

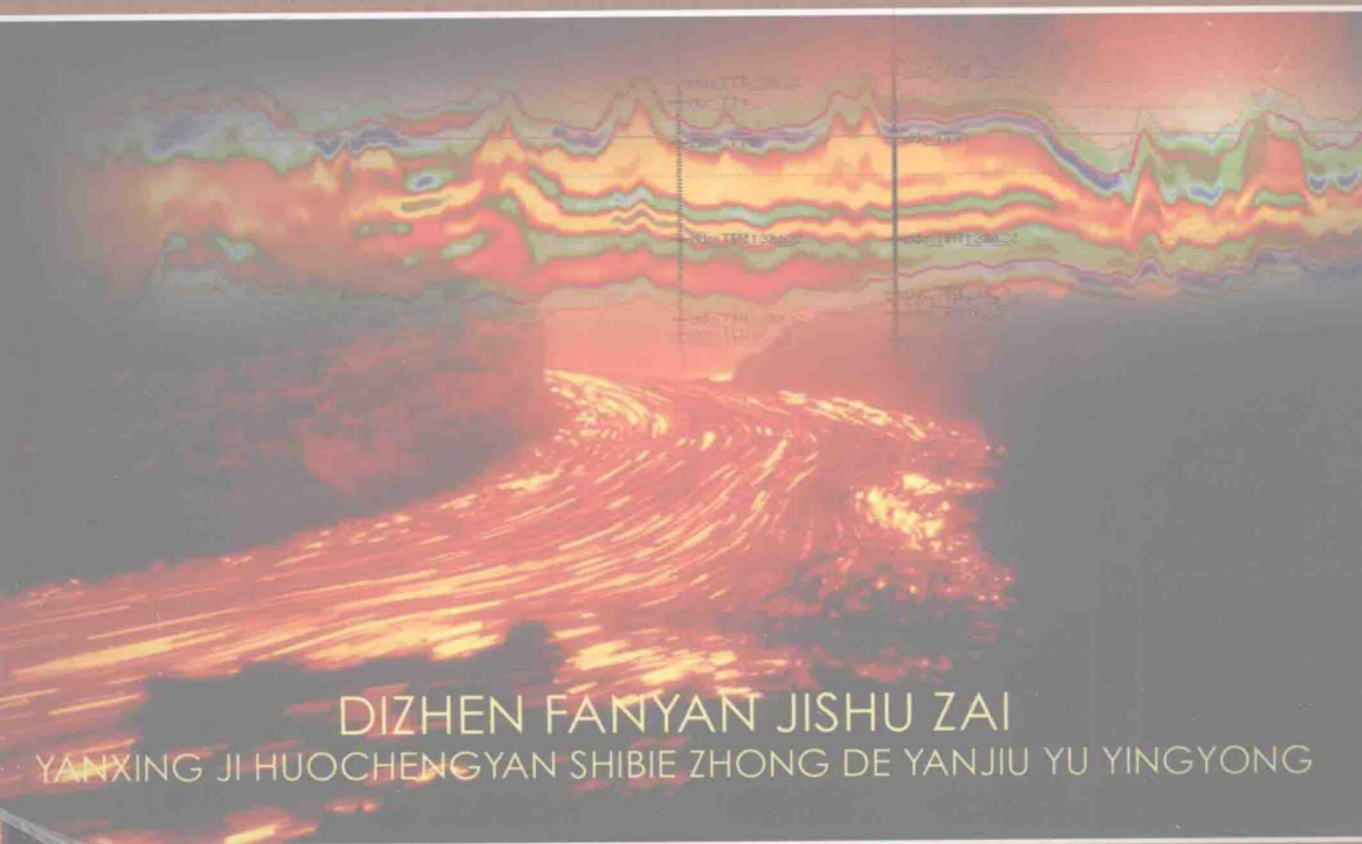
国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB219603)资助

国家科技重大专项项目(2011ZX05001-002-003)资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助

地震反演技术在 岩性及火成岩识别中的应用

许永忠 杨海军 著



DIZHEN FANYAN JISHU ZAI
YANXING JI HUOCHENGYAN SHIBIE ZHONG DE YANJIU YU YINGYONG

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



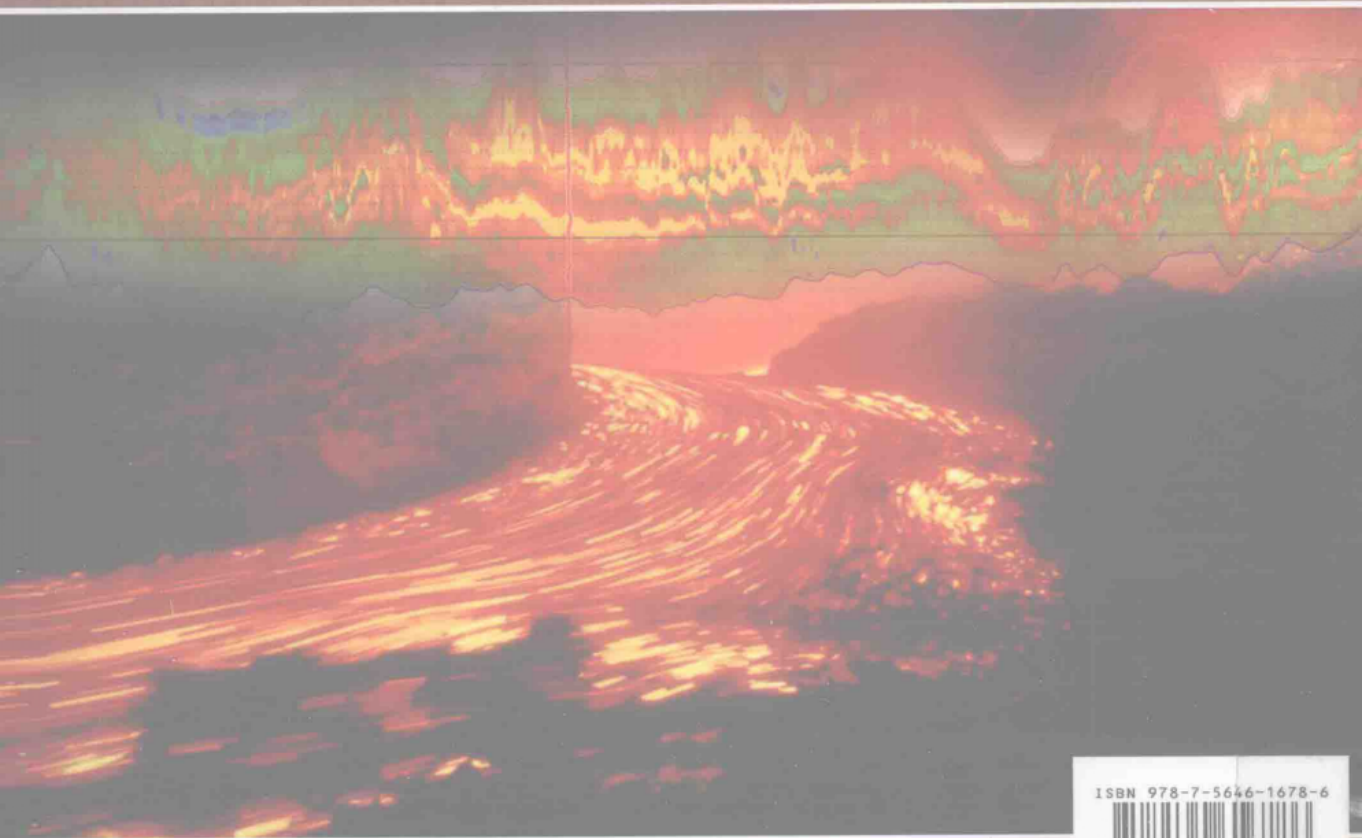
国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

DIZHEN FANYAN JISHU ZAI
YANXING JI HUOCHENGYAN SHIBIE ZHONG DE YANJIU YU YINGYONG

China University of Mining and Technology Press

责任编辑 章毅 孟茜

封面设计 肖新生



ISBN 978-7-5646-1678-6



9 787564 616786 >

定价: 36.00 元

国家重



973 计划)项目(2009 CB 219603)资助

国家科

ZX05001-002-003)资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助

地震反演技术在岩性及火成岩 识别中的应用

许永忠 杨海军 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

岩性勘探是地震勘探工作的重要内容和研究方向。随着开采强度的不断加大,地震勘探面临的地质问题越来越复杂,如薄层开采和火成岩的岩性识别等诸多问题。

本书首先介绍了地震反演的特点,采用反射率法正演和 CSSI 反演技术进行了煤层岩浆岩侵入模型和薄煤层的反演能力探讨;采用二维波动方程反演技术对东部煤田的深部薄煤层、第四系含隔水层进行了反演研究;综合应用基于模型反演、约束稀疏脉冲反演及地震特征反演三种方法进行了反演对比研究。最后,本书介绍了地震反演技术在新疆塔里木盆地哈拉哈塘地区的火成岩岩性识别和速度研究工作。通过岩石物理实验和多种反演方法的对比,很好地识别了深部二叠系火成岩的岩性。

本书可供从事物探、地质等专业的技术人员、科学工作者和相关专业学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震反演技术在岩性及火成岩识别中的研究与应用/

许永忠, 杨海军著. —徐州: 中国矿业大学出版社,

2012. 10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1678 - 6

I. ①地… II. ①许… ②杨… III. ①火成岩—地震
勘探—重力反演问题—研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 239259 号

书 名 地震反演技术在岩性及火成岩识别中的研究与应用

著 者 许永忠 杨海军

责任编辑 章 毅 孟 茜

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 14.25 彩插 4 字数 363 千字

版次印次 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

近年来,地震反演技术被广泛应用于岩性勘探。地震反演把地震资料中包含的岩性、物性信息转变成波阻抗或层速度资料,可与地质、测井资料直接对比分析,并以岩层为目标进行地质解释,能充分发挥地震资料在横向上、测井资料在纵向上的优势,因此在研究岩性体的空间特征、厚度变化、岩性,特别是火成岩的分布特征上具有独特的优势。

在煤矿开采过程中,煤层变薄带、岩性变化带、煤层气富集带、裂隙发育带等地质现象会严重影响巷道的布置及采掘工作的实施,尤其是火成岩侵入范围的确定、薄煤层的开采评价、开采上限的确定等问题越来越突出,应该引起足够重视。

在塔里木盆地哈拉哈塘地区的油气勘探中,二叠系普遍发育大面积火成岩,其厚度变化很大。由于火成岩的岩石类型复杂多变,厚度分布不均,速度差异大等原因,导致其下伏石炭系和志留系的低幅度碎屑岩圈闭和岩性圈闭构造变化大,影响了油气勘探进程。

本书内容是作者近年来的研究成果。第1~6章由许永忠编写,介绍了本书的主要研究内容、研究方法和技术路线,煤田地震勘探面临的主要问题、煤田地震反演的特点和关键技术以及各种反演方法的应用对比;第7~8章由杨海军、许永忠共同编写,介绍了哈拉哈塘地区二叠系火成岩的研究。应用了地震反演、火山岩相学、岩石物理实验、地震属性和地震相以及地震正演等技术进行火成岩的特征及速度变化规律的研究。全书由许永忠统稿。

本书在编写过程中,中国矿业大学崔若飞教授、董守华教授为研究工作提出了宝贵建议,李壮福副教授提供了大量的细致的薄片观察和描述工作,山东煤田物测队张宝水高级工程师为研究工作提供了帮助,塔里木油田公司研究院实验中心对研究工作给予了大力支持,研究生陈世仲、武刚、赵吉祥、王双双、汤浩哲、张昆参加了研究工作,王双双协助完成了部分文字录入和校对工作,在此谨向他们一并致谢。

由于作者水平所限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正!

著 者

2012年6月于徐州

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 地震反演国内外研究现状	2
1.3 煤田地震反演现状	7
1.4 地震反演方法	9
1.5 本书研究内容和技术路线	13
1.6 本章小结	17
2 煤田地震反演的特点及关键技术	18
2.1 煤田地震反演中的数据特点	18
2.2 煤田的测井曲线特征与应用	19
2.3 测井曲线的综合对比	23
2.4 测井资料的处理	25
2.5 Gardner 公式的应用	27
2.6 Faust 公式的应用	38
2.7 煤田地震反演关键技术	41
2.8 本章小结	43
3 薄煤层与岩浆岩侵入区的正演与反演	44
3.1 地震正、反演模拟的目的及思路	44
3.2 反射率法简介	45
3.3 反射率法在层状介质中的应用	45
3.4 薄层及薄煤层分析	48
3.5 薄层、煤层尖灭、岩浆岩入侵模型正反演及分析	52
3.6 本章小结	68
4 二维波动方程反演的应用	69
4.1 二维波动方程反演简介	69
4.2 二维波动方程反演的相关技术	70
4.3 二维波动方程反演的关键步骤	75

4.4	二维波动反演在济北煤田深部勘探中的应用	75
4.5	提高开采上限的应用	79
4.6	本章小结	85
5	基于模型地震反演的应用	87
5.1	基于模型反演的基本原理	87
5.2	实现方法	88
5.3	卧龙湖煤矿岩浆岩侵入区的应用	90
5.4	成庄煤矿丘陵区的应用	99
5.5	大佛寺煤矿黄土塬区的应用	108
5.6	本章小结	114
6	不同反演方法的对比应用研究	115
6.1	约束稀疏脉冲地震反演	115
6.2	地震特征反演	117
6.3	阳泉二矿复杂山区的应用	120
6.4	本章小结	131
7	塔里木盆地哈拉哈塘地区二叠系火成岩特征及速度研究	133
7.1	哈拉哈塘地区二叠系火山岩的岩相学及其分布规律	133
7.2	测井资料研究火成岩	154
7.3	岩石物理实验研究火成岩	173
7.4	火成岩地震属性地震相分析技术应用	180
7.5	反演研究识别火成岩	191
7.6	正演数值模拟研究火成岩	199
7.7	本章小结	206
8	结论	207
8.1	煤田地震反演研究结论	207
8.2	哈拉哈塘地区火成岩研究结论	209
附录	火成岩特征反演速度体处理与评价系统介绍	211
参考文献		214

1 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 地震反演是岩性研究的需要

我国煤矿群死群伤特重大事故主要由于瓦斯和突水灾害造成,遏制瓦斯和突水事故是我国煤矿安全生产控制的主攻目标。突水造成的直接经济损失十分严重,过去 20 年间,有 250 多对矿井被水淹没,直接经济损失高达 350 多亿元。随着矿井开采的水文地质条件的复杂化,突水事故还会越来越严重(缪协兴,2008)。在煤矿开采过程中,煤层变薄带、岩性变化带、煤层气富集带、裂隙发育带等地质现象对巷道的科学布置及采掘工作产生重大影响。因此,解决岩性和水的问题是煤矿安全生产工作的重要工作。

地震资料为煤田的开采和规划提供了有力的保障。常规叠后地震资料长期以来用于研究地层的几何形态,在构造勘探中发挥了巨大作用。随着勘探的不断深入,必然要求地震技术从构造研究深入到岩性评价。

地震反演技术是实现这一跨越的关键。地震资料在横向上有密集的覆盖程度,具有较高的横向分辨能力,能查明煤层空间的横向变化,但垂向分辨能力有限。测井及钻井资料纵向分辨率高,但却仅限于井孔周围,无法反映地层的横向变化的特点。为了各取所长,在波阻抗的反演中使用了以井中测井数据为约束的地震资料反演技术(李庆忠,1998)。地震反演把地震资料中包含的丰富岩性、物性信息反演成波阻抗数据或地层层速度数据等物性资料,使其能与地质、测井资料直接对比分析,以岩层为目标进行地质解释,充分发挥地震资料在横向上资料密集和测井资料纵向上分辨能力高的优势,在研究煤层的空间特征、厚度变化和煤层顶底板岩性方面具有独特的优势。应用地震资料进行测井资料和地质构造信息约束下的地震反演是准确识别复杂岩性和煤层分布的有效方法。

大多数地球物理问题都是非线性的(王家映,1998)。由于反演技术本身的不适定性,应用条件的限制以及地质条件复杂不同,常规叠后地震资料品质不高且分辨率低等多种因素,在一定程度上影响了该技术的广泛应用,必须根据具体情况具体研究。因此,开展对煤层反演和预测问题的研究就显得尤为重要。

1.1.2 火成岩研究的迫切性

哈拉哈塘地区位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起上,该低凸起北邻轮台凸起,南邻北部坳陷,西接英买力低凸起。在奥陶系顶面构造图上,以-6 000 m 等高线圈定,轮南低凸起为一大型潜山背斜,主体在轮南油田—塔河油田一带,长轴由东部的北东向到西部的北东向。轮南低凸起紧邻生、排烃坳陷,是油气长期持续运移的指向区和聚集区,具有形成特大型油气田的良好构造地质背景。

目前在哈拉哈塘地区已经部署钻井 50 余口,在二叠系普遍钻遇火成岩,厚度变化大(100~600 m)。二叠系上部为灰、深灰色凝灰岩及深灰色玄武岩,底部为砂泥岩互层。由于火成岩岩性变化大,成因模式认识不清,厚度分布不均,速度差异大,给其下伏的石炭系和志留系低幅度碎屑岩圈闭和岩性圈闭落实带来了很大的困难,影响了本区的油气勘探进程,因此对二叠系火成岩的精细研究具有重要的意义。

前人已对火成岩研究开展了部分专项研究工作,但与油气勘探密切相关的火成岩速度分析和火成岩对下伏地层圈闭落实的影响仍未全面开展。哈拉哈塘地区拥有丰富的三维地震资料和一定数量的已钻井,且已钻井中声波测井、VSP 测井、岩屑录井等资料丰富,为本区火成岩精细研究和速度分析提供了重要依据。

1.2 地震反演国内外研究现状

地震反演技术是伴随着地震技术在油田勘探开发中的不断深入应用而发展起来的,是 20 世纪 80 年代兴起的一门新学科。

1.2.1 概述

从不同的角度,可将地震反演方法分为不同的类型。按测井资料在反演中所起的作用的大小可分成四类:① 地震直接反演(道积分);② 测井约束地震反演;③ 测井—地震联合反演;④ 地震控制下的测井内插外推反演。从反演实现方法上可分为三大类:① 道积分反演;② 递推反演;③ 基于模型的反演[又可分为广义线性反演(GLI)、测井约束反演、地质统计学反演、遗传算法反演、混沌反演和波阻抗多尺度反演等]。从数学算法上可分为两大类:① 线性反演;② 非线性反演。随着地震反演技术的发展,新的计算方法和新的反演思路不断涌现,各种称谓的地震反演方法也层出不穷,但归根结底,从所使用的地震资料性质上讲,地震反演方法和技术可以分为叠前和叠后两大类。叠前地震反演使用叠前地震道集资料,叠后地震反演使用叠后地震偏移资料。

长期以来,国内外主要应用叠后地震资料进行波阻抗等地震参数反演方面的研究,取得了较好的实际应用效果。叠后地震反演方便快捷,其波阻抗反演成果在一定程度上能够反映储层的内部变化规律。但由于地震资料处理中使用的叠后地震处理技术基于介质均匀或水平层状假设,不满足实际地层结构情况,保幅性和成像效果都差;加之全角度多次叠加,损失、模糊了很多构造和地层信息,削弱了地震资料反映构造、地层变化特征的敏感性,导致叠后地震反演处理与地震属性处理和应用方面的技术成果存在解决地质问题的多解性。由于使用全角度多次叠加后的叠后地震资料在某种程度上削弱了反映储层特征的敏感性,且叠后地震反演只能提供种类很少的纵波波阻抗等参数,不能给出纵横波速度比、泊松比等反映物性、流体特征的参数,在研究储层物性、流体方面受到了限制。随着勘探的进一步深入,勘探的难度越来越大,使得包含更多信息的叠前地震信息处理方法研究日趋活跃。

叠前地震反演与叠后地震反演相比,具有良好的保真性和多信息性。叠前地震资料反演技术,克服了叠后反演的不足,不但适合薄储集层物性反演,还可进行含油气性反演。叠前地震反演保留了地震反射振幅随偏移距不同或入射角不同而变化的特征,并充分应用了叠前不同入射角的地震道集数据,部分角叠加和梯度、截距等地震处理数据体,提供了研究岩性、储层、流体变化规律的更多、更敏感有效的三维反演数据体成果。这些反演数据体成

果是研究地层的“地震地层属性体”。叠前地震反演较叠后地震反演跃进一步,具有明显的优越性,能更可靠地揭示地下油气储层的展布情况和孔、渗物性及含油气性。

近年来,国内外发表和推出了大量有关叠前和叠后地震反演的新方法、新技术。

1.2.2 叠前地震反演

叠前反演的理论基础是地震波弹性动力学和地震波的反射和透射理论。来自同一反射点的地震反射振幅在不同炮检距上是不同的,并且反射波形也随着炮检距的变化而发生改变。叠前反演通过分析叠前地震信息随炮检距的变化特征,来揭示岩性等的关系,如岩石密度、纵横波速度、纵横波阻抗、泊松比等。

Zoeppritz 于 1919 年解出了著名的 Zoeppritz 方程组。当一个平面纵波倾斜入射到两种介质分界面上时,既能产生反射纵波和透射纵波,又能产生反射横波和透射横波,根据边界条件求解波动方程并引入反射系数和透射系数后,可以得出四个波的位移振幅应当满足的方程组,即 Zoeppritz 方程组。陆基孟(1993)对其进行了很好的描述和说明。当一个平面纵波入射到具有不同弹性性质的两种介质的分界面时,会在第一介质中产生反射纵波和反射横波,在第二介质中产生透射纵波和透射横波,反射系数和透射系数与入射角和介质的弹性参数之间存在复杂的依赖关系,这个关系可以用 Zoeppritz 方程来表示。为了对其进行简化以方便实际应用,前人做了很多努力,提出了形式不一的近似公式。Shuey 和 Aki、Richards 等许多著名学者在 20 世纪 80 年代对 Zoeppritz 方程组进行了很多形式的研究和简化,使关系复杂的、难以直接求解的 Zoeppritz 方程组在一定条件下得以求解和分析应用。简化公式包括 Shuey 公式、Aki-Richards 公式、郑晓东公式,它们之间并无本质区别,在 AVO 分析中使用最为普遍。Zoeppritz 方程及其简化公式均表明,地震反射振幅随入射角的变化规律与岩石的弹性参数有关,从理论上讲,利用反射振幅随入射角的变化规律可以实现全部岩性参数的反演,提取纵波速度、横波速度、纵横波速度比、岩石密度、泊松比、体积模量、剪切模量等参数。由于叠前地震资料包含的信息极其丰富,因此,基于 AVO 现象的叠前反演技术有广阔的应用前景,目前已在岩性参数反演、裂缝预测、压力预测、储层非均质性描述等方面得到应用。

叠前地震反演的方法和算法很多,也很复杂。目前,国内外正在深入开展叠前地震反演方法和技术的研究。20 世纪 80 年代后,人们开始研究将反射系数随入射角变化应用于“亮点”型含气砂岩的识别,发现含气砂岩反射振幅随偏移距的增加而增加,含水砂岩反射振幅随偏移距的增加而减小,这一现象极大地改善了烃类检测的能力。AVO 分析的基本理论根据是反射振幅系数随入射角的变化(AVA)与岩性参数组合有一定的规律性。牟永光(1996)进行了双相介质地震资料储层参数反演,将储层地球物理学建立在双向介质和各向异性的理论基础上,解决了储层参数的确定问题。Connolly(1999)正式发表了弹性波阻抗反演方法的论文,Cambois(2000)等在 2000 年的 SEG 年会上发表了多篇论文对 EI(Elastic Impedance)进行了研究,随后商业软件中加入了弹性波阻抗反演的功能,以纵波波阻抗和横波波阻抗的概念来区别其以往软件中的波阻抗概念。马劲风(2003)进行了地震勘探中广义弹性阻抗正反演,提出了广义弹性阻抗的概念。弹性阻抗是波阻抗的推广,解决了非零炮检距条件下常规叠后地震道正反演的关键问题。广义弹性阻抗不仅包含波阻抗,还包含了纵、横波速度等岩性信息,具有很好的实用价值。进行广义弹性阻抗的反演,能较常规地震道反演获得更多、更可靠的流体、孔隙率、砂泥含量等信息,提高预测的精度。甘利灯(2005)

利用叠后测井约束反演方法实现弹性阻抗反演,弹性阻抗是波阻抗的推广。因此,弹性阻抗反演不仅可以使用常规采集的地震资料,而且还可以使用现有的测井约束反演方法和软件。结果表明,弹性阻抗可以更好地反映流体饱和度的变化,在岩性和流体的识别和预测中具有很大的潜力。

Kelly(2000)进行了P—P和P—S角度叠加反演。Ma XinQuan(2002)采用模拟退火法进行了叠前地震数据的岩性同时反演,Adam(2003)进行了砂岩属性的地震反演研究。Gislain(2003)利用声阻抗反演(AI)和同时弹性反演对碳酸岩油气藏进行了研究。Germán Merletti(2003)进行了地质统计的薄层油藏的横向描述研究。Jo Eidsvik等(2004)用叠前地震数据进行了随机的油藏描述。Santos(2004)进行了P—P弹性反射系数的阻抗近似研究模型和AVO反演,比较了反射阻抗(RI)与EI、Shuey公式的异同。Bachrach(2006)采用随机岩石物理学模型进行了孔隙率和饱和度的联合估算。在第73届SEG年会上,AVO专题共发表论文40多篇,争论的话题已不再是AVO量化解释岩性的问题,而是岩性解释工作是否精细。多分量AVO分析越来越受到重视,模式识别方法大量应用于AVO属性的反演,如采用后验概率的Bayes反演、异常分类和支持向量等。但多孔介质、黏弹介质、各向异性介质中的AVO分析仍需深入研究。近年来又新发展起来一些新方法、新技术,如四维地震AVO分析等。

1.2.3 叠后地震反演

叠后地震剖面相当于零炮检距的自激自收记录。令Zoeppritz方程中的入射角等于零,即可得到法向入射条件下的反射系数和透射系数表达式(1-1),它是叠后地震反演的理论基础。

$$\left. \begin{aligned} R_{PP} &= \frac{\rho_2 v_{P_2} - \rho_1 v_{P_1}}{\rho_2 v_{P_2} + \rho_1 v_{P_1}} \\ T_{PP} &= \frac{2\rho_2 v_{P_2}}{\rho_2 v_{P_2} + \rho_1 v_{P_1}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, R_{PP} 和 T_{PP} 为纵波反射系数和透射系数。

与叠前反演不同,叠后反演只能得到纵波阻抗。虽然叠后反演与叠前反演相比有很多不足之处,但由于其技术方法成熟完备,到目前为止,叠后地震反演仍然是主流的反演类型,是地层横向预测的核心技术。本书讨论的地震反演是指叠后地震波阻抗反演。

绝大部分反演方法都是以褶积模型为基础的。所谓Robinson褶积模型理论,粗略地讲就是,地震记录是由地震子波和反射系数序列褶积形成的。以褶积模型为基础的反演方法,一般来说是线性系统或线性化的非线性系统。

地球物理线性反演理论,在20世纪60年代就有了较大的发展。Backus和Gilbert于1967~1970年期间,发表了一系列有关反演的重要文献,这些文章实际上奠定了近代地球物理线性反演的理论基础。Cooke和Schneider(1983)发表了广义线性反演方法,并提出了基于模型的反演方法,从而揭开了波阻抗反演技术的新篇章。Lines和Treitel(1984)详细讨论了最小二乘反演方法,并把该方法用于法向入射地震数据的反演。Chi ChongYung, Mendel和Hampson(1984)提出了基于地震道的稀疏脉冲反演方法。稀疏脉冲反演基于最大似然反褶积、 L_1 模反褶积或最小熵反褶积,通过对每一道逐渐增加反射系数的方法,估算一个符合高斯分布的稀疏反射系数序列,这个宽带的反射系数序列被不断修改,直到合成的

地震道与实际地震道在允许的误差范围内相匹配,从而得到一个最优化的反射系数集合。

20 世纪 80 年代中后期以来,人们对这一问题有了越来越清醒的认识,做了不少研究工作。Lines(1988)等介绍了地震、重力等资料联合反演方法。计算机技术的飞速发展,极大地推动了波阻抗反演方法的研究和技术的发展,人们试图通过反演将测井资料的测量尺度与地震资料的测量尺度有机地结合起来,得到既有纵向高分辨率又有横向连续性的反演结果,因此出现了测井约束反演。它首先从井出发,建立一个详细的全频带地质模型,采用模型优选迭代算法,通过不断修改地质模型,使模型合成的地震数据与实测数据最佳吻合,最终的模型就是反演结果。由于避免了用地震数据做递推反演,其结果可以突破传统地震频带的限制,具有比直接反演更高的分辨率。赵德斌(1989)采用最小结构法进行了地震反演中的线性规划算法研究,阐明了线性规划反演方法中从各种信息源中提取约束条件的算法。王嘉松等(1990)利用 L_1 模极小化和下降算法进行了地震反演研究。大多数地震反演问题是欠定的,即解是不唯一的、不稳定的(王家映,1998;曹柏如,2000)。这主要是由实际数据的有限观测、带限性和存在噪声所致。在反演过程中,可通过对容许解附加一些限制条件、增加资料或附加一些先验信息作为约束条件参与反演之中,使问题变得“条件适定”。赵圣亮(1997)等利用最小二乘法和泰勒展开式进行了复杂地质条件下的地震、测井资料综合约束反演。李庆忠(1998)在地震约束反演研究中指出,低频和低频成分的波阻抗信息只能由测井资料的内插和外推获得,用地震资料的层位信息控制内插方向。Ghosh(2000)进行了带限反射数据的波阻抗反演局限性研究。Bassrei(2001)进行了广义的最大熵法(GME)的地震反演方法研究,指出 GME 法优于 SVD 法。马劲风(2000)进行了波阻抗约束反演中的约束方法研究,提出以声波测井资料的最大和最小速度、速度包络、中值滤波及速度差结合作为约束条件的新方法,可以有效地降低噪声对反演结果的影响,减少解的非唯一性,提高井点以外地震资料反演结果的可信度。

随着地球物理学,特别是勘探地球物理学的发展,20 世纪 90 年代中后期,出现了更多以非线性反演理论为基础的多种反演算法,如模拟退火反演、概率法神经网络反演、遗传算法反演等。这类反演的初始模型是根据低频模型的先验概率产生一个随机层速度模型,与测井约束反演由测井内插高频模型有本质的区别。反演过程针对非线性、多参数、多极值的大型组合优化问题,采用模拟退火、神经网络等全局优化算法,寻找目标函数的最优解。在这期间,地震特征反演、地质统计与随机模拟反演研究得到了较快的发展。地震特征反演在测井数据段和相应的地震数据段的特征间建立了关系,修改每个道位置的权值,使相应地震段的权值叠加,形成与地震数据的最佳匹配。地质统计和随机模拟方法是基于地质统计学原理的一种反演算法,它将地震反射资料、地质模型以及地质统计数据相结合,运用了模拟退火算法,统计模拟中运用协克里金、高斯等算法,把在井点位置得到的地震、地质及测井数据的统计关系,运用非线性、确定性与非确定性数学算法和一些空间约束条件进行模拟,然后在整个目标空间推而广之,以求最大限度地利用所有资料,并使反演结果与已知条件充分吻合。白彦彬(2002)针对波阻抗反演中的难点,充分考虑了沉积模式的特征,采用贝叶斯估算理论作为地震波阻抗反演的准则,进行了在地质规律的约束下的波阻抗反演。陈遵德(2001)进行了地震储层信息智能处理方法研究,用到了 CUSI 神经网络方法。彭真明(2001)进行了地震反演储层的模拟退火、遗传算法、神经网络等非线性反演与预测。张宏兵(2003)进行了正则参数下的波阻抗约束反演,通过改变正则参数数值,利用快速模拟退火算

法,克服目标函数局部极值的限制,从而获得最优解。马如辉(2002)通过对波阻抗反演数据体和测井资料的分析,建立了地震速度数据体与地层岩性的相关关系,并利用 Wyllie 公式预测地层孔隙率,取得了接近实际的效果,延伸了叠后反演的应用领域。Chen ShuangQuan (2005)进行了蚁群优化的非线性地震反演,算法对发现全局优化值很有效。Fu LiYun (2004)进行了地震数据的声阻抗联合反演。

对于薄层的反演研究,甘利灯(2000)等进行了薄层浊积岩反演,提出了一种基于自然电位重构声波和实测声波两次反演联合进行储层横向预测的方法,对 3 000 m/s 的砂层,可以识别 4.5 m 以下的砂层。撒利明(2003)进行了储层反演油气检测理论方法的研究,研究了一套井点模型引导、地质模型和地震特征约束、动态面元控制的最优化、三维波阻抗反演方法,并在吉林四方坨子区块精细构造解释及储层预测中,识别出了 2 m 以上的薄互储层,在江苏黄珏油田储层预测中,反演出可分辨 2 m 以上的单砂体。马朋善(2005)进行了砂泥岩薄互层的高分辨率地震储层反演预测研究,指出在薄互层预测技术研究中,常因地震资料的“假象”或“陷阱”而造成解释或预测结果的错误。孟宪军(2006)进行了复杂岩性储层约束地震反演技术研究,通过应用叠后三维地震资料波阻抗反演,提出了识别、描述河道砂、三角洲、砂砾岩体和超覆层等复杂岩性储层的有效方法。

近几年,多种技术的交叉运用,又产生了一些新的反演思路(杨文采,2002)。李景叶(2003)针对时移反演问题,提出了在附加约束条件下对两组地震数据同时反演的方法,有效地利用了参考波阻抗与监测波阻抗模型之间的相似性,并参考了地震数据之间的联系。由于在反射波的波形反演中碰到非唯一性和多个局部极小的问题,Kwangjin 等提出了两种方法,即时间窗和各种频带来克服此类问题(张永刚,2004)。分频反演方法是根据目前生产中常用的稀疏脉冲反演和模型反演中存在的问题而提出的一种全新的反演方法。分频波阻抗反演,即把地震资料分成几个一定带宽的频段数据进行反演,采用最速下降法和高斯—牛顿法相结合的非线性的算法。于建国(2006)利用分频反演是依靠测井和地震资料,利用支持向量机的方法研究不同探测频率下的振幅响应(AVF),并将 AVF 作为独立信息引入反演,建立起测井波阻抗曲线与地震波形间的非线性映射关系,充分利用地震资料中的低、中、高频带信息,减少薄层反演的不确定性,从而得到高分辨率的反演结果。崔炯成(2007)等提出了一种多井分频非线性地震波阻抗反演方法,将非线性多级结构 Robinson 地震褶积型模型融合到非常规的 Caianiello 褶积神经网络中,实现了确定性和统计性两种反演方式的统一,大尺度低频分量的波阻抗剖面反映了大套地层平缓的大尺度变化,中高频分量的波阻抗剖面对局部的细节变化反映清晰。

1.2.4 地震反演的发展方向

地震反演技术于 20 世纪 70 年代开始出现,80 年代得到了蓬勃发展。它经历了从简单的地震直接反演到利用地震、测井、地质等多种信息的宽带约束反演。反演方法从线性发展到非线性及多种方法的联合应用,从单一的纵波阻抗反演发展到纵、横波阻抗的弹性反演。发展方向表现为以下几点:

(1) 多井约束地震反演的发展。特别是最近几年来,国内外石油地质、地球物理同行加快了约束地震反演技术研究和推广应用工作。约束地震反演技术以包含丰富地下信息的地震反射资料为主要资料,以地质和测井资料作为约束,来揭示地下地层特别是地下储层的属性及其含流体特征。测井约束地震反演技术,可以提高波阻抗反演资料的可靠性、准确性。

在地震反演中,测井资料如何参与并约束地震反演,地质模型如何控制引导,地质信息如何加入等是亟待解决的问题。因此,测井约束地震反演方法技术的突破关键就在于结合上,要加强地质与物探、地震与测井、反演处理与反演解释这三个方面的结合。

(2) 非线性方法的应用。近年来,基于生物学、物理学、人工智能和一些非线性科学而发展了一些具有全局优化性能且通用性强的随机搜索算法,如模拟退火法(SA)、遗传算法(GA)、混沌搜索(CS)等是全局寻优的最优化方法,这些算法克服了上述反演方法的缺点,对地球物理反演来说是一大进步。实际中许多地震反演问题均属于多参数、多极值、非线性的优化问题。因此,选用非线性全局的优化方法是得到可靠反演结构的首要条件。如何提高非线性随机优化方法应用于地震反演效果也是一个发展和研究方向。

(3) 弹性阻抗的发展及综合方法应用。20世纪90年代至今围绕波阻抗反演的各类算法以及应用成果层出不穷。弹性波阻抗反演技术是BP公司90年代在勘探开发大西洋海上油田时发展的一种AVO反演技术。与声阻抗AI不同,弹性波阻抗EI与入射角(θ)有关,它包含了岩性和AVO的信息。弹性波阻抗已经成为波阻抗反演进一步发展的方向之一,地震反演的发展正在走向AI和EI相结合、EI和AVO相结合的道路(张永刚,2002;印兴耀,2006)。

由于纵波勘探深度大、信噪比高,而横波分辨率高,对小断层、极薄层的分辨率较好,因此综合利用多波AVO可以更准确地区分岩性(孙鹏远,2004)。多波多分量地震资料反演技术的研究,代表了地震反演技术的发展方向,也是多波技术走向储层精细研究的必由之路。多波反演的研究会在今后的将来,呈现出广阔的应用前景和强大的生命力(王桂水,2004)。

今后的发展趋势将向叠前地震反演,叠后、叠前联合地震反演,多参数、非线性、联合反演方向发展。尤其是叠前地震反演技术本身的研究深度还不够,叠前地震反演和叠后地震反演技术的结合方法和技术研究还有不少待探讨的问题,还有提高地震反演精度和适应范围的问题等。地震反演的应用也将向着多学科相互渗透、多种方法软件相互集成方向发展。随着进一步的研究发展,必将使人们更科学地应用这项技术为石油、煤田地震勘探服务。

1.3 煤田地震反演现状

石油勘探地震反演工作起步较早。在石油勘探开发的实际应用中,地震反演结果并不总能如地质工作者所愿,解决所面对的所有问题,其中一个重要原因是分辨率问题和地质情况复杂。

煤田地震反演工作起步较晚,处在叠后地震反演的研究和初步应用阶段,主要技术是沿用油田上的方法和技术,但关心的重点不是砂、泥岩含量及孔、渗、饱等储层参数问题,而是针对煤田所关心的煤层厚度、薄层分辨能力问题、异常岩体侵入区与瓦斯问题、顶底板岩性问题而展开的。

1.3.1 薄煤层及岩浆岩侵入

煤层厚度的定量解释和分布情况是煤矿十分关心的问题。在煤田地震反演的实践中,唐文榜(1987)进行了地震反射法中的薄煤层的分辨能力的研究,指出界面反射系数大是从地震剖面上直接检测薄层的特别有利的条件,为地震反射法中直接检测薄煤层提供了理论

和物理实验的证明。程增庆(1991)采用振幅法、能量法进行了地震反射波定量解释的方法研究。仲其涛(2001)进行了煤层厚度反演的研究,但煤厚的预测只是从地震数据来分析,精度和可靠性有待提高。董守华(2005)利用地震资料谱矩法反演煤层厚度,对 5.5~9 m 的分叉区煤层进行研究。董守华(2004)利用地震资料的煤层反射波振幅、频率、相位、速度等属性信息进行煤田横向预测与评价,如果上层为岩浆岩而下层为煤层,那么就很难研究。所以对复杂地区仅从地震资料来进行横向预测是不行的,要进行测井资料约束下的地震反演工作。

朱书阶(2003)应用波阻抗反演对岩浆岩侵入范围作了有益探索,但要确定岩浆侵入煤层的边界,尚要对计算方法进行改进,在测井曲线及子波选取上也有待探索。张爱印(2004)对煤田的三维地震数据进行了反演。孔炜(2004)进行了地震属性的拟测井反演及神经网络煤层解释,指出地震属性选取和样本数据的选取是反演的关键。张绍红(2004)进行了联合模拟退火法和遗传算法技术在煤田地震反演中的应用,许永忠(2004,2006)进行了煤田采区岩浆岩分布及薄煤层的地震反演技术的应用研究,取得了一些较好的经验。陈同俊等(2007)利用波阻抗反演解释煤层和瓦斯的方法研究,提出了用拟合的高精度 P 值剖面预测煤层瓦斯的方法,但研究工作还不是很深入和成熟,如何获得准确的煤系地层的实际速度是成功预测的关键。

可以看出,虽然目前开展了一些煤田地震反演的研究和应用工作,但对煤田地质情况下反演能力的探讨和定量分析研究工作没有开展,缺少煤田条件下薄层反演的理论指导和依据。

1.3.2 提高煤层开采上限

我国是世界上煤矿水文地质条件最为复杂的国家之一,煤矿水害是仅次于瓦斯灾害的第二大煤矿灾害性事故(刘树才,2005)。我国国有煤矿中半数具有突水危险,突水威胁严重制约煤矿生产的集约化和规模化发展。从 20 世纪 50 年代我国就开始了煤矿突水机理方面的研究,涌现了一批代表性的理论,如突水系数理论、下三带理论、强渗通道理论、关键层理论等(刘卫群,2006)。其中,东部煤田有些矿区由于地质条件的限制,开采上限确定得不合理将引起严重的水害问题。

吕卫东(2003)、王祥河(2004)、朱岩华(2004)、苏毅(2004)等进行了煤矿提高开采上限和顶板隔水层的研究和实践工作,但主要是通过电法、钻探和数值模拟进行,有必要进行地震反演解决第四系含隔水层的岩性问题。

1.3.3 煤层顶底板岩性

从目前收集的资料看,对于煤矿关心的顶底板岩性评价问题还没有用到直观的地震反演资料,地震反演技术还没有和煤矿开采中顶底板评价相结合,借助地震反演技术确定煤层顶底板岩性的工作可以说是空白,特别是深部的奥灰水由于没有测井资料而没有这方面的研究。

总体来说,地震反演技术在煤田的研究中刚刚起步,在解决岩性方面的潜力还远远没有充分发挥出来。地震反演资料主要目的就是提高地震资料的纵横向分辨能力和提供岩性信息,但每种反演方法都有其特点。影响地震反演煤田应用的原因主要有:缺乏对不同反演方法的原理、算法特点及适用性的深入研究,没有对影响反演效果的因素做全面系统的对比分析,因此在实际应用中还要加强煤田地震反演的综合应用分析工作。

由于叠前反演所用的是角道集地震数据的限制和煤田研究重点的不同,目前煤田还是以测井约束的叠后波阻抗反演为主。

1.4 地震反演方法

根据反演计算采用的计算方法不同,反演思路差异,地震反演的叫法也很多。随着地震反演技术的发展,新的计算方法和反演思路不断涌现,现从反演实现方法上来介绍。

1.4.1 道积分反演

道积分是利用叠后地震资料计算地层相对波阻抗的直接反演方法。因为它是在地层波阻抗随深度连续可微条件下推导出来的,因而又称连续反演。道积分就是对经过高分辨处理的地震记录,从上到下作积分,并消除其直流成分,最后得到一个积分地震道,通过近似,把反映岩层间速度差异的反射系数转换成反映地层本身特征变化的波阻抗,可直接以岩层为单元进行地质解释。这种方法无须钻井控制,在勘探初期即可推广应用。

道积分反演方法的优点是:① 递推时累积误差小;② 计算简单,不需要反射系数的标定。缺点是:① 受地震固有频宽的限制,分辨率低,无法适应薄层解释的需要;② 要求地震记录经过子波零相位化处理;③ 无法求得地层的绝对波阻抗和绝对速度,不能用于定量计算储层参数;④ 在处理过程中不能用地质或测井资料对其进行约束控制,因而其结果比较粗略。

1.4.2 递推反演

递推反演方法是根据反射系数进行递推计算地层波阻抗或层速度的方法,其关键在于由原始地震记录估算反射系数和波阻抗,测井资料不直接参与反演,只起到标定和质量控制的作用,因此又称为直接反演。其结果的分辨率、信噪比以及可靠程度主要依赖于地震资料本身的品质,因此用于反演的地震资料应具有较宽的频带、较低的噪声、相对振幅保持和准确成像。测井资料,尤其是声波测井和密度测井资料,是储层地震预测的对比标准和解释依据,在反演处理之前应仔细校正,使其能够正确反映岩层的物理特征。

递推反演的技术核心在于由地震资料正确估算地层反射系数,比较典型的实现方法有基于地层反褶积方法、稀疏脉冲反演方法、测井控制地震反演方法、频域反褶积方法等。递推反演方法具有较宽的应用领域。在勘探初期只有很少钻井的条件下,通过反演资料进行岩相分析确定地层的沉积体系,根据钻井揭示的储集层特征进行横向预测。递推反演资料的分辨率相对较低,不能满足薄储集层研究的需要。

基于地震资料直接转换的递推反演方法比较完整地保留了地震反射的基本特征(断层、产状),不存在基于模型方法的多解性问题,能够明显地反映岩相、岩性的空间变化,在岩性相对稳定的条件下,能较好地反映储集层的物性变化。缺点是算法相对复杂,而且在具体实现过程中存在着一些难点,如低频分量的补偿问题:在有井的情况下,以井为控制,能够得到该点的低频分量,但是井与井之间低频分量的内插又是一个难题,简单的线性内插只有在地层等厚且产状平缓时才行。即使利用地层产状起伏来控制内插,还有高低频带的衔接问题,因为低频成分一定要与子波的谱“互补”。在无井区,波阻抗反演往往要从叠加速度谱中提取低频分量,又存在着速度谱的质量和分辨率问题,这些问题解决得好坏直接影响着地震反演结果的可靠性。

1.4.3 基于模型的反演

基于模型反演方法的基本思路是:先建立一个初始地层波阻抗模型,然后由此模型进行地震正演,求得合成地震记录,将合成地震记录与实际地震记录相比较,根据比较结果,修改地下波阻抗模型的速度、密度、深度值及子波,再正演求取合成地震记录,与实际地震记录比较后,继续修改波阻抗模型,如此多次反复,从而不断地通过迭代修改,直至合成地震记录与实际地震记录最接近,最终得到地下的波阻抗模型。基于模型反演的优点是反演结果的分辨率较高,缺点在于模型对反演结果起着控制作用,因此如何构建合理的地质模型是关键。

基于模型的反演方法主要有广义线性反演、测井约束反演、地质统计学反演、遗传算法反演、混沌反演和神经网络反演等。

1.4.3.1 广义线性反演

广义线性反演是另一种建立在模型基础上的反演技术。它也是通过模型正演与实际地震剖面作比较,根据误差的情况,在最小二乘意义上,或者在误差绝对值之和最小的意义上,最佳地逼近实际数据,从而迭代反复修改模型,直到满意为止。该算法将模型看做一个线性系统,其反演问题归结为求解一组线性联立方程组。由于观测数据一般多于模型参数数目,因此方程组是超定的。广义线性反演即通过奇异值分解的算法对超定方程组进行求解。

1983年,Cooke和Schneider在Geophysics上发表了《反射地震资料的广义线性反演》一文,给出了合成记录和野外实际记录的反演结果。邹振恒和杨文采(1987)对Cooke的方法进行了改进,用基于反演模型的Taylor展开,采用迭代的方法使模型响应与实际观测之间的误差响应在某种范数意义下达到最小。

1.4.3.2 测井约束反演

测井约束反演是目前生产上广泛采用的基于模型的地震反演方法,该方法把地震和测井有机地结合起来,突破了传统意义上地震分辨率的限制,理论上可以得到与测井资料相同的分辨率,是多井的勘探后期和油田开发阶段精细描述的关键技术。其基本思想是:综合地震横向可对比性和测井纵向高分辨率的优势,建立初始地质模型,采用迭代的计算方法,通过不断修改地质模型,使模型正演合成地震数据与实际地震数据的误差达到最小,最终的模型数据即为反演结果。

测井约束地震反演结果的低、高频信息来源于测井资料,构造特征及中频段取决于地震数据。多解性是测井约束地震反演的固有特性,减小多解性的关键在于正确建立初始模型。测井约束地震反演结果的精度不仅依赖于研究目标的地质特征、钻井数量、井位分布以及地震资料的分辨率和信噪比,而且还取决于处理工作的精细程度,如测井资料的环境校正、层位的精细标定、子波提取等。

地震资料在基于模型反演中主要起两方面的作用:其一是提供层位和断层信息来指导测井资料的内插外推建立初始模型;其二是约束地震有效频带的地质模型向正确的方向收敛。地震资料分辨率越高,层位解释就有可能越细,初始模型就越接近实际情况,有效控制频带范围就越大,多解区域相应减少。因此,提高地震资料自身分辨率是减小多解性的重要途径。在基于模型地震反演方法中,不适当地强调以下两个概念容易给人造成误解:一是强调分辨率高,因为这种方法本身以模型为起点和终点,理论上与测井分辨率相同,问题的实质在于怎么更好地减少多解性。二是强调实际测井与井旁反演结果最相似。建立初始模型过程的第一步就是测井资料校正,使合成记录与井旁道最佳吻合,用校正后的测井资料制作