第 11 卷 第 2 期　　电 子 科 学 学 刊　　Vol. 11, No. 2
1989 年 3 月　　JOURNAL OF ELECTRONICS　　Mar., 1989

线性电路 K 故障诊断法的有效范围*

吴　耀　　童诗白
（清华大学自动化系，北京）

摘要　在使用 K 故障诊断法时，为提高电路的可诊断性，可以采取诸如增加可及节点，或改变激励点，增加激励和测量次数等办法。本文对这些措施的有效性，以及如何增加可及节点问题进行了详细的讨论，特别着重对比较有效的多激励法进行研究，给出了用多激励法进行诊断时，电路可 K 故障支路诊断的条件。

关键词　模拟电路；故障诊断；K 故障诊断法

一、引　言

文献 [1] 详细论述了电路的可 K 故障诊断条件。根据该文的结论，电路的可诊断性是由其拓扑结构、元件的性质和可及节点共同决定的。简单地说，根据 K 故障诊断条件，节点法希望电路的每一个节点与其它节点间都有支路相连，而支路法还进一步希望电路中的最小回路含尽量多的支路。这样在理想的情况下，对于至多有 K 个故障的假设，只需要 $K+1$ 个测点。

但是，从可 K 故障诊断的角度来看，一个实际电路的拓扑结构是相当不理想的。在实际电路中，一个节点一般只与其它三或四个节点有支路相连，而最小回路中往往也只含有三或四个支路。所以，在 $K+1$ 个测点下用单激励时，为保证能唯一地定位所有的故障，K 的值一般只能取到 1 或 2。

提高 K 值的方法有两种，一是增加测点，二是对电路加多个独立的激励，进行多次测量(即所谓多激励法)，以取得更多的信息。关于用多激励法诊断故障的问题已有若干文献进行过讨论[2-3]，这里不再重复说明。本文进一步研究下列问题：(1) 增加可及节点是否一定可以提高 K 值？(2) 不同激励下的伪故障是否一定有不同的故障值？多激励法的可诊断条件是什么？(3) 当多激励的方法无效时，应怎样增加可及节点？鉴于篇幅的限制，本文略去一些证明。

二、增加可及节点对可诊断性的影响

本节讨论在单激励下，只增加可及节点的方法。

引言中问题 (1) 的答案可从诊断条件直接得到，但因为实际上并没有文章正面回答

* 1987 年 12 月 14 日收到，1988 年 4 月 22 日修改定稿。

过这一问题，所以这里进行一下讨论. 首先在文献[1]的基础上，给出另一种形式的可诊断条件.

设电路N是一个线性时不变，集中参数非互易的网络，含有n个独立节点，b条支路，m个可及节点(编号为1, 2, …, m). 其节点电压方程为:

$$Y_nV_n = I_n \tag{1}$$

式中 Y_n, V_n, I_n 分别为导纳矩阵、节点电压和激励.

1. K故障节点法

由文献[1]可得诊断方程:

$$Z_{mn}\Delta I_n = -\Delta V_m \tag{2}$$

其中 Z_{mn} 可由 $Z_n = Y_n^{-1}$ 得到，$\Delta I_n = \Delta Y_n(V_n + \Delta V_n)$ 称为等效节点故障源，ΔV_m 为可及节点电压在故障前后的变化量. 可诊断条件为: 将矩阵 Y_n 分块为 $[Y_{nm}Y_{nl}]$，$(l + m = n)$，以 $y_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 表示 Y_{nl} 的行向量. 则当且仅当下述条件满足时，电路是可K故障诊断的:

$$\mathrm{RANK}\left(\begin{bmatrix} y_{j_1} \\ \vdots \\ y_{j_t} \end{bmatrix}\right) = l \quad \forall 1 \leqslant j_1 < j_2 < \cdots < j_t \leqslant n \tag{3}$$

其中 $t = n - k - 1$，根据这一条件，从 Y_{nl} 的特征出发，可得到如下两个推论:

推论1 若已知电路的所有n个节点的电压增量，即所有节点均为可及节点，则可对电路进行n故障节点诊断.

推论2 电路是可K故障诊断的，当且仅当下述条件成立:

(1) Y_{nl} 的任一列均有至少$K + 2$个非零元素.

(2) 若 Y_{nl} 的某些列含有J或少于J个非零元素，则至多有 $J - (K + 1)$ 个这样的列，它们的非零元素位于相同的行. (证略)

注意到当电路中不含受控源时，在 Y_{nl} 中，每一列的非零元素数恰为与该列对应的节点(不包括参考节点)有关联的支路数加一. 这表明上述两个推论指出，K故障节点法的可诊断性直接与可及节点数和与内部节点相关联的支路数有关. 因此，若在某个K值下电路不满足可诊断条件，可以通过增加可及节点使电路满足在该K值下的可诊断条件. 增加可及节点的原则是: 把在 Y_{nl} 中的对应列不满足推论2的节点改为可及节点.

由于在实际电路中，大多数节点只与另外二至四个节点相关联，Y_{nl} 的大部分列中，非零元素的个数为三到四个. 由推论2可知，实际K值一般只能取到2. 若要K值取到2以上且仍可唯一定位所有故障，则几乎所有节点均必须是可及的. 这样，K故障诊断法的优点也就不存在了.

2. K故障支路法

K故障节点法是将K故障支路法的等效故障源组合起来，形成等效节点故障源而得到的. 所以K故障支路法的诊断方程为:

$$(Z_{mn}A_{nb})\Delta I_b = -\Delta V_m \tag{4}$$

其中 A_{nb} 为关联矩阵. 可诊断条件如下:

设 $\bar{z}_i$ 为 $Z_{mn}A_{nb}$ 的列向量，则当且仅当下述条件成立时，电路是可K故障支路诊断

的：

$$\mathrm{RANK}([\bar{z}_{i_1}, \bar{z}_{i_2}, \cdots, \bar{z}_{i_{K+1}}]) = K + 1 \tag{5}$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+1} \leqslant b$$

由 (4) 和 (5) 式可看出，第一，只有当 Z_{mn} 满足可K故障节点诊断条件时，$Z_{mn}A_{nb}$ 才可能满足上述K故障支路诊断条件．这称为可及节点因素．第二个因素可表为下述的定理：

定理 1　若电路中最小的一个回路或割集（含支路数最少的回路或割集）含有$K+1$个支路，则 (4) 式不满足可K故障支路诊断条件．（证略）

定理 1 给出的影响电路可诊断性的因素称为基尔霍夫因素，因为它是由于支路电压或割集电流必须满足基尔霍夫定律所造成的．

支路法的可诊断性是由两个因素决定的，因而与节点法不同，单纯增加可及节点数不一定能改善可诊断性．在实际的电路中，一般都含有由 3，4 个支路组成的最小回路（或割集），所以在能唯一定位出所有故障的前提下，K一般只能取到 1，这时基尔霍夫因素起决定的作用，再增加可及节点也是无效的．

三、多激励法

显然，单纯增加可及节点数，对电路可诊断性的改善是很有限的．另一种改善的方法是对电路加不同的激励，进行多次测量，以获取更多的信息．这就是所谓的多激励法．

多激励法要求对电路所加的不同激励必须是相互独立的，否则由于线性电路的性质，将不可能得到新的信息．最简单的情况就是分别在可及节点加激励．在下面的讨论中我们认为所加的都是这样的激励，且激励的幅值为 1．

当电路不满足可诊断条件时，除真故障外还存在等效故障（或称伪故障）．多激励法不是力图防止伪故障产生，而是设法将真故障与伪故障区别开．区别真伪故障的根据是：在不同的激励下，真故障的值保持不变，而伪故障的值各不相同．简称为故障值不变原理．但这种方法只适用于支路法．

故障值不变原理的第一个结论："在不同的激励下真故障值不变"，是不言而喻的，但我们将证明其第二个结论："在不同的激励下伪故障值是不同的"，需在一定的条件下才成立．证明中单故障与多故障的情况有所不同，但鉴于篇幅的限制，下面主要讨论多故障的情况，对单故障的情况，只给出有关的结论．为方便起见，我们假设故障支路与参考节点不相关联．

1. 单故障的情况

以下设节点S和T为可及节点，ΔI_b 的第 i 个分量 ΔI_i 不为零为真故障，第 j 个分量 ΔI_j 不为零为伪故障．

引理 1　$\Delta I_i^s/\Delta I_i^t = \Delta I_j^s/\Delta I_j^t$

（证略）

引理 2　设支路 i 与第 a 和 b 节点相关联，则：

$$\Delta I_i^s/\Delta I_i^t = (Y_{sa} - Y_{sb}/(Y_{ta} - Y_{tb})$$

式中 Y_{ij} 为 (1) 式中 Y_n 的第 i 行 j 列的代数余子式.

证明 由等效故障源的定义有:

$$\Delta I_i^s = -\Delta y_i^s(v_i^s + \Delta v_i^s)$$

$$\Delta I_i^t = -\Delta y_i^t(v_i^t + \Delta v_i^t)$$

对真故障有:

$$\Delta I_i^s/\Delta I_i^t = (v_i^s + \Delta v_i^s)/(v_i^t + \Delta v_i^t)$$

由于加的是单位激励,所以根据解线性方程组的克莱姆法则,有:

$$\frac{\Delta I_i^s}{\Delta I_i^t} = \frac{(Y_{sa} - Y_{sb}) + (Y_{aa} - Y_{ba} - Y_{ab} + Y_{bb})\Delta I_i^s}{(Y_{ta} - Y_{tb}) + (Y_{aa} - Y_{ba} - Y_{ab} + Y_{bb})\Delta I_i^t}$$

即:

$$\frac{\Delta I_i^s}{\Delta I_i^t} = \frac{Y_{sa} - Y_{sb}}{Y_{ta} - Y_{tb}}$$

证毕

引理 3 设支路 i 和 j 分别与节点 a, b 和 c, d 相关联, Y_{ij} 表示 Y_n 的第 i 行 j 列元素的代数余子式,则有:

$$\frac{Y_{at} - Y_{bt}}{Y_{as} - Y_{bs}} = \frac{Y_{ct} - Y_{dt}}{Y_{cs} - Y_{ds}}$$

证明 由 (1) 式可知, z_m 中的 z_{Kl} 元素等于 Y_{lk}/Δ(Δ 为 Y_n 的行列式). 又因为 ΔI_j 是 ΔI_i 的等效故障源,所以有:

$$\frac{\bar{z}_{si}}{\bar{z}_{sj}} = \frac{\bar{z}_{ti}}{\bar{z}_{tj}}, \qquad \frac{z_{sa} - z_{sb}}{z_{sc} - z_{sd}} = \frac{z_{ta} - z_{tb}}{z_{tc} - z_{td}}$$

也就是

$$\frac{Y_{at} - Y_{bt}}{Y_{as} - Y_{bs}} = \frac{Y_{ct} - Y_{dt}}{Y_{cs} - Y_{ds}}$$

证毕

设支路 j 与节点 c, d 相关联, 则下面的定理阐明了单故障情况下多激励法的有效性.

定理 2 若电路不满足可单故障支路诊断条件, 并且电路的节点方程的系数矩阵为对称矩阵,或者虽然不是对称矩阵,但有:

$$\frac{Y_{tc} - Y_{td}}{Y_{sc} - Y_{sd}} = \frac{Y_{ct} - Y_{dt}}{Y_{cs} - Y_{ds}}$$

和

$$\frac{Y_{ta} - Y_{tb}}{Y_{sa} - Y_{sb}} = \frac{Y_{at} - Y_{bt}}{Y_{as} - Y_{bs}} \tag{6}$$

那么伪故障在不同的激励下不变,否则变化. 此证明可由引理 1,2 和 3 直接得到.

2. 多故障的情况

当故障数大于 1 时,有如下定理成立:

定理 3 设 $\bar{z}_i$ 表示故障诊断方程 (4) 式系数矩阵的第 i 列. 则当且仅当下述条件成立时,电路用多激励法是可 $K(K > 1)$ 故障支路诊断的:

$$\mathrm{RANK}([\bar z_{i_1}, \bar z_{i_2}, \cdots, \bar z_{i_{K+1}}]) \geqslant K \tag{7}$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+1} \leqslant b$$

(7) 式称为多激励法的可K故障支路诊断条件。

证明　为说明方便，下面以$K=3$为例证明定理成立。对于任意的 $K>1$，只要把证明中的术语 3 换成 K，2 换成 $K-1$，…等即可。

设 ΔI_4，ΔI_5，ΔI_6 不等于零为真故障，ΔI_1，ΔI_2，ΔI_3 不等于零为伪故障。因为 ΔI_1，ΔI_2，ΔI_3 是 ΔI_4，ΔI_5，ΔI_6 的等效故障，所以 $\bar z_1$，$\bar z_2$，$\bar z_3$ 均可被 $\bar z_4$，$\bar z_5$，$\bar z_6$ 表出，也就是有如下的关系：

$$\begin{aligned}\bar z_1 &= a_{11}\bar z_4 + a_{12}\bar z_5 + a_{13}\bar z_6\\ \bar z_2 &= a_{21}\bar z_4 + a_{22}\bar z_5 + a_{23}\bar z_6\\ \bar z_3 &= a_{31}\bar z_4 + a_{32}\bar z_5 + a_{33}\bar z_6\end{aligned} \tag{8}$$

而且

$$\bar z_1\Delta I_1 + \bar z_2\Delta I_2 + \bar z_3\Delta I_3 = -\Delta V_m \tag{9}$$

故

$$\begin{bmatrix}\Delta I_4\\ \Delta I_5\\ \Delta I_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta I_1\\ \Delta I_2\\ \Delta I_3\end{bmatrix} \tag{10}$$

因真故障值与激励无关，又考虑到 (10) 式，得：

$$\begin{bmatrix}(V_4^{i2}+\Delta V_4^{i2})(a_{11}\Delta I_1^{i1}+a_{21}\Delta I_2^{i1}+a_{31}\Delta I_3^{i1})\\ (V_5^{i2}+\Delta V_5^{i2})(a_{12}\Delta I_1^{i1}+a_{22}\Delta I_2^{i1}+a_{32}\Delta I_3^{i1})\\ (V_6^{i2}+\Delta V_6^{i2})(a_{13}\Delta I_1^{i1}+a_{23}\Delta I_2^{i1}+a_{33}\Delta I_3^{i1})\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}(V_4^{i1}+\Delta V_4^{i1})(a_{11}\Delta I_1^{i2}+a_{21}\Delta I_2^{i2}+a_{31}\Delta I_3^{i2})\\ (V_5^{i1}+\Delta V_5^{i1})(a_{12}\Delta I_1^{i2}+a_{22}\Delta I_2^{i2}+a_{32}\Delta I_3^{i2})\\ (V_6^{i1}+\Delta V_6^{i1})(a_{13}\Delta I_1^{i2}+a_{23}\Delta I_2^{i2}+a_{33}\Delta I_3^{i2})\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\0\\0\end{bmatrix} \tag{11}$$

条件 (7) 的必要性　若该条件不满足，则 (10) 式中各行均有一个自由变量。设 a_{11}，a_{22} 和 a_{33} 为自由变量，令其分别取下列值：

$$a_{11} = \frac{(V_1^{i_2}+\Delta V_1^{i_2}) - (a_{21}\Delta I_2^{i_1} + a_{31}\Delta I_3^{i_1})/\Delta I_1^{i_1}}{V_4^{i_2}+\Delta V_4^{i_2}}$$

$$a_{11} = \frac{(V_1^{i_1}+\Delta V_1^{i_1}) - (a_{21}\Delta I_2^{i_2} + a_{31}\Delta I_3^{i_2})/\Delta I_1^{i_2}}{V_4^{i_1}+\Delta V_4^{i_1}}$$

$$a_{22} = \frac{(V_2^{i_2}+\Delta V_2^{i_2}) - (a_{12}\Delta I_1^{i_1} + a_{32}\Delta I_3^{i_1})/\Delta I_2^{i_1}}{V_5^{i_2}+\Delta V_5^{i_2}}$$

$$a_{22} = \frac{(V_2^{i_1}+\Delta V_2^{i_1}) - (a_{12}\Delta I_1^{i_2} + a_{32}\Delta I_3^{i_2})/\Delta I_2^{i_2}}{V_5^{i_1}+\Delta V_5^{i_1}}$$

$$a_{33} = \frac{(V_3^{i_2}+\Delta V_3^{i_2}) - (a_{13}\Delta I_1^{i_1} + a_{23}\Delta I_2^{i_1})/\Delta I_3^{i_1}}{V_6^{i_2}+\Delta V_6^{i_2}}$$

$$a_{33} = \frac{(V_3^{i_1}+\Delta V_3^{i_1}) - (a_{13}\Delta I_1^{i_2} + a_{23}\Delta I_2^{i_2})/\Delta I_3^{i_2}}{V_6^{i_1}+\Delta V_6^{i_1}}$$

得:

$$\left.\begin{array}{l}(V_1^{i_2} + \Delta V_1^{i_2})\Delta I_1^{i_1} - (V_1^{i_1} + \Delta V_1^{i_1})\Delta I_1^{i_2} = 0 \\ (V_2^{i_2} + \Delta V_2^{i_2})\Delta I_2^{i_2} - (V_2^{i_1} + \Delta V_2^{i_1})\Delta I_2^{i_2} = 0 \\ (V_3^{i_2} + \Delta V_3^{i_2})\Delta I_3^{i_2} - (V_3^{i_1} + \Delta U_3^{i_1})\Delta I_3^{i_2} = 0\end{array}\right\} \tag{12}$$

可见这时伪故障 ΔI_1，ΔI_2，ΔI_3 同样满足故障值不变原理所要求的方程，所以不能区别真伪故障。因此条件 (7) 是必要的.

条件 (7) 的充分性 当该条件成立时，(10) 式中的自由变量数小于 3. 注意到可诊断性与元件的具体取值无关，所以 (11) 式中至少有一个方程不能转变为 (12) 式中的相应方程. 所以可以区别真伪故障. 因此条件 (7) 是充分的. 证毕

推论 3 若电路在单激励下是可 K 故障支路诊断的，则必可用多激励法进行 $K+1$ 故障支路诊断.（证略）

定理 2,3 给出了多激励法的可诊断条件，但有两个问题尚未论及. 一个是究竟应该怎样使用激励，另一个是应该怎样选择和增加可及节点. 下面的定理回答了这些问题.

定理 4 若电路满足 $K-1$ 故障可诊断条件，而不满足 K 故障可诊断条件，则对于由诊断方程定位出的任一组 K 故障，若已知其中一个故障的值是与激励无关的，那么其他故障的值也与激励无关.

证明 不妨设在定位出的故障中，已知 ΔY_i 是与激励无关的. 于是可以构造一个网络 $\bar{N}$，它与网络 N 拓扑相同，各支路的元件值也相同，仅在第 i 支路增加了一个等效电源 ΔI_i. 因为两网络拓扑相同，所以 $\bar{N}$ 也是可 $K-1$ 故障诊断的. 注意到 $\bar{N}$ 的节点电压变化量与 N 的相同，所以在 N 中定位出的那组等效故障源可表出 $\bar{N}$ 的可及节点电压变化量，但只含 $K-1$ 个故障（去掉了 ΔY_i）. 根据可诊断条件的充分性，这些故障是真故障，所以其值与激励无关. 证毕

此定理说明，在使用多激励法时，并不需要对所有假设故障的故障值都进行检验.

定理 5 电路条件同定理 4. 若故障支路在某两个激励下定位出的故障值是与激励无关的，则在其它激励下定位出的故障值也与激励无关. 反之亦成立.

证明 假设在第一组的两个激励下，故障支路组 1 的故障值与激励无关，在第二组的两个激励下，故障支路组 2 的故障值与激励无关. 那么由于：(1) 可表出 ΔV_m 的故障假设中必有一个是真故障；(2) 真故障在不同的激励下故障值不变；(3) 因电路满足条件 (10) 式，所以在一组激励下只存在一组故障假设，其值与激励无关. 所以故障组 1 与故障组 2 必为同一组故障，否则将与上述三条矛盾. 证毕

定理 5 说明，只用两个线性无关的激励即可区别真伪故障.

下述定理将单激励下的可 K 故障节点诊断条件，与多激励下的可 K 故障支路诊断条件联系起来，指出了选择或增加可及节点的原则.

定理 6 设电路中含支路最少的两个不相关回路或割集所包含的支路数大于 $K+2$，则若该电路满足可 K 故障节点诊断条件，则必可用多激励法进行 $K+1$ 故障支路诊断. 反之若不满足，则最多只能进行 K 故障支路诊断.

证明 若电路满足可 K 故障节点诊断条件，则下式

$$\mathrm{RANK}([z_{i_1}, z_{i_2}, \cdots, z_{i_{K+1}}]) = K + 1$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+1} \leqslant n$$

成立。又因为矩阵A的元素只有 0，1 和-1，且每一列中至多含两个非零元素，以及任意$K+2$个支路均不可能形成两个以上的回路或割集，所以不等式

$$\mathrm{RANK}([\bar{z}_{i_1}, \bar{z}_{i_2}, \cdots, \bar{z}_{i_{K+1}}, \bar{z}_{i_{K+2}}]) \geqslant K + 1$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+2} \leqslant b$$

成立。根据定理 3，电路是可用多激励法进行$K+1$故障支路诊断的。

若电路不满足可K故障节点诊断条件，则存在不等式：

$$\mathrm{RANK}([z_{i_1}, z_{i_2}, \cdots, z_{i_{K+1}}]) \leqslant K$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+1} \leqslant n$$

同样由矩阵A的性质，存在不等式：

$$\mathrm{RANK}([\bar{z}_{i_1}, \bar{z}_{i_2}, \cdots, \bar{z}_{i_{K+1}}, \bar{z}_{i_{K+2}}]) \leqslant K$$

$$\forall\ 1 \leqslant i_1 < i_2 < \cdots < i_{K+2} \leqslant b$$

不满足定理 3 的条件，所以电路最多只能用多激励法进行K故障支路诊断。　　证毕

定理 6 说明，多激励法对于电路的可诊断性与用单激励时的K故障节点可诊断性是有联系的，在后者意义下的最佳可及节点，对前者来说也是最佳的。在第二节中讨论的选择和增加可及节点的原则，也适用于多激励法。同时也说明，当电路中不存在串并联支路，且K值不太大时，基尔霍夫因素对多激励法无明显影响。与节点法一样，主要是可及节点影响其可诊断性。

四、示　　例

电路如图 1 所示，$R_i = i\Omega$，$G_i = 1/R_i$

(1) *单故障情况*　　取②和⑤节点为可及节点，这时电路不满足可单故障诊断的条件。又因为电路的导纳矩阵是对称的，根据定理 2，对其用多激励法不能区别真伪故障。令R_2变值为 10 Ω，则在②加激励可求得：

真故障$\Delta G_2 = 0.4$，伪故障$\Delta G_1 = 0.8889$；在⑤加激励可求得：真故障$\Delta G_2 = 0.4$，伪故障$\Delta G_1 = 0.8889$。可见真伪故障值均不随激励而变。

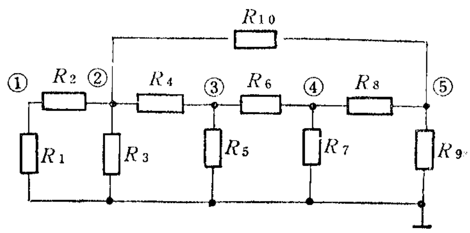

图　1

(2) *选①，③，④，⑤为可及节点*　　这时对$K=2$电路满足定理 3 的条件，所以可进行 3 故障支路诊断。令R_6, R_7和R_8分别变值为 20，25 和 30 Ω，则在①加激励可求得：真故障$\Delta G_6 = 0.1166$，$\Delta G_7 = 0.1028$，$\Delta G_8 = 0.0916$，伪故障$\Delta G_5 = 0.0425$，$\Delta G_7 = 0.0048$，$\Delta G_9 = 0.0233$。在⑤加激励可求得：真故障$\Delta G_6 = 0.1166$，$\Delta G_7 = 0.1028$，$\Delta G_8 = 0.0916$，伪故障$\Delta G_5 = -0.2768$，

$\Delta G_7=-0.0219$，$\Delta G_9=0.0635$．可见，真故障的值不随激励变化，伪故障的值随激励变化，所以可将真伪故障区别开．

五、结　论

本文对线性电路的K故障诊断法的有效性进行了讨论，着重研究了多激励法的可诊断性，首次给出了可诊断条件．同时指出，多激励法对可及节点的要求与节点法几乎是等价的，所以节点法选择测点的原则对多激励法也适用．本文还指出，在实际诊断时，只需两个不同的激励即可满足要求，求值检验也不必对每一个故障元件进行．

参　考　文　献

[1] Zheng F. Huang, Cheng-Shang Lin, Ruey-Wen Liu, *IEEE Trans. on CAS*, **CAS-30**(1983), 257—265.

[2] 邹锐，模拟电路K故障诊断，华中工学院学报，1985年，第2期，第1—8页．

[3] 蒋本瑢，范丽娟，具有不可及节点的模拟电路的多故障诊断，1984年中国电子学会电路与系统第五届年会论文集，西安，1985，第299—303页．

THE EFFECTIVE RANGE OF *K*-FAULT DIAGNOSIS OF LINEAR CIRCUIT

Wu Yao　Tong Shibai

(*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing*)

Abstract　In view of *K*-fault testability, the topological construction of a practical circuit is far from ideal. In order to improve the testability of a circuit, it is used to increase the number of accessible nodes or to use multi-excitation method. Effectiveness of these methods and feasibility choosing accessible nodes are discussed in detail. The conditions for multi-excitation testability are presented.

Key words　Analog circuit; Fault diagnosis; *K*-fault diagnosis; Testability