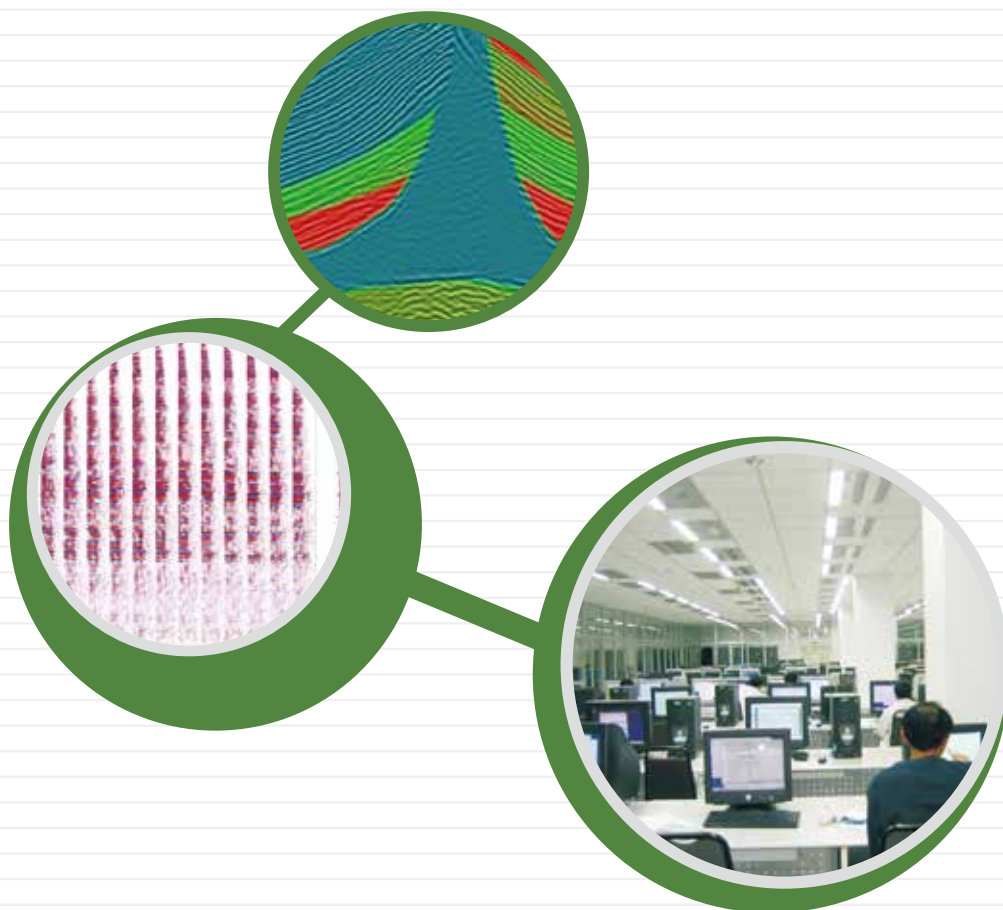


GeoEast-Lightning 叠前深度偏移处理系统

2014 年



中国石油天然气集团公司 科技管理部

GeoEast—Lightning——高精度地震成像的金钥匙！





目 录

1 简介	3
2 模块功能	4
3 特色技术	6
4 典型案例	12
5 科研装备	15
6 资质标准	16
7 专家团队	18



中国石油

中国石油天然气集团公司（简称“中国石油集团”，英文缩写：CNPC）是根据国务院机构改革方案，于1998年7月在原中国石油天然气总公司的基础上组建的特大型石油石化企业集团，系国家授权投资的机构和国家控股公司，是实行上下游、内外贸、产销一体化、按照现代企业制度运作，跨地区、跨行业、跨国经营的综合性石油公司，主要业务包括油气业务、石油工程技术服务、石油工程建设、石油装备制造、金融服务、新能源开发等。中国石油天然气集团公司2013年国内生产原油1.13亿吨，生产天然气888.4亿立方米，加工原油1.46亿吨，全年实现营业收入2.76万亿元，实现利润1880亿元。

2013年，中国石油在世界50家大石油公司综合排名中位居第4位，在全球500家大公司排名中位居第5位。

中国石油天然气集团公司履行资源、市场和国际化战略，坚持“主营业务战略驱动，发展目标导向，顶层设计”科技发展理念和“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的指导方针，以国家科技重大专项为龙头、公司重大科技专项为核心、重大现场试验为抓手、重大装备、软件、产品、标准为载体，持续推进科技进步，提升科技创新能力，取得一大批具有自主知识产权的先进实用技术。

GeoEast—Lightning 叠前深度偏移处理处理系统就是具有代表性的重大创新成果之一。

奉献能源 创造和谐

1 简介

逆时偏移 (Reverse Time Migration 简称 RTM) 方法完全遵守双程波波动方程, 不存在倾角限制, 可适应于速度场的剧烈变化, 不仅可以对一次波成像, 还可以对折波、棱柱波和多次波成像。与目前常用的克希霍夫 (Kirchhoff) 积分偏移和单程波偏移相比, 逆时偏移成像效果更好, 成像信噪比更高, 断层和盐下成像更清晰。

中国石油开发的 GeoEast—Lightning 软件是基

于逆时偏移方法的高精度高性能成像系统, 具有复杂地表下的各向同性 / 各向异性成像能力; 能实现宽频带地震数据的高分辨率成像; 具有 CPU/GPU 高效协同计算能力, 没有负载的短板效应, 可以在不同性能集群同时运行, 并发挥所有计算节点最大计算能力等优点被称为“闪电”。该软件具有界面友好、操作灵活、运行稳定等特点, 已经成功应用于东部潜山、复杂断块, 西部复杂山地、逆掩推覆体等多种复杂构造的成像, 是解决复杂构造成像的一大利器。



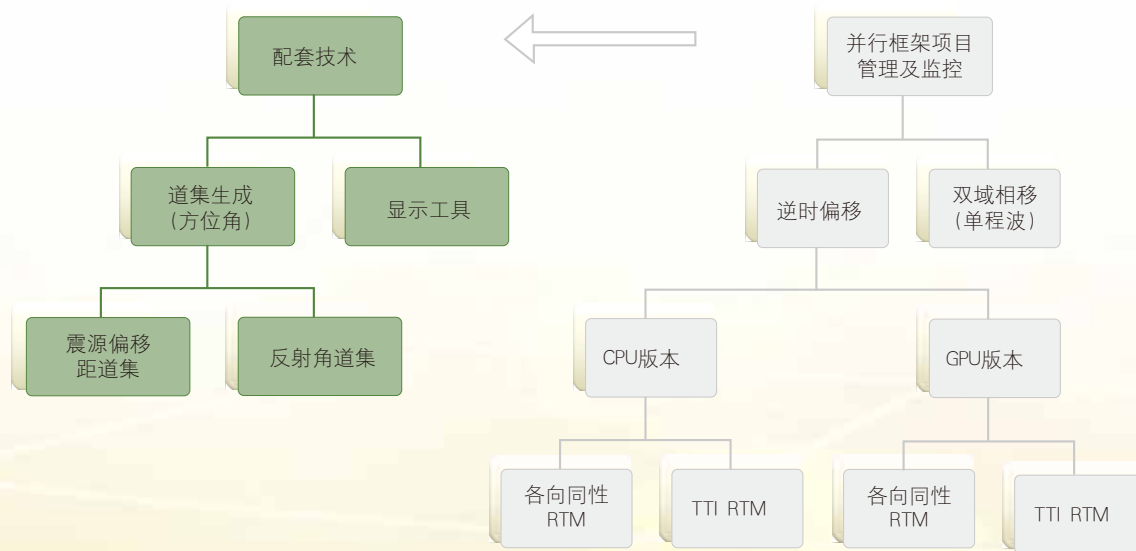
GeoEast—Lightning 技术框架

2

模块功能

GeoEast—Lightning 软件的主要功能包括：单程波叠前深度偏移、各向同性 RTM 偏移、VTI 各向异性 RTM 偏移、TTI 各向异性 RTM 偏移，以及 GPU 版各向同性和 TTI 各向异性 RTM 偏移。

配套功能包括：输出可用于角度域 AVO 分析的共反射角道集、独特的震源偏移距道集、可用于方位各向异性分析的共方位角道集，以及相应的数据分析和结果显示工具。



GeoEast—Lightning 系统功能图

GeoEast-Lightning 软件系统主控界面主要包括项目管理区、工具区、信息区和菜单区。既可以实现单一工区的作业编辑、运行、监控和查询功能，也可实现多工区同时运行管理。软件功能更全面实用性和易用性较好，更方便处理人员使用。

软件功能	GeoEast-Lightning
用户分配计算资源	Y
GPU 多种计算策略	Y
添加节点	Y
暂停节点	Y
恢复坏节点	Y
显示工区偏移状态	Y
随时查看叠加结果	Y
指定工作目录	Y
自定义输出网格	Y

地球物理功能	GeoEast-Lightning
维数	2D 3D
起伏地表	Y
分方位道集输出	Y
角度道集输出	Y
直接输入CMP道集	Y
目标线偏移	Y
输入数据切除	Y
振幅补偿	Y

突出的软件功能和地球物理性能

3

特色技术

GeoEast—Lightning 软件提供了单程波、双程波各向同性和各向异性等广泛适用的偏移功能、CPU—GPU 协同计算功能。

3.1 高精度地震成像技术

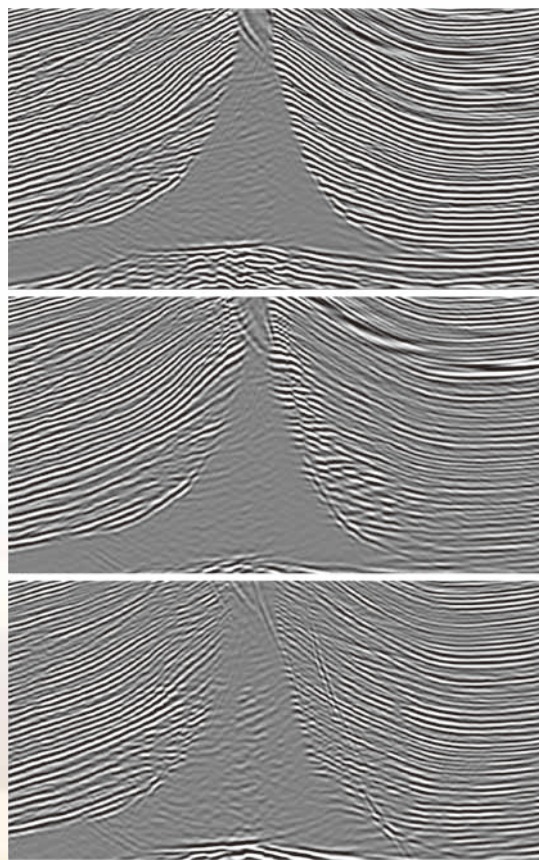
◆稳定的 TTI 各向异性叠前深度偏移技术

RTM 算法在空间—时间域实现，模拟波在各种介质中的传播，是复杂构造区和非均匀 TTI 介质成像的有效工具。在地下介质存在各向异性特征时，TTI 各向异性介质 RTM 偏移与各向同性介质 RTM 偏移相比能更好的计算出实际波前面，因而成像质量有显著提高。

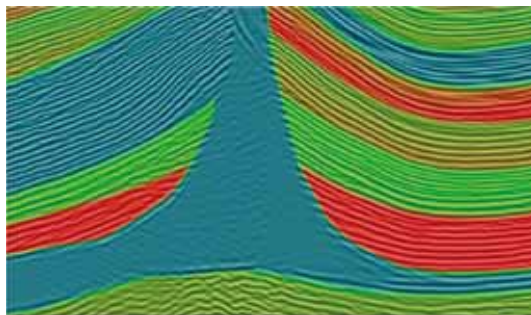


各向同性（左）、VTI（中）、TTI（右）介质中地震波前比较

RTM 算法对各向异性介质能得到更准确的成像结果，尤其是复杂构造的边界和盐下成像更好。



各向异性介质的 TTI 各向异性（上）、VTI 各向异性（中）和各向同性（下）RTM 偏移结果



速度模型与 TTI 各向异性 RTM 偏移结果叠合显示

◆多重 Higdon 吸收边界条件

由于实际波场的计算范围有限，而波场的传播会超出计算边界。如果不消除超出边界

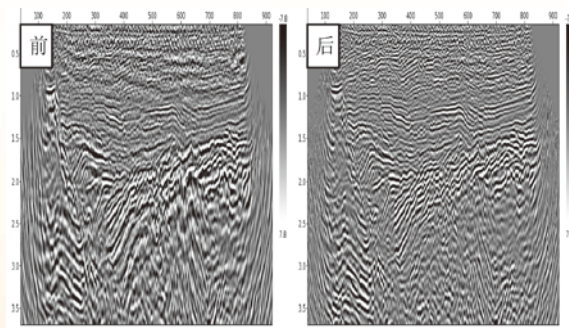
的波场就会在边界处产生很强的干扰噪声，进而影响成像效果。GeoEast-Lightning 采用多重 Higdon 吸收边界条件，达到近乎完美的吸收效果，有效地抑制了人为反射引起的噪声。

◆偏移噪声消除技术

低频噪声产生的本质原因是在偏移过程中对回折波和逆向散射进行了相关成像。为去除互相关条件成像中低频噪音、干扰等噪声软件采用拉普拉斯算子 (Laplacian) 滤波方法，对得到带有假象的成像结果进行滤波，滤波器作用于波数域。该算子作用于逆时偏移互相关成像结果相当于乘以 $\cos^2\theta$ ，也就是随成像角度而衰减。



Higdon 吸收边界效果图

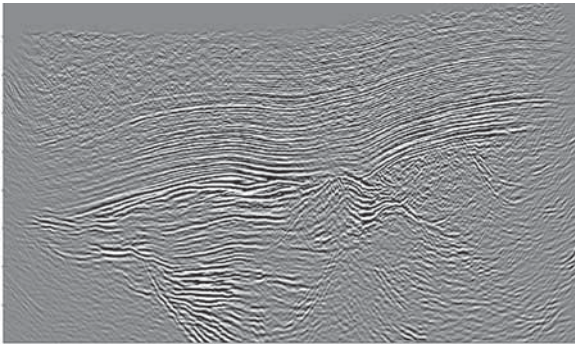


消除非反射噪声前后的偏移结果对比

3.2 高性能计算技术

GeoEast—lightning 与某国际同类软件相比在计算效率方面总体高很多。随着成像主频的升高，其计算效率的优势很快体现出来。当主频为 60Hz 时，其计算时间仅为某国际同类软件的 8%。

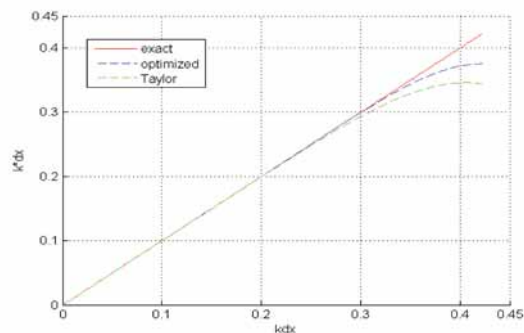
偏移孔径	截止频率 (Hz)	GeoEast—Lightning
10000 *10000 *8000	35	1 GPU
		16m55s
	40	1 GPU
		21m50s
	50	1 GPU
		33m40s
	60	1 GPU
		48m20s



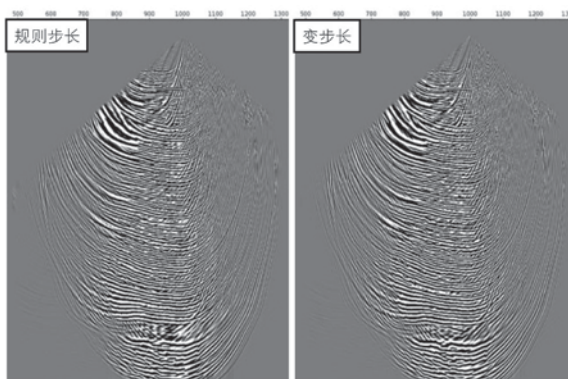
RTM 算法的成像剖面（主频 60Hz）

◆变步长差分优化技术和动态计算域扩张技术

为了提高计算精度，同时能适应剧烈的横向速度变化需要采用时间空间域有限差分法进行 RTM 偏移。变步长差分优化技术考虑了速度随深度的变化以及地震波频率随深度的变化，采用随深度变化的有限差分格式实现波场外推。其优点是随着深度增大，差分步长会越来越大，可以节省大量的差分计算时间。同时，该技术与 Taylor 展开方法相比具有更高的计算精度。

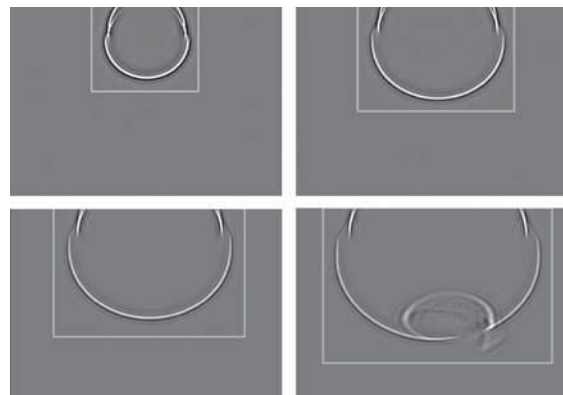


变步长差分优化技术的计算精度对比图



规则步长和变步长单炮偏移结果比较

动态计算域扩张技术是提高 RTM 偏移算法计算效率的又一项重要技术，充分考虑下行波场的传播过程，通过最大介质速度控制每一时刻最大的波场空间范围。在波场计算过程中只



波前范围控制计算技术控制的不同时刻
最大波场范围图

对该范围内的波场进行计算，范围以外的波场可以忽略，从而节省了大量的零波场计算，显著提高了计算效率。

◆最优负载平衡 GPU+CPU 协同计算模式

GeoEast-Lightning 最大程度上发挥 GPU 和 CPU 各自的优势和可利用资源。将计算密集的波场传播和边界吸收放在 GPU 里计算。利用计算域扩展信息，实现高性能的 CPU 并行成像条件算法和高性能的 CPU 并行压缩算法。协调 GPU、CPU 各自运算时间，最大限度地减少同步等待时间。

◆自治模式并行管理技术

具有独创的自适应负载均衡功能、没有负载的短板效应，能在不同性能集群同时运行，可以发挥所有计算节点最大的计算能力。与传统的主奴模式并行管理相比有以下优点：效率更高，某节点出故障时项目只需该单一节点从

断点重启；允许非均匀机群协同工作；其自然负载均衡机制确保非均匀集群几乎所有节点同时完成计算任务；在项目运算过程中，用户可以自由地中断、删除、添加节点，以上操作对正在运算的节点没有任何影响。

	主奴模式	自治模式
任务控制	主节点将任务在从节点间平均分配	主节点建立任务池，从节点自行取得任务
工作模式	主节点传递数据和速度模型，收集偏移结果，从节点偏移运算。	主节点唤醒从节点，从节点自行读取数据和速度模型，偏移运算并保存偏移结果。
节点故障	全部节点暂停，恢复	单个节点暂停，恢复
节点损坏	项目从头重启	坏节点删除，任务重置
其他控制功能		作业运行中自由添加或暂停工作节点

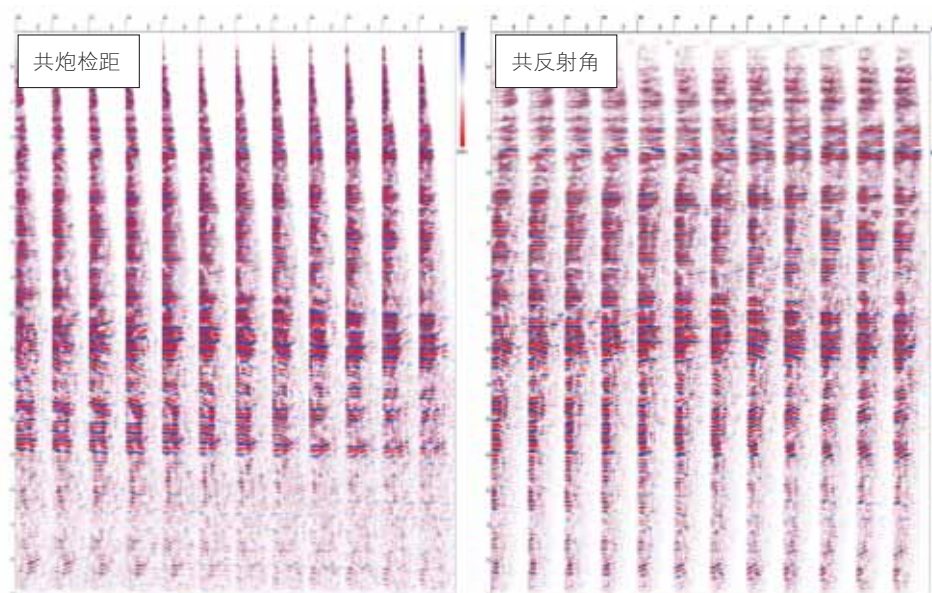
GeoEast—Lightning 软件并行框架创新设计：自治模式（与传统模式对比）



计算过程中可随时暂停计算 (Pause)、恢复计算 (Resume)、删除节点 (Remove) 以及增加 (Add) 计算节点

3.3 灵活多样的成像道集生成技术

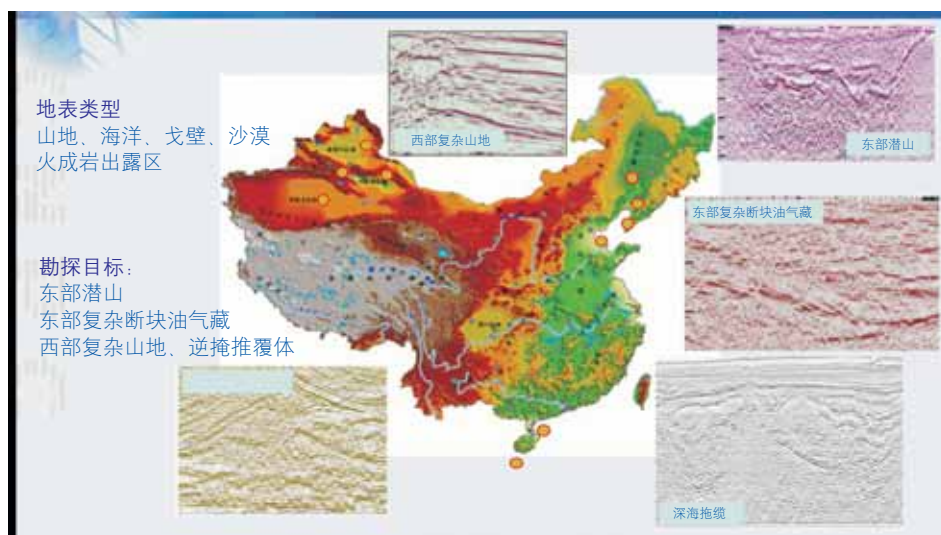
用户可在偏移后灵活地采用不同参数生成多种形式的共像点道集；采用单炮偏移图像存储技术，在偏移过程中可以按用户要求存储每炮的偏移结果，用于偏移后生成多种形式的共像点道集。几乎不增加运算时间，但大大增加了后续道集生成和处理的灵活性。可为后续处理和地震资料岩性解释提供丰富的基础资料。



共炮检距道集和共反射角道集

4 典型案例

GeoEast—Lightning 软件适用于山地、海洋、隔壁、沙漠和火成岩出露区等多种复杂地表类型，并成功应用于中国东部潜山、复杂断块、盐丘和逆掩推覆体等多种复杂构造的成像。

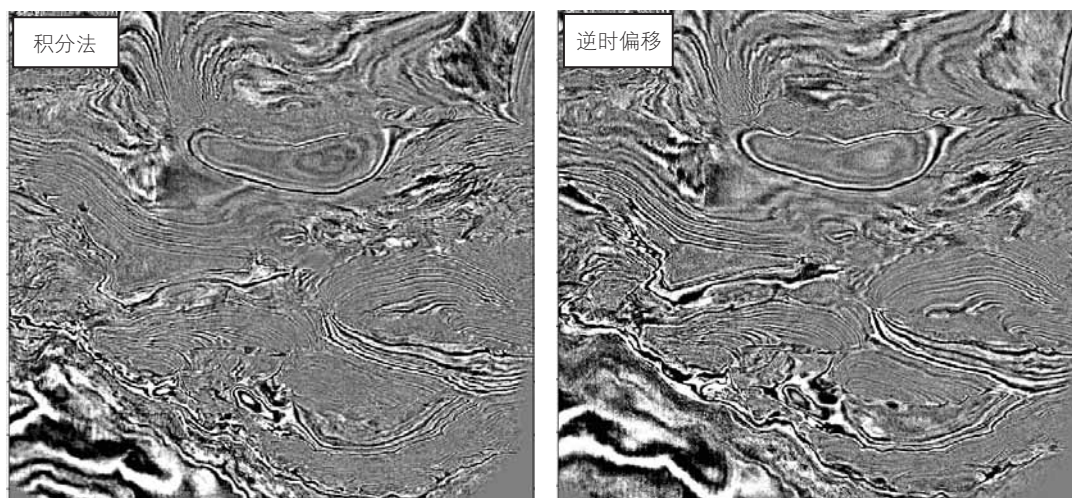


GeoEast—Lightning 系统适用的地表类型和勘探目标图

4.1 盐下成像案例

盐丘是一类高波阻抗地质体，地震波遇到盐丘以后大部分能量都被反射回地面。地震采集到的反射波只携带少量盐下层位反射的有效信息，盐下成像需要利用已知微弱的、来自各个方向的有效信息成像。因此，盐下成像是衡量 RTM 偏移方法的重要地质构造，在墨西哥湾、西非等盐丘发育的储层，RTM 偏移方法相比其

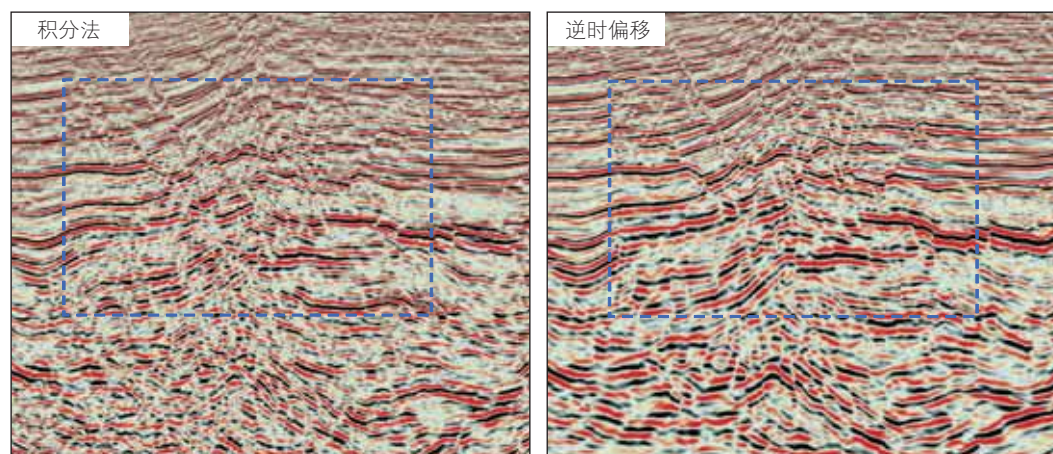
他偏移方法能得到更好的盐下构造，为盐下油气藏的开发提供了可靠的构造依据。国外某滨里海三维工区是盐丘发育的地质区块，盐下构造层位是储层发育区。从不同算法成像结果的对比可以看到，RTM 偏移方法比积分法对盐丘边界的刻画更清楚，盐下的成像更连续，盐丘内部的噪声更小。



滨里海三维工区叠前深度偏移结果对比

4.2 复杂断块成像案例

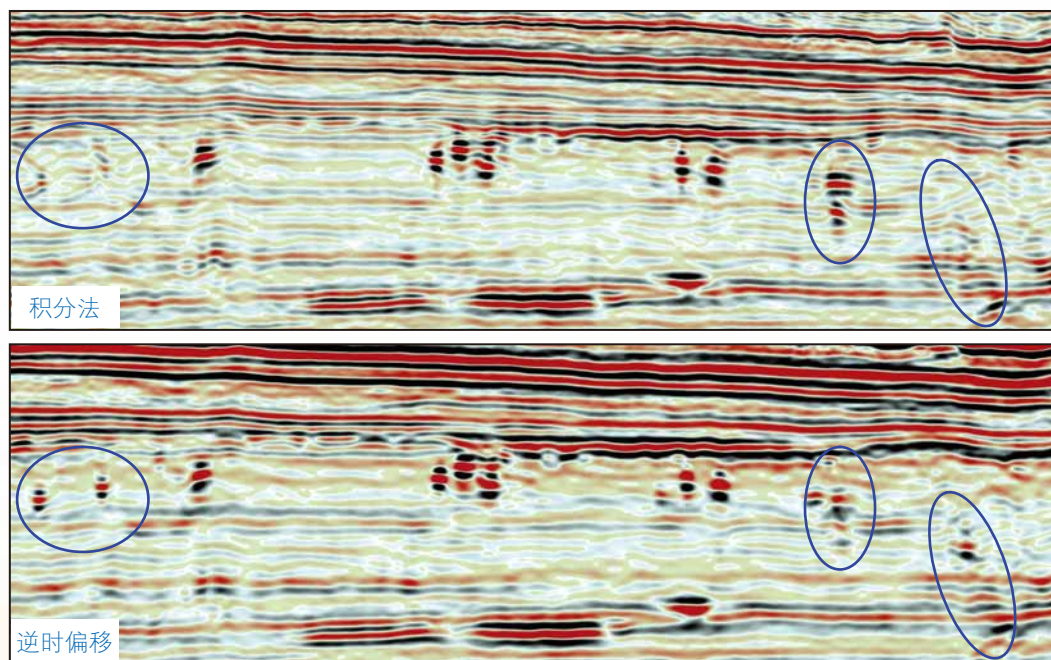
复杂断块的成像难点在于断块边界的准确刻画，以及断面的延展性刻画。从中国东部某工区的小断块叠前深度偏移结果比较来看，RTM 偏移结果的小断块断点更干脆、成像清楚。



东部地区某三维工区叠前深度偏移结果对比

4.3 溶洞和缝洞成像案例

溶洞和缝洞是中国新疆探区的成像难点，其原因是传统成像方法很难准确刻画溶洞的边界。RTM 成像方法能将来各个方向的绕射波收敛，准确雕刻溶洞边界。塔北哈拉哈塘哈 6 井区的叠前深度偏移结果良好。



塔北哈拉哈塘哈 6 井区的叠前深度偏移结果对比

5 科研装备

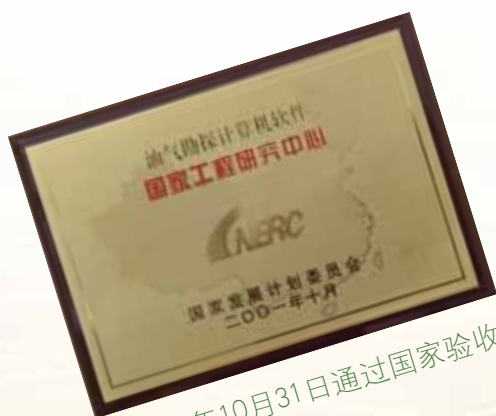
中国石油集团东方地球物理公司物探技术研究中心具有高性能并行机群，共有 CPU20790 个、核数 76458 核，GPU824 个、核数 470000 核，每秒浮点运算次数 1497Tflops，存储总量达到 20000TB。



6

资质标准

中国石油集团东方地球物理公司物探技术研究中心是集地震资料采集、处理、解释方法研究与软件开发为一体的综合物探技术研究机构，是油气勘探计算机软件国家工程研究中心，通过质量管理体系认证、CMMI 三级认证。总部在河北涿州，设北京（昌平）、休斯敦研究分中心，与国际国内知名科研院所开展广泛合作，持续推动物探技术进步。



2000年10月31日通过国家验收



CMMI三级认证



质量管理体系认证

知识产权

申请国家发明专利 3 项，登记软件著作权 3 项。

序号	知识产权名称	知识产权类别	申请号 / 授权号
1	一种三维 TTI 地震各向异性介质逆时偏移成像方法及装置	中国发明专利	201310531155.3
2	一种应用 CPU-GPU 平台进行地震波逆时偏移成像方法	中国发明专利	201310545969.2
3	一种适用于逆时偏移的吸收边界条件方法	中国发明专利	201310293637.X
4	GeoEast—Lightning 叠前深度偏移软件 V1.0	软件著作权	2011SR004322
5	GeoEast—Lightning 叠前深度偏移软件 V2.0	软件著作权	2012SR060899
6	GeoEast—Lightning 叠前深度偏移软件 V3.0	软件著作权	2012SR101312



7

专家团队



戴南浔 博士，教授，自 2009 年加入中石油东方地球物理公司以来，带领团队积极开展地震波成像和速度反演领域的前沿技术研发。他主持研发的 GeoEast—Lightning（“闪电”）软件，填补了中国石油深度域偏移成像领域的多项技术空白。

电话：010—82072020—3018

Email：nxdai@bgprdc.com



赵波 博士，教授级高级工程师，中国石油学会、SEG、EAGE 会员。多次担任国家重大专项、自然科学基金和重大科技攻关项目的负责人。在国内外核心期刊发表论文 10 余篇。

电话：0312—3825908

Email：zhaobo@bgs.com.cn



章威 博士，工程师，2009 年加入东方地球物理公司休斯敦研发中心，在 GeoEast—lightning 项目中的任务是系统集成和开发。曾发表中文专著 1 本（合著），杂志特邀综述 2 篇，在国外核心期刊发表论文 24 篇。

电话：010—82072020—3008

Email：wzhang@bgprdc.com



程润伟 博士，高级工程师。2009 年秋天加入东方地球物理公司休斯顿研究中心，在 GeoEast—lightning 软件开发中主要从事基于 GPU/CPU 异构多核架构的开发。出版专著 5 项（合著）。

电话：010—82072020—3008

Email：chengrunwei@bgprdc.com



武威 工程师，主要从事深度偏移及深度域建模方法研究。2009 年加入 GeoEast—Lightning 项目组，主要从事方法研究，模块开发，软件测试等工作。先后参与国家、集团公司和东方地球物理公司 6 项科研项目的研究，发表论文 3 篇。

电话：010—82072020—3008

Email：weiwu@bgs.com.cn



吴晓丰 工程师，主要从事基于波动方程的叠前深度偏移方法研究与软件开发工作。在 GeoEast-Lightning 软件开发中主要担任方法研究、模块开发、软件测试等工作。先后参与国家、集团公司和东方地球物理公司 5 项科研项目研究，发表论文 6 篇。
电话：0312-3822474
Email：wuxiaofeng@bpg.com.cn



张广娟 工程师，主要从事软件测试和数据处理。在 GeoEast-Lightning 软件开发中从事各个版本的测试和用户手册编写。先后参与集团公司 4 项科研项目研究，发表论文 3 篇。
电话：010-82072020-3008
Email：zhangguangjuan@bpgprdc.com



刘磊 工程师，从事地震信号处理中多次波压制、叠前深度偏移等算法研究与软件实现工作。在 GeoEast-lightning 软件开发中主要担任方法研究，模块开发，软件测试等工作。获国家专利 1 项，发表论文 2 篇。
电话：010-82072020-3008
Email：liulei@bpg.com.cn



郭惠英 工程师，主要从事 GeoEast-Lightning 软件的推广应用，对 GeoEast-Lightning 软件提出了大量有价值的建议和新需求 200 多条，多个被采纳，并已投入生产应用。发表论文 3 篇。
电话：0312-3828625
Email：guohuiying@bpg.com.cn



王兆磊 博士，高级工程师，主要从事地震资料处理，在 GeoEast-Lightning 主要从事软件测试与推广应用。先后参与十余个国家、股份公司、东方公司的攻关、科研项目研究，共发表 6 篇学术论文。
电话：0312-3828629
Email：wangzhaolei@bpg.com.cn



联系人：刁顺 先生
电 话：86-10-5998-6059
Email: sdiao@cnpc.com.cn

Contact: Mr. Diao Shun
Tel: 86-10-5998-6059
Email: sdiao@cnpc.com.cn



