

# 地震资料 处理技术论文集

张德忠 高章伟 编

石油工业出版社

# 地震资料处理技术论文集

张德忠 高章伟 编

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

### 内 容 提 要

本文收编了地震资料处理的有关内容,包括增强信号提高信噪比的去噪技术、提高分辨率的子波处理和反褶积技术、关系到地震资料处理和解释成败的速度分析技术、影响 CMP 叠加和小幅度构造的静校正技术、求取地层、岩性参数的反演技术、提高勘探精度的三维处理技术和偏移技术、提高地震资料处理速度的并行处理技术、小波变换在地震资料处理中的应用方法以及 AVO、VSP 资料处理方法等。文集涉及内容较为广泛,所述原理简明扼要,其技术可操作性强、方法效果明显。可供石油物探工作者特别是从事地震资料处理工作的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地震资料处理技术论文集/张德忠,高章伟编.

北京:石油工业出版社,1995.6

ISBN 7-5021-1468-8

I. 地…

II. ①张…②高…

III. 地震数据-数据处理-技术-文集

IV. P315.63-53

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油地球物理勘探局制图印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 33 页印张 853 千字印 1 1500

1995 年 6 月北京第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

定价:20 元

## 编者的话

自20年前原石油工业部第一次引进RAYTHEON 1704计算机到现在,我们已经先后引进了十余种各类地震资料处理系统,其中应用处理软件包括了世界各主要大地球物理公司的产品,如西方物探公司、法国物探公司、法国CGG、原美国的HGS公司以及CSD公司的地震资料处理软件。这些技术的引进促进了我国地震资料处理技术的进步与发展。

为了用好这些地震资料系统,我们平均1~2年就组织一次用户技术交流会。随着技术水平的提高,交流会的内容逐渐地由一般的经验交流转到新方法和新模块开发的介绍,这些会议对当时处理系统功能的发挥和处理技术、处理水平、处理效率的提高以及节约原材料都起到了相当大的作用。

特别是1992年11月在杭州PE机第三次经验交流会上,提交的论文数量及质量有了很大的提高,不少内容在当时也是较新的。文章的作者多是工作几年的年轻工程技术人员。为了交流经验、切磋技术、提高地震资料处理水平,会议认为将各处理中心有关研究成果汇总,为青年工程技术人员成长开辟一块科技绿地,组织出版《地震资料处理技术论文集》是非常必要的。

这项工作得到了各处理中心的欢迎与大力支持。在一个月內报来100余篇论文,我们中选出62篇,并请俞寿朋、牛毓荃、杨再朝等7位专家对文稿进行了审核。但是由于组织出版这本论文集是一个初步尝试,论文集中难免有不确切或不正确的地方,我们认为可以通过读者和作者之间相互探讨,达到共同提高的目的。

发展国产地球物理勘探软件,是我们长期为之奋斗的目标,因此,《地震资料处理技术论文集》编辑出版得到了中国石油天然气总公司勘探局领导的大力支持,在本论文集出版印刷时,征得中国石油天然气总公司勘探局丁贵明局长的同意,将他1994年12月在中国石油天然气总公司勘探方法软件评审会上的讲话:“建立中国油气勘探软件系统”,整理成文,收编于论文集中,以期对地震资料处理软件开发加强规划,减少低水平的重复,从各个方面、各个专业共同努力,形成拳头产品,尽快建成自己独立版权的地震勘探软件系统。

技术进步是无止无境的。希望拿到论文集的读者,对论文集的内容加以评论,以便今后改进。

本论文集的出版得到了中国石油天然气总公司新技术推广中心、西北石油地质研究所、石油地球物理勘探局研究院、石油地球物理勘探局物探地质研究院、江汉石油管理局物探公司的支持和赞助,在此一并表示衷心的感谢。

张德忠 高章伟

1995.5

# 目 录

## 计算机技术及小波变换

建立中国油气勘探软件系统	丁贵明	郭黔杰(3)
AP 并行算法的研究与应用	盛行	王以治(7)
PE3284 软件开发	张志国 张建京	潘焕革(13)
KJ8920 大型向量机并行程序设计方法探讨	撒利明 陈升安	张志军(24)
小波变换在地震信号时变滤波中的应用	岳伏生 徐云泽	刘贵忠等(37)
用小波变换对地震剖面做多分辨率分解		曹聿明(43)
用小波变换反演吸收系数	李 砚	程绪太(51)

## 一般处理

地震道自动剔除		李宏兵(57)
Radon 变换在地震资料叠后去噪中的应用	冀仁彬 王承曙	李新祥(65)
自适应模型强噪声识别与衰减	王顺根	梁茂贵(70)
叠后中值滤波去噪	郭向宇	凌 云(80)
Radon 变换在消除多次波中的应用		戈良玉(87)
地表一致性振幅能量补偿	文 玲	关治霞(94)
利用地震物理模型对复杂构造的研究	宋锡熊 冯德法	邹玉萍(96)
吐哈地区陡倾角资料处理方法初探		蔡希玲(111)
四川山地地震资料精细处理分析		史保强(119)
新西兰石油公司洞庭盆地资料处理		赵建勋(134)

## 高分辨率处理

噪声自适应子波处理		姚逢昌(147)
两步法反褶积技术中子波的提取与反子波的计算	夏洪瑞 周开明	朱 勇(156)
高分辨率保幅处理在 PE 系统的建立和效果		王余庆(164)
增频处理技术及应用效果	王金钦	魏贵敏(171)
叠后补偿在高分辨率地震资料处理中的应用	单连瑜 陈繁勤	郭树祥(178)
地震子波的转换		董兆斌(185)
地震资料分步最优化反演——一种无井 LOG 的实现	杨旭明 陈 均	唐权钧(190)
动态静校正		聂汉林(196)
模型静校正方法研究		钟德盈(204)
高精度地表一致性振幅校正	李家康	颜兰兰(212)
微测井一初至折射静校正方法	李凤岐 马孟先	肖国强(220)
川西砾石区大静值校正法		吴彦玮(227)

折射波法相对静校正.....			郑鸿明(231)
波动方程基准面静校正.....	陈必远	马在田	管叶君(250)
$v(t_0, x)$ 动校正.....			刘义清(253)
三参量速度信息的求取及应用.....		徐常练	张红英(258)
三参数速度分析.....		余景礼	瞿国平(266)
一步法 NMO—DMO 速度分析与叠加技术.....	丁为照	瞿国平	彭国斌(275)
自适应倾斜面元叠加模块研制及实际应用.....			龚洪林(287)
道积分方法研究及实践.....		杨喜林	黄 棣(295)

## 特殊处理

斜井 VSP 资料处理方法研究.....	赵国旺		边国柱(313)
用 VSP 初至半周期脉冲谱分析法求取吸收参数.....	顾培城		范小冬(323)
VSP 记录中几种参数的提取与应用.....	邳东彪	田子奇	项 发(331)
低信噪比 VSP 资料波场分离方法及效果.....	王成礼	卢春喜	焦湘桓(339)
VSP 反褶积算子的提取和应用.....	许本山	张金岗	王 海(350)
最小旅行时射线追踪方法.....			何惺华(357)
PS 转换波处理软件包.....		朱衍镛	张俊桥(363)
AVO 理论和方法的一些新进展.....			郑晓东(378)
AVO 技术和背景趋势分析法.....	甘春庭	贾建国	熊传凤(390)
NWAVO——一种新的 AVO 分析处理软件包.....			邓 央(397)
高精度 AVO 分析处理方法与效果.....	彭少华	曲寿利	陈繁勤(403)
应用遗传算法反演 AVO 数据中的 $R_0$ 和 $\Delta\sigma$ .....			蔡加铭(416)
变子波多层介质 AVO 正演模拟.....	邵幼英		胡 军(427)

## 三维处理及偏移、反演技术

插值三维技术.....	丁为照	霍 浩	许自龙等(439)
三维可变面元均化.....			刘义清(449)
三维地震资料叠前拼接处理技术及效果.....	林必荣	李培基	陈繁勤(456)
三维频率波数域 DMO 方法研究及应用效果.....	马在田	王 勇	陈效诚等(462)
不规则三维预处理作业流的快速生成.....			段建康(471)
三维波动方程一步法有限差分偏移的实现与应用.....	闵文霆	杨海生	艾建华(479)
三维一步法偏移.....	杨贵祥	陈效诚	全胜汶(486)
串级深度偏移方法与应用.....	陶正喜	马在田	何玉春(494)
二维常速等效叠前偏移技术在复杂构造地区的应用.....	王狮虎	龚仁彬	徐云泽(500)
带有压制画弧因子的等效叠前偏移.....			周 方(506)
层参数迭代反演方法的研究及应用.....	李永章	杨 洁	(517)
井资料约束下的高分辨率岩性参数反演.....	雍学善		张秀萍(523)

# 计算机技术及小波变换





# 建立中国油气勘探软件系统

丁贵明 郭黔杰

(中国石油天然气总公司勘探局)

## 摘 要

先进的油气勘探软件是现代油气勘探体系的重要支撑单元,是提高勘探效益的必要保证。当前,建立一个中国油气勘探软件系统的条件已经成熟,它将会是以勘探数据库为基础,以勘探方法等软件为核心的工程化软件平台。这样一个系统的建成,就为油气勘探多学科联合工作创造了条件,使勘探工作不管在什么地方,不管要做什么作业,不管后边是什么机器,都可以通过面前的工作站来完成工作任务。无论需要什么人,无论需要做什么事,都可以通过面前的终端和任何人进行工作讨论和设计。要达到这一目标,必须有一套完整管理办法把力量组织起来,组成一个大的系统。组织起来才能避免大量重复的低水平工作,这是实现建立中国油气勘探软件系统计划的关键组织措施。

## 勘探工程软件系统研制面临的形势

从几次出国考察和在工作实践中的体会,有一个问题越来越清楚,就是随着计算机技术的不断发展,软件将成为我们现代化社会的重要产业之一。随着现代社会的发展,计算机的运用将越来越普遍,凡是要用计算机就得要软件,包括计算机操作系统和应用软件几个部分。这在世界上发达国家已经是很明确的,大量的软件公司在全球内开展促销活动,我们也花了相当多的精力和软件公司打交道,评估、购买他们的软件,接受培训和进行应用。应该看准这一点:软件是未来社会中不可缺少的一部分,同时是重要的产业之一。

随着中国石油天然气总公司各项工作的现代化,软件支持费用会越来越大,仅勘探系统每年对外的软件支持费用估计要 800~1000 万美元。这是一笔很大的开支。

中国石油天然气总公司应该说是世界上最大的油公司之一,也是世界上最大的服务公司之一。公司年产油 1.4 亿 t,大家可以查一查世界上年产油 1.4 亿 t 的公司有没有?有几家?就服务公司系统来说,我们也是一个很大的服务系统,我们有将近 1000 个钻井队,260 个地震队,500 来个测井射孔队,还有录井队七、八百个,测试队伍也是好几百个。大家知道的世界几大服务公司,如西方、斯伦贝谢、哈里伯顿,它们的钻井队、测井队、地球物理队伍没我们多,我们有世界上最庞大的服务系统。作为世界上最大的油公司和最庞大的服务系统,没有自己独立版权的软件,这是很不相称的。为此,我们一定要开发自己的软件系统。世界上最大的油公司和最大的油服务公司之一,应该有自己的软件系统。

当前,形成自己勘探工程软件系统的条件已经基本成熟。原因有二:第一,经过十多年使用

国外软件,包括地震资料处理、解释,测井资料的处理、解释,录井资料解释软件,我们有了最全面软件应用经验;第二条,在使用这些软件的过程中,各油田已经培养了一批软件力量,这批软件力量已经开始编制我们自己的软件。第一个由石油地球物理勘探局研究院软件所按工业标准组织编制的地震处理软件(GRISYS),1994年已向全国的工作站系统推广了五十多套,加上他们的现场处理系统加起来已经卖出了近200套。地震交互解释软件(GRIStation)1995年即将推出。另外,勘探方法应用软件都已经开始形成,具有很好的发展前景。由此来看,中国拥有自己版权的勘探工程软件系统的条件已经成熟。基于对整个软件形势的估计和对自己力量的估计,我们提出要尽快建成自己版权的勘探工程软件系统。

## 建立多学科联合工作的勘探系统平台

软件设计的核心思想是要指导研制什么类型的软件系统,由我们的勘探工程理论来规划勘探工程软件系统的主要内容。软件系统应当包括三大部分。第一大部分叫资料整理部分,包括:(1)地震资料处理、解释、施工设计;(2)非地震物化探资料处理、解释;(3)测井资料处理、解释;(4)测试、录井及实验室资料处理、解释。第二大部分是油公司的应用软件,包括:盆地分析模拟,圈闭描述评价,油气藏描述评价,勘探规划计划编制及勘探管理工作自动化等软件。第三大部分是勘探数据库,由基本数据和成果数据两大部分组成(图1)。这就是本文所构想的勘探系统软件的内容。当然随着系统的进一步完善,钻井设计、油层改造设计、油藏数值模拟、地理信息系统等软件也将逐步加入其中。

形成一套勘探工程软件系统以后,未来的勘探工作将是怎样的呢?当全国勘探数据和整套勘探工程软件完成并建成信息高速公路后,勘探工作就将进入一个状况:

勘探软件系统

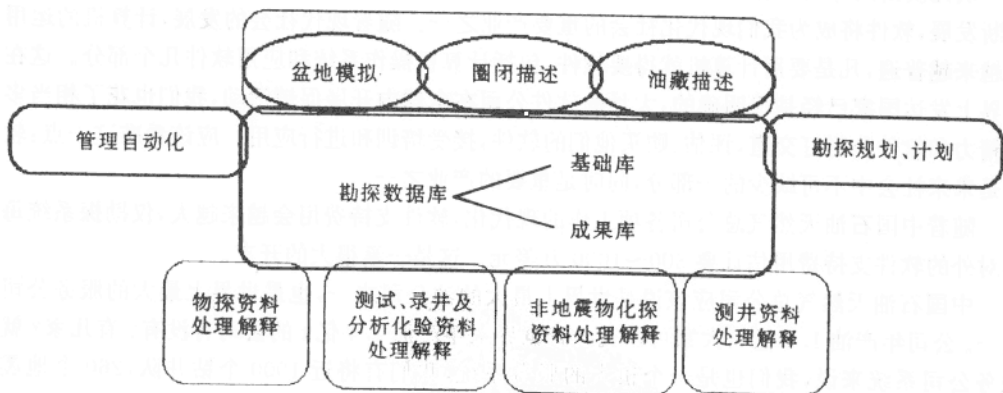


图1 工程化的勘探软件平台基本结构图

(1)不管在什么地方,不管要做什么作业,不管后边是什么机器,都可以通过面前的工作站来完成我的任务,这就是现代网络通讯的概念。在信息网络上,我在任何地方都可以指挥某个研究院的计算机做我要做的工作。而你并不知道你在指挥什么机器,你尽管调用资源,在网络上自动找到一个机器,找到所需要的数据,把工作做完,把成果显示在面前。

(2)无论需要什么人,无论需要做什么事,都可以通过面前的终端和任何人进行工作讨论、设计,这个事情可以做到。比如我在北京某研究院,要进行油藏描述,这时需要一个高水平的地球物理家,这个人在石油地球物理勘探局;同时需要一个高水平的测井专家,这个人在胜利油田;还需要一个高水平的油藏工程师,这个人在大庆。我就在北京研究院里和这三个人来讨论问题。这也是现代网络通讯的概念。实际上,现在就有这样的设备,在三台工作站上,各自带上耳机,在一台机器上设计,另两台机器上就可以看到,可以进行修改和讨论。当我们的勘探工作进入这个时代以后,我们的勘探效益就会极大地提高。

现在确实出现了一个发展自己软件的机遇,这个机遇有如下几方面的内容:

(1)全国勘探系统都面临着一个大面积更换硬件系统的时期。目前所使用的机器大部分都是80年代引进的,大部分是标量机,而我们面临着世界计算机大发展的时代,面临在大批量更换计算机硬件的前夕,因而也需要大批软件。在这个时期必须做出我们自己的软件来占领国内的市场。做不到这点,就要买外国软件,那么国产软件系统就会失去占领市场的最好时机,任何商品离了市场,就没有了生存的权利。现在是一个很关键的时期,我们不能错过计算机软件发展的机会。

(2)中国石油天然气总公司勘探系统从1992年后进行了大量现代勘探与管理研究,其理论体系在全国勘探系统已基本建立。这种研究为勘探工程软件的编制创造了很好的条件,“四个勘探规范”(盆地分析模拟规范,圈闭描述评价规范,油气藏描述评价规范,规划、计划编制规范)制订并发到全国,效果很好,为勘探系统的几个基础工作奠定了基础。

(3)现代勘探数据库正在建设之中,一些油田已经基本完成,这为应用软件提供了理想数据源。

## 组织软件研制队伍

组织起来是软件开发的必由之路。我们十几年在软件开发上的最大教训就是没有组织起来,因此产生不了工业化的软件。组织相对好的是石油地球物理勘探局研究院的软件所,它已经组织了近十年,才产生了自己的处理系统。解释系统是在李天相副总经理亲自支持下集中干了两三年,开发出了一个GRISTation地震解释软件。专家们评估这是目前我们唯一能推出的两套软件系统。

要充分发挥院校、科学院系统、地矿部系统、海洋系统的力量,可以从两个方面入手,一是购买他们成熟的软件作为模块,二是对暂时没有力量开发而又没有购买目标的部分,可投资委托开发。通过这两方面的工作,可以把国内软件力量组织起来,尽快地完善我们的软件系统,使它在短期内形成一个大软件体系,形成与世界上大的软件公司竞争的能力。

组织软件研制的队伍,要有一个好的开发环境。好的环境包括几个部分,一个是硬件环境,一个是软件环境,最后是生活环境。我们应当对集中起来的成为软件子公司的单位提供一定的资金扶持,帮助他们建立好的硬件平台。软件环境我们要尽可能地向POSC靠拢,尽快参加POSC组织。对大的组织系统要创造好的生活、工作环境,要创造一个条件,让软件人员集中精力,拼命工作。要把软件搞上去,没有拼命精神、没有拼命三郎的精神,在短期内想在世界软件市场上立住脚,那是不可能的。

任何一个软件公司推出的软件都不可能是完善的,所以才有第一版本、第二版本。我们的

软件也不例外。因此,要搞好售后服务工作。要组织好软件用户协会,定期交流使用经验、存在问题、有偿收集用户改进和增加软件功能的建议。喜欢使用中国软件,并且为它的完善、发展做贡献,这就是爱事业爱国家的表现。

## 近期的工作

择优组织,尽快推出自己的软件系统。如在盆地分析方面,以北京石油勘探开发研究院与大庆的软件为基础,尽快推出一套完整系统。胜利油田的软件还可以独立发展,就发展情况决定以后合作方向。如果我们认准了软件工作的特点,应该容易走到一起来。组织起来后,可以分别承认各自的贡献。组织起来后,共同建立平台,成立联合公司或软件子公司,推出产品或卖出软件后,根据贡献确定利益划分。按公司组织,完全可以打破单位封闭的格局,同时也会得到科技局与勘探局的支持。勘探局所组织的系统会给大家无偿提供支持。这有利于大家尽快完善系统,占领国内市场,走向世界市场。不必追求一次就推出很完善的系统,建立基本平台后就应进入市场,其他内容让大家都去完善它。我们把统一系统理解为统一基础平台,百花齐放是“放”多种方法模块,这就能集全国勘探系统优势,在世界上形成有影响的软件系统。

最后是要统一基本思想。我们的软件要在市场中发展、完善,所有外国软件也都是在市场中发展。这有两层意思,一是软件组织与编制者以基本平台为基础,集中力量,尽快出成果,二是用户不要过高苛求它。过高苛求会阻碍国产软件的尽快推出。外国公司在介绍自己工作时,将还属构思阶段的东西大力宣传,做广告,而不是产品(包括计算机硬件和软件)出来了才说,基本构思基本思路一通,立即就宣传。我们在使用外国软件时,也发现有许多问题,用他们的软件我们没意见,用我们自己的软件,希望大家也高抬贵手。用户自己也有责任在应用中为完善国产软件做贡献。这并不等于叫大家不要去要求它,这里首先是软件编制者要严格自我要求,第二在使用中完善和发展。使用者要喜欢它,爱护它,在使用中帮助它。我们也记住你的贡献。这个问题很重要,中国人帮助自己的软件走向世界,这也是爱国的具体表现。

为了我们的未来,共同奋斗吧!

# AP 并行算法的研究与应用

盛 衍

(江汉石油管理局物探处)

王以治

(华中理工大学并行计算所)

## 摘 要

随着石油地球物理勘探的飞速发展,地震资料处理工作日趋繁重,为了提高资料处理速度,充分发挥 AP 阵列机高速向量运算的优势,我们开展了“AP 并行算法”的研究,并将其应用于偏移模块获得成功。本文简要介绍了 AP 系统结构,详细讨论了 AP 并行程序设计方法,并描述了偏移模块的分块并行算法,为提高资料处理速度提供了一种新方法。

## 引 言

随着石油地球物理勘探的深入发展,越来越多的大型科学计算及数字处理工作摆在我们面前,这些问题的计算量非常大,并且其向量运算成分占 70%~80%。因此,如何利用现有计算机设备,高效率地处理地震资料,是我们研究的主要方向,我们选择资料处理中占用机时比较多的偏移模块,开展 AP 并行算法的研究,已取得了比较理想的效果(见表 1)。

表 1 两种算法的性能比较

模 块 名		WEMIG	WEMBA
算 法		串行算法	分块并行算法
资源 占用	处理器	主要使用 PE 机	主要使用 AP 机
	I/O 次数	100%	30%
处理 时效	CPU	3173.5s	253.5s
	墙上时间	4624s	2365s
加速比		1.95 倍	

比较环境:单 CPU,单作业,道数=890,道长=5700ms。

## AP 机系统结构

### AP 机硬件结构

AP-120B 全称为 FLOATING POINT SYSTEM ARRAY PROCESSORS(浮点系统向量处理机)。它是一种与主计算机并行工作的高速(167ns 周期时间)外围浮点运算阵列机,其硬件结构特别适合于数字信号处理等大量重复的乘法和加法运算。

AP 机为实现其高速度,采用了快速商用集成电路元件及特殊的结构,使机器中的每个逻

辑部件都能独立地以最大速度工作,这种高速的并行结构允许机器在对数据进行算术运算的同时,执行阵列变换、循环计数、及从内存取数等内部操作,这就使得 AP 机比那些每个操作都必须顺序执行的典型的通用计算机的执行速度要快得多,其峰值运算速度可达 1200 万次/秒。

AP 机由存储器、运算器、地址寄存器、状态寄存器、接口部件及控制部件等六大功能部件组成,各功能部件通过多总线结构互连,这种结构使各种部件可以并行处理各种任务。

### AP 软件系统

图 1 简要地表明了 AP 的软件结构。

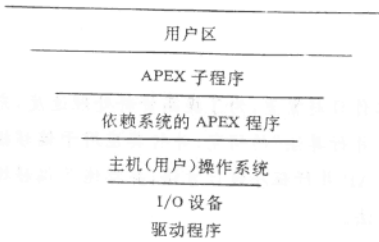


图 1 AP 的软件结构

AP 提供下列软件包供用户使用:

(1) APEX 的主要作用是使用户在 FORTRAN 这一级上控制 AP 的执行。APEX 软件包的功能主要包括:数据传输、断点设置与清除、AP 的初始化及释放、AP 错误检查与同步操作等。

(2) APMATH (AP 数学库)。这是一些用 AP 汇编语言写的子例程,程序员可以在主计算机中用高级语言调用。

(3) APAL/APFORTRAN (AP 汇编/APFORTRAN 编译)。APAL 是一个交叉汇编程序,把代码汇编成目标代码;

APFORTRAN 用于编译 APFORTRAN 程序。

(4) APLINK/APLOAD (AP 连接/AP 加载程序)。APLINK 用来把独立的 APAL 目标模块连接起来并重新定位,从而形成一个单独的执行模块;APLOAD 把 AP 目标代码转换成可传送到 AP 并能在 AP 上运行的加载模块。APLOAD 也产生传送这些加载模块到 AP 中并启动 AP 操作的代码。

(5) APDEBUG/APSIM (AP 查错/AP 模拟程序)。APDEBUG 是一个交互式查错程序,用户可以有选择地设置断点,检查和修改存储器的内容,并运行各段程序;APSIM 提供了 AP 各硬件的程序模拟,用户可以在主计算机上模拟 AP 的运行,为用户调试 AP 程序提供了方便。

(6) APTEST (AP 测试程序)。APTEST 是一个交互式诊断、测试和验证程序的集合,用于 AP 硬件故障的诊断。

## AP 并行程序设计方法

### AP 并行程序设计的基本原则

AP 机具有多个独立的功能部件,而且拥有多条数据通道,这为 AP 并行计算提供了硬件基础,如何让这些功能部件全速高效地启动运行,是程序设计的根本方向。

充分利用大量浮点寄存器,减少访问内存次数

在 AP 中,访问内存比较费时,从数据存储器中取一个数需 3 个周期,执行一条浮点运算指令时,若两个操作数都来自内存,则取数操作需 6 个周期,这样势必影响 AP 运行效率。我们考虑到 AP 为用户提供了多达 64 个的浮点寄存器和独立于数据存储器的表格存储器,充分利用这些硬件设备来存放中间结果,可以大大减少对数据存储器的访问,从而提高运行速度。

尽量减少主机与 AP 的数据交换次数

AP 作为一台后端机,通过 DMA 通道与主计算机相连,主机将须加工的数据通过 DMA 传送到 AP,AP 将加工好的数据通过 DMA 传回主机,频繁的数据传输会占用大量的机时,因此,程序设计时,应尽量减少主机与 AP 之间的数据交换。

### “子程序—循环体—指令流”三级向量化设计方法

根据 AP 机自身的硬件特点,我们可以在程序设计时从不同级别上考虑向量化问题。与巨型向量机不同,AP 没有专门的向量运算指令,而只是提供了一些更为基本的功能,因此,其向量化设计更为灵活、细致,对此,我们分别说明如下。

#### 子程序级

AP 程序一般是作为一个子程序被主机应用程序调用,主机将所需加工的数据传送给 AP,AP 加工好的数据返回给主机。

假设在主机上运行的程序比例为  $x$ ,在 AP 上运行比例则为  $1-x$ ,如果在 AP 上运行的平均速度是主机运行平均速度的  $r$  倍,数据传输开销为  $m$ ,则可以期望整个程序向量化后所达到的加速比为

$$\lambda = \frac{1}{x + \frac{1-x}{r} + m}$$

其中  $r$  取决于 AP 中向量化程序的并行度,理想状态下, $x=0, m=0$ ,则  $\lambda=r$ 。但实际状态下,有两个因素使之难以成立。一是程序运行与外部设备有关,如磁盘、磁带操作,只能由主机执行;二是 AP 自身内存容量有限,AP 只能通过主机访问外存,这样势必增大  $x$  和  $m$ 。因此,我们在程序设计时,必须设法保持较小  $x$  和  $m$ ,以期获得较为理想的加速比  $\lambda$ 。

#### 循环体级

就一程序而言,向量化工作主要集中在内层循环,计算的大部分是反复执行的循环体中的程序段,也就是说,反复计算的部分是消耗 CPU 时间的主要部分。

一般地,一个重复程序段可定义为二元式  $L=(O, T)$  内存位置某个集合  $M$  上的一个映射,  $M$  可能涉及到程序体中的参数,循环构造子  $O$  是  $M$  上的一个谓词,指示  $T$  当前可能的应用,  $L(i)$  表示  $T$  的第  $i$  次应用,即称为第  $i$  次迭代。

程序中的两个循环不是分离的,就是嵌套的,不可能是相交的。设内层两个分离的循环为  $L_1=(O_1, T_1)$  和  $L_2=(O_2, T_2)$ ,如果  $O_1=O_2$ ,且

$$S_o = (\text{In}(L_1(i)) \cup \text{Out}(L_1(i))) \cap (\text{In}(L_2(i))) \neq \emptyset$$

其中  $\text{In}(L(i))$  和  $\text{Out}(L(i))$  表示循环  $L$  在第  $i$  次迭代中使用和生成的内存变量集合,那么我们可在 AP 机向量化程序中将这两个循环合并为  $L=(O_1, T_1+T_2)$ ,由于 AP 机有大量的浮点寄存器作为中间结果的临时存贮单元,因此合并后的循环中访问内存的操作会大大减少。这里要保证  $L_1$  中所用到的  $S_o$  变量的值在进入  $L_2$  之前不能被改变。

对于一般情况,若  $O_1 \cup O_2$ ,我们将两个循环改组成  $(O_1-O_2, T_1)$  和  $(O_2, T_1+T_2)$  的形状。

任何向量化的程序都不能改变相关语句或操作之间的执行顺序,即不能出现使用先于生成的情况,这也是向量化过程中必须遵循的基本原则。

#### 指令流级

在并行机制不发生冲突的前提下,应尽可能保证 AP 机的全速运行,即尽可能在每个周期

都能启动浮点加法和浮点乘法运算。重新安排一个串行程序,使之向量化时,上述两个要求往往会产生矛盾,指令级向量化的优劣直接影响 AP 的运行速度。

下面我们举例说明 AP 机上的程序设计中,如何重新安排串行的标准过程,使之提高速度。

多项式计算的标准过程

$$f = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$$

在机器中通过一系列迭代得到

$$f = a_n$$

$$f = a_{n-1} + xf$$

$$f = a_{n-2} + xf$$

⋮

每步都要用到前一步的输出,每步都包括一个加法和乘法操作,并且每步加法都要用到乘法的结果,在 AP 中完成一个浮点乘法需 3 个周期,浮点加法需 2 个周期,这样每步需 5 个周期。如果我们充分利用 AP 流水线特点,将多项式分解成奇次幂和偶次幂两组,并计算

$$f = f_1 + f_2x$$

其中

$$f_1 = a_n$$

$$f_1 = a_{n-2} + x^2 f_1$$

$$f_1 = a_{n-4} + x^2 f_1$$

⋮

$$f_2 = a_{n-1}$$

$$f_2 = a_{n-3} + x^2 f_2$$

$$f_2 = a_{n-5} + x^2 f_2$$

⋮

这样,虽然增加了若干启动时间,但整个计算速度可以提高一倍左右。

### 并行算法的优化技术

在程序中,当两个或两个以上循环体之间密切(如它们有公共的数据区,或一个循环的结果是另一个循环的初始数据等),就可以考虑将它们合并,以减少对内存的访问次数,同时还能增加程序并行执行的可能性。例如:

```
DO 20 I=1,N
```

```
  C(I)=A(I)+B(I)
```

```
20 CONTINUE
```

```
DO 30 J=6,N
```

```
  C(J)=C(J)+A(J)*B(J)
```

```
30 CONTINUE
```

该程序段中包含有两个循环,循环 20 读出两个数据,写回一个数据,至少需 6 个周期(AP 标准存储器),循环 30 则需 8 个周期,总共至少需要 14 个周期。通过分析,我们不难发现两个循环体之间的蕴含关系,即前者的部分结果  $C(I) (6 \leq I \leq N)$  是后一循环的初始数据,且它们还有公共的输入数据  $A(I)、B(I)$ ,因此,我们可以把它们合并起来,改成如下程序:



```

DO 40 I=1,N
C(I)=A(I)+B(I)
IF(I.GT.5) THEN C(I)=C(I)+A(I)*B(I)
40 CONTINUE

```

改造后的程序段在执行过程中,不仅减少了对中间结果和原始数据的存取,而且对  $A(I) + B(I)$  和  $A(I) * B(I)$  两个操作可同时启动、并行工作,从而提高运行速度。

前已提到,在  $AP$  中,访问内存、计数、寻址、浮点加法、浮点乘法和转移等指令可同时执行,考察一般循环体的计算过程,往往是首先从内存取出操作数,然后进行数据加工,最后将加工结果存入存储器。 $AP$  的并行功能结构使我们可以改造这种串行工作方式,进行重叠的指令流水线设计,即将两条(有时是三条)逻辑指令流错开一定的周期设计在一起,实现并行计算,将串行操作中“取数—运算”两步操作改造成“运算并取下一个数”的同步操作。应当注意的是,必须保证内存访问与算术操作“均匀”分布在计算过程中,避免相互冲突,这种流水线重叠设计方法能大大提高运算速度,其加速比与流水线级数成正比。

## 偏移模块的分块并行算法

### 波动方程偏移的有限差分法

波动方程偏移是根据地震反射原理,通过波动方程地面接收到的反射波场一层层地向下延拓到任何一个深度平面,从而得到地下某深度平面上的反射波的地震波场。

在二维  $(x, z)$  平面上,弹性地震波按纵波波动方程

$$\partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial z^2 = \partial^2 P / v^2 \partial t^2 \quad (1)$$

进行传播,其中  $P(x, y, z)$  为波场函数,  $v$  为介质速度。

由偏微分方程理论可知,从地表观测记录  $P(x, 0, t)$  出发,求解方程(1),即由  $P(x, 0, t)$  通过向地下延拓求地下波场值  $P(x, z, t)$  是一个不适定问题。由于地震记录中包含有随机干扰,这些干扰即使很小,但由于问题的不适定性,可能在波场向下延拓时产生很大畸变,使所得结果完全失去意义,为此,美国斯坦福大学的 Claerbout 提出了一个实际适定性的差分解法,在理论上虽难以证实其适定性,但在实际工作中,它是目前应用得最为广泛和最有效的方法之一。

方程(1)经如下坐标变换

$$x' = x$$

$$\tau = \frac{2}{c} z$$

$$t = T + \frac{2z}{c}$$

可简化成仅适应于上行波的形式

$$\partial^2 P / \partial x'^2 + \frac{4}{v^2} \partial^2 P / \partial \tau^2 + \frac{8}{v^2} \partial^2 P / \partial \tau \partial t = 0 \quad (2)$$

可以证明,当界面倾角较小 ( $< 15^\circ$ ) 时,方程(2)中的  $\partial^2 P / \partial \tau^2$  项可以忽略,由此可得到上行波的近似波动方程为(不妨将  $x'$  仍写为  $x$ ):