

杨士元 编著
童诗白 审校

模拟系统的 故障诊断与 可靠性设计

清华大学出版社

序 言

模拟电子电路故障诊断自 70 年代开始,在世界范围内已取得卓有成效的研究成果,并逐渐形成了比较系统的理论,确立了它在网络理论中应有的地位,成为继网络分析和网络综合之后的网络理论的第三大分支。

当前,由于模拟电子电路 VLSI 的崛起和数字/模拟混合电路的普遍使用,对模拟系统的测试和诊断提出了急迫的需求和更高的要求。本书试图对已有的模拟电子电路的故障诊断方法和理论作一系统的总结,揭示现有各种诊断方法的基本思想,使读者能掌握有关的基础知识,并对该领域的研究和发展趋向有一个全面的了解。

我校自动化系《自动化仪表及装置》博士点,在童诗白教授的主持下,自 1984 年开始作模拟电子电路故障诊断和可靠性设计技术的研究,并于 1988 年开始为研究生开设了“自动测试与故障诊断理论基础”学位课程。其中数字系统测试部分的教材《数字系统的故障诊断与可靠性设计》,已于 1989 年由清华大学出版社出版。关于模拟系统测试部分,我们在经过 6 年多的教学实践之后,对讲稿作了必要的整理和增补,编著成这本教材。为了跟踪世界科技发展的最前沿,书中总结了我们的最新研究成果,并尽可能反映国际上最新的技术。

全书共分七章。第一章扼要介绍了模拟电子电路故障诊断的发展概况和各种方法的分类,使读者对此领域有一全貌的了解。第二章介绍了目前最常用的故障诊断方法——故障字典法,主要讲述了字典的构造方法。第三章介绍故障参数识别法,它是借用系统参数辨识技术而发展起来的。第四章介绍了国际上研究较多的故障验证法,它对假设电路中仅有少数故障的情况是有效的。第五章介绍了专家系统的基本概念以及在电子电路故障诊断中的应用技术,这方面的研究在国际上也是最近几年才开始,但已引起了众多学者的兴趣。第六章介绍模拟系统可靠性设计方法和冗余系统可靠性分析方法,这在一般关于模拟系统测试的教材中介绍较少。最后一章根据目前国内研制和使用自动测试设备的现状,介绍了一种最常见的模拟电路测试方法——路内测试,比较详细地叙述了这种方法的基本原理和编程方法,同时为便于读者选择和使用一般的自动测试设备,本章还介绍了自动测试设备的主要技术指标和系统的分类及构成。

在本书的编著过程中,得到了童诗白教授的热忱帮助,他还为全书作了细致的审校,在此表示衷心的感谢。

书中介绍的一些研究工作,得到了国家自然科学基金项目和国家教委博士点基金项目的支持,在此表示感谢。

由于模拟电子电路故障诊断是一个新兴学科,正处于发展之中,又鉴于本人水平有限,书中难免有错误和疏漏,恳请读者谅解指正。

杨士元

于清华大学自动化系

1993 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 模拟电路故障诊断的进展与展望	1
§ 1.2 模拟电路测试与故障诊断方法的分类	4
§ 1.3 本书内容及使用	7
习题	8
参考文献	8
第二章 故障字典法	10
§ 2.1 直流故障字典法	10
2.1.1 字典的建立和测后分析	10
2.1.2 故障仿真计算方法	17
2.1.3 测试节点的优选及故障测试码的生成	32
§ 2.2 交流故障字典法	37
2.2.1 交流故障字典的建立	37
2.2.2 故障诊断方法	47
习题	49
参考文献	51
第三章 故障参数识别法	52
§ 3.1 多频法故障参数识别	52
3.1.1 多频支路参数识别	53
3.1.2 节点法多频参数识别	63
3.1.3 非线性方程的求解	70
§ 3.2 伴随网络法	75
3.2.1 基本概念	76
3.2.2 伴随网络法故障诊断	78
3.2.3 一般网络的诊断方法	83
习题	86
参考文献	88
第四章 验证法故障诊断	89
§ 4.1 K 故障诊断法	89
4.1.1 故障电流模型	89
4.1.2 K 节点故障诊断	91
4.1.3 K 支路故障诊断	99

4.1.4 快速 K 故障诊断	106
4.1.5 具有容差的实际网络的 K 故障诊断	112
§ 4.2 故障定界法诊断	119
4.2.1 仿真计算模型	119
4.2.2 故障定位的加速措施	126
§ 4.3 网络撕裂法	131
4.3.1 网络的撕裂及子网络特性	132
4.3.2 子网络状态判定条件	132
4.3.3 应用逻辑分析定位故障子网络	136
4.3.4 诊断步骤和应用举例	137
习题	140
参考文献	142

第五章 专家系统及其在模拟电路故障诊断中的应用

§ 5.1 专家系统的基本结构和特点	143
5.1.1 专家系统的基本结构	143
5.1.2 专家系统的特点和主要功能	145
§ 5.2 知识表达和知识库的建立	146
5.2.1 产生式知识表达	146
5.2.2 语义网络的知识表达	149
5.2.3 框架结构的知识表达	153
5.2.4 谓词逻辑知识表达	155
5.2.5 知识获取的一般过程	158
§ 5.3 推理方法和搜索策略	159
5.3.1 非精确推理	159
5.3.2 搜索策略	170
§ 5.4 应用专家系统的故障诊断系统简介	174
5.4.1 FIS 的组成及主要功能	174
5.4.2 知识的描述	175
5.4.3 推理方法	175
5.4.4 最优测试选择	177
习题	181
参考文献	183

第六章 模拟系统的可靠性设计

§ 6.1 模拟系统的可靠性	184
§ 6.2 单模系统	187
6.2.1 基准的稳定性	188
6.2.2 单模反馈系统分析	192
6.2.3 前馈控制系统	197

§ 6.3 多模冗余结构设计	202
6.3.1 被动冗余结构设计	204
6.3.2 主动冗余结构设计	209
6.3.3 半主动冗余结构设计	218
6.3.4 混合冗余结构设计	220
§ 6.4 冗余结构系统的可靠性分析	221
6.4.1 用于可靠性描述的基本参量	221
6.4.2 不可维冗余系统的可靠度	225
6.4.3 可维修冗余系统的可靠度	231
习题	236
参考文献	237
第七章 自动测试设备	238
§ 7.1 模拟电路的路内测试	238
7.1.1 模拟电路路内测试的基本原理	240
7.1.2 测试的误差分析及测试方案的改进	243
7.1.3 六线测试的误差分析	245
7.1.4 路内测试的程序设计	247
7.1.5 接地点的选择方法	248
7.1.6 触针的接触工艺	253
§ 7.2 自动测试设备的结构	254
7.2.1 ATE 的功能与分类	255
7.2.2 ATE 硬件的基本结构和组成	256
7.2.3 ATE 软件系统及编程策略	263
§ 7.3 ATE 的主要技术指标	268
习题	271
参考文献	272
部分习题的答案或提示	273

第一章 绪 论

§ 1.1 模拟电路故障诊断的进展与展望

一、网络理论的第三分支——故障诊断

从网络理论发展过程来看,网络理论主要经历了下述三个阶段。

网络分析 网络分析的主要任务是:在已知网络拓扑结构、元件参数和输入激励信号时求解网络的输出响应。应用的主要理论和方法是克希霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL),以及由它们推导出来的节点电位法、支路电流法和回路电流法等。所求的响应可能是解析解,也可能是数值解,但其结果一般都是唯一的。如果利用数字计算机来求解,则只能求得数值解,通常称之为计算机辅助分析(CAA——Computer Aided Analysis)。到目前为止,网络分析理论的发展最为完善,应用也最广泛。

网络综合 网络综合的主要任务是:在已知网络的输入激励和所需响应的条件下,求解网络的拓扑结构和元件类型及参数。因此经常也将网络综合称之为网络设计。应用的主要理论和技术是数学中的逼近理论和优化设计方法。网络综合的结果通常都不唯一,往往是因设计人员的素质和经验以及所采用的模块或器件而异。由于微电子技术和工艺的迅速发展,集成电路(IC)的集成度越来越高,新的生产工艺和优质器件不断涌现,使网络综合日益简化。如果采用计算机辅助设计(CAD——Computer Aided Design),则设计和综合的工作量可进一步减少,因此,至今模拟电路的CAD仍引起众多研究者的很大兴趣,导致它非常迅速的发展。

故障诊断 故障诊断的主要任务是:在已知网络的拓扑结构、输入激励信号(也可自选激励信号)和故障下的响应时(有时可能还已知部分元器件的参数),求解故障元件的物理位置和参数。要求求解的结果是唯一的,但有时却不能保证。与网络分析和网络综合不同的是,它的输入信号不限于采用网络实际工作所施加的有限信号,而可根据故障诊断的需求“随意”确定。例如可采用直流或交流(正弦波)信号,也可采用不同频率的若干交流信号,或采用不同波形的异型信号(如锯齿波、矩形波等)。故障诊断所涉及的有关理论和技术的面较宽,如系统参数辨识、模式识别、优化技术等。模拟电路的故障诊断一般需要用计算机来实现(CAT——Computer Aided Test)。故障诊断于60年代在军事工业上首先开始研究,发展至今已成为网络理论中公认的第三大分支。

综合上述分析,在表1.1.1中列出了网络理论三大分支的特点。

表 1.1.1 网络理论三大分支的特点

特 点 类 别	项目	激 励	拓扑结构	元件参数	响 应	解的唯一性
网络分析		已知(给定)	已知	已知	待求	唯一
网络综合		已知(给定)	待求	待求	已知(给定)	不唯一
故障诊断		已知(可选)	已知	待求(部分已知)	已知(可测)	要求唯一

在此提及一点,网络分析与网络综合是一对互逆的问题。而故障诊断与网络分析中的灵敏度分析是一对互逆的问题。

二、模拟电路故障诊断的进展

在电子电路的发展进程中,模拟电路比数字电路出现得早,但是数字电路的发展速度却比模拟电路要高得多,最典型的例子是数字计算机现在已基本上替代了模拟计算机,而且仍在日新月异地飞速发展。分析产生这种现象的原因可知,除了军事和工业部门对数字系统有急迫的需求,数字 IC 制造相对比较简单,集成度易于提高,以及可靠性较高等因素以外,数字系统的测试与诊断问题的研究取得突破性进展,并已广泛应用于生产之中,无疑是其中的一个重要原因。

在数字系统中,极大部分的故障都可以用模型化故障 s-a-1 和 s-a-0 来仿真^[8],即一个数字系统中的故障总数是有限的,所以可能构造一个故障特征与故障相对应的字典来检测或诊断故障。由于 D 算法及其各种改进方法的出现,数字系统的诊断理论已趋完善和成熟。从理论上讲,对每一个故障都可找到相应的测试向量,仅存在提高有效度和速度的问题。随着测试方法的不断改进,计算机运算速度的大幅度提高和容量的不断扩大,存在的问题正在逐步解决。尤其是数字 IC 集成度的提高,使得数字系统可测性方案得以实现,从而大大简化了测试问题。数字系统自测试技术已日臻完善,并已广泛应用于实际系统之中,数字系统的可靠性得以迅速提高。

模拟系统的测试与诊断课题自 60 年代开始研究以来,进展一直比较缓慢。探索其原因,大致有两个。一是模拟系统的集成度较低,传统的模拟电路规模也比较小,因此采用人工测试和修理还可满足实际需要,即工业生产没有提出象对规模较大的数字系统测试那样的迫切要求,所以模拟电路的测试和诊断的研究缺少强有力的动力。另一个原因是模拟电路的测试与诊断远比数字系统困难,因此至今无论在理论上和方法上均未完全成熟,可付诸实用的还比较少。事实上上述两个原因是彼此制约和互相促进的。但最终的制约条件还是实际生产的需求的迫切性。

那么模拟电路测试和诊断到底有哪些困难呢?小结起来有下述五个方面。

1. 模拟电路中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,所以模拟系统中的故障模型比较复杂,难以作简单的量化。由于故障参数也是连续的,因此从理论上讲,一个模拟元件可能具有无穷多个故障。所以不可能象在数字系统故障诊断中那样构造一部字典来“查阅”所有的故障。

2. 模拟电路中的元件参数具有很大离散性,即具有容差。由于“容差”事实上就是轻微的“故障”(只是尚在允许的范围以内而已),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,而无法唯一确定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. 在模拟电路中广泛存在非线性问题,包括一般理解的网络中的非线性元件引起的,也包括线性电路中存在的众多的非线性问题。

例如在图 1.1.1 所示的线性网络中,可列出端口特性方程

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{G_7} \begin{bmatrix} G_3(G_1 + G_2) + G_4(G_1 + G_2 + G_3) & G_1 G_3 \\ G_1 G_3 & G_1(G_2 + G_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中

$$G_T = G_1(G_2G_3 + G_2G_4 + G_3G_4)$$

$$R_{11} = \frac{1}{G_T} [G_3(G_1 + G_2) + G_4(G_1 + G_2 + G_3)]$$

$$R_{12} = R_{21} = \frac{1}{G_T} (G_1G_3)$$

$$R_{22} = \frac{1}{G_T} G_1(G_2 + G_3)$$

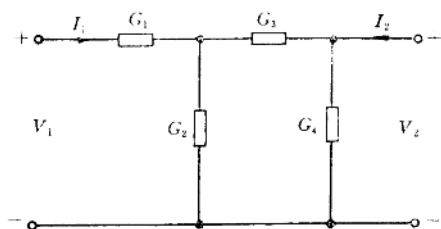


图 1.1.1 线性网络示例

如果网络端口特性 R_{11}, R_{12}, R_{21} 和 R_{22} 通过测量而求得, 在求网络参数 $G_1 \sim G_4$ 时就必须求解四个非线性方程, 即网络参数 $G_1 \sim G_4$ 与网络特性 R_{ij} ($i, j=1, 2$) 之间的关系是非线性的。

众所周知, 解非线性方程通常采用迭代法求解, 因此计算工作量是很大的。随着电路规模的线性增大, 计算工作量则以指数形式增加。如果一个电路具有 100 个元件 (中等规模), 以目前的计算机水平, 总的计算时间几乎是难以接受的。

4. 一个实用的模拟电路中, 几乎无一例外地存在着反馈回路, 电路规模越大, 反馈回路也越复杂。而在计算机上对一个具有复杂反馈回路的模拟电路作仿真计算更需要大量的复杂计算, 因为这也是通过迭代计算实现的。

5. 模拟电路中的电流是一个重要参数, 也是故障信息的重要组成部分。但是在实际测量时, 除输入端口和输出端口可以比较方便地测到电流参数外, 一般电路中的支路电流均不易甚至不可测量, 通常只能通过测量电压来得到。此外可测电压的节点数也有限 (远少于网络的节点数), 导致可用于作故障诊断的有关信息量较少, 甚至很不充分, 最后造成故障定位的不唯一性和模糊性, 或者根本不可诊断。

由于模拟电路故障诊断存在上述各种特点和困难, 不可能将数字系统中所使用的测试方法移植到模拟系统中来, 必须根据模拟电路的自身特点探索有效的诊断理论和方法。70 年代以来, 世界上已发表的有关研究论文达千篇以上, 但主要解决的是线性网络在无容差或小容差情况下的诊断理论和方法。此外, 近年来在非线性问题上也取得一些长足的进展, 不过与实际使用尚有一定的距离, 至今还没有一个完善而成熟的系统或软件可付诸广泛使用。

三、模拟电路故障诊断的展望

模拟电路故障诊断的研究在一个时期内没有取得突破性的进展, 但最近二三年来, 各国又重新投入相当的人力和精力致力于对它的研究, 其主要原因是:

1. 随着数字系统和 IC 的集成度不断提高及运行速度的迅速提高, 脉冲的上升边沿和下降边沿不再可忽视。它的参数直接影响到数字系统和 IC 的工作状态。而对这种边沿的测试问

题已不能采用传统的数字系统测试方法来解决,它已属于模拟信号的诊断范畴。

2. 尽管数字 IC 的发展迅速,但在一个完整的系统中,模拟电路不可能完全被替代,据统计,系统中模拟电路与数字电路的比例变化不大。因此一个系统中存在模拟电路与数字电路的混合结构的情况越来越多,甚至在一个印刷电路板或一个 IC 中也都具有模拟电路和数字电路的混合结构。此时不仅测试混合结构中的模拟电路需要模拟电路的测试理论和方法,而且在测试混合结构中的数字电路时也涉及到有关模拟电路的测试方法。

3. 超大规模模拟电路(Analog VLSI)的发展对模拟电路的测试提出了急迫的需求。这包括 VLSI 研制和生产过程中的三个阶段。首先在 IC 的实验研制阶段,为使实验样品满足预定的设计指标,需要对它作不断的修改和完善,则必须对样品作全面测试,以定位其中不合适的或不合格的“器件”,分析原因,改进工艺。其次在生产过程中,为了降低成本提高成品率,往往采取两个措施:一是加强中间测试,以及时淘汰不可能合格的半成品;二是在一个芯片上设置若干冗余的“器件”或“部件”,如果检测出一些“器件”是不合格的,则可以用冗余“器件”去替代它们。例如在一个用模拟电路组成的人工神经网络中,其节点数(不是一般网络中的节点含义,而是指运算器)是很多的,如果其中一个节点损坏即为废品,则成品率太低了。采用上述补救方法显然可大幅度提高成品率。可以看出,实施这个方案的关键技术之一就是模拟器件或功能模块的测试。最后一个阶段是 IC 的成品测试,由于现在有些模拟 IC 是超大规模的,测试的参数相当多,依赖常规的设计和测试设备是难以胜任的,不仅测试速度低,而且有的参数不易测。因此需要研究新的测试方法和 IC 的可测性设计问题。换句话说,要发展模拟电路的 VLSI,模拟系统的测试和诊断是其不可回避的课题。

4. 随着电子工业的发展,电子设备的复杂性越来越高,且其中的模拟器件和电路不可缺少(多数故障也出现在模拟器件上),对这种设备的维修和保养十分复杂,耗费精力财力,但却是为保证系统正常运行不可缺少的。据用户反映,对这类设备的维修和保养所投入的经费已超过了原先购置这些设备的投资。因此在工业部门,尤其是军事工业部门,对这种复杂设备的维修已提出了十分迫切的要求,需要增加故障诊断与故障预报的附加设备,以减轻维修人员的压力,进一步提高可靠性,降低维修和保养的费用。

综上所述,工业生产对模拟电路提出了新的更高的要求,微电子技术的迅猛发展对模拟电路的测试和诊断也提出了急迫的需求,这就迫使科技人员进一步探索新的测试理论和方法,研制新的测试设备以适应社会的需求。可以预见,在今后的五至十年之中,世界上对模拟电路的测试和故障诊断的研究会有很大的发展。

§ 1.2 模拟电路测试与故障诊断方法的分类

一、故障的分类

在模拟电路中,故障可分为两大类:一类称为硬故障,指元件的断路和短路失效故障;另一类称为软故障,指元件的参数超出预定的容差范围,一般它们均未使设备完全失效,例如,由于元件的老化、变质或使用环境的变化等造成的元件参数变化。

严格地说,网络中元件产生硬故障已改变了网络的拓扑结构,但在模拟电路故障诊断中仍将它们看成是元件(支路)的故障。电路中发生硬故障,经常导致系统严重失效,甚至完全瘫痪,而发生软故障一般仅引起系统性能的异常或恶化,因此对硬故障的检测与诊断比软故障要容易些。可诊断软故障的方法一般也可诊断硬故障,因为硬故障可看成是软故障的一个特例。

按电路中存在的故障数来区分,可将故障分为单故障和多故障。据统计,在实际应用中,电子设备发生单故障的概率是故障总数的70~80%,而且一些多故障往往又是相互联系的,因此有时也可当作单故障处理。例如一支晶体三极管是一个三端口网络,其主要参数是输入电阻 r_{BE} 和电流增益 β ,如果一个三极管BE结击穿。则 r_{BE} 和 β 两个参数均异常,在故障诊断中常作为两个故障处理,而事实上此时只有一个元件故障,因此不必区分是 r_{BE} 故障,还是 β 故障,二者作为一个故障处理即可满足实际要求。

二、模拟电路测试的主要任务

一般地说,模拟电路测试(Test)应完成下述三个方面的工作:

1. 故障检测(Fault Detection)

根据所采集到的数据以及已知的电路结构与标称参数,判断电路是否存在故障。但故障检测不能确定故障元件的位置和参数。相对而言,故障检测比较容易,它主要用于产品的检验。

2. 故障辨识(Fault Identification)

在已检测到电路存在故障的前提下,确定存在的故障总数,各故障元件在电路中的物理位置(Fault Location),如果需要的话,还可进一步确定或估计故障元件的有关参数(Fault Evaluation)。对故障辨识的要求是准确而唯一,这也是目前故障诊断中的主要任务。因此对它的研究最多,但困难也最大。故障辨识也常称为故障诊断(Fault Diagnosis)。

3. 故障预报(Fault Forecast)

为进一步提高系统的可靠性和利用率,最好在系统发生故障前即能预报出将发生故障的元件,以便提前更换或作其它处理,避免系统产生更大的事故,确保系统长期正常运行。为了实现故障预报,需要对被测系统作连续监测,从所取得的现场数据上搜索到异常信号,从中分析和预报即将可能发生故障的元件。其中一个重要问题是要尽量延长系统中的每个元件或部件的生命周期,即尽量减少误报,且不要过早地替换可能有故障的元件(如一个元件的偶发故障不应视为永久故障而被替换)。

三、故障诊断方法的分类

根据不同的分类依据,故障诊断方法有多种不同的分类方式。如按故障诊断的环境区分,可分为在线诊断(On-line Diagnosis)和离线诊断(Off-line Diagnosis)两种。在线诊断时不中断生产线或测试线的运行,因此有时也称为实时诊断;其它方式的诊断均称为离线诊断。一般在线诊断要求快速,但定位的区域较大,离线诊断要求定位区域较小(如元件级或模块级),并且故障位置应该具有唯一性。

现在对模拟电路故障诊断方法的分类常依据电路的仿真是在实际测试的先或后。如果对电路的仿真是在现场测试之前实施,则称为测前模拟诊断(Simulation Before Test Approach);电路的仿真于现场测试之后实施,则称为测后模拟诊断(Simulation After Test Approach)。故障诊断的主要计算工作量多集中在对电路作仿真,因此测前(后)模拟诊断的工作量集中在现场测试之前(后)。显见测前模拟诊断更易于作实时诊断。

测前模拟诊断的典型方法是故障字典法(Fault Dictionary),它是目前模拟电路故障诊断中最具有实用价值的方法,它的基本思想与数字系统的故障诊断相似,即预先根据经验或实际需要,确定所要诊断的故障集,然后求电路存在故障集中的一个故障时的响应(即作电路仿真),求响应的方法既可以在计算机上仿真,也可以在实际电路上仿真。然后将所得到的响应(通常是端口电压向量)作必要的处理(如响应压缩、编码等),作为对应故障的特征,将它们编纂成一部故障与特征对应的字典(希望每个故障与一个特征一一对应。但有时做不到这一点,

有时也没有必要)。在利用这部字典作实际电路的诊断时,对被测电路施加与测前模拟时完全一样的激励和工作条件,取得相应的特征,最后在故障字典中查得与此特征对应的故障。如果字典中每个故障对应的特征都是不相同的,则所查到的故障一定是唯一的。如果在字典中查不到与此特征对应的故障,则电路可能发生了编纂字典时未收录的故障。考虑到测前模拟的现实工作量和字典容量的限度,字典法故障诊断只作硬故障的诊断,对于少量软故障也是转化成硬故障的形式处理。

由于模拟电路中元件的故障参数常是一个连续量,测量响应的数据引入误差是不可避免的。最困难的是各元件都有一定的容差,因此利用字典法即使作硬故障的诊断,其效果也不如数字系统中的字典法诊断。一般地说,字典法只能解决单故障诊断,因为多故障的组合数太大,在实际使用中几乎不可能实现对多故障的诊断。

根据激励源性质和所取特征量的差异,字典法还可分为直流故障字典(特征是测试端口的直流电压向量)、交流(频域)故障字典(特征是测试端口的频率响应)和时域故障字典(特征是测试端口信号的时域特征)。

测后模拟诊断的典型方法主要有元件参数辨识法和故障验证法。前者要求提供较多的诊断用信息,而后者是在电路中仅存在有限个故障假设的前提下作诊断(这在一般使用场合是允许的),因此可以在仅获得少量供诊断用的信息条件下作诊断(例如测试端口较少,测试次数也较少等)。

元件参数辨识事实上是系统参数估计,它是在取得足够的独立数据后,根据网络的结构去估计或求解网络中每个元件的参数。如果一个元件参数超出预先所确定的容差范围,则认为它是一个故障元件。因此只有在解得网络中所有元件的参数之后,才能断定网络中有多少个元件故障,哪些元件存在故障。由于一般网络所包含的元件(模块)数较大,标志这些元件特性的参数量,即方程中的未知量是很多的。欲求出这些未知量所需的方程数目也是很大的(独立方程数至少不少于未知数个数),而且这些方程多数是非线性方程,所以求解这些方程是一件艰巨的工作,通常需要用大型计算机来完成。此外由于这些工作都是在测试后进行的,所以作实时诊断是很困难的。虽然现在已有一些成熟的方法将其中的非线性方程转换成线性方程,但由于同时增加了许多中间变量,方程个数也有相应的增加,所以总的计算工作量仍是相当可观的。

故障验证法是在获取“不完整”的有限故障信息的基础上作诊断,实施比较方便,且具有较好的实用前景,因此引起许多学者的兴趣,所取得的研究成果也比较多。

故障验证法的基本思想是:预先猜测电路中的故障所在,然后根据所测数据去验证这种猜测是否正确(吻合),如果二者吻合,则认为猜测正确,故障定位工作结束。由于电路中总的故障种数较大,而各种故障的组合数则更大,因此这种“猜测”的次数是非常大的,而且每次对猜测的验证都需要大量的计算(随电路规模增大而以指数形式增加)。因此对这种方法的研究主要集中在如何减少猜测的次数,以及减少对每次猜测作验证所需要的工作量。

根据预猜故障的范围,故障验证法可分为K故障诊断、故障定界诊断和网络撕裂法等。K故障诊断的预猜对象是故障元件的集合(即其中不含无故障元件)。而故障定界诊断的预猜对象是:故障元件在其中哪一个子集中(网络所有元件的集合总是只分为两个子集),即哪个子集中包含所有故障元件和部分无故障元件。网络撕裂法的预猜对象是:故障元件在网络元件集的哪些子集中(网络逐渐撕裂成若干子集,而这些子集在网络拓扑结构上可按切块方式取得)。由于网络撕裂法逐渐将网络撕裂成若干子块,因此对每次猜测的验证工作量可逐渐减少,所以总的计算工作量较少。

由于故障验证法诊断所依据的故障信息较少,因此其中一个比较突出的问题是故障的可诊断性问题,即网络的可测性问题。上述三种方法虽各自定义了自己的可测性条件,但在本质上都是一致的:即被测网络的拓扑结构应满足一定的约束条件,施加的独立激励向量应有足够的数量,可及点(可测电压的节点)数必须充分(至少大于故障数),而且应该独立。对模拟电路可测性问题的研究取得的卓有成效的成果,为模拟电路的设计和测试提供了有力的依据。

除了上面叙述的各种常见的方法外,目前还有逼近法(Approximation Method)和人工智能(专家系统)两种方法,它们都介于测前模拟诊断和测后模拟诊断之间。逼近法包括测前模拟中的概率统计方法和测后模拟中的优化方法。专家系统包括类似字典法中的故障特征的收集和过程,以及测后模拟中的故障推理搜索等过程。由于网络分析理论已十分成熟,人们对其认识已经非常充分,因此获取故障的信息不必完全依赖维修“专家”,可以仿照故障字典法建立故障字典的过程来获取知识,建立专家系统中的关键部件——知识库。因此利用专家系统实现模拟电路的故障诊断是有实际意义的。

需要指出的一点是,上述各种方法都基于网络理论,因此称故障诊断是网络理论的第三大分支。现在还有一些不属网络理论的诊断方法,比较典型的是红外成像诊断法。红外成像诊断的基本思路是:当一个元件的参数发生变化时,元件上的电压和电流必有变化,导致它消耗的功率和其表面温度产生变化。如果对一个集成器件的“内脏”或印刷电路板(PCB)作红外摄像,通过计算机处理,寻找到温度有显著差异(与无故障器件或PCB比较)的元件,即可定位故障元件的位置。由于现代的红外摄像仪的灵敏度相当高(0.1°C 以下),且已有商品出售,所以它不失为一种具有实用意义的方法,在一些部门已经采用。其不足之处是投资较高(10万美金),部分故障不可测(如电容短路等)。

§ 1.3 本书内容及使用

本书主要为读者介绍模拟电路故障诊断的进展过程和发展趋向,对目前已有的理论和方法作系统的小结,为模拟电路故障诊断研究提供一个基础。此外还介绍了模拟电路的可靠性设计和模拟电路的自动测试设备。

书中第二章介绍两种字典法诊断的原理,主要叙述字典的构成、故障特征的处理等。第三章介绍网络参数辨识方法,叙述结构方程的构造、方程求解方法、可测性问题等。第四章介绍故障验证技术,叙述了K故障诊断(包括K节点故障诊断和K支路故障诊断)、故障定界法和网络撕裂法的基本原理及诊断方程的建立、可测性设计等,其中包括我们部分新的研究成果——快速K故障诊断。

本书第五章介绍专家系统在模拟电路中的应用。目前国内尚没有有关的成熟的软件,但在国外已有一些专用的系统使用。书中除简单介绍专家系统的一般构成以外,主要介绍利用专家系统作模拟电路故障诊断时的特殊问题。

上述这些方法或多或少存在着一些技术问题,目前还没有得到广泛的实际应用,因此读者应着重理解模拟电路故障诊断的基本概念,各种方法的基本思想和实现的主要思路,了解各种方法的优缺点和各自的适用场合。

第六章介绍模拟系统的可靠性设计,针对模拟电路实施冗余结构中的主要困难——输入和输出接口设计,提出了常见的解决方法。为保持全书的完整性,对可靠性的概念作了十分粗略的介绍。

第七章介绍模拟系统自动测试设备(ATE——Automatic Test Equipment)的结构、原理和指标。考虑到我国已进口大量的模拟电路内测试仪(In-Circuit Test Equipment),且其中有一部分因一些技术问题而闲置,因此专用一节详细介绍它的原理和编程方法。

为便于读者自学和理解,全书引入了较多的例子,并编写和收集了习题,给出了多数习题的答案。

由于模拟电路故障诊断属于一个边缘学科,所涉及的知识面较宽,要求读者在学习本书前掌握网络分析原理、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、线性代数理论、图论知识、概率统计技术等有关知识。

本书的主要内容作为我校自动化系硕士研究生学位课程迄今为止已讲述过五次,根据我们的实践,讲授全书内容约需40学时(每学时以50分钟计),具体分配建议如下:

第一章 绪论	2学时
第二章 故障字典法	6~7学时
第三章 故障参数识别法	4~6学时
第四章 验证法故障诊断	8~10学时
第五章 专家系统及其在模拟电路故障诊断中的应用	4学时
第六章 模拟系统的可靠性设计	8学时
第七章 自动测试设备	4~5学时

习 题

1.1 非线性网络及求解网络参数的非线性问题中的“非线性”的含义各是什么?二者有何联系?

1.2 在图1.1.1所示网络中,作二次测量得

$$V_1^{(1)} = 5V, \quad V_2^{(1)} = 0V, \quad I_1^{(1)} = 3mA, \quad I_2^{(1)} = -2mA$$

$$V_1^{(2)} = 0V, \quad V_2^{(2)} = 5V, \quad I_1^{(2)} = -2mA, \quad I_2^{(2)} = 8mA$$

试求参数 $G_1 \sim G_4$ 的关系,并判断能否确定它们的值。如能确定则求出它们的值,如不能确定则说明理由。

1.3 现有下述三个信号:

$$A_1 = 6\sin(\omega t + \phi)$$

$$A_2 = 3\sin(\omega t + \phi)$$

$$A_3 = 4.5\sin(\omega t + \phi + 90^\circ)$$

试设计一个电路,要求能在任意时刻输出 $A_1 \sim A_3$ 的中值,并画出所取出信号的波形。

1.4 试述模拟电路故障诊断比数字电路故障诊断更困难的原因。你在实际工作中有何体会?

参 考 文 献

[1] J. W. Bandler and A. E. Salama, Fault Diagnosis of Analog Circuits, Proc. IEEE, Vol. 73, No. 8, 1985, pp1279—1327.

[2] R. W. Liu, Testing and Diagnosis of Analog Circuits and System, Van Nostrand Reinhold, 1991.

- [3] R. W. Liu, Analog Fault Diagnosis, IEEE Press, 1987.
- [4] T. Ozawa, Analog Method for Computer-Aided Circuit Analysis and Diagnosis, Marcel Dekker, New York. 1987.
- [5] 唐人亨, 模拟电子系统的自动故障诊断, 高等教育出版社, 1991.
- [6] 赵国南、郭裕顺, 模拟电路故障诊断, 哈尔滨工业大学出版社, 1991.
- [7] 周玉芬、高锡俊, 模拟电路故障诊断, 国防工业出版社, 1989.
- [8] 杨士元, 数字系统的故障诊断与可靠性设计, 清华大学出版社, 1989.

第二章 故障字典法

故障字典法诊断故障的基本思想是：首先提取电路(系统)在各种故障状态下的电路特征(如测试点的直流电位向量、网络的幅频特性等)，然后将特征与故障的一一对应关系列成一个字典。在实际诊断时，只要获取电路(系统)的实时特征，就可以从故障字典中查出此时对应的故障。

利用字典法作故障诊断的关键步骤是建立故障字典，一般说来，它的工作量是很大的。考虑到在实际的模拟电路中，硬故障占的比例相当大，因此通常字典中只包括硬故障，即只作硬故障诊断。除此之外，字典中往往只列出单故障，如果考虑多故障，则因多故障的状态数很大，而加大了计算机用以存储字典的内存容量，更重要的是为获取各多故障的特征需要作超量的计算，这至少在目前计算机的发展水平下是不现实的。一种比较现实和折衷的方案是，根据被测电路的特点和以往的经验，有目的地去选择一批有价值的单故障和多故障(如易发生故障的有源元件，滤波器中确定滤波参数的核心元件等)，即在实际诊断时仅在所选择的故障范围内作诊断。

本章除讨论字典法故障诊断的基本方法外，主要讨论如何在建立故障字典时减少计算工作量，如何优化故障特征等问题。另外还要叙述将故障特征编译成故障代码的方法，以便在实际诊断时可更快地“查阅”到对应的故障。

按照故障特征，可以将故障字典主要分为两大类，一类是直流故障字典，它的故障特征是电路的直流工作点(一般仅取节点的直流电位)的偏移；另一类是交流故障字典，它的故障特征是电路幅频(或相频)特性的转折点的移动。

目前已有不少比较成熟的软件包，可对电路(线性或非线性电路)作静态和动态分析，因此字典法不仅对线性电路适用，同时对非线性电路也适用。

§ 2.1 直流故障字典法

2.1.1 字典的建立和测后分析

一、建立字典

建立字典的过程，实际上是测试前的分析过程，它主要完成故障集的选择，激励信号的选择，故障特征模糊域的分割和隔离，故障特征码的生成等工作^[1]。

1. 故障集的选择

选择故障集实际上是确定可诊断的故障集。一般都只考虑电路中的元件硬故障(即元件开路或短路)，而不考虑电路中的引线故障。由于电路中的元件数较多，多故障的组合数很大，因此罗列所有多故障作为故障集是不现实的。比较实际的方案是根据被测电路的特点和以往的经验及元件故障概率来选择若干单故障和多个故障作为故障集。当然这种做法不能保证电路中的所有元件故障可测，但在实际工程问题中是允许的。

2. 激励信号的选择

通常采用与实际工作相似的输入信号作为激励信号。为了充分隔离故障集中的所有(或极

大部分)故障,经常需要多种输入信号的组合信号,甚至还需要另选一些实际工作过程中没有的组合信号作为激励。至今还没有一种选择输入激励信号的通用方法和程序,通常需要根据经验或通过对电路作灵敏度分析,逐步试探得到能隔离故障集中所有故障的激励信号。故障隔离是指用测试向量能够区分故障集中各个故障,经常采用下述判据来检验:

$$\sum_{k=1}^n [V_k(NOR) - V_k(F_i)]^2 \geq 0.5n \quad (2.1.1)$$

其中 $V_k(NOR)$ 是节点 k 的正常电压, $V_k(F_i)$ 是电路中存在故障 F_i 时节点 k 的电压, n 是测试节点数。

显见,如果电路中存在故障 F_i ,每个测试节点电压偏离正常值都超过 $0.7V$ 时,式(2.1.1)必满足。反之,如果式(2.1.1)满足,则表明存在故障 F_i 时,至少有一个测试节点电位偏离正常值超过 $0.7V$ 。这里之所以取 $0.7V$ 作为一个阈值,是考虑到一般电路中都存在二极管和三极管,它们的 PN 结发生硬故障时产生的电压偏离经常是在 $0.7V$ 左右(硅管)。

3. 测试节点的选择

测试节点选择的基本准则是:在故障集中故障均可隔离的前提下,使可测点数目最少。由于习惯上将对网络作一次激励时在各可及端测得的 n 个电压值列成一个 n 维列向量,因此也可看作尽可能选择维数最低的测试向量(即特征)来区分(隔离)故障集中的所有故障。实际的做法是根据以往的经验选择可获得故障信息量最多的节点(或者多选取一些节点),先将故障集中的故障予以隔离,然后再在仍保证故障可隔离的前提下优选出较佳(即尽可能少)的节点作为实际使用的测试节点。关于优选节点的方法在 2.1.3 节还要详细叙述。

4. 模糊集的分割

在确定故障集、激励信号和测试节点后,可以通过现有的各种模拟电路直流分析程序(如常用的 SPICE 程序)仿真计算出电路在每一个故障状态下的测试向量(无故障元件参数选用标称参数)。如果对每一个故障都满足式(2.1.1),则故障集中的故障都是可隔离的。

考虑到实际网络中元件参数具有容差,此时会造成下述两种情况:

① 电路在无故障状态下,测试向量中的各元素(即各测试点电位)不是一个确定的值,而是一个连续的小区间,甚至某些元素值落在某种故障状态下的对应区间内。换句话说,如果仅分析一个测试点的测试值,有可能将一个具有容差的无故障电路判为故障电路。反之,也有可能将一个存在故障的电路判为正常的电路。

② 对于每个故障状态,其测试向量中的每个元素值也是一个连续的区间,因为在计算时除故障元件外的所有元件的参数也都是有容差的。如果在两种不同故障状态下,测试向量中的元素值有交叉重叠的区间,则可能这两个故障不可区分(隔离)。

鉴于上述原因,式(2.1.1)中的 $V_k(NOR)$ 和 $V_k(F_i)$ 都不是一个点,而是一个小区间,因此事实上无法通过式(2.1.1)作计算。为解决这个问题,将每个测试向量中的每个元素的值划分为若干区域,每个区域的中心值为若干相邻元素值的平均值,然后从中心值向左右各扩展 $0.7V$,构成一个测试值区间,该区间称为一个模糊域。凡值落在这个区间内(模糊域)的元素构成一个模糊集。

例如,设一个电路有两个测试节点,在正常状态(NOR)及六种不同故障状态($F_1 \sim F_6$)下经仿真计算得到如表 2.1.1 所示的测试向量。为直观起见,将表 2.2.1 的特征向量的每个元素画成图 2.1.1 所示的数轴图。

表 2.1.1 测试向量

测试点 \ 故障	NOR	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
V_1	5.5*	9.0	6.8	6.4	6.6	5.1	2.0
V_2	4.0	8.0	5.0	5.2	7.8	7.6	3.0

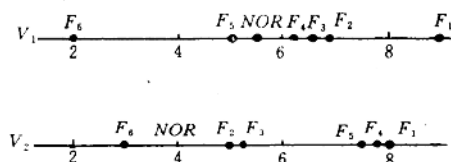


图 2.1.1 模糊域的划分

由图 2.1.1 可看出,在 V_1 处可划分为 4 个区间(即 4 个模糊域),而在 V_2 处可划分为 3 个模糊域,各模糊域的中心值及范围见表 2.1.2。

表 2.1.2 模糊域的中心值及范围

测试点 \ 中心值	1	2	3	4
V_1	$2.0 \pm 0.7 \text{ V}$	$5.3 \pm 0.7 \text{ V}$	$6.6 \pm 0.7 \text{ V}$	$9.0 \pm 0.7 \text{ V}$
V_2	$3.5 \pm 0.7 \text{ V}$	$5.1 \pm 0.7 \text{ V}$	$7.8 \pm 0.7 \text{ V}$	

划分模糊域的基本准则是:使相邻模糊域不产生交叉重叠。如果两个模糊域产生轻微的交叉,则这两个模糊域的边界均应各自向里收缩一些,并保证两个模糊域的边界值至少应有 $0.1 \sim 0.2 \text{ V}$ 的间隙。在某些场合,也可适当放宽若干模糊域的范围。

例如,在表 2.1.2 中 V_1 的第 2 和第 3 个模糊域分别为 $4.6 \sim 6.0$, $5.9 \sim 7.3$,这样划分是不合理的,因为前者与后者有 0.2 V 的重叠,此时应作调整,即分别为 $4.6 \sim 5.9$, $6.0 \sim 7.3$ 。

根据表 2.1.2 可将 6 种故障状态和正常状态划分为表 2.1.3 所示的模糊集,即利用测试点 V_1 和 V_2 可将电路的 7 种状态分割成 7 个模糊集。

表 2.1.3 模糊集的分割

节点	模糊集序号	模糊集	节点	模糊集序号	模糊集
1	1	F_6	2	1	NOR, F_6
1	2	NOR, F_5	2	2	F_2, F_3
1	3	F_2, F_3, F_4	2	3	F_1, F_4, F_5
1	4	F_1			

5. 故障的隔离

在对电路各种状态下的测试向量作模糊域划分之后,可将这些状态分割成若干模糊集。因

* 本书中未标注的电路参数单位为:电压 V,电流 A,导纳 S,电阻 Ω ,电容 μF ,角频率 rad/s 。