

模拟电路仿真与故障字典生成方法

吉蒙¹, 郭玉伟¹, 王卜瑶¹, 吕思璐¹, 王占选²

(1. 中国人民解放军第 4724 工厂, 上海 200436; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 针对模拟电路故障诊断需求, 对模拟电路仿真和故障字典生成的实现方法进行了研究。首先, 设计软件实现总体结构, 从软件界面层、运行层、数据访问层、数据层等方面搭建过程中需要的电路知识管理、工程管理、电路仿真设置、仿真运行、故障字典生成和辅助故障诊断等功能框架; 进而通过创建被测电路仿真原理图、新建仿真工程、仿真设置、故障注入等详细设计, 实现被测电路的功能仿真和故障仿真; 然后根据仿真结果, 利用故障字典生成器生成所有故障模式下的整数编码故障字典; 最终利用辅助诊断功能, 验证故障字典是否可用。通过对演示板 12 个故障注入后的仿真数据做故障字典生成训练, 并完成了对实测数据的故障定位, 验证了该方法的可行性, 为模拟电路故障诊断提供了实用的测试方法和手段, 具有较好的实用价值。

关键词: 模拟电路; 故障诊断; 故障字典; 故障注入; 故障仿真

Analog Circuit Simulation and Fault Dictionary Generation Method

JI Meng¹, GUO Yuwei¹, WANG Buyao¹, LÜ Silu¹, WANG Zhanxuan²

(1. No. 4724 Factory of PLA, Shanghai 200436, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China)

Abstract: In response to the need for analog circuit fault diagnosis, the implementation methods of analog circuit simulation and fault dictionary generation were studied. First, designed the overall structure of the software, and build the functional framework of circuit knowledge management, engineering management, circuit simulation settings, simulation operation, fault dictionary generation and auxiliary fault diagnosis required in the process from the software interface layer, operation layer, Data access layer, data layer and other aspects. Furthermore, by creating a simulation schematic diagram of the tested circuit, creating a new simulation project, setting up simulation settings, injecting faults, and other detailed designs, functional simulation and fault simulation of the tested circuit can be achieved. Then, based on the simulation results, used a fault dictionary generator to generate integer encoded fault dictionaries for all fault modes. By conducting fault dictionary generation training on the simulation data of 12 fault injections on the demonstration board, and completing fault localization on the measured data, the feasibility of this method was verified, provided a practical testing method and means for analog circuit fault diagnosis, with good practical value.

Keywords: analog circuit; fault diagnosis; fault dictionary; fault injection; functional simulation

0 引言

电路板被广泛应用于日常生活、工作的各个领域, 随着使用时间的日益增长, 元器件的可靠性逐渐降低, 再加上某些不可预见因素的影响, 使得电路板的故障发生在所难免。为了提高电路发生故障的测试诊断效率, 对电路板级测试诊断方法的研究显得尤为重要^[1-3]。

在模拟电路故障诊断问题中, 当前主要的研究方法分别为测试前仿真和测试后仿真。测试前仿真的方法主要是通过提前仿真, 得到各种情况下电路各个测点的故障特征, 建立故障字典, 接着再将测试时每次得到的信号与故障字典比较就可以确定对应的电路状态; 测试后仿真的方法是通过建立电路方程推导电路参数, 然后在仿真中验证^[4-7]。主要对模拟电路仿真与故障字典生成方法进行研究。

1 功能组成

模拟电路仿真与故障字典生成主要功能由电路知识管

理、工程管理、电路仿真设置、电路仿真、故障字典生成和辅助故障诊断等几部分组成, 如图 1 所示。

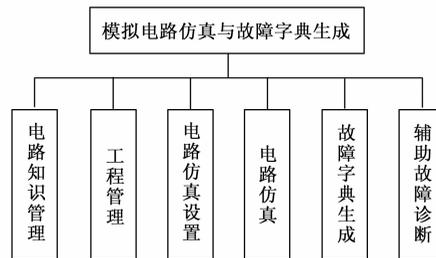


图 1 模拟电路仿真与故障字典生成功能组成

1) 电路知识管理: 用于实现仿真相关的原理图、电路网表、说明文档、元器件、仿真设置、功能仿真模型、故障仿真模型、仿真结果以及最终生成的故障字典文件等管理功能^[8-9];

收稿日期: 2023-07-07; 修回日期: 2023-08-09。

作者简介: 吉蒙(1997-), 女, 大学本科, 助理工程师。

引用格式: 吉蒙, 郭玉伟, 王卜瑶, 等. 模拟电路仿真与故障字典生成方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 124-130.

2) 工程管理: 针对每一个仿真电路建立与之对应的仿真工程, 用于该电路的仿真和故障字典生成;

3) 电路仿真设置: 实现故障设置、测试点设置^[10]、测试激励设置、设置保存等功能;

4) 电路仿真: 通过设计仿真软件结构, 调用 pspice 仿真引擎, 实现电路的仿真执行、仿真类型分析以及仿真结果的保存等;

5) 故障字典生成: 实现仿真的波形识别、信号特征提取、容差配置、模糊集划分以及故障字典文件生成等功能;

6) 辅助故障诊断: 利用生成的故障字典, 实现对实测数据的诊断推理和诊断定位^[11-14]。

2 系统设计

2.1 总体结构设计

模拟电路仿真与故障字典生成方法实现思路如图 2 所示, 其理论基础是故障模式识别, 首先, 根据被测模拟电路的故障诊断需要确定所要诊断的所有故障模式, 建立对应的故障模型; 然后利用 pspice 仿真引擎模拟所有故障模式下的电路状态, 包括故障仿真和功能仿真, 获取仿真后的所有测试节点数据, 将其做必要的数据处理获取波形特征, 并生成波形特征与故障模式对应的故障字典; 进而在实际测试时, 利用自动测试系统 ATE 对被测电路加载与电路仿真一致的测试激励, 并测得实测响应数据; 最终, 根据实测数据与故障字典做对比, 利用一定判决准则实现故障定位, 包括故障的检测和隔离。

模拟电路仿真与故障字典生成软件的总体结构设计如图 3 所示, 分为界面层、运行层、数据访问层和数据层四个部分:

1) 界面层用于提供各个功能部分的操作界面, 分别实现电路知识管理、工程管理、仿真设置、电路仿真、故障字典生成、辅助故障诊断等功能。

2) 运行层用于实现电路仿真、故障字典生成等各部分功能单元的资源调度, 包括电路模型管理器、电路仿真器、故障字典生成器以及诊断推理机等。其中, 电路模型管理用于完成故障模式信息、测试点信息、仿真类型信息、容差信息、故障字典信息、电路知识信息等资源的管理; 电路仿真器包括仿真运行所必须的网表文件处理、.cir 文件处理以及仿真引擎等; 故障字典生成包括仿真数据的预处理、波形识别以故障字典的生成等; 诊断推理实现测试程序的执行、实测数据与故障字典的对比, 故障的诊断定位等。

3) 数据访问层主要包括文本文件的管理、仿真相关数据库的管理等, 用于实现对电路仿真和故障字典生成整个过

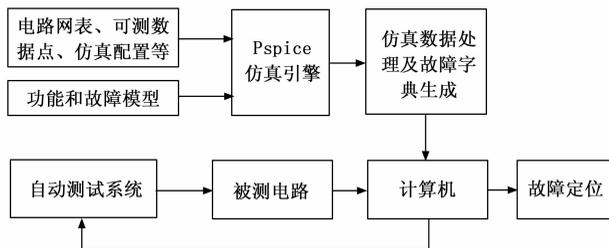


图 2 模拟电路仿真与故障字典生成方法实现思路

程中数据层文件的访问和处理, 数据层文件包括仿真模型数据库、网表文件、.cir 文件、仿真结果、故障字典文件等各种数据。

4) 为了实现被测电路板故障诊断定位, 设计辅助诊断功能。在故障诊断界面中输入所选择的仿真类型和测试点的测试结果, 系统根据生成的故障字典给出故障位置、具体故障模式或可疑故障集, 为后续测试提供依据。

辅助诊断^[15]软件依据的是保存的测试点列表、仿真类型列表、故障字典数据, 输入的是当前测试点测试结果, 辅助诊断的核心是故障字典推理机。推理机根据当前节点的测试结果, 查找故障字典、并判断当前值落在哪个模糊集对应的模糊域中, 从而确定新的可疑故障集, 排除其他的故障集。

故障推理机的推理结果分别以列表的形式显示排除的故障和可疑故障。

2.2 电路知识管理

电路知识管理包括了被测电路板的所有知识和数据信息。通过提供的相关输入和管理接口, 导入并解析电路板的相关资料, 包括电路原理图、电路网表、所含元器件数据、仿真模型等基本信息的管理, 还包括故障注入后的仿

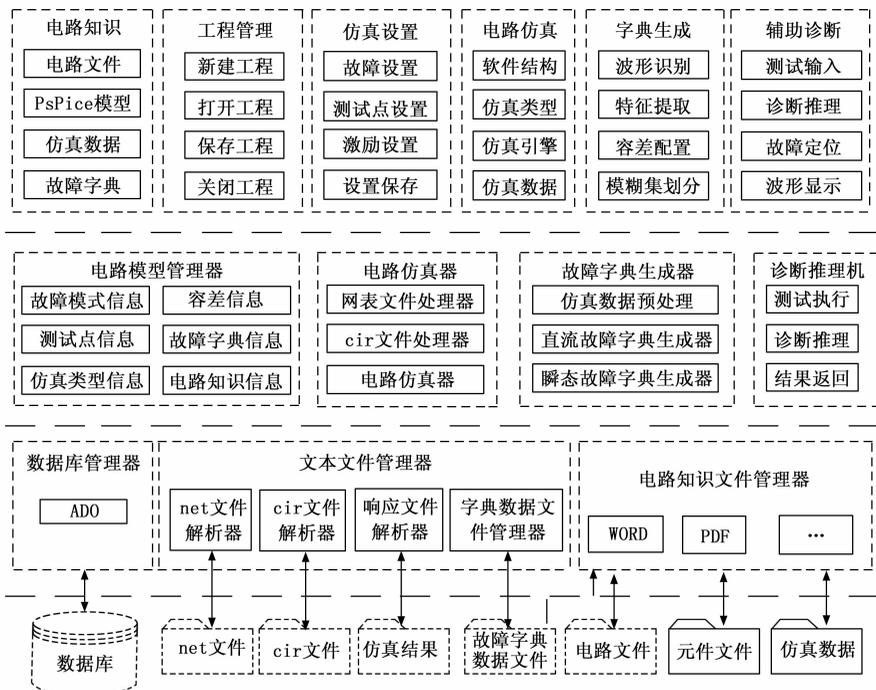


图 3 软件总体结构设计

真数据管理以及电路仿真后的故障字典知识管理等，最终实现对基于仿真的模拟电路故障诊断系统完成故障定位所需的所有电路知识的集中和统一管理。

2.2.1 电路文件管理功能

电路文件管理实现对电路原理图、电路网表、说明文档、元器件、维修经验等文档资料的统一管理和存储，其功能包括对文件的添加、配置、删除以及在资源视图窗口的查看等。电路文件的管理方式按照文件类型、具体信息分类管理，文件类型信息存放在文件分类表中，具体文件信息存放在不同的文件夹中。软件可以根据每种文件的类型选择不同的程序打开，文件类型以及对应的程序打开命令存放于专门的文件中。

元器件管理作为电路文件管理的重要内容，主要用来管理被测电路板的元器件名称、位号、说明以及所含的故障模式名称等信息。元器件管理功能以表格形式存储，分别是元器件信息表和元器件故障模式表。每个元器件信息表的数据显示为一行，点击不同的单元格会根据字段的不同显示下拉框、按钮或编辑框供选择或编辑，对元器件数据的操作都会保存到数据库中。元器件故障模式表按照元器件类型存放对应的故障模式，每个故障模式占一行，通过选中元器件名称或故障模式名称，右键进行故障模式的添加、修改和删除操作。

2.2.2 Pspice 模型管理

Pspice 模型管理功能是为每个电路提供 .cir 仿真文件、仿真模型文件的配置管理。

通过调用 .cir 仿真文件和仿真模型文件（包括元器件的功能模型和故障模型），解析 .net 网表，启动仿真引擎，完成整个电路的仿真。 .cir 文件包含仿真模型存储路径、电路网表存储路径、仿真时间、仿真步长、仿真精度等参数配置；仿真模型文件用来存储功能模型和故障模型的名称，元器件的所有故障模型名称均建在功能模型的子目录下，便于仿真时的故障检索、故障注入和故障仿真。每一个功能模型和故障模型均可任意添加和删除，如果对功能模型进行删除操作，则其包含的所有故障模型将被一并删除。

2.2.3 仿真数据管理功能

仿真数据管理功能主要用于加载和管理故障仿真平台产生的仿真数据，将其保存在指定的软件工程文件夹中，并写入仿真数据表中，实现对仿真数据文件的分类、索引、加载、删除、存储状态显示等功能^[16-17]。执行新的仿真后，一般会覆盖以前的仿真数据，仿真数据不支持编辑操作，所有的仿真结果数据也会显示在资源视图中，便于用户进行查看。

2.2.4 故障字典数据管理功能

故障字典数据保存在数据库中，供系统软件分析使用，也可导出为标准的故障字典输出文件，供用户查看或第三方软件使用。故障字典数据管理功能即是对故障字典输出文件的管理。故障字典生成后，会显示在资源视图的文件列表中，双击可打开并查看文件内容。

故障字典数据管理实现故障字典生成平台产生的按照一定格式存储的故障字典数据文件的统一管理。故障字典共输出 22 个文件：其中头文件 1 个，用来记录故障字典输出的所有文件信息，还有具体的 21 个故障字典文件，包括 7 个 UUT 文件、4 个激励与响应文、10 个故障知识文件，如图 4 所示为故障字典数据管理示意图。软件基于树型控件建立故障字典数据文件节点目录，并以头文件、UUT 文件组、激励响应文件组和故障知识文件组分别作为根节点，将对应节点的分类文件加载存储到工程文件相应的文件夹位置下，实现对不同组文件的分类、加载、删除、查看等功能。

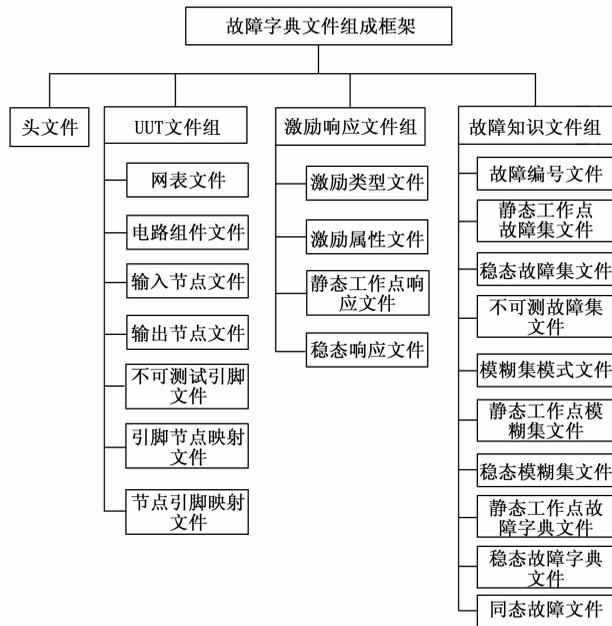


图 4 故障字典数据管理示意图

2.3 工程管理

根据选择的故障模式、测试点等的不同，同一个电路可以建立多个仿真工程，便于查看不同故障模式的仿真数据。工程新建完成后，才可以进行电仿真的各项设置，进而开展仿真和数据分析等工作。工程管理的功能包括新建、保存、打开和关闭。

2.3.1 新建工程

工程数据和电路数据具有相对独立性：电路数据主要针对被测电路板开展的功能仿真，包含了电路板功能仿真相关的所有信息，比如功能仿真 .opj 文件夹、符号模型、.lib 仿真模型、仿真参数信息等；工程数据是以电路数据为基础，在此基础上可进行不同故障模式的注入，便于生成故障字典指导故障诊断。

工程数据保存在 Project 工作区中，新建工程要向 Project 工作区中写入新建工程的名称并导入仿真相关的电路数据。其中，电路数据独立存储在 Circuit 工作区中，每个仿真工程也占用一个独立的文件夹。

2.3.2 工程保存

保存当前仿真工程相关的所有数据，包括故障模式设

置、测试点设置、容差设置、以及生成的故障字典, 均以数据库的形式保存。

2.3.3 打开工程

通过下拉对话框的方式打开已有工程, 打开工程后, 可以在该工程的基础上进行仿真设置、故障注入、仿真、故障字典生成和辅助诊断等操作。

2.3.4 关闭工程

关闭工程是关闭已打开工程有关的所有数据但不删除后台数据, 并清空界面显示。

在打开新工程或关闭软件之前, 也会出现对已打开的工程执行关闭操作。

2.4 仿真设置

对电路进行仿真, 需要进行一些设置, 这些设置包括故障设置、测试点设置、激励设置、设置保存等。

故障模式设置和测试点设置的目的是通过人为的选择, 筛选出比较关注的故障和测试点数据, 从而减小仿真和计算的工作量。

2.4.1 故障设置

故障设置, 即故障注入, 选择想用的故障模型代替原有电路的功能模型, 重新进行仿真。默认情况下选择电路中已有的所有故障。

故障设置主要在资源视图的故障模型列表中进行选择, 每个位号对应的元器件下会罗列该元器件已有的所有故障模型, 经过界面用户设置后, 最终保存到仿真故障模式表中。工程保存后, 这些故障设置会一并保存在数据库中。

2.4.2 测试点设置

默认情况下, 生成故障字典时会将电路网表中的网络节点全部当作潜在测试点, 为了优化仿真数据的查看、剔除对故障诊断影响较小的测试点, 同时减少故障字典计算工作量, 可人为在列表中进行测试点选择, 未被选择的测试点在生成故障字典以及仿真数据查看时将被忽略。

2.4.3 激励设置与仿真设置保存

激励设置用于根据电路工作原理, 在所有信号输入端加载适当的信号波形, 以完成仿真、获取仿真结果, 供后续故障字典生成和故障诊断。所加载的信号波形优先选择具有周期性、信号特征容易识别典型波形作为激励, 比如正弦波、方波、三角波等, 非典型波形生成的故障字典不易自动判读。

仿真设置完成后可保存当前仿真工程相关的所有设置数据, 包括故障设置、测试点设置、激励设置等, 均以数据库的形式保存。仿真工程关闭再次打开时, 所有仿真设置自动加载。

2.5 电路仿真功能

模拟电路仿真流程如图 5 所示, 首先根据被测电路板电路图在仿真引擎下编辑可仿真的原理图; 根据实际故障诊断的需要进行仿真参数的设置, 包括仿真类型、故障设置、仿真时间设置等; 然后对原理图进行编译, 自动检查仿真原理图、仿真模型、仿真设置等有无错误; 进而进行

功能仿真, 获取电路正常状态下的数据; 最后进行故障注入和故障仿真, 获取所有故障模式下的仿真数据, 供下一步处理。

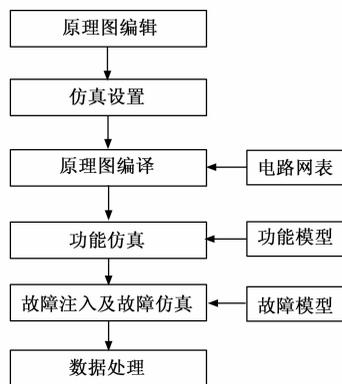


图 5 电路仿真流程

2.5.1 仿真软件结构设计

电路仿真结构如图 6 所示。电路仿真过程通过“仿真”按钮启动, 仿真引擎是电路仿真软件的核心程序。由于仿真时间可能会比较长, 仿真引擎由线程执行, 仿真进度由仿真引擎以消息的方式通知界面显示。

根据故障模式信息列表和激励信息列表进行仿真, 仿真进度可以查看, 仿真数据可以在资源视图根据仿真类型和测试点进行查看。

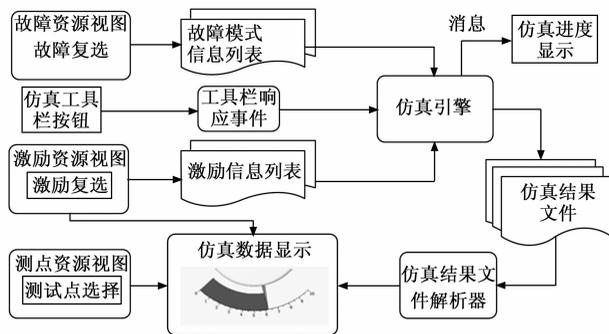


图 6 电路仿真结构图

2.5.2 仿真分析类型

对电路进行仿真时, 需要指定仿真分析类型, 以便将仿真数据存储为特定的格式, 默认瞬态仿真。

2.5.3 仿真引擎设计

仿真引擎是电路仿真软件的核心程序, 软件通过调用 pspice 仿真引擎, 输入电路网表、仿真配置、功能和故障模型、测试激励等信息实现电路的功能仿真和故障仿真。

仿真引擎运行时, 首先遍历仿真类型列表, 然后对每个仿真类型遍历仿真所有注入的故障模式。

仿真引擎在调用 Pspice 仿真前, 首先要生成用于仿真的 .net 网表文件和 .cir 仿真文件。其中, 针对每个故障模式, 要在原始网表的基础上将正常元器件名称替换为故障仿真元件名称, 实现故障注入, 并保存在故障注入网表文件中, 根

据所选仿真类型要向 .cir 文件中写入仿真类型设置。

2.5.4 仿真数据保存

仿真数据量的大小由界面资源视图选择的仿真类型、故障模式多少、仿真时间和仿真步长的设置决定。界面选择的仿真类型和故障模式信息会保存仿真类型信息列表和故障模式信息列表中，仿真引擎依次对各种仿真类型下的故障模式依次进行仿真，每个仿真保存为一个单独的仿真结果文件。

2.6 故障字典生成

故障字典生成软件结构如图 7 所示，其核心是故障字典生成器。故障字典生成器的输入配置数据包括保存在电路模型信息管理器中的仿真类型列表、故障模式信息列表、测试点信息列表和信号容差；生成故障字典的仿真数据通过仿真结果文件解析器从仿真结果文件获得。

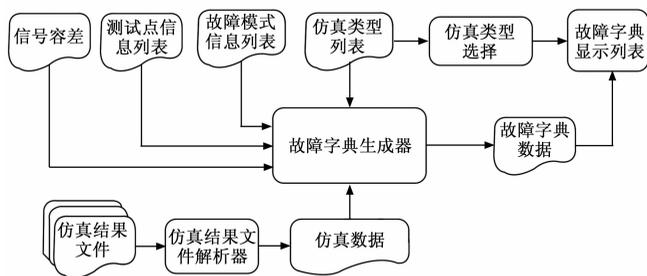


图 7 故障字典生成软件

故障字典生成器首先针对每个仿真类型生成一个行为故障、列为测试点、值为电压的故障字典，然后对每一个测试点进行模糊集划分，进而得到该仿真类型的整数编码故障字典。

用户在资源视图的仿真类型视图中选择不同的仿真类型后，可以在故障字典列表中查看故障字典。

2.6.1 波形识别

用于分析测试节点的仿真数据是否为典型周期波形，步骤如下。

第一步：对信号进行预处理，去除毛刺；

第二步：去除信号中的直流分量，为周期信号的频率分析奠定基础；

第三步：对信号进行自相关分析。由于直流信号的自相关性小，当小于一定的阈值时判定信号为直流，否则当作周期信号，进入下一步分析；另外，当信号的峰峰值小于某一阈值时，由于信号比较微弱，也可以判定为直流信号；

第四步：对信号进行直方图统计，当直方图只有两个点的时候可能为方波或阶跃，需要通过频率分析进一步判断；

第五步：排除阶跃和方波后，可以通过高低值的线性误差进一步分析，判断时正弦波还是三角波。

2.6.2 信号特征提取

在分析电路的瞬态故障字典时，需要对测试点测得的信号进行特征提取，然后才能针对信号特征建立故障字典。系统支持的波形包括直流、正弦、方波、阶跃、三角波。

信号的特征参数包括幅值、频率、直流偏置、高值、低值和占空比。

幅值：计算信号均值作幅值；

直流偏置：对周期信号计算其直流分量即可得直流偏置；

频率：将两个相邻过零点的时间差作为周期信号的周期，取倒数作为周期信号的频率；

占空比：对于方波信号，对信号进行直方图统计，然后计算最大值所占比例即可得方波信号的占空比；

低值：取滤波后信号的最小值；

高值：取滤波后信号的最大值。

2.6.3 容差配置设计

虽然在很多情况下，用于模糊集划分的容差值比较固定。但是，也可能由于仿真类型和电路结构的影响，信号在不同节点的特征差异较大。因此，系统在保持默认值的基础上，提供了针对每个仿真类型在不同节点进行手动容差配置的功能。

容差可能会因仿真类型和节点而不同，因此，在软件使用时需要对每个仿真类型下的每个节点进行容差配置，并将配置结果保存在信号容差配置文件中，用于下一步模糊集的划分。

容差的设置分为两种：绝对值和相对值。即用户可以指定节点容差的绝对值，也可设电路信号特征的相对值，默认值保存在容差默认值配置文件中。其中，直流容差默认为 ± 0.7 V，瞬态容差相对值默认为 10%。

2.6.4 模糊集划分

生成故障字典时，要对每个测试点进行模糊集进行划分。

直流模糊集划分首先对各个故障模式在该节点的电压进行从小到大排序。然后，将节点电压之间的信号容差小于一定阈值的故障划分为一个模糊集，直到完成所有节点电压的比较，将所有故障划分到对应的模糊集中。

由于瞬态信号具有多个特征，瞬态模糊集的划分比直流模糊集的划分要稍微复杂一些，但其故障隔离能力往往也比直流故障字典强。在进行瞬态模糊集划分时，首先针对单个信号特征进行模糊集划分，这一步与直流模糊集划分的方法是一致的。在划分完单个信号特征的模糊集后，再逐一对其他剩余信号特征进行模糊集划分，最终对各个信号特征形成的模糊集进行合成。

2.7 辅助诊断

为了实现被测电路板故障诊断定位，设计辅助诊断功能。在故障诊断界面中输入所选择的仿真类型和测试点的测试结果，系统根据生成的故障字典给出故障位置、具体故障模式或可疑故障集^[18]，为后续测试提供依据。

辅助诊断软件依据的是保存在电路模型信息中的测试点列表、仿真类型列表、故障字典数据，输入的是当前测试点测试结果，辅助诊断的核心是故障字典推理机。推理机根据当前节点的测试结果，查找故障字典、并判断当前值落在哪个模糊集对应的模糊域中，从而确定新的可疑故障集，排除其他的故障集^[19]。

故障推理机的推理结果分别以列表的形式显示排除的故障和可疑故障。

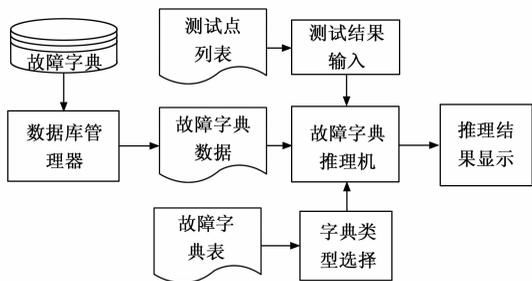


图 8 辅助诊断功能框图

3 仿真验证与结果分析

对试验 Demo 板进行仿真验证, Demo 板中主要含有多个运放调理电路, 提前准备好电路仿真用到的功能模型和故障模型^[20], 通过创建仿真原理图、新建仿真工程、仿真设置等, 进行 12 个故障模式的单故障仿真, 仿真结果如图 9 所示:

- 1) 右上角的“器件故障模式”列表用于勾选想用的故障模型进行故障注入, 仿真验证中共注入了 12 个典型的元器件开路、短路、输出钳位故障;
- 2) 右下角“测试点列表”默认仿真和查看所有测试点信息, 也可以只勾选关注的测试点;
- 3) 左上角“仿真类型”用于指定仿真类型是静态工作点仿真和时域瞬态仿真;
- 4) 左下角“电路知识库”存放电路的 .cir 和 .net 文件等, 默认罗列的故障字典文件夹为空, 用于存放后续生成的故障字典数据;
- 5) “仿真任务列表”罗列中所有仿真数据, 所有故障注入均为单故障仿真, 共进行 1 次功能仿真和 12 次不同的故障仿真, 仿真任务列表具有仿真进度提示功能, 仿真成功后的行提示信息会由“?”变为“√”。

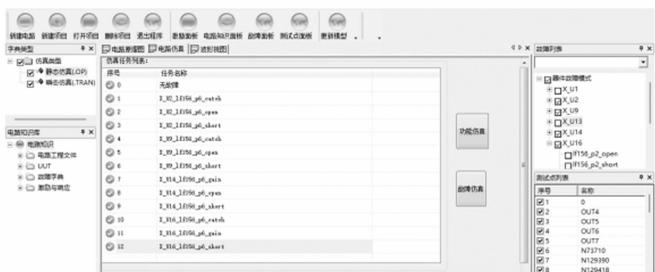


图 9 仿真验证界面

仿真完成后, 启动故障字典生成器自动得到所有故障模式下的整数编码故障字典:

- 1) 软件左下角“电路知识库”已罗列并且可以双击查看所有故障字典文件;
- 2) 软件中下部“故障检测”栏会提示所有故障模式是否可检测、可隔离;
- 3) 软件中部“故障字典生成”栏罗列所有仿真下的测

试点信号特征。其中, 行为同一个测试点对应的不同故障仿真下的测试点信号特征, 列对应不同故障下的仿真, 也就是共有 13 列的仿真数据, 其中 1 列为功能仿真、还有 12 列是故障仿真。

4) 双击“瞬态故障字典”下的某一单元格, 可在右上角“信号特征”栏修改该单元格测试点仿真数据的信号容差(即信号特征可以识别的数据上下限)或将仿真数据修改为用户自定义数据。

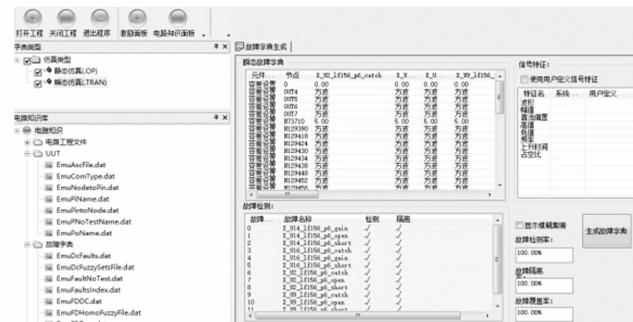


图 10 故障字典生成

生成故障字典后, X_U2_lf156_p6_open 故障模式产生的故障影响使得节点 OUT0 产生故障, 其故障特征如下图所示。当元器件 U2 发生 lf156_p6_open 故障时, 通过将节点 OUT0 实测信号特征录入辅助诊断系统, 软件能够排除其余 11 种故障, 直接定位到元器件 U2 的故障模式 lf156_p6_open, 验证了故障字典生成和辅助诊断的正确性。

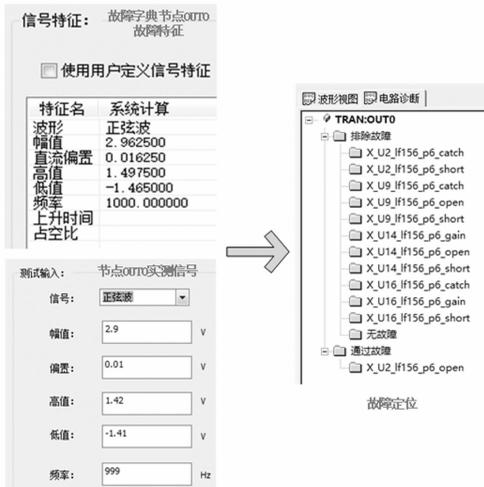


图 11 辅助故障诊断

4 结束语

本文提出了一种模拟电路仿真与故障字典生成的具体实现方法。该方法通过创建被测电路仿真原理图、新建仿真工程、仿真设置等, 实现电路的故障注入、功能仿真和故障仿真; 进而通过故障字典生成器对仿真数据处理生成所有故障模式下的整数编码故障字典; 最终, 通过实测数据做诊断推理实现故障定位, 验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 王占选, 陈嘉恒, 王 晴. 基于仿真的电路板级故障诊断测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 21-25.
- [2] 李光升, 欧 博, 石海滨. 现代模拟电路故障诊断技术发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 5-8.
- [3] 胡 梅, 攀 敏. 一种模拟电路功能模块故障诊断的方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 5 (29): 676-684.
- [4] 连良佳. 模拟电路信号特征分析及故障诊断算法优化 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021: 1-5.
- [5] 姜云威. 面向模拟电路故障诊断的深度学习研究方法 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022: 1-4.
- [6] 幸 敏, 杨秀谦, 龙祖连. 基于仿真技术的模拟电路教学演示系统 [J]. 科技论坛, 2022, 6: 121-123.
- [7] 孙 虎. 基于故障字典技术的模拟电路故障诊断系统设计 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018: 1-3.
- [8] 史雨缘, 徐立升. 电路仿真技术在电路板修理中的研究与应用 [J]. 航空维修与工程, 2019, 12: 55-58.
- [9] 刘春霞, 徐爱强, 王怡莘, 等. 基于 CEM 的故障字典诊断模型的建立与 XML 描述 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3613-3615.
- [10] 张雪敏. 电子电路仿真技术在集成电路设计中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 3 (40): 20-21.
- 外部信号源、信号采集设备的条件下, 仅依靠主控计算机、边界扫描测试软件、边界扫描硬件套件以及供电电源, 通过设计专用测试适配板开展被测电路的全流程测试。通过实际测试, 验证了设计的可行性, 为数字电路板和简单的数模混合电路板的测试提供了实用的测试方法和手段, 具有很好的应用价值。不足之处在于, 对于较为复杂的非边扫器件和模拟器件的测试, 需要依靠用户对器件的清晰把握并编写用户自定义测试代码, 对其本身的技术能力要求比较高。
- 参考文献:
- [1] 刘云久. 雷达数字电路板故障诊断方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [2] 柳 颖, 蔡永招. 基于 SCANWORKS 的模数混合电路板测试程序集设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 10-13.
- [3] 曹子剑, 余美玲. 边界扫描测试在数字电路自动测试系统中的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2311-2317.
- [4] 李 洋. 基于边界扫描技术的电路板测试研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [5] 尤 路. 基于 SCANWORKS 的边界扫描测试系统设计 [J]. 信息通信, 2015, 145 (4): 68-69.
- [6] 刘 军. 基于边界扫描技术的 PCB 测试 [J]. 中国科技信息, 2010, 16 (8): 130-132.
- [7] 王廪洧. 基于 JTAG 标准的边界扫描测试技术的分析与研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Archi-
- [11] 何朝劼, 于文震, 郑元珠. 基于 WPEE-RF 的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 31-36.
- [12] 马春斌, 黄 文, 李宗泽. 基于多种图像的电路板故障诊断系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 15-18.
- [13] 崔 江, 王友仁. 一种新颖的基于混合故障字典方法的模拟故障诊断策略 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (4): 272-278.
- [14] 夏敏芳, 刘 华. 基于 PSpice 与 LM 算法的模拟电路故障诊断方法 [J]. 电子科技, 2015, 28 (10): 38-40.
- [15] 马 敏, 刘成中, 曾钰琴. 电路故障诊断实验教学的探索与创新 [J]. 实验科学与技术, 2020, 18 (5): 85-63.
- [16] 韩 伟, 刘志男, 黄文浩, 等. 模拟电路故障诊断 [J]. 中国科技信息, 2019 (1): 34-35.
- [17] 杨焕峰, 崔业梅, 杨国华, 等. 基于神经网络的模拟电路故障诊断的仿真研究 [J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2020, 20 (4): 66-72.
- [18] 周启忠, 谢永乐, 徐 娟. 模拟电路的故障诊断与参数辨识代数方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (4): 595-601.
- [19] 董江涛, 朱 琳, 巨小微. 超容差条件下的电路软故障信号诊断方法研究 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (7): 622-627.
- [20] 吴 凡, 张 莉. 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 3521-3524.
- ecture: IEEE Std 1149.1-2013 [Z]. 20: 131-444.
- [9] 刘九洲, 王 健. 边界扫描测试技术发展总数 [J]. 电光与控制, 2013 (2): 46-49.
- [10] 张文广, 周绍磊, 李 新. 边界扫描技术及其在 PCB 可测性设计中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 713-715.
- [11] 钟春丽. 基于边界扫描的故障测试诊断系统的设计与实现 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
- [12] 李 洋. 基于边界扫描技术的复杂数字电路板的可测试性分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [13] 韦翠荣, 颜学龙, 尚玉玲. 边界扫描测试生成与故障诊断的研究与实现 [J]. 计算机工程, 2015, 1 (41): 303-308.
- [14] 陆云云. 基于边界扫描技术实现电路板全面测试 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 9 (35): 1-5.
- [15] 王宏伟. 基于 LASAR 和 SCANWORKS 软件的雷达电子设备检测系统的设计 [J]. 信息科技, 2018, 18 (9): 96-97.
- [16] 柳 颖, 徐小杰. 基于边界扫描技术的某引俄指控系统复杂电路板的 TPS 开发 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39 (7): 119-122.
- [17] 陈宝华, 宋晓东, 王新洲. 基于边界扫描的一种电路板测试技术 [J]. 中国修船, 2015, 6: 15-18.
- [18] 张学锋, 王彤威, 王国龙. 边界扫描技术在微处理器电路板测试与诊断的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (6): 1250-1252.
- [19] 刘萌萌, 苏 峰, 宋成军. 装备电子设备边界扫描系列标准及测试性设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 8-11.
- [20] 梁晓芬. 基于边界扫描的某型电路板测试方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2017, 25 (2): 8-11.