

一种模拟滤波器电路的故障诊断方法

胡梅, 孟志军

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 针对模拟滤波器电路, 提出了一种基于测前仿真和测后仿真相结合的故障诊断方法; 在测前仿真环节, 通过仿真获取电路正常状态及故障状态的幅频响应曲线, 引入“区别度”计算电路故障状态和正常状态的区分程度, 从而确定电路的可测故障集, 并通过频率选择建立可测故障集的故障字典; 在测后仿真环节, 通过不同频率的激励获得电路故障状态的测试数据, 再利用“区别度”计算测试数据与故障字典中各故障特征的区分程度, 通过最小“区别度”实现故障检测及故障元件的定位; 最后通过一个滤波器电路仿真实例, 基于 PSpice 仿真和 Matlab 程序计算实现了基于测前仿真的可测故障集确定和故障字典建立, 以及基于测后仿真的故障检测和故障元件定位, 验证了文章提出方法的实用性。

关键词: 模拟滤波器电路; 故障诊断; 测前仿真; 测后仿真; 可测故障集; 故障字典

A Fault Diagnosis Method of Analog Filter Circuits

Hu Mei, Meng Zhijun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the analog filter circuits, a combined fault diagnosis method based on simulation before test and simulation after test is proposed. During the simulation before test, the amplitude frequency response curves of the normal state and fault states are obtained firstly through circuit simulation, the “difference degree” is used to calculate the distinction between the fault status and the normal state, then the detectable fault set of the circuit is determined, furthermore, fault dictionary of the detectable fault set is established through frequency selection. In the simulation after test step, the test data of the fault states is obtained firstly through different frequency excitation, and then calculate the distinction between the test data and the fault features of the fault dictionary according to the “difference degree”, therefore fault detection and fault location are realized by the minimum of the “difference degree”. Finally, a simulation example of a filter circuit is given, during the simulation before test, the detectable fault set determination and the establishment of fault dictionary is realized based on the PSpice simulation and the Matlab program, and also the fault detection and fault location based on simulation after test, which verified the practicality of the proposed fault diagnosis method.

Keywords: analog filter circuit; fault diagnosis; simulation before test; simulation after test; detectable fault set; fault dictionary

0 引言

经过 50 多年的发展, 模拟电路故障诊断研究的成果层出不穷^[1], 归纳起来可以将现有方法分成两大类^[2-9]: 基于测前仿真 (simulation before test, SBT) 的诊断方法和基于测后仿真 (simulation after test, SAT) 的诊断方法。基于测前仿真的故障字典法是目前最为成熟实用的方法, 但该方法的关键在于电路元件的故障特征如何选取, 不同的故障特征能构建不同的故障字典, 诊断效果也因此不同, 而且由于电路固有特性, 有些故障是无法诊断的。

文献 [10] 提出了一种基于多频响应波形相似度的软故障诊断方法, 对事先设置的固定参数偏移软故障进行了诊断分析; 文献 [11] 针对正弦交流激励下的电路硬故障, 提出了一种基于电路输入输出正交“椭圆”轨迹测量分析的节点电压向量模糊集诊断方法; 文献 [10-11] 所提出方法的共同优点是对测点要求低, 只需要输入节点和输出节点就能进

行诊断分析, 对于模拟电路中最常用的滤波器电路, 在实际的测试和故障诊断中也主要从输出节点获取测试信息, 进行故障诊断。对于滤波器电路的故障诊断, 需要分两步: 1) 步确定滤波器电路是否发生故障, 即进行故障检测; 2) 针对发生故障的情况进一步进行故障元件的定位。因此, 本文结合基于测前仿真和测后仿真相结合的思想, 通过测前仿真来确定滤波器电路中可诊断的元件并建立故障字典, 再通过测后多频测试来进行故障元件的定位, 从而实现滤波器电路故障诊断的实用化。

1 基于测前仿真的故障字典建立

滤波器电路的功能是使特定频率范围内的信号通过, 而阻止其它频率信号通过, 在实际应用中滤波器最重要的特性表现即幅频响应, 通过幅频响应即能得出滤波器的截止频率和通带增益等主要特征参数。因此, 通过测前仿真得到滤波器电路正常状态及各个设定的故障状态下的幅频响应曲线是建立故障字典的关键。文献 [12] 研究了模拟电路参数故障的可诊断性问题, 得出结论: 模拟故障的可诊断性与电路固有的局限性有关; 很多参数故障本身是不可诊断的, 这与诊断方法无关。事实上, 由于待测滤波器电路固有的特殊性, 电路中可能有的故障是无法诊断的, 有的故障模糊集是无法区分的。因此, 基于测前仿真的滤波器电路的故障字典建立

收稿日期: 2014-11-07; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61201031, 61171079)。

作者简介: 胡梅 (1982-), 女, 湖北天门人, 博士, 讲师, 主要从事空间仪器工程、空间电子仪器中电路可靠性和故障诊断技术方向的研究。

环节,需要进行电路元件的故障可诊断性分析,步骤如下:

1) 设置滤波器电路正常状态及各个元件的待测故障状态,得到故障集合 $F = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_n\}$,其中 F_0 表示正常状态, $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示元件 X_i 的故障状态(每一个元件考虑短路、开路、参数变小和参数变大4种硬故障和软故障状态)。通过正弦交流激励下的扫频仿真得到各个电路状态下的幅频响应曲线,扫描的频率范围为 $[f_1, f_2]$,扫描点数为 N ,将滤波器电路对应输出的 N 个电压幅值存储起来。

2) 基于第一步得到的各个幅频响应曲线,通过计算各个故障状态下幅频响应曲线与电路正常状态下幅频响应的“区别度”,来进行故障的可诊断性分析。设电路正常状态下扫频仿真存储的电压幅值为 $V_{\text{normal}} = [V_1, V_2, \dots, V_N]$,电路 F_i 故障状态下扫频仿真存储的电压幅值为 $V_{F_i} = [V_{1F_i}, V_{2F_i}, \dots, V_{NF_i}]$,则电路 F_i 故障幅频响应和电路正常状态的“区别度” $\rho_c(V_{\text{normal}}, V_{F_i})$ 定义如下:

$$\rho_c(V_{\text{normal}}, V_{F_i}) = \sqrt{\sum_{m=1}^N V_m - V_{mF_i}}^2 \quad (1)$$

对电路的所有故障计算出 n 个“区别度”,结合幅频响应曲线,设置“区别度”的阈值,判定相应的故障状态是否是可检测的,即电路在故障状态下的幅频响应曲线是否与电路正常状态下的幅频响应曲线能够“区别”。对于“区别度”计算值在阈值以下的,视为不可测故障,从待测故障集中剔除,得到新的电路可测的故障集合 $F_{\text{new}} = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_p\}$, ($p \leq n$)。

第三步,建立故障字典。对于滤波器电路,在测后诊断时需要通过多个频率的测试来进行故障元件的定位^[13],本文提出通过选择4个测试频率对电路进行测后故障诊断,4个测试频率的分布根据实际电路灵活选择 $\{f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}\}$,包含1个低频和以截止频率为中心的其它3个频率。基于第一步通过正弦交流激励下的测前扫频仿真得到的各个电路状态下的幅频响应数据,从中抽取可测故障集合 F_{new} 中各个故障在44个频率下的电压幅值得到 $(p+1)$ 行4列的故障字典矩阵 $D_{(p+1) \times 4}$ 。

2 基于测后仿真的故障元件定位

在基于测前仿真的故障字典建立时,通过分析确定了可测故障集 F_{new} ,并基于扫频仿真数据抽取了其中4个频点的电压幅值数据建立了故障字典 $D_{(p+1) \times 4}$,在测后诊断环节,本文提出针对所有的可测故障,通过4个频率的正弦交流信号的激励,获取电路的输出电压幅值,构建测试数据,通过基于故障字典数据的计算,进行故障检测及故障元件的定位。

针对可测故障集 F_{new} 中的 p 个故障状态,在测后仿真时设置同样的故障状态(其中参数变小和参数变大故障的设置可以和故障字典中的参数不同),在4个不同频率的正弦交流信号激励下得到相应的输出节点电压幅值,从而得到测后仿真的 p 行4列的测试数据矩阵 $T_{p \times 4}$ 。

逐次取测试数据矩阵 $T_{p \times 4}$ 的各行数据 $T_i (1 \leq i \leq p)$,分别和故障字典矩阵 $D_{(p+1) \times 4}$ 中的各行数据 $D_j (1 \leq j \leq p+1)$ 进行“区别度”计算:

$$\rho_c(T_i, D_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^4 T_{im} - D_{jm}}^2 \quad (1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq p+1) \quad (2)$$

对于给定的待测故障测试数据 $T_i (1 \leq i \leq p)$,根据故障字典矩阵计算得到 $(p+1)$ 个“区别度”值,取其最小值作为 T_i 的“区别度”:

$$\rho_c(T_i) = \min\{\rho_c(T_i, D_j)\} \quad (1 \leq j \leq p+1) \quad (3)$$

$\rho_c(T_i)$ 所对应的故障字典矩阵中的 j 行即为定位的故障状态,从而实现故障元件的定位。

3 仿真研究

以某应答机数字基带测试接收滤波器为例,进行仿真实验和结果分析。电路中各元件参数为: $R1 = R2 = 50 \Omega$, $C1 = 2 \text{ pF}$, $C2 = 33 \text{ pF}$, $C3 = C5 = 12 \text{ pF}$, $C4 = 24 \text{ pF}$, $L1 = 56 \text{ nH}$, $L2 = 47 \text{ nH}$,允许的容差范围为元件参数标称值的1%,设计的该低通滤波器电路的截止频率为100 MHz,输入为电压幅值2 V的正弦交流激励,输入的交流频率范围[30 MHz, 120 MHz]。

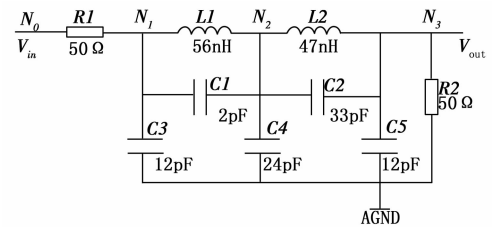


图1 仿真实验电路

首先基于PSpice实现了测前扫频仿真,通过Matlab编程实现了故障可测性分析算法,并针对可测故障集建立了故障字典。为了不改变电路的拓扑结构,测前仿真时对所有电阻、电感和电容元件的短路故障均用微小电阻模拟 $R_{\text{SHORT}} = 1e-6 \Omega$,开路故障均用大电阻模拟 $R_{\text{OPEN}} = 1e6 \text{ MEG}\Omega$,参数变小故障设置为正常参数的50%,参数变大故障设置为正常参数的2倍,具体设置见表1所示。

表1 测前仿真参数变化设置

元件	参数变小 ↓	参数变大 ↑
R1/ R2	25 Ω	100 Ω
C1	1 pF	4 pF
C2	16.5 pF	66 pF
C3/C5	6 pF	24 pF
C4	12 pF	48 pF
L1	28 nH	112 nH
L2	23.5 nH	94 nH

对设置的36个故障状态利用PSpice进行扫频仿真得到各幅频响应曲线,扫频的范围为[30, 120] MHz并与电路正常状态下的幅频响应曲线做了对比,如图2~图10所示,有些故障状态下的幅频响应曲线和电路正常状态幅频响应曲线几乎重合,区分度很小。

基于Matlab程序计算36个故障状态幅频响应和电路正常状态的“区别度”,得到结果如表2所示。根据该滤波器电路的特点,参考图2~10的幅频响应曲线,设置“区别度”阈值 $\text{Th} = 3$,从而确定可测的故障集合为 $F_{\text{new}} = \{R1\text{-short}, R1\text{-open}, R1\downarrow, R1\uparrow, R2\text{-short}, R2\text{-open}, R2\downarrow, R2\uparrow, C2\text{-short}, C2\text{-open}, C2\downarrow, C2\uparrow, C3\text{-short}, C4\text{-short}, C5\text{-short}, L1\text{-open}, L2\text{-short}, L2\text{-open}, L2\downarrow}, L2\uparrow\}$,包含20个故障状态。

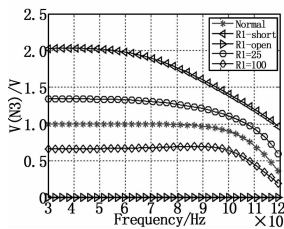


图 2 R1 各故障幅频响应曲线

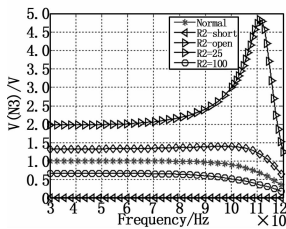


图 3 R2 各故障幅频响应曲线

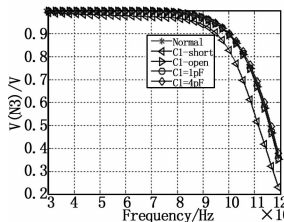


图 4 C1 各故障幅频响应曲线

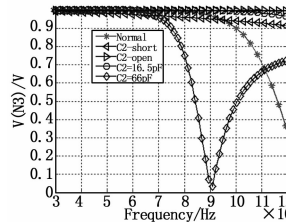


图 5 C2 各故障幅频响应曲线

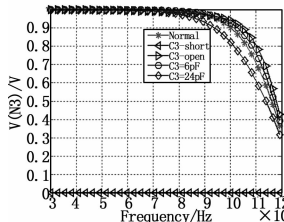


图 6 C3 各故障幅频响应曲线

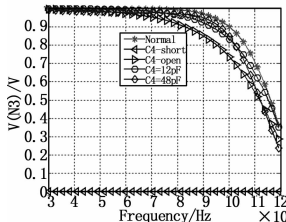


图 7 C4 各故障幅频响应曲线

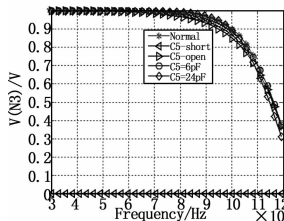


图 8 C5 各故障幅频响应曲线

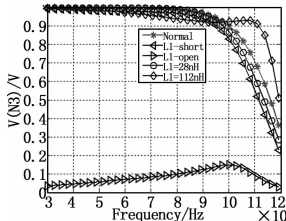


图 9 L1 各故障幅频响应曲线

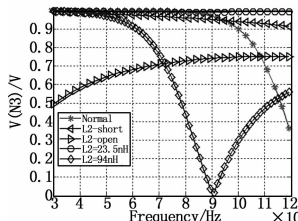


图 10 L2 各故障幅频响应曲线

基于测前扫频仿真得到的各个电路状态下的幅频响应数据, 根据电路的截止频率, 选择 4 个测试频率: {30, 90, 100, 110} MHz, 从测前仿真数据中抽取出可测故障集合 F_{new} 中各个故障在 4 个频率下的电压幅值得到故障字典矩阵 $D_{21 \times 4}$ 。

针对可测故障集 F_{new} 中的 20 个故障状态, 在测后仿真时设置不同的参数变化故障状态如表 4 所示。

表 2 各故障状态幅频响应和电路正常状态的“区别度”

元件	短路故障	开路故障	参数变小 ↓	参数变大 ↑
R1	25.92	29.47	9.13	9.49
R2	29.47	55.55	10.66	12.40
C1	2.18	0.14	0.07	0.16
C2	4.50	5.43	5.17	10.33
C3	29.47	1.26	0.66	1.47
C4	29.47	3.00	1.15	1.90
C5	29.47	0.83	0.30	0.67
L1	2.18	26.81	1.18	2.85
L2	4.50	9.49	5.36	13.41

表 3 可测故障集故障字典矩阵 $D_{21 \times 4}$

故障	30 MHz	90 MHz	100 MHz	110 MHz
Normal	0.9997	0.9701	0.9022	0.7119
R1-short	2.0237	1.6019	1.4117	1.2033
R1-open	9.8751e-8	1.2026e-7	1.0503e-7	5.6528e-8
R1 ↓	1.3384	1.2101	1.1122	0.9381
R1 ↑	0.6638	0.6932	0.6444	0.4555
R2-short	4.0266e-8	3.2028e-8	2.5482e-8	1.6735e-8
R2-open	1.9848	2.4069	2.9828	4.7214
R2 ↓	0.6681	0.6050	0.5288	0.3847
R2 ↑	1.3298	1.3866	1.3916	1.2385
C2-short	0.9930	0.9510	2.5482e-8	0.9289
C2-open	0.9996	0.9990	0.9985	0.9973
C2 ↓	0.9997	0.9979	0.9933	0.9833
C2 ↑	0.9998	0.0282	0.4865	0.6607
C3-short	4.0473e-8	3.2038e-8	2.8234e-8	2.4065e-8
C4-short	4.0186e-8	3.1836e-8	2.4515e-8	1.5170e-8
C5-short	4.0266e-8	3.2028e-8	2.5482e-8	1.6735e-8
L1-open	0.0367	0.1245	0.1498	0.0952
L1-short	0.9930	0.9510	0.9410	0.9289
L2-open	0.4960	0.7409	0.7486	0.7516
L2 ↓	0.9974	0.9911	0.9914	0.9920
L2 ↑	0.9965	0.0140	0.2955	0.4703

表 4 测后仿真故障参数设置

元件	参数变小 ↓	参数变大 ↑
R1/ R2	30 Ω	80 Ω
C2	20 pF	50 pF
L2	30 nH	80 nH

在 4 个不同频率的正弦交流信号激励下通过 PSpice 仿真得到相应的输出节点电压幅值, 从而得到测后仿真的测试数据矩阵 $T_{20 \times 4}$, 如表 5, 其中有两组测试数据相同: {R1-open, R2-short, C3-short, C4-short, C5-short} 5 个故障的测试数据均为 [0, 0, 0, 0], {C2-open, L2 ↓} 2 个故障的测试数据均为 [1, 1, 1, 1], 在测后诊断时会得到模糊诊断的结果。

基于 Matlab 程序计算 20 个待测故障的测试数据与故障字典矩阵各行数据的“区别度”, 取最小值作为测试数据对应故障字典中的故障状态, 从而实现故障元件的定位, 得到结果如表 6 所示。

通过“区别度”的计算, 20 个待测故障的故障检测率达到 100%, 均能与电路正常状态区分开, 故障元件定位的正确诊断故障 12 个, 诊断结果含有模糊集的故障个数 5 个, 误

表5 可测故障集待测故障测试数据矩阵 $T_{20 \times 4}$

故障	30 MHz	90 MHz	100 MHz	110 MHz
$R1 - short$	2.02	1.60	1.41	1.20
$R1 - open$	0	0	0	0
$R1 \downarrow$	1.25	1.15	1.06	0.89
$R1 \uparrow$	0.77	0.78	0.73	0.54
$R2 - short$	0	0	0	0
$R2 - open$	1.98	2.41	2.98	4.72
$R2 \downarrow$	0.75	0.69	0.61	0.45
$R2 \uparrow$	1.23	1.25	1.23	1.05
$C2 - short$	0.99	0.95	0	0.93
$C2 - open$	1.00	1.00	1.00	1.00
$C2 \downarrow$	1.00	1.00	0.99	0.97
$C2 \uparrow$	1.00	0.77	0.24	0.29
$C3 - short$	0	0	0	0
$C4 - short$	0	0	0	0
$C5 - short$	0	0	0	0
$L1 - open$	0.04	0.12	0.15	0.10
$L2 - short$	0.99	0.95	0.94	0.93
$L2 - open$	0.50	0.74	0.75	0.75
$L2 \downarrow$	1.00	1.00	1.00	1.00
$L2 \uparrow$	1.00	0.33	0.07	0.34

表6 故障诊断结果

故障	“区别度”最小值	诊断结果
$R1 - short$	0.0055	$R1 - short$
$R1 - open$	$1.96e-7$	$R1 - open$
$R2 - short$	$5.98e-8$	$R2 - short$
$C3 - short$	$6.36e-8$	$C3 - short$
$C4 - short$	$5.88e-8$	$C4 - short$
$C5 - short$	$5.98e-8$	$C5 - short$
$R1 \downarrow$	0.1283	$R1 \downarrow$
$R1 \uparrow$	0.1825	$R1 \uparrow$
$R2 - open$	0.0065	$R2 - open$
$R2 \downarrow$	0.0930	$R1 \uparrow$
$R2 \uparrow$	0.1993	$R1 \downarrow$
$C2 - short$	0.0034	$C2 - short$
$C2 - open$	0.0033	$C2 - open$
$C2 \downarrow$	0.0138	$C2 \downarrow$
$C2 \uparrow$	0.4794	$C2 \uparrow$
$L1 - open$	0.0074	$L1 - open$
$L2 - short$	0.0035	$L2 - short$
$L2 - open$	0.0047	$L2 - open$
$L2 \downarrow$	0.0033	$C2 - open$
$L2 \uparrow$	0.4095	$L2 \uparrow$

诊断个数3个。分析电路固有的结构特点,电阻 $R1$ 和 $R2$ 的参数变化对输出电压幅值的影响是相反的,因此造成了将 $R2 \downarrow$ 误诊为 $R1 \uparrow$,将 $R2 \uparrow$ 误诊为 $R1 \downarrow$;而 $L2 \downarrow$ 故障的误诊为 $C2 - open$ 原因则是该诊断方法本身的局限性,在测前仿真建立的故障字典中选定的4个频率测试点导致了测后故障的定位困难。

4 结论

现有的模拟电路故障诊断研究倾向于寻找通用的方法,统一解决模拟电路的故障诊断问题,但模拟电路根据其功能不同有其固有的特性,在实际诊断中针对不同功能的模拟电路选取不同的测试和故障诊断方法更符合应用需求。本文针对模拟滤波器电路的故障诊断问题,研究了其故障检测和故障元件定位方法:在基于测前仿真的故障字典建立环节,引入“区别度”计算故障状态和正常状态的区分程度,对电路的故障可测性进行分析,确定可测的待测故障集并建立故障字典;在基于测后仿真的故障诊断环节,通过不同频率的输入激励获取电路的输出电压幅值,构建测试数据,再通过最小“区别度”的计算实现故障检测及故障元件的定位。最后通过一个仿真实例,初步验证了本文提出方法的实用性。但是由于测前仿真字典的建立需要进行频率的选择确定,因此,滤波器电路故障诊断中的测试频率选择是一个需要深入研究的问题,这也是本文下一步将要继续研究的内容。

参考文献:

- [1] 胡梅,胡列峰,明德祥. 模拟电路统一软故障诊断的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27 (11): 1060-1066.
- [2] Aminian M, Aminian F. A modular fault-diagnostic system for analog electronic circuits using neural networks with wavelet transform as a preprocessor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56 (5): 1546-1554.
- [3] Tan Y H, He Y G, Cui C, et al. A novel method for analog fault diagnosis based on neural networks and genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57 (11): 2631-2639.
- [4] 俞雪平,胡云安,郑致刚. 基于分层决策的模拟电路故障诊断技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (2): 304-306.
- [5] 胡梅,王红,杨士元. 基于测前迭代仿真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): 914-920.
- [6] Yang C L, Tian Sh L, Long B, et al. Methods of handling the tolerance and test-point selection problem for analog-circuit fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60 (1): 176-185.
- [7] Sheikhan M, Shabani A A. PSO-optimized modular neural network trained by OWO-HWO algorithm for fault location in analog circuits [J]. Neural Comput & Applic, 2012.
- [8] 张朝龙,何怡刚,邓芳明,等. 一种基于 QPSO-RVM 的模拟电路故障预测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (8): 1751-1757.
- [9] 陈文华. 基于核方法的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1673-1675.
- [10] 钟建林,何友,任献彬. 基于波形相似度的容差模拟电路软故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (8): 222-229.
- [11] Li Z H. A Novel Fault Diagnostic Method Based on Node-Voltage Vector Ambiguity Sets [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63 (5): 1-9.
- [12] Savir J. Test limitations of parametric faults in analog circuits [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52 (5): 1444-1454.
- [13] 罗慧,王友仁,崔江. 基于故障可诊性的模拟电路多音正弦测试信号进化生成 [J]. 宇航学报, 2011, 32 (9): 2051-2058.