



石油科技知识系列读本

SHIYOU KEJI ZHISHI XILIE DUBEN

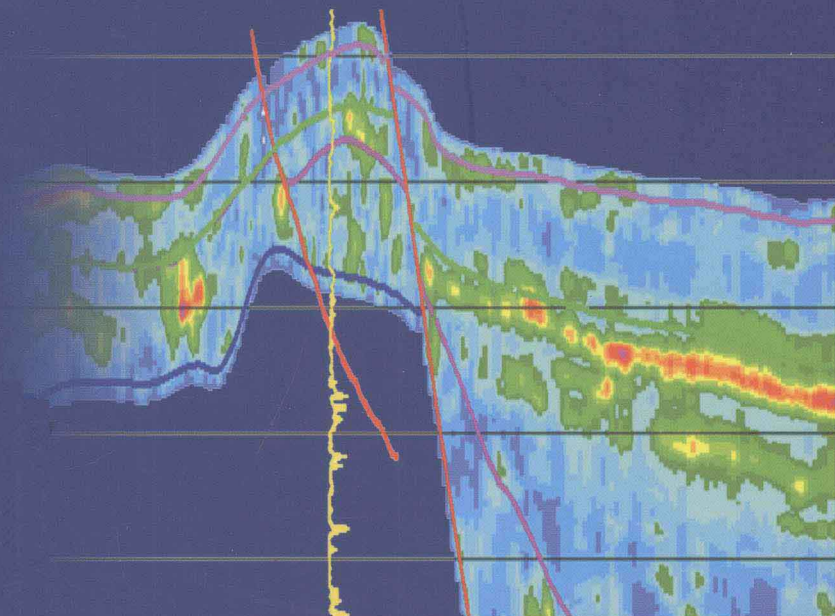
储层

地震学

*Reservoir Seismology: Geophysics in
Nontechnical Language*

作者: Mamdouh R. Gadallah

翻译: 刘怀山



石油工业出版社



石油科技知识系列读本

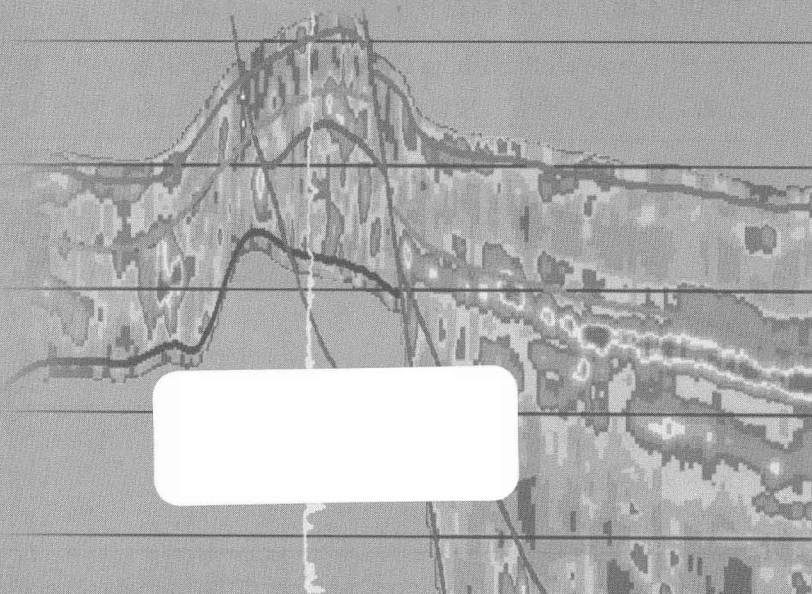
SHIYOU KEJI ZHISHI XILIE DUBEN

储层 地震学

*Reservoir Seismology: Geophysics in
Nontechnical Language*

作者: Mamdouh R. Gadallah

翻译: 刘怀山



石油工业出版社

内 容 提 要

本书用简练的语言全面系统地介绍了储层地震学。内容包括地震勘探基本原理、地震数据采集、地震数据处理、偏移、模拟、垂直地震剖面、AVO 分析、三维地震勘探、层析成像、地震解释、应用实例等。在各章提供了小结和讨论、习题, 以及一些主要关键词和参考文献。

本书可供从事储层地球物理专业的科研和工程技术人员、地质人员、野外工作人员、勘探管理人员、大学本科生、研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

储层地震学 / (美) Mamdouh R. Gadallah 著; 刘怀山译.
北京: 石油工业出版社, 2009.12

(石油科技知识系列读本)

书名原文: Reservoir Seismology

ISBN 978-7-5021-6194-1

I. 储…

II. ① M…② 刘…

III. 储集层—地震勘探

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 113873 号

本书经 PennWell Publishing Company 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 01-2002-3655

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) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

787×960 毫米 开本: 1/16 印张: 21.75

字数: 350 千字

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

《石油科技知识系列读本》编委会

主 任：王宜林

副 主 任：刘振武 袁士义 白泽生

编 委：金 华 何盛宝 方朝亮 张 镇

刘炳义 刘喜林 刘克雨 孙星云

翻译审校：（按姓氏笔画排列）

尹志红 王 震 王大锐 王鸿雁 王新元

王瑞华 艾 池 乔 柯 刘 刚 刘云生

刘怀山 刘建达 刘欣梅 刘海洋 孙晓春

朱珊珊 吴剑锋 张 颖 张国忠 李 旭

李 莉 李大荣 李凤升 李长俊 李旭红

杨向平 杨金华 汪先珍 苏宇凯 邵 强

胡月亭 赵俊平 赵洪才 唐 红 钱 华

高淑梅 高雄厚 高群峰 康新荣 曹文杰

梁 猛 阎子峰 黄 革 黄文芬 黎发文

丛书序言

石油天然气是一种不可再生的能源，也是一种重要的战略资源。随着世界经济的发展，地缘政治的变化，世界能源市场特别是石油天然气市场的竞争正在不断加剧。

我国改革开放以来，石油需求大体走过了由平缓增长到快速增长的过程。“十五”末的2005年，全国石油消费量达到3.2亿吨，比2000年净增0.94亿吨，年均增长1880万吨，平均增长速度达7.3%。到2008年，全国石油消费量达到3.65亿吨。中国石油有关研究部门预测，2009年中国原油消费量约为3.79亿吨。虽然增速有所放缓，但从现在到2020年的十多年时间里，我国经济仍将保持较高发展速度，工业化进程特别是交通运输和石化等高耗油工业的发展将明显加快，我国石油安全风险将进一步加大。

中国石油作为国有重要骨干企业和中央企业，在我国国民经济发展和保障国家能源安全中，承担着重大责任和光荣使命。针对这样一种形势，中国石油以全球视野审视世界能源发展格局，把握国际大石油公司的发展趋势，从肩负的经济、政治、社会三大责任和保障国家能源安全的重大使命出发，提出了今后一个时期把中国石油建设成为综合性国际能源公司的奋斗目标。

中国石油要建设的综合性国际能源公司，既具有国际能源公司的一般特征，又具有中国石油的特色。其基本内涵是：以油气业务为核心，拥有合理的相关业务结构和较为完善的业务链，上下游一体化运作，国内外业务统筹协调，油公司与工程技术服务公司等整体协作，具有国际竞争力的跨国经营企业。

经过多年的发展，中国石油已经具备了相当的规模实力，在国内勘探开发领域居于主导地位，是国内最大的油气生产商和供

应商，也是国内最大的炼油化工生产供应商之一，并具有强大的工程技术服务能力和施工建设能力。在全球 500 家大公司中排名第 25 位，在世界 50 家大石油公司中排名第 5 位。

尽管如此，目前中国石油仍然是一个以国内业务为主的公司，国际竞争力不强；业务结构、生产布局不够合理，炼化和销售业务实力较弱，新能源业务刚刚起步；企业劳动生产率低，管理水平、技术水平和盈利水平与国际大公司相比差距较大；企业改革发展稳定中的一些深层次矛盾尚未根本解决。

党的十七大报告指出，当今世界正在发生广泛而深刻的变化，当代中国正在发生广泛而深刻的变革。机遇前所未有，挑战也前所未有，机遇大于挑战。新的形势给我们提出了新的要求。为了让各级管理干部、技术干部能够在较短时间内系统、深入、全面地了解和学习石油专业技术知识，掌握现代管理方法和经验，石油工业出版社组织翻译出版了这套《石油科技知识系列读本》。整体翻译出版国外已成系列的此类图书，既可以从一定意义上满足石油职工学习石油科技知识的需求，也有助于了解西方国家有关石油工业的一些新政策、新理念和新技术。

希望这套丛书的出版，有助于推动广大石油干部职工加强学习，不断提高理论素养、知识水平、业务本领、工作能力。进而，促进中国石油建设综合性国际能源公司这一宏伟目标的早日实现。

王宜林

2009 年 3 月

丛书前言

为了满足各级科技人员、技术干部、管理干部学习石油专业技术知识和了解国际石油管理方法与经验的需要，我们整体组织翻译出版了这套由美国 PennWell 出版公司出版的石油科技知识系列读本。PennWell 出版公司是一家以出版石油科技图书为主的专业出版公司，多年来一直坚持这一领域图书的出版，在西方石油行业具有较大的影响，出版的石油科技图书具有比较高的质量和水平，这套丛书是该社历时 10 余年时间组织编辑出版的。

本次组织翻译出版的是这套丛书中的 20 种，包括《能源概论》、《能源营销》、《能源期货与期权交易基础》、《石油工业概论》、《石油勘探与开发》、《储层地震学》、《石油钻井》、《石油测井》、《油气开采》、《石油炼制》、《石油加工催化剂》、《石油化学品》、《天然气概论》、《天然气与电力》、《油气管道概论》、《石油航运（第 I 卷）》、《石油航运（第 II 卷）》、《石油经济导论》、《油公司财务分析》、《油气税制概论》。希望这套丛书能够成为一套实用性强的石油科技知识系列图书，成为一套在石油干部职工中普及科技知识和石油管理知识的好教材。

这套丛书原名为“Nontechnical Language Series”，直接翻译成中文即“非专业语言系列图书”，实际上是供非本专业技术人员阅读使用的，按照我们的习惯，也可以称作石油科技知识通俗读本。这里所称的技术人员特指在本专业有较深造诣的专家，而不是我们一般意义上所指的科技人员。因而，我们按照其本来的含义，并结合汉语习惯和我国的惯例，最终将其定名为《石油科技知识系列读本》。

总体来看，这套丛书具有以下几个特点：

(1) 题目涵盖面广，从上游到下游，既涵盖石油勘探与开发、工程技术、炼油化工、储运销售，又包括石油经济管理知识和能源概论；

(2) 内容安排适度，特别适合广大石油干部职工学习石油科技知识和经济管理知识之用；

(3) 文字表达简洁，通俗易懂，真正突出适用于非专业技术人员阅读和学习；

(4) 形式设计活泼、新颖，其中有多种图书还配有各类图表，表现直观、可读性强。

本套丛书由中国石油天然气集团公司科技管理部牵头组织，石油工业出版社具体安排落实。

在丛书引进、翻译、审校、编排、出版等一系列工作中，很多单位给予了大力支持。参与丛书翻译和审校工作的人员既包括中国石油天然气集团公司机关有关部门和所属辽河油田、石油勘探开发研究院的同志，也包括中国石油化工集团公司江汉油田的同志，还包括清华大学、中国海洋大学、中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、大庆石油学院、西南石油大学等院校的教授和专家，以及BP、斯伦贝谢等跨国公司的专家学者等。需要特别提及的是，在此项工作的前期，从事石油科技管理工作的老领导傅诚德先生对于这套丛书的版权引进和翻译工作给予了热情指导和积极帮助。在此，向所有对本系列图书翻译出版工作给予大力支持的领导和同志们致以崇高的敬意和衷心的感谢！

由于时间紧迫，加之水平所限，丛书难免存在翻译、审校和编辑等方面的疏漏和差错，恳请读者提出批评意见，以便我们下一步加以改正。

《石油科技知识系列读本》编辑组

2009年6月

译 者 的 话

由 Mamdouh R. Gadallah 所著的《储层地震学》(Reservoir Seismology) 可以说是近年来国外地球物理界广泛使用的一部教材, 受到许多地球物理工作者的欢迎。这本书几乎囊括了储层地震学各方面的内容, 包括地震勘探基本原理、地震数据采集、地震数据处理、偏移、模拟、垂直地震剖面、AVO 分析、三维地震勘探、层析成像、地震解释、应用实例等。各章还提供了小结和讨论、习题, 以及一些主要关键词和参考文献等。

本书语言通俗易懂, 概念清晰, 叙述简练, 图形清楚明了。正文公式并不很多, 但几幅简单的图形, 就可以将复杂的原理介绍得一清二楚。本书可供从事储层地球物理专业的科研和工程技术人员、地质人员、野外工作人员、勘探管理人员、大学本科生、研究生参考。

曾经有很多人希望能够将这本书介绍到中国。经过半年多的工作, 我们将该书翻译成了中文。全书共 14 章, 由中国海洋大学海洋地球科学学院刘怀山教授负责翻译和统稿, 参加翻译的还有童思友高级工程师, 张进博士, 王兴芝、周青春、涂齐催、焦叙明、马光华、韩晓丽、贺懿、崔树果和刘兵等研究生。

在翻译的过程中, 我们自己也进行了重新学习。每一个参加这项工作的人都从中受益匪浅, 对地球物理和储层地震学的许多概念都有了更深的理解, 同时对原书中存在的某些错误, 我们在翻译过程中都一一作了修改。由于经验不足, 译文难免存在不妥之处, 欢迎批评指正。

前 言

在过去 40 多年里，石油工业得到了突飞猛进的发展。在早期，钻井位置的确定主要基于地面地质异常和人们的直觉。虽然发现了许多大构造，但小构造越来越难以发现。

现在，虽然美国的探明储量在下降，但世界范围内的探明储量基本保持不变，在某些地区甚至有所增加。造成这种现象的原因之一是先进的勘探技术的广泛应用。

随着磁法、电法以及地震方法在勘探地下构造中的应用，勘探钻井的成功率大大提高。地球物理技术已经得到广泛应用，甚至包括井孔中的岩性参数，如密度、声波速度和其他参数的获取。

目前，石油勘探行业已经形成了详细的分工。不同部门在不同勘探阶段具有不同的职责，出现了勘探开发的新领域。在生产过程中，不同部门通过分析得到大量信息，这些信息通常仅由勘探部门保存，而其他部门却无法从中受益。尽管各独立部门可以很好地完成信息的处理解释工作，但由于各部门间缺乏交流，最终得到的综合结果常常不如人意。

编写本书的目的之一是让非地球物理人员熟悉地震方法，提高团体协作的效率。通过本书，地球物理学家、工程师和其他工作者可以学会利用各种已有资料，增加本部门资料结论的可靠性。

储层地震学家将不同部门所代表的学科知识结合在一起，而地质科技人员把地质和岩石物理特性的信息与储层地震学信息结合在一起。他们的任务是把观测研究获得的地震波振幅、地震波速度、岩石弹性参数与储层的岩性（岩石类型）或流体含量联系起来。

通过分析井间地球物理参数的横向和纵向变化特征，储层地震学家可以预测储层的横向范围、厚度变化、地下构造和介质不均匀性（岩石参数变化），从而设计出更好的开采方法。

本书将为工程人员、地质人员、测量人员和管理人员介绍地震方法的基础知识、地震方法的应用和局限性、分辨率不准而造成的缺陷等。这些知识将作为学习地震前沿技术（如高分辨率地下成像、储层描述、油藏特征描述，以及预测钻头前方的地层情况等）的基础，这些地震前沿技术将通过一些史例加以说明。

书中介绍了大量的史例，用以指导所有与石油有关的专业人员，这些例子同

样适用于负责勘探开发项目的管理者。这些资料按时间顺序组织，并包括一些史例。任何人都可以轻而易举地理解本书内容。在每章后面列出了关键词，在书后列出了专业术语表，从而有助于读者更好地理解本章内容。对于希望更详细了解相关知识的读者，本书给出了一些章节的附录，附录中包括了更多的理论和数学原理，同时还为想进一步研究的人员列出了非常完整的参考文献。

致 谢

感谢 Seismograph Service Corporation 的 Dale Stone 和 Doyle Fouquet 为本书提供了部分资料。感谢 Larry Lines 博士和 Terry Watt 博士在层析成像和 AVO 方面的建设性提议。感谢 SEG 允许我应用大量文献。特别要感谢 Yilmaz 博士。

感谢哥伦比亚大学的 E. A. Robinson 博士在百忙之中阅读了本书，并给予积极评价。

感谢埃及开罗 Ain Shams 大学的 Osman M. Osman 先生为本书收集参考资料，并细心校对。感谢他花费大量时间检查本书细节。

感谢 Norman James 先生修订了初稿。

感谢 Norman Hyne 博士给予我的鼓励和建议。

感谢 Seismograph Service Corporation, Bolt Technology Corporation, Halliburton Geophysical Services, Geophysical Press, Schlumberger, Western Geophysical 和 GX Technology 让我引用他们文献中的插图和地震剖面。

特别感谢为本书提供了大量典型应用实例和新技术信息的作者的慷慨大方。感谢在本书写作和出版过程中，所有给予支持和帮助的人们。

M. R. Gadallah, Petroleum consultant
4-D International
Tulsa, Oklahoma

目 录

1	绪论	1
2	地球物理技术概论	6
2.1	概述	6
2.2	地震方法	6
2.3	小结和讨论	9
	关键词.....	9
3	地震勘探基本原理	10
3.1	地震波传播	10
3.2	波前和射线	10
3.3	波动理论	11
3.4	反射和折射	12
3.5	勘探地震学传播模型	16
3.6	小结和讨论	17
	关键词.....	17
	习题.....	18
	参考文献.....	18
4	地震数据采集	20
4.1	野外地震数据采集	20
4.2	数据采集系统构成	22
4.3	海上数据采集	29
4.4	小结和讨论	33
	关键词.....	34
	习题.....	34
	参考文献.....	35
5	地震数据处理	37
5.1	概述	37
5.2	信号理论	42
5.3	正常时差校正	50
5.4	速度分析	51

5.5	切除	62
5.6	静校正	63
5.7	叠加	72
5.8	数据处理目标	73
5.9	数据处理流程综述	75
5.10	小结和讨论	77
	关键词	79
	习题	79
	参考文献	81
6	偏移	84
6.1	概述	84
6.2	垂直入射	84
6.3	小结和讨论	99
	关键词	100
	参考文献	100
7	模拟	103
7.1	概述	103
7.2	合成地震记录应用	103
7.3	波阻抗	103
7.4	制作合成地震记录	105
7.5	数据采集和处理模拟	112
7.6	二维模型类型	116
7.7	结论	120
7.8	小结和讨论	120
	关键词	121
	习题	121
	参考文献	122
8	垂直地震剖面	124
8.1	发展概况	124
8.2	垂直地震剖面概念	124
8.3	野外装备和所需物理环境	125
8.4	垂直地震剖面噪声类型	132
8.5	垂直地震剖面野外施工步骤	134
8.6	上行波和下行波分离	138

8.7	数据增强处理	139
8.8	垂直地震剖面应用	141
8.9	小结和讨论	157
	关键词	159
	参考文献	159
9	振幅与偏移距 (AVO) 分析	163
9.1	概述	163
9.2	AVO 方法原理	163
9.3	AVO 发展概况	164
9.4	AVO 概念和解释	165
9.5	检波器组合校正	169
9.6	数据处理流程图	170
9.7	共角度叠加	174
9.8	AVO 属性和显示	177
9.9	AVO 处理误区	181
9.10	AVO 优点	181
9.11	AVO 应用	182
9.12	小结和讨论	182
	关键词	183
	参考文献	183
10	三维地震勘探	186
10.1	概述	186
10.2	何时、何地、为什么使用三维地震	186
10.3	三维数据采集	187
10.4	三维勘探系统设计概况	188
10.5	二维勘探设计	189
10.6	三维勘探设计	191
10.7	三维数据处理	198
10.8	三维地震数据应用	199
10.9	小结和讨论	209
	关键词	210
	习题	210
	参考文献	211
11	层析成像	213

11.1	概述	213
11.2	地震层析成像类型	214
11.3	旅行时层析成像	215
11.4	透射层析成像	216
11.5	层析成像模型举例	217
11.6	迭代层析成像偏移处理	218
11.7	误差准则选择	224
11.8	地震层析成像和储层特征	226
11.9	最新进展	227
11.10	在石油工程中应用	232
11.11	小结和讨论	232
	关键词	233
	参考文献	233
12	地震解释	236
12.1	地下构造图	236
12.2	等时图和等厚图	242
12.3	人机交互解释	245
	参考文献	246
13	应用实例	247
13.1	AVO 地震响应具有岩性信息吗	247
13.2	联合应用三维地震和计算机辅助勘探加速了阿拉巴马州 N. Frisco 市的油田开发	263
13.3	高效益的三维地震勘探设计	271
13.4	层析成像在井孔和反射地震学中的应用	284
13.5	一个多学科方法联合应用的成功案例	294
13.6	储层开发中的地球科学	302
14	结束语	309
	附录 A	311
	附录 B	313
	附录 C	315
	专业术语表	317
	参考文献	329

1 绪 论

在油田中有一句谚语叫做“石油就在你寻找之处”，意思是说钻头是主要的勘探工具。在过去，这样说毫无疑问是正确的，只是钻井找油的成功率很低。但是，地球科学的发展改变了一切。现在众多现代化的勘探方法在 50 年前只能是梦想的技术和方法。然而，由于对勘探和开发各个阶段中所包括的方法认识 and 了解不够，这些方法的潜力还没有发挥出来。

石油勘探和开发的方法一直都在发展变化。作为地质学家，我们需要想象。作为地球物理学家，我们仍要想象。但是作为工程师，我们要预测和估计其未知的区域。即使地质学家利用地下信息来控制 and 类推识别储层，他们仍需要想象。因此人们说：“石油就在地质学家的脑子里”。

地球物理学家需要从地表来寻找和细化他们的想象。地质学家和地球物理学家是否需要共同工作，并转换思路，使彼此的努力达到最佳效果，产生在地质和地球物理上都合理的（在经济上可行的）勘探方案呢？在初探井之前工程师是否需要预测储层的品质和产量呢？工程师需要考虑勘探方案的有效因素吗？例如：储层厚度、孔隙度、饱和度、采收率和其他参数。通常，初探井成果是由勘探部门来承担的。即使在勘探部门内部，地质学家和地球物理学家的交流也很少。一般地质学家和地球物理学家独立进行各自的解释工作。直到最近，也只有少数石油公司采用有较好交流理念的团队，以便成果更好地交流和综合。

现在让我们来讨论钻井的实施。地质学家决定在构造高点位置钻井，也许掌握地震资料的地球物理学家也参与了这一决定。他们把钻井的位置、合理的钻井参数、所要取的岩心和其他的一些信息提供给钻井工程师，由钻井工程师设计大致符合区域地质背景的合理钻井方案。

在地震剖面上，某一深度上的异常现象可能代表着异常高压区的存在。工程师必须控制好异常高压区，不论是通过下套管还是通过增加钻井液密度。在浅部地层层序的钻井中，直到发生井喷事故，地震剖面上的许多高振幅异常才会引起足够的重视。

如果地质学家和工程师不能确定异常类型，地球物理学家可以在