

地震软件技术

——勘探地球物理计算机软件开发

王宏琳 著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

地震软件技术

——勘探地球物理计算机软件开发

王宏琳 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍勘探地球物理中的计算机软件技术。第1章简要回顾了地震勘探中计算机的应用、地震软件与地震软件平台。第2章至第6章,围绕地震数据处理和解释软件技术,重点讨论批量处理、交互处理、地震数据管理、三维可视化与地震并行处理。第7章至第11章,进一步介绍地震软件平台与体系结构,基于网络的地震软件平台,软件集成技术,数值算法、软件工程与应用软件开发等专题。附录包含若干开放源码的地震软件系统简介。

本书可供从事地球物理勘探计算机应用和软件开发的科研人员、大学本科生、研究生、博士生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震软件技术:勘探地球物理计算机软件开发/王宏琳著.

北京:石油工业出版社,2005.4

ISBN 7-5021-5019-6

I. 地…

II. 王…

III. ①地震勘探-应用软件

②地球物理勘探-应用软件

IV. 631-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 016853 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

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂印刷

2005年4月第1版 2005年4月第2次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 12.25

字数: 310千字 印数: 1—1000册

定价: 38.00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



王宏琳，中国石油东方地球物理勘探有限公司特聘专家，同济大学兼职教授，国家有突出贡献专家。主持了中国第一套地震数字处理软件的设计编制工作，在150计算机上采用该软件处理的中国第一条海洋数字地震剖面被称为“争气剖面”。参加了1724计算机地震软件研究与发展、数字地震勘探技术的应用与发展、银河地震数据处理系统、多阵列机多辅处理机并行处理系统软件开发、GRISYS地震数据处理系统软件开发等项目的科技攻关。多次作为主要完成者获国家级和部级科技奖（包括两次获国家科技进步一等奖）。曾被授予全国五一劳动奖章和孙越崎能源大奖。

内 容 简 介

与其他大多数工业技术领域相比,油气地球物理勘探更加依赖于计算机和信息技术。物探软件已经成为勘探地球物理技术的重要载体,成为用于探测和开发国民经济急需的能源的重要工具。本书介绍了21世纪初物探软件技术的发展态势和如何开发物探软件系统,以及物探软件的体系结构、软件平台和应用框架。本书力图将计算机软件技术与勘探地球物理应用相结合,重点讨论地震软件系统的模块化技术和Plugins技术、可视化技术和一体化技术、批量处理技术和交互处理技术、数据共享技术和存储管理技术、并行计算技术和Internet计算技术,以及有关大型地震软件开发和软件过程的有关概念与方法。

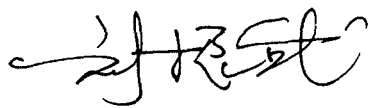
序

在过去 30 多年间,石油工业科学技术的发展(特别是勘探地球物理技术的发展)越来越依赖于计算机技术的应用。在石油工业上游,计算机作为现代技术和工具,已经充当了极其重要的角色。但是,尽管大家非常重视计算机的应用,很多人仍然只是把计算机软件看成神奇的“黑箱子”,对于开发我国自己的石油勘探开发软件系统信心不足。这样,我们将很难赶上科学技术发展日新月异步伐。

在 20 世纪 70 年代初,我国就开始开发地震勘探资料处理计算机软件。经过几十年的发展,已经成功开发出了以 GRISYS 地震数据处理系统为代表的若干具有比较高水平的软件系统。最近,GeoEast 地震数据处理和解释一体化软件系统的开发又取得了重要进展。我们相信,只要广大勘探开发科技人员和计算机软件开发科技人员紧密合作,就能够开发出应用于石油工业上游的更好的软件产品。

早期的计算机应用程序大多是针对特定目的、特定任务开发的,是一个个独立的应用程序。这样的程序相对简单。随着勘探开发过程越来越多应用计算机,一个程序的输出往往需要变成另外一个程序的输入,因此一些软件厂家就开发出了“一体化软件包”。这样的软件包有类似的用户界面,不同应用程序间能够共享数据,方便了用户使用。这是一个进步。但是,大多数软件公司都有其专业领域的局限性,没有能力创建真正全面一体化的软件包。于是,由多数油气公司和服务公司发起组成了 POSC(原名石油技术开放软件公司 Petrotechnical Open Software Corporation,现在名字更改为石油技术开放标准协会 Petrotechnical Open Standards Consortium)等组织,为整个石油工业上游制定数据存储和软件标准。虽然工业界已经做了大量工作,但真正实现标准的统一和软件平台的统一,还存在种种困难,包括废弃过时的软件和用新的软件替代。我们相信,随着软件技术的发展,油气勘探开发计算机应用将出现崭新的局面。

本书作者长期从事油田开发计算技术和勘探地球物理计算机软件系统研究,主持开发过一系列地震勘探计算机软件系统。本书将计算机软件新技术与勘探地球物理应用实际紧密地结合起来,比较全面地讨论了勘探地球物理软件开发的有关问题,相信对于从事石油勘探计算机软件开发的科技工作者有重要价值,对于应用计算机解决石油勘探开发问题的广大科技人员也会有一定的参考价值。



2005.4.25

前言

有人说过,“石油工业是信息工业”。这是因为:很少工业领域如同石油工业这样依赖于数据;石油公司的资产评估也是以数据为依据的,没有数据则无法了解地下油藏的储量和开采的现状。不过,更准确地说,勘探地球物理行业才真正是信息行业,专门从事地球物理数据采集、数据处理和数据解释。计算机作为现代技术工具,在勘探地球物理中已经充当了极其重要的角色。

进入 21 世纪,勘探地球物理计算机应用正在发生若干重大变革。这些变革包括:计算机能力的突破引起的变革、可视化技术发展和一体化软件技术发展引起的变革,以及数据管理和知识管理引起的变革。

在过去几十年间,地震技术的进步得益于计算机技术的发展,同时也受到计算机能力的诸多限制。为了提高地震数据处理计算机的性能,在 20 世纪 70 年代就发展了数组处理机,20 世纪 80 年代引入了向量计算机,20 世纪 90 年代采用大规模并行计算机。但是,由于计算机能力限制,许多地震数据处理步骤仍然采用折中的措施,减少计算量。

近几年,LINUX 集群计算机在地震处理中的应用迅猛发展。集群计算系统(cluster computing)的出现,大规模并行处理和低成本存储器的应用,使得几年前还是不可思议的地震处理步骤,正在成为现实。典型的例子是三维波动方程叠前深度偏移。20 年前,曾经有专家预测:一个三维叠前深度偏移处理项目,利用当时的计算机至少需要运行 6000 天。但是,今天大多数地球物理公司的数据处理中心,都在进行三维叠前深度偏移处理(仅 WesternGeco 就已经完成了 200 多个项目,超过 100000 km² 的叠前深度成像)。有人认为地震计算机发展的趋向是 Internet 数据处理系统,也有人认为是网格计算系统,这两种系统都将提供比以往更高的计算性能。

计算机能力的飞跃对于发展计算机辅助解释也有促进作用。对于计算机辅助构造解释,从 20 世纪 80 年代早期就开始发展的层位自动追踪技术,主要利用相关计算或振幅比较,计算量并不大。近几年开始发展的断层辅助解释技术,例如,“蚂蚁追踪”图像分析,就需要较多的计算。至于计算机辅助储层解释,发展较晚。20 世纪 80 年代中晚期开始发展层位切片沉积环境成像的工具。20 世纪 90 年代中期开始发展地层切片、相干体分析,有助对地震体进行图像分割,提取三维对象地质体。最近几年,快速发展起来的谱分解储层成像和解释技术,利用穿过油藏的地震频率切片序列,可以产生具有高分辨能力的油藏边界图像和岩层的非均质性图像,获得河流冲刷或三角洲河道的地层学特征显示。计算机能力的飞跃,有助于计算机自动解释技术的进步。解释过程的超级计算机任务包括:从叠前地震反演获得速度和密度、地震反演结果的多种实现、全三维烃运移模型、烃运移模型蒙特卡罗技术,以及 3D 可视化等。

在科学界,曾经把科学计算可视化看作“第二次计算机革命”。三维可视化技术的发展,促进了直接面对油藏的三维体解释技术的快速发展,使原需要综合各种资料才能在石油科技工作者头脑中建立起来的 3D 油藏影像变得简单可视,并可直接交互计算。它正在引起地震数据解释工作的变革,成为新一代解释系统的基础。相对于地震数据解释应用而言,地震数

据处理的三维可视化应用发展较晚。在地震处理中应用可视化技术，将使得过去几十年以批量处理方式为主的地震数据处理模式，在可视化环境下实现交互处理与批量处理一体化。

“一体化”是多年来在油气工业界使用最为频繁的关键词之一。例如，地震采集、处理和解释一体化，勘探开发一体化，技术经济一体化等等。有些软件商已经开发出了“一体化软件包”，实现本软件商的一个应用软件数据的输出，可以作为另外一个应用软件的输入。但是，工业界希望来自不同厂家的软件，能够互换数据、协同工作，以及“即插即用”。一体化应用软件集成，将真正实现多软件商的产品组合应用，取长补短，并且有利于发展解释性处理、并驱动地震处理、地质驱动解释等技术发展。例如，在勘探开发计算机应用中，非常重要是如何把三维地震属性与地质、测井、岩性、生产能力等建立起关联。大多数油气出现在不同沉积环境生成的沉积岩中（河道、三角洲、海底扇、碳酸岩隆起和礁等）。地震波传播进入沉积岩层并反射，产生其外部形态的图像和内部纹理。所以，对于地震体的外部形态及其内部纹理的分析（即地震相分析），有助于确定所研究的岩石的沉积环境。一般来说，不同沉积岩产生不同的地震相，每个沉积系统有特殊的地震相。由于地震相分析以及其他地震分析工作（从地震成像、地震解释，到地质模型建立）的复杂性，要求开展多学科的综合研究，包括地球物理、地质、数学、石油工程、信号处理和计算机科学。一体化有利于促进这样的多学科综合研究。

实现一体化应用软件集成，关键是数据共享。石油工业长期以来存在的数据查找和检索困难，严重影响了勘探开发数据的利用。早在 1991 年，Chevron 公司的 Lee Lawyer 就指出，地学工作者 60% 的时间花费在查找数据上，只有 18% 时间花费在实际工作上。10 年后（2001 年），BP 的 Smalley 和 Espeland 又指出，BP 地学工作者 44% 的时间花费在数据查找、存取和质量控制上，50% 的时间花费在增值解释和分析上，其他 6% 的时间花费在档案和存档上。这种情况使得数据利用不充分，而且由于数据不完整或错误给勘探和生产造成的损失更为严重。所以，国际大油气公司在数据管理上均投入巨资。根据 CERA 统计，2002 年主要油气公司资金投入分布如下：勘探阶段——钻井 50%，地震采集处理 20%，地质地球物理分析 6%，数据管理 14%，其他 10%；开发阶段——钻井 67%，地震采集处理 3%，油田评价 6%，数据管理 15%，其他 10%。可以看出，数据管理投入占勘探开发阶段总花费的 14%~15%。近 10 年来，国际上纷纷建立各种各样的数据中心，有的称为公司数据库，提供共享公司可共享的数据能力。应该说，数据管理技术有了长足的进步。近几年还出现了所谓国家数据中心 NDC 或国家数据库 NDR。从英国、俄国到秘鲁、哥伦比亚、喀麦隆，都建立了国家数据中心。

地球物理行业作为知识密集型行业，不但需要发展数据管理和数据集成，还应该发展知识管理和知识集成。什么是知识管理？可以定义为：“无论何时何地，只要需要，就能够利用机构内外集体的知识、经验和能力”。知识管理系统把散布在职工头脑中的无形的知识和经验集中起来，达到书面化、文字化、系统化、规范化。此外，应该发展知识发现和辅助决策工具（数据挖掘、软计算、计算智能等）。

前面我们谈到过勘探地球物理计算机应用面临的若干重大变革，这本书就是在这样的背景下编写的。

本书并不讨论勘探地球物理的具体方法。勘探地球物理作为地球物理的重要应用领域（其他应用领域还有固体地球物理、工程地球物理等），已经有许多出版物，包括有关地震数据处理、解释和建模方法的书籍，以及构造成像技术、储层属性分析技术等专著。本书主要

讨论如何开发勘探地球物理计算机软件,介绍油气勘探计算机软件的体系结构、软件平台和应用框架,这些方面在国内外均鲜有系统的著述。本书力图将计算机软件技术与勘探地球物理应用实际有机地结合起来,全面地讨论地震数据的批量处理和交互处理技术、地震数据管理和数据存储技术、三维可视化技术、并行处理技术、网络计算系统和软件集成方法,以及数值方法与软件开发。

顺便指出,计算机软件工程技术与我们前面讨论的勘探地球物理计算机应用一样,也面临重大变革。我国的软件工程专家提出了软件生产线的概念和思想(杨芙清,2005),其中将软件的生产过程分成三类不同的生产车间:应用构架生产车间;构件生产车间;基于构件、构架复用的应用集成组装车间。软件开发人员被划分为三类:构件生产者;构件库管理者;构件复用者(基于构件的软件开发,包括构件查询、构件理解、适应性修改、构件组装以及系统演化等)。软件业界专家提出了软件工程四项基本原则:选取适宜的开发规范,以保证软件开发的可持续性,并使最终产品满足客户的要求;采取合适的设计方法,支持模块化、信息隐蔽、局部化、一致性、适应性、构造性、集成组装性等问题的解决;提供必要的工程支持,例如,配置管理、质量保证等工具和环境,以保证按期交付高质量的软件产品;有效的工程管理,仅当对软件过程实施有效管理时,才能实现有效的软件工程。

这些软件工程原则是非常重要的。但是,还要特别注意,使这些原则发挥作用的是人。正如一些软件业界专家在2001年组成所谓“敏捷(Agile)联盟”时指出的:个体与交互胜过过程与工具;可工作的软件胜过面面俱到的文档;客户合作胜过合同谈判;响应变化胜过遵循计划。敏捷软件开发的倡导者,还总结了一系列软件开发的成功实践,例如:结对编程(所有的产品都是由两个程序员并排坐在同一台机器上构建);测试驱动开发(程序员以非常短的周期工作,他们先增加一个失败的测试,然后使之通过);编码标准(系统中所有的代码看起来就好像是由单独一个非常值得信任的人编写的)等等。这些原则和实践,对于勘探地球物理软件开发,同样有重要的指导意义。

本书的编写得到了各个方面的支持和帮助。非常感谢中国石油天然气集团公司东方地球物理公司科技发展部和物探技术研究中心(即油气勘探计算机软件国家工程研究中心),他们对本书的编写和出版给予了大力帮助和支持。非常感谢中国科学院院士马在田教授,他在2003年邀请作者到同济大学海洋与地球科学学院介绍油气勘探软件平台技术,鼓励了作者开始动手系统整理发表过的有关文章,这些文章成为本书最初的素材。非常感谢石油工业出版社副编审王焕弟先生,感谢他在编辑本书的过程中付出的辛勤劳动。在半年多的时间里,我们通过电子邮件和电话,不断地进行具有阐明作用的交流。

作者

2005年4月

目 录

1 引论	(1)
1.1 地震勘探与计算机	(1)
1.2 地震数据采集、处理和解释软件	(6)
1.3 地震软件平台	(10)
2 地震数据批量处理	(14)
2.1 批量处理基本概念	(14)
2.2 模块编程模型与属性描述	(16)
2.3 模块参数的获取	(19)
2.4 模块的执行控制	(23)
2.5 GRISYS 系统	(27)
2.6 数据通道	(33)
3 地震数据交互处理	(37)
3.1 从纯批量处理到解释性处理	(37)
3.2 地震交互处理模块	(38)
3.3 地震交互处理框架与设计模式	(41)
3.4 地震交互成像	(45)
4 地震数据管理	(50)
4.1 地震数据管理问题	(50)
4.2 地震数据格式	(51)
4.3 地震数据组织和管理	(59)
4.4 叠前地震数据组织与存取	(66)
4.5 结构化数据组织	(70)
4.6 三维叠后地震数据的组织	(76)
5 地震三维可视化	(79)
5.1 三维可视化	(79)
5.2 直接体绘制技术	(81)
5.3 三维可视化应用	(86)
5.4 虚拟现实可视化	(88)
6 地震数据并行处理	(91)
6.1 并行处理基本概念	(91)
6.2 地震并行处理模式	(93)
6.3 地震并行处理应用框架	(96)
6.4 地震数据处理并行化技术	(98)
6.5 地震并行处理环境与工具	(100)

7 地球科学软件体系结构	(105)
7.1 软件平台	(105)
7.2 软件体系结构	(106)
7.3 软件体系结构式样	(108)
7.4 一体化软件体系结构参考模型	(110)
7.5 软件框架	(113)
8 基于网络的地震计算技术	(116)
8.1 信息高速公路	(116)
8.2 集群计算	(116)
8.3 客户/服务器计算.....	(118)
8.4 网格计算	(121)
9 石油软件集成技术	(124)
9.1 数据集成	(124)
9.2 集成框架	(126)
9.3 从处理解释一体化到勘探开发一体化	(131)
10 数值计算.....	(137)
10.1 基本计算.....	(137)
10.2 向量计算.....	(141)
10.3 并行计算.....	(142)
11 地震软件系统开发.....	(149)
11.1 大型地震软件系统开发.....	(149)
11.2 软件过程与软件过程模型.....	(151)
11.3 计算机辅助软件工程.....	(154)
11.4 面向对象开发与架构中心开发.....	(156)
11.5 软件过程的可控性和成熟度.....	(158)
附录 A 若干开放源码的地震软件简介.....	(161)
附录 B 部分数值计算公式推导	(176)
后记.....	(184)
参考文献.....	(186)

1 引论

1.1 地震勘探与计算机

在油气工业中，地震技术被用来获取地下地质结构的精确图像。地震勘探通过地面震动产生地震波，同时利用高度敏感的检波器接收来自地下的反射波。一般将接收到的数据以数字形式记录在磁带上，这样就可以利用计算机处理，然后由地球物理专家用来推断地震波穿过的岩石的性质。图 1-1 是海洋地震勘探示意图。

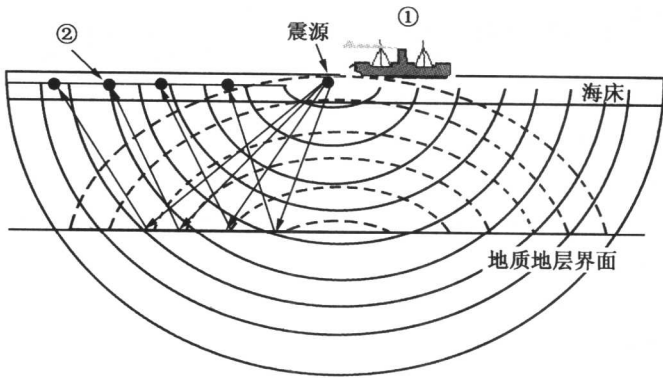


图 1-1 海洋地震勘探
①海洋勘探船；②水中检波器

地震波是一种弹性波（图 1-2），包括体波和面波。穿越地球内部传播的波是体波。第一种类型的体波称为 P 波（纵波），P 波是压缩性的声波，粒子运动沿旅行方向，是最快速

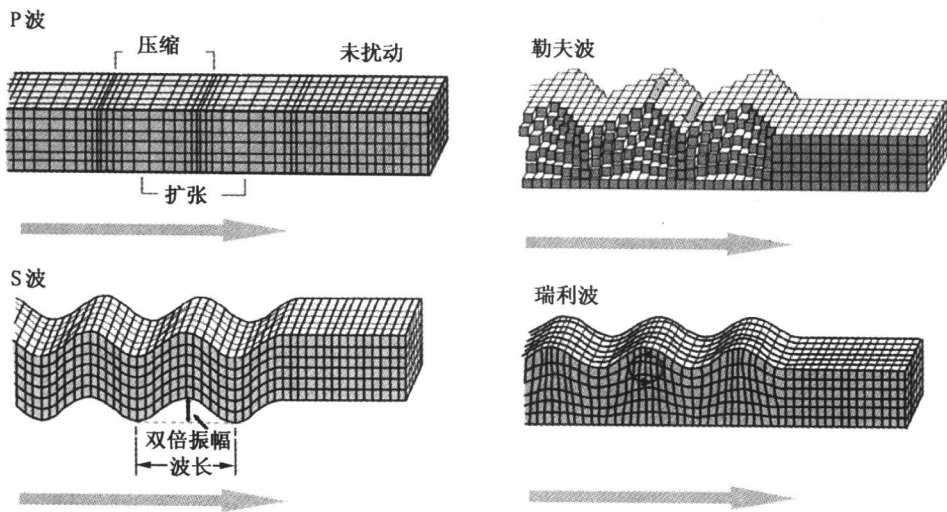


图 1-2 体波（P 波和 S 波）和面波（勒夫波和瑞利波）

的地震波。第二种类型的体波称为 S 波（横波），垂直于旅行方向震动，S 波比 P 波慢，而且不穿过流体。在地表面传播的波是面波，面波比 P 波速度慢，而且频率低，振幅大，是反射工作中的主要噪音源之一。第一种类型的面波称为勒夫波，是最快速的面波，在侧面移动。另外一种类型的面波是瑞利波，在表面上下运动，如同波浪在湖面或海面滚动，同时以相同方向侧面移动。此外还有斯通利波，存在于井筒中。

地球物理学家通过处理和解释地震反射波，可以获得对地下岩层的组成、几何形态和流体成分的模型和预测。石油和天然气地震勘探涉及到地下 0 到 8km 深度。在地震勘测的其他应用领域，例如，土木工程领域通常只涉及地下数百米，而且一般用折射，而不是反射。有些科学研究领域，如地壳和地幔构造研究、灾害研究，也许需要向下深入到上地幔。

地震波的理论原理可以追溯到 1678 年罗伯特·虎克发表的虎克定律。19 世纪早期，一些数学家（Cauchy, Poisson, Stokes 等）就开始研究弹性波传播理论，1828 年，泊松在理论上研究了 P 波和 S 波，瑞利（1885）、勒夫（1927）和斯通利（1924）也分别提出了以他们名字命名的波理论。1889 年，提出了地震勘测方法。第一次成功的石油地震勘探是在 20 世纪 20 年代。共深度点（CDP）方法是在 20 世纪 50 年代发明的。

地震数字处理革命的起源，可以追溯到 20 世纪 50 年代初。最早探索者是 MIT（麻省理工学院）数学系的 GAG（地球物理分析小组）。GAG 尝试把罗伯特·维纳（Norbert Wiener）的信号分析理论用于地震勘探数据分析。正是由于斯文·特雷特尔（Sven Treitel）和恩德·罗宾逊（Enders Robinson）的开创性工作，形成了数字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。这些数字工具，成为以后所有地震数据处理系统的基础。数字化开始于 20 世纪 60 年代。

每次油气勘探重要发现
钻探井（野猫井）数目

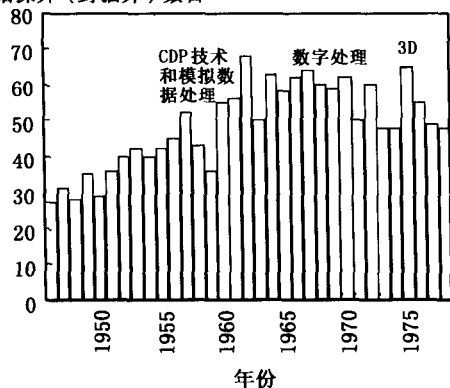


图 1-3 技术进步抑制了钻探井
（野猫井）数目的增长趋势

从 20 世纪 40 年代到 60 年代中期，随着石油勘探程度的增加，为了得到一个重要的油气发现，要钻的探井（野猫井）数目，一直在增加（图 1-3）。尽管在 50 年代中期，由于应用 CDP 技术和磁带模拟数据处理技术，有了明显进步，但未能够扭转这个趋势。20 世纪 60 年代中，地震数字记录系统的发明并替代了野外的模拟磁带记录，使地震勘探数字化技术迈出了极其重要的一步。这不但使野外记录的动态范围大为扩展，更重要的是为计算机数据处理打下了基础。1968 年美国出现了比较成熟的地震数据处理软件，以及后来的三维地震数据采集和处理技术的发展，是油气勘探技术的重要突破。地震数据处理系统，把许多如同图 1-4 的地震数据，变换为更好描述地下特征

和结构的、如同图 1-5 的地震图像，在这个过程中，进行压制噪音和增强信号，并使得地震同相轴偏移归位到空间适当的位置。处理步骤一般包括：速度和频率分析、静校正、反褶积、动校正、DMO、叠加，以及偏移（可以在叠加前或叠加后执行）等。地震处理员可以利用地震数据处理系统，制定处理流程，选择处理参数，监视处理质量。20 世纪 70 年代初，欧洲的德国和法国，也分别推出了自己的地震处理系统。在 1973 年，我国的石油工业部石油地球物理勘探局（东方地球物理公司的前身）和北京大学等单位合作，推出了 150 地

震数据处理系统。从那时候以来的 30 多年间，原石油工业部以及后来的组成的中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司和中国海洋石油集团公司，均十分重视发展地震勘探计算机应用。例如，东方地球物理公司逐渐形成的复杂区勘探、开发地震、浅海过渡带地震勘探、综合物化探、勘探软件、物探装备、新区新领域综合研究、信息网络及应用等八大技术系列，均与计算机应用密切相关。有关大学和研究机构（包括北京大学、同济大学、中国石油大学、中国地质大学和中国科学院地球物理研究所等）与油气工业界密切合作开展了反射地震学关键理论的研究。例如，同济大学海洋与地球科学学院在复杂介质中地震波传播理论与三维地震偏移成像研究获得许多重要成果。

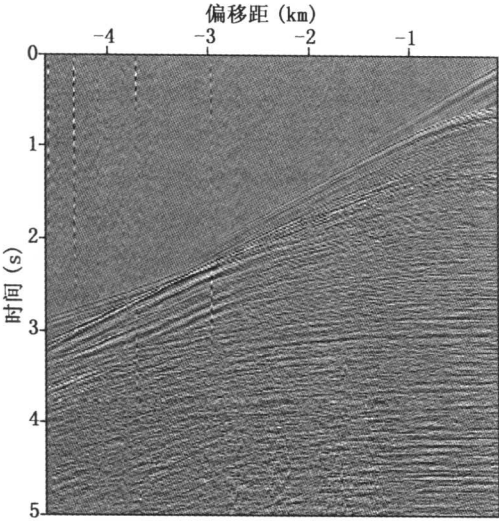


图 1-4 地震数据记录的例子
(Exxon 公司墨西哥湾地震记录)

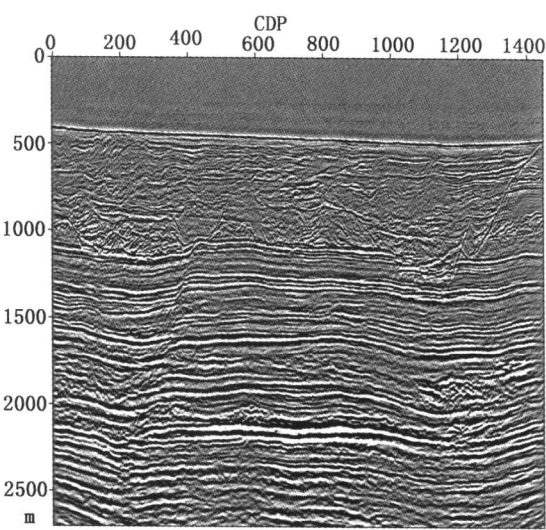


图 1-5 地震剖面图像例子

3D（三维）地震勘探发明于 20 世纪 70 年代，这是重大的技术突破。2D 展现的是一个剖面，3D 展现的是一个体。3D 地震反射是地球成像的更佳途径。从 20 世纪 80 年代初以来，地震数据处理系统的三维处理功能日趋完善，几乎所有软件包都包含三维 DMO、三参量速度分析、地表一致反褶积、三维静校正和三维偏移等。20 世纪 80 年代出现了地震交互解释系统。20 世纪 80 年代末高性能工作站促进了地震交互处理系统发展，20 世纪 90 年代大规模并行计算机以及 PC 集群计算机，促进了地震并行处理系统的发展。表 1-1 列举了 20 世纪石油地震技术发展若干事件。

表 1-1 20 世纪石油地震技术发展若干事件

年 份	石油地震技术发展事件
1923	在美国海湾海岸折射法用于找盐丘（和石油）
1926	反射
1932	自动增益控制
1944	海洋数据
1952	MIT 开展数字处理研究
1953	共中心点放炮；模拟记录滤波，叠加

续表

年 份	石油地震技术发展事件
1953	可控震源法
1961	模拟反褶积和速度滤波
1963	数字记录
1965	气枪
1968	美国出现成熟的地震数据处理软件；数字偏移
1972	亮点
1973	中国成立石油地球物理勘探局，150 计算机用于地震数据处理
1974	垂直地震剖面
1976	三维勘探；三维偏移方法
1978	二维叠后深度偏移
1979	剩余静校正；1D 波阻抗反演
1980	二维叠前深度偏移；亮点分析
1981	地震交互解释绘图；3D 偏移速度分析； τ - p 变换
1982	CRAY-1 向量计算机引入地震计算
1984	交互解释工作站；DMO；最优化理论应用；二维反射层析
1985	三维叠后深度偏移；AVO
1987	交互处理工作站
1991	转换波的应用
1992	地震层序地层学
1994	各向异性处理；地质解释工作站
1995	三维相干数据体
1997	虚拟现实可视化
1999	PC 集群应用

大家知道，计算机能力的增长最有名的预测是摩尔（Moore）定律——计算机芯片技术晶体管数目（集成度）每 18 个月翻一番，已经被过去 40 多年技术发展所证实。后来被推广为计算机 CPU 速度每 18 个月翻一番。对于石油勘探应用计算机的指数增长的一个著名预测，是由西方地球物理公司的萨维特（Carl Savit）做出的（Baesley, 2003）：地震对计算机能力的需求，每 2.7a 提高一个数量级。摩尔定律的预测和萨维特预测比较如图 1-6 所示：地震对计算机能力的需求在 1975 年就超过了商业计算机提供的能力。除了萨维特外，纳尔逊在其著作（纳尔逊，1983）中也曾经讨论过复杂的地球物理方法要求更高的计算机能力：把每道 1500 采样点的 24 道地震记录进行重新采样，在当时最先进的地震计算机 IBM3033 上为 0.2s，不同的偏移方法需要的计算机时间估算如下：2D 偏移 1~8.5min，2D 叠前偏移 85min，近似三维偏移 76h，全三维偏移 51d，全三维统一解 30a，全三维弹性成像 500a。

过去几十年间，地震数据处理中心计算机能力不断发展。如果考虑处理中心计算速度（G Flops）能力增长，在过去 25a 间，翻了超过 18 番，也就是说，大约每 17 个月翻一番。如果考虑处理中心存储（G 字节）能力增长，在过去 25a 间，翻了超过 15 番，也就是说，大约每 20 个月翻一番（表 1-2）。以东方地球物理公司为例，其前身石油地球物理勘探局在 1973 年只有一台每秒大约 100 万次运算能力的 150 计算机，而在 2004 年拥有 6 万亿次运

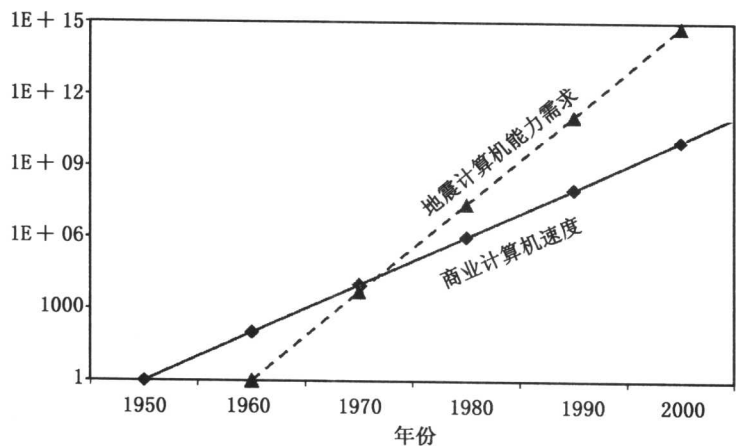


图 1-6 萨维特预测的地震计算机需求与摩尔定律比较

算能力的计算机群，31 年间翻了 21 番。图 1-7 为现代大型地震处理中心的硬件配置。

表 1-2 地震数据处理中心计算机能力的增长

年 份	1980	1985	1990	1995	2000	2005
计算机	CDC VAX	IBM MF Convex, Cray	IBM RS Cray	IBM SP SGI	IBM SP PC Cluster	PC Cluster
处理中心平均 G 字节	1	10	100	1000	20000	60000
处理中心平均 G Flops	0.01	0.1	1	100	1000	6000

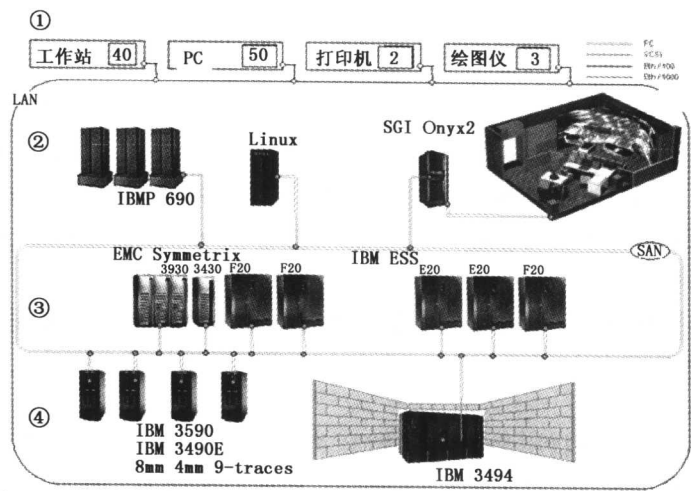


图 1-7 现代地震数据处理中心硬件配置示意图

①用户端的工作站、PC 机都连接在 LAN（局域网）上，此外打印服务器和绘图服务器也连接在 LAN 上；②计算服务器有 IBM 高端计算机和 LINUX 集群计算机，还有可配备 SGI 高端图形计算机，连接可视化中心；③除了具有巨大计算能力的计算机外，有关的数据存储——SAN 存储区域网，也是处于中心的位置；④磁带机和自动磁带库提供野外磁带和存档磁带服务，以及 HSM 分层次存储管理、数据存储移动和备份服务

1.2 地震数据采集、处理和解释软件

软件是客观世界中问题空间与解空间的具体描述,是客观事物的一种反映,是知识的提炼和“固化”(杨芙清,2005)。地震勘探软件是地震勘探领域——地震数据采集、处理和解释知识的提炼和“固化”。

1.2.1 地震采集软件

地震采集是指产生和记录地震勘探数据。利用计算机进行地震勘探数据采集设计分析的软件工具,在过去十多年间,不断发展。地震采集软件功能可分为四个部分(蒋先艺,2004):(1)采集设计;(2)模型正演;(3)静校正;(4)质量控制。采集软件可以应用于地震采集的各个环节:采集参数论证和预设计;观察系统设计;资料品质分析和质量监控;采集后的资料整理、静校正计算等。

采集设计软件涉及许多不同的接收器的排列方式,包括在陆地或海底布设检波器,在地震船后面牵引水中检波器,把检波器垂直悬挂在海中或放置于井筒中。震源(如震动器或气枪)产生的声波或弹性波,传播进入地球,通过具有不同地震响应和滤波效应的地层,返回到地面,作为地震数据记录。理想的采集设计,需要按照本地条件,采用适当的震源(类型和强度),最佳的检波器排列方式,检波器线的走向应该考虑地质特征。这样保证记录能够获得最高的信噪比和适当的分辨力,而外来的影响,如空气波、地滚波、多次波等散射最少或能够区分开,以便通过处理消除。采集参数论证是基于工区的表层结构和这样目的层的模型,对于激发参数、接收参数和炮点—检波点组合参数进行论证。采集设计软件还应具备测量数据处理(适应各种仪器各种测量方法,测量基础数据、坐标集、测量控制点、太阳方位角、导线测量数据、RTK 测量数据等等)和 SPS 数据格式处理(将地震队施工的基础参数——测量设计、静校正数据、地震班报等,整理成为标准的 SPS 格式)。

模型正演包括建立工区的二维或三维地质模型,定义观测系统,进行对主要目的层的射线追踪和波场模拟,了解地震波传播规律和特性,指导采集参数设计和分析。二维模型正演分析可以进行排列参数分析。三维模型正演分析可以进行 CRP 面元分析,优化设计方案。

静校正包括低速带处理(小折射、微测井质料的处理和解释)、二维静校正和三维模型静校正(求取炮点和检波点静校正量)、三维折射静校正(利用折射初至反演近地表三维模型,求取静校正量)。

质量控制,包括资料品质定量分析和野外采集质量实时监控(可以监控激发因素、接收因素、近地表因素和干扰因素等)。

1.2.2 地震数据处理软件

地震数据处理软件,是指用于分析和处理二维、三维,以及四维地震勘探数据的计算机软件。地震数据处理方式有交互方式、大规模和小规模处理方式。交互能力一般用于确定处理参数,以便改善处理质量。按照不同的应用环境,地震数据处理软件可以安装在独立的计算机系统(stand-alone computer systems)支持远程野外队操作,也可以安装在计算机集群支持处理中心操作,以及通过局域网(LAN)或广域网(WAN)提供数据处理服务。

地震数据处理软件,可以分为常规处理软件和特殊处理软件。特殊处理软件在不同时期有不同内容——在一个时期属于特殊处理的软件,在下一个时期则可能被作为常规处理软件。