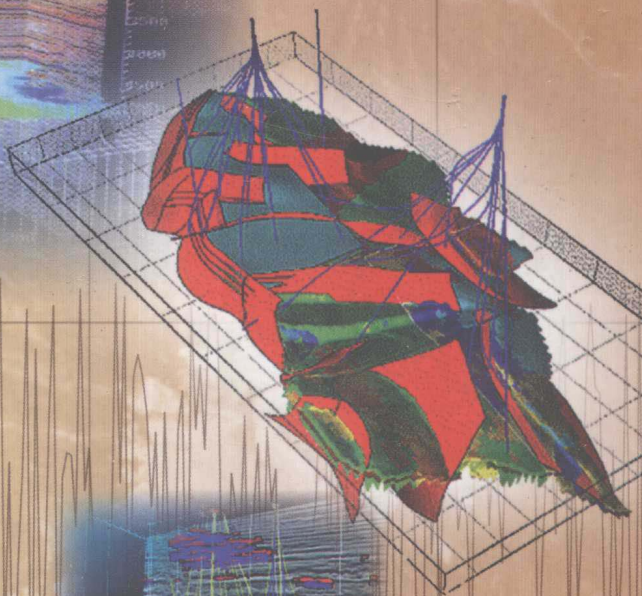
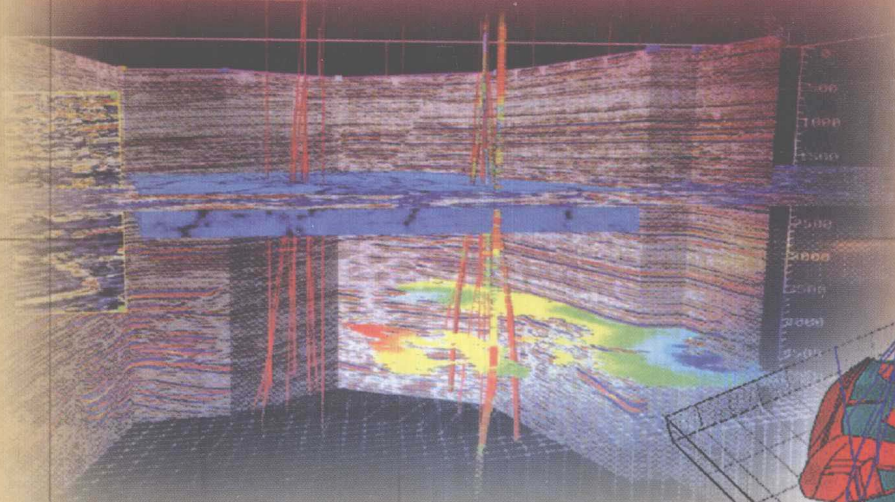


储层地震技术新进展

New Progress in Reservoir Geophysics

□ 主 编 全兆岐
□ 副主编 印兴耀 李振春



石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

储层地震技术新进展/全兆岐主编.-东营:石油大学出版社,2004.10

ISBN 7-5636-1694-2

I.储… II.全… III.油气田-储集层-地震勘探-研究 IV.P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 099155 号

书 名:储层地震技术新进展
作 者:全兆岐主编

责任编辑:周洁韶

封面设计:王凌波

出 版 者:石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://sunetr.hdpu.edu.cn>

电子信息: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

排 版 者:石油大学出版社排版中心排版

印 刷 者:青岛星球印刷有限公司

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本: 210 × 285 印张: 18.875 字数: 580 千字

版 次: 2004 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1 - 500 册

定 价: 90.00 元

《储层地震技术新进展》

编委会名单

顾 问：杜世通

主 编：仝兆岐

副 主 编：印兴耀 李振春

委 员：(以姓氏笔划为序)

王永刚	乐友喜	仝兆岐	印兴耀	刘 展
孙成禹	吴国忱	宋 娟	宋建国	宋维琪
张广智	张军华	张繁昌	杜世通	杜启振
杨国权	李振春	周家惠		

序

杜世通教授是我国著名的地球物理学家。1934年出生于山东省黄县,1960年毕业于苏联莫斯科石油学院石油地球物理勘探专业,获矿山工程师证书。回国后在北京石油学院任教,1978~1980年期间任物探教研室主任,现为石油大学(华东)应用地球物理学教授,博士生导师。

2004年10月,是杜世通教授70寿辰。从杜教授1955年初出国门,投身石油物探行业算起,到今天已经是第50个年头了。10月下旬,在山东东营召开了“恭贺杜世通教授70寿辰暨物探学术研讨会”。从会议收到的众多论文中,我们精选出40篇,编纂了这本《储层地震技术新进展》论文集。谨以此献给杜教授70寿辰,并祝贺他从事石油物探事业50年。

杜世通教授长期在石油高等教育岗位上教书育人、辛勤耕耘、默默奉献,为发展我国的石油物探教育事业做出了重要贡献。由于他的突出成绩,曾先后荣获劳动模范、山东省优秀共产党员等荣誉称号。1988年获石油工业部科技进步一等奖,1990年获国家科技进步二等奖。1991年获石油工业有突出贡献的科技专家称号,1992年获国务院颁发的政府特殊津贴。

杜世通教授曾先后为大学本科生讲授过《普通地球物理勘探》、《地震勘探》、《地球物理资料综合研究》、《地震波动力学》等专业课,为硕士研究生讲授《地震波动力学理论》学位课和《波动方程数值解》、《有限单元法》、《地球物理数据反演》、《油藏描述中的地震研究方法》等专业选修课,并编有《地震波动力学》等研究生和本科生教材。自1978年以来招收硕士生,1994年开始招收博士生,先后培养了30余名硕士生和10余名博士生。如今他的许多学生,都已成为石油高校和研究单位的骨干力量。

杜世通教授还结合教学开展了多项科学研究工作,力求做到理论与实际相结合。坚持开展物探方法前缘课题研究,在国内外发表过30多篇学术论文,为我国的石油物探技术进步做出了突出的贡献。

1962~1964年,他应用统计通讯理论,对重磁资料处理的数学方法进行过早期研究。1970~1974年,参加了石油部组织的援阿(阿尔巴尼亚)勘探工作。在地震速度横向变化及解释方法、地形校正等方面的研究中做出了创造性贡献,取得了较好的地质效果,获得阿方的高度评价。1975~1979年,他参加胜利油田依里斯60机地震资料数字处理方法研究和程序设计,使用图论算法实现了地震速度谱的自动整理和拾取。此项研究成果获1980石油科技进步一等奖。1980年赴美国学习,参加PDP-11计算机和地震资料处理系统的引进工作,为该系统在我国和我校的推广使用做出了重要贡献。1984~1985年赴苏联进修,在苏联原有的地震波调向法原理基础上发展了一套CT积分变换数字处理技术,获得了明显的应用效果。1988年赴美短期访问,取得了“有限元模拟和偏移算法”和“各向异性介质波动方程数值解”两项重要研究成果。1986~1990年,参加了“七五”国家重点科技攻关项目“油藏描述技术”的研究,他将模式识别方法用于油藏地球物理异常目标的预测,为储层研究提供了手段;将随机过程滤波理论用于地震参数到储层物性参数的转换,建立了储层孔隙率分布的预测技术,形成了处理能力,此项课题成果居国内领先地位。“八五”期间,他参加的“胜利油田井间地震技术试验研究”顺利通过中国石油天然气总公司验收。1990年以来,他组织研制并开发的“地球物理资料联合反演技术”、

“地震资料高分辨率处理技术”等软件现已推广到胜利、吉林、长庆等油田及物探局和南海石油公司等生产研究单位,深受广大用户的青睐。在此期间,他多次赴俄罗斯和美国参加国际会议与进行学术访问和交流活动。并于1992年和1994年两次邀请俄罗斯专家到我校讲学和从事科研工作。

此外,杜世通教授还长期担任《石油地球物理勘探》及《石油大学学报》等杂志的编委。如今,已届古稀之年的他仍然坚持奋斗在教学第一线,为研究生开设“地震勘探新技术”等课程,指导博士研究生,并致力于“地震资料高分辨率处理”、“地球物理资料构造层序解释”等方面的研究。

杜世通教授不仅是一位工作严谨、不断创新的学者,而且是一位诲人不倦的师长。在业务上,他对学生的要求十分严格,同时又鼓励学生勤于思考、大胆探索、锐意创新,引导他们从学术理论和生产实际的角度去解决一些前沿课题。在教学中,他以严谨的理论结合丰富的实践,紧密跟踪国际先进水平,把最新的研究成果反映在教学内容中,深受学生欢迎。他始终坚持教书育人,非常重视对学生的政治思想、道德品质和心理素质的教育,告诫学生要实事求是,养成良好的职业道德,“不求名,不求利,只求实”的思想始终贯串于他的学术生涯和教育过程中。

最难能可贵的是,他不为大城市优越的生活条件所心动,坚持扎根东营,默默奉献自己,为我校广大师生树立了一个学习的榜样。在他的影响下,我校地球物理系(原物探教研室)团结向上,拼搏进取,克服困难,如今已进入一个蒸蒸日上的新时期。

杜世通教授也是我的专业老师,他高尚的品德,渊博的学识,严谨的治学态度使我受益匪浅终生难忘。杜老师是我们教师的楷模,值得全校教师学习。他虽届古稀之年,仍然壮心不已,这种“老骥伏枥,志在千里”的精神,值得尊敬。我的这篇序言,也算是向他学习的一个号召。

在此,我谨代表全校师生、他的所有学生和我个人,祝愿杜教授健康长寿,为我校的发展、为我国石油物探事业的发展再立新功。

石油大学(华东)校长 仝兆岐

目 录

储层研究中的地震技术·····	杜世通(1)
西部山前冲断带油气勘探地震技术的几点思考·····	熊 翥(22)

Migration Deconvolution versus Least Squares Migration·····	Jianhua Yu(28)
地震叠前成像的地质适应性研究——波动方程法叠前深度偏移对复杂地质体的适应性初探·····	····· 韩文功 孟宪军 李振春(35)
共聚焦道集偏移速度建模方法研究·····	王延光 陈世军 余大祥(45)
基于 CFP 技术的 AVP 分析初探·····	李振春 吕彬 张建磊(51)
基于迭代反演和共聚焦点技术压制多次波·····	李振春 马光凯 穆志平(57)
非双曲时差速度分析·····	杜启振 李辉(64)
复杂地表条件下的 CRS 叠加及其应用·····	孙小东 李振春 赵建璋(68)
三维连片处理技术及应用研究·····	毕丽飞 张有芳 李振春(73)
转换波处理中共转换点的定位及应用·····	毕丽飞 苗永康 李振春(80)
静校正方法技术综合评述·····	王月英 张军华 吕宁(86)

弹性波阻抗反演及岩性参数提取·····	印兴耀 张繁昌 袁世洪(98)
约束反演中的三维复杂约束模型研究·····	孟宪军(107)
一种叠前数据的弹性波正演方法及其实现·····	张繁昌(113)
测井数据横向能量均衡及其在地震反演中的应用·····	张繁昌 印兴耀 高仁安(118)
一种确定地震子波长度的方法·····	张广智 印兴耀(123)
非线性地震波形反演综述·····	邢文军 王永刚(129)

Using porosity and sandstone content extrapolation to find HZ32 - 3 - EN oil field in South China Sea·····	····· 梁光河 何樵登 程永明(136)
地震属性复合分析技术·····	孙夕平 杜世通(145)
支持向量机方法在储层参数预测中的应用·····	乐友喜 袁全社(152)
砂泥岩互层的地震属性优化与储层参数反演·····	王永刚 乐友喜 张军华(158)
时频分析技术在博东三维区储层预测中的应用·····	杨国权 孙成禹 孙夕平(163)
河流相储集体的精细解释与描述·····	张军华 杨国权 王永刚(168)
相干体技术在埕东凸起北坡河流相研究中的应用·····	杨国权 曹丹平 王永刚(174)
河道砂体含油性预测方法研究·····	曹丹平 王永刚 杨国权(180)
地震小波变换和自组织网络联合边界检测·····	宋维琪 陆慎强(187)

梁南沙四段沉积相和沉积微相的研究	周家惠 杨国权 李振春(192)
------------------------	------------------

井间地震技术

井间地震处理技术及其应用	左建军 李振春 孔庆丰(199)
井间地震速度场反演方法	乐友喜 袁全社(204)
深度域地震资料若干问题初探	何惺华(210)
井间地震技术中几个关键问题的探讨	董晓燕 宋建国 王永刚(221)
三分量井间地震资料预处理	董晓燕 宋建国 马阿丽(227)

地震波传播理论

TTI 介质弹性波数值模拟	吴国忱 王华忠(232)
EDI 介质的正演模拟与反演方法探索	朱兆林 王永刚 赵爱国(243)
复合线性过渡层的地震反射特征研究	孙成禹 张玉华 王学彩(251)
对地震波频散问题的讨论	孙成禹 李胜军 林庆(258)

综合地球物理

东海沟弧盆体系中生界残留厚度及构造特征	刘展 范丰鑫 吴时国(266)
地壳岩石流变实验研究	宋娟 周永胜 何昌荣(275)
重震联合解释技术反演东营凹陷盐膏层	刘展 赵健 李云平(280)
MT 资料三维富里叶变换偏移方法研究及应用	宋维琪 吴华 冯磊(287)

储层研究中的地震技术

杜世通

石油大学(华东)

摘要

20 世纪 80 年代,石油工业中崛起了一个新的研究方向,这就是地质、地球物理、油藏工程多学科综合研究,实现储层描述与表征。前言中简要介绍了储层描述与表征的地质任务。正文中系统介绍了三维油藏描述与表征地震技术:① 三维油藏描述与表征概述;② 储层研究中的高分辨率地震技术;③ 多井约束三维地震波阻抗反演和标定;④ 地震属性分析是精细三维解释的重要方法;⑤ 利用地震属性测定储层岩石孔隙度;⑥ 储层参数转换技术;⑦ 油藏地质数字模型的建立;⑧ 地震层序分析储层预测技术;⑨ 关于油气的直接预测;这是三维储层描述与表征(地震技术)的技术培训教材,也是本研究方向研究成果的系统评述,可为从事三维储层描述与表征(地震技术)的地质、地球物理专家提供参考。

前言

20 世纪 80 年代中期,国际石油工业中崛起了一个新的研究方向,这就是地质、地球物理、油藏工程专家联合组队,利用尽可能多的、多学科资料对油藏作精细描述,精确评价油气藏,估计储层物性,目的是在成熟区油田增加储量、提高采收率,降低油气生产成本。有两个原因:一是为开发一个新油田的决策,要求对油气资源、采收率以及二次采油的潜力作准确评价。这些新油田比已找到的成熟区油田,一般都很小,地质结构又复杂,勘探开发成本很高。自 1979 年以来,油气开发、勘探成本、开发与勘探投资比不断上升;二是原油供应不确定因很多,价格极不稳定。在这种情况下,许多石油公司集中注意,致力于成熟区油田的精确描述、精细表征,以增加储量。因开发成熟区油田的重要性的增加,而导致地质、地球物理、石油工程数据综合应用和多学科专家的联合研究的决策的产生。

多学科混合队的研究目标是作好油藏管理。油藏管理是一个最大可能提高石油资源价值的经济过程。油藏管理是以最小的基本建设投资(钻井、地震、土地租金等)和生产消耗(租赁费、人头费、税金等),以最优方式的油气资源开采,实现油藏最大经济价值。石油资源的产出量应与新增资源相平衡,这是一个连续平衡过程。根据油藏管理这一定义,油田开发策略可分五个基本目标:① 降低油田开发成本,主要是以最小的钻井数,实现预定目标;② 总资源量的最优化;③ 采收率最优化;④ 降低油田开发操作成本;⑤ 经济上合理的二次采油。为此,油藏管理面临的两项任务是:① 实现油气储层的物性、流体性质、岩性及其连通性的空间分布的早期和准确的表征;② 改进油层动态监视技术,对生产状态下的油田作准确的监视和充分的管理。只依靠常规的工程数据,如岩芯分析、测井、采油数据不能为油藏描述和油层监视提供完整信息的。在油藏管理领域,地球物理至少应能在两个方面做出贡献:① 发现和识别尚未开采的新油层,增加资源量;② 利用地球物理信息,合理布井,减少干井和低产井钻井成本。改进油藏描述和油层监视的关键是使用高分辨率地球物理数据,主要是地震数据,与常规数据集成,建立油藏地质模型,为油藏模拟提供精确信息。

对油藏的研究,涉及多尺度目标。地质、地球物理、工程测试的研究尺度,从孔隙微结构对流体效应的影响,到限定油藏范围的断裂系统的研究,跨越了厘米到几十米的垂直和水平分辨率,直至整个油田。这个领域的研究,必须采用多学科信息的集成,才是最有效的、成本最低的研究方法。历史上主要用于地质勘探的地震

勘探技术,在油藏描述和油层监视中,向开发延伸,发展了崭新的研究方向,即开发地震技术,包括高分辨率三维地震及地震数据分析技术、时移地震、井间地震、多波多分量地震等,取得了重大进展。

0 油藏管理中地质、地球物理研究任务

在油藏管理的过程中,地球物理技术,主要是三维地震技术,对储层空间分布的研究,至关重要,是其它方法,如测井、钻井不可替代的。它所能解决的问题有三个方面:① 储层的几何形态;② 储层的物性分布;③ 储层的物性在采油过程中的变化,即动态监视。按油藏管理不同阶段,讨论地球物理工作的研究任务。

油田开发前期(或称早期油藏描述) 在早期发现井评价后,开发前的准备工作基本目标是油藏轮廓描述,取得最大的、可靠的储量。为此,要求确定油藏构造特征、油藏边界(包括厚度分布模式和油储横向、垂向范围)、流体边界、油藏有效厚度和体积。必要时,可能还要求确定油气驱动机制和底水范围。根据油藏轮廓描述得到的大量信息,评价油田开发的商业价值。

早期开发方案主要是布置探边井。地震数据结合少量井的控制,经常可以提供有关产层和底水范围。高分辨率地震勘探极大地改进了利用地震数据研究产油层、非产油层构造及其连通性的可能性,甚至在某些情况下判断油气的存在与否。三维地震提供的储层构造、物性分布精细图件,充分证实了它在早期油藏描述中的关键作用。三维地震在减少钻干井的风险,减少钻井工程危险性方面(如断裂带、异常高压带的预测)也是有效的。在某些方面,储层附近的井中地震测量(如离井 VSP、井间地震)作为油藏轮廓描述工具,为在井周围确定油藏范围、圈定断层位置、和其它地质不均匀体提供可靠数据。

(1) 油田开发初期 油田开发初期基本任务是合理布置开发井,以获得最大的采收率。油藏管理工程师们的主要工作是对油藏和底水特征(油藏表征)而不是轮廓的描述。必须估价储层岩性、岩相和孔隙度的横向变化,以确定储层是否连续或有流体流动阻挡存在。要确定流体分界面,分析地层压力及其对储层油气饱和度的控制,分析储层裂缝发育和分布。集成储层有关信息,建立储层地质模型,并予以验证。在此基础上进行油藏模拟,指导开发布井。油藏表征阶段的主要研究任务是估计用作油藏模拟输入的储层岩石物理性质,如岩性、孔隙度。地震地层学、层序地层学分析可提供沉积模式和岩性、岩相横向变化信息,AVO 分析可用于对储层流体的研究。三维地震,提供大量空间密集、规则分布的数据,可用来改进储层物性空间分布预测。地震数据与地质、测井数据集成,实现储层物性向井间外推,提高了横向预测能力,极大改进了所建地质模型。使用地质统计学方法,综合利用地震、测井、地质数据,间接研究储层的连通性和不均质,或者,使用井间地震方法,直接研究储层不均质,提高地震储层表征的精细度和可靠性。

(2) 油田开发期 油田开发期的主要目标是提高油藏管理效率,确保最高采收率,以降低采油成本。成功的关键是作好油层监视。实际的采油数据与预想值间的差异,可用来调整油藏地质模型,修改采油方案。根据精细的储层表征,可确定加密采油井网,增加储量和采收率。使用二次采油过程,强化油田开采。为此,检测储层中的隔离带(渗透阻挡带),估计储层的连通性,是采油阶段油藏管理的关键。地球物理方法与岩芯、测井、采油数据的集成,用来实现这一研究目标。油层不均质描述,检测开发井间的油气不均匀分布带,可助于加密井钻井计划的设计,圈定剩余油储。在这项工作中,井间地震测量,特别是井间地震反射波成像,由于它的高分辨率,可能是有用的。

(3) 强化采油期 在投资确有保证的条件下,可采用强化采油措施,提高采收率。油层的动态监视是关键的一步。实时测绘注采前缘位置,可用以控制、调整注采方案,降低二次开发成本。通常储层的不均匀和储层物性的各向异性,是影响强化采油效果,甚至于失败的原因。因此,在启动二次采油方案前,必须作好精细油藏表征。岩石物性实验表明,注采过程,引起储层物性变化,且这种变化可用地球物理方法检测。在进行二次采油的油田上,定期(间隔一定时间)作三维地震或井间地震测量,比较各次地震测量结果,可以发现储层物性的变化,从而监视注采过程和提高采收率的效果,及时调整注采方案。这项技术,近年来有较快发展,特别是定期作三维地面地震,称为时移地震,也称四维地震(虽然不准确)。许多已发表的时移地震实例,证实了方法的效

果。

油藏管理的四个不同阶段,及相应的地质任务和地球物理技术,实际上是不能绝然分割的。油藏管理和研究工作是一个连续的、递推的、不断深化的过程。在这个过程中使用着很多方法,地球物理方法是其中的一项。以三维地震为例,根据初期解释结果,制定了开发方案。在钻井后获得了新的测井、岩芯、试采、压力测试等资料,用来改进初期解释。三维数据初期解释模糊之处,清楚了。油藏模型也随之精确化。使用地球物理方法对油藏的研究,从早期油藏描述延续到采油后期的强化开发,描述油藏几何形态、预测储层物性参数、进行油层动态监视,在经济上降低成本,提高采收率,取得最佳效益。

(——摘自 David H. Johnston, Reservoir Management Introduction, Reservoir Geophysics, edited by Robert E. Sheriff, p. p. 1 ~ 5)

1 三维油藏描述与表征地震技术概述

一个油田由一口或几口探井发现后,直至油田开发期,面临一系列复杂地质问题,往往需要多学科数据集成和综合,由多学科研究人员混合组队,共同研究解决。这些问题概括为:油藏轮廓描述、油藏特征描述(表征)、油层动态监视。油藏描述导致建立油藏模型,为开发中的油藏模拟提供数据。储层研究是地质勘探各阶段的研究任务,它的研究目标是发现适于油气聚集的储层,研究它空间分布,以及有关的储层岩性、储层物理性质。随着勘探进程的深入,资料的积累,研究目标集中到对油气储集体的描述,直至油气直接预测,与油藏轮廓描述相衔接。

地震解释,随着地震勘探技术的进步,不断提高解决问题的能力,扩大研究领域。从地震构造解释,到地震岩性解释,经历了不同的阶段。地震地层学解释之后,地震资料广泛使用于地质研究。80年代中后期发展起来的油藏描述技术,大量使用地震资料,把地震解释推到了储层研究的新阶段,地震储层解释阶段。近年来,特别是三维地震技术的发展,提高了地震资料的分辨率和精细度,为储层研究提供了可靠的基础资料。地震储层描述技术有了很大发展,方法多种多样。在方法研究中,人们希望把地震资料转换为地质语言,把地震图件转换为储层地质图件,便于地质应用。这类工作称为储层预测。以油藏描述、储层预测为地质研究目标的地震技术统称为开发地震或储层地球物理。

1.1 开发地震技术

包括(4-D)时移地震、井间地震、高分辨率地震和超高分辨率地震^[9],在近十年间得到很大发展。(4-D)时移地震主要用于油层动态监视,而井间地震由于技术和经济上的原因,未得到预想的快速发展、推广和应用。当前在三维油藏描述、表征和储层预测中,三维地震,特别是高分辨率和超高分辨率三维地震技术(垂直分辨率达14英尺,约4~5 m),研究成本可以接受,地质效果突出,是采用的主要方法。

采油过程中,要求对油藏实行动态监视,研究储层及特征随时间的变化,以便有效改进油藏描述和对储层的管理。油藏监视技术是一项多学科研究项目,它包括:①地质储层模拟;②流体流动过程模拟;③岩石物理实验与研究;④地震储层成像。(时移)四维地震作为油藏监视技术,其物理基础是在油田开发期间,重复作三维地震测量。由于在开发过程中,储层孔隙空间压力和流体饱和度的改变,而改变了地层的地震响应。因此,分析地层地震响应的变化,可以推断储层的改变。发展四维地震技术,应着重研究定量评价地震实验重复性的技术和四维地震数据分析技术。油藏模型研究中的不确定因素是储层排流空间的分布。四维地震的研究目的是确定尚未排空流体的储层空间分布位置。四维地震结果依赖于储层岩石及流体参数随时间变化的估计精度。在储层尺度下的精确地震解释,进行流体阻挡层预测,要求有新的、高精度的分析工具。

1.2 井间地震及时移井间地震技术

这是储层描述和表征的重要方法。在注气过程中,由于储层饱和度与孔隙压力的改变,引起地震速度降低

和有关地震属性的改变。这些变化可用高分辨率井间地震观测到。实践证明,井间地震是达到测井尺度的储层研究技术,而地面地震和垂直地震剖面法只对大尺度储层描述是有效的。早期井间地震遇到许多实际困难,既有装备方面的,也有处理方面的。旅行时地震层析反演,经常达不到希望的高分辨率和精确度。井间地震反射剖面,虽然可以提供高分辨率的结果,但对反射剖面意义的理解不清楚,在一些情况下不能与测井资料相衔接,难以作出令人信服的解释。最新的进展表明,井间地震技术正在克服这些困难,已从基础理论研究阶段,进入成熟的应用阶段。高分辨率井间地震层析所产生的速度估计,其分辨率和可靠性已接近了声波测井;使用恰当的合成记录,已经可以实现井间地震反射剖面与测井资料的联接。

1.3 三维地震波阻抗反演和地震属性分析

当今石油物探大量使用三维地震测量。利用三维地震波阻抗反演和地震属性分析等地震信息,综合其它学科资料,进行三维油藏描述与表征的技术,经多年的研究和开发,已进入了实际应用阶段。储层特征描述技术已历经三代变化:50年代采用岩石物理方法,利用测井、岩芯和试井资料,以确定储层特征;60年代后期采用地质类比法,借助于地质类比概念,指导井间外推;80年代中期开始,采用多学科数据集成和地质统计分析方法,综合地质、工程、测井、地球物理数据,描述储层模型,及对模型的可视化、验证、使用。三维地震储层描述地震技术中,高分辨率三维地震波阻抗反演,并由波阻抗转换储层参数,是核心技术。毕竟波阻抗与各种类型储层参数之间的关系,最为直接。由于直接地震反演的不稳定性,地震波阻抗反演,多采用非地震数据,建立初始模型和约束条件,引导反演过程,以取得有意义的地质结果。三维地震提供了大量的数据和丰富的储层信息。地震属性分析就是由地震数据提取有关储层信息,进行储层描述和表征的三维地震信息分析技术。由地震转换波阻抗、地震属性到储层参数的转换,要对地震波阻抗和地震属性进行标定,使用着地质统计学方法。近年来出现大量的研究报告和成果,使用不同的地震属性进行储层描述与表征,取得地质效果。这项技术的应用基础是地震属性与储层物性之间的必然的物理联系。不管标定的方法如何完善与巧妙,找准与储层物性相关的地震属性是方法成功的关键。

以下是基于高分辨率三维地震数据分析的三维油藏描述、表征和储层预测技术评述。

2 储层研究中的高分辨率地震技术

高分辨率地震技术,近年来取得了很大的进步。采取了一系列技术措施,确保地震资料的高分辨率。这些措施包括:在数据采集中,如宽带震源、限速引爆、加权阵列组合、震源信号的可重复性、尖锐子波、极性清晰、数据采集的高采样率、压制多次波等等;在处理中,如保持高采样率、短道间距以增加总道数、宽频带、真振幅与极性、信噪比的最优选择及其它重要细节。但是,地震数据的分辨率的提高,既是喜又是忧。随着地震分辨率的提高,地震资料的复杂性也加大了许多。高分辨率资料与低分辨率资料相比,确实给处理人员,特别是解释人员带来许多麻烦。低分辨率资料,反射信号强、连续性好、构造简单、记录面貌优良,结果令人高兴、说服力强。与地震勘探中长期使用的层状介质模型符合好,既易处理,也好解释;而高分辨率资料,既复杂又不连续,对比困难,记录面貌“皱折”不雅,许多复杂的细节难以用层状介质模型说明,既难处理,也不好解释。不能继续使用地震勘探中常用的层状介质模型作分析、解释。当然,不能因它复杂而放弃它,选择高分辨率仍是明智的。高分辨率资料中保持的全部信息对未来的研究具有重要价值。根据地质研究目标,选择高分辨率处理方法,提取相关信息,作出接近实际的合理解释,才能充分利用高分辨率地震的价值。为实现这一目标,必须研究高分辨率地震解释模型和相应的处理、解释方法。

2.1 高分辨率地震处理中的地质研究目标调谐频率自适应处理

高分辨率地震采集数据中保持的全部信息,不一定对研究都是有用的。善于根据地质研究目标,从其中提出能表征研究目标的有关信息,是十分重要的。地质目标调谐频率自适应处理技术就是这样一项有效的方法。

以横向均匀层状介质为地质模型的地震勘探,分界面为其基本研究单元。分界面两侧介质波阻抗的差异,决定了分界面的反射系数,表征该分界面的反射性能。一般地说,反射系数与频率无关。反射系数是随机的。反射系数序列与子波的褶积构成了地震记录,这就是地震褶积模型。当地震勘探向开发领域延伸时,地震勘探以油气储层及其不均质为研究目标,转向小尺度不均匀体,地震勘探的地质模型和地震褶积模型,随之发生变化。

根据沉积学原理,地层沉积有一个过程,它不是随机的。显然,当地层层序(岩性或年代)分界面可分辨时,反射系数随机分布的假设是不合理的。储层研究中遇到的薄互层就是一例。在这种情况下,一组相关的分界面,无论是其符号交错或是符号相同的反射系数,构成一个反射体。研究这类反射体的基本单元为其厚度小于半波长的薄层。薄层顶底反射系数符号相反者为微分单元,薄层顶底反射系数符号相同者为积分单元。此类反射单元作为一个反射体可定义一个反射系数,即薄层顶面上反射波振幅与入射波振幅之比。由于顶、底面反射波的干涉,这个反射系数,与分界面的反射系数不同,依赖于入射波的频率,是频率的函数,即所谓的反射系数谱。当薄层厚度为 $1/4$ 波长时,反射波振幅或波峰、波谷幅度为最大,这个厚度称为调谐厚度,最大振幅称为调谐振幅,相应频率称为调谐频率,此处对应反射系数谱的极大值。调试处理系统的响应频率,与研究目标调谐频率相适应,则所期望的反射体可望在记录背景中显露出来。当处理系统的响应频率低于调谐频率,单元反射振幅降低而不可分辨;当处理系统的响应频率升高时,薄层顶、底面逐渐得以分辨,但记录振幅降低,可能不易识别。根据研究目标,选择调谐频率,调试处理系统响应,与之相适应,使研究目标逐步在记录中显示出来,以识别和分辨小尺度目标,提高地震数据分辨率,改进信噪比。这就是地质研究目标调谐频率自适应处理思路。实现这一思路的方法,应是高频、高分辨率处理技术。在这方面研制有效的应用技术,对开发地震是有现实意义的。

根据这一思路,可以设想研究步骤应包括:① 研究、分析储层目标的地质、地球物理特征,根据已知资料判断研究尺度;② 获取研究所必须的宽频带地震数据;若使用老资料,要研究改进资料以适应研究需要的可能性和有效方法;③ 根据获取或改进后的地震资料,研究解决指定地质目标和问题可能性;④ 选择与加强研究目标的调谐频率,使它在记录背景得以分辨和显示,以便可靠识别;⑤ 输出高分辨率地震数据,研究地质目标外形和内部结构;提取地震属性,以研究岩性和储层表征。

2.2 层序框架下的高分辨率地震解释思路

人们在对比高分辨率地震资料时,都会发现资料复杂了,记录的连续性差了。与常规的中、低分辨率资料比较,同相轴中断、分叉现象增多,经常在两个平行同相轴之间,出现与之不整合的短同相轴,以往的地震相分析出现了疑问。这是高分辨率地震资料的正常的特点。当对客观事物观测尺度改变时,观测的精细程度也跟着发生了变化。一个地质(年代或岩性)分界面,在中、低频地震资料中表现为一个连续的、光滑的镜面反射界面,在高分辨率资料中,却显示出了它的复杂结构,显示出进一步的地质现象。问题是要有相应的解释方法。

在地质研究领域,近十年来层序地层学的发展引人注目。层序地层学是地层学的一个分支,它研究在年代地层学框架内岩石之间的关系,其中岩石继承顺序是周期性的,且由有相关成因的一组整合地层组成的层序体。层序体为相对海平面变化所控制,它由海平面低水位开始,并作为其顶、底边界,由不整合面所限定。在层序分界面之间,一个理想的层序体由准层序构成。准层序是海平面相对变化或物源发生变化的记录,为一组在成因上相关的地层或地层组整合连续体,厚度较薄,时间跨度较小,以海侵面或相关界面为分界面。准层序以海平面上升为其终结。准层序通常在地震分辨率之下,但是,其边界产生的反射经常是时代地层学地震界面。层序地层学应用于不同尺度的研究。这意味着层序体其实质具有分级特征,即在任何尺度上具有相同的特征。层序地层学为沉积系统和沉积相解释提供了框架。高分辨率地震勘探,已使它的探测波长逐步接近了低阶(高频)层序体,甚至准层序。层序地层学所推断的许多地质现象和沉积层的细微结构,部分地已经在地震数据中显示出来。利用高分辨率地震数据研究层序体的外形和内部结构已初具可能。高分辨率地震资料比普通分辨

率的资料要复杂,正是精细地质结构的反映。精细层序地层模型远比层状介质模型复杂,是解释复杂化了的高分辨率地震资料的依据。精细层序地层学为高分辨率地震解释提供了框架。层序模型的变化可能很多,特别是四级、五级层序,要求地震解释方法对可能的变化要敏感。在高分辨率地震采集、处理取得进展的今天,系统研究数据解释方法,就成为紧迫的课题。以上便是提出在层序框架下高分辨率地震解释思路的依据。

根据这一思路,可以设想在层序框架下高分辨率地震解释研究步骤应包括:① 建立工区层序地层地质模型;② 改进地震资料分辨率的处理,以求突出、显示层序体的外形和内部结构;③ 针对研究目标及其地质、地球物理特征,设计、提取地震属性,对地震属性作出可靠的地质解释;④ 高分辨率地震储层预测与储层表征。在不同的层序部位,如海进体系域、高水位体系域、低水位体系域,分别发育着不同的储集体。利用高分辨率地震资料寻找各类储集体,是地震储层预测的任务。高分辨率地震资料的精细层序地层学解释为发现更多的非背斜油气藏提供了一个新途径。储层表征应在可靠的储层预测的基础上进行。根据储集体的地质、地球物理特征,选择合理的高分辨率地震资料地震属性,预测储层参数空间分布。层序地层框架及其地质解释,无疑将提高储层预测与表征的可靠性。

3 井约束三维地震波阻抗反演和标定

三维油藏特征描述,要求综合不同类型的数据,实现对储层实际的描述,并尽量减少有关的不确定性。测井和岩芯资料,可以提供有关许多储层特征的垂直变化信息,但只限于井孔附近区域。三维地震资料在描述离开井孔以外区域储层的不均质起着重要的作用。三维地震资料,特别是高分辨率地震资料,有助于对储层内部结构的了解。地震振幅与波阻抗变化有联系,因此,也与许多储层物性有关。使用三维地震波阻抗反演的方法,确定波阻抗空间分布,进而作出标定,转换为各种油藏参数。在这项研究中,高分辨率三维地震资料的多井约束三维地震波阻抗反演和标定,是关键技术。在这个研究领域,有几项成熟的技术,取得了相应的成果。

3.1 叠后地震数据的多道三维地层反演^[1]

基于一个稀疏层状声阻抗模型,使用迭代多道的反演算法,将三维零偏移距的地震偏移数据体,转换为声阻抗。所产生的声阻抗模型为全局最优。因为它不包含测井数据的显式输入,这个声阻抗模型可以与测井资料对比。

地震数据的声阻抗转换是非唯一性的。必须引入一些验前信息,以确保提取有实际地质意义的声阻抗解。声阻抗模型的地震响应与实际地震记录整体比较,沿层位测量误差。为使模型参数的概率函数为最大,应使所得误差为最小。在这个过程中,声阻抗模型的分界面将趋于与地震反射体一致,并使随机的地震噪音平均化,加强弱的、但横向相关性强的地震反射波。这一特点,改善了对薄层的分辨率与拾取的可能性。一般说,三维地震振幅可能由于空间采样率不足和低信噪比而受到畸变。通过使用验前信息和稀疏模型参数化而进行的三维反演,可以克服这些数据方面的问题。该算法保留和加强了三维地震数据中固有的空间信息,并避免使地震转换的声阻抗过分地与测井一致。算法允许假定一个不准确的初始模型和简单的声阻抗信息,进一步减少井的控制。参数化的稀疏模型,联入大量地震采样数据,产生一个单一的模型参数,并逐步达到稳定的模型参数估计和随机噪音的衰减。

程序的输入为处理后的三维地震数据块及相应的子波和简单的三维宏观模型。使用少量的三维地震主要时间层定义三维宏观模型的几何形态。宏观模型中的声阻抗可以是垂向变化的,也可以是横向变化的。可以置入声阻抗约束,以保持声阻抗模型的平滑,在给定的分界面内是最优化的。声波测井资料用来与主要的时间层位联接,估计在每个宏观模型区间的平均层速度,定义声阻抗的极大值和极小值。若工区内许多井资料可以使用,则可以建立一个验前模型参数概率分布图,用以采集模型空间参数。

问题采用模拟退火法(SA)求解。使用了基于 Metropolis 算法的蒙特卡罗过程,适用于多模式特点的非线性过程。从综合观点来看,三维地震波阻抗反演问题的解是复杂的。执行过程中,巨型的三维数据体必须分割为

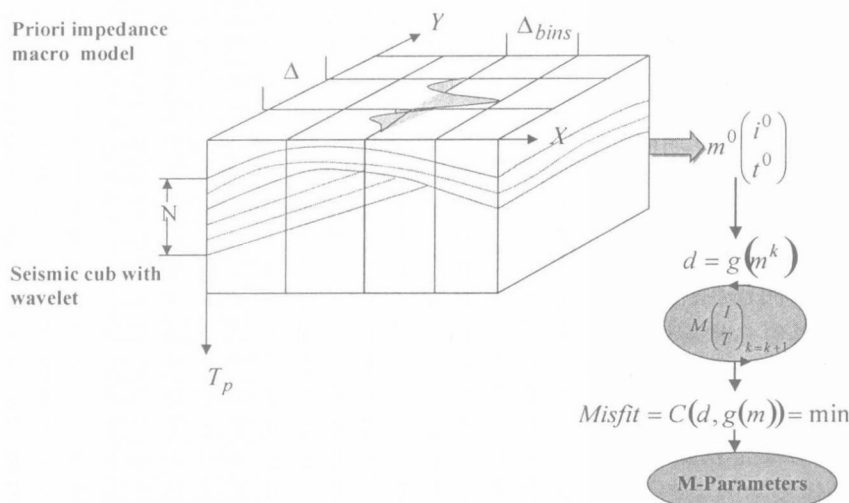


图1 多道三维地层反演

相互重迭的数据块。每个数据块的未知模型参数的个数,一般控制为 10 000 个。应避免超过这个数目。因为处理时间随未知数个数的增加而急剧加大。因此,单元数据块的大小,与处理时间有关,也依赖于如何保持计算结果。按顺序反演各个单元数据块,逐步扩展到局部声阻抗场的所有反演地震道。

3.2 叠后地层反演^[2]

根据验前信息进行地层反演的方法分三个阶段实现:① 三维井资料与地震资料定量标定;② 三维声阻抗模拟;③ 地层反演。

a) 三维井资料与地震资料定量标定的目的是根据井与地震资料的联接,提取面向目标的单一算子。这项标定包括了三个步骤:功率谱估计,相位估计和单一标定算子的确定。使用多道、多线相关分析,作出功率谱估计。这项分析的目的是从三维地震数据集合中估计相关信号和不相关噪音。在计算相关信号功率谱的基础上,构造一个初始零相位带通的算子。信噪比估计是地层反演的关键参数。根据零相位算子和声波测井资料计算零相位合成地震记录。然后,在每个井上计算合成地震记录与井旁地震道的相关系数,实现线性相位估计,以便分析它们之间的可拟合性,评估最优相位旋转角。最后,从拟合最好的数据中估计标定算子。其中,考虑了公共相位旋转角的选择,剩余时移最小及采用平均振幅,而达到一个合理的折衷。在这个阶段,定量确定和分析了三个主要参数:每口井上的相关系数、时移量和算子振幅。

b) 三维声阻抗模拟,引用构造与地层学验前知识,提供一个三维相关的初始声阻抗模型。在这个模型的建立过程中,使用了声波测井资料内插,根据零相位反褶积后的三维地震资料集合,作出区域构造和地层学解释,确定具有均匀性质的地质单元空间分布,定义模型的几何形态。

c) 地层反演,综合了三维地震振幅的变化。初始的三维声阻抗验前模型图象,在联入三维地震数据之后,将被更新。为此,使用了验前信息多道反演方法^[3]。地层反演产生的最终结果是最优声阻抗模型及三维反射系数数据。后者可用于精细的地震解释。

3.3 声波测井与地震资料联合反演^[4]

与上述两项声阻抗转换技术不同,声波测井与地震资料联合反演,使用了声波测井与地震数据的迭代拟合、联合反演算法,可以有效地改善两类数据的相关性。结果得到统一的地震地质模型,用作声阻抗反演的初始模型和约束条件。反演结果得到的反射系数数据,经平滑滤波后输出,作为高分辨率地震数据用作精细的地

震地质解释;同时反射系数经标定后,可转换为声阻抗数据,进行地层学解释和油藏参数转换。联合反演方法中使用的有效地震地质模型,是声波测井与井旁地震道迭代拟合,联合反演得到的一维地质模型,其垂直分辨率接近于测井资料,以地震采样率为限。用这样的声阻抗模型,求解地震反演算子,更准确可靠。在有多井资料时,可以实现多井约束。对每一口井实行联合反演,获得地层反演算子,然后,估计其空间变化。根据算子稳定性和各个井上的相关系数,确定地震数据地层反演算子和内插、外推算法。根据有效地震地质模型,实现多井约束地震反演,比采用验前信息、稀疏宏观模型,求解地震声阻抗转换这一非唯一性问题,获得有实际地质意义的解答,更精确、可靠,对薄层、细微地质结构的分辨率更高。

波阻抗反演,有两个问题。一是由地震记录恢复的反射系数序列,通常是带通的,缺少高频和低频信息。特别是缺少低频成分,这是由地震数据反演波阻抗面临的严重问题,克服它也比较困难。二是地震记录中含有相干和随机噪音,使反演的反射系数序列,不是真的反射系数序列。存在很多的干扰源,对真反射系数的恢复造成干涉,如多次波的存在,透射传输损失等。这样的系统误差随深度而积累。声波测井与地震资料联合反演算法,在克服上述缺点方面是有效的。声波测井资料中包含着地震记录中所缺少的高频和低频信息。以有效地震地质模型为初始模型和约束条件的约束反演,实现了对地震模型反射系数序列的高频补偿和低频拓宽。对高频补偿的效果要比低频好,补偿低频成分要困难的多。工业用的地震波阻抗软件 SEISLOG 是对地震波阻抗做低频趋势补偿,而声波测井与地震资料联合反演是对反射系数序列做频带补偿,对低频段(10 Hz 以下)补偿的效果有时不理想,但对高频成份的补偿优于对地震波阻抗做补偿的算法。对高分辨率地震资料(采样率 1ms),往往需要在高频频带内做反演的反射系数序列的平滑,这会对低频频带有损害。必要时,可对地震波阻抗再做低频趋势补偿。

3.4 高分辨率地震反演波阻抗剖面和数据体

由声波测井资料解释得到的声学速度剖面,经统计整理建立了有效地震地质模型。这个模型与井旁地震记录作联合反演,实现了与地震模型的拟合,改善了它们之间的相关性。在井位点上,我们已经有了测井与地震资料统一的有效地震地质模型。下一步的处理,要求根据地震剖面实现对统一的有效地震地质模型的外推和插值。为此,可以对地震剖面做子波反褶积,得到近似于反射系数的地震时间剖面,这是地震数据处理中的地层反褶积算法。在地球物理数据反演方法的范畴内,我们设计了带约束条件的地震反演算法,即在子波反褶积时,以有效地震地质模型中的反射系数序列作约束条件,对地震剖面进行反演,获得地震反射系数剖面,并由反射系数剖面换算地震波阻抗剖面。这样,我们实现了井位点上的有效地震地质模型沿地震测线的外推和插值,为地震资料解释提供了高精度的数据。地震反演波阻抗剖面,可以用作岩性解释;地震反射系数剖面,是一个高分辨率时间剖面,可以用作小尺度的地质现象的精细解释。

从井位点出发,逐道进行反演,直到地震剖面的两个端点。作为反演结果,可以获得反射系数剖面。若在反演过程中计算了合成地震记录,可以将各反演道的合成记录以剖面形式输出,称为拟合剖面。拟合剖面与原地震剖面之差,称为残差剖面。拟合剖面和残差剖面的输出,都是为了检查反演过程的可靠性,是可选功能。作为反演主要结果的反射系数剖面,可以经平滑滤波后以普通的地震时间剖面形式输出,是一种高分辨率地震剖面,用来作地质目标的精细解释;也可以用递推算法反演地震波阻抗,输出地震转换波阻抗剖面,用作岩性和地层学解释。

由反射系数剖面转换声阻抗剖面,使用递推反演算法。这是许多工业地震波阻抗反演软件使用的基本算法。基本关系式是由反射系数定义导出的。已知第 i 层和第 $i+1$ 层的波阻抗,第 i 层底面的反射系数是

$$r_i = \frac{\rho_{i+1} v_{i+1} - \rho_i v_i}{\rho_{i+1} v_{i+1} + \rho_i v_i} = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i}, \quad (1)$$

其中 r 为反射系数, ρ 为介质密度, v 为介质波速, Z 为波阻抗,下角码表示层序号,第 i 层在第 $i+1$ 层之上。如果已知真反射系数,则可根据上述公式恢复波阻抗。为明了起见,分步写出其间的关系式,

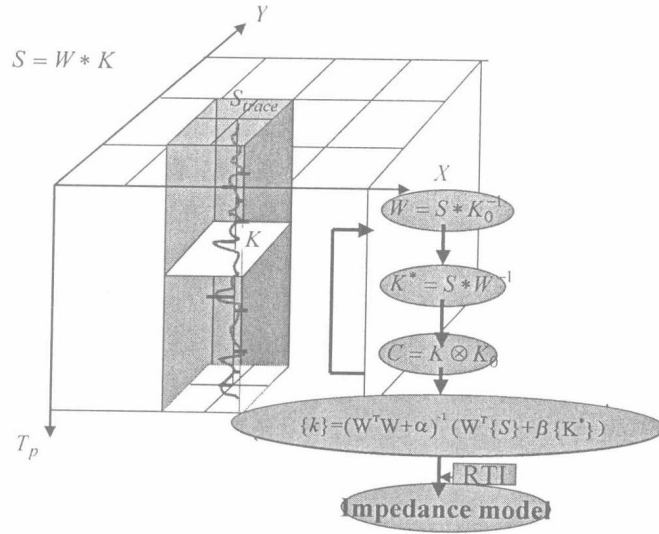


图2 高分辨率地震反演波阻抗

$$1 + r_i = \frac{Z_{i+1} + Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} + \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} = \frac{2Z_{i+1}}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (2)$$

$$1 - r_i = \frac{Z_{i+1} + Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} - \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} = \frac{2Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (3)$$

$$\frac{Z_{i+1}}{Z_i} = \frac{1 + r_i}{1 - r_i} \quad (4)$$

最终结果是,

$$Z_{i+1} = Z_i \left[\frac{1 + r_i}{1 - r_i} \right] \quad (5)$$

称为离散递推反演公式,在许多的反演技术中使用。这个公式表明,若已知某层的波阻抗及层底面的反射系数,可以计算下一层的波阻抗。自然,这个迭代过程开始,要求已知第一层的波阻抗。假如我们能够估计这个值,则可推算下一层的波阻抗,

$$Z_2 = Z_1 \frac{1 + r_1}{1 - r_1}; Z_3 = Z_2 \frac{1 + r_2}{1 - r_2}$$

等等。由第一层递推第 n 层的波阻抗,可有关系式,

$$Z_n = Z_1 \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1 + r_i}{1 - r_i} \quad (6)$$

对于连续反演,使用对数关系近似上述公式。为此,把反射系数写成,

$$r(t) = \frac{Z(t + dt) - Z(t)}{Z(t + dt) + Z(t)} = \frac{1}{2} \frac{dZ(t)}{Z(t)} \quad (7)$$

$$r(t) = \frac{1}{2} \frac{d \ln Z(t)}{dt}$$

波阻抗反演公式是

$$Z(t) = Z(0) \exp \left(2 \int_0^T r(t) dt \right) \quad (8)$$

当 $|r(t)| < 0.3$, 这个近似公式是合理的。若反射系数在 $-0.5 \sim 0.3$, 连续反演公式计算结果误差在 4% 以内。若反射系数在 ± 0.1 之间, 则可以使用更简单的反演公式(即道积分公式)

$$r(t) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} Z(t) \Leftrightarrow Z(t) = 2Z(0) \int_0^t r(t) dt \quad (9)$$

在将这些公式使用实际地震资料处理时,有两个问题。一是由地震记录恢复的反射系数序列,通常是带通的,缺少高频和低频信息。缺少高频导致分辨率不够;而缺少低频信息则不能完整反演模型,反演结果缺少准确性。因而特别是缺少低频成分,这是由地震数据反演波阻抗面临的严重问题,克服它也比较困难。二是地震记录中含有相干和随机噪音,使反演的反射系数序列,不是真的反射系数序列。存在很多的干扰源,对真反射系数的恢复造成干涉,如多次波的存在,透射传输损失等。这样的系统误差随深度而积累。本项目所采用的声波测井与地震资料联合反演算法,对克服上述两个问题是有效的。声波测井资料中包含着地震记录中所缺少的高频和低频信息。以有效地地震地质模型为初始模型和约束条件的约束反演,实现了对地震模型反射系数序列的补偿高频和拓宽低频。对高频补偿的效果要比低频好,补偿低频成分要困难的多。工业用的地震波阻抗软件 SEISLOG 是对地震波阻抗做低频趋势补偿,而声波测井与地震资料联合反演是对反射系数序列做频带补偿,对低频段(10 Hz 以下)补偿的效果有时不理想。对高分辨率地震资料(采样率 1 ms),往往需要在高频频带内做反演的反射系数序列的平滑,这会对低频频带有损害。必要时,可对地震波阻抗再做低频趋势补偿。

3.5 无井条件下联合反演算法的应用

在没有井资料的情况下,可以根据验前信息建立第二层序模型及约束条件,实现联合反演。这个思路十分重要。在勘探阶段,工区很少有、一般没有勘探井。在进行了大量地震工作以后,需要对地震资料作详细解释。特别是在作岩性预测和构造层序分析时,改善地震分辨率、提高信噪比是地质解释成功的关键。“无井约束联合反演”自然成为解释性处理的有效手段,受到人们的注意。实验表明了该方法的效果和可靠性。为实现无井条件下的联合反演,建立第二约束条件,按照处理目的的不同,可以采用以下的简单方法:

(a) 在剖面上选择一个层次齐全、信噪比较高的地震道引导联合反演,可以有效地改进整个剖面的信噪比。信噪比的改进是提高分辨率的基础。

(b) 在剖面上选择一个层次齐全、信噪比较高的地震道建立脉冲地震道。为此,给定一个门槛值,对超过门槛值的采样点选极值,以单位脉冲代替,数值等于原有采样值,构成脉冲记录。用这个脉冲记录引导联合反演,可以降低噪音背景,改进地震分辨率。

(c) 在剖面上选择一个层次齐全、信噪比较高的地震道,检查其高频部分。若是高频信号可靠,则可以对全频带作频率分解,而后加权迭加,或者作兰色滤波。应注意,高截频应低于折叠频率,以避免假频畸变。

(d) 对选定的地震道作反褶积或在目标层序体响应频率位置的一个有限频带上作谱白化。所得地震道用来引导联合反演,可以有效地改进地震分辨率。

(e) 经(d)处理的地震道可能缺少低频成分。为弥补这个缺憾,该地震道可与原地震道加权迭加,所得地震道可直接用于引导联合反演,也可先构造脉冲记录再用于联合反演。这个处理方法对改进地震分辨率,效果较好。

应该指出的是,使用第二约束条件作联合反演,所得地震转换声阻抗剖面,声阻抗只具有相对值,可用来研究声阻抗变化规律。为获得正常地震转换声阻抗剖面,还要求利用已知资料进行标定。其它的处理效果,则与各项参数选择有关。

3.6 对地震转换波阻抗的理解与解释

波阻抗(AI)是P波速度与介质密度的乘积。这意味着 AI 是岩石性质,而不是分界面性质(如地震反射资料一样)。这一点正是 AI 的使用价值所在。波阻抗反演是对地震道所作的简单变换,将地震数据变换为“伪”波阻抗,地震数据中所有信息都得到保留。总结波阻抗数据的优点如下:

1) 一个高品质的波阻抗模型比地震数据包含更多的信息。它既有地震数据所有信息,但无因子波褶积而