

GH

高 等 学 校 规 划 教 材
工 科 电 子 类

微电子器件与电路 可靠性

张安康

電 子 工 業 出 版 社

微电子器件与电路可靠性

张 安 康

电子工业出版社

(京)新登字 055 号

内 容 简 介

本书全面地介绍了微电子器件、电路的可靠性及其失效分析。内容包括微电子器件、电路可靠性的基本概念,抽样检查,寿命试验的数据处理,微电子器件的表面、体内、电极系统及封装对器件性能的影响,微电子电路常见的失效机理,超薄栅介质的可靠性,微电子器件、电路的失效分析,失效分析技术等。

本书文字简练、内容丰富、取材新颖、注重实际,较好地反映了当前微电子器件与电路的可靠性工作水平。

本书可供高等学校工科电子类微电子器件与技术专业师生阅读,也可供从事器件与电路研制、使用和生产的技术人员、管理人员和可靠性工作者参考。

微电子器件与电路可靠性

张安康

责任编辑 陈晓莉

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16印张: 13 字数: 333 千字

1994 年 4 月第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷

印数: 0001-2000 册 定价: 6.30 元

ISBN7-5053-2235-4/TN654

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定, 我公司承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力, 有关出版社的紧密配合, 从 1978~1990 年, 已编审、出版了三轮教材, 及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要, 按照国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神, 我们“以全面提高教材质量水平为中心, 保证重点教材, 保持教材相对稳定, 适当扩大教材品种, 逐步完善教材配套”作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想, 组织我公司所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会, 在总结前三轮教材工作的基础上, 根据教育形势的发展和教学改革的需要, 制订了 1991~1995 年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的, 以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约 300 余种。这批教材的评选、推荐和编审工作, 由各编审委员会(小组)或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿, 其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐, 由编审委员会(小组)评选择优产生出来的, 其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的, 其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社, 为保证教材的出版和提高教材的质量, 作出了不懈努力。

限于水平和经验, 这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处, 希望使用教材的单位, 广大教师和同学积极提出批评和建议, 共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

中国电子工业总公司教材办公室

前 言

本教材由《电子材料与固体器件》教材编审委员会《半导体物理与器件》编审小组评选审定,并推荐出版。

本教材分为两部分:前面部分共三章,介绍可靠性基本概念、抽样检查、寿命试验的数据处理;后面部分共七章,讨论微电子器件与电路的失效分析,包括半导体表面、体内、电极系统及封装对器件性能的影响,微电子电路常见的失效机理,超薄栅介质的可靠性,微电子器件与电路的失效分析,失效分析技术等。

本书内容丰富、系统,文字精练,取材新颖,既叙述有关理论,又结合生产实践对失效产品进行分析。

本教材与二版相比,作了较大篇幅的修改。本版由张安康修订,天津大学潘姬副教授(主审)、郑云光副教授、韩关云讲师审阅。他们为审阅本教材付出了辛勤的劳动,提出了很多宝贵意见。

在编写过程中,责任编委赵鸿麟教授、周南生教授、郭维廉教授、简耀光教授、王洪鸣教授级高级工程师、冯耀兰副教授、余宏达、华汉良、印惠泉、阎育镇等高级工程师以及机电部第五研究所、中国华晶电子集团公司、东南大学无锡分校、东南大学微电子中心的同志曾给予多方面的支持和帮助。对于上述在编写过程中给予帮助的同志,编者谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,切望读者批评指正。

编 者

1992年10月于东南大学

目 录

第一章 可靠性概念及其主要数量特征	1
§ 1.1 产品的可靠度	1
一、可靠性的定义	1
二、可靠度 $R(t)$	1
§ 1.2 产品的失效特征	2
一、失效分布函数 $F(t)$	2
二、失效密度函数 $f(t)$	2
三、失效率函数 $\lambda(t)$	4
四、失效分布函数、失效密度函数和失效率的关系	4
五、微电子器件与电路的失效规律	5
§ 1.3 产品的寿命特征	7
一、平均寿命	7
二、寿命方差和寿命标准离差	7
三、可靠寿命与中位寿命	8
§ 1.4 微电子器件常见的失效分布	8
一、威布尔分布	8
二、指数分布	9
三、正态分布	10
四、对数正态分布	11
§ 1.5 产品可靠性指标间的内在联系	12
思考题	14
参考资料	14
第二章 可靠性试验及数据处理方法	15
§ 2.1 可靠性试验	15
§ 2.2 寿命试验	16
一、寿命试验简单介绍	16
二、寿命试验应注意的几个问题	17
§ 2.3 可靠性筛选	18
一、可靠性筛选的目的和意义	18
二、筛选条件的选择	18
三、筛选方法的简单介绍	19
§ 2.4 威布尔分布寿命试验结果的图估计法	21
一、威布尔概率纸的结构原理	21
二、威布尔概率纸上绘图的方法	24
三、利用威布尔概率纸估计威布尔参数	24

§ 2.5 利用威布尔概率纸估计寿命特征值	26
一、 $\frac{\mu}{\eta}$ 、 $\frac{\sigma}{\eta}$ 、 $F(\mu)$ 、 $F(\sigma)$ 四把刻度尺	26
二、寿命特征值的估计	27
§ 2.6 加速寿命试验及其数据处理	28
一、加速寿命试验的理论依据	29
二、加速寿命试验的加速变量与应力水平	31
三、加速寿命试验结果的数据处理程序	31
思考题	33
参考资料	34
第三章 微电子器件、电路可靠性抽样检查	35
§ 3.1 概述	35
§ 3.2 计数抽样检查的原理	36
一、抽样检查的接收概率	36
二、抽样检查特性曲线	37
三、关于两种错误判断	38
四、 P_0 和 P_1 的选取方案	38
§ 3.3 一次计数抽样检查	39
§ 3.4 二次计数抽样检查	40
§ 3.5 国家标准 GB2828、GB2829 的使用方法及其特点	41
一、GB2828-87 的使用方法	41
二、GB2829-87 的使用方法	45
三、GB2828 与 GB2829 特点分析	45
§ 3.6 失效率抽样检查	45
一、失效率的抽样检查方案	45
二、失效率抽样检查的 λ_1 方案	45
三、器件失效率等级鉴定方案	48
§ 3.7 平均寿命抽样检查	49
一、指数分布定时截尾寿命试验抽样方案	49
二、指数分布序贯寿命试验抽样方案	50
思考题	51
参考资料	51
第四章 微电子器件的可靠性问题——表面失效机理	52
§ 4.1 微电子器件的失效模式和失效机理	52
一、失效模式和失效机理	52
二、失效模式模型	52
§ 4.2 二氧化硅层缺陷对器件性能的影响	54
一、氧化层针孔对器件性能的影响	54
二、其他氧化层缺陷对器件性能的影响	55
§ 4.3 二氧化硅中正电荷对器件性能的影响	56
一、pn 结反向漏电	56
二、二氧化硅中正电荷对反向击穿电压的影响	60

三、二氧化硅中正电荷对晶体管小电流 I_{FE} 的影响	63
§ 4.4 硅-二氧化硅的界面陷阱电荷对器件性能的影响	65
一、界面陷阱电荷引起晶体管小电流 I_{FE} 下降	65
二、 I_{FE} 雪崩衰退效应	65
三、界面陷阱电荷的“产生和复合”噪声	68
四、界面陷阱电荷对 MOS 器件性能的影响	69
思考题	69
参考资料	70
第五章 微电子器件的可靠性问题——体内失效机理	71
§ 5.1 热电破坏引起器件的失效	71
一、二次击穿的性质	71
二、晶体管的安全工作区	74
三、功率管的抗烧毁措施	75
§ 5.2 晶体缺陷对器件性能和可靠性的影响	76
一、点缺陷对器件性能的影响	77
二、位错对器件性能的影响	78
三、层错对器件性能的影响	80
四、微缺陷对器件性能的影响	80
五、二次缺陷对器件性能的影响	81
六、吸除技术	82
§ 5.3 辐射造成微电子器件的失效	83
一、辐射的基本效应	83
二、辐射对微电子器件性能的影响	84
§ 5.4 温度对微电子器件性能的影响	88
一、温度对器件电参数的影响	88
二、晶体管直流电流放大系数随温度的变化及其改善办法	89
思考题	92
参考资料	92
第六章 微电子器件的可靠性问题——电极系统及封装的失效机理	93
§ 6.1 金属化系统介绍	93
§ 6.2 金属化系统的失效机理	93
一、机械损伤	93
二、铝的电迁移	94
三、浅结器件中铝金属化膜造成 EB 结短路	97
四、热循环引起铝金属化再结构造成器件失效	98
五、铝金属化膜的电化反应造成器件失效	99
六、氧化层台阶处金属膜断路	99
七、过合金造成器件失效	101
§ 6.3 芯片焊接失效机理	102
一、银浆粘结	102
二、合金粘结	102
§ 6.4 引线键合的失效机理	104

一、工艺差错造成失效	104
二、金属互化物使 Au-Al 系统失效	104
三、银的迁移造成 pn 结短路	104
四、热循环使引线疲劳而失效	105
五、沾污造成引线腐蚀而开路失效	106
六、内涂料开裂造成断丝	106
七、键合应力过大造成失效	106
八、外引线的失效	106
§ 6.5 封装与半导体器件的可靠性	107
一、封装与器件可靠性	108
二、金属封装的失效机理	108
三、塑料封装的失效机理	109
思考题	110
参考资料	110
第七章 微电子电路的可靠性问题——超薄栅介质的可靠性	111
§ 7.1 概述	111
一、MOS 器件按比例缩小的问题	111
二、栅介质的可靠性问题	111
三、薄氧化层与器件可靠性的关系	112
§ 7.2 薄栅氧化层击穿	112
一、漏电	112
二、介质膜的击穿	113
§ 7.3 热载流子注入效应	115
一、n-MOS 的热电子效应	116
二、CMOS 集成电路的热载流子注入效应	116
三、热载流子注入效应对 MOS 器件性能的影响	117
四、热载流子引起器件衰退的机理	118
五、影响热载流子效应的主要因素	119
六、提高抗热载流子效应的措施	120
§ 7.4 研究超薄栅介质可靠性的测试结构	121
一、栅氧化层可靠性评估	121
二、测量栅绝缘层中陷阱电荷质心的新技术	123
思考题	124
参考资料	124
第八章 微电子电路的可靠性问题——常见的失效机理	125
§ 8.1 微电子电路的静电损伤	125
一、静电放电损伤模型	125
二、静电放电敏感性	126
三、静电损伤的失效模式及失效机理	127
四、静电放电失效的防护措施	128
§ 8.2 电过应力失效	130
§ 8.3 VLSI 中金-半接触系统的可靠性	131

一、铝-硅接触系统	131
二、金属-硅化物-硅接触系统	133
§ 8.4 VLSI 与电迁移	135
一、VLSI 的电迁移性质	135
二、电迁移引起 VLSI 互连膜失效率预测	136
§ 8.5 CMOS 集成电路的闭锁效应	137
一、闭锁效应及其失效机理	137
二、CMOS 电路产生闭锁效应的失效条件	138
三、CMOS 电路抗闭锁效应的方法	138
§ 8.6 核辐射对微电子电路的影响	140
一、双极集成电路	140
二、CMOS 集成电路	141
三、几种集成电路的耐辐射特性	141
§ 8.7 动态存储器中的软误差	142
一、产生存储器软失效的两种失效机理	143
二、产生软误差的条件	143
三、软误差与临界电荷的关系	144
四、降低软误差率的方法	145
§ 8.8 工艺缺陷造成的失效	145
一、MOS RAM 失去接触窗口和产生寄生晶体管	145
二、SOS 的背沟道效应和岛边缘的界面陷阱	146
三、局部氧化中的鸟嘴和白带效应	146
思考题	147
参考资料	148
第九章 微电子器件与电路失效分析	149
§ 9.1 概述	149
一、失效分析的意义、作用	149
二、失效分析的一般程序	149
§ 9.2 分析中几种常用方法介绍	151
一、结截面显示方法	151
二、内涂料去除方法	152
三、纯化层等的去除方法	153
四、材料缺陷的显示方法	153
五、扩散管道的显示方法	154
§ 9.3 从失效器件的特性曲线分析失效机理	154
一、异常击穿特性曲线	154
二、晶体管异常输出特性曲线	158
三、MOS 管异常输出特性曲线	161
四、测试分析时应该注意的几个问题	162
§ 9.4 失效分析举例	163
一、硅 npn 中功率管分段击穿特性分析	163
二、硅 pnp 管的漏电失效分析	164

三、高频小功率器件的接触失效·····	164
四、硅 npn 平面中功率三极管的低击穿·····	165
五、集成电路腐蚀开路失效·····	166
六、彩电两片机行场扫描电路分析·····	167
思考题·····	168
参考资料·····	168
第十章 失效分析技术 ·····	169
§ 10.1 电子显微镜分析·····	169
一、电子束轰击试样产生的各种信息·····	169
二、扫描电子显微镜·····	171
三、闪频扫描电镜·····	174
四、透射电子显微镜·····	175
§ 10.2 电子微探针分析·····	175
§ 10.3 质谱分析和离子微探针分析·····	175
一、质谱分析·····	176
二、离子微探针分析·····	176
§ 10.4 光电子能谱分析·····	178
§ 10.5 俄歇电子能谱分析·····	179
一、俄歇电子能谱仪的工作原理·····	179
二、俄歇电子能谱在微电子器件失效分析中的应用·····	180
三、综合性能分析装置·····	182
§ 10.6 红外显微分析·····	183
一、红外热分析法·····	183
二、红外电视显微分析·····	184
§ 10.7 X 射线貌相分析·····	185
§ 10.8 微电子器件的检漏技术·····	186
一、密封有效期和检漏标准·····	186
二、氦质谱检漏·····	187
§ 10.9 深能级瞬态谱分析·····	189
一、基本原理·····	189
二、DLTS 的应用·····	190
思考题·····	193
参考资料·····	193
附录 ·····	195
I. 正态分布的密度函数表·····	195
II. 正态分布表·····	196

第一章 可靠性概念及其主要数量特征

§ 1.1 产品的可靠度

一、可靠性的定义

所谓可靠性,就是产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。在这里,需要说明以下几点:

(1) 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、工作方式和使用方法等。规定条件不同,产品可靠性也不同。通常,温度越高,额定负荷越大,电子产品的可靠性就越低。

(2) 产品的可靠性与规定时间有关。规定时间是指产品完成规定功能的工作时间。随着时间的推移,产品的可靠性会越来越低。根据使用场合和环境的不同,有的只规定几十小时,有的则规定几万小时,相差可以很大。例如,海底电缆的通讯设备规定不低于 20 年。

(3) 产品的可靠性还与规定功能有密切的关系。一台设备或一只器件往往有若干项功能,或若干项技术指标。这里所说的“完成规定功能的能力”是指若干功能的全体,而不是其中的一部分。例如,硅 NPN 外延平面高速开关晶体管有下述几项指标。极限参数:集电极最大电流 I_{CM} ,集电极最大耗散功率 P_{CM} ;直流参数:共发射极直流电流放大系数 h_{FE} ,发射极开路时集电结反向电流 I_{CBO} ,集电极开路时发射结反向电流 I_{EBO} ,基极开路时集电极-发射极反向电流 I_{CEO} ,饱和压降 $V_{CE(sat)}$, $I_E = 0$ 时集电极-基极击穿电压 BV_{CBO} , $I_C = 0$ 时发射极-基极击穿电压 BV_{EBO} , $I_B = 0$ 时集电极-发射极击穿电压 BV_{CEO} ;交流参数:特征频率 f_T ,共基极输出电容 C_{ob} ;开关参数:开通时间 t_{on} ,存储时间 t_s ,下降时间 t_{fo} 。

为了衡量电子产品在规定条件、规定时间内完成规定功能的能力,必须引出可靠性的定量概念。

二、可靠度 $R(t)$

电子产品在应用时,往往由于各种偶然因素而失效。所谓失效,即产品失去规定的功能。例如,振动、冲击、温度、电负荷等的突然改变,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,所以对于某一产品来说,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,也可能不发生的事件,通常称为随机事件。随机事件的发生与否,是带有偶然性的,表面上看来是不可能预测的。但是,在大量的偶然性中蕴藏着必然的规律。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。这样,前述的定性定义“可靠性”,就可以改为定量的定义“可靠度”。所谓可靠度就是指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。可靠度是可靠性的数学描述,通常用字母 R 表示。

可靠度的一个重要变量是时间。用 T 表示产品失效前的工作时间,即产品寿命。对于规定的时间 t ,寿命 T ,有可能是 $T \geq t$,也有可能是 $T < t$ 。若将“ $T \geq t$ ”看作是一个随机事件,产品可靠度的定义可以用下面的数学式子表示:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1.1)$$

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,称为产品的可靠度函数,记作 $R(t)$ 。若有 N 个产品从开始工作到 t 时刻的失效数为 $n(t)$,则当 N 足够大时产品在 t 时刻的可靠度近似为

$$R(t) \approx \frac{N - n(t)}{N} \quad (1.2)$$

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 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。 $R(t)$ 随时间的变化曲线见图 1.1。

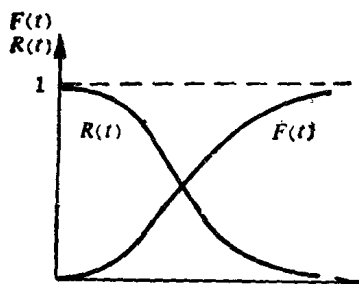


图 1.1 $R(t)$ 与 $F(t)$ 随时间的变化曲线

§ 1.2 产品的失效特征

一、失效分布函数 $F(t)$

前面已经指出,对于规定的时间 t ,产品寿命 T ,有可能是 $T \geq t$,也有可能是 $T < t$ 。当产品的寿命 $T < t$ 时,产品在时间 t 以前失效的概率,按可靠度定义,可用下式表示:

$$F(t) = P(T < t) \quad (1.3)$$

$F(t)$ 称为产品寿命 T 的失效分布函数。(1.3) 式可看作是“产品在规定条件下和规定的时间内发生失效的概率”。若给定的时间 $t = 100$ 小时,则 $F(100) = P(T < 100)$ 表示 100 小时以前的失效概率;若 $t = 1000$ 小时,则 $F(1000) = P(T < 1000)$ 表示 1000 小时以前的失效概率。当然 $F(1000)$ 也包括 100 小时以前的失效概率。因此, $F(t)$ 含有累积失效的概念,在可靠性工作中,也有把 $F(t)$ 称作“累积失效概率”的。

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

$$F(t) \approx \frac{n(t)}{N} \quad (1.4)$$

众所周知,产品在规定时间内失效与不失效、完成规定功能与不完成规定功能是相互对立的,因此有时也称 $F(t)$ 为不可靠度。可靠度与不可靠度的关系,可用下式表示:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.5)$$

$$\text{或 } R(t) = 1 - F(t) \approx \frac{N - n(t)}{N} \quad (1.6)$$

图 1.1 为 $F(t)$ 与时间 t 的关系曲线。 $F(t)$ 与 $R(t)$ 是一对互补的函数。因为在开始工作时,所有的产品都是合格品,即 $n(0) = 0$, $R(0) = 1$, $F(0) = 0$ 。随着时间增加,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,使用到最后总是要失效的,即 $n(\infty) = N$, $F(\infty) = 1$, $R(\infty) = 0$ 。因此,可靠度函数是 $[0, 1]$ 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,其取值范围亦为 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。

二、失效密度函数 $f(t)$

为了描述产品的失效分布,经常要用到失效密度函数的概念。为了对它有个直观的理解,必须首先讨论失效频率直方图。

1. 失效频率直方图

若对 N 个同类产品进行寿命试验,可以得到每个产品的失效时间,则可按试验结果来探求失效规律。计算过程如下:

(1) 分组 由于失效数较多,可按一定的时间间隔将产品寿命试验数据分成 a 组,计算落在每组中的失效个数。通常把每组中的失效个数叫失效频数。若第 i 组的失效频数为 Δn_i ,则所有组的失效频数的总和就是受试产品的总数 N ,即

$$\text{求和 } \sum_{i=1}^a \Delta n_i = N \quad (1.7)$$

(2) 计算失效频率与累积失效频率 各组的失效频数 Δn_i 与产品总数 N 之比值称为该组的失效频率,记作 f_i^* 。即

$$f_i^* = \frac{\Delta n_i}{N} \quad (1.8)$$

显然

$$\sum_{i=1}^a f_i^* = 1 \quad (1.9)$$

从第 1 组到第 i 组的失效频率之和称为第 i 组的累积失效频率,记作 F_i 。即

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j^* = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta n_j}{N} \quad (1.10)$$

由于 $f_i^* \geq 0$,所以 F_i 必然是增加的,到最后一组等于 1。

(3) 作频率直方图 将失效频率除以每组时间间隔 Δt 所得的商记作 f_i ,则

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t} = \frac{\Delta n_i}{N \cdot \Delta t} \quad (1.11)$$

以失效时间 t_i 及其对应的 f_i 作成直方图,如图 1.2 所示。由图可直观地看出试验数据的分布范围、集中程度以及每个时间区间中所占的失效比例。

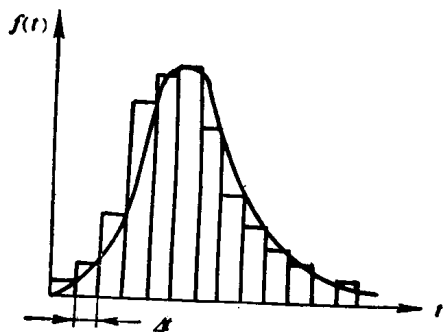


图 1.2 失效频率直方图与失效密度曲线

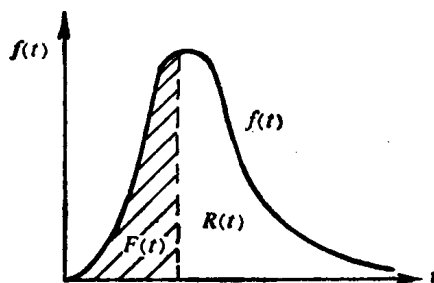


图 1.3 $R(t)$ 、 $F(t)$ 与 $f(t)$ 的关系

2. 失效密度函数

若受试产品数量多,试验数据也越多,则可把分组的时间间隔 Δt 取得越来越小,相邻矩形的高度也越来越接近,最后趋于一条光滑曲线,如图 1.2 所示,称为失效密度曲线。其数学表达式 $f(t)$ 称为失效密度函数。失效密度曲线与横坐标轴之间所围成的面积等于失效时间在 $[0, \infty]$ 范围内取值的概率,因此

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (1.12)$$

失效密度函数 $f(t)$ 与失效分布函数 $F(t)$ 有如下关系:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1.13)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.14)$$

$f(t)$ 、 $F(t)$ 与 $R(t)$ 之间的关系示于图 1.3。因此,只要确定 $f(t)$ 或 $F(t)$,可靠度函数 $R(t)$ 就随之而定。通常所说的器件失效分布类型指的就是 $f(t)$ 或 $F(t)$ 的函数类型。它们是用来说明产品失效规律的一个较好形式,反映失效产品数分布在各个时刻的情况,了解这些对制定筛选方案、分析失效机理是非常重要的。

三、失效率函数 $\lambda(t)$

1. 失效率的概念

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,这样便引入了失效率的概念。

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”,记作 $\lambda(t)$,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 时刻有 $n(t)$ 个产品失效;又工作到 $t + \Delta t$ 时刻,失效数为 $n(t + \Delta t)$,则失效率 $\lambda(t)$ 可用下式估计:

$$\lambda(t) \approx \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)]\Delta t} \quad (1.15)$$

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,可靠性愈高。对于长寿命的电子元器件经常用 $\lambda(t)$ 来表征产品的可靠性水平。

2. 失效率单位

失效率单位有三种表示方法: h^{-1} , $\%/100h$, 菲特 (Fit)。通常可用每小时或每千小时的百分数作为产品失效率的单位。例如,美国军用电台要求其失效率不超过 0.2% ($1000h$)。对于可靠性要求较高的微电子器件等产品,常用 Fit 作为基准单位。例如,长期工作卫星系统要求其器件失效率不超过 1Fit。菲特这一单位的数量概念是

$$1\text{Fit} = 1 \times 10^{-9}/h = 1 \times 10^{-6}/1000h$$

所以 1 个菲特所表示的物理意义是指 10 亿个产品,在 1 小时内只允许有一个产品失效。或者说每千小时内只允许有百万分之一的失效概率。

[例] 设 100 块集成电路,在第 100h 内的失效数为 7 块,在 100~101h 内失效 13 块,求该电路在 100h 的失效率为多少?

[解] 按题意 $n(100 + 1) = 13$, $n(100) = 7$,由(1.15)式,得

$$\lambda(100) = \frac{13 - 7}{(100 - 7)(101 - 100)} = 6.45\%h^{-1}$$

四、失效分布函数、失效密度函数和失效率的关系

前面引进的 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 三种失效分布函数,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。下面讨论三种分布函数之间的关系。

用 N 分别乘(1.15)式的分母和分子,并根据(1.11)、(1.6)式可得

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N - n(t)} \quad (1.16)$$

$$\lambda(t) \approx \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1.17)$$

由此可见,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,知道 $\lambda(t)$ 后,根据(1.17)式和(1.13)式, $R(t)$ 也可以用 $\lambda(t)$ 来表达。

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d[\ln R(t)]}{dt} \quad (1.18)$$

两边对 t 积分,并由 $R(t=0) = 1$,可得

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \Big|_0^t$$

$$R(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (1.19)$$

对于失效率稳定近似为常数($\lambda(t) = \lambda \approx$ 常数)的产品,其可靠度函数为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.20)$$

所以这种产品的可靠度函数是服从指数分布的。

五、微电子器件与电路的失效规律

1. 浴盆曲线

绝大多数器件在使用过程中,失效率并不是恒定不变的。失效率的典型曲线,形如“浴盆”俗称“浴盆曲线”,示于图 1.4。按失效率的变化规律,可把产品的全部工作时间分为以下三个时期。

(1) 早期失效期

其特点是失效发生在器件使用的初期,失效率较高,且随工作时间的增加而迅速下降。早期失效的原因大多是由于器件本身存在的缺陷所造成。进行合理的筛选,尽可能在交付使用前把早期失效的器件淘汰掉,可以使出厂器件的失效率达到或接近下述偶然失效期的水平,即达到或接近原设计水平。改进产品设计、加强材料和器件的质量控制,可以减少这一阶段的失效。

(2) 偶然失效期

其特点是失效率高、稳定,近似为常数。这个阶段中所发生的失效往往带有偶然性。如电浪涌使器件开路而失效等。偶然失效期是器件的良好使用阶段,产品的失效规律符合指数分布规律。

当失效率为常数时,可用下式估算:

$$\lambda = \frac{k}{T_N} \quad (1.21)$$

式中, k 为产品失效数, T_N 为受试器件数和试验时间的乘积,简称器件小时数。

【例】某批电路经筛选进入偶然失效期,取样 1000 块,作 1000h 寿命试验,失效 5 块,试

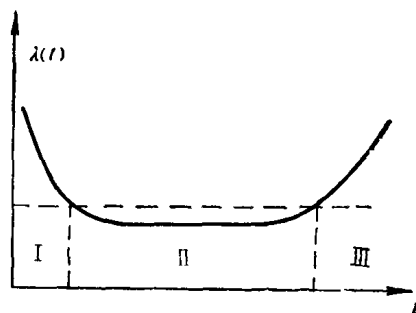


图 1.4 典型的失效率曲线
图中,Ⅰ区为早期失效期,Ⅱ区为偶然失效期,Ⅲ区为耗损失效期

求这批产品的失效率为多少?

$$[\text{解}] \quad T_N = 995 \times 1000, \lambda = \frac{5}{9.95 \times 10^5} = 0.503\% / 1000\text{h}$$

(3) 耗损失效期

其特点是失效率明显上升,大部分器件相继失效,一般出现在产品使用的后期。耗损失效是由于磨损、老化、疲劳等原因引起器件性能恶化所造成的。这时必须更换器件来保证设备的正常工作。

必须指正,不是任何一批器件均有三个失效期的。对于微电子器件、电路,早期失效阶段表现得十分明显(杂质、尘埃沾污,封装漏气,键合不良等等);然而,偶然失效期的时间较长,所以它们的工作寿命较长。

2. 新失效率曲线

由于浴盆曲线的基本模型与实验数据不相符合,使它的使用受到了限制。因为它是基于早期失效、偶然期失效以及耗损期失效之间彼此独立的。为此,丹麦电气科学院机电研究所提出了新的模型——S曲线模型,其基本形状是单峰、双峰或三峰分布,模型与基本实验是符合的。

S曲线模型的重要概念是对元器件提出三种失效类型:a. 由于耗损、衰老才失效的“优质”元器件;b. 由于内部缺陷而失效的“畸变”元器件;c. 由系统组装过程中损伤而造成的“早期失效”元器件。S曲线模型另一个重要方面是能确定元器件和系统的老化时间,可以决定系统老化和元器件老化之间的关系以及如何作适当的分配。

对于S曲线模型,在某一系统中的元器件可能是下面四种组合类型的一种;第一种全部是“优质”元器件;第二种是“畸变”元器件加“优质”元器件;第三种是“早期失效”元器件加“优质”元器件;第四种是“早期失效元器件”加“畸变”元器件加“优质”元器件。第一类型将出现“单峰分布”。第二、三类将出现双峰分布。第四类型将出现三峰分布。下面以三峰分布为例进行简要说明。

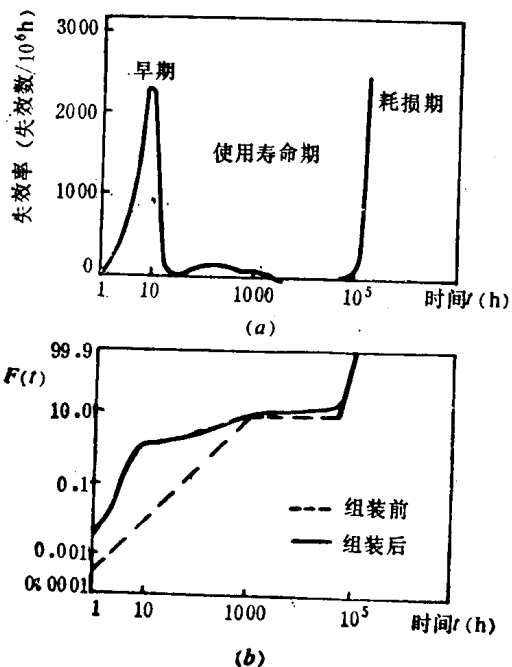


图 1.5 具有三峰失效分布的系统,其元器件的失效率曲线(a)和失效分布曲线(b)

呈现三峰分布的元器件的累积失效分布函数为

$$F(t) = P_i F_i(t) + P_f F_f(t) + P_s F_s(t)$$

其中下标 i 、 f 、 s 分别表示“早期失效”、“畸变”、“优质”元器件。若假设 $F_i(t)$ 、 $F_f(t)$ 、 $F_s(t)$ 均是双参数威布尔分布(详见 § 1.4)函数。图 1.5(a)(b) 为典型的失效分布函数曲线和失效率曲线。新失效率曲线(或称新浴盆曲线)虽然仍有“早期”和“耗损期”,但是“偶然失效期”却被“畸变失效期”和“无失效期”所替代。从使用角度来看,累积失效分布函数 $F(t)$ 是令人感兴趣的(这里是使用的威布尔分布函数)。因为它具有双 S 形,且每个 S 形的水平部分对应于 P_i 和 $P_i + P_f$ 值。未组装过的元器件将按虚线所示规律失效。若把这些元器件放在和系统环境所接近的环境中作试验,就可以从虚线的水平段起