

# MPCG算法在GIS三相共罐式SF<sub>6</sub>高压断路器 电场计算中的应用

马爱清<sup>1</sup>, 郑勇<sup>2</sup>, 江秀臣<sup>1</sup>, 曾奕<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海市 徐汇区 200030; 2. 正泰电气股份有限公司, 上海市 松江区 201614)

## Application of MPCG Algorithm to Three Dimensional Electric Field Calculation of SF<sub>6</sub> Circuit Breaker in Three-phase-in-one-tank GIS

MA Ai-qing<sup>1</sup>, ZHENG Yong<sup>2</sup>, JIANG Xiu-chen<sup>1</sup>, ZENG Yi<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Xuhui District, Shanghai 20030, China;  
2. Chint Electrical Co. Ltd., Songjiang District, Shanghai 201614, China)

**ABSTRACT:** Based on the character of the complex structure of SF<sub>6</sub> circuit breaker in three-phase-in-one-tank GIS, the modified preconditioned conjugate gradient(MPCG) algorithm applied to solve multi-nodes and multi-elements large sparse real positive defined symmetric matrix is analyzed and the program diagram of MPCG algorithm is also proposed. According to the sparse symmetric character of coefficient matrix, the method of storing coefficient matrix effectively and rapidly is studied and new data structure is adopted. The finite-element calculation model and physical equations of SF<sub>6</sub> circuit breaker are founded. The large sparse matrix is solved by using the MPCG algorithm. The electric field intensity and potential distribution are calculated under power frequency voltage and their corresponding profile charts and planforms are given. They can provide a useful and optimized design parameters for designing the circuit breaker configuration in GIS.

**KEY WORDS:** modified preconditioned conjugate gradient; three-phase-in-one-tank; circuit breaker; finite element method; sparse matrix

**摘要:** 针对实际的GIS三相共罐式SF<sub>6</sub>高压断路器模型结构复杂的特点, 分析了适用于计算多节点、多单元的大型稀疏正定实对称矩阵求解的修正预优共轭梯度算法MPCG, 给出MPCG算法的迭代流程。根据系数矩阵稀疏、对称的特点, 对系数矩阵的寻址方法进行了研究, 引入了新的数据结构, 该方法可以快速、有效地解决系数矩阵的寻址问题, 占用内存少, 寻址速度快。建立计算三维电场有限元模型及数学方程, 根据该模型方程对高压断路器在工频测试电压下的电位和电场进行了计算, 采用MPCG算法来求解所得到的大型有限元方程组。根据计算的电位和电场分布剖面图以及俯视图,

可以为GIS断路器内部各部件的优化配置提供很好的参考。

**关键词:** 修正预优共轭梯度算法; 三相共罐式; 高压断路器; 有限元法; 稀疏矩阵

## 0 引言

随着GIS三相共罐式SF<sub>6</sub>高压断路器(以下简称为GIS断路器)体积的小型化<sup>[1-2]</sup>, 对GIS断路器内部结构和布置以及绝缘配合问题提出了新的设计要求。利用广泛使用的有限元计算方法对GIS断路器的三维电场进行数值计算, 根据计算的电场分布情况指导断路器各相间的结构距离, 通过增加间隙的大小来提高绝缘强度, 同时充分考虑电场的均匀性, 使极间及整个场域的电场分布尽可能均匀, 在罐体结构小型化的同时, 尽量提高绝缘强度, 为新产品的开发研制提供参考。

用有限元法求解静态电磁场问题最终归结为求解一组代数方程组的问题<sup>[3-4]</sup>。对于大型的三维工程问题, 有限元离散方程组的阶数可达到几十万阶, 因此直接法(Gauss消去法、直接三角分解法等)难以适用, 而迭代法(Gauss-Seidel迭代法、超松弛迭代法等)依赖与问题有关的最佳松弛因子的选择, 而且有时还不能保证收敛, 也不适用于大型有限元方程组的求解<sup>[5]</sup>。半迭代法(共轭梯度法, conjugate gradient, CG)理论上可以有限步收敛, 不必预先估计参数, 但它的收敛性与系数矩阵的条件数紧密相关。20世纪70年代后期发展起来的预处理技术, 使预处理共轭梯度法(preconditioned conjugate gradient, PCG)在电磁场数值计算领域得到了广泛

应用。文献[6]通过使系数矩阵的对角元素均匀化来降低矩阵的条件数；文献[7-8]提到的ICCG算法，通过对系数矩阵进行不完全乔列斯基分解，然后再采用CG算法迭代；文献[10-12]利用雅克比矩阵作为预优矩阵对系数矩阵进行处理，然后再采用CG算法迭代；文献[13]实质是变带宽的ICCG法，人为地对系数矩阵注入零元素，减少了分解时间。对于每一种CG算法的预处理方法，其目的都是为了减小系数矩阵的条件数，使得迭代过程具有好的收敛性，同时也减少了系数矩阵的内存占用量，加快计算速度。但这些算法大多计算的是二维场或是三维 1/4 场域。特别是ICCG算法，由于条件数低，收敛速度快，又比较稳定，在二维场域或是三维 1/4 场域电场计算中得到了广泛的应用。对于一个复杂的三维场域的整体求解，方程组系数矩阵的阶数很大，系数矩阵的增长需要更大的内存空间，如本文中GIS三相共罐式SF<sub>6</sub>高压断路器，不是轴对称的场域，不能将它转化为二维的轴对称场或是三维 1/4 场域来处理，要根据GIS断路器的实际情况，对整个三维场域进行电场数值计算，剖分后得到的系数矩阵阶数达到三十万阶之多。当ICCG算法用来求解这样超大型的有限元方程组时，尽管其算法本身有较快的收敛特性，但迭代过程的矩阵运算时间也是相当长的，从而导致最终的计算时间也很长。

本文引入的MPCG算法<sup>[6,14]</sup>，首先使稀疏矩阵对角元素均匀化，然后在ICCG算法的基础上引进了一个控制参数 $\delta$ 来减少下三角分解矩阵中非零元素的个数，从而既降低了系数矩阵的条件数，又减少了每次迭代过程中的矩阵运算量，但具有和ICCG算法相近的收敛速度，且不增加迭代次数，达到了减少超大型方程组求解时间的效果。

本文在引入了 MPCG 算法的同时，针对超大型系数矩阵的对称、正定、稀疏的特点，设计了一种较好的存储方式，使得在分解和迭代的运算过程中能立即寻址到所需元素，进一步加快了分解和迭代的运算速度，也降低了整个方程组的求解时间。在建立了 GIS 断路器的三维有限元计算模型及相应的数理方程的基础上，采用有限元法计算 GIS 断路器内的电场分布，对有限元方程组采用 MPCG 算法进行求解，计算表明 MPCG 算法求解速度快，计算精度高，根据对计算结果的分析，可以对 GIS 断路器结构进行优化，以满足 GIS 断路器体积小且性能稳定的发展需要。

## 1 MPCG 算法

在电磁场有限元分析方法中，有限元方程为：

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (1)$$

式中系数矩阵  $\mathbf{A}$  为对称正定稀疏矩阵。

ICCG算法是将系数矩阵 $\mathbf{A}$ 作不完全乔列斯基分解，即 $\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{D}\mathbf{L}^T + \mathbf{E}$ ，其中 $\mathbf{L}$ 为下三角矩阵，稀疏性与 $\mathbf{A}$ 相同， $\mathbf{D}$ 为对角阵， $\mathbf{E}$ 为误差矩阵，通常忽略。通过分解，降低了系数矩阵 $\mathbf{A}$ 的条件数，同时又保持了系数矩阵 $\mathbf{A}$ 的稀疏性。然后再用CG算法求解分解后的代数方程组<sup>[6]</sup>。

由于系数矩阵  $\mathbf{A}$  的非零元素之间存在着数量级差别，为了缩小这一差别，MPCG 算法首先对系数矩阵  $\mathbf{A}$  进行了预优化处理，使矩阵  $\mathbf{A}$  的对角线元素均匀化。即将式(1)化成

$$\mathbf{A}'\mathbf{X}' = \mathbf{b} \quad (2)$$

然后再对优化后的系数矩阵  $\mathbf{A}'$  进行带有控制参数  $\delta$  的不完全乔列斯基分解，即  $\mathbf{A}' = \mathbf{L}_1\mathbf{D}_1\mathbf{L}_1^T + \mathbf{E}_1$ ， $\mathbf{L}_1$ 为下三角矩阵， $\mathbf{D}_1$ 为对角矩阵。但在分解过程中引入了控制参数 $\delta$ 来减少矩阵 $\mathbf{L}$ 的非零元素的个数。完成带有控制参数 $\delta$ 的不完全乔列斯基分解后，再用CG法对方程组进行求解。即将式(2)化成

$$\mathbf{C}\mathbf{Y} = \mathbf{d} \quad (3)$$

式(2)、(3)中的矩阵元素由下面各式决定：

$$(1) \mathbf{A}' \text{ 为预优矩阵, } \mathbf{A}' = \mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{B}, \text{ 且 } \mathbf{A}' = \{a'_{ij}\},$$

它的主对角元素为 1，其他元素分别为

$$a'_{ij} = \begin{cases} b_{ii}a_{ij}b_{jj} & i \neq j = 1, 2, \dots, n \\ 1 & i = j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j = 1, 2, \dots, n \\ \sqrt{1/a_{ii}} & i = j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{C} = (\mathbf{L}_1\mathbf{D}_1)^{-1}\mathbf{A}'(\mathbf{L}_1\mathbf{D}_1)^{-T} \\ \mathbf{Y} = (\mathbf{L}_1\mathbf{D}_1)^T\mathbf{X}' \\ \mathbf{d} = (\mathbf{L}_1\mathbf{D}_1)^{-1}\mathbf{b}' \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{L}_1$ 、 $\mathbf{D}_1$ 由式 $\mathbf{G} = \mathbf{L}_1 + \mathbf{D}_1 - \mathbf{I}$ ( $\mathbf{I}$ 为单位矩阵)决定，对 $\mathbf{G}$ 的稀疏性不作预先规定，而是按以下方式决定分解中元素 $g_{ij}$ 的取舍：若矩阵 $\mathbf{A}'$ 的元素 $a'_{ij}$ 为零，则将 $g_{ij}$ 忽略，不作填充；若 $\mathbf{A}'$ 的元素 $a'_{ij}$ 不为零，计算

$$g_{ij} = \frac{[a'_{ij} - \sum_{m=1}^{j-1} g_{im} \times g_{mm} \times g_{jm}]}{g_{jj}} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (7)$$

当 $i > j$ 时，若 $|g_{ij}| < \delta$ ，则将 $g_{ij}$ 忽略，不作填充。

MPCG 算法的迭代流程如图 1 所示。

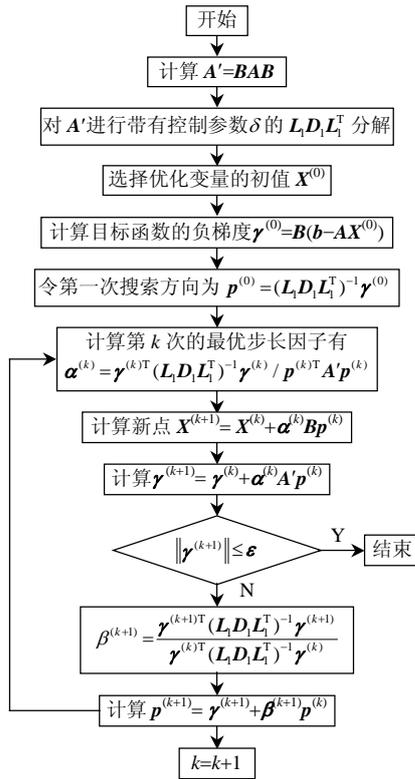


图 1 MPCG 算法程序框图

Fig. 1 The block diagram of MPCG algorithm

图 1 中的  $k(k=1,2,\dots,N)$  为迭代次数。从以上分析可以看出, MPCG 算法不仅可以降低系数矩阵的条件数, 而且能减少三角分解后的非零元素个数, 又结合了 ICCG 算法的优点。虽然它的流程和 ICCG 算法相似, 但优于 ICCG 算法。它减少了 CG 算法每一次迭代的计算量, 又能保持与 ICCG 算法大致相同的收敛速度, 是一种较好的大型有限元方程组计算方法。

## 2 系数矩阵的快速寻址

通过分析 ICCG 法的不完全乔列斯基分解过程和 CG 迭代过程可知<sup>[8]</sup>, 真正用于矩阵算术运算的时间相对来说并不多, 运算时间大部分都花在了寻址系数矩阵非零元素上面, 所以对系数矩阵设计一种合理的存储方式, 使得在分解和迭代过程中能快速地访问到所需的元素, 对求解整个方程组的计算时间有不可忽略的影响。

矩阵中的零元素是不需要参加矩阵运算的。针对系数矩阵稀疏的特点, 只存储系数矩阵的非零元素, 不存储零元素, 可以大大降低矩阵的内存占用量。由于一般问题的非零元素的分布是没有确定规律的, 本文针对矩阵稀疏的特点, 设计了 2 个通用

的一维数组, 巧妙地存储了系数矩阵  $A$ , 使得系数矩阵  $A$  的内存占用量仅为  $2m(m$  是矩阵  $A$  中的非零元素的个数)。假设系数矩阵  $A$  的阶数为  $N$ , 其中非零元素个数为  $m$ 。数组 1, 记为  $\text{tab\_val}[]$ , 存储系数矩阵的所有非零元素的值, 是实型数组, 存储规则如下:

(1)  $\text{tab\_val}[]$  的前 1 到  $N$  个元素, 即  $\text{tab\_val}[1]$  到  $\text{tab\_val}[N]$ , 顺序存储矩阵  $A$  的对角线元素的值; 这样存储的目的是利用对角线本身的特性, 即  $N$  阶方阵的对角线元素所在的行和列是相等的。当按行存储对角线元素时, 数组的下标就是对角线元素所在的行, 也就是对角线元素所在的列。

(2)  $\text{tab\_val}[N+1]$  的位置不存储任何数据; 原因见下面的分析。

(3) 从  $\text{tab\_val}[N+2]$  开始, 按行顺序存储系数矩阵  $A$  的每一行的所有非对角线上的非零元素的值; 显然  $\text{tab\_val}[]$  的最后一个元素, 存放的是系数矩阵  $A$  的最后一行的最后一个非对角线元素, 其地址记为  $k$ 。假设矩阵  $A$  存在第  $N+1$  行, 则第  $N+1$  行的非对角线元素在  $\text{tab\_val}[]$  中的起始地址就应该是  $k+1$ 。

数组 2, 记为  $\text{tab\_position}[]$ , 是一个位置指示数组, 用来指示系数矩阵  $A$  的非对角线元素在  $\text{tab\_val}[]$  中的存放地址以及各个非对角线元素在矩阵  $A$  中所在的列号, 是整型数组, 其存储规则如下:

(1)  $\text{tab\_position}[]$  的前 1 到  $N$  个元素, 即  $\text{tab\_position}[1]$  到  $\text{tab\_position}[N]$ , 顺序存储矩阵  $A$  的每一行的非对角线元素在  $\text{tab\_val}[]$  中的起始地址。

(2) 假设矩阵  $A$  存在第  $N+1$  行, 则第  $N+1$  行的非对角线元素在  $\text{tab\_val}[]$  中的起始地址就应该是  $k+1$ , 将这个地址存储在  $\text{tab\_position}[N+1]$ 。这样的存储规则的目的是为了利用存储在  $\text{tab\_position}[]$  中的每一行的起始地址来得到每一行所拥有的非对角线元素的个数; 第  $i$  行的非对角线元素的个数 =  $\text{tab\_position}[i+1] - \text{tab\_position}[i]$ ,  $i=1,2,\dots,N$ 。显然, 做如上假设的目的也只是为了得到第  $N$  行所拥有的非对角线元素的个数。

(3) 从  $\text{tab\_position}[N+2]$  开始, 按行顺序存储系数矩阵  $A$  的每一行的所有非零元素的所在的列号; 为保持这 2 个数组的地址对齐,  $\text{tab\_val}[]$  也最好从  $N+2$  的地址处开始存储非对角线元素的值。保持 2 个数组的地址对齐, 非常重要, 可以非常方便地寻址, 所以  $\text{tab\_val}[N+1]$  存储单元被保留的原因

就在于此。

tab\_position[]的作用就是将这些非对角线元素在 tab\_val[]中的位置映射到 tab\_position[], 通过 tab\_position[], 在进行矩阵运算时就不需要做任何的地址运算, 在矩阵运算的循环体内只需做基本的算术运算, 大大加快了矩阵运算循环体的执行速度。

可以得出 tab\_val[]的长度是  $m+1$ , tab\_position[]的长度是  $N+1+m-N=m+1$ 。总的内存占用量是  $2m+2$ , 对于一般的实际问题  $m \gg 2$ , 故可以认为内存占用量是  $2m$ , 对于本文分析的 GIS 断路器, 剖分后得到的系数矩阵的阶数达到三十万阶之多, 总的非零元素的个数近 400 万个左右, 如果是单精度实系数矩阵, 则占用的内存大约是 32MB, 如果是双精度实系数矩阵, 则占用的内存大约是 48MB。当然剖分越细, 非零元素的个数就越多, 占用的内存也越多。

### 3 GIS 断路器三维电场计算

#### 3.1 计算模型

以图 2(a)、(b)所示的 GIS 断路器结构为计算模型, 为了能清晰看到整个断路器的结构, 右端 2 个封闭盖暂时没盖, 图(a)所示。实际计算时, 右端三相输入端是封闭的, 图(b)所示。计算电场时, 由于 GIS 断路器罐体本身是个封闭的场域, 考虑实际运行和测试条件, 可以认为罐体以外场量为零, 这样并不影响计算结果的准确性。所以在计算中可以利用罐体封闭的特点来解决场域封闭问题。

GIS 断路器罐体内部电场的整个计算区域, 电位函数满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (8)$$

由于 GIS 断路器在工频电压下进行开断、闭合等操作时, 近似为一个三维静态场, 场域内不考虑空间电荷效应。所以它的边界条件, 应满足:

$$\begin{cases} \varphi_1|_{r_1} = U \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial n}|_{r_2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $U$  是一个已知的零电位或者是一个已知的工频测试电压。

本文的三维模型是一个封闭的罐体, 主要计算罐体内部在输入工频测试电压时整个罐体内的电场分布情况, 将封闭罐体设置为零电位, 作为该三维场域的有限元边界, 也使计算场域人为认为是一个封闭体。

#### 3.2 电场计算

图 2 所示的计算结构为 GIS 断路器内的结构简图, 除了一些小的螺钉之外, 该三维模型包括所有的结构, 主要分析断路器在开断、闭合等状态时的全场域电场分布情况, 暂时不考虑灭弧室内的情况, 只把它当作导体。GIS 断路器的结构比较复杂, 包括罐体右端并行的两组三相接线柱、盘式绝缘子, 中心部位是三相断路器杆、支撑底座, 左端是三相电极的输出, 盘式绝缘子等, 有很多的弯角, 而且为了使罐体体积尽量小型化, 需要罐体内各接线柱的结构尽量紧凑, 但必须保证合理的绝缘配合, 这对电场分布计算的精度要求也就尤为重要。很显然, 结构模型不能按二维场或对称场计算, 需按整个断路器的结构模型场域进行计算。因此它的系数矩阵将是一个超大规模、线性、正定、稀疏矩阵, 本文采用有限元法对一个 126kV GIS 三相共罐式 SF<sub>6</sub> 高压断路器罐体内区域的三维电场进行数值计算, 对于有限元代数方程组的求解分别采用 ICCG 算法、MPCG 算法。计算所用的计算机 CPU 主频为 Pentium 2.40GHz, 内存为 1024MB, 迭代容差  $\varepsilon$  为  $1 \times 10^{-7}$ , 结果如表 1 所示。最终的计算时间是取决于收敛速度和每次迭代的矩阵运算量的, 从表 1 中可以看出, 当  $\delta$  取值较小时, 由于不完全乔列斯基分解后矩阵  $A$  中的非零元素仍然很多, 矩阵运算量大, 计算时间较长; 当  $\delta$  取值较大时, 虽然不完全乔列斯基分解后矩阵  $A$  中的非零元素变少了, 但收敛速度会变慢, 计算时间也较长。因此, 通过恰当选择控制参数  $\delta$ , 就可在收敛速度和矩阵运算量上达到一种较好的平衡。在本文的算例中,

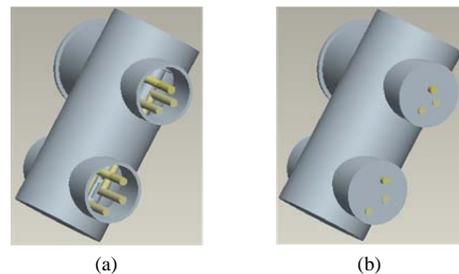


图 2 高压断路器结构图

Fig. 2 The structure of high voltage circuit breaker of GIS

表 1 MPCG 算法和 ICCG 算法比较

Tab. 1 Comparison of the MPCG and ICCG algorithm

算法	$\delta$	非零元素	迭代次数	CPU 时间/s
ICCG	0.0	3770891	63	75.532
MPCG	$1 \times 10^{-3}$	1204021	66	41.264
MPCG	$1 \times 10^{-4}$	1553202	62	37.886
MPCG	$1 \times 10^{-5}$	1782170	60	41.156

控制参数  $\delta$  取  $1 \times 10^{-4}$  时，可以达到较佳的收敛速度和计算时间。

图 3 为电场计算模型的三维网格剖分图，剖分单元用三维 10 节点四面体，剖分后的整个计算区域节点数共为 364984 个，单元数为 298601 个。

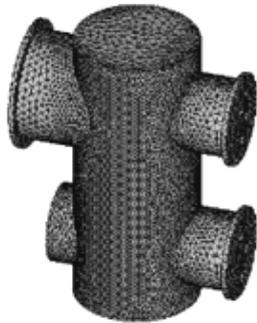


图 3 高压断路器计算区域三维剖分图

Fig. 3 Three dimensional mesh diagram of computation field of circuit breaker in GIS

本文给出了 GIS 断路器在闭合状态时整个电器设备的电位分布和电场分布，由于计算模型是个封闭的罐体，同时给出它的剖面图以及相应的俯视图，分别如图 4、5 所示。根据图中所示高压断路器罐体内区域的电场分布，可以对断路器的内部各电极布置结构及其绝缘性能进行分析并作进一步的优化。

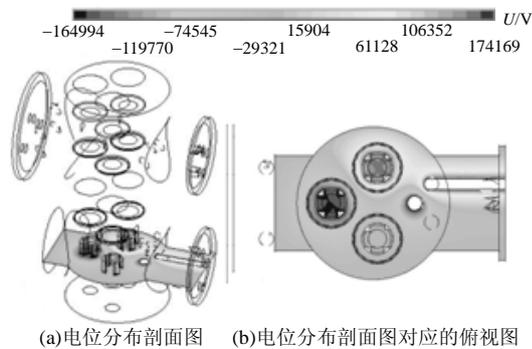


图 4 高压断路器的电位分布图

Fig. 4 Potential distribution of circuit breaker in GIS

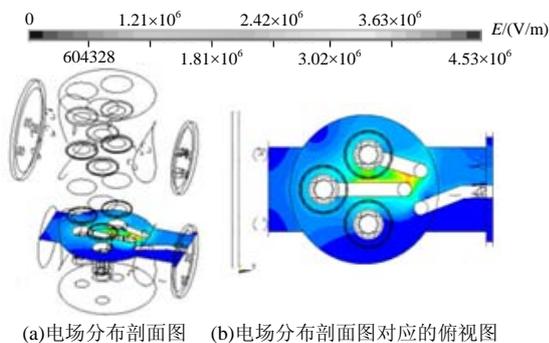


图 5 高压断路器的电场分布图

Fig. 5 Electrical field intensity of circuit breaker in GIS

## 4 结论

引入新的PCG算法来计算大型有限元实对称、正定、稀疏矩阵。该方法节省内存，程序简单。在本文的算例中，当控制参数  $\delta$  取  $1 \times 10^{-4}$  时，从表 1 中可知，计算时间可以减少约 50%。可见，该方法是用来计算大型有限元方程组的一种非常有效的方法。

提供了一种新的系数矩阵的存储方式，在减少内存空间占用的同时，该方法还可以对系数矩阵进行快速、有效地寻址，从而加快方程组的求解速度。

建立了GIS三相共罐式SF<sub>6</sub>高压断路器有限元电场分布的计算模型和数理方程。利用有限元法对GIS断路器的三维电场分布进行了数值计算，计算的电场分布情况可为GIS断路器体积小设计提供有效的参考依据。

## 参考文献

- [1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [2] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社. 1992.
- [3] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [4] 谈克雄, 薛家麒. 高压静电场数值计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [5] 张铁, 严家斌. 数值分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [6] 崔翔. 一种新型的预处理共轭梯度法[J]. 华北电力学院学报, 1989, (2): 1-7.  
Cui Xiang. A new preconditioned conjugate gradient algorithm [J]. Journal of North China Institute of electric power, 1989, (2): 1-7(in Chinese).
- [7] Kershaw D S. The incomplete Cholesky-conjugate gradient method for the iterative solution of systems of linear equations [J]. Computational Phys., 1978, 26(1): 43-65.
- [8] Mishra M, Lowther D A, Silvester. A preconditioned conjugate gradient frontal solver for three dimensional electromagnetic field problems[J]. IEEE Trans. on Mag., 1984, 20(5): 1909-1911.
- [9] 林莘, 刘志刚. ICCG 算法在 SF<sub>6</sub> 罐式高压断路器三维电场有限元计算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 21-24.  
Lin Xin, Liu Zhigang. The application of ICCG algorithm in the three dimensional electric field calculation of SF<sub>6</sub> tank-type circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 21-24(in Chinese).
- [10] Hsieh Kuo Ta. Parallelization of EMAP3D based on element-by-element jacobi preconditioned conjugate gradient method[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2003, 39(1): 139-141.
- [11] Kim S Y, Im Y T. Parallel processing of 3D rigid-viscoplastic finite element analysis using domain decomposition and modified block jacobi preconditioning technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 2(134): 254-264.

- [12] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 基于 JPCG 算法的真空灭弧室三维电场有限元计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 108-111.  
Liao Minfu, Duan Xiongying, Zou Jiyan, et al. Application of JPCG algorithm in the three dimensional electric field calculation of vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 108-111(in Chinese).
- [13] 刘建新, 崔翔, 邵汉光. 对 ICCG 算法的一种改进[J]. 华北电力学院学报[J]. 1994, (2): 1-5.  
Liu Jianxin, Cui Xiang, Shao Hanguang. The improved ICCG method [J]. Journal of North China Institute of Electric Power., 1994, (2): 1-5(in Chinese).
- [14] Wang Jinming, Xie Dexin, Yao Yingying, et al. A modified solution for large sparse symmetric linear systems in electromagnetic field

analysis[J]. IEEE Trans on Mag., 2001, 37(5): 3494-3497.

收稿日期: 2007-01-24。

作者简介:

马爱清(1975—), 女, 博士研究生, 研究方向主要包括电磁场数值计算、高压电器的优化设计等;

江秀臣(1965—), 男, 博士学位, 教授, 博士生导师, 研究方向主要包括在线监测、状态检修和电气设备自动化等;

曾 奕(1961—), 男, 教授, 主要从事电力设备绝缘在线监测方面的研究。

(责任编辑 韩 蕾)