

用Mc68000微机系统进行 优化潮流计算的研究

——非线性规划的应用

王文义 张树民

(电机系)

提 要

电力系统潮流计算是电力系统中的三大计算之一。而牛顿——拉夫逊(Newton—Raphson)法潮流计算又是对高、低电压系统都较适用的一种算法。

上述算法也是有局限性的,特别是当电力系统中出现负荷较重,某些结点电压严重偏离其额定值时,它的本来较好的收敛特性就会恶化,从而使得用该方法计算潮流会导致发散、振荡而得不到结果。为了研究这种情况,我们对自编的牛顿——拉夫逊法潮流计算程序作了改进,运用优化技术中的非线性规划知识,在Mc68000微型计算机上,调试通过了优化的潮流计算程序,使得改进后的计算方法在收敛特性上较之改进前有所提高,并且在调试过程中也得到了一些计算经验和体会。

目前,对电力系统潮流的计算,多是采用以导纳矩阵为基础的牛顿—拉夫逊法(以下简称牛顿法)和PQ分解法。这两种方法都各具特点,后一种方法由于忽略了一些因素,所以数学模型较简,计算快捷,适合于高压电力系统的计算,而前一种方法的突出特点则是收敛特性好,在精度相当高的条件下,一般常态潮流,只需迭代4~5次即可迅速逼近真解。这一种方法无论对高电压系统还是低电压系统均可使用,它唯一存在的缺点是对初始值的选择以及计算机的内存容量要求较高。

考虑到现在电力系统中投入运行的容量与实际负荷间存在的矛盾,往往使电力系统处于过负荷运行的状态。这种情况给我们提出了新的问题,即用牛顿法计算过负荷运行的电力系统潮流时,收敛性会不会受到影响?如果收敛特性变坏,如何解决?针对这个问题,我们在引进的Mc68000微机系统上对上述问题进行了研究,并且充分利用该机丰富的软件和足够大的内存空间,把非线性规划技术应用到牛顿法潮流计算中,调试通过了优化的潮流计算程序,基本上摸清和解决了因负荷加重给电力系统潮流计算带来的问题。

本文1984年4月14日收到

一、牛顿法潮流计算的数学模型

电力系统的功率方程是有很多个非线性方程组组成的,它们可以被归纳为下式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_i &= P_i - \sum_{j=1}^n [e_i (g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) + f_i (g_{ij} f_j + b_{ij} e_j)] = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_i - \sum_{j=1}^n [f_i (g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - e_i (g_{ij} f_j + b_{ij} e_j)] = 0 \\ \Delta u_i^2 &= u_i^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

式中,对PQ结点只有一、二条,对PV结点只有一、三条。

牛顿法潮流计算是把式(1)所示的对非线性方程组的求解过程化为相应的对线性方程组的求解过程,用逐步线性化的方法,求出结点的电压修正量 Δe_i 、 Δf_i ,进而由下式:

$$\left. \begin{aligned} e_i^{(k)} &= e_i^{(k-1)} - \Delta e_i^{(k-1)} \\ f_i &= f_i^{(k-1)} - \Delta f_i^{(k-1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

求出新的结点电压 e_i , f_i ,如此反复迭代,最后达到收敛。式中K为迭代次数。

假定系统中共有n个结点,且第n个结点为平衡结点,那么它是不参与迭代的,而PQ结点和PV结点的结点号可以通过结点优化任定。当这些因素确定之后,可把式(1)中的三个式子共 $2(n-1)$ 个方程式按泰勒公式展开,略去了二次及二次以上的高次项后,把已经线性化了的方程组整理成下式:

$$\begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta p_i \\ \Delta u_i^2 \\ \vdots \\ \Delta p_{n-1} \\ \Delta Q_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta p_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta p_1}{\partial f_1} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_1}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta p_1}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta p_1}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \Delta p_i}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta p_i}{\partial f_1} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_i}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta p_i}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_i}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta p_i}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial f_1} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta p_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial e_i} & \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial f_i} & \dots\dots\dots \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta e_i \\ \Delta f_i \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f_{n-1} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)称为牛顿法潮流计算的修正方程式, 它可简写成;

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{X}$$

其中 \mathbf{J} 称为雅可比矩阵, 矩阵中的各元素都是结点电压 \mathbf{e} 、 \mathbf{f} 的函数。当 $j \neq i$ 时,

$$\frac{\partial \Delta p_i}{\partial e_i} = - \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = - (g_{ij} e_i + d_{ij} f_i)$$

$$\frac{\partial \Delta p_i}{\partial f_j} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} = b_{ij} e_i - g_{ij} f_i$$

$$\frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial e_j} = \frac{\partial \Delta u_i^2}{\partial f_j} = 0$$

时 $j = i$ 当,

$$\frac{\partial \Delta p_i}{\partial e_i} = - \sum_{j=1}^n (g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - g_{ii} e_i - b_{ii} f_i$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} = - \sum_{j=1}^n (g_{ij} f_j + b_{ij} e_j) + b_{ii} e_i - g_{ii} f_i$$

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i} = - \sum_{j=1}^n (g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) + g_{ii} e_i + b_{ii} f_i$$

$$\frac{\partial \Delta u_{2i}}{\partial e_i} = -2e_i$$

$$\frac{\partial \Delta u_{2i}}{\partial f_i} = -2f_i$$

通过比较可以发现, 雅可比矩阵虽然不象导纳矩阵那样是对称矩阵, 但是分块的雅可比矩阵却与导纳矩阵具有完全相同的稀疏性, 并且电力系统的规模愈大, 二者也就愈稀疏。注意到这一点, 在编制牛顿法潮流计算程序中正确运用稀疏技巧, 再加上结点优化技巧, 就可以节省大量的计算机内存空间, 从而达到提高牛顿法计算速度的目的。

在程序中, 形成雅可比矩阵是关键的一步, 它直接关系到整个程序的质量, 所以在进行这一步时, 须对上述雅可比矩阵诸元素公式进行仔细的研究, 找出它们的共同点, 尽量避免无谓的重复计算。采用稀疏技巧后, 由于对导纳矩阵的上三角非零非对角元素和对角元素是分别存贮的, 所以雅可比矩阵各元素的形成也需分两步进行: 首先形成非对角元素, 然后再形成对角元素(这儿所谓的元素系指分块元素而言的)。

另外, 考虑到程序的通用性, 应允许PV结点为任意的结点号, 这就需要在输入原始数据时, 给PV结点赋以特殊的标志, 以便在形成雅可比矩阵相应结点的偶数行元素时, 使其有别于PQ结点。

二、牛顿法潮流计算的优缺点及其改进方法

由大量的计算实践表明,牛顿法对电力系统常态潮流的求解是令人满意的,但是当迁到诸如初值选择不当,系统负荷过重或其它非正常运行状态(国外称之为病态运行—ill-condition)时,用这种方法计算潮流就往往会出现收敛太慢、发散甚至产生振荡的现象。分析原因,可能是由下列情况引起的:

1) 系统中某些结点的电压严重偏离正常值,使得无法选出接近于各结点实际运行电压的初值。

2) 系统超负荷运行,使得潮流真解的各根彼此相离过近,以致在真解附近功率方程的切平面斜率呈现出稳定状态,这就会导致引起振荡或收敛到使系统无法接受的运行水平。

3) 系统运行正常,但是所选初值不当,使得牛顿法潮流计算方法本身引起不收敛。

对于计算不收敛的情况,单从计算结果来看是判断不出究竟是潮流本身无解还是所用的数学方法解不出来这两种原因的。这个问题,最近几年国内外不少人曾提出了很多的设想和改进方法,但是总的说来,这些方法的局限性都比较大,一般是用某种方法只能去解决某些特定的问题,而对另外的问题,这种方法就可能无能为力了。

牛顿法收敛太慢或者发散的主要原因,是因为在它的修正方程中只计入了 Δx 的一次项,而更高次项被忽略掉了。这个前提在 Δx 本身很小时是成立的,但是当碰到诸如初值选择不当等特殊情况而导致 Δx 不很小时,尚若再忽视其高次项,就势必引起修正方程式与精确的功率方程泰勒展开式之间存在有较大的误差,从而使收敛特性大大变坏。

考虑到上述原因,要是在修正方程中计入高次项时,情况又怎样呢?首先推导一下功率方程精确的泰勒展开式。

功率方程;

$$P_i - P_i(x) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$P_i = [P_{1i}, Q_{1i}, P_{2i}, Q_{2i} \dots\dots\dots P_{mi}, u^2_{m1}, \dots\dots\dots]^T$$

式中: P_i —已知的各结点注入功率。

$$X = [e_1, f_1, e_2, f_2, \dots\dots\dots, e_m, f_m, \dots\dots\dots]^T$$

X —电压向量

$P_i(X)$ ——指功率(有功,无功,电压平方)计算量。它是由给定的电压向量按照网络方程计算出的各结点功率,若它与 P_i 的误差在允许的范围内,则 X 即视为方程(4)的解。

精确的泰勒展开形式为;

$$P_i - P_i(X) - J(X)\Delta X - P_i(\Delta X) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

根据功率方程(1)可知, $P_i(X)$ 是 X 的二次型函数[(1)中的 e, f 对应于此处的 X],故其泰勒展开式中三阶及三阶以上的导数值等于0,而一阶导数(即 Δx 一次项的系数)与改进前的雅可比矩阵 $J(X)$ 相同,二阶导数经分析后与 $P_i(X)$ 具有完全相同的结构,只不过是把 $P_i(X)$ 式中的 X 改为 ΔX 而已,关于这一点,我们可以从 $P_i(X)$ 中的典型项以及该

项的二阶偏导数上看起来,

如: $b_{ij} X_i X_j$ 或 $g_{ij} X_i X_j$

$$\text{其} \quad \frac{\partial^2 (b_{ij} X_i X_j)}{\partial X_i \partial X_j} \neq 0.$$

所以在功率方程泰勒展开式中的二次项中只出现一项:

$$\frac{\partial^2 (b_{ij} X_i X_j)}{\partial X_i \partial X_j} \cdot \Delta X_i \Delta X_j = b_{ij} \Delta X_i \Delta X_j \dots\dots\dots (6)$$

式(6)就是精确的泰勒展开式中的二次项。

找到了精确形式的泰勒展开式,就可以着手在修正方程式中计入展开式中的高次项。

由(5)可得:

$$[P_i - P_i(X) - P_i(\Delta X)] = J(X) \Delta X$$

$$\text{即:} \quad [\Delta P_i - P_i(\Delta X)] = J(X) \Delta X \dots\dots\dots (7)$$

从式(7)不难看出,欲要解出的未知数 ΔX 是隐含在等式左端中的,所以指望用 ΔX 去求解 ΔX 是不可能的。对于这样一个问题有人曾经仿照式(2)采取迭代的办法从而解出 ΔX 来,方法是先给定初值 $X^{(0)}$,然后用下式进行迭代:

$$[\Delta P_i(X^{(0)} - P_i(\Delta X^{(k)}))] = J(X^{(0)}) \Delta X^{(k+1)} \dots\dots\dots (8)$$

式中 K 为迭代次数。由该式可以看出,上述方法是把原来对 X 的迭代替换成了对 ΔX 的迭代,并且只在第一次迭代时形成一次雅可比矩阵,以后各次迭代仍然使用这个矩阵,显然,采用这个方法计算潮流,可以减少很多计算量。

经过实验计算表明,上述改进方法虽然采用了精确形式的修正方程式,表面看起来好象大大前进了一步,但是实际上它的收敛特性反而比一般牛顿法要差,这究竟是什么原因呢?原来,在修正方程中计入二次项后,这种方法本身已经不能保证使每次迭代都是朝着牛顿方向(即真解方向)前进(而不是后退或停滞不前),所以说用这种方法去改善牛顿法的收敛特性基本上是一次不成功的尝试。

此时我们又联想到了另一个引起牛顿法收敛特性变坏的原因,那就是,既然在泰勒展开式中略去了高次项,那么在每次迭代后求出的电压修正量 Δe_i 、 Δf_i 是不是最理想的修正量?若不是,能不能找到一种方法,用这种方法求出一个理想系数,利用它再把求出的 Δe_i 、 Δf_i 加以优化,去弥补一下因采用近似的修正方程所引起的误差。

三、用非线性规划求解系统潮流

由优化技术知道,非线性方程组

$$\left. \begin{aligned} f_1(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ f_2(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \\ \vdots \\ f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

的求根问题可以化为对由式(9)所构造的目标函数求极小值的问题。

设目标函数为 F ,则

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sum_{j=1}^n f_j^2(X_1, X_2, \dots, X_n) \dots\dots\dots (10)$$

当目标函数的导数 $F'(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 时的解 X_1, X_2, \dots, X_n 也就是(9)式所示的非线性方程组的真解，这是多维寻优问题。

对求解电力系统潮流来说，我们可以在第一次迭代求出电压修正量 $\Delta e_i, \Delta f_i$ 的基础上，找到一个理想系数 β ，用这个系数再把 $\Delta e_i, \Delta f_i$ 加以修正，然后再利用下式：

$$\begin{aligned} e_i^{(k)} &= e_i^{(k-1)} - \beta \Delta e_i^{(k-1)} \\ f_i^{(k)} &= f_i^{(k-1)} - \beta \Delta f_i^{(k-1)} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

求出各结点电压 e_i, f_i ，並以此作为新的电压初值参加迭代，若在每次迭代中都求一次理想系数，继而重复上述步骤，就可以加快收敛速度。

由式(11)不难看出，网络中各结点电压都是理想系数 β 的函数，同理，各结点的 $\Delta p_i, \Delta Q_i$ 和 Δu_i^2 也一定是 β 的函数。因此目标函数 F 的极小化问题对于电力系统潮流计算来说，常常是一维寻优的问题，也就是求 $F'(\beta) = 0$ 时的理想系数 β 的问题。

考虑理想系数 β 时的各个数学模型：

把(11)式代入(1)式，经整理可得：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i(\beta) &= P_i - (e_i - \beta \Delta e_i) \sum_{j=1}^n [(g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - \beta (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j)] \\ &\quad - (f_i - \beta \Delta f_i) \sum_{j=1}^n [(g_{ij} f_j + b_{ij} e_j) - \beta (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j)] \\ \Delta Q_i(\beta) &= Q_i - (f_i - \beta \Delta f_i) \sum_{j=1}^n [(g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - \beta (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j)] \\ &\quad - (e_i - \beta \Delta e_i) \sum_{j=1}^n [(g_{ij} f_j + b_{ij} e_j) - \beta (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j)] \\ \Delta u_i^2(\beta) &= u_i^2 - (e_i - \beta \Delta e_i)^2 - (f_i - \beta \Delta f_i)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

其目标函数为：

$$F(\beta) = \sum_{i=1}^n \left\{ \Delta P_i^2(\beta) + \begin{array}{l} \text{PQ结点} \\ \text{PV结点} \end{array} \left. \begin{array}{l} \Delta Q_i^2(\beta) \\ [\Delta u_i^2(\beta)]^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

求 $F(\beta)$ 极小值的寻优方法有很多种,常常采用的有共轭梯度法,最优下降法和随机搜索法等等,但考虑到这样的寻优问题同样存在有要求精度问题,即理想系数 β 符合什么条件才算满足要求?这个问题,一般也是通过迭代方法来实现的,既然是迭代,就同样也涉及到收敛性问题。鉴于插值中的三次插值比二次插值收敛性好,所以求理想系数 β 时就采用了三次插值。当然,这种方法也有其美中不足之处,因为它要求在计算过程中要不断的计算目标函数 F 对 β 的导数值,使得计算量较大。

对目标函数求导可得到:

$$F'(\beta) = 2 \sum_{j=1}^n \Delta p_i(\beta) \cdot \frac{\partial \Delta p_i(\beta)}{\partial \beta} + \left. \begin{array}{l} \xrightarrow{\text{PQ结点}} 2 \sum_{i=1}^n \Delta Q_i(\beta) \cdot \frac{\partial \Delta Q_i(\beta)}{\partial \beta} \\ \xrightarrow{\text{PV结点}} 2 \sum_{i=1}^n \Delta u_i^2(\beta) \cdot \frac{\partial \Delta u_i^2(\beta)}{\partial \beta} \end{array} \right\} \dots (14)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta p_i(\beta)}{\partial \beta} &= \Delta e_i \sum_{j=1}^n [(g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - \beta (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j)] \\ &\quad + \Delta f_i \sum_{j=1}^n [(g_{ij} f_j + b_{ij} e_j) - \beta (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j)] \\ &\quad + (e_i - \beta \Delta e_i) \sum_{j=1}^n (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j) + (f_i - \beta \Delta f_i) \\ &\quad \sum_{j=1}^n (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j) \\ \frac{\partial \Delta Q_i(\beta)}{\partial \beta} &= \Delta f_i \sum_{j=1}^n [(g_{ij} e_j - b_{ij} f_j) - \beta (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j)] \\ &\quad - \Delta e_i \sum_{j=1}^n [(g_{ij} f_j + b_{ij} e_j) - \beta (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j)] \\ &\quad + (f_i - \beta \Delta f_i) \sum_{j=1}^n (g_{ij} \Delta e_j - b_{ij} \Delta f_j) - (e_i - \beta \Delta e_i) \\ &\quad \sum_{j=1}^n (g_{ij} \Delta f_j + b_{ij} \Delta e_j) \\ \frac{\partial \Delta u_i^2(\beta)}{\partial \beta} &= 2 \Delta e_i (e_i - \beta \Delta e_i) + 2 \Delta f_i (f_i - \beta \Delta f_i) \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

$F(\beta)$ 与 $F'(\beta)$ 求出之后,即可利用插值公式求取理想系数 β 。首先给定区间 $[\beta_a, \beta_b]$, 其条件是目标函数 $F(\beta)$ 在该区间内极小值必须存在。为了保证这一点,必须实现导数 $F'(\beta)$ 在区间两端点处的值符号相反,一旦此条件满足,就可以利用下式求 β :

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{3[F(\beta_a) - F(\beta_b)]}{\beta_b - \beta_a} + F'(\beta_a) + F'(\beta_b) \\ D &= \sqrt{C^2 - F'(\beta_a) \cdot F'(\beta_b)} \quad (D > 0) \\ \beta &= \beta_a + \frac{[F'(\beta_a) + C + D] \cdot (\beta_b^3 - \beta_a^3)}{F'(\beta_a) + F'(\beta_b) + 2C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

在计算过程中经过反复的搜索,逐步缩小寻优区间,当最后 β 满足下式:

$$|F'(\beta)| < \varepsilon \dots\dots\dots (17)$$

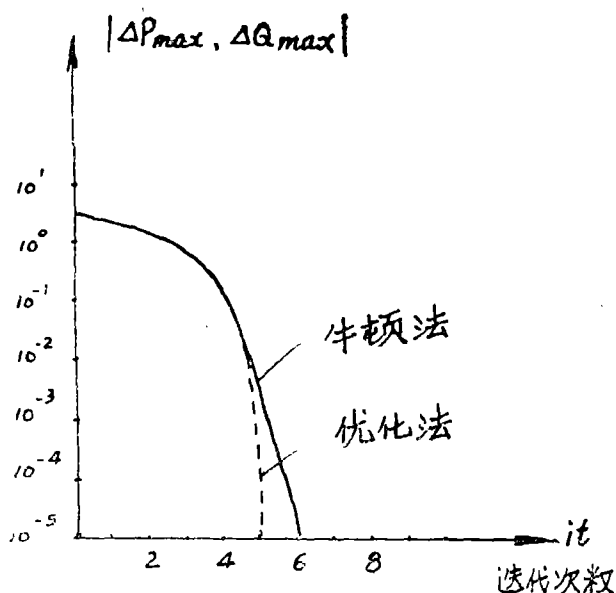
时,此 β 值称为理想系数,用它去修正 Δe_i 、 Δf_i ,可以收到满意的效果。 ε 为予先选定的小正数。

潮流计算总的原理框图和求理想系数 β 的原理框图附于文后。

优化潮流计算的特点是收敛性提高了,这是因为它既保证了 $e^{(k)}$ 、 $f^{(k)}$ 恒在牛顿方向上,又经过了步步优化,具有双重保证的特点。

四、优化潮流与牛顿法潮流的比较

优化潮流的突出优点在于它的收敛特性较优,最明显的现象是,对同一网络的计算,在后几次迭代时,优化潮流在牛顿方向上前进的速度显然比牛顿法要快(如图所示)。



当电压初值选取不当,如初始电压标么值选的离额定值较远时,如 $u_0 = 0.75$,牛顿法潮流收敛起来就相当困难,但优化潮流迭代4次即可收敛(精度 10^{-5} , 12结点系统)。同样是12结点系统,若是把负荷比正常值平均增加1.25倍,牛顿法需要6次迭代,而优化潮流5次即可收敛。如果把某个负荷结点负荷增加至1.65倍,牛顿法出现发散趋势,但优化法仍是迭代5次收敛。对22个结点做类似实验,结果与12结点相同。二者间的收敛特性关系如图所示。

若是其它条件不变,但提高收敛精度,也发现优化法的迭代次数总是比牛顿法要少。

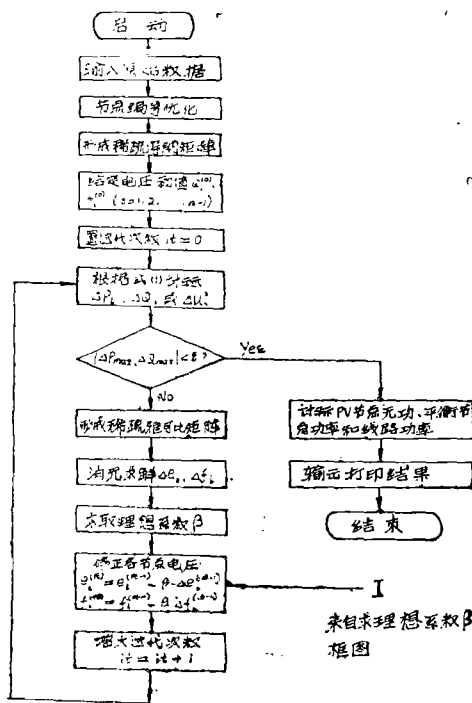
通过上述实验,我们初步发现优化潮流计算适用于下列情况:

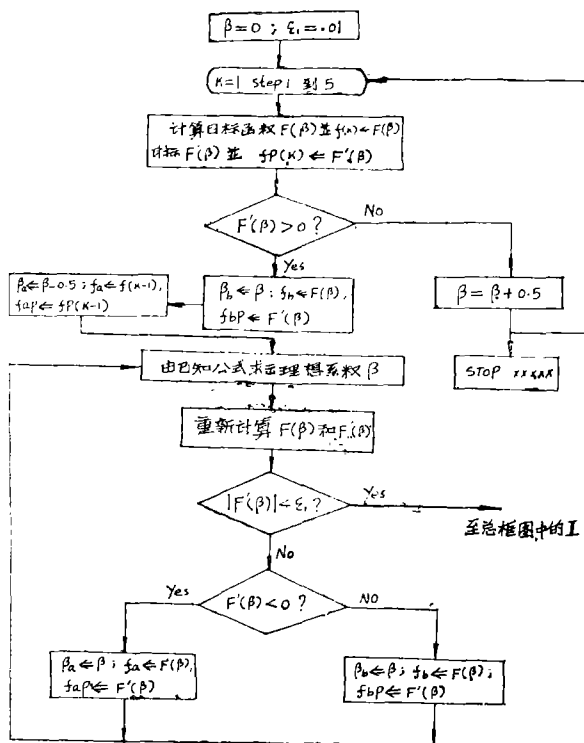
- (1) 当初值选取不当,牛顿法产生发散或收敛困难时;
- (2) 当系统中负荷较重,牛顿法收敛很慢时;
- (3) 当精度要求较高(如 $>10^{-8}$),牛顿法迭代次数太多时。

优化潮流程序也是存在有缺点的,这是因为在它的每一次迭代过程中比牛顿法额外增加了求解理想系数 β 的部分,由于在这个过程中需要多次计算目标函数的导数值,使得计算速度放慢。由此可见,对一般常态潮流的计算,还是采用牛顿法,除非遇到上述三种情况时才采用优化潮流的计算方法。

由于对实际系统试算的不多,所以难免在文中有考虑不周的地方,谨望指正。

附图一 优化潮流计算原理框图



附二：求理想系数 β 的原理框图附图二 计算理想系数 β 的原理框图

参考文献

- 〔1〕 最优化方法 南京大学数学系计算数学专业编 科学出版社1978.8
- 〔2〕 最优化与最优控制 蔡宣三编著 清华大学出版社1982.12
- 〔3〕 电力系统计算 西安交通大学 水利电力出版社1978.10
- 〔4〕 最优化计算方法常用程序汇编 万耀青等编 工人出版社1983.9