解释的发展方向 .....	(174)

<b>5 实例研究：用地震数据预测岩性和孔隙流体</b> .....	(175)
5.1 实例 1：用 3D AVO 映射北海浊积体系中的地震储层 .....	(175)
5.2 实例 2：用地震阻抗反演和统计岩石物理映射北海储层岩相和孔隙流体概率 .....	(189)
5.3 实例 3：在北海 Grane 油田用统计 AVO 预测地震岩性和描绘储层 .....	(200)
5.4 实例 4：西非沿岸未固结深水体系中岩性和孔隙流体分类的 AVO 深度趋势 .....	(208)
5.5 实例 5：使用岩石物理模板映射地震储层（北海浊积体系的例子） .....	(212)
<b>6 工作流程和指导</b> .....	(216)
6.1 AVO 识别 .....	(216)
6.2 岩石物理“如果……会怎么样？”及 AVO 可行性研究 .....	(218)
6.3 RPT 分析 .....	(219)
6.4 用岩石物理深度趋势约束 AVO 分类 .....	(220)
6.5 用岩相分析和统计岩石物理约束地震储层描述 .....	(222)
6.6 为什么和什么时候我们做定量地震解释？ .....	(223)
<b>7 动手练习</b> .....	(226)
7.1 引言 .....	(226)
7.2 问题 .....	(226)
7.3 项目 .....	(228)
<b>参考文献</b> .....	(232)

# 1 岩石物理概述

尽可能使理论易懂，但绝不是简单。

Albert Einstein

## 1.1 引言

许多年以来，地震速度对关键油藏参数（如孔隙度、岩相、孔隙流体类型、饱和度和孔隙压力）的敏感性一直被人们认可。然而，随着地震勘探采集、处理的进步和烃类检测、油藏描述、油藏监测和地震振幅解释的需要，在过去的十年间，将地震信息到岩性信息的转变以及它们之间的不确定性关系定量化变得至关重要。发现并了解地震信息与油藏之间的关系就成为岩石物理研究的焦点。

我们之所以偏爱需要岩石物理分析的例子之一显示在图 1.1 中（见书后彩图）。这是一张水底扇或浊积体系上面的地震 P-P 反射率图。由于存在明显的、可识别的特征形态，因此我们不用更多的岩石物理信息就可以解释这张图。沉积学家会告诉我们，在图像左边三分之一处的主补给水道（高振幅指示）很可能是大规模的、纯净的、分选很好的砂岩——好的储层岩石。这种砂岩很可能被低振幅显示的泥岩所切割。所以，我们可以得出这样的结论，高振幅与好的砂岩相对应，而低振幅代表泥岩。

然而，在扇叶环境的下游，情况变化了。井控告诉我们，在图像的右边，低振幅是与泥岩和纯砂岩相对应——砂岩是显而易见的。在图像的这一部分，亮点不亮，因为砂岩富含泥岩。那么，会发生什么呢？

现在，我们了解到，这些结果很多是由于沉积和成岩交互作用的结果。彩图 1.1 左边的纯砂岩被轻微胶结，从而使它们有比泥岩更高的波阻抗。右边的砂岩没有被胶结，因而实际上与泥岩具有相同的波阻抗。然而，在右边，有许多与低能量沉积环境有关的岩相，它们是分选更差且富含黏土的岩相。从实验和理论研究可以知道，差的分选也能影响波阻抗。在彩图 1.1 的浊积体系中，纯的、轻微胶结的砂岩和纯的、未胶结的砂岩都是饱含油的。这些砂岩实质上具有相同的孔隙度和组分，可是它们具有不同的地震响应。

这个例子表明，通常我们需要把岩石物理的原理引入到地震解释和储层地球物理中。尽管具有很好的地震资料品质和井控，但是，正确的解释需要把地质和地震数据的联系定量化。使用纯粹的相关方法，例如神经网络或地质统计学，并不会如此成功。

在第 1 章中，我们的目的是回顾一些基本的岩石物理概念，这些概念对储层地球物理至关重要。尽管讨论并不彻底，但我们将对当前所使用方法的优点、不足及共性误区进行讨论；对于反演岩性、孔隙度及流体类型地震信息到岩性信息的转换，我们作了特别推荐。一些岩石物理方法将在第 2 章、第 3 章和第 5 章中作进一步讨论和应用。

## 1.2 映射孔隙和岩相的速度—孔隙度关系

岩石物理模型把速度和波阻抗与孔隙度和矿物成分（例如泥质含量）联系起来，形成了用于孔隙度和岩相地震分析的关键部分。在这一节中，我们展示了当遇到一个新的储层地球物理问题时，如何识别合适的速度—孔隙度关系。

误区：

在实际中，我们观察到最严重也最常见的错误是使用不恰当的速度—孔隙度关系，用于地震映射孔隙度和岩相。最常见的错误是使用过分生硬的速度—孔隙度关系，如典型的 Wyllie 等（1956）、Raymer、Hunt、Gardner（Raymer 等，1980）、Han（1986）、Raiga-Clemenceau 等（1988）、临界孔隙度模型（Nur，1992）、硬币形状裂缝模型的经验趋势。使用 Wyllie 时间平均方程，从声波测井导出的“声波孔隙度”也许是最糟糕的例子。这些关系中隐含着孔隙度是由成岩作用控制的观点，然而实际情况并非总是这样。因此，关键的沉积变化被忽略了。

对策：

测井及岩心的岩石物理诊断分析与地质模型耦合，通常会产生更合理的速度—孔隙度关系。在本节中，某些方面被重点强调。

将速度—孔隙度关系应用于其他岩石物理问题也非常重要。甚至在下一节要讨论的地震孔隙流体分析也依赖速度—孔隙度关系。我们可以从 Gassmann 关系式出发来分析这一点，Gassmann 关系式可以用下面的公式表示（Zimmerman，1991；Mavko Mukerji，1995；Mavko 等，1998），即

$$\frac{1}{K_{\text{rock}}} = \frac{1}{K_{\text{mineral}}} + \frac{\phi}{K_{\phi}}$$

式中， $K_{\text{rock}}$ ， $K_{\text{mineral}}$  及  $\tilde{K}_{\phi}$  分别表示饱和岩石、矿物及饱和孔隙空间的体模量； $\phi$  是孔隙度。孔隙空间模量近似为干孔隙模量和流体模量之和： $\tilde{K}_{\phi} \approx K_{\phi} + K_{\text{fluid}}$ （后面我们会更认真地定义这些概念）。由此，我们可以看到，岩石模量对孔隙流体变化的敏感性直接依赖于孔隙空间刚度与孔隙度的比率  $K_{\phi}/\phi$ 。刚度相对大的岩石对孔隙流体的地震敏感性较小，而刚度小的岩石对孔隙流体的敏感性较大。

我们会遇到几种常见方式把流体替换和速度—孔隙度关系联系起来：

（1）当首先分析用测井数据来导出速度—孔隙度关系时，实质上首先要把数据转换成一种普通的流体。否则，岩石骨架和孔隙流体的影响会混合在一起。

（2）当解释用于烃类检测的 3D 数据时，Gassmann 分析需要一个比较准确的孔隙度估算，这也必须用地震数据进行转换。

（3）当时移声阻抗特性（ $v_P$  和  $v_S$ ）储层模型用于 4D 可行性研究时，我们经常需要把孔隙度转换成速度。如果开始的转换就不正确，那么，后面的流体替换就不可能正确。

### 1.2.1 弹性边界的背景

我们以讨论岩石弹性模量上下限开始，为速度—孔隙度关系提供一个有用且完美的框架。

许多已发表的“有效介质”模型，试图从理论上描述岩石和沉积物的有效弹性模量（如需回顾，请参见 Mavko 等，1998）。一些模型把岩石近似为受孔洞扰动的一块弹性矿物。这些模型通常被称为“包体模型”。另一些模型试图描述接触上分开的弹性颗粒的情况。这些模型有时被称为“颗粒-介质模型”或“接触模型”。不考虑方法，模型通常需要确定三种信息：（1）各种成分的体积分数；（2）各种相的弹性模量；（3）各种相之间排列的几何细节。

实际上，岩石和沉积物的几何细节从来没有被恰当地纳入到理论模型中，而总是致力于模型的近似和简化。

当我们只指定成分的体积分数和它们的弹性模量，而不考虑其排列几何细节时，那么我们只能预测出复合岩石模量和速度的上下限。然而，弹性限是极为可靠和稳健的，它们几乎不受困扰大多数特定几何形态有效介质模型近似假设的影响。此外，由于测井产生的仅是有关结构成分及其体积分数的信息，而几乎没有颗粒及孔隙微结构信息，因此，上下限就成为极有价值的岩石物理工具。

图 1.2 阐明由两种成分构成一种简单混合物的概念。这可以是两种不同矿物或一种矿物加流体（水、油或气）。对于给定的各成分体积分数，混合物有效模量会落在上下限之间（在沿着图中垂直虚线附近），但它的精确值依赖于几何细节。例如，我们使用术语像“硬孔隙形状”和“软孔隙形状”来描述几何变化。在允许范围内，硬的颗粒或孔隙形状产生较高的值；软的颗粒或孔隙形状产生较低的值。

### 1.2.1.1 Voigt 和 Reuss 限

最简单，但不一定是最好的限是 Voigt (1910) 和 Reuss (1929) 限。由  $N$  种材料相构成的混合物，其有效弹性模量  $M_V$  的 Voigt 上限为

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (1.1)$$

式中， $f_i$  为第  $i$  个成分的体积分数； $M_i$  为第  $i$  个成分的弹性模量。

没有办法把由几种成分构成的材料混合在一起，使其弹性比由 Voigt 限给出的成分模量的简单算术平均还要硬。Voigt 限有时被称为等应变平均，因为当假定所有成分具有相同的应变时，它给出了平均应力与平均应变的比率。

有效弹性模量  $M_R$  的 Reuss 下限为

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (1.2)$$

无法把由几种成分构成的材料混合在一起，使其弹性比由 Reuss 限给出的调和平均模量还要软。Reuss 限有时被称为等应力平均，因为当假定所有成分具有相同的应力时，它给出了平均应力与平均应变的比率。

数学意义上，Voigt 和 Reuss 公式中的  $M$  可以代表任何模量：弹性模量  $K$ ，剪切模量  $\mu$ ，杨氏模量  $E$  等。然而，只有当剪切模量  $M = \mu$  及体积模量  $M = K$  时，计算出 Voigt 和 Reuss 平均才更有意义，然后再使用各向同性线性弹性准则计算其余模量。

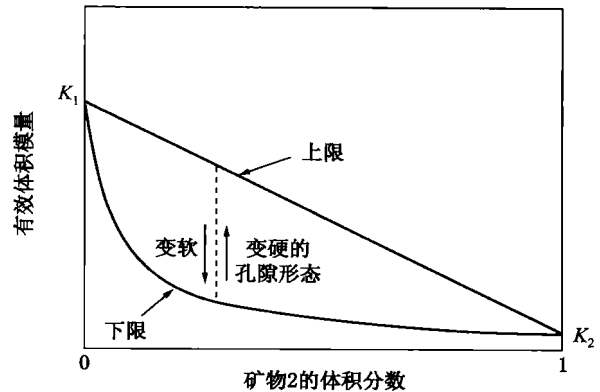


图 1.2 两种材料混合物有效弹性体模量边界的概念性说明

图 1.3 以图解方式来说明当成分之一是一种流体或气体时弹性体模量和剪切模量的上下限。在这种情况下，下限对应于颗粒悬浮在流体中的情形，对于低有效应力、很软的沉积物来说，这是一个非常好的模量。注意，虽然流体的体积分数不是零，但其剪切模量的下限为零。

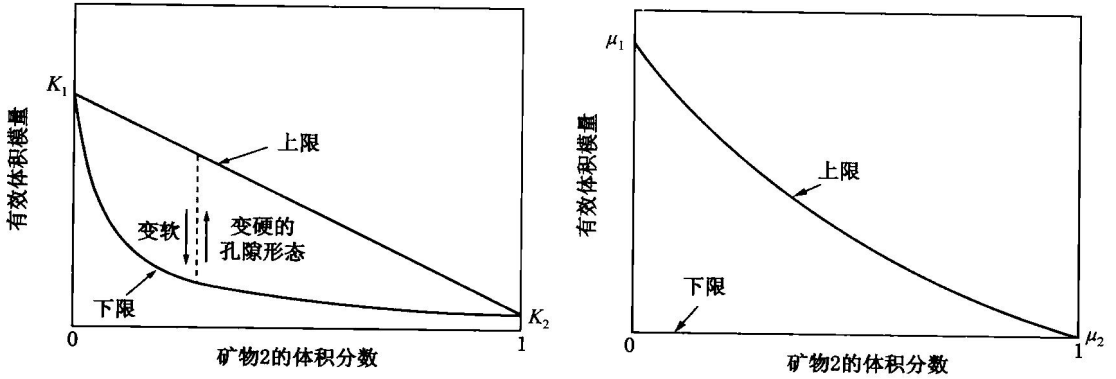


图 1.3 两种材料混合物（其中之一为流体）体模量和剪切模量上、下边界的概念性说明

Reuss 平均准确地描述了流体中悬浮固体颗粒的有效模量。这将成为描述某种弹性沉积物的基础。它也可以描述“破碎”材料的模量，即固体碎块完全被孔隙流体包围的情形。

### 1.2.1.2 Hashin - Shtrikman 限

对于一个各向同性的弹性混合物来说，最好的上下限（给出尽可能小的弹性模量范围，而不考虑成分的几何特性）是 Hashin - Shtrikman 限（Hashin - Shtrikman, 1963）。对于两种成分的混合物，Hashin - Shtrikman 限由下式给出，即

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{f_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + f_1 (K_1 + 4\mu_1/3)^{-1}} \quad (1.3)$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{f_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + 2f_1 (K_1 + 2\mu_1) / [5\mu_1 (K_1 + 4\mu_1/3)]}$$

式中， $K_1, K_2$  是单相的体模量； $\mu_1, \mu_2$  是单相的剪切模量； $f_1, f_2$  是单相的体积分数。

上下限采用角标为 1 的材料和角标为 2 的材料分别交替计算。一般来讲，当最硬的材料以角标 1 表示时，上述表达式计算的是上限，而当最软的材料以角标 2 表示时，计算的是下限。

一种体模量落在 Hashin - Shtrikman 上下限之一上的材料的物理解释示于图 1.4 中。空间是由材料 2 球型集合充填，每一个球由一个材料 1 的球壳所包裹。每一个球和其球壳都具有精确的体积分数  $f_1$  和  $f_2$ 。

当较硬的材料形成壳时，就是上限；当较硬的材料形成心时，就是下限。

对于多于两种相的材料，更为通用的 Hashin - Shtrikman 限形式可以写为

$$K^{HS+} = \Lambda(\mu_{\max}), K^{HS-} = (\mu_{\min}) \quad (1.4)$$

$$\mu^{HS+} = \Gamma[\zeta(K_{\max}, \mu_{\max})], \mu^{HS-} = \Gamma[\zeta(K_{\min}, \mu_{\min})]$$

这里

$$\Lambda(z) = \left[ \frac{1}{K(r) + 4z/3} \right]^{-1} - \frac{4}{3}z$$

$$\Gamma(z) = \left[ \frac{1}{\mu(r) + z} \right]^{-1} - z$$



$$\zeta(K, \mu) = \frac{\mu}{6} \left( \frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right)$$

式中，括号[·]表示介质的平均，与成分平均一样，用它们的体积分数对其加权。

上下限（Voigt - Reuss 或 Hashin - Shtrikman）之间分开的程度依赖于成分在弹性上的差异。正如图 1.5 显示的那样，当把固体混合时，上下限通常具有很好的相似性，因为普通矿物的弹性模量通常都在彼此的 2 倍之内。由于许多有效介质模型都假定一个均匀的矿物模量，因此用一种“平均矿物”模量代表一种混合矿物模量常常是有用的（合适的），平均矿物模量既能等于计算的混合矿物的上下限之一，又能等于它们的平均 $(M^{HS+} + M^{HS-})/2$ 。

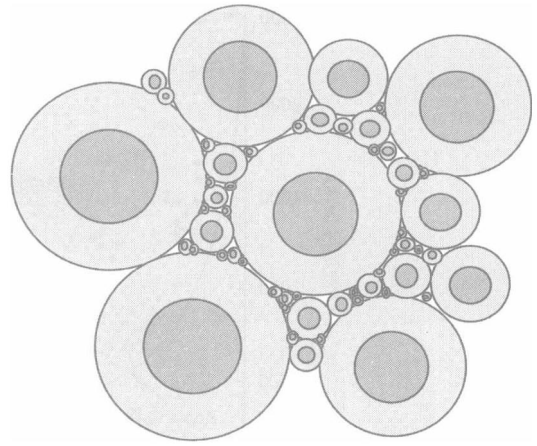


图 1.4 两相材料体模量 Hashin - Shtrikman 边界的物理解释

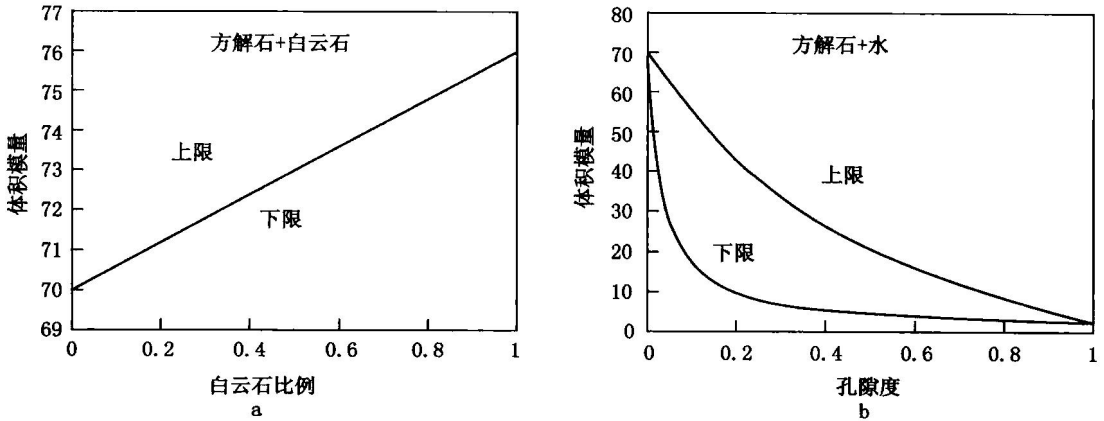


图 1.5 a 图为两种材料的混合物。当材料的成分弹性上相近时，上、下边界重合；b 图为矿物和水的混合物。当材料的成分弹性上不相同时，上、下边界分开

另一方面，当成分变化较大时，如矿物和孔隙流体，则上下限分开较大，我们就损失了一些预测的价值。

注意，当  $\mu_{\min} = 0$  时，那么， $K^{HS-}$  与 Reuss 限相同。在这种情况下，Reuss 或 Hashin - Shtrikman 下限都准确描述了孔隙流体中颗粒悬浮物的模量。这些下限也描述了流体和（或）气体混合物的模量。

## 1.2.2 碎屑岩通用的速度—孔隙度模型

### 1.2.2.1 碎屑沉积岩短暂的“生命故事”

上下限提供了理解沉积物声阻抗特性的框架。图 1.6 给出了不同水饱和和沉积物纵波速度和孔隙度的关系，范围从洋底悬浮物到固结砂岩。用计算出石英和水的混合物的 Voigt 和