

科学计算应用程序探讨*

莫则尧[†] 裴文兵

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100094)

摘要 科学计算应用程序是科学计算研究的成果集成,其研制不同于通常的计算机应用软件.随着科学计算研究的不断深入和高性能计算机的迅猛发展,应用程序越来越依赖于实际应用和高性能计算的交叉融合,迫切需要革新程序的研制思路,发展研制方法.文章简要介绍了科学计算应用程序的主要特征,分析了应用程序面临的主要困难,探讨了研制应用程序的新思路和新方法.

关键词 数值模拟, 科学计算, 应用程序, 高性能计算

Scientific computing application codes

MO Ze-Yao[†] PEI Wen-Bing

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract Scientific computing application codes have integrated the results of scientific computing research. Because of the requirements of specific scientific fields for large scale and highly efficient computing, the development of application codes is very different from that of the usual computer application software. Currently, the development of application codes is becoming more and more dependent on combining both the application and high performance computing. New ideas should be studied and new methods proposed to simplify and speed up the development process. This paper outlines the main characteristics of application codes, analyzes the key problems that need to be solved, and discusses new ideas and methods for their development.

Keywords numerical simulation, scientific computing, application codes, high performance computing

1 引言

文献[1]指出,科学计算包含针对真实客观系统进行物理建模,针对物理模型研制计算方法,针对模型和方法设计算法,以及将模型、方法和算法转变为程序,运用程序在计算机上开展数值模拟,并对模拟结果进行物理分析的全过程.在这个过程中,科学计算应用程序将物理模型、计算方法和算法转变为数值模拟代码,作用是不言而喻的.没有应用程序的科学计算研究只能是空中楼阁.

2 科学计算应用程序的主要特征

我们知道,高性能计算机(以下简称“计算机”)包含硬件和系统软件.硬件指构成计算机的多核微处理器(以下简称处理器核为“核”)、内存、输入/输

出(I/O)、网络等;系统软件指控制硬件的软件,包括操作系统、编译系统、编程环境等.应用软件建立在系统软件之上,是求解实际应用问题的程序代码.

计算机应用软件的内涵广泛.实际应用不同,应用软件的特征也不同.科学计算应用程序是一类特殊的计算机应用软件,它服务于科学计算,以再现、预测和发现真实客观系统运行规律和演化特征的数值模拟为主要目标.文献[1]对科学计算的内涵和作用做了简要介绍.与其他计算机应用软件相比,科学计算应用程序有以下三个主要特征,现分别介绍如下:

2.1 科学计算应用程序的领域专业性很强

* 国家自然科学基金(重大研究计划)(批准号:90718029)和国家重点基础研究发展计划(批准号:2005CB321702)资助项目
2009-07-05 收到初稿,2009-07-13 收到修改稿

[†] 通讯联系人, Email:zeyao_mo@iapcm.ac.cn

随着科学技术的进步,科学研究越来越精细,学科分支越来越多.在众多的学科分支中,例如物理、力学、化学、大气、海洋、地质、天体、生物等,科学计算各具特色,专业性很强.这种要求来自两个方面:第一是物理建模,第二是计算方法.物理建模是根据真实客观系统的运行规律和演化特性,结合发展需求,提出数学物理方程并给出物理参数;计算方法则是结合问题的几何构型和物理参数,离散数学物理方程,使数值解达到精度需求.如果数学物理方程没有抓住真实客观系统的主要特征,或者计算方法不适用于数学物理方程,数值解就可能没有置信度.数值模拟只有经过物理建模和计算方法的反复迭代,经过原理验证和实践确认之后,才能逐步形成置信度.在不同的学科领域,这个过程需要该领域专业人员的深入工作,需要其他相关学科人员的充分合作和融合,领域专业性很强.对于计算机科学研究人员而言,由于缺少数学物理方程和计算方法的专业训练,在这些领域研制应用程序的难度比其他计算机应用软件大得多.

以激光聚变数值模拟中的多介质流体力学计算^[2]为例.为了研制应用程序,需要研制者理解流体力学 Euler 方程,熟悉 Lagrange 或 Euler 数值方法^[3],掌握介质界面处理方法,离散计算区域并定义物理量.整个过程中,专业性很强,计算机专业人员很难直接介入.

2.2 科学计算应用程序需要面向大规模和高效率计算

在真实客观系统研究的初始阶段,数值模拟以定性认识为主要目标,物理模型和计算方法比较简单,对算法和数据结构的要求也不高,代码量较少.一个人,既可以进行物理建模,又可以设计计算方法,还可以研制程序.在这个阶段,应用程序大多由物理和数学人员编写.习惯上,我们称这些程序为遗产型程序.

随着原理认识逐步由定性走向定量,数值模拟对置信度的要求越来越高,科学计算就越来越重要.对比遗产型程序,科学计算应用程序的主要差别在于:前者要求相对较低,在物理建模和计算方法方面不够精细,程序中含有一些经验因子,数值模拟和物理试验之间形成了强烈的依赖关系;而后者要求程序建立在科学的基础之上,去掉经验因子,实现数值模拟的高科学置信度,从而对物理建模和计算方法提出了更高的要求.为了这个挑战,必须开展大规模

计算.所谓大规模计算,就是充分利用计算机的资源,包括处理器(CPU)、内存、I/O 等,高分辨率地求解数学物理方程.文献[1]通过简单的例子,充分说明了大规模计算的必要性,这里不再论述.

目前,单个 CPU 核的计算、存储和 I/O 能力是有限的,有限的能力只能支持有限规模的计算.为了增加问题的计算规模,需要增加总的 CPU 核数.通常是根据数值模拟的分辨率确定计算规模,从而确定内存容量和至少需要使用的 CPU 核数.如果程序运行时间很长,甚至超出计算机稳定运行的极限,高效率计算研究就非常重要了.一方面,它可以提升单核效率¹⁾和多核并行效率²⁾;另一方面,它可以增加核数.如果单核效率提升 1 倍,并行效率提升 1 倍,则执行时间就可以缩短到原来的 1/4;如果核数再增加到 100 倍,并行效率大于 40%,则执行时间可以进一步缩短 40 倍.

很多因素可以影响应用程序的效率,其中数据结构、并行算法和编程质量是最重要的.我们以稠密矩阵乘为例来简要说明.请读者编写一个程序,运行程序并记录执行时间;然后,调用计算机内置的 BLAS 库函数 DGEMM^[4]来编写另一个程序,也同样记录执行时间;通过比较就会发现,函数 DGEMM 竟然比自己编写的程序快 10 倍以上,而且,这个差距随着矩阵规模的扩大而扩大.更进一步,如果统计浮点运算速度,自己编写的程序的单核效率只有几个百分点,而 DGEMM 却超过 60%.什么原因导致了如此大的差距呢?其实很简单,就是自编程序没有结合微处理器体系结构做针对性设计,而 DGEMM 适应了这种结构.这个例子还只是串行计算.在百万亿次计算机上,除了串行计算,还要处理好数千上万核之间的并行计算,难度更大.处理不好,应用程序可能慢百倍以上.

2.3 科学计算应用程序需要实际应用和计算机的多学科交叉融合

科学计算对大规模计算提出了迫切需求,而大

- 1) 单核效率是指程序单核串行执行的浮点运算速度与单核峰值浮点速度的比值.例如,以 Intel Xeon 3.0GHz 四核微处理器为例,单核峰值速度为每秒 120 亿次,程序速度为每秒 6 亿次,则浮点效率等于 5%
- 2) 并行效率是指并行执行时间被缩短的倍数除以核增加到的倍数.例如,使用 200 核,并行执行时间为 100 小时,使用 2000 核,并行执行时间为 20 小时,时间缩短了 5 倍,核数增加到 10 倍,并行效率等于 50%

规模计算又牵引了计算机的迅猛发展^[5,6]. 进入 21 世纪以来, 计算机峰值性能已经提升了 3 个量级, 达到每秒千万亿次^[7], CPU 核数接近 10 万, 体系结构日趋复杂.

图 1 给出了计算机的典型体系结构. 计算机由数百上千个结点组成, 结点通过互连网络连接, 内存局限在结点内部; 每个结点包含数个 CPU, CPU 共享结点内存; 每个 CPU 包含多核, 所有核共享快速缓存(Cache); 每个核包含多个浮点运算部件, 拥有独立的寄存器和局部 Cache. 为了不断提升峰值性能, 结点数、结点内 CPU 数、CPU 内核数在不断增加. 2010 年前后, 国产千万亿次计算机的 CPU 核数将接近 10 万. 与此同时, 为了弥补峰值性能与访存性能之间的差距, Cache 层数越来越多. 越靠近 CPU 的共享内存, Cache 的容量就越大, 价格也越便宜, 但速度越慢. 在矩阵乘的例子中, 自编程序总是访问共享内存, 而 DGEMM 却充分利用了 Cache, 二者的执行速度自然差距很大.

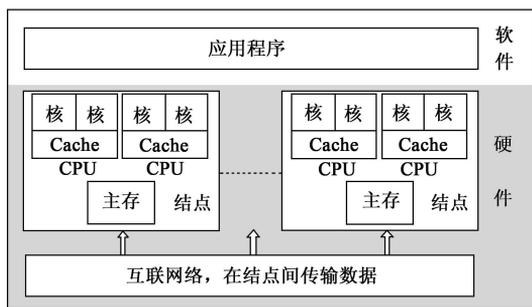


图 1 计算机体系结构示意图

科学计算应用程序为了实现高效率计算, 需要充分考虑计算机的体系结构. 然而, 物理建模和计算方法专业人员要清楚哪个环节对程序性能有重要影响并具体实现到程序中, 难度很大. 反之, 计算机专业人员要充分理解物理模型和计算方法并提出数据结构和并行算法, 难度也相当大. 于是容易出现两个极端: 一端是科学计算研究人员, 他们以自己研究的物理模型和计算方法为中心来编写应用程序, 认为计算机的发展应该适应程序; 另一端是计算机研制人员, 他们单方面提升硬件性能, 认为应用程序应该适应计算机. 两个极端导致实际应用和计算机相互脱节, 脱节越严重, 对科学计算和计算机的持续发展就越不利.

为了避免两个极端的畸形发展, 必须实现应用领域和计算机的多学科交叉融合. 可是, 如何融合呢? 要解决好这个问题, 应该培养一批多学科交叉

融合的研究人员^[8], 他们既对物理模型和计算方法有深入理解, 又对计算机体系结构有深刻把握. 这样的想法是非常正确的, 然而, 实现起来却相当困难. 笔者认为, 适应于多学科交叉融合的研究思路和人才培养模式还没有成熟, 需要积极探索.

3 研制科学计算应用程序的传统思路

“串程序并行化”是目前我国普遍采用的研制思路. 根据该思路, 科学计算应用程序可以按如下过程研制: 初步设计物理模型和计算方法, 研制串程序; 针对物理模型和计算方法, 提出并行算法和并行实现技术, 应用这些算法和技术, 并行化串程序; 并行程序投入实际应用并得到进一步发展. 这种思路从原来的遗产程序出发, 是科学计算应用程序发展的必经之路. 但是, 随着实际应用的深入和计算机的发展, 这种思路的不足也逐步显现出来.

第一, 应用程序的效率低, 扩展能力弱. 并行程序的数据结构源自串程序, 较少考虑微处理器的多级存储和多核体系结构, 执行速度通常只有单核峰值性能的几个百分点; 并行算法和并行实现通常不能适应实际应用中的动态负载不平衡和复杂非规则数据通信, 难以扩展到数百上千核; 数值算法计算量的增长速度远大于问题规模和核数的增长速度, 使得问题规模较难扩展. 当计算机核数提升到数千上万时, 应用程序无法做相应的扩展, 即使做了扩展, 也可能由于数值算法的计算量增长过快而无法实现大规模计算.

第二, 应用程序的模块化和标准化能力弱. 串行计算时, 物理建模比较简单, 计算方法可以做相应简化, 串程序可以由单个或几个人研制完成; 大规模计算时, 物理建模和计算方法日趋精细, 时空跨度大, 数据结构、并行算法和并行实现日趋复杂, 高效并行应用程序需要多学科专业人员相互协同才能完成, 而程序的模块化和标准化能力是实现多人协同的基础. 遗产程序侧重于物理建模和计算方法, 较少考虑多学科专业人员, 尤其是计算机专业人员的协同开发, 而并行化将进一步削弱程序的模块化功能.

第三, 不利于保护交叉学科研究的知识产权. 对一个从事关键技术攻关多于科学研究的群体而言, 如果知识产权得不到保护, 研究潜力就很难激发. 在传统思路中, 串程序的知识产权属于应用领域, 计算机的知识产权属于计算机研制者, 并行程序返回实际应用并进一步发展后, 知识产权仍然属于应用

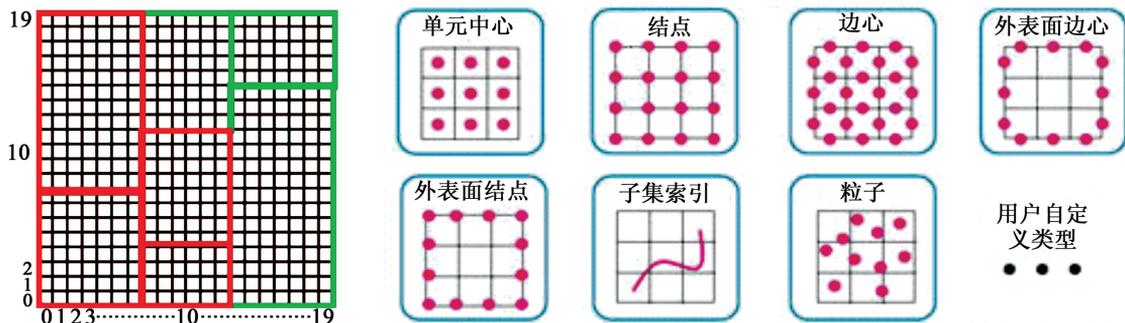


图2 结构网格、网格块及单元几何位置的示意图

领域, 经过艰苦的程序并行化工作后, 交叉学科专业人员发现自己没有知识产权, 势必对这样的工作产生厌烦情绪. 不解决这个问题, 就很难培养一支高水平的、稳定的人才队伍.

综上所述, 随着实际应用和计算机的发展, “串行程序并行化”逐渐不能适应, 需要革新研制思路, 发展研制方法, 更好地促进多学科交叉融合, 为相应的人才培养奠定基础.

4 研制科学计算应用程序的新思路和新方法探讨

科学计算应用领域的专业性强, 物理模型和计算方法各具特色. 科学计算应用程序需要服务于这些特色, 但是, 它们也具有共性. 数学物理方程定义在计算区域上, 计算区域需要被离散成网格, 在网格上可以定义变量并存储变量值, 变量值由计算方法和数值算法修改, 修改得合适, 就可以正确地求解数学物理方程. 站在离散网格的角度, 如果网格可以标准化, 变量和变量值的定义就可以标准化, 则应用程序的数据结构就可以规范化, 数值算法、实现技术和计算方法就可以形成可重用的软件模块, 可以在不同应用程序中共享. 只要形成共享的工作模式, 应用程序的研制难度就可以降低, 研制周期就可以缩短.

例如, 在物理、力学、化学、大气、海洋、环境、天文等应用领域, 结构网格是科学计算中最常用的离散网格. 在结构网格之上, 可以形成统一形式的数据结构. 图2左端给出了一个 20×20 的逻辑结构网格. 为了管理网格, 将其分成了7个网格片. 每个网格片包含一个矩形 box 索引的网格单元区域. 变量可以定义在单元的中心 (cell)、结点 (node)、边心 (face) 等几何位置, 或者定义在网格片的外表面边心 (outerface) 或外表面结点 (outernode), 粒子 (par-

ticles) 可以散乱分布在单元上, 等等. 基于这些数据结构, 可以研制数值算法和计算方法的共享软件模块, 可以支持个性化的物理模型和计算方法的研究.

针对科学计算应用程序的共性, 图3给出了比较理想的多学科交叉融合模式. 在计算机硬件平台之上, 由数学和计算机科学的交叉学科研究人员建立并行应用支撑软件框架. 框架面向实际应用, 封装共性数据结构, 屏蔽并行算法和并行实现, 集成共性数值算法和计算方法, 提供模块化和标准化接口规范. 基于接口规范, 应用领域可以专心于物理模型和计算方法的研究, 只需研制相应的串行软件模块, 就可以形成高效应用程序. 当计算机体系结构发生变化, 只需改进和发展支撑软件框架, 无需修改应用程序; 当数值模拟对象发生变化时, 只需修改应用程序, 无需修改框架. 这样, 遵循学科的层次分解规律, 实际应用人员、框架人员和计算机研制人员可以各司其职, 在软件层面实现交叉融合. 基于框架, 应用领域可以通过重用数据结构和软件模块来实现高效率计算, 通过模块化和标准化接口规范来实现多人协同开发, 降低应用程序的研制难度, 缩短程序的研制周期. 并且, 随着实际应用的不断深入, 框架集成

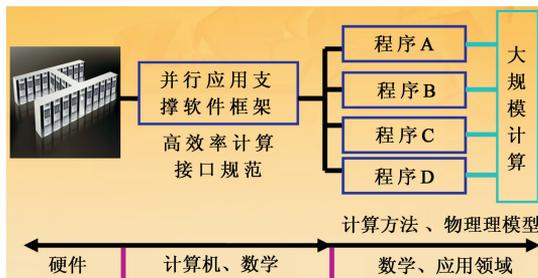


图3 研制科学计算应用程序的多学科交叉融合模式

的科研成果将越来越丰富, 接口规范可以逐步形成行业标准.

为了使图3的研究思路落到实处, 需要在实际

应用领域对应用程序做层次化软件体系结构分析,需要抽取共性和分离个性,研制具体可行的框架。

4.1 科学计算应用程序的层次化软件体系结构

既然科学计算应用程序是一类特殊的计算机应用软件,就应该遵循应用软件的规律。我们知道,程序是数据结构和算法的集合^[9],如果数据结构可以统一,则计算方法和算法就可以分解和整合。在给定的数据结构之上,如果计算方法适应多种不同物理建模形成的数学物理方程,算法适应多种不同类型的物理模型和计算方法,则这些方法和算法具有共性。例如,求解偏微分方程的隐式时间离散格式是具有共性的计算方法^[10],而求解隐式离散格式形成的稀疏(非)线性代数方程组的迭代解法是具有共性的数值算法^[11]。

在具有共性数据结构的科学计算应用领域,应用程序可以分解为3个层次:计算机科学层、数值共性层和数值个性层。其中计算机科学层包含适应于该类科学计算领域中应用程序的数据结构和并行算法以及并行实现技术;数值共性层包含具有共性的数值算法和计算方法;数值个性层包含依赖于实际应用问题的物理模型和计算方法以及数值算法。数值共性层建立在计算机科学层之上,数值个性层建立在计算机科学层和数值共性层之上。

对于单个科学计算应用程序而言,这种层次化分解的价值可能有限。但是,对于科学计算应用领域而言,这种分解意义重大。计算机科学层集成了具有共性的数据结构和并行算法,独立于专业性很强的物理建模和计算方法,可以由计算机人员结合计算机体系结构进行针对性设计。数值共性层基于计算机科学层,集成具有共性的数值算法和计算方法,可以由数学人员和计算机人员相互融合来实现。数值共性层和计算机科学层提供模块化和标准化的接口规范,支撑数值个性层研制应用程序。由于计算机科学层和数值共性层实现了高效率计算,因此,应用程序可以自动获得高效率。

4.2 科学计算并行应用支撑软件框架的研究内容

根据科学计算应用程序的层次化分解,并行应用支撑软件框架可以包含3层:计算机科学层、数值共性层和应用接口层。这里,笔者对每层给出一个大概的描述。

计算机科学层包含具有共性的数据结构、算法、实现技术、接口规范等。数据结构既要适应物理建模

和计算方法,又要适应微处理器体系结构。算法是指提升单核计算效率和多核并行效率的各种算法,涉及数据通信、负载平衡、数值计算、非数值计算、并行I/O、网络管理和操作等;实现技术是指针对数据结构和算法研制软件模块的程序设计技术,涉及内存管理、并行编程、性能优化、浮点异常处理、浮点算术运算精度等多个方面;接口规范是由软件模块的输入输出接口函数给出。

数值共性层建立在计算机科学层之上,集成具有共性的数值算法和计算方法,研制相应的软件模块,提供接口规范。通常情况下,数值算法涉及计算区域几何描述、网格生成、矩阵向量运算、稀疏(非)线性代数方程组解法、特征值解法、快速 Fourier 变换等;计算方法涉及数学物理方程的时间和空间离散格式、偏微分方程快速解法等;接口规范是由软件模块的输入输出接口函数来定义。

应用接口层建立在计算机科学层和数值共性层之上,可以提供模块化和标准化的接口规范,支撑实际应用领域专业人员编程,实现个性化的物理模型、计算方法和数值算法。接口规范建立在数据结构之上,是科学计算多学科交叉融合的界面,需要实际应用、数学和计算机科学三方面经过长期磨合才能确定。

计算机科学层、数值共性层和应用接口层的研究内容不是静态的,而是随着实际应用和高性能计算机的发展而动态变化的。例如,个性的计算方法经过实际应用的验证和确认并得到普遍应用后,就可以沉淀到数值共性层;数值共性层的数值算法和计算方法可以进一步分解和合并,将共性的非数值算法和实现技术沉淀到计算机科学层。

4.3 一个框架示例:JASMIN 框架

以激光聚变数值模拟应用^[2]为牵引,北京应用物理与计算数学研究所从2004年开始,研制了并行自适应结构网格应用支撑软件框架 JASMIN(<http://www.iapcm.ac.cn/jasmin>)^[12]。该框架适应高性能科学与工程计算广泛采用的(自适应)结构网格,它可以提供如下功能:

(1)支持应用领域专家在无需了解高性能并行计算和共性数值算法细节的前提下,在个人电脑上,通过编写串行的数值计算子程序,实现物理模型和计算方法及与问题相关的数值算法,就可以高效地使用大规模并行计算机数百至数千个处理器核的高效并行应用程序;

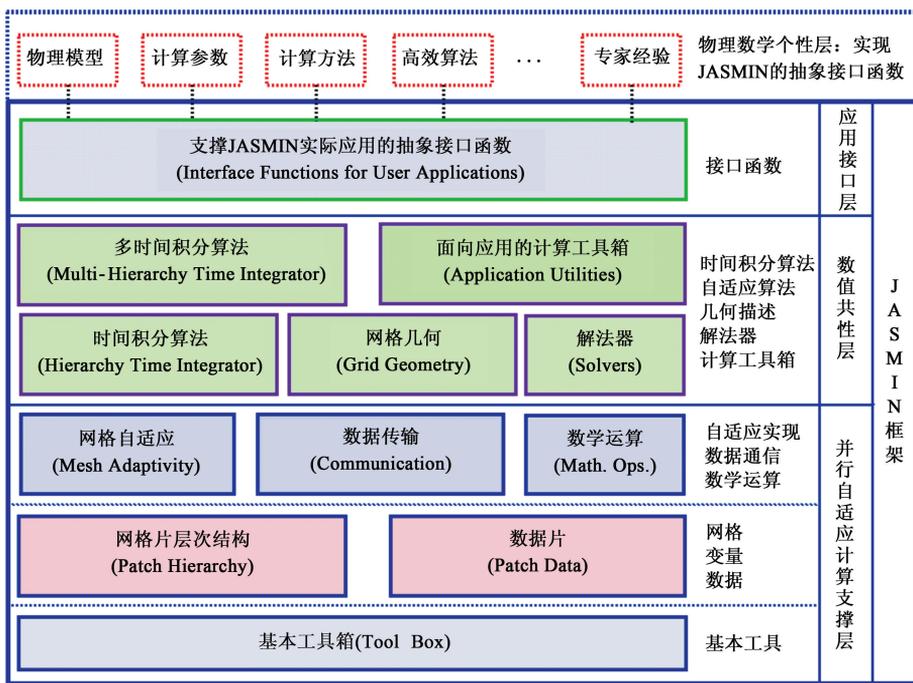


图 4 JASMIN 框架 1.5 版体系结构示意图

(2)支持程序的模块化和标准化,通过重复使用软件模块和多人并行开发软件模块,大幅度地降低了程序的研制难度,缩短了程序的研制周期。

2009年3月,JASMIN框架推出1.5版^[12](<http://www.iapcm.ac.cn/jasmin>).该版本基于消息传递并行编程环境MPI,包含50多万行C++/C/Fortran语句,可以安装运行于个人电脑和高性能计算机.图4给出了JASMIN框架1.5版的体系结构,它包含并行自适应计算支撑层、数值共性层和应用接口层.支撑层提供数据结构(“网格片层次结构—网格层—网格片—数据片”)、网格管理和操作、网格自适应、动态负载平衡、数据通信、内存管理、并行I/O、重启等功能;数值共性层建立在支撑层之上,集成成熟的计算方法和数值算法,包含计算区域几何描述方法、网格生成方法、大变形结构网格重分和物理量重映算法、(非)线性稀疏代数方程组解法器、偏微分方程组快速解法器、时间离散格式和时间积分算法、数学运算、多层快速多极子算法等;应用接口层在前面两层之上,提供模块化和标准化接口规范,支撑应用领域专家编程,实现物理模型、物理参数、计算方法和专家经验,研制应用程序。

目前,JASMIN框架1.5版已经成功地应用于流体力学、辐射流体力学、弹塑性流体力学、辐射和中子输运、分子动力学、位错动力学、粒子模拟(PIC)和计算电磁学以及多物理过程的耦合计算

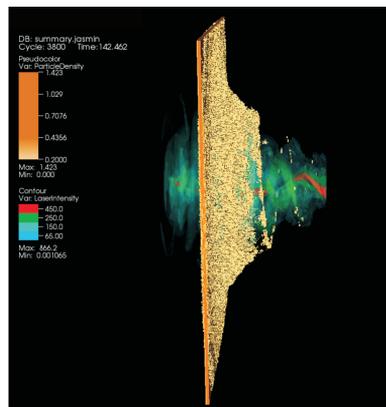


图 5 三维激光等离子体相互作用模拟示例

中.基于JASMIN框架,已经研制完成了10多个高效并行应用程序,在实际应用中正在发挥重要作用。

例如,三维激光等离子体相互作用程序LAR-ED-P开展了“高能离子束产生及在稠密等离子体中传播”、“激光偏振态对高能超短电子束产生及在锥状离子体中传播的影响”、“激光大尺度等离子体中非线性过程的长时间(几十ps)二维动力学模拟的可能性”等方面的大规模数值模拟.图5给出密度为100nc、厚度为100nm的固体平板靶,超强短脉冲圆偏振激光从左端入射,清晰地展示了靶被击穿后的圆偏振激光强度分布和高能粒子的螺旋状分布情况!该结果由512个CPU核计算6个多小时获得,其中平板靶的粒子总数为10亿,仅占2%的计算区

域,但却集中了 98% 以上的计算量,负载极端不平衡.可见,JASMIN 框架可以很好地支持该类实际应用.

通过 JASMIN 框架,我们在激光聚变数值模拟领域发展了科学计算应用程序的研制方法,革新了研制思路,验证了这条技术途径是切实可行的.

5 结束语

随着科学计算研究的不断深入和国产高性能计算机的迅猛发展,科学计算应用程序的研制面临计算效率低、模块化和标准化能力差的困难.为了攻克这些难题,需要革新研制思路,发展研制方法.在科学计算应用领域,依据学科的层次化分解规律,在计算机硬件平台之上建立并行应用支撑软件框架,屏蔽高效率计算,制定模块化和标准化规范,支持并行应用程序的研发,是可行的技术途径.为此,需要培养更多高水平的多学科交叉专业人员,研制适应不同应用领域的支撑软件框架,促进自主知识产权应用程序的研制,推动我国科学计算的进步.

参 考 文 献

[1] 朱少平.物理,2009,38(8):545[Zhu S P. Wuli (Physics), 2009,38(8):545(in Chinese)]

[2] 裴文兵,朱少平.物理,2009,38(8):559[Pei W B, Zhu S P. Wuli(Physics), 2009,38(8):559 (in Chinese)]

[3] 李德元,徐国荣等.二维非定常流体力学数值方法.北京:科学出版社,1987[Li D Y, Xu G R *et al.* Numerical methods for two-dimensional non-steady hydrodynamics. Beijing: Science Press, 1987(in Chinese)]

[4] Dongarra J, Luszczek P, Petitet A. Concurrency: Practice and Experience, 2003, 15(9): 803

[5] Bader D A 著,都志辉译.面向千万亿次计算的算法和应用.北京:清华大学出版社,2008[(Bader D A. Du Z H trans. Petascale Computing: Algorithms and Applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2008(in Chinese)]

[6] Dongarra J, Foster I 等编著,莫则尧,陈军,曹小林等译.并行计算综论.北京:电子工业出版社,2005 [Dongarra J, Foster I *et al.* Mo Y M, Chen J, Cao X L *et al.* trans. Sourcebook of Parallel Computing. Beijing: Electron Engineering Press, 2005(in Chinese)]

[7] 国际高性能计算机 TOP 500 排名表,见 <http://www.top500.org>

[8] 贺贤土.我国高性能计算的现状、面临的挑战与发展.香山科学会议:我国高性能计算的发展与对策.北京,2008年10月7日—9日

[9] Knut D E. The Art of Computer Programming. New York: Pearson Education Inc., 2002

[10] Stoer J, Bulirsch R. Introduction to Numerical Analysis. Second Edition, Spinger-Verlag, 1992

[11] Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems, 2th edition, SIAM, Philadelphia, 2003

[12] 莫则尧,张爱清主编.并行自适应结构网格应用支撑软件框架 JASMIN(1.5 版)用户指南.北京应用物理与计算数学研究所技术报告:T09-JMJL-01, 2009



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校,科研机构,试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询.我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等.



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜.
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝,镀银,镀金,及介质反射镜.直径 5mm—200mm.
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶.直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头.
- 国产滤光片:规格为直径 5mm—200mm.(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片.
- 进口光学滤光片:长波通滤光片/短波通滤光片;波长:400—1000nm;窄带干涉滤光片

地址:北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座# 306 室 电话:010—88096218/88096217 传真:010—88096216

网址:www.goldway.com.cn E-mail:kevinchen@goldway.com.cn,shinan@goldway.com.cn,zengan@goldway.com.cn

联系人:陈镛先生,施楠小姐,曾安小姐,郑海龙先生