

# 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化

程 莹, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

## REACTIVE-POWER OPTIMIZATION OF LARGE-SCALE POWER SYSTEMS WITH DISCRETE CONTROL VARIABLES

CHENG Ying, LIU Ming-bo

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** This paper presents a new algorithm for solving reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables, which realizes successive discretization of the discrete control variables in optimization process by incorporating penalty function into nonlinear primal-dual interior-point algorithm. The principle of handling these discrete variables by quadratic penalty function and how to incorporating it into the primal-dual interior-point algorithm in a straightforward manner are discussed in detail. A novel data-structure rearrangement is proposed in order to solve the high-dimension correction equation speedily and efficiently. The numerical results of test systems that range in size from IEEE 14-bus system to 538-bus Guangdong power system have shown that the proposed method can handle the discrete control variables effectively and has good convergence and accuracy.

**KEY WORDS:** reactive-power optimization; primal-dual interior-point algorithm; penalty function; discrete control variables

**摘要:**提出了一种求解含离散控制变量的大规模电力系统无功优化的新算法,该方法通过对离散变量构造罚函数并直接嵌入非线性原对偶内点法中,以实现离散变量在优化过程中的逐次归整。文中对罚函数处理离散变量的原理以及其如何与原对偶内点法的直接结合进行了详细论述,并给出了一种新的数据结构以快速有效地求解高阶修正方程。从 IEEE 14 节点到广东省 538 节点电网等几个不同规模系统的演算结果可看出,该方法可以有效地处理离散变量,而且具有较好的收敛性和精确性。

**关键词:** 无功优化; 原对偶内点法; 罚函数; 离散变量

中图分类号: TM 744 文献标识码: A

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (011648)。

## 1 引言

无功优化的基本内容是在满足各种约束条件下利用无功控制手段,如控制发电机和无功补偿设备的无功出力及可调变压器的分接头等,来提高电压水平,降低系统有功损耗。精确地说,它属于非线性混合整数规划问题。近年来,原对偶内点法因其具有收敛性好、计算速度快、便于处理不等式约束等优点被越来越多地应用于求解电力系统的各种优化问题,且在求解大规模问题上有明显的优势<sup>[1]</sup>。

在无功优化计算中,可投切并联电容器组(或电抗器组)的无功出力和可调变压器的分接头位置是非连续变化的,目前的算法大多为先将其作为连续变量参与优化,求得优化解后再进行简单的靠拢式取整,对其余的连续变量则用常规的潮流计算或优化计算确定。这不仅会产生数学上的近似,而且可能导致某些约束条件违限,无法获得可行解,是不恰当的。

文[2]给出了完整的非线性混合整数无功优化模型,用常规的分支定界法和决策树法求解,其计算量较大。文[3]建立了电容器投切的逐次线性整数规划模型,并提出对偶松弛解法和逐次归整解法。文[4]采用二次罚函数的线性近似建立离散模型,并与牛顿法最优潮流求解过程结合,但必须辅之以一系列规则及一些人工调试的参数影响了其实用性。文[5]提出在牛顿法最优潮流中用正曲率二次罚函数处理离散变量,引入的机制简单有效。

本文提出了非线性原对偶内点法内嵌罚函数的新算法,以求解大规模系统无功优化问题的非线性混合整数规划模型,深入分析了优化过程中高阶修

正方程的求解问题,给出了一种新的数据结构,使之较传统方法可以有效地降低非零注入元素的数目。并以几个试验系统和广东省电网的计算来验证该算法的正确性和有效性。

## 2 非线性原对偶内点法内嵌罚函数法的原理

以网损最小为目标的无功优化数学模型为

$$\min f(x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

$$s.t. \quad g(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad (2)$$

$$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max} \quad (3)$$

$$x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max} \quad (4)$$

式中  $f(x_1, x_2, x_3)$  为系统有功损耗;  $g(x_1, x_2, x_3) = 0$  为节点功率平衡方程;  $x_1 = [Q_C^T, T_B^T]^T$ ;  $x_2 = [Q_G^T, V^T]^T$ ; 其中  $Q_C$  为可投切电容器或电抗器的无功出力列向量;  $T_B$  为可调变压器的变比列向量; 且  $Q_C$  和  $T_B$  为具有离散值的向量,  $x_1 \in R^{(p)}$ ;  $Q_G$  为发电机或静止无功补偿器的无功出力列向量,  $V$  为所有节点电压幅值构成的列向量,  $Q_G$  和  $V$  是连续变化的向量;  $x_2 \in R^{(q)}$ ;  $x_1$  和  $x_2$  为有约束的优化变量; 设节点  $n$  为平衡节点,  $x_3 = [P_{Gn}, q_1, q_2, \dots, q_{n-1}]^T$ , 由平衡机的有功出力和除平衡节点外的其它节点电压相角构成,  $x_3 \in R^{(n)}$ ,  $n$  为系统节点数。

上述无功优化数学模型中还可计及其它不等式约束。

引入松弛变量( $s_u, s_l, s_h, s_w \geq 0$ ), 将不等式约束式(3)和(4)转变成等式约束为

$$x_1 + s_u = x_{1\max}, x_1 - s_l = x_{1\min} \quad (5)$$

$$x_2 + s_h = x_{2\max}, x_2 - s_w = x_{2\min} \quad (6)$$

引入对数壁垒函数消去松弛变量的非负性约束, 分别对式(2)、(5)和(6)引入拉格朗日乘子向量  $y, y_u, y_l, y_h, y_w$ , 得到拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & f(x_1, x_2, x_3) - y^T g(x_1, x_2, x_3) - \\ & y_u^T (x_1 + s_u - x_{1\max}) - y_l^T (x_1 - s_l - x_{1\min}) - \\ & y_h^T (x_2 + s_h - x_{2\max}) - y_w^T (x_2 - s_w - x_{2\min}) - \\ & m \sum_{j=1}^p \ln s_{lj} - m \sum_{j=1}^p \ln s_{uj} - m \sum_{j=1}^q \ln s_{wj} - m \sum_{j=1}^q \ln s_{hj} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $y_u, y_h \leq 0, y_l, y_w \geq 0$ ;  $m$  为壁垒参数, 且  $m \geq 0$ 。

为计及  $Q_C$  和  $T_B$  的离散特性, 本文引入如图1所示的二次罚函数来处理这些离散变量。图1中,  $f(x_b)$  为二次罚函数,  $x_b$  为离散变量。离散变量是

非连续变化的, 按某个给定的分级步长变化, 如某

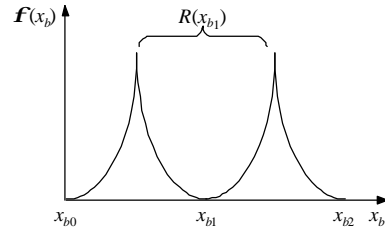


图1 二次罚函数模型

Fig.1 Quadratic penalty function model

个电容器组的总容量为 36Mvar, 由 12 组构成, 且每组容量相同, 则其分级步长为 3Mvar。假设每个离散变量的分级步长是均匀的, 则  $x_{b0}, x_{b1}, x_{b2}$  为  $x_b$  的离散取值中任意 3 个相邻值。

定义某离散取值  $x_{b1}$  的邻域  $R(x_{b1})$  为如下区间:

$$R(x_{b1}) = \{x_b \mid x_{b1} - \frac{1}{2}S \leq x_b \leq x_{b1} + \frac{1}{2}S\} \quad (8)$$

式中  $S$  是离散变量  $x_b$  的分级步长;  $x_{b1}$  为其邻域中心。

在优化过程中, 当  $x_b$  的值处于上述定义的邻域内时, 应迫使其向邻域中心靠拢。由此可在该邻域内引入二次罚函数:

$$f(x_b) = \frac{1}{2} v_b (x_b - x_{b1})^2 \quad (9)$$

式中  $v_b$  为罚因子。

在此定义的  $x_b$  的邻域中心在优化过程中是动态变化的, 可根据离散变量的实际计算值求出的最为靠近的离散取值得到。

将针对离散变量引入的罚函数增广到式(7)的拉格朗日函数中, 可得到

$$\begin{aligned} L = & f(x_1, x_2, x_3) - y^T g(x_1, x_2, x_3) - \\ & y_u^T (x_1 + s_u - x_{1\max}) - y_l^T (x_1 - s_l - x_{1\min}) - \\ & y_h^T (x_2 + s_h - x_{2\max}) - y_w^T (x_2 - s_w - x_{2\min}) - \\ & m \sum_{j=1}^p \ln s_{lj} - m \sum_{j=1}^p \ln s_{uj} - m \sum_{j=1}^q \ln s_{wj} - \\ & m \sum_{j=1}^q \ln s_{hj} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p v_j (x_{1j} - x_{1jb})^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $v_j$  为罚因子;  $x_{1jb}$  为邻域中心。

由式(10)可知, 二次罚函数的引入使得原目标函数中附加了一项由离散变量引起的虚拟费用, 可将连续值就近靠拢取其离散值的规则嵌入到求解连续无功优化的非线性原对偶内点算法中。在全局优

化和虚拟费用的共同作用下,离散变量可向两个相反的方向运动,或者趋向邻域中心,或者趋向远离邻域中心的另一个可能的相邻离散取值。

根据 Karush-Kuhn-Tucker 最优性条件可得

$$L_{x_1} = \nabla f_{x_1}(x_1, x_2, x_3) - \nabla_{x_1}^T(x_1, x_2, x_3)y - y_u - y_l + \mathbf{u}_B(x_1 - x_{1B}) = 0 \quad (11)$$

$$L_{x_2} = \nabla f_{x_2}(x_1, x_2, x_3) - \nabla_{x_2}^T(x_1, x_2, x_3)y - y_h - y_w = 0 \quad (12)$$

$$L_{x_3} = \nabla f_{x_3}(x_1, x_2, x_3) - \nabla_{x_3}^T(x_1, x_2, x_3)y = 0 \quad (13)$$

$$L_y = -g(x_1, x_2, x_3) = 0 \quad (14)$$

$$L_{y_u} = x_1 + s_u - x_{1\max} = 0 \quad (15)$$

$$L_{y_l} = x_1 - s_l - x_{1\min} = 0 \quad (16)$$

$$L_{y_h} = x_2 + s_h - x_{2\max} = 0 \quad (17)$$

$$L_{y_w} = x_2 - s_w - x_{2\min} = 0 \quad (18)$$

$$L_{s_u} = S_u Y_u e_1 + \mathbf{m} e_1 = 0 \quad (19)$$

$$L_{s_l} = S_l Y_l e_1 - \mathbf{m} e_1 = 0 \quad (20)$$

$$L_{s_h} = S_h Y_h e_2 + \mathbf{m} e_2 = 0 \quad (21)$$

$$L_{s_w} = S_w Y_w e_2 - \mathbf{m} e_2 = 0 \quad (22)$$

式中  $e_1, e_2$  分别代表维数为  $p$  和  $q$  的单位列向量;  $Y_u, Y_l, Y_h, Y_w, S_u, S_l, S_h, S_w$  分别为以  $y_u, y_l, y_h, y_w, s_u, s_l, s_h, s_w$  的分量为对角元素的对角阵。 $\mathbf{u}_B$  是以各罚因子为对角元素的对角矩阵;  $\mathbf{u}_B \in R^{(p \times p)}$ 。 $x_{1B}$  为离散变量相应的邻域中心构成的列向量。

用牛顿法求解式(11)~(22),得到修正方程为

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & -\nabla_{x_1}^T \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & -\nabla_{x_2}^T \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & -\nabla_{x_3}^T \\ -\nabla_{x_1} & -\nabla_{x_2} & -\nabla_{x_3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ -L_{x_3 0} \\ -L_{y 0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Delta s_u = -L_{y_u 0} - \Delta x_1 \quad (24)$$

$$\Delta s_l = L_{y_l 0} + \Delta x_1 \quad (25)$$

$$\Delta s_h = -L_{y_h 0} - \Delta x_2 \quad (26)$$

$$\Delta s_w = L_{y_w 0} + \Delta x_2 \quad (27)$$

$$\Delta y_u = -S_{u0}^{-1}[L_{s_u 0} - Y_{u0}(L_{y_u 0} + \Delta x_1)] \quad (28)$$

$$\Delta y_l = -S_{l0}^{-1}[L_{s_l 0} + Y_{l0}(L_{y_l 0} + \Delta x_1)] \quad (29)$$

$$\Delta y_h = -S_{h0}^{-1}[L_{s_h 0} - Y_{h0}(L_{y_h 0} + \Delta x_2)] \quad (30)$$

$$\Delta y_w = -S_{w0}^{-1}[L_{s_w 0} + Y_{w0}(L_{y_w 0} + \Delta x_2)] \quad (31)$$

式中

$$A = -L_{x_1 0} - S_{u0}^{-1}(L_{s_u 0} - Y_{u0}L_{y_u 0}) - S_{l0}^{-1}(L_{s_l 0} + Y_{l0}L_{y_l 0}) \quad (32)$$

$$B = -L_{x_2 0} - S_{h0}^{-1}(L_{s_h 0} - Y_{h0}L_{y_h 0}) - S_{w0}^{-1}(L_{s_w 0} + Y_{w0}L_{y_w 0}) \quad (33)$$

$w_{kj}(k, j=1,2,3)$  的计算式为  $k=j=1$  时:

$$w_{11} = \nabla f_{x_1 x_1}^2(x_1, x_2, x_3) - \sum_{i=1}^{2n} y_i \nabla g_{ix_1}^2(x_1, x_2, x_3) + S_{l0}^{-1}Y_{l0} - S_{u0}^{-1}Y_{u0} + \delta_B \quad (34)$$

$k=j=2$  时:

$$w_{22} = \nabla f_{x_2 x_2}^2(x_1, x_2, x_3) - \sum_{i=1}^{2n} y_i \nabla g_{ix_2}^2(x_1, x_2, x_3) + S_{w0}^{-1}Y_{w0} - S_{h0}^{-1}Y_{h0} \quad (35)$$

除  $k=j=1$  或  $k=j=2$  外:

$$w_{kj} = \nabla f_{x_k x_j}^2(x_1, x_2, x_3) - \sum_{i=1}^{2n} y_i \nabla g_{ix_k x_j}^2(x_1, x_2, x_3) \quad (36)$$

相继求解式(23)~(31),可得到原变量和对偶变量的修正方向  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta y, \Delta s_u, \Delta s_l, \Delta s_h, \Delta s_w, \Delta y_u, \Delta y_l, \Delta y_h, \Delta y_w$ 。

### 3 罚函数处理离散变量的机理

由上节公式的推导可知,离散变量的归整过程被直接纳入非线性原对偶内点法的求解过程中,通过二次罚函数的软惩罚策略使离散变量趋于某一离散值。而且,因为邻域中心是动态变化的,若某次归整不是最优解,可以被后续的逼近过程所校正。

为使二次罚函数有效地处理离散变量,首先应使二次罚函数和原对偶内点法中的对数壁垒函数相互协调起作用,避免产生不必要的振荡。原对偶内点法本质上是拉格朗日函数、牛顿法和对数壁垒函数三者的结合。当不等式约束条件不满足时,对数壁垒函数将起作用,使其回到可行域内。对于离散约束惩罚和不等式约束违限惩罚,应优先考虑后者,即在离散变量满足上、下限值约束的情况下,才引入二次罚函数,以免干扰对数壁垒函数起作用。

对罚函数处理离散变量的效果起直接影响作用的还有引入罚函数的时机和罚因子  $\mathbf{u}_b$  的大小。在研究中发现,无功优化计算最初的几次迭代实质上是确定起作用的不等式约束的过程,优化变量的变化幅度较大,若较早地引入罚函数,势必会影响对数壁垒函数起作用,而且可能会导致邻域中心频繁变动,目标函数的下降也会因惩罚项的加入而受到干扰;相反,若等最优解已基本确定下来再引入的话,则会影响收敛速度,增加迭代次数。因此,准确、恰当地引入二次罚函数是算法取得较好效果的关键。罚因子的取值也是一个重要因素。罚因子过大或过小都会影响算法对离散变量的处理效果以

及全局寻优的有效性,其功能是迫使离散变量靠向邻域中心。对于不同的离散变量,应按其分级步长的不同来取值,以使罚机制灵活、合理。由于电容器组的分级步长较大,罚因子不宜取得太大,以免影响目标函数的下降,取为50较合适。而对于变压器变比,由于其分级步长较小,相对容易处理,罚因子应取得大一些,可以使得罚机制灵敏,取为500较好。

在非线性原对偶内点法中,不等式约束的满足情况可直观地从迭代过程中补偿间隙  $g_{ap}$  值的大小反映出来。随着起作用的不等式约束基本确定,补偿间隙会迅速减小。另外,在相邻两次迭代中,离散变量的变化小于某一值时才引入罚函数,可以避免邻域中心的频繁变动。本文把  $g_{ap} < 0.1$ , 且相邻两次迭代离散变量的变化小于其分级步长的  $1/4$  作为引入二次罚函数的条件,后面的计算结果也将表明这样处理确实非常有效。

#### 4 算法步骤及修正方程的求解

##### 4.1 算法步骤

应用上述算法求解离散无功优化的步骤为

(1) 初始化:输入系统参数及不等式约束上下限值;给定原变量、对偶变量初始值,并保证  $s_u, s_l, s_h, s_w, y_l, y_w > 0$ ,  $y_u, y_h < 0$ ; 给定合适的加速因子  $b \in (10 \sim 100)$ ; 置迭代次数  $k=0$ , 最大迭代次数  $K=50$ ; 给定收敛精度  $e_1=10^{-6}$  和  $e_2=10^{-3}$ 。

(2) 计算补偿间隙,并判断收敛条件:

$$g_{ap} = \sum_{i=1}^p (y_{li}s_{li} - y_{ui}s_{ui}) + \sum_{i=1}^q (y_{wi}s_{wi} - y_{hi}s_{hi}) \quad (37)$$

如果  $g_{ap} < e_1$  且式(2)的最大潮流偏差  $< e_2$ , 则输出最优解,结束计算。否则继续。

(3) 计算壁垒参数:

$$m = g_{ap} / 2(p+q)b \quad (38)$$

(4) 判断离散变量是否越上、下限:若越限,则不作离散化处理,置罚因子为零。记录未越限的离散变量。

(5) 判断未越限离散变量是否已引入罚函数:若是,则确定邻域中心,转到步骤(7)。否则继续。

(6) 判断是否满足二次罚函数引入条件,即  $g_{ap} < 0.1$  且相邻两次迭代离散变量的变化量  $< \frac{S}{4}$ , 若是,则确定邻域中心,引入罚函数。否则,置罚

因子为零。

(7) 计算修正方向:由式(23)~(31)求得  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta y, \Delta s_u, \Delta s_l, \Delta s_h, \Delta s_w, \Delta y_u, \Delta y_l, \Delta y_h, \Delta y_w$ 。

(8) 确定原变量和对偶变量的步长:

$$b_p = 0.9995 \min \left\{ \min_{\Delta s_{li} < 0} \frac{-s_{li}}{\Delta s_{li}}, \min_{\Delta s_{ui} < 0} \frac{-s_{ui}}{\Delta s_{ui}}, \min_{\Delta s_{hi} < 0} \frac{-s_{hi}}{\Delta s_{hi}}, \min_{\Delta s_{wi} < 0} \frac{-s_{wi}}{\Delta s_{wi}}, 1.0 \right\} \quad (39)$$

$$b_D = 0.9995 \min \left\{ \min_{\Delta y_{ui} > 0} \frac{-y_{ui}}{\Delta y_{ui}}, \min_{\Delta y_{li} < 0} \frac{-y_{li}}{\Delta y_{li}}, \min_{\Delta y_{hi} > 0} \frac{-y_{hi}}{\Delta y_{hi}}, \min_{\Delta y_{wi} < 0} \frac{-y_{wi}}{\Delta y_{wi}}, 1.0 \right\} \quad (40)$$

(9) 修正原变量和对偶变量:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ s_l \\ s_u \\ s_w \\ s_h \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ s_l \\ s_u \\ s_w \\ s_h \end{bmatrix}^{(k)} + b_p \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta s_l \\ \Delta s_u \\ \Delta s_w \\ \Delta s_h \end{bmatrix}^{(k)} \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} y \\ y_l \\ y_u \\ y_w \\ y_h \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} y \\ y_l \\ y_u \\ y_w \\ y_h \end{bmatrix}^{(k)} + b_D \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta y_l \\ \Delta y_u \\ \Delta y_w \\ \Delta y_h \end{bmatrix}^{(k)}$$

置  $k = k+1$ , 转到步骤(2)。

##### 4.2 修正方程的求解

考察算法的整个计算步骤可知,主要计算量集中在对式(23)的求解上。因此,快速有效地求解该式是提高算法计算性能的关键。

以图2所示的Ward & Hale 6节点系统为例,来说明如何构造适当的数据结构,使式(23)的系数矩阵在三角分解过程中产生的非零注入元素尽量减少。图中,节点6为平衡节点,节点1和6上的发

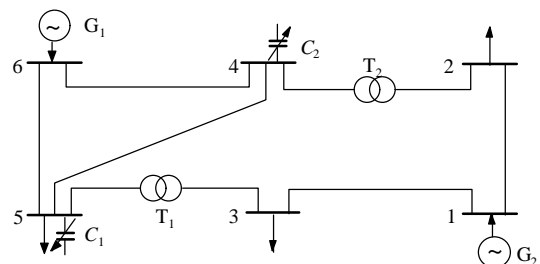


图2 6节点系统接线图

Fig.2 One-line diagram of the 6-bus system



系统和广东省电网的优化结果为例进行具体说明。

(1) IEEE 118 节点系统优化结果分析

IEEE 118 节点系统包括 36 台发电机、10 个无功补偿设备和 8 台可调变压器。发电机和无功补偿设备的节点编号及变压器支路两端的节点编号见表 1 中相应变量的下标。可调变压器变比的上、下限为 1.10 和 0.90，分级步长为 2.5%。无功补偿设备出力的上下限为 5.0 和 0，分级步长为 0.05。节点电压的上、下限为 1.10 和 0.90。表 1 列出了用 3 种方法(本文方法、连续优化法和简单归整法)求得的离散变量值。表 2 列出了用 3 种方法得到的优化结果，其中，连续优化方法是指将离散变量当作连续变量处理，并用非线性原对偶内点法求解；简单归整方

法是在连续优化方法所得结果的基础上，将离散变量的值就近归整，再作一次潮流计算。表 2 中，简单归整方法的迭代次数不包括潮流计算所需的迭代。

由表 2 可知，简单归整法求得的网损降幅最大，为 15.27%，但造成有 12 个节点电压和 6 台发电机无功出力越限，这显然是不可行解。连续优化法使网损下降了 14.61%，是理想值，但在实际调度运行中是无法操作的。本文方法求得的无功补偿设备的无功出力和可调变压器的变比都较好地满足了离散分级变化的要求，见表 1，经 16 次迭代，网损下降了 14.49%，接近理想值，且与连续优化方法相比，迭代次数没有发生显著的变化。

表 1 118 节点系统优化后的离散变量值  
Tab.1 Values of discrete variables after optimization for the 118-bus system

变比/pu	T <sub>5-8</sub>	T <sub>17-30</sub>	T <sub>25-26</sub>	T <sub>37-38</sub>	T <sub>59-63</sub>	T <sub>61-64</sub>	T <sub>65-66</sub>	T <sub>80-81</sub>	—	—
本文方法	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0250	1.0000	1.0500	1.0750	—	—
连续优化法	1.0058	1.0115	1.0146	0.9954	1.0105	0.9987	1.0381	1.0949	—	—
简单归整法	1.0000	1.0000	1.0250	1.0000	1.0000	1.0000	1.0500	1.1000	—	—
出力/pu	Q <sub>19</sub>	Q <sub>20</sub>	Q <sub>21</sub>	Q <sub>33</sub>	Q <sub>34</sub>	Q <sub>35</sub>	Q <sub>36</sub>	Q <sub>37</sub>	Q <sub>43</sub>	Q <sub>76</sub>
本文方法	0.3500	0.0500	0.1000	0.1000	0.0000	0.1000	0.0500	0.6000	0.0500	0.6500
连续优化法	0.3787	0.0203	0.1239	0.0928	0.0035	0.0924	0.0485	0.6746	0.0553	0.6701
简单归整法	0.4000	0.0000	0.1000	0.1000	0.0000	0.1000	0.0500	0.6500	0.0500	0.6500

表 2 118 节点系统的优化结果  
Tab.2 Optimization results of the 118-bus system

优化方法	本文方法	连续优化法	简单归整法
初始网损	1.3670	1.3670	1.3670
优化后网损	1.1688	1.1673	1.1583
迭代次数	16	14	14
满足约束情况	满足	满足	有违限

(2) 广东省电网优化结果分析

广东省电网的节点数为 538，有 48 台发电机，118 个无功补偿设备，409 条变压器支路。考虑到广东省电网具有节点众多、某些重要节点的运行参数要求严格等特点，选择了 48 台发电机、98 个无功补偿设备、51 台升压变压器和 13 台降压变压器参与优化。

可调变压器变比、无功补偿设备和发电机无功出力的上、下限均按系统的给定值确定，可调变压器变比的分级步长按各变压器的铭牌值给定，有 2.25%、2.5%、1.25%和 1.5%。无功补偿设备的分级步长都取为 0.05。节点电压的上、下限根据实际电网中节点性质的不同确定了几种范围：对于发电机机端电压和 500kV 母线电压，严格限定为 1~1.1；对于 500kV 变电站的 220kV 电压监测点、220kV

电厂的 220kV 电压监测点，其电压允许偏移值为 1~1.1；对于 220kV 变电站的 220kV 电压监测点，其电压允许偏移值为 0.95~1.1；其余节点电压的上、下限定为 0.9~1.15。表 3 列出了用 3 种方法得到的优化结果，其中，简单归整法的迭代次数不包括潮流计算所需的迭代。

表 3 广东省电网的优化结果  
Tab.3 Optimization results of Guangdong power system

优化方法	本文方法	连续优化法	简单归整法
初始网损	1.7261	1.7261	1.7261
优化后网损	1.4823	1.4685	1.5046
迭代次数	45	40	40
满足约束情况	满足	满足	有违限

由表 3 的优化结果可知，用简单归整法使网损下降了 12.83%，但造成了许多发电机无功出力和节点电压超出限值，无法得到可行解。连续优化法求得的网损降幅为 14.92%，下降最多，但未考虑离散变量的离散特性，不符合实际要求。用本文方法经过 45 次迭代，网损降至 1.4823，下降了 14.12%，所有约束条件都得到满足，离散变量也较好地满足了分级变化的要求，且与连续优化法相比，增加的迭代次数并不多，说明二次罚函数处理离散变量是

简单合理的。

通过分析广东省电网的优化结果可以发现,当系统规模增大且优化变量数增多时,用本文所提出的方法也可获得较为满意的优化解,这表明了本文方法具有求解大规模系统优化问题的能力。

(3) 采用不同数据结构时非零注入元素数目的比较

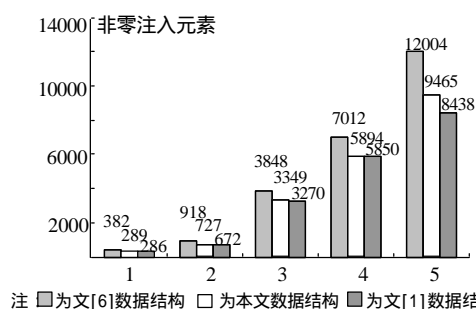
试验系统的基本数据和式(23)的阶数见表4。

表4 试验系统的基本数据和修正方程阶数  
Tab.4 Basic data of test systems and dimension of correction equation

试验系统	节点/支路数	离散变量( $Q_c, T_B$ ) / 连续变量数	不等式约束数	修正方程阶数
IEEE 14	14/19	(3,3)/30	22	64
IEEE 30	30/40	(9,4)/66	49	129
美国 EPRI68	68/82	(10,4)/152	98	302
IEEE 118	118/188	(10,8)/272	172	526
广东省电网	538/639	(98,64)/1124	748	2362

图3示出了在采用文[1, 6]和本文提出的数据结构时,各试验系统修正方程的系数矩阵在三角分解时产生的非零注入元素的数目。图中横坐标1~5分别指IEEE 14、30、美国EPRI 68、IEEE 118节点系统和广东省电网。采用本文提出的数据结构,与采用文[6]的数据结构相比,这5个系统的非零注入元素数目分别下降了24.3%、20.8%、13.0%、15.9%和21.2%。

由图3可知,采用文[1]的数据结构,产生的非零注入元素数目(令三角分解出现困难的行的对角元素为一很小的正数如 $10^{-10}$ 求得,)最少,但是上述5个系统都出现了矩阵三角分解困难,需引入



注 ■ 为文[6]数据结构 □ 为本文数据结构 ▨ 为文[1]数据结构

图3 采用不同数据结构时的非零注入元素数目

Fig.3 The number of nonzero fill-in elements for the different data structures

较多的虚拟发电机。对IEEE 14、30、美国EPRI 68、IEEE 118节点系统和广东省电网来说,要分别加入3、5、10、32和25个虚拟发电机。

## 5 结论

本文提出了一种求解含离散控制变量的大规模电力系统无功优化的新算法,该方法通过非线性原对偶内点法中直接内嵌针对离散变量构造的罚函数,实现离散变量在优化过程中的逐次归整。文中针对高阶修正方程的求解,给出了一种新的数据结构,以降低其系数矩阵在三角分解时产生的非零注入元素的数目。将该算法应用于几个不同规模的试验系统和广东省电网,获得了较为理想的结果,而且收敛稳定,算法鲁棒性强,为求解大规模系统离散优化提供了新的思路。

## 参考文献

- [1] Wei H, Sasaki H, Kubokawa J, *et al.* An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [2] 李乃湖(Li Naihu). 计及整型控制变量的电压-无功功率优化(Optimal voltage-reactive control with discrete variables)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems). 1994, 18(12): 5-11.
- [3] 邓佑满,张伯明,相年德(Deng Youman, Zhang Buoming, Xiang Niande). 配电网络电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法(A successive linear integer programming methodology for capacitor switching on distribution systems. [J]. 中国电机工程学报(Proceeding of the CSEE), 1995, 15(6): 375-382.
- [4] Liu W H, Papalexopoulos A D, Tinney W F. Discrete shunt controls in a newton optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1509-1518.
- [5] 赵晋泉,侯志俭,吴际舜(Zhao Jinquan, Hou Zhijian, Wu Jishun). 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法(A novel quadratic penalty function based discretization algorithm for newton optimal power flow)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(23): 37-40.
- [6] Sun D L, Ashley B, Brewer B, Hughes A, Tinney W F. Optimal power flow by newton approach[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(10): 2864-2880.

收稿日期: 2001-03-12。

作者简介:

程莹(1975-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统最优潮流及无功优化计算;

刘明波(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电网无功优化调度及最优潮流计算、电力系统电压稳定性分析、地理信息系统及配网自动化技术。

(责任编辑 喻银凤)