

# PC 群集系统中并行矩量法研究

张 玉, 苏 涛, 翟会清, 梁昌洪

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 目前复杂环境的 EMC 分析, 计算量过大, 耗时太长, 使分析与优化遇到实质性的困难. 本文研究 MPI 结合矩量法的并行技术, 测试了在 PC 群集系统中并行矩量法的性能, 并以此完成大型计算. 与大型机和工作站相比, PC 群集系统中的并行矩量法可以用较低的硬件成本有效的实现复杂环境电磁特性分析.

**关键词:** PC 群集系统; 并行矩量法

**中图分类号:** TN820; TP393. 0 **文献标识码:** A **文章编号:** 037222112 (2003) 091368204

## Study on Applications of Parallel MoM on PC Clusters

ZHANG Yu, SU Tao, ZHAI Huizqing, LIANG Changzhong

(School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Prohibitive computation resources and too much time are needed for EMC analysis of complicated EM environment. To overcome this drawback, a parallel algorithm that combined MoM with MPI functions is studied, and performance of parallel MoM on PC clusters is measured. Numerical results show that the parallel MoM on PC clusters can be efficiently employed to analyze EM feature of complex targets at very low cost because no special workstation is needed.

**Key words:** PC clusters; Parallel MoM

## 1 引言

随着计算机技术的发展, 矩量法得到了越来越广泛的应用, 但是, 由于受到计算机资源的限制, 对电大尺寸目标的电磁散射特性的分析, 一直以来难于直接在 PC 机上实现. 国内外的研究者对并行矩量法的研究工作主要依赖于大型计算机和工作站, 如 IBM(RS6000)、CRAY(Digital alpha)、Meiko(Sun)、SGI(MIPS)和 Convex(HP)等, 这些工作平台价格极其昂贵. 最近, 以 PC 机网络群集系统为工作平台的大型计算系统蓬勃发展, 事实上, 由台式计算机构成这样的系统无需任何额外的投资. 为了实现电大目标电磁特性分析, 同时节省硬件成本和计算时间, 本文研究了 MPI 支持下的 PC 机组成的网络群集系统下的并行矩量法, 实例分析了其并行性能, 并应用该方法分析了某飞机的散射特性. 笔者已经研究了并行高频方法分析机载天线特性<sup>[1]</sup>, 本文的研究工作旨在以较低的硬件成本(PC 群集系统), 解决高频方法与低频方法之间的频段高频方法不适用、低频方法由于计算量和内存需求量大从而导致单机目前难于计算的问题.

此外, 为了使研究工作适用于形状复杂的电磁目标, 本文首先给出了一种基于 RAW 格式几何数据文件来提取 RWG 基<sup>[2]</sup>矩量法计算数据的方法, 使得核心程序与模型无关, 便于程序应用到任意导体目标. 本文在 PC 机组成的网络群集系

统中实现了复杂形状、电大目标电磁散射的自动分析, 具有广泛的现实意义.

## 2 RWG 基矩量法计算数据提取

RAW 格式文件顺序记录几何模型表面进行三角形剖分后的三角形的三个顶点坐标, 每行记录一个三角形的三个顶点空间坐标信息(9 个数据). 由于对模型的表面三角形信息进行记录时采取了最直观的三角形 y 顶点的对应方式, 因而其数据结构比较简单. RAW 格式文件的获得对于复杂目标可以通过 AutoCAD 建模方法得到.

根据 RWG 基函数的定义方式可知, 除计算目标的三角形面元的几何数据外, 尚需提取的数据还有:

(1) 几何三角形中有效公共棱的编号信息(各条公共棱对应于各个 RWG 基函数).

(2) 几何三角形所包含的有效公共棱的正负号标志信息(正负标志对应 RWG 基函数的 T+ 和 T- ).

不失一般性, 我们假设三个顶点按逆时针(或右手螺旋)给出, 散射体外法线方向为正向. 其提取过程如下:

(1) 读取 RAW 格式数据文件, 对计算目标三角形面片重新描述, 将空间三角形的三顶点坐标记录方式改为三顶点编号和各项点坐标分别记录的方式, 由此得到面片 y 顶点、顶点 y 坐标的数据描述方式. RAW 文件描述的几何信息被重新用

此方式描述.

(2) 比较不同三角形是否存在相同顶点编号, 找出所有三角形的全部公共边并顺序编号.

(3) 获取各三角形三边的编号和正负标志: 遍历所有三角形的三条边, 分别与 (2) 中得到的公共边比较, 如果该边不是公共边, 编号为 -1, 是公共边, 则记录相应编号, 写入文件方式为: 三角形编号 I, 第几条边的边号 J, 公共边编号 K; 同时, 如果该三角形的边与 (2) 中公共边的顶点顺序相同, 该三角形为正面片, 标记为 +1; 顺序相反, 标记为 -1. 写入文件方式为: 三角形编号 I, 第几条边的边号 J, 面片标记值.

由于第一步对大量重复的顶点坐标信息进行了整理归并, 节省了几何信息的存储空间, 这对表面剖分单元多的目标的计算很有意义. 至此, 任意形状导体所需的计算数据全部得到.

### 3 面片划分的并行矩量法

RWG 基矩量法面片边与矩阵元素的对应关系、基函数与权函数相互作用分别如图 1、图 2 所示.

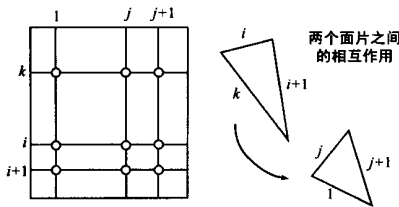


图 1 面片边编号与矩阵元素

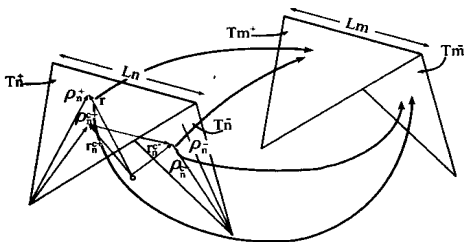


图 2 基 y 权函数的相互作用

矩量法的矩阵填充非常适合于 MIMD(单指令多数据)的并行处理<sup>[4]</sup>. 每个矩阵单元完全独立于其他的单元, 因此最简单也是最直观的并行算法就是根据矩阵单元的位置来划分工作任务, 从而使得每个节点独立计算阻抗矩阵的一块, 此计算过程中不需要节点通信. 但是, 此时可能必须重复计算源面片与场面片的作用, 那么每个节点的计算时间可能比原先增加了 300%~420%. 由于总的计算性能按照节点的个数正比例增加, 相对于单一节点的面片循环算法, 此时仍可以得到  $p/3 \sim p/4.2$  的加速范围, 这是非常可观的加速比, 而且也比较容易获得. 然而, 这并不一定是最有效的并行算法, 为了利用面片遍历比边遍历的若干优点, 按照面片分区的并行算法值得研究.

如何给出一种有效的面片分区算法, 一个简单的想法是用一个节点计算一个给定的源面片与一个场面片的相互作

用, 然后把结果发送给所需要的节点, 最多有 8 个节点需要这个信息, 这意味着可能要 8 次通信来代替 8 次可能的积分计算. 在分布式系统中, 通信的代价很高, 这么做很不划算.

如果对一个场面片的计算可以用一个节点完成, 那么相互作用的计算可以减少到 3 次, 任务以这种方式分解, 从数据分解上来看, 这不过是将矩阵按照列来分块. 可以采用片状的(图 3(a))或者分散的(图 3(b))列分块方法, 取决于哪一种列分块方式更有效. 对于源三角形, 其边的总体编号与矩量法矩阵的列数相关, 而场面三角形的边编号与矩阵的行相关, 根据第三部分的方法, 边的编号的具有局部性(三角形在一般情况下有两个相邻的边编号), 因此, 片状分解比分散分解的方法要好, 此时, 除了每个节点的边界上的列以外, 相互作用的可能计算次数是 2. 换言之, 每个面片的相互作用只可能被重复计算一次. 如果是列块间隔较大的问题, 重复计算的可能性很小. 而且可以看出, 这种填充技术不需要线程间的通信.

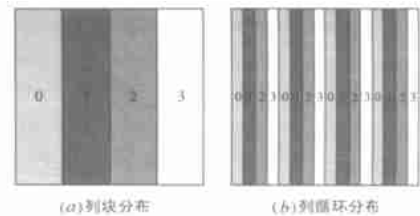


图 3 数据分布方式比较

本文采用的并行算法中, 每个节点对所有的源面片进行顺序循环. 在每个源面片上, 最多有三个可能的边. 每个节点找出与边相联系的列编号、要计算该列的节点索引号, 以及该节点内部矩阵块的局部列号. 每个节点给予一个工作计数器, 如果该节点是要计算当前列的节点, 其工作计数器加 1. 在每个计算机节点对源面片可能的三条边循环后, 只有被选中计算的节点来填充矩阵元素. 其他的节点接着去进行另外一个源面片, 重新进行选取工作. 由此可见, 与串行的算法相比, 仅仅是面片的选取过程被提前了. 因此可以预料得到比较好的加速比. 由于通常对于一个源面片来说, 仅仅有两个节点被选中来计算面片与面片的相互作用, 因此也只有一次多余的计算. 这样的填充算法基本能保正总的负载均衡, 因为每个处理器与所有其他的处理器相比, 最多有一行额外计算. 算法的程序框架如图 4 所示.

### 4 MPI 工作网络

目前很多人热衷于研究由普通网络如以太网、FDDI、或 ATM 连接起来的非正式并行系统, 这些被称作 COWs 或 NOWs(clusters or networks of workstations) 的系统很明显是非均匀存储访问的 MIMD 型的分布式存储并行计算机, 它们应该能运行 IBM SP2 或 Intel Paragon 设计的任何软件或并行算法, 只是后者具有更高的通信带宽和更低的通信延迟, 这样它们能高效地支持更多类型的应用. COWs 变得如此吸引人是因为实验表明它能很高效地执行一些并行任务, 而且它们不受政策与经济条件的限制. COWs 可以由那些在晚上或周末时空闲的 PC 机或工作站组成, 而且, 由台式计算机构成这

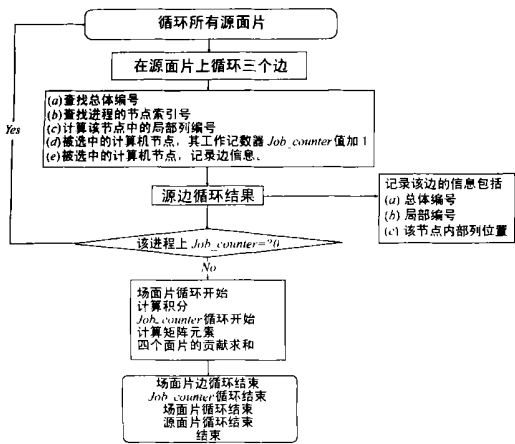


图 4 并行矩阵填充程序框架

样的系统无需任何额外的投资. 上述的想法可以实现元级计算, 即利用通过网络连接的任意数目的异构计算机来联合求解一个问题.

根据这个趋势, 在计算资源成本有限的情况下, 我们采用两个 PC 网络群集系统来研究并行矩量法. 第一个 MPI 工作网络由 9 台 P 450 通过 10/100M 自适应网卡连接起来的 Win2000 局域网 (如图 5 所示), 用于测试单机内存允许的情况下, 并行 MoM 随 PC 个数增加的性能变化. 第二个工作站网络是 11 台 P4 2.0G 用 10/100M 自适应网卡连接群集于一个局域网内, 用于完成目前单机内存难于完成的计算.

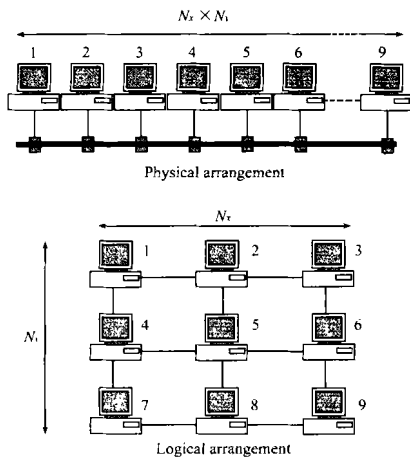


图 5 MPI 工作网络

支持分布计算的库为 MPI 2.1. 要评价分布式 MoM 代码, 理想的 MPI 环境去仿真 MPP, 就是用一个封闭的局域网中的相同计算机来实现, 我们的替代方案是在网络交通比较通畅的时候运行. 我们开发测试了不同群集体系下的具体实现.

## 5 性能评价与应用

### 5.1 金属立方体与金属球的组合体

本例进行扩展性测量, 研究群集系统中处理器个数的改变对并行 MoM 性能的影响.

设立方体边长为  $a$ , 其电尺寸  $k_0 a = P$ , 金属球的直径  $D$

=  $a$ . 假定  $-z$  方向传播的平面波  $E_x$  向组合体垂直入射, 用本文方法计算的归一化 RCS 方向图如图 6 所示, 并与 ANSOFT 的仿真结果进行了比较, 吻合良好, 同时也表明本文提取复杂目标计算数据的正确性.

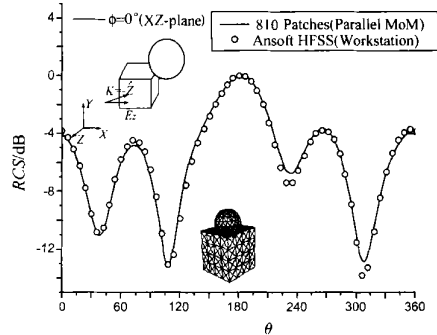


图 6 实例 1 的计算结果

由表 1 可见, 运行于 PC Clusters 中的并行矩量法, 对本例而言, 总时间可以节约高达单机用时的 59% 时间. 在并行 MoM 在矩阵填充时, 由于基本无需数据传递, 矩阵构造节省的时间随着 PC 个数的增加呈现线性增加; 由于并行 LU 分解需要各个进程之间传递数据, 要花费通信时间, 求解节约的时间不是线性上升. 因此, 用 PC Clusters 作并行计算时, 如何降低通信时间, 以提高总效率, 将是未来一个十分重要的研究课题.

表 1 并行方法与传统方法用时情况比较表

名称	PC 数	填充时间 (秒)	求解时间 (秒)	总时间 (秒)	节约时间比例 (%)		
					填充	求解	总时间
MoM	1	57	153	210	0	0	0
PMoM	2	28	90	118	51	41	44
PMoM	3	19	76	95	67	50	55
PMoM	4	14	75	89	75	51	58
PMoM	5	11	75	86	81	51	59
PMoM	6	9	97	106	84	37	50
PMoM	7	8	105	113	86	31	46
PMoM	8	7	147	154	88	3	27
PMoM	9	6	168	174	89	-11	17

注: 表中的时间数据为三次计算用时的平均值, 求解方法为 LU 分解方法, 节约时间比例按照  $\frac{\text{PMoM 时间} - \text{MoM 时间}}{\text{MoM 时间}} @ 100\%$  计算.

### 5.2 某飞行器模型

假设某飞机表面按照最大边不超过  $1/10$  波长来划分三角形 (局部需要细划三角形), 那么 100MHz 时 MoM 计算 (采用双精度) 需要大约需要 1.35G 内存, 采用前述第二个群集系统中的 3 台 512M 内存的 P4 2.0G PC, 可以方便的得到其散射特性.  $E_z$  沿着  $-x$  方向入射, RCS 结果如图 7 所示.

## 6 结语

本文所研究的 PC 机互联网组成的群集系统中的并行矩量法, 使得我们可能完成单机无法解决的大型问题. 只要群集系统 PC 个数足够多, 可大大节约完成大型计算的硬件开销和计算时间. PC 群集系统机网之间的通信时间进一步缩短, 将是今后的研究的重要课题.

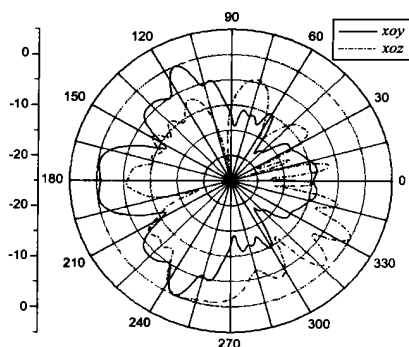


图 7 某飞机散射方向图

## 作者简介:



张 玉 1978 年 4 月出生于安徽淮北, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事电磁场数值计算、复杂系统电磁兼容分析、并行计算等方面的研究工作。

苏 涛 1974 年 8 月出生于山东济南, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事电磁场数值计算、电磁优化设计、复杂目标建模等方面的研究工作。

翟会清 1978 年 2 月出生于吉林大安, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要从事电磁场数值计算、电磁兼容中的高低频混合算法等方面的研究工作。

梁昌洪 1943 年 12 月出生于上海, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士、IEEE Senior member, 研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张玉, 梁昌洪. 并行 UTD 算法及在机载天线分析中的应用 [J]. 电子学报, 2003, 31(3): 332- 334.
- [ 2 ] S M Rao, D R Wilton, A W Glisson. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans, 1982, AP30: 409- 418.
- [ 3 ] Gang Cheng. A dataflow based software integration model in parallel and distributed computing and applications [D]. USA: the Graduate School of Syracuse University, 1996.