

高等学校试用教材

半导体器件可靠性与失效分析

南京工学院

卢其庆 张安康 编

江苏科学技术出版社



·732

383

半导体器件可靠性与失效分析

南京工学院

卢其庆 张安康 编



江苏科学技术出版社

1113493

内 容 简 介

本书对半导体器件可靠性与失效分析作了较为全面的介绍。内容包括:电子元器件可靠性的基本概念,可靠性试验原理和方法,失效数据的处理方法,半导体器件失效机理分析,失效分析技术,提高器件可靠性、稳定性的措施。

本书为高等工科学校半导体物理与器件专业选修教材,并可供从事半导体器件研制、生产的工程技术人员阅读参考。

半导体器件可靠性与失效分析

南京工学院
卢其庆 张安康 编

出版:江苏科学技术出版社

发行:江苏省新华书店

印刷:丹阳人民印刷厂

开本787×1092毫米 1/16 印张 18 字数 433,000

1981年4月第1版 1981年4月第1次印刷

印数 1—5,000册

书号: 15196.054

定价: 1.70 元

责任编辑 许顺生

前 言

为适应电子工业的迅速发展,提高半导体器件可靠性与稳定性,在半导体物理与器件专业学生中开设半导体器件可靠性与失效分析的课程,已经十分迫切。一九七八年三月,四机部在成都召开“高等学校工科电子类专业统编教材”会议。根据半导体器件生产的特点和专业的要求,与会教师共同讨论、拟定了课程编写大纲。本书就是根据该大纲编写而成的专业教材。

全书内容共分两个部分:前面部分共四章,介绍可靠性基本知识;后面部分共六章,讨论半导体器件的失效分析。

在编写时,我们力求贯彻理论联系实际的原则,既阐述有关基本理论,又结合生产实际对失效产品进行分析。本书把失效机理归纳成表面、体内、金属化系统及封装三个方面进行全面和系统的阐述,书中所介绍的表面钝化部分主要讨论钝化机理及其对器件稳定性的作用。

本教材课内教学时数为40学时,各校在使用时可根据具体要求适当取舍。

本教材1~4章由卢其庆编写,5~10章由张安康编写。天津大学郭维廉、潘姬同志,天津半导体器件厂阎育镇同志对原稿作了反复认真地审阅,并提出了宝贵的意见。

在教材编写过程中,得到四机部可靠性研究所,742厂、上海元件五厂等单位的领导同志和技术人员的大力支持和热情帮助,南京工学院一些教师对本书的编写工作也给予不少帮助,对此我们一併表示衷心的感谢。

在教材编写过程中,曾广泛参考国内各兄弟单位编写的各种书刊、讲义、资料等,因具体名称较多,恕不一一列举。

由于我们水平有限,经验不足,书中肯定会有不少错误或不妥当之处,恳切希望读者批评指正。

编者 1980年3月

目 录

绪 论	1
1. 提高半导体器件可靠性的意义	1
2. 可靠性与产品质量的关系	1
3. 半导体器件可靠性工作的基本内容	2
第一章 可靠性概念及其主要数量特征	3
§1.1 产品的可靠度	3
§1.2 产品的失效特征	5
1. 累积失效概率(不可靠度)	5
2. 失效密度函数(分布密度)	6
3. 失效率函数(失效率)	7
4. 累积失效概率、失效密度函数和失效率的关系	7
§1.3 产品的寿命特征	8
1. 平均寿命	8
2. 寿命方差和寿命标准离差	10
3. 可靠寿命与中位寿命	11
§1.4 半导体器件常见的失效分布	12
1. 电子元器件的失效规律	12
2. 威布尔分布	13
3. 指数分布	15
4. 正态分布	15
5. 对数正态分布	18
第二章 可靠性试验	21
§2.1 概述	21
§2.2 环境试验	22
1. 概述	22
2. 环境试验方法	24
§2.3 可靠性筛选	35
1. 概述	35

2. 筛选应考虑的有关问题	36
3. 筛选方法	37
§2.4 例行试验与鉴定验收试验	40
1. 例行试验	40
2. 鉴定验收试验	41
第三章 寿命试验及其试验数据的处理方法	42
§3.1 长期寿命试验	42
1. 长期贮存寿命试验	42
2. 长期工作寿命试验	43
3. 试验需要注意的几个问题	43
§3.2 利用威布尔概率纸估计可靠性数量特征的方法	43
1. 威布尔概率纸的结构原理	44
2. 在威布尔概率纸上绘图的方法	45
3. 利用威布尔概率纸估计威布尔参数的方法	48
4. 利用威布尔概率纸估计寿命特征值	52
§3.3 加速寿命试验	57
1. 加速寿命试验方案的考虑	58
2. 加速寿命试验的理论依据	59
3. 加速寿命试验结果的数据处理程序	64
第四章 抽样检验	68
§4.1 计数抽样检验的一般原理	70
1. 二项分布和泊松分布	70
2. 抽样检验的特性函数及特性曲线	72
3. 关于两种错误判断	73
§4.2 一次计数抽样检验	75
§4.3 二次计数抽样检验	76
§4.4 失效率抽样检验	78
1. 失效率的抽样检验方案	78
2. 失效率抽样检验的 λ_1 方案	79
3. 器件失效率等级鉴定方案	82
第五章 半导体器件失效分析	85
§5.1 失效分析一般程序	87
§5.2 半导体器件失效模式和失效模式模型	89
1. 失效模式	89
2. 失效模式模型	91

§5.3 现场失效及其分析	93
1. 大功率晶体管	93
2. 双极型电路	93
3. MOS大规模集成电路	94
4. CMOS集成电路	94
第六章 失效分析技术	97
§6.1 电子显微镜分析	97
1. 电子束轰击试样产生的各种信息	97
2. 扫描电子显微镜	100
§6.2 电子微探针分析	105
§6.3 质谱分析和离子微探针分析	106
1. 质谱分析	106
2. 离子微探针分析	107
§6.4 光电子能谱分析	111
1. X射线光电子能谱学的原理	111
2. X射线光电子能谱仪	112
3. 光电子能谱的应用	112
§6.5 俄歇电子能谱分析	113
1. 俄歇电子能谱仪的工作原理	113
2. 俄歇电子能谱在半导体分析中的应用	116
3. 综合性能分析装置	118
§6.6 红外显微技术概况	119
1. 红外显微技术概况	119
2. 红外热分析法	120
3. 红外电视显微镜及其在失效分析中的应用	123
§6.7 X射线貌相分析	125
§6.8 半导体器件的检漏技术	126
1. 泄漏速率和密封有效期	126
2. 半导体器件的粗检	128
3. 氦质谱检漏	128
第七章 半导体器件表面失效机理及其表面钝化	131
§7.1 二氧化硅层缺陷对器件性能的影响	131
1. 氧化层针孔	131
2. 其他氧化层缺陷	133
§7.2 二氧化硅中正电荷对器件性能的影响	134
1. 硅-二氧化硅中的电荷	134
2. 表面反型判据	138

3. P-N结的反向漏电	140
4. 二氧化硅中正电荷对击穿电压的影响	146
5. 二氧化硅中正电荷对晶体管小电流电流增益 h_{FE} 的影响	152
§7.3 硅-二氧化硅界面的界面态对器件性能的影响	156
1. 界面态引起晶体管小电流 h_{FE} 下降	157
2. h_{FE} 雪崩衰退效应	157
3. 界面态产生“产生和复合”噪声	161
4. 界面态对MOS器件性能的影响	161
§7.4 表面钝化对器件稳定性的作用	161
1. MOS结构的C-V曲线	162
2. 磷硅酸盐玻璃钝化	168
3. 氯化氢氧化	170
4. 三氯乙烯氧化	173
5. 三氧化二铝钝化	173
6. 低温钝化技术	178
7. 氮化硅钝化	179
8. 半绝缘多晶硅钝化	182
9. 氮氢烘焙工艺	185
10. 玻璃钝化	186

第八章 半导体器件体内失效机理 187

§8.1 热电破坏引起器件的失效	187
1. 二次击穿	187
2. 晶体管的安全工作区	191
3. 功率管的抗烧毁措施	192
§8.2 硅晶体缺陷对器件成品率和可靠性的影响	198
1. 点缺陷	198
2. 位错	201
3. 层错	202
4. 漩涡缺陷	203
5. 二次缺陷	204
6. 晶片裂纹、弯曲和局部应力	207
§8.3 辐射造成半导体器件的失效	207
1. 辐射的基本效应	207
2. 辐射对半导体器件性能的影响	209
3. 提高半导体器件的耐辐射措施	214

第九章 电极系统及封装的失效机理 218

§9.1 金属化系统介绍	218
--------------	-----

§9.2 金属化系统的失效机理	219
1. 机械损伤	219
2. 铝的“电迁移”现象	220
3. 浅结器件中铝金属化膜造成 E-B 结短路	225
4. 热循环引起铝金属化再结构造成器件失效	227
5. 铝与二氧化硅的相互反应	227
6. 铝金属化膜的电化反应	228
7. 氧化层台阶处金属膜断路	229
§9.3 键合的失效机理	231
1. 工艺差错造成失效	232
2. 金属互化物使 Au-Al 系统失效	232
3. 热循环使引线疲劳而失效	232
4. 底座焊剂疲劳导致接触电阻增大	232
5. 内涂胶与封盖造成断丝	233
§9.4 封装与半导体器件的可靠性	233
1. 封装的一般介绍	233
2. 塑料封装及其对集成电路稳定性的影响	235
 第十章 质量控制及其管理	 237
§10.1 环境管理	237
1. 超净空气的管理	237
2. 超净水的管理	239
§10.2 原材料的质量控制	241
1. 超纯气体	241
2. 超纯化学试剂	241
§10.3 设计中的可靠性考虑	242
1. 基本内容	242
2. 高频功率管的可靠性设计	242
§10.4 工艺过程中的质量控制	244
1. 质控的内容	244
2. 镜检	244
3. MOS 电容的 $C-V$ 曲线在生产中的应用	248
4. 栅控管监控界面特性和表面复合	256
5. 用钠离子选择电极法对半导体器件进行钠沾污分析	258
§10.5 质量控制图	226
1. 均值-极差控制图 ($\bar{x}-R$ 控制图)	263
2. 不合格品率和不合格品数控制图	266
3. 缺陷数控制图	268
 附 录	 270

I. 正态分布的密度函数表	270
II. 正态分布表	271
III. 二项分布表	273
IV. 泊松分布 $P\left\{\xi = k\right\} = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ 的数据表	275
参 考 资 料	277

绪 论

半导体器件具有体积小、重量轻、功耗低和可靠性高的特点，在电子学领域中占有重要地位。由于用它构成的设备、系统的功能复杂化，器件数量增多，使用环境十分严酷，所以发生器件性能退化、失效是相当普遍的。因此，学习可靠性基础知识，研究半导体器件失效规律，从而提高器件可靠性是当前迫切需要解决的问题。

1. 提高半导体器件可靠性的意义

实现半导体器件的高可靠是电子技术发展本身提出的要求。为了完成国防和科研任务，电子设备和系统的复杂程度在不断提高，所用器件数量也在不断增多。电子设备的可靠性和它所用的元器件数量有密切关系，所用元器件数量越多，可靠性问题就越突出。对于一个串联系统，只要一个元器件失效，就会导致整个系统出故障，因此电子设备的可靠度为所用各元器件可靠度的乘积。假定每个器件的可靠度为0.995，用10个这样的器件组成的设备，它的可靠度就为 $(0.995)^{10}=95.1\%$ ；用40个这样的器件组成的设备，可靠度则降为81.8%。假如某导航计算机包含40000支晶体管，为了确保系统可靠度为95%，则要求每个器件的可靠度为0.9999987。因此，电子设备越复杂，所用器件数越多，对器件可靠性的要求越高。

实现半导体器件的高可靠，是使用上提出的迫切要求，特别是使用性质决定的。例如一个火箭、导弹系统的电子设备可靠性不高，在发射时或发射后，电子系统出现故障，造成控制失灵，这将导致较大的经济损失和不良的政治后果。随着半导体器件应用范围日益扩大，使用条件苛刻而多样，器件要经受各种高低温、潮热、高低气压、振动冲击、辐射等环境条件，所以对半导体器件可靠性的要求也越来越高。例如，家用电视机要求器件失效率为500~1000非特，工业通讯设备要求器件失效率为100~500非特，地下通讯设备要求器件失效率为20~200非特，短期、中期、长期工作卫星系统要求器件失效率分别为100、10、1非特等。

综上所述，实现半导体器件高可靠，是人们生活的需要，是国民经济建设的需要，是国防建设的需要。

2. 可靠性与产品质量的关系

可靠性是产品质量的一个重要指标，是对产品保持其性能的能力的衡量。半导体器件的产品质量应包括如下两个方面：技术性能指标和可靠性指标。这两者之间既有联系又有区别。一方面，若产品不可靠，技术性能再先进也得不到发挥；另一方面，若产品的一些基本性能十分低劣，那么产品的可靠性也无从谈起。例如，用于电视机行输出管的3DD15高反压功率管，可以用电流放大系数的大小、反向饱和电流的大小、饱和压降和击穿电压的高低等作为器件失效的判别标准。若器件的某一项或几项技术指标不符合要求，则该器件根本不能使

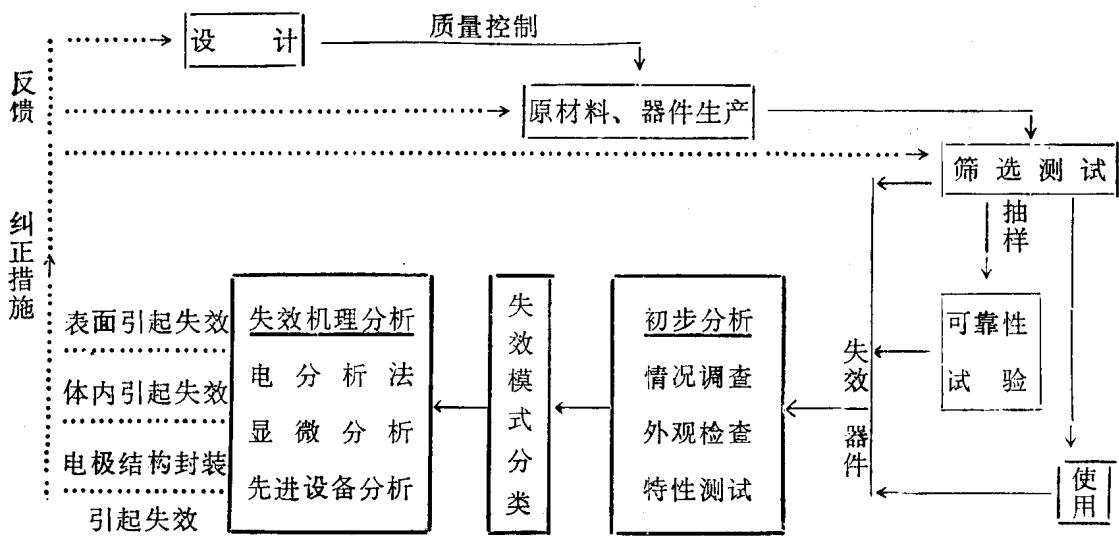
用，其可靠性自然无从谈起。一只高反压功率管，各项技术指标都很先进，但是如果不可靠、寿命短，用到电视机上很快失效，那么功能也就不能发挥。

产品的可靠性指标与产品技术性能指标之间有个很重要的差别，那就是产品技术性能可以通过仪器直接测量出来，例如由仪器可直接测量3DD15的技术参数，而产品的可靠性则必须进行大量的试验或调查研究，才能对产品的可靠度、失效率、寿命特征进行统计估计。

3. 半导体器件可靠性工作的基本内容

器件可靠性工作贯穿到从器件构思设计到使用报废的全部过程。影响器件可靠性的因素，有技术上和组织管理上的原因；有设计上和生产上的原因；也有使用上的原因。因此，实现器件的高可靠，必须在设计时就奠定可靠性基础，生产时确保可靠性实现，使用时保持可靠性水平。

半导体器件可靠性工作的基本内容，可以用下图来说明。图中表明器件生产、使用、失效分析、提出改进措施再反馈到生产的全过程，即由筛选测试、可靠性试验、现场使用中发现的失效器件进行失效分析，找出失效模式和失效机理，确定器件失效原因，拟订措施，改进器件设计、制造和筛选测试。



本教材共分两个组成部分——可靠性基本知识和半导体器件失效分析。

第一部分共四章。它包括可靠性基本概念、可靠性试验、抽样检验及使用特征的评估方法。

第二部分共六章。它包括半导体器件失效分析方法、失效分析新技术、失效模式、失效机理和质量控制及其管理。对于半导体的失效机理，我们分成表面引起的失效、体内引起的失效、电极系统及其封装引起的失效三个方面加以详细叙述。

第一章 可靠性概念及其主要数量特征

§ 1.1 产品的可靠度

当我们着手讨论可靠性这一问题时，不管是元器件或设备的可靠性，都必须对“可靠性”这一术语的定义有个明确的概念。这里还必须指出，可靠性的定义有个演变过程。

(1) 可靠性的含义

电子产品的可靠性是指产品在规定条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。

首先，产品的可靠性与规定的条件密切相关。所谓规定条件，包括产品所处的环境条件、负荷大小、工作方式和使用方式等。其环境条件包括气候环境和机械环境；其负荷大小包括所加电压和电流的大小等；其工作方式有连续工作或间断工作等；其使用方法是无人自动运行还是有相当技术水平的人操作。这些对产品的可靠性都有很大影响。

规定的条件不同，产品的可靠性也不同。一般情况下，温度越高，额定负荷越大，其电子产品的可靠性就越低。

其次，电子产品的可靠性是时间的函数。随着时间的推移，产品的可靠性将会越来越低。例如，要在1小时内保持一台电视机的规定性能当然比在一年时间内保持同样性能容易得多。

根据使用场合和环境的不同，通常在设计产品时应考虑产品的使用期、保险期或有效期等。例如，规定海底电缆的通讯设备不低于20年等。

第三，电子产品的可靠性与规定的功能有着极密切的关系。产品的可靠性是针对产品完成某种功能或针对完成其多种功能的综合而言的。因此，在讨论某一具体产品的可靠性以前，首先就必须对产品在哪种情况下叫可靠，在哪种情况下叫不可靠，给出一个统一的判断标准。如对晶体管的电流放大系数、反向漏电流、击穿电压等给出明确的判断标准。如果在设计整机时对器件要求很高，只允许其参数在很小的范围内变化，则器件就容易失去规定的性能，即不可靠。如果允许元器件的性能在较宽的范围内变化，则器件便有可能不失去规定的性能，即可靠性高。

那么如何去衡量电子产品的这种在规定条件下和规定的时间内完成规定功能的能力呢？这便需要引出可靠性的定量概念。

(2) 可靠度的定义

电子产品在实际工作中，往往由于各种偶然的因素而发生失效。所谓失效即产品失去规定的功能。例如，电负荷、振动、冲击、温度等突然改变，维修或使用不当等原因造成产品失效。由于这些原因具有偶然性，所以对于一具体产品来说，它在规定的条件下和规定的时间内，有可能完成规定的功能，也有可能不能完成规定的功能。这种在一定条件下可能发

生的事件,也可能不发生事件,通常称为随机事件(简称事件)。随机事件的发生与否,是带有偶然性的,表面上看来似乎是不可能预测的。但是,在大量的偶然性中蕴藏着必然的规律。例如,对于一个元器件来说,在某个时间内失效与否,固然是偶然的,不可预测的,然而,如果在试验时投入大量的元器件,那么在有些试验样品中,到某个规定时刻 t 止,失效的样品数 m 对投入试验的样品总数 n 之比值 m/n 是遵从一定规律的。设随机事件 A 在 n 次试验中发生了 m 次,则比值 $\frac{m}{n}$ 叫做随机事件 A 的频率,记作 $W(A)$,即 $W(A)=m/n$,其中 m 为

随机事件 A 的频数。如果对同批生产的元器件进行多次抽样试验,当每次投入试验的样品数 n 充分大时,便会发现这个频率 $W(A)$ 稳定在某常数 $P(A)$ 的周围,即有 $P(A)\approx m/n$ 。我们以 $P(A)$ 表示随机事件 A 发生的概率。这样,我们可以通过频率来找出客观存在的概率,即将频率看作为概率的一个近似值。所谓概率就是衡量随机事件发生的可能性大小的尺度。

因此,我们可以用概率这一尺度来衡量产品完成规定功能的能力的大小。将“能力”二字改为“概率”二字,这样,前述的可靠性定性定义就可以改为可靠性的定量定义——可靠度,即“可靠性”用概率表示时为“可靠度”。或者说,可靠度是用概率表示的产品可靠程度。

电子产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率就称为它的可靠度。可靠度是可靠性的数学描述,通常用字母 R 表示。

由可靠度的定义可知,可靠度是对一定的时间而言的。如果所指的时间不同,其可靠度的数值就不一样。用 T 表示产品失效前的工作时间,即产品的寿命。对于规定的时间 t ,某产品的寿命 T ,有可能是 $T\geq t$,也有可能是 $T<t$ 。这种取值随偶然因素而变动的量称为随机变量,常记为 ξ 。把仅可能取得有限个或无穷可数多个的数值的随机变量称为离散型随机变量;而可以取得某一区间内的任何数值的随机变量称为连续型随机变量。那么产品寿命 T 是一个连续型的随机变量。随机变量是随机事件的数量性表征。引入了随机变量就能充分利用其他数学工具来研究随机现象了。

将“ $T\geq t$ ”看作是一个随机事件。因此产品可靠度的定义可以用如下的数学式子表示:

$$R(t)=P(T\geq t) \quad (1-1)$$

由此可见,产品寿命 T 不小于某规定时间 t 的概率 $P(T\geq t)$ 是 t 的函数,叫作产品的可靠度函数,记作 $R(t)$ 。

如果有 n 个产品从开始工作到 t 时刻的失效数为 $m(t)$,则当 n 足够大时产品在 t 时刻的可靠度近似为

$$R(t)\approx\frac{n-m(t)}{n} \quad (1-2)$$

随着时间的增长,产品的可靠度会越来越低。它是一个介于1与0之间的数,即 $0\leq R(t)\leq 1$ 。

把抽象的可靠性用数学形式的概率表示,这就是可靠性技术发展的出发点。含糊不清的可靠性,用技术上统一的明确尺度——概率来定义后,产品可靠性的评估、比较、选择、保证、管理等等,才有了基础。

§ 1.2 产品的失效特征

可靠性的定量描述与一般的技术性能指标不同，它很难只用一个量完全代表，前面给出的可靠度是可靠性的一个数量指标。但是，并不是在任何场合使可靠度这个指标都是方便的。在有些情况下，就可能觉得还不直观。为此，在实际工作中针对具体情况，还要规定另外一些有关可靠性的数量指标。

1. 累积失效概率(不可靠度)

前面已经指出，对于规定的时间 t ，某产品的寿命 T ，有可能是 $T \geq t$ ；也有可能是 $T < t$ 。与可靠度的定义相对应，当产品的寿命 $T < t$ 时，即产品在时间 t 以前失效的概率可以用如下的数学式子表示：

$$F(t) = P(T < t) \quad (1-3)$$

$F(t)$ 称为随机变量 T 的概率分布函数或简称为分布函数。

对于给定的时间，例如 $t=1000$ 小时，如果某一产品的寿命 T 小于1000小时，那么我们就说，在规定的1000小时内，该产品发生了失效。因此，式(1-3)也可看作是“产品在规定的条件下和规定的时间内发生失效的概率”。在可靠性工作中，就称 $F(t)$ 为“产品的累积失效的概率”，或简称失效概率。

如果 n 个产品从开始工作到 t 时刻的失效数为 $m(t)$ ，则当 n 足够大时，产品在该时刻的累积失效概率可近似地看成为

$$F(t) \approx \frac{m(t)}{n} \quad (1-4)$$

$F(t)$ 的定义和 $R(t)$ 的定义是相对应的，因此，有时称 $F(t)$ 为不可靠度。可靠与不可靠之间，显然是相互对立的对立事件。就是说它们两者不可能同时出现，也不能同时都不出现，两者必居其一。这就是说，它们之间的概率和等于1，即

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad R(t) = 1 - F(t) \approx \frac{n - m(t)}{n} \quad (1-6)$$

例如，有100块TTL电路，在开始工作的1000小时内，累积失效10块电路；而工作到2000小时内，共累积失效30块电路，那么：

$$F(t=1000) \approx \frac{10}{100} = 10\%$$

$$\begin{aligned} R(t=1000) &= 1 - F(t=1000) \\ &\approx \frac{100-10}{100} = 90\% \end{aligned}$$

$$F(t=2000) \approx \frac{30}{100} = 30\%$$

$$R(t=2000) = 1 - F(t=2000)$$

$$\approx \frac{100-30}{100} = 70\%$$

由此可见, 在开始工作时, 即 $t=0$ 时, 所有的产品都是合格品; 因此 $m(t=0) \approx 0$, $R(t=0) = 1$, $F(t=0) = 0$ 。随着时间的增加, 失效数也不断增加, 可靠度相应减小。所有产品, 不管寿命有多长, 在使用中最后总是要失效的。因此, $m(t=\infty) \approx n$, 故 $F(t=\infty) \approx 1$, 而 $R(t=\infty) \approx 0$ 。从而可靠度函数是在 $[0, 1]$ 区间的非增函数, 其取值范围为 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。相应的累积失效概率为递增函数, 其值范围亦为 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。 $F(t)$ 与 $R(t)$ 的曲线如图 1.1 所示, 是一对互补函数。

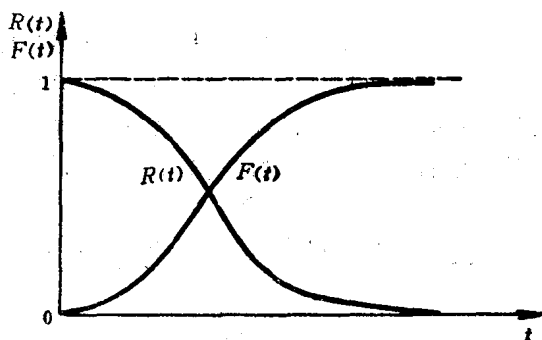


图 1.1

2. 失效密度函数(分布密度)

对于连续随机变量, 在大多数情况下, 它的分布函数是可微分的函数。现对分布函数 $F(t)$ 用时间微分, 则

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-7)$$

即分布密度 $f(t)$ 是分布函数 $F(t)$ 的导函数, 或者

$$F(t) = 1 - R(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-8)$$

即分布函数 $F(t)$ 是分布密度 $f(t)$ 的一个原函数。分布密度的图形 $y=f(t)$ 通常叫做分布曲线。

在可靠性工作中, 我们称 $f(t)$ 为失效密度函数或称失效密度。失效密度函数是指产品失效发生在 t 时刻的单位时间内的概率。它用来描述产品失效的可能性在 0 到 $+\infty$ 的整个时间轴上的分布情况, 是产品寿命这一随机变量的密度函数。在实际数据统计中, 它的近似值为

$$f(t) \approx \frac{\Delta m(t)}{n \Delta t} \quad (1-9)$$

式中: $\Delta m(t)$ 为 t 时刻附近的 Δt 时间间隔内试验样品的失效数; n 为试验样品的总数。

如果某产品的失效密度 $f(t)$ 以曲线表示, 那么该产品在规定的时间 t_i 内的累积失效概率 $F(t)$ 就是 $f(t)$ 在 $t < t_i$ 的区间内的面积。 $f(t)$ 、 $F(t)$ 与 $R(t)$ 之间的关系如图 1.2 所示。

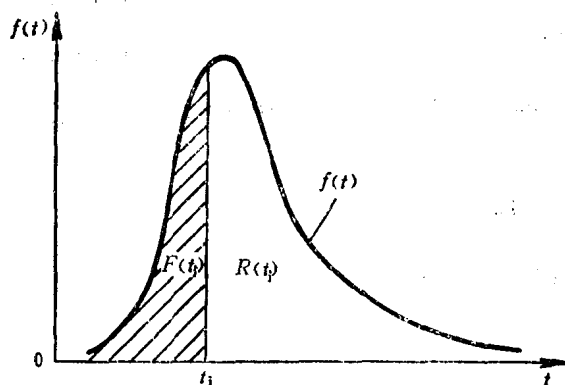


图 1.2

失效密度函数是用来说明产品失效规律的一个较好的形式, 它反映失效产品数分布在各

时刻的情况,而了解这一点对于制定筛选方案、分析失效机理是非常重要的。

3. 失效率函数(失效率)

失效密度函数是一个描述产品失效规律的重要概念。但是,在可靠性工作中,人们有时更关心的是在 t 时刻还在正常工作的产品中,在 t 时刻后的单位时间内还会有多少百分比的产品失效,这便引入失效率的概念。

产品在任意时刻 t 的失效率通俗地说是“产品工作到 t 时刻后,在一个单位时间内失效的概率”,通常记为 $\lambda(t)$,称为失效率函数。简称失效率。

设 n 个产品从 $t=0$ 开始,工作到 t 时刻失效数为 $m(t)$;又工作到 $t+\Delta t$ 时刻,失效数为 $m(t+\Delta t)$,则失效率 $\lambda(t)$ 可用下式估计:

$$\lambda(t) = \frac{m(t+\Delta t) - m(t)}{(n - m(t))\Delta t} = \frac{\Delta m(t)}{(n - m(t))\Delta t} \quad (1-10)$$

失效率是标志产品可靠性的常用数量特征之一。失效率愈低,则可靠性愈高。对于长寿命的电子元件经常用 $\lambda(t)$ 来表征产品的可靠性水平。

通常可以采用每小时百分之几或每千小时百分之几来作为产品失效率的单位。对于具有高可靠要求的半导体器件等产品,常常用“非特”(Fit)作为基准单位。“非特”的数量概念是:

$$1 \text{ 非特 (Fit)} = 1 \times 10^{-9} / \text{小时} = 1 \times 10^{-6} / \text{千小时}。$$

1个非特表示10亿个产品,在1小时内只允许有一个产品失效。或者说,在1千小时内只允许有百万分之一的失效概率。

为了区别产品的失效率水平,常常将产品的失效率分成若干等级;把为确定产品的失效率等级而进行的寿命试验称为失效率试验。

4. 累积失效概率、失效密度函数和失效率的关系

前面已引进了 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 三种失效分布函数。它们都反映着产品的失效概率或失效规律。但是三者是有区别的,不能在概念上混淆起来。

三种分布函数之间的关系:

以 n 分别乘式(1-10)的分母和分子,得

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta m(t)}{n\Delta t} \cdot \frac{n}{n - m(t)}$$

根据式(1-6)和式(1-9),则上式可写成

$$\lambda(t) \approx \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1-11)$$

可见失效率可通过失效密度函数对可靠度函数或其互补函数的比值来表达。

当然,在知道 $\lambda(t)$ 后,可靠度函数 $R(t)$ 也以用 $\lambda(t)$ 来表达。因为根据式(1-11)和式(1-7)得

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d[\ln R(t)]}{dt} \quad (1-12)$$

两边对 t 积分