第35卷 第16期
2007年8月16日

继电器
RELAY

Vol.35 No.16
Aug. 16, 2007

基于泰勒级数的 *N*-1 网络快速灵敏度修正计算

邓 阳，吴政球，容文光，匡文凯

（湖南大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410082）

摘要：灵敏度计算是电力系统分析中的重要方法。提出了一种针对 *n*-1 网络中节点电压对系统控制参数变化灵敏度的快速计算方法，它是基于高阶泰勒级数的，其优势在于不必重新进行潮流计算，而是通过求解灵敏度对线路开断参数的高阶导数，从而代入灵敏度泰勒级数展开式修正基态灵敏度。文章以 IEEE300 节点算例，将此方法与重新进行潮流计算的牛顿法进行了数值试验和比较，结果说明了文章所述算法的正确性和优越性。

关键词：泰勒级数；灵敏度；潮流计算；雅可比矩阵；电力系统稳定

Sensitivity of N-1 system fast correction calculation based on Taylor series

DENG Yang, WU Zheng-qiu, RONG Wen-guang, KUAN Wen-kai

(School of Electrical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Sensitivity analysis approach is very important in electric power system analysis. In this paper, a fast calculation approach which aims at the sensitivity of node voltage to system control parameter of n-1 system is proposed.It's based on the higher order Taylor series. Its predominance is that it's not necessary to recalculate the power flow, and just need to calculate the various higher order derivatives of the sensitivity to line open-break parameter which would be joined into the Taylor series expansion formula to correct the original sensitivity. It has been tested by IEEE-30. The results, which are compared with those of Newton method which must recalculate the power flow, show that the presented approach is correct and superior.

Key words: Taylor series; sensitivity; power flow calculation; Jakobin matrix; power system stability

中图分类号：TM711 文献标识码：A 文章编号：1003-4897(2007)16-0023-04

0 引言

在电力网络分析中，常常涉及到灵敏度计算[1]，如节点无功变化对系统有功网损的灵敏度[2]、支路功率对发电机功率变化的灵敏度[3]、$\mathrm{d}Q_L/\mathrm{d}V_L$ 和 $\mathrm{d}P_L/\mathrm{d}V_L$[4]等。常见的灵敏度计算方法包括增量网络法、伴随网络法[5~7]、灵敏度矩阵法、拉格朗日乘子法[1]、基于 Tellegen 定理的方法[8]、轨迹灵敏度法[9]等，并得到广泛应用。

但只要网络结构发生变化，就必须重新计算灵敏度。在特殊情况下，例如当需大量计算 *n*-1 网络的灵敏度时，计算量急剧增加。本文提出一种适用于 *N*-1 网络的灵敏度修正计算方法，主要考虑节点电压对系统控制参数变化的灵敏度。在线路断开情况下，不须修改节点导纳矩阵去重新进行潮流和灵敏度计算，而是通过求解灵敏度对线路开断参数的高阶导数，利用泰勒级数展开式修正基态灵敏度值（以下简称泰勒法）。文章以 IEEE300 节点算例，将此方法与重新修改节点导纳矩阵的方法（以下简称牛顿法）进行了比较，说明了所述算法的正确性和快速性。

1 牛顿法

牛顿法潮流修正方程为：

$$-[J][\Delta V]=[\Delta W] \tag{1}$$

其中：$[\Delta W]$ 为有功、无功以及电压幅值偏差量，$[J]$ 为雅可比阵，$[\Delta V]$ 为电压修正量。

潮流收敛后，节点电压对系统控制参数 p 的灵敏度可以由原始节点功率平衡方程式直接对 p 求导得到：

$$[J]\left[\frac{\partial V}{\partial p}\right]=\left[\frac{\partial W}{\partial p}\right] \tag{2}$$

也可以将式(1)两边对 p 求导得：

$$-[J]\left[\frac{\mathrm{d}\Delta V}{\mathrm{d}p}\right]=\left[\frac{\mathrm{d}\Delta W}{\mathrm{d}p}\right] \tag{3}$$

式（3）中的$\left[\frac{\mathrm{d}\Delta V}{\mathrm{d}p}\right]$与式（2）中的$\left[\frac{\partial V}{\partial p}\right]$数值上相等，$\left[\frac{\partial V}{\partial p}\right]$以下用$\left[\frac{\mathrm{d}\Delta V}{\mathrm{d}p}\right]$代替$\left[\frac{\partial V}{\partial p}\right]$。在传统方法中，当网络中有线路开断时，无论是从式（2）还是从式（3）求取灵敏度都必须修改节点导纳矩阵重新进行牛顿潮流计算，再计算灵敏度，计算量大，耗时多。

2 泰勒法

2.1 灵敏度一阶导数

高阶泰勒级数法是在基态网络灵敏度已求得的情况下，通过修正基态灵敏度来求得网络中一线路开断后的灵敏度。

把式(3)可简写成式(4)：

$$-[J][SV]=[SW] \tag{4}$$

为了简化，$[SW]$代表$\left[\frac{\mathrm{d}\Delta W}{\mathrm{d}p}\right]$，$[SV]$代表$\left[\frac{\mathrm{d}\Delta V}{\mathrm{d}p}\right]$。假设线路开断状态可用参数$\alpha_{ij}$表示($i$=1, 2, 3..., j=1, 2, 3...)。当$\alpha_{ij}=1$，表示线路$i-j$正常运行；$\alpha_{ij}=0$，$i-j$停运。再将式(4)二边同时对线路状态参数α_{ij}求导可得：

$$-[J]\left[\frac{\mathrm{d}SV}{\mathrm{d}\alpha_{ij}}\right]=\left[\frac{\partial J}{\partial \alpha_{ij}}+JV\right][SV] \tag{5}$$

式中：$\left[\frac{\mathrm{d}SV}{\mathrm{d}\alpha_{ij}}\right]$为灵敏度对线路开断参数的一阶导数，$\left[\frac{\partial J}{\partial \alpha_{ij}}\right]$是雅可比矩阵对$\alpha_{ij}$的偏导数，形式如下：

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha_{ij}}=\begin{bmatrix} 0, & \cdots & \cdots & \cdots & ,0 \\ 0 & & & & \\ 0, & \cdots\frac{\partial J_{ii}}{\partial \alpha_{ij}} & \cdots & \frac{\partial J_{ij}}{\partial \alpha_{ij}}\cdots & ,0 \\ 0 & & & & \\ 0, & \cdots\frac{\partial J_{ji}}{\partial \alpha_{ij}} & \cdots & \frac{\partial J_{jj}}{\partial \alpha_{ij}}\cdots & ,0 \\ 0 & & & & \end{bmatrix}$$

对于PQ节点有如下分块阵

$$\left[\frac{\partial J_{ii}}{\partial \alpha_{ij}}\right]=\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i}] \\ \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i}] \end{bmatrix}, \quad \left[\frac{\partial J_{ij}}{\partial \alpha_{ij}}\right]=\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j}] \\ \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j}] \end{bmatrix}$$

对于PV节点有如下分块阵

$$\left[\frac{\partial J_{ii}}{\partial \alpha_{ij}}\right]=\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i}] \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \left[\frac{\partial J_{ij}}{\partial \alpha_{ij}}\right]=\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j}] & \frac{\partial}{\partial \alpha_{ij}}[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j}] \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

而式(5)中$[JV]$代表$[J]$经节点电压V对α_{ij}的1阶偏导数，$[JV^m]$代表$[J]$经V对α_{ij}的m阶偏导数，$[JV]$即是$[JV^m]$中m=1的情况(m=1, 2, 3, …)，其形式如下：

当$i \neq j$时，

$$\left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j}\right]^{(m)}=-\left[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j}\right]^{(m)}=-G_{ij}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-B_{ij}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j}\right]^{(m)}=\left[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j}\right]^{(m)}=B_{ij}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-G_{ij}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_j}\right]^{(m)}=\left[\frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_j}\right]^{(m)}=0$$

当$i=j$时

$$\left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i}\right]^{(m)}=-\sum_{k=1}^{n}\left(G_{ik}\left[\frac{\partial e_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-B_{ik}\left[\frac{\partial f_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}\right)-G_{ii}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-B_{ii}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i}\right]^{(m)}=-\sum_{k=1}^{n}\left(G_{ik}\left[\frac{\partial f_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}+B_{ik}\left[\frac{\partial e_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}\right)+B_{ii}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-G_{ii}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i}\right]^{(m)}=\sum_{k=1}^{n}\left(G_{ik}\left[\frac{\partial f_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}+B_{ik}\left[\frac{\partial e_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}\right)+B_{ii}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-G_{ii}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i}\right]^{(m)}=-\sum_{k=1}^{n}\left(G_{ik}\left[\frac{\partial e_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}-B_{ik}\left[\frac{\partial f_k}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}\right)+G_{ii}\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}+B_{ii}\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

$$\left[\frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_i}\right]^{(m)}=-2\left[\frac{\partial e_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)} \qquad \left[\frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_i}\right]^{(m)}=-2\left[\frac{\partial f_i}{\partial \alpha_{ij}}\right]^{(m)}$$

2.2 灵敏度多阶导数

从式(5)依次求导，可得

$$-[J]\left[\frac{\mathrm{d}^3SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^3}\right]=\left[3\times Ja\,V^2+JV^3\right][SV]+3\times\left[2\times Ja\,V+JV^2\right]\left[\frac{\mathrm{d}SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}}\right]+3\times\left[\frac{\partial J}{\partial\,a_{ij}}+JV\right]\left[\frac{\mathrm{d}^2SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^2}\right] \tag{6}$$

$$-[J]\left[\frac{\mathrm{d}^5SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^5}\right]=\left[5\times Ja\,V^4+JV^5\right][SV]+5\times\left[4\times Ja\,V^3+JV^4\right]\frac{\mathrm{d}SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}}+10\times\left[3\times Ja\,V^2+JV^3\right]\frac{\mathrm{d}^2SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^2}+10\times\left[2\times Ja\,V+JV^2\right]\left[\frac{\mathrm{d}^3SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^3}\right]+5\times\left[\frac{\partial J}{\partial\,a_{ij}}+JV\right]\left[\frac{\mathrm{d}^4SV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^4}\right] \tag{7}$$

式(5～7)依次为灵敏度对开断参数的1、3、5阶导数求解式，如继续对式(7)求导，则可得灵敏度的更高阶导数求解式。等式右边$\left[\frac{\mathrm{d}^kSV}{\mathrm{d}\,a_{ij}^k}\right]$($k$=1, 2, 3, …)为已求出的灵敏度对$\alpha_{ij}$的各阶导

数，而等式左边$\left[\dfrac{d^m SV}{d\alpha_{ij}^m}\right]$（$m$=1, 2, 3, …）则为待求$m$阶灵敏度导数。$\left[\dfrac{\partial J}{\partial\alpha_{ij}}\right]$是$[J]$对$\alpha_{ij}$的偏导数，在确定的系统运行点处，其形式和数值固定。$\left[JV^k\right]$是$[J]$经V对α_{ij}的k阶偏导数，$\left[J\alpha V^k\right]$是$\left[\dfrac{\partial J}{\partial\alpha_{ij}}\right]$电压对$\alpha_{ij}$的$k$阶偏导，它们中的所有元素都包含了节点电压$V$对$\alpha_{ij}$的$k$阶导数$\left[\dfrac{d^k V}{d\alpha_{ij}^k}\right]$（$k$=1, 2, 3, …），实验表明随着阶数的升高$\left[\dfrac{d^k V}{d\alpha_{ij}^k}\right]$数值急剧变小使得$\left[JV^k\right]$和$\left[J\alpha V^k\right]$对各阶灵敏度导数的影响也越来越小。因此计算过程中，只保留第一、二阶式中的$[JV]$、$\left[JV^2\right]$和$[J\alpha V]$，它们中元素包含的$\left[\dfrac{dV}{d\alpha_{ij}}\right]$和$\left[\dfrac{d^2V}{d\alpha_{ij}^2}\right]$求解如下：

首先，将式（1）两边对α_{ij}求导得：

$$-[J]\left[\frac{d\Delta V}{d\alpha_{ij}}\right]=\left[\frac{\partial\Delta W}{\partial\alpha_{ij}}\right] \tag{8}$$

式（10）的$\left[\dfrac{d\Delta V}{d\alpha_{ij}}\right]$与$\left[\dfrac{dV}{d\alpha_{ij}}\right]$的数值是相等的，在程序中看成是等同的。等式左边形式为$\left[0,\dots,0,\dfrac{\partial\Delta W_i}{\partial\alpha_{ij}},0,\dots,0,\dfrac{\partial\Delta W_j}{\partial\alpha_{ij}},0,\dots,0\right]$其中只包含两个非零项。求得$\left[\dfrac{d\Delta V}{d\alpha_{ij}}\right]$后，再将式（10）两边求导

$$-[J]\times\frac{d^2\Delta V}{d\alpha_{ij}^2}=\frac{\partial J}{\partial\alpha_{ij}}\frac{d\Delta V}{d\alpha_{ij}}+[JV]\times\frac{d\Delta V}{d\alpha_{ij}} \tag{9}$$

式（11）中$\left[\dfrac{d^2\Delta V}{d\alpha_{ij}^2}\right]$与$\left[\dfrac{d^2V}{d\alpha_{ij}^2}\right]$的数值也是相等的。

由此即可求得$\left[\dfrac{dV}{d\alpha_{ij}}\right]$和$\left[\dfrac{d^2V}{d\alpha_{ij}^2}\right]$，从而可求得第一、二阶式中的$[JV]$、$\left[JV^2\right]$和$[J\alpha V]$。二阶以后的灵敏度各阶导数求解式简化为：

$$-[J]\left[\frac{d^m SV}{d\alpha_{ij}^m}\right]=m\times\left[\frac{\partial J}{\partial\alpha_{ij}}\right]\left[\frac{d^{m-1}SV}{d\alpha_{ij}^{m-1}}\right]\quad(m=3,4,5,\dots) \tag{10}$$

求出灵敏度对α_{ij}的各阶导数$\left[\dfrac{d^k SV}{d\alpha_{ij}^k}\right]$后，代入灵敏度对开断参数的泰勒级数展开式：

$$\left[\frac{d\Delta V}{dp}\Big|_{\alpha_{ij}=0}\right]=\left[\frac{d\Delta V}{dp}\Big|_{\alpha_{ij}=1}\right]+\sum_{K=1}^{N}\frac{1}{K!}\frac{d^K}{d\alpha_{ij}^K}\left[\frac{d\Delta V}{dp}\Big|_{\alpha_{ij}=1}\right](-1)^K \tag{11}$$

式(13)右边$\left[\dfrac{d\Delta V}{dp}\Big|_{\alpha_{ij}=1}\right]$为$i$-$j$开断前的灵敏度值，式左边$\left[\dfrac{d\Delta V}{dp}\Big|_{\alpha_{ij}=0}\right]$即为$i$-$j$开断后的灵敏度值，$m$值越大精度越高（$m,k$=1, 2, 3, …）。

3 算例

文章以IEEE300节点系统为例，系统控制参数p选取系统中出线数最多的9003节点的注入无功，通过计算网络各节点电压对9003节点注入无功的灵敏度$\left[\dfrac{dV}{dQ_{9003}}\right]$，将泰勒法与牛顿法进行了程序实验和比较。第一步，编写牛顿潮流程序，潮流收敛后，根据式(3)计算出基态网络灵敏度。第二步，令9007-9003线路断开，通过修改潮流程序的节点导纳矩阵，重新进行潮流计算，再由式(3)计算出线路断开后的灵敏度。第三步，用高阶泰勒法计算线路9007-9003断开后的灵敏度修正量，修正基态网络灵敏度。第四步，将两种方法的过程和结果进行比较。

表1 线路9007–9003断开后两种方法的部分结果及计算时间

Tab.1 Part results of the two approaches and their computing time when broach 9007-9003 outage

节点号	牛顿法		泰勒法三阶		泰勒法五阶	
	$\frac{de}{dQ_{9003}}$	$\frac{df}{dQ_{9003}}$	$\frac{de}{dQ_{9003}}$	$\frac{df}{dQ_{9003}}$	$\frac{de}{dQ_{9003}}$	$\frac{df}{dQ_{9003}}$
9006	0.008803	-0.009942	0.008040	-0.009772	0.008829	-0.009945
9007	0.000001	0.000000	0.000002	-0.000000	0.000001	0.000000
9031	-0.008209	0.000601	-0.008010	0.000631	-0.008213	0.000602
9032	-0.010019	0.000790	-0.010712	0.000842	-0.010019	0.000810
9033	0.000831	-0.005401	0.000878	-0.005311	0.000840	-0.005411
9034	-0. 008864	-0.001916	-0.008301	-0.001971	-0.008851	-0.001935
9035	0.000374	0.008320	0.000390	0.008165	0.000376	0.008315
9036	0.016788	-0.001210	0.016647	-0.001104	0.016787	-0.001207
9037	-0.004678	-0.006546	-0.004239	-0.006990	-0.004621	-0.006575
9038	-0.000623	0.007210	-0.000673	0.007510	-0.000601	0.007309
9044	0.010238	0.000086	0.010427	0.000071	0.010257	0.000085
计时	1.4 s		0.3 s		0.4 s	

系统中与9003节点相连的节点有9006、9007、9031、9032、9033、9034、9035、9036、9037、9038、9044，表1中分别列出了两种方法的部分计算结果，可以看出随着阶数升高，泰勒法计算结果与牛顿法

计算结果越来越接近，到泰勒法 5 阶时，其差值已经很小，但计算时间比牛顿法少很多，而且从泰勒法 3 阶到 5 阶计算时间增加只有 0.1 s。

表 2 泰勒法计算阶数及其最大值误差

Tab.2 Computing steps and maximum errors of the Taylor approach

计算阶数	最大误差
1	0.001903
3	0.000141
5	0.000057

表 2 中列出了部分用泰勒法计算灵敏度高阶导数的阶数及其对应计算结果的最大误差（即泰勒法结果与灵敏度真值之差的绝对值最大值），由表 2 可以看出随着计算阶数的升高最大误差值很快减小，而表 1 中计算时间表明泰勒法随着计算阶数升高其计算时间增加很少，由此说明要使泰勒法结果达到更高的精度，只需增高少数计算阶数，而其计算时间增加将很少。

4 结束语

本文提出了一种在基态牛顿潮流基础上利用高阶泰勒级数求解 N-1 网络节点电压对系统控制参数灵敏度的快速修正计算方法。通过 IEEE300 节点系统算例，将此方法与牛顿法进行了程序实现与比较。由于高阶灵敏度导数求解式的简化，使得泰勒法计算阶数升高时程序基本不变，实际算法中主要是利用基态雅可比矩阵和$\left[\dfrac{\partial J}{\partial a_{ij}}\right]$矩阵进行计算，因此其程序编写只须在基态潮流雅可比迭代程序基础上，形成和分解$\left[\dfrac{\partial J}{\partial a_{ij}}\right]$矩阵，而$\left[\dfrac{\partial J}{\partial a_{ij}}\right]$中非零元素不超过 16 个，且对不同线路开断情况其形式固定，形成和分解程序简单灵活。而牛顿法对每条线路开断情况都要重新修改原始节点导纳矩阵进行潮流计算，且牛顿潮流程序运算时间长，对于一些较大系统，求解 N-1 网络灵敏度工作量很大，耗时也很长，此时泰勒法的优势将更明显。由算例中实验结果表 1 和表 2 可以看出，该方法不仅计算速度比牛顿法快很多，而且易于满足高精度要求。

参考文献

[1] 王尔智，赵玉环.电力网络灵敏度分析与潮流计算[M]. 北京：机械工业出版社，1991.
WANG Er-zhi,Zhao Yu-huan.Sensitivity Analysis of Electric Power Network and Calculation of Power Flow[M]. Beijing:China Machine Press，1991.

[2] 余健明，杜刚，姚李孝. 结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网无功补偿优化规划[J]. 电网技术，2002, 26（7），47-49.
YU Jian-ming，DU Gang，YAO Li-xiao. Application of Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Optimized Planning of Reactive Power Compensation for Distribution Networks[J]. Power System Technology，2002，26（7），47-49.

[3] 王功涛，蒙明晓，赵 豫. 支路合成法联络线族有功灵敏度计算[J]. 电力系统及其自动化学报，2003，15(5): 9-11.
WANG Gong-tao，MENG Ming-xiao，ZHAO Yu. Active Power Sensitivity Calculation of Interconnection Line with Branch Synthesis Method[J]. Proceedings of the EPSA，2003，15(5): 9-11.

[4] Smith K S，Ran I. Voltage Stability Assessment of Isolated Power System with Power Electronic Converters[J]. Proceeding of IEE，GTD,1994，141（4）: 310-314.

[5] 张惠廉，庄镇泉. 电子线路的计算机辅助设计[M]. 北京：高等教育出版社，1984.
ZHANG Hui-lian，ZHUANG Zheng-quan. CAD of Electronic Line[M]. Beijing：Higher Education Press，1984.

[6] 洪先龙，孙家广. 计算机辅助电路分析[M]. 北京：清华大学出版社，1984.
HONG Xian-long, SUN Jia-guang. CAD of Electrocircuit[M]. Beijing：Tsinghua University Press，1984.

[7] 邱关源.网络理论分析[M]. 北京：科学出版社，1984.
QIU Guan-yuan . Analysis of Network Theory[M]. Beijing：Science Press，1984.

[8] 鲁宝春，王成山. 增广节点电压方程及其灵敏度计算[J]. 辽宁工学院学报，2001，21(4):1-3.
LU Bao-chun，WANG Cheng-shan. The Extended Nodal Voltage Equation and Its Sensitivity Calculation[J]. Journal of Liaoning Institute of technology,2001,21(4): 1-3.

[9] 孙景强，房大中，周保容. 基于轨迹灵敏度的电力系统动态安全预防控制算法研究[J]. 电网技术，2004，28(21)，26-30.
SUN Jing-qiang, FANG Da-zhong, ZHOU Bao-rong. Study on Preventive Control Algorithm for Dynamic Security of Power Systems Based on Trajectory Sensitivity Method[J]. Power System Technology，2004，28(21):26-30.

收稿日期：2007-01-19； **修回日期：**2007-04-20

作者简介：

邓 阳（1982-），男，硕士，研究方向为电力系统稳定分析研究；E-mail: sun_man_2007@126.com

吴政球（1963-），男，博士，教授，博士生导师,从事电力系统分析与控制，电力市场；

容文光（1982-），男，硕士，研究方向为电力系统稳定分析研究。