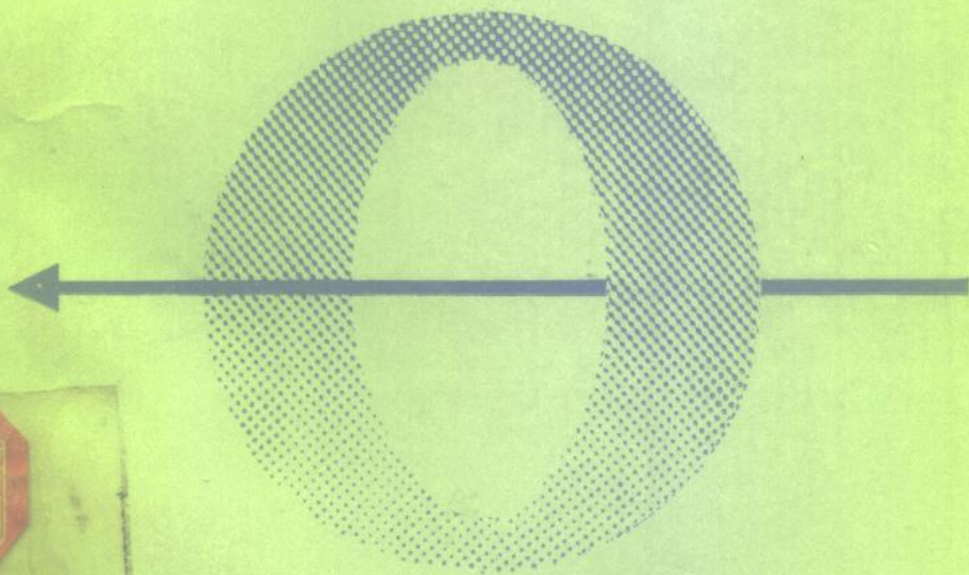


模拟电子系统的 自动故障诊断

唐人亨 编著

高等教育出版社



模拟电子系统的自动故障诊断

唐人亨 编著

高等教育出版社

D247/11

模拟电路的故障诊断是电路与系统学科中的一个重要领域。本书反映了在故障诊断方面的研究成果,在模拟电子系统更加复杂、计算机技术迅猛发展的今天,为模拟电子系统的自动故障诊断的发展提供了必要性和可能性。本书论述了模拟电路自动故障诊断的理论和方法,讨论了故障诊断的字典法、故障识别法、故障证实法和最优化近似法。在讨论每种方法的同时还附有一定的实例。在本书的最后两章讨论了故障诊断的应用和发展前景。

本书可供电子与通信类的本科生和研究生阅读,也可供有关的科研人员和工程技术人员参考。

(京)112号

模拟电子系统的自动故障诊断

唐人亨 编著

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

广东省河源县印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 6.25 字数 150 000

1991年9月第1版 1991年9月 第1次印刷

印数 0 001—1 230

ISBN7-04-001074-7/TN·92

定价 3.75 元

序 言

模拟电路的故障诊断起源于60年代，到了70年代，它已逐步形成了网络理论的一个新分支。进入80年代，它在理论上逐渐成熟，已成为电路与系统学科中的一个重要领域。现今，虽然各国科学家在这一学科的研究成果非常丰富，但具有系统性的专门著作还非常少，本书正是这方面的一次尝试。

本书要求读者具有电路理论的基础知识，并且有利用计算机进行运算和控制的能力。另外，还要求读者对矩阵理论有所了解。本书是入门性的教科书，因此，在编写中力求做到由浅入深，附有大量的例题。避免繁琐的数学推导，重视理论联系实际，以期通过本书能使读者了解模拟电路故障自动诊断的全貌及当代发展水平。在某些章节，本书还附有一定的习题。本书可作为研究生和大学高年级学生的选修课教材，约需40~60小时课程讲授时间。也可作为电子工程技术人员进修提高之用。

本书分成两部分：第一部分主要是理论基础，它包括字典法、故障识别法、故障证实法和最优化近似法。第二部分主要是实际问题，它包括模拟电路自动诊断系统、故障诊断的应用和故障诊断的前景。

杨鸿魁同志协助本书的编写，并提供第四章和第六章的素材。钱彭年教授审阅了初稿，蹇锡钧、杜丽冰副教授对本书提出许多修改意见，马燕生工程师在实验上给了大力支持。研究生金震、邓广华、谷良和胡天鹏等对本书的出版也做出了贡献。

本书是在国家自然科学基金(信85141项目)资助下完成的，它也是北京邮电学院模拟系统故障自动诊断科研组全体成员共同努力

力的结果。

本书的审订者，南京工学院鲍顺光副教授对本书初稿进行了详细审阅，并提出许多修订意见，特致深切谢意。

由于水平限制，错误在所难免，尚望广大读者指正。

编著者

1987.5.1

目 录

第一章 导言	1
§ 1.1 模拟电路故障诊断的进展	2
§ 1.2 模拟电路故障诊断概述	5
第二章 字典法	12
§ 2.1 字典的建立	12
2.1.1 直流法字典的建立	13
2.1.2 交流法字典的建立	20
§ 2.2 故障的隔离	25
§ 2.3 互补主元法故障仿真	31
§ 2.4 硬故障字典举例	39
第三章 故障识别法	46
§ 3.1 确定元件值的线性方法	46
3.1.1 元件仿真法	47
3.1.2 伴随网络法	55
§ 3.2 确定元件值的拟线性法	62
3.2.1 广义Y- Δ 变换法	62
3.2.2 转移导纳法	68
§ 3.3 确定元件值的非线性方法	75
3.3.1 牛顿-拉普森迭代	75
3.3.2 线性网络的多频测试	79
3.3.3 元件连接模型(CCM)	82
第四章 故障证实法	92
§ 4.1 补偿模型法	92

4.1.1	补偿模型	92
4.1.2	支路诊断法	94
4.1.3	节点诊断法	102
§ 4.2	自测试诊断法	106
§ 4.3	网络分块诊断法	112
第五章	最优化近似法	120
§ 5.1	最优化的基本概念	120
5.1.1	向量的范数	121
5.1.2	最小二乘法	122
§ 5.2	二次范数法(l_2 法)	126
§ 5.3	一次范数法(l_1 法)	130
§ 5.4	二次规划法	133
§ 5.5	参数容差处理的一种方法	138
第六章	模拟电路自动诊断系统	144
§ 6.1	自动测试系统概述	144
§ 6.2	通用接口GP-IB	146
§ 6.3	自动测试过程和测试程序	150
§ 6.4	自动故障诊断程序	152
§ 6.5	一个实验性自动诊断系统	155
第七章	故障诊断的应用	162
§ 7.1	通信设备的故障诊断	162
§ 7.2	中医疾病诊断	166
§ 7.3	流体传送中的故障诊断	170
§ 7.4	故障诊断在地质勘探中的应用	177
第八章	故障诊断的前景	180
§ 8.1	人工智能和专家系统	180
§ 8.2	故障诊断的专家系统	183
§ 8.3	整体诊断后援体系 IDSS	189

第一章 导 言

故障按通俗的说法就是“异常”，它是相对正常而言的。身体的疾病，机器的失效，电路的障碍……等一切不正常的现象，从广义说都是故障。故障破坏了事物的正常运动，干扰了系统工作的稳定性，它是事物在运动过程中存在的普遍现象，也是物质世界中不可抗拒的客观规律。

严格说，一切恶化功能、破坏稳定、有碍生存的运动统称为故障。它是在特定条件下，完成特定功能时发生的一类变异运动。它对特定系统的贡献是消极的，破坏性的，表现效果则是事故、失效、甚至灾祸^[1-1]。

故障过程是正常过程的外延与扩展，它可以用状态转移形式来说明。设计一项工程，生产一种设备，开发出一项产品就孕育成正常状态，见图 1.1。当系统机制发生变异，要素被破坏或环境受

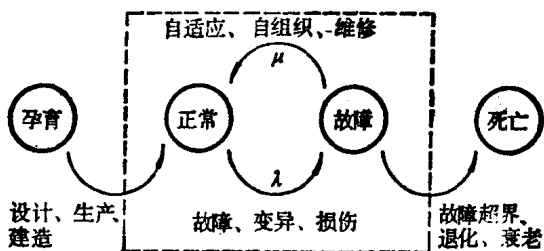


图 1.1 故障的状态转移

扰动，都将使正常状态以 λ 的故障率转化成故障状态。在故障状态下，通过修理或系统本身具有的自适应，自组织机能而使系统恢

复正常,即以 μ 的恢复率向正常状态转化。当系统退化、衰老,而使故障超过界限无法修复时,即进入死亡状态。人体的孕育和死亡也符合这种生灭理论。

机器设备也应该模拟人体的功能,即有良好的自适应环境变异的能力,有自修复、自组织的能力。应该降低故障率 λ , 提高修复率 μ , 才能使设备更加可靠,更加可信赖。

故障规律的研究可分以下三方面:

1. 故障的实践性 人们在与故障作斗争的过程中积累了丰富的经验,有各种各样分析故障的方法、对抗故障的措施。我们知道:实践是第一性的。

2. 故障的工程分析 即从感性提高到理性,总结各种故障的规律,以实现故障的预报、诊断和控制。

3. 故障的系统理论 即要把不同领域和系统中发生的故障机理概括起来,找出它们的共同规律,从系统工程的观点来考虑,甚至提高到哲学范畴来加以研究。

本书研究模拟电路的故障诊断,虽然从世界万物来看,它仅仅是一个专门的科学领域,但由各学科的内在联系和相互影响来看,它又不是孤立的。它的规律和哲理可以推广和应用到其他科学领域。

§ 1.1 模拟电路故障诊断的进展

模拟电路的故障诊断起源于 60 年代,最早发表这方面文章的是 S.D.Bedrosian^{[1.2]、[1.3]、[1.4]}。但它变成活跃的研究领域却是在 70 年代,P.Duhamel and J. C. Rault^[1.5]很好地总结了这个时期的研究成果。就是到了 80 年代,还不能讲故障诊断已达到成熟的阶段,J.W. Bandler and A.E. Salama^{[1.6]、[1.7]}曾对近年来各方面的进展作了比较详细的介绍。

虽然说至今世界上已发表的故障诊断的文献已达千篇左右,但总的说,进展还比较慢。在理论方面虽然已做了比较深入的探讨,但在实际方面还没有比较完整的、面向用户的电路故障诊断程序。因此,这里还有许多问题值得研究。

我国在模拟电路故障诊断方面的开发和研究是近十年来的事,发展比较迅速。从事这方面工作的除了高等院校外,还有科研单位,军事单位等部门。已发表的主要成果有:凌燮亭在有限故障数预测^[1.9]和非线性电路故障理论^[1.10]方面的成果;林争辉在故障诊断中提出了故障激励理论^[1.11];熊秉焜提出了块限网络和故障信息正则向量的概念^[1.12];赵国南的集成电路的在线诊断^[1.15];唐人亨在优化方法方面的研究成果^[1.8];以及其他人的研究成果^{[1.13]、[1.14]}。就大多数来说,理论上的进展,要比实用化的进展为快。

模拟电路故障诊断的发展与现代科学技术的发展分不开。随着微电子科学的进展,电子电路集成化程度日益提高,换代更新迅速,应用日趋广泛。因此对电路的可靠性、可维修性,和自动故障诊断等要求也日见迫切。经典的故障诊断主要依靠模拟式仪表,诸如:信号发生器,电子电压表,示波器等;它还要求操作人员应具有一定的理论基础和丰富的实践经验。一般说,它的测试速度较慢,测试准确性也较低。近代的故障诊断则主要依靠数字式仪表,用电子计算机加以控制,组成全自动的测试系统,不仅能进行系统的测试,还能将测试数据加以处理,自动判断出故障性质和地点。这要比人工的故障检测更加迅速和准确,更能适应近代大规模复杂电子电路的实际情况。

众所周知电子电路有模拟电路和数字电路。模拟电路的发明和应用远早于数字电路。但是,数字电路发展的速度却远高于模拟电路。随着电子计算机的出现,数字电路日新月异,而且数字电路的故障诊断已比较成熟。每部电子计算机均配备有自动测试和

诊断程序,在开机时就能按规定程序,对重要部件进行预检,以保证开机后的正常运行,在运行中发生故障时,也能依靠故障诊断程序对设备进行确诊。象集成度这样高的电子计算机,再完全依靠人工进行故障诊断,已经不现实了。模拟电路的使用虽然由来已久,但故障诊断技术却发展较慢,还不很成熟,应用上也不够广泛,其主要原因有:

1. 模拟电路的输入输出关系复杂,一般是连续函数,许多是非线性函数。

2. 对非线性的模拟电路要用计算机计算就要用迭代法,计算量较大。

3. 模拟电路的元件都有容差,它引起电路工作特性的偏移,增加了故障诊断的难度。

4. 模拟电路的测试也比较复杂,而数字电路依靠软件,再利用本身硬件就可自我检查故障。

大部分数字电路有0和1两个状态,它受非线性、噪音、容差等的影响都不大,它的工作原理主要是逻辑运算,函数不必连续,测试也比较准确,二进制数据也便于电子计算机加以处理,所有这些有利条件才使得数字电路的故障诊断发展更为迅速。目前,许多数字电路的故障诊断方法已移植到模拟电路中,如故障树的概念,故障字典法,逻辑运算法等都已经在模拟电路中得到应用。

模拟电路故障诊断是各个学科的综合,它不仅是电路理论的新分支,它也和系统工程、信息理论、控制理论、概率理论、优化理论、决策论、模式识别、人工智能和专家系统等有关。模拟电路故障诊断的研究、方法和概念,通过非电量的电量变换和比拟,同样可以用到其他学科如医学等中去。因此,对模拟电路故障的研究不应该是孤立的、封闭的,而应该是开放的、联系的,同时还要注意它在国民经济各个部门的应用。

§ 1.2 模拟电路故障诊断概述

网络理论的发展已经有相当长的时间了,它主要经历了三个阶段。

网络分析阶段 人们熟知的基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL)是这个阶段的代表。网络分析的要点是:已知网络的拓扑结构,然后分析网络的特性和指标。这是比较直觉的方法,答案是唯一的,在应用上也最广泛、最成功。

网络综合阶段 20年代开始出现了网络综合理论,W.Cauer和H.W.Bode是这个阶段的代表。网络综合的要点是:已知网络的特性和指标,为了满足这些指标,选择必要的拓扑结构。它的答案不是唯一的。实际上许多工程设计都属于综合性质。

故障诊断阶段 60年代开始^[1,2]出现了故障诊断理论。故障诊断的特点是:已知网络的拓扑结构,已知故障后网络的特性,要求判断网络元件的偏移值,从而确定故障地点。它的答案也只能是唯一的,否则即属误判或误诊。故障诊断是网络理论的第三个分支,也是一个年轻的分支。

事物运动的规律是可以被认识的,认识这些规律的目的在于驾驭自然。但是许多事物的内部结构并不明显,只能由表及里加以认识,这类问题可称为“黑盒问题”。例如:通过心电图获得波形,参数等数据,再通过处理得出心脏运动的规律或模式,再用来诊断疾病。这里并不知道心脏的“电路”,因此,它是一个黑盒问题。同理,国民经济问题也是一个复杂的黑盒问题。国民经济是综合性问题,虽然并没有什么“电路”,但是可通过调查获取各种统计资料,用以列写国民经济的数学模型,于是就成为可解的问题了。

模拟系统的故障诊断属“灰盒问题”,或者说是一个“半透明

的”问题。这是因为网络的拓扑结构是已给的、有章可循的，那么因元件发生变异所导致的性能失常，就可以通过电路理论来加以判断、推理，找出故障元件的地点。虽然它是灰盒问题，但是许多黑盒问题中的理论和方法，如模式识别和模糊集等知识也可以加以引用。

疾病诊断是一个典型的故障诊断例子，图 1.2 表示疾病诊断过程。医生通过多年的医学理论学习和临床经验，积累了丰富的知识，他对各种病变的模式(如症状、类型、治疗方案等)都有一定的认识，产生了各种疾病的标准模型，存储在大脑中。另一方面，对病人进行各种物理的(如 X 射线等)和化学的(如试剂等)检验，得出各种病变的技术数据，再辅以与病人对话所得到的病史、病状，输入医生的大脑，依靠大脑的判断和推理，找出最接近的病变模式，然后予以确诊，给出治疗方案。当然，当疾病界限不清，难以断定时，还可以改变诊断方案，增加检验项目，以便把疾病类型更准确地识别出来。我国已研究出不少的医疗诊断系统，它利用电子计算机代替医生实现疾病的自动诊断，自动处方，详见第七章的 § 7.2。

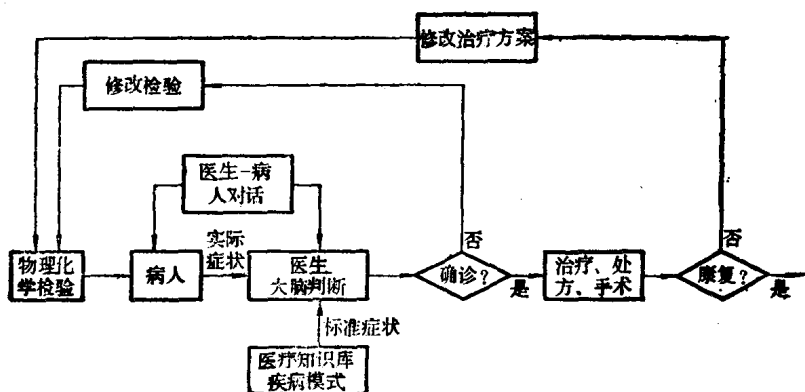


图 1.2 疾病的诊断过程

人体是一个非常复杂的模拟系统,因此,疾病诊断是模拟系统故障诊断的一个特例。疾病诊断过程可以推广到模拟电路的故障诊断。

一般说来,故障诊断主要包括以下三个方面:

1. 诊断前的准备 如知识库的建立,故障特征、故障模式的分类和典型的诊断方案等。

2. 诊断后的判断 主要包括:

故障检测 依据症状,断定是否有故障发生。

故障定位 断定故障的空间位置,如有必要,则进一步判定故障参数偏移的数值,实现故障识别。

3. 故障的预测 为了防患于未然,连续不断地监测系统的性能,在元件参数发生故障之前,先行更换元件。

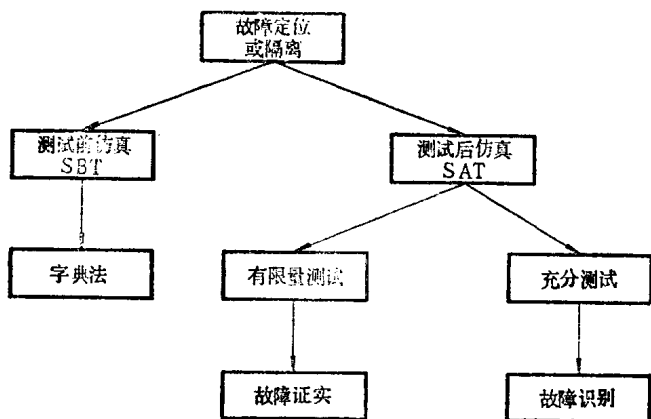
模拟电路故障诊断的分类

模拟电路的故障按故障性质可区分为硬故障和软故障两类。硬故障是指严重的,突出的,极端的故障,例如元件的短路、开路、毁坏、失效等等。软故障是指一些已偏离正常工作状态,尚未严重失效的故障,例如元件的老化、变质和杂散效应,此时元件参数已超出容差范围,导致电路性能失常。硬故障特征明显,仿真容易,所以对它的判断要比软故障容易。

模拟电路故障按元件数量可区分为单故障和多故障两类。在实际中,设备发生单元件故障的概率最大。但同时几个元件发生故障的可能性也有存在,虽然它的概率要小于单故障的概率。

如果就故障定位中测试时间的前后来区分,则可分为测试前仿真 SBT(Simulation-before-test)和测试后仿真 SAT (Simulation-after-test)两类,参见图1.3。本书主要按照这种分类叙述。现在分别简要介绍如下。

字典法 故障字典法属于 SBT 类型,见图 1.4,它的大部分计算工作在故障发生以前就已完成。将图 1.2 和图 1.4 相比较,可



以看出两者相似。为了建立字典,首先预定故障类型,再用电路分析程序,如 SYSCAP-II 程序,进行电路仿真,将计算所得的节点电压值 V_T 进行分类,建立故障模式,最后编辑成故障字典,并存储在计算机中以备检索。

被测电路 UUT 在自动测试系统 ATE 的控制下, 选择恰当的激励和必要的测试点, 将测得的节点电压 V_n 送往电子计算机。

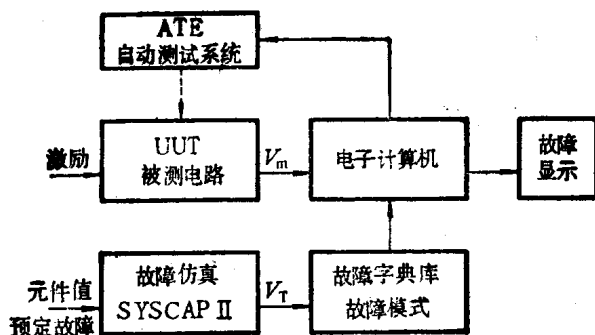


图 1.4 SBT-故障字典法

电子计算机将输入的测试数据与由字典中检索到的存储数据按一定准则,如最小偏差平方和准则,进行比较,作出判断,并予以显示,详见第二章。

字典法只能机械地执行人们预先编写的程序,不能象医生一样具有演绎、推理和创新的能力。它没有反馈,也没有自适应的能力,就是说,它没有智能。现在人们正在研究将人工智能引用到故障诊断中来,要发展专家系统和知识工程使故障诊断更加完善,详细情况见§ 8.1 和§ 8.2。

故障识别法 故障识别法归于 SAT 类型。它的网络仿真在测试时联机完成。为此,必须有足够的测试步骤,以便把全部网络元件都能识别出来。依据诊断方程的性质,它又可分为线性的和非线性的。在线性法中着重介绍广义 Y- Δ 法和元件仿真法。在非线性法中着重介绍直流法和多频测试法等。

故障证实法 故障证实法归于 SAT 类型。由于通常总是少数几个元件发生故障,因此,全部元件的识别不总是必要的。当少数元件发生故障,而多数元件都在容差之内时,只需用有限数量的测试,就足以证实故障的地点了。

除了上述三种主要方法外,本书还介绍了近似法。近似法建立在最优化理论上。它用目标函数来估算最可能发生的故障元件。本书主要分析一次范数法(l_1)、二次范数法(l_2)和二次规划法。

智能测试系统是故障诊断的主要手段,要使故障诊断实用化,自动测试设备是必不可少的。为此,本书对通用仪表接口 GP-IB 作必要的介绍。为了使理论联系实际,本书还介绍了自动测试程序生成(ATPG)的内容。

模拟电路故障诊断理论已开始应用到各个领域。它除了应用在通信系统的监测,电子仪器设备的故障诊断外,通过流体力学和传输线的比拟,还可以用于石油管道故障诊断。通过机电比拟,可

以用于航天设备的故障自动监测。

故障诊断已向人工智能方向发展, 它使诊断系统成为具有丰富知识和有推理能力的专家系统。

如果把个别电路、个别设备的故障诊断方法推广到一个大的系统, 如生产系统, 军事系统, 那么就要应用到整体综合故障诊断体系的新概念, 这就和系统工程有关联了。

对故障诊断的应用和发展本书也作必要的介绍。

参 考 文 献

- [1.1] 宋广泽: “故障学初探”, 《系统工程理论与实践》, 第3期, pp. 11~14 1983
- [1.2] S. D. Bedrosian: converse of the star-mesh transformation, *IRE Trans Circuit Theory*, Vol. CT-8, 1961
- [1.3] S. D. Bedrosian and R. S. Berkowitz: solution procedure for single-element-kind networks, *IRE Int Conv. Rec*, Vol. 10, pt 2, pp. 16~24, 1962
- [1.4] R. S. Berkowitz: conditions for network-element-value solvability, *IRE Trans. Circuit Theory*, Vol. CT-9, pp. 24~29, 1962
- [1.5] P. Duhamel and J. C. Rault: automatic test generation techniques for analog circuits and systems: A review, *IEEE Trans. Circuit systems*, Vol. CAS-26, pp. 411~440, 1979
- [1.6] J. W. Bandler and A. E. Salama: fault diagnosis of analog circuits, *PIEEE*, Vol. 73, No. 8, August, 1985, pp. 1279~1326
- [1.7] J. W. Bandler and A. E. salama: recent advances in fault location of analog networks, *IEEE Int. Symp. on circuit and systems*, Vol. 2, pp. 660~663, 1984
- [1.8] 唐人亨: “模拟电路的最小二乘解”, 《通信学报》, 第1期 pp. 48, 1984
- [1.9] 凌璧亭: “模拟电路中有限故障数的预测-判定分析法”, 《电子学报》, 第3期 1982
- [1.10] 凌璧亭: “非线性电路故障分析”, 《电子学报》, 第1期 1981
- [1.11] Zheng Hui Lin (林争辉): an approach to the development of analog circuit fault diagnosis, *Proc. IEEE Int. Symp.*