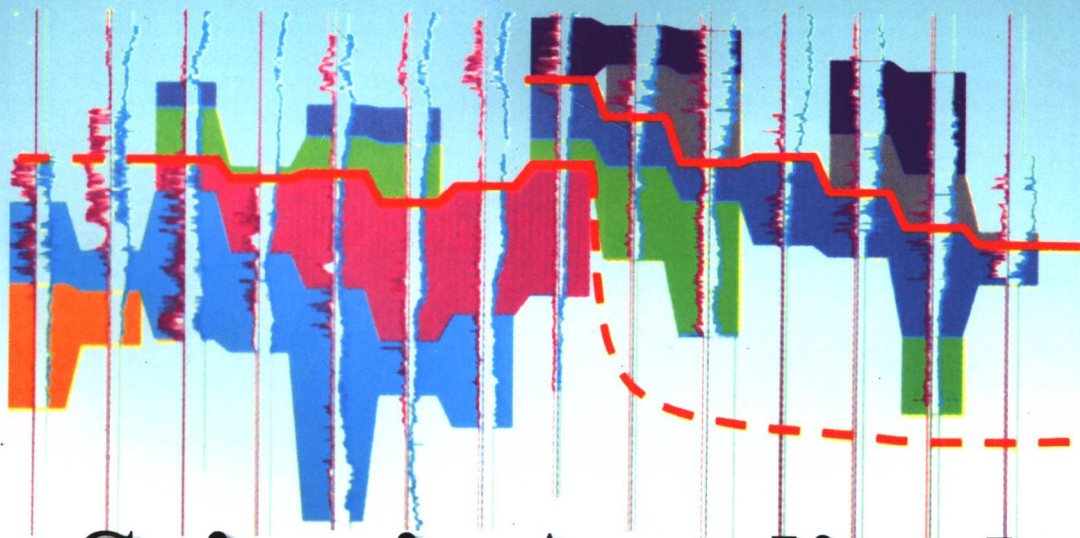


# 地震振幅解释

〔美〕 Fred J. Hiltermann 著

孙夕平 赵良武 等译

张 研 校



## Seismic Amplitude Interpretation

石油工业出版社

# 地震振幅解释

[美] Fred J. Hiltermann 著

孙夕平 赵良武 等译

张 研 校

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从岩石物理变换式和反射系数方程出发,论述了地震振幅解释的系统方法,提供了一套烃类检测的技术手段和经验法则。通过总结前人及作者本人的研究成果,书中建立了地下岩石特性和地震振幅相关联的理论基础和经验关系,给出了大量的 AVO 属性和解释方法,在识别烃类特征、证实油气成藏组合方面提供了可靠的分析手段。针对三类情形下的 AVO,结合模型和大量实际例子,分析了各自的特性和地震响应,提出了适合的解释流程及属性特征组合。

本书理论讲述清楚易懂,技术方法新颖可靠,实例典型,地质分析透彻。书中介绍的内容在理论和方法研究方面具有很强的系统性和先进性,对从事地球物理解释和地质分析的研究人员具有重要参考价值。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

地震振幅解释/ [美] Fred J. Hilterman 著; 孙夕平等译.  
北京: 石油工业出版社, 2006. 42  
书名原文: Seismic Amplitude Interpretation  
ISBN 7-5021-4952-X

- I. 地…
- II. 孙…
- III. 地震波-振幅-解释
- IV. P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 006614 号  
Copyright © 2001 by Fred J. Hilterman  
All rights reserved. No part of this book may be reproduced,  
stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any  
means, electronic or mechanical, including photocopying and re-  
cording, without the prior written permission of the publisher.  
本书经 Fred J. Hilterman 授权翻译出版, 中文版权归石油工  
业出版社所有, 侵权必究。  
著作权合同登记号图字 01-2005-6418

---

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](http://www.petropub.com.cn)  
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

---

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷  
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.75  
字数: 272 千字 印数: 1—1500 册

---

定价: 58.00 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

## 译校人员名单

主 译：孙夕平 赵良武

审 校：张 研

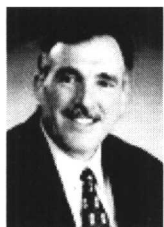
其他翻译人员：

张 昕 宋吉杰 戴晓峰 徐右平

高银波 李凌高 马秀兰 徐光成

王 玲 马晓宇

## 作者简介



Fred J. Hiltermann 毕业于美国科罗拉多矿业学院，获得地球物理工程硕士学位和地球物理学博士学位。在 Mobil 供职期间（1963—1973 年），他曾从事过野外和工程评价工作，后来担任野外研究实验室主任。1973 年，他到休斯敦大学担任地球物理学教授。在休斯敦大学任教期间，他协助建立了地震声学实验室（SAL）。直到 1981 年，他一直是该实验室的首席研究员。后来，他又协助创办了地球物理发展公司（GDC），他现在是该公司的副总裁。同时，作为杰出的从事地球物理研究的教授，他在休斯敦大学也担任授课工作。

Fred 早期的研究方向和论著内容主要为理论和物理上的三维模拟领域。自 1984 年以来，他的兴趣和论文涉及的内容主要是利用 AVO 技术进行岩石物性和地震资料的标定及综合研究等。除此之外，Fred 对地震技术的各个方面也始终保持着浓厚的兴趣。

Fred 是 SEG、EAGE、AGU、GSH 和 AAPG 的终生会员。他是 *Geophysics* 杂志副主编，*THE LEADING EDGE* 编委会主席，SEG 和 AAPG 杰出讲师，SEG 年会（1996—1997）的技术主席和大会主席。Fred 获得过 SEG 最佳论文奖、最佳报告奖和 Virgil Kauffman 金质奖章。他还获得过美国科罗拉多矿业学院 VanDiest 金质奖章和杰出校友奖章。20 世纪 70 年代以来，他一直是 SEG 和 AAPG 继续教育课程的讲师。

## 作者的话

It is an honor to learn my book *Seismic Amplitude Interpretation* is ready to go to press and will soon be published in Chinese. This book represents a lifetime of interest and work. My notes from Continuing Education Lectures were published for the 2001 SEG DISC (Society of Exploration Geophysicists' Distinguished Instructor Short Course). The goal is to help geoscientists learn how to better predict lithologies and fluid content from prestack reflection seismic data.

很荣幸，我的《地震振幅解释》即将以中文出版。这本书包含了我一生的研究兴趣和工作成果。我的持续教育课程中的讲义在 SEG 2001 年度杰出短期讲座报告人系列中出版。出版此书的目的是帮助地球科学工作者在叠前地震数据中预测岩性和流体。

In general, Chinese petroleum geology is older, and thus the rock matrices are much stiffer than in the Gulf of Mexico where these technologies were mostly developed. This can make it harder to apply the principles described in my book. However, from my trips to China, I am convinced there are extremely talented Chinese geoscientists who will take this work to the next level, and learn how accomplish in the older and more stiff Chinese rocks what we demonstrate in the Gulf Coast. Hopefully your Chinese language publication will open doors to enable me to collaborate on inventing ways of better extending this work to unravel Chinese lithology and fluid content.

总体上，中国石油地质的地层年代更老，所以，其岩石要比我们发展这套技术所研究的墨西哥湾的岩石坚硬得多。这会使得在应用书中的理论时，存在一些困难。但是，我曾多次到过中国，中国有大量的非常优秀的地球科学家，我坚信中国的同行们会找到如何在比墨西哥湾更硬的岩石中应用本书中理论的方法，并有更进一步的发展。我希望中文的《地震振幅解释》也能使我有机会和中国的同行合作，发展本书中的成果，找到用地震振幅信息揭示中国岩性和流体的方法。

The geophysical industry is constantly changing. For example, the company we founded in 1981, Geophysical Development Corporation or GDC, became part of a larger geophysical contractor named Geokinetics, Inc. in 1999. With Geokinetics recent purchase of Trace Geophysical and Grant Geophysical, making it one of the largest seismic acquisition companies in the world, the decision was made to create a common name for all divisions, so GDC is now Geokinetics Processing & Interpretation.

地球物理行业在不断地变化。我们在 1981 创立的地球物理发展公司（GDC）在 1999 年成为了更大的地球动力公司（Geokinetics, Inc.）的子公司。地球动力公司最近又兼并了 Tarce 和 Grant 两家地球物理公司，使其成为世界上最大的地球物理采集公司之一。为使名称一致，我们已经决定把地球物理发展公司更名为地球动力公司处理解释部。但是，不管公

司结构和名称如何变化,《地震振幅解释》中的坚实的科学理论和方法始终是我们行业中共同的基础。

However, solid scientific advances, like those described in detail in *Seismic Amplitude Interpretation*, remain the common foundation of our industry. I do not read Chinese, and I am old enough. I'm sure I never will. However, I would appreciate your forwarding to me English translations of any comments you receive regarding the Chinese publication of the book. Also, I would like to demonstrate my appreciation for your making my life work available to Chinese geophysicists.

非常遗憾我不懂中文,我也太老了,怕这辈子也学不会了。我非常感谢石油工业出版社的同仁能把中国同行们对我的书的看法和意见翻译后转给我。我也真诚地感谢他们把我一生的工作成果翻译并带给中国的同行们所做的努力。

A handwritten signature in black ink, reading "Fred V. Natterman". The signature is written in a cursive, flowing style with a large, stylized 'F' and 'N'.

2006 年 11 月 29 日

# 目 录

|                                                            |        |
|------------------------------------------------------------|--------|
| 1 绪论 .....                                                 | ( 1 )  |
| 1.1 地震解释的哲学观点 .....                                        | ( 1 )  |
| 1.1.1 解释的四个步骤 .....                                        | ( 1 )  |
| 1.1.2 解释目标的扩展 .....                                        | ( 2 )  |
| 1.2 历史回顾 .....                                             | ( 3 )  |
| 1.3 基本原理 .....                                             | ( 5 )  |
| 1.4 本书的目的 .....                                            | ( 7 )  |
| 2 岩石物理 .....                                               | ( 9 )  |
| 2.1 纵波、横波、密度和泊松比 .....                                     | ( 9 )  |
| 2.2 建立区域和局部的岩石特性趋势线 .....                                  | ( 11 ) |
| 2.2.1 海平面与海底基准面 .....                                      | ( 13 ) |
| 2.2.2 有效压力 .....                                           | ( 13 ) |
| 2.2.3 砂岩和页岩的速度与密度趋势线 .....                                 | ( 15 ) |
| 2.3 速度与密度之间的经验关系 .....                                     | ( 18 ) |
| 2.3.1 Gardner 的速度—密度变换式 .....                              | ( 18 ) |
| 2.3.2 Wyllie 的速度—孔隙度变换式 .....                              | ( 20 ) |
| 2.3.3 Raymer—Hunt—Gardner (R—H—G) 的速度—孔隙度变换关系 .....        | ( 21 ) |
| 2.3.4 Han 的速度—孔隙度—粘土含量变换式 .....                            | ( 22 ) |
| 2.3.5 Castagna 的 $v_P$ — $v_S$ 变换式 .....                   | ( 23 ) |
| 2.4 体积模量间的关系 .....                                         | ( 25 ) |
| 2.4.1 Voigt, Reuss 和 Hill (V—R—H) 的模量模型——估算 $K_{ma}$ ..... | ( 25 ) |
| 2.4.2 Wood 孔隙流体模量模型——估算 $K_f$ .....                        | ( 27 ) |
| 2.4.3 Batzle 和 Wang 对孔隙流体特性的估算 .....                       | ( 28 ) |
| 2.4.4 Biot 系数 .....                                        | ( 28 ) |
| 2.5 波的传播理论 .....                                           | ( 30 ) |
| 2.5.1 Gassmann 方程 .....                                    | ( 31 ) |
| 2.5.2 流体替代的验证 .....                                        | ( 34 ) |
| 2.5.3 总结——流体替代模拟实例 .....                                   | ( 36 ) |
| 2.6 地质解释 .....                                             | ( 39 ) |
| 3 地震反射振幅 .....                                             | ( 40 ) |
| 3.1 法向入射振幅 .....                                           | ( 40 ) |
| 3.1.1 极性问题 .....                                           | ( 40 ) |
| 3.1.2 反射和透射系数 .....                                        | ( 41 ) |
| 3.2 振幅的几何特征 .....                                          | ( 42 ) |
| 3.2.1 地质界面反射回来的子波 .....                                    | ( 42 ) |

|       |                     |      |
|-------|---------------------|------|
| 3.2.2 | 薄层和过渡层速度响应          | (43) |
| 3.2.3 | 小面积和小体积的响应          | (45) |
| 3.2.4 | 振幅、相位和时间畸变          | (46) |
| 3.2.5 | 多层界面的关系             | (47) |
| 3.3   | 振幅与入射角              | (48) |
| 3.3.1 | 流体—流体界面             | (49) |
| 3.3.2 | 固体—固体界面             | (51) |
| 3.3.3 | 固体—固体界面——大速度差异      | (52) |
| 3.3.4 | 固体—固体界面——小速度差异      | (54) |
| 3.4   | Zoeppritz 方程的线性近似   | (55) |
| 3.4.1 | 岩石特性模型              | (56) |
| 3.4.2 | Bortfeld 方程分析       | (56) |
| 3.4.3 | AVO 与岩石模量的关系        | (58) |
| 3.4.4 | Zoeppritz 方程的线性近似   | (60) |
| 3.4.5 | Shuey 方程和入射角的关系     | (61) |
| 3.4.6 | 模拟: 精确解与近似解         | (63) |
| 3.5   | 各向异性介质中的线性近似方程      | (65) |
| 3.5.1 | 各向异性介质的特性           | (65) |
| 3.5.2 | 测量与应用               | (66) |
| 4     | 烃类特征识别              | (68) |
| 4.1   | 20 世纪 70 年代烃类的识别和分类 | (68) |
| 4.1.1 | 地震振幅的定性分析           | (70) |
| 4.2   | AVO 分类与烃类的识别        | (70) |
| 4.3   | AVO 异常的油田实例         | (72) |
| 4.3.1 | 第 3 类 AVO 异常——亮点    | (72) |
| 4.3.2 | 第 2 类 AVO 异常——相位反转  | (74) |
| 4.3.3 | 第 1 类 AVO 异常——暗点    | (77) |
| 4.4   | 烃类指示的总结             | (80) |
| 4.4.1 | 烃类指示                | (80) |
| 5     | “快速解析”经验法则          | (83) |
| 5.1   | Shuey 方程交会图         | (83) |
| 5.1.1 | Koefoed 的观测结果       | (83) |
| 5.1.2 | Shuey 方程的图解         | (85) |
| 5.2   | 根据测井曲线进行 AVO 预测     | (87) |
| 5.3   | 深水地震岩石特性标定          | (89) |
| 5.3.1 | 可用的资料               | (89) |
| 5.3.2 | 速度和密度趋势——岩性和压力      | (89) |
| 5.3.3 | 速度和密度趋势——端员岩性       | (91) |
| 5.3.4 | 端员岩性的岩石特性交会图        | (94) |
| 5.3.5 | 异常岩性                | (95) |

|                                          |               |
|------------------------------------------|---------------|
| 5.3.6 结论 .....                           | ( 96 )        |
| <b>6 AVO 斜率和截距属性 .....</b>               | <b>( 97 )</b> |
| 6.1 根据反射率识别孔隙流体 .....                    | ( 97 )        |
| 6.1.1 斜率和截距对孔隙流体变化的敏感度 .....             | ( 98 )        |
| 6.1.2 Smith 和 Gidlow 的流体因子 .....         | ( 99 )        |
| 6.1.3 $\lambda - \rho$ 孔隙流体判别式 .....     | (100)         |
| 6.1.4 其他反射率关系 .....                      | (101)         |
| 6.1.5 A/B 分析 .....                       | (101)         |
| 6.1.6 第 1 类、第 2 类、第 3 类 AVO 的 A/B .....  | (102)         |
| 6.2 预测孔隙流体和岩性的交会图 .....                  | (103)         |
| 6.2.1 岩石特性交会图 .....                      | (103)         |
| 6.2.2 反射系数交会图 .....                      | (106)         |
| 6.3 地震 AVO 属性交会 .....                    | (107)         |
| 6.3.1 求取截距和斜率道 .....                     | (107)         |
| 6.3.2 AVO 反演求取截距和斜率的精度 .....             | (108)         |
| 6.3.3 有限带宽地震 AVO 属性交会 .....              | (109)         |
| 6.3.4 地震剖面交会 .....                       | (114)         |
| 6.3.5 对地震交会的评论 .....                     | (115)         |
| 6.4 斜率和截距估计中的误差 .....                    | (116)         |
| 6.4.1 截距和梯度的统计相关性 .....                  | (116)         |
| 6.4.2 剩余 NMO 对截距和梯度估计的影响 .....           | (117)         |
| 6.4.3 弹性阻抗 .....                         | (119)         |
| <b>7 实例分析 .....</b>                      | <b>(123)</b>  |
| 7.1 第 3 类 AVO——岩性识别 .....                | (123)         |
| 7.2 第 3 类 AVO——Ursa: 墨西哥湾深水油田 .....      | (125)         |
| 7.2.1 井标定 .....                          | (125)         |
| 7.2.2 振幅分析 .....                         | (128)         |
| 7.3 第 2 类 AVO——坐标轴旋转和交会图 .....           | (132)         |
| 7.3.1 地层模型 .....                         | (132)         |
| 7.3.2 墨西哥湾实际数据 .....                     | (134)         |
| 7.3.3 评论 .....                           | (135)         |
| 7.4 第 2 类 AVO——利用各向异性 NMO 进行孔隙流体识别 ..... | (136)         |
| 7.4.1 简介 .....                           | (136)         |
| 7.4.2 年代地层和岩性地层的反射 .....                 | (137)         |
| 7.4.3 岩石物理模型 .....                       | (137)         |
| 7.4.4 测井资料 .....                         | (138)         |
| 7.4.5 各向异性效应 .....                       | (139)         |
| 7.4.6 野外实际数据 .....                       | (140)         |
| 7.4.7 讨论 .....                           | (141)         |
| 7.4.8 结论 .....                           | (142)         |

7.5 第1类 AVO——孔隙流体识别：各向异性 NMO 和模拟..... (142)

7.5.1 简介 ..... (142)

7.5.2 深水浊积岩成藏组合 ..... (142)

7.5.3 讨论 ..... (145)

8 评论及展望 ..... (147)

8.1 振幅解释的第二个时代 ..... (147)

8.2 与众不同的振幅异常 ..... (148)

8.3 主要挑战 ..... (150)

8.3.1 勘探困难区 ..... (151)

8.3.2 未来挑战 ..... (151)

8.3.3 最后的评论 ..... (152)

致谢..... (153)

参考文献..... (154)

# 1 绪论

## 1.1 地震解释的哲学观点

地震解释的目标是什么？当今的目标和 40 年前的目标一样吗？当今的三维地震资料和计算机工作站使解释能力得到巨大提高，这在 40 年前是不能想像的。然而，这仅仅是实现目标使用工具上的变化。地震解释的目标和地震资料的频率成分不同，不随时间而变化。

图 1.1.1 列出了解释工作的目标，是 Jakosky 在 1960 年出版的书上给出的阐述。第一个目标是“识别烃类异常”，这仍然是当今地震解释的最高要求。然而，我们的识别准则在现代的真振幅采集和处理中已经得到极大增强，地震振幅已成为了识别潜在烃类储层的一个主要依据。

第二个目标是“证实烃类异常”。该目标应该扩展为包括地层格架解释，通过地震波形特征的解释就可实现。但这需要在地质格架的构造解释中结合地层的验证。简而言之，找出异常，做出构造图，并确保地震反射振幅与构造解释保持一致。

如果解释的目标是识别和证实潜在的地震异常，那么管理方面也应有自己的要求。除了要考虑远景区的优势经济价值外，如果仅为了确定首选钻探目标，那么也应考虑远景区的风险方面。管理的要求可按几种方式陈述。一种是：“在构造和振幅解释中，要识别出哪里以艺术为主而不讲科学。”这个观点是几年前与同事 Jack Caldwell 在一天晚上讨论时得出的。另外，使用古老格言“地震解释是需要多年的经验才能获得的一门艺术”来陈述风险，具有不同的意义。地震解释既是一门艺术又是一门科学。图 1.1.2 表明，该古老格言中的多年经验只是总结出的一系列系统的规则，据此可产生异常体的构造及组成的初始估计。如果没有地下模型的初始估计，就难以科学地证实远景区，更难以降低与风险有关的不确定性。

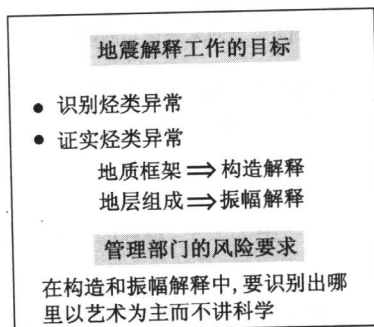


图 1.1.1 地震解释的含义

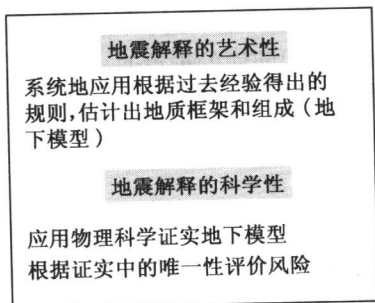


图 1.1.2 解释的艺术和科学

### 1.1.1 解释的四个步骤

地震解释的这个哲学观点是 1961 年我上地震勘探的第一堂课时学到的。Hasbrouck 教授用粗体在黑板上写下 ACCCH (图 1.1.3)。这个缩写词代表着解释的艺术和科学。A (Assume) 指的是假设一个地下模型，是利用根据过去的经验总结出的系统的规则想像出地下模型。两个 C (Compute 和 Compare) 为计算和比较，是科学中的证实步骤。最后 H (Hope) 是期待钻头到达异常目标深度的喜悦和对成功的期望。另外，Hasbrouck 教授在黑板上的 ACCCH 下面写了一条推论：“地球物理数据在不知道答案的情况下无法解释。”对于这堂课上的年轻地球物理学家来说，这是一个自相矛盾的阐述，

必然需要作进一步的明确解释。

图 1.1.4 中显示出的地震剖面将帮助阐述 ACCH 法和它的推论。在图上的问号下面有一明显的时间异常。该异常是由于速度横向变化引起的时间高点呢，还是一个能够看作是潜在油气圈闭的真正背斜？让我们应用 ACCH 法来分析一下。对 A 部分，可假设是位于平层之上的一个盐体（假设为一个速度异常）。证实部分的“计算和比较”可以非常简单。异常体的时间间隔为 1s，下面平层时间厚度为 0.4s，总共 1.4s。如果该构造之外 1.3s 和 2.7s 之间的层速度 = 盐的速度  $\times 1.0s/1.4s$ ，那么位于平层之上的盐体看上去是地下模型的一个很好的估计。那么，潜在的油气圈闭就没有了。但是为了实现 ACCH 法，应当知道以下几项：盐体构造的形状，盐体以及围岩的岩石物理特性等。

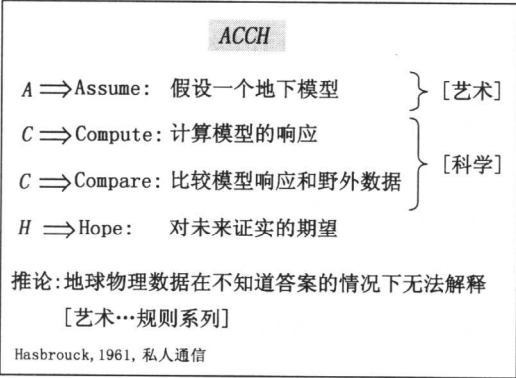
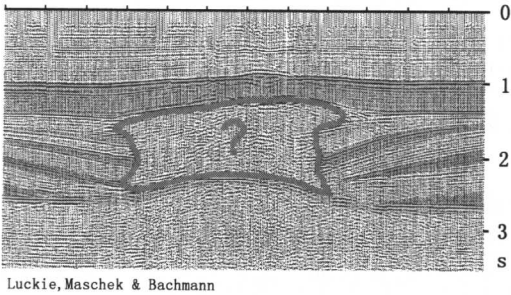


图 1.1.3 解释的四个步骤



时间上拉是一个真正的古高点吗？

图 1.1.4 ACCH 解释方法的应用

简而言之，构造解释的证实使用了一套包括岩石物理关系的规则。如果使用现代解释工作站充实构造解释，那么证实过程应当是趋于科学，如图 1.1.5 所述。当解释达到科学阶段，就可以发展质量控制（QC）的标准，而且也容易通过别的方面来验证。事实上，当今已有几家公司发展了这些 QC 标准，这样就使地球科学家从原先的构造成图工作中解放出来。

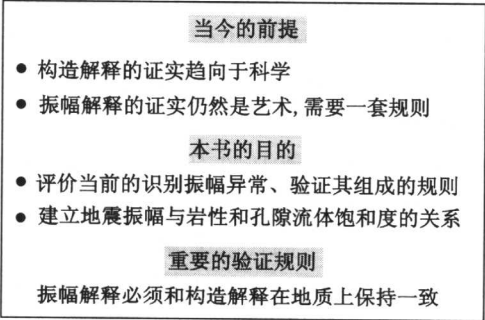


图 1.1.5 构造解释和振幅解释

但是，振幅证实的当前状态趋于科学了吗？如果没有，那么，振幅解释哪里仍以艺术为主，有必要做些什么才能使振幅解释提升到科学阶段？很明显，缺少的东西是以过去经验为基础的一套现代的规则（即前面的推论）。这就是本书的目的：评价当前的识别和验证振幅解释的规则，重点是地震振幅与岩石物理的关系。

1.1.2 解释目标的扩展

到目前为止，地震异常的证实相当受限制。通常，大多数油公司要求证实含油气系统的所有要素，而不仅仅是油藏的组成和构造。Gordon Greve 在他的 1996 年 SEG 主席讲话中简明扼要地描述了团队努力的重要性，以此回答了含油气系统的七个要素（表 1.1.1）。所有的要素必须都满足，油气才能存在。振幅解释在这个分析中能有帮助吗？

表 1.1.1 含油气系统的七个要素

| 序 号 | 要 素  | 表征参数或类型             |
|-----|------|---------------------|
| 1   | 烃源岩  | 厚度和丰度               |
| 2   | 生油   | 压力、温度和埋藏史           |
| 3   | 运移   | 流体运移通道              |
| 4   | 储层   | 孔隙度、渗透率、含水饱和度、厚度和范围 |
| 5   | 封堵   | 潜在的泄漏和压力大小          |
| 6   | 三维圈闭 | 构造、地层或二者都有          |
| 7   | 时限   | 圈闭与烃类生成、运移之间的时间关系   |

对于烃源岩来说，是否具有唯一的岩石特性，使用振幅就能够确定出干酪根的丰度和存在？既然地震速度与有效压力测定值有关，那么在压力异常区是否有大的振幅变化？如果断层是可能的油气运移通道，那么活动断层与不活动断层相比振幅特征是强还是弱？识别出的断层活动与圈闭形成时间有关系吗？如果盖层的岩石物性和压力大小有关，那么地震振幅能够将页岩特性量化吗？如前所述，所有这些问题都重点强调地震振幅和岩石物理的关系。

## 1.2 历史回顾

如果试图获得地震资料振幅解释的综合文档，那么油公司的档案报告应当是必需材料。但不幸的是，在提供直接探测指示（DDI）或烃类指示（HCI）的档案中发现的任何振幅解释技术，其文件封面上总是盖上了“机密”印章。因此，振幅解释的这些规则就丢失了。

但是，Mike Forrest 在最近讨论了壳牌公司在 20 世纪 60 年代晚期开展的亮点或 DDI 的研究工作（Forrest, 2000）。从这篇文章可以明显看出，这项新技术在各项租约中是壳牌公司机密的前端。在石油工业界，亮点技术的广泛应用大约是在 1972 年。因此，记载使用地震振幅预测岩性或孔隙流体成分的出版物非常少。

然而，在很好地记载寻找油气的振幅解释技术方面，俄罗斯的文献要早于西方国家。Sengbush 注意到，俄罗斯人在 1952—1953 年就在构造上使用了振幅，以此来找出水—油和气—流体界面。在 1963 年，Churlin 和 Sergeyev 报道了四项重要的应用到地震资料上的 DDI：亮点测定、油藏边界的干涉模式、平点和吸收。

对于西方国家而言，Savit (1960) 利用软件 Summarizer 做出了两个振幅解释的实例，该软件由 AGIP 的 Merlini 研制。Summarizer 对地震道作积分，得到类似于声阻抗测井曲线的道。图 1.2.1 给出的是加拿大西部的一个实例。图中有两口生产井和一口干井，用于岩石物理标定。在 Summarizer 的剖面上，C 层位振幅的增加确定了地层油气藏的范围。Savit 注意到了，我确信你也会注意到，在地震剖面上再寻找

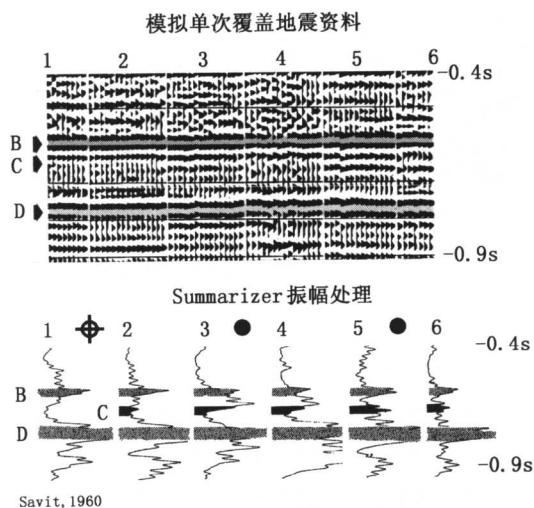
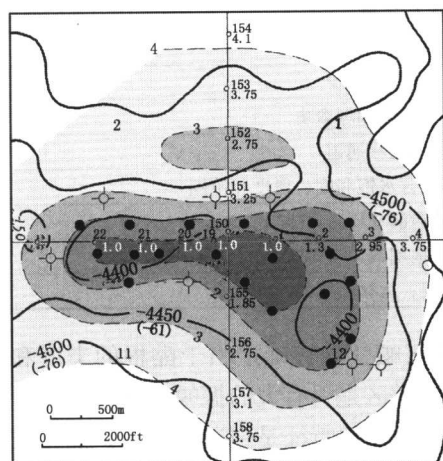


图 1.2.1 加拿大西部地层油气藏振幅解释实例（1960 年）



Gurley油田 Nebraska

Pan and de Bremaecker, 1970

图 1.2.2 利用地震振幅预测孔隙流体 (1970 年)

很明显,作者在检验地震资料之前给出了一个解释的哲学观点。如图 1.2.4 描述的那样,该观点包括的多项技术是当今振幅解释的一部分:岩石物理标定、声阻抗反演和相对振幅标定。目标是求取出孔隙度、孔隙流体饱和度以及油田的范围。令人惊奇的是,该油田并不是一个亮点异常,而是一个暗点,图 1.2.2 中含油气区的地震振幅衰减了。

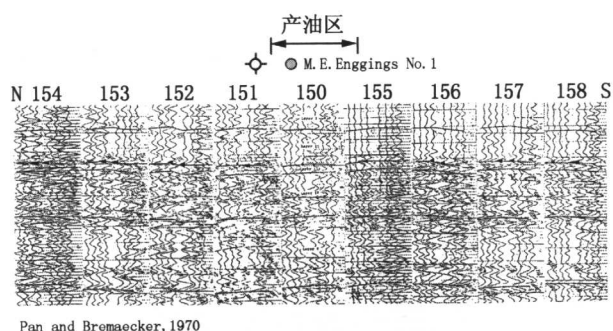


图 1.2.3 Gurley 油田的地震资料

同样的振幅关系相当困难。

1970 年, Pan 和 de Bremaecker 发表了一篇文章,来自于 Pan 的博士论文 (1969 年), 研究的是如何使用地震振幅直接找出油气位置。图 1.2.2 是该文章中一幅彩图。图中有一个构造图,上面叠合着彩色振幅图。使用构造之外含水饱和和反射层的振幅 (B) 对构造中含油气部分的地震振幅 (A) 进行了归一化。构造图和归一化后的反射振幅 (A/B, 异常/背景) 之间具有强的相关性。该分析使用的地震资料显示在图 1.2.3 中。使用的是多个 8 道拼接成的连续模拟资料! 数据做过 AGC, 并进行了解释。

#### 振幅解释使用的技术

- 岩石物理 — 应用了岩石特性变换  
— 包括了孔隙流体替代  
— 进行了井震标定
- 反演 — 估算了声阻抗
- A/B — (异常/背景)振幅成图

#### 根据振幅预测的参数

- 孔隙流体饱和度
- 孔隙度
- 孔隙流体接触界面的构造范围

该油藏是暗点,而不是亮点

图 1.2.4 Pan 和 de Bremaecker 的解释 (1970 年)

1973 年, 休斯敦地球物理学会组织了一个关于直接检测指示 (DDI) 的专题讨论会。会上展示了大量的野外实例和理论模型, 用于试图建立地震和岩石物理的联系。另外, DDI 的数量也大大扩充, 包括了如平点、速度下拉、频率衰减等特征。从这个专题讨论会可明显看出, 从叠加剖面上识别和证实地震振幅异常, 已为石油行业所认可。20 世纪 70 年代亮点技术成为了地震振幅解释的第一阶段。图 1.2.5 中给出了振幅解释的简要阶段划分。

振幅解释的第二阶段即振幅随炮检距变化 (AVO) 的分析, 实际上已同时出现了。

AVO 也被看作是 AVA，振幅随入射角变化。在讨论第二阶段之前，对亮点阶段以及当前 AVO 阶段的一个重要贡献常被忽略，那就是 Gassmann 的贡献。对于岩石物性与地震速度的标定，特别是孔隙流体的预测来说，Gassmann 的工作是其根本。

大约在 1900 年，Knott 和 Zoeppritz 就开展了 AVO 理论所必需的理论工作 (Knott, 1899, Zoeppritz, 1919)。在给定两相邻介质的 P 波和 S 波速度以及密度的情况下，他们得出了作为入射角函数的平面波反射振幅方程。但是，由于

反射系数的精确数学表达式特别长，所以使得在岩石特性轻微改变的情况下难于看出振幅如何变化。因此，为了获得岩石特性和反射振幅相互影响的形象化表达，1961 年出现了 Bortfeld 的研究成果。Bortfeld 简化了 Zoeppritz 方程，而且令人吃惊的是，这是在 Koefoed (1955) 描述 AVO 和界面两侧泊松比变化之间关系的六年之后出现的。Koefoed 的结果根据的是精确的 Zoeppritz 方程。Koefoed 得出的结论是当今 AVO 解释的基础。

认识到 Koefoed 的成果对于岩性预测的重要性，Rosa 在 1976 年研究了弹性特征参数，能够从 AVO 反演中稳健地提取出来。他的成果与 Shuey (1985) 研究出的线性近似方程联系紧密。有趣的是，在学习了 Koefoed 的文章之后，Shuey 受到鼓舞，也开始了 AVO 的研究。

然而，在 Koefoed 取得成果 27 年以后，才由 Ostrander (1982) 把 AVO 和岩性之间的关系显著地变成了众人瞩目的焦点。Ostrander 的成果是工业界需要的“证实”，目的是确认技术是否起作用。在 Ostrander 阐述了野外资料做 AVO 解释的益处之后，第二阶段的振幅解释加速了。岩石物理、正反模拟、保幅、成像和地震振幅的反演等方面得到了新的关注。

所有 AVO 实例的分发公布仍是地球物理行业尚需解决的问题。在 20 世纪 90 年代的早期，由天然气研究所 (GRI) 和 SEG 赞助，Allen 和 Peddy 从得克萨斯州的工作在墨西哥湾沿岸的几家勘探公司收集了地震资料、井信息及解释成果。他们发表了一个 AVO 的实际调查报告 (Allen 和 Peddy, 1993)，不仅记载了成功的实例，而且记载了干井的解释上的教训。大多数实例集中在始新世 Yegua 地层。实际上，使用 AVO 探测 Yegua 成藏组合非常成功，以至于当地称 Yegua 是 AVO 的美国印第安语的发音。

随着 AVO 的出现，振幅解释的原理得到了发展，亮点已经发展成了 AVO 的一部分。

|                                        |
|----------------------------------------|
| <b>第一阶段——亮点 (1970—1982 年)</b>          |
| 1899: Knott 理论——振幅和入射角的关系              |
| 1919: Zoeppritz 理论——振幅和入射角的关系          |
| 1951: Gassmann 理论——岩石物理和地震的联系          |
| 1955: Koefoed 应用——根据 $RC(\theta)$ 求泊松比 |
| 1961: Bortfeld 理论——线性近似方程              |
| 1976: Rosa 应用—— $RC(\theta)$ 弹性反演      |
| <b>第二阶段——AVO (1982—现在)</b>             |
| 1982: Ostrander——AVO 的证实               |
| 1985: Shuey 应用——强调在不同入射角上的岩石特性         |

图 1.2.5 振幅解释的阶段划分

### 1.3 基本原理

Pan 和 de Bremaecker (1970) 的文章给出了一个基于亮点技术进行振幅解释的好观点：法向入射的反射波振幅分析。这个需要扩展到 AVO。那么，在 AVO 解释中还有哪些另外的信息？

图 1.3.1 显示的是一个叠加剖面 and 三个共深度点 (CDP) 道集。在叠加剖面上 CDP110 附近, 上部层位的振幅有一个亮点 (大振幅)。该振幅的变化是由岩石类型、孔隙度、孔隙流体成分或厚度的变化引起的吗? 位置 20 处的 CDP 道集在异常体之外。位置 20 处的 CDP 道集中, 上部层位的振幅不随炮检距变化。如何将该处的振幅随炮检距的变化与远景区上的 CDP 道集进行对比? 图中给出了位于振幅异常区位置 110 处的两个可能的 CDP 道集。如果两种情况的 CDP 道集叠加起来, 结果将是相同的。因此, 如果仅仅检查叠加振幅, 将会发现不了情况 1 的振幅随炮检距减少和情况 2 的振幅随炮检距增加的事实。正如 Koefoed 在 1955 年提出的那样, 振幅变化的差异可以用来研究岩性。什么样的介质特性将会引起这两种不同的 AVO? 岩性和岩石物理如何相关起来?

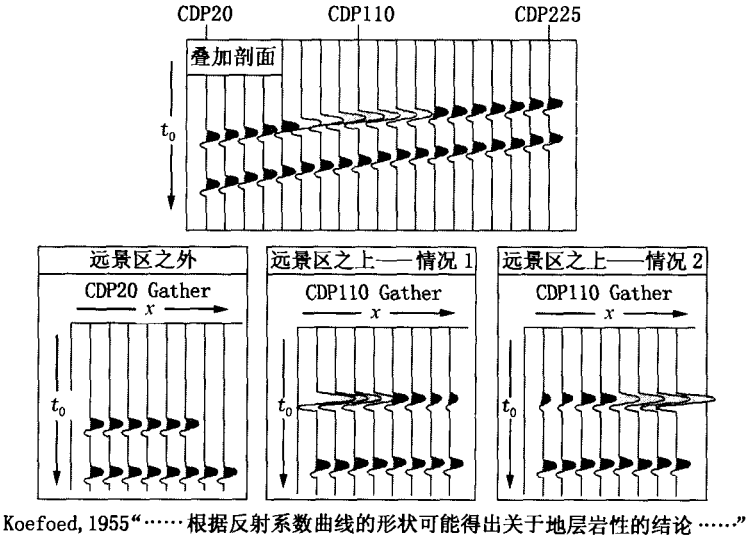


图 1.3.1 AVO 振幅解释

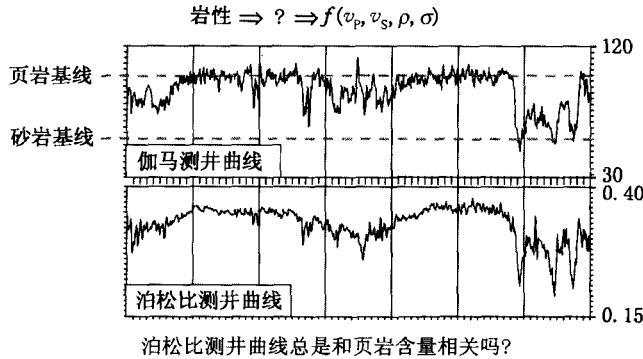


图 1.3.2 岩性与弹性参数之间的关系

按照 Koefoed 的建议, 利用偶极横波测井导出泊松比曲线, 与对应的伽马测井曲线显示在一起, 如图 1.3.2 所示。该井位于一个第三系的由砂岩 - 页岩序列组成的盆地。因此, 伽马测井指示的是砂岩百分比或页岩含量。在该测井层段上, 泊松比和推断出的砂岩百分比之间存在很强的相关性。这种情况总会出现吗? 所有砂岩都是湿的吗? 如果孔隙流体用烃类来替代, 泊松比的值

会有多大变化? 在证实该 AVO 异常过程中, 另外还应当考虑什么样的岩石物理可能性? 一旦列出可能的岩石物理上的改变, 那么它们的地震结果必须同野外资料进行对比。图