

石油物探 计算机应用与软件开发

..... 王宏琳 赵 波 罗国安 编著



石油工业出版社

石油物探计算机应用与软件开发

王宏琳 赵 波 罗国安 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讨论石油物探计算机应用与软件开发的重大课题,分为6章。第1章绪论,回顾国内外石油物探计算机应用和软件开发技术的发展历程和发展趋势,讨论计算机应用如何促进物探技术变革、物探软件和地球物理学科发展。第2章批量处理,介绍批量处理和软件模块化的一般概念,地震数据处理系统的基本组成,编程模型、执行模型和运行控制技术。第3章交互计算,介绍地震交互处理、交互成像和交互解释的基本概念,讨论插件框架和基于框架软件开发,以及可视化技术。第4章并行计算,介绍石油物探对高性能计算的需求,向量处理、并行计算、集群计算和GPU计算技术,地震并行处理模式和应用框架。第5章软件体系结构,介绍软件平台、软件集成平台和软件体系结构的基本概念,面向应用集成的软件体系结构模型,讨论物探软件体系结构问题。第6章智慧油气田,介绍从信息高速公路到数字油气田、智慧油气田的技术发展,涉及技术集成、智慧操作、智慧预测和智慧决策,以及智慧云数据中心的大数据平台和远程可视化等方面问题。

本书对于从事石油工业计算机应用和软件开发的工程师具有重要参考价值,也可作为计算机应用、地球探测科学和信息技术等相关专业的大学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油物探计算机应用与软件开发 / 王宏琳等编著.

北京:石油工业出版社,2014.7

ISBN 978-7-5183-0187-4

I. 石…

II. 王…

III. 计算机应用—油气勘探—地球物理勘探

IV. P168.130.8-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第098573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.cn

编辑部:(010) 64523533 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014年7月第1版 2014年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:13

字数:240千字

定价:98.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本书是基于油气勘探计算机软件国家工程研究中心多年软件开发实践撰写的。油气勘探计算机软件国家工程研究中心（即中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司物探技术研究中心），其前身是1986年成立的石油地球物理勘探局研究院方法研究所和软件研究所，向前还可以追溯到1973年成立的燃料化学工业部六四六厂计算中心站方法程序研究室。几十年来，众多从事物探方法研究和软件开发的技术人员致力于发展国产地震处理解释软件，为探测和开发国民经济急需的油气资源提供先进的技术和软件工具。包括：20世纪70年代初的150工程；随后的数字地震勘探技术的引进、应用和发展；20世纪80年代银河工程和多阵列机多辅处理机并行处理系统的研发；20世纪90年代商品化的GRISYS地震数据处理系统和GRISStation地震解释系统的研发；特别是21世纪以来GeoEast地震数据处理解释一体化系统的研发。与此同时，研发队伍也不断壮大：20世纪70年代初派驻北京大学参加150工程的方法程序人员不足20人，如今的物探技术研究中心的员工超过300人，在东方地球物理勘探有限责任公司其他多个单位还有数以千计的从事地震采集、处理和解释计算机应用的专业技术人员和从事石油勘探与生产信息技术服务的工程技术人员。

本书重点讨论了石油物探计算机应用和软件开发中的批量处理、交互计算、并行计算和软件体系结构等问题，介绍国内外物探公司相关技术的发展历程和新进展，也简要讨论了若干计算机前沿技术的应用（如智慧油气田、大数据平台和远程可视化等）。正如书中指出的，“计算机应用促进了石油物探技术变革、物探软件技术进步和地球物理学科发展”。可以说，没有现代计算机应用技术的发展，就没有现代物探技术的发展。同时，石油物探领域也为计算机技术的应用和发展提供了广阔的空间。

本书的撰写和出版得到了东方地球物理勘探有限责任公司钱荣钧教授、《石油地球物理勘探》编辑邵汪庭璋编审，以及油气勘探计算机软件国家工程研究中心祝宽海高级工程师和赵长海博士的支持与帮助。本书第6章智慧油气田部分的内容，受益于与东方地球物理勘探有限责任公司信息技术中心马涛总工程师的多次交流和讨论。在此对他们表示感谢。

作者简介

王宏琳

油气勘探计算机软件国家工程研究中心教授级高级工程师，中国石油天然气集团公司咨询中心专家委员会工程技术专家组专家，享受国务院政府特殊津贴专家。1963年本科毕业于同济大学应用数学专业，先后从事油田开发和石油物探计算机应用与软件开发。曾任中国石油集团地球物理勘探局副总工程师、华中理工大学和同济大学兼职教授。其科研成果获国家科技进步一等奖2项、三等奖1项，以及全国科学大会奖1项、全国科技信息系统优秀成果三等奖1项。1986年获全国优秀科技工作者称号和五一劳动奖章，同年被国家科委授予中青年有突出贡献专家称号，1996年获孙越崎能源大奖。

赵 波

油气勘探计算机软件国家工程研究中心教授级高级工程师，中国石油天然气集团公司专家，中国石油集团东方地球物理公司物探总监兼物探技术研究中心主任，享受国务院政府特殊津贴专家。1982年本科毕业于吉林大学物理系，1999年获成都理工学院物探专业博士学位。长期从事地震信号分析与处理方法研究、应用软件开发和技术管理工作。参与“超大型复杂油气地质目标地震资料处理解释系统”软件开发，其科研成果获2013年国家科技进步二等奖。

罗国安

油气勘探计算机软件国家工程研究中心教授级高级工程师，中国石油天然气集团公司专家，中国石油集团东方地球物理公司物探技术研究中心副主任。1982年本科毕业于复旦大学物理系物理学专业，2009年获中国石油大学地球勘探与信息技术专业博士学位。长期从事地震信号分析与处理方法研究、应用软件开发和技术管理工作。参与“超大型复杂油气地质目标地震资料处理解释系统”软件开发，其科研成果获2013年国家科技进步二等奖。



目 录

1 绪论	1
1.1 石油物探与计算机	1
1.2 国产物探软件发展历程	11
1.3 物探软件技术变革	21
1.4 小结	28
2 批量处理	29
2.1 地震数据处理	29
2.2 地震数据批量处理	32
2.3 地震数据处理软件模块化	33
2.4 一个简单的模块化地震处理系统	37
2.5 地震数据处理系统结构	41
2.6 GeoEast地震数据处理解释一体化系统	43
2.7 地震批量处理运行控制技术	51
2.8 地震数据组织	54
2.9 小结	59
3 交互计算	61
3.1 交互处理与成像	61
3.2 交互处理和成像系统结构	65
3.3 交互解释	70
3.4 插件架构与基于框架软件开发	76
3.5 三维可视化与体透视技术	84
3.6 小结	91

4 并行计算 92

- 4.1 石油物探高性能计算 92
- 4.2 向量处理 97
- 4.3 并行计算 105
- 4.4 集群计算 111
- 4.5 地震数据并行处理模式与应用框架 117
- 4.6 地震成像并行计算几例 132
- 4.7 小结 139

5 软件体系结构 141

- 5.1 软件平台概念 141
- 5.2 软件集成平台 144
- 5.3 软件体系结构 149
- 5.4 物探软件体系结构设计问题讨论 159
- 5.5 组合多式样异构体系结构 164
- 5.6 小结 166

6 智慧油气田 167

- 6.1 从信息高速公路到智慧油气田 167
- 6.2 数字油气田技术集成 170
- 6.3 智慧油气田 177
- 6.4 智慧云数据中心 185
- 6.5 知识集成 195
- 6.6 小结 199



1.1 石油物探与计算机

1.1.1 石油物探数字化革命

石油和天然气资源是现代工业文明的重要基础。当前油气资源勘探的最重要方法是地球物理勘探,简称石油物探。在英文、法文和俄文中,“地球物理”分别是“Geophysics”、“Géophysique”和“Геофизика”,均是由“地质学”和“物理学”组成的合成词。顾名思义,地球物理方法是用于解决地质问题的物理方法,是通过间接测量获得一些地下地层的物理参数,了解和研究地质构造或岩层性质。

在油气勘探与生产应用中,地震勘探是一种利用回声定位的物探技术,在概念上有些类似声呐和医学超声波^❶,其目标是获得地球的地下图像、地层构造和岩石性质,故有人形象地比喻为给地球做CT。图1-1是陆地地震勘探数据采集示意图:炮点震源用于产生冲击波,检波器用于接收岩层反射的能量,并通过电缆传输到记录仪器车,记录存储在磁带或磁盘上。石油地震勘探方法源于第一次世界大战期间用以确定敌方炮兵位置的方法。当时美国标准局曾经组织开发了声波

❶ 2001年7月22—26日,在美国加利福尼亚的Newport Beach,曾经举办七个半天的“地球物理、医学和空间成像”研讨班。卫星雷达、光学成像、医学成像(包括核磁共振、X射线和超声波成像),与地震成像面临类似的问题。例如:(1)散射理论用于三个领域的成像处理(当然对数据和信号强度要求不同)。(2)四维地震勘探涉及的重复或时间延迟研究,可以从时间延迟医学成像中获得有益的经验。地球物理、医学和空间成像三个领域的区别为:(1)利用不同类型波在不同类型介质成像:地震弹性波通过的介质非常复杂;医学不同形态的波如声波、X射线和核磁共振,穿过的三维介质相比较而言一般不如地震成像复杂,而且界面较平滑;空间成像则利用不同频率范围的电磁谱,是对地球或其他星球体的较浅的地下成像。(2)观测系统区别很大:对于地面地震,震源和检波器被限制位于需要获得内部图像的材料表面,通过反射成像;医学成像大部分通过透射而不是反射(超声波除外)来成像;空间成像的源和接收器,与成像表面的距离远。(3)实时性不同,医学成像实时最重要。(4)在对于计算机能力的要求方面,地震成像比其他两个应用领域高。



测距装置，用在欧洲战场寻找敌方发炮位置——炮弹发射的空气载声经过声波测距装置的麦克风阵列，空气波到达时间的电信号被传到中心站，从麦克风阵列记录的时间差可以确定声源位置。声波测距试验和系统极大影响了反射地震学的诞生。在1918—1919年间开始试验将这项创新技术用于石油勘探。1924年E.D.Golyer利用单次覆盖地震资料，发现了第一个油田。但是，直到20世纪50年代，勘探工作仍然主要依据地表露头资料和未经处理的记录在光敏纸带上的地震勘探资料。

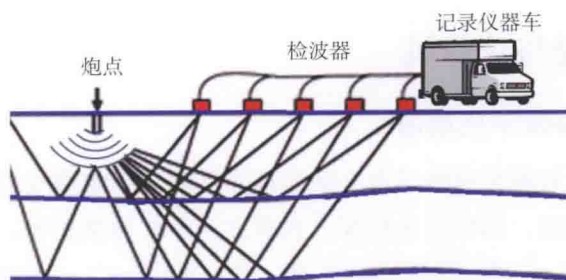


图1-1 地震勘探示意图

20世纪50年代初期，在地震勘探中开始利用模拟磁带记录系统代替纸带记录系统。这使得原始记录可以多次回放，从而可利用多种数据处理方法压制噪声和增强信号。但是，那时大多数靠手工整理记录和手工绘图。在数字地震技术提出之前，石油地震勘探采用的模拟磁带记录技术存在很多不足，例如：(1)模拟磁带记录的动态范围小，不能够满足研究地震波的动力学特性要求；(2)模拟记录磁带经多次回放转录后信噪比会大幅度降低；(3)用模拟机对地震记录进行滤波处理精度很低，无法进行复杂的计算工作等。

应用数字计算机处理地震勘探数据的最初尝试可追溯到20世纪50年代初，MIT（麻省理工学院）数学系的研究人员在乔治·瓦德沃兹教授领导下，把著名数学家和控制论专家罗伯特·维纳（Norbert Wiener）的时间序列分析理论，用于石油地震勘探研究。使用的Whirl Wind（旋风）计算机是当时世界上最快的计算机，但那只是一台裸机，要直接使用机器指令（加、减、乘、移位、读、写、传送、条件转移、停机及逻辑操作）写程序，所有地址和操作均用八进制编码，且所有地址均是绝对地址。内存仅1024个16位的字，即2KB容量。没有浮点操作指令，也没有整数除法指令。用纸带作输入设备，没有绘图仪。就在这样环境下，MIT的地球物理分析小组完成了其第一批程序。罗伯特·维纳和MIT地球物理分析小

组(GAG)的探索性研究,以及斯文·特雷特尔(Sven Treitel)和恩德·罗宾逊(Enders Robinson)的开创性工作,形成了数据处理的初步框架,包括带通滤波、层状地下模型和预测误差滤波。这些数学工具,成为以后所有地震数据处理系统的基础。GAG每天用机一小时为Mobil等石油公司处理资料(当时是世界上最大的计算机用户之一),将地震反射的模拟信号转化为数字信号,进行滤波和去假频,增强有效信号,可谓地震勘探数字革命的先驱。这项工作的意义正像三十多年后美国的一个正式国家委员会所指出的^[1]：“维纳的经典数学论著《平稳随机序列的外推、内插和光顺》标志着一个新时代的开始……例如,由于应用维纳和列文逊的理论设计出了过滤噪声和识别地震信息的设备,于是,产生了当今规模宏大的石油勘探工业。信息处理技术已经在勘探地球物理中产生了重要作用。”

1952年,WesternGeo(WesternGeco的前身)研究部门开始用计算机进行反褶积方法研究。1956年,油气勘探公司开始对经过模数转换的模拟磁带记录的数据,利用计算机进行滤波、叠加及绘制剖面图。同年有人建议在野外采集地震数据时,采用数字记录形式。但是,由于技术上的问题,直到1963年才出现地震数字记录系统。这是石油勘探技术发展的重要一步:不仅使得记录的范围大为扩大,更重要的是为促进计算机数据处理技术的发展打下了基础。

20世纪60年代中至70年代初,在采用数字地震记录仪器和发展了数字地震勘探技术之后,引发了石油物探数字化革命,计算机数据处理真正开始成为油气勘探中不可缺少的环节。20世纪60年代中期,油气勘探公司开始从模拟记录技术转向数字记录技术。石油物探数字化革命收到了明显的经济效果。随着石油勘探程度的发展,为了获得一个有意义的发现,需要钻初探井(野猫井)。从20世纪40年代到60年代中期,初探井数目一直在增加。尽管在20世纪50年代中期以后发明了磁带模拟记录技术,且CDP(共深度点)技术有了显著进步,但也未能够扭转这一趋向。一直到20世纪60年代后期,由于数字地震技术及计算机的应用,发展了反褶积、直接碳氢化合物指示(DHI),以及三维(3D)地震勘探方法等,才减缓和扭转了这个趋向(图1-2)。地震数据采集、处理和解释,已经成为油气田勘探的主要手段(图1-3),其中包括:20世纪70年代三维地震,80年代交互计算技术,90年代的叠前处理技术(叠前时间成像、属性计算、岩石物理、可视化等),21世纪初出现了更先进的技术(叠前深度成像、集群计算等)。而高精度



地震成像成为油气勘探最重要的技术工具^{①[2]}。地震勘探学界近10年来最为重要的研究成果之一是多分量地震勘探技术,这也是地震勘探技术的发展方向,要求建立多分量地震采集设计、监控、处理、解释和反演一体化模式和软件系统^[3]。

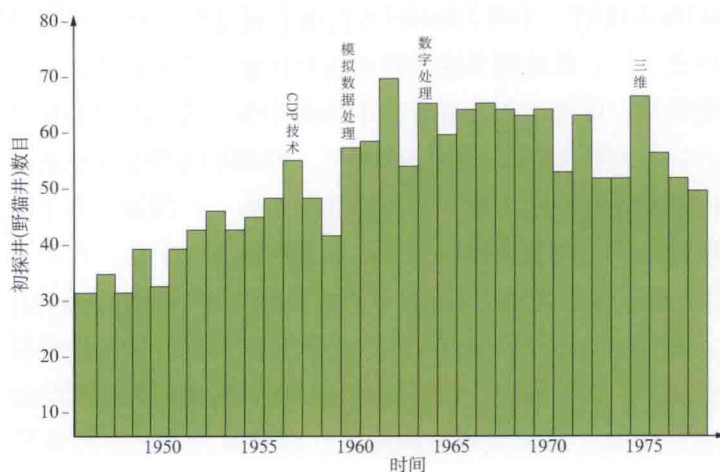


图1-2 重要油气发现需要钻初探井(野猫井)数目

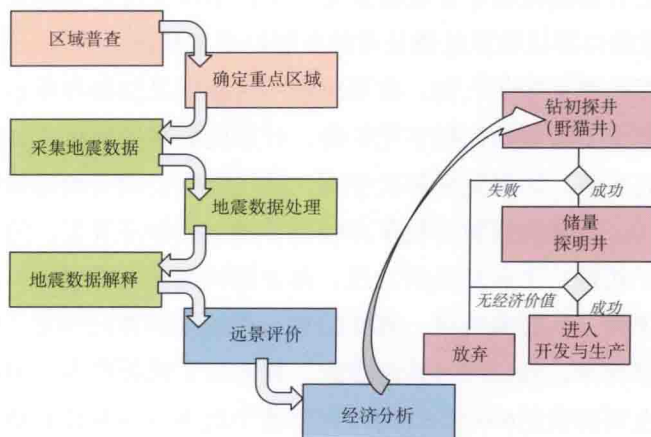


图1-3 油气田勘探基本流程^②

① 20世纪90年代中期,按照美国能源部的要求,NPC(National Petroleum Council)针对石油工业中短期(至1999年)、长期(至2010年)的“技术需求”向主要油气公司、其他综合油气公司、独立公司和服务公司进行过调查,结果排在首位的都是“高精度深度成像”。NPC勘探技术长期需求的排序结果如下:高精度深度成像、三维AVO、三维可视化和特殊地震处理。

② 参考Fred W. Schroeder, Geology and Geophysics Applied to Industry, <http://www.aapg.org/slide-resources/schroeder/>。

1.1.2 石油物探技术历史与计算机技术历史不可分割

美国Tulsa大学Chris Liner教授曾经指出,地球物理的历史与计算机技术的历史是不可分割的^[4]。计算机应用促进了石油物探技术变革、物探软件技术进步和地球物理学科发展。

1.1.2.1 计算机应用促进石油物探工作方式变革

石油物探数字化革命促使了石油物探本身工作方式的变革。在数字化革命以前,地震处理 and 解释工作大多在野外采集现场进行,由于计算机中心的出现,处理和解释工作明显分离(图1-4)。20世纪80年代开始采用计算机工作站进行地震数据解释。随着计算机网络和一体化软件的发展,地震数据处理解释日益呈现重新一体化的趋势,并将向E&P(勘探与生产)应用集成发展。

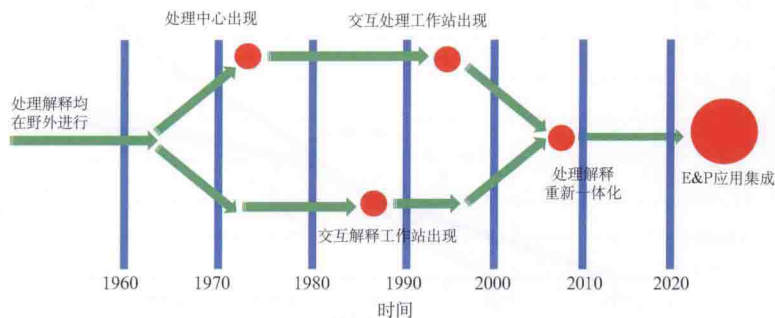


图1-4 地震处理解释工作方式的变革

1.1.2.2 计算机技术变革促进物探软件发展

现代地震勘探方法主要建立在地震波理论、岩石物理、数学科学和计算技术的基础上。计算机的应用无疑是影响油气勘探,特别是地震勘探的最重要事件之一。现代地震勘测可能覆盖数千平方公里和投入数千万元进行数据的采集、处理和解释。在处理过程中,需要利用精细的信号处理和成像技术,以便降低波在复杂的地质环境中传播引入的噪声和畸变。将这些数据转化为可解释的形式需要几周甚至几月的计算机处理时间。发展更复杂的算法和处理更大量的数据,也就需要更多计算机能力、更灵活的组织 and 存储大量数据的方法,以及更先进的组织和控制处理流程的技术——这些均是对软件开发的巨大挑战。有研究者指出^[5],“地球物理软件技术发展表现出先进性、开放性、一体化、自由化、网络化、并行化、可视化、标准化、智能化、普及化等特征”。



众所周知,摩尔(Moore)定律称:集成电路上可容纳的晶体管数目,约每隔18个月便会增加一倍,性能也将提升一倍。对于油气勘探应用计算机的一个类似的预测,是由西方地球物理公司的萨维特(Carl Savit)做出的^[6]:地震对计算机能力的需求,每2.7年提高一个数量级。也就是说,地震对计算机能力的需求增长,远高于摩尔定律的计算机能力增长(图1-5)。实际上,早在1975年地震对计算机能力的需求,就已经超过了商业计算机能够提供的能力。所以从20世纪70年代以来,为了解决商业计算机能力不足的问题,曾经探索过采用各种加速计算的技术。图1-6表示在过去半个世纪间,国际上地球物理计算机经历的五次重大变革。

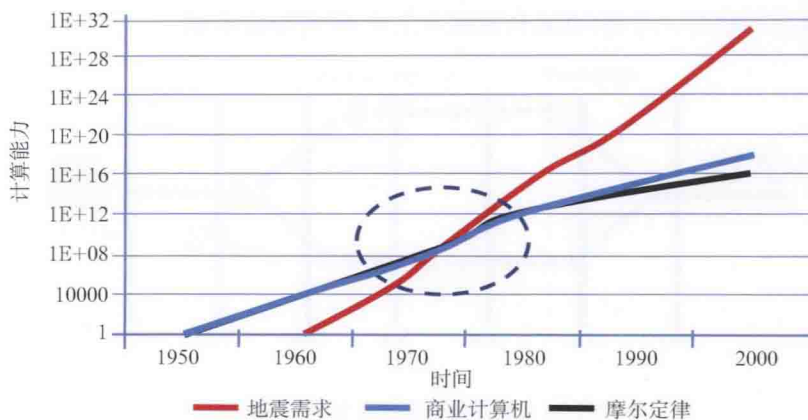


图1-5 地震对计算机能力的需求超过摩尔定律^[6]

(1)20世纪70年代——主机+数组处理机。数组处理机是一种外部向量协处理器,可以对数组进行操作,包括地震数据处理中常用的相关、褶积和FFT。典型代表是IBM公司应西方地球物理公司要求开发的IBM 2938数组处理机(1969年)和IBM 3838数组处理机(1974年),以及FPS公司的AP-120B数组处理机(1975年)。主机系统附加数组处理机后,价格只增加十分之一,而处理地震数据的性能提高四倍以上。

(2)20世纪80年代——向量计算机。向量计算机以流水处理为主要特征,可对数据成批地进行同样的运算。典型代表是Cray-XMP(1982年),Cray-YMP(1988年),IBM3090(1985年),以及中国的YH-1银河巨型机(1983年)。

(3)20世纪90年代——工作站和并行计算机。将交互处理与批量处理集成起来在UNIX工作站和并行计算机上运行。工作站使用RISC（精简指令计算机）技术，典型代表是DEC公司的DECstation 3100（1989），IBM公司的RISC System/6000（1990）。并行计算机代表是IBM Scalable Power PARALLEL 2（1994），Convex SPP-1000（1994），SGI Origin 2000（1996）。

(4)21世纪初年代——集群计算机（Cluster）。PC集群是由PC构成的一种松散耦合的计算节点集合。PC集群计算机的例子是曙光3000和曙光4000L。

(5)21世纪10年代——多核CPU和GPU集群计算机。PC集群的CPU核在不断增加，同时利用具有更多核的GPU加速器。GPU（图形处理器）具有管理复杂场景的策略和高级图像强大处理能力，现在被用于科学和工程计算密集型程序中，包括地震数据处理和成像。

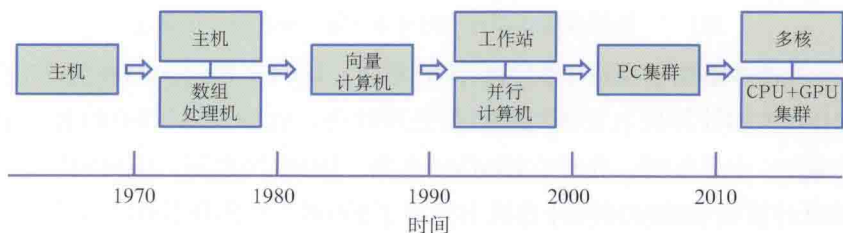


图1-6 地震数据处理计算机发展历程

计算技术的发展，推动了地震数据处理技术特别是地震成像技术的不断发展（图1-7）：20世纪60年代，计算机只能进行简单的地震道计算；20世纪70年代出现数组处理机（也称为褶积器或阵列处理机），大大提升了褶积等运算效率，并可以进行二维叠后地震成像；20世纪80年代的向量处理机，可以实现二维叠前地震成像，以及处理三维数据；20世纪90年代的大规模并行机，能够实现三维叠后地震成像，三维DMO，并开始试用三维叠前地震偏移；进入21世纪，广泛利用高性能价格比的集群计算机和GPU技术，能够实现三维Kirchhoff叠前偏移甚至逆时偏移。未来地震成像、解释和地震反演对于高性能计算将提出更高的要求。随着计算机性能的提升，三维弹性波动方程偏移、全波形反演，以及多分量成像技术将得到广泛的应用。

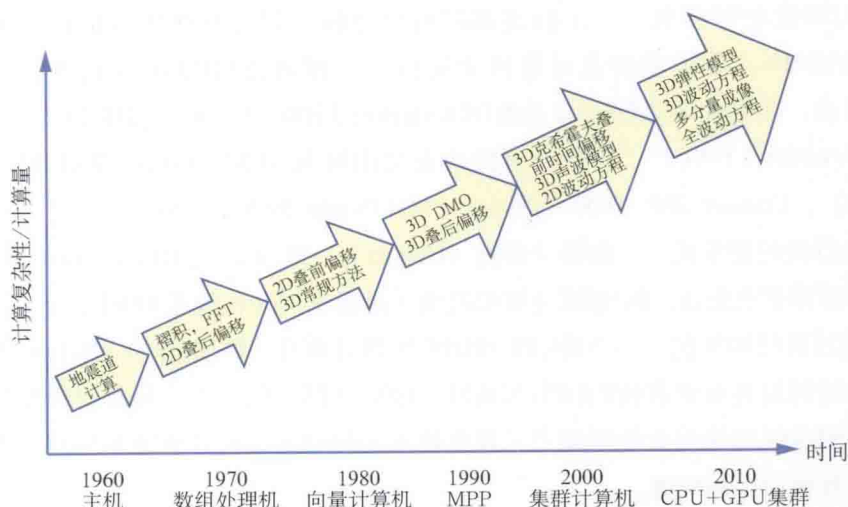


图1-7 地震数据处理算法的复杂性随计算机技术的发展

计算机技术的变革促进了物探软件的发展。1964年WesternGeo同IBM公司合作,在IBM7090计算机上发展地震数据处理软件。这套软件用FORTRAN语言写成。随后的二十多年间,先后在IBM360系列、IBM370系列、IBM3033计算机、IBM33081计算机和IBM3090计算机上发展了300多个模块和2000多个子程序。其他国家也开始发展地震处理软件,其中包括法国和中国。

表1-1以法国CGG和中国BGP为例,综述国内外计算机应用与地震处理软件发展历程中若干事件。

表 1-1 BGP 和 CGGVeritas 计算机应用与软件开发发展历程

年代 (计算机变革)	CGG	BGP (东方地球物理勘探有限责任公司)
20世纪60—70年代 (主机→主机+数组处 理机)	1966年: CGG建立第一个处理中心,使用SDS9300计算机; 1972年: 开发GeoMaster软件	1973年: 建立第一个处理中心,使用150计算机; 1977年: 引进Cyber172-4机+MAP II
20世纪80年代 (主机+数组处理机→ 向量计算机)	1980年: DIGICON开发DISCO处理系统运行在DEC VAX 11/780上; 1984年: CGG GeoVecteur (CRAY批量处理版本) 软件安装在当时最大计算机Cray 1S上; 1988年: DIGICON开始研究MPP (大规模并行处理), 并开发新的处理系统SeismicTANGO替代DISCO	1983年: 引进IBM3033+3838; 1986年: 建立YH-1巨型机地震数据处理系统; 1987年: 开发PE3284+AP2704 多数组处理机多辅处理机地震数据处理系统; 1987年: 引进IBM3081+3838

续表

年代 (计算机变革)	CGG	BGP (东方地球物理勘探有限责任公司)
20世纪90年代 (向量计算机→工作站和并行计算机)	1991年: CGG GeoVecteurPlus将批量和交互处理集成在UNIX平台上运行; 1994年: CGG并行GeoVecteur运行在Convex SPP1000上; 1996年: CGG GeoVecteur支持IBM, SGI, SUN和HP平台	1991年: 引进IBM3084+3838; 1992年: GRISYS在UNIX平台上运行; 1995年: 引进IBM SP2并行机
21世纪初 (工作站和并行计算机→集群计算机)	2001年: GeoCluster在PC集群上运行; 2002年: GeoCluster1.1全面取代了GeoVecteurPlus; 2003年: GeoCluster2.1全部软件可以在PC集群上运行	2001年: 安装曙光3000 (EP460) 地震数据处理系统; 2003年: 安装曙光4000L集群地震数据处理系统; 2005年: GeoEast系统在PC集群上运行
21世纪10年代 (集群计算机→多核CPU和GPU集群计算机)	2013年 GeoVation2013提供了处理需求较完整解决方案	2013年 GeoEast 2.6提供了处理需求较完整解决方案

CGG在1966年建立第一个处理中心,从那时以来,CGG先后开发了GeoMaster(1972年)、GeoVecteur(1984年)、GeoVecteurPlus(1991年)、并行GeoVecteur(1994年)、GeoCluster(2001年)和GeoVation(2010年)。CGG在2000年启动GeoCluster,所有软件支持Linux,优化用于Cluster架构。几年间,CGG世界范围地震数据处理网络计算能力迅速提升(2002年为15Tflop/s,2004年为40Tflop/s,2005年为65Tflop/s,2006年超过150Tflop/s,2013年达到12Pflop/s^①)。GeoVation是CGG公司新一代二维/三维/四维地震数据处理系统,集成了原CGG公司的

① 在表示计算能力常用KFLOPS、MFLOPS、GFLOPS、TFLOPS等,或Kflop/s、Mflop/s、Gflop/s、Tflop/s等,其中最后面的s是“秒”的意思,FLOPS或flop/s是“每秒浮点操作”的意思。表示计算机存储能力常用KB、MB、GB、TB等,其中最后面的B是“字节”的意思。最前面的K, M, G, T等是常数:

K (kilo) 表示 $2^{10} = 1,024$

M (mega) 表示 $2^{20} = 1,048,576$

G (giga) 表示 $2^{30} = 1,073,741,824$

T (tera) 表示 $2^{40} = 1,099,511,627,776$

P (peta) 表示 $2^{50} = 1,125,899,906,842,624$

E (exa) 表示 $2^{60} = 1,152,921,504,606,846,976$

Z (zetta) 表示 $2^{70} = 1,180,591,620,717,411,303,424$

Y (yotta) 表示 $2^{80} = 1,208,925,819,614,629,174,706,176$



GeoCluster处理系统和原Veritas公司(该公司1996年由Veritas和Digicon合并而成, 2007年与CGG公司合并)的VEGA, TANGO等地震数据处理系统的功能, 包括超过450个批处理模块和一系列的交互处理软件, 覆盖了时间域、深度域、宽方位、各向异性、岩性处理的各个方面, 广泛应用于海洋、陆地和过渡带的地震数据处理。最新的GeoVation2013的软件工具提供了处理需求的较完整的解决方案, 包括全波形反演、逆时偏移等工具、真三维宽方位处理技术系列、去除多次波技术系列。2014年2月, CGG推出了GeoSoftware软件系列产品, 包含了Hampson-Russell和Jason的岩石物理、先进的地球物理解释和地震油藏描述, 以及TerraSpark的Insight Earth 三维解释技术。

BGP在1973年建立第一个处理中心, 开发了150计算机地震数据处理系统, 后来在不同阶段也发展了一系列软件系统^[7]: 银河向量巨型机地震处理系统(1986年)、多数组处理机多辅处理机并行处理系统(1987年)、GRISYS系统(1992年)和GeoEast系统(2005年)^①。BGP的GeoEast系统提供了地震处理 and 解释需求的较完整的解决方案。有关BGP地震处理软件系统发展历程, 将在本章1.2节进一步介绍。

1.1.2.3 计算机应用促进地球物理学发展

与许多科学学科发展一样, 过去几十年间计算机应用变革了地球物理学研究方式^②, 拓展了地球物理应用领域。以前, 在油田投入生产前, 地球物理活动即结束——随着开发井的完钻, 勘探团队即被分散到新项目。由于现有油田老化和油价波动, 促使在油田开发和生产过程中增加地球物理应用。石油工业认识到需要提高油藏分布和油水路径的精细描述能力, 准确预测剩余油相对富集区, 以便

① 150计算机地震勘探数据处理方法和程序获1978年全国科学大会奖。数字地震勘探技术的应用和发展(含150计算机和Cyber计算机软件的研究和发展)获1985年国家科技进步一等奖。银河地震数据处理系统获1987年国家科技进步一等奖。PE3284多阵列机多辅处理机地震资料并行处理系统获中国石油天然气总公司1992年科技进步一等奖。GRISYS地震数据处理系统获1995年国家科技进步三等奖。GeoEast超大型复杂油气地质目标地震资料处理解释系统及重大成效获2013年国家科技进步二等奖。

② 科学和技术的历史可以分为几个时代。早期科学时代开始于实验科学。几百年前科学的理论分支初露端倪, 诞生了如牛顿的运动定律、开普勒行星运动定律和麦克斯韦的电动力学、光学和电气电路的理论。过去几十年是计算科学时代, 快速的计算机提供了在计算流体动力学、气象和气候、航空航天和油气储层模拟等方面模拟和建模, 这只是几例。根据许多科学家的看法, 我们现在进入了“e-科学”或数据密集型科学新时代, 可以从物理现象或模拟收集大量的数据, 基于这些数据生成模拟和构建新的模型。