

第八届渤海湾油气田 勘探开发技术研讨会 ——论文集——

DIBAJIE BOHAIWAN YOUQITIAN KANTAN KAIFA JISHU YANTAOHUI LUNWENJI

《第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会论文集》编委会 编



石油工业出版社

第八届渤海湾油气田 勘探开发技术研讨会论文集

《第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会论文集》编委会 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本文集收录了“第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会”的 110 余篇优秀论文。内容涉及断陷盆地地球物理技术, 岩性地层油气藏勘探, 内幕潜山勘探, 中浅层双高油藏提高采收率技术, 中深层低孔低渗油藏开发技术, 高凝高黏、高温高盐、裂缝等特殊油藏开发, 钻完井及措施改造工艺, 采油与地面工艺技术等。

本文集可供从事油气勘探与生产工作的科研人员与管理人员参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会论文集/《第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会论文集》编委会编.

北京: 石油工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5183-1525-3

I. 第…

II. 第…

III. ①渤海-海上油气田-油气勘探-文集

②渤海-海上油气田-油气田开发-文集

IV. TE5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 237535 号

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

编辑部: (010) 64523543

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本: 1/16 印张: 52

字数: 1502 千字

定价: 260.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《第八届渤海湾油气田
勘探开发技术研讨会论文集》
编 委 会

主 编：赵贤正

副主编：（按姓氏笔画排序）

毕义泉 朱明会 吴永平 张以明 张洪安
孟卫工 赵平起 董月霞 薛永安

序

渤海湾盆地是中国重要的含油气盆地和能源生产基地。自 1961 年华 8 井、1964 年港 5 井等相继获得工业油流之后，盆地大规模油气勘探开发工作就此展开，先后开发建成了胜利、大港、辽河、华北、渤海、中原、冀东等油气田，目前形成了年产 $7500 \times 10^4 \text{t}$ 油当量的油气生产能力，成为中国最大的原油生产基地。历经五十余年艰苦卓绝的勘探开发历程，截至 2015 年底，在渤海湾盆地累计探明石油地质储量 $146 \times 10^8 \text{t}$ ，累计生产原油 $24.5 \times 10^8 \text{t}$ ，累计探明地质储量和原油产量分别占全国同期总储量与产量的 40% 和 30% 以上，在国家能源工业发展尤其是在华北和环渤海湾区域经济发展中起着举足轻重的作用。

渤海湾各油气田在基本地质特征、油气藏类型、油气富集规律等方面具有很大的相似性，但在含油气层系分布、油气藏特征、勘探开发面临的技术瓶颈等方面又具有差异性。为了促进该地区勘探开发研究成果交流和技术资源共享，进一步推动渤海湾盆地各油气田实现稳健与可持续发展，2006 年经渤海湾地区内七家油田共同商议，决定轮流举办渤海湾油气田勘探开发技术研讨会，迄今为止，已成功举办七届。十年光景、七届大会，为渤海湾各油气田的管理者和科技人员提供了一个很好的相互交流和学习的平台，架起了一道增进友谊和感情的桥梁，有效助推了各油田勘探开发技术的持续创新和事业的持续发展。

“第八届渤海湾油气田勘探开发技术研讨会”拉开了本地区新一轮集中技术交流的序幕。中国石油大港油田公司作为本次会议的承办方，在相关兄弟油田的共同支持下，广大科技人员积极响应、踊跃投稿，共征集专业学术论文 415 篇，经过专家评定，优中选优，收录了其中 117 篇代表性和创新性较强的论文成册，公开出版供会议代表交流。内容涉及断陷盆地地球物理技术，岩性地层油气藏勘探，内幕潜山勘探，中浅层双高油藏提高采收率技术，中深层低孔低渗油藏开发技术，高凝高黏、高温高盐、裂缝等特殊油藏开发，钻完井及措施改造工艺，采油与地面工艺技术等。这些论文思路新、水平高、涉及面广，集聚了广大科技工作者的智慧，充分展现了近几年渤海湾各油气田勘探开发领域最新成果和科技进展。

衷心希望借此论文集的编印出版，能对渤海湾各兄弟油田战胜低油价挑战、实现可持续发展起到积极的指导和借鉴作用。

中国石油大港油田公司总经理

2016 年 10 月

目 录

一、地球物理勘探技术

黏声介质中的最小二乘逆时偏移技术研究及应用	张 猛 王华忠 匡 斌 单联瑜 李振春 (3)
大港油田斜坡地层岩性油气藏精细目标处理技术及效果	王者武 张保庆 于慧文 王一鸣 王雨莹 (10)
KD 地区沙河街组超覆储层描述研究	潘中华 张云涛 伊 慧 耿 雪 (19)
CN 断裂带中深层砂砾岩体特征描述及地震预测	夏志威 (24)
雷家地区沙四段碳酸盐岩叠前预测研究	蒋学峰 王晓光 蓝 阔 冷泓颖 (31)
VSP 技术在欢喜岭油田的研究与应用	李子华 黄慧兵 聂凯杰 高永宏 郭 明 (39)
构造约束下薄储层精细描述方法	郭乃川 吕丁友 吴 奎 康 琳 彭 鹏 (44)
渤海锦州 25-1 地区沙河街组复杂储层地震预测研究及应用	张琳琳 李 久 王建立 王 腾 陈 瑶 严 皓 (51)
东关潜山中生界火山岩地震预测技术	郭淑文 邢 兴 国春香 彭雪梅 (57)
基于 morlet 小波变换时频分解技术在刘官庄地区储层预测中的应用——以庄浅 33-41 断块为例	刘利勤 周志尧 吴 勇 (63)
华北油田储层预测适用技术方法应用研究	陈树光 王 亚 秦凤启 王孟华 冯小英 贾 敬 李 勇 张梦琳 (69)
KN26X1 井区“两宽一高”地震资料解释技术及应用效果	王仁康 李玉海 卢刚臣 吴振东 李冰玲 岳跃龙 赵贻水 王文涛 (77)
地震地质一体化解释技术在复杂潜山勘探中的应用	王文庆 李岳桐 卢刚臣 吴振东 (88)
相控多尺度精细储层预测——以歧口凹陷板桥低斜坡沙一段为例	王文庆 李岳桐 朱梓强 卢刚臣 (94)
斜坡带地层—岩性油气藏精细预测技术研究与应用	谢玉权 李玉海 卢刚臣 李振永 刘 辉 胡菊香 孙 健 王仁康 (100)
复杂储层测井精细评价技术进展	张晋言 刘 伟 李绍霞 刘海河 孙建孟 刘兵开 (109)
华北油田复杂油气层测井识别新技术	赵国瑞 刘 萍 黄文革 李晓娇 李 辉 (118)

二、油气勘探综合地质

断陷盆地主力含油层系油气精细勘探方法与实践——以渤南洼陷为例	宋国奇 王永诗 安天下 向立宏 伍松柏 刘瑞娟 尹丽娟 林 璐 (127)
元古宇内幕结构识别技术初探——以大民屯凹陷为例	单俊峰 刘兴周 牟 春 崔晓磊 张子璟 张云生 (135)
东濮凹陷天然气富集规律及重点增储领域	徐田武 张洪安 谈玉明 彭 君 李继东 苏颂成 慕小水 张云献 (142)

饶阳凹陷东部洼槽区油气成藏新认识与规模增储	王 权 刘井旺 李熹微 侯凤香 王 鑫 牛新杰 刘 慧 肖 红 张莎莎 (150)
南堡凹陷岩性油气藏勘探方法与实践	樊发雄 周 贺 张晓明 李 杰 孟令箭 关宝文 (160)
成熟探区内“低品位探区”高效勘探的方法与实践——以渤海湾盆地济阳坳陷为例	董 冬 牛栓文 赵光宇 田 波 王先礼 初启龙 (168)
复杂地层圈闭勘探技术——以东营凹陷草桥地区为例	陈 涛 (174)
埕岛地区前中生界潜山构造特征及控藏作用	张在振 (181)
辽河探区西部凹陷岩性油气藏主要类型及有利区预测	张文伟 (190)
辽河东部凹陷北部精细滚动勘探实践	涂伟伟 (197)
东濮凹陷上古生界油气富集条件再认识	许书堂 赵 强 (202)
东濮凹陷低丰度区带勘探潜力再认识——以西南洼陷带为例	袁 波 万 涛 张琛琛 梅 冰 兰亚萍 (209)
东濮凹陷东营组滚动勘探研究	霍 斌 陈发亮 韩福民 刘赵峰 刘 委 (214)
断裂控藏定量研究与黄河口凹陷中央构造脊勘探实践	温宏雷 (218)
斜坡区“古地貌—层序”联合控砂机制与沉积响应——以渤海海域旅大 A 构造沙二段为例	徐 伟 (227)
深层生屑云岩形成机制研究与储层精细预测	汪 跃 陈建波 别旭伟 孙藏军 刘洪洲 吴浩君 (235)
廊固凹陷固安背斜构造精细勘探技术与成效	韩红涛 陈 令 于大勇 胡美玲 田建章 张传宝 王爱丽 马玉芝 (241)
饶阳凹陷蠡县斜坡“连续型”不饱油藏成藏特征及勘探意义	姚 欢 张霖潮 孙瑞娜 谢静平 邵彦蕊 李晓燕 马红岩 (247)
二连盆地东部富油凹陷油气成藏富集新认识与高效发现	邢雅文 赵志刚 曾 婷 王元杰 李晓红 蓝宝锋 王会来 (254)
南堡凹陷物源体系发育特征与优质储层形成	赵忠新 赵迎冬 王建伟 张永超 (264)
南堡 1 号构造中浅层火成岩发育区油藏滚动评价	乔海波 国朋飞 张博明 李玉存 肖朝云 文 雯 (271)
歧口西南缘岩性—地层油气藏勘探技术与实践	袁淑琴 赵宇超 (279)
歧口凹陷古近系流体动力演化与油气成藏	姜文亚 周立宏 肖敦清 蒲秀刚 牟连刚 孙超因 (286)
歧口凹陷奥陶系碳酸盐岩缝洞储层形成条件及分布规律	付立新 吴雪松 李宏军 冯建元 崔 宇 王 辉 (294)
沧东凹陷孔二段细粒相区沉积旋回特征与致密油储集甜点分析	韩文中 (301)
建立集中共享的专业软件云环境,提升勘探开发研究效率和水平	陈 哲 范德军 杨宣林 (307)

三、油气开发地质与油气藏工程

胜坨油田矢量开发调整技术研究与应用	赖书敏 刘志宏 黄迎松 魏 明 (313)
中深层稠油工业化汽驱取心井综合评价研究与应用	林中阔 樊 涛 许 卉 王熙琮 (318)
东濮薄互层油藏高含水期相控油藏描述及挖潜技术	马艳艳 熊运斌 赵 磊 任 宏 高江博 王 明 孙廷彬 (322)
仿水平井开发技术在现河特低渗油藏中的应用	李 敏 张德崇 张淑娟 (330)

层状复杂稠油油藏地质与开发一体化研究	杨新标	陈 钟	郜志平	王东升	(335)
中厚互层状稠油油藏边部水平井开发效果分析与评价	王 杰				(342)
薄层稠油藏低速难采储量二次开发研究与实践——以 G 油田 M 块莲花油层为例	朱 伟				(346)
文明寨油田高含水期效益挖潜技术	王 军	程凤莲	王艳平		(351)
浅水三角洲前缘厚油层构型解剖及剩余油分布模式——以文南油田 W33 断块为例 1	刘云华	李中超	尹楠鑫	罗波波	常玉丽 (356)
渤海高含水油田综合调整后剩余油挖潜技术创新与应用——以渤南 SZ 油田为例	田 博	刘宗宾	高红立	刘 超	张 瑞 (364)
裂缝—孔隙型碳酸盐岩气藏封存水判别与对策探讨	余元洲	张建民	王月杰	黄 琴	郭 诚 朱建敏 (374)
气顶边底水油藏水平井垂向位置优化方法	朱志强	葛丽珍	张占女	杨志成	孟智强 (379)
海上低渗油田有效开发技术探索与实践	汪全林	胡 勇	谢丽沙	赵军寿	张 驰 (389)
海上大型河流相油田高含水期开发调整技术与实践	张 章	徐中波	李 林	张 俊	杨洪伟 康 凯 申春生 李廷礼 (398)
地面地下一体化油井产量预测及在生产优化中的应用	李丰辉	郑 旭	于明超	潘 彬	(408)
新近系边底水油藏开发后期挖潜对策研究	陈小琴	王美思	张国兄	许爱云	郭 睿 赵 辉 (417)
冀东油田不同类型油藏有效开发关键技术研究与实践	毕永斌	马晓丽	崔 建	罗福全	高广亮 李秋影 (425)
冀东油田特高含水期剩余油分类评价研究	龚晶晶				(434)
大港孔南互层油藏层系重组提高采收率实践 ...	陶自强	朱红云	董传杰	张世浩	李翠平 (438)
超低渗透砂岩油藏微观孔隙特征和渗流规律研究	邢晓霞				王东林 (447)
三角洲储层构型解剖的理论及方法	芦凤明				(453)
大港油田精细注水开发技术对策与实践	赵 明	蔡明俊	潘 红		(465)
低渗透油藏天然气驱提高采收率油藏工程研究	孟立新				(472)
确定性建模与随机建模在埕海一区沙河街组油藏中的应用	牟晓慧	李 宁	唐和军		(478)
砂泥岩互层油藏水平井随钻跟踪的地质问题与对策	季 岭	王庆魁	张家良		(483)
低渗透储层非达西试井技术研究与应用	王志愿	韩旭东	丛 威		(490)

四、钻完井及措施改造工艺技术

低渗透复杂断块油藏提高单井产量技术研究与实践	张胜传	田福春	杨 扬	郝桂宪	付大其	王津建	王爱国	张东亭	(511)
南堡滩海大位移井钻井关键技术	胡中志	刘永辉	徐 吉	潘俊英					(519)
多级加砂压裂技术研究与应用	贾元钊	许正栋	王孝超	龙长俊	澈 力	张 洋			(525)
南堡深层复杂岩性地层泥页岩井壁稳定技术	陈金霞	阚艳娜	卢淑芹	朱宽亮					(532)
深层低渗薄互层油气藏多层压裂工艺技术	魏美涛	王 栋	王安培	刘永花	苏君慧				(539)
变排量顶替固井技术在大港油田复杂压力井的应用	吴 华			张学强					(550)
低渗透油藏连续油管拖动底封开启滑套压裂完井工艺	齐月魁	赵 涛	曲庆利	周宝义	曾晓辉				(557)
深层低渗储层整体分段压裂工艺研究与应用	赵玉东	郝桂宪	张胜传						(562)
长井段非均质储层多元酸化技术提高油井产能	杨太伟	闫 钰	郭树召	程诗睿	蔡晴琴				(566)

低渗特低渗油气藏防水锁技术研究	王小芳	樊松林	王 煜	郭元庆	刘福鹏	(569)
-----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-------

五、“2+3”提高采收率工艺技术

胜利油田分层注水工艺技术及发展建议	马珍福	孙金峰	张 凯	(577)				
冀东油田深斜井多级分注与测配技术研究	王金忠	张建忠	付 军	黄晓蒙	郝夏蓉	(582)		
特低渗透油藏仿水平井注水开发优化设计技术	郭迎春	吕广忠	曹小朋	李志鹏	李忠新	(589)		
注聚末期转流场提高采收率开发技术	邹 倩	李文华	陈孝芝	葛徐旭	聂锋锦	(600)		
新型聚合物解堵剂的研制及现场应用	李 强	成梅华	陈利霞	张 君	张 磊	卢占国	宋 菲	(606)
胜利油田微生物单井吞吐技术进展 ...	孙刚正	胡 婧	刘 涛	曹嫣嫔	宋永亭	曹功泽	(613)	
辛 68 高温高盐区块微生物复合驱油技术研究	曹功泽	林军章	宋 欣	刘 涛	王 静	赵凤敏	曹嫣嫔	(619)
多层非均质油藏细分层注水工艺技术应用与推广	赵焕伟	胡 剑	田 冰	贾贻勇	(623)			
低渗油藏注水影响因素分析及矿场实践认识 ...	田相雷	游龙潭	石连栋	刘海波	鲍荣玲	(632)		
天然气驱提高采收率技术与应用研究——以中原油田挥发性油藏注气开采为例	聂法健	李中超	田 巍	王进安	许 寻	刘云华	(637)	
海上超稠油热采平台采出液处理流程动态模拟研究	刘际海	刘春雨	王文光	曲兆光	唐宁依	陈正文	(644)	
埕北油田“双高”阶段提高采收率研究与实践	常 涛	李 根	曲炳昌	刘 斌	汪 跃	罗义科	(649)	
模拟蒸汽吞吐的变形介质流固耦合模型	吴婷婷	张凤义	杜春晓	许万坤	(658)			
深层巨厚裂缝性潜山油藏氮气驱技术应用	吴 超	林 健	(664)					
裂缝性低渗透油藏深部调驱研究与应用	牟 勇	杨士萍	邵建中	张雪梅	李文涛	吴玲玉	(669)	
稠油开发中后期高温调堵配套技术的研究与应用	王 浩	(675)						
杜 229 块气体辅助蒸汽吞吐措施阶段效果分析	李正威	张崇刚	李坤遥	(679)				
华北油田深斜井分注工艺技术研究与应用	王建宁	林福欣	张宝民	苏 毅	徐智远	王 怡	(687)	
冀东油田柳赞北区 CO ₂ 驱技术研究与应用	曹亚明	郑家朋	孙 蓉	邢丽洁	程椿玲	(696)		
低温油藏深部调剖用无铬弱凝胶体系研究	杨卫华	(703)						
气混酸复合技术在稠油油藏开采中的应用	何丕祥	韩项勇	胡成亮	袁润成	宋玉文	(708)		
中浅层砂岩油藏油水井安全高效封堵技术研究实践	葛红江	雷齐玲	(712)					
复杂断块油藏空气泡沫驱技术研究与实践	程海鹰	柳 敏	(717)					
智能分注工艺技术研究与应用	张宏伟	王文韬	杨天成	舒 畅	杜晓霞	王明燕	胡金铜	(727)
特高含水油藏提高采收率技术攻关与实践	王宏伟	张祖峰	(732)					

六、采油与地面工艺技术

胜利油田套损井现状及修复技术进展	伊西锋	刘玉国	朱瑛辉	张化强	高恒超	(741)
牛心坨油田冷采后断杆原因与对策研究	徐殿才	赵 鑫	李延年	(746)		
套管变形井修复技术研究	王木乐	向俊科	(754)			

创新变强度注水实现老油田低投入开发	贾云超	夏朝晖	陈俊革	杨惊鸣	(766)
一种金属定子螺杆泵采油技术	王显荣	王文钢	(772)		
稠油水平井分抽技术研究及试验	彭松良	马 薇	袁爱武	(781)	
SAGD 高干度集中注汽地面配套工艺技术	郭金鹏	姜兴玲	田 野	孟 鑫	胡 博 (784)
抽油机井智能排采技术体系的构建与应用	常鹏刚	张胜利	金学锋	胡书宝	马 彪 户 虎 李一凡 (791)
套变井柱塞挡砂技术研究与应用	王 超	李怀文	刘 伟	王艳山	刘志斌 韩 艳 (797)
有杆举升抽油泵锚定技术研究	李志广	闫永维	李风涛	张子佳	李 川 (802)
生产作业中油层保护技术体系研究与应用	樊松林	董 军	郭元庆	杨小平	刘福鹏 (808)
大港油田地面工程标准化设计研究与应用	邹晓燕	赵昕铭	王树好	于 刚	(812)
基于 PLC 的注水站能耗监控系统研究与应用	方 睿	(818)			

一、地球物理勘探技术

黏声介质中的最小二乘逆时偏移技术研究及应用

张 猛^{1,2} 王华忠² 匡 斌¹ 单联瑜¹ 李振春³

(1. 中国石化胜利油田公司物探研究院; 2. 同济大学海洋与地球科学学院波现象与反演成像研究组; 3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院)

摘要:地震波在传播过程中由于地层衰减的存在降低了地震波的振幅(或能量),改变了地震波的相位,降低了地震波的主频,影响了地震资料分辨率,因此需要在成像过程中考虑补偿介质对地震波的非弹性吸收衰减作用,并针对不同的需求对黏滞性效应进行消除、校正和应用,从而实现真振幅成像处理,为岩性油气藏研究提供可靠的地震资料。同时,常规逆时偏移算法具有较强的低频噪声、对观测系统要求较高、较难进行透射损失补偿等问题。黏声介质中的最小二乘逆时偏移不仅能有效克服常规逆时偏移的上述难题,而且还能有效地消除黏滞性效应,实现真振幅成像。本文首先介绍了黏声介质中的最小二乘逆时偏移的基本原理和实现流程。其次,分别进行了二维和三维理论模型测试,在此基础上,对胜利探区某二维资料进行了实际应用,获得了较满意的处理结果。最后,给出了结论和认识。

关键词:振幅衰减;黏声介质;最小二乘;逆时偏移;实际应用

随着地震勘探的不断深入,地震勘探重点也由原来构造型油气藏勘探进入精细的岩性油气藏和隐蔽油气藏勘探阶段,要求地震资料能够反映地下地质体岩性变化,以及识别含油、气、水的地震响应特征,分辨薄互层、低幅度构造的能力。然而,地震波在传播过程中由于地层衰减的存在降低了地震波的振幅(或能量),改变了地震波的相位,降低了地震波的主频,从而降低了地震资料分辨率。特别是浅层吸收衰减因素对振幅的影响较大。浅层未固结的沉积层对地震波起着决定性的作用,地震波衰减明显,波形畸变严重。因此,要准确而有效地提高地震资料分辨率,尤其是薄互层、薄层的识别,需要开展非均匀黏性介质中的地震波衰减和补偿研究工作,通过准确的 Q 补偿,拓宽地震记录频带。在地震资料处理的过程中进行 Q 值补偿,通常有两种途径,即带 Q 补偿反褶积方法和带 Q 补偿的偏移成像。带 Q 补偿的反褶积方法(反 Q 滤波)大多是依据地震资料信号特征,而且是基于单道实现的,反映的是局部信息。另外,该类方法大都基于层状介质假设,并不是一种精确的处理方法,在复杂地区的应用受到限制,因此,此类方法具有一定的局限性。而带 Q 补偿的叠前偏移成像方法,在偏移过程中考虑吸收衰减对子波影响,对振幅、相位和频率进行校正,更加符合物理过程,有利于实现真实准确的保真处理,精度更高。

当前叠前偏移方法主要有基于射线理论和基于波动方程理论两类。基于射线理论的偏移方法主要有 Kirchhoff 积分法偏移、射线束偏移等;基于波动方程理论的偏移方法主要有单程波波动方程、双程波逆时偏移(RTM)和最小二乘逆时偏移(LSRTM)等。RTM 具有无倾角限制的优点,能够处理纵、横向变速问题,是目前工业界公认的解决高陡复杂构造成像的较好方法。然而 RTM 在浅部成像过程中存在较强的低频噪声,深部储层成像幅值弱,分辨率低。LSRTM 在反演的理论框架下很好地克服上述问题的影响,实现了真振幅成像。

最小二乘偏移的理论基础最早由 Tarantola 提出,但由于计算能力的限制,发展较缓慢。近年来,计算机技术飞速发展,特别是高性能的 CPU、GPU 等机器设备的诞生,极大地推动了最小二乘偏移等地球物理新技术的发展。最小二乘理论经历了基于射线理论(Nemeth、Chavent)、单程波理论等发展阶段。近期基于双程波波动方程最小二乘逆时偏移理论也引起了人们的重视,并成为当今

地球物理界研究热点。常规的 LSRTM 大都是基于声波介质实现的, 没有考虑地球介质的黏滞性, 因而在黏声介质中实现最小二乘逆时偏移技术研究, 在理论上将具有更加明显的优势。

本文首先介绍了黏声介质中最小二乘逆时偏移的基本原理, 给出了基于广义标准线性固体 (GSLs) 模型的黏声介质波动方程的线性化形式, 分别对二维、三维理论模型进行了测试, 验证了方法的正确性及有效性。同时对胜利探区某二维实际资料进行了试处理, 获得了较满意的处理效果。

1 基于黏声介质的逆时偏移理论基础

1.1 最小二乘方法本质思想

最小二乘思想即是在二范数意义下找到一个最优化的模型去拟合数据。对于基于反演的成像方法, 即是寻求最优的地下介质模型以使得正演波场与观测波场残差的模最小。

地震波场的正传播过程表示为:

$$\mathbf{d}_{\text{obs}} = \mathbf{L}(\mathbf{m}_{\text{true}}) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{m}_{\text{true}}$ 为地震地球物理参数矢量, 如速度、密度等; $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ 为观测到的地震数据, $\mathbf{L}(\mathbf{m}_{\text{true}})$ 描述了依赖于 $\mathbf{m}_{\text{true}}$ 的地震波场正传播过程。反演的过程可以记为,

$$\mathbf{m}_{\text{est}} = \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{d}_{\text{obs}}) \quad (2)$$

$\mathbf{L}^{-1}(\mathbf{d}_{\text{obs}})$ 即描述了应用数学工具进行地震反演的过程。 $\mathbf{L}(\mathbf{m})$ 是依赖于模型参数 $\mathbf{m}$ 的非线性函数。定义误差泛函为:

$$E(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} [\mathbf{L}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}}]^t [\mathbf{L}(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}}] \quad (3)$$

这里, 上标 t 表示矩阵转置。为了求解这一非线性问题, 经典方案是牛顿法。将 (3) 式泰勒展开, 并忽略高阶项, 可以得到迭代格式的反演方程。

1.2 黏声介质中最小二乘逆时偏移推导及实现流程

黏声介质中的最小二乘逆时偏移, 采用广义标准线性固体 (GSLs) 黏滞性模型构建, 其波动方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ M_R \left[1 - \sum_{i=1}^I \left(1 - \frac{\tau_{ei}}{\tau_{oi}} \right) e^{-t/\tau_{oi}} \right] H(t) \right\} * \nabla_g \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) + f \quad (4)$$

式中, M_R 为松弛模量; τ_{ei} 与 τ_{oi} 为松弛时间; $H(t)$ 为单位阶跃函数; I 为标准线性固体的个数; $\nabla \cdot$ 为散度算子; $*$ 为时间上的卷积算子; ρ 为密度。

黏声介质中最小二乘逆时偏移的核心是伴随算子的构建, 经推导可得伴随算子为:

$$L^* \rho^* = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p^*}{\partial t^2} - \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{\rho} \nabla \left\{ \rho p^*(t) * \frac{\partial}{\partial t} \left[- \left(1 - \sum_{i=1}^I \left(1 - \frac{\tau_{ei}}{\tau_{oi}} \right) e^{t/\tau_{oi}} \right) H(-t) \right] \right\} \right\} \right\} \quad (5)$$

分析 (5) 式可知, 若 $\tau_{ei} = \tau_{oi}$ 时, 该式就退化为弹性介质, 即是声波伴随算子。

利用最速下降法, 可对模型进行迭代更新, 直至收敛到终止条件。

$$\mathbf{m}^k(\mathbf{x}) = \mathbf{m}^{k-1}(\mathbf{x}) - \alpha P \frac{\partial O(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}(\mathbf{x})} \quad (6)$$

式中， $O(m)$ 为 LSRTM 的目标函数； α 为步长； m 为模型参数。

在研究黏声最小二乘逆时偏移基本原理的基础上，提出黏声介质中最小二乘逆时偏移实现流程（图 1）：

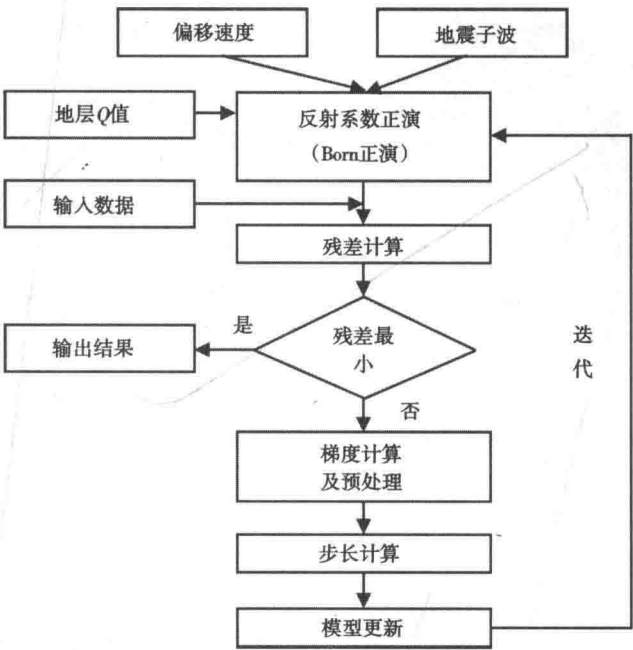


图 1 黏声最小二乘逆时偏移算法实现流程

2 理论模型测试

理论模型测试采用国际标准的 SEG/EAGE 盐丘模型，其中二维模型是在三维模型中抽取的一条线。该数据的观测参数为：总炮数是 4781 炮，50 束线，炮线间距 160m。炮间距 80m，线间距 40m，道间距 40m。每束线 96 炮，每炮 65 道；记录长度 5s，时间采样率 8ms。

2.1 二维盐丘测试

地层 Q 值参数反演的方法有很多。主要包括三类：基于信号理论的方法、基于层析理论的方法以及经验公式方法。其中李庆忠提出的经验公式在石油工业界应用较广泛，其表达式为：

$$Q_p = 14V_p^{2.2} \tag{7}$$

该经验公式在胜利东部探区具有较好的对应关系，并在实际生产中得到了较好的应用。下图分别为在三维岩丘模型中抽取的二维速度模型，以及应用该模型和李氏经验公式，计算的地层 Q 值模型（图 2）。

为了验证方法实现的准确性，首先应用已知的速度模型和 Q 值（应用李氏公式计算）进行黏声波动方程正演，获得单炮记录。然后，应用该模拟的炮记录进行黏声最小二乘逆时偏移，进行 30 次迭代计算，其收敛曲线如图 3 所示：

由图 3 可知，最小二乘逆时偏移在开始迭代时收敛较快，大约在 10 次迭代后，算法就能收敛。同时，我们同步进行了声波 LSRTM 计算。图 4 分别为声波 LSRTM 和黏声 LSRTM 经过 15 次迭代后的偏移结果：

通过图对比可知，由于考虑了波传播过程中的吸收衰减效应，相对于声波介质的 LSRTM 处理，黏声介质中的 LSRTM 偏移处理的剖面，断层刻画更加精细准确，中深层能量得到了补偿，成像质量明显改进。

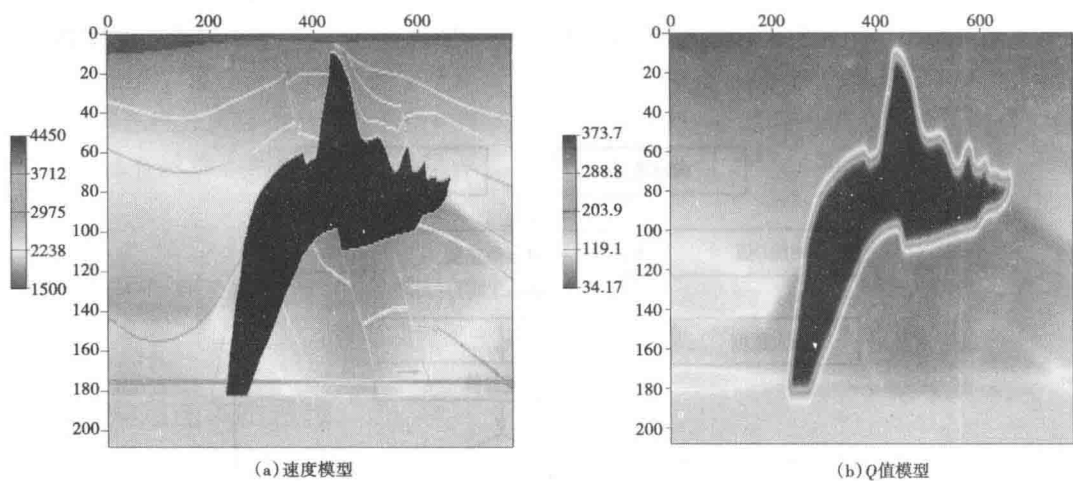


图 2 速度模型和 Q 值模型

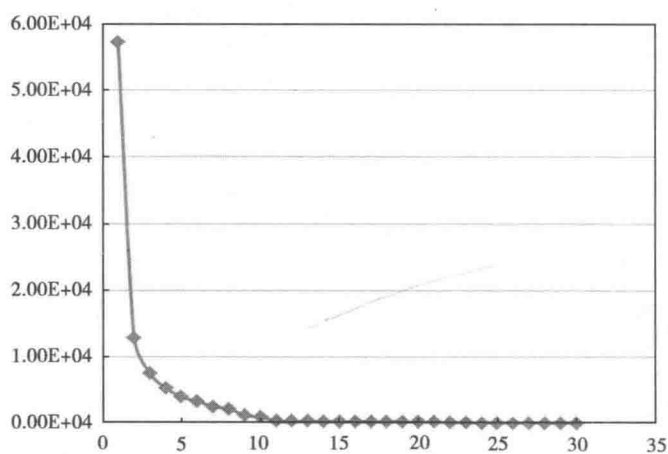


图 3 黏声最小二乘偏移收敛曲线

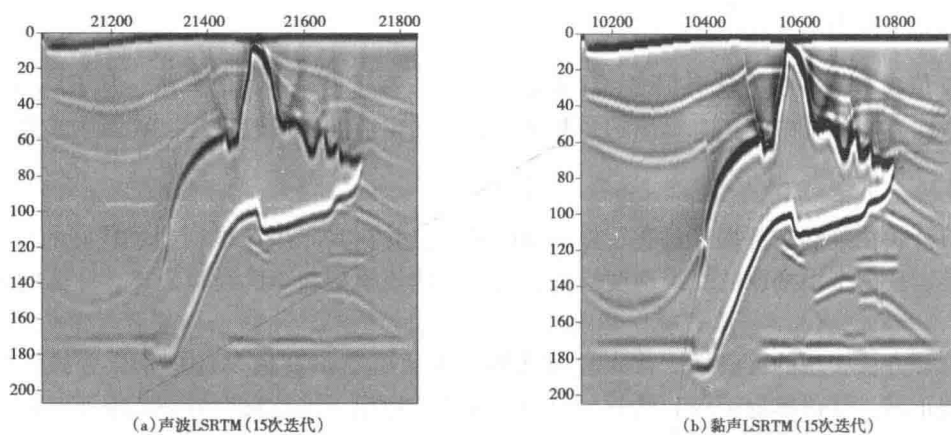


图 4 声波和黏声介质中最小二乘逆时偏移分别 15 次迭代后结果

2.2 三维盐丘模型测试

由于最小二乘逆时偏移计算量巨大,比常规逆时偏移多出一个数量级,为了节省计算时间,本文从原始三维盐丘模型中截取了一部分进行正演模拟和偏移计算。速度范围:300 (线) $\times$ 100 (点) $\times$ 201 (深);时间采样点:4s,采样间隔 0.001s,深度采样 201,采样间隔 10m。

由图 5 可知,随着迭代次数的增加,最小二乘逆时偏移的处理精度越来越高。然而,即是如此小的规模三维数据,30 个节点采用 OpenMP 并行,每个节点 8 个进程,一共 240 个进程并行,运行 30 天。通过 45 次迭代,成像质量越来越高。前面 15 次迭代已经获得较满意的偏移结果。同样,在刚开始收敛较快,15 次迭代后,结果改善不是非常明显。

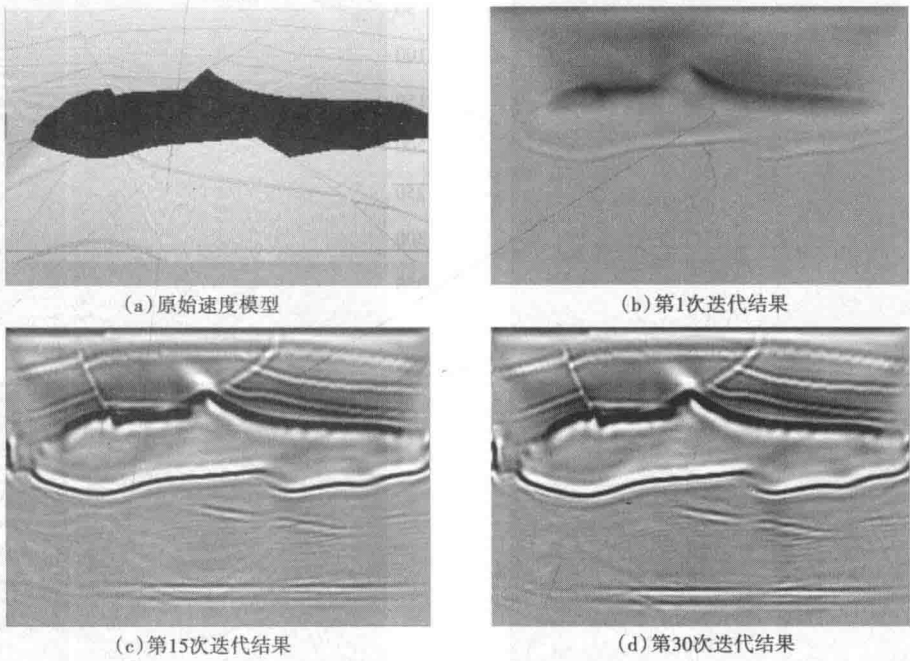


图 5 三维盐丘模型以及不同迭代次数结果对比

3 实际资料试处理

本文在胜利油田某实际三维工区抽取一条二维线进行试验。该工区位于胜利东部,该工区含油层系多,油藏类型丰富,主要以砂砾岩体油藏为主。主要反射层有: T_1 、 T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_7 、 T_g , 浅层比较平缓,深层呈现西浅东深的趋势,油气勘探潜力巨大。

在进行黏声最小二乘逆时偏移前,对炮集数据进行了常规的叠前预处理(静校正、能量均衡、去噪、直达波切除、面波剔除)等流程,重点开展了子波估计和速度建模工作,以保证算法能够收敛(图 6)。

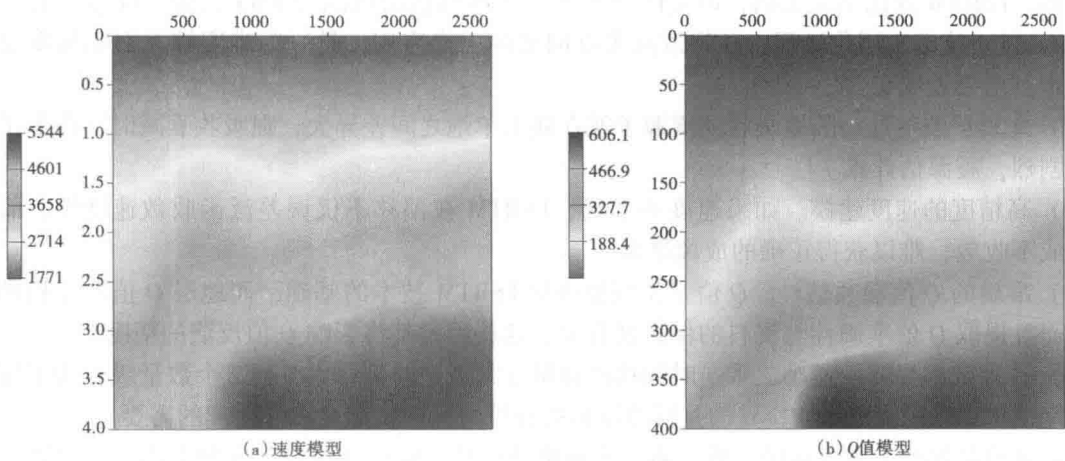


图 6 二维实际资料的速度模型和 Q 值模型