

基于 IRAM 的大型电力系统特征值在线并行计算策略

王永昆¹, 鲍颜红^{1,2}, 方勇杰^{2,3}, 郑伟¹, 徐伟¹

(1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对离线小干扰稳定分析无法满足电力系统时变的情况, 提出了一种基于隐式重启动 Arnoldi 算法 (IRAM) 的特征值在线计算策略。该策略根据前一断面小干扰分析结果, 预估当前断面特征值分布情况, 建立了位移点选择的多目标优化数学模型, 并采用线性加权法和法求解该模型。按照预估计算量大小逐个分配计算任务, 相比现有的任务分配方式, 可最大限度地减少 CPU 闲置时间。对南方电网在线数据进行了分析计算, 计算结果表明, 所提策略可对小干扰稳定关注的区域内的特征值进行全面搜索, 相对于平均任务分配策略和现有的不公平任务分配策略, 其耗时更短。

关键词: 电力系统; 小干扰稳定; 线性加权; 在线计算; 并行计算; 稳定; 特征值

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.023

0 引言

区域电网互联, 特别是特高压交直流电网的建设以及大规模风电的接入使得电网的低频振荡问题非常突出, 进行电力系统小干扰稳定在线分析对预防互联电网弱阻尼引起的低频振荡和连锁故障具有重要的现实意义^[1-2]。

自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者对大型电力系统特征值计算的方法进行了大量的研究^[3-5], 目前小干扰稳定特征值离线计算方法已经很成熟。但是基于离线数据的分析计算并不能反映系统时变的特性, 为满足在线小干扰分析^[6-7]的要求, 提出了并行计算和分布式计算的方法。文献[8]介绍了 BI 迭代法、BI 迭代法/逆迭代混合算法的并行化处理, 该算法是求解一个特征值的并行实现方法, 对原有串行代码改动较大, 实际的加速比并不高。文献[9]提出了按区域分网的分布式并行算法, 该算法将每个区域设为一个子网, 子网仅计算本区域数据, 通过主控机的协调和交互来完成全网的小干扰稳定分析, 但是该算法也需要对原有串行算法进行大量改动, 并且网络划分越不均, 则各节点机相互等待时间越长, 计算效率也不高。文献[10]将 AESOPS 算法与带边界分区的互联电网切分方法相结合, 提出了分布式的特征值算法, 但该算法在迭代过程中需要多次交换数据, 网络通信的延迟是分布式计算主要的性能瓶颈。文献[11]基于多核 CPU 并行计算技术提出了多进程的特征值并行搜索算法, 该算法将特征值搜索

点根据 CPU 核的数量和设定的任务分配策略分配给各进程, 各 CPU 核的计算与串行计算完全相同, 不但保持了串程序的完整性, 而且保证了计算效率。

本文在文献[11]的理论基础上, 提出了一种基于位移求逆隐式重启动 Arnoldi 算法 IRAM (Implicitly Restarted Arnoldi Method) 的特征值在线并行计算策略, 利用前一时刻断面分析结果对特征值位移点 (即搜索点) 进行了优化选取, 并且介绍了一种新的任务并行分配策略, 可进一步提高计算速度。

1 位移求逆 IRAM

IRAM 在收敛性能和计算速度上较优越^[12-13], 但一次位移求逆 IRAM 只能计算给定位移点附近一定数量的特征值, 为求解搜索区域内所有关键特征值, 需要执行多次位移求逆 IRAM, 以使搜索圆盘尽量覆盖整个区域^[14] (复平面上位移点附近的一个圆内的特征值已被完全搜索)。目前位移点的选择方法有中国电力科学研究院的 PSD-SSAP^①采用的静态设置方法和国网电力科学研究院的 FASTEST^②及上海交通大学的小干扰稳定分析包 SSAP^[15]采用的动态设置方法。前者是对整个频段等间隔地设置位移点, 它的缺点是需凭经验或反复尝试来选择位移点的数量, 若位移点数量过少, 将导致严重漏根现象, 反之则会由于特征值的重复搜索而浪费时间。后者是在频段两侧取位移点, 若任意 2 个圆盘不相交, 则在中间点再取 1 个位移点, 直至所有圆盘均相交, 但该方法不易在并行计算中实现。

收稿日期: 2013-04-01; 修回日期: 2014-01-20

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 (SGCC-MPLG001-003-2012)

Project supported by Major Projects of State Grid Corporation of China (SGCC-MPLG001-003-2012)

① 中国电力科学研究院系统所. PSD-SSAP 电力系统小干扰稳定性分析程序用户手册. 2009.

② 国网电力科学研究院稳定所. FASTEST 小扰动稳定分析技术手册. 2007.

2 特征值在线并行计算策略

定义预估圆盘为复平面上以位移点为圆心、半径 $r=\omega/k$ 的圆,如图 1 所示。其中, ω 为位移点的虚部, k 为给定阻尼比范围对应的恒阻尼线斜率。

$$k=\sqrt{1-\xi^2}/\xi \quad (1)$$

其中, ξ 为给定阻尼比范围边界。

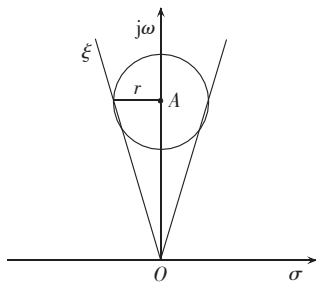


图 1 预估圆盘示意图

Fig.1 Schematic diagram of predict circle

系统结构和运行参数的变化对特征值的阻尼影响较大,对特征值的频率影响较小^[16]。假定系统运行方式没有发生大的改变,则可根据前一时刻断面的特征值计算结果,得到指定位移点的预估圆盘内的特征值数量,进而为当前时刻断面计算时位移点及特征值数量的选取提供依据。

根据电力系统的特点,通常在小干扰稳定分析中区内振荡模式较多,而区间振荡模式较少^[10],因此中高频段位移点的预估圆盘半径与实际圆盘半径相差不大。对于小型电网,特征值分布稀疏,预估圆盘与实际圆盘误差较大,可能会导致重复搜索或遗漏关键根,效率降低。

2.1 主位移点的选择策略

位移点的选择和数量对并行算法的性能起着重要作用。为减少特征值的重复搜索,选择的位移点应满足预估圆盘相交面积较少;为尽可能多地搜索到特征值,选择的位移点应满足预估圆盘相交交点距复平面虚轴较远。已知第 1 个位移点位置及预估圆盘半径,可将第 2 个位移点位置的选择,转化为求解两圆盘相交面积极小且交点阻尼比绝对值极大的多目标优化问题。

2.1.1 主位移点选择的数学模型

如图 2 所示,搜索区域内两相邻位移点的搜索圆盘相交,其圆心(即位移点)分别为 B 和 C ,半径分

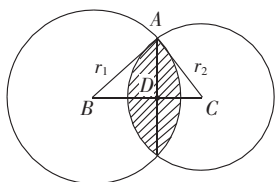


图 2 主位移点选择示意图

Fig.2 Schematic diagram of main searching point selection

别为 r_1 和 r_2 , 圆心距 $d=BC$, 交点 A 到两圆心所在直线的距离 $h=AD$, 两圆相交部分(即阴影部分)面积为 S 。

由图 2 可建立如下等式:

$$\begin{cases} \sqrt{r_1^2-h^2} + \sqrt{r_2^2-h^2} = d \\ S = r_1^2 \arcsin(h/r_1) + r_2^2 \arcsin(h/r_2) - hd \end{cases} \quad (2)$$

在复平面中又有:

$$d=k(r_1-r_2) \quad (3)$$

由式(1)–(3)消去 d 和 r_2 , 可定义:

$$\begin{cases} f_1(h)=S(h) & f_1(h) \in (0, \pi r_1^2) \\ f_2(h)=h & f_2(h) \in (0, r_1) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $S(h)$ 为两圆相交部分面积, 是关于 h 的一元表达式, 由式(1)–(3)消去 d 和 r_2 得来。

计算目标是使 $f_1(h)$ 尽量小, 而 $f_2(h)$ 尽量大。

权系数均取 0.5, 且对 $f_1(h)$ 、 $f_2(h)$ 进行无量纲化处理, 根据线性加权和法建立评价函数如下:

$$f(h)=\frac{1}{2}[f_1(h)+f_2(h)]=\frac{1}{2}\left[1-\frac{S(h)}{\pi r_1^2}+\frac{h}{r_1}\right] \quad (5)$$

求解 $\max f(h)$ 最优值 h , 进而求出 d , 即可得到第 2 个位移点。

2.1.2 主位移点的选择策略

根据第 2.1.1 节位移点选择方法计算指定频率及阻尼比范围内的各位移点和预估圆盘半径, 然后基于前一时刻断面分析结果计算各预估圆盘内特征值数量。

当特征值数量较少时预估圆盘与实际圆盘会存在较大误差, 实际圆盘极有可能出现严重重叠, 因此为了减少重复计算量, 需要对位移点进行修正, 即合并预估圆盘内特征值数量较少的位移点, 取中点替代被合并的位移点, 取预估特征值数量之和作为修正位移点的特征值数量。对于高频段(0.7~2.0 Hz), 特征值分布密集且搜索圆盘较大, 建议合并 2 个位移点; 而对于低频段(0.1~0.7 Hz), 特征值分布稀疏且搜索圆盘较小, 可以考虑多合并 1 个位移点。由于预估圆盘与实际圆盘总会存在误差, 为防止漏根, 建议采取保守计算, 即对于主位移点实际计算的特征值数量 n 稍多于预估特征值数量 $\tilde{n}$, 例如取 $n=\tilde{n}+2$ 。

2.2 辅助位移点的选择策略

由于小干扰稳定较关注的频段范围内中高频段附近振荡模式较多, 在线计算时预估圆盘半径与实际圆盘半径相差不大, 可根据预估圆盘交点阻尼比与给定阻尼比来选择辅助位移点。如图 3 所示, 辅助位移点取线段 AF 靠近 F 的黄金分割点 E 处作为辅助位移点, 预估圆盘半径为 AE , 对于辅助位移点的实际计算特征值数取 $\tilde{n}+3$ 。

对于低频段, 由于特征值分布较少且每次计算

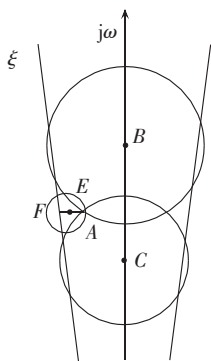


图 3 辅助位移点选择示意图

Fig.3 Schematic diagram of assistant searching point selection

时都进行了保守计算,搜索圆盘可以完全覆盖搜索区域,因此不必增设辅助位移点。

2.3 任务分配策略

在当前的在线动态安全分析系统中,通常利用分布式并行计算技术,采用同构的计算节点组成计算集群,在集群计算平台的管理节点上形成多个计算方案,分配到计算节点上进行并行计算,然后在管理节点上汇总计算结果。

文献[9]所提不均分配策略由于受计算任务随机分配的影响,CPU 利用率也具有很大的随机性,本文将对其进行改进。

假设位移点数量为 N ,CPU 核的数量为 M ,当 $N \gg M$ 时,参与并行计算的 CPU 核应尽量多;当 N 与 M 相差不大或 $N < M$ 时,考虑其他在线分析任务的需求,参与并行计算的 CPU 核的数量以小于 N 为宜。

IRAM 的计算时间与位移点的位置和计算特征值的数量有关。可认为每个位移点计算量的大小主要取决于每次计算特征值的数量,数量越多计算量越大;对于特征值数量相同的位移点,计算量大小则取决于位移点所处位置,所处位置频率越低计算量越大。基于以上原则可估计出各位移点的计算量相对大小。

本文按预估计计算量的大小分配任务,具体为:基于预估计计算量将各任务压入栈中,计算量大的位移点处于栈顶,计算量小的位移点处于栈底,首先根据 CPU 核的数量分配计算量大的位移点,剩余的位移点作为预留任务;当某个 CPU 核的计算任务完成后,即到预留任务中按出栈顺序自动提取 1 个位移点进行计算,直至所有任务计算完成。该分配策略可近似实现任务计算时间均分,最大限度地减少 CPU 核的闲置时间。

2.4 漏根判断

由特征值计算结果很容易得出各位移点的实际圆盘半径。若两相邻主位移点的圆盘不相交,则存在严重漏根现象,取两相邻主位移点的中点为新的位

移点;若相交但交点不在临近辅助位移点圆盘内(高频段)或交点阻尼比小于给定阻尼比(低频段),则交点附近存在漏根,取圆盘交点为新的位移点。

2.5 计算步骤

特征值在线并行计算的整体计算流程如图 4 所示。首次特征分布可采用现有的静态设置位移点选择方法和任务分配策略(平均分配或不平均分配策略)来得到或者采用离线分析结果。

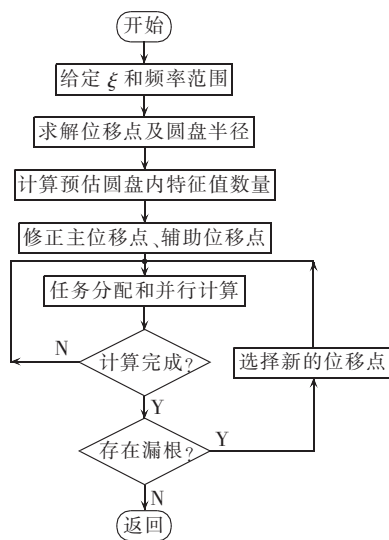


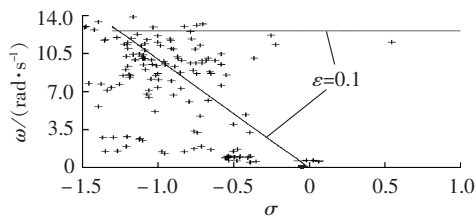
图 4 特征值在线并行计算整体步骤

Fig.4 Overall flowchart of online parallel eigenvalue calculation

3 仿真分析

测试算例采用南方电网 2012 年 5 月 7 日的在线数据:前一断面时刻 t_1 和当前断面时刻 t_2 分别为 23:49:34 和 23:54:35;搜索频率范围为 0.1~2.0 Hz;阻尼比为 $-0.1 \sim 0.1$ 。

对 t_1 时刻断面进行特征值分析,结果如图 5 所示,图中横、纵轴分别为阻尼和振荡角频率, $\varepsilon = |\xi|$ 。

图 5 t_1 时刻特征值分布图Fig.5 Eigenvalue distribution at t_1

根据第 2 节的位移点选择策略选择的位移点如表 1 所示,表中一对实部和虚部(均保留 2 位有效数字)组成 1 个位移点, n 为对应位移点处欲计算的特征值数量。

根据表 1 中数据对当前(t_2 时刻)断面进行位移求逆 IRAM 特征值搜索计算,结果如图 6 所示,为便于作图,将虚轴和各圆盘整体进行了纵向压缩。

表 1 位移点选择情况
Tab.1 Selection of searching points

序号	实部	虚部	n	序号	实部	虚部	n
1	0	9.65	14	9	-0.93	10.23	4
2	0	12.57	13	10	0	1.17	3
3	0	11.01	11	11	0	1.74	3
4	0	8.45	6	12	0	2.58	3
5	-1.06	11.67	6	13	0	3.84	3
6	0	0.78	4	14	0	5.33	3
7	-0.54	7.62	4	15	0	6.95	3
8	-0.82	8.96	4				

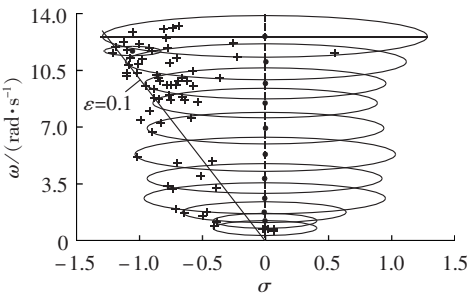


图 6 t_2 时刻特征值分析结果
Fig.6 Results of eigenvalue analysis at t_2

从图 6 可以看出,圆盘几乎覆盖整个小干扰稳定所关注的频段及阻尼比范围,而且减少了特征值的重复搜索。仅在较高阻尼比且较高频段内会遗漏个别特征值(阻尼比分别为 0.0957 和 0.0983),在实际中这些特征值是非关键的,而且如果搜索这些非关键特征值会耗费更多时间。

表 1 中位移点的序号是按预估计算量由大到小的顺序排列的,位移点的实际搜索时间如图 7 所示。从图中可以看出,预估计算量大的位移点计算耗时较大,预估计算量小的位移点计算耗时较小。由于特征值分布的不均导致某些位移点的预估计算量误差较大,但对本文提出的任务分配策略影响不大。

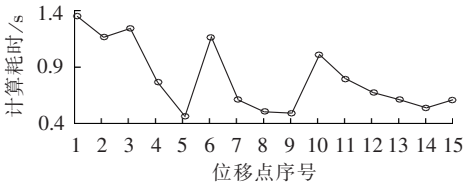


图 7 各位移点的计算耗时
Fig.7 Time consumption of different searching points

在相同计算环境下,通过计算机模拟双 CPU 核下 3 种任务并行分配策略。忽略数据处理及数据输出时间,各策略的计算时间取决于计算最慢的 CPU 核,如表 2 所示。从表 2 可以看出,本文所提分配策略耗时最短。任务分配的具体情况对平均分配策略和不均分配策略的计算时间影响很大,但这 2 种策略均缺乏有效的任务分配依据,只能随机分配任务,而本文所提分配策略则能较好地解决任务分配不合理的问题。

表 2 不同策略计算时间对比
Tab.2 Comparison of computing time among different strategies

分配策略	计算耗时/s		
	CPU ₁	CPU ₂	总耗时
平均分配	6.333	5.179	6.333
不均分配	6.021	5.491	6.021
本文策略	5.647	5.865	5.865

同时基于本文所提分配策略也对四川电网和西北电网进行了在线仿真分析,结果均验证了本文提出策略的正确性和有效性。

4 结论

本文基于位移求逆 IRAM 提出了一种电力系统小干扰特征值在线并行计算策略,该策略保持现有位移求逆 IRAM 特征值计算程序不变,充分运用在线分析计算结果,高效、准确地完成小干扰稳定所关注的计算区域内关键特征值的计算,程序实现简单可靠,可为其他特征值算法的在线并行实现提供参考。

参考文献:

[1] 仲悟之,宋新立,汤涌,等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析[J]. 电网技术,2010,34(3):1-4.
ZHONG Wuzhi,SONG Xinli,TANG Yong,et al. Small signal stability analysis for UHV AC/DC power grid[J]. Power System Technology,2010,34(3):1-4.

[2] 张红光,张粒子,陈树勇,等. 大容量风电场对电力系统小干扰稳定和阻尼特性的影响[J]. 电网技术,2007,31(13):75-80.
ZHANG Hongguang,ZHANG Lizi,CHEN Shuyong,et al. Influence of large scale wind farms on power system small signal stability and damping characteristic[J]. Power System Technology,2007,31(13):75-80.

[3] 刘晓鹏,吕世荣,郭强,等. 小干扰稳定性部分特征值分析的多重变换法[J]. 电力系统自动化,1998,22(9):38-42.
LIU Xiaopeng,LÜ Shirong,GUO Qiang,et al. A multiple Cayley transformation method for analyzing partial eigenvalues of power system small-signal stability [J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(9):38-42.

[4] 杜正春,刘伟,方万良,等. 大规模电力系统关键特征值计算的 Arnoldi-Chebyshev 方法[J]. 西安交通大学学报,2004,38(10):25-31.
DU Zhengchun,LIU Wei,FANG Wanliang,et al. Calculation of critical eigenvalues in large-scale power systems using Arnoldi-Chebyshev method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2004,38(10):25-31.

[5] 周双喜,苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(2):1-8.
ZHOU Shuangxi,SU Xiaolin. Advance of study on small disturbance stability of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2007,19(2):1-8.

[6] 陈中. 电力系统小干扰稳定实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):42-46.
CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):42-46.

- [7] 顾丽鸿,周孝信,严剑峰,等. 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):1-7.
GU Lihong,ZHOU Xiaoxin,YAN Jianfeng,et al. Real time small signal stability analysis of power systems interconnected by ultra high voltage transmission line[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):1-7.
- [8] CAMPAGNOLO J M,MARTINS N,FALCAO D M. 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.
- [9] 李芳,郭剑,吴中习,等. 基于PC机群的电力系统小干扰稳定分布式并行算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):7-13.
LI Fang,GUO Jian,WU Zhongxi,et al. Distributed parallel computing algorithms for power system small signal stability based on PC clusters[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(31):7-13.
- [10] 张旭,沈沉,梅生伟,等. 基于自激法的小干扰稳定特征值分布式算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):12-16.
ZHANG Xu,SHEN Chen,MEI Shengwei,et al. Distributed AESOPS algorithm for eigenvalue analysis of small signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(13):12-16.
- [11] 仲悟之,宋新立,汤涌,等. 基于多进程的电力系统频域特征值并行搜索算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):11-16.
ZHONG Wuzhi,SONG Xinli,TANG Yong,et al. A multi-process based frequency domain eigenvalue parallel search algorithm for power system small signal stability assessment [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):11-16.
- [12] 励刚,苏寅生,陈陈. 面向对象的多谱变换隐式重启动 Arnoldi 算法[J]. 电力系统自动化,2001,25(8):24-27.
LI Gang,SU Yinsheng,CHEN Chen. Object-oriented multi-spectrum transformation implicit restarted Arnoldi algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(8):24-27.
- [13] 郑伟,王克文. 基于精化 Arnoldi 方法的小信号稳定性关键特征值计算[J]. 继电器,2007,35(4):40-43.
ZHENG Wei,WANG Kewen. Application of the refined Arnoldi method to the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. Relay,2007,35(4):40-43.
- [14] 沈梁. 小干扰稳定分析软件包 SSAP 的完善和在交直流并行输电系统中的应用[D]. 上海:上海交通大学,2008.
SHEN Liang. The improvement of small signal stability analysis software and its application in AC/DC parallel transmission power system[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [15] 陈陈,励刚,谷寒雨. 一种新的互联电力系统小干扰稳定分析软件包[C]//2001年励磁年会论文集. 北京:中国电机工程学会,2001:47-56.
- [16] 徐伟,鲍颜红,徐泰山,等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):1-4.
XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan,et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):1-4.

作者简介:



王永昆

王永昆(1988-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail:wangyk0665@mails.jlu.edu.cn);

鲍颜红(1971-),男,安徽巢湖人,高级工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

方勇杰(1964-),男,河北蔚县人,研究员级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

Parallel computing strategy of online eigenvalue calculation based on IRAM for large-scale power system

WANG Yongkun¹,BAO Yanhong^{1,2},FANG Yongjie^{2,3},ZHENG Wei¹,XU Wei¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute/Nari Group Corporation,Nanjing 210003,China;

2. North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

3. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: Since the offline small signal stability analysis is not suitable for the time-varying power system, a strategy of online eigenvalues calculation based on IRAM (Implicitly Restarted Arnoldi Method) is proposed,which predicts the eigenvalue distribution of present time fraction according to the small signal analysis of previous time fraction to build a multi-target optimized model with searching point selection. The linearly weighted sum method is applied to solve the model. Calculation tasks are assigned sequentially according to their estimated calculation loads,which minimizes the idle time of CPUs. Online data of China Southern Power Grid are analyzed and calculated,which shows that,the eigenvalues in area concerning the small signal stability are entirely searched and its time consumption is shorter than that of either even or the existing uneven task assignment strategy.

Key words: electric power systems; small signal stability; linearly weighted sum; online calculation; parallel calculation; stability; eigenvalue