

地震勘探中的 超级计算机

E. 艾斯纳 编

石油工业出版社

北京)

地震勘探中的超级计算机

E. 艾斯纳 编

崔学群 王宏琳 译 刘颂威 王康立 校

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书共收录十二篇论文,较详细地介绍了在地震勘探中所使用的各种类型的超级计算机(如SIMD、MIMD、阵列处理机、心动阵列机、超立方体和光计算机)的体系结构以及与之相匹配的各种地震模拟问题的算法,并对某些问题的研究做了较为乐观的展望。其内容均为当前地震数据处理领域中的最新科研成果。

本书可供从事这项工作的科研人员,工程技术人员及大专院校师生参考。

地震勘探中的超级计算机

E. 艾斯纳 编

崔学群 王宏琳 译 刘颂威 王康立 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本12³/₄印张4插页312千字 印1—1,500

1992年3月北京第1版 1992年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0666-9/TE·633

定价: 3.55 元

前 言

本书是1986年11月勘探地球物理学家协会会议期间举办的专题研讨会的直接成果,所探讨的问题是:现有的计算能力是否是常规解释中的地球物理数据实际反演的主要障碍。

L. Baker给出一个有代表性的地震模型,并确定它与几种标准的数值模拟方法有关的计算需求。

M. Edwards和M. Reshef用CRAY超级计算机进行这类计算的现状对这一问题的讨论作了细节性的补充。

O. Holberg非常注意算法和体系结构选择的协调一致,并对建造一台用于计算这类问题的专用计算机作了一个设计分析。

O. Johnson和E. Leiss提出了对新型计算机多种设计思路的最新评价,每种思路都可用于一特定的地球物理勘探或开发反演问题。

A. McAulay介绍了他本人在反演方面所做的工作,并对专门用于这一领域的新硬件设计依据作了一番评述。

S. Ronen和R. Schreiber详细地论述了心动阵列计算机用于这类问题的内在可能性。

W. Moorhead阐述了超立方体体系结构,并对它在这一领域内如何有效应用提出了指导性意见。

P. Mora和A. Tarantola作了乐观的探讨,他们认为目前硬件和算法的发展可能为我们达到所期望的目标提供了方向,但还有很长的一段路要走。

下面三位作者涉及了地震反演、迭代模拟的核心。

K. Marfurt和C. Shin阐明如何使用常规有限差分 and 有限元解法,并使它们对于特定的迭代模拟实例有较高的效率。他们还对一些算法作了改进,这些改进通过减少计算量需求使之较易处理。

I. Mufti说明如何将有限差分算法加以改进,以便提供给人们更能负担得起的结果。为防止坐等理想结果以及追求尽善尽美,他向我们展示了目前在这方面能做些什么。他还提供了一个大规模三维有限差分地震模型的结果,并讨论其在解释上的重要意义。

G. Schuster说明了当前用边界积分法能做些什么,它可能是有助于高效三维模拟的一种替代方法。

T. F. Russell提供了油藏模拟测定结果和改进计算能力的可能性。由于在支持油藏开发方面地球物理勘探的需求增长很快,所以这篇论文会引起广泛的兴趣。

读者也应对D. Rothman在麻省理工学院(MIT)所做的开发工作给于应有的注意。他应用细胞自动机(cellular automata)来模拟多孔介质中的液体流动。遗憾的是由于时间所限在这里不可能把计算结果包括在内。

本书各章表达了作者不同的观点,并不强求一致。由于工业界实行某种程度的保密,我们作了各种努力才使本书在内容上能体现出了到1988年1月时的在这一问题上的研究状况。我相信大规模合作是取得快速进步的关键,并且希望本书的出版能达到这一预期的目的。

我想借此机会对各章作者为本书按时出版所做的努力与合作表示衷心的感谢。同时对Texaco的后勤支持和鼓励表示感谢。

编者 Elmer Eisner
休斯敦，得克萨斯
1988.3

译者的话

本书共包括十二篇论文，较全面地介绍了超级计算机在地震勘探中的应用现状，并对今后在这一领域中的应用作出了乐观的展望。这些论文重点介绍了多种超级计算机的并行体系结构(如SIMD、MIMD、阵列处理机、处理机阵列、心动阵列、超立方体和光计算机等)、地震数据处理的并行算法、计算机体系结构和与之相匹配的算法。

由于超级计算机的出现，使地球物理工作者长期梦寐以求的愿望(如弹性波动反演模拟、真三维处理、叠前偏移等方法)部分地变成了现实。但由于地震数据处理技术的进步在很大程度上依赖于计算机技术的进步，而计算机的运算速度已经达到了物理上的极限。所以，大规模的地震数据处理最终只能靠并行处理来解决。本书中有较多的篇幅讨论了这一问题。

科学技术的高速发展要求从事地球物理研究、油田开发和科技管理的人员了解计算机发展的状况，同时也要求计算机设计和开发人员了解石油勘探对计算机的需求，为此，我们翻译了本书。

各篇论文条理清楚，深入浅出，有些论文还详细地给出了在特定的超级计算机(如CRAY X—MP，超立方体)上运行某些算法的定量的测试结果。

本书可供从事地震数据处理、油田开发、计算机设计和应用方面的工程技术人员、研究人员以及石油大专院校师生参考。

书中第1、2、4、5、6篇，作者前言，附录由崔学群翻译；第7、8、9、10、11篇由王宏琳翻译；第3、12篇由刘颂威翻译。全书各章均由刘颂威修改并作最后审订，王康立参加了审校工作。

石油工业出版社为本书的出版给了极大支持，在此表示感谢。

目 录

今后十年内能作三维波动方程模拟吗?	(1)
在Cray超级计算机上用并行技术作三维地震处理、偏移和模拟	(7)
波动方程计算和真并行处理	(21)
地震数据高性能处理的进展	(33)
用于模拟和反演的并行计算机与光计算机的体系结构	(48)
在SIMD阵列并行超级计算机上的地震数据处理	(86)
超立方体计算机上的大型计算	(97)
大型弹性波场反演	(111)
地球物理勘探中迭代模拟的未来	(122)
超级计算机在三维地震模拟中的应用	(138)
三维轴对称散射声学响应的快速边界积分解法	(148)
在油藏模拟中使用的超级计算机: 过去、现在和将来	(165)
英汉对照名词附录	(184)

今后十年内能作三维波动方程模拟吗？

L. J. BAKER 埃克森生产研究公司

在今后十年内能够研制出用数小时的时间就能作真三维地震模拟的高度并行的计算机来吗？为了回答这个问题，我们首先回顾一下地震正演模拟的应用，并描述一个其大小有代表性的地震模型。然后，概述这样的一个模型的数学方法和相应的计算需求。最后，基于对当前分布式内存并行计算机的性能和十年内计算能力增长趋势的预测，我们可以断定在十年内作真三维声波模拟是可能的。

1. 背景

在超级计算机出现以前，地震模拟基本上限制在作一维和二维射线追踪方面。射线追踪模拟仍然是最广泛采用的地震模拟方法。除了它的历史地位之外，射线追踪法一般比波动方程要快，况且射线追踪法还体现了地球物理学家所想象的地震剖面的形成过程。但是，在复杂地质条件或复杂波动现象的情况下，地球物理学家确实已转向研究声学或弹性波动方程模拟。波动方程法与射线追踪法相比，它有一些特殊的优点：

- (1) 自动产生绕射、临界折射和多次波。
- (2) 能得到更精确的振幅值和波形，特别是在小构造和薄层存在的情况下。
- (3) 不管复杂与否都不会丢失同相轴。

在石油工业界，各个公司应用的地震模拟程序都不尽相同。最初，由于计算能力的限制，波动方程主要用于基础理论的研究。但是，现在的波动方程模拟却更经常地用于检验地震解释、规划数据集以及验证地震处理方法（和其它模拟程序）的效果。我们也在反演中用正演模拟，但是，一个有代表性的模型驱动反演程序的计算量相当于10个以上的正演模拟，因此要有更强的计算能力才行。

当前，大多数地震模拟以二维方法来实现，有些射线追踪模拟以三维方法来实现。很明显，随着我们采集更多的三维数据和需要寻找更小的油藏，三维模拟处理就变得越来越重要了。为了模拟整个地震过程，特别是模拟地质构造、模拟实际地震数据采集过程（包括多炮点的情况），已经有人提出了规模有限的三维波动方程模拟，主要想用来说明超级计算机的处理能力（Adams, 1984; Edwards, Hsiung, Kosloff和Reshef 1985）。最近，Mufti（Mufti, 1987）提出了主要以爆炸反射面模拟为基础的低分辨率三维声波模拟，因此，在某种意义上来说，作三维波动方程模拟即使是在今天也是可能的。在本章的其余部分，我们将讨论一种三维模拟，它的二维横剖面长短可和今天的二维模型相比较，而且这种模型是由中等分辨率的地震波穿透的。

2. 一个典型的地震模型

现在让我们评估一下采用多大的地震模型是合理的。当然，地质模型的大小存在相当大

的差异,但我们仍然要努力给出地震解释员认为是中等大小的模型。一个典型的地震模型其大小为 $3\text{km} \times 3\text{km} \times 4.5\text{km}$,速度范围从 1.5km/s 到 4.5km/s ,典型的震源振幅谱能量范围从 10Hz 到 50Hz ,峰值能量在 25Hz ,这样在最低速介质中的有效波波长大约是 60m 。因此,按波长来计算,这个模型的大小是 $50 \times 50 \times 75$ 。记录 4s 的反射一般认为已是足够的了。

除了确定地质模型本身的参数外,还必需考虑模拟的其它一些要点,特别是现有三种通用的波动方程模型:爆炸反射面模型、声波模型和弹性波模型。对于爆炸反射面模型,我们直接模拟一个叠加地震剖面,波从布满震源的地震界面简单地向上传播。爆炸反射面模型作为一级近似是有效的,但它包含有一些限制条件:最值得注意的是它不能产生某些射线路径,因而将导致多次波的时间错误,并使来自界面两边的反射波发生极性错误(Claerbout, 1985)。对于声波模型,我们把地层看作流体,它仅传播压缩波(纵波)。声波模型对于实际介质的地震响应是一个很好的一级近似。在本章的其余部分,将集中讨论声波模拟。

声波近似的明显弱点是它没有包括由于横波存在而产生的弹性效应,弹性波模拟与声波模拟相比计算量更大。以三维模拟而言,和声波模拟相比,弹性波模拟浮点操作次数大约要多32倍以上,对内存量的需求要大16倍以上。凭经验估计,计算机速度每5年一般增长10倍,我们预测弹性波动方程潜在能力的开发要比声波方程落后大约7年。

此外,我们是否还需要了解点震源、线震源或面积网格震源等各种不同的响应呢?这里,我们再次选择中间的情况,即只关心单线震源的三维模型。

3. 数值法

有四种普通的方法用于模拟波的传播:有限差分法(Kelly, Ward, Treitel和Alford, 1976; Dablain, 1986; Bayliss, Jordan, LeMesurier和Turkel, 1986; Cohen, 1986; Shubin和Bell, 1987)、有限元法(Marfurt, 1984)、伪谱法(Kosloff, Reshef和Lowenthal, 1984; Fornberg, 1987)和边界积分法(Rokhlin, 1983; Apsel, 1984; Schuster, 1985)。前三种方法所需要的计算量只取决于问题的大小(这里指空间和时间的尺寸),而通常和模型的复杂性无关,边界积分法与模型的复杂性、问题的尺寸都有关系。在以后的讨论中,我们都假设是由于所考虑问题的结构而使边界积分法不适用。并假设在给出三维网格中大量的网格点之后,不考虑隐式频率域法而采用显式时间步进法。

具体来说,将讨论四阶显式有限差分法和伪谱法这两种方法对计算量和内存量的要求。首先,分析有限差分法。对于我们所研究的模型问题,如果假设12个网格点/波长,并有 $\text{CFL}=0.5$ 的条件(Courant, Friedrichs和Lewy, 1928; Richtmyer和Morton, 1967),则需要一个 $600 \times 600 \times 900$ 的网格和7200个时间步长(注意:该速度范围要求小的时间步长,也就是说需要大量的延拓次数)。这样,总计 2.3×10^{12} 个网格点—时间步长(没有考虑域的修整),大致需要1.5千兆字的内存量。假设每个网格点—时间步长作25次计算,对单点震源则需要作 5.8×10^{13} 次浮点运算。进一步假设有50个震源点,则总计大约需要作 3×10^{15} 次浮点运算。

下面,对伪谱法重复这种分析。理论上讲,和有限差分法相比伪谱模拟需要较少的网格点/波长,我们可假设6个网格点/波长。根据Kosloff的论文(Edwards, Hsiung, Kosloff和Reshef, 1985),假设 $\text{CFL}=0.2$,这里需要 $300 \times 300 \times 450$ 个网格和9000个时间步长,大约要用0.2千兆字的内存量。这相当于有限差分法的 $1/8$ 。我们已经注意到,当今的一些超级

计算机已经能满足这种内存量的要求。假设计算一个 n —长快速傅里叶变换(FFT)的实浮点运算次数近似为 $10n\log(n)$ ，并且假设在每个方向上(2个正向和2个反向)需要作4次FFT，那么每个时间步长要作大约 1.5×10^{10} 次浮点运算，每个震源点总计作 1.4×10^{14} 次浮点运算。再次假设有50个震源点，这样，需要作大约 7×10^{15} 次浮点运算，它是有限差分法的两倍。

关于上面那些估计的数字应作几点说明，以防止误解。首先，由于地震模型的大小取决于具体的应用，我们可以很容易地估算出一个比上面描述的模型更小或更大的地质模型。其次，关键参数(诸如震源频率和地层速度)的不同，也会对计算量和内存量的需求产生极大的差异。例如，如果典型的波长是上面分析的波长的两倍，那么计算量会减少16倍，内存量的需求会减少8倍。因此，这些计算量和内存量需求的估算仅仅作参考，其变化范围在两个数量级之内。

4. 并行计算机

由于传统的串行计算机已达到它本身固有的物理极限，未来的超级计算机将是并行机，这个趋势已十分明显。通过利用一组处理机并发地执行计算，并行计算机能提高运算速度和改进性能/价格比。对一般的问题来说，有效的并行处理要求在一台并行计算机的多处理单元之间能互相传送它们的结果。有

两种实现这种通信的通用的方法，一种是共享内存，另一种是具有信息传送能力的分布式内存。当今的技术还不能做到使共享内存计算机高度并行化，由于这个原因，我们把注意力集中在能高度并行化的分布式内存计算机上。分布式内存计算机的一个典型例子是超立方体(Hypercube)，之所以称为超立方体是因为多处理机之间的通信通道形成

维数	结点	通道
0	1	0
1	2	1
2	4	4
3	8	12
4	16	32

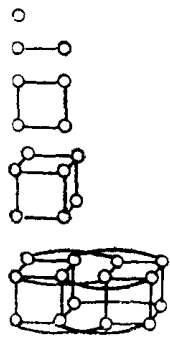


图1 超立方体结构

成一个 N 维立方体，如图1所示。一个 N 维立方体具有 2^N 个处理机和 $N2^{N-1}$ 个通信通道。

5. 在超立方体计算机上实现有限差分

为了更好地评价在一台高度并行计算机上的三维声波模拟的效率，我们在一台有16个处理机的英特尔(Intel)向量超立方体计算机上编制了一个二维声波模拟程序ACOUS2D，它是一个显式有限差分源码程序，并且，它本身容易并行化。图2给出一个简单的ACOUS2D模型。

并行化唯一的复杂性是由于ACOUS2D使用了域修整。ACOUS2D采用一固定大小的计算网格，并且绝对要求只在网格点上作计算。更具体些讲，利用波动方程的双曲线特征，ACOUS2D在计算的初期仅对震源附近作计算，在计算的末期仅对接收点附近作计算。如果把计算网格简单地分成水平条带，并把它分配给最邻近的处理机，那么，域修整会导致在计算初

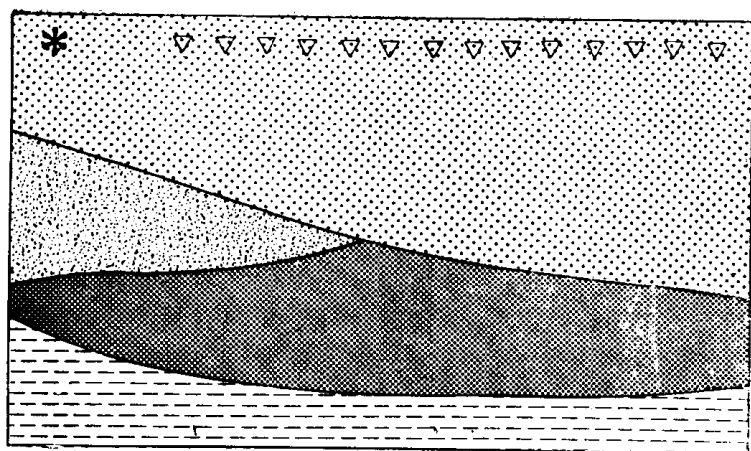


图2 一个简单的ACOUS2D模型

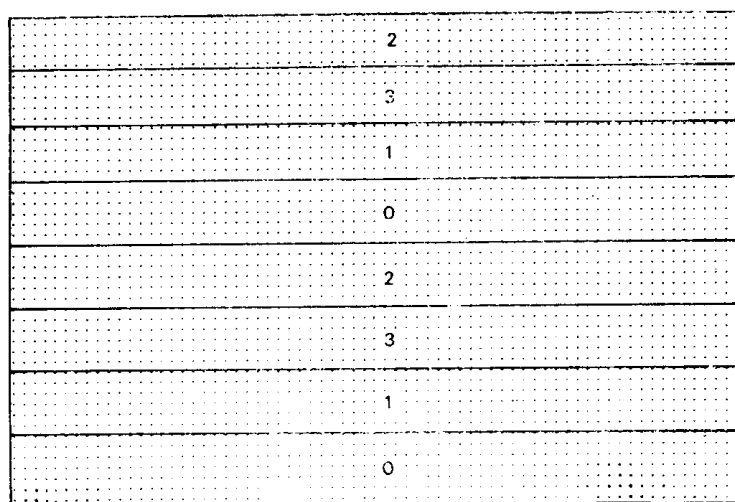


图3 四个处理机并且每个处理机分配2个条带的分解

期和末期的计算负载在各处理机之间不均匀的分布。为了改善域修整中的负载平衡问题,将有限差分网格分解成条带,并给每个处理机分配多个条带。图3给出使用4个处理机的分解情况,每个处理机分配两个条带。为了获得高效率,需要每个处理机选择适当数量的条带(一般2~4个条带)来调整负载平衡和计算开销。即使没有域修整,负载平衡也是一个重要因素,这是因为处理机的计算域里既包括了震源点也包括了接收点,因此存在着计算和通信的开销。

图4示出了给每个处理机分配三个条带时运行ACOUS2D的时间数据。从这个图给出的时间关系我们可以看到内部循环负载没有得到很好的平衡。该图右边的结点和模型的顶部相对应,其负载(内部循环)比较重而且等待(通信和同步)比较少。附加的测试还表明,造成瓶颈的主要原因是同步,而通信开销是很微小的。请注意处理机“0”等待时

间略多于500s,而且整个运行时间大约是2400s,由此可知效率接近80%。在没有域修整的情况下预期效率要在95%以上。

6. 今后十年内能作真三维模拟吗?

目前,通用超级计算机(如,CRAY X—MP/48, Amdahl 1400E)运算速度大约为每秒1~2千兆次浮点运算,而最快的专用数字计算机运算速度大约为每秒10千兆次浮点运算,(如IBM的GF11)。由于计算机运算速度的提高变得越来越缓慢,我们只有寄希望于并行计算机,但希望它能保持足够的灵活性以便适应算法的变异。为达到这个目标,我们有理由说(可能较保守),在十年时间内肯定能研制出高度并行的计算机,它的运算速度在每秒500千兆次浮点运算。下面的表格给出一分布式内存计算机中单个处理机的一种可能的前景。(正如由我们的二维模拟在一超立方体上运行的结果所看到的,对互连网络地震模拟仅需要一环形拓扑结构)。

据据这样一种前景,无论对有限差分或伪谱模拟内存量都不成问题。在十年内,可以预

计内存量将达50千兆字,而这两种数值法仅需要1千兆字的内存量。但是在计算能力方面的情况就不那么乐观。根据二维模拟在超级计算机和超立方体上运行的结果,预期三维模拟程序会以计算机广告峰值速度的一半来运行。在十年内,我们可以以每秒250千兆次浮点运算的速度处理三维模拟程序。按照我们早期的分析来估计,模拟一条有50个炮点的测线需要作 $(3\sim7)\times 10^{15}$ 次浮点运算。上面这些计算表明,在十年内,一个三维声波模拟能以3~8小时的周转时间模拟一条地震测线上的数据采集。

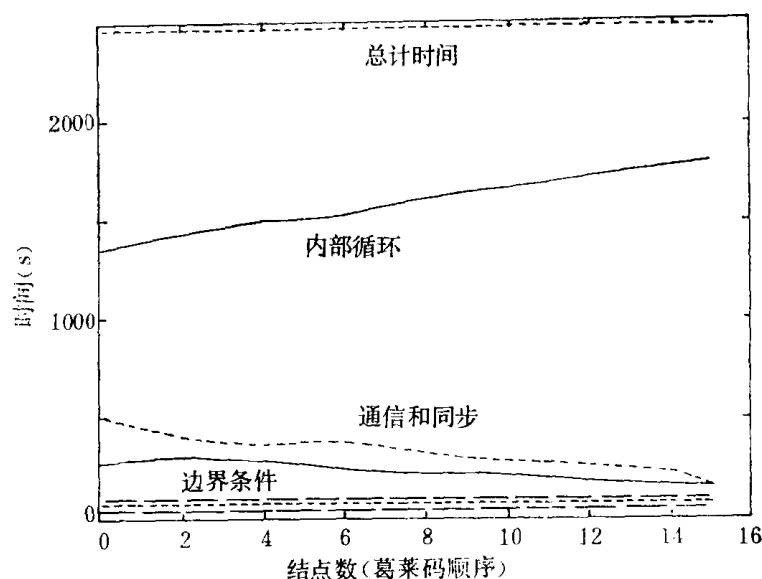


图4 在有16个处理机的Intel超立方体计算机上运行ACOUS2D的时间数据

超 立 方 体		
	现 在	十 年 内
结点速度(MFLOPS)	5	100
内存量/结点(MB)	0.5	5
结点互连通信速率(MB/s)	0.5	5
处理机数	1,000	5,000

这里所作的分析报告主要受益于我和我的同事们的多次讨论。特别指出的是,我想借此机会向W.Y.Crutchfield, M.A.Dablain, 和A.Weiser 表示感谢,他们给了我许多有益的启示和帮助。ACOUS2D程序是我和J.B.Bell以及G.R.Shubin 共同开发的,最初由G.Chessire和C.B.Moler在Intel超立方体上实现。

参 考 文 献

- Adams, N., 1984, 3-D elastic modeling on a vector computer: Presented at the 54th Ann. SEG Mtg., Atlanta.
- Apsel, R. J., 1984, Exact synthetic seismograms for three-dimensional irregularly layered media using the boundary integral equation algorithm, Binteq: Presented at the 54th Ann. SEG Mtg., Atlanta.
- Bayliss, A., Jordan, K. E., LeMesurier, B. J., and Turkel, E., 1986, A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic waves: Bull. Seis. Soc. Am., 76, 1115-1132.
- Claerbout, J. F., 1985, Imaging the earth's interior: Blackwell Scientific Publ.
- Cohen, G., 1986, Fourth-order schemes for the 2-D wave equation in a homogeneous medium: Presented at the 56th Ann. SEG Mtg., Houston.

- Courant, R., Friedrichs, K. O., and Lewy, H., 1928, Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik: *Math. Ann.*, **100**, 32.
- Dablain, M. A., 1986, The application of high-order differencing to the scalar wave equation: *Geophysics*, **51**, 54-66.
- Edwards, M., Hsiung, C., Kosloff, D., and Reshef, M., 1985, Elastic 3-D forward modeling by the Fourier Method: Presented at the 55th Ann. SEG Mtg., Washington, D.C.
- Fornberg, B., 1987, The pseudospectral method: comparisons with finite differences for the elastic wave equation: *Geophysics*, **52**, 483-501.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel S., and Alford, R. M., 1976, Synthetic seismograms: a finite difference approach: *Geophysics*, **41**, 2-27.
- Kosloff, D. D., Reshef, M., and Lowenthal, D., 1984, Elastic wave calculations by the Fourier method: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **74**, 875-891.
- Marfurt, K. J., 1984, Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations: *Geophysics*, **49**, 533-549.
- Mufti, I. R., 1987, Interpretive lessons from three-dimensional finite-difference seismic models: Presented at the 57th Ann. SEG Mtg., New Orleans.
- Richtmyer, R. D. and Morton, K. W., 1967, Difference methods for initial-value problems: Interscience Publ.
- Rokhlin, V., 1983, Solution of acoustic scattering problems by means of second kind integral equations: *Wave Motion*, **5**, 257-272.
- Schuster, G. T., 1985, Modeling structural traps by a hybrid boundary integral equation and Born series method: Presented at the 55th Ann. SEG Mtg., Washington, D.C.
- Shubin, G. R., and Bell, J. B., 1987, A modified equation approach to constructing fourth order methods for acoustic wave propagation: *SIAM J. Sci Stat. Comp.*, **135-151**.

在Cray超级计算机上用并行技术 作三维地震处理、偏移和模拟

MOSHE RESHEF, MICKEY EDWARDS 克雷研究有限公司

1. 引言

通过使用并行处理和大容量存储器使地震处理行业获得广泛的三维处理能力。而在过去, 这种能力受到了计算机系统的很大限制, 或者说, 以前的计算机系统根本不可能作这种处理。所谓并行处理就是使用多个处理机部件处理同一应用问题。本章简单地介绍使用CRAY X—MP计算机系统处理三维地震资料的结果。其中讨论的一些算法也已用CRAY—2系统做过测试, 但由于CRAY—2硬件目前正在改进而且其操作系统和Fortran编译软件也正处在完善阶段, 因此CRAY—2的处理结果只是初步的。我们将要公布的是CRAY X—MP的记时结果。本章将不涉及数学方面的发展, 也不试图验证或引用相应的文献资料。而认为这里讨论的算法已为地球物理界所熟悉。

2. CRAY X—MP的硬件和软件

本节概述CRAY X—MP的硬件和软件。讨论内容有中央内存、大容量第二级存储器——固态存储器(SSD)、输入输出子系统、中央处理机部件和并行处理。

2.1. CRAY X—MP中央内存

在写本文时, 已公布的CRAY X—MP系统的中央内存容量是2到16兆64位字, 它由16到64个交叉访问的存储体组成。由于内存体是交叉访问的, 因此内存地址在连续的内存体内是连续的。目前, 中央内存的容量受限于指令的24位内存地址长度。为了扩展中央内存的容量并能执行现有软件系统, 即将推出的兼容系统将既包括24位又包括32位指令的内存地址长度。包含有4个处理机的CRAY X—MP系统的中央内存由双极ECL电路构成, 而单处理机和双处理机的CRAY X—MP系统则使用静态MOS存储器。对于多处理机系统, 所有的处理机都可以存取全部中央内存, 这一点是与那种被称为高度并行处理的体系结构之间的重要差别。高度并行处理机体系结构必须不同处理机的局部内存之间传送数组。

有许多计算机体系结构要求以内存增量为1或间距为1在连续的内存单元存取向量, 这是因为不以1为增量来存取向量的存取时间较慢, 会对系统性能造成不良的影响。CRAY X—MP结构允许以完全正或完全负的内存增量和以随机变址来形成向量, ECL和MOS内存体存取时间分别为4个和8个时钟周期(34ns和68ns)。如果向量操作有足够的长度, 那么在存取第一个内存体的起步延迟后依次存取其它内存体则不会产生任何延迟。如果对一个内存体做存储访问而该内存体由于前一次存储访问正忙着, 则冲突的存储访问必须等待到忙条件清除后才能响应。ECL内存的等待时间是1到3个时钟周期, 而MOS内存则是1到7个时钟周期。在多处理

机的情况下,一旦解决了最初的内存体冲突,一般来说,每个处理机就呈流水化或者说在每个时钟周期内能接收(或存储)操作数(或结果数)。内存体冲突对整个系统性能的影响将取决于具体应用,并在某种程度上取决于编程技巧。迄今为止,从事大计算量地震算法的研究实践表明,一个4处理机系统的性能降低10%是正常的。随着处理机个数和中央内存容量的增加,可以通过增加内存体的个数来减少内存冲突。内存体个数的最大值取决于组装和布线。每个处理机有4个内存端口,这些端口具备同时从内存并行读取2个向量、向内存写入1个向量以及做输入输出操作的功能。最初的CRAY-1对上述操作只用了一个单一的内存端口或路径。

2.2. CRAY X-1MP的固态存储器

CRAY X-1MP系统选用的大容量第二级存储器是一种非旋转式的固态存储器或叫作SSD。SSD是MOS存储器,其容量可配置成32、64、128、256或512兆64位字。1982年推出第一台SSD时,其最大容量是32兆字,所用存储芯片是64千位。从那以后,已采用了256千位和1兆位存储芯片以便在相同物理空间内增加存储容量。采用集成度更高的存储芯片可以在输入输出子系统(IOS)内安放32兆字的SSD,而不需要将SSD作为独立的硬件部件。随着集成度更高的MOS存储芯片变得更可靠和更便宜,SSD存储容量将会增加。例如,下一步的SSD将使用4兆位的存储芯片,容量可达2千兆字。

一个4处理机的CRAY X-1MP系统,4个最大容量的SSD用2条传输率为每秒1000兆字节的通道连接到中央内存,其它配置使用一条单一的1000兆字节/s通道。当初,仅当配置了最大存储容量时才能获得最大的传输率,如果存储容量减少到一半,四分之一等,则传输率按1/2、1/4、1/8的比率递减。而现在,上述1000兆字节/s和2000兆字节/s的传输率都已达到而且与存储容量无关。目前,Cray研究公司的操作系统把SSD当作一个磁盘设备来使用,有标准的输入输出子程序。存取SSD大约需要330到540 μ s,其依操作系统而定。一般来说,三维算法需要从两个途径存取三维数据集,例如,可能需要 x 为常数和 y 为常数的两个平面。对于这个例子,我们假设三维数据集最初按 z 存放在SSD中, z 的存储变址增长最快,然后是 x ,最后是 y 。 y 为常数的平面或者说 xz 平面代表连续的SSD存储单元,可由一个单一的输入输出请求存取。 x 为常数的平面或者说 yz 平面代表分散的SSD存储单元,要用多个输入输出请求才能存取。可以使用异步队列I/O(AQIO)程序来有效地存取这类三维数据集,用AQIO,对操作系统的单一调用,会送出一I/O地址列表。表1列出使用AQIO的效率,测试环境为一个4处理机的CRAY X-1MP系统,SSD容量为128兆字。为作计时,对于不同的记录长度都执行50次读或写操作,记录长度从1个段(512个字或4096个字节)到256个段不等。第2列上给出了对每一块记录发送一个单一的I/O请求或者作一次操作系统调用的总计传输率。第3列给出当用一次单一的操作系统调用传送50个地址列表时的传输率。如果通过给SSD和中央内存地址加一常数增量来定义几个I/O操作,那就可以只发送一个复合AQIO请求。第4列给出一个复合AQIO请求产生50个I/O操作时的传输率。表1表明可以获得大于2千兆字节/s的传输率。将传输率除以2可以近似地表示使用单处理机和双处理机的CRAY X-1MP系统SSD性能。

利用SSD能实时计算许多内存容纳不下的问题,其中包括有几千个计算步骤而且每一步都必须取回和恢复数据集的递归法。通过使用高带宽的SSD使原来许多不可行的、受I/O约束的计算问题变成可计算的程序或者变成仅受CPU计算能力约束的程序。到目前为止的经验

表1 传输率(兆字/s)

SSD记录长度 (段)	单I/O 请求	AQIO	复合 AQIO
1	1.22	13.60	33.50
2	2.43	14.28	36.35
4	4.76	28.51	72.28
8	9.42	56.66	133.46
16	18.98	114.59	177.25
32	33.36	152.89	231.90
64	62.75	208.88	263.97
128	75.98	254.01	285.79
256	131.33	265.67	291.11

表明,三维算法的实施所面临的最大的困难是数据传输问题,在解决数据传输问题后,可以用并行处理来缩短计算时间。

2.3. CRAY X—MP输入输出子系统

1976年最初推出的CRAY—1使用传统的连接到中央内存的I/O通道来执行I/O操作。1981年,CRAY超级计算机开始用于地震处理,推出了CRAY—1s系统,配有一个独立的I/O子系统(IOS)来执行I/O操作。所有的CRAY X—MP系统都配有IOS系统。IOS包括了容量最大达8兆字(64位/字)的主要用于I/O缓冲的MOS存储器。对于一个配有联机磁带机的系统,IOS包括3个或4个I/O处理机,用1条或2条100兆字节/s的通道将IOS连接到中央内存。IOS缓冲存储器用于磁盘和磁带的“读在前”和“写在后”的I/O操作。缓冲器的充填和刷新对于应用程序是透明的。借助于IOS,在巅峰状态,8到10台6250bpi磁带机可以以最大带速多流操作。IBM3480双密度盒式流磁带机,大约可以有×××台多流操作。在IOS和中央内存间使用2条100兆字节/s的通道,磁盘操作可保持总计×××兆字节/s的传输率。SSD与中央内存间的传输不通过IOS。将一条附加的100兆字节/s通道连接到IOS上,提供磁带和磁盘所谓“后门”SSD传输,以便旁路中央内存。关于IOS结构和外部设备的详细介绍请参考Cray研究公司手册。

2.4. CRAY X—MP中央处理机部件

CRAY X—MP系统有1、2或4个CPU,每个CPU(或者说处理机)都是相同的。每个CPU有14个功能部件,功能部件是完全段化的,并且每个时钟周期可以启动一个新的操作。功能部件是独立的,可以并行执行操作。每个CPU有8个向量寄存器,每个向量寄存器有64个64位字(或单元)。许多向量处理体系结构以“内存到内存”操作为特点。每次向量操作从内存装入1个或2个操作数数组并将1个结果数数组存入内存。而CRAY体系结构使用“寄存器到寄存器”向量操作,输入操作数和结果数数组都放在向量寄存器中。在许多算法中不止一次地使用相同的变量进行运算,这样就不必再从内存重新装入了。另外,CRAY X—MP使用多个内存端口也可完成“内存到内存”的操作。一个功能部件的输出结果可用作另一功能部件的输入。如果后一个功能部件不忙、则两个功能部件可以“链接”在一起。对于长度大于64的向量,以64个元素为一段来分段执行计算。因为CRAY—1到内存是单一路径,所以长向量将会使性能曲线呈锯齿状。CRAY X—MP由于增加了内存端口的数目从而

避免了长向量性能的降低。这种性能的降低是长向量按64分段执行的结果。

对于标量操作,每个CPU有8个64位的通用寄存器和64个64位的中间或后援寄存器。一个中间寄存器与一个通用标量寄存器之间的内容传送可在一个时钟周期内完成。每个CPU还有8个24位的地址寄存器和64个24位的中间地址寄存器。中间地址寄存器和地址寄存器间的内容传送可在一个时钟周期内完成。Cray Fortran编译程序使用上述中间寄存器存放标量变量和地址。标量和向量指令是16位和32位的字片并可散置。指令在4个指令缓冲器处执行,每个指令缓冲器可存放128个16位的字片,指令缓冲器从中央内存以每个时钟周期32个16位字片的速率装入。一般来讲,数学库子程序的需要少于512个16位字片,因此在初始装入指令缓冲器后不需要从内存再取其它指令。

关于中央处理机部件更详细的说明,请参阅Cray研究公司相应的手册。

2.5. CRAY X—MP并行处理

Fortran程序员通过使用多任务(multitasking)、微任务(microtasking)、宏任务(macrotasking)和自动任务(autotasking)可以实现并行处理。多任务是首先被开发的功能,它利用了已存在多年的任务概念。多任务库实用程序能启动任务、传送事件和实现同步。Fortran程序员要标识程序的并行部分并且必须使之子程序化。程序员还必须分配整体和局部变量以及数组。微任务使用一个预编译器,预编译器解释编译器命令并产生包含有相应实用程序调用的第二级源程序,微任务可以同子程序或外层do循环一起使用。假如有现成的处理机,则每次外层循环用一个不同的处理机,微任务力图以动态方式使用可用的处理机,提供批量环境下的最佳性能。与微任务有关的系统开销一般小于多任务的系统开销,微任务能以较细的粒度结构使用。宏任务也使用一个预编译器并将多任务和微任务结合在一起。Cray的用户们有时也把多任务称为宏任务。自动任务力图自动地将Fortran程序并行化。实现自动任务是最困难的挑战,尚需不断改进。基于到目前为止的经验,并行处理工具的选择取决于应用的需要。

与许多并行处理结构相比,Cray X—MP使用少量“快速”处理机,而不是使用大量“低速”处理机。如表2所示,要想成功地应用多处理机就要求在总计算量中的大部分程序都是可并行化的。例如,当计算量中有百分之四必须由一个单处理机串行执行的时候,那么使用16个处理机并行处理的最大的理论加速为一个单处理机的16倍。最大理论加速不包括系统开销,也不包括与内存冲突或与数据输入输出有关的延迟。到目前为止,三维外部存储器递归算法的实践表明,Cray X—MP系统可实现的并行运算不到100%。

3. 三维标准处理

三维勘探最初面临的问题是输入的数据量。前几年,一块典型的三维海洋勘探覆盖的表面积为 3×5 平方英里,要用掉500~600盘6250bpi的磁带。而今天,一块海洋采集所用磁带的数量可增加一个数量级。高分辨率陆地采集使用大面积排列同样也需要大量的野外磁带。

Cray X—MP硬件设计考虑到了并行处理。它的CPU间的通信以共享地址寄存器、共享标量寄存器和标记寄存器为特征。共享寄存器将地址和标量信息从一个CPU传送到另一个CPU。标记寄存器用于CPU间的控制,CPU死锁则由硬件确定。

下面举一个例子,假设一次测量有300条测线,每条测线1000炮,每炮记录120个检波点,总计有3600万个地震道。若每道1500个采样点,则要处理的总的三维数据量是54千兆