

非线性电路直流故障模拟的一种有效算法^{*}

林 华 凌燮亭 潘明德

(复旦大学电子工程系)

提 要

本文给出了非线性电路直流故障模拟的一种有效算法。它利用豪斯霍尔德变换和分块矩阵的方法,尽可能地减少了故障模拟的运算量。本算法也适用于非线性电路的直流分析。

一、引 言

由于种种原因,近几年来模拟电路的故障诊断问题引起了人们很大的兴趣,并提出了一些方法^[1,2]。在一些实际应用中,往往要求用微型计算机对电路作在线测试(on-line test)。在这种场合,“字典法”^[3]是比较实用的。因为,它只需要把测得的信息同存储在内存中的故障信息作对照从而找出故障原因,而不需要作复杂的测试后计算,因此,对计算机的要求不高。另外,“字典法”不但适用于线性电路而且适用于非线性电路的测试。但是为了建立故障字典,必须在计算机上进行各种故障的模拟。当电路规模较大时,故障模拟的计算量极大。为了克服这个缺点文献[4]利用豪斯霍尔德(Householder)变换,提出了线性电路故障模拟的一种有效算法。它的基本想法是:故障模拟实际上是一个不断修改方程的部分系数,然后求解的过程。由于每次模拟所需要修改的参数往往不多,若能充分利用电路在无故障时的计算结果,则可以大大减少故障模拟的运算量。

为了完整起见,在本文第二节中,将首先简单地介绍文献[4]的算法。在此基础上,我们将进一步把文献[4]的算法推广到非线性电路的直流故障模拟中去。非线性电路的直流故障,往往会引起非线性元件工作点的改变。这样,直流故障模拟的问题就变成了解非线性方程的问题。当电路规模较大时解非线性方程的计算量是很大的。因此,针对这类问题的具体特点,找出一种比通常更为有效的算法,将大大提高故障模拟的效率,从而使“字典法”更为实用化。本文在第三节中首先建立非线性电路的线性化迭代方程,并说明这个方程同第二节中讨论的方程,具有完全类似的形式。第四节将详细讨论如何有效地解这个方程,并比较不同算法的运算量。

二、线性电路的故障模拟

为了便于叙述,本文仅以节点分析法为出发点。一般地,线性电路的节点电压方程^[5]为

^{*} 1984年1月12日收到,1984年9月20日修改定稿。

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{I}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{Y}$ 是节点导纳矩阵; $\mathbf{V}$ 是节点电压矢量; $\mathbf{I}$ 是等效电流源矢量. 有故障时的节点电压方程为

$$\mathbf{Y}_f \cdot \mathbf{V}_f = \mathbf{I}_f. \quad (2)$$

这里, 下标 f 表示有故障. 为了叙述方便可设*

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{I}, \quad (3)$$

则式(2)可写成:

$$\mathbf{Y}_f \cdot \mathbf{V}_f = \mathbf{I}. \quad (4)$$

可以把有故障时的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_f$ 看作是由无故障时的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 和故障引起的 $\mathbf{Y}$ 的变化 $\Delta\mathbf{Y}$ 这两部分组成, 即

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{Y} + \mathbf{A}_f \cdot \Delta\mathbf{Y}_b \cdot \mathbf{A}_f^T, \quad (5)$$

式中, $\Delta\mathbf{Y}_b$ 是由故障元件的导纳的偏差构成的 m 阶对角阵

$$\Delta\mathbf{Y}_b = \text{diag}(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_m), \quad (6)$$

$\mathbf{A}_f$ 是由故障支路构成的 $n \times m$ 的关联阵 (n 为节点数; m 是故障元件数)

$$\mathbf{A}_f = \text{col}(a^1, a^2, \dots, a^m), \quad (7)$$

$$a^i(j) = \begin{cases} 1, & \text{若第 } i \text{ 条故障支路的设定电流方向是流出结点 } j; \\ -1, & \text{若第 } i \text{ 条故障支路的设定电流方向是指向节点 } j; \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

把式(5)代入式(4)后, 得

$$\mathbf{V}_f = (\mathbf{Y} + \mathbf{A}_f \cdot \Delta\mathbf{Y}_b \cdot \mathbf{A}_f^T)^{-1} \mathbf{I}. \quad (8)$$

要解式(8)当然可以用高斯消去法或 $\mathbf{LU}$ 分解法, 但是为了利用式(8)所具有的特点来降低方程的阶数, 从而减少计算量, 文献[4]提出用豪斯霍尔德变换来简化这个方程. 豪斯霍尔德变换的一般形式^[6]是:

$$(\mathbf{Y} + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{W})^{-1} = \mathbf{Y}^{-1} - \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{U} \cdot (\mathbf{S}^{-1} + \mathbf{W} \cdot \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{U})^{-1} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{Y}^{-1}, \quad (9)$$

式中, $\mathbf{Y} \in \mathbf{C}^{n \times n}$; $\mathbf{U}, \mathbf{W}^T \in \mathbf{C}^{n \times m}$; $\mathbf{S} \in \mathbf{C}^{m \times m}$. 把式(9)代入式(8)得

$$\mathbf{V}_f = [1 - \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{A}_f \cdot (\Delta\mathbf{Y}_b^{-1} + \mathbf{A}_f^T \cdot \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{A}_f)^{-1} \cdot \mathbf{A}_f^T] \cdot \mathbf{V}_0, \quad (10)$$

其中,

$$\mathbf{V}_0 = \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{I}. \quad (11)$$

因为(1)在一般情况下, 同时发生故障的元件数不会太多, 故假设: $m \ll n$; (2) $\mathbf{V}_0$ 是无故障时的节点电压, 在故障模拟中始终不变, 故可预先算好存放在内存中; (3) $\mathbf{A}_f$ 是由 1、-1、0 构成的稀疏矩阵; (4) $\mathbf{Y}^{-1}$ 是无故障时的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 的逆阵, 在故障模拟中被反复利用, 故可预先算好, 存入内存; (5) $\Delta\mathbf{Y}_b^{-1}$ 是对角阵 $\Delta\mathbf{Y}_b$ 的逆阵, 故很容易计算; (6) 不难看出方程

$$(\Delta\mathbf{Y}_b^{-1} + \mathbf{A}_f^T \cdot \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{A}_f) \cdot \mathbf{X} = \mathbf{A}_f^T \cdot \mathbf{V}_0. \quad (12)$$

是 m 阶方程; 所以可充分利用许多已知的信息, 把原来要求解的 n 阶高阶方程简化为一个 m 阶的较低阶的方程. 这正是文献[4]引入豪斯霍尔德变换的目的所在.

* 当电路存在电压源时, 可把等效电流源分成电流源和电压源两部分, 分别讨论. 这样会增加计算量, 但不会给下面的讨论带来实质性影响.

若用高斯消去法求解降阶后的方程(12),则模拟一次故障所需要的长操作(即乘法或除法)数约为(略去一次项)

$$m^3/3 + m^2 + m \times n, \quad (13)$$

其中, $m^3/3 + m^2$ 是求解方程(12)的长操作数; $m \times n$ 是计算 $\mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{A}_f \cdot \mathbf{X}$ 项的长操作数。

在以下两节中,我们把上述算法推广用于非线性电路的故障模拟。

三、非线性电路的迭代方程

本文讨论的电路,除了含有电阻、电容和电感等线性二端元件外,还含有二极管和晶体三极管等非线性元件。因此,在模拟直流故障时,电路的节点电压方程是非线性方程。求解非线性方程的常用方法,是将非线性方程化为线性方程,经过反复迭代得到近似解。而迭代的过程,实际上是对非线性元件的线性化参数不断修正的过程。因此,我们试图用上节介绍的方法来简化每次迭代运算。首先,在本节中建立类似于式(8)的迭代方程。然后在下一节中进一步讨论如何求解的问题。

非线性方程的线性化迭代方程的一般形式是^[9]

$$\mathbf{Y}^{(j)} \cdot \mathbf{V}^{(j+1)} = \mathbf{I}^{(j)}, \quad (14)$$

式中, $\mathbf{Y}^{(j)} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是第 j 次迭代后得到的线性化节点导纳矩阵; $\mathbf{I}^{(j)} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 是第 j 次迭代后得到的等效电流源矢量; $\mathbf{V}^{(j+1)} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 是节点电压矢量的第 $j+1$ 次迭代值。有故障时,

$$\mathbf{Y}_f^{(j)} \cdot \mathbf{V}_f^{(j+1)} = \mathbf{I}_f^{(j)}, \quad (15)$$

式中

$$\mathbf{Y}_f^{(j)} = \mathbf{Y}^{(0)} + \mathbf{A}_f \cdot \Delta \mathbf{Y}_b \cdot \mathbf{A}_f^T + \mathbf{Y}_D^{(j)} + \mathbf{Y}_{TR}^{(j)}. \quad (16)$$

这里, $\mathbf{A}_f \cdot \Delta \mathbf{Y} \cdot \mathbf{A}_f^T$ 与上节中的意义完全相同; $\mathbf{Y}_D^{(j)}$ 是对二极管的修正项; $\mathbf{Y}_{TR}^{(j)}$ 是对晶体三极管的修正项; $\mathbf{Y}^{(0)}$ 是 $\mathbf{Y}_f$ 的初值。

现在说明, $\mathbf{V}_f^{(j)}$ 也可以化为类似于式(8)的形式。为了便于叙述,我们采用双极型三极管的注入模型^[7]作为三极管的模型,见图1。它的线性化模型见图2。

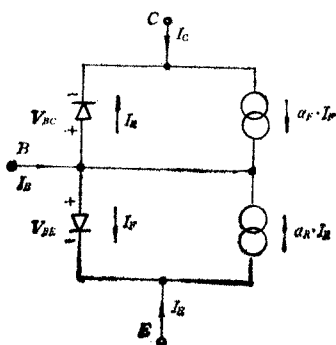


图 1

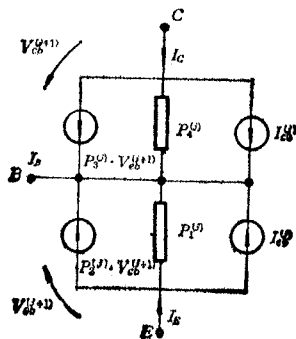


图 2

图 2 中的线性化参数 $p_1^{(j)}$, $p_2^{(j)}$, $p_3^{(j)}$, $p_4^{(j)}$ 的表达式是

$$p_1^{(j)} = -\frac{q}{K \cdot T} \cdot I_{cs} \cdot \exp \frac{-q \cdot V_{cb}^{(j)}}{KT}, \quad (17a)$$

$$p_2^{(j)} = \alpha_R \cdot p_4^{(j)}, \quad (17b)$$

$$p_3^{(j)} = \alpha_F \cdot p_1^{(j)}, \quad (17c)$$

$$p_4^{(j)} = \frac{q}{KT} \cdot I_{cs} \cdot \exp \frac{-q \cdot V_{cb}^{(j)}}{KT}, \quad (17d)$$

其中, I_{cs} 是集电结短路时的发射结反向饱和电流, I_{cs} 是发射结短路时的集电结反向饱和电流. 不难看出, 三极管 TR_i 的贡献 $Y_{TR_i}^{(j)}$ 可以表成

$$Y_{TR_i}^{(j)} = U_i \cdot S_i^{(j)} \cdot U_i^T, \quad (18)$$

式中, $U_i \in R^{n \times 2}$ 是三极管 TR_i 的两条非线性支路构成的关联阵; $S_i^{(j)} \in R^{2 \times 2}$, 且满足

$$S_i^{(j)} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_1^{(j)}(i) & \tilde{p}_2^{(j)}(i) \\ \tilde{p}_3^{(j)}(i) & \tilde{p}_4^{(j)}(i) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

这里,

$$\tilde{p}_1^{(j)}(i) = p_1^{(j)}(i) - p_1^{(0)}(i), \quad (20a)$$

$$\tilde{p}_2^{(j)}(i) = p_2^{(j)}(i) - p_2^{(0)}(i), \quad (20b)$$

$$\tilde{p}_3^{(j)}(i) = p_3^{(j)}(i) - p_3^{(0)}(i), \quad (20c)$$

$$\tilde{p}_4^{(j)}(i) = p_4^{(j)}(i) - p_4^{(0)}(i). \quad (20d)$$

设电路中共有 N_T 个三极管,

$$Y_{TR}^{(j)} = C \cdot \Delta Y_{TR}^{(j)} \cdot C^T, \quad (21)$$

式中,

$$C = (U_1, U_2, \dots, U_{N_T}), \quad (22)$$

$$\Delta Y_{TR}^{(j)} = \begin{bmatrix} S_1^{(j)} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & S_{N_T}^{(j)} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

同样, 为了方便, 我们采用二极管的模型, 如图 3 所示. 类似地, 设电路有 N_D 个二极管,

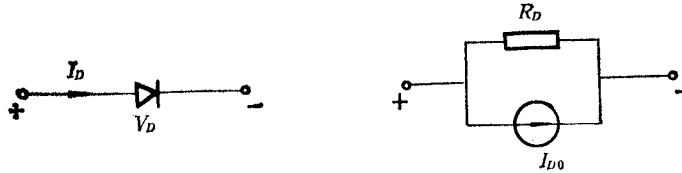


图 3

则不难得到

$$Y_D^{(j)} = B \cdot \Delta Y_D^{(j)} \cdot B^T, \quad (24)$$

式中, B 是由二极管所在支路构成的 $n \times N_D$ 关联矩阵; $\Delta Y_D^{(j)}$ 是 N_D 阶对角矩阵, 表示二极管线性化参数的修正值.

把式(21),(24)代入式(16)后, 整理得到

$$\mathbf{Y}^{(j)} = \mathbf{Y}^{(0)} + \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{Y}^{(j)} \cdot \mathbf{E}^T, \quad (25)$$

其中

$$\mathbf{E} = (\mathbf{A} | \mathbf{B} | \mathbf{C}), \quad (26)$$

$$\Delta \mathbf{Y}^{(j)} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Y}_b & & 0 \\ & \Delta \mathbf{Y}_D^{(j)} & \\ 0 & & \Delta \mathbf{Y}_{TR}^{(j)} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

于是有

$$\mathbf{V}^{(j+1)} = (\mathbf{Y}^{(0)} + \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{Y}^{(j)} \cdot \mathbf{E}^T)^{-1} \cdot \mathbf{I}^{(j)}. \quad (28)$$

这样我们就得到了形式与式(8)相同的非线性迭代方程。

四、方程的求解

设要修正的非线性支路数与有故障的线性元件数之和为 $\tilde{m}$ 。一般 $\tilde{m}$ 小于电路的节点数 n 。因此运用第二节中的想法,引入豪斯霍尔德变换,充分利用已知的信息,便可将式(28)简化为一个阶数较低的方程。又考虑到每次迭代运算并不需要知道所有的节点电压,而只需要知道非线性支路电压 $\mathbf{V}_b^{(j+1)}$ 。故将式(28)简化为:

$$\mathbf{V}_b^{(j+1)} = \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \{1 - \mathbf{E} \cdot [(\Delta \mathbf{Y}^{(j)})^{-1} + \mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \cdot \mathbf{E}]^{-1} \mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1}\} \cdot \mathbf{I}^{(j)}, \quad (29)$$

式中, $\mathbf{A}$ 是由所有非线性支路构成的关联矩阵。 $(\mathbf{Y}^{(0)})^{-1}$ 在迭代中并不改变,故可预先算好,作为已知的信息存在内存里。从式(29)可以看出,我们已经把原来求解 n 阶线性方程的问题降为求解 m 阶方程的问题

$$[(\Delta \mathbf{Y}^{(j)})^{-1} + \mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \cdot \mathbf{E}] \cdot \mathbf{X} = \mathbf{Z}, \quad (30)$$

其中,

$$\mathbf{Z} = \mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \cdot \mathbf{I}^{(j)}. \quad (31)$$

若我们用高斯消去法求解降阶后的式(30),则不难估算出求解式(29)所需要的长操作数(略去一次项)是

$$(m_n + \tilde{m}) \times n + \tilde{m}^3/3 + \tilde{m}^2, \quad (32)$$

其中, n 是电路的节点数; $\tilde{m}$ 是非线性支路数与有故障的线性支路数之和; m_n 是非线性支路数; $\tilde{m}^3/3 + \tilde{m}^2$ 是求解式(30)所需要的长操作数;而 $m_n \times n$ 和 $\tilde{m} \times n$ 则分别是计算 $\mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \cdot (\mathbf{I}^{(j)} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{X})$ 和 $\mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \mathbf{I}^{(j)}$ 的长操作数。

但是注意到一个晶体管就含有两条非线性支路,故对实际电路往往有

$$\tilde{m}^3/3 > (m_n + \tilde{m}) \times n. \quad (33)$$

这就是说,按上面的方法计算式(29)的主要计算时间花在求解式(30)上。我们希望找到更有效的方法来求解式(30)。

为此,进一步考察式(30)。显然 $\mathbf{E}^T \cdot (\mathbf{Y}^{(0)})^{-1} \cdot \mathbf{E}$ 项在每次迭代运算中保持不变。而 $\Delta \mathbf{Y}^{(j)}$ 是乔丹(Jordan)阵,其形式为

$$\Delta Y_f^{(j)} = \begin{bmatrix} \Delta Y_{b(1,1)} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \Delta Y_{b(f,f)} & & & \\ & & & \Delta Y_{D(1,1)}^{(j)} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \Delta Y_{D(N_D, N_D)}^{(j)} & & 0 \\ 0 & & & & & & & \tilde{p}_{1(1)}^{(j)} & \tilde{p}_{2(1)}^{(j)} \\ & & & & & & & \tilde{p}_{3(1)}^{(j)} & \tilde{p}_{4(1)}^{(j)} \\ & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & \tilde{p}_{1(N_T)}^{(j)} & \tilde{p}_{2(N_T)}^{(j)} \\ & & & & & & & & & \tilde{p}_{3(N_T)}^{(j)} & \tilde{p}_{4(N_T)}^{(j)} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

因此它的逆阵 $(\Delta Y_f^{(j)})^{-1}$ 也是 Jordan 阵, 并且具有与 $\Delta Y_f^{(j)}$ 完全相同的形式. 由于 $(\Delta Y_f^{(j)})^{-1}$ 满秩, 故在此已无法进一步利用豪斯霍尔德变换来降低式(30)的阶数了.

下面利用分块求逆的方法^[8], 可以充分利用已知的信息, 进一步降低式(30)的阶数. 为了使 Jordan 矩阵 $(\Delta Y_f^{(j)})^{-1}$ 中的 Jordan 块具有统一的形式便于数学处理, 假定 $\Delta Y_f^{(j)}$ 的阶数为 m , 且 m 是 4 的整倍数*. 这样就可以将 $(\Delta Y_f^{(j)})^{-1}$ 表成

$$(\Delta Y_f^{(j)})^{-1} = \begin{bmatrix} g_1 & & 0 \\ & g_2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & & g_m^m \end{bmatrix}, \quad (35)$$

式中, g_i 是 2 阶的方阵. 把 $\Delta Y_f^{-1(j)}$ 和 $E^T \cdot (Y^{(0)})^{-1} E$ 分块:

$$(\Delta Y_f^{(j)})^{-1} = \begin{bmatrix} G_1^{(j)} & 0 \\ 0 & G_2^{(j)} \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$E^T \cdot (Y^{(0)})^{-1} \cdot E = \begin{bmatrix} P & Q \\ R & S \end{bmatrix}. \quad (37)$$

这里, $G_1^{(j)}$, $G_2^{(j)}$, P , Q , R 和 S 均为 $\tilde{m}/2$ 阶方阵. 把式(36), (37)代入式(30), 得

$$\begin{bmatrix} G_1^{(j)} + P & Q \\ R & G_2^{(j)} + S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

这里,

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = X, \quad \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = Z;$$

且 X_1 , X_2 , Z_1 和 Z_2 均为 $\tilde{m}/2$ 维向量. 设 Q^{-1} 存在, 由分块矩阵的求逆公式容易得出

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Q^{-1} \cdot (P + G_1^{(j)}) & Q^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ Z_2 \end{bmatrix}, \quad (39)$$

$$F = -D \cdot [(S + G_2^{(j)}) \cdot Q^{-1} \cdot Z_1 - Z_2], \quad (40)$$

$$D = [R - (S + G_2^{(j)}) \cdot Q^{-1} \cdot (P + G_1^{(j)})]^{-1}. \quad (41)$$

从上面三个式子容易看出, 需要求解的方程具有如下形式:

$$[R - (S + G_2^{(j)}) \cdot Q^{-1} \cdot (P + G_1^{(j)})] \cdot F = -Y, \quad (42)$$

* 若假设得不到满足, 可在电路中再适当另选最多不超过三条支路, 适当改变支路上的元件值, 使改变前后电路的特性的变化足够小, 这样就可以使 $\Delta Y_f^{(j)}$ 的阶数扩展到 4 的整倍数.

其中,

$$Y = (S + G_2^{(j)}) \cdot Q^{-1} Z_1 - Z_2. \quad (43)$$

不难看出,方程(42)是 $\tilde{m}/2$ 阶方程,比起原方程(30),阶数减少了一半。这样就得到了求解式(29)的有效算法:

- 步骤 1 $Z_1, Z_2 \leftarrow E^T \cdot (Y^{(0)})^{-1} \cdot I_f^{(j)};$
 步骤 2 $Y \leftarrow (S + G_2^{(j)}) \cdot Q^{-1} \cdot Z_1 - Z_2;$
 步骤 3 $F \leftarrow -[R - (S + G_3^{(j)}) \cdot Q^{-1} \cdot (P + G_1^{(j)})]^{-1} \cdot Y;$
 步骤 4 $X_1 \leftarrow F;$
 步骤 5 $X_2 \leftarrow -Q^{-1} \cdot (P + G_1^{(j)}) \cdot F + Q^{-1} \cdot Z_2;$
 步骤 6 $V_{fb}^{j+1} \leftarrow A^T \cdot (Y^{(0)})^{-1} \cdot [I_f^{(j)} - E \cdot X];$

因为:(1) Q^{-1} , $S \cdot Q^{-1}$, $Q^{-1} \cdot P$ 和 $S \cdot Q^{-1} \cdot P$ 在迭代中始终不变,可作为已知信息预先算好存放在内存里;(2) $G_1^{(j)}$ 和 $G_2^{(j)}$ 是乔丹阵,其乔丹块为 2 阶方阵;(3) 用高斯消去法求解式(42);所以不难得到计算上述步骤所需要的长操作数(略去一次项)为

$$(m_n + \tilde{m}) \times n + \tilde{m}^3/24 + 3 \frac{1}{2} \tilde{m}^2. \quad (44)$$

表 1 列出了分别用高斯消去法和本文介绍的两种方法求解式(15)所需要的长操作数。

表 1

方 法	长 操 作 数
直接用高斯消去法	$n^3/3 + n^2$
用豪斯霍尔德变换方法	$(m_n + \tilde{m}) \times n + \tilde{m}^3/3 + \tilde{m}^2$
用豪斯霍尔德变换和分块求逆的方法	$(m_n + \tilde{m}) + \tilde{m}^3/24 + \tilde{m}^2$

五、结 束 语

“字典法”具有测试后运算量小,线性和非线性电路均适用等优点。对故障元件数目不是很多的电路进行在线测试时,这种方法是比较实用的。但是为建立故障字典而进行的故障模拟,需要花费的计算量通常是很大的。如果利用豪斯霍尔德变换,可以降低方程的阶数,从而得到比较有效的故障模拟算法(线性和非线性电路均适用)。如果再利用被修正的矩阵的某些特点,运用分块矩阵的方法,则可以进一步降低方程的阶数,减少计算量。本文提出的算法特别适用于由分立元件构成的中、小规模电路。显然这个算法也适用于非线性电路的直流分析。

参 考 文 献

- [1] P. Duhamel and J. C. Rault, *IEEE Trans. on CAS*, **CAS-26** (1979), 411.
 [2] R. W. Liu, C. S. Lin, Z. F. Huang and L. Hu, "Analog Fault Diagnosis: A New Circuit Theory", *IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems*, 1983, pp. 931—939.
 [3] W. Hochwald and J. D. Bastain, *IEEE Trans. on CAS*, **CAS-26** (1979), 523.

- [4] G. C. Temes, "Efficient Methods of Fault Simulation", Proc. of 20th Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 191—194, Aug. 1977.
- [5] Leon O. Chua and Pen-Min Lin: Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithm and Computational Technique, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1975.
- [6] A. S. Householder, *SIAM J. Appl. Math.*, **5** (1957), 155.
- [7] 洪先龙等, 计算机辅助电路分析——算法和软件技术, 清华大学出版社, 1982.
- [8] F. Szidarvuszky and S. Yakvitz 著, 施明光, 潘仲雄译, 数值分析的原理及过程, 上海科技出版社, 1982.

AN EFFICIENT DC FAULT SIMULATION ALGORITHM FOR NONLINEAR CIRCUITS

Lin Hua, Ling Xieting, Pan Mingde
(*Department of Electronic Engineering, Fudan University*)

An efficient DC fault simulation algorithm for nonlinear circuits is proposed in which Householder's transform and the method of partitioned matrices are used to minimize the number of operations for fault simulation. The algorithm is also applicable to DC analysis for nonlinear circuits.