文章编号：1000-3673（2011）07-0096-05　　中图分类号：TM 743　　文献标志码：A　　学科代码：470·4051

基于 *m* 次重启的简化广义最小残差法的电力系统暂态稳定仿真

林济铿[1]，吴鹏[1]，章建新[2]，刘涛[2]，郑卫洪[2]

（1. 电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学)，天津市 南开区 300072;
2. 天津市电力公司，天津市 河北区 300010）

Power System Transient Stability Simulation Based on Simpler Generalized Minimal Residual Algorithm of *m*-Times Restart

LIN Jikeng[1], WU Peng[1], ZHANG Jianxin[2], LIU Tao[2], ZHENG Weihong[2]

(1. Key laboratory of Power System Simulation and Control (Tianjin University), Ministry of Education, Nankai District, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Electrical Power Cooperation, Hebei District, Tianjin 300010, China)

ABSTRACT: A new simpler generalized minimal residual algorithm of *m*-times restart (SGMRES(*m*)) is proposed, namely the linear equations, which form in the transient stability simulation during the iteration from the *n*-th step to (*n*+1)-th step, are solved by SGMRES(*m*). Through modifying the generative process of normal orthogonal basis, the *m*-order upper Hessenber matrix is turned into upper triangular matrix, thus so long as simply solving the upper triangular linear equations the correction value of the solution is attained, thus the trouble of solving least square problem that appears in each iteration during the solution of generalized minimum residual method can be avoided, and the calculation burden can be effectively reduced. To further accelerate the calculation, the proposed algorithm is integrated with dishonest Newton method and incomplete LU precondition. Simulation results of calculation examples show that the proposed algorithm is efficient.

KEY WORDS: power system simulation; transient stability; simpler generalized minimal residual algorithm of *m* times restart (SGMRES(*m*)); incomplete LU precondition; dishonest Newton method

摘要：提出了一种基于 *m* 次重启的简化广义最小残差法(simpler generalized minimal residual algorithm of *m* times restart，SGMRES(*m*))的电力系统暂态稳定仿真新算法，即采用SGMRES(*m*)方法对暂态稳定仿真中形成的线性方程组进行求解，通过修正标准正交基的生成过程，使得 *m* 阶上Hessenberg 矩阵成为上三角矩阵。这样，只要通过简单的上三角线性方程组的求解即可求得解的修正量，避免了求解广义最小残差法每次迭代中的最小二乘问题，从而有效地减少了计算量。为进一步加快计算速度，文中算法进一步结合了伪牛顿策略和不完全 LU 预处理技术。多个算例的计算结果表明，所提出方法是有效的。

关键词：电力系统仿真；暂态稳定性；基于 *m* 次重启的简化广义最小残差法；不完全 LU 预处理；伪牛顿法

0　引言

仿真计算是进行电力系统安全性、稳定性分析的有力工具[1]，但也是电力系统分析计算领域最耗时的计算之一，其中大部分时间用是在雅可比矩阵的形成及线性方程组的求解方面。因此，减少雅可比矩阵的形成时间以及线性方程组的求解时间是加快电力系统暂态仿真速度的有效策略[2-3]。

近年来，基于 Krylov 子空间的迭代法——广义最小残差法(generalized minimal residual algorithm，GMRES)因其易于并行化且收敛速度快而备受关注[4]。文献[5-7]提出了将基于伪牛顿法及预处理技术的 GMRES 算法用于潮流和稳定性仿真；文献[8]比较了 *m* 次重启型 GMRES(*m*)算法与基于特征向量(eigenvector)的重启型算法——GMRES-E 迭代法在电力系统暂态稳定计算中的应用情况，得到了GMRES-E 算法的收敛性要好于 GMRES(*m*)算法的结论；文献[9-11]对基于不完全 LU(incomplete LU，ILU)分解的 GMRES 算法用于电力系统暂态稳定仿真及潮流计算的结果进行了研究，认为带部分填充量的 ILU 分解预处理技术可以取得更好的效果；文献[12-13]将 Jacobian-Free Newton-GMRES(*m*)方法应用于电力系统分布式潮流计算和分布式暂态仿真；文献[14-15]分别采用矩阵分裂和矩阵求逆运算

的松弛方法，以及矩阵的对称反对称分裂方法进行 GMRES 算法的预处理，并将其用于潮流计算，也得到了很好的计算效果；文献[16]提出了基于灵活广义最小残差法(flexible generalized minimal residual algorithm，FGMRES)的潮流计算算法，该算法比传统的 Newton-GMRES 算法具有更好的收敛性。

综上可见，寻求更优异的预处理技术以及更先进的迭代方法一直是有关 GMRES 迭代方法在电力系统暂态及潮流中应用的研究重点。简化广义最小残差法(simpler generalized minimal residual algorithm，SGMRES)[17]是一种对 GMRES 进行改进的迭代方法，即通过改进正交基的生成过程，使 Hessenberg 矩阵成为上三角矩阵，从而避免了求解最小二乘问题，显著减少了每次迭代的计算量，加速了迭代过程。

本文把基于 m 次重启的 SGMRES(m)迭代方法用于电力系统暂态仿真，同时结合伪牛顿策略和 ILU 分解预处理技术。用上述方法对多个不同规模的系统计算，结果表明，在其他条件相同的情况下，基于 SGMRES(m)方法的计算速度要优于基于 GMRES(m)的仿真方法。

1　暂态稳定计算的数学模型和求解方法

1.1　电力系统机电暂态稳定性计算的数学模型

电力系统机电暂态稳定仿真分析所要描述的是，系统从故障开始到故障切除后 3~5 s 之间的系统短期动态行为，可以用一组非线性微分方程组来描述电力系统中动态元件的动态特性，用一组代数方程组来表示系统的网络模型[18-19]

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{X}}=f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U}_n)\\ \boldsymbol{0}=\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U}_{\rm n})-\boldsymbol{Y}\boldsymbol{U}_{\rm n}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为动态元件的状态变量；f 为非线性函数；$\boldsymbol{U}_{\rm n}$ 为节点电压向量；$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{U}_{\rm n})$为节点注入电流向量；$\boldsymbol{Y}$ 为系统导纳阵。

若采用隐式梯形法对式(1)进行求解，离散化之后，从第 n 步到 n+1 之间其实是解一个非线性方程组。若采用牛顿法对其进行求解，经线性化之后需求解线性方程组

$$\boldsymbol{J}^k\Delta\boldsymbol{x}^k=\boldsymbol{b}^k\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{J}^k$ 表示第 k 次迭代时的雅可比矩阵；$\Delta\boldsymbol{x}^k$ 表示 k 次迭代时的修正量；$\boldsymbol{b}^k$ 表示 k 次迭代的残差。

1.2　SGMRES(m)迭代法

可以采用迭代法对式(2)进行求解。略去式(2)中的上标 k，可将其写为

$$\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{J}\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为一个非奇异矩阵；$\boldsymbol{b}\in\mathbf{R}^n$ 为一个给定的向量。

设 $\boldsymbol{r}_0=\boldsymbol{b}-\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}_0$ 为初始残差，$\boldsymbol{v}_1=\boldsymbol{r}_0/\theta$，其中 $\theta=(\boldsymbol{r}_0, \boldsymbol{r}_0)^{1/2}$。利用 Arnoldi 方法构造 Krylov 子空间 $\boldsymbol{K}_m(\boldsymbol{J}, \boldsymbol{r}_0)$ 的一组标准正交基，记为 $\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2,\ldots,\boldsymbol{v}_m$，且记 $\boldsymbol{V}_m=[\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2,\ldots,\boldsymbol{v}_m]$，则 Arnoldi 过程满足

$$\boldsymbol{J}\boldsymbol{V}_m=\boldsymbol{V}_m\boldsymbol{H}_m+h_{m+1,m}\boldsymbol{v}_{m+1}\boldsymbol{e}_m^{\rm T}$$

式中：$\boldsymbol{H}_m$ 是 m 阶上 Hessenberg 矩阵；$\boldsymbol{e}_m$ 是 m 维向量$[0,0,\ldots, 0,1]^{\rm T}$。

GMRES 方法就是寻找式(3)的近似解 $\Delta\boldsymbol{x}_m=\Delta\boldsymbol{x}_0+\boldsymbol{z}_m$，其中 $\boldsymbol{z}_m\in\boldsymbol{K}_m(\boldsymbol{J}, \boldsymbol{r}_0)$。通过求解最小二乘问题：

$$\boldsymbol{y}_m=\arg\min_{\boldsymbol{z}}\left\|\theta\boldsymbol{e}_1-\bar{\boldsymbol{H}}_m\boldsymbol{z}\right\|_2$$

$$\bar{\boldsymbol{H}}_m=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_m\\ 0,\cdots,0,h_{m+1,m}\end{bmatrix}$$

即可以得到式(3)的迭代近似解 $\Delta\boldsymbol{x}_m=\Delta\boldsymbol{x}_0+\boldsymbol{V}_m\boldsymbol{y}_m$。

GMRES(m)方法中，由于 $\bar{\boldsymbol{H}}_m\in\mathbf{R}^{(m+1)\times m}$ 为上梯形矩阵，故不得不使用最小二乘方法求解。SGMRES(m)采用修正的标准正交基生成方法，使得 $\bar{\boldsymbol{H}}_m$ 成为上三角矩阵，这样就把最小二乘问题转化成求解上三角矩阵的线性方程组，每次迭代的计算量大大减少，从而加快了计算速度。

SGMRES(m)中的 m 表示每隔 m 次迭代就重启一次，用最后一次迭代的余量作为新一轮迭代的初始余量，最后一次迭代的解作为新一轮的初始解。具体过程如下：

1）初始化。给定初值$\Delta\boldsymbol{x}_0$ 及收敛容差 $T_{\rm TOL}$，令 $\boldsymbol{r}_0=\boldsymbol{b}-\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}_0$，$\rho_0=\|\boldsymbol{r}_0\|_2$。如果$\rho_0\le T_{\rm TOL}$，则$\Delta\boldsymbol{x}_0$ 为所求解，程序结束。否则，令 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}_0/\rho_0$，置$\rho_0=1$。

2）k=1。

3）计算 $\boldsymbol{v}_k=\boldsymbol{J}\boldsymbol{v}_{k-1}$。当 k=1 时，$\boldsymbol{v}_1=\boldsymbol{J}\boldsymbol{r}$，转到步骤 5)；当 k>1 时继续进行步骤 4)。

4）令 i=0。

①计算 $\rho_{ik}=\boldsymbol{v}_i^{\rm T}\boldsymbol{v}_k$。

②i=i+1，若 $i\le k-1$，转到①；否则，转步骤 5)；

5）$\rho_{kk}=\|\boldsymbol{r}_k\|$。如果$\rho_{kk}\le T_{\rm TOL}$，置 $k=k-1$，转到步骤 9)；否则，令 $\boldsymbol{r}_k=\boldsymbol{r}_k/\rho_{kk}$。

6）更新 $\boldsymbol{R}_k$ 矩阵，$\boldsymbol{R}_k=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{k-1} & \rho_{1k}\\ & \vdots\\ 0\cdots0 & \rho_{kk}\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{R}_1=\rho_{11}$。

7）计算 $\xi_k=\boldsymbol{r}^{\rm T}\boldsymbol{v}_k$，$\rho=\rho\sin[\cos^{-1}(\xi/\rho)]$。如果

$\rho\rho_0 \le T_{\mathrm{TOL}}$，跳转到步骤 9)。

8）计算 $\boldsymbol{r}_k=\boldsymbol{r}-\xi_k\boldsymbol{v}_k$。更新 $k=k+1$，若 $k\le m$，转到步骤 3)。

9）设 k 为步骤 2）—8）最终迭代次数，则

①求解 $\boldsymbol{R}_k\boldsymbol{y}=[\xi_1, \xi_2,\ldots,\xi_k]$，得到 $\boldsymbol{y}=[\eta_1, \eta_2,\ldots,\eta_k]^{\mathrm{T}}$。

②计算 $\boldsymbol{z}=\begin{cases}\eta_1\boldsymbol{r}, & k=1\\ \eta_1\boldsymbol{r}+\sum\limits_{i=1}^{k-1}(\eta_{i+1}+\eta_1\xi_i)\boldsymbol{v}_i, & k>1\end{cases}$

③更新 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}+\rho_0\boldsymbol{z}$。

④$\boldsymbol{r}_0=\boldsymbol{b}-\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}$，如果$\|\boldsymbol{r}_0\|_2\le T_{\mathrm{TOL}}$，$\boldsymbol{x}$ 是所求的解；否则，令$\rho_0=\|\boldsymbol{r}\|_2$，$\rho=1$，转向步骤 2)。

2 加速仿真过程的策略

2.1 伪牛顿策略

为了加快仿真计算过程，本文进一步采用伪牛顿策略及 ILU 分解的预处理技术。

采用牛顿法求解差分代数联立方程组时，由于每一时步计算雅可比矩阵元素的计算量较大，且雅可比矩阵的元素在系统无故障或无操作发生的很小时间段内变化很小，因此可以采用每隔几个时步才更新一次雅可比矩阵的伪牛顿策略。本文的方法是：当本时步迭代超过 4 次或上一时步迭代超过 3 次时，才重新形成雅可比矩阵，否则保持修正方程的雅可比矩阵不变。

2.2 ILU 分解的预处理技术

本文的预处理策略是先对雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 进行 ILU 分解，即把 $\boldsymbol{J}$ 近似分解为下三角矩阵 $\boldsymbol{L}$ 和上三角矩阵 $\boldsymbol{U}$，使得 $\boldsymbol{J}\cong\boldsymbol{LU}$。设$\varepsilon$为分解过程中对产生的注入元数量的控制阀值。$\varepsilon$的选择非常重要。本文经测试得到，当$\varepsilon$=0.000 001 时，各算例 ILU 分解预处理的效果最好。

用对雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 进行 ILU 分解得到的 $\boldsymbol{L}$、$\boldsymbol{U}$ 矩阵对式(3)进行如下修正：

$$\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}\Rightarrow\boldsymbol{L}\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{J}\boldsymbol{U}\boldsymbol{U}^{-1}\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}$$

令

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}=\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{J}\boldsymbol{U}^{-1}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{B}=\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{b}\end{cases} \tag{4}$$

则线性矩阵方程转化为

$$\boldsymbol{F}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{B} \tag{5}$$

然后用 SGMRES(m)算法对其进行迭代求解，最后由求出的等价线性方程组的解 $\boldsymbol{y}$，根据式 $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{x}$ 即可得到原雅可比矩阵方程组 $\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{b}$ 的解 $\Delta\boldsymbol{x}$。

3 基于 SGMRES(m)并结合 ILU 分解预处理的伪牛顿电力系统暂态仿真过程

对于单个时步，应用基于 SGMRES(m)结合 ILU 预处理技术的伪牛顿方法，求解电力系统机电暂态仿真第 k 步到第 k+1 步由差分和代数方程组组成的非线性方程组的过程为：

1）计算第 k 时步的线性方程组右端向量 $\boldsymbol{b}_k$。

2）判断前一时步牛顿迭代次数是否大于 3 次，若是则转步骤 3)；否则转步骤 4)。

3）在当前时步重新形成雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_k$，并对更新后的雅可比矩阵采用 ILU 分解法进行分解，从而得到新的预处理矩阵 $\boldsymbol{L}_k$ 和 $\boldsymbol{U}_k$。然后按照式(4)形成新的系数矩阵 $\boldsymbol{F}_k$，作为本时步 SGMRES(m)方法求解的系数矩阵，转步骤 5)。

4）继续使用前面已经得到的等价方程组系数矩阵 $\boldsymbol{F}_j$($\boldsymbol{F}_j$ 表示第 j 时步更新得到的预处理后的等价系数矩阵，$j<k$)，作为当前时步 SGMRES(m)求解的系数矩阵。

5）利用 SGMRES(m)算法迭代求解预处理后的等价线性方程组。判断本时步是否已收敛，若是则返回步骤 1）开始下一时步计算；若本时步还没收敛，则更新右端向量 $\boldsymbol{b}_k$，继续用 SGMRES(m)算法迭代求解，直至本时步收敛。

图 1 给出了上述算法每时步的计算流程图。

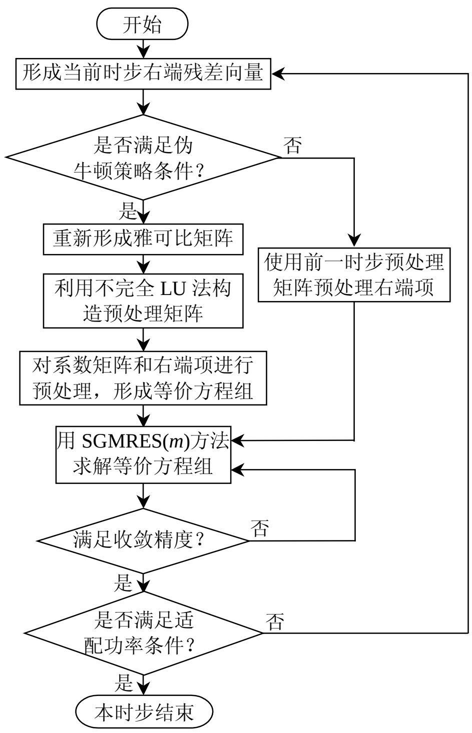

图 1 每时步迭代计算流程

Fig. 1 The flowchart of iteration computation

由图 1 可以看出，每时步的迭代计算包括 2 层迭代，即内层的 SGMRS(m)迭代和外层的牛顿迭代。

4　算例及结果分析

4.1　概述

本文采用 C 语言编程，在 CPU 主频为 2.0 GHz、内存为 1G 的计算机上，分别对 New England39 系统、IEEE 57 系统、IEEE 162 系统以及多个合成系统采用上述算法进行暂态稳定性仿真计算试验。表 1 为各算例的系统规模数据。

表 1　测试系统的数据

Tab. 1　Parameters of test systems

算例	节点总数	支路总数
sys39	39	46
sys57	57	82
sys118	118	179
sys162	162	286
sys324	324	578
sys442	442	758
sys648	648	1 147
sys810	810	1 434

仿真相关参数设置如下：1）各算例系统的发电机模型为 3 阶或 5 阶模型；负荷模型为 60%恒功率加 40%恒阻抗的静态负荷模型；仿真时间长度为 4.00 s；仿真计算步长为 0.01 s；外层牛顿迭代收敛精度(即失配功率精度)为 10^{-4}；内层 GMRES 和 SGMRES 迭代的收敛容差(即修正量精度)为 10^{-8}；内层 GMRES 和 SGMRES 的重启次数 m=6。故障情况是在 0.00 s 某线路发生三相对称短路故障，经 0.10 s 切除该故障线路。

4.2　计算精度

图 2 给出了采用本文算法与 GMRES(m)算法求得的 New England39 系统算例中，1 台发电机的转子角曲线对比结果。从图 2 可以看出，2 种算法的计算结果几乎完全一致。

4.3　计算速度

图 3 给出了采用 SGMRES(m)和 GMRES(m)求解各算例线性方程组的总时间对比。从图 3 可以看出，SGMRES(m)比 GMRES(m)求解速度快，且随着算例节点规模的增大，2 者时间差距不断增大。

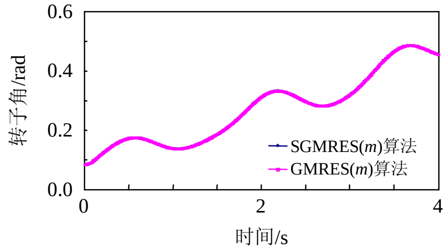

图 2　2 种算法得到的发电机转子角曲线对比

Fig. 2　The comparison of a generator's angle respectively gained by the two methods

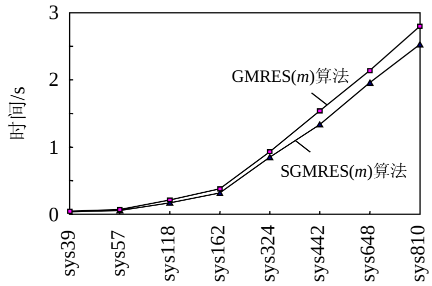

图 3　2 种方法求解时间比较

Fig. 3　The comparison of the simulation time of the two methods

表 2 给出了采用本文算法与结合伪牛顿策略及 ILU 技术的 GMRES(m)算法在求解修正方程时的迭代次数和仿真总时间方面的对比。表中：N_{iter} 代表牛顿迭代次数；S_{Giter} 代表 SGMRES(m)迭代次数；T_{iter} 代表仿真总时间；G_{iter} 代表 GMRES(m)迭代次数；T_{save} 代表 SGMRES(m)比 GMRES(m)节省的仿真总时间；P_{save} 代表 SGMRES(m)仿真总时间节省百分比。通过对比表 2 中 2 种算法的迭代次数(S_{Giter} 和 G_{iter})以及仿真总时间可见：在内层迭代的次数方面，SGMRES(m)略多于 GMRES(m)，而且随着算例规模的增大，SGMRES(m)迭代次数与 GMRES(m)迭代次数的差距有增加的趋势；在仿真速度方面，本文算法比结合伪牛顿策略和 ILU 预处理技术的 GMRES(m)快，仿真总时间节省了 3.66%~9.67%。

表 2　2 种算法仿真结果比较

Tab. 2　The comparison of the simulation results by two methods

算例	SGMRES(m)算法			GMRES(m)算法			2 种算法对比	
	N_{iter}	S_{Giter}	T_{iter}/s	N_{iter}	G_{iter}	T_{iter}/s	T_{save}/s	P_{save}/%
sys39	1 198	1 212	0.395	1 198	1 212	0.410	0.015	3.66
sys57	1 198	1 720	0.462	1 198	1 719	0.493	0.031	6.29
sys118	1 183	1 589	0.803	1 183	1 589	0.889	0.086	9.67
sys162	1 211	2 205	2.055	1 211	1 920	2.265	0.210	9.27
sys324	1 209	2 424	4.714	1 209	2 005	5.056	0.342	6.76
sys442	1 208	2 406	6.884	1 208	2 018	7.196	0.312	4.34
sys648	1 206	2 586	10.284	1 206	2 002	10.735	0.451	4.20
sys810	1 208	2 661	13.099	1 208	2 011	13.691	0.592	4.32

上述算例结果表明，在暂态稳定仿真过程中，尽管求解线性方程组时，SGMRES(m)迭代次数多于GMRES(m)，但因 SGMRES(m)只是求解上三角线性方程组，使得每次迭代所需时间明显小于后者，进而使得 SGMRES(m)求解所需总时间仍小于GMRES(m)求解总时间。随着系统规模的增大，总体节省时间将更多。

5　结论

本文提出了一种基于 SGMRES(m)的电力系统暂态稳定仿真新算法。通过对暂态稳定仿真中形成的线性方程组进行求解，并在仿真迭代的过程中结合了伪牛顿策略和 ILU 分解预处理技术，因此具有较快的计算速度。因 GMRES(m)类迭代方法具有天然的并行性，较适用于并行处理，故本文后续工作将把它与并行处理技术(如 PC−Cluster 平台)相结合，以期进一步提高仿真计算速度，争取达到在线实时或超实时的计算速度。

参考文献

[1]　倪以信，陈寿孙，张宝霖．动态电力系统的理论和分析[M]．北京：清华大学出版社，2002：135-180．

[2]　洪潮．电力系统暂态稳定计算的一种时间并行计算方法[J]．电网技术，2003，27(4)：31-35．
Hong Chao．A parallel-in-time algorithm for analysis of power system transient stability[J]. Power System Technology，2003，27(4)：31-35(in Chinese)．

[3]　洪潮，沈俊明．电力系统暂态稳定计算的一种空间并行算法[J]．电网技术，2000，24(5)：20-24．
Hong Chao，Shen Junming．A parallel-in-space algorithm for power system transient stability simulation[J]．Power System Technology，2000，24(5)：20-24(in Chinese)．

[4]　Saad Y，Schultz M．GMRES：a generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems[J]．SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing，1986，7(3)：856-869．

[5]　Pai M A，Sauer P W，Kulkarni A Y. A preconditioned iterative solver for dynamic simulation of power systems[C]//International Symposium on Circuits and Systems．Seattle，USA：IEEE，1995：1279-1282．

[6]　Flueck A J，Chiang H D．Solving the nonlinear power flow equations with a Newton process and GMRES[C]//International Symposium on Circuits and Systems．Atlanta，USA：IEEE，1996：657-660．

[7]　胡博，周家启，刘洋，等．基于预条件处理 GMRES 的不精确牛顿法潮流计算[J]．电工技术学报，2007，32(2)：98-104．
Hu Bo，Zhou Jiaqi，Liu Yang，et al. Inexact Newton flow computation based on preconditioned GMRES method[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2007，32(2)：98-104(in Chinese)．

[8]　Chaniotis D，Pai M A．Iterative solver techniques in the dynamic simulation of power systems[C]//Power Engineering Society Summer Meeting．Seattle，USA：IEEE，2000：609-613．

[9]　蔡大用，陈玉荣．用不完全 LU 分解预处理的不精确潮流计算方法[J]，电力系统自动化，2002，26(8)：11-14．
Cai Dayong，Chen Yurong. Solving power flow equations with inexact Newton methods preconditioned by incomplete LU factorization with partially fill-in[J]．Automation of Electric Power Systems，2002，26(8)：11-14(in Chinese)．

[10]　李晓华，历吉文，张林鑫，等．潮流计算雅可比矩阵预处理方法的比较研究[J]．继电器，2005，33(15)：33-36．
Li Xiaohua，Li Jiwen，Zhang Linxin，et al．Comparison and study of preconditioning methods of Jacobian matrix of power flow calculation[J]．Relay，2005，33(15)：33-36(in Chinese)．

[11]　Hiroyuki M，Kotaro S．Continuation Newton-GMRES power flow with linear and nonlinear predictors[C]//Large Engineering Systems Conference on Power Engineering．Montreal，Canada：IEEE，2007：171-175．

[12]　陈颖，沈沉，梅生伟，等. 基于改进 Jacobian-Free Newton-GMRES(m)的电力系统分布式潮流计算[J]．电力系统自动化，2006，30(9)：5-8，37．
Chen Ying，Shen Chen，Mei Shengwei，et al．Distribute power flow calculation based on an improved Jacobian-Free Newton-GMRES(m) method[J]．Automation of Electric Power Systems，2006，30(9)：5-8，37(in Chinese)．

[13]　陈颖，沈沉，梅生伟，等．基于 Jacobian-Free Newton-GMRES(m)方法的电力系统分布式暂态仿真算法[J]．电力系统自动化，2006，30(10)：12-18．
Chen Ying，Shen Chen，Mei Shengwei，et al．Distribute dynamic simulation algorithm for power systems based on a Jacobian-Free Newton-GMRES(m) method[J]．Automation of Electric Power Systems，2006，30(10)：12-18(in Chinese)．

[14]　汪芳宗，何一帆，叶婧．基于稀疏近似逆预处理的牛顿–广义极小残余潮流计算方法[J]．电网技术，2008，32(14)：50-53．
Wang Fangzong，He Yifan，Ye Jing．Load flow calculation of Newton-GMRES method with sparse approximate inverse preconditioners[J]．Power System Technology，2008，32(14)：50-53(in Chinese)．

[15]　刘凯，陈红坤，向铁元，等. 以对称反对称分裂预条件处理 GMRES(m)的不精确牛顿法潮流计算[J]．电网技术，2009，33(19)：123-126．
Liu Kai，Chen Hongkun，Xiang Tieyuan，et al．Inexact Newton flow computation based on Hermitian and skew-Hermitian splitting preconditioners GMRES(m)[J]．Power System Technology，2009，33(19)：123-126(in Chinese)．

[16]　Zhang Yishan，Chiang H D．Fast Newton-FGMRES solver for large-scale power flow study[J]．IEEE Trans on Power Systems，2010，25(2)：769-776．

[17]　Walker H F，Zhou L．A simpler GMRES[J]．Numer Linear Algebra Appl，1994，(1)：571-581．

[18]　林济铿，仝新宇，李杨春，等．基于预处理共轭梯度法的电力系统机电暂态仿真[J]．电工技术学报，2008，23(5)：93-99．
Lin Jikeng，Tong Xinyu，Li Yangchun，et al，Electrical-machanical transient simulation of power system based on preconditioned conjugate gradient method[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2008，23(5)：93-99(in Chinese)．

[19]　章建新．基于迭代法的电力系统机电暂态仿真[D]．天津：天津大学，2010．

林济铿

收稿日期：2010-03-28。

作者简介：

林济铿(1967)，男，博士，副教授，研究方向为电力系统稳定性分析及控制和智能电网等，E-mail：mejklin@126.com；

吴鹏(1987)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统仿真和控制；

章建新(1985)，男，硕士，研究方向为电力系统仿真和控制。

（责任编辑　王晔）