

# 大规模电力系统关键特征值计算的 Arnoldi-Chebyshev 方法

杜正春, 刘 伟, 方万良, 夏道止

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 介绍了一种 Chebyshev 多项式加速的显式重启 Arnoldi 算法,并用其直接求取大规模电力系统小干扰稳定性分析中状态矩阵的按实部递减的部分特征值,即关键特征值.这种方法构造了一个包含不想要特征值的椭圆,用由此椭圆确定的 Chebyshev 多项式获取新的初始向量,增强右端特征值对应特征向量在基向量方向的分量;进而运用新的初始向量构造 Krylov 子空间,求取按实部递减的特征值.3 机和 46 机两个系统的计算结果表明,所提算法能够准确有效地求出系统的关键特征值,适合于大规模电力系统的特征分析.

**关键词:** 大规模电力系统;特征值;Arnoldi 方法;Chebyshev 加速

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)10 - 0995 - 05

## Calculation of Critical Eigenvalues in Large-Scale Power Systems Using Arnoldi-Chebyshev Method

Du Zhengchun, Liu Wei, Fang Wanliang, Xia Daozhi

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Eigenvalues ordered in decreasing real parts in large-scale power systems, i. e. critical eigenvalues, are directly computed by explicitly restarted Arnoldi method with Chebyshev acceleration, where an ellipse containing unwanted eigenvalues is constructed and the Chebyshev polynomial is adopted to acquire a restart vector to amplify the components in the direction of the basis vectors for the wanted eigenvalues and damp those in the direction of the remaining basis vectors. Numerical results of the systems with 3 and 46 machines verify that the critical set of eigenvalues of large-scale power systems can be found efficiently and accurately by the proposed method.

**Key words:** large-scale power systems; eigenvalues; Arnoldi method; Chebyshev acceleration

判断电力系统的小干扰稳定性及进行控制器的参数优化,都需要准确高效地计算系统的关键特征值<sup>[1,2]</sup>. Perez-Arriaga 等<sup>[3]</sup>提出了降阶选择模态分析法,求取部分机电振荡模式,但此方法不能保证所有关键特征值不被遗漏. Uchida 等人<sup>[4]</sup>提出 S 矩阵法,判断系统是否稳定. Wang 等人<sup>[5]</sup>及谷寒雨等人<sup>[6]</sup>应用位移求逆法,求位移点附近的特征值. 刘晓鹏等人<sup>[7]</sup>提出三重 Cayley 变换法,对 S 矩阵法进行改进,求取多个关键特征值. 这些方法间接地求取关键特

征值,其参数选择没有系统化的方法.

Lee 等人<sup>[8]</sup>运用块 Arnoldi-Chebyshev 方法直接求取系统的关键特征值,并给出了求取 10 机 69 阶系统最右端 5 个特征值的数值算例. 块方法可以有效地求解堆积在一起的特征值,但是 Morgan<sup>[9]</sup>指出,随着块维数的增加,构造相同维数子空间时获得的矩阵左乘次数随之减小,算法收敛速度下降. 由于块维数必须大于所求特征值数量,对于大规模电力系统而言,当需要求取的特征值较多时,块方法的使

用受到限制.

本文运用 Chebyshev 多项式加速的显式重启 Arnoldi 算法,直接计算大规模电力系统按实部递减的特征子集.使用单向量重启,重启向量为所求近似特征向量的线性组合,并用 Chebyshev 多项式进行加速,增强想要特征值在基向量方向的分量,同时减小不想要特征值在基向量方向的分量.两个数值算例的结果表明,该算法能有效地求出大规模系统按实部递减的特征子集.

### 1 小干扰稳定性分析的数学模型

电力系统小干扰稳定性分析的数学模型可以描述为如下线性化微分-代数方程组

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{0}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

设网络节点总数为  $m$ , 状态变量总数为  $n$ , 则有  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times 2m}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{2m \times n}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{2m \times 2m}$ .

在式(1)中消去运行参数向量  $\mathbf{y}$ , 得

$$\dot{\mathbf{0}} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C} \quad (3)$$

式(1)中的矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$  都为稀疏矩阵, 而用式(3)得到的状态矩阵  $\mathbf{A}$  的稀疏性几乎完全失去. 为了叙述方便, 在以下的公式中, 直接运用状态矩阵  $\mathbf{A}$ . 在实际计算时, 可以用式(1)中的稀疏增广状态矩阵计算状态矩阵  $\mathbf{A}$  的特征值<sup>[2]</sup>.

## 2 Arnoldi 方法

### 2.1 基本的 Arnoldi 方法

基本的 Arnoldi 方法是向 Krylov 子空间进行正交投影的不变子空间法<sup>[10]</sup>, 该方法可简述如下: 给定单位  $\ell_2$  范数的初始向量  $\mathbf{v}_1 \in \mathbf{R}^n$ , 逐列地形成矩阵  $\mathbf{V}_k = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_k]$  的各列向量 (称为 Arnoldi 向量), 使得  $\mathbf{H}_k = \mathbf{V}_k^T \mathbf{A} \mathbf{V}_k$  为上海森伯格矩阵. 这个过程可概括为 Arnoldi 分解

$$\mathbf{A} \mathbf{V}_k = \mathbf{V}_k \mathbf{H}_k + h_{k+1,k} \mathbf{v}_{k+1} \mathbf{e}_k^T \quad (4)$$

$\mathbf{V}_k$  的列构成了 Krylov 子空间  $\text{span}\{\mathbf{v}_1, \mathbf{A}\mathbf{v}_1, \mathbf{A}^2\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{A}^{k-1}\mathbf{v}_1\}$  的一组标准正交基. 如果  $h_{k+1,k} = 0$ , 则它是  $\mathbf{A}$  的不变子空间,  $\mathbf{H}_k$  的所有特征值是  $\mathbf{A}$  的特征值的子集, 即  $\sigma(\mathbf{H}_k) \subseteq \sigma(\mathbf{A})$ . 若  $h_{k+1,k} \neq 0$ , 根据式(4)可得

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{x} = h_{k+1,k} \mathbf{v}_{k+1} \mathbf{e}_k^T \mathbf{y} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为  $\mathbf{H}_k$  的单位特征向量, 即  $\mathbf{H}_k \mathbf{y} = \lambda \mathbf{y}$ ,  $\mathbf{x} =$

$\mathbf{V}_k \mathbf{y}$ . 称为 Ritz 值,  $\mathbf{x}$  为相应的 Ritz 向量. 显然

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{x} = h_{k+1,k} \mathbf{v}_{k+1} \mathbf{e}_k^T \mathbf{y} = h_{k+1,k} / \mathbf{e}_k^T \mathbf{y} \quad (6)$$

算法 1 基本的 Arnoldi 方法如下.

(1) 给定  $k, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1 / \|\mathbf{v}_1\|_2$ ;

(2) For  $j = 1, 2, \dots, k$

$\mathbf{w} = \mathbf{A} \mathbf{v}_j$

For  $i = 1, 2, \dots, j$

$h_{ij} = \mathbf{v}_i^T \mathbf{w}; \mathbf{w} = \mathbf{w} - h_{ij} \mathbf{v}_i$ ;

End

$h_{j+1,j} = \|\mathbf{w}\|_2; \mathbf{v}_{j+1} = \mathbf{w} / h_{j+1,j}$ ;

End

(3) 计算矩阵  $\mathbf{H}_k = \{h_{ij}\}$  的特征对  $(\lambda_i, \mathbf{y}_i)$  及  $\mathbf{A}$  的关于  $\lambda_i$  的 Ritz 向量  $\mathbf{x}_i = \mathbf{V}_k \mathbf{y}_i$ .

### 2.1.2 显式重启 Arnoldi 方法

$\mathbf{H}_k$  中包含的特征信息主要取决于初始向量  $\mathbf{v}_1$ .

在一般情况下, 我们想要的特征信息可能在  $k$  很大时才出现. 然而, 当  $k$  很大时, 不但需要巨大的存储空间和计算量, 而且保持  $\mathbf{V}_k$  中各列向量正交也相当困难.

想要使较小的固定  $k$  维子空间中包含我们想要的  $r (r < k)$  个特征值, 就需要进行迭代计算. 显式重启 Arnoldi 方法就是用基本 Arnoldi 方法求得我们想要的近似特征向量  $\mathbf{x}_i$ , 以它们的某种线性组合作为下次迭代的初始向量, 即

$$\mathbf{v}_1 = \sum_{i=1}^r \alpha_i \mathbf{x}_i \quad (7)$$

式中:  $\alpha_i$  为  $\mathbf{v}_1$  的归一化系数;  $\alpha_i$  为加权系数. 通过不断迭代改进初始向量, 使  $k$  维子空间中包含我们想要的特征信息.

## 3 用 Chebyshev 多项式加速

### 3.1 多项式加速的思想

多项式加速就是用  $\mathbf{v}_1^{(3)} = p(\mathbf{A}) \mathbf{v}_1$  代替  $\mathbf{v}_1$  作为迭代初始向量, 其中  $p(\cdot)$  为多项式. 如果  $\mathbf{v}_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{q}_i$ , 其中  $\mathbf{q}_i (i = 1, \dots, n)$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的单位特征向量, 则有

$$\mathbf{v}_1^{(3)} = p(\mathbf{A}) \mathbf{v}_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i p(\lambda_i) \mathbf{q}_i = \sum_{i=1}^r \alpha_i p(\lambda_i) \mathbf{q}_i + \sum_{i=r+1}^n \alpha_i p(\lambda_i) \mathbf{q}_i \quad (8)$$

将特征值按照实部递减的顺序排列,  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r\}$  为  $r$  个“想要”的特征值, 将“不想要”的特征值  $\{\lambda_{r+1}, \lambda_{r+2}, \dots, \lambda_n\}$  组成的点集用  $S$  表示. 选择多项

式  $p(\cdot)$ , 使得  $p(\cdot)$  在  $S$  上尽可能小, 即增强  $v_1^{(3)}$  在“想要”的特征值对应的基向量方向的分量, 同时减少在“不想要”的基向量方向的分量. 设  $p(\cdot)$  为连续域  $E$  (包含  $S$  但不包含  $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ ) 上的多项式. 确定  $p(\cdot)$  成为如下极大极小化问题

$$\min_p \max_{\lambda \in E} |p(\lambda)| \quad (9)$$

式中:  $P_l$  表示阶数不超过  $l$  的所有多项式的集合.

### 3.1.2 Chebyshev 多项式

在复平面上, 定义  $l$  阶 Chebyshev 多项式为

$$T_l(z) = \cosh(l \cosh^{-1} z) \quad (10)$$

其中  $\cosh^{-1}(z) = z$ . 设  $w = e^z$ , 式(10)等价于

$$T_l(z) = (w^l + w^{-l})/2 \quad (11)$$

其中  $z = (w + w^{-1})/2$ .

Chebyshev 多项式与复平面上的椭圆密切相关. 设  $C$  为中心在原点半径为  $1$  的圆, 那么 Joukowski 映射  $J(w) = (w + w^{-1})/2$  将  $C$  转化为中心在原点、焦点为  $\pm 1$ 、长半轴为  $(1 + \sqrt{1})/2$ 、短半轴为  $|1 - \sqrt{1}|/2$  的椭圆. 当  $|w| > 1$  时, 将映射  $J$  得到的椭圆用  $E$  表示.

**定理** 考虑从  $C$  经映射  $J$  得到的椭圆  $E$ , 并设  $z$  是复平面上不被  $E$  围住的任意一点. 那么

$$\frac{1}{|w|} = \min_p \max_{z \in E} |p(z)| \quad (12)$$

式中:  $w$  是方程  $J(w) = z$  的主根.

当  $l \rightarrow \infty$  时, 式(12)中左右两个边界之差趋近于 0. 因此, 当  $l$  很大时, Chebyshev 多项式

$$p^3(z) = \frac{w^l + w^{-l}}{w^l + w^{-l}} \quad (13)$$

接近于最优多项式, 其中  $z = (w + w^{-1})/2$ . 换言之, Chebyshev 多项式是渐近最优的<sup>[11]</sup>.

对于更一般的中心为  $d$ 、焦点为  $d \pm c$  的椭圆, 近似最优的多项式为

$$T_l[(z - d)/c] \quad (14)$$

### 3.1.3 Chebyshev 加速

用  $E = E(d, c, a)$  表示中心为  $d$ 、焦点为  $d \pm c$ 、长半轴为  $a$ 、包含  $S$  的椭圆. 根据式(14), 式(9)中的渐近最优多项式可取为

$$p_l(\lambda) = \frac{T_l[(\lambda - d)/c]}{T_l[(r - d)/c]} \quad (15)$$

对于  $\lambda \in S$ , 根据式(15)和式(13)可得

$$p_l(\lambda_j) = \frac{w_j^l + w_j^{-l}}{w_r^l + w_r^{-l}} \quad (16)$$

其中  $w_i$  是方程  $(w_i + w_i^{-1})/2 = (\lambda_i - d)/c$  ( $i$  为  $r, j$ ) 的模值最大的根. 将  $p_l(\lambda_j)$  的收敛因子定义为

$$R(\lambda_j) = \lim_{l \rightarrow \infty} |p_l(\lambda_j)|^{1/l} \quad (17)$$

由式(16)、式(17), 得

$$R(\lambda_j) = \left| \frac{\lambda_j - d + \sqrt{(\lambda_j - d)^2 - c^2}}{\lambda_r - d + \sqrt{(\lambda_r - d)^2 - c^2}} \right|^{1/2} \quad (18)$$

由式(18)可以看出, 位于同一椭圆上所有特征值对应的收敛因子相同, 即

$$R(\lambda_j) = \frac{a_j + b_j}{a_r + b_r} \quad (19)$$

式中:  $a_j, a_r$  为对应椭圆的长半轴;  $b_j, b_r$  为对应椭圆的短半轴.

### 3.1.4 Chebyshev 椭圆参数

设  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  是 Krylov 子空间中的  $k$  个按实部递减的 Ritz 值, 假设我们“想要”的为前  $r$  个, Bran2 connier 给出了一个简单实用的对椭圆参数  $d, c$  进行优化的方法<sup>[12]</sup>.

**算法 2** Chebyshev 椭圆参数优化如下.

$$(1) \quad d = [\operatorname{Re}(\lambda_{r+1}) + \operatorname{Re}(\lambda_k)]/2$$

$$a = \operatorname{Re}(\lambda_{r+1}) - d; \quad v = 010$$

$$(2) \quad b = \max_i \frac{|\operatorname{Im}(\lambda_i)|}{\{a^2 - [\operatorname{Re}(\lambda_i) - d]^2\}^{1/2}}$$

$$c^2 = a^2 - b^2$$

(3) 如果  $E(d, c, a)$  满足要求, 停止; 否则

$$v = v + 1; \quad a = a + \frac{\operatorname{Re}(\lambda_{r+1}) - v \operatorname{Re}(\lambda_r)}{v + 110}$$

返回(2)

### 3.1.5 用于加速的 Chebyshev 多项式的迭代公式

对于椭圆簇  $E(d, c, a)$ ,  $d \in \mathbf{R}, c \in \mathbf{R}, a \in \mathbf{R}$ , 有如下迭代算法 1

**算法 3** Chebyshev 多项式迭代如下.

(1) 选定初始向量  $v_1^{(0)}$ , 计算

$$\lambda_1 = c/(\lambda_r - d); \quad v_1^{(1)} = \frac{1}{c}(A - dI)v_1^{(0)}$$

(2)  $l$  阶 Chebyshev 多项式迭代

$$\text{For } i = 1, 2, \dots, l - 1$$

$$\lambda_{i+1} = 1/(2/\lambda_i - \lambda_i)$$

$$v_1^{(i+1)} = \frac{2}{c} \lambda_{i+1} (A - dI)v_1^{(i)} - \lambda_{i+1} v_1^{(i-1)}$$

### 3.1.6 Arnoldi-Chebyshev 迭代公式

**算法 4** Chebyshev 加速的显式重启 Arnoldi 方法如下.

(1) 给定  $r, k, l, \lambda_1, v_1, \dots, v_{l-1}$ .

(2) 实施算法 1, 得到的  $k$  个 Ritz 值按实部递减排列, Ritz 向量相应排列.

(3) 根据式(6), 如果

$$\max_i \{ |h_{k+1,k}| e^T y_i, i = 1, \dots, r \} <$$

结束,否则,继续.

(4) 实施算法 2,得到 Chebyshev 多项式参数.

(5) 取  $v_1^{(0)} = \sum_{i=1}^r x_i$ , 实施算法 3.

(6) 返回(2).

在算法 4 中,  $n$  维初始向量  $v_1$  的各元素取为  $[ - 015, 015 ]$  间均匀分布的随机数,子空间的维数  $k$  一般取为  $3r \sim 5r$ , Chebyshev 多项式阶数  $l$  的取值在后面的算例中加以说明. 重启向量  $v_1^{(0)}$  中权系数  $x_i$  的选取是一个十分复杂的问题,文献[11]建议取  $x_i = Ax_i - x_i$  或  $x_i = 1$ , 多个计算结果表明,后者稍好,因此本文选用后者. 文献[12]也曾建议取  $v_1^{(0)} = x_1$ , 但计算效果不好.

### 4 算例及其分析

对 Anderson 3 机系统和我国某区域 46 机系统进行了分析研究,并和 MATLAB 中的函数 eig(双位移 QR 法)求得的特征值进行比较,从而说明本文方法的有效性和正确性.

按照文献[2]中给定的数学模型, Anderson 3 机系统共有 16 个状态变量. 在用本文方法的计算中,  $r = 4, k = 12, \epsilon = 10^{-6}$ , 表 1 给出了迭代过程中 4 个特征值及其相应的误差值.

表 1 3 机系统的迭代过程

迭代/次	特征值	误差
	01918 334 0	01019 775 4
0	- 01154 950 1 ±i81680 982 4	01000 648 5
	- 01753 160 3 +i121864 447 5	01000 326 1
	01158 244 1	01000 161 8
1	- 01151 542 5 ±i81671 249 8	01000 000 0
	- 01365 689 2 +i01600 090 0	01002 327 5
	01015 641 0	410 ×10 <sup>-6</sup>
3	- 01061 129 7	319 ×10 <sup>-6</sup>
	- 01151 542 9 ±i81671 249 7	110 ×10 <sup>-12</sup>
	01000 039 9	410 ×10 <sup>-8</sup>
4	- 01045 762 3	510 ×10 <sup>-8</sup>
	- 01151 542 9 ±i81671 249 7	110 ×10 <sup>-14</sup>

用 eig 求出的 4 个最右端的特征值为 - 01000 000 0, - 01045 709 1 和 - 01151 542 9 ±i81671 249 7. 显然,用本文方法可以正确地计算出

系统 4 个最右端的特征值.

对于 46 机实际系统,在所考虑的模型下共有 493 个状态变量,在用本文方法的计算中,  $r = 12, k = 60, \epsilon = 10^{-6}$ . 表 2 给出了迭代过程中的误差. 表 3 给出了本文方法和 eig 计算出的 12 个最右端的特征值.

表 2 46 机系统的迭代过程

迭代/次	最大误差	迭代/次	最大误差
0	01562 991 1	9	01008 778 9
1	01604 087 7	10	01005 830 1
2	01674 991 7	11	01003 439 6
3	01311 673 4	12	01001 072 0
4	01714 523 8	13	31622 70 ×10 <sup>-4</sup>
5	01033 312 9	14	21349 23 ×10 <sup>-4</sup>
6	01093 844 6	15	11728 83 ×10 <sup>-5</sup>
7	01036 639 6	16	31920 59 ×10 <sup>-7</sup>
8	01033 194 6		

表 3 46 机系统的最右特征值

本文方法	QR 法
01053 009 4 ±i91461 773 2	01053 009 2 ±i91461 773 2
01050 212 5 ±i91594 699 3	01050 212 1 ±i91594 698 8
01048 287 5 ±i91704 626 7	01048 287 5 ±i91704 626 7
01042 406 7 ±i81571 366 5	01042 406 7 ±i81571 366 5
01037 395 5 ±i101165 891 1	01037 395 5 ±i101165 891 1
01022 225 5 ±i61964 785 8	01022 225 4 ±i61964 786 0

图 1 给出了用本文方法和 QR 法计算出该系统最右端的 12 个特征值分布. 显然,用本文方法也可以正确地计算出系统 12 个最右端的特征值.

Chebyshev 多项式阶数  $l$  对方法的收敛性有很大的影响,但  $l$  的取值却没有系统化的方法. 根据计算经验,本文取  $l = \min \{ l_0(t+1), 800 \}$ , 其中  $t$  为迭

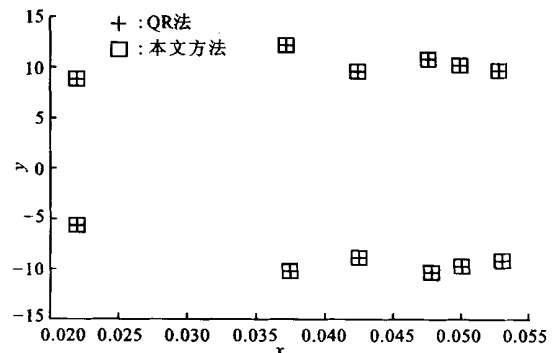


图 1 46 机系统最右端的 12 个特征值分布

代次数. 在 3 机系统特征值计算时,  $l_0 = 40$ ; 在 46 机系统特征值计算时,  $l_0 = 100$ .

两个系统的计算结果表明, 本文方法可以准确地求得我们所需要的按实部递减的特征子集和相应的特征向量, 并且各特征值不被遗漏, 因此能够用于大规模电力系统的小干扰稳定性分析.

## 5 结 论

电力系统的小干扰稳定性分析需要计算系统状态矩阵的特征值. 当系统规模巨大时, 传统的 QR 法失效. 本文提出了一种直接计算大规模电力系统按实部递减特征子集的显式重启 Arnoldi-Chebyshev 算法. 这种方法通过 Arnoldi 分解构造低维 Krylov 子空间, 使得该子空间包含按实部递减特征子集的信息, Chebyshev 加速技术加快了方法的收敛性. 两个数值算例的结果表明, 该算法能有效地求出大规模系统按实部递减的特征子集, 并且各特征值不被遗漏.

提出的方法不但可以用于大规模电力系统的小干扰稳定性分析, 而且可以在抑制低频振荡控制器参数的优化配置中方便使用.

### 参考文献:

- [1] 夏道止. 电力系统分析: 下册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 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.
- [3] PerezArriaga I J, Verghese G C, Schweppe F C. Selective modal analysis with applications to electric power systems: part I and part II [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus

- and Systems, 1982, 101(9): 3 117 - 3 134.
- [4] Uchida N, Nagao T. A new eigenanalysis method of steady state stability studies for large power systems: S matrix method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 706 - 714.
- [5] Wang L, Semlyen A. Application of sparse eigenvalue techniques to the small signal stability analysis of large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 635 - 642.
- [6] 谷寒雨, 陈 陈. 一种新的大型电力系统低频机电模式计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 50 - 54.
- [7] 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): 36 - 42.
- [8] Lee B, Song H, Kwon S H, et al. Calculation of rightmost eigenvalues in power systems using the block (BACM) Arnoldi-Chebyshev method [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 2003, 150(1): 23 - 27.
- [9] Morgan R B. On restarting the Arnoldi method for large nonsymmetric eigenvalue problems [J]. Math Comp, 1996, 65(215): 1 213 - 1 230.
- [10] Saad Y. Numerical methods for large eigenvalue problems [M]. Manchester: Manchester University Press, 1992.
- [11] Saad Y. Chebyshev acceleration techniques for solving nonsymmetric eigenvalue problems [J]. Math Comp, 1984, 42(166): 567 - 588.
- [12] Scott J A. An Arnoldi code for computing selected eigenvalues of sparse, real, unsymmetric matrices [J]. ACM Transaction on Mathematical Software, 1995, 21(4): 432 - 475.

(编辑 杜秀杰)

### [文摘预登]

## 不连续定子永磁直线同步电动机运行过程分析

上官璇峰<sup>1</sup>, 励庆孚<sup>1</sup>, 袁世鹰<sup>2</sup>, 焦留成<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049 西安; 2. 焦作工学院电力, 454000 焦作)

从不连续定子永磁直线同步电动机的结构特点和工作原理出发, 建立起电机的仿真模型. 通过对一台样机运行过程的仿真、分析, 探讨动子运动过程中电机电磁推力的变化规律, 寻求改善电磁推力稳定性的方法. 研究表明, 若相邻定子绕组间的距离为磁场基波波长的整数倍, 动子有效长度为相邻定子中心轴线间距的整数倍, 且各段定子对应电流大小相等、相位相同时, 推力较稳定. 若不满足相邻定子绕组间的距离为磁场基波波长的整数倍时, 可通过调节定子电流相位来稳定电磁推力.