

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.023

基于 Adomian 分解方法的暂态稳定 并行仿真研究*

刘云飞¹, 江全元^{1*}, 陈跃辉², 张文磊², 宋军英²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:针对目前大规模电力系统难以实现快速实时仿真的问题,提出了一种基于 Adomian 分解方法的暂态稳定仿真并行算法。首先,在考虑节点权重的同时,采用 METIS 将大系统拆分成若干子系统,然后采用波形松弛方法对系统进行并行求解。为加速各子系统的迭代过程,所有状态变量经过隐式梯形积分格式差分后,采用基于 Adomian 分解的迭代算法配合非诚实牛顿算法进行了求解;为了进一步提高波形松弛法的整体收敛性,同时还使用了窗口方法、预处理方法与波形预测方法;最后,采用 2 383 节点和 12 685 节点两个算例进行了测试,发电机采用复杂模型,同时考虑励磁调速系统,并通过共享内存的并行环境加以实现。测试研究结果表明,上述算法可以取得较为理想的收敛速度和并行加速比,同时实现了上万节点的超实时仿真。

关键词: Adomian 分解; 波形松弛法; 并行计算; 共享内存

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0649-06

Parallel transient stability simulation based on adomian decomposition method

LIU Yun-fei¹, JIANG Quan-yuan¹, CHEN Yue-hui², ZHANG Wen-lei², SONG Jun-ying²

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at the problem that fast simulation for large-scale power systems is hard to realize, a parallel transient stability simulation based on Adomian decomposition method was presented. First of all, a power system described by large-scale differential-algebraic equations (DAE) was decomposed into several subsystems by METIS with the weight of all nodes taken into consideration. Waveform relaxation method was adopted for parallel implementation and all subsystems were solved using Adomian decomposition method combined with very dishonest newton (VDHN) method independently after the state variables were discretized by implicit-trapezoidal rule. Moreover, to accelerate convergence of the system, windowing, preconditioning and waveform prediction were adopted. Finally, the proposed algorithm was verified by two large-scale test cases with 2 383 buses and 12 685 buses and complex model was adopted for generators as well as the exciting and governing systems. The parallel efficiency was further improved by a shared-memory parallel environment. The results indicate that the proposed method achieves in increasing convergence speed and parallel speedup effectively, and super real-time simulation is realized.

Key words: Adomian decomposition; waveform relaxation; parallel computing; shared-memory

0 引 言

为满足电源大规模集中投产和用电负荷增长的需

要,我国电网规模不断扩大。截至 2011 年底,除台湾地区外,全国联网络局已经形成^[1],而且对电网的安全性和可靠性要求也在不断提高。所以,寻找一种快

收稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA05A118); 国家自然科学基金资助项目(50977082)

作者简介: 刘云飞(1988-),男,吉林长春人,主要从事电力系统暂态稳定并行计算方面的研究. E-mail: lya1988129@aliyun.com

通信联系人: 江全元,男,教授,博士生导师. E-mail: jqy@zju.edu.cn

速收敛、高度并行、适合大规模系统的暂态稳定算法就显得尤为重要。

国内外很多学者在暂态稳定算法方面开展过相关研究^[2-4],其目的就是为了能够快速求解大规模电力系统,实现(超)实时仿真。然而,随着并行计算机的快速发展,并行算法已经成为处理暂态稳定问题的主流方法。并行方式从原理上大致可分为3类:空间并行^[5]、时间并行^[6-7]和波形松弛^[8-10](Waveform Relaxation, WR)。但不论采用何种并行方式,都面对对微分代数方程组(DAE)初值问题的求解。交替求解和联立求解是求解该类问题的主流方法,而由于联立求解不存在交接误差,在对仿真精度要求较高时被广泛采用^[11]。其基本过程为:先用隐式积分公式将微分方程组差分,然后和代数方程组联立,得到一个非线性方程组,而现有的研究往往采用牛顿法(Newton's method)迭代求解该非线性方程组。其优点是迭代函数简单,所以得到广泛应用。但是一些对收敛速度要求较高的场合,牛顿法往往不能满足收敛性的要求。

近几百年来,数学工作者们从来没有停止对新型或高阶收敛的迭代法的研究。上世纪80年代初,美国数学家G. Adomian^[12]提出了一种解非线性方程(组)问题,而后以他名字命名的Adomian分解方法。该方法的本质是利用一个无穷级数去逼近问题的精确解。通过构造不同形式的Adomian多项式,可以得到不同的迭代格式和收敛精度。文献[13]和文献[14]分别提出了各自的分解格式,进而得到了不同的迭代形式。Changbum Chu在文献[15]中指出,利用Adomian级数技巧构造的迭代,只要展开的项数足够多,就可以得到任意精度的解。文献[16]在原Adomian分解法上加以修正,得到了一种收敛更快、精度更高的求解非线性方程的迭代算法,并可推广到非线性系统的求解。

本研究采用波形松弛法作为并行框架,将Adomian分解方法配合非诚实牛顿算法(Verily dishonest Newton method, VDHN)应用于各个子系统的求解。同时为了进一步加快内部收敛,本研究还使用预处理过程和初值猜测提高整体收敛性。此外,本研究采用OpenMP的共享内存并行环境,以提高本研究的并行度。

1 Adomian 分解方法

本节将对Adomian多项式和基于Adomian级数分解的迭代算法作简单介绍。

1.1 Adomian 多项式及其计算

考虑非线性方程:

$$f(x) = 0 \quad (1)$$

式中: f —连续可微函数。

将方程(1)改写成如下的形式:

$$x = c + N(x) \quad (2)$$

式中: c —常数, N —非线性部分。

Adomian级数法首先把 x 分解为如下的无穷级数形式:

$$x = \sum_{i=0}^{\infty} x_i \quad (3)$$

而非线性部分 N 分解为一个函数项级数:

$$N(x) = N\left(\sum_{i=0}^{\infty} x_i\right) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \quad (4)$$

式中: A_i —依赖于 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i$ 的Adomian多项式,其形式如下:

$$A_n = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{d\lambda^n} \left[N\left(\sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i x_i\right) \right]_{\lambda=0}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

由式(2~4)可知:

$$\sum_{i=0}^{\infty} x_i = c + \sum_{i=0}^{\infty} A_i \quad (6)$$

从而级数形式解的每项 x_i 与Adomian多项式之间的关系为:

$$x_0 = c, x_1 = A_0, \dots, x_{n+1} = A_n, n = 0, 1, 2, \dots$$

解的部分和为:

$$X_m = x_0 + \dots + x_m = c + A_0 + A_1 + \dots + A_{m-1} \quad (7)$$

且有:

$$\lim X_m = x \quad (8)$$

1.2 非线性方程组的Adomian级数法

研究者得到了Adomian分解法的构造,就可以通过该方法求解非线性方程式(1)。根据不同的分解方法,可以得到Adomian级数的不同形式,进而得到相应的迭代格式。其中Changbum Chu提出了如下分解:设 α 是方程式(1)的一个单根, γ 是充分靠近 α 的一个初值。将 $f(x)$ 在 γ 处一阶Taylor展开,可得到方程式(1)的耦合形式:

$$f(\gamma) + f'(\gamma)(x - \gamma) + g(x) = 0 \quad (9)$$

其中,余项为:

$$g(x) = f(x) - f(\gamma) - f'(\gamma)(x - \gamma) \quad (10)$$

方程式(9)可以改写为式(2)的形式:

其中:

$$c = \gamma - \frac{f(\gamma)}{f'(\gamma)}, N(x) = -\frac{g(x)}{f'(\gamma)}$$

可以得到Adomian多项式的前几项的具体表达式为:

$$\begin{cases} A_0 = N(x_0) = -\frac{g(x_0)}{f(\gamma)} = -\frac{f(x_0)}{f(\gamma)}, \\ A_1 = x_1 N'(x_0) = A_0 N'(x_0) \\ = -\frac{f(x_0)}{f(\gamma)} + \frac{f(x_0)f'(x_0)}{[f(\gamma)]^2}, \\ \dots \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)可知, X_m 可以作为 x 的一个近似解, 实际所需的展开项很少时就可以达到所需要的精度。利用上述关系, 取不同的项数来近似方程的解, 就可以得到不同精度的各种迭代格式。

当 $m = 0$ 时:

$$x \approx x_0 = c = \gamma - \frac{f(\gamma)}{f'(\gamma)} \quad (12)$$

从而得到二阶收敛的 Newton 迭代序列:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

当 $m = 1$ 时:

$$x \approx x_0 + x_1 = c + A_0 = \gamma - \frac{f(\gamma)}{f'(\gamma)} - \frac{f(x_0)}{f'(\gamma)} \quad (14)$$

得到两步三阶收敛的迭代序列:

$$\begin{cases} y_n = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \\ x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} - \frac{f(y_n)}{f'(x_n)} \end{cases} \quad (15)$$

由于每一个子系统都需要求解一个相对较小规模的 DAE 系统, 差分化后得一个非线性方程组。本研究采用式(15)的两步迭代格式求解对各个子系统, 该格式只需求解一次雅克比矩阵, 与传统牛顿迭代相比, 仅仅增加了一次前推回代的过程。为了进一步减少 LU 分解的次数, 本研究采用 VDHN 算法, 即在系统结构不发生变化的情况下, 迭代次数没有超出设定阈值时, 不更新雅克比矩阵。

2 暂态稳定并行仿真流程

本研究采用波形松弛法作为本研究的并行方法, 同时采用预处理和波形预测加速收敛。笔者采用商业软件将大系统拆分成若干子系统, 子系统内部采用上节提到的基于 Adomian 级数分解的迭代算法求解, 最后在共享内存平台上并行实现。

2.1 波形松弛方法及其加速方法

和许多大型电路系统的仿真模拟或多体动力学模拟过程一样, 电力系统暂态稳定问题可以用一系列指标 1 型、非线性、半隐式微分代数方程来描述, 可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{V}(t)) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{V}(t)) \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, t \in [0, T] \end{cases} \quad (16)$$

式中: $T > 0$; $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ —状态变量, 用来描述发电机和励磁调速系统; $\mathbf{V}(t) \in \mathbf{R}^m$ —代数变量, 即节点电压; \mathbf{x}_0 —状态变量初值。

用波形松弛法求解如式(16)所示的系统, 可以将其分解成 p 个子系统, 其过程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_p, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_i, \dots, \mathbf{V}_p) \\ 0 = \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_p, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_i, \dots, \mathbf{V}_p) \\ \mathbf{x}_i(0) = \mathbf{x}_{i,0}, i = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (17)$$

本研究采用雅克比 (Jacobi) 迭代求解, 雅克比迭代是松弛算法中最基本而有效的迭代方法, 而且是天然并行的算法, 其过程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i^{k+1} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_1^k, \dots, \mathbf{x}_i^{k+1}, \dots, \mathbf{x}_p^k, \mathbf{V}_1^k, \dots, \mathbf{V}_i^{k+1}, \dots, \mathbf{V}_p^k), \\ 0 = \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_1^k, \dots, \mathbf{x}_i^{k+1}, \dots, \mathbf{x}_p^k, \mathbf{V}_1^k, \dots, \mathbf{V}_i^{k+1}, \dots, \mathbf{V}_p^k), \\ \mathbf{x}_i^{k+1}(0) = \mathbf{x}_{i,0}, i = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (18)$$

本研究把整个时间段分为若干窗口, 在每个窗口内波形收敛后, 再进行下一窗口的迭代, 以提高整体收敛性。窗口长度的选取会影响到迭代的快慢和并行效率, 但是由于最佳窗口长度求解极为复杂^[17], 工程上难以实现, 故本研究选取固定的窗口长度。

本研究同时采用文献[18]中的预处理方法加速波形松弛法的收敛。其格式如下:

$$\mathbf{V}^{k+1}(t_n) = \mathbf{V}^{k+\frac{1}{2}}(t_n) - \mathbf{P}^{-1} \mathbf{g}[(\mathbf{x}^{k+\frac{1}{2}}(t_n), \mathbf{V}^{k+\frac{1}{2}}(t_n))] \quad (19)$$

式中: \mathbf{P} —预处理子, $\mathbf{P} = \partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) / \partial \mathbf{V}$ 。

每次迭代之后增加如式(19)的一部求解, 可以将每个子系统的电压信息传递给其他分组, 从而加速收敛。

由于波形松弛法在迭代开始时每个子系统需要将其子系统波形的“猜测值”作为初值, 本研究采用 3 点 Lagrange 型多项式插值公式对所有变量在窗口内的波形进行预测, 以达到减少迭代次数的目的, 格式如下:

$$y_{n+1} = y_{n-2} - 3y_{n-1} + 3y_n \quad (20)$$

式中: y_n —第 n 次迭代状态变量和非状态变量的值。

2.2 并行算法流程

综上所述, 本研究算法流程如图 1 所示。

并行前, 首先需要对系统进行拆分, 现有的系统分块方法主要分为两种: ①采用商业软件对系统进行分块; ②按照地理分区对系统进行分组。以上两种方法都存在缺陷, 对于空间并行方法, 两种分组方法无法在兼顾协调子网(关联子网)规模的大小的同时, 将各个进(线)程的任务平均分配; 而对于常规的波形松弛方法, 两种方法都不能保证良好的收敛性能。国内外有

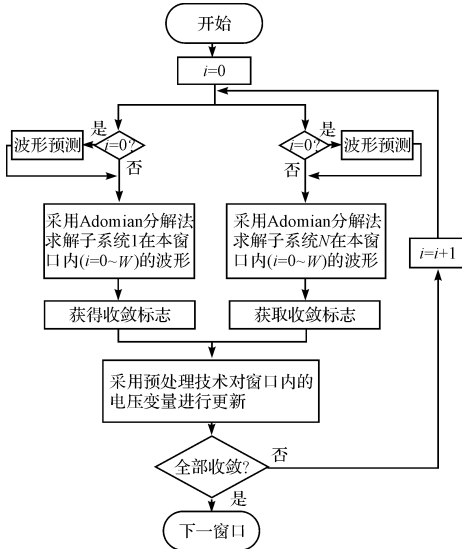


图 1 算法流程

N —分组数; W —窗口长度

部分学者针对电力系统分区策略开展相关研究^[19-20]。

由于本研究采用了预处理的加速方法,这样每个节点的“信息”会在每次迭代后第一时间传递到其他分组,大幅缩短了信息的传递距离,提高了收敛性。故本研究采用分图软件 METIS^[21]对原系统进行拆分,尽可能使各线程任务分配更加均匀,使各个子系统内的变量数尽可能达到平衡。因此需要考虑每个节点的权重,即每个节点所含的状态变量和电压变量的个数。得到 N 个分组后,交给 N 个线程进行并行求解。

在每次开始新的窗口计算时,本研究先采用式(20)对波形进行外推。各个子系统采用隐式梯形积分公式对状态变量进行差分化处理。每次求解之后,各个线程分别对各自的子系统进行收敛判断,并得到收敛标志。在全部分组收敛后,系统开始下一个窗口的计算。

2.3 并行环境的选择

由于每次迭代,所有分组都需要交换数据、传递波形,如果采用分布式内存的并行方式,就需要各个节点之间频繁地通信,通信时间所占的比重会很大,会导致并行效率很低。

OpenMP^[22]是一个共享存储并行系统上的应用编程接口,是基于线程的并行编程模型。OpenMP 使用 Fork-join 并行执行模型,该模型如图 2 所示。由于 OpenMP 是基于共享内存的编程模型,其更适合用于本研究这种细粒度、需要密集通信的并行环境。

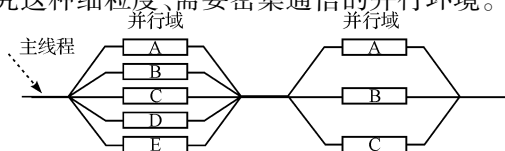


图 2 OpenMP 的 Fork-join 模型

3 算例测试

本研究的算法通过 C++ 语言编程实现,采用的测试环境为 Beowulf 集群计算机,测试单节点为 8 路 8 核 Intel Xeon CPU 的 SMP(对称多处理)结构,同时采用 Linux 操作系统,并调用 KLU^[23] 解法器求解线性方程组。分别采用 Matpower^[24] 中的 2 383 节点算例与一个 12 685 节点算例对算法进行测试,测试算例如表 1 所示。其中发电机采用 6 阶模型,励磁采用 4 阶模型,调速器采用 1 阶模型。仿真时间为 20 s,仿真步长 0.02 s,窗口长度 0.1 s,收敛精度 0.000 1。

表 1 测试算例

算例	节点个数	支路条数	发电机组数	DAE 方程数
Case1	2 383	2 896	327	8 363
Case2	12 685	23 005	1 340	40 110

本研究采用 METIS 对两个算例进行分组,最大分组数为 16,分组结果如表 2 所示。为了表征分组的平均程度,定义如下变量:

$$Balance = \frac{\text{最大分组变量数}}{\text{最小分组变量数}}$$

当变量 $Balance$ 接近 1 时,表示分组越均匀。

表 2 分组结果

总变量		4 分组	8 分组	12 分组	16 分组
Case1	8 363	最大值 2 092	1 046	698	531
		最小值 2 090	1 044	696	515
		$Balance$ 1.00	1.00	1.00	1.03
Case2	40 110	最大值 10 028	5 163	3 346	2 509
		最小值 10 027	4 785	3 340	2 506
		$Balance$ 1.00	1.08	1.00	1.00

为了验证算法精度,本研究采用经典串行的 VDHN 算法作为比对算法,以 Case2 上万节点系统为例进行比对。本研究选取了两种故障,分别为 0.1 s 切除故障和 0.5 s 切除故障,其中某两台发电机的相对功角误差如图 3 所示,从图 3 中可以看出,最大误差为 6.05×10^{-6} rad,符合精度要求。

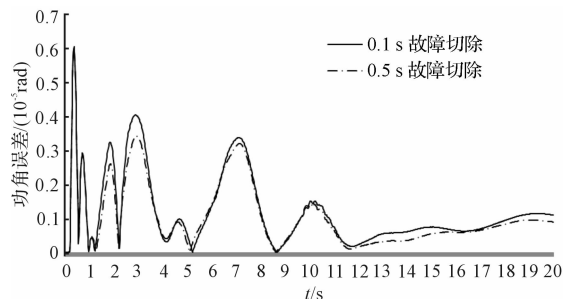


图 3 功角误差曲线

为验证 Adomian 分解法的有效性,本研究仍采用

VDHN 算法求解子系统,作为对比,并行时间如表3所示。从表3可以看出,Adomian 分解法可提高算法效率,最多可达39.17%,验证了本研究算法的有效性。

表3 两种算法的求解时间对比(单位:s)

		4 分组	8 分组	12 分组	16 分组
Case1	VDHN	5.97	3.76	3.30	3.01
	Adomian	4.79	3.05	2.47	2.19
Case2	VDHN	18.50	10.14	8.09	7.07
	Adomian	14.40	7.96	6.16	5.08

此外,从表3可以看出,通过本研究算法已实现了上万节点系统的超实时仿真。

本研究算法的并行度如图4所示。其中并行加速比定义如下:

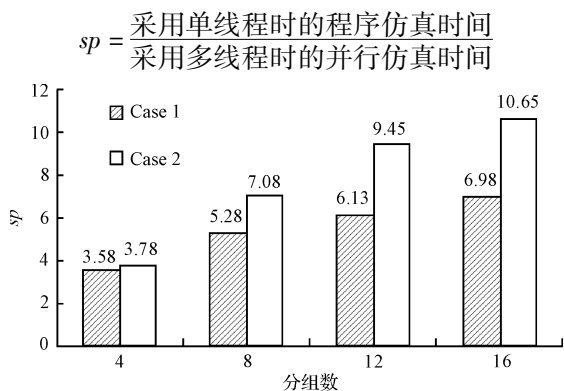


图4 并行加速比

从图4可以看出,本研究采用的 OpenMP 并行方式可以获得较高的并行加速比。并且本研究算法对更大规模的系统有更好的适应性,在16分组时可获得10.65的并行度。现有的空间并行算法中,最高并行度可达9.82^[25],现有波形松弛算法在相同加速比定义的情况下,最高加速比也低于10^[26](2500节点系统,20进程并行)。

4 结束语

本研究提出了一种基于 Adomian 分解的迭代算法求解大规模电力系统暂态稳定问题的并行算法。该算法采用波形松弛法作为本研究的并行框架,同时采用预处理和波形预测进一步加快收敛过程。此外,本研究采用 OpenMP 的共享内存并行环境,来提高本研究的并行度。

通过对两个较大算例的测试,证明本研究算法在保证算法精度的同时,还获得较高收敛速度和并行效率,最终实现了上万节点系统超实时仿真,充分说明了本研究算法的有效性和对大规模系统的适应性。

参考文献(References):

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社, 2012:345.
- [2] 赵志奇,王建全. 隐式精细积分算法在电力系统暂态稳定分析中的应用[J]. 机电工程,2012,29(5):580-583.
- [3] 武同心,吕晓祥,王建全. Duhamel 数值积分算法在电力系统暂态稳定分析中的应用[J]. 机电工程,2013,30(6):741-745.
- [4] FABOZZI D, CHIEH A S, HAUT B, et al. Accelerated and localized newton schemes for faster dynamic simulation of large power systems [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2013,28(4):4936-4947.
- [5] QUANYUAN J, HAN J. OpenMP-based parallel transient stability simulation for large-scale power systems [J]. **Science China: Technological Sciences**, 2012 (10): 2837-2846.
- [6] HONG C. Implementation of parallel-in-time newton method for transient stability analysis on a message passing multi-Computer[C]// International Conference on Power System Technology,2002:1239-1243.
- [7] 洪潮. 电力系统暂态稳定计算的一种时间并行算法[J]. 电网技术,2003(4):31-35.
- [8] ILIC SPONG M, CROW M L, PAI M A. Transient stability simulation by waveform relaxation methods[J]. **Power Systems, IEEE Transactions on**,1987,2(4):943-949.
- [9] 薛巍,舒继武,严剑峰,等. 基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):38-43.
- [10] 林济铿,李杨春,罗萍萍,等. 波形松弛法的电力系统暂态稳定性并行仿真计算[J]. 电工技术学报,2006,21(12):47-53,65.
- [11] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [12] ADOMIAN G, RACH R. On the solution of algebraic equations by the decomposition method [J]. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**,1985,105(1):141-166.
- [13] ABBASBANDY S. Improving Newton-Raphson method for nonlinear equations by modified Adomian decomposition method[J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2003,145(2-3):887-893.
- [14] NOOR M A. New family of iterative methods for nonlinear equations[J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2007(190):553-558.
- [15] CHUN C. Iterative methods improving newton's method by the decomposition method[J]. **Computers & Mathematics with Applications**,2005,50(10-12):1559-1568.
- [16] BABOLIAN E, BIAZAR J. Solution of nonlinear equations

- by modified adomian decomposition method[J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2002, 132(1):167-172.
- [17] 蒋耀林. 波形松弛方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] PRUVOST F, LAURENT-GENGOUX P, MAGOULES F, et al. Accelerated waveform relaxation methods for power systems[C]// 2011 International collferen on Electrical and Cohtrol Engineering, 2011:2877-2888.
- [19] 舒继武, 薛 巍, 郑纬民. 一种电力系统暂态稳定并行计算的优化分区策略[J]. 电力系统自动化, 2003(19):6-10.
- [20] ZECEVIC A I, GACIC N. A partitioning algorithm for the parallel solution of differential-algebraic equations by waveform relaxation[J]. **Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications**, **IEEE Transactions on**, 1999, 46(4):421-434.
- [21] GEORGE K V K. METIS: A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices Version4[M]. 1998.
- [22] BARBARA C G J A R. Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming[M]. Cambridge, MAL: MIT Press, 2007.
- [23] DAVO T A, NATARAJAN E P. Algorithm 907: KLU a direct sparse solver for circuit simulation problems[J]. **ACM Transactions on Mathematical Software**, 2010, 3(37):1-17.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO S X, NCHEZ C E, et al. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. **Power Systems**, **IEEE Transactions on**, 2011, 26(1):12-19.
- [25] JIWU S, WEI X, WEIMIN Z. A parallel transient stability simulation for power systems[J]. **Power Systems**, **IEEE Transactions on**, 2005, 20(4):1709-1717.
- [26] HOU L, BOSE A. Implementation of the waveform relaxation algorithm on a shared memory computer for the transient stability problem[J]. **Power Systems**, **IEEE Transactions on**, 1997, 12(3):1053-1060.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

刘云飞, 江全元, 陈跃辉, 等. 基于 Adomian 分解方法的暂态稳定并行仿真研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5):649-654.

LIU Yun-fei, JIANG Quan-yuan, CHEN Yue-hui, et al. Parallel transient stability simulation based on adomian decomposition method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(5):649-654.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 594 页)

致 谢

值此论文完稿之际, 谨向在课题与论文完成过程中给予指导、关心、支持和帮助的老师、同学、朋友表示衷心的感谢!

首先要感谢我的导师王忠飞老师, 没有他的悉心指导和不断的鼓励, 本论文不可能顺利完成。另外, 还要感谢同实验室的师弟、师妹以及其他同学的帮助。

参考文献 (References):

- [1] WHITNEY D E. Perspective and state in robot force control[J]. **International Journal of Robotics Research**, 2007, 6(1):3-14.
- [2] NATALE C. Interaction Control of Robot: Six degrees-of-freedom[M]. Springer, 2006.
- [3] SEUL Jung, HSIA T C. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2004, 12(3):474-483.
- [4] YIN Y H, XU Y, JIANG Z H, et al. Tracking and Understanding Unknown Surface With High Speed by Force Sensing and Control for Robot[J]. **IEEE Senors Journal**, 2012, 19(9):2910-2916.
- [5] PEREZ A, MCCARTHY J M. Dimensional Synthesis of Spatial RR Robots[M]. *Advances in Robot Kinematics*, Lenarcic J, Piran-Portoroz, Slovenia, 2000.
- [6] DOULGERI Z. Adaptive control of robot with on-line learning of surface[J]. **Automatica (Elsevice)**, 2009, 45(10):2374-2382.
- [7] 黄晓曦. 机器人主动柔顺控制研究[M]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 殷跃红, 尉忠信, 朱剑英. 机器人柔顺控制研究[J]. 机器人, 1998, 20(3):232-240.
- [9] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000:5-9.
- [10] 陈伟强, 计时鸣, 金明生, 等. 气囊连续进动抛光的转换模块设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(1):24-28.

[编辑: 张 翔]