《地震勘探中的地下成像与介质参数估计》一书的分析性评述

DOI：https://doi.org/10.5281/zenodo.22100292

相关出版物：

《地震勘探中的地下成像与参数估计》教材出版公告。DOI：https://doi.org/10.5281/zenodo.22064681

《黏弹性介质中的动力学反问题》。DOI：https://doi.org/10.5281/zenodo.21723472

中文

通过考察本书的整体结构、各篇前言、引言、主要章节、结论及附录，可以得出一个较为明确的判断：这既不是一本常规的地震勘探教科书，也不只是对先前出版著作所作的扩充性第二版。从本质上看，它是一部具有鲜明作者特色的科学专著，以经典理论为基础，系统阐述了作者相互贯通的学术观点、研究方法及原创成果。

本书最突出的特色

本书最显著的优势，在于贯穿全书的一条统一的概念主线：

成像 → 聚焦 → 波场运动学 → 波场动力学 → 介质参数 → 地质解释 → 算法与软件。

正是这一研究链条，使本书有别于许多将偏移成像、速度分析、层析成像、地质解释、衰减分析等内容主要作为彼此独立技术来阐述的教科书与专著。

本书最根本的物理概念是“像”。作者从几何成像理论出发，并借助光学类比来解释共深度点（Common Depth Point，CDP）方法：数字叠加被视为光学系统聚焦过程的对应形式。此后，这一思想沿着走时场导数、NIP 定理、多聚焦方法、偏移成像，并进一步延伸至运动学与动力学反问题，得到连贯而深入的发展。

因此，本书确立了一套特征鲜明、内在逻辑一致的科学理论体系。

第二个重要特色——走时场及其导数

在全书的理论构架中，第 2 章所处的基础性地位，远高于它在一般教学文献中的常见地位。通过走时场的导数，作者将波前几何、成像参数、叠加速度、NIP 定理以及后续反问题的求解联系在一起。

值得注意的是，对本书的评述也强调了这一研究方向的重要性。M. I. 普罗塔索夫（M. I. Protasov）在附录中指出，大型教科书和专著通常很少关注走时场导数，而本书关于这一问题的论述尤为重要。他提出的唯一一项实质性建议，是进一步增加与走时场一阶、二阶导数有关的实践材料。

在向西方出版社推介本书时，这部分内容可以视为其最主要的竞争优势之一。

第三个特色——作者对既有方法提出的替代性方案

本书并未停留在介绍 CRS、MF、偏移成像等已有方法的层面，而是始终追问：某种方法的局限性何在？是否能够构建一种不受这些局限约束的替代方案？

- 运动学滤波与球面反射镜；
- 林恩（Lynn）方程的求解；

- 绕射波提取；
- 地震地层学叠加；
- 运动学地震记录；
- 反偏移（demigration）；
- 黏弹性介质中的动力学反问题；
- RGB / “彩色斑点”；
- 圈闭的自动识别与边界圈定。

其中，SSS 方法尤其值得关注。在 MF 和 CRS 方法中，叠加走时函数在局部具有单一极值；而在 SSS 方法中，首先确定局部斜率，再据此构建完整的走时函数，该函数也可以具有多个极值。这已不仅是对既有方法的一种新实现，而是对波场运动学的另一种表述方式。

第四个特色——第 11 章

从科学研究的角度看，第 11 章可能是第二版中最不同寻常的部分。

不同于传统全波形反演（FWI）的流程——选取模型、反复求解正问题、随后最小化数据失配——作者直接针对波动方程提出了系数反问题，并给出局部、非迭代的两阶段参数恢复方法：首先确定弹性参数，然后确定弛豫时间。

此外，本章讨论了一个颇为不同寻常的结论：在高频渐近近似下，表观频率和时间衰减项在最终公式中相互抵消，而介质参数则通过慢度及振幅的空间变化来确定。

在所考察的参数范围内，模型试验报告的精度分别为：v_p^2 达到 99.99%，α_R 达到 99.96%。

向出版社介绍本书时，应将这一章视为整部著作最核心的科学创新之一，而不是将其仅仅作为一般性课程中的另一个章节。

第五个特色——理论与软件实现直接衔接

这是本书另一项值得强调的优势。几乎所有主要思想都被发展为具体算法，并在 CubeTechnology 系统中得到实现。

附录 B 并非对软件作形式性的提及，而是相当详细地介绍了一套已经实际实现的科研系统。内容涵盖数据库、可视化、谱分析、Prony 分析、多聚焦、SSS、RGB、速度分析、偏移 / 反偏移、层析成像、动力学分析、数值模拟、圈闭计算以及编程手册。

本书中的全部图件也均使用该系统制作。

因此，本书处于科学专著、教科书与实际科研软件系统技术文档之间一个颇为独特的位置。

另一项重要的区别性特征

本书保留苏联及俄罗斯地震学派的发展历史，并非出于对过去的形式性致敬，而是将这段历史作为所讨论科学思想发展过程中的有机组成部分。

书中提及普济列夫（Puzyrev）、戈尔金（Goldin）、阿列克谢耶夫（Alekseev）、克列姆-穆萨托夫（Klem-Musatov）、切尔尼亚克（Chernyak）等研究人员，均与具体的科学研究方向相联系。作者在前言中，也将自己的科研经历直接置于这一学派的发展脉络

之中。其中一篇书评还将本书视为由普济列夫、戈尔金和阿列克谢耶夫奠基的新西伯利亚地震学派传统的延续。

对于英文版而言，这不应被视为弱点，恰恰相反，它是一项优势：西方读者对这一体系丰富的科学文献确实相对陌生。

本书最为成功的方面

第 1 章尤其出色。一位评审者特别指出了其论述的清晰性。光学类比使读者得以将 CDP 理解为一种物理成像过程，而不仅是常规动校正（NMO）—速度分析—叠加的一系列处理步骤。

全书的论述逻辑同样十分成功：

物理意义 → 数学表述 → 算法 → 实际或合成数据实例。

沃尔特·林恩（Walt Lynn）特别肯定了这一优势：许多教科书往往局限于理论论述，而本书将理论与实际数据直接结合起来。

本书的另一项长处是，作者并不试图给读者造成所有问题均已得到最终解决的印象。例如，在有效厚度的确定问题中，作者明确指出，结果取决于频带宽度、子波稳定性、处理质量、波间干涉以及井资料标定等因素，因此应将其视为经过统计标定的估计值，而非厚度的直接测量结果。

这种处理方式符合严谨的科学写作规范。

需要澄清的意见与问题

1. 第 11 章中的表述

在第 155 页公式（2.2.11）之后，原文实际上作出了如下表述：

由于方程中不含 α_R，因此满足该方程的波场 $u(x,t)$ 不依赖于 α_R。

随后得到所需结论：

$$\frac{\partial M(x,\alpha_R)}{\partial \alpha_R} = 0$$

上述第一项表述似乎过于绝对。观测到的黏弹性波场本身当然可能依赖于 αR。

根据公式（2.2.11），更准确的表述应当是：对于给定的观测波场 $u(x,t)$，用于恢复 M 的方程不含 α_R；因此，所恢复的 M 值不依赖于所选取的 α_R 值。

这是一个根本性的区别。

与此同时，其下方紧接着的脚注已经十分准确地指出，这种操作“并不改变所记录黏弹性波场的物理性质”。

因此，这里的问题并不是要改变数学结论，而是要更准确地阐明这一结论的物理含义。

2. 关于频率、衰减与 Q 的论述，需要更明确地限定适用条件

现有文本的措辞有时容易被理解为近乎普遍性的物理结论：

“根据频率、衰减或品质因子直接确定弛豫时间……缺乏充分依据。”

然而，在所讨论的推导中，这一结论具有更加具体的含义：在所采用的模型、渐近近似以及所考察的频率范围内，相应物理量在代数运算中相互抵消。

因此，建议在全文中突出强调如下限定条件：

“在本文所采用的反问题表述以及相应地震频率近似条件下……”

这一澄清可以避免与大量通过衰减估计 Q 值的研究产生不必要的对立。

如此一来，所得结论便不会与上述文献相矛盾，而是表达一个更为具体的论断：在本文得到的系数反问题解中，Q、Ω 和 γ 并非关于 τ_R 的相互独立的信息载体。

采用这样的表述，结论在逻辑上将更加严密，也更不容易受到质疑。

3. 第 11 章的结果验证仍以模型试验为主

本书对此已有较为审慎的说明：使用合成的垂直地震剖面（VSP）波场，恢复包括厚度仅为 10 m 的薄层在内的界面，并考察了求解精度。

书中还正确指出，τ_R 与孔隙度、渗透率、流体性质及其他岩石物理参数之间的物理联系仍需开展专门研究。

这一限定应当保留并予以强调。对于严肃的科学出版社而言，这样做更可能增强作品的说服力，因为它准确界定了研究成果所达到的阶段：

“该方法的数学与数值可行性已经确立；其岩石物理解释和实际野外资料验证仍有待进一步研究。”

换言之，该方法在数学与数值层面的可行性已经得到证明，而岩石物理解释及利用实际野外数据开展全面验证，仍属于后续研究课题。

4. “CDP 是偏移成像的一个特例”这一论断需要更精确的表述

本书指出，在所考察的基尔霍夫（Kirchhoff）方案中，当孔径大小趋于零时，可以得到 CDP 图像。

这是一个具有统一意义的有趣思想。

然而，下述表述：

“CDP 方法是偏移成像的一个特例。”

可能会被部分西方地球物理学者认为在术语使用上存在争议。

更准确的表述是：

“在本书所采用的统一聚焦表述中，当偏移孔径趋于零时，CDP 成像算子表现为基尔霍夫偏移算子的一个极限情形。”

按照这种表述，上述论断就不再是对 CDP 方法在历史或术语意义上的重新分类，而是在本书采用的统一聚焦框架内严格表述的一项数学结果。

5. 关于镜面反射边界与单个震源的论断也需要类似的澄清

第 1 章指出，对于完全镜面反射的界面，从界面上每一点出射的射线只有一条。因此，使用单个震源无法形成界面本身的像，而多次覆盖则人为构造出所需的射线束。

这是一种有趣且不同寻常的解释，也正因如此，更有必要作出格外审慎的说明。

偏移成像领域的专家可能会提出异议：

“但是，单炮偏移确实能够形成反射界面的图像。”

对这一质疑的回答，实际上已经包含在本书采用的定义之中：这里使用的是由聚焦射线束形成像点的严格概念，而非地震勘探中对“成像”一词的通常宽泛用法。

建议在正文中明确阐明这种区别。这样，潜在的术语争议反而可以成为支持所提出理论体系原创性的另一项论据。

6. RGB 章节颇具价值，但关于“颜色的物理本质”的措辞需要谨慎

本书指出，按振幅对地震图像进行常规着色与颜色的波动本质无关，而从物理上讲，颜色由频率决定；随后又以相应频带的振幅确定各 RGB 分量的强度。

所提出的方法本身清晰明确，且具有研究价值。

然而，应当清楚地区分两个方面：

- 与光学频率之间的物理类比；
- 以 RGB 属性表示谱分量，其中振幅决定相应颜色通道的强度。

若不作此区分，讨论便可能转向色觉生理学、人眼的光谱灵敏度函数、显示设备的 RGB 机制等问题，而这些问题与所提出的地震方法并无直接关系。

“油气直接检测”这一表述也应谨慎使用。更恰当的说法是，“彩色斑点”是一种与可能存在的油气聚集相关的地震指示特征 / 属性，而不是油气存在的唯一、直接的物理证明。

总体评价

本书的独特性可以概括如下：

本书并非对现代地震勘探知识的百科全书式综述，而是一套由作者提出的地震成像与介质参数估计的数学—物理理论体系。这一体系根植于新西伯利亚地震学派，并由作者从理论公式逐步发展到具体算法、软件实现以及实际数据处理。

向潜在出版社介绍本书时，恰应突出它的这一定位。

无需与那些力求“涵盖现代地震数据处理一切内容”的出版物竞争，因为本书的核心优势并不在此。它的优势在于不同寻常的概念统一性、作者的原创成果、向西方读者介绍相对陌生的俄罗斯科学传统，以及将数学理论与已实际实现的软件技术紧密结合起来的罕见特色。