非线性电路和系统的故障诊断——一种新理论和方法

焦李成

(西安交通大学电工原理教研室)

摘要

本文提出了关于非线性电路和系统的故障诊断的一种新理论——Volterra 泛函级数理论,并以此为基础,发展了非线性电路和系统故障诊断的故障方程递归法和故障证明的决策法.它们是两种 SAT 方法,不但大大减小了仿真的工作量,而且适于线性与非线性系统、硬故障和软故障、参数识别和故障隔离.同时它们又是完全解析的频域中的符号法,因而适于任意动态非线性系统.

一、引言

自从 1962 年 Berkowitz 提出电路元件值可解性概念[1]以来,电路和系统的故障诊断成为与分析和综合鼎立的一个新的研究领域.特别是近十年来,随着超大规模集成技术(VLSI)和计算机科学技术的迅速发展,这一领域更为国际、国内学者所瞩目.对于线性电路和系统已经取得了很大的进展[2].然而,电路和系统的故障诊断要达到实用化的程度,必须解决的是非线性电路和系统的故障诊断,而这方面的成果则如凤毛麟角[3-5].非线性电路和系统故障诊断的研究对于超大规模集成电路技术和计算机科学技术的发展都具有非常重要的实际意义.

在线性系统理论中人们广泛使用 Laplace 变换来对系统进行频域分析,它把复杂的积分、微分方程变换为简单的代数方程,在频域中得到了从时域分析中难以认识的零、极点分布和频率响应等概念的物理意义.然而不幸的是,人们习知的 Laplace 变换是一种线性算子,显然对非线性电路和系统是不适用的.由意大利著名数学家 Volterra[6] 提出的 Volterra 泛函级数理论使得我们也能象线性系统一样,提出 K 重卷积积分、n 重 Laplace 变换、n 阶传递函数(亦称 n 阶非线性传递函数)、n 阶脉冲响应等新概念,并对非线性系统进行频域分析.对于任意阶复杂的动力系统,可以用递归方法对 n 阶传递函数进行分析,亦即只需对线性系统进行 n 次分析,其中每次对线性系统的分析都是基于以前各次分析得到的信息递推地进行的.这样,就把非线性系统的分析转化为线性系统的 n 次分析(具有不同的输入).这种转化与通常的“线性化处理”有着本质的区别,它所用的多重频域分析手段是线性系统理论频域分析的直接推广,因而更具优越性.

基于 Volterra 泛函级数理论,本文提出了非线性电路和系统故障诊断的一种新理论和

本文 1987 年 3 月 9 日收到,1987 年 11 月 10 日收到修改稿.

方法．首先给出了基本理论的有关概念和性质，然后给出了基本非线性元件的 n 阶诊断方程及系统分析方法，并提出了 n 阶诊断的新概念．同时，本文中还提出了一种与求解方程法完全不同的故障证明的决策方法，它是一种递归形式的方法，并不需要对所有系统参数求解故障方程，且适用于任意阶动态非线性系统．既可处理软故障，又可处理硬故障，用它可实现故障定位和故障隔离．最后，我们还讨论了可解性和可诊断性，给出了完整的数学证明．

二、 Volterra 级数和非线性传递函数

对于一解析的非线性系统 N，假定其输入函数为 $x(t)$，输出函数为 $y(t)$，则输出 $y(t)$ 可表示为输入 $x(t)$ 的 Volterra 泛函级数

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t), \tag{2.1}$$

其中

$$y_n(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \cdot \prod_{i=1}^{n} [x(t-\tau_i)] \cdot d\tau_1 d\tau_2 \cdots d\tau_n. \tag{2.2}$$

式中 $h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n)$ 称为非线性系统 N 的 n 阶 Volterra 核或 n 阶脉冲响应．利用多维 Laplace 变换理论，(2.1)和(2.2)式可以写为：

$$Y_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) \prod_{i=1}^{n} X(s_i), \tag{2.3}$$

其中

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \cdot \exp\left\{\sum_{i=1}^{n} s_i\tau_i\right\} d\tau_1 d\tau_2 \cdots d\tau_n. \tag{2.4}$$

$Y_n(s_1, s_2, s_3, \cdots, s_n)$ 称为非线性系统 N 的 n 阶输出变换，$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)$ 称为非线性系统 N 的 n 阶传递函数（亦称 n 阶非线性传递函数）或称为非线性系统 N 的 n 阶脉冲响应的 Laplace 变换．下面给出有关 n 阶传递函数的基本性质．

1. 加法性质

对于平行系统，如果在时域中有

$$y(t) = a(t) + b(t), \tag{2.5}$$

则其 n 阶时域核为：

$$h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) = f_n(\cdot) + g_n(\cdot), \tag{2.6}$$

n 阶频域为：

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = F_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) + G_n(s_1, s_2, \cdots, s_n). \tag{2.7}$$

由(2.6)和(2.7)式可知串联电路的高阶阻抗和并联电路的高阶导纳也和一阶阻抗与一阶导纳一样具有加法性质．

2. 微分系统

如果在一系统 F 输出端口接有一微分器 S，则它们一起构成一微分系统，其传递函数为：

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = (s_1 + s_2 + \cdots + s_n)F_n(s_1, s_2, \cdots, s_n). \tag{2.8}$$

3. 级联系统

如在系统K输出端有另--系统F与其级联，则级联系统的n阶传递函数为：

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = \sum_{m_n=1}^{1} \sum_{m_{n-1}=0}^{\alpha_{n-1}} \cdots \sum_{m_2=0}^{\alpha_2} \left(\frac{m!}{\prod_{i=1}^{n} m_i!} \right) \cdot F_m(K_1)^{m_1}(K_2)^{m_2}\cdots(K_n)^{m_n}, \tag{2.9}$$

其中

$$m_1 = n - \sum_{i=2}^{n} im_i,$$

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i,$$

$$\alpha_p = \mathrm{In}\left(\frac{n - \sum_{P+1}^{n} im_i}{P} \right), \quad \forall P = 2, 3, \cdots, n-1.$$

式中 In(·) 表示取整函数．如果F为一线性子系统，则(2.9)式可写为：

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = K_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)F_1(s_1 + s_2 + \cdots + s_n), \tag{2.10}$$

如果K为一线性子系统，则有

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = \prod_{i=1}^{n} K_1(s_i)F_n(s_1, s_2, \cdots, s_n). \tag{2.11}$$

4. 互逆系统

一个系统F与其逆系统F^{-1}级联后给出一单位系统，用算子形式可表示为：

$$F * F^{-1} = F^{-1} * F = I, \tag{2.12}$$

若用高阶传递函数表示则有

$$H_1(s_1) = F_1(s) \cdot F_1^{-1}(s) = 1, \tag{2.13}$$

$$H_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = 0, \ \forall n > 1. \tag{2.14}$$

上述性质的详细证明请参考文献[7][1]．

三、n阶故障诊断方程

1. 基本电路元件的n阶非线性传递函数

(1) 对流控非线性电阻

$$v = \sum_{i=1}^{n} a_i i^i, \tag{3.1}$$

则其n阶阻抗函数

$$Z_n(s_1, s_2, \cdots, s_n) = a_n. \tag{3.2}$$

(2) 对压控非线性电阻

1) 焦李成，西安交通大学硕士论文，1984．

$$i=\sum_{j=1}^{n} b_j v^j, \tag{3.3}$$

则其 n 阶导纳函数

$$Y_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)=b_n. \tag{3.4}$$

(3) 对荷控非线性电容

$$v=\sum_{i=1}^{n} a_i q^i, \tag{3.5}$$

则其 n 阶阻抗函数

$$Z_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)=\frac{a_n}{s_1 s_2 \cdots s_n}. \tag{3.6}$$

(4) 对压控非线性电容

$$q=\sum_{i=1}^{n} b_i v^i, \tag{3.7}$$

则其 n 阶导纳函数

$$Y_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)=b_n(s_1+s_2+\cdots+s_n). \tag{3.8}$$

(5) 对流控非线性电感

$$\phi=\sum_{j=1}^{n} a_j i^j, \tag{3.9}$$

则其 n 阶阻抗函数

$$Z_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)=a_n(s_1+s_2+\cdots+s_n). \tag{3.10}$$

(6) 对于链控非线性电感

$$i=\sum_{j=1} b_j \phi^j, \tag{3.11}$$

则其 n 阶导纳函数

$$Y_n(s_1, s_2, \cdots, s_n)=\frac{b_n}{s_1 s_2 \cdots s_n}. \tag{3.12}$$

需要指出的是，非线性 VCCS 和 CCVS 可用非线性电阻来模拟. 上述基本元件包含了 VLSI 中的基本元件.

2. 故障诊断方程

(1) 一阶诊断方程　电路和系统的一阶诊断方程也就是电路或系统的线性化方程，其一阶传递函数与线性传递函数完全相同.这样就很容易用线性电路或系统的故障诊断方程,如节点故障诊断方程来处理.

(2) 三阶故障诊断方程　对一般的 VLSI 元件,其非线性特性，如运放的非线性特性可用奇次非线性多项式来模拟[1]. 即其偶次项为 0,相应偶阶传递函数也为 0. 这样,我们只需列出奇数阶故障诊断方程,即可进行 VLSI 系统的故障诊断. 当然,如有偶阶非线性项时，也可很方便地依照本文方法列出其故障诊断方程.

1) 焦李成，西安交通大学硕士论文，1984.

对非线性电阻有

$$i = g_1 v + g_3 v^3, \tag{3.13}$$

则其三阶诊断方程为：

$$I_3(s_1, s_2, s_3) = g_1 V_3(s_1, s_2, s_3) + g_3 V_1(s_1) V_1(s_2) V_1(s_3). \tag{3.14}$$

对非线性电容有

$$g = c_1 v + c_3 v^3, \tag{3.15}$$

则其三阶诊断方程为：

$$I_3(s_1, s_2, s_3) = c_1 s_1 V_1(s_1) + c_3(s_1 + s_2 + s_3) V_1(s_1) V_1(s_2) V_1(s_3). \tag{3.16}$$

对链控非线性电感

$$i = \Gamma_1 \phi + \Gamma_3 \phi^3, \tag{3.17}$$

则其三阶诊断方程为：

$$I_3(s_1, s_2, s_3) = \frac{\Gamma_1}{s_1} V_1(s_1) + \frac{\Gamma_3}{s_1 s_2 s_3} V_1(s_1) V_1(s_2) V_1(s_3). \tag{3.18}$$

对非线性 VCCS 有

$$I_3(s_1, s_2, s_3) = g_{m1} V_{x1}(s_1) + g_{m3} V_{x1}(s_1) V_{x2}(s_2) V_{x3}(s_3). \tag{3.19}$$

由(3.14)—(3.19)式可见，其三阶故障诊断方程仍然只蕴含一阶电压，而一阶电压值用其线性电路即可求出，这样用递归程序可求出其任意阶非线性电路或系统变量．也就是说，最后得到的 n 阶诊断方程是一递归方程(对应的等效电路是一线性有源电路)，只需对其线性系统进行 n 次分析，其中每次对线性系统进行的分析都是基于以前各次分析得到的信息递推地进行的．

一阶电路的节点方程可写为：

$$A(G_m + Y_b) A^T V(s) = A(Y_b V_s(s) - J_s). \tag{3.20}$$

式中 G_m 为非线性 VCCS 的一阶系数矩阵．令 $V = [V_1 \alpha]^T, A = [A_1, A_2]^T$, V_1 为可及电压向量，α 为不可及节点电压向量，这样(3.20)式可以写成

$$\begin{aligned} &A(G_m + Y_b) A_1^T V_1(s) + A(G_m + Y_b) A_2^T \alpha(s) - A(Y_b V_s - J_s) \\ &= 0. \end{aligned} \tag{3.21}$$

设 P_1 为一阶参数向量，且令

$$f(s, P_1) = [A(G_m + Y_b) A_1^T \mid A(G_m + Y_b) A_2^T \mid -A\mathbf{Y}_b], \tag{3.22}$$

$$g(\alpha) = [V_1(s) \mid \alpha(s) \mid V_s]^T, \ \beta = -AJ_s, \tag{3.23}$$

$$x_1 = [P_1, \alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_q]^T,$$

这样有

$$f(s, P_1) g(\alpha) - \beta = 0. \tag{3.24}$$

若考虑 q 个输入频率，可得一阶故障方程

$$F_1(x_1) = \begin{bmatrix} f_1(s_1, P_1) g_1(\alpha_1) - \beta_1 \\ \cdots \\ f_q(s_q, P_1) g_q(\alpha_q) - \beta_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}. \tag{3.25}$$

前面已经指出三阶等效电路仍是一线性有源电路，即

$$\mathbf{Y}_n(s_1 + s_2 + s_3) V_3(s_1, s_2, s_3) = I_{s3}(s_1, s_2, s_3), \tag{3.26}$$

式中

$$Y_n(s_1+s_2+s_3)=A[G_m+Y_b(s_1+s_2+s_3)]A^T, \tag{3.27}$$

而电流源向量 I_{s3} 则是元件三阶系数的函数,故可设

$$I_{s3}(s_1,s_2,s_3,P_3)=mP_3+n, \tag{3.28}$$

从而(3.26)式可以改写为:

$$[Y_{1n}(s_1+s_2+s_3) \mid Y_{2n}(s_1+s_2+s_3)]\cdot\begin{bmatrix}V_1(s_1,s_2,s_3)\\ \cdots\cdots\\ \alpha(s_1,s_2,s_3)\end{bmatrix}$$

$$=I_{s3}(s_1,s_2,s_3,P_3). \tag{3.29}$$

这是一组线性代数方程组,未知量为 P_3 和 α, 选择 q 个测试频率

$$x_3=[P_3,\alpha(s_1,s_2,s_3),\alpha(s_2,s_3,s_4),\cdots,\alpha(s_{q-2},s_{q-1},s_q)]^T,$$

利用与一阶故障方程类似的推导可得非线性电路或系统的三阶故障方程

$$F_3(x_3)=Cx_3+D=0. \tag{3.30}$$

其中 C, D 为常数矩阵. 求解(3.30)式即可确定故障元件参数.

(3) N 阶故障诊断方程

$$F_n(x_n)=Ex_n+G=0, \tag{3.31}$$

式中 $x_n=[P_n,\alpha(s_1,s_2,s_3),\cdots,\alpha(s_{q-2},s_{q-1},s_q)]^T$. 递归地求解各阶故障方程,即可完成非线性电路或系统的故障参数的识别和定位.

四、非线性系统故障诊断的决策方法

1. 仿真模型

设系统的输入为

$$x(t)=\sum_{i=1}^{M}A_ie^{j\omega_it}, \tag{4.1}$$

把(4.1)式代入(2.1)与(2.2)式可得系统的输出

$$y_n(t)=\sum_{i_1=1}^{M}\sum_{i_2=1}^{M}\cdots\sum_{i_n=1}^{M}\left\{\left(\prod_{k=1}^{n}A_{i_k}\right)\exp\left[j\left(\sum_{k=1}^{n}\omega_{i_k}t\right)\right]\right.$$

$$\left.\cdot H_n(j\omega_{i_1},j\omega_{i_2},\cdots,j\omega_{i_n})\right\}. \tag{4.2}$$

令 $M=n$, $A_{i_k}=1\ \forall k=1,2,\cdots,n$, 即

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}\exp(j\omega_it), \tag{4.3}$$

从而有

$$y_n(t)=\sum_{i_1=1}^{n}\sum_{i_2=1}^{n}\cdots\sum_{i_n=1}^{n}H_n(j\omega_{i_1},j\omega_{i_2},\cdots,j\omega_{i_n})$$

$$\cdot\exp\{j(\omega_{i_1}+\omega_{i_2}+\cdots+\omega_{i_n})t\}, \tag{4.4}$$

由高阶传递函数的对称性,我们可以得到

$$H_n(j\omega_1,j\omega_2,\cdots,j\omega_n)=\frac{1}{n!}\left\{\exp\left[j\left(\sum_1^n\omega_i\right)t\right]\right\} \tag{4.5}$$

的系数．进一步令 $\omega_i=\omega\quad(i=1,2,\cdots,n)$，则(4.5)式变为：

$$H_n(j\omega,j\omega,\cdots,j\omega)=\frac{1}{n!}A_n. \tag{4.6}$$

式中 A_n 表示输出 $y(t)$ 中 $\exp(jn\omega t)$ 项的系数，也即频率为 $n\omega_{i_n}$ 的 n 阶输出分量的幅值．我们知道，非线性 n 阶传递函数 $H_n(s_1,s_2,\cdots,s_n)$ 是系统参数的符号函数，这样用频谱分析即可得到 A_n．(4.6)式称为故障仿真方程．在这里，只需利用一般的方法[7,1)]求得系统的各阶传递函数，然后再施加输入信号并作频谱分析，即可得到仿真方程，而并不需列写系统的分析方程，更重要的是上述程序可对任一系统或子系统以至元件级施行之．

2. 决策算法

在这里，根据上面给出的故障仿真方程(4.6)，我们提出一种不需要求解故障方程的决策性算法，这样就避免了求解故障方程的巨大困难．我们有如下算法：

(1) 分解系统成一组子系统；

(2) 求出每一子系统的各阶非线性传递函数；

(3) 对每一子系统做频谱分析；

(4) 对每一子系统，检验故障仿真方程(4.6)是否成立，如果方程满足等式，则子系统无故障，反之，为故障子系统；

(5) 重新回到(1)，再对故障子系统做新的划分，重复(2)—(4)步骤，直到检查出最小故障集合．对于线性子系统，可用多频输入法检验之．

应当指出的是，上述算法是与求解故障方程方法(亦称参数识别法)完全不同的决策性方法．我们的方法克服了对所有参数求解故障方程的困难．即使需要求解系统参数，其工作量也是很小的．决策性方法适于系统故障的证明和隔离．

五、可诊断性研究

上述讨论都是通过非线性传递函数 $H_n(s_1,s_2,\cdots,s_n)(n=1,2,\cdots)$ 而进行的，所做的唯一假设是非线性电路或系统的元件存在收敛的 Volterra 级数，而对任一时域特性解析的非线性元件都存在收敛的 Volterra 描述，这样也就保证了系统的可诊断性．任意非线性电路或系统的非线性传递函数可用递归法[7]、拓扑法和 I/O 描述法1)求出．下面我们给出本文方法的正确性——可诊断性的证明．

引理 1.　设输入函数 x 在其定义区间上做有界变化，则

$$\Big(\sum_{K_1+\cdots+K_n=m}\Big)|\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)|<\infty, \tag{5.1}$$

式中 $\hat{x}(K_1)$ 为 $x(K_1)$ 的幅值．

引理 2.　设有

$$H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)=O\left(\frac{1}{K_1\cdots K_n}\right), \tag{5.2}$$

则

1) 焦李成，西安交通大学硕士论文，1984.

$$\left(\sum_{K_1+\cdots+K_n=m}\right)\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n) \tag{5.3}$$

绝对收敛.

证. 设 $H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)=O\left(\frac{1}{K_1\cdots K_n}\right)$, 则

$$[H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)]_{K_i\in N}\in l^2(N^n). \tag{5.4}$$

因 $\hat{x}\in l^2$, $[\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)]_{K_i\in N}\in l^2(N^n)$ 具有范数 $\|\hat{x}\|_2^n$, 使

$$\begin{aligned}&\left(\sum_{K_1+\cdots+K_n=m}\right)|\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)|\\&\leqslant\sum_{K_1,\cdots,K_n}|\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)|\\&\leqslant\|\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)\|_2\|H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)\|_2\\&=\|\hat{x}\|_2^n\|H_n(j\omega K_1,\cdots,j\omega K_n)\|_2.\end{aligned} \tag{5.5}$$

证毕.

定理 5.1. 设 $\|x\|<P$, 且

输入 x 在其定义区间上作有界变化或

$$H_n(j\omega K_1,j\omega K_2,\cdots,j\omega K_n)=O\left(\frac{1}{K_1\cdots K_n}\right), \tag{5.6}$$

则系统输出

$$\begin{aligned}\hat{y}(m)=\sum_{n=1}^{\infty}\left(\sum_{K_1+\cdots+K_n=m}\right)&\hat{x}(K_1)\cdots\hat{x}(K_n)\\&\cdot H_n(j\omega K_1,j\omega K_2,\cdots,j\omega K_n)\end{aligned} \tag{5.7}$$

有界.

利用引理 1 与引理 2 即可证明定理 5.1 保证了本文方法的正确性, 即保证了系统的可诊断性.

需要强调指出的是,非线性系统的等效受到严格的限制,对于不同拓扑结构, 其高阶传递函数是唯一的. 这个看来是困难的根源的特点却给系统的故障诊断带来了方便. 对此, 我们给出如下定理:

定理 5.2. (Volterra 级数唯一性定理)

设N和M是分别具有核 h_n 和 g_n 的 Volterra 算子,当且仅当 Sym h_n = Symg_n (对所有 n) 时有

$$N=M. \tag{5.7}$$

证. 必要性是很显然的. 为证充分性,必须证明测度 Sym h_n 可由N确定之. 测度 $\mu\in B^n$ 可由 R^n 内 n 重积分确定,即可由下述积分确定:

$$\iint\cdots\int\mu(\tau_1,\cdots,\tau_n)x_1(-\tau_1)\cdots x_n(-\tau_n)d\tau_1\cdots d\tau_n. \tag{5.8}$$

式中每一 x_i 是一区间的特性函数. 利用 Volterra 级数算子的 Frechet 导数即

$$D^{(K)}N(x_0)(x_1,\cdots,x_K)(t)=\sum_{n=K}^{\infty}n(n-1)\cdots(n-K+1)$$

$$\cdot \iint \cdots \int \mathrm{Sym} h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n) \prod_{i=1}^{K} x_i(t-\tau_i) d\tau_i$$

$$\cdot \prod_{i=K+1}^{n} x_0(t-\tau_i) d\tau_i, \tag{5.9}$$

可得

$$\iint \cdots \int \mathrm{Sym} h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n) x_1(-\tau_1) \cdots x_n(-\tau_n) d\tau_1 \cdots d\tau_n$$

$$= \frac{1}{n!} D^{(n)} N(x_1, \cdots, x_n)(0). \tag{5.10}$$

因此，N确定了(5.8)式中的积分，即有测度 $\mathrm{Sym}h_n$. (5.8) 式可进一步写成

$$\iint \cdots \int \mathrm{Sym} h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n) x_1(-\tau_1) \cdots x_n(-\tau_n) d\tau_1 \cdots d\tau_n$$

$$= \frac{1}{n!} \left[\frac{2}{2\alpha_1 \cdots 2\alpha_n} \right]_{\alpha=0} N\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_i \right)(0), \tag{5.11}$$

从而充分性得证. 证毕.

上述定理保证了诊断结果的唯一性，也就充分保证了诊断结果的可靠性，所以我们的方法在一定程度上解决了故障诊断的 Robustness 问题.

六、结　论

(1) 本文的研究为非线性系统的故障诊断提供了一新的理论基础. 同时，本文提出的节点电压故障诊断法和决策理论为非线性电路和系统提供了两种新方法，由于采用了递推程序和方法，这就大大地减少了故障诊断的工作量，同时因采用决策算法而提高了故障诊断的可靠性. 实际上，这已由本文发展的故障诊断理论所保证.

(2) 本文提出的理论和方法是完全解析的频域中的符号法，与已有的方法不同，它适于任意阶动态非线性系统的硬故障与软故障的诊断及故障证明和故障子系统的隔离，同时又是一SAT 方法，这也是 VLSI 故障诊断理论发展的方向所在，在一定程度上解决了故障诊断的 Robustness 问题，这也是已有方法和理论所不及的.

参　考　文　献

[1] Berkowitz, R. S., *IRE Trans. Circuit Theory*, 9(1962), 24—29.
[2] 吴成禧，国防科技大学学报，1984,4.
[3] Jiao, L. C., *Proc, IEEE Int. Symp. CAS., Sar. Jose*, 1986, 1241—1244.
[4] Wu, C. C. et al., *IEEE Trans. On CAS*, 29 (1982), 277—284.
[5] Burstall, R. M. and Goguen, J. A., *Proc. 5th Int. CSymp. CAS.*, Montreal, 1984, 660—663.
[6] Volterra, V., *Theory of Functional and of Integreal and Integradifferential Equations*, Douer, New York, 1959.
[7] Chua, L. O. and Ng, C. Y., *IEE J. Electronic Circuits and Systems*, Vol. 3, 1979, 165—185.