

国产地震处理解释软件的发展

王宏琳* 罗国安

(东方地球物理公司物探技术研究中心,河北涿州 072751)

王宏琳,罗国安. 国产地震处理解释软件的发展. 石油地球物理勘探,2013,48(2):325~331

摘要 从20世纪70年代初在“150工程”上开发了中国第一套地震数据处理系统以来,东方地球物理公司国产地震处理解释软件已经历了40年的发展历程。其中包括:20世纪70年代末开始的技术引进、80年代的“银河工程”、90年代的GRISYS和GRISStation系统的研发,以及近年推出的GeoEast地震数据处理解释一体化系统。中国的地震勘探已进入了一个全新的阶段。如今GeoEast系统快速发展,正在成为BGP地震数据处理解释特色技术的有效载体,并将发展成为CNPC油气勘探的主流软件。本文还讨论了地震数据处理解释软件的发展趋向,包括:进入叠前时代,发展E & P(勘探与生产)应用集成,实现高性能计算和采用先进的“人机互动”技术。

关键词 国产软件 地震处理软件 地震解释软件 150工程 GeoEast

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 概述

地震处理解释软件是地震处理解释知识的提炼和“固化”,也是物探技术的载体、油气勘探的利器。本文以中国石油集团东方地球物理公司(BGP)为例,回顾国产地震处理解释软件的发展历程,讨论物探软件技术的发展趋向。

2 国产地震处理解释软件发展历程回顾

从20世纪70年代初中国第一套地震数据处理程序系统面世以来,国产地震数据处理解释软件已经历了40年的发展历程。图1列举了BGP软件发展的重要里程碑:150工程(150计算机地震处理软

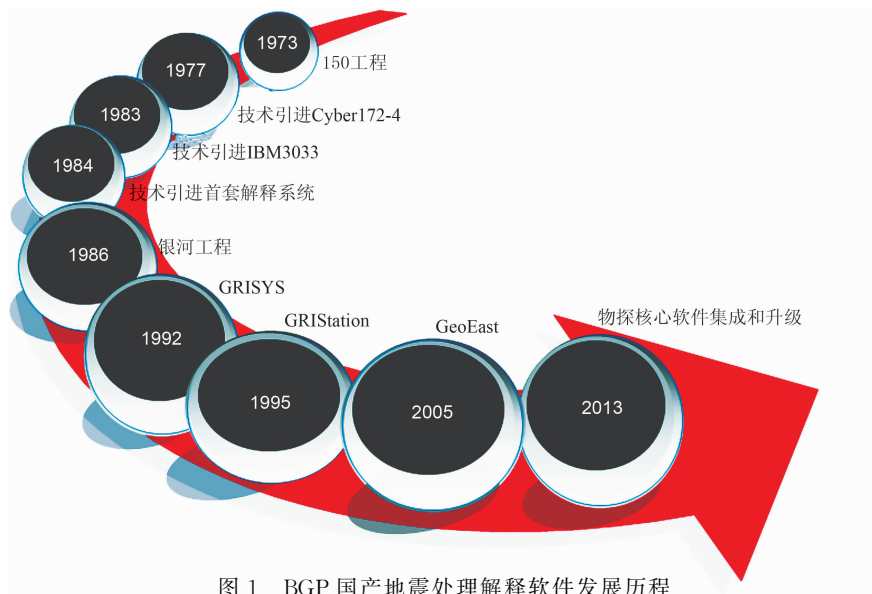


图1 BGP 国产地震处理解释软件发展历程

* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心,072751。Email:wanghonglin@cnpc.com.cn

本文于2012年10月30日收到,最终修改稿于同年12月11日收到。

件开发)、技术引进软件研究和发展、银河工程(银河巨型计算机地震数据处理软件开发)、GRISYS 处理系统和 GRISStation 解释系统软件开发、GeoEast 地震处理解释一体化系统软件开发。目前,中国石油集团公司(CNPC)正在开展为期两年的“物探核心软件集成和升级”科技专项,将进一步推动国产处理解释软件技术进步。

2.1 150 工程——国产第一套地震处理程序系统

20 世纪 70 年代初,中国第一台百万次计算机——150 计算机在艰难的条件下,历经三年多的时间完成了从集成电路到计算机硬件、软件系统和应用软件的研制。这项成果是由北京大学、石油工业部和电子工业部合作完成的,被称为 150 工程。当时石油部 646 厂(BGP 的前身)在 150 计算机上开发了三套软件:程序 A——用于考核计算机的程序(计算量非常大的理论记录偏移程序);程序 B——模拟记录模数转换简单水平叠加处理程序,1973 年 10 月投产;程序 C——中国第一套地震数字处理程序系统。程序 C 包含了 18 种常用的地震数据处理方法*,采用主机和外部设备并行工作方式(即在“中央处理机”对地震道进行处理的同时,“交换器”控制磁带机输入下一个地震道),直接用八进制代码的机器语言编写程序。1974 年 4 月 2 日,用程序 C 处理的中国第一条数字地震剖面,被誉为“争气剖面”。

150 工程在中国计算机技术发展历史上和在石油地球物理计算机应用的发展过程中,具有重要地位[**]。150 工程促进了中国地震勘探数字化,主要表现在地震数字采集日益普及,地震数据处理中心不断涌现,地震数据解释也开始向自动化方向迈进。150 计算机在物探局运行了 10 年,共处理了 14 万公里的地震勘探资料,地震处理软件技术也不断发展,为中国油气勘探做出了重要的贡献。

2.2 引进软件的研究与发展

鉴于 150 工程的成功,当时石油工业部领导决

定进一步推进地震勘探数字化,并开始从国外引进数字地震仪和计算机数字处理技术。

中国最早引进用于地震处理的小型计算机是 Ratheon 计算机(1975 年),最早引进的两种用于地震处理的大型计算机是 Cyber172-4 计算机(1977 年)和 IBM3033 计算机(1983 年)。计算机的引进曾经受到西方国家的限制,例如,限制 Cyber172-4 的阵列机的性能发挥、控制 IBM3033 计算机的使用,而且 IBM3033 和后来引进的 IBM3084 均是 IBM 公司当时在美国宣布“撤回”的产品[**]。但是,当时计算机的引进确实促进了中国地震勘探数字化,我们在引进技术的基础上通过消化、吸收、再创新,促进了中国物探方法研究和软件技术的发展。以 Cyber172-4 计算机地震软件研究与发展为例,共完成了 130 多个新模块和服务性程序的开发[2],不仅增强了系统功能,也提升了系统性能。如地震数据磁带输入效率提高了 30%,数组处理机计算效率提高了 10%~40%。同时还促进了一批新方法研究,如马在田院士的高阶有限差分偏移[3]就是在引进的 Cyber172-4 计算机上实现的。Cyber 计算机和 IBM 计算机,在相当长时间里成为物探局处理中心的主力计算机。同时,由于西方国家对数组处理机(也称阵列机)出口的限制,物探局研究院软件所将引进的 PE3284 计算机连接上国产阵列机,成功地构成多辅处理机多阵列机处理系统,在 7 个油田得到了应用。

物探局最早引进的地震解释软件是 DISCOVERY(1984 年)和 SIDIS(1986 年),特别是 1989 年引进了 Landmark 系统(7 套)和 GeoQuest 系统(5 套)后,有效提高了地震数据解释能力和技术水平。

2.3 银河工程——国产巨型机地震处理系统

银河机(YH-1)是一种当时非常先进的向量计算机,具有很高的向量处理能力。银河地震数据处理系统[4]研制了地震操作系统和 126 个应用功能模块。由于银河机的数据输入输出能力有限——一些

[*] 国家媒体曾经对 150 工程做过报道,这里列举几例:①1973 年 8 月中央新闻电影制片厂拍摄的《伟大祖国欣欣向荣》记录片,报道了中国第一台百万次电子计算机研制成功的科技新闻,拍摄地点在石油部 646 厂计算中心站(河北徐水)。②1973 年 8 月 27 日,《人民日报》头版刊登了中国第一台每秒运算百万次的集成电路电子计算机试制成功的消息。③在北京中华世纪坛“青铜甬道”上距今 300 万年前人类出现到公元 2000 年的时间纪年,也镌刻了 1973 年中国第一台每秒运算百万次的集成电路电子计算机研制成功。④2009 年 10 月 3 日,新华社向海内外播发了中共中央党史研究室编写的《中华人民共和国大事记》。《大事记》记述了新中国成立 60 年来的发展历程,反映了所取得的辉煌成就。《大事记》记载了与计算机技术有关的两则大事,其中一则是 1973 年 8 月 26 日中国第一台每秒钟运算 100 万次的集成电路电子计算机试制成功。这台计算机就是指 150 计算机。

[**] IBM3033 计算机在美国 1977 年 3 月 25 日推出,1982 年 9 月 3 日撤回,中国 1983 年引进;IBM3084 计算机在美国 1982 年 9 月 3 日推出,1987 年 8 月 4 日撤回,中国 1991 年引进。

计算量大的模块在银河机运行效率非常高,而一些输入输出操作多的模块则效率比较低,于是,银河地震处理系统中开发了“分布式处理管理程序”,从而实现异型机连接,能够将一个地震处理作业的不同模块,自动分布到银河主机和前端机(Cyber730)执行,如计算量大的模块(如偏移等)在银河机运行,而输入输出操作多的模块(如绘图显示等)在前端机运行。

2.4 GRISYS & GRISStation——国产商品化的地震处理软件和商品化的解释软件

从 150 机到银河机以及 KJ8920 等,均要针对具体计算机开发相应的地震软件,因此,出现一个新的计算机型号,就需要针对机器重新开发应用软件。GRISYS & GRISStation 系统设计的目标除了技术先进、功能齐全外,还包括可移植性及较强的交互能力。

GRISYS 是国产第一个商品化地震勘探专业软件系统,其基本核心系统设计包括地球物理操作系统(翻译子系统和执行子系统)、地震数据库系统的设计以及地震应用模块规范。GRISYS 提供地球物理语言(编码语言)由地球物理分析员(编码员)用于描述作业的处理流程和参数。GRISYS 系统设计中包含 4 个主要的概念^[5]:模块化、可视化、并行化和一体化。在 20 世纪 90 年代,GRISYS 处理系统每两年有一次版本升级,迄今版本发展到 V8.0,包括 14 类功能,300 多个功能模块,5 大特色技术(有效的去噪技术、配套的静校正技术、高分辨率技术、三维连片技术、叠前偏移技术等)。

GRISStation 地震地质综合解释系统具有地震构造解释、地质解释、三维可视化显示与成图工具、

储层分析及综合评价等功能,并在多线剖面解释、逆断层构造成图等方面独具特色。从 20 世纪 90 年代起至今,GRISStation 解释系统已发布了 3 个版本。

2.5 GeoEast——国产第一套地震处理解释一体化系统

“地震处理解释一体化”是物探技术的重要发展方向。物探软件作为油气勘探技术的载体和工具,应该支持这样的工作模式。早在 20 世纪 90 年代初,国际石油工业界就开展过软件集成技术研究。在 20 世纪 90 年代后期,CNPC 也曾经开展“石油勘探开发应用软件工程化与集成技术”(也称为 OIO 软件平台)科技攻关。2003 年,CNPC 正式就研制地震处理解释一体化软件系统立项。GeoEast 系统研发的目标是充分利用现代先进的计算机信息技术,构建可全面支持处理解释一体化应用功能、适用于油气精细勘探和初期开发的软件平台,使其成为中国油气勘探技术的有效载体。

经过几年攻关,GeoEast 处理系统已经具有较先进的软件平台^[6]和较完备的二维、三维地震资料处理功能,目前已经具备超过 230 个功能模块,涵盖了地震资料处理的各个环节(图 2)。在复杂地表、低信噪比和高分辨率等处理方面具有特色。解释系统不仅能够完成二维和三维常规构造解释任务,还在三维可视化构造解释和多线剖面解释等方面独具特色。地震处理和解释共享一部分功能。经过多年发展,GeoEast 正在成为 BGP 特色技术的有效载体,必将发展成为 CNPC 油气勘探的主流软件。

最近,GeoEast 处理解释一体化系统在复杂构造成像、提高分辨率处理、深海及多波资料处理、叠前属性提取和参数反演等方面又有新的发展。同

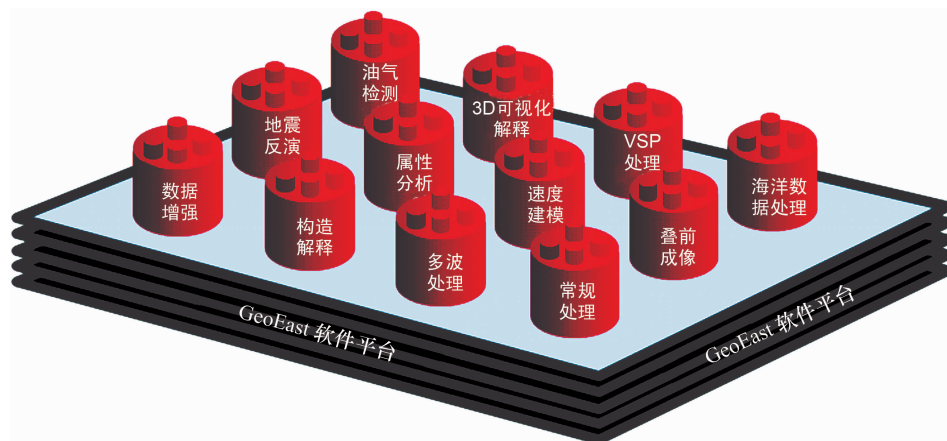


图 2 GeoEast 系统应用功能示意图

时,GeoEast 软件性能不断优化,以叠前时间偏移为例,表 1 是利用相同的地震数据(24030203 道,174G)在相同计算机集群(64 节点)上运行时间的统计。可以看出,新版本 GeoEast 系统的叠前时间偏移的性能有了很大提升,已经可以和国外的著名品

牌地震成像软件比肩。GeoEast 系统还开发了并行和分布式处理框架,支持实现高效率并行计算。

当前 CNPC 正在开展为期两年(2012~2013 年)的《物探核心软件集成和升级》科技专项,主要研究内容是:发展高精度地震成像和地震建模新技术,

表 1 叠前时间偏移性能对比(赵长海博士提供资料)

软件系统	GeoEast		国外 某著名软件	GeoEast 新版本比国外某 著名软件性能提升倍数
	原版本	新版本		
目标线偏移	90min	29min	48min	0.66
体偏移	42.20h	35.45h	51.28h	0.45

发展和集成地震综合裂缝预测和多波处理新技术,全面提升地震处理解释软件和采集工程软件的功能和性能。

3 地震处理解释软件发展趋向讨论

数十年来,国内在地震处理解释软件平台、软件体系结构和软件集成环境的研究和开发方面,不断取得进展。软件平台研发包括应用软件与外部环境的接口(用户平台、数据平台和系统通讯平台);软件体系结构研发涉及层次化、流程控制(顺序控制、循环控制、条件转移控制和子流程控制)和应用框架(交互框架、可视化框架和并行分布式处理框架)等;软件集成环境研发包括用户环境、数据环境、系统运行环境 and 应用开发环境。

地震处理解释软件的发展依赖于需求牵引(油气勘探开发需求)和技术推动(地球物理、应用数学和计算机技术)。地震处理解释软件技术发展主要趋向包括:地震处理解释进入了叠前时代;发展勘探与生产应用集成;实现高性能计算和采用先进的“人机互动”技术。

3.1 叠前时代

一些地球物理学家认为,地震数据处理解释已经进入“叠前时代”。有些国外地球物理公司甚至声称“Everything Prestack”(“一切在叠前”)。叠前成像已经成为主流技术,而且许多地球物理公司推出了“叠前解释”软件,使解释人员可以利用叠前数据验证叠后解释结果或拾取叠前属性,以及进行联机快速面向目标重新处理。

叠前时代对数据管理^[7]和可视化技术提出了新的挑战,包括:①在项目管理系统中集成叠前地震数

据,并实现在叠后数据体和叠前道集(共成像点道集)的链接和索引;②具备多维可视化和拾取操作能力,在一个窗口视图同时显示叠前和叠后数据,以及多层次 2D 窗口与 3D 窗口同步显示能力;③具备解释功能和处理功能动态集成能力,实现在解释过程中进行实时面向目标交互处理。

3.2 应用集成

地球物理技术的发展,已经从勘探地球物理(Exploration Geophysics)扩展到开发地球物理(Development Geophysics)和生产地球物理(Production Geophysics)。地震数据不仅可用于油田开发规划、初始生产井位置和设施设计、基本建设和油田生产的准备工作,还可以在油田生产活动过程中用于监督油气藏饱和度和压力变化。图 3 为 Eric Klumpen 曾经描述的软件趋势^[8]。从图 3 可以看出:①当前工业界正在努力实现地震、地质、岩石物理和油藏工程的软件系统的应用集成(或称一体化),将实现油气勘探与生产所有软件系统集成;

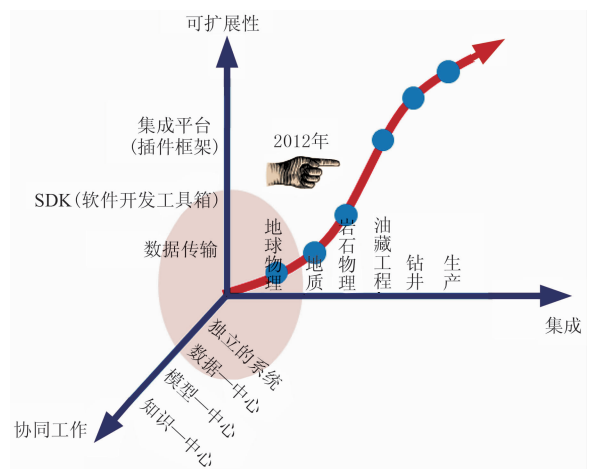


图 3 软件集成趋势(引自文献[8])

②系统集成或扩展能力,从数据传输,发展到通过 SDK(软件开发工具包)支持,将实现统一的集成平台(插件框架);③系统集成将引发协同工作方式的变革,从独立系统发展到以数据为中心和以模型为中心,将实现以知识为中心。

国际上主流地球物理软件公司,都重视发展 E&P(石油勘探与生产)软件集成和协同工作。软件集成可以是紧密集成,也可以是松散集成,也就是说不同层面的一体化。哈里伯顿公司的 DecisionSpace 平台支持集成处理、解释、建模、云服务等。斯伦贝谢公司的 Petrel E&P(勘探与生产)软件平台支持集成地质和地质建模、地球物理软件、油藏工程、区带到远景 workflow、钻井、勘探与生产知识环境工作台。2011 年斯伦贝谢公司初步推出了“一体化的产品组合”,集成 Omega 地震处理系统的地球物理和计算引擎、Petrel 从地震到模拟软件的可视化功能和 Ocean 插件框架,实现了从勘测设计到储层模拟连续的工作流。

GeoEast 系统在国际上率先实现地震数据处理解释一体化,为发展多学科集成和协同工作能力奠定了良好基础。进一步发展插件框架技术和软件开发工具箱(SDK),提升可扩展性,有利于发展国产勘探开发应用集成。

基于云计算的应用集成技术是值得注意的发展方向之一。云计算服务允许用户无论在任何地方,都可以连接到“云”,远程运行勘探开发应用软件,实

时进行 3D 可视化和交互式工作,以及开展团队协作工作。云计算服务平台可以利用高性能计算机系统“资源池”实现负载均衡,并实时根据网络状态自动实现应用优化。云计算服务既可在 LAN(局域网)运行,又可在 WAN(广域网)运行,支持多种操作系统(包括 Windows 和 Linux)。但是,由于地震处理解释涉及海量数据,云计算应用的发展会受到网络带宽等诸多因素制约。

3.3 高性能计算

地震处理解释越来越多利用如同图形处理器(GPU)或现场可编程门阵列(FPGA)这样的处理设备。一颗 CPU 包含 4 到 8 个 CPU 核,而一颗 GPU 却包含数百个尺寸更小的核。这些新型的处理部件提供巨大的计算能力,GPU 计算的性能价格比可望得到十倍的改善(10 年前 PC Cluster 比超级计算机性能价格比得到十倍的改善)。但其代价是软件开发更具挑战性,包括提升 CPU/GPU 数据传输能力、发展 CPU/GPU 集群。

随着高性能计算机技术(HPC)的发展,更复杂、更精确的叠前深度偏移地震成像算法被采用,如图 4 所示。在 20 世纪 90 年代初期采用叠前时间偏移,90 年代中期以来先后发展了基尔霍夫叠前深度偏移、束偏移和单程波波动方程偏移,现在开始发展全波动方程技术(RTM 逆时偏移、FWI 全波形反演等)。图 4 中圆点为据 top500^[*]统计的最高性能计算机不同年份的运算速度。

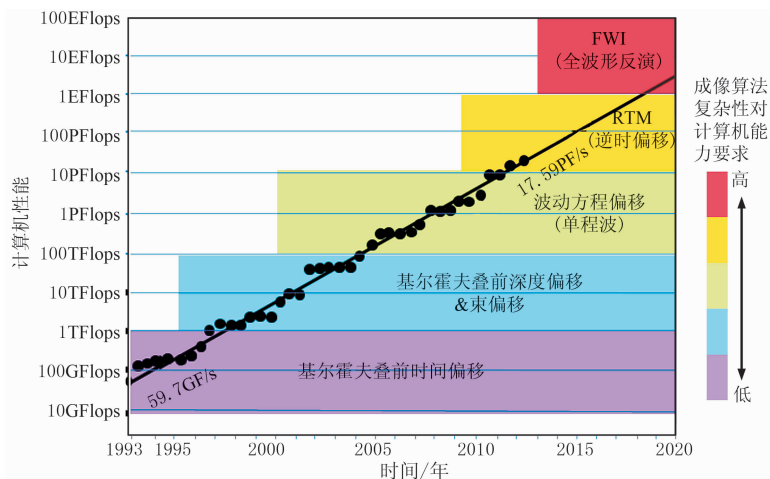


图 4 高性能计算技术发展与地震成像算法应用示意图

[*] top500(一个为高性能计算机提供统计的组织)每半年公布一次世界上最高性能的计算机系统的计算速度评测结果的列表,见 <http://www.top500.org>。性能指标 GFlops、TFlops、PFlops 和 EFlops 分别指每秒十亿、万亿、千万亿和百亿万浮点运算。2012 年 11 月世界上最快速超级计算机 Titan 实测速度为 17.59 Pflops,它拥有 560,640 个处理器,包括 261,632 个英伟达 K20 GPU 加速核。

集群计算已经成为物探行业主流计算模式。地震处理解释将进一步发展集群计算,包括:CPU/GPU 集群、本地/远程集群和跨平台(Windows/Linux)应用。最近出现了一个新的计算模式——前面提到过的云计算。云计算也是一种大型分布式计算模式,它将计算任务分布在由大量计算机组成的虚拟化和动态的资源池上,使 Internet 上的用户能够根据需要获取计算力、存储空间、平台和各种软件服务。这里有必要比较一下集群计算与云计算。集群是通过高速局域网 Infiniband 或千兆位以太网连接的计算机组。这些计算机可以一起工作,解决单一计算问题。MPI(消息传递接口)是在集群计算中最广泛使用的子程序库,能够进行并程序计算节点之间的通信。相比集群计算,云计算按需提供了更有弹性的虚拟机和数据存储。集群和云在科学计算中有以下主要差异:

(1)虚拟化 在集群的计算机上直接运行程序,而云则利用虚拟机,从而使计算更便携、容错,并支持自动动态负载平衡。当然,虚拟化也可能会影响性能。

(2)弹性按需资源 云计算资源动态汇集按需共享,集群计算资源是相对固定的。

(3)网络通信 集群通常使用专用高速局域网技术(例如,Gigabit 以太网或 Infiniband),而云上

的节点共享网络计算,可能会减慢节点间通信。因此,许多研究表明云计算平台速度稍慢于集群性能。

(4)付费方式 “云”是庞大的资源池,按照使用量付费,如同水、电、煤气计费。

总之,云计算与集群计算相比有其自身的优势和缺点。由于云计算是在虚拟机运行,地震处理解释采用云计算需要解决智能数据 Staging(中转缓存,允许在作业开始之前提供所需要的数据,在作业执行完成后保存数据)问题,使得对极大数据集处理成为可能。此外,还得减少人工干预,发展“自主计算”。

3.4 先进“人机互动”技术

1986 年 Peter Mora 曾经讨论过地震学家“把地震记录送进计算机,等待输出地下模型”的梦想和现实^[9]。二十多年过去了,如今距实现地震数据“自动处理”和“自动解释”的梦想仍然遥远,相反,“交互处理”和“交互解释”技术取得了长足进步。

地震交互处理解释需要发展先进的“人机互动”技术,例如,从触摸屏技术^[*](图 5)到先进的虚拟现实技术。虚拟现实使地震处理解释工作者可以与地下数据和模型进行直观、有效的互动。与在外部查看 3D 模型的用户相比,虚拟现实的用户有机会同时“浸没”在更为动态和强大的 3D 模型中,选择导航、比例放大数据,能够从更佳视野检查数

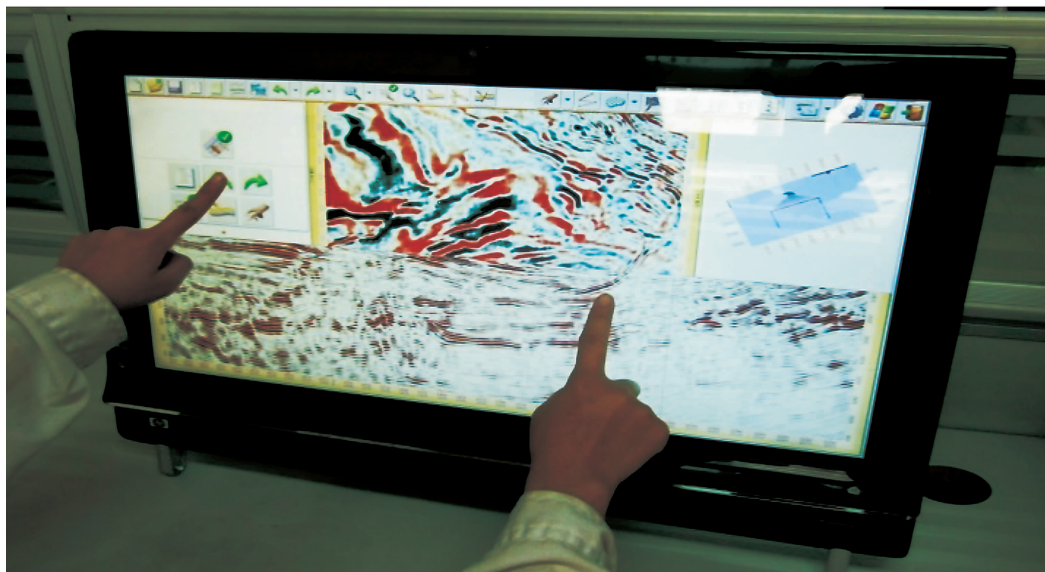


图 5 GeoEast-EasyTrack 触摸屏解释软件

[*] 触摸屏技术在手机上已经获得成功应用,但是在 PC 机上地震处理解释应用还需要解决许多问题。例如,地震处理解释对象细小,用手指触摸不易对准目标。又如,地震处理解释工作时间长,长时间触摸屏幕,容易产生手臂疲劳问题。

据细节。声音是可视化显示的最自然的扩展。视觉和听觉多感知信息,有助于分析复杂的地震数据。利用新的特殊用途的虚拟现实互动技术,例如使用手套来抓取和操作 3D 几何,比使用鼠标和键盘更为有效。此外,虚拟现实还可以向用户提供相关的物理反馈。

由于地震处理解释的许多计算任务需要在大型集群计算机执行,而人机互动界面适用于移动环境(如平板电脑)或桌面环境(如 PC Windows)或虚拟现实中心,需要地震处理解释软件“跨平台”运行。传统的跨平台软件是指“在一个操作系统下开发的应用,放到另一个操作系统下依然可以运行”。对于大型地震处理解释软件,则需要一部分在一种操作系统平台运行,另外部分在另一种操作系统平台运行,未来将进一步实现应用软件在“云计算”环境下运行。

4 结束语

除了 BGP 以外,中国其他地球物理公司和研究机构也在研发地震处理解释软件,如中国石化石油物探研究院、中国石化胜利油田物探研究院、中国石油集团川庆钻探工程有限公司、中国石油勘探开发研究院及西北分院等。

中国石油工业计算机应用始于 1963 年(最早应用在油田开发研究领域),第一套地震数据处理软件系统诞生于 1973 年(150 计算机地震处理系统),笔者亲历了石油工业计算机应用和物探软件开发技术发展历程。尤其可喜的是,近年来 Geo-East 处理解释一体化系统功能不断完善,性能得到了持续提高。

软件开发永远不能安于现状,应该进一步加强应用导向与技术推动结合,持续追求卓越,增强自主创新能力。创新研究中有著名的 3T 理论,指创新的三要素,包括技术(Technology)、人才(Talent)和

包容(Tolerance)。推进国产地震处理解释软件的发展,需要创造“创新友好型”的环境,推进原始创新、集成创新和协同创新。

参考文献

- [1] 计算中心站方法程序研究室. 150 计算机地震数字处理程序 C. 物探数字技术, 1974, 1(2): 3~41
Algorithms and Programming Laboratory of BGP Computing Center. The 150 computer seismic data processing program C. *Geophysical Digital Technologies*, 1974, 1(2): 3~41
- [2] 王宏琳. CYBER 地震软件系统的改进. 石油地球物理勘探, 1980, 15(1): 83~93
Wang Honglin. Improvement of the CYBER seismic system software. *OGP*, 1980, 15(1): 83~93
- [3] 马在田. 高阶有限差分偏移. 石油地球物理勘探, 1982, 17(1): 6~15
Ma Zaitian. Finite-difference migration of higher-order equation. *OGP*, 1982, 17(1): 6~15
- [4] 王宏琳. 地震软件系统设计研究. 物探科技通报, 1988, 6(1): 48~56
Wang Honglin. Studies on seismic software design. *GRI's Processing & Interpretation*, 1988, 6(1): 48~56
- [5] 王宏琳, 张希哲, 牟善林. GRYSYS 软件系统设计中新技术的应用. 计算机在地质中的应用国际讨论会论文摘要集, 1991, 564~569
Wang Honglin, Zhang Xize, Mu Shanlin. New technologies in GRYSYS software system design. *Expanded Abstracts of the International Workshop on Computer Application in Geoscience*, 1991, 564~569
- [6] 王宏琳, 陈继红. 地球物理软件集成环境研究. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 299~305
Wang Honglin, Chen Jihong. Studies on geophysical software integration environment. *OGP*, 2010, 45(2): 299~305
- [7] Philip Neri. Data management challenges in the pre-stack era. *First Break*, 2011, 29(1): 97~99
- [8] Eric Klumpen. Extensibility beyond Ocean. <http://www.ocean.slb.com/Docs/OceanDevelopersForumEAGE/Extensibility%20beyond%20Ocean%20EricKlumpen.pdf>. The Third Ocean Developers Forum, 2011, 1~18
- [9] Peter Mora 等. 大型弹性波场反演. 见: 地震勘探中的超级计算机. 北京: 石油工业出版社, 1992, 111~121

(本文编辑:刘英)