

文章编号: 1001-0920(2013)11-1713-05

## 基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法

韩 涵, 王厚军, 龙 兵, 刘 震

(电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 提出一种基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法. 根据被测电路的拓扑结构进行可测性分析, 利用测试矩阵确定规范模糊组, 从而得到单故障假设下的可分潜在故障元件. 将马氏距离根据模拟电路的特性作出改进, 并应用于模拟电路潜在故障元件的诊断. 利用测点特征值的改进马氏距离对潜在元件进行划分, 减少可疑故障元件的类别, 在诊断分类时达到提高速度的效果. 实验表明, 所提出的方法对模拟电路软故障诊断速度较快, 具有较好的模拟电路故障诊断测试效果.

**关键词:** 模拟电路; 故障诊断; 可测性; 马氏距离

**中图分类号:** TP181

**文献标志码:** A

## Method for analog circuit fault diagnosis based on improved Mahalanobis distance

HAN Han, WANG Hou-jun, LONG Bing, LIU Zhen

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China. Correspondent: HAN Han, E-mail: han3260326@126.com)

**Abstract:** A method based on improved Mahalanobis distance according to the characteristics of analog circuits is proposed for fault diagnosis. Firstly, the circuit testability is analyzed based on the topology of the test circuit and the ambiguity groups are determined by using test matrix. Then the separable potential faulty components under the assumption of single fault are identified. Finally, improved Mahalanobis distance of the feature values of the test points is applied to classify the suspicious components, resulting in fewer classes and faster speed for fault classifying process. Simulation results show that the proposed method can improve the fault diagnosis rate and is effective for analog circuit fault diagnosis and classification.

**Key words:** analog circuits; fault diagnosis; testability; Mahalanobis distance

### 0 引 言

随着集成电路的高速发展, 数模混合电路集成设计逐渐成为主流. 在混合电路检测中, 模拟电路部分测试成本占总测试成本的95%(占制造成本的30%以上), 测试时间占80%以上<sup>[1]</sup>, 可见提高模拟电路的测试和故障诊断水平对于产品可靠性的提高和生产成本的降低具有重要作用. 由于模拟电路故障的多样性和元件参数的离散性与非线性的存在, 对模拟电路的故障检测和准确定位一直都是热点和难点. 基于传统的检测无论从理论还是方法上都尚未完善. 目前模糊理论、小波理论和神经网络等相继被用于模拟电路的检测, 虽然比传统方法的检测效果有所提高, 但在检

测时间、寻优过程、检测的准确性和可靠性上仍有待进一步提高. 近年来, 大规模集成电路的出现和电路可及节点的减少, 对模拟电路的测试和故障诊断提出了更高、更新的要求<sup>[2-4]</sup>.

马氏距离<sup>[5]</sup>通过计算数据样本集之间的协方差距离来度量两个样本之间的相似度, 马氏距离越小表明两个样本之间的相似度越大. 因为马氏距离不受量纲的影响, 独立于测量尺度, 能够考虑到各种特性之间的联系, 并且可以排除变量之间相关性的干扰, 所以相比传统的欧氏距离有很多优势.

本文针对模拟电路提出一种故障诊断方法. 将马氏距离引入模拟电路故障检测中, 并根据模拟电路的

收稿日期: 2012-07-09; 修回日期: 2012-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60934002, 61271035, 61201009, 61071029); 国防科学研究基金项目(9140A17060-411DZ0205); 电子科技大学 DPHEC 项目(20100185110004).

作者简介: 韩涵(1980-), 男, 博士生, 从事故障检测、可测性分析的研究; 王厚军(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 从事检测仪器与自动化装置、信号传输与测试等研究.

特性作出改进. 首先对被测电路进行可测性分析, 依据测试矩阵确定模糊组关系, 确定单故障假设下的可分潜在故障元件, 利用测点特征值的改进马氏距离对可疑元件进行划分, 从而尽可能减少故障的可能类别, 提高故障检测的速度.

## 1 马氏距离

### 1.1 基本马氏距离

对于一个均值为  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ , 协方差矩阵为  $\Sigma$  的多变量向量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 其马氏距离为

$$M_D(x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)}. \quad (1)$$

如果协方差矩阵为单位矩阵, 则马氏距离简化为欧氏距离. 但马氏距离的缺点在于它夸大了变化微小的变量的作用, 微小变量除了使向量值自身产生偏移, 也会改变均值向量值, 从而对其他各向量的马氏距离计算产生偏差, 影响故障诊断的准确性.

### 1.2 改进马氏距离

#### 1.2.1 $\mu$ 值的改进

在马氏距离公式中, 均值  $\mu$  表示样本集的均值向量, 本文将马氏距离应用到电子电路故障检测中并作出改进: 用电子电路正常运行时的可测点基准电压值  $\mu'$  替代样本集的向量均值  $\mu$ , 显然  $\mu'$  不受向量变化影响, 是独立的.

如图 1 所示, 一个线性时不变网络  $N$ , 受独立电源  $\mu_s$  激励,  $V_1$  和  $V_2$  分别为测点  $t_1$  和  $t_2$  上的电压值.  $x_j$  是无源元件, 其压降为  $\mu_j$ . 依据叠加定理<sup>[6-7]</sup>,  $V_1$  和  $V_2$  的关系为

$$\begin{aligned} k_{(2,1)j} &= \frac{V_{2j} - V_{20}}{V_{1j} - V_{10}} \Leftrightarrow \frac{V_{1j} - V_{10}}{k_{1j}} = \frac{V_{2j} - V_{20}}{k_{2j}}, \\ k_{(2,1)j} &= \frac{k_{2j}}{k_{1j}}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $V_{10}$  和  $V_{20}$  为电路无故障时测点  $t_1$  和  $t_2$  的电压值;  $V_{1j}$  和  $V_{2j}$  为  $x_j$  故障时测点  $t_1$  和  $t_2$  的电压值;  $k_{1j}$  和  $k_{2j}$  为常数,  $k_{(2,1)j}$  为测点  $t_1$  和  $t_2$  电压值对于  $x_j$  的斜率特征值, 其值为固定值, 与  $x_j$  的参数大小无关. 显然, 线性时不变网络  $N$  中的其他所有元件的斜率特征曲线也会通过点  $(V_{10}, V_{20})$ . 类似于式 (2), 在有  $n$  个测点的情况下可以得到

$$\frac{V_{1j} - V_{10}}{k_{1j}} = \frac{V_{2j} - V_{20}}{k_{2j}} = \dots = \frac{V_{nj} - V_{n0}}{k_{nj}}. \quad (3)$$

其中:  $V_{i0} (i = 1, 2, \dots, n)$  为所有测点  $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$  在电路无故障状态下的电压值,  $k_{ij} (i = 1, 2, \dots, n)$  为常数. 因此, 使用各个测点无故障时的电压值  $\mu' = (V_{10}, V_{20}, \dots, V_{n0})$  具有实际的物理意义, 比采用电路容差范围内数据集的均值  $\mu$  更适用于电子电路马氏距离的计算. 与文献 [8-9] 相比, 采用具有实际物理意

义的标称值替代数据集均值, 更能反应电路的实际情况.

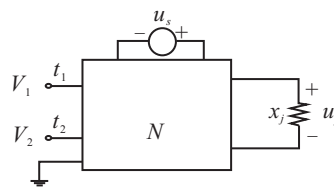


图 1 线性网络  $N$

#### 1.2.2 权值的引入

为了减少微小变化量对向量集的影响, 本文提出了加权的处理方式, 即将马氏距离公式改进为

$$M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T W \Sigma^{-1} W (x - \mu)}. \quad (4)$$

其中  $W$  为加入的权重值矩阵, 其值为

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & w_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$w_i = m_i^2 / \sum_{i=1}^n m_i^2, \quad (6)$$

$m_i = |x_i - \mu_i'| / \mu_i'$  为第  $i$  个特征量的电压值灵敏度.

权值的引入在数值上减小了微小变量的比重, 根据电路测点对不同电路元件的灵敏度差异, 进一步加强主导变化量的作用. 从电路性质上看, 不同的电子器件在产生相同的数值比例偏移时, 在同一测点所产生的变化一般而言存在差异, 所得到的马氏距离也不一致. 权值的引入加大了不同元件偏移所导致的测点斜率特征量变化的差异, 有助于对偏移元件的定位工作. 以图 2 的分压电路为例, 当  $R_1, R_2, R_3$  分别产生  $-10\% \sim 10\%$  的数值偏移时, 每变化 2% 进行一次测量, 得到  $t_1$  和  $t_2$  的电压值如表 1 所示.

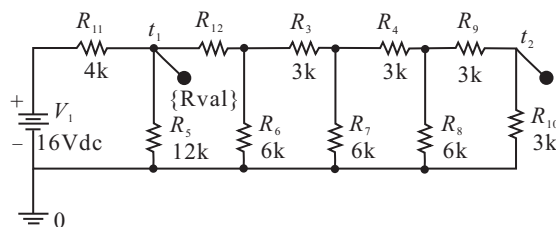


图 2 分压电路

由表 1 可见, 不同元件在相同的百分比数值偏移时, 一般在测点上引起的偏差斜率值是不同的, 代入马氏距离公式后得到的距离值不同, 随着偏移量增加, 改进马氏距离的变化也不同. 因此在文献 [8-9] 中, 将所有元件的故障判断规定为同一个马氏距离值的方法存在缺陷. 本文对不同的元件分别采用与之对应的改进马氏距离进行判断, 依据电路斜率特征、权重值和改进马氏距离值对元件作出诊断.

表 1  $R_1, R_2, R_3$  数值偏移时的电压分布

测点		偏差量				
		-10%	-8%	-6%	-4%	-2%
$R_1$	$t_1$	8.421 1	8.333 3	8.247 4	8.163 3	0.080 8
	$t_2$	0.526 3	0.520 8	0.515 5	0.510 2	0.505 1
$R_2$	$t_1$	7.862 1	7.890 4	7.918 4	7.945 9	7.973 2
	$t_2$	0.517 2	0.513 7	0.510 2	0.506 8	0.503 4
$R_3$	$t_1$	7.965 5	7.972 6	7.979 6	7.986 5	7.993 3
	$t_2$	0.517 2	0.513 7	0.510 2	0.506 8	0.503 4

测点		偏差量				
		2%	4%	6%	8%	10%
$R_1$	$t_1$	7.920 8	7.843 1	7.767 0	7.692 3	7.619 0
	$t_2$	0.495 0	0.490 2	0.485 4	0.480 8	0.476 2
$R_2$	$t_1$	8.026 5	8.052 6	8.078 4	8.103 9	8.129 0
	$t_2$	0.496 7	0.493 4	0.490 2	0.487 0	0.483 9
$R_3$	$t_1$	8.006 6	8.013 2	8.019 6	8.026 0	8.032 3
	$t_2$	0.496 7	0.493 4	0.490 2	0.487 0	0.483 9

## 2 可疑元件划分和故障定位

设潜在故障元件的标称值为  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 在  $\pm 5\% X_i$  的容差范围内元件值为正常; 在  $\pm(5 - 25)\% X_i$  偏移时, 认为元件存在软故障. 计算所有潜在故障元件在  $\pm 5\% X_i$  偏移时的改进马氏距离  $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 并以  $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$  作为衡量元件  $i$  是否可能存在故障的依据.  $M_{\min}$  是  $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$  中的最小值, 作为马氏距离判断标准的阈值下界;  $M_{\max}$  是  $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$  中的最大值, 作为马氏距离判断标准的阈值上界. 当实际电路采集到特征值所计算得到的改进马氏距离  $M_j$  低于阈值下界  $M_{\min}$  时无可疑元件, 电路无故障; 当距离值  $M_j$  高于阈值上界  $M_{\max}$  时, 电路必然存在故障, 所有潜在故障元件都认为是可疑元件; 当距离值在阈值范围内, 可疑元件包括所有  $M_j > M_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的元件. 确认这些可疑元件是否存在故障即可判断整个电路运行情况, 可

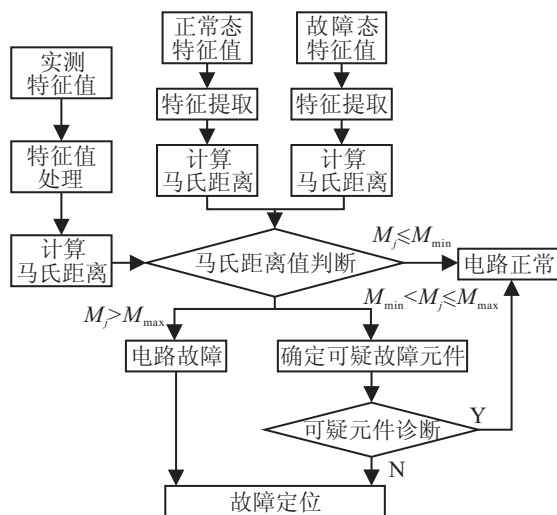


图 3 马氏距离故障诊断流程

以有效减少检测代价.

电路运行时, 将电路各潜在故障元件工作状态下各特征值与基准值之间的改进马氏距离作为衡量该可测元件故障的主要参数, 建立类似故障字典的元件参数偏移量诊断表. 当电路发生故障时, 对故障潜在元件进行划分, 并对当前的改进马氏距离与建立好的马氏距离表中的各元件距离值相比较, 确定故障可疑元件, 进而实现故障诊断. 具体流程如图 3 所示.

## 3 测试矩阵与模糊组

潜在故障元件集是马氏距离故障诊断的重要条件, 准确获得被测电路的潜在故障元件集十分必要. 对被测电路而言, 在有限测点信息和其本身电路拓扑结构关系的影响下, 不是所有的元件都能被单独检测, 因此对被测电路进行可测性分析十分重要. 依据可测矩阵确定所有元件的模糊组划分, 进而确定电路的可测元件, 将这些元件作为电路的潜在故障元件集.

### 3.1 测试矩阵的确定

在一个被测电路中, 由于元件与电路的拓扑结构已经确定, 可及测点的测量值与该电路激励输入之间的传递函数关系也是惟一确定的. 利用传递函数关系建立被测电路的诊断方程组是一种有效的手段. Liberatore 等<sup>[10]</sup>提出了一种新的可测性分析方法, 设可及测点的传函关系为

$$h_i(s, p) = \frac{a_0(p) + a_1(p)s + \dots + a_n(p)s^n}{b_0(p) + b_1(p)s + \dots + b_{m-1}(p)s^{m-1} + s^m} \quad (7)$$

其中:  $h_i$  为第  $i$  个可测节点,  $P = [p_1, p_2, \dots, p_q]^T$  为预先认定的  $q$  个潜在故障元件,  $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$  和  $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$  分别为传函分子分母与  $s$  的阶次相对应的系数.  $i$  节点的测试矩阵  $B_i$  表示为

$$B_i = \begin{bmatrix} \partial a_o / \partial p_1 & \partial a_o / \partial p_2 & \dots & \partial a_o / \partial p_q \\ \partial a_1 / \partial p_1 & \partial a_1 / \partial p_2 & \dots & \partial a_1 / \partial p_q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial a_n / \partial p_1 & \partial a_n / \partial p_2 & \dots & \partial a_n / \partial p_q \\ \partial b_o / \partial p_1 & \partial b_o / \partial p_2 & \dots & \partial b_o / \partial p_q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial b_{m-1} / \partial p_1 & \partial b_{m-1} / \partial p_2 & \dots & \partial b_{m-1} / \partial p_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

电路测试矩阵  $B$  即为所有测点测试矩阵的集合, 为

$$B = [B_1, B_2, \dots, B_n]^T, \quad (9)$$

其中  $n$  为所有的  $n$  个测点.

### 3.2 规范模糊组与潜在故障元件集的获取

Stenbakken 等<sup>[11]</sup>提出了 QR 分解, 用于确定规范模糊组, Janusz 等<sup>[12]</sup>对低可测性电路模糊组的获取也采用 QR 进行分析, 但 QR 分解容易产生舍入误差.

Stefano 等<sup>[13]</sup>认为奇异值分解 SVD 能有效克服 QR 的舍入误差, 本文采用奇异值分解法对电路的规范模糊组进行识别.

在获取规范模糊组后, 被测电路的潜在故障元件集即可确定.  $N$  阶规范模糊组中的元件是  $N - 2$  可分的, 在单故障假设下, 3 阶以上的规范模糊组可对故障元件实现定位, 2 阶规范模糊组只能假设其中一个元件故障而另一个非故障才能实现诊断<sup>[14]</sup>.

#### 4 实例分析

测试电路如图 4 所示. 2 阶 thomas 滤波器, 其标称值为:  $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 100\text{ nF}$ . 设元件的容差为  $\pm 5\%$ , 且假设该电路中只发生单故障, 故障时的元件值在  $[0.75, 0.95]X_n \cup [1.05, 1.25]X_n$  范围内变化,  $X_n$  为元件标称值,  $V_a, V_b, V_c$  为所选测点. 根据电路幅频特性, 该电路  $-3\text{ dB}$  截止频率在  $1.5\text{ kHz}$  左右, 所以实验时选择激励信号源的频率为  $1.5\text{ kHz}$ .

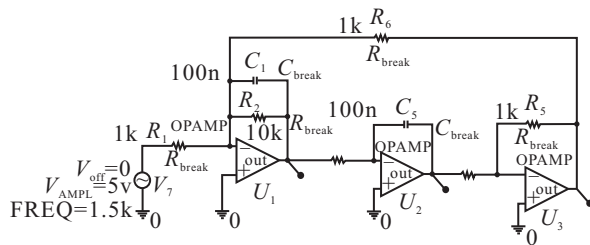


图 4 2 阶托马斯滤波电路

图 5 和图 6 分别是潜在故障元件在  $\pm[1 \sim 25]\%$  变化的原始马氏距离和改进马氏距离. 可见, 未加权马氏距离对参数特征变化的灵敏度较低, 虽然也能用

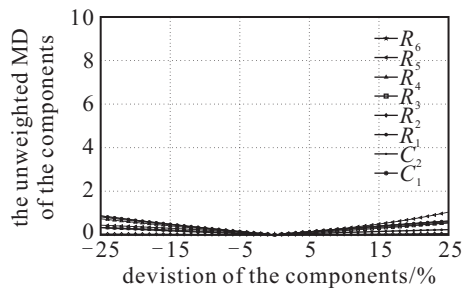


图 5 各元件未加权的马氏距离

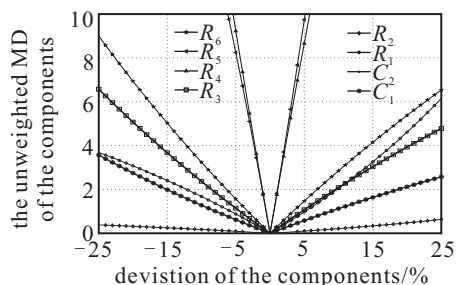


图 6 各元件加权后的改进马氏距离

于对元件健康状态的估计, 但精确度较差; 参数特征值的微小变化所对应的改进马氏距离有明显的变化, 可以对电路元件的工作状态作出较为准确的评估.

#### 4.1 故障集分析

由电路的拓扑结构可以得到测点  $V_a, V_b, V_c$  与输入值的传函关系

$$h_a(s) = \frac{-R_2 R_3 R_4 R_6 C_2 S}{R_1 R_2 R_3 R_4 R_6 C_1 C_2 s^2 + R_1 R_3 R_4 R_6 C_2 s^2 s + R_1 R_2 R_5} \quad (10)$$

$$h_b(s) = \frac{R_2 R_4 R_6}{R_1 R_2 R_3 R_4 R_6 C_1 C_2 s^2 + R_1 R_3 R_4 R_6 C_2 s^2 s + R_1 R_2 R_5} \quad (11)$$

$$h_c(s) = \frac{-R_2 R_5 R_6}{R_1 R_2 R_3 R_4 R_6 C_1 C_2 s^2 + R_1 R_3 R_4 R_6 C_2 s^2 s + R_1 R_2 R_5} \quad (12)$$

由于电路元件的取值与可测性无关, 不妨定义元件的值为 1, 由此得到测试矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

对于测试矩阵 (13), 采用 SVD 分解法可以得到电路的规范模糊组为  $[R_4, R_5]$ ,  $[R_3, C_2]$  和  $[R_1, R_2, R_6, C_1]$ . 由于是单故障假设, 2 阶规范模糊组整体可测, 由图 6 可见,  $R_3$  和  $C_2$  的改进马氏距离是重合的,  $R_4$  和  $R_5$  的改进马氏距离是镜像重合的. 4 阶规范模糊组中发生单故障是可分的, 因为其中某一个元件故障产生的变化值必须在同组中其他 3 个元件的值同时变化时才有较低的几率相抵消, 这在单故障假设下是不可能发生的, 所以假设  $R_3$  和  $R_4$  不发生故障, 该电路潜在故障元件为  $R_5, C_2$  和  $R_1, R_2, R_6, C_1$ .

#### 4.2 可疑元件分析

根据实验数据得到的各个潜在故障元件的改进马氏距离  $M_i$  与电路的  $M_{\min}$  和  $M_{\max}$  如表 2 所示. 当  $M_j \leq 0.0910$  时, 电路无故障; 当  $M_j > 8.2442$  时, 电路故障; 当  $0.0910 < M_j \leq 8.2442$  时, 电路可疑故障元件的划分与在当前划分下的故障诊断时间如表 3 所示.

表 2 各元件故障时的改进马氏距离临界值

	$M_i$	$M_{\min}$	$M_{\max}$
$C_1$	0.5793		
$C_2$	1.0735		
$R_1$	0.8776	0.0910	8.2442
$R_2$	0.0910		
$R_5$	8.2442		
$R_6$	1.4960		

表 3 改进马氏距离值、可疑元件划分和诊断时间

改进马氏距离范围	可疑元件	平均测试时间/ms	准确率/%
1 (0.0910, 0.5793]	$R_2$	16.47	100
2 (0.5793, 0.8776]	$R_2 C_1$	17.91	99.42
3 (0.8776, 1.0735]	$R_1 R_2 C_1$	18.74	98.57
4 (1.0735, 1.4690]	$R_1 R_2 C_1 C_2$	20.80	98.85
5 (1.4690, 8.2442]	$R_1 R_2 R_6 C_1 C_2$	22.53	97.85
6 (8.2442, $+\infty$ )	$R_1 R_2 R_5 R_6 C_1 C_2$	24.73	97.14

### 4.3 故障诊断

对电路进行蒙特卡洛仿真实验, 从  $V_a, V_b, V_c$  三个测点采集响应值, 容差范围内正常运行时进行 200 次仿真, 各元件在范围  $[0.75, 0.95]X_n \cup [1.05, 1.25]X_n$  内分别进行多次蒙特卡洛仿真, 每种故障样本选 100 组作为训练数据. 剩下的故障样本分别计算其改进马氏距离值, 在表 3 所示的改进马氏距离的范围内各选出 200 组数据作为测试样本. 采用支持向量机一对一方式构建多类分类器, 惩罚参数  $c$  设为 4, 核函数为径向基核函数, 参数  $g$  设为 32. 2 阶托马斯滤波电路的测试时间和诊断准确率如表 3 所示. 当电路元件发生软故障时(包括早期微弱故障), 依据改进马氏距离的大小, 将可疑元件划分为 6 种情况. 对应这 6 种情况, 如果未进行改进马氏距离划分, 则所测数据都会使用 21 个分类器, 平均检测时间为 24.73 ms. 前 5 种划分情况使得分类器数量减少, 进而减少故障检测时间, 在各类情况下故障诊断率均达到了较好的效果.

## 5 结 论

本文提出了一种基于改进马氏距离的模拟电路故障诊断方法. 马氏距离的引入使得部分未发生故障的潜在故障元件被预先排除, 故障诊断时需要辨别的故障类型减少, 使用到的分类器数量也相应降低, 进而减少了故障检测时间. 对于未进行马氏距离分类的情况, 所有测试数据分类均会用到 21 个分类器, 平均检测时间为 24.73 ms. 加入马氏距离分类后, 当电路元件发生软故障时(包括早期微弱故障), 依据被测数据的改进马氏距离大小, 将可疑元件划分为 6 种情况. 改进马氏距离的引入在大多数情况下能预先排除一些未发生故障的故障潜在元件, 可以有效地减少故障的可能类别, 提高故障检测的速度.

## 参考文献(References)

- [1] 孙永奎. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断方法研究[D]. 成都: 电子科技大学自动化工程学院, 2009. (Sun Y K. Study on fault diagnosis in analog circuit based on support vector machine[M]. Chengdu: School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [2] Wang Peng, Yang Shi-yuan. A soft fault dictionary method for analog circuit diagnosis based on slope fault mode[J]. Control and Automation, 2006, 22(6): 1-23.
- [3] 许丽佳, 黄建国, 王厚军. 基于 HMM 的模拟电路故障诊断方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(6): 1215-1222. (Xu L J, Huang J G, Wang H J. A method for the diagnosis of the incipient faults in analog circuits using HMM[J]. J of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(6): 1215-1222.)
- [4] Long B, Tian S L, Wang H J. Diagnostics of filtered analog circuits with tolerance based on LS-SVM using frequency features[J]. J of Electronic Testing: Theory and Application, 2012, 28(3): 291-300.
- [5] Dogruel M, Ozgunzer U. Stability of hybrid systems[C]. Proc of IEEE Int Symposium on Intelligent Control. New York: IEEE Press, 1994: 129-134.
- [6] Robert L Boylestad. Introductory circuit analysis[M]. 10th ed. Englewood Cliff: Prentice Hall, 2002: 354-356.
- [7] Yang Cheng-lin, Tian Shu-lin, Long Bing, et al. Methods of handling the tolerance and test-point selection problem for analog circuit fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 176-185.
- [8] 秦庆强, 张晓安, 李艾华. 马氏距离在模拟电路硬故障检测中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7): 41-45. (Qing Q Q, Zhang X A, Li A H. Research on the application of Mahalanobis distance in catastrophic faults detection of analog circuits[J]. J of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(7): 41-45.)
- [9] 秦庆强, 张晓安, 李艾华. 一种基于马氏距离的模拟电路软故障检测算法[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(10): 1886-1888. (Qing Q Q, Zhang X A, Li A H. Algorithm based on mahalanobis distance for soft faults detection of analog circuits[J]. Computer Measurement and Control, 2009, 17(10): 1886-1888.)
- [10] liberatore A, Manetti S, Piccirilli M C, et al. A new efficient method for analog circuit testability measurement[C]. IEEE IMTC '94. Hamamatsu, 1994: 193-196.

(下转第 1722 页)