

# 基于分块信息矩阵十字链表的快速状态估计方法

颜伟<sup>1</sup>, 项波<sup>1</sup>, 黄正波<sup>1</sup>, 卢建刚<sup>2</sup>, 李钦<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030;

2. 广东电网公司电力调度通信中心, 广东 广州 510600)

**摘要:** 充分利用信息矩阵的分块对称稀疏结构特点, 提出了一种基于分块信息矩阵十字链表的快速状态估计方法。采用等效电流量测变换技术, 将功率量测方程严格等值变换为电流量测方程, 使非对角雅可比矩阵元素为常数, 以利于信息矩阵的修正。创建了分块信息矩阵的下三角分块十字链表, 提高了信息矩阵内存空间操作与节点优化编号的效率。基于量测方程与分块信息矩阵的网络节点关联关系, 提出了信息矩阵形成与修正的量测方程直接追加法, 避免了雅可比矩阵的存储操作及其矩阵运算, 提高了分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的效率。通过 IEEE118、IEEE300 以及波兰 2746 节点的仿真测试, 验证了所提方法的快速性。

**关键词:** 分块信息矩阵; 十字链表; 状态估计; 稀疏技术; 电力系统

## A fast state estimation method based on orthogonal list of block information matrix

YAN Wei<sup>1</sup>, XIANG Bo<sup>1</sup>, HUANG Zheng-bo<sup>1</sup>, LU Jian-gang<sup>2</sup>, LI Qin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),

Chongqing 400030, China; 2. Guangdong Electric Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** Making full use of block symmetric and sparse characteristics of information matrix, a fast state estimation method based on orthogonal list of block information matrix is proposed. Firstly, in order to facilitate the modification of information matrix, the equivalent current measurement transformation technique is used to transform power measurement equation into current measurement equivalently, making the off-diagonal elements of Jacobian matrix become constant. Secondly, the lower triangular block orthogonal list of block information is created, so that the efficiency of memory space operation and node optimizing code of information matrix is improved. Finally, based on the network node correlative relationship of measurement equation and information matrix, the measurement equations direct superaddition method of the formation and modification of information matrix is proposed. It avoids the access operation and calculation of jacobian matrix, and improves the efficiency of formation and modification of the information matrix and the efficiency of the creation of memory space of relevant orthogonal list. The rapidity of the proposed method is verified by the simulation test on IEEE118, IEEE300 and Poland2746 bus system.

**Key words:** block information matrix; orthogonal list; state estimation; sparse technology; power system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0028-05

## 0 引言

状态估计是能量管理系统(EMS)的核心功能,是EMS高级应用软件实用化的基础。状态估计的计算速度一直是相关研究人员关心的重点问题。稀疏技术可大幅度提高线性方程组的求解效率,目前已广泛应用于电力系统分析计算的各个领域,比如

潮流计算<sup>[1-2]</sup>、状态估计<sup>[3-5]</sup>和安全分析<sup>[6-7]</sup>等。文献[3]在快速解耦状态估计方法的基础上采用十字链表技术来实现相关矩阵的存储与计算。文献[4]提出了一种基于分块吉文斯(Givens)旋转的快速状态估计算法。其中采用行链表来存储量测雅可比矩阵非零分块子阵,每个分块子阵的维数为 $1 \times 2$ ,对应同一节点电压的实部和虚部雅可比矩阵元素。文献[5]采用稀疏向量法求解状态估计的线性迭代方程组,并采用加链的数组来存储量测雅可比矩阵及信息矩阵因子分解后的上三角非零元素。

**基金项目:** 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512710204)

本文充分利用信息矩阵的分块对称稀疏结构特点, 提出了一种基于分块十字链表的快速状态估计方法。首先, 论文采用等效电流量测变换技术, 将功率量测方程严格等值变换为电流量测方程, 使非对角雅可比矩阵元素为常数, 以利于信息矩阵的修正。其次, 创建了分块信息矩阵的下三角分块十字链表, 每个链表单元存储一个  $2 \times 2$  阶的分块信息子阵, 对应任意两个节点的电压实部和虚部变量同时关联的 4 个信息矩阵元素, 由此提高了信息矩阵内存空间操作与节点优化编号的效率。最后, 基于量测方程与分块信息矩阵的网络节点关联关系, 提出了信息矩阵形成与修正的量测方程直接追加法, 避免了雅可比矩阵的存储操作及其矩阵运算, 提高了分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的效率。

## 1 基于电流型量测方程的状态估计方法

### 1.1 直角坐标下的电流量测方程

状态估计的量测量通常采用: 注入功率量测、支路功率量测和电压幅值量测。本文基于直角坐标, 将功率量测方程等值变换为电流量测方程。具体变换如下:

(1) 节点注入电流量测方程

节点  $i$  的注入功率量测值分别为  $P_i^{\text{mea}}$  和  $Q_i^{\text{mea}}$ , 其功率量测方程等值变换为注入电流量测方程, 有:

$$0 = \sum_{j=1}^N (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - \frac{P_i^{\text{mea}}e_i + Q_i^{\text{mea}}f_i}{e_i^2 + f_i^2} + v_1 \quad (1)$$

$$0 = \sum_{j=1}^N (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) - \frac{P_i^{\text{mea}}f_i - Q_i^{\text{mea}}e_i}{e_i^2 + f_i^2} + v_2 \quad (2)$$

公式 (1) 和 (2) 分别表示节点注入电流的实部和虚部量测方程;  $v_1$  和  $v_2$  分别表示对应的量测误差;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别表示节点导纳矩阵中的电导和电纳;  $e_i$ 、 $f_i$ 、 $e_j$  和  $f_j$  分别表示节点  $i$  和  $j$  的电压实部和虚部状态量;  $N$  表示节点总数。

(2) 支路电流量测方程

设支路  $ij$  的  $i$  侧有功和无功功率量测值分别为  $P_{ij}^{\text{mea}}$  和  $Q_{ij}^{\text{mea}}$ , 其功率量测方程等值变换为支路电流量测方程, 有:

$$0 = (e_i - e_j)g_{ij} - (f_i - f_j)b_{ij} + e_i g_0 - f_i b_0 - \frac{P_{ij}^{\text{mea}}e_i + Q_{ij}^{\text{mea}}f_i}{e_i^2 + f_i^2} + v_3 \quad (3)$$

$$0 = (f_i - f_j)g_{ij} + (e_i - e_j)b_{ij} + e_i b_0 + f_i g_0 - \frac{P_{ij}^{\text{mea}}f_i - Q_{ij}^{\text{mea}}e_i}{e_i^2 + f_i^2} + v_4 \quad (4)$$

公式 (3) 和 (4) 分别表示支路电流的实部和虚部量测方程,  $v_3$  和  $v_4$  为对应的量测误差;  $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$  和  $g_0$ 、 $b_0$  分别表示支路电导、电纳和对地电导、电纳的  $1/2$ 。

(3) 电压幅值量测方程

$$(V_i^{\text{mea}})^2 = e_i^2 + f_i^2 + v_5 \quad (5)$$

式中:  $V_i^{\text{mea}}$  为  $i$  节点的电压幅值;  $v_5$  表示电压幅值量测方程的量测误差。

由式 (1) ~ (4) 可见, 功率量测方程变换成电流量测方程后, 量测方程雅可比矩阵非对角元素为常数, 有利于信息矩阵的修正。

### 1.2 基于电流量测方程的加权最小二乘状态估计

量测方程及其对应的加权最小二乘目标可集中表示为:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (6)$$

$$\min J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (7)$$

式 (6)、(7) 中:  $\mathbf{z}$  表示量测矢量;  $\mathbf{x}$  表示状态变量即电压实部、虚部矢量;  $\mathbf{R}^{-1}$  表示对角的权重矩阵;  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  表示量测函数矢量;  $\mathbf{v}$  表示量测误差矢量。

根据文献[8]方法, 式(7)的加权最小二乘目标函数求解的迭代修正方程可表示为:

$$\mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{b} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \quad (9)$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(l)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)})] \quad (10)$$

式 (8) ~ (10) 中:  $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(l)})$ 、 $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{b}$  分别表示量测函数的雅可比矩阵、迭代方程的信息矩阵和不平衡偏差量向量;  $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(l)}$  为第  $l$  次迭代的状态变量修正量矢量; 上标  $l$  表示迭代次数。

## 2 分块信息矩阵的十字链表结构及其形成与修正的量测方程直接追加法

### 2.1 分块信息矩阵及其特点

根据式 (9), 信息矩阵可由  $(2 \times 2)$  阶分块子阵的基本单元重构, 该子阵为:

$$\mathbf{A}_{ij} = \sum_{k=1}^m \left( R_k^{-1} \begin{bmatrix} H_{k,i_e} \\ H_{k,i_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{k,j_e} & H_{k,j_f} \end{bmatrix} \right) = \sum_{k=1}^m (R_k^{-1} \mathbf{A}_{ij}^k) \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_{ij}^k = \begin{bmatrix} H_{k,i_e} H_{k,i_e} & H_{k,i_e} H_{k,i_f} \\ H_{k,i_f} H_{k,i_e} & H_{k,i_f} H_{k,i_f} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式 (11) 中:  $H_{k,i_e}$ 、 $H_{k,i_f}$ 、 $H_{k,j_e}$  和  $H_{k,j_f}$  为量测方程的一阶偏导数;  $\mathbf{A}_{ij}$  和  $\mathbf{A}_{ij}^k$  分别为信息子阵及其子阵分量; 下标或上标的  $k$  表示第  $k$  个量测方程;  $m$  为量测方程总数; 下标的  $i$  和  $j$  表示信息子阵所关联

的两个节点的编号；下标的 e 和 f 表示信息子阵所关联的节点电压实部和虚部。式 (11) 表示对应任意两个节点的电压实部和虚部变量同时关联的 4 个信息矩阵元素。本文即以式 (11) 的  $A_{ij}$  分块子阵为基本单元重构信息矩阵，创建分块信息矩阵十字链表，实现迭代方程的求解。

分析式 (1) ~ (5) 的量测方程及式 (11) 的分块信息子阵，可发现分块信息矩阵具有如下三个特点：

(1) 分块信息矩阵的部分常数化特点

由式 (11) 可见，信息矩阵中每个非零元素都是由量测方程雅可比矩阵元素两两乘积的代数和形成的。由于电流量测方程的不完全线性化与其雅可比矩阵的不完全常数化，使每个量测方程对应分块信息子阵分量  $A_{ij}^k$  可能是常数子阵或可变量子阵（与电压有关），相应由  $A_{ij}^k$  叠加形成的  $A_{ij}$  可分解为常数子阵分量和可变量子阵分量两部分。因此，若修正  $A_{ij}$  时保留常数子阵分量，只修正可变量子阵分量，则可提高信息矩阵的修正效率。

(2) 分块信息矩阵的对称性特点

分析式 (11) 可得，除对角子阵  $A_{ii}$  外，分块信息子阵内部的四个单元不具有对称性。但非对角子阵之间具有对称性，即  $A_{ij}=A_{ji}^T$ 。

(3) 分块信息矩阵的分块子阵与电网节点的关联性特点

根据式 (11) 和式 (12)，分块信息子阵  $A_{ij}$  直接与电网节点关联，其下标就是电网的节点编号。本文将电网节点从 1 开始进行连续自然编号，则子阵下标  $i$  和  $j$  即代表子阵在分块信息矩阵中的行列号位置。相应可根据量测方程所关联电网节点确定其对应分块信息子阵在信息矩阵中的位置。

2.2 分块信息矩阵的分块十字链表结构

结合 2.1 节分块信息矩阵的特点，本文建立了一个分块下三角十字链表。与普通十字链表<sup>[3]</sup>相同，本文所建链表的每个存储单元也包含矩阵对应节点元素的行号、列号和元素值，以及该节点同列的下一个非零元素地址和同行的下一个非零元素地址。另外还有存储矩阵行首非零元地址和主对角元素地址的两个辅助指针数组。与普通十字链表不同的是，为了兼顾本文分块子阵的四个基本元素及其可变与不变分量，本文链表的每个存储单元对应一个分块子阵，其中包含八个值，每两个值对应一个子阵基本元素的两个分量。由此大幅度减少了信息矩阵基本存储单元的个数，不仅提高了其链表空间的操作

效率，而且提高了以分块信息子阵为基础的节点优化编号效率。

2.3 分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的量测方程直接追加法

本文在深入分析量测方程分块信息子阵的结构和数值特点基础上，提出了分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的量测方程追加法。具体如下：

2.3.1 量测方程分块信息子阵的结构和数值特点

(1) 支路量测方程分块信息子阵的结构和数值特点

根据式 (3) 和式 (4) 的支路量测方程可以推导得知：一条支路关联两个节点  $i$  和  $j$ ，当任意一侧或两侧都同时存在有功和无功量测信息时，对应量测方程可确定四个非零子阵及其在分块信息矩阵中的行列位置，分别是  $A_{ii}$ 、 $A_{ij}$ 、 $A_{ji}$  和  $A_{jj}$ 。当量测信息在  $i$  侧时，与  $i$  侧电压无关的信息子阵  $A_{jj}$  是常数；反之，当量测信息在  $j$  侧时， $A_{ii}$  是常数子阵。四个子阵的互子阵具有对称性，即  $A_{ij}=A_{ji}^T$ 。

(2) 节点注入量测方程信息子阵的结构和数值特点

根据式 (1) 和式 (2) 的节点注入量测方程可以推导得知：若一个同时存在有功和无功注入功率量测信息的节点  $i$  关联另外两个节点  $j$  和  $k$ ，则由这三个节点的自组和两两组合，可确定九个非零子阵，相当于 (3×3) 阶矩阵的子阵个数，分别是  $A_{ii}$ 、 $A_{ij}$ 、 $A_{kk}$ 、 $A_{ij}$ 、 $A_{ik}$ 、 $A_{jk}$ 、 $A_{ji}$ 、 $A_{ki}$  和  $A_{kj}$ 。其中，与  $i$  侧电压无关的四个信息子阵  $A_{ij}$ 、 $A_{kk}$ 、 $A_{jk}$  和  $A_{kj}$  是常数子阵。同样，其中的互子阵也具有对称性，如  $A_{ij}=A_{ji}^T$ 。类似地，若节点  $i$  关联了 (N-1) 个其他节点，则可确定 (N×N) 阶矩阵的子阵个数，具体子阵同样可采用节点的自组和两两组合方法来确定。同样，与  $i$  侧电压无关的信息子阵也是常数，互子阵也具有对称性。

(3) 节点电压量测方程信息子阵的结构和数值特点

根据式 (5) 可以推导得知：节点  $i$  的电压幅值量测方程所确定的分块信息子阵是  $A_{ii}$ ，其为可变量子阵。

2.3.2 分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的量测方程追加法

由 2.3.1 节方法可知，根据每个量测方程的节点关联信息，可唯一确定其关联信息子阵分量的值  $A_{ij}^k$  和位置  $(i,j)$ 。为此，本文在创建信息矩阵及其链表空间时，从第一条支路到最后一条支路，再从第一个节点到最后一个节点，逐个检查其量测信息，逐个

计算非零信息子阵的数值, 逐个查找子阵的位置, 逐个开辟子阵对应的十字链表存储空间, 逐个进行子阵分量数值的叠加。比如根据量测方程确定了一个子阵分量  $A_{ij}^k$ , 首先查找十字链表空间的  $i$  行  $j$  列元素是否存在。不存在, 则开辟一个链表空间, 并保存  $A_{ij}^k$  的值; 已存在, 则进行子阵的常数和非常数分量的叠加。如此反复, 直到所有支路和节点的量测信息全部处理完毕。由此实现分块信息矩阵链表空间的开辟与值的形成。

为了避免  $A_{ij}^k$  修正时链表空间的遍历寻址操作, 本文还建立了支路量测方程的辅助定位指针数组  $P_{line}$  和节点电流量测方程的辅助定位指针数组  $P_{bus}$ 。其中,  $P_{line}$  为一维数组 ( $N_L \times 1$ ),  $N_L$  为支路数, 每个指针存储该支路量测方程非对角子阵  $A_{ij}$  的地址 (或 Null, 对应支路无量测信息)。 $P_{bus}$  为二维指针数组 ( $N_b \times N_{max}$ ), 其中  $N_b$  为节点数,  $N_{max}$  为系统单个节点关联其他节点的最大个数, 每行的每个指针存储该节点电流量测方程所关联的可变非对角子阵地址。比如  $i$  与  $j$  和  $k$  关联, 则需要定位修改可变的  $A_{ij}$  和  $A_{ik}$  子阵 ( $A_{ji}$  和  $A_{ki}$  与其对称, 不需要存储)。这样, 在遍历量测方程时, 每开辟一个可变非对角子阵分量的链表空间, 都同时将其地址赋值给对应的  $P_{bus}$  或  $P_{line}$ 。修正信息矩阵时, 就可以根据  $P_{bus}$  或  $P_{line}$  中的地址, 直接定位修正相关子阵元素, 从而提高信息矩阵修正的效率。

### 3 基于分块信息矩阵十字链表的状态估计迭代求解步骤

(1) 对电网节点进行连续自然编号, 起始编号为 1。

(2) 根据支路的节点与导纳信息, 创建节点导纳矩阵十字链表  $Y$ 。

(3) 结合  $Y$  及支路和节点量测方程所关联的电网节点, 根据 2.3.1 节的方法, 确定分块信息矩阵各非零子阵的节点与节点关联矩阵十字链表  $M$ 。

(4) 根据  $M$ , 采用半动态节点优化编号<sup>[9]</sup>方法, 对电网节点进行重新编号, 并建立新旧节点的关联关系。注意, 不能根据  $Y$  来进行优化编号。尽管  $Y$  和  $M$  所对应的网络节点完全相同, 但因为节点电流量测方程使其中的所有子阵节点两两关联, 从而导致  $M$  中节点与节点的关联范围比  $Y$  多。

(5) 初始化节点电压的实部与虚部状态变量  $X_0$ , 置迭代次数  $k=0$ 。

(6) 采用 2.3.2 节的方法, 遍历所有支路和节点量测方程, 按式 (11) 直接计算量测方程的分块信

息子阵分量及迭代方程的不平衡偏差量  $b$ , 创建信息矩阵的下三角分块十字链表  $A_0$  及辅助定位指针数组  $P_{bus}$  和  $P_{line}$ , 并以  $A_0$  为消元链表。

(7) 采用对称分块矩阵高斯消元迭代计算, 更新状态变量  $X_1$ 。

(8) 若  $k=0$ , 则保留含消元注入元的信息矩阵分块十字链表  $A_1$ 。否则, 转下一步。

(9) 对  $A_1$  中分块子阵的可变分量清零, 保留常数分量。置迭代次数  $k=k+1$ 。

(10) 收敛性判断。若收敛, 则输出状态估计结果, 否则转下一步。

(11) 根据  $X_1$ , 采用 2.3.2 节的方法, 遍历所有量测方程, 按式 (11) 和  $P_{bus}$  与  $P_{line}$ , 定位计算修正  $A_1$  中的分块信息子阵可变量和  $b$ , 并以  $A_1$  为消元链表。转步骤 (7)。

## 4 仿真结果分析

为了检验所提算法的有效性, 论文对 IEEE118、IEEE300 以及波兰 2746 节点的 3 个算例系统进行了测试。

算例中量测配置方法是: 在潮流计算的结果中选取所有节点的电压幅值、注入功率以及所有支路一侧的功率作为系统的量测真值。并以该量测真值为基准, 叠加零均值、标准差为  $\sigma$  的正态分布随机数得量测值。其中电压幅值的标准差为 0.004, 支路功率的标准差 0.008, 注入功率的标准差为 0.01。然后根据误差传递方法<sup>[10]</sup>由功率和电压的标准差计算电流和电压的实部与虚部标准差及权重。计算中, 迭代收敛精度统一为  $\varepsilon_e = \varepsilon_f = 10^{-4}$ 。

为了验证论文稀疏技术的效率, 我们构造了两个方法: 方法一为本文方法。方法二为文献[8]提出的功率量测方程基本加权最小二乘法, 其中采用十字链表来存储导纳矩阵、雅可比矩阵和信息矩阵的非零元素, 采用同样的对称矩阵高斯消元法和半动态编号法。与方法一的主要区别: (1) 信息矩阵不分块; (2) 采用雅可比矩阵叉乘形成信息矩阵; (3) 采用功率量测方程。

在 VC6.0 语言环境下编制测试程序, 程序运行计算机: 主频为 Pentium(R) Dual-Core CPU 2.60 GHz, 内存 2 GB, 兼容机。

三个算例的收敛结果如表 1 所示。其中, 本文方法 (方法一) 的收敛迭代次数少于或等于文献方法 (方法二), 平均每次迭代时间为文献方法的 25% 左右。这说明本文方法相对经典的文献方法具有明

显的速度优势。

表1 两种算法的估计时间以及迭代次数比较

Tab.1 Comparing computation time of estimation and iterations about 2 algorithms

计算时间		系统名称		
		IEEE118	IEEE300	波兰 2746
状态估计时间/ms	方法一	3.3	10.5	294.6
	方法二	13.7	46.9	1 505.4
平均每次迭代时间/ms	方法一	0.825	2.625	73.65
	方法二	3.425	9.38	301.08
迭代次数	方法一	4	4	4
	方法二	4	5	5

## 5 结论

论文基于十字链表技术，结合功率量测方程的电流变换、信息矩阵的分块对称重构、分块信息矩阵形成与修正的量测方程直接追加，形成了一种快速状态估计算法。该方法具有如下特点：

(1) 采用等效电流量测变换技术，将功率量测方程严格等值变换为电流量测方程，使非对角雅可比矩阵元素为常数，有利于提高信息矩阵的修正效率。

(2) 利用信息矩阵的分块对称稀疏结构特点，创建了分块信息矩阵的下三角十字链表，提高了信息矩阵内存空间操作与节点优化编号的效率。不仅如此，该方法还可以推广至功率量测方程的基本加权最小二乘法，同样可以提高该方法的速度。

(3) 充分利用量测方程与分块信息矩阵的网络节点关联关系，提出了分块信息矩阵形成与修正的量测方程直接追加法，避免了雅可比矩阵的存储操作及其矩阵运算，提高了分块信息矩阵形成与修正及其十字链表存储空间开辟的效率。同样，该方法也可以推广至功率量测方程的基本加权最小二乘法。

(4) 算例结果表明，论文的稀疏计算方法具有明显的速度优势，这对于大型电力系统状态估计的在线计算具有重大实用价值。

## 参考文献

[1] MICHELE Benzi. Preconditioning techniques for large linear systems: a survey[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 182, 418-477.

[2] 朱凌志, 安宁. 基于二维链表的稀疏矩阵在潮流计算中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (8): 51-55.

ZHU Ling-zhi, AN Ning. Application of two-dimensional chain table based sparse matrix in

power flow calculation[J]. Power System Technology, 2005, 29 (8): 51-55.

[3] 陈海占. 电力系统状态估计的程序实现及算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.

CHEN Hai-zhan. Study on algorithm of power system state estimation and the realization of program[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.

[4] 郭瑞鹏, 邵学俭, 韩祯祥. 基于分块吉文斯旋转的电力系统状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 26-31.

GUO Rui-peng, SHAO Xue-jian, HAN Zhen-xiang. A blocked givens rotations based algorithm for power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 26-31.

[5] 徐得超, 李亚楼, 吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31 (8): 32-36.

XU De-chao, LI Ya-lou, WU Zhong-xi. Application of sparse techniques in power system state estimation[J]. Power System Technology, 2007, 31 (8): 32-36.

[6] 何洋, 洪潮, 陈昆薇. 稀疏向量技术在静态安全分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 41-44.

HE Yang, HONG Chao, CHEN Kun-wei. Study of sparse vector techniques applied to contingency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1): 41-44.

[7] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (5): 63-66.

GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An improved zero eigen value method for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (5): 63-66.

[8] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

YU Er-keng. Power system state estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

[9] Tinney W F, Walker J W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization[J]. Proc of the IEEE, 1967, 55 (11): 1801-1809.

[10] 杨惠连, 张涛. 误差理论与数据处理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992.

YANG Hui-lian, ZHANG Tao. Error theory and data disposal[M]. Tianjin: Tianjin University Publishing Company, 1992.

收稿日期: 2009-11-06

作者简介:

颜伟(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究; E-mail: cqyuanwei@cqu.edu.cn

项波(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制;

黄正波(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制。