

## 基于伴随网络的电力系统灵敏度分析的新方法<sup>\*</sup>

李彬华

(云南工业大学信息与电子工程学院, 昆明, 650051)

【摘要】本文应用特勒根定理, 并结合电力系统各节点的特点, 导出了一种新的电力系统灵敏度分析方法。该法在求解伴随网络后, 能迅速有效地计算出电力系统各节点电压对系统控制(与扰动)变量及线路参数的灵敏度。

【关键词】特勒根定理, 伴随网络, 灵敏度, 电力系统分析。

## A Novel Approach to Power System Sensitivity Analysis Based on Adjoint Network

Li BinHua

(School of Information and Electronic Engineering, Yunnan Polytechnic Univ., Kunming 650051)

**Abstract:** By making use of Tellegen's theorem and combining the characteristics of the nodes in power system, a novel approach to power system sensitivity analysis is developed in this paper. The sensitivities of all the node voltages with respect to all the system control variables(or disturbance variables) and the transmission line parameters can be calculated efficiently after an adjoint network analysis.

**Key words:** Tellegen's theorem, Adjoint network, Sensitivity, Power system analysis.

### 1 引言

基于稳态交流潮流模型的电力系统灵敏度分析与计算, 在电力系统优化设计、最佳潮流计算、电力系统的经济运行、电力系统规划以及电力系统的故障状态分析等方面都有重要的应用价值。因此自1968年以来, 国外就有一些学者从事电力系统灵敏度的研究工作, 取得了较为丰富的成果<sup>[1-4]</sup>。但他们的的方法均不能一次性求解多个节点电压对所有控制变量和线路参数的灵敏度。本文作者在文献[5]中所提出的方法虽然克服上述缺点, 但在计算全部灵敏度时, 计算量稍嫌过大。

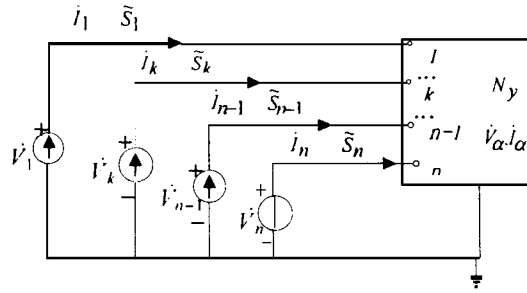
1978年H. B. Puttgen和R. L. Sullivan将特勒根定理用于电力系统灵敏度分析之中, 提出了一种新的灵敏度分析方法<sup>[6]</sup>。但它只能处理平衡节点及PQ节点, 对PV节点则没有给出解决的方法; 其计算量也较大, 并且只能求系统变量对线路参数的灵敏度。为此, 本文作者在1988年提出了一种改进的伴随网络法<sup>[7]</sup>, 该法克服了Puttgen方法的前两个缺点。

本文在文献[7]的基础上, 进一步分析了电力系统各节点的特点, 使特勒根定理的变型表达式中能够包含电力系统的控制变量的增量, 从而导出了节点电压对控制变量的灵敏度计算公式。由于该法所用的伴随网络与文献[7]的一样, 所以只要对伴随网络进行一次计算, 就能求出节点电压对线路参数和控制变量的灵敏度。这样在求全部灵敏度的时候, 应用该方法就可以大大地减少计算工作量。因此, 它可以用于电力系统分析、计算以及规划等诸多领域。

### 2 电力系统的伴随网络

<sup>\*</sup>收文日期: 1997年7月8日(July 8, 1997)

根据电力系统的运行特点, 可将其母线分成三类:  $r$  个 PV 节点,  $q$  个 PQ 节点和 1 个平衡节点。每个节点对地有一个电源, 分别称为 PV 功率源、PQ 功率源和平衡功率源。电力系统的等效模型用图 1 所示的电力网络  $N$  表示, 其中  $N_y$  表示无源网络。PV 节点的给定变量是节点电压的幅值  $V$  和节点净注入有功功率  $P$ ; PQ 节点的给定变量是节点净注入的复功率  $\tilde{S}$  (即有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ ); 平衡节点给定变量是节点电压相量  $\dot{V}$  (即幅值  $V$  和初相角  $\delta$ )。为方便起见, 将这些给定变量统称为控制变量。以下主要讨论各类功率源在特勒根定理中的具体形式。

图 1 电力网络  $N$ 

由文献[7]可知, 特勒根定理在频域中的另一种差形式为

$$\sum_{k=1}^n \Delta \dot{V}_k \hat{I}_k - \hat{V}_k \Delta \dot{I}_k + \Delta \dot{V}_k^* \hat{I}_k^* - \hat{V}_k^* \Delta \dot{I}_k^* = \sum_{\alpha=1}^b \Delta \dot{V}_\alpha \hat{I}_\alpha - \hat{V}_\alpha \Delta \dot{I}_\alpha + \Delta \dot{V}_\alpha^* \hat{I}_\alpha^* - \hat{V}_\alpha^* \Delta \dot{I}_\alpha^* \quad (1)$$

第  $k$  个功率源向该节点净注入的复功率为  $\tilde{S}_k = \dot{V}_k \dot{I}_k^*$ , 其一阶增量为

$$\Delta \tilde{S}_k = \Delta \dot{V}_k \dot{I}_k^* + \hat{V}_k \Delta \dot{I}_k^*$$

从而有

$$\Delta \dot{I}_k^* = (\Delta \tilde{S}_k - \Delta \dot{V}_k \dot{I}_k^*) / \hat{V}_k$$

将其代入式(1)左端的第  $k$  项中, 经整理后得

$$\hat{I}_k + \frac{\dot{I}_k^*}{\hat{V}_k} \Delta \dot{V}_k + \frac{\dot{I}_k^*}{\hat{V}_k} \Delta \dot{V}_k^* - \frac{\dot{V}_k}{\hat{V}_k} \Delta \tilde{S}_k + \frac{\dot{V}_k}{\hat{V}_k} \Delta \tilde{S}_k^* \quad (2)$$

由这个多项式可导出各类功率源的伴随元件方程。

## 2.1 PV 功率源

由关系式  $\dot{V}_k = V_k e^{j\delta_k}$  和  $\tilde{S}_k = P_k + jQ_k$ , 根据微分法则得:

$$\Delta \dot{V}_k = \Delta V_k e^{j\delta_k} + j\dot{V}_k \Delta \delta_k \quad (3-a)$$

$$\Delta \tilde{S}_k = \Delta P_k + j\Delta Q_k \quad (3-b)$$

将它们代入多项式(2), 经整理后可得:

$$[\dot{\hat{I}}_k \dot{V}_k + \dot{I}_k^* \dot{\hat{V}}_k^* - (\dot{\hat{I}}_k^* \dot{V}_k^* + \dot{I}_k \dot{\hat{V}}_k)] j \Delta \delta + 2 \Re \left[ \dot{\hat{I}}_k + \frac{\dot{I}_k^*}{\dot{V}_k} \dot{\hat{V}}_k^* e^{j\hat{\alpha}_k} \right] \Delta V_k - 2 \left[ \Re (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta P_k - \Im_m (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta Q_k \right] \quad (4)$$

为求节点电压对控制变量的灵敏度, 可使上式只保留含  $\Delta V_k$ 、 $\Delta \hat{\alpha}_k$  和  $\Delta P_k$  的项, 并以此作选择功率源的伴随元件的原则。根据这一原则, 选择 PV 功率源的伴随元件的支路方程为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{I}}_k &= a_{1k} \hat{x}_k + a_{2k} \hat{z}_k + \dot{I}_{sk} \\ \dot{\hat{V}}_k &= z_k e^{-j\hat{\alpha}_k} \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $a_{1k} = 1/\dot{V}_k$ ,  $a_{2k} = -\dot{I}_k^*/\dot{V}_k$ ,  $k=1, 2, \dots, r$ ,  $\hat{x}$  为实数参变量;  $\dot{I}_{sk}$  为伴随网络  $\hat{N}$  中节点  $k$  的注入电源。将上式代入多项式(4)中, 并应用式(3-a)可得:

$$\dot{\hat{I}}_{sk} \Delta V_k + \dot{I}_{sk}^* \Delta \dot{V}_k^* + 2 \frac{\hat{x}_k}{\dot{V}_k} \Delta V_k - 2 \frac{\hat{z}_k}{\dot{V}_k} \Delta P_k \quad (6)$$

## 2.2 PQ 功率源

将节点净注入复功率的增量表达式(3-b)代入多项式(2)中, 经整理后可得

$$\dot{\hat{I}}_k + \frac{\dot{I}_k^*}{\dot{V}_k} \dot{\hat{V}}_k^* \Delta \dot{V}_k + \dot{I}_k^* + \frac{\dot{I}_k}{\dot{V}_k} \dot{\hat{V}}_k \Delta \dot{V}_k^* - 2 \left[ \Re (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta P_k - \Im_m (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta Q_k \right] \quad (7)$$

仍按前述原则, 选择 PQ 功率源的伴随元件特性为

$$\dot{\hat{I}}_k = b_k \dot{\hat{V}}_k^* + \dot{I}_{sk} \quad (8)$$

其中  $b_k = -\dot{I}_k^*/\dot{V}_k$ ,  $k=r+1, r+2, \dots, n-1$ 。这时多项式(7)简化为

$$\dot{\hat{I}}_k \Delta \dot{V}_k + \dot{I}_{sk}^* \Delta \dot{V}_k^* - 2 \left[ \Re (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta P_k - \Im_m (\dot{\hat{V}}_k^* / \dot{V}_k) \Delta Q_k \right] \quad (9)$$

## 2.3 平衡功率源

考虑平衡节点电压的变化对其它节点电压的影响时, 必须求其它节点电压对平衡节点电压的灵敏度。为此, 在多项式(2)中要保留  $\Delta \dot{V}_n$  而去除  $\dot{S}_n$ 。故选其伴随元件的方程为

$$\dot{\hat{V}}_n = 0 \quad (10)$$

这时多项式(2)成为

$$\dot{\hat{I}}_n \Delta \dot{V}_n + \dot{I}_n^* \Delta \dot{V}_k^*$$

再将式(3-a)代入其中得

$$2 \Re [\dot{\hat{I}}_n e^{j\hat{\alpha}_n}] \Delta V_n - 2 \Im_m [\dot{\hat{I}}_n \dot{V}_n] \Delta \hat{\alpha}_n \quad (11)$$

电力系统中其它无源支路构成的网络  $N_y$  的伴随网络  $\hat{N}_y$  与文献[7]的一致, 即

$$\hat{Y}_b = Y_b^T \quad (12)$$

由于支路导纳矩阵  $Y_b$  为  $b$  阶对角阵, 所以  $\hat{N}_y$  与  $N_y$  完全一样。在此条件下, 式(1)右端的和项可表示为

$$-\hat{V}_b^T \Delta Y_b \hat{V}_b - \hat{V}_b^{*T} \Delta Y_b^* \hat{V}_b^* \quad (13)$$

其中  $\hat{V}_b, \hat{V}_b^*$  分别是网络  $N_y$  与  $\hat{N}_y$  的支路电压的  $b$  阶列向量。

综上所述, 可得电力网络的伴随网络如图2所示, 其中  $AE_k$  是第  $k$  个节点电源的伴随元件。将以上导出的伴随元件方程(即式(5)、(8)、(10)、(12)与文献[7]中的伴随网络元件的方程比较可知, 这里导出的伴随网络与文献[7]中的伴随网络是完全一致的。因此其求解的方法也是一样的, 本文就不再介绍了。

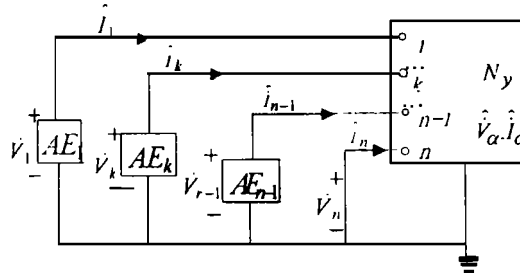


图2 伴随网络  $\hat{N}$

### 3 电力系统的灵敏度计算

与文献[7]类似, 灵敏度公式也是由式(1)导出的。不过这里将式(6)、(9)、(11)、(13)代入式(1)后, 再将其改写为矩阵形式并经移项后得

$$\begin{aligned} \hat{I}_s^T \Delta \hat{V} + \hat{I}_s^{*T} \Delta \hat{V}^* = & -2 \hat{X}^T D_v^{-1} \Delta V_r - \hat{Z}^T D_v^{-1} \Delta P_r \\ & + 2[\Re(\hat{V}_q^{*T} D_{vq}^{-1}) \Delta P_q - \Im(\hat{V}_q^{*T} D_{vq}^{-1}) \Delta Q_q] \\ & - 2 \Re[\hat{I}_e^{j\hat{\theta}_n}] \Delta V_n \\ & + 2 \Im[\hat{I}_n \hat{V}_n] \Delta \hat{\theta}_n - \hat{V}_b^T \Delta Y_b \hat{V}_b - \hat{V}_b^{*T} \Delta Y_b^* \hat{V}_b^* \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta \hat{V} &= [\Delta \hat{V}_1, \Delta \hat{V}_2, \dots, \Delta \hat{V}_{n-1}]^T; \\ \hat{I}_s &= [\hat{I}_{s1}, \hat{I}_{s2}, \dots, \hat{I}_{s(n-1)}]^T; \\ \hat{V}_q &= [\hat{V}_{q1}, \hat{V}_{q2}, \dots, \hat{V}_{q(n-1)}]^T; \\ \hat{X} &= [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_r]^T; \\ \hat{Z} &= [\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_r]^T; \\ D_v &= \text{diag}[V_1, V_2, \dots, V_r]; \\ D_{vq} &= \text{diag}[\hat{V}_{q1}, \hat{V}_{q2}, \dots, \hat{V}_{q(n-1)}]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta V_r &= [\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_r]^T; \\ \Delta P_r &= [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_r]^T; \\ \Delta P_q &= [\Delta P_{r+1}, \Delta P_{r+2}, \dots, \Delta P_{n-1}]^T; \\ \Delta Q_q &= [\Delta Q_{r+1}, \Delta Q_{r+2}, \dots, \Delta Q_{n-1}]^T.\end{aligned}$$

上式是特勒根定理应用于电力网络  $N$  及其伴随网络  $\hat{N}$  的特殊形式, 是导出灵敏度公式的基本关系式。

若要求节点电压  $\dot{V}_k$  对控制变量或支路导纳参数的灵敏度, 须使式(14)的左端只保留  $\Delta \dot{V}_k$  和  $\Delta \dot{V}_k^*$  的项。为此取  $\hat{\mathbf{I}}_s$  中除第  $k$  个元素为 1 外, 其余元素均为 0, 即

$$\hat{\mathbf{I}}_s = \hat{\mathbf{I}}_{sk} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (15)$$

这时式(14)的左端为  $\Delta \dot{V}_k + \Delta \dot{V}_k^*$ , 它只能反映出  $\Delta \dot{V}_k$  实部的变化。要反映  $\Delta \dot{V}_k$  虚部的变化, 还须取

$$\hat{\mathbf{I}}_s = \tilde{\mathbf{I}}_{sk} = [0, \dots, 0, j, 0, \dots, 0]^T \quad (16)$$

这时式(14)的左端为  $j(\Delta \dot{V}_k - \Delta \dot{V}_k^*)$ , 这一表达式正好能反映出  $\Delta \dot{V}_k^*$  虚部的变化。

由此可知, 利用上述两个不同的  $\hat{\mathbf{I}}_s$  就能完整地反映出  $\Delta \dot{V}_k$  的变化。为了区分这两个只是  $\hat{\mathbf{I}}_s$  不同的伴随网络, 将由前一个  $\hat{\mathbf{I}}_s$  所形成的伴随网络记为  $\hat{N}_k$ , 由后一个  $\hat{\mathbf{I}}_s$  所形成的伴随网络记为  $\tilde{N}_k$ , 它们相应的电流源向量分别为  $\hat{\mathbf{I}}_{sk}$  和  $\tilde{\mathbf{I}}_{sk}$ 。这样为求全部节点电压的灵敏度, 就需要形成  $2(n-1)$  个伴随网络  $\hat{N}_1, \hat{N}_2, \dots, \hat{N}_k, \dots, \hat{N}_{n-1}$  和  $\tilde{N}_1, \tilde{N}_2, \dots, \tilde{N}_k, \dots, \tilde{N}_{n-1}$ 。

下面推导  $\dot{V}_k$  的灵敏度公式。由上面的讨论可知, 式(14)对应于电力网络  $N$  及其伴随网络  $\hat{N}_k$  和  $\tilde{N}_k$  的结果为

$$\begin{aligned}\Delta \dot{V}_k &= (-\hat{\mathbf{X}}_k^T + j\tilde{\mathbf{X}}_k^T)D_{rr}^{-1}\Delta V_r + (\hat{\mathbf{Z}}_k^T - j\tilde{\mathbf{Z}}_k^T)D_{rr}^{-1}\Delta P_r \\ &\quad + [\Re(\hat{\mathbf{V}}_{qk}^{*T} D_{vq}^{-1}) - j\Re(\tilde{\mathbf{V}}_{qk}^{*T} D_{vq}^{-1})]\Delta P_q \\ &\quad - [\Im(\hat{\mathbf{V}}_{qk}^{*T} D_{vq}^{-1}) - j\Im(\tilde{\mathbf{V}}_{qk}^{*T} D_{vq}^{-1})]\Delta Q_q \\ &\quad - [\Re(\hat{\mathbf{I}}_n e^{j\delta n}) - j\Re(\tilde{\mathbf{I}}_n e^{j\delta n})]\Delta V_n \\ &\quad + [\Im(\hat{\mathbf{I}}_n \dot{V}_n) - j\Im(\tilde{\mathbf{I}}_n \dot{V}_n)]\Delta \delta_n \\ &\quad - [\Re(\hat{\mathbf{V}}_{bk}^T D_{vb}) - j\Re(\tilde{\mathbf{V}}_{bk}^T D_{vb})]\Delta G_b \\ &\quad - [\Im(\hat{\mathbf{V}}_{bk}^T D_{vb}) - j\Im(\tilde{\mathbf{V}}_{bk}^T D_{vb})]\Delta B_b\end{aligned} \quad (17)$$

其中  $\hat{\mathbf{X}}_k$  为伴随网络  $\hat{N}_k$  对应的  $\hat{\mathbf{X}}_k, \tilde{\mathbf{X}}_k, \hat{\mathbf{Z}}_k, \tilde{\mathbf{Z}}_k, \hat{\mathbf{V}}_{qk}, \tilde{\mathbf{V}}_{qk}$  类推;  $\Delta G_b, \Delta B_b$  为支路电导、电纳的一阶增量, 它们是  $b$  维列向量;  $D_{vb} = \text{diag}[\dot{V}_b]$ 。

显然, 由上式可得:

$\dot{V}_k$  对 PV 节点控制变量  $P_r, V_r$  的灵敏度计算公式为

$$\frac{\partial \dot{V}_k}{\partial \dot{V}_r^T} = (-\hat{\mathbf{X}}_k^T + j\tilde{\mathbf{X}}_k^T)D_{rr}^{-1}; \quad \frac{\partial \dot{V}_k}{\partial P_r^T} = (\hat{\mathbf{Z}}_k^T - j\tilde{\mathbf{Z}}_k^T)D_{rr}^{-1} \quad (18)$$

$\dot{V}_k$  对 PQ 节点控制(扰动)变量  $P_q, Q_q$  的灵敏度计算公式为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{V}_k}{\partial P_q^T} &= \Re(\hat{V}_{qk}^{*T} D_{\dot{V}q}^{-1}) - j \Re(\tilde{V}_{qk}^{*T} D_{\dot{V}q}^{-1}) \\ \frac{\partial \dot{V}_k}{\partial Q_q^T} &= -\Im(\hat{V}_{qk}^{*T} D_{\dot{V}q}^{-1}) + j \Im(\tilde{V}_{qk}^{*T} D_{\dot{V}q}^{-1})\end{aligned}\quad (19)$$

$\dot{V}_k$  对平衡节点控制变量  $V_n, \delta_n$  的灵敏度计算公式为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{V}_k}{\partial V_n} &= -\Re(\hat{I}_n e^{j\delta_n}) + j \Re(\tilde{I}_n e^{j\delta_n}) \Im \\ \frac{\partial \dot{V}_k}{\partial \delta_n} &= (\hat{I}_n \dot{V}_n) - j \Im(\tilde{I}_n \dot{V}_n)\end{aligned}\quad (20)$$

$\dot{V}_k$  对支路导纳参数的灵敏度计算公式为

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{V}_k}{\partial G_b^T} &= -\Re(\hat{V}_{bk}^T D_{vb}) + j \Re(\tilde{V}_{bk}^T D_{vb}) \\ \frac{\partial \dot{V}_k}{\partial B_b^T} &= -\Im(\hat{V}_{bk}^T D_{vb}) + j \Im(\tilde{V}_{bk}^T D_{vb})\end{aligned}\quad (21)$$

#### 4 程序框图及算例分析

灵敏度的计算与电力网络  $N$  及其伴随网络  $\hat{N}$  的求解密切相关。电力网络  $N$  求解可以用现成的电力系统潮流计算方法完成,伴随网络  $\hat{N}$  的求解则可以用文献[7]中介绍的方法进行,在此就不再讨论了。

根据以上讨论结果及有关公式,结合文献[7]中关于伴随网络  $\hat{N}$  的求解方法,作者用 FORTRAN 语言编制了计算程序,其框图如图 3 所示。应用该程序在微机上对多个 IEEE 测试系统进行了计算。对 IEEE6 节点测试系统的部分计算数据见表 1 和表 2。

表 1 是节点电压对控制变量的灵敏度数值,从中可以看出,节点 2(PV 节点)的电压  $V_2$  对  $P_1, Q_4, V_6$  和  $\delta_6$  的灵敏度数值为零(正的负七次方数量级的误差是由计算引起的,可忽略不计); $V_2$  对  $V_2$  自己的灵敏度数值为 1.0196,这里 0.0196 的误差也是由计算引起的,可忽略不计;平衡节点相角  $\delta_6$  的变化只会引起其它节点相角出现同样大小的变化,而不会使系统的相位差发生变化,也不会使节点电压的幅值发生变化。从表 2 中可以看出,当控制变量变化不大时,用交流潮流法与用灵敏度估算法求出的电力系统节点电压的数值十分接近(表中的最大误差不超过 0.82%)。这些足以证明本文提出的电力系统灵敏度分析方法的正确性。

在计算的复杂程度上,本方法与文献[7]是一样的,即在求多个节点电压对多个控制变量和线路参数的灵敏度时,本算法的计算工作量是最少的,有关的比较结算可参见文献[7]

#### 5 结束语

本文将特勒根定理应用于电力系统的灵敏度分析之中,建立了与文献[7]中完全一致的伴随网络,导出了节点电压对所有的变量(控制变量和线路参数)的灵敏度计算公式。只需进行一次电力系统潮流计算和一次伴随网络的计算,就能算出的所有节点电压对所有变量的灵敏度数值,这是其它算法没有做到的,因此,该方法简单而且实用,在电力系统分析、计算及规划等方面将会有一定的应用价值。

表 1

节点电压对控制变量的灵敏度				
控制变量	$V_2$	$\delta_2$	$V_5$	$\delta_5$
$P_1$	$0.74506 \times 10^{-4}$	0.16882	0.0022	0.20484
$V_2$	1.0196	-0.090635	0.74636	0.27728
$Q_4$	0.0	0.024564	0.00016907	0.027333
$V_6$	$0.29802 \times 10^{-7}$	1.1385	0.0010917	1.15645
$\delta_6$	$0.59605 \times 10^{-7}$	1.0	$0.59605 \times 10^{-7}$	1.0

表 2

	交流潮流法		灵敏度估算法	
	$V_2$	$\delta_2$ (度)	$V_2$	$\delta_2$ (度)
基本情况	0.9787	-37.8267	0.9787	-37.8267
$\Delta P_1 = 0.5$	0.9794	-32.1769	0.9798	-31.95846
$\Delta V_2 = -0.05$	0.9418	-38.7109	0.941382	-38.62105
$\Delta Q_4 = 0.5$	0.9786	-38.7389	0.9786155	-38.60973
$\Delta V_6 = -0.05$	0.9786	-41.4781	0.9786454	-41.13968

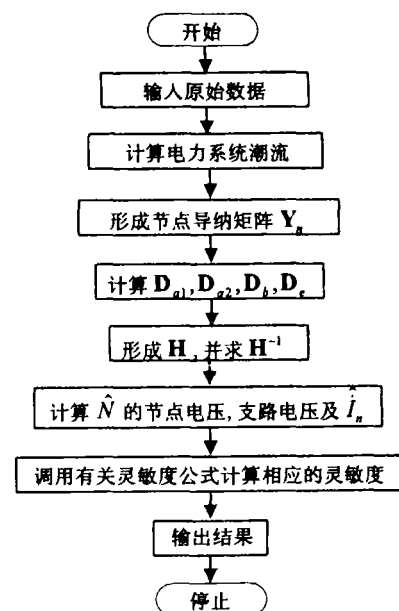


图 3 该算法的程序框图

## 参考文献

- [1] J. Peschon et al., Sensitivity in Power System, IEEE Trans. on PAS, 1968, 87(8): 1687 - 1696.
- [2] W. F. Tinney et al., Steady State Sensitivity Analysis, Proc. 4th PSCC, 1972, report 1.3
- [3] J. B. Bandler et al., A Complex Lagrangian Approach to Power Network Sensitivity Analysis, IEEE Trans. on CAS, 1982, 29(1): 1 - 5.
- [4] J. Bandler et al., A Generalized, Complex Adjoint Approach to Power Network Sensitivity, Int. J. of Circuit Theory and Application, 1984, 12(3): 194 - 222.
- [5] 李彬华, 电网灵敏度分析的改进增量网络法, 云南工业大学学报, 1997, 13(2): 70 - 74.
- [6] H. B. Puttgen et al., A Novel Comprehensive Approach to Power System Sensitivity Analysis Proc. IEEE PES SM, 1978, A78: 525 - 528.
- [7] 李彬华、任玉珑、周守昌, 一种非线性输电规划的灵敏度分析方法, 重庆大学学报, 1988, 11(12): 37 - 46.

李彬华 副教授, 1987 年获重庆大学理论电工专业硕士学位。主要从事电路理论、电力系统规划及计算机应用方面的教学与研究工作。