



普通高等教育“十三五”规划教材
测试、计量技术及仪器系列规划教材

电路与电子 系统故障诊断技术

/ 马 敏 编著 /



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
测试、计量技术及仪器系列规划教材

电路与电子系统故障诊断技术

马 敏 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书较全面地介绍电路与电子系统的故障诊断方法, 主要内容包括: 数字电路、模拟电路、混合电路及微机系统的测试与故障诊断。本书还从实用的角度出发, 讲解电路的维修技术, 介绍当前热门的可测性设计技术。故障诊断的发展离不开测试技术的发展, 本书最后还根据作者多年的科研和工程经验介绍网络化测试仪器的设计、面向信号的自动测试系统知识等。本书提供电子课件。

本书可作为高等学校电路与系统、检测计量、自动测试、计算机、信息技术等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材, 也可供相关领域的工程技术人员学习、参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与电子系统故障诊断技术 / 马敏编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.2

ISBN 978-7-121-27975-1

I. ①电… II. ①马… III. ①电路—故障诊断—高等学校—教材 ②电子系统—故障诊断—高等学校—教材
IV. ①TM13 ②TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 318795 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 506 千字

版 次: 2016 年 2 月第 1 版

印 次: 2016 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

在电路与电子系统飞速发展的大环境下,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,行业间界限的模糊化,使得电子设备正在加速向各行业渗透。电子设备的可靠性、安全性成为人们越来越注重的问題,因而对系统进行故障诊断,及早发现故障所在并预防是很有必要的。先进的电路与电子系统故障诊断技术对各种类型电路板的故障诊断提供了便利,维修人员可以根据电路板出现的不同特征,利用相关测试仪器,快速地定位到故障元件并进行准确的维修,确保电路与电子系统的正常运行。如今,掌握电路与电子系统故障诊断技术不仅可以节省人力物力,还可以延长电子设备的使用寿命,这门技术已成为产业从业人员,特别是技术维修人员必备的技能。

本书是电子科技大学的特色教材。全书共9章,从理论性和实用性的角度出发,较全面地介绍电路与电子系统故障诊断的基本理论和维修应用方面的技能,主要内容包括:第1章讲述电子系统常用的故障诊断方法,介绍对于电子系统常用的故障诊断及关于故障诊断的基础知识;第2章讲述数字电路测试与故障诊断,介绍数字电路的经典诊断方法,并指出其实施的困难;第3章讲述组合逻辑电路和时序电路中最常使用的故障诊断方法,同时简要介绍有时滞测试问题;第4章讲述模拟电路和混合信号的测试诊断方法;第5章讲述电路板的维修技术;第6章讲述微机系统的故障诊断方法,重点阐述存储器和微处理器的故障诊断;第7章讲述可测性设计,重点阐述可测性的定义、计算方法和提高可测性测度的设计原理;第8章讲述网络化测试仪器,即着重介绍LXI总线仪器;第9章讲述面向信号的自动测试系统等。

本书覆盖面广,理论与实际结合,能较好地满足广大读者的需求,可作为高等学校电路系统、检测计量及自动测试、计算机、信息技术等专业高年级本科生和研究生教材,也可供电路设计或测试人员学习参考。

本书向使用教师提供配套电子课件、习题参考答案等,请登录华信教育资源网<http://www.hxedu.com.cn>注册下载。

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料,其中主要参考了作者的博士导师陈光福教授编著的《数据测试及仪器》,在这里对陈教授表示衷心的感谢。书中模拟电路测试部分编写时得到了龙兵教授提供的资料,在此深表谢意。

由于电路与测试技术发展迅速,作者学识有限,书中误漏之处难免,望广大读者批评指正。

作 者
于电子科技大学

目 录

绪论	1	2.3.1 测试矢量的产生	30
0.1 电路与电子系统的复杂性	1	2.3.2 测试响应的观测	31
0.2 电路与电子系统故障诊断的必要性	2	2.4 可测性与完备性	32
0.3 电路与电子系统测试的特点	2	2.4.1 可测性	32
0.3.1 模拟电路与系统测试的特点	2	2.4.2 完备性	32
0.3.2 数字电路与系统测试的特点	3	2.5 复杂系统的分级测试	33
0.3.3 混合电路测试的特点	4	2.5.1 子系统一级的测试	33
0.4 本书主要内容	4	2.5.2 微机系统的测试	34
本章参考文献	6	2.6 穷举测试法	34
第1章 电子系统常用故障诊断方法	7	2.6.1 单输出无扇出电路	35
1.1 常见故障诊断方法	7	2.6.2 带汇聚扇出的单输出电路	38
1.1.1 基于故障模型的诊断方法	7	2.6.3 各输出不依赖于全部输入的 多输出电路	40
1.1.2 基于机器学习的诊断方法	9	2.7 故障表方法	40
1.1.3 基于信号处理的方法	10	2.7.1 固定式列表计划侦查	41
1.1.4 基于解析模型的方法	11	2.7.2 固定计划定位	42
1.1.5 基于知识的故障诊断方法	12	2.7.3 适应性计划侦查和定位	44
1.1.6 故障诊断方法的发展趋势	14	习题	47
1.2 基于故障树的故障诊断方法	15	本章参考文献	48
1.2.1 故障树分析法中的基本概念和 符号	16	第3章 组合电路与时序电路的故障诊断	50
1.2.2 故障树的生成	17	3.1 通路敏化	50
1.2.3 IEEE 1232 的系统结构	19	3.1.1 敏化通路	50
1.2.4 IEEE 1232 模型文件	19	3.1.2 通路敏化法	51
1.2.5 IEEE 1232 的推理机服务	20	3.1.3 关于一维敏化的讨论	53
本章参考文献	21	3.1.4 多维敏化	55
第2章 数字电路测试与故障诊断	22	3.2 d 算法	56
2.1 数字电路测试方法概述	22	3.2.1 d 算法的基础知识	56
2.1.1 数字电路测试的基本概念	22	3.2.2 d 算法的基本步骤	58
2.1.2 数字电路测试的必要性和复杂性	22	3.2.3 d 算法举例	58
2.1.3 数字电路测试的发展	24	3.2.4 扩展 d 算法	63
2.2 数字电路故障模型与测试	25	3.3 布尔差分法	68
2.2.1 故障及故障模型	25	3.3.1 布尔差分的基本概念	68
2.2.2 故障测试	27	3.3.2 布尔差分的特性	69
2.2.3 故障冗余	29	3.3.3 求布尔差分的方法	70
2.3 数字电路测试的基本任务	30	3.3.4 单故障的测试	73

3.3.5 多重故障的测试	76	4.7.2 IEEE 1149.4 测试方法	126
3.4 故障字典	78	4.7.3 IEEE 1149.4 标准指令	126
3.5 时序逻辑电路的测试	78	本章参考文献	128
3.6 迭接电路法	79	第5章 电路板维修技术	130
3.6.1 基本思想	79	5.1 维修前的准备	130
3.6.2 同步时序电路的组合迭接	80	5.1.1 维修设备和工具	130
3.6.3 异步时序电路的组合迭接	82	5.1.2 安全技术	130
3.7 状态变迁检查法	85	5.1.3 感官训练	131
3.7.1 初始状态的设置	85	5.2 检修技术和方法	131
3.7.2 状态的识别	88	5.2.1 电路检修原则	131
3.7.3 故障的测试	88	5.2.2 具体电路问题及故障处理顺序	132
3.7.4 区分序列的存在性	89	5.2.3 故障维修方法	132
习题	91	5.2.4 小结	145
第4章 模拟电路与混合信号的故障诊断	92	第6章 微机系统的故障诊断	146
4.1 模拟电路测试的复杂性	92	6.1 存储器的测试	146
4.1.1 模拟电路故障诊断概述	92	6.1.1 RAM 中的故障类型	147
4.1.2 模拟电路故障诊断技术的产生	92	6.1.2 测试的若干原则性考虑	148
4.1.3 模拟电路故障特点	93	6.1.3 存储器测试方法	149
4.1.4 故障诊断是网络理论的一个重要分支	93	6.1.4 各种测试方法的比较	154
4.2 模拟电路的故障模型	94	6.2 ROM 的测试方法	155
4.3 模拟电路的故障诊断方法	95	6.3 微处理器的测试	156
4.3.1 传统的故障诊断方法	96	6.3.1 μP 的算法产生测试	157
4.3.2 目前的故障诊断方法	96	6.3.2 μP 功能性测试的一般方法	160
4.3.3 发展中的新故障测试方法	97	6.3.3 μP 功能性测试的系统图方法	165
4.4 故障字典法	99	6.4 利用被测系统的应用程序进行测试	167
4.4.1 直流域中字典的建立	99	6.4.1 基本概念	167
4.4.2 频域中字典的建立	103	6.4.2 应用程序的模型化	167
4.4.3 时域中字典的建立	107	6.4.3 关系图	169
4.4.4 故障的识别与分辨	110	6.4.4 测试的组织	171
4.5 混合信号测试概述	112	6.4.5 通路测试的算法	173
4.5.1 混合信号的发展	112	习题	176
4.5.2 混合信号测试面临的挑战	112	本章参考文献	176
4.5.3 混合信号的基本测试方法	113	第7章 可测性设计	177
4.5.4 混合信号测试的展望	114	7.1 可测性设计的概念	177
4.6 数模/模数转换器简介	115	7.1.1 可靠性的定义	177
4.6.1 数模转换器	115	7.1.2 可靠性的主要参数指标	178
4.6.2 模数转换器	118	7.1.3 可测性设计的提出	178
4.7 混合信号测试总线	124	7.2 可测性设计的发展	179
4.7.1 IEEE 1149.4 电路结构	124	7.2.1 可测性的起源与发展过程	179

7.2.2	国内情况	180	8.3.2	LXI 测试仪器的基本特性	232
7.2.3	关键的技术	181	8.3.3	LXI 测试仪器的分类	234
7.2.4	国际标准	182	8.3.4	LXI 测试仪器的结构与电气特性	237
7.2.5	可测性设计发展趋势	184	8.3.5	LXI 测试仪器的网络设置与通信	241
7.3	可测性的测度	185	8.3.6	LXI 测试仪器的触发与同步	246
7.3.1	基本定义	185	8.3.7	LXI 测试仪器 IVI 驱动接口设计方法	249
7.3.2	标准单元的可测性分析	187	本章参考文献	252	
7.3.3	可控性和可观测性的计算	189			
7.4	可测性设计方法	190	第 9 章 面向信号的自动测试系统	253	
7.5	内建自测试设计	193	9.1	自动测试系统概述及发展	253
7.5.1	多位线性反馈移位寄存器	194	9.1.1	自动测试系统的框架结构	253
7.5.2	伪随机数发生器	196	9.1.2	自动测试系统的提出与发展	254
7.5.3	特征分析器	197	9.1.3	面向信号自动测试系统	256
7.5.4	内建自测试电路设计	199	9.1.4	面向信号的自动测试系统的技术框架	257
7.6	边界扫描技术	201	9.2	IEEE 1641 协议	259
7.6.1	JTAG 边缘扫描可测性设计的结构	202	9.2.1	IEEE 1641 的提出	259
7.6.2	工作方式	204	9.2.2	信号的层次结构	260
7.6.3	边缘扫描单元的级联	205	9.2.3	IEEE 1641 标准的不足	262
7.6.4	JTAG 的指令	206	9.3	ATML 标准	262
7.6.5	JTAG 应用举例	207	9.3.1	XML 标记语言	262
7.6.6	JTAG 的特点	209	9.3.2	ATML 标准	263
本章参考文献	209	9.3.3	协议与自动测试系统各部分的关系	264	
第 8 章 网络化测试仪器	211	9.4	IVI 技术	265	
8.1	分布式自动测试系统	211	9.4.1	可互换虚拟仪器技术	265
8.1.1	分布式系统概述	211	9.4.2	IVI 技术	266
8.1.2	分布式系统结构及其特点	212	9.4.3	IVIsignal	268
8.1.3	分布式系统的优势	213	9.5	自动测试系统应用	269
8.1.4	分布式自动测试系统	214	9.5.1	自动测试系统的软件结构	269
8.2	网络化测试仪器	216	9.5.2	测试过程	271
8.2.1	网络化测试仪器概述	216	本章参考文献	271	
8.2.2	网络化测试仪器设计规范	216			
8.3	LXI 总线测试仪器	232			
8.3.1	LXI 总线的发展	232			

绪 论

0.1 电路与电子系统的复杂性

电子世界正在兴起一场深刻的革命,这个革命以大规模集成电路(LSI, Large Scale Integration)和微处理器系统(μ P 系统)为标志,近来又发展了甚大规模集成电路(VLSI, Very Large Scale Integration)和电子系统。

什么是电子系统?通常是指有若干相互连接、相互作用的基本电路组成的具有特定功能的电路整体。具体地说,通常将由电子元器件或部件组成的能够产生、传输、采集或处理电信号及信息的客观实体称为电子系统。电子系统是能够完成某种任务的电子设备,有大有小,大到航天飞机的测控系统,小到出租车计价器,都是电子系统在实际生活和生产的应用范例。

由于电子系统的实现是由若干个单元电路组成的,因此在电路发展的各个阶段,电子系统也呈现出不同的特征。早期的电子系统以简单的电子管、晶体管组成的模拟电路为基础,其特点是功能简单、体积庞大、功耗大。随后出现了由数字芯片组成的数字电路,电子系统不再局限于波形处理而开始进行数字运算,电路功能逐步强大,电子系统也变得更加复杂。由原来简单的互补金属氧化物半导体(CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor)数字芯片到如今的现场可编程门阵列(FPGA, Field Programmable Gate Array),每一片芯片含有上万个甚至十万个门,输入与输出变量可能多达数十个甚至上百个,电路的响应不仅是组合的而且在大多数情况下是时序的,构成集成电路的各个门及记忆元件都集成在芯片内部。

到了20世纪70年代,中小规模集成电路迅速发展并得到广泛应用,电子系统也逐渐过渡到以集成电路为基本的组成器件。80年代以后,集成电路的规模进一步扩大,出现了大规模集成电路和超大规模集成电路,电子系统在性能上又得到进一步的提高。

到了20世纪90年代,在集成电路中把模拟、数字和混合信号电路集成到同一衬底的集成电路板(IC, Integrated Circuit)上的现象愈来愈普遍。这种趋势就是SoC(System-on-Chip),可译为片上系统或者系统级芯片,以前一个完整的电子系统往往由许多不同的芯片构成,每个芯片分别行使不同的功能。而现在加入系统集成技术后,同样的电子系统只需要一块芯片,便可以实现从前需多块芯片同时工作才能实现的功能。结合SoC和智能功率集成电路的发展,近年来提出了PSoC(Power System on Chip)的概念,即将电源、传感器、控制电路、驱动电路和功率电路集成于同一芯片上,形成具有部分或完整功能的单片功率系统。它和目前的SoC技术相比,其难度更大,也更具有特殊性。

目前,随着现代工业及科学技术,特别是计算机技术的快速发展,电子系统的结构变得越来越复杂,规模越来越庞大,自动化程度也越来越高,系统中不仅同一设备的不同部分之间互相关联、紧密结合,而且不同设备之间也存在着紧密的联系,在运行过程中形成一个整体。

在现代大型系统中,电子系统往往占据着核心和灵魂地位,而且渗透到各个领域发挥着重要作用。例如,汽车中的导航系统、自动控制系统、智能变速系统等使汽车更加智能化自动化;生物医学中的植入式电子系统是一种埋置在生物体或人体内的电子设备,主要用来测量生命体内的生理、生化参数的长期变化与诊断、治疗某些疾病,实现在生命体无拘束自然状态下的、体内的直接测量和控制功能,也可用来代替功能业已丧失的器官;在如今炙手可热的嵌入式可穿戴领域中也大量地运用电子系统,

谷歌眼镜 (Google Project Glass)、可穿戴手表、头戴式显示器都运用了集成的各种模块化功能化的电子系统。除此之外,电子系统在测控、通信、计算机、家电、数据处理等领域中也发挥着重要的作用。

0.2 电路与电子系统故障诊断的必要性

现代电子系统日趋大型化和复杂化,功能越来越多,结构也越来越复杂,如果系统由于某一零部件的原因出现故障而又未能及时发现和排除,不仅可能导致设备的损坏,影响任务的按时完成,降低工作效率,更严重的将会造成机毁人亡的重大事故,因电子系统故障设备停止运行而造成的损失也将会大大增加。

近年来,因关键电子设备故障而引起的灾难性事故时有发生。美国在 1998 年到 1999 年短短 1 年时间里就发生了 5 次运载火箭的发射失败,直接经济损失达 30 多亿美元;2003 年 2 月 1 日,美国航天飞机“哥伦比亚 0 号”的空中解体事件,导致 7 名宇航员全部遇难,直接经济损失达 12 亿美元;2003 年 8 月 14 日,美国、加拿大发生大面积停电事故,受停电影响的人口约 5000 万,地域约 24 000 方公里,停电持续时间为 29 小时,经济损失达 60 亿美元。2013 年 12 月印度一辆电力火车因电路故障引起火灾,导致 26 人丧生。

我国因电子系统故障导致的事故也时有发生。2012 年 4 月中国电信骨干网发生严重网络故障,造成中国大部分地区不能访问百度等网站;2012 年 9 月香港龙华线地铁因供电设备故障导致停运 7 个小时,影响 7 成旅客的出行。

这些故障性事件的不断发生时刻提醒人们,系统运行的可靠性和安全性是保障经济效益和社会效益的关键因素,它已成为产品开发商和系统设计人员急需解决的重大问题之一。近 30 年来,电路与电子系统故障诊断技术的出现为这类问题的解决开辟了一条新途径,日益受到科学界、工程界等诸多领域的重视。电路和电子系统故障诊断与检测的目的就是及时发现故障并进行有效的处理,防止故障的扩散与恶化。

0.3 电路与电子系统测试的特点

电路与电子系统中的故障会造成系统不可预估的损失,直接威胁到了电路的可靠性和安全性。在电路与电子系统的生产和维护过程中,测试一直是十分重要的环节,完整有效的测试是电路与电子系统得以正常工作的前提条件。电路根据其信号特征一般分为模拟电路、数字电路和模拟数字都有的混合电路,由于电路的特征不同其测试方法也千差万别,根据不同的信号特征找出有效的测试方法,才能高效快速地进行故障诊断。

0.3.1 模拟电路与系统测试的特点

模拟信号的客观存在决定了模拟电路的必然存在。外界的自然信号很大一部分都属于模拟信号。模拟电路是较早兴起的电路,但是由于模拟信号本身的特点,使得模拟电路的测试变得困难。

模拟电路与系统测试的特点:

(1) 模拟电路的规模大小没有一个界限,电路的输入激励和输出响应都是连续量,网络中各元件的参数通常也是连续的,难以进行简单的量化。由于故障参数是连续的,因此从理论上讲,一个模拟元件可能具有无穷多个故障,所以要想找到所有故障就要进行多次测试。

(2) 模拟电路中的元件参数具有很大的离散性,即具有容差。由于容差实际上就是轻微的故障,它们的普遍存在,其影响往往可与一个或几个元件的大故障等效,因此导致实际故障的模糊性,而无

法唯一定位实际故障的物理位置。从模拟电路故障诊断的实践看,元件参数的容差是实施正确诊断的最大困难。

(3) 模拟电路的可分解性差。在模拟电路中,被测电路不能轻易地分解成很多相对独立的宏模块进行测试。

(4) 模拟电路中的测试总线比较难以实现。将模拟信号传送到输出引脚可能改变模拟信号和电路的功能性。在测试过程中,重新配置模拟电路通常是不可接受的,因为重新配置硬件会不可避免地改变模拟电路转移功能。

0.3.2 数字电路与系统测试的特点

相对于模拟电路,因为数字电路的离散特性,其可测性问题相对简单一些。在一个模拟电路中,某一点上所发生的事件,一般会立即(只有有限的延时)在其输出端反映出来。数字系统则不然,某一点上所发生的事件,往往在经过若干个内部工作循环周期之后,才会在另一点或输出端上有所表现,甚至可能毫无表现。另一方面,数字系统中不同的内部事件,也有可能产生同样的外部或终端效果。加之在数字集成电路中,特别是 LSI 和 VLSI 中,内部电路规模庞大,十分复杂,而外部可观测点(引脚)则甚少,常常不得不依靠少数外部测试点上所得的有限结果去推断电路内部发生的复杂过程。此外,在数字系统中,除了由于硬件故障而引起外部信息错乱之外,还可能由于软件的问题而导致异常输出。凡此种种因素,都给数字系统的测试和分析带来极大困难。

数字电路与系统测试的特点:

(1) 因为数字电路研究的是输入与输出的逻辑关系,一般而言,为了实现数字电路系统的逻辑函数及其动态特征,数字电路各个部分之间都必须保持严格的逻辑与时序关系。因此,时序性是设计数字电路的重要特征之一。

(2) 数字信号不像模拟信号那样具有周期性,在处理大量的数字信息时难以寻找周期规律,这给对信号的观察和测试带来了困难。

(3) 数字信号是由不规则排序的 0 和 1 两个对立的状态组成的,而不像模拟信号那样每个点是具体的变量值,所以对数字信号的测试就不能进行简单的模拟。

(4) 在数字电路中基本信号只有高或低两种逻辑,既然数字电路作为一种运行着的动态运算与逻辑电路,那么其基本信号就只能是高、低两种脉冲信号。而脉冲信号的特征就只能是高、低两种状态,且两种状态都有一定的持续时间和范围。由于脉冲的不稳定性容易产生毛刺和门电路的延迟产生竞争与冒险等不稳定因素直接影响数字信号的准确度。

(5) 数字电路中没有具体数值的数,很难根据其数字特征判断出被测对象的来源类别。例如,数据流测试就难以区分是软件测试还是硬件测试。

(6) 数字信号可以借助计算机达到快速处理,现在已可以达到皮秒级别,这是模拟电路所没有的。

数字系统所处理的是一些脉冲序列,多为二进制信息,通常一般化地称之为“数据”,因此,有关的测试分析也就称为数据域测试分析。

数据域测试的历史,其渊源虽可上溯到 20 世纪 50 年代初期或更早,而其真正的发轫则可认为是始于 20 世纪 60 年代初期对电子计算机的诊断工作。事实上,所谓数据域测试就是对数字电路和系统进行故障侦查、定位和诊断。

在 20 世纪 70 年代时,随着 LSI 电路的发展,数据域测试也得到蓬勃发展,其势异常迅猛。有关的理论、方法、技术和设备,如雨后春笋层出不穷,至今方兴未艾。它们对当今电子世界的革命起着日益重要的作用,前途不可限量。

0.3.3 混合电路测试的特点

目前更多的电路开始同时包含数字和模拟两个部分,由于数模两种电路的测试方法不同,混合电路在测试上比单纯的数字电路或模拟电路的测试都要困难,目前的电路诊断测试研究工作大部分针对数字电路或者模拟电路,而综合考虑数模混合的电路测试方面的研究工作仍然比较少。

对于混合电路要分块测量,一般分为数字电路部分和模拟电路部分,然后根据各个部分的电路特点分别进行测量,之后再加以整合进行诊断,如图 0.1 所示。模拟信号要经过滤波器、模拟采样器;数字信号要经过计算机处理器、动态存储器、信号处理器。数字信号和模拟信号要经过数模转换器(DAC, Digital-to-Analog)和模数转换器(ADC, Analog to Digital Converter)进行相互转换输出。

尽管如此,我们也需要一种标准化的电路来解决这类电路的可测行问题,在 20 世纪 90 年代初期人们提出 IEEE 1149.4 总线标准。该标准定义了混合信号芯片测试中的内连测试、参数测试和内部测试等标准化测试方法。

内连测试是指对直接通过导线连接的引脚进行的互连测试,主要用来测试器件连线间的开路、短路和网络间的桥接等故障。

参数测试是指引脚之间不是通过简单的导线连接,而是通过由电阻、电容、电感或由它们组成的网络而连接的一种互连测试,即扩展互连测试。

内部测试是指对隔离的或安装在衬底上的元件执行相关的综合测试。

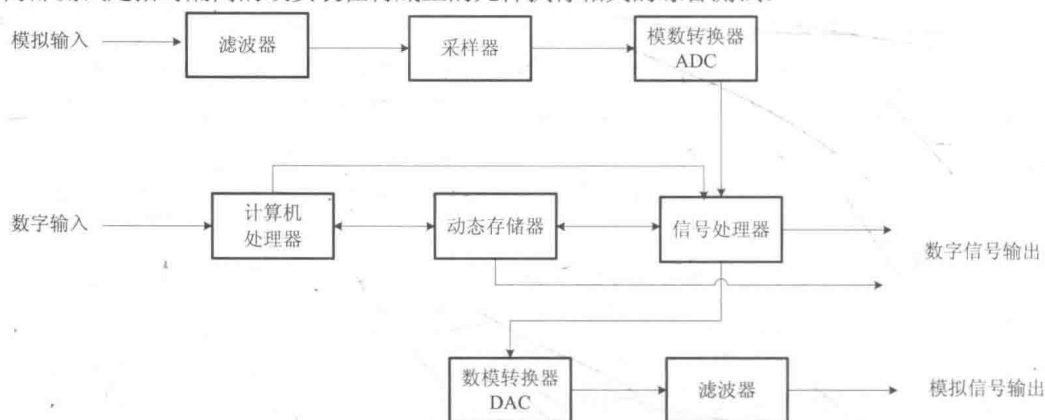


图 0.1 混合电路测试流程

0.4 本书主要内容

本书第 1 章首先介绍了电子与电路系统常见的诊断方法和故障诊断的发展趋势,并且着重介绍了基于故障树的诊断方法。

要对一个数字电路进行完备的测试,最简单的方法无疑是穷举测试法,即把任何可能的输入组合加于被测系统,看是否得到应有的输出结果。拿正常电路的真值表同有某种故障电路的实际真值表相比较,即可求得完备的测试集。本书第 2 章阐明了数字电路这些经典测试的方法,并指出其实施的困难。

第 3 章阐述有关针对数字电路两大分类的分别故障诊断方法。对于组合逻辑电路的一些较为实际可行的测试方法,包括:①利用拓扑方法寻求测试的敏化通路法,以及其实施的 d 算法和扩展(九值) d 算法;②利用分析方法寻求敏化通路的布尔差分法;对于时序逻辑电路的测试,包括主要借鉴于组合电路测试的所谓选接电路法,以及以有限自动机的状态识别为基础的状态变迁检查法。最后还阐述对时延故障的测试。时延故障是时序逻辑电路和组合逻辑电路特有的一类故障。

与数字信号相呼应的就是模拟信号了,本书第4章专门介绍了经常用到的几种测试模拟电路与电子系统的方法。在早期人们已经研制出测试模拟电路的传统方法,比如直接观察法、电阻测试、电压测试、波形显示、部件替代。随着模拟电路越来越复杂,采用的元器件也逐步趋向集成化,对模拟电路的测试方法也越来越多,基本可以分为三大类:估计法、测前拟似法和测后拟似法。混合信号既有模拟信号的特性又有数字信号特点,所以针对于混合信号的测试,需要专门的标准 IEEE 1149.4——混合信号测试总线标准,这个标准给混合信号提供了可控性和可观察性。第4章也对此部分有详细的描述。

在积累了针对不同电路的故障诊断知识后,第5章阐述了针对于具体故障板的实际维修方法,从维修前的准备,到测试诊断和定位故障源进行了体系的讲解。重点讲解了对于电路板的多种角度的维修方法。

第6章阐述微处理器系统的测试。这类系统一般由LSI电路组成。由于LSI电路的结构太过复杂,而且用户一般也不了解其细节,所以前面所述的结构性测试则无所施其技。该章所述的测试属于子系统级的功能性测试,包括对随机存取存储器(RAM, Random Access Memory)的测试和对裸 μP 的测试。最后阐述利用被测系统自身的应用程序来对系统进行测试的方法,这类方法只对该系统的应用所涉及的功能进行测试,至于用不着的一些功能则置之不理。这类测试虽然远非完备,但却十分实用,就实际应用而言,测试是完备的。

数字电路的可测性和内测试是VLSI电路设计和测试发展的必然趋势之一。因此,本书在第5章专门讨论这一论题,其目的并不在于可测性设计本身,而是想借此向读者展示可测性设计与数字电路的紧密联系。

第7章7.1节和7.2节首先阐明可测性设计的概念、参数和发展。7.3节专门阐述了可测性的测度。

第3章3.6节中曾经讨论过测试时序电路的迭接电路法,这种迭接电路模型仅适用于30个门以下的电路。当电路的规模更大、反馈路径更多时,测试就不可能在合理的时间内完成。这种测试上的困难,事实上就是数字电路(特别是VLSI电路)的各种扫描通道设计发展的主要原因。第7章7.4节就此问题做了扼要的阐述。

第7章7.5节扼要介绍了Koeneman等在1979年提出的内建逻辑块观测(BILBO, Built In Logic Block Observation)技术。这种技术主要是利用电路内含的线性反馈移位寄存器(LFSR, Linear Feedback Shift Register)产生伪随机测试样式,用LFSR进行信号特征分析,从而达到自测试的目的。不过BILBO技术却不适用于可编程逻辑阵列(PLA, Programmable Logic Array)的测试。PLA的特点是逻辑门的扇入非常多。例如,一个PLA中的一个“与”门可能有20个输入端,一条输入线呆滞于1的故障的侦出率为 $1/20^{20} \approx 1 \times 10^{-6}$;如果用BILBO技术产生1000个测试样式,则故障的侦出率只约为1/1000,这显然是不行的。

第7章的最后一节集中介绍了可测试性设计工业标准和主要的边界扫描技术。这些标准和技术使可测性设计更加通用化。

故障诊断离不开测试,在本书的最后两章针对测试技术进行了扩展知识的讲解。

第8章介绍了网络化测试仪器,对分布式测试系统的需求的增加,推动了网络化仪器的发展,对网络化仪器的测试指标和同步触发提出了更高的要求。继而需要LXI(LAN eXtension for Instrumentation)总线测试仪器,该章重点介绍了LXI总线测试仪器。

有了满足测试的仪器,在本书的最后一章中介绍了面向信号的自动测试系统。自动测试系统节省了大量的人力资源,并且提高了测试的精准性。尤其是面向信号的自动测试系统,增强了测试的可移植性和通用性,是下一代测试系统的发展方向。

本章参考文献

- [1] 宋晓梅. 现代电子系统设计教程. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [2] 沈嗣昌. 数字电路故障诊断. 南京: 东南大学出版社, 1991.
- [3] Tian F, Voskuijl M. Knowledge based engineering to support electric and electronic system design and automatic control software development. Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2013 IEEE/AIAA 32nd. IEEE, 2013: 7A4-1-7A4-9.
- [4] 朱彦卿. 模拟和混合信号电路测试及故障诊断方法研究. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [5] Ye Z, Hua C. An innovative method of teaching electronic system design with PSoC. Education, IEEE Transactions on, 2012, 55(3): 418-424.
- [6] Xiu L. The New Frontier in Electronic System Design. Nanometer Frequency Synthesis Beyond the Phase-Locked Loop, 211-278.
- [7] 钱照明, 张军明, 谢小高等. 电力电子系统集成研究进展与现状. 电工技术学报, 2006, 21(3): 1-14.
- [8] 梁晓雯, 李玉虎, 许瑛. 电子系统设计基础. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [9] 谢翔, 张春, 王志华. 生物医学中的植入式电子系统的现状与发展. 电子学报, 2004, 32(3): 462-467.
- [10] 严之琦. 数字电路故障检测与诊断的策略探讨. 赤峰学院学报: 科学教育版, 2011 (3): 90-91.
- [11] 李正光, 雷加. 基于 IEEE 1149.4 的测试方法研究. 电子工程师, 2003, 29(4): 10-13.

第1章 电子系统常用故障诊断方法

随着系统复杂性的增加、产品生命周期的缩短、生产成本的降低以及技术的革新,对智能工具的需求在产品生命周期的各个阶段都变得越来越重要。

故障诊断通过测量、测试和其他的信息来源(例如可观性症状),采集和分析系统状态信息。故障诊断一般由诊断专家完成,在产品生命周期的各个阶段都具有重要作用,特别是在制造和现场维护过程中。

故障诊断一般分为三个部分:① 生成故障信息:故障信息必须包含故障的本性。这可以通过融合多种信息来完成,信息来源包括:可测性症状、进行测量和运行故障测试。② 生成故障假设:利用收集的信息将故障定位到一个包含有用故障信息的零件子集或组件子集。③ 辨别故障假设:如果存在多个可能的故障源,可能就需要继续测试或利用历史数据(比如概率)来进一步辨别。如果不可能继续辨别,可以根据经验或反复试验来确定最适当的检修方案。

故障诊断的目的是及时隔离系统故障的原因(零件或组件)。诊断过程从本质上讲,可以定义为根据系统观测和测试所收集到的信息进行故障隔离。

1.1 常见故障诊断方法

1.1.1 基于故障模型的诊断方法

基于模型的诊断方法就是针对一种故障模型特有的诊断方法,这种方法主要用于数字电路的诊断,包括呆滞于1和呆滞于0故障、桥接(短路)故障和延迟(定时)故障。例如,采用一系列的二进制测试向量去测试一个简单的数字组合电路。通过故障仿真,记录系统在不同测试模式和故障类型下的表现。

所谓故障模型是指这类模型预期可能出现的所有故障类型。每个被选故障类型嵌入到各个组件中,并利用仿真监测整个系统的表现。每次仿真都是采用精确的方式让某个特定部分失效之后,产生一个对整个系统如何运转的描述。这就产生了一个故障/症状对应的列表,可以用来生成故障字典。当某个特定的全局症状出现时,故障字典可以指示失效的组件。

故障模型可以准确地诊断组合数字电路的模型化故障,但是,不能处理未预期(也就是未仿真)的故障。无论如何,已仿真的故障集可以满足大多数的诊断目的,此外还可以为很多应用提供足够多的解。

故障模型在时序电路中的应用不是太成功。诊断时序电路更需要测试序列,而不是单独的向量,如果在测试过程中因为某种故障丢失了电路状态,测试就可能无法完成,因此,将电路分离并封装成易处理块的诊断技术,被认为是可能的解决方案。

最后,大规模电路所需要的测试向量数目很大,可能导致不切实际的测试时间。数据压缩技术已经用来解决这个问题。

下面介绍几种常见的故障模型及其诊断方法

1. 因果模型

因果模型是一个有向图,节点代表模型化系统变量,链接代表变量之间的关系或联合。例如,在

诊断模型中, 变量通常表示症状和故障, 链接则表示症状-故障的联合。每个链接的强弱通常采用数字权重或概率来定义。因此, 采用贝叶斯 (Bayesian) 技术对成型的故障假设进行归类或消除。这里采用的是发射机的贝叶斯网络模型, 如图 1.1 所示。

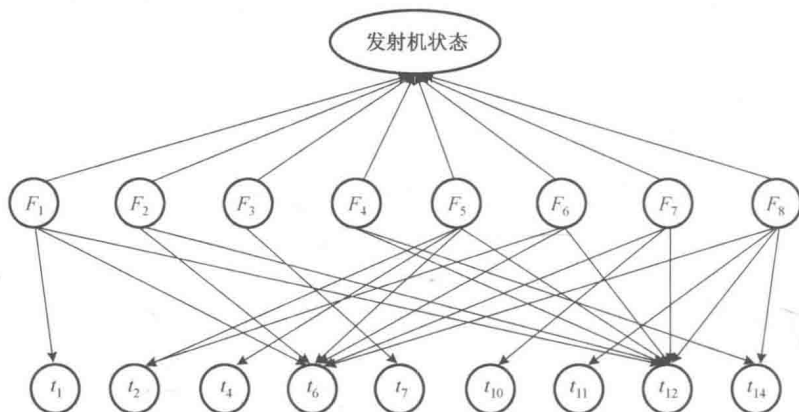


图 1.1 贝叶斯网络模型

应用贝叶斯网络检测集成电路检测器: 可以将某领域内关于不同检测器故障模型概率的专业知识描述成一个贝叶斯网络。基于规则的系统在工业生产中比基于模型的方法更加流行, 因为相对来说, 基于模型的系统更难建立。为了克服这个缺点, 提出了一种将简单的系统结构图转换为因果模型的工具。然而构建一个因果模型需要应用领域的专业知识, 因此“知识获取瓶颈”是该方法的主要缺点。主要的优点是比较规则, 能够更容易地表达物理或抽象概念中的复杂知识结构, 因而具有更高的计算效率。此外, 因果模型是建立在严格的数学概率理论之上的。

2. 基于结构和行为的模型

基于结构和行为的模型是过去 15 年中一个主要的研究方向。结构和行为采用对偶来描述。结构描述列举了模型化系统中所有的组件, 以及组件之间的相互联络。行为描述表示了所有组件的正确行为模式。行为描述可以采用多种水平的抽象提取, 包括数学的、定性的或功能的。结构描述和行为描述

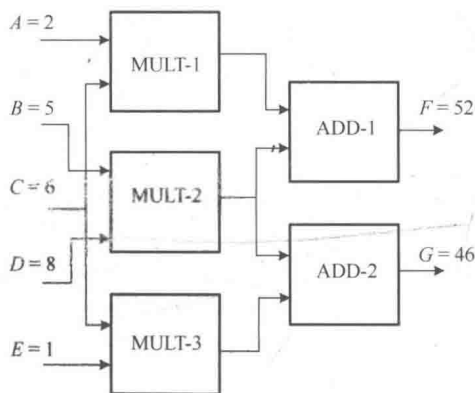


图 1.2 简单电路模型

通过采用逻辑公式建立, 比如一阶谓词演算。如果模块在某个特定操作模式下的工作与在实际系统上观测到的不符, 那么矛盾就产生了, 必须进行诊断, 以确定失效的组件。图 1.2 所示为一个简单的运算电路的例子。仿真的时候, 如果 A 到 E 的输入如图所示, 应该得到图中的输出值。假如输出值与图中不相同, 则意味着模型和实际系统之间存在差异。与故障模型不同, 这种类型的模型是正确模型。也就是说, 是工作设备的模型化, 理论上可以诊断任何类型的故障, 而不仅仅是模型化的故障。

基于结构和行为的模型似乎是许多诊断问题的理想解决方法。理论上, 由于采用了正确的模型, 因此能够诊断所有的故障; 可以利用计算机辅助设计 (CAD, Computer Aided Design) 数据自动生成适合的模型。但是, 实际上有许多重要的局限性。

- (1) 复杂问题的集约计算, 首先关注最可能的故障, 并采用故障模型的包含来提高效率。
- (2) 描述复杂组件的行为, 比如奔腾微处理器, 仍然是主要的研究课题。

(3) 完善和相容的模型是很难开发的。本质上, 一个模型只是某个真实系统的近似描述。比如, 结构模型就无法描述电路桥接故障。

(4) 涉及系统可能的失效方式的信息经常都没有提供, 这就可能导致无意义的故障隔离。

(5) 开发和维护模型是很耗时的, 除非能采用 CAD 生成。

3. 诊断推理模型

诊断推理模型通过描述解决问题的诊断信息流来完成诊断。以前称为信息流模型, 之所以修改名称是为了反映模型注重诊断提供的信息, 可以从这些信息中得出推论。

这种模型有两个基本组成: 测试和结论。测试包含任何来源的诊断信息, 包括可观性症状、物流记录和诊断测试结果。结论描述有代表性的故障或需要替换的单元。测试和结论之间的依赖关系用一个有向图描述。除了测试和结论, 诊断推理模型还可能包含另外 3 个元素: 可测性输入、不可测性输入和无错误输入 (No-Fault)。输入表示进入系统的信息, 这些信息可能影响系统的正常状态。可测性输入可以进行有效性检查, 而不可测性输入则不能。No-Fault 是一个特殊的结论, 标志着测试集没有发现故障。图 1.3 给出了一个诊断推理模型的例子。

测试序列的优化是通过基于最大测试信息增益的算法实现的。诊断推理融合多个测试信息, 通过多种逻辑和统计推理技术实现, 其中包括改良的 Dempster-Shafer (D-S) 证据推理, 该方法包含了一个特殊的结论, 即不曾预料的结果。这种不曾预料的结果用来补偿冲突掩盖的不确定性。如同所有的基于模型的技术一样, 诊断推理可能得出相互冲突的结果。冲突来自于: 测试误差、多故障, 以及不完整或不准确的模型。D-S 方法和确定性因素都用来推导这些不确定性的方法。

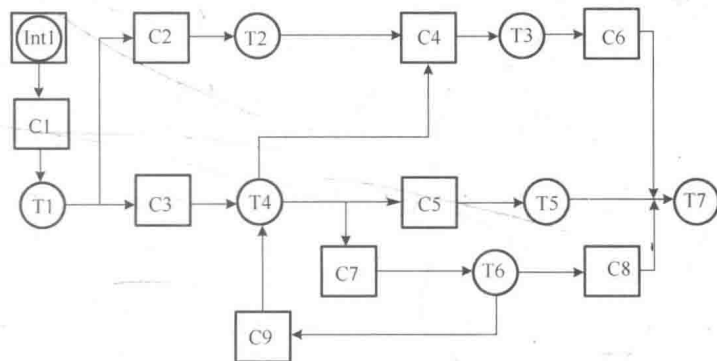


图 1.3 诊断推理模型示例

诊断推理模型如果被考虑和应用到产品的研发阶段, 将起到最佳的效果。但遗憾的是, 许多系统仍然不注重故障诊断设计, 因此结构诊断信息不充分, 造成使用该方法诊断时结果不准确。可是, 如果能利用可用的诊断信息建立适当的模型, 就可以准确和高效地进行诊断。

1.1.2 基于机器学习的诊断方法

前面所讨论的方法在应用中具有固定水平的性能, 采用过去的成功和失败的经验提高性能是不可能的。机器学习的方法可以开发以前成功或失败的诊断, 持续地提高系统的性能, 或者利用现有的相关数据, 自动生成知识。

这里简单介绍几种典型的机器学习方法

1. 基于案例推理

基于案例推理 (CBR, Case-Based Reasoning) 存储了以往的解决方案, 也就是案例的经验, 从中

检索一个适宜于新问题情形的案例,调整该案例并用于新问题,根据其成功或失败的程度修改这个案例,最终将有用的经验保存到案例存储器中。

一个 CBR 解决方案一般包含以下步骤:

(1) 知识或案例描述。

(2) 案例检索,包括以下步骤:

①总结当前问题或案例,得到识别特征。

②利用这些特征在案例存储中寻找类似的案例。所有的案例都根据相似性归类。

③对比当前案例,更加细致地分析步骤②中选择的案例,执行最终的匹配。选择最相似的案例。

(3) 案例复用:包括找出过去和当前案例的不同点,并以某种方式调整过去的案例,使之与当前案例相匹配。通常调整的方式包括置换(用新数值置换旧数值)和转换(利用启发式方法)。

(4) 案例修改:包括根据案例复用评估案例解决方案,如果有不适合的地方,则尽可能修补。评估包括将解决方案应用到一个实际的环境中,并以某种方式测量其成功的水平。这样就可以得到该解决方案的误差,并利用相关的专业知识进行修补。

最后,案例保留(或学习)将在解决当前问题中学到的有用信息加入案例存储。这不仅包括成功的新案例,也包括失败的案例,保留可以是对现有案例及其指标的调整,也可以添加全新的案例。

CBR 的效率依赖于根据历史数据和仿真而生成的适宜案例数据,以及索引的效率、检索和调整方法。

2. 基于解释的学习

基于解释的学习(EBL, Explanation-Based Learning)利用专业知识和一个单独训练的例子,学习新的概念。比如,在诊断中,可以利用一个系统模型和一个错误诊断的例子,得出一个适当诊断的解释。

一个诊断 EBL 系统,该系统通过学习改进诊断推理模型。其操作如下:错误诊断之后,继续测试直到完成正确的诊断;随后用这个附加信息修改模型,从而使正确的诊断与测试相容。

EBL 的成败依赖于适当专业知识的有效性。因此,复杂的领域需要广泛的知识描述新概念,这个方法就可能难以实现。

3. 从数据学习知识

另一种方法就是从现有的数据库和案例库中提取知识。这也克服了知识获取瓶颈,可以从现有的资源中自动生成智能诊断系统。显然,这个方法只有在先决数据存在的条件下才有用,因此对于新系统,这个方法用处很小或根本没用。

利用现有的信息自动生成基于知识的系统能够大大加快开发速度,同时在很大程度上减小“知识获取瓶颈”。但是,这个方法仅仅适用于存在大型专业知识数据库的场合。因此,不适合没有实际数据的新系统。

1.1.3 基于信号处理的方法

所谓基于信号处理的方法,通常是利用信号模型,如相关函数、频谱、自回归滑动平均、小波变换等,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征值,从而检测出故障。如旋转机械中的滚动轴承在出现疲劳脱落、压痕或局部腐蚀等故障时其振动信号的功率谱就会出现相应的反应,利用这种反应就可诊断系统故障。近年来出现的基于信号处理的方法主要有以下几种。

1. 小波变换方法

小波变换是一种时频分析方法,具有多分辨分析的特性,非常适合非平稳信号的奇异性分析。故