

基于状态空间模型的线性模拟电路 BIST 方法^{*}

杨拥民 温熙森 胡政

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 本文针对线性模拟电路,提出了一种基于系统状态变量的 BIST 方法。该方法将系统的状态、状态变化率及输入信号进行加权求和,以此加权和作为系统的故障检测输出。将其值的大小作为判别依据,可以区分系统的正常与异常状态。此方法具有简单可靠,故障覆盖率高的特点。

关键词 状态, BIST, 故障检测

分类号 TN407

A BIST Method for Linear Analog Circuits Based on State Space Model

Yang Yongmin Wen Xisen Hu Zheng

(Department of Mechatronics Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract For the linear analog circuits, a BIST method based on the system's state variables is presented. This method adds up the state variables, their variation speed and input signal by weights, uses the sum as the fault detection output of the system. The normal situation and abnormal situation can be distinguished by the magnitude of the output. This method is simple and reliable, and has a high fault coverage.

Key Words state, BIST, fault detection

数字电路的故障检测与诊断已得到了广泛的研究,形成了成熟的理论与方法。然而,虽然现代工业使得模拟电路越来越复杂,对模拟电路的可靠性要求也越来越高,其故障检测与诊断却仍没有较为成熟的方法。以往的工作主要集中于对电路的特性如阻抗特性等^[1]进行测试,虽然线性系统的故障检测与诊断理论已得到一定的发展,但各种方法都是在系统原有结构的基础上提取信号进行分析^[2],实现起来较为复杂。如果将 BIST 的思想与线性系统理论相结合,运用到线性模拟电路的故障检测中,将得到新的有效的途径。本

* 5 国防预研基金资助项目

1997 年 3 月 19 日收稿

文提出了一个基于状态空间模型的 BIST 方法, 在系统检测时, 输入一标准正弦信号, 并对输入信号、状态及其变化率取加权和。选择适当的权系数, 可使得该加权和在系统正常时输出接近于零, 在系统异常时产生一定的输出, 故可以之作为系统的故障指示。仿真结果表明, 该方法具有较快的检测速度及高故障覆盖率。

1 系统原理模型

以如下状态空间方程表示的单输入单输出、线性定常的 n 维模拟系统为对象:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ y &= CX \end{aligned} \quad (1)$$

按如下框图设计 BIST 系统:

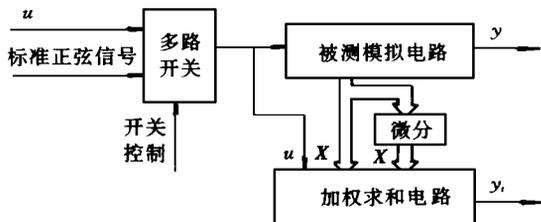


图 1 BIST 系统原理框图

系统前端有一多路开关。自检时, 输入一标准正弦信号, 同时对输入信号、状态及其变化率取加权和。

定理 对于(1)式所示单输入单输出线性定常系统, 总能够找到 $1 \times n$ 维加权矩阵 M 、 N 及标量 f , 使得:

$$y_i = M\dot{X} + NX + fu = 0$$

证明 将系统状态方程代入, 得:

$$\begin{aligned} y_i &= M\dot{X} + NX + fu = (MA + N)X + MBu + fu \\ &= (MA + N)X + (MB + f)u \end{aligned} \quad (2)$$

若令

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}$$

则有

$$MA + N = m_1\alpha_1 + m_2\alpha_2 + \dots + m_n\alpha_n + N$$

可任意取定 n 个非零系数 $m_1 \sim m_n$ 。并令 $N = -(m_1\alpha_1 + m_2\alpha_2 + \dots + m_n\alpha_n)$, 有:

$$MA + N = 0$$

并取 $f = -MB$, 则有:

$$y_t = (MA + N)X + (MB + f)u = 0$$

证毕。

当系统各参数均正常时, BIST 输出 y_t 保持为零。当电路出现故障时, y_t 将不为零。故 y_t 作为 X 、 \dot{X} 及 u 的校验和, 可用为故障监测输出。

2 权矩阵参数的确定

令 $A_t = A$ 、 $B_t = B$

$$C_t = MA + N, D_t = MB + f$$

校验和可视为如下系统的输出:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A_t X + B_t u \\ y_t &= C_t X + D_t u \end{aligned} \quad (3)$$

此系统和原系统有相同的输入-状态特性, 仅输出特性不同。

设 a_{ij} 变化 Δa_{ij} , b_i 变化 Δb_i , 得:

$$y_t = m_i \Delta a_{ij} x_j + \Delta b_i m_i u$$

令故障阈值为 P , 即 $y_t \geq P$ 时, 认为出现故障。同时令任一参数相对变化超过 γ , 认为系统出现故障。这里, γ 取信号幅值。对于 B 阵的变化, 取 $\gamma b_i m_i u = P$, 得

$$m_i^b = \frac{P}{\gamma b_i u} \quad (4)$$

对于 A 阵的变化, 取

$$m_i^a = \frac{P}{\gamma a_{ij} x_j} \quad (5)$$

m_i^b 、 m_i^a 分别为输出对于 A_t 、 B_t 阵第 i 行参数变化的临界灵敏度。 x_j 的大小可根据系统运行状况进行近似估算。矩阵 M 中各元素的值越大, 故障监测输出 y_t 对状态空间矩阵相应参数的变化越敏感; 但权系数也不能太大, 否则会产生较高的误判率。由于 m_i 同时决定故障监测输出对于 A 矩阵参数和 B 矩阵参数变化的灵敏度, 故要适当地选取标准信号的频率与幅值, 使得 u 与 x_j 具有适当的比例关系, 使得 $m_i^a \approx m_i^b$, 此时, 可取 $m_i = m_i^a \approx m_i^b$ 。若实际系统满足不了上述要求, 要尽量使得 m_i^a 接近 m_i^b , 一般可取 $m_i = \max(m_i^a, m_i^b)$, 此时, 故障判决时要具体参照检测输出对于参数变化的灵敏度进行。

3 实例

在这里, 我们选择一个双二次滤波器作为研究对象, 如图 2 所示。

我们可以建立系统的状态空间方程:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C} & -\frac{1}{R_3 C} \\ \frac{R_4}{R_{41} R_{42} C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{CR_1} \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{R_{41}}{R_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

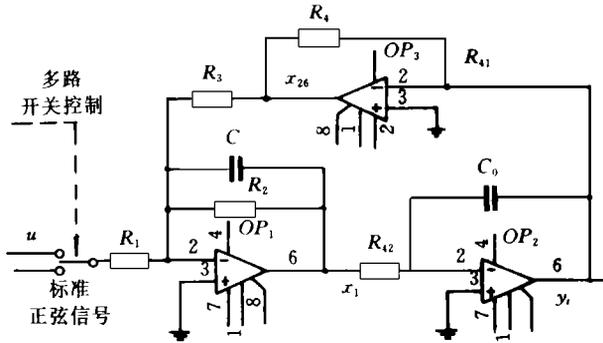


图2 双二次滤波器电路

一般正常工作的情况下,有 $R_4 = R_{41} = R_{42}$, $C = C_0$ 。我们以截频为 10kHz 巴特沃斯型双二次滤波器为对象,取:

$$\begin{cases} R_1 = R_3 = R_4 = 1.592\text{k}\Omega \\ R_2 = 1.125\text{k}\Omega \\ C = 0.01\mu\text{F} \end{cases}$$

有:

$$A = \begin{bmatrix} -88889 & -62814 \\ 62814 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -62814 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad -1]$$

输入一正弦信号 $u = 10\sin(\omega t)$, 由电路图知,对于所选输入信号,有:

$$\begin{matrix} x_2 & u & 10 \\ x_1 & \omega R_{42} C_0 u & 0.0001592\omega \end{matrix}$$

为保证状态量与输入量幅值接近,取输入信号频率为 $\omega = 10000\pi$

此时, $x_1 = 5.0$, 取 $P = 0.5\text{V}$, $Y = 0.1$

按(4)、(5)式,取

$$m_1 = \max \left[\frac{0.5}{0.1b_1 u}, \frac{0.5}{0.1a_{1j} x_j} \right] = 1.125 \times 10^{-5}$$

$$m_2 = \frac{0.5}{0.1a_{21} x_1} = 1.59 \times 10^{-5}$$

$$n_1 = -m_1 a_{11} - m_2 a_{21} = 0, n_2 = -m_1 a_{12} = 0.7076, f = -m_1 b_1 = 0.7076$$

我们进行仿真,观察其校验和输出。当系统工作正常时,校验和输出近似为零,如图3所示。

当 R_2 由 $1.125\text{k}\Omega$ 变为原值的 0.9 倍时,校验和输出端会产生较大的输出,幅值为 $y_i(t) = 0.5029\text{V}$,如图4所示。

对其它情况进行仿真,结果表明该系统的故障覆盖率较高,如下表:

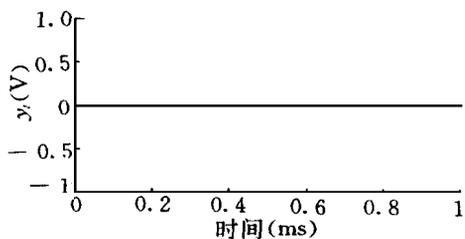


图 3 系统正常情况下校验和输出

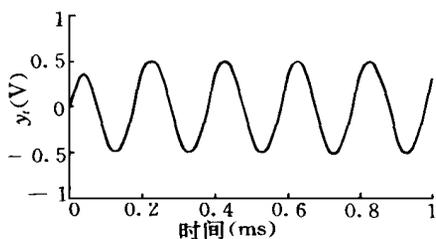


图 4 系统异常情况下校验和的输出

表 1 故障覆盖率

元件	正常值	变化值	输出信号幅值(V)
R_1	1.592k Ω	- 159.2 Ω	0.7852
R_2	1.125k Ω	- 112.5 Ω	0.5092
R_3	1.592k Ω	- 159.2 Ω	0.6974
R_4	1.592k Ω	- 159.2 Ω	0.5124
R_{41}	1.592k Ω	- 159.2 Ω	0.4938
R_{42}	1.592k Ω	- 159.2 Ω	0.4938
C	0.01 μF	+ 0.01 μF	2.0133
C_o	0.01 μF	- 0.001 μF	0.4938

4 结论

可以看到,交流输入下对系统状态及其变化率进行校验和的方法有较高的覆盖率。另外,将控制系统故障检测与诊断理论和 BIST 的方法相结合,为模拟电路的故障监测与诊断提供了一种具有广泛前景的思想和较为有效的技术手段。本文提出的方法关键在于必须选取适当的权矩阵。如果故障检测输出对各参数变化的灵敏度相差很大,将给故障判决造成困难,这有待于进一步的研究。

参考文献

- 1 Balivada A. Analog Testing with Time Response Parameters. IEEE Design & Test of Computers, 1996, 13(2): 18 ~ 24
- 2 Sider M. Implementation of Failure-Detection Systems with Adaptive Observers. Proc. of American Control Conference, 1983: 1205 ~ 1211

(责任编辑 张静)