

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 35



集群 MPI 环境下有限元 结构分析并行计算研究

- 作者：付朝江
- 专业：工程力学
- 导师：张 武



001289211

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 35



集群 MPI 环境下有限元 结构分析并行计算研究

- 作者：付朝江
- 专业：工程力学
- 导师：张武



2006年上海大学博士学位论文

第一卷

上海大学出版社出版

贵阳学院图书馆



GYXY1289211

11585100

2006年上海大学博士学位论文第1辑

图书在版编目(CIP)数据

2006年上海大学博士学位论文.第1辑/博士学位论文编辑部编.—上海:上海大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-81118-511-9

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第162521号



2006年上海大学博士学位论文
——第1辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 264.75 字数 7 376 千

2009年12月第1版 2009年12月第1次印刷

印数:1—400

ISBN 978-7-81118-511-9/G·513 定价:1000.00元(50册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

上海大学

The Research on Parallel Computation of Finite Element Structural Analysis Based on MPI Cluster

答辩委员会名单:

主任: 林慧生 教授, 复旦大学力学与工程科学系 200433

Candidate: Fu Chao-jiang

委员: 有晓飞 教授, 上海大学机械工程学院 200092

Major: Engineering Mechanics

程玉良 教授, 上海大学机械工程学院 200072

Supervisor: Zhang Wu

王德高 教授, 上海交通大学船舶与建筑学院 200240

刘宗田 教授, 上海大学计算机学院 200072

导师: 杨武 教授, 上海大学 200072

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

- 主任: **张慧生** 教授,复旦大学力学与工程科学系 200433
- 委员: **贺鹏飞** 教授,同济大学航天与力学学院 200092
- 程玉民** 教授,上海大学力学所 200072
- 王德禹** 教授,上海交通大学船舶与建筑学院 200240
- 刘宗田** 教授,上海大学计算机学院 200072
- 导师: **张 武** 教授,上海大学 200072

学大博士

评阅人名单:

- | | | |
|------------|---------------|--------|
| 陈耀松 | 教授, 北京大学力学系 | 100871 |
| 程玉民 | 教授, 上海大学力学所 | 200072 |
| 李开泰 | 教授, 西安交通大学理学院 | 710049 |

评议人名单:

- | | | |
|------------|------------------|--------|
| 张慧生 | 教授, 复旦大学力学与工程科学系 | 200433 |
| 武际可 | 教授, 北京大学力学系 | 100871 |
| 何银年 | 教授, 西安交通大学理学院 | 710049 |
| 郭铁信 | 教授, 厦门大学数学科学学院 | 361005 |

答辩委员会对论文的评语

付朝江的博士学位论文“集群 MPI 环境下有限元结构分析并行计算研究”选题是目前大规模科学和工程计算研究的前沿领域,其研究成果具有重要的理论意义和工程应用价值。

论文的创新之处是:

(1) 研究了稀疏矩阵-向量乘法的负载平衡算法,提出了一个快速负载平衡与有效的消息传递技术相结合的方法,来缓解计算节点间的通信。研究了预条件共轭梯度法的并行化,并对系统矩阵的储存方式进行了研究;

(2) 提出了粗细网格与预条件共轭梯度法相结合的有限元并行算法,研究了基于单元区域分解的共轭梯度并行算法,并用该方法对坝体结构进行了求解,对其并行性能进行了分析;

(3) 以子结构模态综合分析为基础,提出了一种求解大型结构特征值问题的并行解法;

(4) 提出一种基于 Newmark 隐式时间积分的非线性动力分析的并行算法;

(5) 研究一种基于 MPI 集群环境下的弹塑性区域分解有限元并行算法。

论文难度和工作量大,具有创新性,表明作者具有坚实的数学和力学基础以及宽广的专业知识,具有较强的独立科

研能力。

论文条理清晰,写作流畅,推导正确,计算结果可靠,是一篇优秀的博士学位论文。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会投票表决,全票(五票)通过付朝江同学的博士学位论文答辩,并建议授予付朝江同学博士学位。

答辩委员会主席: **张慧生**

2006 年 4 月 15 日

摘 要

网络并行计算是当前国内外并行计算领域中最引人注目的前沿课题之一,有限元法是当今用于结构分析问题的有效方法.将并行计算技术引入结构有限元分析,可以增大结构分析的规模,提高分析的速度,从而促进有限元在大型结构工程中的应用.本文结合上海市教委重点科研基金项目开展了网络机群并行计算环境下的结构有限元并行算法及其实现的研究,并应用于实际结构分析.

本文在基于 MPI 集群环境下,所做工作的主要内容如下:

(1) 利用工作站构建了网络机群并行计算环境,阐述了并行计算的基本概念,介绍了 MPI 编程方法.

(2) 考虑在工作站机群上实现大型稀疏矩阵和向量乘的负载均衡.提出了一个快速负载均衡和有效的消息传递技术相结合的方法,来缓解计算和节点间通信,并且,通过 I/O 延迟隐藏和整体负载均衡使 I/O 开销能有效地分摊.预处理共轭梯度法 (PCGM) 是求解线性方程组的有效迭代方法.本文对预处理共轭梯度并行算法进行研究.对存储方式进行详细分析.编程中采用了稀疏矩阵向量相乘的优化技术.数值结果表明设计的并行算法具有良好的加速比和并行效率.

(3) 提出了粗细网格与预处理共轭梯度法结合的并行有限元算法.从多重网格刚度矩阵推导出有效的预处理子.实现了对矩形网格的线弹性力学问题的并行求解,对其并行性能进行

详细讨论. 计算结果表明该算法具有良好的并行加速比和效率, 是一种有效的并行算法.

(4) 将采用区域分解技术的并行有限元方法应用于工作站机群的分布式并行环境. 提出了基于单元区域分解的共轭梯度并行算法, 对坝体结构进行求解, 对其并行性能进行分析.

(5) 以子结构模态综合分析为基础, 提出一种求解大型结构特征值问题的并行解法. 采用子结构模态综合算法, 结构特征模态采用子空间迭代方法并行求解. 这种子空间迭代法的子结构并行计算的实施是利用子结构的刚度阵和质量阵而不必完全组集系统刚度阵和质量阵求解综合系统的特征值问题. 数值结果表明这种求解大型结构特征值问题的并行算法是可行有效的.

(6) 针对大规模结构非线性瞬态动力分析非常耗时, 提出一种采用 Newmark 隐式时间积分的非线性动力分析的并行算法. 该算法采用无条件稳定的 Newmark-b 方法(平均加速技术)进行时间积分, 并结合区域分裂技术进行分析. 它不同于已有的采用非重叠区域的并行算法, 而是采用重叠区域的并行算法. 对给定结构有限元分析的质量、阻尼、刚度矩阵进行分裂可推出重叠区域分裂算法的计算公式. 为改善每一步的求解, 采用预估和校正子方案. 数值算例验证了算法的性能, 计算结果表明该算法优于非重叠区域分裂算法.

(7) 研究一种基于 MPI 集群环境下的弹塑性区域分解并行有限元算法. 提出了相应的并行求解策略. 提出了采用三阶和四阶的 Runge-Kutta 方法对应力-应变关系进行积分的算法. 积分过程中自动调整子步大小来控制积分过程中的误差. 研制

了采用最小残余平滑法的子结构预处理共轭梯度并行求解算法。

(8) 分析了平面钢闸门的工作特点,研究和建立了平面钢闸门空间组合的有限元计算模型.采用循环分解技术实现了并行计算。

关键词 网络环境, Message Passing Interface (MPI), 工作站机群, 分布式并行计算, 多重网格, 有限元法, 区域分解, 结构分析, 特征值, Newmark 算法

Network parallel computing is one of the most attractive forward position subjects for parallel computing in recent. Introduced into the structure finite element analysis to multiply the size of problem to be solved, accelerate the analysis and facilitate the large-scale application in structural engineering. In combination with the key project of Shanghai Educational Committee, parallel algorithms for FEM under distributed networked workstation cluster parallel environment are studied and implemented in this dissertation and applied to analysis of steel gate structure.

Based on the networked workstation cluster parallel environment of MPI, the main contents of this dissertation are as follows:

(1) A networked workstation cluster parallel computing environment is set up. The basic concepts of parallel computing are described. MPI programming is presented.

(2) The load-balanced multiplication of a large sparse matrix with vector on workstation cluster is considered. A method that combines fast load balancing with efficient message-passing techniques to alleviate computation and inter-

Abstract

Network parallel computing is one of the most attractive forward position subjects for parallel computing in recent. The finite element method (FEM) is a very effective method used for structure analysis nowadays. The technology of parallel computing is introduced into the structure finite element analysis to multiply the size of problem to be solved, accelerate the analysis and facilitate the large-scale application in structural engineering. In combination with the key project of Shanghai Educational Committee, parallel algorithms for FEM under distributed networked workstation cluster parallel environment are studied and implemented in this dissertation and applied to analysis of steel gate structure.

Based on the networked workstation cluster parallel environment of MPI, the main contents of this dissertation are as follows:

- (1) A networked workstation cluster parallel computing environment is set up. The basic concepts of parallel computing are described. MPI programming is presented.
- (2) The load-balanced multiplication of a large sparse matrix with vector on workstation cluster is considered. A method that combines fast load balancing with efficient message-passing techniques to alleviate computation and inter-

node communications is presented. Moreover, I/O overhead can be efficiently amortized through I/O latency hiding and overall load balancing. The preconditioned conjugate gradient method (PCGM) is an efficient iterative method used to solve the finite element systems of equations with symmetric positive definite system matrices. The algorithm of PCGM is parallelized. The storage scheme is analyzed in detail. Optimization techniques for the sparse matrix vector multiplication are adopted in programming. The experiment result shows that the designed parallel algorithm has high speedup and good efficiency on the high performance workstation cluster.

(3) A parallel preconditioned conjugate gradient iterative algorithm for finite element problems with coarse-mesh/fine-mesh formulation is presented. An efficient preconditioner is derived from the multigrid stiffness matrix. Example of solution of simple linear elastic problem on rectangular grids is presented and parallel performance is discussed. The results show higher speedup and efficiency. The algorithm is efficient for parallel computing.

(4) The parallel finite element method using domain decomposition technique is adopted to the distributed parallel environment of workstation cluster. The parallel algorithm is presented for solving the conjugate gradient method with element based domain decomposition. Model of dam structural analysis problem is solved. The parallel performance is analyzed.

(5) On the basis of mode synthesis analysis, parallel algorithm of solving large-scale structural eigenproblem is presented. The eigenmode of the structure is solved using subspace iterative parallel method. The substructure subspace iterative method is implemented using the stiffness matrix and mass matrix of the substructures without assembling the stiffness and mass matrix of whole structure. The numerical results show that this parallel algorithm is effective for large-scale structure eigenproblem.

(6) A Newmark implicit parallel algorithm for nonlinear transient dynamic finite element analysis of large structures is presented because a lot of time is taken in its sequential algorithm. An unconditionally stable Newmark-b method (average acceleration technique) is employed for time integration. The proposed parallel algorithm is devised using domain decomposition techniques. However, unlike most of the existing parallel algorithms which are basically derived using nonoverlapped domains, the proposed algorithm uses overlapped domains. The parallel overlapped domain decomposition algorithm is formulated by splitting the mass, damping and stiffness matrices arises out of finite element discretization of a given structure. A predictor-corrector scheme is formulated for iteratively improving the solution in each step. Numerical example is implemented to validate as well as to evaluate the performance of the proposed parallel algorithm. Comparison is made with the conventional nonoverlapped domain decomposition algorithms. Numerical

studies indicate that the proposed algorithm is superior in performance to the conventional domain decomposition algorithms.

(7) An elastic-plastic parallel element finite method based on domain decomposition is studied, and its parallel strategies are proposed. An algorithm for integrating stress-strain relation based on the third and the fourth order Runge-Kutta method is presented. This substepping scheme controls the errors in the integration process by adjusting the substep size automatically. A parallel substructure preconditioned conjugate gradient algorithm combined with minimal residual Smoothing method is developed.

(8) The work characteristic of plane steel gate is analyzed. The spatial finite element model of plane steel gate is studied and set up, and its parallel computing is implemented by using loop-unroolling technique.

Key words network environment, MPI, workstation cluster, distributed parallel computing, multigrid, finite element method, domain decomposition, structure analysis, eigenvalue, Newmark algorithm

目 录

第一章 绪论	1
1.1 论文研究的背景	1
1.2 论文研究的意义	3
1.3 并行有限元研究现状	4
1.4 存在的不足	18
1.5 本文所做的工作	18
1.6 本章小结	19
第二章 基于 MPI 的网络并行计算	20
2.1 并行计算概述	20
2.2 网络并行计算	23
2.3 本文建立的工作站机群	31
2.4 MPI 并行编程	31
2.5 基于 MPI 并行编程设计	34
2.6 本章小结	38
第三章 有限元稀疏方程组并行求解分析	39
3.1 稀疏矩阵向量乘的负载平衡和通信优化	39
3.2 有限元线性方程组并行求解	45
3.3 本章小结	52
第四章 基于粗细网格的有限元并行算法	54
4.1 引言	54

4.2	粗-细网格的有限元法	55
4.3	并行预处理共轭梯度法	58
4.4	预处理	60
4.5	数值算例	61
4.6	本章小结	63
第五章 区域分解并行有限元法		64
5.1	引言	64
5.2	有限元区域分解算法	65
5.3	数值算例	73
5.4	性能分析	74
5.5	本章小结	76
第六章 结构动力模态分析的有限元并行分析		78
6.1	引言	78
6.2	大型结构子结构模态分析	79
6.3	并行解法	83
6.4	数值算例	84
6.5	本章小结	87
第七章 非线性动力有限元隐式并行算法		88
7.1	引言	88
7.2	Newmark 时间步算法	89
7.3	基于重叠区域分裂的并行隐式算法	91
7.4	并行实现	94
7.5	算例及分析	96
7.6	本章小结	99