

水利高性能计算的进展

姜弘道

(河海大学 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对水利信息化对精细模拟与高性能运算提出的愈来愈高的要求 ,在简单介绍高性能计算的硬件、软件环境及其在水利上的几个应用实例后 ,着重介绍了并行有限元法、并行边界元法的一些进展以及网格技术的最新进展。指出从网络到网格是高性能计算发展的最新方向 ,应以网格平台支持、促进水利信息化进程。

关键词 :数值模拟 ;高性能计算 ;并行有限元法 ;并行边界元法 ;网格计算

中图分类号 :TP301.4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2006)02-0070-06

Progress in high-performance computing in water science//JIANG Hong-dao(Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In consideration of the increasing demands for refined simulation and high-performance computing (HPC) in water science , an introduction was given to the hardware and software for HPC and their applications in water science , with emphasis placed on the progresses in parallel finite element method and the parallel boundary element method as well as the latest development of grid computing . It is pointed out that grid computing is the new trend of HPC development , and it should be adopted to promote the further development of water science .

Key words : numerical simulation ; high-performance computing ; parallel finite element method ; parallel boundary element method ; grid computing

人类认识世界的历史告诉我们 ,观察与实验以及理论分析是人类认识世界的两个重要手段。从 20 世纪下半叶起 ,数值模拟与仿真已逐渐成为人类认识世界的新的的重要手段 ,它主要用来解决不可能进行实验的问题或者进行实验代价太大的问题。水利上如洪水预报、水库群优化调度、大坝优化设计、流域 (区域)水资源统一管理与优化配置等等均属于这两类问题。数值模拟与仿真的基本过程如图 1 所示。由于计算机硬、软件的飞速发展 ,大大推动了数值模拟与仿真水平的不断提高 ,现已成为解决经济、社会、科学、工程等几乎所有领域重大问题的主要手段。

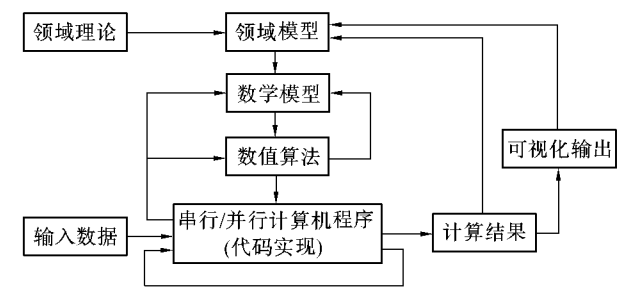


图 1 数值模拟与仿真的基本过程

1 水利呼唤高性能计算

在水利现代化的进程中 ,数字流域的建设已受到高度重视。数学模型模拟是“数字黄河”工程建设的重要内容之一。文献 [1] 介绍了基于 GIS 的黄河下游二维水沙数学模型的构建。该模型包括水流计算构件、泥沙计算构件及可视化构件 ,并用有限体积法求解浅水流动的守恒型控制方程。对于从花园口至利津长 660 km 的河段 ,计算区域面积达 4 000 km² ,按平均单元边长 50 m 计算 ,网格量超过 200 万个 ,即使采用显式计算 ,单机计算下游洪水的演化过程所需时间远大于天然洪水的实际传播时间。可见 ,从洪水预报的角度来讲 ,单机计算是没有意义的。

20 世纪下半叶 ,我国大坝建设取得了巨大成就。到 2002 年底 ,全世界 15 m 以上的大坝共有 49 700 座 ,中国有 25 800 座 ,占 51.9%^[2]。这些大坝在防洪、灌溉、发电、供水以及航运等各方面发挥了巨大的作用。但在高坝建设中 ,全世界已建成 30 座 200 m 以上的大坝 ,我国仅有 1 座坝高 240 m 的二滩拱坝。我国适合建高坝的坝址很多 ,高坝建设方兴

作者简介 :姜弘道(1940—)男 ,浙江湖州人 ,教授 ,从事复杂结构分析方法及应用研究。E-mail :jdjiang@hhu.edu.cn

未艾,大有作为。高坝结构的力学分析具有计算规模大、非线性明显、不确定性的影响因素多、对安全性要求高、施工周期长等种种特点,还存在多种耦合问题、多种需要反复计算的问题,因而在数值模拟和仿真分析中要求做到精细模拟与高速运算。以河海大学土木工程学院工程力学系进行的拱坝及地下洞群三维有限元计算为例,结构离散化的自由度总数由 20 世纪 70 年代的几千自由度,发展到 80 年代几万自由度,90 年代的几十万自由度,目前已经要求有百万个以上的自由度。例如,在龙滩地下厂房的三维有限元计算中^[3],为了比较精细地模拟地质构造、锚杆、锚索与洞室形状,用了 21 万个结点,单机每个工况的弹性计算直接解超过 20 h,迫切需要大大提高运算速度,也就是说迫切需要高性能计算。

还有更多的例子可以说明水利对高性能计算的强烈需求。

2 高性能计算的硬件和软件环境

2.1 并行计算机的硬件环境

在科学与工程计算领域,高性能计算一般被理解为并行计算,特指使用并行计算机来减少解决单个计算问题所需的时间^[4]。支持并行计算的多处理器计算机系统主要分为两种,即集中式多处理器(亦称对称多处理器系统 SMP)以及多计算机系统,它们的主要区别是共享内存或是分布内存,见图 2~4。

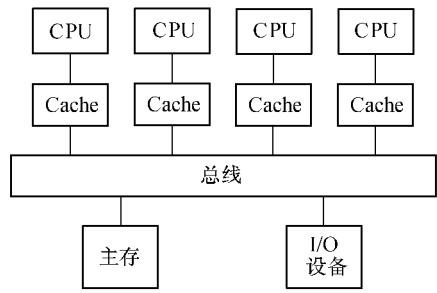


图2 集中式多处理器的体系结构(共享内存)

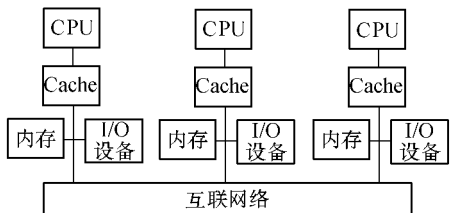


图3 分布式多处理器的体系结构(分布内存)

目前在全球超级电脑 Top500 排名第 1 位的是美国 IBM 公司的 Blue Gene/L,有 65 536 个处理器,理论峰值速度达 183.5 TFlops,实测峰值速度达 136.8 TFlops。曙光 4000 A 是我国自主制造的速度最快的超级计算机,有 2 560 个 2.2 GHz AMD Opteron CPU,理论峰值速度达 11 TFlops,实测峰值速度达

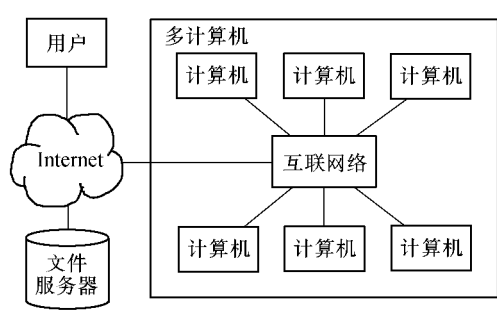


图4 对称计算机的体系结构(分布内存)

8 TFlops,目前列第 31 位。由于 CPU 技术与高速网络技术的进步以及并程序计设计环境的开发,计算机集群系统发展很快。集群是指利用高速网络将一组商用高性能微机、工作站或服务器按某种结构连接起来,在并行计算环境支持下统一调度的并行处理系统。集群的结点是通用的商品化系统,造价以及升级维护的成本均较低,并具有灵活的可扩充性,能有效保护以前的投资,个别结点故障也不影响整个系统的运行,因而特别适合基层单位较大规模应用的需要。由美国弗吉尼亚理工学院大学生们研制的高性能计算机集群由 1 100 个 2.0 GHz Apple G5 处理器组成,实测最大速度达 10 TFlops,在 2003 年 11 月 Top500 排名中列第 3 位。由于集群的优点,投资不多就可搭建一个具有较高性能的集群^[5]。如河海大学土木工程学院工程力学系的集群由 1 个管理结点与 16 个计算结点组成,每个结点均采用 HP Proliant DL140 服务器,CPU 为 Inter 至强处理器 2.4 GHz,内存 2 GB,266 MHz,硬盘 80 GB,网络为 3COM 公司的千兆网络交换机,操作系统为 Red Hat Linux 9.0。该集群的理论峰值速度为 768 亿 Flops,用 Linpack 实测峰值速度达 455.5 亿 Flops。

2.2 并行计算机的编程模式

并行计算机的编程模式主要有以下 2 种^[4]:
 ①共享地址空间模式。以 Open MP 为代表,利用添加并行化指令到串行程序中,由编译器完成自动并行化,适用于 SMP 系统。
 ②消息传递模式。以 MPI 为代表,通过开发一个子程序库扩展串行编程语言,实现并行计算。消息传递模式包括 200 多个函数,常用的有大约 30 个,实际上只需要使用其中 6 个最基本的函数,就能编写一个完整的 MPI 程序。适用于各种并行计算机,尤其是集群。PVM(parallel virtual machine)是消息传递模式的一个变种。例如用公式 $\pi = 4 \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx = \sum_{i=1}^N \frac{4}{N \left[1 + \left(\frac{i-0.5}{N} \right)^2 \right]}$ 计

算 π 值的串行程序及 MPI 并行程序分别如下:
 串行程序

$$h = 1.0/N \quad \pi = 0;$$

```

for( i = 1 ; i <= N ; i ++ ){temp =( i - 0.5 ) * h ;
    pi = pi + 4*( 1 + temp * temp );}
pi = pi * h ;
printf pi ;

```

并行程序

```

MPI_Init( argc ,argv );
MPI_Comm_size( );
MPI_Comm_rank( );
h = 1.0/N ;
for( i = myid + 1 ; i <= N ;
    i += numprocs ){mypi = ... }
MPI_Reduce( mypi ,pi ,1... );
printf pi ;
MPI_Finalize( );

```

其中以 MPI 开头的各句均是 MPI 子程序库的调用。

3 水利高性能计算的进展

3.1 淮河中上游群库联合优化调度的并行实现^[6]

淮河正阳关以上干支流相互影响较大,大型水库和行蓄洪区等工程由上而下错落分布,是一个复杂的水库-河道系统。按照最大削峰准则以及串联水库串行求解、并联水库并行调度编制淮河中上游九大水库联合优化调度方案,并在曙光 1000 并行计算机上计算,1 个 CPU 需要 5 691.1 s,6 个 CPU 需要 2 104.6 s,加速比为 2.704,效率为 45.1%。

3.2 黄河下游二维水沙数学模型并行计算^[7]

采用区域分解方法,将整个计算区域的河长分解成几个子区域,分别在几个 CPU 上运行,并采取基于结点的网格划分来方便地实现负载平衡。经测试,将夹河滩至高村河段划分为 39 166 个单元,模拟第三次调水调沙期间小浪底水库下泄人造洪峰的实际过程,用曙光 4000A 系统的 8 个 CPU 计算,效率可达 80%。

3.3 蒙特卡罗法的并行计算

蒙特卡罗法是一个通过统计试验来解决问题的算法。并行蒙特卡罗法因其并行效率极高而得到广泛应用,一个为大多数人所接受的论断是:有一半的超级计算机的计算能力都用来进行蒙特卡罗计算。

蒙特卡罗法在水文水资源中得到广泛应用^[8],并已比较成熟,如在水文频率计算中可用来研究参数估计方法的优劣;在多元回归分析计算中,对得到的回归方程进行预报效果可靠性和稳定性的统计检验等等。

例如在用统计试验方法作参数估计精度评价时,计算所需时间与所取随机样本的组数成正比,利

用计算机集群进行并行计算可大大节省计算时间。表 1、表 2 是对于 P-Ⅲ 型总体线型用适线法作参数估计时所需的时间(河海大学工程力学系集群)。

表 1 单 CPU 不同统计试验次数所需计算时间

统计试验次数	所需时间/s	统计试验次数	所需时间/s
1 000	16.29	5 000	75.24
2 000	30.34	10 000	149.86

表 2 统计试验为 10 000 次时多 CPU 所需计算时间

CPU 数目	所需时间/s	CPU 数目	所需时间/s
1	140.98	4	37.90
2	69.79		

随着 GB 50199—90《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》等设计规范的陆续修编、发布,蒙特卡罗法在研究各类工程结构的可靠度上应用越来越广泛,如边坡可靠度分析^[9]、水工混凝土可靠度分析^[10]、抗拔桩可靠度分析^[11]、桥梁状态评估^[12]等等。文献[13]从岩体介质的不均匀性、不连续性和材料参数分布的分散性和随机性出发,首先依据大量试验数据,确定其材料参数(如抗压强度)的分布特征,如属于正态分布的 Weibull 分布,进而建立该材料参数的分布密度函数及其积分函数。在用有限元法分析非均质材料弹塑性断裂过程时,首先在(0,1)区间上产生一组均匀分布的随机数序列{ r_j }(j 为单元数),由{ r_j }可得一组材料参数序列{ σ^i_j }。这组参数既具有随机性,又服从以上的统计分布规律。用这组数据进行弹塑性有限元分析,并考虑破裂单元的材料参数被重新赋值使其降低,数值分析的结果与实验结果比较一致。

3.4 并行有限元法与并行边界元法

有限元法已成为结构分析中最常用、最有效的方法,采用并行有限元法在并行计算机上进行超大规模的计算目前已有较快的发展^[14]。并行有限元法的首要问题是并行性分析。在有限元法的计算步骤中,单元分析和单元贡献的集成以及系统方程组的求解所需的计算工作量最大,应尽量并行化。根据有限元法的特点,对于单元的运算可采用子结构的方法实现并行计算,对于系统方程组的求解则可采用适合于超大规模方程组高性能求解的方法,如预条件共轭梯度法(PCG)。文献[15]介绍了采用主从式编程模式的并行子结构预条件共轭梯度法,此方法对各子结构需形成总体劲度矩阵,在进行凝聚消去各子结构内点自由度后用预条件共轭梯度法求解各子结构界面的方程。文献[16]介绍的子结构多波前并行算法则对于每个子结构用波前法进行求解,可以不必形成各个子结构的总体劲度矩阵。文献[17]介绍的 EBE-PCG 有限元解法,实质上是将各

个单元取为子结构,每个处理器处理一部分单元,优点是便于分布式计算时实现负载平衡,而不涉及复杂的区域分解和有限元离散化网格的拓扑结构。针对某拱坝的坝体-地基系统用 17 980 个单元、20 879 个结点进行离散,用此方法进行并行计算,其计算时间和并行效率如表 3 所示。

表 3 拱坝-地基系统有限元并行计算效率

CPU 数	计算时间/s	并行计算效率/%	CPU 数	计算时间/s	并行计算效率/%
1	1 399	100	8	334	59
2	806	92	12	277	49
4	532	73	16	242	43

边界元法由于只需对边界离散化,因而对于某些问题的求解相比有限元法具有明显的优越性。边界元法的计算步骤中,主要是通过对结点、对单元和对高斯积分点的三重循环来形成整体方程组,并且方程组的系数矩阵为不对称满阵。在形成方程组的三重循环中,各结点的循环是互相独立的,很适合分布式并行处理。文献[18]介绍了结点超行卷帘分布的边界元方程组分布存储及形成方案,并用并行约当-高斯消去法求解,以避免传统三角分解法中回代计算时结点机之间的数据通信。文献[19]介绍了用广义最小余量法(GMRES)求解边界元方程组,不仅将方法实现并行化,而且用预条件技术与重正交技术加以改进,提高了收敛速度。对某三维弹性问题,用 448 个 8 结点四边形边界元对其边界离散化,共 1 346 个结点,用并行约当-高斯消去法和用 GMRES 法计算的加速比如表 4 所示。计算结果表明,单 CPU 与多 CPU 计算的结果完全一致。

表 4 并行边界元法计算效率

CPU 数目	求解时间/s		加速比	
	并行约当-高斯消去法	GMRES 法	并行约当-高斯消去法	GMRES 法
1	526.293	187.036		
2	268.437	101.115	1.961	1.822
4	144.211	56.286	3.650	3.274
8	97.780	46.040	5.382	4.002
16	64.373		8.176	

表 6 开挖并行计算效率

结点机个数	第 1 步开挖			第 2 步开挖			第 3 步开挖			整个开挖过程		
	计算时间/s	加速比	并行效率/%	计算时间/s	加速比	并行效率/%	计算时间/s	加速比	并行效率/%	计算时间/s	加速比	并行效率/%
1	3 155.0			7 488.9			12 973.5			23 617.4		
2	1 277.3	2.47	123.6	3 299.1	2.27	113.5	5 978.6	2.17	108.3	10 555.0	2.24	112.0
3	841.3	3.75	124.9	2 392.6	3.13	104.3	4 616.9	2.81	93.5	7 850.8	3.01	100.3
4	623.5	5.06	126.4	1 891.1	3.96	99.0	3 793.4	3.42	85.4	6 308.0	3.74	93.4

对某地下厂房洞室群进行三维弹性边界元分析,典型截面见图 5。分 3 步开挖的边界元数与边界结点数如表 5 所示。各步开挖并行计算所需时间及并行效率如表 6 所示(在 4 台微机组成的集群上计算)。

整个开挖过程并行计算所需时间及并行效率如表 6 所示。从表中可见出现了并行效率超过 100% 的情况。

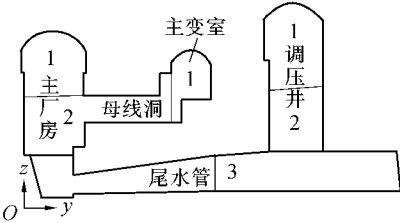


图 5 洞室群典型截面示意图

表 5 地下洞室开挖边界元离散数

开挖步骤	边界元数	边界结点数	内点数
第 1 步	344	1 024	1 007
第 2 步	516	1 556	377
第 3 步	634	1 908	0

4 高性能计算的发展新方向

4.1 需求与现实

我国正在经历信息化快速发展的进程。各行各业都在大规模建设网络基础设施,大量采购计算机硬件与软件,大力开发应用系统,传统业务正在向信息化、网络化的方向发展。水利以“国家防汛指挥系统”以及“数字流域”建设为代表,信息化进程日新月异,对高性能计算的要求愈来愈高也愈来愈迫切。但是客观现实存在着资源浪费现象严重,应用系统之间不能互联互通,分布、异构、多样、动态变化的网络环境使应用系统复杂程度高、开发困难,高运行成本难以承受等问题,严重阻碍了信息化进程^①。这些问题的解决除了需要运行机制的变革之外,也有赖于新技术的发展。网格就是应对这些问题而出现的新技术,它支持资源共享、协同工作,将成为新一代信息基础设施,也是高性能计算发展的新方向。

①钱德沛. 中国国家网络进展(PPT 文件). 西安交通大学, 2004.

4.2 网络的定义和本质

“ 网格是构筑在互联网上的一组新兴技术 ,它将高速互联网、计算机、大型数据库、传感器、远程设备等融为一体 ,为科技人员和普通老百姓提供更多的资源、功能和服务。互联网主要为人们提供电子邮件、网页浏览等通讯功能 ,而网格的功能则更多、更强 ,它能让人们共享计算、存储和其他资源 [20] 。

网格是建造分布式科学计算环境的一种一体化的集成方法 ,这一环境包括计算、数据管理、科学仪器以及人类的协作。网格的功能是在中间件的支持和管理下完成的 ,因而也可称网格就是方便资源管理、有效支持广域分布的、多领域的科学与工程问题解决的中间件系统。网格所提供的是一种无缝的、集成的计算与协作环境 ,它可以提供以前不能得到的各种服务与特有功能。

共享与协同是网格的本质 [21] 。共享是将网络上海量、自治、分布、异构的资源进行有效组织 ,以服务的方式为网格用户提供统一透明的访问机制。协同是指资源可以相互交互、理解、协作 ,以期共同完成复杂的网格应用。网格所提供的服务是完全透明的 ,用户不需要知道服务提供者在哪里 ,如何提供服务等问题。网格计算就是在动态变化的 ,拥有多个部门或者团体的复杂虚拟组织内 ,灵活、安全地协同资源共享与问题求解。网格计算使得计算模式从 20 世纪七八十年代的多一人一机以及八九十年代的一人一机发展到 90 年代以来的一人多机。网格计算不仅能减少费用支出、提高工作效率 ,更能提高工作质量 ,能做一些过去根本办不到的事情。

4.3 网格的架构

以河海大学校园网格为例介绍网格的架构 [22] ,如图 6 所示。校本部的计算资源分为两个虚拟组

织 ,每个虚拟组织内部用一个资源代理统一对内部资源进行管理。然后通过校园内部的中心服务器在网格一层对各个虚拟组织进行统一的资源管理和调度 ,而且可以灵活地通过 Internet 或者 Cernet 将其他虚拟组织计算资源进行集成。经过中心服务器的统一管理 ,在校园网上的任意一台微机(工作站)都可以对以前很难使用到的计算机资源进行方便的访问和操作 ,并且根据用户的需要分别用 Web 服务器、Shell 服务器和应用服务器提供 Web 界面、Shell 界面和 Web Service 这 3 种访问方式。此架构极大地提高了系统的灵活性 ,可以使在家办公的教师或出差在外的教师通过 Internet/Cernet 安全地访问校园内的计算资源 ,提高了教职员工的科研和工作能力。

河海大学校园网格从层次结构上采取了 3 层结构 :资源层、网格服务层和客户端服务层(图 7)。资源层主要在底层给网格提供基本的硬件支持 ,资源

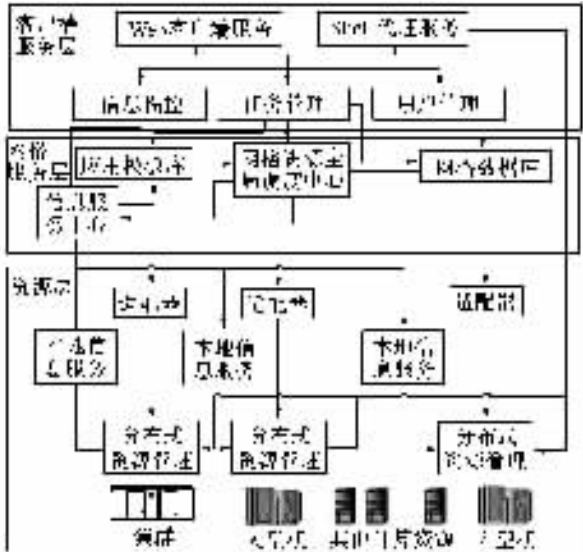


图 7 可扩展河海大学校园网格整体架构

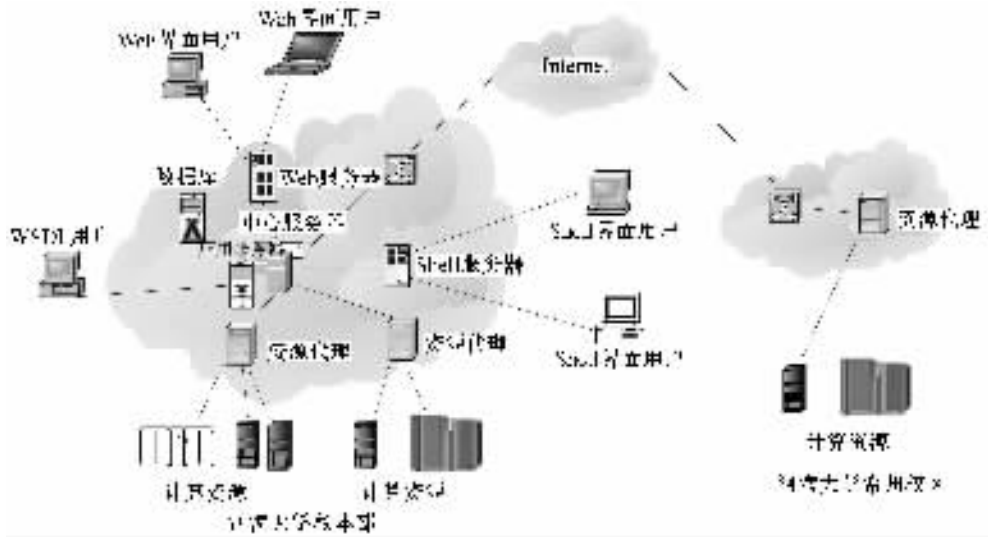


图 6 河海大学校园网格拓扑结构示意图

可以是大型机、存储器以及集群等各种资源设备,也可以是各种应用软件。网络服务层主要是在网络一层对底层各种不同的分布式资源进行调度管理、执行信息收集等功能,能够对用户隐藏底层硬件资源的异构特性。客户端服务层主要是对最终用户提供服务,比如用户的身份验证、用户任务提交和任务监控等服务,并且能够根据用户的需要透明地调用底层资源。河海大学校园网络是基于 WSRF 架构的一个新的具有高度可扩展性的校园网格平台,主要具有如下特点:高度的可扩展性,统一以作业的形式调用底层的计算资源;支持 Web、远程 Shell 以及 Web Service 客户端方式调用资源;努力在系统中实现预构件。

4.4 网格的应用

我国正在建设五大网格,分别是 China National Grid,国家“863”计划支持;China Science Grid,国家自然科学基金支持;China Semantic Grid,国家“973”计划支持;China Grid,国家教育部支持;Shanghai Grid,上海市府支持。中国国家网格目前的应用项目有地质调查网格、数字林业网格、气象网格、生物网格、科学数据网格等;中国教育科研网格目前的应用项目有计算流体力学网格、海量信息处理网格、大学课程在线网格、图像处理网格、生物信息学网格等;上海网格目前的应用项目有医学图像处理网格、交通信息网格等。

河海大学校园网络的第一个应用是建立高性能计算网格平台^[23],以先进的计算能力支撑学校学科建设的基础研究与应用研究,支持广大研究生在较高的起点上开展创新研究,使校园网格成为教学科研人员 and 研究生与高性能计算之间的桥梁,从而有力促进相关学科研究水平与研究生培养水平的提高。在这个平台上,以发布服务方式将特定的计算包装成服务发布在网格上提供计算能力,也可由用户通过传送自己的文件到代理再到大型机或集群上运行可执行程序,还可直接利用大型机或集群的计算资源与软件资源运行特定的应用软件。河海大学校园网格的进一步应用,将包括数据网格的应用,如多媒体课件视频网格、数字水利博物馆网格、信息网格的应用,如全国水利学科网格。河海大学校园网格还将加入中国教育科研网格,并为水利信息化提供网格技术服务。

5 结 论

水利信息化进程对高性能计算提出愈来愈高、愈来愈迫切的要求。目前以单机运行为主的计算模式已很不适应形势发展的需要;尽管计算机的性能

已经提高了数十亿倍,但是由于管理、经费、技术等各种原因,水利高性能计算的研究与应用还不多见,迫切需要大力推进。

微机(工作站)集群是较易进行高性能计算的硬件平台,应大力推广应用。高性能计算的软件除了需将串行程序改为并行程序外,在算法设计、负载平衡等方面也需进行研究,应大力加强这方面的研究与培训。

计算机等资源的闲置情况不容忽视,既有不够用也有用不到的问题。除了在管理上采取措施外,网格技术是解决这个问题的有效途径。网格虚拟出性能空前的超级计算机,成为下一代 Internet 的发展方向,也是高性能计算的发展方向。为了更快、更有效地推进水利信息化,应以网格精神大力开展网格研究,以网格平台支持、促进水利信息化进程。

参考文献:

- [1] 朱庆平,芮孝芳,杨明,等.基于 GIS 的黄河下游二维水沙数学模型水沙构件设计[J].人民黄河,2005,27(3):44-46.
- [2] 中国大坝委员会.世界大坝统计数据[J].中国三峡建设,2005(2/3):24.
- [3] 苏超,陈国荣,姜弘道.洞室群围岩支护参数与施工程序研究[R].南京:河海大学,2003.
- [4] MICHAEL J Q. MPI 与 Open MP 并行程序设计[M].北京:清华大学出版社,2004:34-40.
- [5] 张磊,姜弘道,潘海琳.计算机集群的搭建、测试与应用[J].水利水电科技进展,2006,26(2):55-69.
- [6] 毛睿,黄刘生,徐大杰,等.淮河中上游群库联合优化调度算法及并行实现[J].小型微型计算机系统,2000,21(6):603-607.
- [7] 余欣,杨明,王敏,等.基于 MPI 的黄河下游二维水沙数学模型并行计算研究[J].人民黄河,2005,27(3):49-53.
- [8] 陈元芳.统计试验方法及应用[M].哈尔滨:黑龙江人民出版社,2000.
- [9] 许文达.基于蒙特卡罗-有限元法的边坡可靠度分析[J].福州大学学报,2004,32(1):73-77.
- [10] 杨志刚,徐镇凯,汪春文.一种改进的蒙特卡罗法在水工混凝土可靠度分析中的应用[J].南昌大学学报,2004,26(2):56-69.
- [11] 阙云,刘明维,熊国伟.基于蒙特卡罗法的抗拔桩可靠度指标分析[J].重庆交通学院学报,2004,23(1):69-72.
- [12] 郭彤,李爱群,卞朝东.蒙特卡罗数值模拟技术在桥梁状态评估中的应用[J].特种结构,2004,21(4):44-47.
- [13] 宋力,肖丽萍,林韵梅.岩石弹塑性破裂过程的数值模拟研究[J].力学学报,2005,37(4):516-521.
- [14] 姜弘道,秦忠国.水工结构分析中的并行计算[C]//姚振汉.力学与工程.北京:清华大学出版社,1999.

(下转第 86 页)

for minimum weight using genetic algorithms[J]. Finite Elements in Analysis and Design 2001 37 :447-465.

[45] 唐文艳 ,顾元宪 ,李云鹏 . 遗传算法求解可行域分离的结构优化问题[J]. 力学学报 2003 35(3) :361-366.

[46] 唐文艳 ,顾元宪 ,郭旭 . 求解具有奇异性的桁架拓扑优化的遗传算法[J]. 计算力学学报 2004 21(2) :191-196.

[47] KAVEH A ,KALATJARI V. Topology optimization of trusses using genetic algorithm , force method and graph theory[J]. Int J Numer Meth Engng 2003 58 :771-791.

[48] RYOO J ,HAJELA P. Handling variable string lengths in GA-based structural topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization , 2004 , 26(5) :318-325.

[49] TOPPING B H V ,KHAN A I ,De BARROS L J P. Topological design of truss structures using simulated annealing[J]. Structural Engineering Review ,1996 8(2/3) :301-314.

[50] 蔡文学 ,程耿东 . 桁架结构拓扑优化设计的模拟退火算法[J]. 华南理工大学学报 ,1998 26(9) :78-84.

[51] OĞUZHAN H ,FUAT E. Layout optimization of trusses using simulated annealing[J]. Advances in Engineering Softwaer , 2002 33 :681-696.

[52] 朱朝艳 ,刘斌 ,李艺 ,等 . 离散变量桁架结构拓扑优化的杂交算法[J]. 东北大学学报 2004 25(8) :800-803.

[53] 朱朝艳 ,刘斌 ,张延年 ,等 . 复合形遗传算法在离散变量

桁架结构拓扑优化设计中的应用[J]. 四川大学学报 , 2004 36(5) :6-10.

[54] RULE W K. Offshore structural topology synthesis by optimal growth[C]//ASME Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE : Offshore Technology. New York :Academic Press ,1993 :339-343.

[55] 秦义校 ,唐风 . 桁架式臂架布局优化设计[J]. 港口装卸 , 1996(5) :1-5.

[56] Xu L ,MIN H ,SCHUSTER R M. Optimization design of cold formed steel residential roof trusses[C]//American Iron and Steel Institute. Fifteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures :Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction. MO :University of Missouri-Rolla Press 2000 393-410.

[57] ZHOU M ,SHYY Y K ,THOMAS H L. Checkerboard and minimum member size control in topology optimization[J]. Struct Multidisc Optim 2001 21(2) :152-158.

[58] 狄杰建 ,段宝岩 ,仇原鹰 ,等 . 周边式桁架可展开天线的形面调整[J]. 宇航学报 2004 25(5) :583-586.

[59] 吕大刚 ,王光远 . 结构智能优化设计 :一个新的研究方向[J]. 哈尔滨建筑大学学报 ,1999 33(4) :7-12.

(收稿日期 2004-12-16 编辑 骆超)

(上接第 39 页)

频率 ,对于尾水管涡带引起的压力脉动采样频率一般取 200 Hz 左右 ;而对于转轮与导叶之间的测点及蜗壳进口处的测点 ,建议其采样频率至少应大于 1 000 Hz。

d. 压力脉动试验特别是验收试验时 ,应根据电站的水头变幅 ,推算出水轮机实际运行的空化系数 ,对于重要的运行工况 ,增加不同空化系数下的压力脉动试验。这不仅能为原型机组空化安全系数的选取提供更为科学、更切合实际的依据 ,也可对机组重要部件、建筑物等固有频率的计算提供有用的参考 ,以避免共振的发生。

参考文献 :

[1] 田锋社 . 混流式水轮机尾水管压力脉动验收考核浅析[J]. 水利水电技术 ,1999(10) :34-41.

[2] 徐珍懋 . 混流式水轮机高水头大负荷区域振动的分析[J]. 水电站机电技术 2003(4) :27-30.

[3] 覃延春 ,罗兴昧 ,郑小波 . 基于 CFD 技术的水轮机性能预估[J]. 水利水电科技进展 2004 24(7) :21-23.

(收稿日期 2004-12-30 编辑 骆超)

(上接第 75 页)

[15] 余天堂 ,姜弘道 . 基于 PVM 的网络并行子结构共轭梯度法[J]. 工程力学 2001 18(5) :29-35.

[16] 余天堂 ,姜弘道 . 多波前并行处理的弹塑性子结构并行有限元[J]. 计算力学学报 ,1999 16(4) :493-496.

[17] 刘耀儒 ,周维垣 ,杨强 ,等 . 三维有限元并行计算及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报 ,2005 24(14) :2434-2438.

[18] 张健飞 ,姜弘道 . 大型边界元方程组的并行直接分块求解算法[J]. 应用力学学报 2003 20(4) :129-132.

[19] 张健飞 ,姜弘道 . 适合求解边界元法方程组的 GMRES 算法的实用化和并行化研究[J]. 计算力学学报 ,2004 21(5) :620-624.

[20] FOSTER I ,KESELMAN C. 网格计算[M]. 2 版 . 金海 ,袁平鹏 ,石柯 ,译 . 北京 :电子工业出版社 2004.

[21] 都志辉 ,陈渝 ,刘鹏 . 网格计算[M]. 北京 :清华大学出版社 2002.

[22] 河海大学网格及高性能计算研究所 ,解放军理工大学网络研究中心 . 河海校园网格概要设计报告[R]. 南京 :河海大学 2005.

[23] 河海大学网格及高性能计算研究所 . 河海校园网格建设任务书[R]. 南京 :河海大学 2005.

(收稿日期 2005-11-07 编辑 骆超)