

文章编号:1000-582X(2005)12-0006-03

复杂结构动态特性的并行分布求解策略*

杨为, 陈小安, 刘欣

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要:以液压挖掘机工作装置为研究对象,提出了一种复杂机械结构动态特性的并行分布求解策略,用高性能计算并行编程技术,使计算与通信过程最大可能地重叠,克服了细粒度并行过程中通信频繁、通讯延迟所带来的效率低的困难,为进行系统级机械产品的广义优化设计提供了有效的途径。

关键词:特征值问题;并行算法;高性能并行编程技术;液压挖掘机;工作装置

中图分类号:TU621

文献标识码:A

随着科学技术的发展,国内外市场对机械设备质量的要求愈来愈高,而产品的质量又在很大程度上取决于产品的设计,因此须对机械产品进行面向全系统、全过程、全性能的优化设计,在设计过程中对机械产品性能进行全面的分析,结合目标函数进行优化设计,才能使产品的综合质量最优,其中对机械产品进行动态性能分析是一个重要环节^[1-2]。然而,对于大型特征值问题,其刚度阵 $[K]$ 和质量阵 $[M]$ 为高阶,虽然可利用其稀疏和带状性来部分克服计算工作量和存储量上所遇到的困难,但对于有近上十万个自由度的复杂机械结构,会影响动态性能求解的进程。此外,对零部件进行优化的效果与系统级的优化效果有一定的差距,因此从系统级优化效果角度来讲需寻求一种有效的方式来克服对复杂机械进行动态特性求解所带来的困难。针对上述存在的问题,以液压挖掘机工作装置为研究对象,笔者提出了复杂机械结构的静、动态特性分布并行的求解策略,可有效地提高机械结构动态特性的分析效率,适合于机械产品广义优化设计平台上进行优化设计的需求,有着重要的理论意义和实用价值。

1 模态综合法

模态综合法是求解复杂机械结构动态特性的一种有效方法,其主要优点在于可通过解算若干小的特征值问题来替代对大型特征值问题的直接求解。这种子结构间处理的相对独立性给工程人员的分工协作提供了可能,也为并行求解提供了途径。根据算法中并行处理在整个问题求解中所处的层次,并行算法主要划分为3大类:1)粗粒度并行:将整个程序分解成可同时执行的多个任务实施并行处理,如结构并行算法、特征值分组并行算法。2)细粒度并行:将具体的运算如方程组求解、矩阵运算等分解成子操作来并行化。3)混合粒度并行:将粗、细粒度并行结合起来,整体上采用粗粒度并行,其中的一些运算(算法)又利用细粒度方

式并行化。

复杂结构被分解成若干子结构,形成各子结构的刚度阵和质量阵等步骤,属于粗粒度并行计算。各子结构的处理是完全独立的,相互间不需要通讯。集总刚度阵、质量阵以及求解综合系统特征对是串行过程,这是影响计算效率的瓶颈所在。因此考虑将这部分运算加以改进,提高大型结构特征值问题的计算效率。

2 基于高性能并行技术的分布并行求解策略

2.1 子空间迭代法的子结构并行算法

综合系统的刚度阵、质量阵 $[\mu]$ 、 $[k]$ 是由结构组装而成的,因此不必完全组装系统的刚阵及质量阵,将结构划分为子结构进行分块并行处理,具体实现如下:

$$\begin{cases} [\bar{K}]^i [\bar{X}_{k+1}]^i = [Y_k]^i, i = 1, 2, \dots, \beta, \\ [K_{vv}]^i [\bar{X}_{k+1}]^v = [Y_k]^v. \end{cases} \quad (1)$$

$$[K+1] = \sum_{i=1}^{\beta} (([\bar{X}_{k+1}]^i)^T \cdot [Y_k]^i + ([\bar{X}_{k+1}]^v)^T \cdot [Y_k]^v). \quad (2)$$

$$\begin{cases} [\bar{Y}_{k+1}]^i = [\mu]^2 [\bar{X}_{k+1}]^i + [\mu_{EV}]^i [\bar{X}_{k+1}]^v, \\ [\bar{Y}_{k+1}]^v = \sum_{i=1}^{\beta} [\mu_{EV}]^i [\bar{X}_{k+1}]^i + [\mu_{EV}]^v [\bar{X}_{k+1}]^v. \end{cases} \quad (3)$$

$$[M_{k+1}] = \sum_{i=1}^{\beta} (([\bar{X}_{k+1}]^i)^T \cdot [\bar{Y}_{k+1}]^i + ([\bar{X}_{k+1}]^v)^T \cdot [\bar{Y}_{k+1}]^v). \quad (4)$$

形成 $[K_{k+1}]$, $[M_{k+1}]$ 后,即可用雅可比方法求解特征对 $([\Lambda_{k+1}], [Q_{k+1}])$ 。然后又可获得新一轮迭代的迭代向量 $[Y_{k+1}]^i, [Y_{k+1}]^v$ 。

$$\begin{cases} [Y_{k+1}]^i = [\bar{Y}_{k+1}]^i \cdot [Q_{k+1}]; \\ [Y_{k+1}]^v = [\bar{Y}_{k+1}]^v \cdot [Q_{k+1}]. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $[\mu]^i, [K]^i$ 表示第 i 个子结构的模态质量矩阵和刚度矩阵($i=1, 2, \dots, \beta$), $[\mu_{EV}]^i$ 表示第 i 个子结构与

* 收稿日期:2005-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50205026);重庆市自然科学基金(CSTC,2005BB3222)

作者简介:杨为(1973-),男,贵州遵义人,重庆大学副研究员,博士,主要从事机械系统动力学、优化设计等方面的研究。

界面自由度的耦合质量阵,式(1) - (5)中 $i = 1, 2, \dots, \beta$ 在子结构模态综合粗粒度并行的基础上,用式(1) - (5)进行子结构子空间并行迭代后,利用雅可比方法在求解特征对时,用选取的一组正交矩阵 $[P_j]$ 依次对刚度阵 $[K]$ 和质量阵 $[M]$ 进行正交变换后,利用产生的 $[K_{i+1}]$ 和 $[M_{i+1}]$ 与变换前 $[K_i]$ 、 $[M_i]$ 的区别仅在于第 i,j 行和第 i,j 列的元素发生了变化,而其它行、列元素保持不变的特点. 可将刚度阵、质量阵依处理器个数划分成子矩阵,其中行列完全不相交的子矩阵可同时进行消去变换. 由于低阶的特征对近似程度高,迭代所需的时间少,会使各处理器间的任务分配非常不均衡,导致计算效率降低,从而达不到期望的计算效果. Newton-Raphon 迭代法的多处理器任务分配策略可有效地解决此类问题^[3].

这种混合粒度的并行算法在一定程度上可有效地提高大型特征值问题的求解效率,不足之处是细粒度并行计算中处理器间的通讯频繁,通讯延迟和同步的要求使得细粒度并行效率受到影响.

2.2 基于 MPI 子结构子空间迭代法的并行算法

高性能并行编程技术可使通信与计算同时进行,克服各处理器通讯频繁的问题,为提高混合粒度并行算法的效率提供了可能. MPI 是目前最重要的并行编程工具,它具有移植性好、功能强大、效率高等多种优点^[4-6]. 因此,笔者提出基于 MPI 的子空间迭代法子结构并行算法,针对液压挖掘机工作装置的结构特点,提出了复杂机械结构的动态特性分布并行分析的策略,其实现框图如图 1 所示.

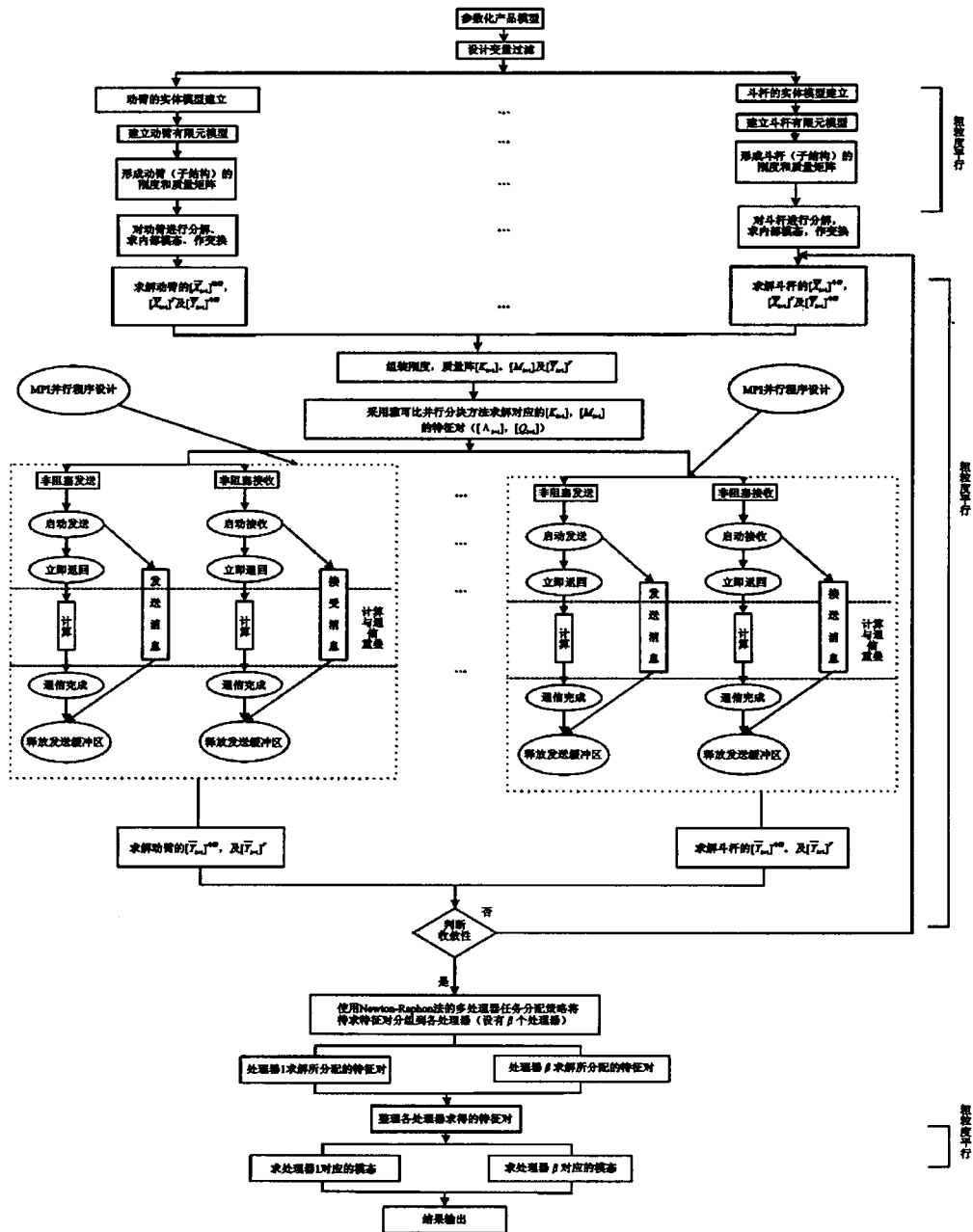


图 1 复杂机械结构动态特性分布并行的求解策略

动臂、斗杆、铲斗、动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸等零部件构成了液压挖掘机的工作装置,依零部件数分别分布在 $1, 2, 3, \dots, \beta$ 个处理器上进行(β 最小可为2)并行计算. 当每个处理器感知到设计参数发生变化时,用MSC PATRAN 二次开发语言 PCL(Patran Command Language)编写的软件在各个处理器上对设计参数进行过滤,然后自动、参数化地实现各零部件的实体模型,在定义有限元类型、有限元特征参数、材料属性、边界条件等步骤后,建立起相应的有限元分析模型,形成相应子结构的质量、刚度矩阵,作变换、分解,得到各子结构(动臂、斗杆、铲斗、动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸等)的 $[\bar{X}_{k+1}], [\bar{X}_{k+1}]^V, [\bar{Y}_{k+1}]^V$,这部分的计算是相对独立进行的,各零部件的有限元模型自由度比整体模态的有限元自由度要少得多,对整个计算进程的影响程度很小,各处理器间通信少,数据量相对较少. 在各处理器上完成粗粒度并行计算后,组装刚度、质量矩阵 $[K_{k+1}], [M_{k+1}]$ 以及 $[M_{k+1}]$ 后利用雅可比分块矩阵的性质求得对应的特征对 $[A_{k+1}], [Q_{k+1}]$. 由于在有限元分析实例完成各自分析任务后,各处理器处于准备接收数据或发送数据等阶段,相互间通信频繁,存在着大量的信息传输,易造成通信阻塞,必然导致系统的并行分析效率下降,影响整个系统的计算进程. 因此利用高性能并行编程技术,让计算和通信过程实现最大程度的重叠,使通信可在计算任务执行期间完成,而不需要专门的等待时间,从而克服通讯延迟和同步对细粒度并行效率的影响. 用改进的 Newton—

Raphon 迭代法的多处理器任务分配策略,使每个处理器求解各特征对的计算任务均衡,完成液压挖掘机工作装置动态特性求解.

3 结 语

提出了将复杂机械结构动态特性分析分为分布式、集中式2步走的策略,通过改进的混合粒度并行算法进行复杂机械结构的动态特性计算,用MPI高性能并行计算技术实现分析计算与通信延迟的最大重迭,可获得好的并行效率和加速比,易于在各处理器间实现相互协同计算,适合工程实际的需求.

参考文献:

- [1] 闻邦春,周知承,韩清凯,等. 现代机械产品设计在新产品开发中的重要作用—兼论面向产品总体质量的“动态优化、智能化和可视化”三化综合设计法[J]. 机械工程学报,2003,39(10):43-51.
- [2] 冯培恩,邱清盈,潘双夏,等. 机械产品的广义优化设计进程研究[J]. 中国科学(E辑),1999,29(4):338-346.
- [3] 李红云,沈为平. 大型结构特征值问题的混合粒度并行算法[J]. 力学季刊,2000,21(1):52-58.
- [4] 都志辉. 高性能计算并行编程技术——MPI并行程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [5] 杨为. 复杂结构静、动态特性的若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [6] 钱仲焱. 复杂结构协同优化理论、方法及技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.

Parallel and Distributing Strategy to Solve Dynamic Characteristic of Complicated Mechanical Structure

YANG Wei, CHEN Xiao-an, LIU Xin

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The work device of hydraulic excavator is considered as subject investigated, the parallel and distributing strategy to solve dynamic characteristic of complicated mechanical structure is put forward. When computing process is farthest superposed communications process, the difficulty due to frequent communicate and lingering communicate incur inefficient can be overcome by using high performance computing technology. The strategy can provide an effective approach to carry out system mechanical product generalized optimize.

Key words: eigneproblem; parallel algorithm; high performance computing technology; hydraulic excavator; work device