



基于EDA的故障字典生成技术研究*

Research on Techniques in Fault Dictionary Construction based on EDA

刘丹丹 任占勇 蒋海涛/中国航空综合技术研究所

摘要: 在现代新型武器装备中, 复杂模拟和数模混合电路的应用在提升装备性能的同时, 也对电路故障诊断提出了更高的要求与挑战。故障字典不但具有规范性和实用性等特点, 且能有效解决当前复杂电路的故障诊断存在的问题, 提高装备的故障诊断效率。本文提出了基于EDA的故障字典生成技术。从该技术的原理出发, 详细论述了故障模式集的选择方法、测试点的筛选与优化方法、特征信号的提取方法、基于EDA的故障注入方法和故障字典的生成方法等; 最后, 以某型机音频处理电路为例, 验证了该故障字典生成方法在故障诊断中的可行性和有效性。

Abstract: The performance of weapons is improved and fault diagnosis becomes more and more difficult while more and more mixed-signal circuit boards are used. And the application proves that the fault dictionary can satisfy the testing and diagnose demands of weapons. In this paper, research on techniques in fault dictionary construction based on EDA is introduced. After describing the basic principle of such method, the paper discussed the selection of fault modes set, filtration and optimization of test points, extraction of characteristic signal, fault injection based on EDA and fault dictionary construction. Finally, by using an audio processing circuit belonged to some airplane, it is validated that the technique in fault dictionary construction is valid and it will be significant for engineering practicability.

关键词: 电子设计自动化; 故障字典; 故障诊断

Keywords: EDA; fault dictionary; fault diagnosis

0 引言

随着现代电子技术和系统技术的发展, 装备电子设备的规模和复杂程度越来越高, 这种状况对现代航空、航天、军工等领域高可靠性的要求形成了挑战。维修数据显示, 数模混合电路, 特别是复杂模拟电路的维修比例最大。针对装备维修保障的需求, 电路故障诊断技术一直是研究的热点和难点^[1-2]。为此, 国内外广泛开展了相关的技术研究, 目前取得的研究成果中, 最为有效的方法是属于测前仿真的故障字典法。但大多数有关故障字典的研究成果存在过程繁琐、实用化程度有限等问题^[3]。为此, 本文引入了适用于实际工程应用的基

于电子设计自动化(EDA)的故障字典生成技术, 该技术借助了EDA仿真技术实现了故障字典的快速生成。

1 故障字典生成技术的原理

故障字典法是目前电路故障诊断中常用方法, 它具有原理简单、升级方便的优点。故障字典法的生成是通过提取电路在各种故障状态下的电路特征, 如测试点的支流电位向量、网络的幅频特性等, 然后将特征与故障一一对应关系列成一个字典的过程。在实际故障诊断时, 只要提取电路的实时特征, 就可以立即从故障字典中查出此时对应的故障。若无法查出故障, 说明故障字典

信息不够丰富, 需要采用其他方法得到诊断结果, 并完善故障字典, 以便于下次诊断。由此, 故障字典的完备性和实用性在于其所包含的故障诊断信息的丰富程度。

故障字典分为直流故障字典和交流故障字典。

直流故障字典是以可及节点的电压为故障特征。由于节点电压最便于测试, 且直流故障字典还具有测前仿真运算量相对较小、测后易于进行故障辨识的优点, 因而被广泛使用。直流故障字典生成技术研究的关键步骤是故障字典的建模, 主要包括故障集的选择、激励信号的选择、故障特征模糊域的划分和隔离、故障字典生成和优化工作。首先, 根据被测电路的特点、以往的经验

* 基金项目: “十一五”优秀航空科学基金(2008ZD41004)项目资助。

及元件故障概率来选择若干单故障和一些多故障作为故障集;然后,根据经验或通过对电路作灵敏度分析,逐步试探得知能隔离故障集中的所有故障的激励信号;之后,根据故障仿真分析计算出的每个故障状态下的测试向量和故障隔离判据,见式(1),确定故障特征模糊集;

最后,根据上述得到的模糊集,并依据如下步骤,进行故障编码与优化,以完成故障字典的生成。故障编码与优化过程分为以下5步。

1) 首先选取编码字数种类最多的测试电压,如果这样的测试电压不止一个,则可以从任选一个。

2) 根据故障对所选测试电压的编码进行故障隔离,若与某一编码对应的故障只有一个,则该故障被隔离;若与某一编码对应的故障有若干个,则这些故障构成一个模糊组,在以后的分离中,各故障块可分别考虑。

3) 检查是否所有的故障都被分离,若是,则停止,否则进行下一步。

4) 将已选的测试电压和已被分离的故障去掉,如果所有测试电压已选完,则停止,否则做下一步。

5) 在剩下的测试电压中选一个编码数字种类最多的测试电压(此时的编码数字种类等于各个故障块编码数字种类之和),如果这样的测试电压不止一个,可从中任选一个,转第2步。

$$\sum_{k=1}^n [V_k(NOR) - V_k(F_i)]^2 \geq 0.5n \quad (1)$$

其中, n 为测试点数; $V_k(NOR)$ 为节点 K 的正常电压; $V_k(F_i)$ 为电路中存在故障 F_i 时节点 K 的电压。

2 基于EDA的故障字典生成技术

EDA仿真技术是上个世纪70年代出现的、90年代逐渐成熟。现有成熟的

EDA软件可以将电路原理图设计、印刷电路板设计、电路仿真综合分析等功能组合在一起,能够同时对模拟、数字和数模混合电路进行仿真,完成多个特性的分析。本文研究基于EDA的故障字典生成技术:首先,基于EDA软件强大的功能仿真和故障仿真功能,建立电路的EDA功能仿真模型,并向其运行基于EDA的故障注入操作;然后,筛选并优

化出电路的最优测试点或次优测试点,收集并提取相应特征量;最后,通过对比正常电路输出和故障电路输出,生成相应的故障码,完成故障字典的生成。

该方法的原理框图如图1所示。

2.1 故障模式集的选择

对电路的故障模式及其重要度进行详细分析,选取重要度较高的故障模式,建立故障模式集。本文选用电路FMEA—FTA综合的分析方法,完成此项工作。

FTA(故障树分析)和FMEA(故障模式和效应分析)方法的基本原理是在FTA的基础上进行FMEA分析;然后结合FMEA分析结果与电路FMEA分析报告中严重故障模式清单,取其交集,得到电路关键功能故障模式清单。

首先根据电路功能和故障定义,选择一个或多个电路不希望发生的故障模式作为顶事件;然后建立相应顶事件的故障树,并列重要底事件清单,同时结合FMEA分析技术对重要底事件进行分析评定。根据分析结果,并结合电路FMEA分析报告中严重故障模式清单,确定产品关键功能故障模式清单。实施过程如图2所示。

采用FTA和FMEA相结合的方法,

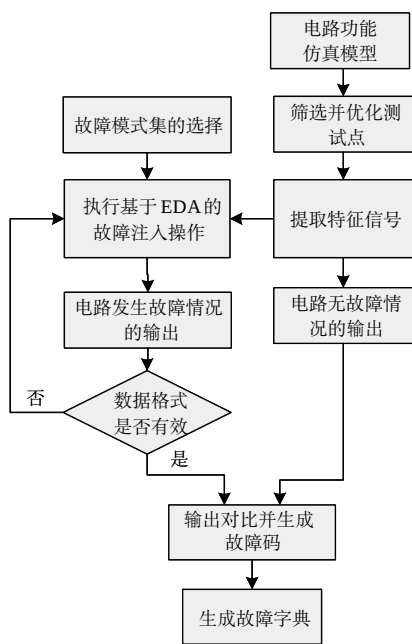


图1 基于EDA的故障字典生成技术原理

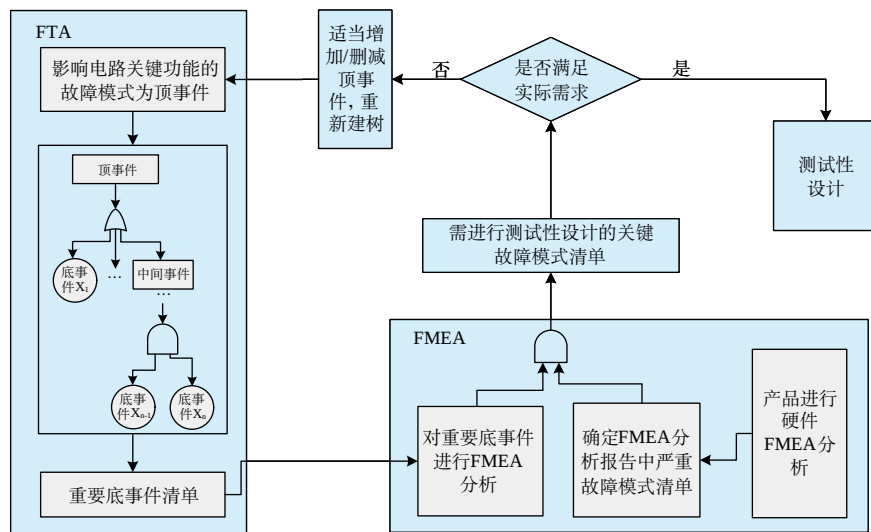


图2 FMEA和FTA综合分析法的实施过程

既可以抓住重点,又可以做到较为全面、深入的分析。

2.2 测试点的筛选与优化

测试点的筛选与优化是生成故障字典的一个重要步骤,测试的规模及其复杂性测试点的选择有密切的关系。为了满足故障的及时检测和准确定位,不仅要尽量减少电路的测试点,还要对布线的难易和测试信号的复杂程度等进行综合决策。本文研究的测试点筛选与优化方法是依据参考文献[1],并结合电路原理图,利用权值函数分别对故障信息表中的数据信息进行统计实现的。

2.3 特征信号的提取

特征信号的有效提取是生成故障字典的关键技术之一。为有效提取特征信号,需要对有效节点电压产生的数据进行数据处理,生成以仿真故障及其故障特征为基础构成的数据库,作为故障字典的信息来源。

构成故障字典必备的特征信号提取方法分为两种。

1) 波形辨识。基于相关分析,以IEEE 1641的相关信号定义作为波形标准模板,实现对电路故障仿真软件输出

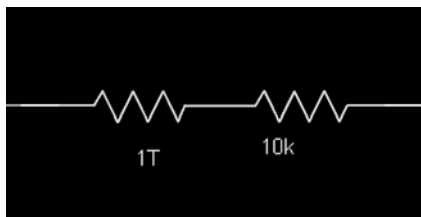


图3 修改电路原理图实现开路故障注入

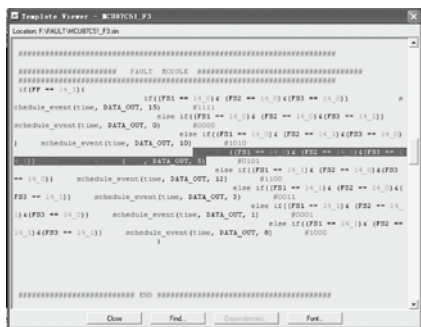


图4 修改87C51编程文件实现故障注入

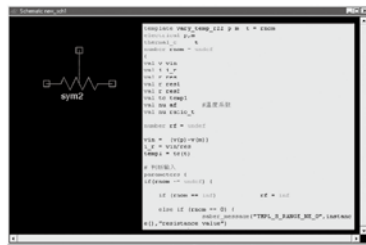
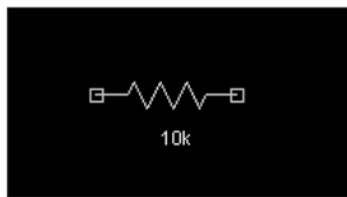


图5 修改正常电阻模型实现故障注入

的节点电压离散数据的波形辨识。

2) 时域典型信号特征提取。基于IEEE 1641,并结合实际测试诊断的需求,总结提取典型信号的特征参数,然后根据波形辨识的结果,进行典型参数提取,按照信号与故障的对应关系,构造出故障特征。

2.4 基于EDA的故障注入

基于EDA的故障注入方法是将EDA仿真和故障注入相结合,按照电路中指定元器件的故障信息,通过对其建模或对电路正常状态仿真模型的修改,形成元器件的故障模型,从而生成电路的故障状态仿真模型,然后收集和分析所注入故障的反映信息,最后完成对电路功能仿真模型的故障注入^[4-5]。

基于EDA的故障注入主要采用修改仿真电路原理图、修改复杂器件的编程文件、修改正常仿真模型定义和故障建模等四种方法。

1) 修改仿真电路原理图。该方法比较直观,可以直接将已建好的故障模型加入到故障元器件的指定位置,生成电路的故障仿真模型。如图3所示,利用该方法向电路注入开路故障模式。

2) 修改复杂器件的编程文件。复杂器件,如数模混合器件、可编程逻辑器件等,其功能仿真模型一般采用基于硬件描述语言的建模方法与层次化建模方法相结合的综合建模方法实现。本文研究向其编程文件中嵌入故障模式编程模块,实现故障注入。以单片机87C51为例,向其编程文件中嵌入的故障集编程模块,如图4所示。

3) 修改正常仿真模型。该方法有助于性能参数退化故障、参数漂移故障等与环境应力和工作载荷有关的故障模型的建立。该方法在器件的原有功能模型的基础上进行修改,实现故障注入。图5为在原有10kΩ普通模型的基础上建立的阻值随温度变化而变化的热敏电阻模型。

4) 故障建模。该方法主要是利用构建故障模型的方法,即向仿真电路相关位置嵌入故障模块来实现。图6是为实现向电路中注入间歇性固高故障所建立的故障建模模块。

2.5 故障字典的生成

故障字典是将电路在各种故障状态下的特征信号提取出来,与故障形成一一对应的关系,从而构成的一个字典。在执行诊断测试时,根据提取的特征信号,并参照故障字典,便可以迅速完成故障的及时检测与准确定位。在本文,对电路执行基于EDA仿真的故障注入操作,然后提取每个故障电路仿真结果中与测试点波形相关的特征信号,并将其与无故障状态下的特征信号进行比对,最终形成故障字典。基于EDA的故障字典的生成算法分为4步。

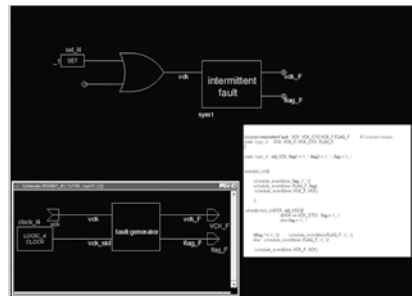


图6 间歇性固高故障模块



1) 基于电路的EDA功能仿真模型,分析EDA仿真出的特征信号的波形类型。

2) 根据电路诊断测试的需求以及EDA仿真环境的特点,提取故障状态下的特征信号,并以时间为刻度,将其转化为离散点的形式,存储在文本文件中,用于后续的波形分辨。

3) 根据文本数据,并运行数据运算,形成相应的故障码。

4) 将故障模式与故障码一一对应生成故障字典。

3 基于EDA的故障字典设计与实现

3.1 软件的开发流程

故障字典的生成过程,实际上是测

试前的分析过程,它主要完成故障模式集的选择、测试点的筛选与优化、特征信号的提取和基于EDA的故障注入等。基于EDA的故障字典生成软件的开发流程如图7所示,具体步骤为6步。

1) 启动软件,进入故障字典生成软件界面。

2) 导入文本文件,其代表故障状态下的特征信号的EDA电路仿真输出。

3) 对所导入文本文件数据的格式进行符合性检查。即检查文本文件中每行的数据量是否正确、每行中包括的分隔符数量是否正确等。如果检测正确,则进入运算阶段;如果检测到格式错误,则返回,重新选择并检测待测数据文件。

4) 执行数据运算。在仿真时间内,比较电压值的有效平均值和无故障条件下电路的电压有效平均值,根据比较结果生成相应的故障代码。

5) 执行故障代码的有效性验证。随机抽取若干时间节点的电压数据,并与理论实际数据比较,若二者差值保持在误差允许范围之内,则故障代码可信,完成故障字典的生成;若二者差值超出误差允许范围,则代码不可信,利用时间复杂度高的原始算法重新生成故障代码。

6) 程序结束。

3.2 软件的开发代码

依据上述软件开发流程,在VC++环境下,开发故障字典的生成软件,软件部分源代码如下:

```
.....
// jiemianDlg.cpp : implementation file
//
#include "stdafx.h"
#include "jiemian.h"
#include "jiemianDlg.h"
#include "MATH.h"
#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;
#endif
.....

pf.Open("test.txt",2);
CheckStyle();
pf.ReadString(str_a);
while(pf.ReadString(str_a)!=0)
{
    i++;
    d=ReadReqData(str_a,"D");
    resultD=resultD+d;
    a=ReadReqData(str_a,"A");
    resultA=resultA+a;
}
```

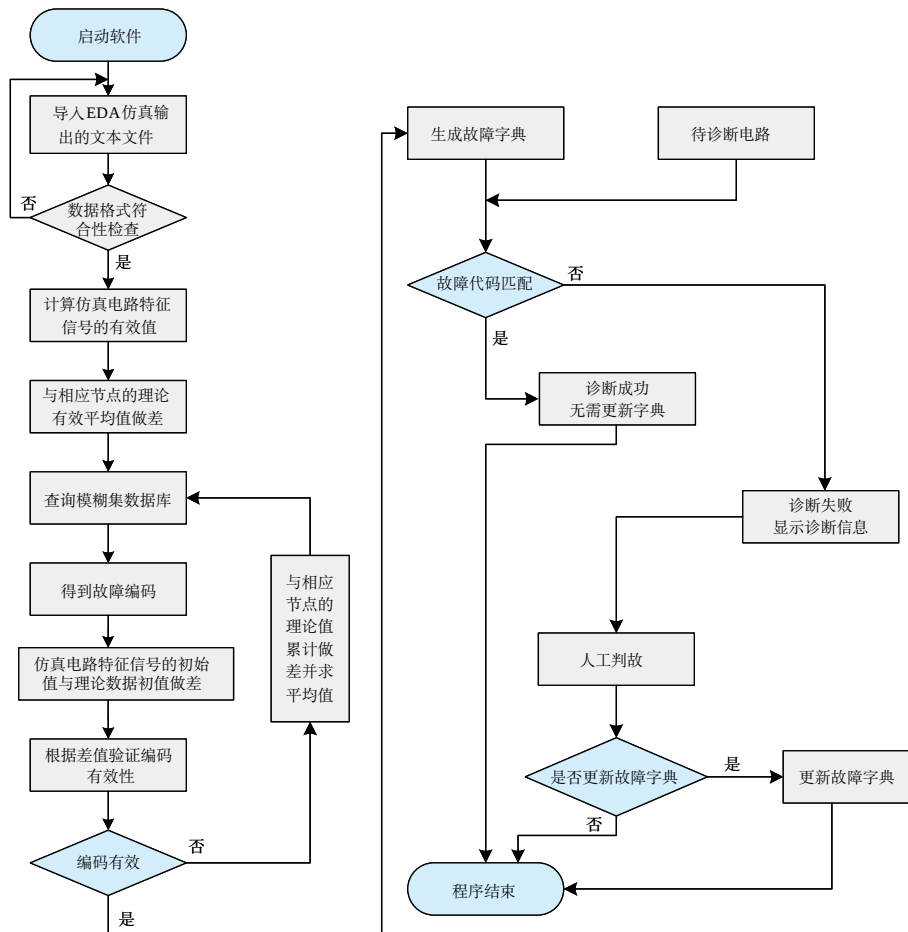


图7 故障字典生成软件的开发流程

```

b=ReadReqData(str_a,"B");
resultB=resultB+b;
c=ReadReqData(str_a,"C");
resultC=resultC+c;
}
.....
}
index=str_a.Find("t");
str_a=str_a.Right(str_a.GetLength()
)-index-1);
index=str_a.Find("t");
str_a=str_a.Left(index);
int nRow=m_list.InjectItem(0,"**");
m_list.SetItemText(nRow,1,str_a);
m_list.SetItemText(nRow,2,str_a);
pf.ReadString(str_a);
index=str_a.Find("t");
str_a=str_a.Right(str_a.GetLength()-
index-1);
PicView(num);
UpdateData(false);
}

```

3.3 软件的实现

基于EDA的故障字典生成软件有四种模式:初始化、特征信号提取、故障字典生成和故障字典更新。故障字典生成软件主界面如图8所示。

4 工程案例

以某型飞机音频处理单元为例,应用已开发的基于EDA的故障字典生成软件进行验证。

该音频处理单元是该型飞机通信导航系统的一个重要装置。其单元电路的主要功能是根据综合任务处理机发出的作战和飞行指令,从数据存储单元中提取声音数据,通过语音合成电路将声音信号发送到通信控制器。该电路包含了数字器件、模拟器件、数模混合器件和可编程逻辑器件,信号比较全面,对



图8 故障字典生成软件主界面

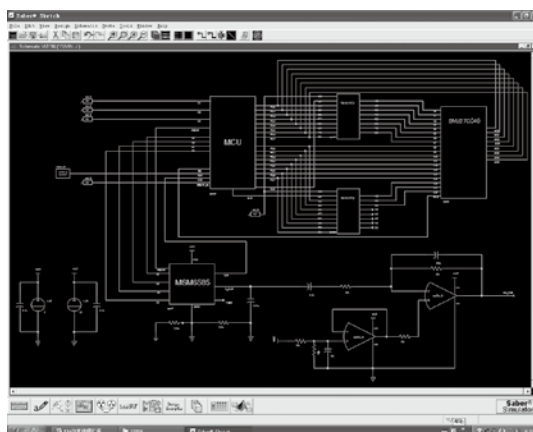


图9 音频处理电路的仿真模型

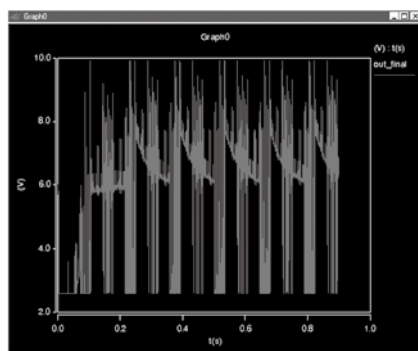


图10 电路功能仿真分析的输出波形

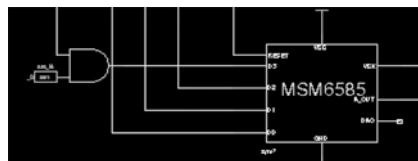


图11 MSM6585 DO0管脚的固低故障

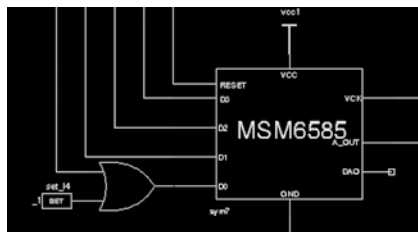


图12 MSM6585 DO0管脚的固高故障

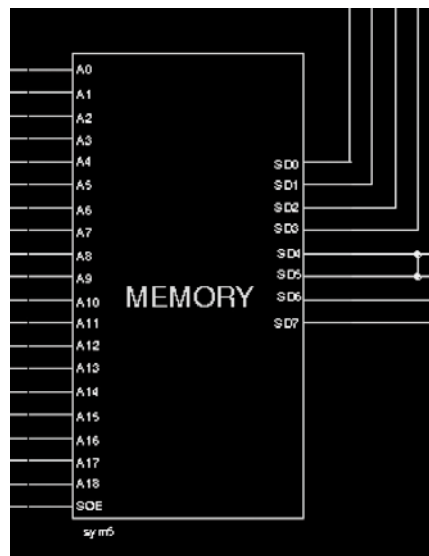


图13 MCS-51单片机桥接故障模型

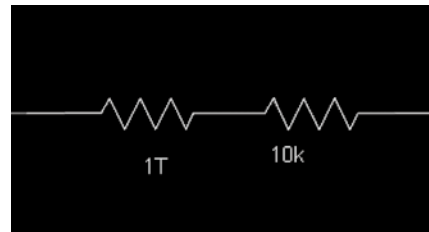


图14 电路开路故障模型

基于EDA的故障字典生成技术的研究具有典型性。

在EDA仿真环境下,根据音频处理电路的设计原理图对其进行建模,如图9所示。运行功能仿真分析,得到电路正常情况下的仿真输出波形如图10所示,与实际得到的试验波形相符,说明所建模型合理,与实际电路相符。

4.1 故障模式集的选择与建模

通过对音频处理单元的故障模式及其重要度进行详细分析,选取重要度较高的故障模式,建立故障模式集,并分别对其进行建模。

图11至图15所示,为音频处理电路中MSM6585芯



图15 电路短路故障模型

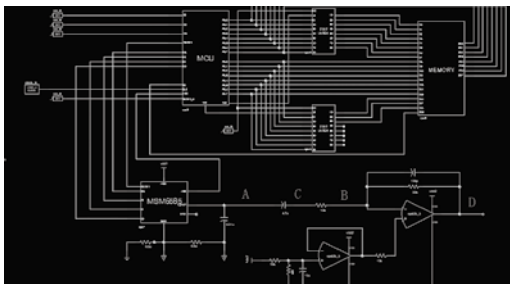


图16 音频处理电路的最优测试点

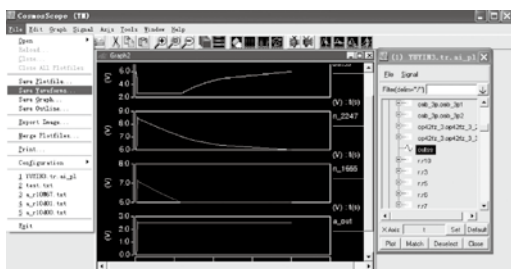


图17 MSM6585芯片DO0管脚的固低故障的特征波形

t/s	A	B	C	D
0.0253862	0.0253862	6.00052	6.00052	6.00052
6.25e-005	0.0253862	6.00052	6.00052	6.00052
8.43857e-005	0.0255721	6.00052	6.00052	5.99999
0.000106271	0.0259079	6.00052	6.00104	5.99896
0.000119049	0.0261376	6.00052	6.00127	5.99824
0.000125	0.0262567	6.00052	6.00139	5.99787
0.000137015	0.0265407	6.00052	6.00167	5.99696
0.000149029	0.0268572	6.00052	6.00199	5.99595
0.000164368	0.027291	6.00052	6.00242	5.99456
0.0001875	0.0280086	6.00052	6.00314	5.99223
0.000204838	0.028687	6.00052	6.00381	5.99006
0.000216661	0.029193	6.00052	6.00432	5.98843
0.000231751	0.0298781	6.00052	6.005	5.98622
0.00025	0.0307626	6.00052	6.00589	5.98335
0.000263388	0.0315184	6.00052	6.00664	5.98092
0.000276776	0.0323379	6.00052	6.00746	5.97828
0.000290163	0.033194	6.00052	6.00831	5.9755
0.0003125	0.03471	6.00052	6.00982	5.97057
0.000374246	0.0391243	6.00052	6.01422	5.95608
0.000375	0.0391771	6.00052	6.01427	5.95591

图18 波形转化为文本数据



图19 向MSM6585注入固低故障后的故障字典诊断界面

片DO管脚的固低故障、固高故障、MCS-51单片机桥接故障、电路短路故障、电路开路故障的模型。

4.2 测试点的筛选与优化

利用上述测试点筛选与优化方法,并结合灵敏度分析结果,确定该音频处理电路的最优测试点A、B、C、D。图16所示,经过仿真验证,由A、B、C、D四个节点所建立的故障字典足以隔离所有故障。针对上节所述的故障模式集,运行基于仿真的故障注入操作,收集电路注入上述故障后,测试点A、B、C、D的仿真波形。图17所示,为电路中MSM6585芯片DO0管脚注入固低故障后,所收集的仿真波形。

4.3 生成故障状态下的特征信号的文本文件

得到上述所有数据波形,以时间为刻度,将它们转化为离散点的形式,并存储于.txt文档之中,如图18所示。其中,第一列对应仿真时刻,后四列分别对应A、B、C、D四个测试节点在当前仿真时刻所测得的电压值。

4.4 故障字典的生成

将上述生成的故障状态下的特征信号的文本文件,导入到故障字典生成软件中,生成该飞机音频处理单元的故障字典。

4.5 故障字典的有效性验证

依据音频处理电路故障模式集,并采用按比例分层抽样的方法,建立关键故障模式集的EDA模型。对音频处理电路

执行基于EDA的故障注入操作,验证该故障字典生成软件的有效性。例如,向音频处理单元仿真电路的MSM6585芯片中注入固低故障,如图19所示,收集测试点A、B、C、D的实测均值,并与电路无故障条件下的电压有效平均值进行比较,生成故障代码,然后,与故障字典中的编码匹配,匹配成功,在“提示信息”中显示诊断信息,并在“提示图”中显示故障发生的具体位置。与实际测试结果相符,说明所建立的故障字典有效。

AST

参考文献

- [1] 石君友. 测试性设计分析与验证[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [2] Liu Dandan, Ren Zhanyong. Methodology of fault integrated diagnostics based on EDA software [C]. 2011 Prognostics & System Health Management Conference (PHM-2011 Shenzhen).
- [3] Liu Dandan, Li Yonghong. The fault injection system applied to laboratory's test validation of FDR and FIR [C]. The proceeding of 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2009.
- [4] Liu Dandan, Ren Zhanyong. Methodology of fault injection based on EDA software [C]. 2010 Prognostics & System Health Management Conference (PHM-2010 Macau).

[5] 赵广燕,孙宇峰. EDA仿真在电路故障诊断中的应用[C]. 中国航空学会2007年学术年会,2007.