

潮流计算与并行计算在电力传输中的应用

彭梦晶¹,马丽明²

1. 重庆市中医院设备处, 重庆 400010

2. 佛山市妇幼保健院信息中心, 广东 佛山 528000

摘要: 随着大规模用电负荷的增长和电源投产的需要, 电网规模越来越大, 电压等级也在不断地提高。为增强电网结构安全性和稳定性, 将并行计算引入到潮流计算中, 不仅提高了安全性和稳定性, 而且加快了电能的传输。本文介绍了并行计算的定义、分类, GPU 通用计算的背景和动机, 以及并行计算对潮流计算的重要性。

关键词: 潮流分析; 电力系统; 并行计算

中图分类号: O246

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)04-0597-05

The Application of Load Flow and Parallel Calculation in Power Transmission

PENG Meng-jing¹, MA Li-ming²

1. Equipment Department of Chongqing Chinese Medicine Hospital, Chongqing 400010, China

2. Foshan Maternal and Child Health Care Hospital, Foshan 528000, China

Abstract: With the increase of large-scale electricity load and the demand of power supply, the power grid is becoming larger and larger, the voltage level is constantly improving. To enhance the safety and stability of power grid structure, parallel calculation is introduced into load flow calculation, it not only improves the safety and stability and also accelerates the transmission of electric energy. This paper introduces the definition and classification of parallel calculation, the background and motivation of GPU general purpose computation, and the importance of parallel calculation to load flow calculation.

Keywords: Load flow calculation; power system; parallel calculation

1 并行计算的定义

一说到并行计算, 我们马上会联想到串行计算, 那么, 串行计算和并行计算到底有什么区别呢(图1)。串行计算, 是将数据字节以一位一位的形式切分, 而后在一条传输线上逐个传输, 而并

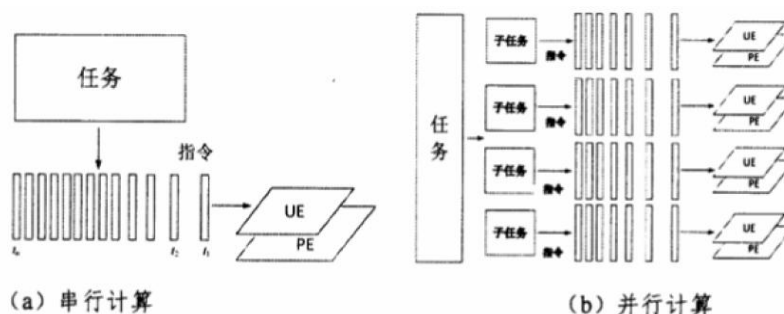


图 1 并行计算与串行计算的区别

Fig.1 Distinction between parallel calculation and serial calculation

行计算则非如此, 引出并行计算, 就是为了加速, 并行计算属于大量计算被同时进行的计算模式, 定义并行计算的有三个术语首先得定义三个术语: 首先是任务, 任务是指以具体任务为依据所编制的一系列指令以及指令所构成集合单元, 程序设计中的首要环节就是将任务进行分解, 将整体化的任务分解为多个子任务; 其次是执行单元 (Unit of Execution, UE), 执行单元的基本定义是各种任务指令得以执行的最主要软件单元。在任务执行的过程中, 必须在执行指令与执行单元之间形成映射关系, 使执行单元获取该任务的相关执行信息。在本领域中, 执行单元主要包括两种类型, 第一是线程, 第二则是进程。从并行计算上来看, 两者最大的差异在于地址空间的不同, 即线程执行单元对地址空间可全面共享, 而进程执行单元则具有独立且对应的地址空间; 第三是处理单元

收稿日期: 2016-03-07

修回日期: 2016-03-28

作者简介: 彭梦晶(1974-10),男,研究生,工程师.从事数据挖掘和数据库研究. E-mail:p_m_j@sohu.com

数字优先出版:2017-06-05 <http://www.cnki.net>

(Processing Element, PE)，处理单元的基本定义是任务指令执行期间最基本性的硬件单元。在当前实践应用领域中，一个处理单元通常不仅仅与传统单核 CPU 连接对应，更多的体现为多核中央处理器中核单元，在执行任务指令的过程中，由执行单元首先获取好了任务，然后在 PE 上运行。

2 GPU 通用计算的背景和动机

GPU (Graphic Processsing Unit)，即“图形处理器”。自 GPU 诞生之日起，它就远远逾越了摩尔定律的发展速度，同时运算能力更是在不断地提升，因此 GPU 在性能加速这一块中越来越受欢迎也是情理之中，很多圈内人士发现了 GPU 进行计算的莫大潜力，所以经过考虑，于 2003 的 SIGGRAPH 的大会上提出了 GPGPU 的概念，引出了异构的思想。

2.1 计算中为什么要引入 GPU 进行分析

GPU 不仅在处理能力上优于 CPU，同时在存储带宽上比 CPU 也有优势得多，在成本及功耗上，GPU 也并不需要花太多和太大的代价，基于图形渲染的高度并行性理论^[1]，通过增加存储器控制单元、并行处理单元等多种方式，能够显著提高 GPU 对单元的处理能力，同时也能大大提升存储器的运行带宽；此外，GPU 在设计上也做了不少改进，它将数量更多的晶体管单元作为执行单元，并非与传统意义上的中央处理器单元类似，而是以更加多样的控制以及缓存单元起到提高执行单元工作效率的目的。对于中央处理器单元而言，单元运行过程中需要借助于不同运算单元来完成包括分支、整数、浮点计算以及逻辑判断等在内的相关功能。除此以外，GPU 单元中还增设有专门的浮点加速器装置，从而使得 GPU 的运算速度及运算性能，相对于 CPU 有了显著提高（图 2）。

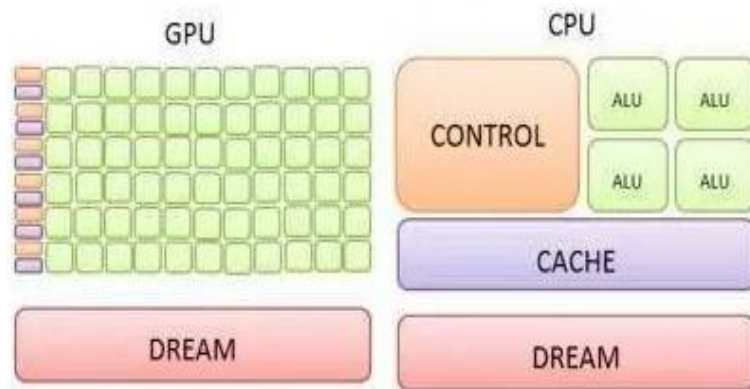


图 2 GPU 与 CPU 结构上的区别
Fig.2 Distinction between GPU and CPU structures

2.2 并行计算机的分类

经过多年的发展，并行计算机的种类繁多，我们就选择和潮流计算有关的弗林分类法进行详细的计算，根据弗林分类法，计算机的结构类型有单指令，多数据；多指令，多数据；单指令，单数据；多指令，单数据。

2.2.1 SIMD 同一时钟周期范围内，并行计算机中处理单元仅能够针对同一指令进行处理，但不同单元可支持处理的数据元素有所不同。词类并行计算机通常使用于对规则度有较高要求的计算类型，如矩阵向量相乘 (matrix-vector multiplication)。

2.2.2 MIMD 每个处理单元既可以执行不同指令流，又可以使用不同数据元素。

2.2.3 SISD 同一周期内，只有唯一一条指令能够某处理单元执行，且只允许输入一个数据流，这就相当于一个单核的 CPU 在固定的一个时刻之内只能一个任务。

2.2.4 MISD 当单数据流进入多个处理单元，每一个处理单元会通过指定的指令流，去独立地操作数据，这种情况很少出现，一般用于实验。

我们今天所能看到的双核或 4 核桌面计算机就是 MIMD 系统。

3 潮流分析

3.1 潮流分析的定义

对于电力系统而言,必须在掌握电力系统运行条件以及电网结构的基础之上展开对电力系统的潮流计算。潮流计算的过程中必须对电力系统整体运行状态进行评估,掌握电力系统网络中功率分布、母线线路电压以及功率损耗等在内的一系列的状态参数。潮流计算更为电力系统故障分析以及稳定计算提供了重要依据与支持^[2]。

(1)在电网系统规划设计过程中,潮流计算的主要功能是指导规划设计人员合理确定电源容量,选择相应接入点以及网络架构,采取无功补偿方案,达到相应要求;

(2)在对电网系统年度运行方式与计划进行编制的过程中,工作人员可以以新设备投运以及预计负荷水平增长计算为前提,利用典型方式完成潮流计算与分析;

(3)在电网系统特殊运行条件以及检修维护期间,潮流计算可支持对电力系统日运行方式的科学编制,为发电厂开机方案的制定奠定基础,满足线路、变压器热稳定要求及电压质量要求。

最后归结为为电力系统无论在前期规划设计或后期运行过程中,均需要通过潮流计算的方式对规划方案的可行性进行研究,或提供对运行方式可靠性的分析结果。由此可见,在电力系统进行潮流计算的重要性非常突出,且需求是非常大的。

3.2 将并行计算运用到潮流计算

暂态稳定时,仿真函数用数学语言大致描述为求解大规模微分代数方程组的初值问题,详见如下方程: $0=x-f_1(x,U)$

$$0=f_2(x,U)=I-Y_N U$$

方程中 x 为微分方程状态变量; U 是向量电压; I 为电流向量; Y_N 输电网络的导纳矩阵,一般为对角阵。

在所定义的模型当中,以上的微分方程中的暂态原件为发电机,励磁系统,高压直流输电系统(HVDC),代数方程第二个中的 f 则代表了输电网络。暂态时域中的核心问题则是当时间变量 t 已知时,通过以上的微分方程,我们来求解下一时刻的方程,求解的目的就是防止系统发生故障或者在预防系统故障,并且能够在系统故障时做出相应的且必要的处理。

在电力系统中,以导纳矩阵为连接在母线电源和母线电压建立电力系统的方程,电力系统中还有几个非常重要的参数,如有功功率 P ,无功功率 Q ,相角等,这些参数是影响电力系统稳定性的重要因素。

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

其中,上式中的 G_{ij} 系统中的电导,而 B_{ij} 为系统的电纳,上述方程属于非线性方程,在电力系统潮流系统中,首先应该很清楚一点,分清几类节点,只有在分清这几类节点以后,才能做进一步分析,总共分为三类节点: P, Q 节点, P, V 节点,平衡节点。其中 P, Q 分别代表已知有功功率,无功功率,求未知量:相角 δ ,电压 U ; P, V 节点分别代表已知有功功率和电压,求未知量:无功功率 Q ,相角 δ ;平衡节点的相应关系为 $U=1, \delta=0$ 。

求解以上等式有很多种方法^[3],比如说在反复的变化中进行高斯迭代法(Gauss iteration),还有就是高斯——赛德尔迭代法(Gauss-Seridel iteration),这种复杂的求解方法在电力系统潮流计算中是经常被使用的,迭代法在整个计算过程中的所有的公式是不能够被改变的,都是不允许变化的,已知一个值,根据公式,从而求出未来所需要的一系列的值。另一种最常用的方法就是牛顿拉夫逊迭代法(Newton-Raphson iteration),这种方法的核心思想就是应用到了雅克比矩阵法(Jacobian matrix),而雅克比矩阵在使用过程当中是能够被改变的。

在运算的过程当中，对牛顿拉夫逊法进行一些简化也是很有必要的，再者说随着电力系统越来越复杂，所以对电力系统做一定的规划是一项很有必要的工作，而且对能源的节约，对运算的复杂度分析都是非常有必要的，所以引入了对角块加边模型(Bordered Block Diagonal Form, BBDF)算法，这种算法是并行算法的一个分支。这种算法的实质就是利用分割理论将矩阵进行分块，从而形成的导纳矩阵为 BBD 型，雅克比矩阵也有着相同的类型，故二者有很多相似之处。将电力系统的潮流计算归结为求解一个线性方程的过程，最常用的求解方法当属牛顿拉夫逊迭代法。详细计算过程如下： $F(x)=0$

$$\text{分开写为如下: } f_i(x_i, x_{q+1}) = 0 \quad i = 1, \dots, q$$

$$f_{q+1}(x_1, \dots, x_q, x_{q+1}) = 0$$

$$\text{其中, } x_i \in R^{l_i} \quad f_i \in R^{l_i} \quad i = 1, \dots, q, q+1$$

$$\sum_{i=1}^{q+1} n = n$$

从而系统中的导纳矩阵根据上式的公式转化成为 BBDF 的形式为，则 $F(x) = 0$ 相关的雅克比矩阵为：

$$\begin{bmatrix} J_{1,1} & & & & J_{1,q+1} \\ & J_{2,2} & & & J_{2,q+1} \\ & & \dots & & \vdots \\ & & & J_{q,q} & J_{q,q+1} \\ J_{q+1,1} & J_{q+1,2} & \dots & J_{q+1,q} & J_{q+1,q+1} \end{bmatrix}$$

所以总的线性方程为： $Jx=b$

所以相对应的雅克比矩阵为：

$$\begin{bmatrix} J_{11} & \cdot & \cdot & J_{1k} & J_{1n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ J_{k1} & & & J_{kk} & J_{kn} \\ J_{n1} & \cdot & \cdot & J_{nk} & J_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_k \\ b_n \end{bmatrix}$$

我们此时能够注意到上式中的下标， k 代表子块， n 则代表割集矩阵块，因此未知的向量矩阵在割集向量块中能够用一下的等式来表达。

$$x_n = (J_{nn} - \sum_{i=1}^k J_{ni} J_{ii}^{-1} J_{in})^{-1} (b_n - \sum_{i=1}^k J_{ni} J_{ii}^{-1} b_i)$$

而每个未知的向量在每个子块中能够用一下的等式能够表达：

$$x_i = J_{ii}^{-1} (b_i - J_{in} b_n)$$

经计算分析，将上述矩阵进行 LU 分解，得到

$$\begin{bmatrix} J_{11} & \cdot & \cdot & J_{1k} & J_{1n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & \cdot & \cdot & \\ J_{k1} & & & J_{kk} & J_{kn} \\ J_{n1} & \cdot & \cdot & J_{nk} & J_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & & & & \\ \cdot & \cdot & & & \\ \cdot & & \cdot & & \\ L_{k1} & & & L_{kk} & \\ L_{n1} & \cdot & \cdot & L_{nk} & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} & \cdot & \cdot & U_{1k} & U_{1n} \\ & \cdot & & & \cdot \\ & & \cdot & & \cdot \\ & & & U_{kk} & U_{kn} \\ & & & & U_{nn} \end{bmatrix}$$

将所得矩阵等式代入到 x_n 等式中，得以下方程：

$$\begin{aligned} x_n &= (J_{nn} - \sum_{i=1}^k L_{ni} U_{ii} U_{ii}^{-1} L_{ii}^{-1} L_{ii} U_{in})^{-1} \times (b_n - \sum_{i=1}^k L_{ni} U_{ii} U_{ii}^{-1} L_{ii}^{-1} b_i) \\ &= (J_{nn} - \sum_{i=1}^k L_{ni} U_{in})^{-1} (b_n - \sum_{i=1}^k L_{ni} L_{ii}^{-1} b_i) \end{aligned}$$

再将上述的矩阵等式代入到 x_i 的等式当中，所以得到的以下方程为：

$$x_i = U_{ii}^{-1} L_{ii}^{-1} (b_i - L_{ii} U_{in} b_n) = U_{ii}^{-1} (L_{ii}^{-1} b_i - U_{in} b_n)$$

通过计算和限制条件，在 30 节点和 39 节点分别运用牛顿拉夫逊迭代法和解耦分解法，还有分布式计算的计算时间，如下图所示：

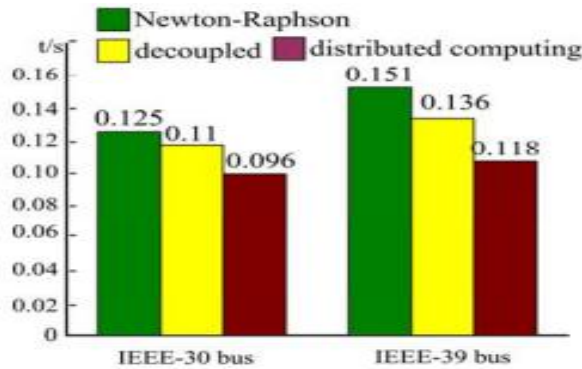


图 3 牛顿拉夫逊迭代法，解耦分解法和分布式计算在 30 和 39 节点的计算时间

Fig.3 Times of Newton-Raphson, decouple and distributed computing at IEEE 30 and 60 bus

可以看出牛顿拉夫逊迭代法无论在 30 节点还是 39 节点，都是时间最长的，所以对牛顿拉夫逊的改进是很有必要的，分布式计算方法就是较为典型的应用，从而并行计算在潮流系统中的作用就十分突出而又至关重要了。

4 结论

通过以上分析论证，分布式计算在电力系统潮流计算中的重要性是不言而喻的，而电力系统中的矩阵往往是对称矩阵或稀疏矩阵。故 BBDF 对角块加边模型的并行潮流计算是非常适用于电力系统中潮流计算的。因此，将并行计算引入到潮流计算是一件非常有必要的事情，对系统的运算速度至关重要^[4]。

参考文献

[1] 李 峰,李虎成,於益军,等.基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J].电力系统自动化,2013,37(14):75-80
 [2] 黄 珂.网络平台下电力系统潮流并行算法的实现[D].成都:电子科技大学,2006
 [3] 张晋波.并行计算在电力系统潮流及可靠性分析中的应用[D].合肥:合肥工业大学,2008
 [4] 张怀勋.基于并行处理的大规模电力系统潮流计算与可靠性评估[D].重庆:重庆大学,2009