

基于波形相似度的容差模拟电路软故障诊断

钟建林 何友 任献彬
(海军航空工程学院 烟台 264001)

摘要 针对容差模拟电路输出波形参数的随机性,构造了描述特定电路状态的特征区间向量,据此提出了一种基于多频响应波形相似度的软故障诊断方法。对每一种软故障,分别施加 K 种不同频率的激励信号,获取 K 个由输出响应构成的标准特征区间向量作为该故障状态的信号特征。对待测电路施加相同的 K 种频率的激励信号,获取 K 个待测样本,分别与每种故障模式的 K 个相应的标准特征区间向量进行相似度计算,获取 K 个波形相似度,在波形相似度融合中考虑了均方差权重系数和可信度权重系数,得到待测样本与该故障模式的总体相似度。最后依据一定的模糊规则进行故障定位。仿真实验证明,本方法在保证较高诊断准确率的情况下,对测点要求低,易于在自动测试系统中实现诊断的自动化。

关键词: 模拟电路 故障诊断 特征区间向量 多频测试 波形相似度
中图分类号: TP206+.3

Soft Fault Diagnosis Based on Waveform Similarity for Tolerance Analog Circuit

Zhong Jianlin He You Ren Xianbin

(Naval Aeronautical and Astronautical University Yantai 264001 China)

Abstract Regarding to the random attribute of the parameters of tolerance analog circuit output waveform, the feature interval vector used to describe the tolerance analog circuit in a certain mode is constructed. Accordingly, a novel soft fault diagnosis method based on waveform similarity acquired by multi-frequency tests is proposed. For each fault mode of the circuit under test, K standard feature interval vectors are acquired by K tests with alternating current signal inputs with different frequencies respectively. In order to diagnose the fault mode of the circuit, it is input with the same signals with K different frequencies to form K output wave parameter samples. K wave similarities are calculated by the K output wave parameter samples with the K standard feature interval vectors of each fault mode. The integrated similarity is the fusion of the K wave similarities considering mean square deviation weight and credibility weight. Finally, fault location is realized by a set of fuzzy rules. The simulation results show that the proposed method gains satisfactory accuracy while less limited by accessible test points. Moreover, it is practical and easy to be realized in automatic test systems.

Keywords: Analog circuit, fault diagnosis, feature interval vector, multi-frequency test, waveform similarity

收稿日期 2011-01-27 改稿日期 2011-05-10

1 引言

与数字电路相比,模拟电路往往缺少简单的故

障模型,实际电路中的反馈回路导致仿真复杂;模拟元件参数受到容差的影响、广泛存在非线性问题以及实际的可测节点数有限^[1]。这些使得模拟部分的故障诊断成为混合信号集成电路故障诊断的瓶颈,而模拟电路的软故障比硬故障诊断的难度更大。

故障字典法在测前仿真中需要利用电路结构知识,对于复杂的模拟电路,字典法由于涉及的工作量巨大往往并不适用^[2]。基于信号处理和基于知识的现代诊断方法由于不依赖电路的复杂模型,在模拟电路故障诊断中得到许多应用,如神经网络方法、模糊逻辑方法、支持向量机分类方法、克隆选择算法等智能方法^[3-6],但这些方法的主要缺点是对样本的要求高,而且对可及测点少的电路,误诊、漏诊的概率较大。基于区间数学的区间分析法将元件参数值用区间描述,较好地刻画了容差造成的元件值的不确定性,可以进行较准确的故障检测^[7]。但是该方法只能进行故障检测不能进行故障定位,另外,由于对复杂非线性电路难以进行量化建模和解算,该法适用范围有限。实际装备设备的维护中,模拟电路的诊断往往依赖于自动测试系统,自动测试系统提供电路实际工作的激励信号,将其施加在电路的输入端口,测试其输出是否在正常的范围内。因此,如何在不增加测点的情况下,通过电路的输入输出端口,充分利用信息处理和模式识别技术进行故障定位,具有十分重要的意义。

由于模拟元件参数受到容差的影响,模拟电路的输出响应具有一定的随机性,但随机性响应的总体轮廓应与电路状态对应。基于此,借鉴区间分析的思想,本文定义特征区间矢量用于描述容差模拟电路元件参数的离散性对响应信号特征的影响;定义波形相似度用于描述待测样本与故障模式之间的靠近程度;最后对多频测试的诊断结果进行决策层信息融合,有效提高诊断的准确率。实验结果表明,此方法能较好地解决模拟元件的容差对诊断的影响,适用于可及测点少的模拟电路。

2 特征区间向量和波形相似度的建立

通过对输出信号的波形参数进行辨识的方法进行故障诊断,首先应确立波形特征的描述方法。波形的描述应能反映容差的影响。

2.1 波形描述参数的选择

HP E1426A 500MHz Digitizing Oscilloscope按照波形描述模型对所有信号的18个波形参数进行定义。这18个参数分别是频率、周期、信号正半周宽度、信号负半周宽度、上升沿时间、下降沿时间、包络幅值、峰峰值、预冲值、过冲值、占空比、交流均方值、最大幅值、最小幅值、顶值、基值、平均幅值和直流均方值^[8]。事实上,在故障诊断中,

当信号之间的相似程度通过波形进行比较时,这18个波形参数足以反映信号的特征。因此,可以用这些波形参数构造信号特征矢量

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_N) \quad (1)$$

式中, $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ 为第 i 个波形参数值。

由采样定理可知,足够多个时刻对应的响应瞬时值系列也可以反映响应信号波形的特征。故可用具有一定间隔的响应瞬时值构成信号特征矢量

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_N) \quad (2)$$

式中, $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ 为第 i 个时刻对应的响应瞬时值,一般地,响应瞬时值取波形瞬时电压幅值。

由于波形描述模型的参数获取较为困难,而在 PSpice 电路仿真程序中可以使用 Mont-Carlo 方法方便地获取各时刻瞬时响应值,并且这些以数组形式存在的瞬时响应值可以方便地被 Matlab 程序调用进行数值处理和分析,在保证仿真效果的同时,减少了仿真实验的工作量。因此,本文以等时间间隔的若干个波形瞬时电压幅值作为电路输出响应的描述参数。

2.2 容差电路的特征区间矢量

由于容差的存在,模拟元件值是在其标称值附近的随机数。因而,在特定的电路状态(正常或特定故障)下,输出波形的参数是一个在某一区间内的随机值。这些参数区间构成的特征区间矢量,描述了特定电路状态下输出响应的信号特征,反映了相应的电路状态。特征区间矢量的描述方法如下:

$$\mathbf{Z} = ((x_1, y_1) \quad (x_2, y_2) \quad \cdots \quad (x_N, y_N)) \quad (3)$$

式中, $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, N)$ 分别为第 i 个波形参数(或第 i 个时刻对应的响应参数值)分布区间的下限和上限。

2.3 待测样本对特征区间向量的相似度

将电路的输出响应作为待测样本进行故障诊断,实际上就是将该待测样本与电路各特征区间矢量进行关联的问题。本文求出待测样本与各特征区间矢量的波形相似度,从而建立待测样本与故障模式之间的关联,作为故障诊断的依据。

设有待测样本

$$\mathbf{S} = (s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_N) \quad (4)$$

和 M 个特征区间矢量

$$Z_i = ((x_{i1}, y_{i1}) (x_{i2}, y_{i2}) \cdots (x_{iN}, y_{iN})) \quad i=1, \dots, M$$

式中, N 为采样数; M 为包括正常和各种故障模式的电路状态数。

定义 μ_{ij} 是参数 S_j 对参数区间 (x_{ij}, y_{ij}) , $i=1, 2, \dots, M$ 的“区间相似度”

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & (i, j) \in I \\ 1 - \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^M r_{ij}} & (i, j) \notin I \end{cases} \quad (5)$$

式中, $I = \{(i, j) | x_{ij} \leq s_j \leq y_{ij}, i=1, \dots, M, j=1, \dots, N\}$,

r_{ij} 定义为样本参数 S_j 对参数区间 (x_{ij}, y_{ij}) 的“区间相对距离”, 且

$$r_{ij} = \frac{\min \{s_j - x_{ij}, |s_j - y_{ij}|\}}{|x_{ij} - y_{ij}|} \quad j=1, 2, \dots, N$$

(6)

S_j 从区间 (x_{ij}, y_{ij}) 的两边越靠近区间, 其区间相对距离越小, 区间相似度越大, 但不超过 1, 当 S_j 落入区间 (x_{ij}, y_{ij}) 时, 区间相似度为 1。

定义待测样本 S 对特征区间矢量 Z_i (即故障模式 i) 的波形相似度

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

3 基于多频测试信息融合的诊断方法

3.1 多频测试原理

直接依据 2.3 节介绍的方法, 不同软故障的特征区间矢量可能有重叠的部分, 这将引起许多模糊的诊断结果。本文利用同一电路状态对不同频率激励信号输出响应的差异, 采用多频测试信息融合的办法解决这一问题, 一方面在不增加测点的情况下, 利用多频测试信息融合降低单频测试诊断的模糊性; 另一方面通过模糊诊断规则对容差电路响应的不确定性进行“包容”, 减少漏检和误检的概率。

多频测试就是在不增加测试点的情况下, 通过优选多种敏感频率的激励信号对被测电路进行多次或联合激励, 对响应信号进行分析以获取电路状态的一种测试方法。多频测试在模拟电路故障诊断中

已有成功应用 [9-10]。

3.2 诊断步骤

(1) 针对特定的研究对象, 选择 M 种最易发生的软故障。对于每一种软故障 (包括正常状态), 分别施加 K 种不同频率的激励信号, 获取 K 个由输出响应构成的标准特征区间矢量作为该故障状态的信号特征。

(2) 为了诊断研究对象所处的故障模式, 对电路施加与 (1) 相同的 K 种不同频率的激励信号, 获取 K 个待测样本, 分别与每种故障模式的 K 个相应的标准特征区间矢量进行相似度计算, 获取 K 个波形相似度, 通过一定的法则将 K 个波形相似度进行融合, 得到待测样本与该故障模式的总体相似度。

(3) 依据一定的模糊规则, 根据总体相似度进行故障定位。诊断原理如图 1 所示 (图中 UUT 表示被测单元)。

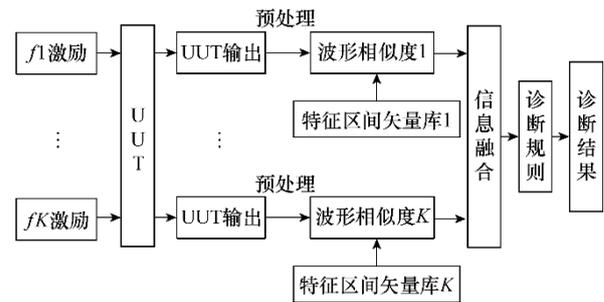


图1 诊断原理图

Fig.1 Diagnosis schematic diagram

4 总体相似度的融合算法

设 Z_{ij} ($1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq M$) 为测试频率 i 激励下电路在故障模式 j 的特征区间矢量,

γ_{ij} ($1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq M$) 为待测样本相对 Z_{ij} 的波形相似度, 其中 K 为测试频率总数, M 为包括正常模式在内的故障总数。

根据 2.3 对电路进行多频测试的响应信号进行处理后, 可获得波形相似度矩阵

$$A_0 = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1M} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{K1} & \gamma_{K2} & \cdots & \gamma_{KM} \end{bmatrix} \quad (8)$$

每个故障模式对应一个总体相似度, 总体相似度是各频率激励下获得的多个波形相似度的综合。在综合的过程中, 各波形相似度对总体相似度的贡献 (权重) 不应是均等的, 有两个权重需要考虑:

可信度权重和方差权重。

4.1 均方差权重

本文采用 Mont-Carlo 方法获取不同频率激励下的大量响应曲线（一组曲线簇）作为样本进行统计分析。同一电路状态下不同频率激励获得的电路响应曲线簇的离散程度是不同的。曲线簇的离散程度越小，则相应频率激励获取的响应在总体相似度计算中应赋予越大的权重。曲线簇的离散程度可通过均方差进行表征。

曲线簇在某一时刻对应的瞬时值是一组离散的样本值。测试频率为 k ，故障模式为 i 的情况下获取 t 时刻样本值均方差为

$$\sigma_{ki}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^L (X_j - \bar{X})^2}{L-1}} \quad (9)$$

式中， L 为仿真次数（即曲线簇包含的曲线数）； \bar{X}

为样本均值且 $\bar{X} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L X_j$ 。

以曲线簇各时刻样本均方差的平均值表示曲线簇的总体离散程度

$$\bar{\sigma}_{ki} = \frac{1}{N} \sum_{t=0T}^{NT} \sigma_{ki}(t) \quad (10)$$

式中， N 为采样总数， T 为采样间隔。

则在故障模式 i 情况下，测试频率 k 对应的均方差权重系数为

$$v_{ki} = \frac{(\bar{\sigma}_{ki})^{-1}}{\sum_{k=1}^K (\bar{\sigma}_{ki})^{-1}} \quad (11)$$

均方差权重矩阵为

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1M} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ v_{K1} & v_{K2} & \cdots & v_{KM} \end{pmatrix} \quad (12)$$

则考虑均方差权重后的波形相似度矩阵为

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 \cdot V \\ &= \begin{pmatrix} \gamma_{11}v_{11} & \gamma_{12}v_{12} & \cdots & \gamma_{1M}v_{1M} \\ \gamma_{21}v_{21} & \gamma_{22}v_{22} & \cdots & \gamma_{2M}v_{2M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{K1}v_{K1} & \lambda_{K2}v_{K2} & \cdots & \gamma_{KM}v_{KM} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

4.2 可信度权重

相似度矩阵 A 某行中最大波形相似度的绝对值越大，且该波形相似度值与其它波形相似度值相对“距离”越大，则该行对应的测试频率判断的可信度越大，应赋予的权重也应越大。设不同测试频率判断的可信度权重矢量为 $W=(w_1, w_2, \dots, w_k)$ ，其中 w_k ($k=1, 2, \dots, K$) 是第 k 个测试频率判断的可信度。在工程上， W 的值可按以下方法计算^[11]：

$$w_k = \frac{\alpha_k \beta_k}{\sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k} \quad (14)$$

$$\alpha_k = \max_{i=1}^M \{\gamma_{ki}\} \quad (15)$$

$$\beta_k = \frac{\alpha_k}{\sum_{i=1}^M \gamma_{ki}} \quad (16)$$

4.3 总体相似度

在考虑均方差权重的基础上，考虑可信度权重后的总体相似度矢量为

$$\begin{aligned} \mu &= WA_1 \\ &= (w_1, w_2, \dots, w_K) \begin{pmatrix} \gamma_{11}v_{11} & \gamma_{12}v_{12} & \cdots & \gamma_{1M}v_{1M} \\ \gamma_{21}v_{21} & \gamma_{22}v_{22} & \cdots & \gamma_{2M}v_{2M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ \gamma_{K1}v_{K1} & \lambda_{K2}v_{K2} & \cdots & \gamma_{KM}v_{KM} \end{pmatrix} \\ &= (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M) \end{aligned} \quad (17)$$

□ 式中， $\mu_j = \sum_{k=1}^K w_k \gamma_{kj} v_{kj}$ ， $j=1, 2, \dots, M$ 。

5 故障判定准则

在获得总体相似度向量的基础上，故障定位依循以下规则：

(1) 所属故障状态的总体相似度最大。

(2) 所属故障状态的总体相似度必须大于某一阈值 λ 。

(3) 所属故障状态与其它故障状态的总体相似度之差必须大于某一阈值 θ 。

即：若有 $\mu_m = \max\{\mu_i\}$, $\mu_n = \max\{\mu_i | i \neq m\}$, 则满足

$$\begin{cases} \mu_m > \lambda \\ \mu_m - \mu_n > \theta \end{cases} \quad (18)$$

时, 样本对应的故障状态为故障 m 。

若式(18)不满足, 但满足:

(4) 最大的两个总体相似度之和大于阈值 λ' ;

(5) 最大的两个总体相似度之和与第三大总体相似度之差大于阈值 θ' 。

即: 若有 $\mu_m = \max\{\mu_i\}$, $\mu_n = \max\{\mu_i | i \neq m\}$, $\mu_k = \max\{\mu_i | i \neq m, i \neq n\}$, 则满足

$$\begin{cases} \mu_m + \mu_n > \lambda' \\ \mu_m + \mu_n - \mu_k > \theta' \end{cases} \quad (19)$$

时, 样本对应的故障为模糊组 $\{m, n\}$ 。

本文通过三个仿真实验验证所提方法的有效性。仿真实验一在小偏差故障设定的情况下得到可行的诊断结论; 仿真实验二比较了不同软故障偏离程度对诊断结论的影响; 仿真实验三比较了各种融合权重对诊断结论的影响。

6 仿真实验一

6.1 仿真电路与故障设定

诊断电路选用 Sallen-Key 带通滤波电路, 如图 2 所示。图中 $R_1=5.18\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$, $R_3=2\text{k}\Omega$, $R_4=R_5=4\text{k}\Omega$, $C_1=C_2=5\text{nF}$, 其中电阻和电容的容差分别为 5% 和 10%。选定正常模式和 5 种软故障模式进行算法验证, 故障元件列表见表 1。对于验证电路, 考虑证据体之间的区分度, 通过仿真优选敏感频率系列: $f_1=50\text{Hz}$, $f_2=1\text{kHz}$, $f_3=5\text{kHz}$, 幅度均为 6V, 则激励信号分别为: $u_1=6\sin(100\pi t)$, $u_2=6\sin(2000\pi t)$, $u_3=6\sin(10000\pi t)$ 。

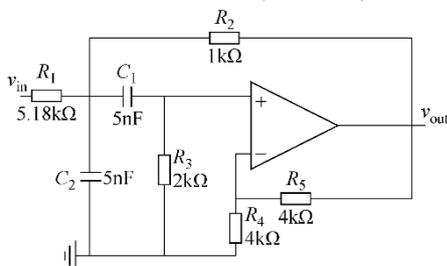


图 2 Sallen-Key 带通滤波电路

Fig.2 Sallen-Key bandpass filter circuit

表 1 故障元件列表

Tab.1 List of fault components

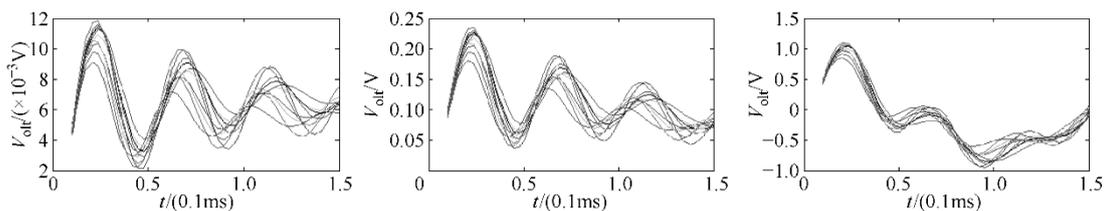
序号	故障元件	标称值	软故障偏差 (%)	故障值	表示法
1	正常	-	-	-	NF
2	$R_1/k\Omega$	5.18	+20	5.957	$R_1 \uparrow$
3	$R_2/k\Omega$	1	+20	1.15	$R_2 \uparrow$
4	$R_3/k\Omega$	4	-20	3.4	$R_3 \downarrow$
5	C_1/nF	5	+30	6	$C_1 \uparrow$
6	C_2/nF	5	+30	6	$C_2 \uparrow$

6.2 仿真设定与特征向量选取

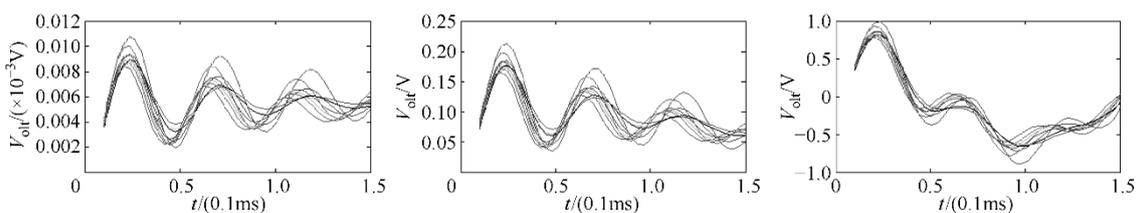
仿真中假定：电路处于正常状态时，所有元件值均在各自的容差范围内按几何分布变动；电路处于软故障状态时，发生软故障的元件值如表 1，其

他元件的元件值均在各自的容差范围内按几何分布变动。对于每一种激励频率，每种故障模式和正常模式，在 OrCAD16.0 的 PSpice 电路仿真环境下用 Monte-Carlo 方法进行 150 次仿真，电路各状态在不同频率输入激励作用下的响应如图 3 所示。

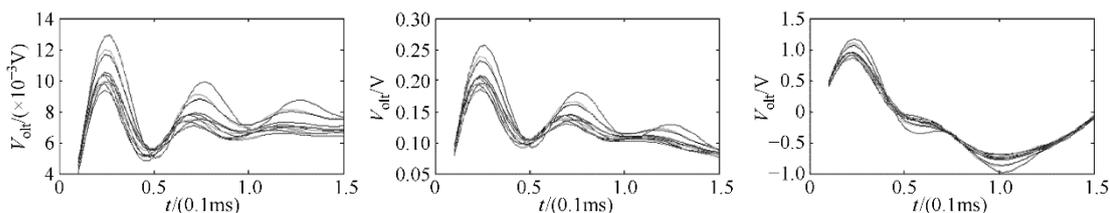
按照 2.2 节方法分别对图 3 各波形信号进行特征提取，时间间隔为 $15\mu s$ ，取前 10 个时刻对应的 10 个响应电压幅值区间构成波形特征矢量。150 次仿真共获取 150 个波形特征矢量，其中 100 个用于获取与激励频率和电路状态相应的特征区间矢量，50 个作为待测样本。对 5 种软故障和正常状态仿真，用以上算法对待测样本分别进行基于频率 f_2 和频率 f_1 、频率 f_2 、频率 f_3 三者融合的故障诊断，阈值选取 $\lambda=0.8$ ， $\theta=0.2$ ， $\lambda'=1$ ， $\theta'=0.6$ 。



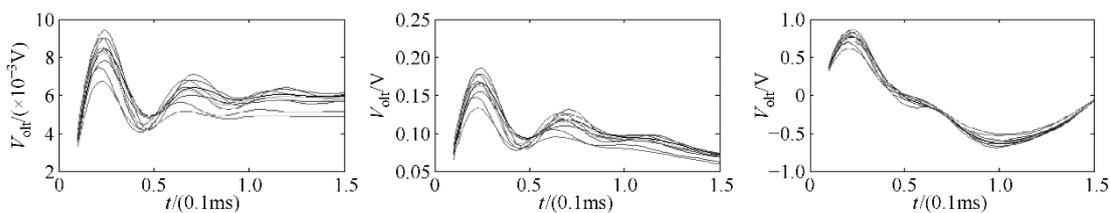
(a) 无故障状态响应波形



(b) $R_1 \uparrow$ 故障状态响应波形



(c) $R_2 \uparrow$ 故障状态响应波形



(d) $R_3 \downarrow$ 故障状态响应波形

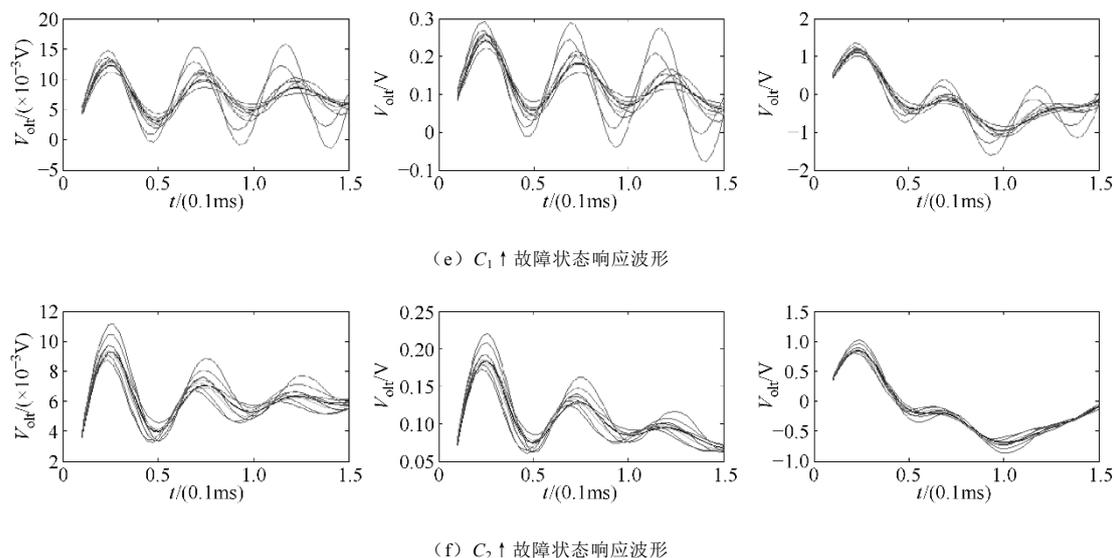


图 3 电路各状态在不同频率激励作用下的响应波形 (激励频率从左到右依次为 50Hz, 1kHz, 5kHz)

Fig.3 Responses of the circuit in different status under stimulus with different frequencies

(The stimulus frequencies are 50Hz,1kHz and 5kHz from left to right)

6.3 仿真结果分析

图 4、图 5 表示了六种故障模式下利用激励频率 f_2 (单频) 和依靠 f_1, f_2, f_3 (融合) 两种诊断方法下正确率、模糊率的比较。其中横坐标 1~6 分别代表 NF, $R_1 \uparrow, R_2 \uparrow, R_5 \downarrow, C_1 \uparrow, C_2 \uparrow$ 故障模式, 纵坐标是诊断正确率。图 4 正确率是指依据 5 节中故障判定准则 (1)~准则 (3) 诊断的结果, 即: 诊断结论正好为故障元件。图 5 模糊率是指依据故障判定准则 (4)~准则 (5) 诊断的结果, 即: 诊断结论为包含故障元件在内的两个元件。

诊断统计结果表明在故障元件的软故障设定较小 (超出容差 15%~20%) 的情况下, 本文方法能满足容差模拟电路故障诊断的要求, 正确率为 89.7%, 模糊率为 9.2%, 总体正确率 (正确率与模糊率之和) 为 98.9%, 拒诊率和误诊率为 1.1%。图 4 表明大部分故障模式的正确率满足诊断要求, 但 NF 模式和 $R_1 \uparrow$ 在本文诊断设定条件下诊断精度偏低, 从图 3a、3b 也可以看出两者相应的输出响应在三种频率下都很接近。从仿真实验可以看出, 单频诊断的模糊率较高, 总体为 53.1%, 难以满足工程上的要求。本文方法通过多频测试的方法大大减小了诊断结论的模糊性, 并降低了拒诊和误诊的概率。

与文献 [10] 多频响应均值累积法相比, 本文通过优化诊断算法, 能以较少的激励频点达到较高的诊断精度, 减少了测试诊断的成本。

与文献 [12] 相比, 本文方法通过采样响应瞬时值系列作为波形特征参数, 通过特征区间向量计算

波形相似度, 通过考虑不同的权重对多频波形相似度进行融合, 避免了灰色关联度、小波分解和 D-S 推理等复杂运算, 计算量较小。

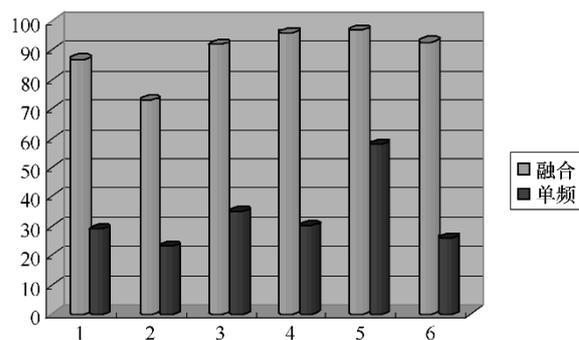


图 4 两种方法的诊断正确率

Fig.4 Correction rate of the two diagnosis methods

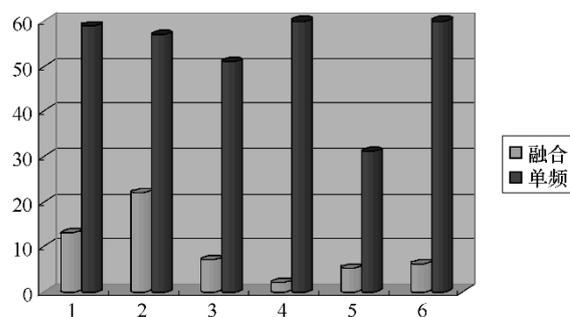


图 5 两种方法的诊断模糊率

Fig.5 Fuzzy rate of the two diagnosis methods

7 仿真实验二

假设发生故障时电阻和电容的元件值均偏离了50%，对NF, $R_1\uparrow$, $R_2\uparrow$, $R_5\downarrow$, $C_1\uparrow$, $C_2\uparrow$ 故障模式进行诊断，正确率为93.3%，模糊率为5.8%，总体正确率为99.1%，拒诊率和误诊率为0.9%。与仿真实验一相比，可以看出：①在两种软故障设定情况下，利用本文方法的拒诊率和误诊率都很低，两者差别不大；②故障元件值偏离较大时，软故障较为明显，诊断的正确率有一定提高，而模糊性进一步降低。

文献[13]运用 Haar 小波对测试样本进行预处理，并基于神经网络方法对同一电路进行了故障诊断研究，假设发生故障时元件值偏离了50%，通过对包括正常状态在内的9种电路状态进行诊断分析，诊断正确率为96%。事实上，基于样本统计结果的诊断精度与仿真电路的选取、样本规模、测试频率的选择、故障样本的选择、阈值的设定等多种因素有关。与文献[13]相比，本方法的好处在于：避开了神经网络的训练，在样本数量较少情况下，仍然能做出有效的诊断，即对样本的要求更低，诊断的鲁棒性较好。

8 仿真实验三

基于对多频响应波形分布规律的分析，本文提出由多个波形相似度计算总体相似度的过程中，不同频率激励获取的波形应具有不同的均方差权重和可信度权重，并给出了两种权重向量的计算方法。与取多频响应波形相似度均值作为总体相似度的方法相比，本文方法能有效提高总体相似度的“置信度”，并最终提高故障诊断的准确率。仿真实验三的故障设定和仿真条件与仿真实验一相同，比较了平均权重（取多频响应波形相似度均值）、只考虑均方差权重、只考虑可信度权重和同时考虑均方差权重和可信度权重四种方法对诊断结论的影响见表2。

表2 考虑不同权重的诊断结果比较

Tab.2 Comparison of diagnosis results considering different weights

	正确率 模糊率 拒诊和误诊率 (%)		
考虑平均权重	81.1	12.5	6.4

只考虑均方差权重	85.6	10.4	4.0
只考虑可信度权重	86.2	10.0	3.8
考虑两种权重	89.7	9.2	1.1

9 结论

本文提出了基于波形相似度和多频测试的容差模拟电路软故障诊断方法。定义特征区间矢量描述模拟元件固有的容差对输出响应的影响，在特征区间矢量基础上构造的波形相似度描述了待测样本与特征区间矢量的“靠近程度”。以多频响应波形相似度为基础，通过分析其波形分布规律，得到综合了均方差权重和可信度权重的总体相似度，最后以总体相似度进行模糊故障诊断，避开了对复杂电路模型的研究，提高了诊断的准确率和诊断系统的泛化能力。实验证明本方法适用于容差模拟电路的软故障诊断。

本方法虽然对某些元件故障定位的能力有限，但没有在电路中增加新的测点，仅通过输入输出端口信息对电路状态进行诊断，测试诊断的成本较低，容易在自动测试系统中实现。

参考文献

- [1] 杨士元, 胡梅, 王红. 模拟电路软故障诊断的研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(1): 1-8.
Yang Shiyuan, Hu Mei, Wang Hong. Study on soft fault diagnosis of analog circuit[J]. Microelectronic & Computer, 2008, 25(1): 1-8.
- [2] 彭敏放, 何怡刚. 容差模拟电路的模糊软故障字典法诊断[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 25-28.
Peng Minfang, He Yigang. A fuzzy soft fault dictionary method for diagnosis of analog circuits with tolerance[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2005, 32(1): 25-28.
- [3] Stopjakova V, Malosek P, Micusik D, et al. Classification of defective analog integrated circuits using artificial neural networks[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 2004: 20(1): 25-37
- [4] Wang P, Yang S. A new diagnosis approach for handling tolerance in analog and mixed- signal circuits by using fuzzy math [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and

- Applications, 2005, 52(10): 2118-2127
- [5] 王安娜, 邱增, 吴洁, 等. 基于 SVM 多类分类算法的模拟电路软故障诊断 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2008, 29(7): 924-927.
Wang Anna, Qiu Zeng, Wu Jie, et al. SVM-based multi-classifying algorithm for soft fault diagnosis of analog circuits[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(7): 924-927.
- [6] 彭良玉, 禹旺兵. 基于小波分析和克隆选择算法的模拟电路故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 12-16.
Peng Liangyu, Yu Wangbing. Fault diagnosis of analog circuit based on wavelet analysis and clonal selection algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2007, 22(6): 12-16.
- [7] 田玮, 凌燮亭. 基于区间线性方程组解的电路容差分析 [J]. 电子学报, 1995, 23(9): 56-60
Tian Wei, Ling Xieting. Circuit worst-case tolerance analysis via solution of interval linear equations[J]. Acta Electronica sinica, 1995, 23(9): 56-60.
- [8] 马彦恒, 刘林. 基于 VXIbus 的波形模糊识别的研究 [J]. 电子科技大学学报, 2001, 30(16): 625-628.
Ma Yanheng, Liu Lin. The study of waveform fuzzy identification based on VXIbus measurement[J]. Journal of University of Electronic Science and Techonogy of China, 2001, 30(16): 625-628.
- [9] Alippi C, Catelani M, Fort A, et al. Automated selection of test frequencies for fault diagnosis in analog electronic circuits[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1033-1044.
- [10] 张玮, 沈士团, 李驿华. 一种面向输出响应的多频测试故障检测与隔离方法 [J]. 遥测遥控, 2003, 24(6): 43-46.
Zhang Wei, Shen Shituan, Li Yihua. Output response-oriented fault detection and isolation under multifrequency test[J]. Journal of Telemetry Tracking and Command, 2003, 24(6): 43-46.
- [11] 彭敏放, 何怡刚, 吕敬祥. 基于智能信息融合的模拟电路故障定位方法 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 93-96.
Peng Minfang, He Yigang, Lü Jingxiang. Fault location of analog circuits using intelligent information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (11): 93-96.
- [12] 钟建林, 何友, 王红星. 基于多频小波分析和 D-S 推理的电路故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 180-184.
Zhong Jianlin, He You, Wang Hongxing. Circuit fault diagnosis based on multi-frequency wavelet analysis and D-S reasoning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25 (8): 180-184.
- [13] Aminian F, Aminian M. Neural-network based analog-circuit fault diagnosis using wavelet transform as preprocessor[J]. IEEE Transactions on Circuits and System II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(2): 151-156.

作者简介: 钟建林 男, 1974 年生, 博士, 讲师, 研究方向为电子系统故障诊断、自动测试等。何友 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号检测、数据融合、信息处理等。