

高等学校教材

模拟电路故障诊断

赵国南 郭裕顺 编著

哈尔滨工业大学出版社

7N481.1

二 32

337647

模拟电路故障诊断

赵 国 南 编 著
郭 裕 顺

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍在为数很少的可及端口测试条件下，借助计算机对模拟集成电路进行故障诊断的原理及方法，重点放在故障字典法、元件参数解法、故障预猜验证法以及逼近法（或然法）上。最后一章对上述各种方法进行了比较，指出了它们各自应用情况，并探讨了模拟数字混合电路的故障诊断方法，展望了新技术在故障诊断中的远景及集成电路的可测试性设计。

本书可作为高等工科院校电类专业本科高年级学生和研究生 的教材或教学参考书，也可供有关的工程技术人员参考。

模拟电路故障诊断

赵国南

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.125 字数 134 000
1991 年 11 月 第 1 版 1991 年 11 月 第 1 次印刷

*

印数 1—2 000

ISBN 7-5603-0232-7/TN·17 定价 1.75 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属电子类专业方面的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和学生积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由高等学校电子类无线电教材编审委员会电路及系统编审小组征稿，并评选择优推荐出版，责任编辑委为东南大学沈永朝。

本教材由杭州电子工业学院赵国南、郭裕顺一同编著，南京邮电学院郭祥沅担任主审。

本课程的参考学时数为20~30学时，其主要内容包括：在为数很少的可及端口测试条件下，借助于计算机对模拟电路进行故障诊断的原理和方法。这些方法是故障字典法、元件参数解法、故障预猜验证法以及逼近法（或然法）等。最后一章对前述的各种诊断方法进行了比较，指出其各自的适用场合和优劣，同时对模拟-数字混合电路的故障诊断进行了探讨，并对新技术在故障诊断中的应用进行了展望。

模拟电路的故障诊断方法具有很大的实用价值。在实际工作中，故障是不可避免的，但如何尽早地发现故障并及时排除故障却是摆在工程技术人员面前且时时困扰他们的难题。本书作者针对上述问题，通过多年的潜心研究和反复实践，分析了大量国内外有关“诊断”的理论及最新成果，编写成了此书。本书的出版，希望能对我国的“故障诊断”理论的研究起到推动作用，对我国的生产实际起到指导作用。

由于作者水平有限，书中难免还存在一些缺点和疏误，殷切希望广大读者批评指正。

赵国南

1989年10月

II

目 录

第一章 引论	(1)
§1.1 模拟电路故障诊断概述	(1)
§1.2 故障诊断是网络理论的一个重要分支	(3)
§1.3 模拟电路故障诊断方法的分类	(5)
第二章 故障字典法	(10)
§2.1 直流域中字典的建立	(11)
§2.2 频域中字典的建立	(21)
§2.3 时域中字典的建立	(29)
§2.4 故障的识别与分辨	(34)
§2.5 故障拟似方法	(37)
习题	(49)
第三章 元件参数解法	(51)
§3.1 元件参数解法的故障诊断方程概述	(51)
§3.2 通过网络函数建立故障诊断方程	(56)
§3.3 求解电阻网络元件参数的一个算法	(66)
§3.4 引入辅助未知量的元件参数解法	(70)
§3.5 网络等效变换法	(79)
§3.6 获得线性诊断方程的条件	(85)
§3.7 非线性电路的元件参数解法	(89)
习题	(97)
第四章 故障的预猜验证法	(99)

§4.1	符号网络函数法	(101)
§4.2	节点故障诊断法	(105)
§4.3	支路故障诊断法	(112)
§4.4	故障元件的可诊断性	(116)
§4.5	故障划界诊断法	(123)
§4.6	网络分解诊断法	(128)
§4.7	容差问题	(134)
	习题	(141)
第五章	逼近法	(143)
§5.1	逆概率法	(143)
§5.2	最小二乘方优化法	(146)
§5.3	线性优化法	(148)
	习题	(151)
第六章	模拟电路故障诊断的现状与发展趋势	(152)
§6.1	各种诊断方法的比较	(152)
§6.2	可测性量度及可测性判据	(158)
§6.3	模拟-数字混合电路的故障诊断——模拟 电路故障诊断的一种延拓	(160)
§6.4	结论及展望	(171)
	参考文献	(173)

第一章 引 论

§1.1 模拟电路故障诊断概述〔1〕~〔5〕

众所周知，故障诊断历来是一个十分重要的课题。在电子系统中，尤其是在以集成电路为核心的现代微电子系统中，由于系统的规模越来越庞大，性能和构造也更加完善、复杂，系统中任何一个元器件的故障都有可能导致整个系统的失灵。特别是对于某些安全保卫装备、宇航及星际电子设备，在十分特殊的环境下必须保证系统正常工作。因此，在设计、生产、运用这些系统的各个过程中，都必须周密研究系统的各部分的可测性和可诊断性，以便及时修理维护。修理和维护的前提便是故障诊断。

故障诊断是一项十分复杂困难的工作。虽然电子系统的故障诊断问题几乎与电子技术本身同步发展，可是诊断的发展速度似乎要缓慢得多。在早期的诊断技术中，电子系统的故障诊断基本上还是沿用传统方式，即依靠一些测试仪表，按照跟踪信号逐点寻迹的思路，借助人们的逻辑判断来侦查系统中的故障所在。这种诊断技术在很大程度上与维修人员的实践经验与专业水平密切相关，而且也没有一套可遵循的、科学的、成熟的办法。

现代微电子系统内部存在着**不可及性**(inaccessibility)。对于这样的系统，诊断可凭藉的就是为数很少的可及端口，

所以，我们只能从该系统的外部特性来侦查其内部故障，也就是依赖端口测试进行诊断。这种诊断，存在着可测性问题，集成电路的诊断就是一个典型的例子。

事实上，即使系统内部的各处都是可及的，要对规模庞大的现代系统逐点进行测试以诊断故障，也是相当费时的，而且极易出错。

随着微电子工业的发展，人们逐渐认识到，对故障诊断问题有必要重新研究，必须把以往的经验提升到理论的高度，同时在坚实的理论基础上，系统地发展和完备一整套严密的近代故障诊断方法，并结合先进的计算机数据处理技术，实现故障诊断的自动检测、定位、定值以及预报[6~7]。

自50年代末、60年代初以来，人们对故障诊断的自动化问题进行了一系列的探索。目前，数字电路的故障诊断已经取得了比较满意的结果，出现了大量有效的诊断及测试生成算法，并已有了一些商品程序可供实际使用。然而，模拟电路故障诊断的发展并不理想，尽管它起步较早，但直至70年代末才在理论上取得了一些可喜的成果，可是距实际应用尚有不小距离。造成这种现象的原因大致有以下几个方面：

1. 模拟电路的故障现象往往十分复杂，任何一个元件的参数变值超过其容差时就属故障，因此模拟电路的故障状态是无限的，故障特性是连续的。而在数字电路中，一个门的状态一般只有两种可能，即1或0，所以，故障特性是离散的，整个系统的故障状态是有限的，便于处理。

2. 模拟电路的输入-输出关系比较复杂，即使是线性电路，其输出响应与各个元件参量之间的关系也往往是非线性的，更何况许多实际电路中还存在着非线性元件。而在数字电路中，只需用一幅真值表或状态转换图就足以清楚地描

述它的输入-输出特性。

3. 虽然模拟电路中非故障元件的参数标称值（设计值）是已知的，但一个具体电路的实际值会在其标称值上下作随机性的变动，一般并不正好等于其标称值。另外，模拟电路中特有的一些复杂因素，诸如元件非线性表征误差、测试误差等等，也会给诊断带来很大困难。所有这些原因，均使得模拟电路的故障诊断比数字电路的故障诊断困难得多。

目前的电子设备中，模拟电路仍占相当比重，而且模拟电路的故障问题较多又特别复杂，但不断发展的计算机辅助测试技术为此问题的解决提供了客观可能。现有的自动测试设备（ATE）可以在微机控制下十分迅速地对待诊断电路进行各种测试，使我们能方便地获得诊断所需的大量精确数据。同时，近代网络理论也为故障诊断准备了深厚的理论基础，故障诊断也成为网络理论的一个重要分支。

§1.2 故障诊断是网络理论的一个重要分支^{[8]~[10]}

以往人们都认为网络理论具有两大分支，即网络分析和网络综合（或网络合成），分别示于图1.2.1中的前两栏。

在**网络分析**中，已知量是激励信号及网络本身，包括网络的拓扑及其元件的性质和数值，求解的未知量是响应。求解方法可以是解析的，也可以是数值的。而其解通常应该是唯一的。应用计算机求解时，常简写为**CAA**。

在**网络综合**中，已知量是激励信号和响应结果，求解的未知量是网络本身，包括网络拓扑及其元件。求解方法通常采用逼近理论或优化设计。而其解通常不唯一，一般也不要

求唯一。应用计算机求解时，常简写为**CAD**。

随着网络理论不断发展，人们已开始认识到**网络诊断**是继网络分析和网络综合而后发展起来的网络理论的第三大分支。这是因为在网络诊断中，已知量除了通常的激励信号和部分输出响应外，还增加了网络拓扑及其各元件的性质，甚至还有部分元件的参量值，待求的未知量是其余一些元件的参量值及其位置。求解方法一般依赖于计算机辅助测试**CAT**，并要求其解是唯一的。“要求解唯一”这一条件是很不容易能满足的，但却是实际中必要的〔5〕。网络理论的三大分支如图1.2.1中表格所列。由图可见，在网络理论的

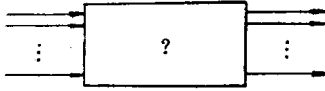
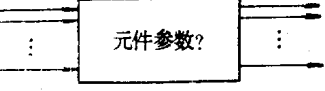
特征 分支	已知量	待求量	象 征 图	求解方法	解的唯一性
网络分析	激励和网络	响应		解析法数值法	通常唯一
网络综合	激励和响应	网络		逼近理论机助设计	不要求唯一
网络诊断	激励、部分响应、网络结构	未知元件的位置、参数		机助求解	要求唯一

图 1.2.1

各分支中，激励信号一般总是作为已知量的。在网络诊断中，激励信号原则上可以由人们任意选择，因此，不论是模拟电路还是数字电路，为了获得网络诊断的最佳效果，必须在作为已知量的激励信号中赋予必要的信息。对于数字电路的故障诊断，就有各种各样的测试生成，以便它产生的各种

脉冲列能充分识别故障，正确诊断。对于模拟电路的故障诊断来说，激励信号当然不仅限于直流信号，可以是不同频率的正弦信号（频域信号），也可以是具有不同幅度、波形的其它信号（时域信号）。

除了在已知的激励信号上我们可以赋予其必要的信息外，在其它已知量，如网络结构、部分输出响应及元件上，只能根据它们原有的实际情况，尽可能精确地提取它们客观存在的信息，而不可能也不允许任意赋予其信息。因此，还应该根据待诊断网络中原有的实际情况，研究激励信号具有什么样的特征，才能获得最佳的诊断效果〔4〕。

§1.3 模拟电路故障诊断方法的分类〔11〕~〔12〕

查明电路是否存在故障称作**故障检测** (fault detection)。发现故障后确定引起故障的原因及明确当前故障的状态称作**故障诊断** (fault diagnosis)。更确切地说，电路的故障诊断就是在电路所允许的条件下进行各种必要的测试，以决定引起电路性能不正常的故障元件的位置及该故障元件的参数值，前者简称**故障定位** (fault location)，后者简称**故障定值** (fault evaluation)。前后两者统称**故障辨识** (fault identification)。

故障诊断可分为**在线诊断** (on-line diagnosis) 及**离线诊断** (off-line diagnosis) 两个阶段。所谓在线诊断，是指不中断生产线或测试线上运行条件的诊断，其余便称离线诊断。相应地，我们也把诊断过程中的计算分为在线计算及离线计算两部分。

对于模拟电路，有许多种诊断方法。对于这些诊断方

法，可从不同的角度进行分类，具体可归纳为以下几种分类方法：从**诊断**是否仅仅限于故障检测、或进一步要求故障的定位或定值来分类；根据待诊断电路的复杂性（例如线性或非线性）来分类；根据诊断过程中能否充分保证测试条件来分类。目前文献中介绍的诊断方法大都是采用对被诊断电路进行现场测试之先于（或后于）电路拟似*（Circuit Simulation）的方法来分类。此法故分为下列两类：

测前拟似法 (simulation before test approach)

测后拟似法 (simulation after test approach)

这两类诊断法又可分为许多具体方法，如图1.3.1所示^{〔8〕}。

由图可见，测前拟似法中的主要方法是**故障字典法**。故障字典法在数字电路的故障诊断中是较为常用的一种方法。该方法的思路是预先拟似（这里的拟似，既可以是理论的，也可以是实验的，甚至是经验的。）出种种常见故障状态下的网络端口征兆，然后将这些端口征兆经过某种处理后编纂成一部字典，称作故障字典。诊断时就根据待诊断电路的现场测试结果，在字典中检索出相应的故障类型，因此，这种方法本质上是一种经验性的诊断方法。由于模拟电路中的故障现象十分复杂，需要考虑的因素很多（包括故障值的连续性和容差等问题），因此，用字典法诊断模拟电路的故障不如诊断数字电路有效。但它毕竟是在模拟电路故障诊断领域早期就已发展起来的一种主要方法，也确实能够解决不少实际问题，特别是那些对输入-输出特性难于深入进行解析分析的系统问题。人们对它做了大量改进工作，这将在第二章中介绍。

测后拟似法中的两类主要方法是：**元件参数解法和故障**

* (simulation) 也译作模拟或仿真，为避免混淆起见，本书用拟似。

模拟电路故障诊断方法的分类

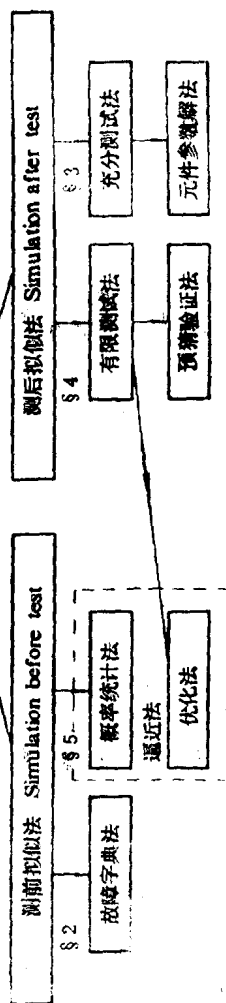


图 1.3.1

预猜验证法。其中元件参数解法是通过解析分析，直接从网络响应与元件参数值之间的关系中求解出元件的实际参数值，因此在测试条件充分的情况下，有可能不牵涉容差问题。但是，正因为它是通过解析分析直接从网络响应与元件参数值之间的关系中求解出元件的实际参数值，所以它只适用于故障元件的位置已明确的场合。在元件参数解法中，待诊断电路即使是线性的，其诊断方程通常也是非线性的，因此计算起来比较复杂，一般需要有较大容量的计算机。特别是当需要从非线性诊断方程中解出所有元件的参数值时，从可解性的条件出发，端口测试必需充分，这将在第三章中介绍^[13]。

故障预猜验证法一般用在测试条件较差的场合，即可及端口数较少的场合。该方法首先认为网络中存在的故障很少，而且假定非故障元件的实际值即为其标称值，这样就可预猜哪几个元件是故障元件。通常根据测试结果与故障元件拓扑之间的约束条件作为验证式来判别上述预猜是否正确，如此不断筛选，直至搜索到符合“验证式”要求的真实故障元件的位置（故障定位）后才进行故障定值。由此可见，故障预猜验证法所处理的故障元件，不仅其参数值是未知的，其位置也是未知的，这是本方法的一个十分重要的特点。但当电路的规模较大，且其中故障元件为数较多时，预猜验证法的筛选、搜索工作量较大，不过每一次验证所涉及的运算比较简单，而且对于线性电路通常其诊断方程可以是线性的，同时该方法中的不少运算工作可事先离线毕备，因此一般微机便可胜任该方法的计算任务。然而，由于容差的存在，非故障元件的实际值与标称值之间的偏差却往往并不很小，以致该法诊断效果不够理想。这将在第四章中讨论。

除了上述三种主要诊断方法以外，还有一类方法称作逼近法 (approximation method)。它实际上包括测后拟似法中的优化法与测前拟似法中的概率统计法两种。由于这两种方法所得的解都是或然的，因此也统称为近似法，这将在第五章中讨论。

上述各种方法各有其优缺点，其中测后拟似法中的元件参数解法较有发展前途，但需要进一步改进、探索。在实际诊断中，常把各种方法结合起来使用，根据实际场合的需要，取长补短，达到最佳诊断效果。目前，国内外许多学者正在总结数十年来所积累的丰富的故障侦查及维修经验，以期用人工智能等方法把各种诊断法综合应用。这些将在最后一章中讨论。

近年来，模拟-数字混合的专用集成电路层出不穷，迅速地研究开发这类电路的故障诊断方法的任务摆在了我们面前。由于这类电路的故障诊断还是属于模拟电路的故障诊断（可以认为是模拟电路故障诊断的延拓），因此放在最后一章一起论述。至于模拟电路及系统的可测性判据及模拟集成电路的可测试性设计，已成为当前开发模拟集成电路时降低生产成本、保证产品质量的关键问题，此内容将在最后一章扼要叙述。此外电子注探测技术近年来也已应用到集成电路的故障诊断上来，且卓有成效，其功能已远远超越电路意义上的故障诊断，但因成本昂贵操作复杂，尚待普及，可供重点实验室分析应用。

第二章 故障字典法

故障字典法，顾名思义，是把各种故障与其许多征兆之间的关系一一对照，并整理成字典形式的一种诊断方法。诊断时按测得的种种征兆在该字典中进行检索，并按某种判别准则确定最可能的故障状态。因此，应用任何一种故障字典法都包含以下三个步骤：

1. 明确故障的诊断范围：由于故障通常大都是元件参量的变异，而模拟电路中元件参量的变值是连续的，因此可以认为故障状态是无限多的，这显然不可能在一本篇幅有限的字典中完全罗列出来。为此，在着手编制一本故障字典之前，必须首先明确这本故障字典的诊断范围。通常总是根据元件的可靠性与以往维修工作中的经验，把最常遇到的一些故障作为一本字典的诊断范围。一本故障字典适用的对象一般只是某一特定设备或某一专门电路，而不是任一设备或任一电路。而且认为常见的故障大多是硬故障，即元件的断开或短路等，而很少是元件参量连续变值的软故障。

2. 辨明故障的征兆：每种故障都有其各种征兆。编纂一本故障字典时，首先必须把故障诊断范围内的每一种故障的种种征兆搜集整理在一起，再按便于查找、检索故障的某种方式进行编排。故障的征兆既可以用特定激励下的响应来体现，也可以用为了获得某一特定响应的激励来表达，有时候还需要用多种激励和其相应的多种响应来表征，以便区别