

基于PC机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法

李芳, 郭剑, 吴中习, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085)

Distributed Parallel Computing Algorithms for Power System Small Signal Stability Based on PC Clusters

LI Fang, GUO Jian, WU Zhong-xi, ZHOU Xiao-xin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: With the interconnection of power systems, inter-area low frequency oscillation occurs occasionally; insufficient damping of the weak-interconnected power grid has become a serious issue affecting the power system stability. Considering the high rank of algebraic and differential equations and the geographical distributed data of interconnected power systems, it is necessary to analyze small signal stability problems in parallel mode with distributed computers. Based on the 'multi-port inverse matrix parallel algorithm' proposed by China EPRI, the parallel implementation methods of the Simultaneous Iteration algorithm and the Inverse Iteration/Rayleigh Quotient Iteration algorithm are described. With the characteristics of limited communication time, the proposed parallel algorithms can run well on distributed PC clusters. Numerical simulation results on actual large-scale power systems show that the proposed algorithms are correct and efficient.

KEY WORDS: small signal stability; distributed computing; parallel algorithm; PC cluster; power system

摘要: 大区电网互联后, 系统弱阻尼动态稳定问题突出使区域间的低频振荡现象时有发生。对大规模电网进行小干扰稳定分析时, 电网数据按地理位置分布, 各电网仅拥有本网的数据, 全网数据收集困难; 超大规模电网对应的高阶代数/微分方程组模型在线性化之后的矩阵规模庞大, 特征值求解速度慢, 这些都要求从分布式及并行计算的角度去研究小干扰稳定问题。该文基于中国电力科学研究院提出的“端口逆矩阵并行解法”, 提出并实现了小干扰稳定特征值求解的“逆迭代转 Rayleigh 商迭代法分布式并行算法”和“同时迭代法分布式并行算法”。所提出的小干扰稳定特征值分布式并行解法, 通讯次数少, 每次的通讯量小, 具备分布式计算的实

际应用前景。应用所开发的小干扰稳定并行计算程序, 在实际大规模系统上进行了测试和分析, 验证了所提出算法的正确性和有效性。

关键词: 小干扰分析; 分布式计算; 并行计算; PC 机群; 电力系统

0 引言

系统小干扰稳定性的实时监控和预警对预防低频振荡事故和防止事故蔓延是非常必要的。但当前的在线动态安全分析概念^[1]中, 仅仅强调要在一定时间内完成大量预想事故的暂态稳定分析与评价, 并没有明确提出涵盖小干扰稳定在线计算的任务。这主要是由于在线动态安全分析面向的在线数据是按区域分布所导致的。

由于管理体制和竞争机制等原因, 全网内每个区域仅拥有自己本地的在线数据, 各区域数据相互并不完全透明, 全网各区域在线数据的集中既存在管理方面的问题, 也存在技术上的困难。为此, 目前区域电网在线动态安全分析, 对外网系统通常采用等值的方法。这对暂态稳定仿真影响可能不大, 但对大区域联网的小干扰稳定分析则是不可行的。因此, 必须研究适用于在线计算的、能基于按区域分布的在线数据的小干扰稳定分布式并行算法, 作为实现小干扰稳定在线动态安全分析的有效方法。

目前, 将并行技术^[2]应用到电力系统的研究主要集中在潮流计算和暂态稳定方面^[3-4], 在小干扰稳定计算方面研究较少, 且目前所有在小干扰稳定分析方面的研究均基于集中的数据, 未涉及到分布式计算。文献[5]实现了带位移的、同时迭代法的并行算法, 但该方法仅适用于对称阵的特征值求解问题, 不适合电力系统中的应用。文献[6]描述了一个使用

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(973 项目)(2004CB217903)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (973 Program) (2004CB217903).

AESOPS和隐式迭代算法的并行特征值求解方案,算法在一台模拟并行计算机的串行处理机上进行了测试,并给出了大系统的测试结果,但预估的并行计算效率并不高。文献[7]中分而治之的特征值算法是并行处理的一个典型代表,提出了一种以QR算法为基础的分解算法,所提并行算法存在的问题是,当任意2个子系统的特征值比较接近时,求解特征值偏移时可能会不收敛;而对于大规模电网,任意2个子系统的特征值比较接近的情况是很常见的。该方法基于满阵的状态矩阵,没有利用到电力系统的稀疏性,且不能考虑孤立子系统互联后会出现的互联模式,所以该文献所提出的方法也不适合大规模电力系统的特征值分析。文献[8]在Intel iPSC/860并行机上实现了同时迭代法的并行算法,给出了一个实际特征值求解算法的并行计算机结果,提出的并行策略是,给初始向量矩阵中每一个初始迭代向量分配一个节点机或进程。文献[9]是对文献[8]研究工作的进一步发展。该文献采用了和文献[8]相同的并行策略,对Bi-iteration (BI)迭代法、BI迭代法/逆迭代的混合算法进行了并行化处理,并和文献[8]中的同时迭代法并行算法进行了比较。该文献所提出的3种并行算法的优点:各处理器负载基本平衡;缺点和不足:首先,增广雅可比矩阵 J 的形成和对 J 的LU分解均需要串行求解得到,而加速比和效率的计算却未考虑这两项的计算时间。实际上,对于大规模电力系统,这两项任务与求解特征值相比,耗时要大得多,所以实际整个小干扰分析过程的加速比和效率比文献[8]所提到的要低;其次,参与并行处理的节点个数需和迭代向量的个数一致,且并行算法需在串行算法代码上作很大改动。

上述文献的并行算法都没有获得较高的加速比,且仅文献[8-9]提出的并行算法在大规模电力系统上进行了测试。最重要的是,所有并行算法研究的前提都是全网数据完全集中,每个节点机都能获得全网的数据,即所有算法都没有考虑分布式数据的处理,因而这些算法仅适用于小干扰稳定离线计算,不能解决大型互联电网的在线小干扰稳定计算问题。本文采用按区域分网并行计算的研究思路,在Linux操作系统下,基于MPI的并行编程环境,使用Fortran语言实现了“迭代法转瑞利商迭代法分布式并行算法”和“同时迭代法分布式并行算法”。所提算法在PC机群系统上使用实际大规模电网数据进行了仿真,结果验证了所提算法的正确性和有效性。

1 小干扰稳定全维部分特征值串行算法

全维部分特征值分析方法的主要思想:将全系统状态矩阵 A 经过适当变换后,成为一个与其维数相同的矩阵 A_i ,使矩阵 A 中所研究的一个或一小部分特征值相应的变换成为 A_i 中模最大的一个或较大的几个特征值,然后采用适合于计算矩阵按模最大特征值或一部分按模递减特征值的计算方法,求出 A_i 中的这些特征值,最后经过反变换得出 A 中所关心的特征值。常用的状态矩阵变换形式包括复位移逆法、S矩阵法、Mobius变换。

常用的求取矩阵按模最大的一个或几个特征值的算法有幂法、瑞利商迭代法、同时迭代法、隐式重启动Arnoldi方法。幂法数值稳定性较好,但其迭代收敛速度较慢,且该方法一次只能求出一对特征值和特征向量;瑞利商迭代法的迭代收敛速度较快,但对于初始位移要求较高,也一次只能求出一对特征值和特征向量^[10]。通常将迭代法和瑞利商迭代法相结合使用,称为迭代法转瑞利商迭代法。其中,迭代法是由幂法和复位移逆变换组合而成。迭代法转瑞利商迭代法,是先用迭代法求出一个较好的估计值,然后以此估计值为初值,用瑞利商迭代法求出特征值。同时迭代法和隐式重启动Arnoldi方法都属于子空间法,能同时求出若干个主导特征值及特征向量。这两种方法收敛性能都比较好,且速度较快^[11-12]。

本文主要是基于电力系统分析综合程序(PSASP)中的迭代法转瑞利商迭代法和同时迭代法的串程序进行了分布式并行算法的研究^[13]。

这两种算法充分利用了大型电力系统的稀疏特性,如并不直接形成状态矩阵 A (A 本身不是稀疏的),而在整个迭代过程仅仅用增广雅可比矩阵 J 来进行计算,保留了问题的稀疏特性。另外,为改善同时迭代法的收敛性和计算效率,在同时迭代法中使用了锁定机制和监视向量技术。

使用这两种全维部分特征值算法时,特征值的搜索过程就是反复求解以雅可比矩阵的变换形式为系数矩阵的线性代数方程组,分析如下:在对系统网络及所有元件线性化之后,可以列出全系统的线性化状态方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{X} = (J_A - J_B J_D^{-1} J_C) \Delta X = A \Delta X \quad (2)$$

式中： ΔX 为状态变量矢量； ΔY 为非状态变量矢量； J 为系统的线性化雅可比矩阵，是高度稀疏的矩阵。

Nelson Martins 在文献[14]中提出了一种利用雅可比矩阵稀疏特性求解系统特征值和特征向量的方法，原理如下：以迭代法为例，该方法每次迭代中均需要执行以下计算：

$$v^{k+1} = A u^k = (A - qI)^{-1} u^k \quad (3)$$

式(3)等价于求解下列线性方程组：

$$(A - qI)v^{k+1} = u^k \quad (4)$$

由式(2)中矩阵 A 的定义可得：

$$u^k = [(J_A - J_B J_D^{-1} J_C) - qI] v^{k+1} = (J_A - qI)v^{k+1} - J_B J_D^{-1} J_C v^{k+1} \quad (5)$$

$$\text{令 } w^{k+1} = -J_D^{-1} J_C v^{k+1} \quad (6)$$

则式(5)可化为

$$u^k = (J_A - qI)v^{k+1} + J_B w^{k+1} \quad (7)$$

同时由式(6)得

$$J_C v^{k+1} + J_D w^{k+1} = 0 \quad (8)$$

将式(7)和式(8)合并为

$$\begin{bmatrix} J_A - qI & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{k+1} \\ w^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可见，矩阵向量积被转换成了求解线性代数方程组，且上述处理用式(9)进行迭代，避免了显式形成系统矩阵 A 的计算量。

2 小干扰稳定分布式并行算法实现

2.1 并行算法的基本思路

为适应按区域分布的数据，对并行算法的研究采用空间并行的策略，即每个区域设为一个子网，各子网仅面对本区域的数据，大量计算在本地完成，子网间尽量减少交换数据；全网协调计算，共同完成全系统的特征值分析。在硬件配置上，为每一个分布的区域内设置一个节点机，再在全网设置一个主控机对这些区域节点机进行协调和管理，也可以指定某一个节点机作为主控机。每个区域节点机用于处理和管理本区域的数据，在本地完成大量工作；主控机则负责对各区域节点机进行协调和交互，以完成全网的小干扰稳定分析。其原理如图 1 所示。

按照上述分网计算的思路，各区域不考虑边界与外区域联络，而独自形成自己区域的线性化模型，则数据的分布性则意味着增广雅可比矩阵和增广状态向量是分布的。因而要实现全网的特征值分析，就要研究能处理分布式雅可比矩阵和分布式迭代向量的特征值分布式并行算法。

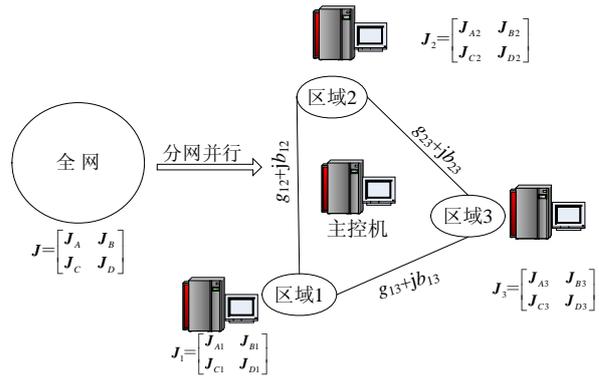


图 1 分网并行示意图
Fig. 1 Parallel computing by partition the whole power systems into several parts

2.2 分布式雅可比矩阵操作的并行实现

2.2.1 端口逆矩阵并行算法原理

端口逆矩阵并行算法由中国电力科学研究院周孝信院士于 2001 年提出，是线性方程组的一种并行求解算法。该方法的专利申请已受理(专利申请号：200410000154.7)。该方法最初用于解决电力系统潮流并行计算，后来被成功用于电力系统暂态稳定并行算法的开发。

将端口逆矩阵法运用到各种特征值并行算法中，即可解决特征值算法中分布式雅可比矩阵的并行实现问题。其原理和步骤：

(1) 将全网分为若干个子网，并为全网的协调计算设置一个主控机。如将某电网分为 3 个子网，分割后各子网存在若干个边界点，称之为端口点。设子网 1 的端口点为 $a_1^{(1)}$ ，子网 2 为 $a_4^{(2)}$ 和 $a_5^{(2)}$ ，子网 3 为 $a_7^{(3)}$ ，如图 2 所示。

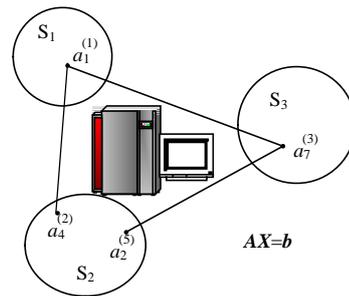


图 2 网络划分
Fig. 2 Partition the whole power systems into several parts

(2) 各子网分别向各边界点收缩，并将收缩后的端口逆矩阵汇总到主控机。如图 3 各子网中的 Z_{c1} 、 Z_{c2} 、 Z_{c3} 。

(3) 在主控机上用收缩后的端口逆矩阵代替各子网，对全网计算，得到各子网边界点的准确解。如图 3 中的 X'_1 、 X'_4 、 X'_5 、 X'_7 。

(4) 计算各子网边界的等效注入量 Δb_i ，发送

到各子网。在各子网上将外网的影响用等效注入量替代, 分别计算得到子网内所有变量的准确解。

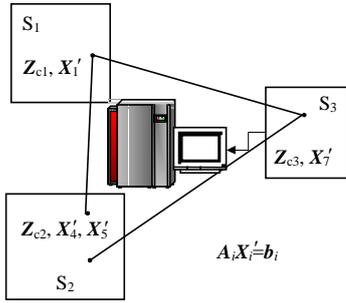


图 3 网络收缩

Fig. 3 Compress the whole power systems into the invert matrix

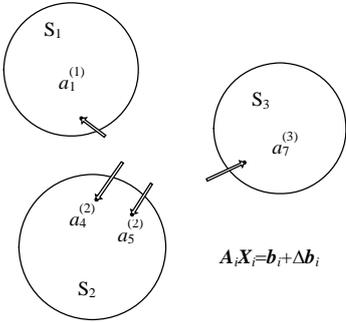


图 4 分网求解

Fig. 4 Solve each subnet independently

在上述步骤中, 最关键的是得到端口逆矩阵和等效注入量。端口逆矩阵可通过对 A_i 求逆, 提取出边界点子块得到。等效注入量则由式(10)得到:

$$\Delta b_c = -Y_c X_c = \begin{bmatrix} \Delta b_1 \\ \Delta b_2 \\ \Delta b_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 Y_c 为端口矩阵, 它汇总了各子网边界信息, 在本例中可定义如下:

$$Y_c = \begin{bmatrix} 0 & a_{14}^{(1,2)} & a_{17}^{(1,3)} \\ a_{41}^{(1,2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{57}^{(2,3)} \\ a_{71}^{(1,3)} & a_{75}^{(2,3)} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2.2 端口逆矩阵并行算法在特征值并行算法中的应用

由第 1 节可知, 大型稀疏矩阵的特征值算法实际是反复求解形如式(9)的代数方程组。经过分网后, 各区域分别形成本地的雅可比矩阵, 且全网和子网的雅可比矩阵关系为(设分为 3 个子网)

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & & \\ & J_2 & \\ & & J_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

对 J 进行分析可知, 由于动态元件的控制系统一般仅为本地控制或就近控制, 所以 J 非对角元仅为反映各区域耦合关系的联络线互导纳。因而将端口逆矩阵法运用于特征值并行算法中时, 端口矩阵即由联络线互导纳组成, 端口逆矩阵则由本地 J 求逆得到。

2.3 分布式迭代向量操作的实现

使用逆迭代转瑞利商迭代法和同时迭代法时, 与迭代向量相关的操作主要是迭代向量的规范化。对状态向量进行规范化的原因是^[15], 在求解主特征值及对应的特征值向量时, 如果特征值的模大于 1(小于 1), 迭代向量的各个不等于 0 的分量将随迭代次数 $k \rightarrow \infty$ 而趋向于无穷(或趋向于 0), 在计算机实现时, 就可能发生“溢出”现象。设迭代向量为 v ($v \neq 0$), 规范化过程即为求解如下向量 u :

$$u = v / \max(v) \quad (13)$$

式中 $\max(v)$ 表示向量 v 的绝对值或模最大的分量。简单说, 对迭代向量规范化最主要的就是找出迭代向量 v 的绝对值或模最大的分量。

向量规范化操作的一种并行实现方法是, 各子网将自己的迭代子向量发送到主控机, 主控机汇总得到完整的迭代向量, 找到迭代向量所有分量中模最大的值, 对迭代向量进行规范化, 再将规范化后的向量按块分发回各子网。操作对如图 5 所示。

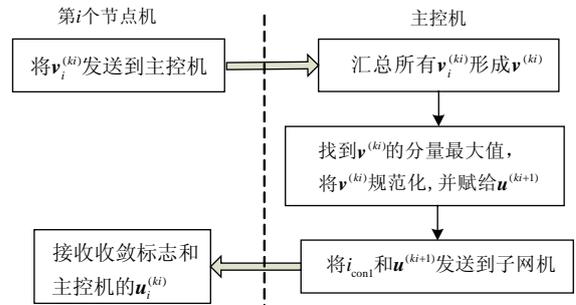


图 5 向量规范化并行实现方式 1

Fig. 5 Parallel implementation 1 of vector normalization

向量规范化操作的另一种并行实现方法是, 每个子网比较得到子向量的最大值, 发送到主控机进行比较。主控机比较得到最大值后, 发回节点机, 各节点机分量均作如式(13)的操作, 完成各子向量的规范化, 操作如图 6 所示。在这种方式下, 通讯次数为 2 次, 第 1 次通讯, 节点机只需将各子网上状态变量的最大分量(仅一个数据)发送到主控机; 第 2 次通讯, 主控机也只需将找到的状态变量的最大分量再发回各节点机。相对于方式 1, 发送的数据由向量变为了单个数据, 数据交换量显著减小。

但方式 1 下主控机上形成了完整的迭代向量，方式 2 下则没有。所以对于主控机需要完整迭代向量进行其它操作时，就必须得采用方式 1 来实现迭代向量的规范化。

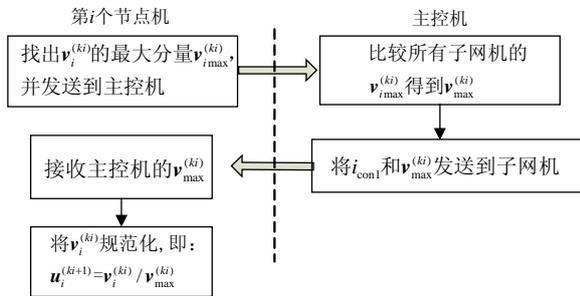


图 6 向量规范化并行实现方式 2

Fig.6 Parallel implementation 2 of vector normalization

2.4 特征值分布式并行算法的实现

基于以上分析，逆迭代转瑞利商迭代分布式并行算法的实现流程如图 7 所示。同时迭代法分布式并行算法的实现流程如图 8 所示。其中，左边为串行算法流程图，分网后每个子网机的流程基本和其类似；右边为考虑分网后各子网机和主控机之间的交互任务。可以看出，所实现的并行算法在原串行算法基础上改动不大，每次迭代主控机和子网机之间交互次数也不多。但需要注意的是，所实现算法为同步算法，因此各节点机的负载均衡问题可能会影响算法的性能，即网络划分不均时，各节点机会存在相互等待的现象，网络划分越不均，等待时间越长，计算总时间也越长。

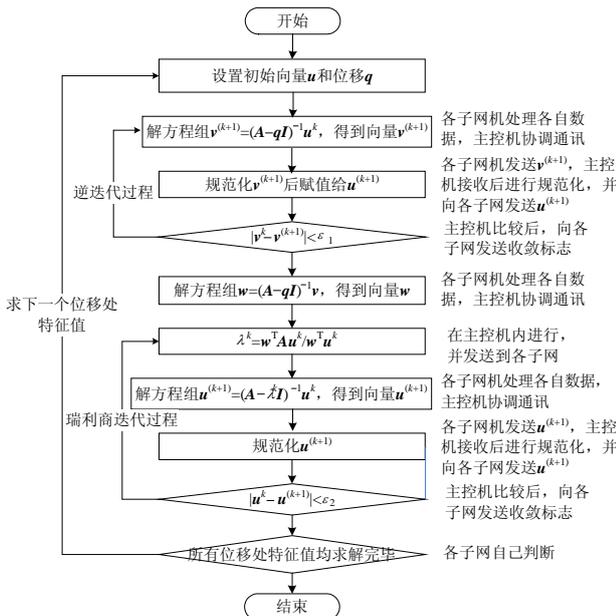


图 7 逆迭代转瑞利商迭代并行算法流程图

Fig. 7 Flowchart for inverse iteration/rayleigh quotient iteration parallel algorithm

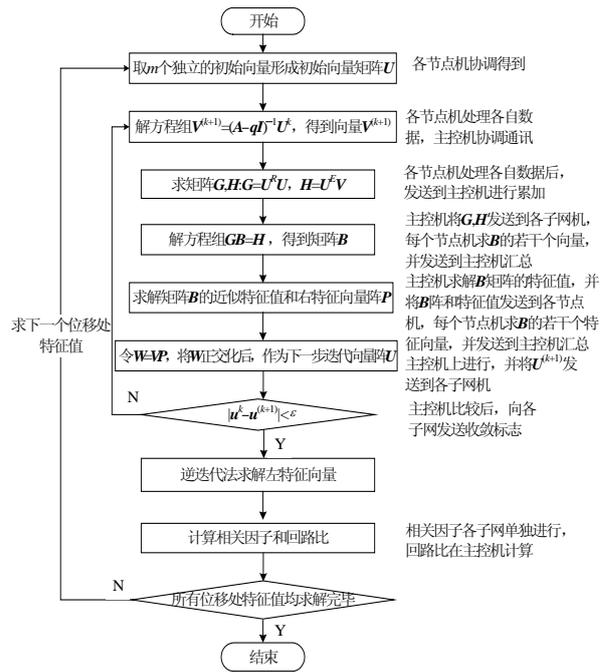


图 8 同时迭代法并行算法流程图

Fig. 8 Flowchart for simultaneous iteration parallel algorithm

3 算例仿真

在 Linux 操作系统下，基于 MPI 的并行编程环境，使用 Fortran 语言实现所提出的两种小干扰稳定分布式并行算法。所编写程序在 PC 机群的硬件平台上进行了测试，PC 机群节点间的互网络采用 Myrinet 网络。所用机群系统配置如表 1 所示。测试算例采用全国联网数据，表 2 为全国联网数据中各元件的数目。

表 1 机群系统详细配置
Tab. 1 Configuration of PC clusters

序号	配件名称	配置
1	管理节点 共 1 个	Intel Xeon 2.8GHz CPU (512KB L2 cache)
		1G DDR RAM, 36G SCSI 硬盘 100M 网卡 + 1000M 网卡
2	计算节点 共 8 个	2*Intel Xeon 2.4GHz CPU (512KB L2 cache)
		1G DDR RAM, 18G SCSI 硬盘 Myrinet 网卡
3	机群网络	带宽 2G bit/s、延迟 10μs 以内的 Myrinet 网络
4	操作系统	Linux
5	并行支持软件	MPI

表 2 全国联网元件数目
Tab. 2 Physical characteristics of test system

元件名称	母线	交流线	变压器	直流线	发电机	负荷
数量	4597	3950	2643	3	655	1562
元件名称	SVC	AVR	GOV	PSS	感应马达	—
数量	1	631	635	146	1207	—

系统内大多数发电机使用了详细的动态模型(5阶或 6 阶模型)模拟,机端配备了励磁调节器 AVR 和调速器 GOV,在部分机组上还配备了 PSS,其它小容量发电机使用简单模型 E'_q 恒定模拟。该系统增广雅可比矩阵阶数为 41345 阶、状态向量阶数为 13042 个,代数变量为 28303 个。

对该系统研究的方式是全国联网夏季方式,辛嘉线北送 $70 \times 10^4 \text{kW}$,三万龙线送 $100 \times 10^4 \text{kW}$,河北外送 $170 \times 10^4 \text{kW}$,山东送出 $100 \times 10^4 \text{kW}$,全网发电量为 $13147 \times 10^4 \text{kW}$ 。实际仿真计算中,华北山东—华中川渝之间的区间振荡模式频率为 0.17 Hz,由于辛嘉线功率较轻,该振荡模式阻尼较强。在该方式下还存在着一个阻尼较弱的区间内振荡模式,即鄂西北黄龙地区对三峡机组的振荡模式,振荡频率为 0.85 Hz。

为测试本文所研究的并行算法,在此全国联网数据上进行了多种网络分割方案的定义,其中包括 5 种按地理位置分割的方案和 4 种按节点分裂的自动分割方案。

现以 $(0+j*2\pi*0.85)$ 为初值,在该点附近分别用串行算法和并行算法搜索弱阻尼振荡模式。经比较,在不同分网情况下采用并行算法所得特征值结果和采用串行算法所得特征值结果完全一致,均能找到该模式 $-0.15+j5.37$ 。在复平面的 $(0+j*2\pi*0.1, 0+j*2\pi*0.7)$ 直线段上,设置 10 个初始点,每个初始点搜索 10 个特征值,总共搜索 100 个特征值,经比较,在不同分网情况下采用并行算法所得特征值结果和采用串行算法所得特征值结果完全一致。

分别记录上述两种情况下,串行算法和并行算法的特征值求解时间,并计算得到并行算法的并行加速比和并行效率,如表 3、4 所示。设方法 1 为迭代转瑞利商并行算法,方法 2 为同时迭代法并行算法。将表 3 中的计算时间和并行加速比用折线图

表 3 并行计算结果(1*1)
Tab. 3 Parallel results (1*1)

子网个数	计算时间/s		加速比		效率	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
1	30.12	31.17	—	—	—	—
2	8.82	9.62	3.41	3.24	1.71	1.62
3	6.90	7.60	4.37	4.10	1.46	1.37
4	3.42	3.96	8.81	7.88	2.20	1.97
5	2.64	3.09	11.41	10.08	2.28	2.02
6	3.12	3.91	9.65	7.97	1.61	1.33
7	2.43	3.71	12.40	8.40	1.77	1.20
8	2.63	4.10	11.45	7.61	1.43	0.95
9	2.19	4.05	13.75	7.70	1.53	0.86
10	2.22	4.73	13.57	6.59	1.36	0.66

表 4 并行计算结果(10*10)
Tab. 4 Parallel results (10*10)

子网个数	计算时间/s		加速比		效率	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
1	191.84	305.81	—	—	—	—
2	183.04	261.96	1.05	1.17	0.52	0.58
3	137.24	198.41	1.40	1.54	0.47	0.51
4	121.12	172.93	1.58	1.77	0.40	0.44
5	118.36	174.84	1.62	1.75	0.32	0.35
6	158.47	215.26	1.21	1.42	0.20	0.24
7	189.28	221.32	1.01	1.38	0.14	0.20
8	229.42	318.66	0.84	0.96	0.10	0.12
9	239.44	367.06	0.80	0.83	0.09	0.09
10	305.40	305.80	0.63	1.00	0.06	0.10

表示,如图 9、10 所示(有曲线标记的为迭代转 Rayleigh 商并行算法;无曲线标记的为同时迭代法并行算法)。

由图 7、8 可见,分网个数越多计算时间越短,但分 5 个子网时,加速比达到饱和,而且与第 2 节提到的一致,当网络划分不均时,各节点机存在相互等待的现象。

这两种并行算法求解在 1 个初始点附近搜索 1 个特征值时,通讯次数如表 5 所示。这两种算法的通讯量取决于网络划分后各子网的边界点个数,设边界点个数为 m ,则每次迭代通讯量大致与 m^2 成正比。由上可知,所实现的这两种分布式并行算法通讯次数有限,通讯量不大。

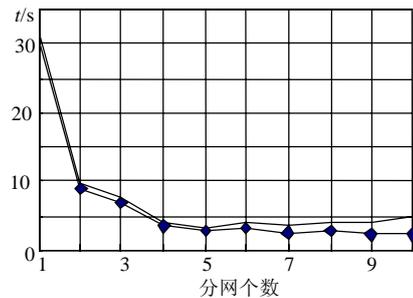


图 9 特征值搜索时间比较(1*1)
Fig. 9 Computation times of two parallel algorithms

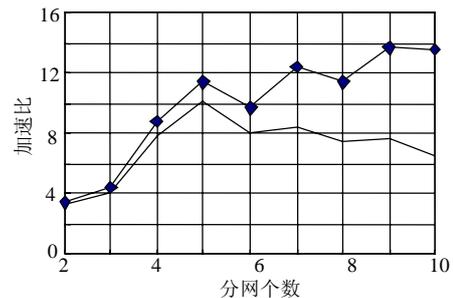


图 10 加速比比较 (1*1)
Fig. 10 Speedup of two parallel algorithms

由上述结果可看出, 在 1 个初始点附近搜索 1 个特征值时, 所提出的分布式并行算法均取得了较理想的加速比和并行效率, 说明所提出的分布式并行算法是适合大型互联电网的在线小干扰稳定分析的。对于日常离线计算搜索 10×10 这种大规模特征值扫描任务, 使用分布式并行算法效果并不是很理想, 最高加速比在 2 左右。由于离线计算不存在数据无法集中的问题, 所以这种离线计算搜索任务可采取任务并行的方式计算。

表 5 通讯次数统计(1*1)
Tab. 5 Communication times(1*1)

方法	分解部分	迭代次数	每次迭代的通讯次数	总通讯次数
迭代法转瑞利商	迭代部分	3	4	
迭代分布式并行算法	瑞利商迭代部分	2	5	32
	左特征向量求解	2	4	
同时迭代法分布	特征值求解	13	4	60
式并行算法	左特征向量求解	2	2	

4 结论

提出并实现了适用于大型互联电网小干扰稳定在线分析的“迭代法转 Rayleigh 商迭代法分布式并行算法”和“同时迭代法分布式并行算法”。所提出的这两种小干扰稳定分布式并行解法可使在保持在线数据按地理位置的空间分布性、不需要收集全网数据的前提下, 高效、准确、不遗漏的搜索出指定搜索范围内的特征值。应用所开发的小干扰稳定并行计算程序, 在实际大规模系统上进行了测试和分析, 获得了较理想的加速比和并行效率, 验证了本文所提算法的正确性和有效性, 且具备分布式计算的实际应用前景。

参考文献

- [1] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 14-20.
Bai Xuefeng, Ni Yixin. Survey on dynamic security assessment of power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 14-20(in Chinese).
- [2] 中国分布式计算总站 [EB/OL]. [2007-04-24]. <http://www.equin.com/info/n-1.htm>
- [3] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
Li Yalou, Zhou Xiaoxin, Wu Zhongxi. A parallel complex fault computation algorithm for large scale power system digital simulation [J]. Proceeding of the CSEE, 23(12): 1-5(in Chinese).
- [4] 薛巍, 舒继武, 王心丰, 郑纬民. 电力系统暂态稳定仿真并行算法的研究进展[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 177-182.

- Xue Wei, Shu jiwu. Wang xinfeng. Advance of parallel algorithm for power system transient stability analysis[J]. Journal of System Simulation, 2004, 24(9): 142-146(in Chinese).
- [5] Utku S, Chang H Y, Salama M, et al. Simultaneous iterations algorithm for general eigenvalue problems on parallel processors [C]. IEEE International Conference on Parallel Processing, St. Charles, Illinois, 1986.
- [6] Martins N, Lima L T G. Decomposition technique for efficient computation of small-signal stability problems in large power systems [C]. IASTED Conference on High Technology in the Power Industry, Scottsdale, Arizona, 1988.
- [7] Van Ness J E, Boratynska-Stadnicka D J. A partitioning algorithm for finding eigenvalues and eigenvectors[C]. Power Systems Computation Conference, Graz, Austria, 1990.
- [8] Campagnolo J M, Martins N, Pereira J L R, et al. Fast small-signal stability assessment using parallel processing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 949-956.
- [9] Campagnolo J M, Nelson Martins, Djalma M. Falcao, An efficient and robust eigenvalue method for small-signal stability assessment in parallel computers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 506-511.
- [10] Lima L T G, Bezerra L H, Tomei C, et al. New methods for fast small-signal stability assessment of large scale power system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1995, 10(4): 1979-1985.
- [11] Angelidis G, Semlyen A. Improved methodologies for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1990, PWRS-5(2): 1209-1217.
- [12] Sorensen D C. Implicit application of polynomial filters in a k-step Arnoldi method[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1992, 13(1): 357-385.
- [13] 杨永涛. 基于用户自定义模型的电力系统小干扰稳定性分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 1998.
Yang Yongtao. Power system small signal stability analysis based on User-Defined model[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 1998(in Chinese).
- [14] Martins N. Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1986, PWRS-1(1): 217-226.
- [15] 李庆杨. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

收稿日期: 2007-08-14。

作者简介:

李 芳(1979—), 女, 博士研究生, 从事电力系统小干扰稳定分析、电力系统无功优化等方向的研究, lifang@epri.ac.cn;

郭 剑(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析及软件开发;

吴中习(1941—2007), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析及控制;

周孝信(1940—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究领域为电力系统分析与控制、电力系统仿真以及 FACTS 技术等。

(编辑 王剑乔)