



电路故障诊断实验教学的探索与创新

马 敏, 刘成中, 曾钰琴

(电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 为了让仪器学科的学生更好地学习电路故障诊断技术的基本知识, 掌握电路故障诊断技术的几种基本方法, 如故障表法、布尔差分法、故障字典等, 熟悉电路原理图工具 OrCAD Capture 及仿真软件 OrCAD Pspice 的基本操作。该学院教研室设计了配套的实验电路板, 采用软件仿真加硬件电路板验证的方法, 设计并完成电路故障诊断的 5 个实验。通过实验教学, 帮助学生理解实际电路故障诊断的理论和模拟方法。

关键词: 电路故障诊断; 故障表法; 故障字典; 实验电路板; 软件仿真

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12179/1672-4550.20180420

Exploration and Innovation of Experimental Teaching of Circuit Fault Diagnosis

MA Min, LIU Chengzhong, ZENG Yuqin

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The School of Automation Engineering designed a supporting experimental circuit board and employed software simulation and hardware circuit board verification method to design and complete the circuit fault diagnosis of the five experiments. The aim is to help students better study the basics of circuit fault diagnosis technology and master basic methods such as fault table, Boolean difference, fault dictionary and other methods, and understand the schematic capture software and circuit diagram maker OrCAD Capture and the simulation software OrCAD Pspice. Such experimental teaching will help students understand the theories and simulation methods of actual circuit fault diagnosis.

Key words: circuit fault diagnosis; fault table method; fault dictionary; experimental circuit board; software simulation

电路与电子系统故障诊断实验(以下简称电路故障诊断实验)是电子科技大学仪器等相关专业本科生和研究生的综合性实验课程。国内多所院校测控技术与仪器专业也开设了相关的实验课程。该课程主要介绍了电路故障诊断中常用的几种测试技术以及方法。在该课程的学习过程中, 为了理论联系实际, 让学生对电路系统的故障诊断有一个形象和直观的认识, 学院教研室自主开发和设计了一个电路故障诊断硬件实验板作为课程实验平台^[1]。

当代的科技发展日新月异, 电路故障诊断的技术和方法也在不断更新换代, 而实验教学的课时数有限, 不可能将每一种方法都配套相应的实

验, 这样既不利于教师课程讲授, 也不利于学生消化吸收, 所以本文选取了某些电路故障诊断中最基本、最经典的几种检测方法。此外, 实际系统中, 电路很多是模拟和数字混合电路, 但如果实验教学中也这样做, 不利于学生掌握基本的电路故障诊断技术和方法, 所以我们选择将数字电路与模拟电路实验分开, 减轻学生学习压力, 帮助学生更好地掌握每一种方法。

基于以上两点, 本实验课程设计了基于故障表^[2]方法的数字电路故障测试仿真实验、基于布尔差分法^[3-4]的数字电路故障测试仿真实验、基于故障字典法^[5-6]的模拟电路故障测试仿真实验、实验板的数字电路故障诊断测试和实验板的模拟电

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2020-05-29

基金项目: 电子科技大学教师实验教学研究项目(bksjy-2016-54)。

作者简介: 马敏(1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事自动测试系统集成、网络化测试、故障诊断技术方面的研究。

路故障诊断测试5个实验。前3个实验学生主要使用OrCAD Pspice^[7-8]进行软件仿真;后两个实验不仅要软件仿真,更要在实验板上对仿真及理论结果进行验证,加深学生对电路故障诊断技术的理解和认识。

1 电路故障诊断仿真实验

1) 实验1:基于故障表方法的数字电路故障测试仿真实验

本实验需要运用故障表方法中的固定计划定位法^[9]求出电路的最小完备测试集^[10]。以下以二输入与门电路为例介绍。

首先需要在OrCAD Capture中建立电路的原理图,然后添加数字激励源,进行Pspice逻辑仿真。这时需要遍历与门所有可能的输入组合,总共有4种情况,分别是 T_1 (输入 x_1 、 x_2 均为低电平)、 T_2 (输入 x_1 为低电平, x_2 为高电平)、 T_3 (输入 x_1 为高电平, x_2 为低电平)、 T_4 (输入 x_1 、 x_2 均为高电平),测试与门正常时的输出;之后还要测试与门的输入和输出存在呆滞于低电平^[11](s-a-0)或者呆滞于高电平(s-a-1)故障时的输出,这样总共有6种故障情况。在仿真中要注意,呆滞于低电平可将节点与地线短接,呆滞于高电平可将节点与电源短接。

根据仿真结果,列出二输入与门的故障表,通过与无故障电路的真值表对比,可以推断出每一种测试可以观测出的故障。故障表包括了输入的一切可能组合,是一个完备测试集。通过观察发现 T_1 能观测出的故障即输出 Y 呆滞于高电平可以由 T_2 或者 T_3 得到,所以 T_1 可以省略。剩下的3个测试 T_2 、 T_3 、 T_4 不可再减少。所以测试集 $[T_2, T_3, T_4]$ 是一个可以检测出所有故障的完备测试集,而且是**最小完备测试集**。

故障表方法需要测试电路正常和故障时的输出,建立真值表,当电路规模较大时,只靠人力去建立故障表,需要的工作量巨大,即使建立了故障表,庞大的数据,也不利于工程师去分析结果;而实验二介绍的布尔差分法则将系统内节点的信号变化直接反映到输出端的变化,可以快速地定位故障。

2) 实验2:基于布尔差分法的数字电路故障测试仿真实验

本实验需要利用布尔差分法求解给定电路图

中4个故障L5-s-a-0(节点5呆滞于低电平)、L5-s-a-1(节点5呆滞于高电平)、L6-s-a-0和L6-s-a-1哪些是可测^[12-13]的,哪些是不可测的?写出可测故障的输入测试矢量。以下对L5-s-a-0故障进行介绍。

首先通过给定逻辑电路,运用布尔差分法进行理论上的推导,对故障可测与否进行初步判断,再通过仿真的方法,进行故障模拟以及故障可测性的仿真实验,仿真步骤和实验一相同,不过这里有4个输入共16种激励情况。

最后可以得到,L5-s-a-0故障的仿真结果如图1所示。其中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 Y 分别是4个输入节点、中间节点5和输出节点无故障时的电平;而 $N_1 \sim N_5$ 及输出 $\$D_LO$ 是L5-s-a-0故障时的情况。由仿真结果可知,L5无故障时(即图中 X_5 为高电平),输出结果 Y 是高电平;设置L5-s-a-0故障之后输出结果 $\$D_LO$ 就发生了变化,所以L5-s-a-0故障是可测的。其输入测试矢量 $T=\{T_0, T_1, T_8, T_9\}$,即数字电路依次输入0000、0001、1000、1001时,故障可以在输出端侦测到,且可以唯一定位到L5-s-a-0故障。同理可知,L5-s-a-1、L6-s-a-0、L6-s-a-1均为不可测故障。

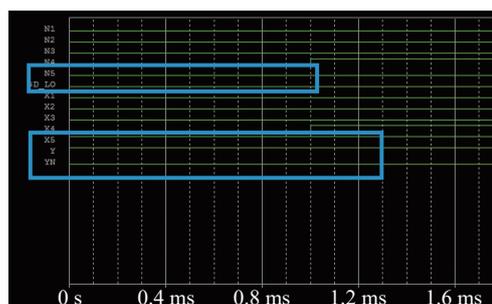


图1 L5-s-a-0故障仿真结果

布尔差分法对非冗余电路有很好的可测性,因为在非冗余电路中,任何故障都会改变原电路的输出,而对于冗余电路则无能为力。因此,在电路故障诊断中没有一种方法是一劳永逸的,需要不断汲取新的知识,解决新的问题。

3) 实验3:基于故障字典法的模拟电路故障测试仿真实验

日常生活中,我们接触到的大多是模拟信号,而实际工程中也大量存在着单独的模拟电路以及模数混合电路,因此对模拟电路故障诊断的研究有着非常重要的意义。而故障字典法是目前模拟电路故障诊断中最具实用价值的方法。它需要将电路故障时的特征列为字典,以便发生故障

时查验、对症下药。为此,我们特地安排了本实验。

由于模拟电路的故障主要是短路与断路两种硬故障,其中又主要是由电阻开断、电容短路以及三极管和二极管等引出线的开断或短路引起的故障,所以模拟电路实验仿真中只考虑这两种故障类型。

该实验需要建立给定电路的故障字典,可设置 VDO、VT1BO、VT2BES、VT3CES、VT4CES、VT5BCS、VT6BCS、VT7BO 这 8 个故障。其中

VD 代表二极管,VT 代表三极管,O 代表开断故障,S 代表短路故障,B、C、E 分别代表了三极管的基极、集电极、发射极。

在 OrCAD Capture 中建立电路的原理图,选择 40 V DC 电压源作为激励,进行故障模拟;并在 VT₅、VT₆、VT₇、VT₈、VT₁₀ 这 5 个三极管的基极以及输出端 OUT 设置 6 个观测节点,进行 Bias Point 仿真,在原理图页面显示节点电压,获取故障时的电压特征,最终的测试结果如表 1 所示。

表 1 观测节点电压

| 电路状态 | 故障序号 | CAT ₁ /V | CAT ₂ /V | CAT ₃ /V | CAT ₄ /V | CAT ₅ /V | CAT ₆ /V |
|--------|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 正常 | 0 | 20.48 | 20.64 | 21.58 | 20.03 | 32.94 | -33.02 |
| VDO | 1 | -3.848 | -3.563 | -3.523 | -3.524 | 35.00 | -35.00 |
| VT1BO | 2 | 32.82 | 33.45 | 33.88 | 33.87 | 33.21 | -35.00 |
| VT2BES | 3 | -24.33 | -25.22 | -22.82 | -25.89 | 25.48 | -25.32 |
| VT3CES | 4 | 20.67 | 21.22 | 21.56 | 21.56 | 34.66 | -35.00 |
| VT4CES | 5 | 36.60 | 31.73 | 32.79 | 31.61 | 32.79 | -32.47 |
| VT5BCS | 6 | -25.38 | -26.27 | -23.87 | -26.94 | 25.48 | -26.94 |
| VT6BCS | 7 | 19.95 | 20.20 | 33.85 | 33.31 | 33.19 | -34.64 |
| VT7BO | 8 | 20.07 | 17.94 | 23.01 | 17.24 | 28.18 | -34.30 |

首先根据电压的正负大致划分模糊集^[14],然后进一步细分,最后列表写出各节点电压在各模糊集上的故障状态。以 CAT₁ 为例,纵向去看表 1 中 CAT₁ 的电压,明显可以看出 CAT₁ 有 3 个负电压,正好对应 3 种故障,而正电压与正常时的电压也有一定差距,可以侦测出剩下的故障。表 2 为 6 个观测节点在特定的模糊集划分条件下,可检测出故障的序号,其中第一列为模糊集,第一行为观测节点。但通过观察表 2 可发现,有些故障与正常状态同在一个模糊集,这些故障不能通过此节点电压来侦测,而需要其他节点来侦测。这就要求需选择合适的测试节点以及合理的划分模糊集。

表 2 模糊集划分及各节点可检测故障

| 可检测故障电压分组 | CAT ₁ | CAT ₂ | CAT ₃ | CAT ₄ | CAT ₅ | CAT ₆ |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| -36~-32 V | | | | | | 0124578 |
| -27~-22 V | 36 | 36 | 36 | 36 | | 36 |
| -4~-3 V | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 17~18 V | | 8 | | 8 | | |
| 19~22 V | 0478 | 047 | 04 | 04 | | |
| 23~29 V | | | 8 | | 368 | |
| 31~37 V | 25 | 25 | 257 | 257 | 012457 | |

通过该实验,让学生体会到模拟电路故障仿真与数字电路故障仿真中存在着的巨大不同,如激励的不同、测试节点选择的不同、观测电量的不同,让学生转变思路,更好地解决实际电路故障问题。

4) 仿真实验的不足

只通过软件仿真,学生对电路故障检测的理解只停留在理论阶段,对实际电路的故障检测不能有直观立体的感受,所以一块硬件实验平台必不可少。为此,我们专门设计了电路故障诊断实验电路板,且已应用于电子科技大学本科生实验教学,取得了不错的效果。

2 电路故障诊断实验板的设计

实验板采用 51 单片机设计了数模混合电路。其结构框图如图 2 所示。

本实验板采用 USB+5V 供电,USB 线通过 USB 转串口芯片实现程序下载功能,时钟电路和复位电路与 51 单片机主控芯片一起构成最小系统。单片机内部产生的 3 路方波作为数字电路的输入。而数字电路故障产生模块是由几片常用的 74 系列集成电路芯片来实现数字电路的逻辑。实验板上的模拟电路则由分立的二极管、三极管等

组成。故障产生模块可以通过拨码开关控制数字电路或者模拟电路产生故障。为了便于分析, 本课程只考虑电路中存在一种故障时的情况。最后用显示模块的 4 个 LED 的亮灭表示数字电路故障产生模块 3 路输入和 1 路输出的高低电平。实验板实物如图 3 所示。

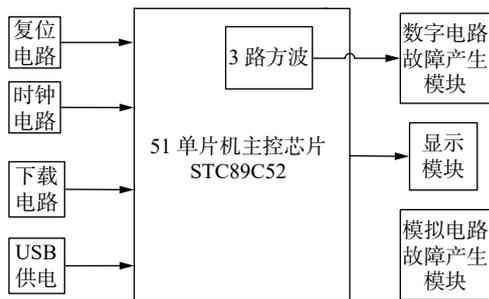


图 2 实验板结构框图



图 3 实验板实物图

1) 数字电路故障产生模块

数字电路故障产生模块是在数字电路的节点 4 到节点 9 这 6 条关键线路上设置了 6 个 3 挡拨码开关, 分别代表节点正常、呆滞于高电平、呆滞于低电平, 可以控制电路产生故障。51 单片机 P0 口的 3 个引脚分别输出周期为 2 s、4 s、8 s 的方波, 使数字电路的输入 X_3 、 X_2 、 X_1 在 000、001、010、011、100、101、110、111 这 8 个状态内周期切换。电路原理如图 4 所示。

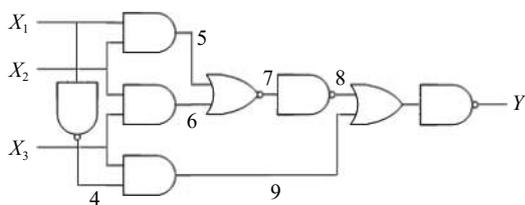


图 4 数字电路原理图

2) 模拟电路故障产生模块

模拟电路故障产生模块有 A 和 B 两路输入, 一路 Y 输出。两路输入可分别设置为高电平(5 V)、低电平(0)及 0~5 V 之间可调的电压输入, 并且设置了 D2O、Q1BO、Q1CES, Q5CES 共 4 处故障, 可通过两挡拨码开关控制故障是否有效。最后还在 Q_2 的基极、 Q_3 的基极、 Q_4 的基极和输出 Y 处设置了 CAT₁~CAT₄ 共 4 个观测节点, 可通过测试点的电压来建立模糊集, 判断电路是否存在故障。模拟电路原理图如图 5 所示。

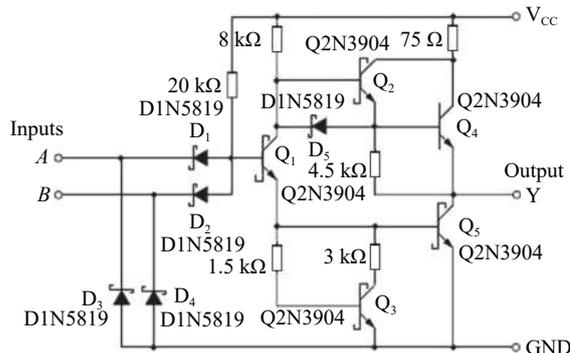


图 5 模拟电路原理图

3) 电路调试中遇到的问题

原理图设计时, USB 转串口芯片 CH340T 的 TX、RX 两个管脚和 51 单片机的串口 TX、RX 管脚应该交叉连接, 即 CH340T 的 TX 连单片机的 RX、RX 连单片机的 TX, 却因为疏忽连反了, 直到 PCB 布局布线后再检查时发现了这个错误。

电路板调试时, USB 线插上, 电路板通电, 拨动电源开关没有任何作用, 经检查发现, 原理图中直接将 USB 的供电引脚连到了电路的正负极上, 将拨码开关直接短路了, 而不是先通过电源开关再与电路的正负极相连。这些经验教训告诉我们, 设计原理图时, 要熟悉器件的数据手册、清楚选用器件的原理及连接关系, 避免从根本上犯错误。另一方面, 设计电路时要耐心、细心, 不要怕麻烦, 要不断检查、优化设计。

3 电路故障诊断实验板实验

测试的本质是比较, 将电路正常时和故障时的响应进行比较。所以, 进行实物测试之前, 要先在 EDA 软件上进行仿真实验, 获得电路正常时的输出, 当然, 现在的 EDA 软件也完全可以进行故障仿真。实物测试所需的硬件主要有实验板、

数字万用表、数字存储示波器，实验板通过 USB 下载线供电。

1) 实验 4: 实验板的数字电路故障诊断测试

本实验需要建立图 4 中数字电路的故障表，对实验一提到的故障表方法进行验证。

首先在 OrCAD Capture 中建立电路的原理图，然后添加数字激励源，使输入遍历可能的 8 种情况，之后进行 Pspice 逻辑仿真，先获取电路正常时的响应。这里需要学生重点掌握在 OrCAD Capture 中设置时间步长，产生数字电路输入激励的方法。最后要在节点 4~节点 9 上设置固定故障，获取故障响应并建立对应的故障表。

而在实验板测试中，也要遍历数字电路所有可能的输入，记录下电路正常时的输出数据，以及通过拨码开关控制电路产生单个故障时的电路输出，列出故障表。记录数据时，可以用肉眼观察实验板上的输入、输出显示 LED 的亮灭。但为了避免出错，也为了方便同时记录下一个周期内所有的输出，可以使用示波器来观察实验结果，如图 6 所示。



图 6 示波器测试结果

列出故障表后，分析电路可以侦查出来的故障，并与仿真结果进行对照，验证仿真模拟的正确性以及故障表方法的正确性。

2) 实验 5: 实验板的模拟电路故障诊断测试

本实验需要建立图 5 中模拟电路的故障字典，对实验 3 中的故障字典法进行验证。

首先在仿真软件 OrCAD PSpice 上进行初步的仿真，对输入电压进行 DC Sweep^[15] 仿真，分别找出输出为高电平和低电平时输入激励电压的范围；然后在 A、B 两个输入端分别输入：A 低电平 B 低电平、A 低电平 B 高电平、A 高电平 B 高电平、A 高电平 B 低电平这 4 种情况下的电压激励，并分别在这 4 种情况下进行 D2O、Q1BO、Q1CES、

Q5CES 的故障模拟，使用 PSpice 仿真并记录下输出端和观测节点电压的变化情况。

仿真完成后，进行实验板测试，需首先得到电路正常时的响应；再通过拨码开关，控制模拟电路产生故障，进行故障模拟，同时用数字万用表记录下各个观测节点的电压，并建立故障字典；最后对照软件仿真和实验板验证数据，分析结果，以加深学生对模拟电路故障诊断的理解。

3) 小结

由于实验教学课时数有限，所以电路实验板实验分别针对数字电路和模拟电路各设置了一个实验。但是，实验板可以进行验证的不仅仅是实验所采用的这两种电路故障诊断方法，课程教学中讲授的方法很多都可以采用这块实验板进行验证。教师鼓励学生按照自己兴趣，选择其中一种或几种方法进行验证性实验。

4 结束语

在集成电路的集成度越来越高且集成电改产生规模越来越大，电子设备正在加速向各行业渗透的大环境下，让仪器学科的学生掌握电路与电子系统故障诊断技术有着非常重要的意义。

本门课程，通过仿真实验让学生在原理图级别上认识了故障产生、故障侦测等模拟方法；后期的实验板验证更是让学生自己动手，观察实验现象、得出结论，验证仿真模拟方法的正确性，使学生熟练掌握常用的故障诊断技术和模拟方法。而课程配套的硬件电路板不仅可以作为仪器学科学生的实验平台，而且对于集成电路测试、测控技术与仪器、电子工程、通信等专业的学生来说也是必不可少的实验工具。

参考文献

- [1] 马敏, 陈光祜, 刘治国, 等. 边界扫描测试实验系统的设计与开发[J]. 实验科学与技术, 2009, 7(3): 18-20.
- [2] 王涛. 数字电路故障诊断及故障仿真技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [3] 杨鹏, 邱静, 刘冠军, 等. 基于布尔逻辑的测试选择算法[J]. 测试技术学报, 2007, 21(5): 386-390.
- [4] 鲁传武. 数字电路的故障模型和故障压缩方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [5] JIA H Q. Petroleum instrument fault analysis based on the data mining fault dictionary method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 128/129: 942-945.

- [6] YANG C L, TIAN S L, LONG B, et al. A test points selection method for analog fault dictionary techniques[J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2015, 82(2): 435-448.
- [7] 陶瑞莲. OrCAD PSpice在电子线路实验仿真研究[J]. *通信电源技术*, 2010, 27(2): 27-29.
- [8] FANG B, GUO L H. Research on single-stage grid-connected photovoltaic system based on orCAD/PSpice analog behavioral model[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 2784(827): 72-77.
- [9] 陆红阳, 陆绮荣. 故障诊断算法的分析与比较[J]. *电子测试*, 2007(Z1): 8-11.
- [10] 赵岩岭. 数模混合电路可测试性的若干问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [11] SAINI V K, AKHTER S, CHAUHAN T, et al. Implementation, test pattern generation, and comparative analysis of different adder circuits[J]. *VLSI Design*, 2016, 2016: 1-8.
- [12] 袁海英, 陈光祜. 模拟电路的可测性及故障诊断方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2006, 20(5): 17-20.
- [13] CAI J Y, HAN C H, MENG Y F. Analog circuit testability for fault diagnosis[J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2007(12): 270-274.
- [14] 曾希雯. 基于故障字典的电路故障诊断研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [15] 田智文. 一种带有保护电路的直流稳压电源的设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

编辑 张俊

(上接第 38 页)

- [11] ILHEM B, AMAR B. A comparative study of synchronous reluctance and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2012, 39(4): 793-799.
- [12] BRABANDERE K D, DRIESEN J, BELMANS R. The control of switched reluctance drives and their use for flywheel energy storage[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2583-2606.
- [13] HAMOUDA M, SZÁMEL L. A new technique for optimum excitation of switched reluctance motor drives over a wide speed range[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2018, 26(5): 2753-2767.
- [14] HE C, HAO C, ZHOU Y. Average torque control of switched reluctance machine drives for electric vehicles[J]. *IET Power Electric*, 2015, 9(7): 459-468.
- [15] 宋世潮. 开关磁阻电机调速系统性能优化方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

编辑 张俊