

U392/116

TN30/27

可靠性与环境试验参考资料(1)

半导体器件可靠性技术

王炫华译 关成勋 周 琥校

可靠性与环境试验编辑部

編 者 序

为了实现半导体器件的高可靠性，器件厂固然要熟悉整机厂对器件的技术要求，而至关重要的，是在器件的设计、制造、检验等每一过程都能认真考虑和确实保证器件的可靠性，以及有一套完整的质量管理系统。另一方面，为了实现系统的高可靠性，整机设计部门和生产厂亦应很好地熟悉器件的质量和可靠性水平，并在整机的设计中充分考虑工作环境对器件可靠性的影响。

本书就是基于这一目的，在参考美国军用手册 MIL-HDBK-217B 的基础上，结合日本的经验而编写的。内容共分五章：第一章，是通过器件的失效作定性和定量上的描述，来阐明半导体器件可靠性的特征；第二章，介绍器件的可靠性评价试验方法；第三章，介绍器件的质量保证系统；第四章，介绍各种半导体器件的可靠性数据；第五章，介绍器件在选择和使用上应注意的事项。

本书叙述比较系统、具体，并附有各种图表，以资说明。本书可供我国从事高可靠器件设计、生产、检验及整机设计、生产部门的工程技术人员、工人参考。

本书原版存在不少错漏，在编辑、审校过程中已尽量作了订正，但仍恐有不尽妥当之处。

在本书审校过程中，曾得到何国瑞、余宏达两同志的大力协助，特此致謝。

編 者

目 录

编 者 序

第一章 半导体器件的可靠性	(1)
1.1 半导体器件可靠性的特征.....	(1)
1.2 半导体器件的失效模式和失效机理.....	(2)
1.2.1 失效物理.....	(2)
1.2.2 失效模式和失效机理.....	(2)
1.3 失效分析.....	(5)
1.4 失效分布.....	(7)
1.4.1 可靠度函数.....	(7)
1.4.2 可靠性的概率分布.....	(7)
1.5 失效率预计.....	(11)
第二章 半导体器件可靠性试验方法	(20)
2.1 失效判据.....	(20)
2.1.1 失效判据的考虑.....	(20)
2.1.2 失效判据举例.....	(20)
2.1.2.1 晶体管的失效判据.....	(20)
2.1.2.2 数字集成电路的失效判据.....	(21)
2.1.2.3 线性集成电路的失效判据.....	(22)
2.2 可靠性试验方法.....	(22)
2.2.1 可靠性试验.....	(22)
2.2.2 可靠性试验方法.....	(23)
2.2.3 筛 选.....	(31)
2.3 加速寿命试验方法.....	(33)
2.3.1 加速寿命试验的基本想法.....	(33)
2.3.2 加速寿命试验示例.....	(34)
2.4 可靠性的抽样检验.....	(41)
2.4.1 抽样检验方法.....	(41)
2.4.2 失效率置信度的求法.....	(42)
第三章 半导体器件的质量保证	(43)
3.1 对质量和可靠性的考虑.....	(43)
3.2 半导体器件的可靠性设计.....	(43)
3.2.1 可靠性指标.....	(43)

3.2.2	可靠性设计的方法	(43)
3.2.3	设计评价	(45)
3.3	半导体器件的质量保证系统	(46)
3.3.1	质量保证活动	(46)
3.3.2	质量鉴定	(46)
3.3.3	批量生产的质量和可靠性管理	(46)
3.3.3.1	材料、零件的质量管理	(48)
3.3.3.2	生产线上的质量管理	(48)
3.3.3.3	成品检验及可靠性保证	(50)
3.3.4	出厂后的失效处理	(50)
3.3.5	可靠性数据的收集	(51)
第四章	半导体器件的可靠性	(53)
4.1	半导体器件的可靠性设计及生产工艺的特点	(53)
4.1.1	表面钝化技术	(53)
4.1.2	蒸电极及装架技术	(54)
4.1.3	封装技术	(55)
4.1.4	其他技术	(55)
4.2	硅二极管的可靠性	(56)
4.2.1	结 构	(56)
4.2.2	可靠性数据	(56)
4.2.3	使用硅二极管应注意的事项	(61)
4.3	硅小信号晶体管的可靠性	(61)
4.3.1	结 构	(61)
4.3.2	可靠性数据	(64)
4.3.3	使用硅小信号晶体管应注意事项	(64)
4.4	硅大功率晶体管的可靠性	(66)
4.4.1	结 构	(66)
4.4.2	可靠性数据介绍	(70)
4.4.3	使用硅大功率晶体管应注意的事项	(72)
4.5	线性集成电路的可靠性	(74)
4.5.1	线性集成电路的结构	(74)
4.5.2	可靠性数据	(76)
4.5.3	使用线性集成电路应注意的事项	(79)
4.6	TTL 电路的可靠性	(84)
4.6.1	结 构	(84)
4.6.2	可靠性数据	(86)
4.6.3	使用TTL 电路应注意事项	(90)
4.7	MOS 大规模集成电路的可靠性	(90)

4.7.1 结 构	(90)
4.7.2 可靠性数据	(91)
4.7.3 使用 MOS 大规模集成电路应注意的事项	(93)
4.8. IC 存储器的可靠性	(95)
4.8.1 结 构	(95)
4.8.2 可靠性数据	(97)
4.8.3 使用 IC 存储器时应注意的事项	(102)
第五章 使用半导体器件应注意的事项	(104)
5.1 半导体器件的选择	(104)
5.1.1 最大额定值	(104)
5.1.1.1 晶体管及二极管的最大额定值	(104)
5.1.1.2 集成电路的最大额定值	(104)
5.1.1.3 降额措施的考虑	(107)
5.1.2 封装的选择	(107)
5.2 机械操作上应注意的事项	(111)
5.2.1 引线成形和切断	(111)
5.2.2 器件在印制电路板上的安装	(112)
5.2.3 焊 接	(112)
5.2.4 清 洗	(114)
5.2.5 散热板的安装	(114)
5.2.6 器件的排列	(118)
5.3 电路安装方面应注意的事项	(121)
5.3.1 总的注意事项	(121)
5.3.2 防止噪声和浪涌电压的措施	(121)
5.3.2.1 噪声的种类	(122)
5.3.2.2 噪声源与信号线的耦合	(122)
5.3.2.3 消除噪声的措施	(123)
5.3.2.4 防止浪涌电压的措施	(124)
5.3.3 特性参数与可靠性的关系	(125)
5.4 其他注意事项	(129)
5.4.1 半导体器件的贮存方法	(129)
5.4.2 运输方面应注意的事项	(129)
5.4.3 测量和操作方面应注意的事项	(131)
附 录 半导体器件有关的可靠性标准一览表	(133)

第一章 半导体器件的可靠性

摘要：本章所述，是从可靠性的观点来看半导体器件的特征，以及掌握半导体器件可靠性的途径。此外，是从半导体器件可靠性的物理概念出发，说明失效模式、失效机理和有关失效分析的内容；之后，再根据数理统计的概念，对可靠性函数、概率分布等作一叙述。最后，是介绍失效率估计的理论和具体方法。

1.1 半导体器件可靠性的特征

从可靠性观点来看，半导体器件有下述特征：

(1) 半导体的表面态决定它属于典型的敏感型结构。因此，在制造过程中，不仅要注意微观的变化，而且还要对生产工艺进行严格的管理。

(2) 器件的可靠性取决于半导体材料、电极材料、封装材料以及各种材料的配合。

(3) 从薄膜、超精细加工的观点来看，主要应抓住金属化和键合等问题；从物理观点来看，微小物、薄膜等表面有时会表现出与材料内部不同的性质。

(4) 由于技术发展迅速，大多是采用新工艺研制新产品，并要求在短时间内提供产品，因此，往往不能照搬现有的器件可靠性数据。

(5) 半导体器件多采取大批量生产，因此，作为质量管理的一个基本环节，必须重视对产品非一致性的控制。

(6) 半导体器件的可工作时间，在本质上说是属于半永久性的，故从这一观点考虑，我们只是研究它的早期失效和偶然失效；但考虑到电极材料和封装材料等因素，

以及器件与使用环境不相适应的场合，又须研究由材料疲劳和材料物质迁移等所引起的磨损失效。

(7) 半导体器件的可靠性取决于器件的实装条件、使用条件、环境条件等因素，这是元器件的共性。此外，电压、电场强度、电流密度、温度、湿度、环境气氛、灰尘、机械应力、振动、冲击、射线、磁场强度等则是决定器件可靠性的应力因素。

晶体管、集成电路等半导体器件的可靠性，通常是用失效率来表示。所谓失效是指器件失去规定的功能。它不纯粹指破坏或完全失去功能；间歇失效和功能退化等也属于失效。此外，还有器件受工作条件影响的现场失效。所以失效不是单一性的问题。第二章介绍的可靠性试验，对失效判据下了明确的定义。但应指出，在实际使用时，失效的检测灵敏度和工作特性余量等有误差。

在正常情况下，电子元件和电子设备的失效率与时间的关系如图 1-1 的浴盆曲线所示。半导体的失效率可用威布尔分布曲线表示。当形状参数小于 1 时，属于早期失效。只要环境应力不是特殊情况，一般都能获得足够长的工作寿命。因此，对半导体器件而言，主要是解决早期失效期及偶然失效期的失效问题。在分析半导体器件可靠性时，除

可用数理统计方法外，还可以用物理概念来分析失效。总之，只要充分理解和有效使用失效物理和数理统计这两种方法，就能有效地提高可靠性。

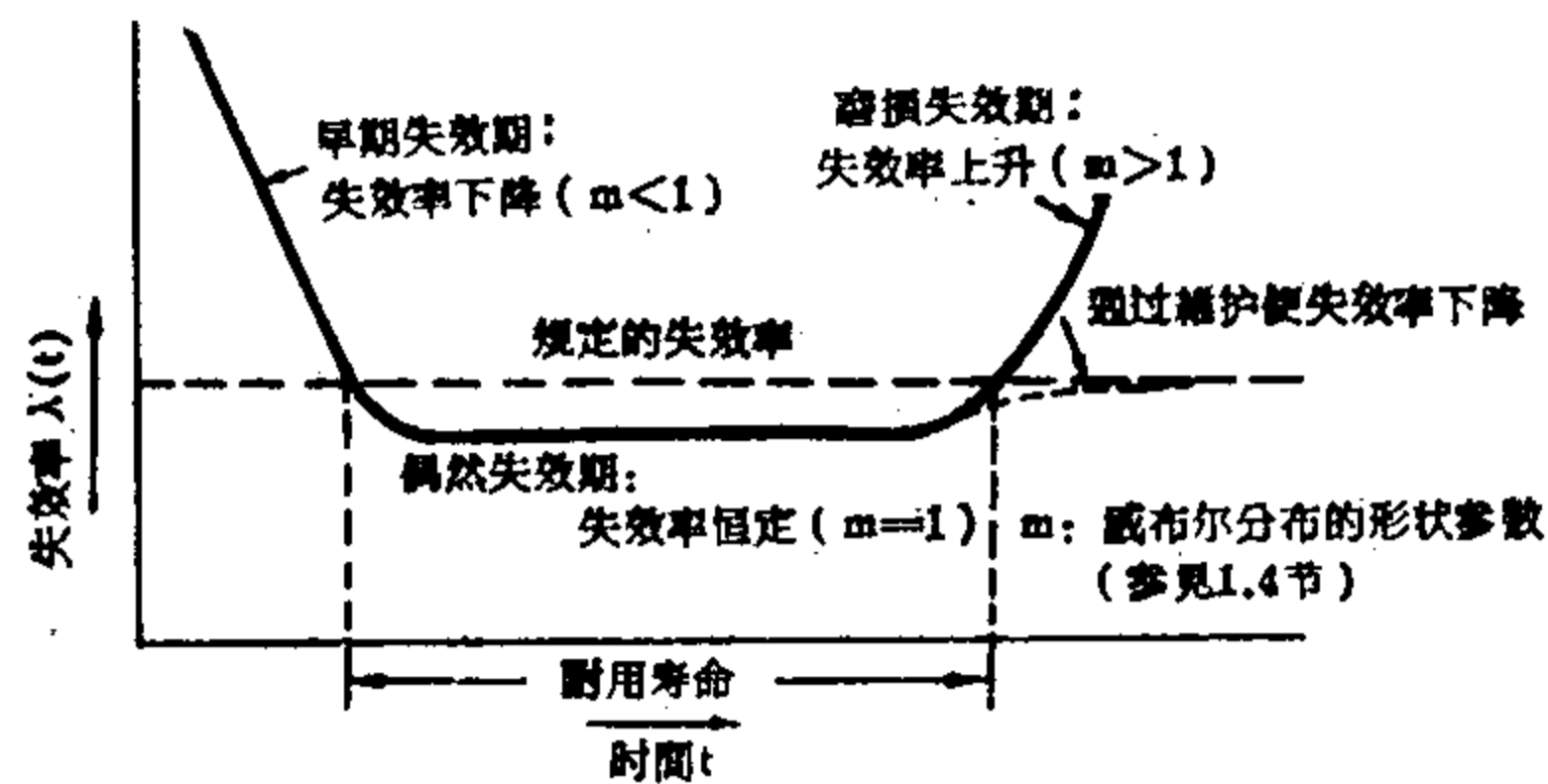


图1-1 典型的失效率曲线

1.2 半导体器件的失效模式和失效机理

这里，首先介绍失效物理的概念，然后再说明半导体器件的失效模式和失效机理。

1.2.1 失效物理*

失效物理是从原子和分子的角度来解释失效的物理性质。从广义上说，它是提高器件可靠性的物理+工程学的基础技术。第二次世界大战以后，随着固体物理（半导体物理）的发展，开始研制出各种半导体器件，从而促进了电子系统组装的高密度和复杂化，加速了技术革新的进程，并对可靠性提出了越来越高的要求。在这样的形势下，为了把研制周期和成本降低到最低限度，就在可靠性技术里导入了物理分析方法。失效物理分析方法是用来解决下述问题的：

- (1) 在短时间里发现有内在缺陷的器件；
- (2) 用物理学概念，给出预测失效的模式和数学公式；
- (3) 通过加速寿命试验，在短时间里对可靠性作出评价。

研究失效物理分析方法的目的是，在于把物理概念导入以往的可靠性经验数据或统计

保证方法中，从而在产品的研制、设计、预测、试验、维修、使用等这些与可靠性有关的各个环节里起到促进作用。

1.2.2 失效模式和失效机理

本节概要说明有关半导体器件失效的物理性质。半导体器件的失效模式包括：断丝、短路、退化等等。表 1-1 列出失效模式和失效机理的关系。图 1-2 至图 1-10 示出若干实际例子。下面概略地介绍两、三种失效机理。

(1) 表面退化

由于 PN 结是在 $10^{14} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$ 的电荷浓度下形成，当大于 $10^{14} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$ 的电荷加到 PN 结的表面，特别是加到耗尽层周围时，容易改变 PN 结的电特性。虽然一般的平面晶体管表面，有一层惰性 SiO_2 保护膜，但仍然会出现表面沟道造成的退化现象。近几年，虽有塑料封装器件的迅速发展，但造成表面退化失效机理的因素仍然不能忽视。表面退化与温度、电压应力有很大关系，多数可按后面介绍的反应论模型来处理。

(2) 电极的失效

由于人们对复杂的多层电极结构的要求，所以电极布线的重要性越来越受到重视。特别应注意的是铝离子移动产生的电子迁移和塑料封装器件的铝条腐蚀等问题。

金属加上大电流应力 ($10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$ 左右) 后，会使金属原子移动，这种现象叫做电子迁移。当离子化的原子和散射电子碰撞造成的电子风 (electrowind) 使金属原子沿电流的反方向移动时，就会在阴极端产生空隙，在阳极端形成小岛 (hillock)、钻蚀 (whisk)。电子迁移造成的失效包括：因空隙使引线电阻增大，以及局部过电流使引线熔

* 原注：参见盐见 弘著《故障物理入门》，日科技连，1970。

断。另一方面，在多层电极里有可能因钻蚀而造成短路。Al引线的电子迁移是由于温度过高和电流密度过大而造成的。此外，塑料封装器件有时会出现Al电极腐蚀。Al腐蚀的机理很复杂：芯片受潮、离子杂质、PH的改变等是造成Al腐蚀的主要因素。

多层电极结构的失效主要表现在：由于层间介质层的缺陷而导致漏电流的增加或短路；引线金属间的电阻增大或断丝等。

(3) 键合失效

引线键合失效除因焊点不匀、Au-Al断条、虚焊造成的电阻增大和断丝外，还会发生塑封在高温时的间歇失效。

表 1-1 失效因子及其诱发的失效机理、模式

失效因子	失效机理	失效模式	示例	
表面钝化	表面氧化膜，布线间的绝缘层	针孔，裂纹，厚度不均匀，沾污，表面反型	耐压退化，短路，漏电流过大， h_{FE} 退化，门限电压变化，噪声退化	图1-2
金属化	芯片布线，接点，针孔	划伤，空隙，机械损伤，台阶，非欧姆接触，接合强度不够，厚度不匀，电子迁移，腐蚀	开路，短路，电阻增大	图1-3
连接部分	引线焊接，球焊	焊点脱落，金属间有化合物，焊点移位，焊接损伤	同上	图1-4
引线	内引线	断线，引线松弛，引线间碰接	开路、短路	图1-5
扩散、键合	扩散结，隔离	晶格缺陷，杂质析出，不匹配	耐压退化、短路	图1-6
芯片键合	芯片与管壳的键合	芯片脱落，裂纹	断开，短路，工作点不稳定，热阻增大	图1-7
封装	封装，密封，引线电镀，密封外壳和塑料外壳，封入气体	密封性，受潮，封入气体不纯，高温，表面沾污，引线生锈，断折	短路，漏电流增大，断开，腐蚀断线，焊接不良	图1-8
混入杂质	管壳内有杂质	灰尘，导电性杂质，有机碳化物	短路，漏电流增大	图1-9
输入输出端	静电，过压，浪涌电压等	电击穿	短路，开路，熔断	图1-10

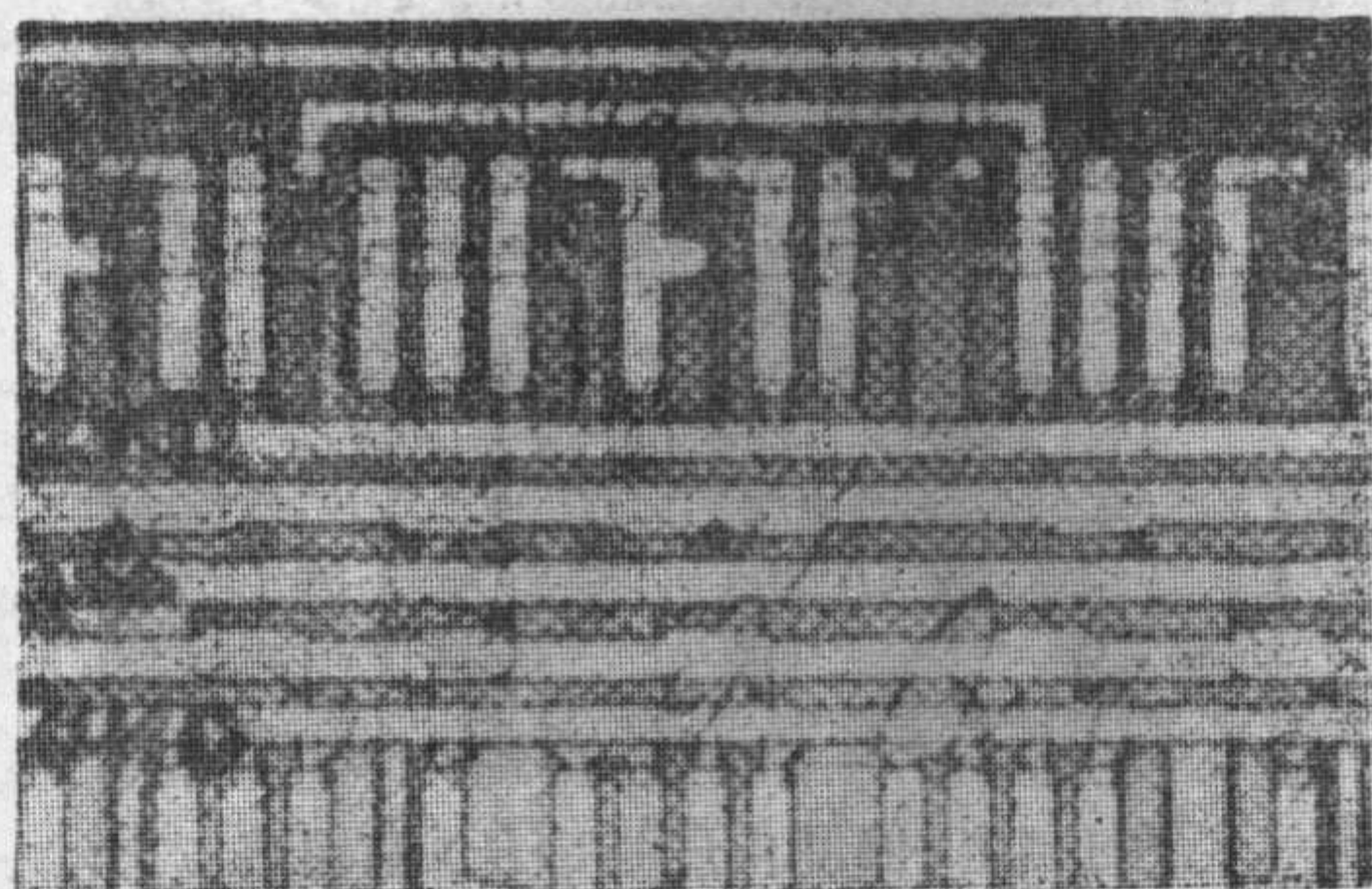


图1-2 氧化硅膜损伤造成的耐压退化

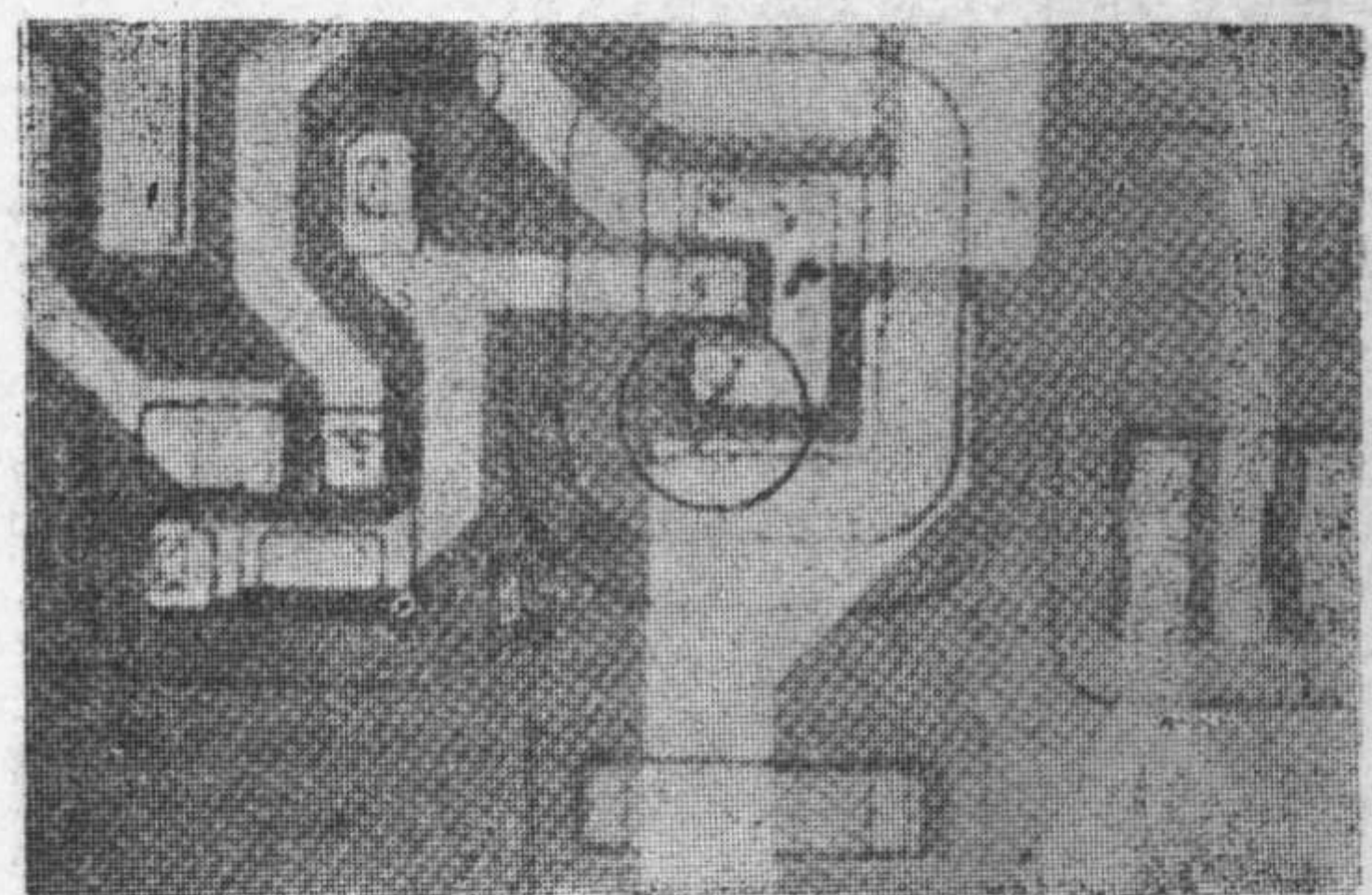


图1-3 金属化布线的电子迁移

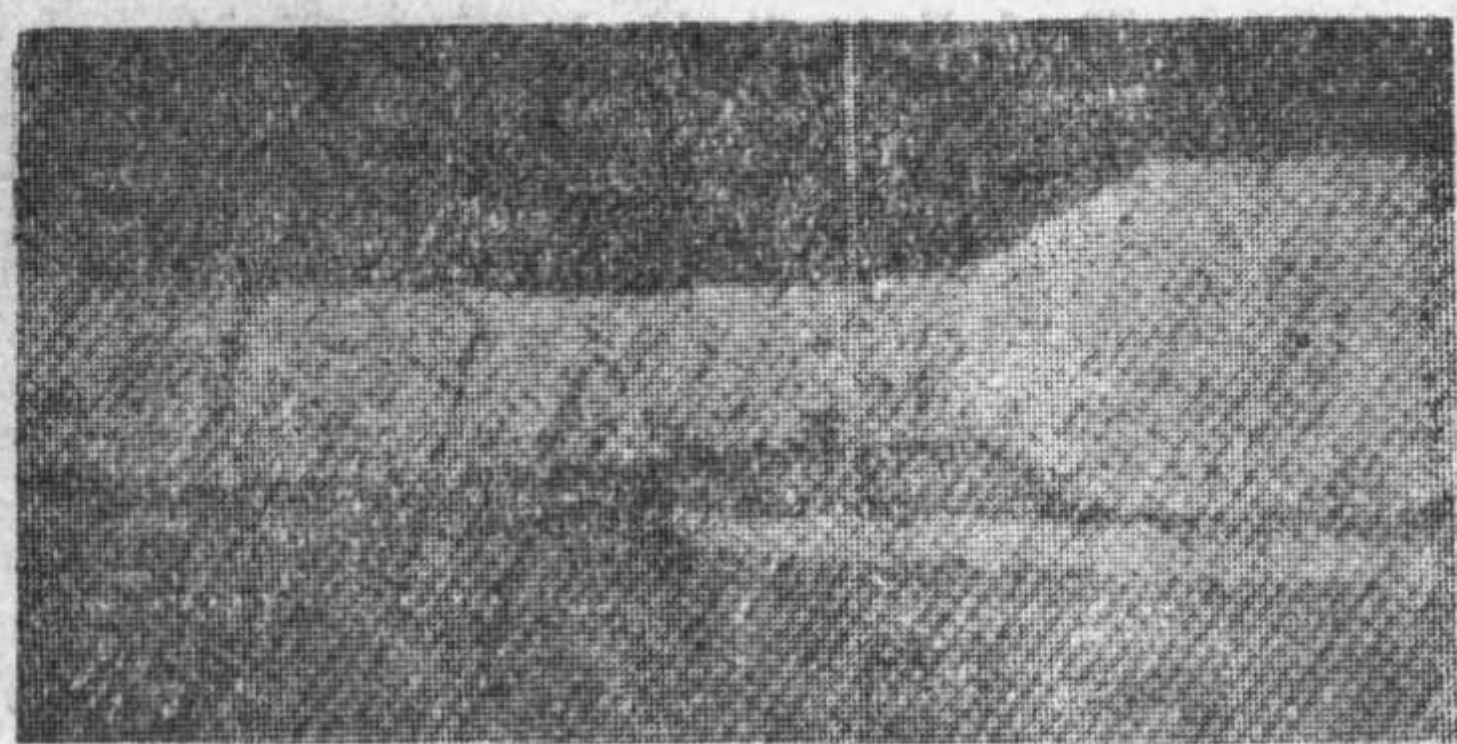


图1-4 Au-Al金属化合物造成焊接断线

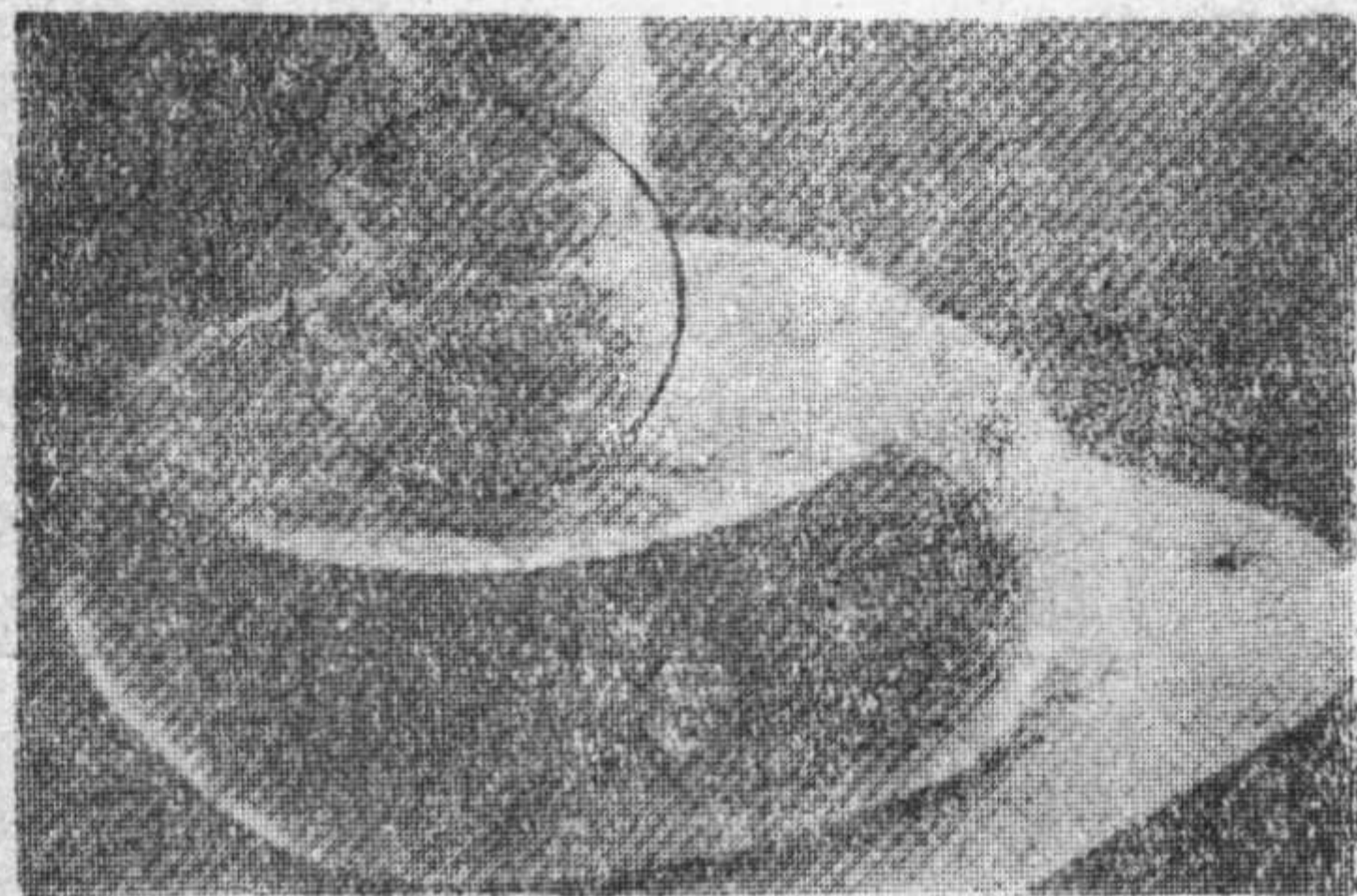


图1-5 焊接引线时造成的热疲劳断线

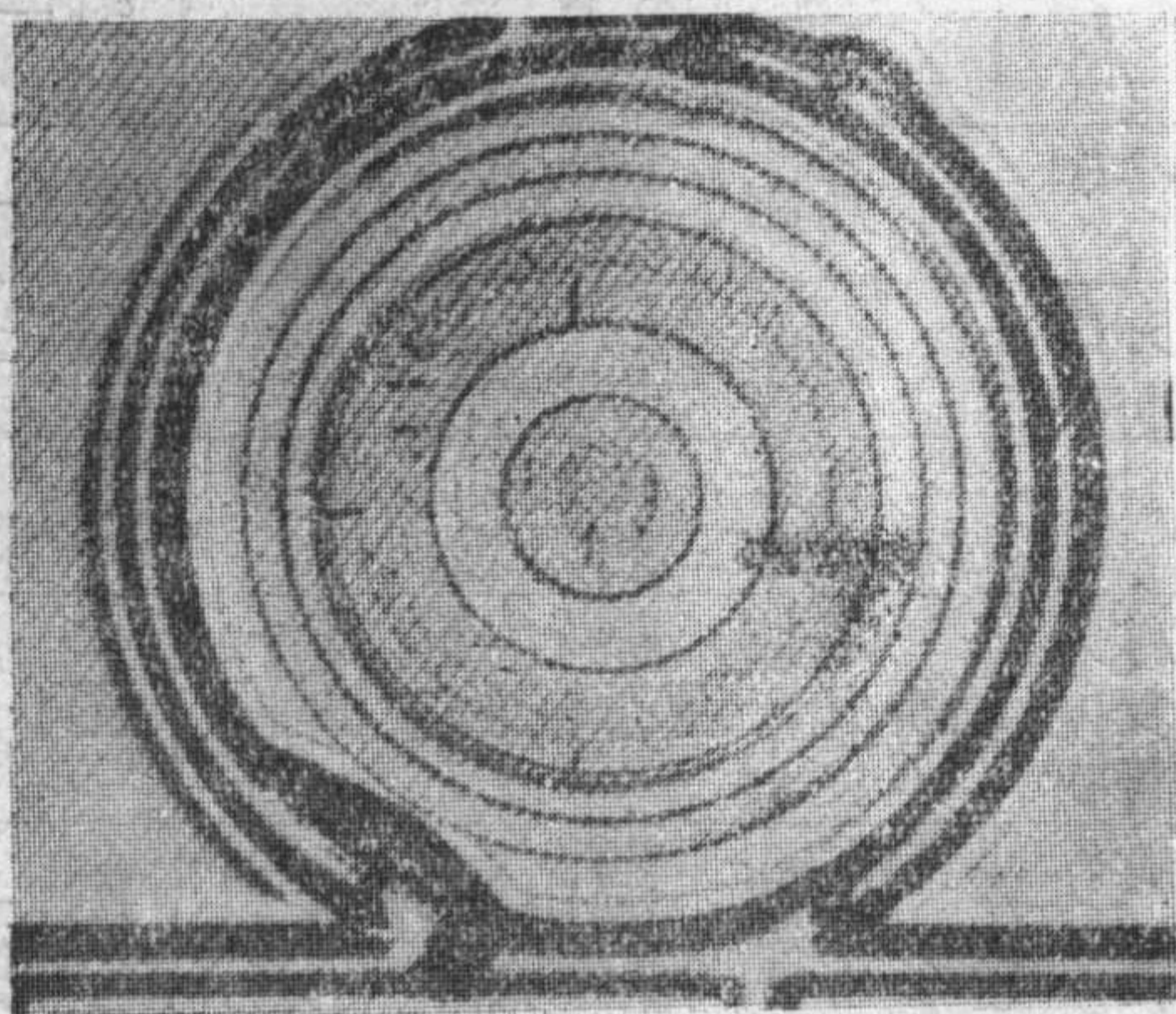


图1-6 晶格缺陷使耐压退化

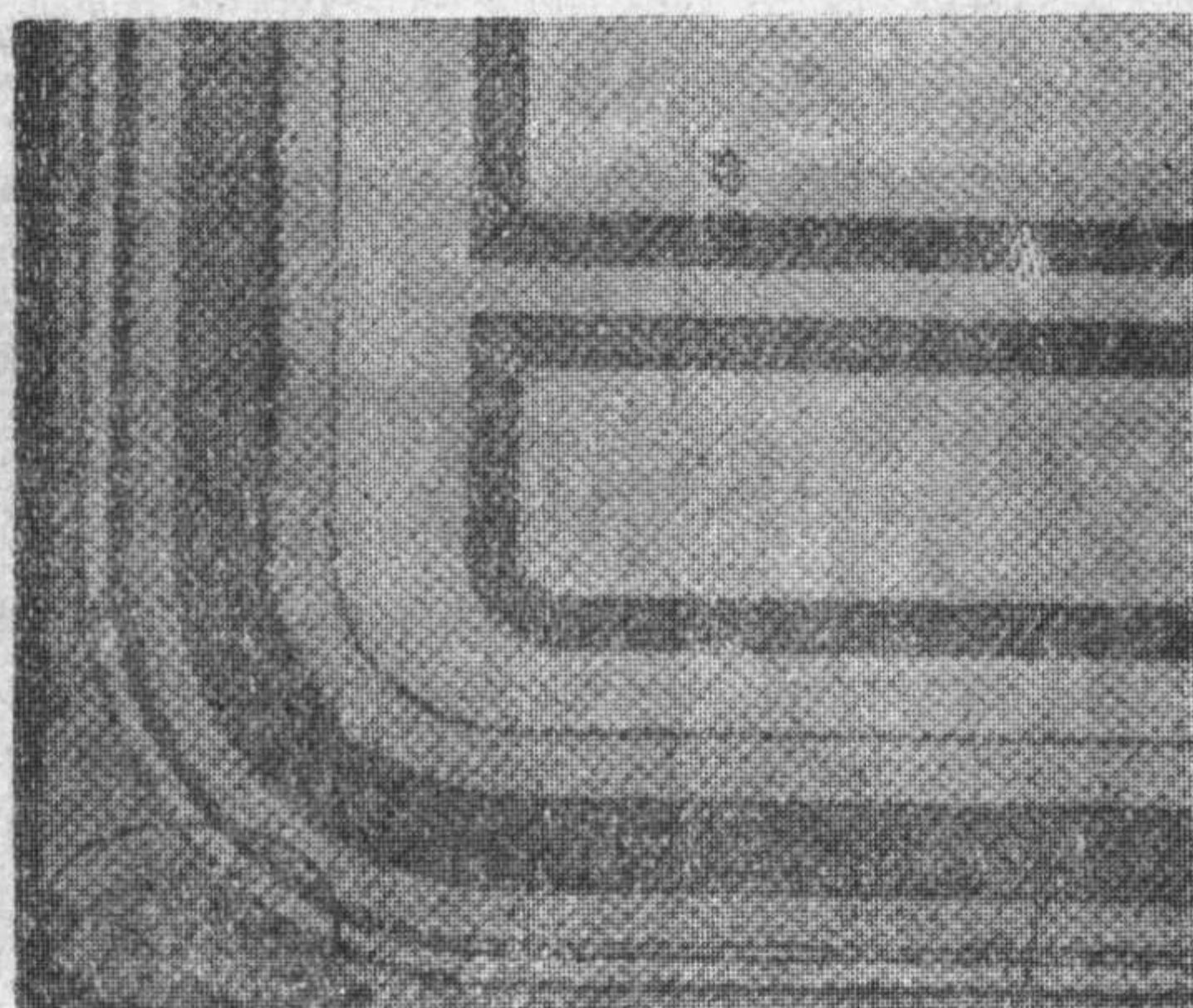


图1-7 芯片裂纹

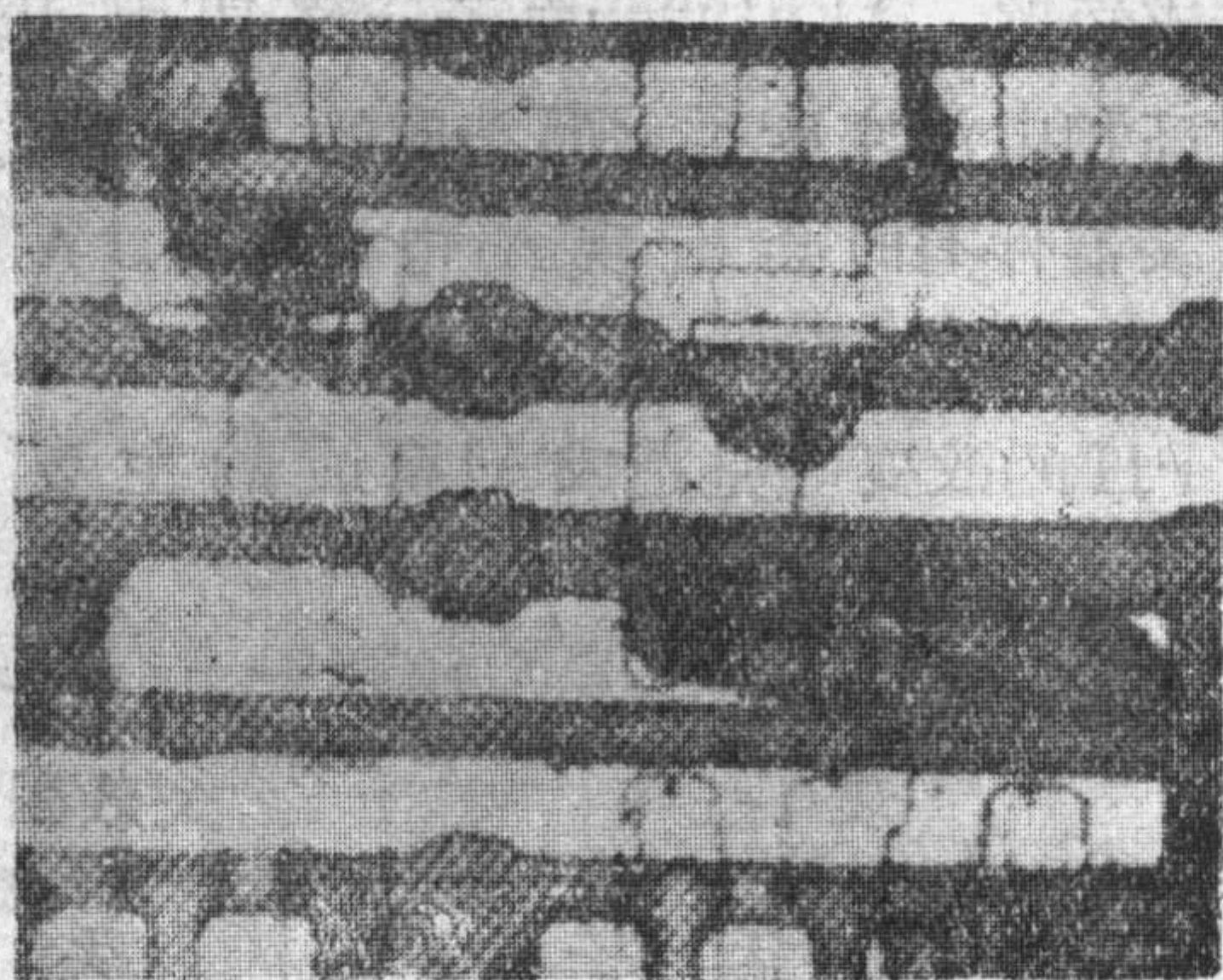


图1-8 金属化腐蚀



图1-9 导电性杂质造成的短路

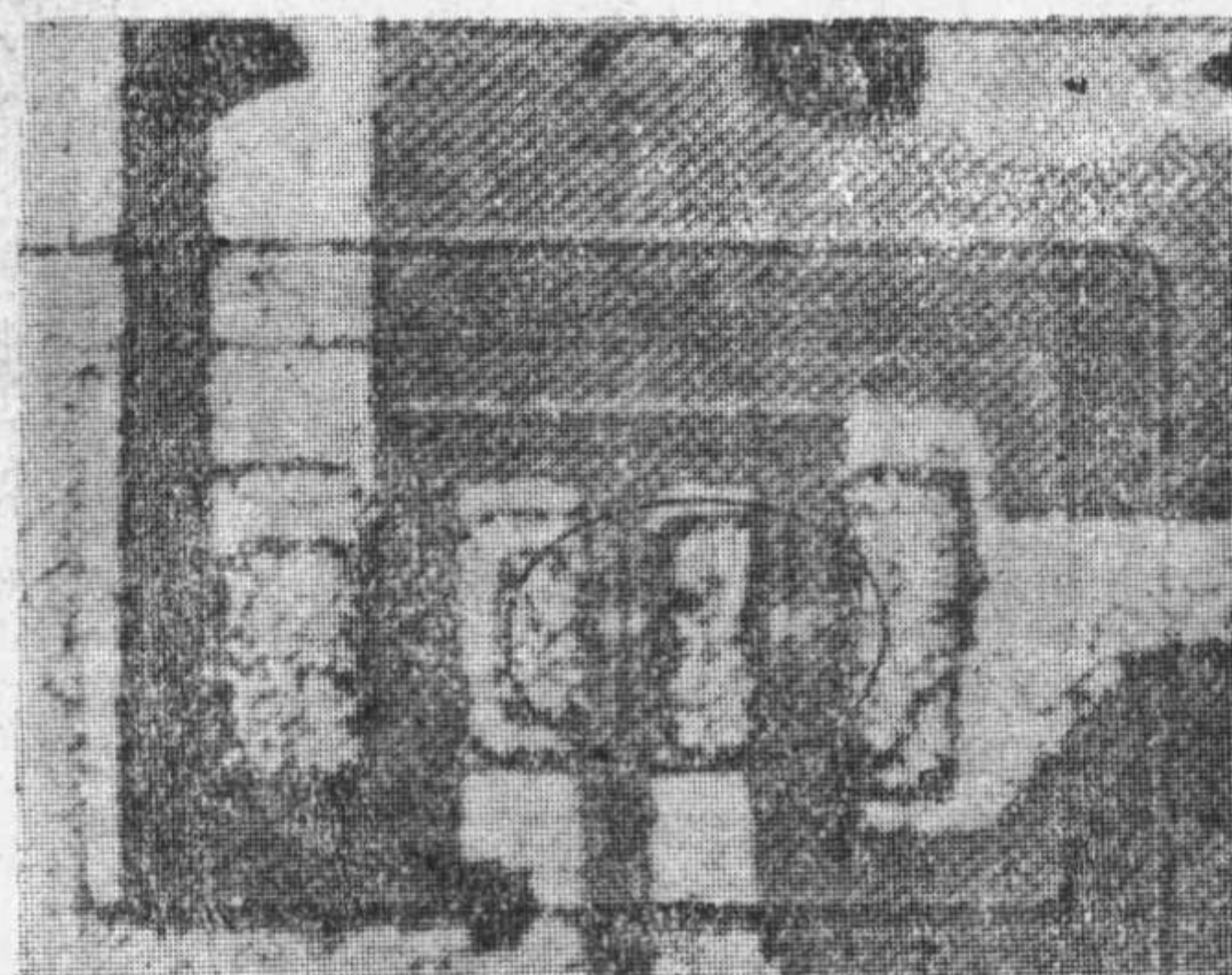


图1-10 浪涌电压造成PN结短路

芯片与管座、芯柱键合时，特别是功率器件，由于各种材料的热膨胀系数不同会造成热应力。而当焊接等用软焊料时，容易产生空隙，这是主要的失效因素。

热膨胀系数不同产生的热应力和功率器件装散热片时的机械应力，都是造成芯片裂紋的原因。

(4) 封装的失效

无论金属、玻璃密封外壳还是陶瓷密封外壳，密封问题都是一个不可忽视的失效因素。一般来说，密封问题出现于早期失效，但也有可能诱发出上述的特性退化、电极腐蚀等失效。

1.3 失效分析

通过对在可靠性试验过程中发现的失效器件及在整机制造和现场使用中发现的失效器件的分析，既可以获得有关失效模式、机理的第一手资料，同时通过质量反馈，又可以制定出提高器件可靠性的措施。在分析失效的过程中，由于不能将失效器件恢复原状，所以必须采用适当的分析手段，小心而准确地进行分析。进行失效分析时，应注意下述事项：

(1) 器件失效后，由于仍然存在着改变其失效状态的应力，所以在分析前，千万

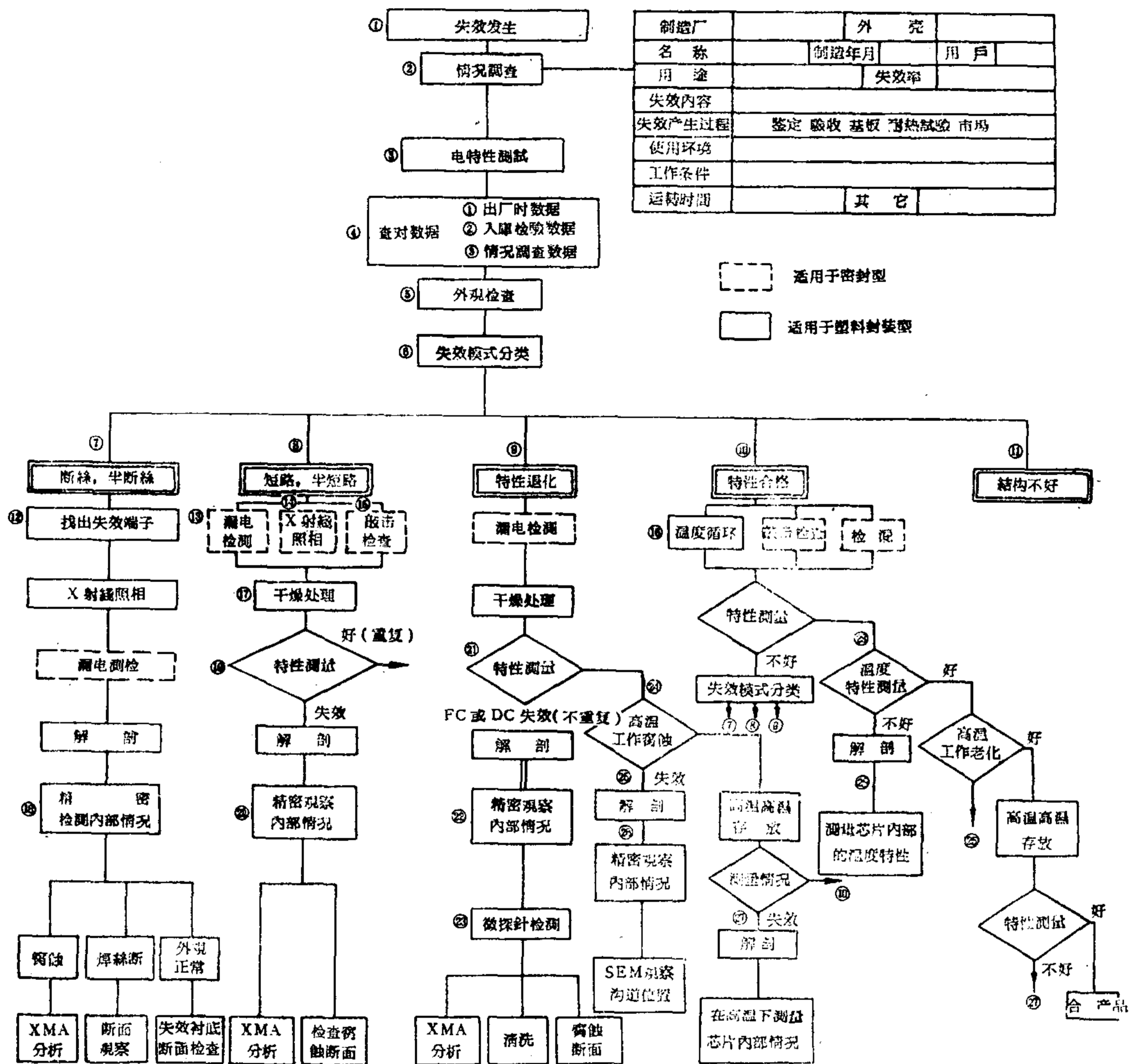


图1-11 失效分析程序示例

不要将机械、电、热的冲击加到失效器件上；

(2) 采用适合分析目的的分析设备；

(3) 为了能进行准确的失效分析，需要熟悉器件的设计和制造工艺；

(4) 应了解在试验和使用时的加在器件

上的应力，或者熟悉有关失效的履历资料。

对于准确无误地进行失效分析来说，这些都是非常重要的资料；

(5) 为了能广泛地利用失效分析结果，需作系统化的记录和数据积累。

表 1-2 分析失效用的设备、仪器

分 类	设 备 、 仪 器	分 类	设 备 、 仪 器
观 测 设 备	实体显微镜 金相显微镜 电子扫描显微镜 红外线显微镜 扫描型激光显微镜 X 射线透视仪 摄影设备 扫描型表面温度测量设备 其 它	电 特 性 测 量	二极管图示仪 晶体管图示仪 集成电路图示仪 晶体管测试仪 集成电路测试仪 LSI 测试仪 函数测试仪 示波器 脉冲振荡器 直流电源 电流表 (包括微安表) 电压表 噪声测量仪 电容测量仪 控制器 其 它
	X 射线微观分析仪 荧光 X 射线分析仪 俄歇效应电子分析仪 离子微观分析仪 激光微观分析仪 电子衍射设备 X 射线衍射设备 红外线吸收分光仪 原子核偶磁共振仪 气体色谱分析仪 质量分析仪 微检漏仪 差热分析仪 其 它		解剖样品用的器具、药品 切断机 砂轮机 研磨设备或夹具 树脂模夹具、药品 蒸发台 通风 (废液, 排气) 各种腐蚀液 塑料分析药品 其 它
各 种 试 验 设 备	恒温试验箱 湿度箱 温度循环试验箱 张力试验台 其 它	其 它	天 秤 千分尺 其 它

图1-11示出半导体厂通常进行的失效分析程序图。由图可知，这些都是基本的失效分析。但是，失效模式和失效程度不同，对分析细则的考虑也有所不同。表1-2示出失效分析使用的主要设备和仪器。如分析程序所要求的，在进行失效分析时，应按需要采用适当的设备。

1.4 失效分布

本节简单说明半导体器件可靠度函数及概率分布。

1.4.1 可靠度函数

按日本工业标准 JIS Z 8115，可靠度的定义是：系统、设备、元件等在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。由于发生失效是按概率处理的，所以如何降低这一概率，是一个重要的课题。

由可靠度定义可知，用数学方法表示发生失效前的时间的概率分布，叫作可靠度函数。现设到时间 t 前，失效品的比率即寿命的概率分布函数为 $F(t)$ ，概率密度函数为 $f(t)$ ，可靠度函数为 $R(t)$ ，失效率为 $\lambda(t)$ ，则它们之间有如下的关系：

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = F(t) + R(t) = 1$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

由上述的关系式可知，只要给出 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $R(t)$ 和 $\lambda(t)$ 这四个函数中的任何一个，就能求出其他三个函数。一般地说，在未获得数据以前，寿命分布模型是不清楚的，所以，就只能以试验结果为基础来推导。因此，必须熟悉统计学里所应用的几种分布。

1.4.2 可靠性的概率分布

本节简单地说明与半导体器件寿命分布有关的概率分布。

1. 指数分布

指数分布属于偶然失效型的分布。但从半导体器件可靠性试验所获得的大量结果表明，这类失效的发生是渐趋减少的，因此，用指数分布就不太确切。然而，如开头所述，因为指数分布是可靠性寿命分布中最基本的分布；此外，除去早期失效，在稳定期中所出现的便是偶然失效；又，抽检时假定为指数分布能保证合格品的质量，所以有必要介绍指数分布。

指数分布的概率密度函数 $f(t)$ 、分布函数 $F(t)$ 可由下式求出：

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

图1-12示出指数分布的曲线。指数分布的特征参数是 λ 。 λ 的倒数是失效前平均工作时间 (MTTF)，它表示平均寿命。

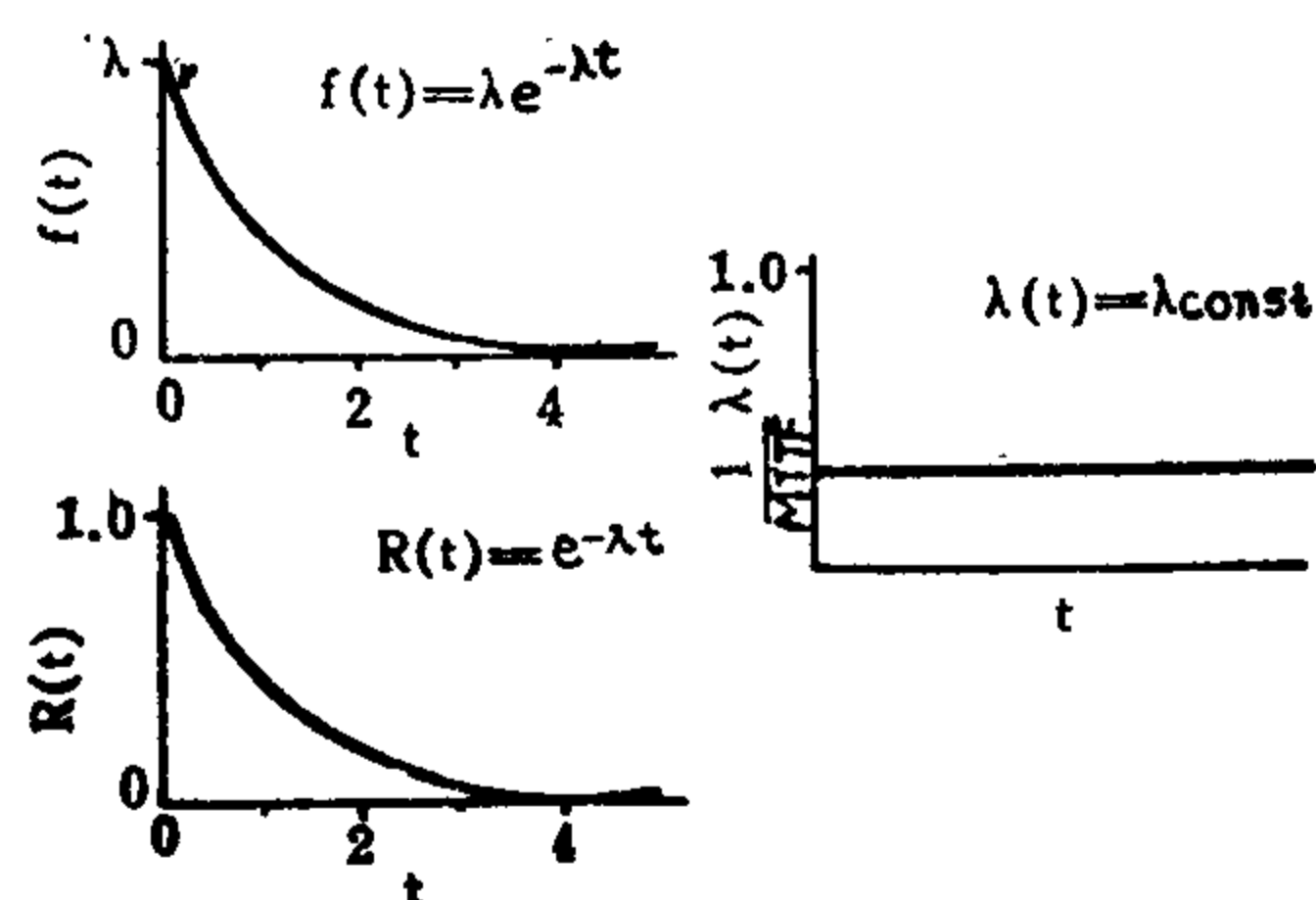


图1-12 指数分布

2. 威布尔分布

威布尔分布是瑞典的W. Weibull氏在研究金属材料疲劳寿命时所运用的分布，可视为前述指数分布的扩展。其分布函数为：

$$f(t) = \frac{m t^{m-1}}{\eta} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

$$(t \geq 0, \eta > 0, m > 0)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

式中, m 为形状参数, η 为真尺度参数。由威布尔分布可知, 各时刻的劣化比率即失效率 $\lambda(t)$, 可由下式求出:

$$\lambda(t) = \frac{m t^{m-1}}{\eta^m}$$

因此, 与 $m < 1$ 、 $m = 1$ 和 $m > 1$ 这三种情况相对应, 分别表示失效率随时间下降、恒定和增大三个阶段。图1-13示出 $m = 0.5$ 、1 及 2 时, $f(t)$ 、 $R(t)$ 、 $\lambda(t)$ 随时间的变化。由图可知, $m = 1$ 时, 与指数分布一致。 $m = 0.5$ 时, $\lambda(t)$ 随时间下降, 这表明是早期失效型的分布。如前所述, 半导体器件的寿命试验表明, 它通常是 $m < 1$ 的分布。

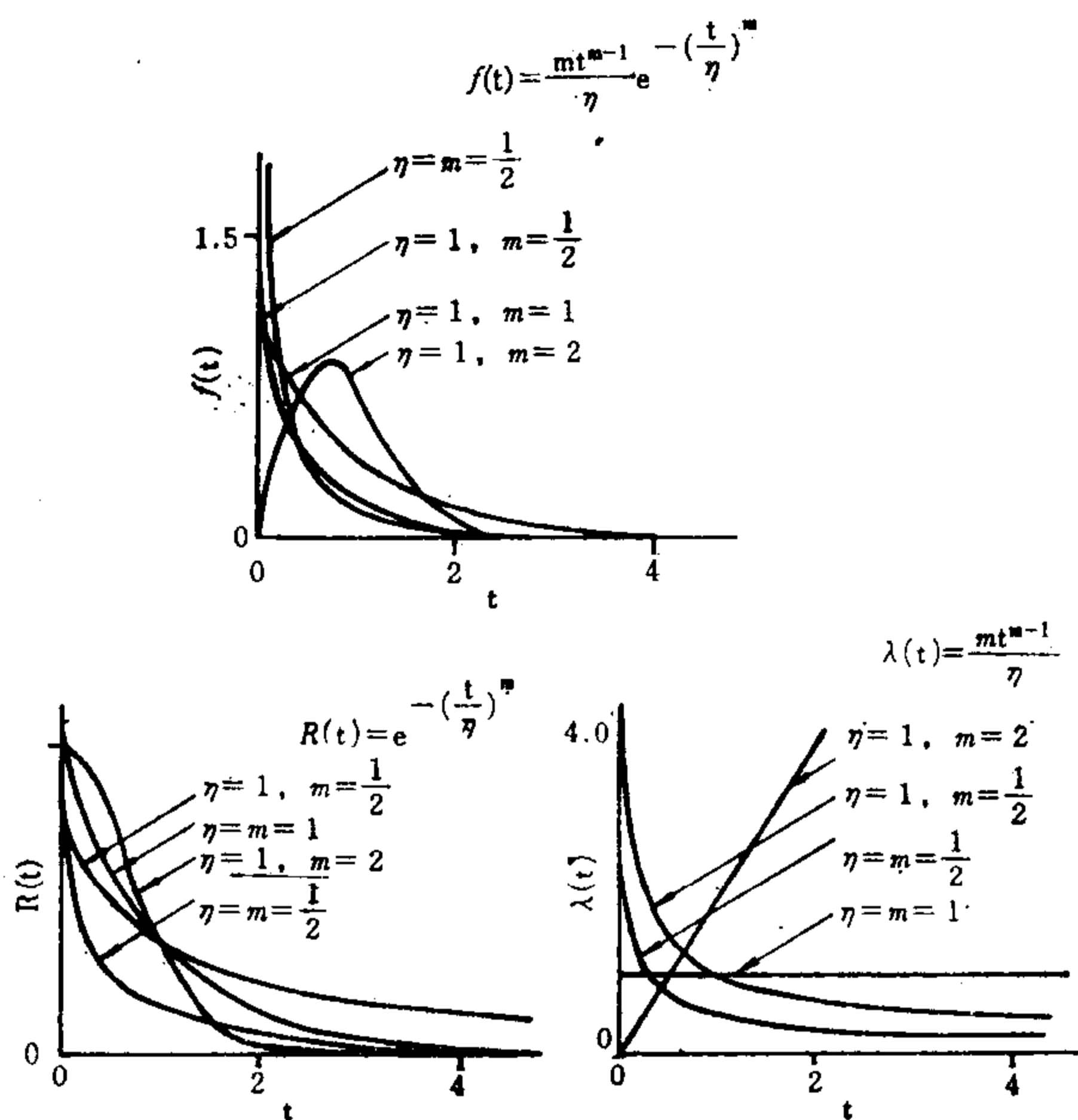


图1-13 威布尔分布

求出威布尔分布的 m , 就能清楚地知道失效率随时间变化的情况, 这有助于解释寿命现象。通常, 某种退化现象和失效机理都有它各自的失效分布, 因此, 威布尔分布的参数 m 及 η 是随失效模式和失效机理的变化

或者应力的变化而改变的。因此, 可以认为:

(1) 当 m 变化不大, 仅 η 变化时, 失效的物理原因不变, 仅失效发生的速度不同。

(2) 当 m 变化时, 在其变化前后, 失效的物理原因也发生变化。

应用威布尔概率纸 (图 1-4), 能较容易地推算出威布尔分布的参数 m 和 η 。

应用威布尔概率纸来分析可靠性数据的顺序

威布尔概率纸的原理, 是将分布函数 $F(t)$ 的两边取两次对数, 从而使函数图形成一条直线。

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

$$\frac{1}{1-F(t)} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

$$\ln \frac{1}{1-F(t)} = \left(\frac{t}{\eta}\right)^m$$

即以下列形式构成纵轴和横轴:

$$\underbrace{\ln \ln \frac{1}{1-F(t)}}_{\text{纵轴}} = \underbrace{m}_{\text{斜率}} \underbrace{\ln t}_{\text{横轴}} - \underbrace{m \ln \eta}_{\text{截矩}}$$

$$\text{令 } Y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}$$

$$X = \ln t$$

$$b = -m \ln \eta$$

$$\text{则得 } Y = m X + b$$

下面介绍对照图1-14示出的概率纸, 来估计分布参数 m 、 η 和平均值 (μ)、方差 (σ^2) 等的顺序。

顺序 1: 根据所得数据, 将时间 t 和累积失效概率 $F(t)$ 描点, 刚好成一条直线 (回归直线)。这时, 当抽样数 n 为 20 个以下时, 对应于累积失效数 r 的累积失效概率

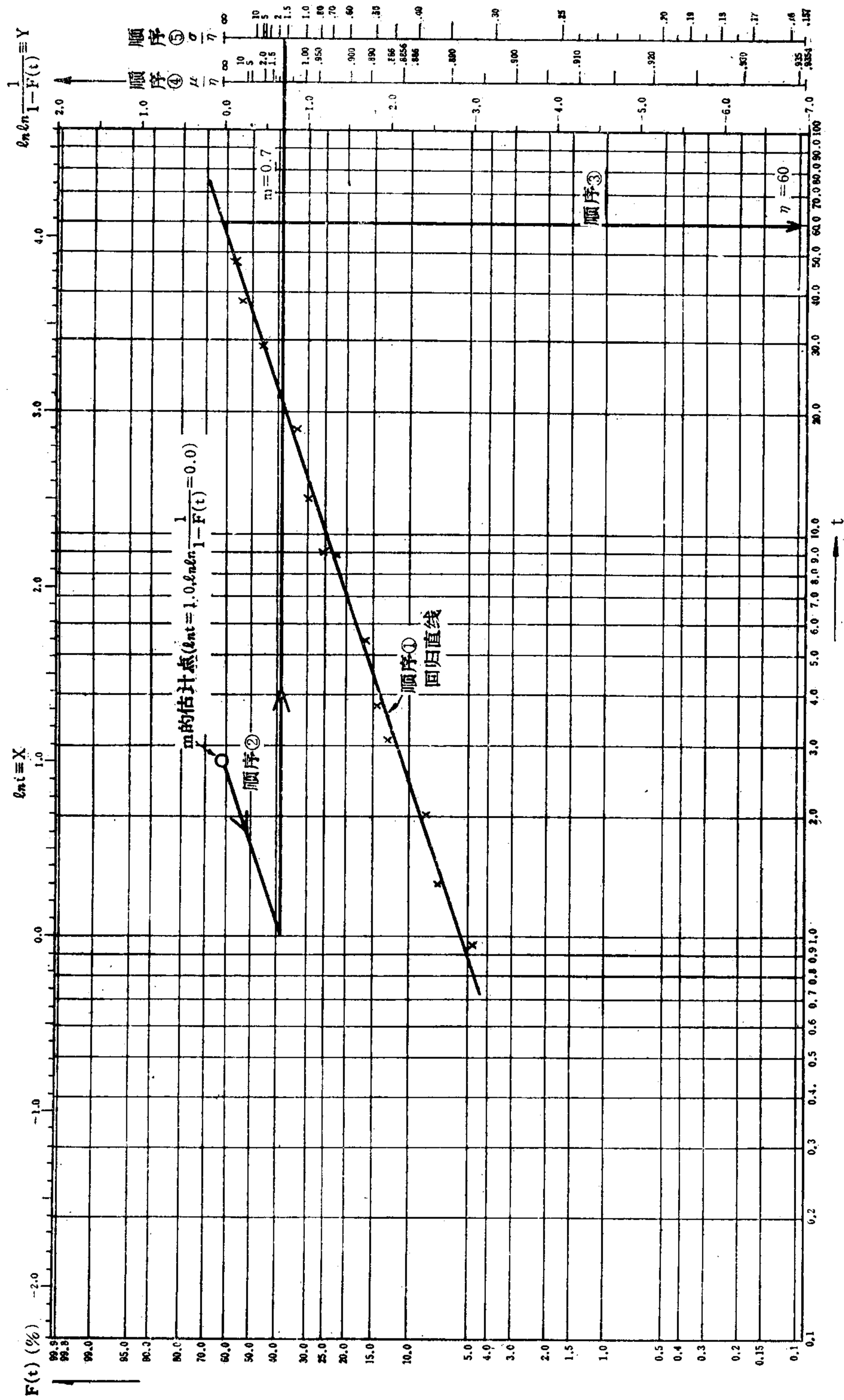


图1-14 用威布尔概率纸估计分布参数的顺序

F(t)为(中位秩):

$$F(t) = \frac{r}{n+1}$$

顺序 2: 自 m 的估计点, 引一条与回归直线相平行的直线, 把平行线和 $\ln t = 0.0$ 的交点从右边刻度读出, 并将值的符号改变, 即得形状参数 ($m = 0.7$)。

顺序 3: 回归直线和 $F(t) = 63.2$ (%) 相交的时间, 即为真尺度参数 η ($\eta = 60$)。

顺序 4: 读出与右边的 m 相对应的 μ/η , 并将 μ/η 乘上 η , 求出平均寿命 μ 。

$$\mu = \frac{\mu}{\eta} \times \eta = 1.2 \times 60 = 72$$

顺序 5: 读出与右边的 m 相对应的 σ/η , 并将 σ/η 乘上 η , 求出标准偏差。

$$\sigma = \frac{\sigma}{\eta} \times \eta = 1.7 \times 60 = 102$$

上面介绍了最基本的顺序, 各种应用例子详见“可靠性数据分析”一书(日科技连)。

3. 对数正态分布

当寿命时间 t 的对数 $\ln t$ 遵循正态分布时, 就叫做对数正态分布。其概率密度函数 $f(t)$ 的表达式如下:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad t \geq 0$$

$$= 0 \quad t < 0$$

式(6.10)

图1-15示出 $f(t)$ 、 $R(t)$ 、 $\lambda(t)$ 的对数正态分布。由图可知, 失效率在短时间内上升, 其后逐渐下降, 这对于半导体器件的寿命分布, 往往是很适用的。

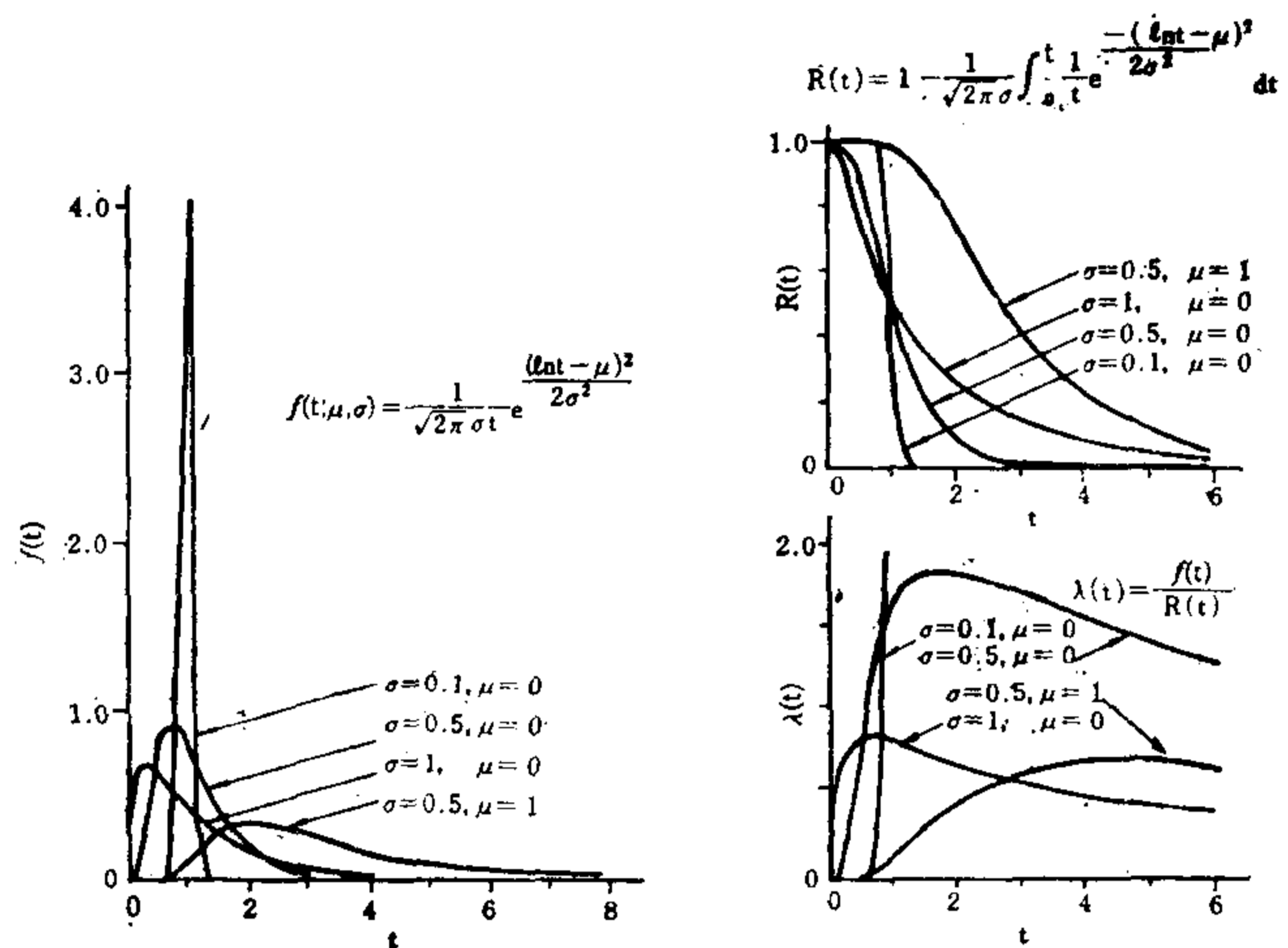


图1-15 对数正态分布

与估计威布尔分布参数相同, 可用对数正态概率纸(图1-16)来估计分布参数 μ 和 σ 。

应用对数正态概率纸分析可靠性数据的顺序

顺序 1: 根据所得数据, 将时间 t 和累积失效概率 $F(t)$ 描点, 配一条直线(回归直线)。这时, 当抽样数 n 为 20 个以下时, 对应于累积失效数 r 的累积失效概率 $F(t)$ 即为(中位秩):

$$F(t) = \frac{r}{n+1}$$

顺序 2: 找出对应于回归直线和 $F(t) = 50\%$ 的交点的时间 t_0 值, 求出其平均值 μ 。

顺序 3: 找出与回归直线和 $F(t) = 15.87\%$ 及 $F(t) = 84.13\%$ 的交点相对应的各时间 t_1 、 t_2 , 可求出标准偏差 σ :

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[\ln t_2 - \ln t_1 \right]^*$$

上面介绍了最基本的顺序。各种应用例子请参阅日书“检查管理便览(丸善, 1969)”。

* 原文为 $\sigma = \ln \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{t_0}{t_1} + \frac{t_2}{t_0} \right) \right\}$, 疑有誤。——校注

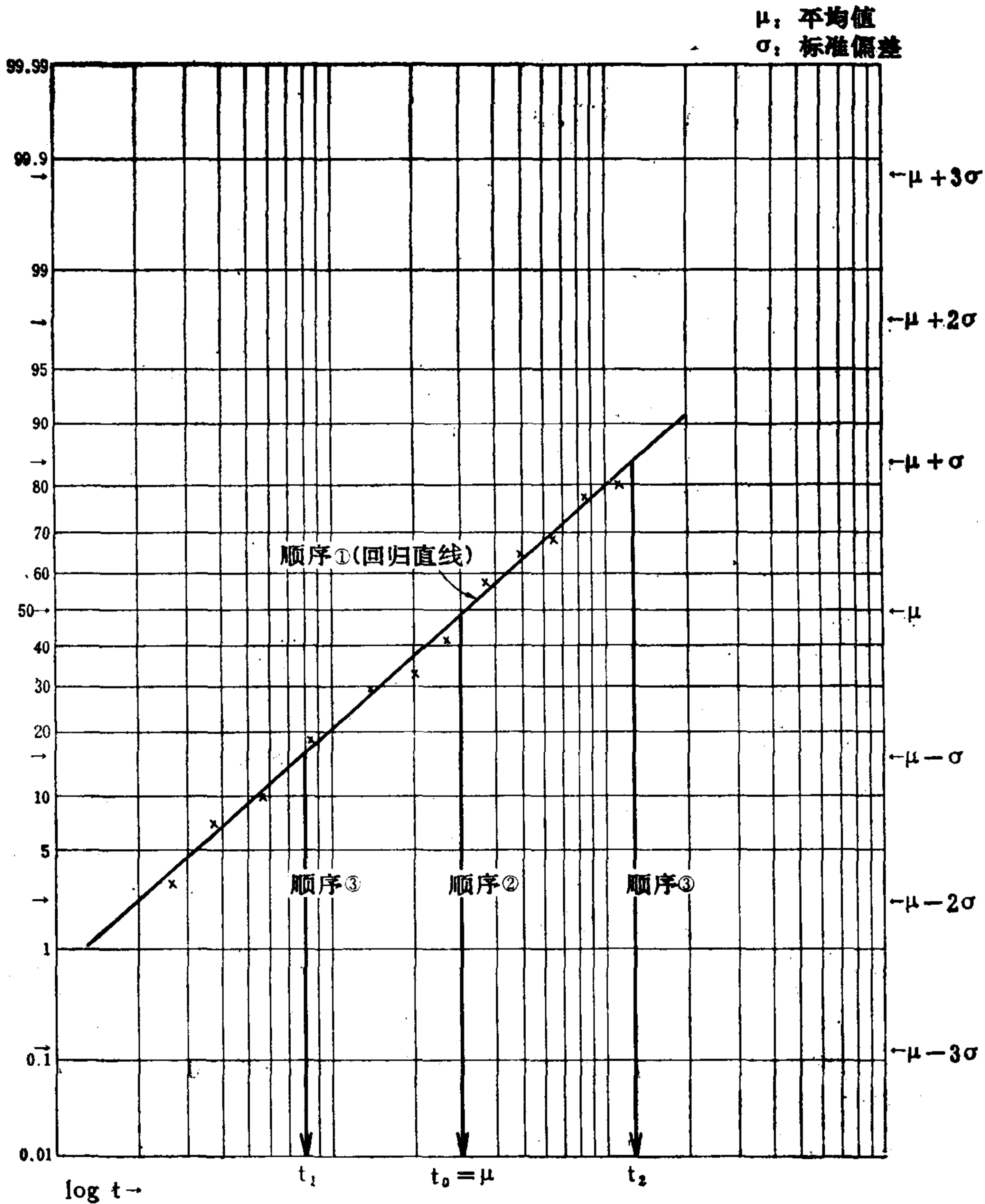


图1-16 对数正态概率纸和估计分布参数的顺序

1.5 失效率予计

从系统的可靠性设计和维修性设计来看, 预测电子系统中半导体器件的失效率是一项非常重要的工作。如前所述, 影响半导体器件失效率的因素有: 器件的种类和设计、工艺质量、有无经过筛选、以及使用时的减额程度、环境条件等等。

关于电子元件失效率的予计方法, 应

用了

$$\lambda = \sum_{i=1}^n K_i \lambda_i$$

的数学模型。式中 K 是严格系数。另外, 在 MIL-HDBK-217B 中, 还进一步推荐了以下的数学式:

$$\lambda_P = \lambda_b (\pi_E \pi_A \pi_{S2} \pi_C \pi_Q)$$

式中: λ_b ——基本失效率 (分立半导体器件);

- π_E ——环境因子;
- π_A ——电路条件因子;
- π_{S_2} ——电压应力因子;
- π_C ——复杂性因子;
- π_Q ——质量因子。

下面概略地说明本书中半导体器件的失效率预计模型。

1. 集成电路的失效率预计

① 集成电路的失效率模型

数字集成电路 (MOS, 双极型) —— 少于100门或者400只晶体管以下:

$$\lambda_P = \pi_L \pi_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) / 10^6 \text{ 小时}$$

式中, π_L ——成熟因子 (learning factor);

- π_Q ——质量因子;
- π_T ——温度加速因子;
- π_E ——环境因子;

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 0.00129(G)^{0.67} \\ C_2 &= 0.00389(G)^{0.35} \end{aligned} \right\} \text{ 复杂度因子;}$$

G——门数 (假定每门4只晶体管)。

线性集成电路:

$$\lambda_P = \pi_L \pi_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) / 10^6 \text{ 小时}$$

- π_L ——成熟因子;
- π_Q ——质量因子;
- π_T ——温度加速因子;
- π_E ——环境因子;

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 0.00056(T)^{0.76} \\ C_2 &= 0.0026(T)^{0.55} \end{aligned} \right\} \text{ 复杂度因子;}$$

T——晶体管数。

数字大规模集成电路 (MOS, 双极型)

——大于100门或者400只晶体管以上:

$$\lambda_P = \pi_L \pi_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) / 10^6 \text{ 小时}$$

- π_L ——成熟因子;
- π_Q ——质量因子;
- π_T ——温度加速因子;
- π_E ——环境因子;

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 0.0187e^{0.0005G} \\ C_2 &= 0.013e^{0.0004G} \end{aligned} \right\} \text{ 复杂度因子;}$$

G——门数 (假定每门4只晶体管);

e——自然对数的底=2.718。

存储器 (MOS, 双极型):

$$\lambda_P = \pi_L \pi_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) / 10^6 \text{ 小时}$$

- π_L ——成熟因子;
- π_Q ——质量因子;
- π_T ——温度加速因子;
- π_E ——环境因子;

RAM的复杂度因子

$$C_1 = 0.00199(B)^{0.603}$$

$$C_2 = 0.00056(B)^{0.644}$$

ROM的复杂度因子:

$$C_1 = 0.00114(B)^{0.603}$$

$$C_2 = 0.00032(B)^{0.646}$$

B——位数。

② 集成电路的各种因子数据表

表 I 质量因子 π_Q

质量等级或筛选等级	说明	π_Q
A	MIL-M-38510 A级	1
B	MIL-M-38510 B级	2
B-1	MIL-STD-883方法5004 B级	5
B-2	同上 与B级同	10
C	MIL-M-38510 C级	16
D	一般级	150

表 II 成熟因子 π_L

1. 在下述条件下, $\pi_L = 10$

- ① 新产品
- ② 设计或工艺有较大改进的产品
- ③ 长期停产后或者生产线人员更换后的产品。

在上述条件情况下, 直到工艺连续稳定6个月前, 都使用 $\pi_L = 10$ 。

2. 除①②③条件以外, 其他都用 $\pi_L = 1.0$ 。