第1章 电子电路故障诊断概述

众所周知，电子技术已广泛应用于国民经济的许多部门，并在推动社会现代化方面起着越来越大的作用。在电子系统中，尤其是在以集成电路为核心的现代化微电子电路中，由于系统的规模越来越大，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可能导致整个系统的失灵。所以，伴随着电子技术发展电子电路集成化程度日益提高，换代更新迅速，对电子电路的可靠性、可维修性和自动故障诊断等的要求也日渐迫切。所谓电子电路故障诊断技术，就是根据对电子电路的可及节点或端口直接测量的信息，推断该系统所处的状态，确定故障元件部位和预测故障的发生，判别电子产品的好坏和给出必要的维修提示的方法。

电子设备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，可是故障诊断方面的发展速度似乎要缓慢得多。在早期的电子系统故障诊断技术中，电子系统的故障诊断基本上是依靠一些测试仪表，按照跟踪信号逐点寻迹的思路，借助人们的逻辑判断来侦察系统中的故障所在。这种沿用至今的传统诊断技术在很大程度上与维修人员的实践经验和专业水平密切相关，基本上没有一套可循的、科学的、成熟的办法。

随着电子工业的发展，人们逐步认识到，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，系统地发展和完善一套严谨的现代化电子设备故障诊断方法，并结合先进的计算机数据处理技术，实现电子电路故障诊断的自动检测、定位、定值以及故障预测。

电子电路分模拟电路和数字电路。模拟电路的发明和应用，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技术也比较成熟。每部电子计算机均配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故障检测。高集成度的电子计算机，完全依靠传统的人工进行故障检测，已经不现实了。

模拟电路的使用虽然由来已久，但模拟电子故障诊断技术却发展较慢，其原因主要有：由于模拟电路的多样性，且模拟电路的物理量是连续函数，因此模拟电路的电量模拟困难，而且模拟的模型适应性有限；电子电路的元件都有容差，它引起的电路工作特性的偏移，使许多模拟电路诊断方法失去准确性和稳定性，增加了故障诊断的困难；非线性问题的求解比较困难，通常要用迭代法计算，其计算工作量大；由于现代电子电路通常是多

层的或被封闭的，特别是集成电路只有少数一些可及端口或节点是可测量的，仅通过这些节点或端口的测量，要反映电路内部各种故障是十分困难的。

1.1 故障诊断的基本概念

1.1.1 电子电路的故障及其规律

电子电路是由具有特定功能的电子元件组合成的，其中每个元件都有自己特定的作用。如果某个元件损坏，电路的功能必将发生变化。我们将电路系统丧失规定功能的现象称为电路故障。电路功能的变化必然伴随电路参数的变化，根据电路参数变化来辨别电路故障的过程，称为电子线路故障诊断。故障诊断的过程，实际上就是从故障现象出发，通过反复测试，做出分析判断，逐步找出故障的过程。

1. 电子电路故障分类

故障可以按不同的原则进行分类。对于电子电路来说，按故障的程度可以分成软故障和硬故障。软故障又称为渐变故障或部分故障，指元件参数超出容差范围而造成的故障。这时元件功能通常并没有完全丧失，而仅仅引起功能的变化。例如一个 5.6 kΩ(1+ ±5%)的电阻，其实测值为 6 kΩ；一个漏电流不许超过 10 μA 的 6 μF/12 V 的电解电容器，实测漏电流为 150 μA ，都可以认为是软故障，因为它们并没有导致电路功能的完全丧失。当然，软故障有时是可以容忍的，有时则是不许可的，特别是处于电路关键之处的元件。对软故障，通常除了要判定故障元件之外，还应计算元件参数对标称值的偏离量。硬故障又称为突变故障或完全故障，例如一个电阻阻值变得特别高以至开路；一个二极管阳极与阴极短路等。这样的故障往往引起电路功能的完全丧失、直流电平的剧烈变化等现象。对这种故障，通常只要判定故障位置即可。

按故障存在的时间，又可分为永久性和间歇性故障。永久性故障是指，一旦出现就长期存在的故障，在任何时刻进行检测均可检测到。间歇性故障是指，在某种特定条件下才出现的或随机性的、存在时间短暂的故障。由于难以把握其出现的规律与时机，这种故障不易检测。

按同时出现故障的数量又可分为单故障和多故障。若某一时刻仅有一个故障，称为单故障；若同时可能发生若干个故障，则称为多故障。通常诊断多故障比诊断单故障更为困难。

2. 电子电路故障规律

研究电子电路的故障，就是研究故障出现的客观规律，分析电子电路发生故障的原因，以便进一步提高电子设备的可靠性和可维修性。每一台设备出现故障虽然是个随机事件，是偶然发生的，但是大量产品的故障却呈现出一定的规律性。从产品的寿命特征来分析，大量使用和试验结果表明，电子电路故障率曲线的特征是两端高，中间低，呈浴盆状，习惯称之为“浴盆曲线”,如图 1.1.1 所示。

从曲线上可以看出，电子设备的故障率随时间的发展变化大致可分为 3 个阶段：

(1) 早期故障期。早期故障出现在产品开始工作的初期，这一阶段称为早期故障期。在此阶段，故障率高，可靠性低，但随工作时间的增加而迅速下降。电子设备发生早期故

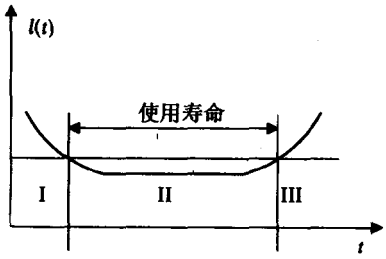

图 1.1.1

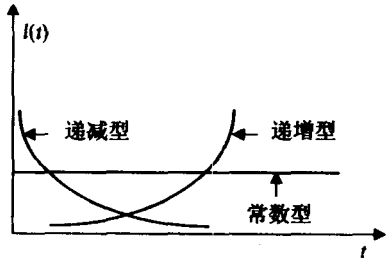

图 1.1.2

障的原因主要是由于设计、制造工艺上的缺陷，或者是由于元件和材料的结构上的缺陷所致。

（2）偶然故障期。偶然故障出现在早期故障之后，此阶段是电子设备的正常工作期，其特点是故障率比早期故障率小得多，而且稳定，故障率几乎与时间无关，近似为一常数。通常所指的产品寿命就是指这一时期。这个时期的故障是由偶然不确定因素所引起的，故障发生的时间也是随机的，故称为偶然故障。

（3）耗损故障期。耗损故障出现在产品的后期。此阶段特点刚好与早期故障期相反，故障率随工作时间增加而迅速上升。损耗故障是由于产品长期使用而产生的损耗、磨损、老化、疲劳等所引起的。它是构成电子产品元器件的材料，长期化学、物理不可逆变化所造成的，是电子设备寿命的“终了”。上述是大量电子设备的统计规律。对于实际电子产品不一定都出现上述 3 个阶段。“浴盆曲线”也可看成是在成批电子设备中，有些电子设备故障率曲线是递增型、有些是递减型，而有些是常数型，宏观表现出来的是 3 种故障率曲线叠加而成的，如图 1.1.2 所示。

1.1.2 故障诊断的基本概念

故障诊断学科由故障诊断理论和故障诊断技术两部分组成。故障诊断理论主要研究故障诊断方法和被测对象的可测试性。故障诊断技术主要研究故障诊断实现手段。本书主要讨论故障诊断技术的基本问题。

1. 故障诊断方式

就被测对象与诊断装置的关系而言，有主动诊断与被动诊断之分。由诊断装置向被测试对象发出激励信号，同时测量被测试对象对激励的响应叫主动诊断。被测试对象本身可以发出信号，诊断装置只是采集这些信号的诊断叫被动诊断。按实施诊断时被测试对象是否工作，可分为在线诊断与离线诊断。按实施诊断时被测试对象的工作状态，可分为动态诊断与静态诊断。前者指诊断时对象处于动态过程中，后者是指诊断对象处于某种稳定状态。按被测试对象的性质来分，有数字电路故障诊断与模拟电路故障诊断（由于这两种电路有不同的特点，其诊断方法有很大的差异）。如果就故障诊断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）两大类。

2. 故障诊断方法

（1）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见的一种方法。该方

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

法的思路是预先模拟（这里的模拟，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。

故障字典法属于 SBT 类型，是一种适用范围很广的故障诊断方法。它不仅适用于电子或电气系统，也适用于诊断非电类设备的故障，甚至适用于诊断人的疾病，只要能获得清楚而且确定的征兆，以及征兆与故障原因或疾病之间的关系，都可以用故障字典法进行诊断。

若被测对象可能发生 n 种故障(相当于 n 个模式类 $s_1, s_2, \cdots, s_n$),它有 m 个征兆或特征($k_1, k_2, \cdots, k_m$),并定义特征向量 k_j 为

$$k_j=\begin{cases}0 & \text{第 } j \text{ 个征兆不出现}\\ 1 & \text{第 } j \text{ 个征兆出现}\end{cases}$$

其中：$j=1, 2, \cdots, m$；$k=k_1, k_2, \cdots, k_m$。

当已经知道存在第 i 个故障，即已经知道 $s_i=f_i(k_1, k_2, \cdots, k_m)=f_i(k)$ 时,哪些征兆出现，哪些征兆不出现，就可以按实际观察到的征兆特征判断故障原因了。上式中 $f_i(k)$为各种特征的布尔表达式，将上式表示成表格的形式，就是故障字典。

故障字典应在故障发生以前就已完成。为了建立故障字典，首先应预定故障类型，再用电路分析程序，进行电路仿真，将计算所得的节点电压值 VT 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。被测电路在自动测试系统的控制下，选择恰当的激励和必要的测试点，将测得的节点电压 VM 送往电子计算机。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，做出判断，并予以显示。

故障字典法只能机械地执行人们预先编写的程序，不能像医生一样具有演绎、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。故障字典法只在下列条件下适用：所考虑的故障只有有限个，而且都是已知的；故障是永久性的不是间歇性的；故障是单故障或硬故障。如果不满足这些条件，就会出现判断错误。例如，当用故障字典进行故障诊断时，系统发生了未曾预料的故障或多故障，使得特征值与故障字典中的任一行都不符合，则诊断后会误认为系统正常，这就是“失配”现象，是不允许的。

(2) 故障识别法。凡是通过测试，以识别网络的全部参数为目的，从而确定故障地点的方法，统称为故障识别法（也称为元件参数解析法）。故障识别法是通过解析分析，直接从网络响应与元件参数值之间的关系中求出元件的实际参数值。

事实上，响应与元件参数之间的关系，在很多场合下是完全有可能用解析函数来表达的。因此，在测试条件充分的情况下有可能不牵扯容差问题。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之间的关系中求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。给定了网络的拓扑结构及元件性质后，其外部特性完全取决于元件的参数值。故障识别法的基本出发点就是通过网络的外部特性与元件参数之间的解析关系来确定故障元件。即列出以元件参数为未知量的方程组，由该方程组中解出所有元件参数值，再参照元件容差确定故障元件。

故障识别法必须具有足够的独立测试点，才能把网络的全部元件值识别出来。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方程中解析出所有元件参数值时，从可解析性的条件出发，端口测试必须充分。当网络规模较大而可测端数较少时，往往不可能唯一地确定网络中所有元件的参数，这样也就无法诊断或诊断不全。实际上网络中经常出现的故障为数并不多，甚至只是极少数几个，如单故障，双故障等。网络中大部分元件都是无故障的，它们的实际值与其标称值比较接近，理想情况下便可以认为这些无故障元件的实际值就是它们各自的标称值。而且为了便于生产，电子设备测试点的设置也是有限的。所以，没有必要求出网络中所有元件的参数，而只需计算出故障元件的参数。显然，这时应用故障识别法就太不经济了。

（3）故障概率法。故障概率法又称为故障预猜验证法。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标称值。在此基础上，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，来判别上述预测是否正确。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)后才进行故障元件的定值。

大量事实表明，网络中所含的故障元件数并不多，在实际诊断过程中指出故障元件的位置是重要的，而元件数值并不十分重要。其余无故障元件的实际值可以认为就是其标称值。基于这样的认识，我们就可以通过对电路的分析，预测某几个元件作为一个假想的故障元件集，这时可使得测试点的数目减少。测试目标元件数减少，将简化整个测试过程。故障概率法，就是根据以往诊断结果所得的各元件的故障发生率的经验，再配合测试结果，从而确定各元件发生故障的条件概率。利用有限数量的测试，在满足一定目标条件下，隔离出最有可能发生故障的元件。其中故障概率最大的便是最可能的故障元件。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以事先离线完成。因此，一般微机便可胜任该方法计算任务。由于容差存在，非故障元件的实际值与标称值之间的偏差，往往并不很小，以致该方法诊断效果不够理想。

1.1.3 电子电路故障诊断

故障诊断过程，实际上就是从故障现象出发，通过反复测试，作出分析判断，逐步找出故障的过程。对于一个复杂的系统来说，要在大量的元器件和线路中迅速、准确地找出故障是不容易的。首先，要通过对原理图的分析，把系统分成不同功能的电路模块，通过逐一测量找出故障模块，然后再对故障模块内部加以测量，找出故障。这就是从一个系统或模块的预期功能出发通过实际测量，确定其功能是否正常来诊断它是否存在故障，然后逐层深入，进而找出故障原因并加以排除。电子电路故障诊断主要包含以下几个方面：

（1）故障检测。故障检测是指，为判断系统或设备是否有故障而进行的必要测试。电路功能的变化必然伴随着电路参数（电流、电压等）和元件参数的变化，所以电路参数的测试，是判断电路故障的基本工作。检测的顺序可以从输入到输出也可以从输出到输入。找到故障模块后，要对其产生故障的原因做进一步检查。

（2）故障定位。故障定位是指确定故障的具体部位。故障定位又称为故障隔离或故障诊断。通常做法是，把合适的信号或某个模块输出的信号引到其他模块上，然后，依次对

每个模块进行测量，直至查到故障模块为止。本书把故障诊断一词赋予更广的含义。

（3）故障识别。对于某些检测对象，不仅要确定故障部位，还要求对故障作进一步的描述，称为故障辨识。它包括故障参数识别和故障影响分析。例如对电 路故障的诊断，不仅要知道哪个元件出了故障，还要求知道元件参数的变化量。即使元件参数没有超出正常范围，知道了元件的实际数值，就可通过前后几次测量结果的比较，找出其变化规律以预测故障，做到视情维修，减少盲目性。

（4）连续监测。连续监测又称为状态监测。它可以连续地对被测对象的主要性能参数进行监测和记录，一旦发生故障就发出故障信号。连续监测通常只指出故障的性质而不能进行故障定位，但可根据连续监测记录的数据作进一步分析。

1.2　电子电路通用故障诊断方法

这里所讨论的电子电路故障诊断方法，其基本过程可分为以下 4 个主要步骤：分析故障症状、找出故障范围、查找故障电路、确定故障位置。本书以后几章将主要讨论这 4 个步骤在电子电路故障诊断中的应用。在详细讨论之前，让我们首先考察一下每步应当做些什么。

1.2.1　故障症状分析

分析故障症状，首先必须知道正常设备应该如何工作，从而当设备工作不正常时，能够识别出来。大多数电子设备都有一些操作控制装置、显示仪器或评价其性能的辅助装置。例如，电视机有操作控制旋钮、显像管和喇叭，异常的症状就是从这些指示器中得到的。分析故障症状并不意味着用螺丝刀和焊接工具打开设备，也不意味着要用测试仪器。换句话说，为了有条理地查找故障，必须具有预先判断功能范围和各种症状间相互关系的能力，用视觉或听觉来判断显示器所指示的性能是否正常。

1. 确定故障症状

当电子设备不能工作时，识别故障并不是一件困难的事。例如，当电视机插上电源，开机后没有图像，没有声音，同时指示灯也不亮，这是一种明显的故障。若设备仍可工作，但不能完成正常的功能，问题就不同了。再举一个电视机的例子。开机后图像和声音都有，但图像质量差且有嗡嗡声，这种情况下识别故障就不那么容易了。确定故障症状中的另一个问题是使用人员操作不当。对复杂的电子设备，操作人员通常须进行训练，并通过考核，而家用设备做不到这一点。不管是什么设备，都存在操作人员使用不当的问题。因此，首先必须知道设备在正常情况下是如何工作的，应如何正确操作和控制设备，从而确定故障的特征。

2. 故障症状的识别

故障症状的识别是分析电子设备工作正常与否的一种技术。故障症状是设备特性的改变或偏离。例如，对于通信设备，压下 PTT 键，面板上的表头应指示出有高频输出。如果没有高频输出指示，由于与所期望的特性不一致，则可确认这是一种故障症状。假设由于接收条件或天线原因，通信机接收性能差，接收机没有足够的增益以产生好的输出，则可能错误地认为这是一种故障症状。接收差（对于在这种条件下工作的特定设备）并不是不正

常现象，也不是设备性能发生了不期望的改变。

识别电视机的故障症状也是类似的。例如，工作正常的电视机图像清晰，集中于屏幕上的垂直和水平边框中。如果图像发生垂直方向的滚动，由于这不符合正常特性，所以可认为是一种故障症状。假设图像信号微弱，比方说该地区广播信号差或天线有故障。这种接收条件下，若接收机高放、中放级，不能提供足够的增益，以保证图像质量，则可能错误地认为这是一种故障症状。图像质量差（对于在这种条件下工作的特定电视机）并不是工作不正常，也不是电视机性能发生了不希望的变化。

3. 设备故障与性能下降

设备故障表示整个设备或设备中某些功能块不能工作。例如，通信设备收不到图像(所有控制旋钮的操作都正确),只是设备的喇叭有声音(背景噪声),这就是设备故障。设备能工作但达不到正常性能，这称为设备性能下降。如设备仍能工作，但喇叭中有交流声，这就是性能下降。应当注意，数字设备一般没有性能下降的问题。换句话说，数字设备一旦发生故障，就会完全失灵。但数字设备的故障也可能是断断续续的。

4. 故障症状的评价

故障症状评价是对故障准确描述的过程。许多故障都可能有类似的症状，因此，原始故障症状的识别并不能提供足够的信息来确定故障的真正原因。评价故障症状一般可以通过操作与故障有关的控制装置并利用设备说明书提供的信息来进行。通过有些故障症状的评价可以明显地确定故障范围。例如，在查找电视机场电路的故障时，如果问题仅出现在一个频道上，高频头是可能出现故障的地方。这类故障症状称为明显的故障症状。有时确定故障的过程并不总是明显的。例如，在查找电视机故障时，水平扫描电路故障将是一个特别的问题，它可能是高压变压器、行输出级、行振荡级等故障造成的。这类症状则称为模糊故障症状。

2.2 确定故障范围

大多数电子设备都可以分为若干单元，每一单元都有确定的功能。确定故障范围就意味着确定故障实际上出现在哪个功能块。为了有条理地查找故障，必须预先判断功能块和各种症状之间的相互关系。这一工作涉及到图的应用，这些图包括功能方框图、电路原理图和印刷电路板元件布置图（或者接线示意图）。功能方框图给出电子设备中电路的功能关系。这是故障分析的主要信息来源。电路原理图给出电子设备中所有部件及其功能关系。由于电路原理图给出的与特定故障症状不直接有关的信息太多，在确定故障范围过程中不是很有价值。但是，在确定故障位置，或当没有功能方框图时，电路原理图仍然是十分有用的。印刷电路板元件布置图（或者接线示意图）给出电子元件间的实际关系，及其在设备中的具体位置。在确定故障范围时不怎么有用，而在故障定位和排除故障时最为有用。确定故障范围时，可以按以下步骤进行。

1. 外观检查

判断故障位置的第一步是对设备做彻底的查看。要检查被烧坏的保险丝、失效或变色的元件、断开的电线、断裂的印刷电路连接导线、冷焊点、发出异常气味的变压器、腐蚀现象、过热的元件和漏电的电解电容器。换句话说，要寻找不十分正常的任何元件。通过彻底的外观检查，往往能看出足以值得注意的故障。如果没有发现什么异常情况，通过全面

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

的直观检查也可以熟悉所有部件的位置。

2. 电源状态和静止状态

电源状态的检查，应针对工作在正常负荷下的所有电源。它们的电压电平应正常,即使必须切断电源输出而插入一个假负载，也应在负荷状态下检查电源。有时，寻找不明确的故障往往要浪费许多时间，而问题却出自有故障的电源。

对于模拟设备或数字设备的模拟部分，应检查模拟电路的静态，即设备已通电但无信号输入的状态。因为若静态不正确，信号将不能被适当处理。数字设备常常可以在复位状态下进行检查，观察它的初始状态是否正确。

3. 故障电路分割

基本分割技术利用方框图或电路原理图把故障确定到某一功能区。分割技术（有时称为‘正常输入／不正常输出’技术)提供了一种手段,以便把故障范围缩小到某一电路群,然后再到某一电路。症状分析和信号跟踪法可与分割法一并使用，也可作为分割技术的一部分。分割技术应从寻找合适的分割点入手，在方框图或电路原理图上确定一个正常输入点和不正确输出点。分割点可记在心里，也可用铅笔标出，视方便而定。无论采用什么方法，选择合适的分割点然后进行测试，就可知道故障是否出在这两个分割点间的某处。分割点往往需要改变，移动分割点的目的是经过最小次数的测试以确定故障位置。每次改变一个分割点（可以是正常输入点，也可以是不正确输出点），然后进行测试，确定故障是否出在划出的分割范围内。不断进行这一过程，直到找到故障出在某一电路群为止。分割技术的关键是找出合适的分割点，这取决于根据故障症状和对设备的了解而做出的推论。

当可能有故障的电路群不止一个时，应首先从哪个电路群入手是分割技术的一个基本问题。决定这个问题时，应考虑下列因素。作为一种惯例，当某种测试可排除多个电路或电路群的故障问题时，这一测试就应在只能排除一个电路故障的测试前进行。要作到这一点，需要研究电路方框图和电路原理图，且应具有正确操作设备方面的知识。在作判断时，当然还需要用到逻辑推理的方法。

选择便于测试的位置是下一个需要考虑的因素，原则上测试点可以是线路中任何节点。通常测试点选择在一个便于接近的插孔（如在底盘上部）、插头，或一些重要的工作电压点或电路信号连接点（直接连接或通过开关连接的点）。另一个要考虑的因素是过去检修经验和设备的故障记录。经验因素可帮助决定首先测试哪一个电路群。相同或类似设备的故障检修记录和故障概率分析，对第一测试点的选择有一定的帮助。此外，对类似设备的检修经验也可能简化故障检查工作。当然，不管在检修设备方面有何经验，都必须对与故障症状有关的所有电路群进行检查。任何一个有实际检修经验的技术人员都知道，确定故障范围的过程很少是按教科书上给出的模式进行的。维修手册中所列出的许多故障在检修的设备中可能从未出现过，而且故障并不是千篇一律的。在某些查找故障的情况下，有可能需要修改检修程式。

4. 部件交换

将好的印刷板或组件、元件换到系统中以确定故障的方法称之为部件交换法。当电路中有可替换部件时，确定故障范围的过程与上述的方法有所不同。现今电子设备趋向于采用可替换部件的结构，如印刷电路板可用插头插入，或用少量的焊点接入。检查这样的设备，可顺序替换组件或电路板，直到查清故障在哪一部件为止。

例如，更换音频部件后设备恢复正常，则故障出在音频部件上。这一结论可通过重新插入有故障部件的方法来加以证实。虽然这种证实方法理论上不能算作检修方法的一部分，但它是一种实用的检查方法，这一方法在有接插件的设备中显得尤其重要。值得注意的是，这种设备常会发生接插件和插座间接触不良的故障。由于组件没有必要完全按功能模块来划分，所以故障症状与组件可能没有直接关系，在这种情况下，进行组件更换之前应研究设备的说明书，按照说明书所提供的建议去做。当然，如果没有可供更换的备件，就应该通过测试来确认组件的好坏（以便定购好的组件）。另外，设备中的控制和连接电路通常不做在可更换部件上，因此，对这些部分应单独测试。

当设备需要迅速恢复工作时，替换已经失效的部件是可行的有效的方法，它能使现场维修工作时间缩到最短，然后在某个时候从容地找出故障部件中的故障元件。部件交换法用于快速诊断，已为大多数人接受和采用。但是作为主要的故障诊断步骤，此法的代价较高，有时许多好的部件在替换接入通电的故障设备时，会遭到致命的损坏。值得注意的是许多电子设备不允许带电拔插，尤其是计算机系统带电拔插部件可能会造成致命的故障。

1.2.3 查找故障电路

故障诊断的前两步（症状判别和确定故障范围）提供了初步的故障症状信息和查找可能产生故障的功能块的基本方法。前面两步很少涉及使用仪器的问题，在查找具体的故障电路时，将大量使用测试仪器。

1. 查找故障电路时各种图表的应用

不管查找电路故障的过程如何安排，所遵循的原则是相同的，即通过逻辑判断和合理测试，不断缩小故障范围。这一过程将会减少测试工作量，因而节省了时间，同时减少了失误。由于方框图表明了各电路模块所处的地位，因此，方框图是查找故障的一个方便工具。遗憾的是，有些维修说明书并没给出方框图，这样，就必须会用电路图进行检修工作。无论用哪种图，如果能识别电路组和单元电路，则诊断工作就会十分容易。如果所检修的设备的电路图分成电路组而不是单元电路，则通过对电路组的输入和输出进行一次测试就可以判定电路组的故障。

一般而言，无论怎样对设备进行排列，总是要寻找 3 个主要信息：信号路径、信号特征（波形、幅度、频率等）和沿信号路径各电路的调节和控制装置。如果知道观察的信号有什么特征，经过哪里，是如何受控制影响的，那么，就能在电子设备中快速诊断故障。由于大多数通信设备所用的信号都是正弦波（音频、中频和射频），所关心的是信号的幅度和频率，波形一般是无关紧要的（音频级可能除外）。大多数通信设备的技术文献中，幅度和频率的信息可在调试说明中找到。 而电视机和与之类似的设备，波形则是十分重要，通常在电路图（或方框图）上都标有波形。另外，当你把各单元电路排列成功能块后，下一步应是找到所有操作与调节部件的位置，这些控制装置总是在电路图中标出，但方框图中不一定标出。

2. 电路测试的主要方法

（1）从后向前法。从后向前法仅仅意味着在进行动态测量时从输出部分着手，如图 1.2.1 所示。随后，向输入端方向进行检查，直到发现正确的信号（对数字设备则为代码），这时下一级电路就可能是有故障的电路。

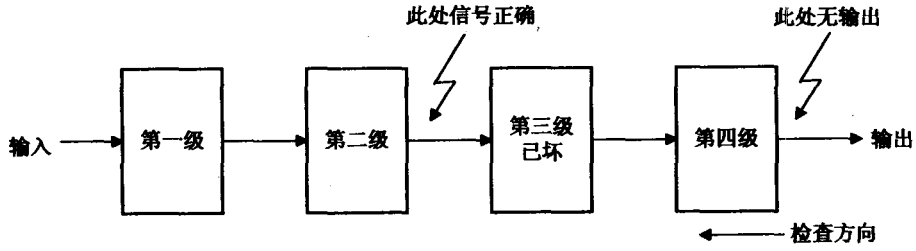

图 1.2

(2) 信号注入法。当一个有故障的电路影响到前一级的输出或使设备没有正常输入时，故障查找必须用函数信号发生器将信号注入该设备，这个信号应尽可能与正常信号接近。当所测电路需要一个叠加在直流电平上的交流信号时，应使用函数信号发生器上的位置控制器，以便提供一个有限的直流电平。如果直流偏置调节范围不够大，可以利用分压器和电容器来获得所需的直流偏置，如图 1.2.2 所示。

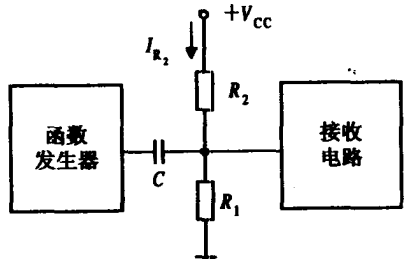

图 1.2.2

(3) 一半分开法。一半分开法是指在一个有许多级的复杂电路的中点处检查其输出，并依次在每次余下的电路级的中点处进行检查。例如，假设一个 8 级电路在第 5 级有故障，为了弄清楚第 5 级有故障，应采取以下步骤 在检查电源之后，应首先检查第 4 级(整个电路的中点)的输出。若发现第 4 级输出正常，则应检查第 4 级和最后一级之间的中点，即第 6级的输出。在本例中，第 6 级的输出应是错误的。现在应检查第 4、6 两级之间的电路的中点，即第 5 级的输出。检查结果应是错误的，所以故障显然发生在第 5 级。此法最适用于各级独立串联的设备，如无线电接收机和发射机。

(4) 断开环路法。具有反馈环路的电子系统除非将环路断开，否则便很难找出故障。而且必须在反馈环路断开的地方注入适当的直流电平或信号，然后监测整个电路上的电压和信号是否有错误。可以改变在环路断开点注入的电压或信号，以检查对整个电路的变化是否有适当的响应。在正常情况下，环路应在便于注入低功率信号的地方断开。图 1.2.3 示出该方法用于锁相环电路的方框图。在断开该环路之前，要检查电源和基准振荡器的输出是否正常。如果 f_0 不正确或不稳定，甚至没有，我们就知道 VCO(压控振荡器)出了故障。

(5) 隔开法。复杂系统一般都是由逻辑子系统设计而成的，整个系统可能太复杂而不能立即确定故障，但是每个子系统通常可以独立采用前述方法之一来检查。当发现有故障的子系统后，该子系统又可以采用前述的方法来查找具体的故障。所有子系统故障确定后，整个复杂系统的故障也就确定了。

(6) 与已知的正常电路比较法。为了识别错误的输出，将它与能正常工作的电路输出进行比较，或将输出与维修手册中的波形（位组合形式、状态序列、存储器映像图或数字设

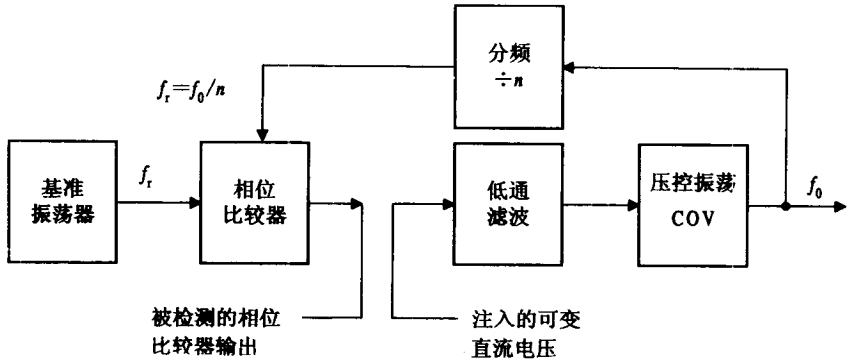

图 1.2.3

备的时序图）作比较。如果没有给出正确输出的文件，以及缺乏确认输出的经验，则应将得到的输出同相似的，能正常工作的装置的输出作比较，以决定设备是否完好。这种方法对数字设备和以微处理器为基础的设备特别有价值。

3. 信号和波形的比较

查找故障电路的最简单的方法之一，就是将电路中信号路径上的实际信号或波形与设备说明书给出的标准波形相比较，通常称为信号跟踪法和信号替代法。信号跟踪法和信号替代法是各类电子设备的故障查找中最常用的技术。选用哪种技术，应视测试设备的性能和所测电路的特点而定。

信号跟踪法用监测装置考察各测试点的信号。监测装置包括频率计、示波器、万用表或喇叭。进行信号跟踪时，首先应在一固定点上加入信号，信号可用外部仪器产生，也可利用设备中的正常信号。然后用监测装置的输入探头，在测试点上逐点测量。信号跟踪法多用于振荡器、频率合成器、发射机和高频放大器。因为这些电路产生和放大信号，所以便于跟踪，无需替代。

信号替代法将信号发生器产生的仿真信号加到电路或电路组的各测试点上，而在一固定点上加入监测设备。监测设备可以用专门的测试仪器，如示波器、毫伏表等，也可用被测设备上的指示仪表，如 CRT、电压表等。进行测试时，注入信号点将依次一点一点地移动。信号替代法多用于接收机的高放、中放、噪声抑制、静噪和音频电路中。信号跟踪法和信号替代法在故障查找中常常被同时使用。

4. 集成电路和插接件设备中故障的查找

现今的电子设备中，集成电路被广泛使用。例如，在某些通信设备中，整个中放电路或噪声抑制放大电路仅用一块集成电路代替。在电视设备中，整个中频电路和视频电路也可以用一块集成电路代替。除变压器以外的所有部件都可以集成在集成块里，组件可以是插入的，也可焊在电路板上。在使用集成电路和可以更换模块的电子设备中，故障只能确定到组件或模块，不能确定到集成电路内的某一电路（或单个元件）。由于集成电路内的单个元器件不能更换，因而没有进一步检查集成电路内部故障的必要。固态密封电路组件和集成电路一样，多数只能整片或整个电路一起更换。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1.2.4 确定故障位置

故障诊断的最后一步，是确定故障位置。即借助于测试仪器对故障电路各个支路和节点进行测试，识别和确定故障直至查出有故障的元器件。

1. 直观检查

查到故障电路后，确定故障的第一步是凭直觉来进行一次初步检查。例如，电阻或有填充物（油或蜡）的元件，如电容、线圈和变压器等，可用视觉和嗅觉查到。元件过热，如晶体管的管壳发热，可以利用触觉很快查找出来。听觉也可用来检查导线与导线之间，导线与机壳之间的高压打火，听变压器有无交流声也是一种检查变压器过载的方法。

2. 电路测试

（1）波形测试。电路测试的第一步是分析电路或有源器件的输出波形，如对波形幅度、持续时间、相位和形状进行的分析，对波形的细心分析常常可以正确地指出有故障的支路。故障症状和波形有一定关系，电路完全毁坏时，通常会导致无波形输出，电路性能差会导致波形差或失真。通常电视机维修说明书（以及其他设备的维修说 明书)所给出的波形只能与实际波形相近似，且用不同的示波器进行测量，也并不能显示出完全相同的波形。另外测量时，常常在工作电路中加入输入信号，该信号来自外接信号源或某些形式的替代源（电视广播信号或另一通信设备发射的信号）。如果使用维修手册给出的波形作为标准，应留意按手册规定的方法进行工作，通常手册中已标明信号输入位置，典型信号的幅度等。

（2）电压测量。在进行了波形分析之后，下一步是在有源器件的节点上进行电压测量。在波形不正常的地方，测量应特别留心，在这些地方大多数情况下电压都不正常。说明书或电路图会给出有关电压信息，这些信息包含控制位置、典型电压值等。在某些设备的维修说明书中，电压和电阻的相互关系及其实际位置是画在一起的，测量时要找出准确测量位置。将实际测试的电压值和说明书给出的正常值相比较，有助于找到有故障的支路。为了安全起见，测量前应将电压表量程置于最高档。因此，应首先测量高电压端，依电压高低顺序进行测试。测量集成 IC 时，常常并不需要测量各引出脚的准确电压，只需要知道各引出脚的相对电压。而管脚的相对电压值只能通过对电路图的逻辑分析得出。例如， NPN 晶体管中，当集电极与发射极之间有电流流过时，基、射极间应为正向偏置， $u_{BE}=0.6$ V 左右。

进行电压测量时（电阻及波形的测量也一样），要得到与说明书中一样的值是很困难的。这就提出一个电压测量中会涉及的重要问题：应与标称值接近到什么程度？回答这个问题时应考虑如下因素。①电路中影响电压读数的重大因素是电阻，其误差可能是 20%、10%或 50%，某些关键电路中电阻的误差小于 1%。因此，元件上的容差标记和色码是同等重要的。②晶体管的特性有相当宽的变化范围，因此也是造成测量值与标称值误差的重要因素。③多数电压表的精度在(5～10)%之间，精密实验室用的仪表有更高的精度，所以测试仪器的精度也应考虑。④电源电压误差会影响电压测试精度，通常许多电路的电源电压误差在 20%～30%以内就能工作，但是有些关键电路可能要求供电电压误差很小（在 10%以内)。所以先测试电源电压,并作到心中有数是重要的。

一般讲，引起电路性能超出容差的这类故障可能只引起电路电压的微弱变化，所以仅

进行电压测量可能解决不了问题

(3) 电阻测量。除非已用波形和电压测量方法找到了故障位置，否则下一步要进行的工作是测量电阻值。做完波形和电压测量之后，在有源器件的相对点上进行电阻测量常常有助于查找故障，可疑元器件常常通过电阻测试或对可疑支路点与点之间的电阻测量而被发现，特别是当发现该点波形和电压不正常时，更是如此。

电阻测量应在不加电压状态下进行，可以测量有源器件各引出脚对地（或机壳）的电阻，也可以测量电路中任何两点之间的电阻。对于可变电阻的测量，应将其置于某一特定的位置，这时所测的读数才可能与说明书所标示的读数近似。所以在测量可变电阻时，位置一定要调准确。在进行固态电路的电阻测试时，应特别细心。三极管的 PN 结相当于一个二极管。当 PN 结上加正向偏压（用欧姆表电池）时，二极管导通，测量到的是正向结间电阻。

测量任何电路中的电阻之前，应检查一下滤波电路是否已放电，并在严格地按照安全规程操作的前提下，遵循说明书中所给出的各种要求进行。

1.2.5 故障消除

严格地讲，故障消除不是故障诊断的一部分，但消除故障是使设备恢复正常工作所必需的。替换一个器件时，如有可能，新器件的性能应与原器件完全相同。如果做不到这一点，并且原器件难以修复时，可用等效器件或性能更好的器件代替。注意，在高频、中频和视频电路中，改变器件的位置可能使电路失调。所以应该按原样、原位置、同样的引线长度来替换原故障器件。如果此故障是二次性的，在没有找到产生故障的根源之前，决不要匆忙更换器件，最好在第一次更换器件时就能确切地找到故障的根源。但是这并不总是现实的，例如电阻由于瞬时短路而被烧坏，那么，当消除了短路的根源后，下一步就可以更换电阻了。但这种短路可能再次发生而烧坏更换后的电阻，如果这样，就必须重新检查电路各个器件和相应的引线。

1.3 故障诊断中应注意的事项

1.3.1 测试时应注意的问题

1. 探头接地点

将测试设备的探头接地点尽可能地靠近信号的被监测点，有助于保证故障现象就是实际上存在的现象。例如，图 1.3.1(*a*)所示为将示波器地线接到小型计算机机架上的时钟脉冲的波形，图 1.3.1(*b*)则为将探头地线接到时钟脉冲发生器输出端附近的印制板上时，同一示波器上的显示。时钟脉冲是完好的，但图 1.3.1(*a*)中波形的前后沿容易使人产生误解。

2. 静电感应

当使用金属一氧化物一半导体(MOS)集成电路时，要使用专门的操作工具。如果没有专门的工具，则在更换 MOS 器件之前，将工作表或设备机架接地，并将手腕用导线连接到一个高阻(典型值为 1 MΩ）地线上。应小心不要使带静电的电路引出线接触身体，否则将

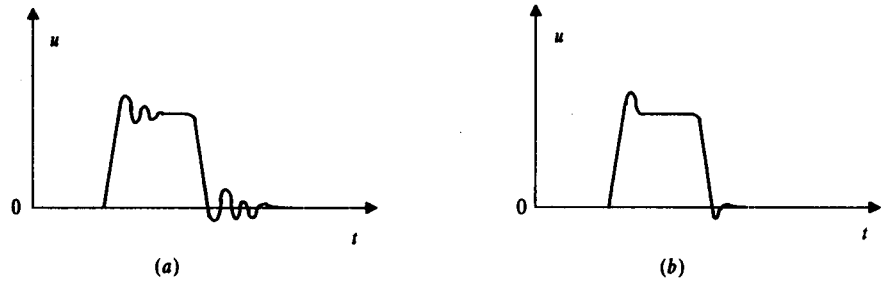

图 1.3.1

可能损坏集成电路。人体在直接接触 MOS 器件之前，必须先与良好的地线接触，否则人体的静电会使 MOS 器件很薄的隔离栅断裂。带保护的 CMOS 器件不太容易遭受静电电压的击穿，不过仍应小心对待。如果人体上的静电荷量足够大，甚至会损坏带保护的器件。

3. 通电顺序

在许多设备上，电源通电的顺序是很要紧的，尤其是利用互补金属一氧化物一半导体(CMOS)集成电路电源时更是如此。CMOS 器件中的 N 沟道和 P 沟道场效应晶体管(MOS-FET）内装有一个附加的可控硅整流器(SCR)，如果通电顺序错误，SCR 可能锁死或损坏，也许还会损坏其他设备。所以，在查找 CMOS 设备的故障时，不要忘记检查电源通电的顺序。

，使用数字设备工作时，如有可能应采用手动单步方式，逐步使设备从一个状态进入下一个状态 。单步方式对故障的查找有极大的帮助，因为可以用万用表或示波器将各个点的状态（高电平或低电平）与所希望的状态进行比较。否则，状态将变化得太快，以至不用逻辑分析仪就不能加以监视。

4. 接地回路

模拟和数字设备中的噪声问题可能是设备的地回路不良所致。图 1.3.2 示出当两个子系统之间没有地线时，示波器上一个信号的外形。所以应检查接地电阻和接地阻抗。

最后一点注意事项：弄脏的或经氧化的印制电路板触点会造成许多问题，对触点的日常清洁能预防问题的发生。

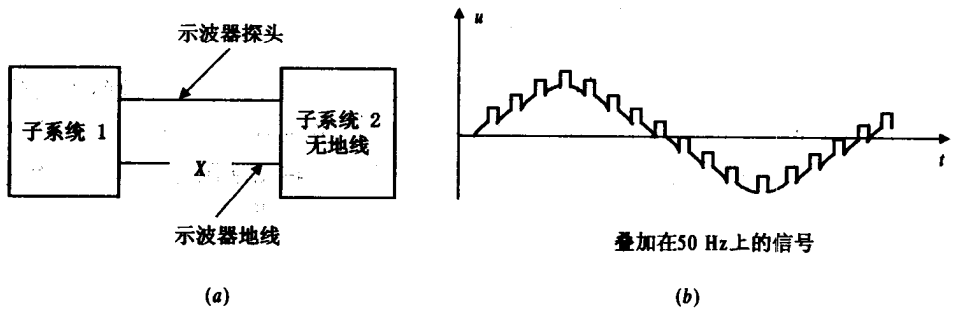

图 1.3.2

1.3.2 测试的安全防护

除了常规操作程序外，在操作任何电子测试设备期间必须建立某些预防措施。许多预防措施对于各种类型的测试设备来说都是相同的。一些预防措施用以防止故障检测操作中测试设备或被测电路的损坏，另有一些用以防止人体受到伤害。下面是一般的安全防护措施，应予以注意。

(1) 在有 CRT 显示器的设备中最危险的部分是视频终端 CRT 的高压。一般地说，CRT 阳极电压大约为 1000 V／英寸①,故一个 9 英寸的 CRT 阳极电压大约为 9000 V。所以阳极电压（及与其有关电源）的测量应采用屏蔽的高压探针。

(2) 设备的电源输入电压一般为 220 V。尽管为了 IC 的使用，此电压常常被降低 5 V 或 6 V，然而电源线仍工作在 220 V 线电压上。此电压足以造成人员伤亡。

(3) 大多数测量仪器都罩在金属壳内，这些外壳与内部电路的地相连。为了进行检测工作，仪器的接地端一般应该与正在维修的设备的地相连，但是有些设备的电源没有隔离变压器，其底盘和外壳可能与动力线高于“地”的某一电位相连。这时要通过隔离变压器把待维修的设备与电源线隔离开来。

(4) 维修带有高电压的设备时，在危险电压（比如，CRT 使用的高压）上操作总是有危险的。特别是，当拆开设备外壳并重接电源电缆时更危险。因此，在对这类设备进行维修之前，总要尽力熟悉它。特别是在有故障的设备中，高压可能出现在未曾预料的某些点上。工作时保持一只手操作，并站在适宜的绝缘地板上，可免除电击的危险。

(5) 在把测试引线与高压点连接之前，最好切断电源。事实上，在进行所有维修连接时也应事先切断电源。如果难以做到这一点，那么要特别小心避免探头意外接触到电路中的元件。甚至测试低压电路有时也会出现问题。例如，改锥掉在 5 V 线上可能会烧坏微机的主要部件，以致无法维修。

(6) 电容可能储存足以造成危害的电荷。在连接测试引线之前应使滤波电容放电。绝缘损坏的引线会在暴露点处形成意外的高压危险。工作之前，应检查绝缘磨损或断裂的测试引线。

(7) 为避免意外电击的危险，只能使用屏障的引线和探针，当探针接触“热”电路时，始终不允许手指滑向仪表探针尖上。测试完成后应立刻断开测试引线。

(8) 严重电击仅是可能造成的危害之一。有时甚至小的电击或燃烧会使你面临更严重的危险，如倒在或碰到较高的电压上。无经验的维修人员应时刻预防损伤，且不在危险电路上工作，除非在故障情况下另外有人协助。即便对故障检测的测试设备具有相当的经验时，还要对不完全熟悉的仪器维修说明书进行学习。在进行任何测试连接之前，应熟悉要维修的电路。尽力使测试仪器的能力与维修的电路相适应。

1.4 电子元器件的失效与故障分析

电子电路或电子系统主要是由各种元器件组成的，电子设备复杂程度的显著标志是所

① 1 英寸＝2.54 cm。

需元器件数量的多少。人们在故障诊断实践中发现，元件损坏的现象是多种多样的，但是造成损坏的原因主要有两个，一是不正常的电气条件，二是不正常的环境条件。优良的电气条件取决于电路的正确设计。假如元件能够工作在额定的电压、电流和功率范围之内，它的寿命可以延长。假如它过载运用，寿命必然会缩短。环境条件取决于元件周围的工作环境。高温，高湿，机械冲击和震动，高气压与低气压，空气中的尘埃和腐蚀性化学物质等，都可能影响元件的寿命。例如一个安装在连续热循环系统中的元件是很容易脆化的，如果再遇到机械震动就可能开路。为了减少恶劣环境的影响，我们应对电路结构进行精心设计，特别是当电子仪器工作在工业环境中，这一点尤为重要。元件损坏的另一种常见原因是高压启动脉冲或“尖峰信号”。它们是由电感负载接通而造成的，它很容易击穿半导体器件的 PN 结。而且电子电路的故障大约有 80%是硬故障，其中又有 60%～80%是电阻开路、电容短路以及三极管和二极管等引线的开路或短路等造成的故障。这样人们自然会想到，电子设备所用的元器件数量越多，其可靠性问题就越严重。为保证设备或系统能可靠的工作，对元器件可靠性的要求就非常高、非常苛刻，可靠性指标已经开始成为元器件的重要的质量指标之一。因此，元器件的可靠性是电子线路或系统可靠性的基础，了解元器件的可靠性，分析元器件的失效机理，是电子电路故障诊断技术的重要任务之一。

1.4.1 半导体器件失效机理

半导体器件的失效模式大致可划分为 6 大类，即开路、短路、无功能、特性劣化、重测合格率低和结构不好等。最常见的有烧毁、管壳漏气、管腿腐蚀或折断、芯片表面内涂树脂裂缝、芯片粘结不良、键合点不牢或腐蚀、芯片表面铝腐蚀、铝膜伤痕、光刻／氧化层缺陷、漏电流大、阈值电压漂移等。如果将器件品种按失效模式不同分类做出累积频数直方图，就能准确地找出主要问题并提出针对性改进措施。

按照导致的原因可将失效机理分为以下 6 种：

(1) 设计问题引起的劣化：指板图、电路和结构等方面的设计缺陷；

(2) 体内劣化机理：指二次击穿、CMOS 闭锁效应、中子辐射损伤、重金属沾污和材料缺陷引起的结构性能退化、瞬间功率过载等；

(3) 表面劣化机理：指钠离子玷污引起沟道漏电、γ辐射损伤、表面击穿(蠕变)、表面复合引起小电流增益减小等；

(4) 金属化系统劣化机理：指铝电迁移、铝腐蚀、铝划伤、铝缺口、台阶断铝、过电应力烧毁等；

(5) 封袋劣化机理：指管腿腐蚀、漏气、壳内有外来物引起漏电或短路等；

(6) 使用问题引起的损坏：指静电损伤、电浪涌损伤、机械损伤、过高温度引起的破坏、干扰信号引起的故障、焊剂腐蚀管腿等。

1. 各类晶体管的失效机理

各类晶体管与其失效机理的对应关系如表 1.4.1 所示。

2. 集成电路的失效机理

集成电路的失效机理与筛选项目的关系如表 1.4.2 所示。

表 1.4.1 晶体管失效机理

有对应关系 失效机理 / 管子类型	污染	体积	基片键合	倒置	沟道	参数漂移	粒子	气密性	基片破裂	封装缺陷	引线过长	外引线缺陷	引线键合	氧化物缺陷	金属化	第二次击穿
硅合金管	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓				
硅扩散管		✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
硅平面外延管		✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
锗扩散管	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
锗合金管	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
锗台面管	✓		✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	

表 1.4.2 集成电路失效机理

筛选项目 / 有对应关系 / 主要失效机理	高温储存	热冲力	反偏压	检漏	工作寿命试验	离心加速度	冲击	振动	温度循环	电测试	目测	X射线试验	高压试验	低压试验
划分错位					✓					✓				
表面或电阻率不均匀					✓					✓				
污　　染	✓		✓		✓				✓	✓	✓			
龟裂、刻痕、碎裂、针孔									✓	✓	✓			
纯化缺陷	✓				✓				✓		✓			
光刻清洗、切割不良	✓									✓	✓			
扩散掺杂控制不当	✓				✓				✓	✓				
金属化	✓				✓				✓	✓	✓			
芯片分选龟裂、碎裂		✓				✓	✓	✓	✓		✓			
芯片键合					✓	✓	✓	✓			✓	✓		
引线键合	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
密封不良或残存金属物				✓										✓
可伐玻璃封装龟裂、空洞	✓			✓					✓	✓			✓	
封装气体不当	✓		✓		✓				✓					
标记不对										✓				

1.4.2 电阻器的失效机理

电阻器在电子设备中使用的数量很大，而且是一种发热元件，由电阻器失效导致电子设备故障的比率也相当高，据统计约占 15%。电阻器的失效模式和原因与其产品的结构、工艺特点、使用条件等有密切关系。电阻器失效可分为两大类，即致命失效和参数漂移失效。从现场使用统计表明，电阻器失效的（85～90）%属于致命失效，如断路、机械损伤、接触损坏、短路、绝缘击穿等，只有 10%左右是由阻值漂移导致失效。根据现场使用失效情

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com