

民航电子电气系统测试与故障 诊 断 技 术

王友仁 孔德明 姚 睿

南京航空航天大学

二〇〇一年十二月

前 言

根据民航电气工程与民航电子工程专业特点, 学生毕业后主要从事机务工作(即民用飞机上电子或电气设备的维护保养与维修), 这就要求掌握相关的维修知识和技术, 能进行电子或电气设备的测试分析, 具有故障诊断(排除故障)及基本的维修能力: 由于现代飞机上的机载电设备非常复杂, 目前民航维修基地的机务人员都使用先进的自动化测试设备来完成相关的测试与维修任务, 因而学生必须熟悉各种自动化测试设备的工作原理, 掌握相关的自动测试方法, 为将来的实际工作奠定坚实基础。

为了满足新开办的民航电气工程与民航电子工程专业的学科建设与发展需要, 在没有合适的现成教材供使用的情况下, 根据本专业课程的教学大纲要求, 我们编写了这本试用讲义。书内主要包括三大部分内容: 模拟电路故障诊断(第一章~第五章)、数字电路故障诊断(第六章)和复杂系统智能故障诊断(第七章~第九章)。课程讲授的计划学时数为 40 学时。

本讲义由王友仁、孔德明与姚睿老师编写。陈鸿茂老师参与了本课程的教学大纲制定、教材编写计划与课程建设方案的讨论, 认真审阅了全文, 并提出了有益的修改意见。

由于时间仓促及编者知识有限, 文中出现的不足与错误, 敬请读者、有关专家指正。

编 者

2000.01

目 录

第一篇 模拟电路测试与故障诊断

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	(1)
1.3 模拟电路故障诊断方法的分类	(2)
第二章 故障字典法	(4)
2.1 直流域中字典的建立	(4)
2.2 频域中字典的建立	(8)
2.3 时域中字典的建立	(11)
2.4 故障的识别与分辨	(14)
第三章 元件参数解法	(21)
3.1 元件参数解法的故障诊断方程概述	(21)
3.2 通过网络函数建立故障诊断方程	(23)
3.3 求解电阻网络元件参数的一个算法	(26)
3.4 引入辅助未知量的元件参数解法	(28)
3.5 网络等效变换法	(31)
3.6 获得线性诊断方程的条件	(34)
3.7 非线性电路的元件参数解法	(36)
第四章 故障的预猜验证法	(40)
4.1 符号网络函数法	(41)
4.2 节点故障诊断法	(42)
4.3 支路故障诊断法	(45)
4.4 故障元件的可诊断性	(48)
4.5 故障划界诊断法	(50)
4.6 网络分解诊断法	(53)
4.7 容差问题	(56)
第五章 逼近法	(60)
5.1 逆概率法	(60)
5.2 最小二乘方优化法	(61)
5.3 线性优化法	(62)
5.4 各种诊断方法的比较	(63)

第二篇 数字电路测试与故障诊断

第六章 数字电路测试码的产生方法	(67)
6.1 故障模拟法	(67)
6.1.1 并行故障模拟	(67)

6.1.2 演绎故障模拟	(68)
6.1.3 同时故障模拟	(69)
6.1.4 临界路径跟踪	(69)
6.2 一维通路敏化法	(70)
6.2.1 故障激活	(70)
6.2.2 正向驱动	(70)
6.2.3 反向跟踪	(70)
6.3 布尔差分法	(71)
6.3.1 布尔差分法的定义	(71)
6.3.2 布尔差分的性质	(72)
6.3.3 实例分析	(72)
6.4 D 算法	(74)
6.4.1 基本定义	(74)
6.4.2 算法描述	(77)
6.4.3 实例分析	(77)
6.5 PODEM 算法	(79)
6.5.1 基本原理	(79)
6.5.2 算法流程	(79)
6.5.3 实例分析	(79)
6.6 FAN 算法	(81)
6.6.1 基本原理	(81)
6.6.2 算法流程	(83)
6.6.3 应用实例	(83)
6.7 10 值算法	(83)
6.7.1 基本思想	(83)
6.7.2 算法步骤	(83)
6.7.3 实例分析	(84)
6.8 时序电路的测试序列生成	(85)
6.8.1 时序电路的模型	(85)
6.8.2 时序电路展开测试法	(85)
6.8.3 时序电路功能测试法	(86)
6.9 概率测试	(88)
6.9.1 输入概率优化	(88)
6.9.2 数据压缩方法	(91)

第三篇 复杂系统智能故障诊断

第七章 诊断知识处理、征兆获取和诊断求解	(95)
7.1 诊断知识处理	(95)

7.1.1 从传统诊断到智能诊断	(95)
7.1.2 从数据处理、建模处理到知识处理	(96)
7.1.3 诊断知识的获取	(97)
7.1.4 诊断知识的表示	(100)
7.1.5 基于知识的诊断推理	(106)
7.2 征兆获取和诊断求解	(111)
7.2.1 故障征兆的自动获取	(111)
7.2.2 多故障诊断问题的求解	(116)
第八章 传统故障诊断专家系统	(120)
8.1 传统诊断专家系统设计的基本组成	(120)
8.2 知识库的建立和维护	(122)
8.3 全局数据库的设计与操作	(125)
8.4 推理机	(125)
8.5 解释程序的设计	(128)
8.6 用户界面设计	(129)
8.7 基于规则的专家系统中的不精确推理	(129)
8.8 搜索策略	(131)
8.9 专家系统开发工具	(133)
第九章 神经网络故障诊断专家系统	(136)
9.1 从传统专家系统到神经网络专家系统	(136)
9.2 人工神经元模型	(137)
9.3 前向多层神经网络、BP 算法及计算机实现	(139)
9.4 神经网络诊断专家系统知识库的组建	(143)
9.5 神经网络故障诊断专家系统推理机制	(150)
9.6 神经网络故障诊断专家系统的解释机制	(154)
9.7 传统专家系统与神经网络专家系统的关系	(157)

第一篇 模拟电路测试与故障诊断

第一章 引 论

1.1 模拟电路故障诊断概述

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、航天及航空电子设备,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,也是相当困难时的,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。

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,可是离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。而在数字电路小,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,诸如元件非线性的表征误差、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,因而模拟电路故障诊断是十分必要与急需的。同时近代网络理论也为故障诊断准备了深厚的理论基础,故障诊断也已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

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, 常简称为 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, 常简称为 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第三大分支。这是因为在故障诊断中, 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。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)。

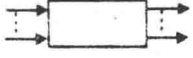
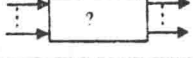
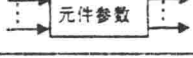
分支	特征	已知量	待求量	象征图	求解方法	解的唯一性
网络分析		激励和网络	响应		解析法、数值法	通常唯一
网络综合		激励和响应	网络		逼近理论机助设计	不要求唯一
网络诊断		激励、部分响应、网络结构	未知元件的位置、参数		机助求解	要求唯一

图 1.2.1

除了在已知的激励信号中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, 尽可能精确地获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。

1.3 模拟电路故障诊断方法的分类

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(或后)电路模拟或电路仿真(Circuit Simulation)的方法来分类。此法故分为下列两类: 测前模拟法(simulation before test approach)、测后模拟法(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。

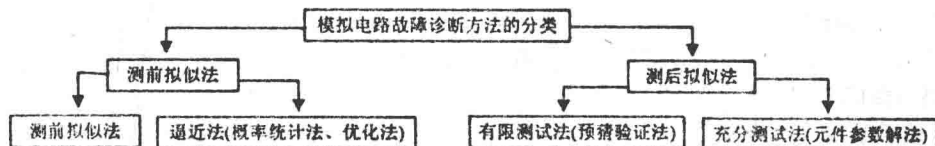


图 1.3.1

由图示,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或仿真(拟似可用理论的、实验的或经验的方法)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。但由于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,故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,要求高速计算机。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。

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,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,其位置也可未知,这是本方法的重要特点。但当电路的规模较大,且其中故障元件数较多时,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准备,因此一般微机便可满足计算要求。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。

除了上述三种故障诊断方法以外,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,以期利用人工智能(含神经网络与专家系统)等方法把各种诊断法综合应用。

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。这类电路的故障诊断本质上仍然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)。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中来,且卓有成效,其功能已远远超越电路意义上的故障诊断,但其成本昂贵操作复杂,难于普及。

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。通常总是根据元器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,即元件的开断或短路等,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,也可以用于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,以便区别不同的故障。这些征兆一般总是在诊断测试之前,通过对被诊断电路的拟似(simulation)而取得。一般是在计算机上进行拟似,必要时也可用实物拟似。

3.在线诊断要快速准确:当被诊断对象出现故障后,即按与编写字典时辨明故障征兆相同的步骤对被诊断对象进行检测,再在字典中按所得征兆逐个查找。但实际中经常存在着这样一种情况,即多个不同的故障有着相近的征兆,这时就需按一般的判别准则加以区分,以确定它为某一故障。

故障拟似中元件特性的表征误差、实际元件的容差以及测试过程中难免出现的测试误差等因素都会使在线诊断时所得的结果不能完全符合测前拟似所得的征兆,以致诊断不准确,甚至引起误判。为了保证诊断的正确可靠,必须提高对故障状态,亦即故障征兆的分辨率。因此,在建立故障字典时,必须在给定的可测性条件下,适当选则激励点和测试点以及测试信号,以提高分辨率。

在 1.3 节已经提到,字典法本质上是一种经验性的诊断方法,因此对于那些没有条件进行解析分析或难于获其输入-输出解析特性的系统非常适用,而且字典法的在线诊断又比较简便省时,这是它的优点。但实际上,字典法一般还只局限于处理单个故障,且故障类型都为硬故障。若要诊断多个故障及软故障,则对待测电路预先要作大量拟似,还要保证对故障状态具有较高的分辨率。

2.1 直流域中字典的建立

我们以图 2.1.1 所示的一个视频放大器为例来说明编写一本直流域故障字典的一般过程。人们在诊断实践发现,模拟电路的故障大约有 80%是硬故障,其中又有 60~80%是电阻开断、电容短路以及三极管和二极管等引出线的开断或短路而引起的故障。这样人们自然会想到,解决实际问题得首先从解决这些硬故障入手,我们以图 2.1.1 的视频放大器为例进行讨论。设该电路有 20 种最常见的故障状态可作为所编故障字典的诊断范围,它们由表 2.1.1 中按序号一、二、……二十编排。表中 Q 表示三极管, DZ 表示稳压管; O 指开断, S 指短路; BES、CES 及 BCS 分别表示三极管相应电极之间的短路, BO 表示基极的开路。显然,这里定义的故障均系硬故障。由表 2.1.1 可以看出,所定诊断范围实际上未包括图 2.1.1 中所有的九个三极管,仅包括其中的前六个,而未考虑后三个,而且还未包括电感的硬故障。又由于电路中无电容,因此对该放大器电路便于在直流域中建立其故障字典。

表 2.1.1

故障序号	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
故障状态	Q1BES	Q2CES	Q2BO	Q3BES	Q3BO	Q4BES	Q4BO	Q5BES	Q5BO	Q6BES
故障序号	十一	十二	十三	十四	十五	十六	十七	十八	十九	二十
故障状态	Q6BCS	Q6BO	DZ1O	DZ1S	DZ2O	DZ2S	DZ3O	DZ3S	DZ4O	DZ4S

由图 2.1.1 可见, 该电路共有 43 个节点, 其中节点 14 是输入节点, 可作为激励端口, 在该节点上允许施加+30V 的直流电压作为激励信号。为叙述方便起见, 先设可测节点为十个, 即节点 2、5、8、11、16、18、26、27、33、36。通常可用±30V 直流信号激励下各可测节点上的电压作为故障征兆来建立故障字典。虽然该电路是非线性的, 但这些节点电压均可由通用的电路分析程序经拟似而获得。对于图 2.1.1 所示电路, 为了获得其 20 种故障状态的征兆, 在节点 14 上施加±30V 两种激励情况下, 需拟似每一种故障状态在上述十个可测节点上的电压, 这样共需拟似 $2 \times 10 \times 20 = 400$ 个节点电压数据, 加上电路处于无故障标称状态时的 20 个节点电压, 该字典中就需存储 420 个节点电压数据, 以便诊断时根据测到的电压值从上述字典中查找相应的故障。

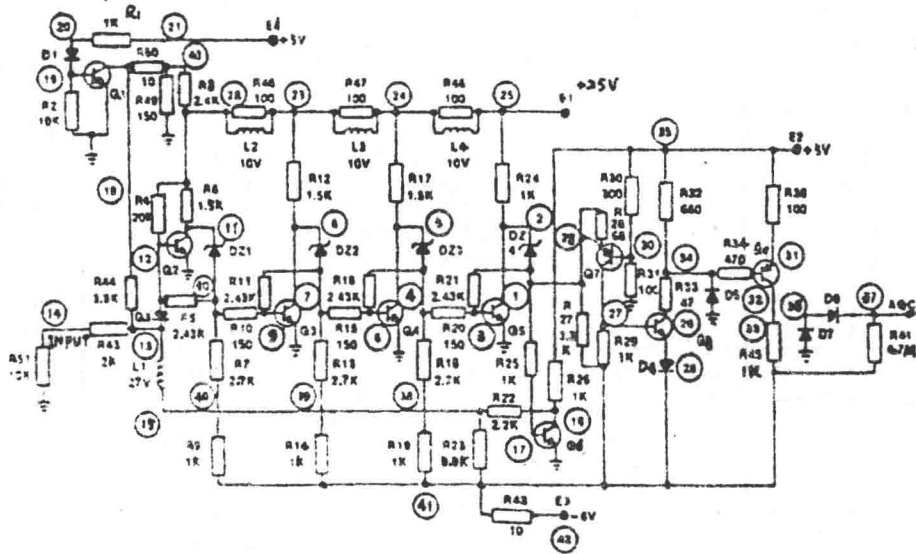


图 2.1.1

为了说明清楚起见, 这里用 SPICE 程序进行拟似 (仿真时稳压管一律用 5V 定额, 二极管与三极管均用典型值), 所得 420 个数据如表 2.1.2 所示。由表 2.1.2 可见, 节点 36 上的电压对诊断这 20 种故障不提供任何有用信息。因为不论激励是+30V 还是-30V 电压, 不论在无故障的标称状态, 还是在 20 种故障状态下, 节点 36 上的电压值均在(-0.47V)~(-0.48V)范围内。节点 18 上的电压除了在故障状态一时略高以外, 均在 0.04~0.05V 范围内。

由表 2.1.2 还可发现, 除了上述两节点外, 节点 26、27、33 上的电压值基本上是相关的, 因此它们三者所提供的信息完全一致, 并且和节点 2 上的电压所提供的信息基本类同, 但在故障状态十九及二十情况下尚有差别。所以, 节点 26、27、33 在 20 种故障状态下所提供的信息事实上微乎其微, 可不予考虑。因此, 以上五个节点上的电压可以不必存储。在线诊断时也不用测量。

表 2.1.2

节点 状态激励	2	5	8	11	16	18	26	27	33	36
0 +30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
正常 -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	1.80	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q1BES -30V	0.05	7.23	0.04	6.91	1.24	1.10	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.00	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q2CES -30V	7.97	0.04	7.10	0.00	0.03	0.04	-4.26	-3.43	4.12	-0.47
+30V	0.05	7.23	0.04	7.49	6.70	0.05	5.00	-5.88	-5.88	-0.48
Q2BO -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q3BES -30V	7.97	0.04	7.27	6.20	0.03	0.04	-4.24	-3.42	4.12	-0.47
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q3BO -30V	7.97	0.03	7.57	11.12	0.03	0.04	-4.23	-3.41	4.12	-0.47
+30V	0.05	7.25	6.50	0.15	6.69	0.05	5.00	-5.88	-5.88	-0.48
Q4BES -30V	0.05	7.24	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	0.04	7.50	10.14	0.09	6.69	0.05	5.00	-5.87	-5.87	-0.48
Q4BO -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q5BES -30V	7.96	6.53	0.04	6.93	0.03	0.04	-4.24	-3.42	4.12	-0.47
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q5BO -30V	8.07	9.80	0.04	6.93	0.03	0.04	-4.22	-3.42	4.12	-0.47
+30V	7.92	0.04	7.27	0.11	6.75	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
Q6BES -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.83	0.05	-4.21	-3.39	4.12	-0.47
Q6BCS -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	0.43	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	8.10	0.04	7.27	0.11	6.75	0.05	-4.20	-3.38	4.12	-0.47
Q6BO -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.18	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
DZ1O -30V	7.97	0.04	7.10	25.00	0.02	0.04	-4.26	-3.43	4.12	-0.47
+30V	7.97	0.04	7.28	0.10	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
DZ1S -30V	0.05	7.23	0.04	2.27	1.22	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	0.05	7.20	25.00	3.98	6.70	0.05	5.00	-5.89	-5.89	-0.48
DZ2O -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	2.64	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
DZ2S -30V	0.05	7.25	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
DZ3O -30V	7.95	25.00	0.04	6.92	0.03	0.04	-4.25	-3.43	4.12	-0.47
+30V	7.97	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.21	-3.38	4.12	-0.47
DZ3S -30V	0.04	2.60	0.04	6.90	1.18	0.04	5.00	-5.90	-5.90	-0.48
+30V	25.00	0.04	7.23	0.12	6.70	0.05	5.00	-5.90	-5.90	-0.48
DZ4O -30V	0.05	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48
+30V	3.21	0.04	7.27	0.11	0.05	0.05	-4.18	-3.34	4.12	-0.47
DZ4S -30V	0.04	7.23	0.04	6.90	1.19	0.04	5.00	-5.93	-5.93	-0.48

故障拟似时, 由于电路分析程序中非线性器件特性的表达式难免与被诊断器件的特性不完全一致, 因此表 2.1.2 中仿真的节点电压总不免有些偏差, 这是需要注意的一个方面, 在线诊断时, 由于测试中存在误差以及被诊断电路中无故障元件的容差等因素, 所测得的节点电压也不免有些偏差, 这是需要的另一方面。为此, 在建立字典时, 要把最坏场合的情况考虑在内, 故通常可用 Monte-Carlo 法拟似。

建立字典时, 可把电路施加各次激励时所有可测节点上的电压拟似值划分几个模糊集, 以便用模糊观点来确定电路中的故障状态, 这样对在线诊断查找故障也较简便有效。

模糊集的划分可按如下原则进行。把与各个故障状态以及无故障标称状态相对应的所有节点电压拟似值作为原始数据, 挑选其中比较密集的数据群构成数个模糊集。各模糊集之间当然不允许有相互重叠的情况, 而且各模糊集之间应尽可能分离。每一模糊集所覆盖的具体电压值可根据具体情况而定。对于表 2.1.2 中节点 2、5、8、11、16 上的电压数据, 根据各模糊集之间不应重叠而务须分离的原则, 可具体划分为下列 I、II、III、IV 个模糊集:

I. 0~1.25V; II. 2.25~4.0V; III. 6.0~8.15V; IV. 9.8~11.2V。

此外有额外值 25V。显然, I、II 两模糊集之间有约 1V 的间隔, II、III 模糊集之间及 III、IV 模糊集之间均有约 2V 的间隔, 而每一模糊集所覆盖的电压量程也不过 1~2V 上下。至于额外值 25V, 与前四个模糊集间隔更大。

从这里也可以看出, 我们之所以删去 18、26、27、33、36 五个节点, 不仅因为它们对该诊断范围内的 20 种故障状态提供的信息不多或甚至不提供任何信息, 而且也是为了有利于选取更合适的模糊集。例如上述分集情况下, 如果需要考虑节点 18 上 +30V 电压激励时, 存在故障状态一时所出现的 1.8V, 就难处理了。

根据上述划分, 可得表征各节点电压在各模糊集上的故障状态的表 2.1.3。

表 2.1.3 既然说明了 $\pm 30V$ 激励时上述五个节点上所得电压落在某一模糊集时所代表的故障状态, 那么一旦电路出了故障, 该表能否唯一地判断该诊断范围内所有的 20 个故障呢? 故障诊断是否具有唯一性, 取决于给定的可测性条件下所获得的故障征兆能否有效地区分出不同的故障状态。例如, 当 +30V 激励时, 若节点 8 上的电压落在模糊集 I 中, 则该电路中的故障必为故障三(Q2BO); 同样地, 当 +30V 激励时, 节点 11 上的电压落在模糊集 III 中, 则该电路中的故障也必为故障三, 两者可相互验证。再例如, 当 +30V 激励时, 若节点 2 上的电压落在模糊集 II 或为额外值 25V, 则相应的故障必分别唯一地为故障二十或十九; 又节点 8 上的电压若落在 II、IV 集或为额外值 25V, 则相应的故障必分别唯一地为故障十六、七、十五。再例如, 当 -30V 激励时, 若节点 5 上的电压落在模糊集 II、IV 或为额外值 25V, 则相应的故障必分别唯一地为故障十八、九、十七; 若节点 11 上的电压凡落在模糊集 I、II、IV 或为额外值 25V, 则相应的故障必分别唯一地为故障二、十四、五、十三。由此可见, 这些故障状态, 诸如二、三、五、七、九、十三、十四、十五、十六、十七、十八、十九及二十均可在 $\pm 30V$ 激励时根据某可测节点上电压是否出现在某一模糊集中而唯一地被确定。

至于另外一些故障, 可利用交及对称差的运算确定之。例如故障四就可在不出现故障二、五、十三的情况下, 通过检查 -30V 激励时节点 8 上电压是否落在模糊集 III 或节点 5 上电压是否落在模糊集 I 而被唯一地确定。故障六可在确定故障十六不出现情况下, 由 +30V 激励时节点 5 上电压不落在模糊集 I 而节点 8 上电压却出现在模糊集 III 而得以被唯一地被确定。故障八可在确定故障十八不存在的情况下, 由 -30V 激励时节点 2 上电压不落在模糊集 I 而节点 5 上电压落在模糊集 III 中而得以被唯一地确定。

此外, 在确定不存在故障十九情况下, 故障十和十二可由 +30V 激励时, 节点 5 上电压落在模糊集 I 而节点 16 上电压不落在模糊集 I 而得以被同时确定。但是它们虽能被确定, 却难以判定具体对应哪一故障。余下的故障一和无故障状态 0 也是如此, 只有再利用节点 18 上的电压才可以区别它们。

表 2.1.3

节点	激励	I 0~1.25V	II 2.25~4.0V	III 6.0~8.15V	IV 9.8~11.2V	V 25V
2	+30V	三、六、七、十五	二十	0、一、二、四、五、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十六、十七、十八		十九
	-30V	0、一、三、六、七、十、十一、十二、十四、十五、十六、十八、十九、二十		二、四、五、八、九、十三、十七		
5	+30V	0、一、二、四、五、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十六、十七、十八、十九、二十		三、六、七、十五		
	-30V	二、四、五、十三	十八	0、一、二、六、七、八、十、十一、十二、十四、十五、十六、十九、二十	九	十七
8	+30V	三	十六	0、一、二、四、五、六、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十七、十八、二十	七	十五
	-30V	0、一、三、六、七、八、九、十、十一、十二、十四、十五、十六、十七、十八、十九、二十		二、四、五、十三		
11	+30V	0、一、二、四、五、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十六、十七、十九、十九、二十	十五	三		
	-30V	二	十四	0、一、三、四、六、七、八、九、十、十一、十二、十五、十六、十七、十八、十九、二十	五	十三
16	+30V	0、一、二、四、五、八、九、十一、十三、十四、十六、十七、十八、二十		三、六、七、十、十二、十五、十九		
	-30V	0~二十(全部状态)				

通过上例可以看出,不同节点上的不同激励在诊断故障时所起的作用并不一样。节点 2、8、11 在+30V 激励时和节点 5、11 在-30V 激励时都对诊断起着较大的作用。

总之,建立故障字典时,在确定诊断范围后,需要选择测试点,也可改变输入激励量,甚至还可适当调整模糊电压集量程,这样才能最终分辨清楚各种故障状态。

2.2 频域中字典的建立

对于线性交流电路,可根据其频率响应来构造故障字典。频域字典法的优点是所需硬件比较简单,只要有正弦信号发生器及电压表就可以了。若有矢量电压表或频谱仪就更好了。

线性电路的频域分析理论已十分成熟,因此频域中建立故障字典的方法也较多。这些方法大都基于各种网络函数的幅频特性和相频特性。下面分别介绍之。

(一)Seshu-Waxman 方法:这是一种比较早期的方法,它利用传输函数的幅频特性来构造字典。设待测电路中某一传输函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = k \prod_{i=1}^{n_z} (s - z_i) / \sum_{j=1}^{n_p} (s - p_j) \quad (2.2.1)$$

式中 s 为复频率, k 为一常数, z_i 、 p_j 分别代表传输函数的零极点,其数目分别为 n_z 、 n_p 。这些零极点的位置及常数 k 完全决定了 $H(s)$ 的幅频特性及相频特性。因此,对于该传输函数的特性,也可由 $(n_z + n_p + 1)$ 个频率点上的 $H(s)$ 的值来完全确定。换句话说,一旦获得了 $(n_z + n_p + 1)$ 个频率点上的 $H(s)$ 值,原理上就可完全确定式(2.2.1)中的 k 、 z_i 及 p_j 。

在 RC 网络中,零极点均为实根,故可把它们绝对值的分别视为角频率 ω_i 及 ω_j ,此即上、

下折角频率。这样很容易画出该 $H(s)$ 的 Bode 图。当网络中某一元件发生故障时，部分或全部折角频率也将随之改变，从而引起整个 $H(s)$ 的 Bode 图的改变。

总之，在建立频域中故障字典时，我们应在 (n_z+n_p+1) 个频率点上计算出电路处于无故障标称状态及各种故障状态时的 $H(s)$ 的幅值，由这些幅值就可构造故障字典。建立这种故障字典的一般步骤为：

1. 首先用符号网络函数分析程序实现 $H(s)$ 的符号表达式，即将 $H(s)$ 的分子、分母多项式中的各系数用各元件符号的函数来表达；

2. 将无故障状态时元件标称值代入上式，对分子、分母多项式进行因式分解，计算出各折角频率；

3. 至少在 (n_z+n_p+1) 个测试频率点上计算出电路处于各种故障状态时的 $H(s)$ 幅值。这些测试频率宜按如下方式选取：在相邻的两个折角频率之间选取一个测试频率，同时在最高折角频率以上和最低折角频率以下也各取一个测试频率；

4. 在上述各测试频率点上，把电路处于各种故障状态下的 $H(s)$ 的幅值按一定方式存储起来。一定方式通常是指将这些幅值直接存储，或取其与标称值的偏离进行量化、编码，以征兆码形式存储。

例如对图 2.2.1 的电路，可求得其电压传输函数为

$$H(s) = \frac{I_0(s)}{I_1(s)} = \frac{a_0 + a_1s}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3} \tag{2.2.2}$$

式中, $a_0=R_2$, $a_1=R_1R_2C_1$, $b_0=R_1+R_2$

$$b_1=R_1C_1R_2+R_2R_4C_3+(C_2+C_3)(R_2R_3+R_3R_1+R_1R_2)+R_1R_4C_3$$

$$b_2=R_1R_2R_3C_1(C_2+C_3)+R_1R_2R_4C_3(C_1+C_2)+R_3R_4C_2C_3(R_1+R_2)$$

$$b_3=R_1R_2R_3R_4C_1C_2C_3$$

由式(2.2.2)可知， $H(s)$ 有三个极点和一个零点。设各元件标称值为 $R_1=R_2=1\text{M}\Omega$, $R_3=10\text{M}\Omega$, $R_4=2\text{M}\Omega$, $C_1=0.01\mu\text{F}$, $C_2=C_3=0.001\mu\text{F}$ ，在这些标称值下， $H(s)$ 的折角频率分别为(零点) $\omega=100$ 和(极点) $\omega=83.3$ 、 288.6 及 2288.1rad/s 。因此可选下列 5 个测试频率，即 $\omega=10$ 、 95 、 200 、 800 及 5000rad/s 。它们分别处在相邻的零极点之间，并在最高折角频率以上及最低折角频率以下。无故障正常状态下标称值时的 $H(s)$ 记作 $H^0(s)$ 。

表 2.2.1

$ H(s) - H^0(s) $	码
$\leq \pm 0.5\text{dB}$	0
$-1 \sim -0.5\text{dB}$	1
$-2 \sim -1\text{dB}$	2
$-5 \sim -2\text{dB}$	3
$\leq -5\text{dB}$	4
$0.5\text{dB} \sim 1\text{dB}$	5
$1 \sim 2\text{dB}$	6
$2 \sim 5\text{dB}$	7
$\geq 5\text{dB}$	8

表 2.2.2

故障类型	征兆码	故障类型	征兆码
R_1^+	10000	R_1^-	56000
R_2^+	50000	R_2^-	21000
R_3^+	02434	R_3^-	06788
R_4^+	00214	R_4^-	00578
C_1^+	05050	C_1^-	01210
C_2^+	02334	C_2^-	06778
C_3^+	02434	C_3^-	06788

如若对该电路定义 14 种故障状态，它们对应于图 2.2.1 中 7 个元件分别当其实际值相距其标称值有 +50% 或 -50% 的偏离，并分别记为 R^+ 、 C^+ 或 R^- 、 C^- 。由式(2.2.2)及(2.2.3)计算出这些故障状态下 $H(s)$ 的幅值，再按表 2.2.1 进行量化并编码。于是在 5 个频率上可得一个 5

码, 所得故障字典如表 2.2.2 所示。

由表可以看出, R^+ 与 C^- 、 R^- 与 C^+ 都具有相同的征兆码, 因此它们都是两个故障共占一个模糊集, 因此不能唯一地确定单个故障元件。这时只能再增加测试频率点, 例如利用更低的或更高的测试频率, 这样其余各种故障也都可唯一地被确定。

(二)双线性变换方法: 由网络理论得知, 线性网络的网络函数可以表示为某一元件参量 r_i 的双线性函数, 即

$$H(s, r_i) = \frac{a_1 i(s) r_i + a_0 i(s)}{b_1 i(s) r_i + b_0 i(s)} \quad (i=1, 2, \dots, n_h) \quad (2.2.4)$$

式中 a, b 均为 s 的多项式, 而这些多项式的系数又是各元件参数 $r_j (j \neq i)$ 的函数。可以根据 $H(s, r_j)$ 与 r_j 的上述双线性关系来构造故障字典, 即对每一测试频率, 在复平面上作出 $H(s, r_j)$ 与 r_j 的关系曲线, 由双线性变换的特性可知, 当 r_i 在一定范围内变化时, 该曲线或是一条直线, 或是一段弧线。将在所有测试频率上作出的这些关系曲线存储起来, 就构成了故障字典。

测试频率仍按相邻零极点间穿插的方式选取。因此, 对有 n_z 个零点与 n_p 个极点的函数 $H(s)$, 至少需在 $(n_z + n_p + 1)$ 个测试频率上计算出 $H(s, r_i)$ 与某一 r_i 的关系曲线。对于单故障, 这样构造出来的故障字典确实能够比较全面地反映出各种故障、征兆, 包括硬、软故障的征兆。

从双线性函数式(2.2.4)可以看出, 其分子、分母的四个系数中只有三个是独立的, 因此只需三个点上的 $H(s, r_i)$ 的值就可完全确定该双线性函数。于是, 为了构造整个故障字典, 按照

式(2.2.4)至少需计算出 $3(n_z + n_p + 1)n_h$ 个值作为基本数据, 这里 n_h 为元件数。

以图 2.2.1 所示的电路为例, 当测试频率 $\omega = 200 \text{ rad/s}$ 时, $H(s, r_i)$ 与各元件参量 r_i 的变化关系曲线如图 2.2.2 所示。图中各元件参数在其标称值的 0.1~10 倍之间变化。在其它测试频率上, $H(s, r_i)$ 与 r_i 的关系曲线也是类似的。

(三)稀疏矩阵字典法

设待测电路的某一网络函数 $H(\omega)$ 可测, 且定义该电路有 n_f 种故障状态, $f=1, 2, \dots, n_f$ 。拟似出每种故障状态在 n_ω 个频率 ($i=1, 2, \dots, n_\omega$) 上网络函数 $H^f(\omega_i)$ 的值。令它们与标称无故障网络函数 $H^0(\omega_i)$ 的偏差为

$$d_{if}^* = H^0(\omega_i) - H^f(\omega_i) \quad i=1, 2, \dots, n_\omega; f=1, 2, \dots, n_f \quad (2.2.5)$$

式中 $H^0(\omega_i)$ 及 $H^f(\omega_i)$ 既可表示幅值, 也可表示相位。即对应某些频率, $H^0(\omega_i)$ 、 $H^f(\omega_i)$ 可表示幅值; 而对另一些频率, 它们又可表示相位。若把 d_{if}^* 看作是 i 行 f 列的一个元素, 则可构成一个矩阵。

考虑到元件容差的影响, 可对 d_{if}^* 进行量化。设因元件容差及测试误差而引起的 d_{if}^* 的偏差不得超过 ψ_i , 则 d_{if}^* 可按如下方式进行量化, 即

$$d_{if} = \begin{cases} 1, & \text{当 } d_{if}^* > \psi_i \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } |d_{if}^*| \leq \psi_i \text{ 时, } (i=1, 2, \dots, n_\omega; f=1, 2, \dots, n_f) \\ -1, & \text{当 } d_{if}^* < -\psi_i \text{ 时} \end{cases} \quad (2.2.6)$$

以量化后的 d_{if} 作为元素而组成的矩阵就是要构造的故障字典。由于这个矩阵是一个稀疏矩阵, 因此这种字典称为稀疏矩阵字典。为了提高故障在字典中的分辨度, 通常可选用较多的测试频率, 例如选 $n_\omega \geq 3n_h$, n_h 为元件数。

例如, 以图 2.2.1 所示的电路为例来构造故障字典。选择测试频率 ω 为 10、200、800、2000、8000 rad/s, 在前三个频率上测幅值 G , 后二个频率上测相角 φ 。量化时相角取 $\psi_\varphi = 0.08$,

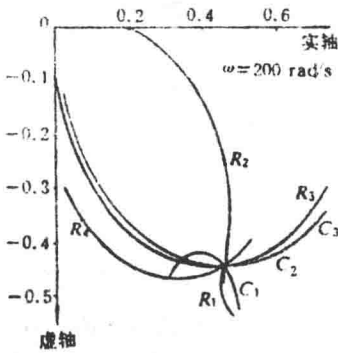


图 2.2.2

幅值取 $\psi_i=0.025$ 。仍考虑 7 个元件对其标称值有 $\pm 50\%$ 的偏离作为它们的故障状态，则可得稀疏矩阵字典如表 2.2.3 所示。

由表 2.2.3 可见， R_1^+ 与 R_2^- 、 R_1^- 与 R_2^+ 、 C_2^+ 与 C_3^+ 及 C_2^- 与 C_3^- 各对故障状态之间均难以区分，因此该字典尚不完善。为此可以舍弃式(2.2.6)的量化方式而对 d_{ij}^* 作如下处理，即

$$d_{ij}^* = \frac{d_{ij}^*}{|\psi_i|} \quad \begin{matrix} i = 1,2,\cdots,n_\omega \\ f = 1,2,\cdots,n_f \end{matrix} \tag{2.2.7}$$

这样所得矩阵就更加便于区分各种故障状态了。但是，处理后的矩阵不再是稀疏矩阵，因此需要较大的存储容量。

若再对 d_{ij}^* 按如下方式进行归一化处理，即

$$d_{ij}^* = \frac{d_{ij}^*}{\|d_{ij}^*\|} \quad \begin{matrix} i = 1,2,\cdots,n_\omega \\ f = 1,2,\cdots,n_f \end{matrix} \tag{2.2.8}$$

式中 $d_{ij}^*=[d_{1f}^* \ d_{2f}^* \cdots d_{n_\omega f}^*]^T$ ， $\|\bullet\|$ 表示范数，该范数通常可取为

$$\|d_{ij}^*\| = \sum_{i=1}^{n_\omega} |d_{if}^*| \tag{2.2.9}$$

经过上述处理后，可得以 d_{ij}^* 为元的矩阵。考虑到容差的影响，再将该矩阵中绝对值小于 $\eta\|d_{ij}^*\|$ 的诸元置为零。这里 η 是经验系数，例如取 $\eta=1/3n_\omega$ 。这样便可得归一化无量纲的稀疏矩阵故障字典，如表 2.2.4 所示。稀疏矩阵字典法的优点是所需存储量较少，因此能缩短运算时间，但在线诊断时有可能不利于区分故障。

表 2.2.3

故障 增益或相位	R_1^+	R_1^-	R_2^+	R_2^-	R_3^+	R_3^-	R_4^+	R_4^-	C_1^+	C_1^-	C_2^+	C_2^-	C_3^+	C_3^-
G $\omega=10$	1	-1	-1	1									*	
G $\omega=200$					1	-1			-1	1	1	-1	1	-1
G $\omega=800$					1	-1	1	-1			1	-1	1	-1
$\varphi \ \omega=2000$						-1	1	-1			1	-1	1	-1
$\varphi \ \omega=8000$								-1				-1		-1

表 2.2.4

故障 增益或相位	R_1^+	R_1^-	R_2^+	R_2^-	R_3^+	R_3^-	R_4^+	R_4^-	C_1^+	C_1^-	C_2^+	C_2^-	C_3^+	C_3^-
G $\omega=10$	0.99	-0.96	-0.98	0.98										
G $\omega=200$		-0.25	-0.14	0.16	0.81	-0.57	0.29	-0.15	-0.99	0.97	0.71	-0.53	0.80	-0.63
G $\omega=800$					0.56	-0.76	0.38	-0.22	-0.08	0.6	0.48	-0.45	0.52	-0.62
$\varphi \ \omega=2000$						-0.26	0.79	-0.77	0.09	-0.14	0.45	-0.59	0.25	-0.39
$\varphi \ \omega=8000$							0.35	-0.57			0.2	-0.39		-0.21

2.3 时域中字典的建立

对于线性或非线性动态电路，可以利用它的时域响应，拟似出它在时域中的各种故障征兆，从而建立故障字典。下面先介绍两种诊断线性电路的时域字典法。

(一)伪噪声信号法

在待测网络的输入端施加一周期性的伪噪声信号 $\eta(t)$ ，所得响应为 $v(t)$ ，则可证明：对于线性电路，激励与响应的互相关函数近似为网络的冲激响应 $h(t)$ ，即

$$h(i\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T \eta(t - i\tau) v(t) dt \quad (2.3.1)$$

τ 为 $\eta(t)$ 的周期, T 为测试时间, 它的选择取决于信噪比。

按式(2.3.1)拟似出待测网络在标称状态及各种故障状态下的冲击响应, 分别记作 $h^0(i\tau)$ 及 $h^f(i\tau)$ 。将它们的差值记为

$$d_{if}^* = h^0(i\tau) - h^f(i\tau) \quad i=1, 2, \dots, n_i; \quad f=1, 2, \dots, n_f \quad (2.3.2)$$

式中 n_i 为在时域中进行拟似的时间点数, n_f 为各种故障状态的数目。

根据上述 d_{if}^* , 既可直接将它存储起来构成字典, 也可仿照上节频域中稀疏字典的构造方法对其进行量化、归一化处理后构成故障字典。

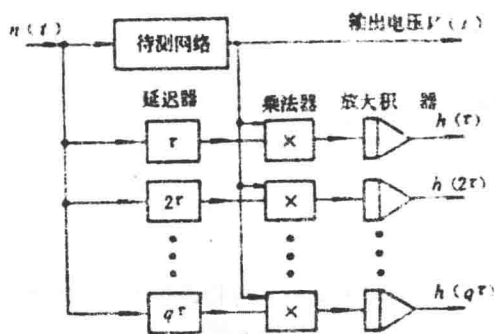


图 2.3.1

按直接方法建立字典时, 式(2.3.1)可用延迟器、乘法器和积分器等硬件来实现, 如图 2.3.1 所示。当然也可用计算机来拟似。

(二) 激励信号设计法

对于线性待测动态电路, 在其发生故障前后, 若把它从其零状态驱使到零状态, 两者所要求的非平凡激励信号是不相同的, 因此可用激励信号参数来标志电路的各种故障, 这就是激励信号设计法。

对于线性动态电路, 其输入输出特性可用下列微分方程来描述。

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_0 u + b_1 \frac{du}{dt} + \dots + b_m \frac{d^m u}{dt^m} \quad (2.3.3)$$

引入辅助参量 $\mathbf{x}$, 可将上式表示为状态方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad y = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (2.3.4)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{a_0}{a_n} & -\frac{a_1}{a_n} & -\frac{a_2}{a_n} & -\frac{a_3}{a_n} & \dots & -\frac{a_{n-1}}{a_n} \end{bmatrix} \quad (2.3.5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \frac{1}{a_n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

由此让我们来设计把该电路从零状态驱使到零状态的非平凡激励信号。因为状态方程式(2.3.4)的解为

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}u(\tau) d\tau \quad (2.3.6)$$

故当激励信号为阶跃函数

$$u(\tau) = a_k \quad kT \leq \tau < (k+1)T \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2.3.7)$$

的组合时, 则有

$$\mathbf{x}[(k+1)T] = e^{\mathbf{A}T} \mathbf{x}(kT) + (e^{\mathbf{A}T} - \mathbf{I}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} a_k \quad (2.3.8)$$