DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190099

最优乘子法在电流注入型保留非线性潮流计算中的应用

李宝国，鲁宝春，姜丕杰

(辽宁工业大学电气工程学院，辽宁 锦州 121001)

摘要：随着电力系统规模的扩大，对电力系统潮流算法的收敛性和计算速度提出了更高的要求。为此，提出一种带有最优乘子的电流注入型保留非线性潮流计算方法。首先根据直角坐标系潮流方程的特点，给出了一种最优乘子的计算方法，该方法只需求解一元三次方程，不需再额外增加任何计算量。在此基础上，将最优乘子应用于电流注入型保留非线性潮流计算，在潮流计算迭代过程中，采用最优乘子调整电压修正量，提高了潮流计算的收敛可靠性和收敛速度。系统算例表明，所提出的方法能在潮流方程无解时保证潮流不发散，在潮流方程有解时提高潮流计算速度。

关键词：电力系统；最优乘子法；潮流计算；保留非线性；电流注入型

Application of optimal multiplier method in retaining-nonlinearity power flow calculation based on current-influx model

LI Baoguo, LU Baochun, JIANG Pijie

(College of Electric Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: With the expansion of power system scale, higher requirements are imposed on convergence and calculation speed of power flow algorithm. Therefore, a retaining-nonlinearity flow algorithm based on current-influx model with optimal multiplier is proposed. According to the characteristics of the power flow equations in rectangular coordinate, a method for calculating the optimal multiplier is given firstly. This method only needs to solve a unary cubic equation without adding any additional calculations. On this basis, the optimal multiplier is applied to the retaining-nonlinearity flow algorithm based on current-influx model. In iterative process of power flow calculation, the optimal multiplier is used to adjust the voltage correction. The convergence reliability and convergence speed of power flow calculation are improved. Numerical examples show that the proposed method can ensure that the system flow is non-divergent when the flow equation has no solution, and can improve the calculation speed when the flow equation has a solution.

This work is supported by Project of Liaoning Education Department (No. JFL201715401).

Key words: power system; optimal multiplier method; power flow calculation; retaining-nonlinearity; current-influx model

0　引言

电力系统潮流计算是电力系统分析计算中最基本的计算，牛顿拉夫逊法是电力系统潮流计算的重要方法，在实际电力系统中有着广泛的应用[1-3]。随着现代电力系统的发展，对潮流计算收敛性及计算速度需求不断提升。因此，研究电力系统潮流方程的高效求解方法十分重要[4-7]。

电流注入型潮流算法[8-10]由常规牛顿法演变而来，有效地利用了网络自身线性的特点，在迭代过程中，相比于牛顿法变化的系数矩阵，电流注入型潮流算法系数矩阵变化很小，大大提高了计算速度。保留非线性潮流算法[11]采用了更精确的计算模型，具有良好的收敛可靠性和较快的收敛速度，使它们具有一定的应用场合。最优乘子法在潮流计算中引入标量乘子，对偏差量进行修正，不仅对病态潮流有改善收敛性的作用[12-16]，对于正常潮流也有加快收敛速度的作用。文献[17]采用保留非线性电流注入型潮流模型，将广义 Tellegen 定理的小扰动定理应用在灵敏度矩阵计算中，提高了保留非线性电流

基金项目：辽宁省教育厅项目资助(JFL201715401)

注入型潮流的计算速度；文献[18]将最优乘子法引入牛顿拉夫逊法潮流计算的每次迭代过程中，提高了潮流计算的收敛可靠性；文献[19]将电流注入模型引入交流等值法求解交直流电力系统潮流的过程，减少了每次迭代的计算量，提高了潮流计算的速度；文献[20]求解潮流时，提出基于电流/功率混合注入模型的牛顿潮流算法，继承了常规电流注入模型迭代时雅克比矩阵系数变化小的优点，又降低了雅克比矩阵的规模，节省存储空间；文献[21-22]和文献[23]分别将最优乘子法应用到交直流电网混合潮流计算和连续潮流计算中，在收敛性及计算速度方面均得到了比较满意的结果。

本文将最优乘子法应用于电流注入型保留非线性潮流计算中，将电流注入型潮流方程展开成Taylor 级数，利用其二次型特点以及每次迭代的中间结果，通过求解一元三次方程得到最优乘子，每次迭代的计算量增加很少。本文给出的带最优乘子的电流注入型保留非线性潮流计算方法，在保证潮流不发散的同时，减少了迭代次数，提高了潮流计算速度。最后的系统算例验证了本文所提潮流计算方法的有效性。

1 最优乘子法简介

所谓的最优乘子潮流算法，就是在迭代过程中，对第 k 次已求得的变量修正量 $\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$ 乘以一个标量乘子 μ 后再去修正该变量，作为第 k+1 次迭代的变量初值，即

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \boldsymbol{x}^{(k)} + \mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)} \tag{1}$$

其中的标量乘子需满足

$$\min_{\mu}\left\| f(\boldsymbol{x}^{(k)} + \mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})\right\|_2 \tag{2}$$

这种标量乘子的引入，目的是使潮流计算中的不平衡量的平方和最小。如果潮流方程无解，则迭代的最终结果是标量乘子 μ 为零值(或某一绝对值很小的数值)，将不再对待求变量作任何修正，从而保证潮流计算过程不发散。

2 电流注入型保留非线性潮流方程

假设电力系统的节点总数为 n，其中第1到第m个节点为PQ节点，第m+1到第n−1个节点为PV节点，第n节点为平衡节点。

对于PQ节点($i=1,2,\cdots,m$)，将节点注入功率转化为电流，得

$$\dot{I}_i = \frac{\hat{S}}{\hat{V}_i} = \frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i} \tag{3}$$

该节点网络方程为

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}V_j \tag{4}$$

由式(3)与式(4)得到

$$\Delta\dot{I}_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}\dot{V}_j - \frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i} = 0 \tag{5}$$

式(5)为复数形式的潮流方程，写成直角坐标形式的实数方程，得

$$\begin{bmatrix}\Delta I_{xi}\\ \Delta I_{yi}\end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{n}\begin{bmatrix}G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_j\\ f_j\end{bmatrix} - \frac{1}{e_i^2+f_i^2}\begin{bmatrix}e_i & f_i\\ f_i & -e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_i\\ Q_i\end{bmatrix} \tag{6}$$

将式(5)在工作点处展开成 Taylor 级数，保留二阶项，并考虑其原点项(零阶导数项)为零，得

$$\begin{aligned}\Delta\dot{I}_i = {} & \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}\dot{V}_j - \frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i} + \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}\Delta\dot{V}_j - \frac{\Delta P_i - \mathrm{j}\Delta Q_i}{\hat{V}_i} + \\ & \frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i^2}\Delta\hat{V}_i - \frac{1}{2}\Delta\hat{V}_i^2\frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i^3} = \\ & \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}\Delta\dot{V}_j - \frac{\Delta P_i - \mathrm{j}\Delta Q_i}{\hat{V}_i} + \\ & \frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i^2}\Delta\hat{V}_i - \frac{1}{2}\Delta\hat{V}_i^2\frac{P_i - \mathrm{j}Q_i}{\hat{V}_i^3}\end{aligned} \tag{7}$$

将式(7)写成实数形式，并考虑 PQ 节点的功率为给定值，故其偏差为零，可得

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\Delta I_{xi}\\ \Delta I_{yi}\end{bmatrix} = {} & \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n}\begin{bmatrix}G_{ij} & -B_{ij}\\ B_{ij} & G_{ij}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta e_j\\ \Delta f_j\end{bmatrix} + \\ & \left(\begin{bmatrix}G_{ii} & -B_{ii}\\ B_{ii} & G_{ii}\end{bmatrix} + \boldsymbol{D}_{ii}\right)\begin{bmatrix}\Delta e_i\\ \Delta f_i\end{bmatrix} + \frac{4}{(e_i^2+f_i^2)^3}\cdot \\ & \begin{bmatrix}e_i & f_i\\ f_i & -e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_i & f_i\\ -f_i & e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_i & -Q_i\\ Q_i & P_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_i\Delta e_i^2 + f_i\Delta e_i\Delta f_i\\ f_i\Delta f_i^2 + e_i\Delta e_i\Delta f_i\end{bmatrix} + \\ & \frac{2}{(e_i^2+f_i^2)^2}\cdot\begin{bmatrix}P_ie_i + f_iQ_i & P_ie_i + f_iQ_i\\ P_if_i + e_iQ_i & P_if_i - e_iQ_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta e_i^2\\ \Delta f_i^2\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{8}$$

式中，

$$\boldsymbol{D}_{ii} = \frac{1}{(e_i^2+f_i^2)^2}\begin{bmatrix}e_i & -f_i\\ f_i & e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_i & f_i\\ f_i & -e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P_i & -Q_i\\ Q_i & P_i\end{bmatrix}。$$

式(8)即为节点电流注入型保留非线性潮流修正方程，整理得到保留非线性潮流修正方程的矩阵形式。

$$\Delta\boldsymbol{I} + \boldsymbol{N} = (\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{D})\Delta\boldsymbol{V} \tag{9}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix}\Delta I_{x1} & \Delta I_{y1} & \cdots & \Delta I_{xi} & \Delta I_{yi}\cdots & \Delta I_{xm} & \Delta I_{ym}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，为节点注入电流的平衡量；由式(6)得到 $\Delta\boldsymbol{V} = \begin{bmatrix}\Delta f_1 & \Delta e_1 & \cdots & \Delta f_i & \Delta e_i & \cdots\Delta f_{n-1} & \Delta e_{n-1}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，为节点电压修正量；

$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix}N_{x1} & N_{y1} & \cdots & N_{xi} & N_{yi} & \cdots & N_{xm} & N_{ym}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，其计算公式为

$$\begin{bmatrix}N_{xi}\\ N_{yi}\end{bmatrix}=-\frac{4}{(e_i^2+f_i^2)^3}\begin{bmatrix}e_i & f_i\\ f_i & -e_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_i & f_i\\ -f_i & e_i\end{bmatrix}\cdot \begin{bmatrix}P_i & -Q_i\\ Q_i & P_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_i\Delta e_i^2+f_i\Delta e_i\Delta f_i\\ f_i\Delta f_i^2+e_i\Delta e_i\Delta f_i\end{bmatrix}-\frac{2}{(e_i^2+f_i^2)^2}\begin{bmatrix}P_ie_i+f_iQ_i & P_ie_i+f_iQ_i\\ P_if_i+e_iQ_i & P_if_i-e_iQ_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta e_i^2\\ \Delta f_i^2\end{bmatrix} \tag{10}$$

$\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{D}$ 为 $2m\times 2(n-1)$ 阶矩阵：

$$\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}B'_{11} & G'_{11} & -B_{12} & G_{12} & \cdots & -B_{1,n-1} & G_{1,n-1}\\ G''_{11} & B''_{11} & G_{12} & B_{12} & \cdots & G_{1,n-1} & B_{1,n-1}\\ -B_{21} & G_{21} & B'_{22} & G'_{22} & \cdots & -B_{2,n-1} & G_{2,n-1}\\ G_{21} & B_{21} & G''_{22} & B''_{22} & \cdots & G_{2,n-1} & B_{2,n-1}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots\\ -B_{m1} & G_{m1} & -B_{m2} & G_{m2} & \cdots & -B_{m,n-1} & G_{m,n-1}\\ G_{m1} & B_{m1} & G_{m2} & B_{m2} & \cdots & G_{m,n-1} & B_{m,n-1}\end{bmatrix} \tag{11}$$

其中，

$$\begin{cases}B'_{ii}=-\dfrac{\partial\Delta I_{xi}}{\partial f_i}=-B_{ii}+A_i\\ G'_{ii}=-\dfrac{\partial\Delta I_{xi}}{\partial e_i}=G_{ii}+B_i\\ G''_{ii}=-\dfrac{\partial\Delta I_{yi}}{\partial f_i}=G_{ii}-B_i\\ B''_{ii}=-\dfrac{\partial\Delta I_{yi}}{\partial e_i}=B_{ii}+A_i\end{cases} \tag{12}$$

其中，A_i、B_i 为

$$\begin{cases}A_i=-\dfrac{Q_i\left(e_i^2-f_i^2\right)-2e_if_iP_i}{\left(e_i^2+f_i^2\right)^2}\\ B_i=\dfrac{P_i\left(e_i^2-f_i^2\right)+2e_if_iQ_i}{\left(e_i^2+f_i^2\right)^2}\end{cases} \tag{13}$$

对于每个PV节点($i=m+1,m+2,\cdots,n-1$)，其节点功率潮流方程为

$$\begin{cases}\Delta P_i=P_{is}-e_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j)-f_i\sum\limits_{j=1}^{n}(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j)\\ \Delta V_i^2=V_{is}^2-(e_i^2+f_i^2)\end{cases} \tag{14}$$

写成矩阵形式的修正方程式为

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{V}^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{N} & \boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{S} & \boldsymbol{R}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{f}\\ \Delta\boldsymbol{e}\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中元素的计算式如下。

$$\begin{cases}N_{ii}=-\sum\limits_{j=1}^{n}\left(G_{ij}f_j+B_{ij}e_j\right)+(B_{ii}e_i-G_{ii}f_i)\\ N_{ij}=B_{ij}e_i-G_{ij}f_i\end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases}H_{ii}=-\sum\limits_{j=1}^{n}\left(G_{ij}e_j-B_{ij}f_j\right)-(G_{ii}e_i+B_{ii}f_i)\\ H_{ij}=-(G_{ij}e_i+B_{ij}f_i)\end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases}S_{ii}=-2f_i\\ S_{ij}=0\end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases}R_{ii}=-2e_i\\ R_{ij}=0\end{cases} \tag{19}$$

3　最优乘子的求取

一组待求变量 x 的初值为 $\boldsymbol{x}^{(k)}$，电流型潮流方程的 Taylor 展开式可以精确地表示为

$$\boldsymbol{y}_{sp}=y(\boldsymbol{x}^{(k)})+\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}+z(\Delta\boldsymbol{x}) \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{y}_{sp}$ 是节点注入电流给定值；y 是节点注入电流和节点电压之间的函数表达式；$\Delta\boldsymbol{x}$ 是待求变量 $\boldsymbol{x}$ 的修正量，即节点电压修正量。

由式(8)—式(10)可知，对于直角坐标系电流型潮流方程来说，式(20)等号右端第三项是一个不含一次项的二次函数，故有式(21)。

$$z(\mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})=\mu^2 z(\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}) \tag{21}$$

式中，μ 为一标量。

当 $\Delta\boldsymbol{x}$ 前乘一个标量乘子 μ 代替 $\Delta\boldsymbol{x}$ 时，由式(20)可得

$$\begin{aligned}f(\mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})&=\boldsymbol{y}_{sp}-y(\boldsymbol{x}^{(k)})-\boldsymbol{J}\mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}-z(\mu\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})=\\ &\boldsymbol{y}_{sp}-y(\boldsymbol{x}^{(k)})-\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}\mu-z(\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})\mu^2\end{aligned} \tag{22}$$

定义 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$ 三向量，并对照式(9)，考虑其物理意义如式(23)所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{a}=\boldsymbol{y}_{sp}-y(\boldsymbol{x}^{(k)})=\Delta\boldsymbol{I}\\ \boldsymbol{b}=-\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}=-(\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{D})\Delta\boldsymbol{V}\\ \boldsymbol{c}=-z(\Delta\boldsymbol{x}^{(k)})=-\boldsymbol{N}\end{cases} \tag{23}$$

在潮流计算的迭代过程中，式(23)中的 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$ 三个向量参数可以由式(9)的中间计算结果直接得出，而不需要额外增加任何计算量。

综上，求取最优乘子 μ 的问题转化为对式(24)的求解。

$$\min_{\mu}\left\|f(\mu\Delta\boldsymbol{x})\right\|_2=\min_{\mu}\left\|\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}\mu+\boldsymbol{c}\mu^2\right\|_2 \tag{24}$$

设关于标量 μ 的目标函数为

$$F(\mu)=\frac{1}{2}(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}\mu+\boldsymbol{c}\mu^2)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}\mu+\boldsymbol{c}\mu^2) \tag{25}$$

式(25)对 μ 求偏导并令其为零，可得一元三次方程为

$$g_0+g_1\mu+g_2\mu^2+g_3\mu^3=0 \tag{26}$$

其中，

$$\begin{cases} g_0=\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \\ g_1=\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}+2\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{c} \\ g_2=3\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{c} \\ g_3=2\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{c} \end{cases} \tag{27}$$

式(26)的解即为最优乘子 μ 的值。此方程是一元三次方程，存在 3 个解，一般取其中大于 0 的实数解作为最优乘子[23]，在数学上一元三次方程可以解析求解，所以引入最优乘子的附加计算量很小[24]。

4 潮流计算的实现步骤

综上所述，带最优乘子的保留非线性电流型潮流算法的计算步骤如下。

(1) 输入原始数据。

(2) 形成节点导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}$。

(3) 令迭代次数 $k=0$，给定各节点电压初值 $e^{(k)}$、$f^{(k)}$ 等。

(4) 将 $e^{(k)}$、$\Delta f^{(k)}$ 等代入潮流方程中，求出 $\Delta\boldsymbol{I}$、$\Delta\boldsymbol{P}$、$\Delta\boldsymbol{V}^2$ 及 $\boldsymbol{N}$；并检验是否收敛，若满足收敛条件 $\max\limits_i\left\{\left|\Delta P_i^{(k)}\right|,\left|\Delta I_i^{(k)}\right|,\left|(\Delta V_i^{(k)})^2\right|\right\}<\varepsilon$，则潮流收敛，迭代结束，计算并输出结果；若不满足收敛条件，继续下一步。

(5) 将 $e^{(k)}$、$\Delta f^{(k)}$ 等代入式(11)—式(13)，求取 PQ 节点的系数矩阵 $\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{D}$。

(6) 将 $\Delta e^{(k)}$、$\Delta f^{(k)}$ 等代入式(16)—式(19)，求取 PV 节点的系数矩阵。

(7) 解修正方程式(9)和式(15)，求出电压的修正量 $\Delta e^{(k)}$ 和 $\Delta f^{(k)}$。

(8) 提取计算中的状态变量 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$，利用式(27)计算一元三次方程的 4 个系数。

(9) 解一元三次方程式(26)，计算最优乘子 $\mu^{(k)}$，如果最优乘子 $\mu^{(k)}$ 趋于零，迭代结束，潮流无解。

(10) 根据 $e^{(k+1)}=e^{(k)}-\mu^{(k)}\Delta e^{(k)}$、$f^{(k+1)}=f^{(k)}-\mu^{(k)}\Delta f^{(k)}$，对各节点的电压进行修正。

(11) $k=k+1$，返回步骤(4)，继续循环迭代。

5 算例分析

采用本文给出的潮流计算方法，对IEEE11标准系统和107节点系统进行潮流计算，收敛精度为10^{-5}。

表1和表2列出了两个测试系统带最优乘子的传统电流注入型和带最优乘子的电流注入型保留非线性潮流算法每次迭代的最优乘子 μ 值。表中工况一是指系统原始运行状态，工况二是指系统中所有节点功率增加到2倍时的运行状态。由表1和表2的结果数据看出：在系统原始运行状态下，除第一次迭代外，乘子值均接近于1，最优乘子的作用不够明显；但当系统趋于病态时，最优乘子具有明显的调整作用；当潮流收敛时，其最优乘子 μ 的值最终趋于1。

表 1 IEEE11 系统最优乘子的取值

Table 1 Value of optimal multiplier in IEEE 11-node system

迭代	工况一的 μ 值		工况二的 μ 值	
次数	传统电流注入	保留非线性	传统电流注入	保留非线性
1	0.902 25	0.909 16	1.335 86	1.802 67
2	1.081 25	1.030 10	0.821 25	1.530 10
3	1.002 54	1.001 35	1.056 31	0.871 56
4	1.001 38	1.000 82	0.975 47	0.935 72
5	1.000 24	1.000 12	0.998 33	1.002 15

表 2 107 节点系统最优乘子的取值

Table 2 Value of optimal multiplier in 107-node system

迭代	工况一的 μ 值		工况二的 μ 值	
次数	传统电流注入	保留非线性	传统电流注入	保留非线性
1	0.903 81	0.925 87	1.458 12	1.754 36
2	1.098 65	1.066 62	0.725 68	1.478 26
3	1.046 73	1.008 58	1.165 31	1.106 41
4	1.002 43	1.001 87	0.903 29	0.916 82
5	1.000 25	1.000 12	0.997 23	1.003 21

分别采用无最优乘子电流注入型保留非线性潮流算法和带有最优乘子的电流注入型保留非线性潮流算法，针对107节点系统，按倍数逐渐增加所有节点功率至潮流病态，其迭代次数及收敛情况如表3所示。结果表明：对于常态潮流系统，最优乘子可以减少潮流的迭代次数；对于病态潮流系统，最优乘子的引入有效地提高了潮流的收敛可靠性。

表 3 107 节点系统收敛性比较

Table 3 Convergence comparison in 107-node system

功率增加倍数	迭代次数	
	无最优乘子	带最优乘子
1.00	6	5
1.50	6	5
2.00	6	5
2.31	发散	8
2.33	发散	10
2.35	发散	无解

表4列出了本文方法与其他三种方法的潮流计算时间(s)和迭代次数的结果比较。方法一为电流注入型潮流算法，方法二为带最优乘子的电流注入型潮流算法，方法三为电流注入型保留非线性潮流算法。

表 4 四种方法计算结果的比较

Table 4 Comparison of the calculation results for four methods

测试系统	方法一		方法二	
	时间/s	次数	时间/s	次数
11 节点	0.006	6	0.006	5
107 节点	1.671	9	1.188	6

测试系统	方法三		本文方法	
	时间/s	次数	时间/s	次数
11 节点	0.006	5	0.006	5
107 节点	1.186	6	1.052	5

表4的潮流计算结果显示，在相同的潮流计算精度下：对于IEEE11节点系统，四种算法的潮流迭代次数与计算时间基本相同；对于107节点系统，方法二与方法三的效果基本相同，均明显优于传统的电流注入型潮流算法，而本文方法优于方法二和方法三。由算例结果的分析可知：带最优乘子的电流注入型保留非线性潮流算法可以减少潮流的迭代次数，加快收敛速度，系统的节点数越多，最优乘子的作用就越明显。

6 结论

在电流注入型保留非线性潮流计算中引入最优乘子，从算法上保证了计算过程的不发散，并提高了潮流计算的收敛速度。IEEE11 节点系统和 107 节点系统算例证明，带有最优乘子的保留非线性电流注入型潮流计算方法在保证潮流不发散的同时，减少了迭代次数，提高了潮流计算速度。

参考文献

[1] 陆文甜, 刘明波, 林舜江, 等. 基于分布式内点法的多区域互联电力系统最优潮流分散式求解[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6828-6837.
LU Wentian, LIU Mingbo, LIN Shunjiang, et al. Decentralized solution for optimal power flow of multi-area interconnected power systems based on distributed interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6828-6837.

[2] 容文光, 吴政球, 匡文凯, 等. 基于泰勒级数展开的 $N-1$ 牛顿拉夫逊法快速潮流修正计算[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 42-46.
RONG Wenguang, WU Zhengqiu, KUANG Wenkai, et al. Taylor series expansion based $N-1$ fast power flow revision calculation using Newton-Raphson method[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 42-46.

[3] 鲍玉川, 张巧霞, 张萌, 等. 基于综合能源系统的最优潮流解耦算法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 80-86.
BAO Yuchuan, ZHANG Qiaoxia, ZHANG Meng, et al. Optimal power flow decoupling algorithm based on integrated energy system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 80-86.

[4] 韩学军, 赵少峰, 赵慧磊, 等. 冗余电压数据干扰下的配网合环潮流计算方法改进研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(7): 1-6.
HAN Xuejun, ZHAO Shaofeng, ZHAO Huilei, et al. Improvement of the calculation method of distribution loop power flow in the distribution network under the interference of redundant voltage data[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(7): 1-6.

[5] 彭慧敏, 袁虎玲, 鲍颜红, 等. 大电网病态潮流的识别和修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 116-123.
PENG Huimin, YUAN Huling, BAO Yanhong, et al. Identification and correction method for ill-conditioned power flow of large scale network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 116-123.

[6] 叶晨, 崔双喜, 王维庆. 含风电的电力系统概率潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 167-172.
YE Chen, CUI Shuangxi, WANG Weiqing. Probabilistic load flow calculation for power grid containing wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 167-172.

[7] 梁梓均, 林舜江, 刘明波. 一种求解交直流互联电网分布式最优潮流的同步 ADMM 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 28-36.
LIANG Zijun, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. A synchronous ADMM algorithm for solving distributed optimal power flow of AC/DC interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 28-36.

[8] 王宗义, 郭志忠. 电流型牛顿法潮流[J]. 继电器, 2005, 33(18): 27-29.
WANG Zongyi, GUO Zhizhong. Newton load flow algorithm based on current balance equations[J]. Relay, 2005, 33(18): 27-29.

[9] 牛辉, 郭志忠. 电流注入模型的电力系统潮流计算[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 39-41.
NIU Hui, GUO Zhizhong. Power flow algorithm based on current-influx model[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 39-41.

[10] 彭世康, 王永刚, 余志文, 等. 极坐标形式的电流注入型潮流算法[J]. 继电器, 2000, 28(3): 1-4.
PENG Shikang, WANG Yonggang, YU Zhiwen, et al.

Polar current-injecting power flow algorithm[J]. Relay, 2000, 28(3): 1-4.

[11] IWAMOTO S, TAMURA Y. A fast load flow method retaining nonlinearity[J]. IEEE Transactions on PAS, 1978, 100(4): 1736-1737.

[12] 韩禹歆，陈来军，王召健，等. 基于自适应步长ADMM的直流配电网分布式最优潮流[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 26-37.
HAN Yuxin, CHEN Laijun, WANG Zhaojian, et al. Distributed optimal power flow in direct current distribution network based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 26-37.

[13] 张昕，张勇，钱伟杰，等. 基于简化零空间内点法VSC-HVDC离散化最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 15-23.
ZHANG Xin, ZHANG Yong, QIAN Weijie, et al. Research on the optimal power flow of VSC-HVDC based on the simplified null space interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 15-23.

[14] 董晓明，梁军，韩学山，等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. 电力系统自动化，2011，35(13): 49-53.
DONG Xiaoming, LIANG Jun, HAN Xueshan, et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step size controlling in continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 49-53.

[15] 杨健，韦化，覃秀君. 基于二阶正交配置法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1): 64-73.
YANG Jian, WEI Hua, QIN Xiujun. Transient stability constrained optimal power flow based on second-order orthogonal collocation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 64-73.

[16] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.

[17] 安娜，鲁宝春，李宝国，等. 广义Tellegen定理在保留非线性电流注入型潮流计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 40-43.
AN Na, LU Baochun, LI Baoguo, et al. Application of general Tellegen's theorem in retaining-nonlinearity power flow calculation based on current-influx model[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 40-43.

[18] TATE J E, OVERBYE T J. A comparison of the optimal multiplier in polar and rectangular coordinates[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1667-1674.

[19] 蒲园园，郑焕坤，常鲜戎. 基于注入电流模型的等值法交直流电力系统潮流计算[J]. 电测与仪表，2016，53(20): 56-61.
PU Yuanyuan, ZHENG Huankun, CHANG Xianrong. Equivalent algorithm for AC /DC power system load flow based on current-injecting model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 56-61.

[20] 王立国，刘宝柱. 基于混合注入模型的光伏并网潮流计算研究[J]. 现代电力, 2014, 31(1): 45-51.
WANG Liguo, LIU Baozhu. Research on power flow calculation of hybrid injection model based on PV grid-connected power system[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(1): 45-51.

[21] 胡泽春，严正. 带最优乘子牛顿法在交直流系统潮流计算中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 26-31.
HU Zechun, YAN Zheng. Application of Newton load flow methods with optimal multiplier for AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 26-31.

[22] 李知艺，丁剑鹰，吴迪，等. 步长优化技术在交直流系统潮流计算中的应用研究[J]. 华北电力大学学报，2014, 41(3): 1-9.
LI Zhiyi, DING Jianying, WU Di, et al. Research on applications of step size optimization techniques in power flow calculation of AC/DC systems[J]. Journal of North Electric Power University, 2014, 41(3): 1-9.

[23] 宾进宽，丘祖文，汪超群. 基于矢量化和准最优步长的电力系统连续潮流计算[J]. 智能电网，2015，3(2): 119-124.
BIN Jinkuan, QIU Zuwen, WANG Chaoqun. Continuation power flow calculation based on vectorization and quasi-optimal step-size operation mode[J]. Smart Grid, 2015, 3(2): 119-124.

[24] 方朝雄. 最优乘子法及其在交直流电网潮流计算中的应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 107-112.
FANG Chaoxiong. Optimal multiplier method and its application in power flow calculation for AC/DC power grids[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 107-112.

收稿日期：2019-01-22；　　修回日期：2019-03-12

作者简介：

李宝国(1966—)，男，教授，硕士，研究方向为电力系统运行与稳定控制、分布式发电技术；E-mail: dqlibaoguo@lnut.edu.cn

鲁宝春(1964—)，男，教授，博士，研究方向为电力系统稳定及其控制、微电网技术；

姜丕杰(1978—)，男，讲师，硕士，研究方向为电力系统分析与仿真。

（编辑　许　威）