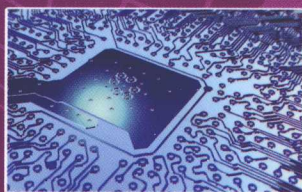


仪器与 系统可靠性

康瑞清 编著



内容全面 涵盖了电子仪器可靠性理论和应用

针对性强 针对电子类专业的可靠性教材

实用性强 包含实用的电子仪器可靠性设计案例



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

仪器与系统可靠性

康瑞清 编著

湖北工业大学图书馆



01349046

TH86/32



机械工业出版社

X₂

本书主要论述了与电子系统相关的可靠性设计基础,可靠性建模、设计与分配方法,电子仪器中常用电路的故障树分析方法,故障模式影响及危害性分析方法,以及可靠性试验方法,着重对电子系统的可靠性设计方法进行了阐述。本书是作者在总结多年教学经验的基础上撰写而成的。书中强调了基本理论的系统性与工程实用性的结合,突出理论联系实际的内容,并提出了一些实际的电子系统可靠性案例。

本书可用作高等院校电子类专业本科生教材,也可供广大从事可靠性工程工作的工程技术人员和相关企业管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

仪器与系统可靠性/康瑞清编著. —北京:机械工业出版社,2012.11
ISBN 978-7-111-40012-7

I. ①仪… II. ①康… III. ①虚拟仪表—软件工具—程序设计
IV. ①TH86②TP311.56

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第239366号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨 韩静

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·9.5印张·211千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40012-7

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

可靠性工程是国外 20 世纪 50 年代发展起来的, 它是以概率论为理论基础, 以数理统计为基本方法, 用以保证和提高系统适用性的一门综合技术。它包括可靠性设计、可靠性试验、可靠性管理及失效分析等内容。至今已在电子、航天与航空、造船、轻工和建筑工业等各个领域得到了广泛应用。目前各行各业都对可靠性工程提出了进一步的要求, 可靠性工程的行业特点也越来越明显。

本书在跟踪国内外可靠性工程技术发展的基础上, 从工程实用的角度, 以电子类专业学生和专业工程师以及管理人员为目标读者, 介绍了电子仪器的可靠性工程设计知识。本书共 7 章, 各章紧扣电子仪器可靠性设计这一主题, 介绍仪器与系统在进行可靠性设计时需要掌握的可靠性理论和设计方法, 并给出了实际案例。

本书撰写的过程中, 借鉴了国内外的一些优秀教材和文献, 在此一并向相关作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中的不足和疏漏之处恳请读者批评指正。

康瑞清

目 录

前言

第1章 可靠性设计基础	1
1.1 概述	1
1.2 可靠性的基本概念	3
1.3 可靠性特征量	4
1.3.1 可靠度与不可靠度	4
1.3.2 失效率	5
1.3.3 可靠度函数的一般表达式	8
1.3.4 故障前平均工作时间	9
1.3.5 平均故障间隔时间	10
1.4 可靠性寿命分布	11
1.4.1 指数分布	11
1.4.2 威布尔分布	13
1.4.3 正态分布和对数正态分布	13
1.4.4 不同分布中可靠性特征量的选取原则	15
1.5 习题	15
第2章 可靠性模型	16
2.1 可靠性框图	16
2.2 模型的建立	18
2.3 几种典型结构的可靠性模型	19
2.3.1 串联结构	19
2.3.2 并联结构	22
2.3.3 K/N 结构	26
2.4 三态系统的可靠性模型	29
2.4.1 三态系统的概念	29
2.4.2 串联结构	29
2.4.3 并联结构	30
2.5 习题	31
第3章 可靠性预计与分配	32
3.1 可靠性预计	32
3.1.1 元器件的可靠性预计	33
3.1.2 系统的可靠性预计	35
3.2 可靠性分配	39
3.2.1 指数分布的情况	40

3.2.2 等分配法	40
3.2.3 再分配法	42
3.2.4 AGREE 分配法	42
3.2.5 拉格朗日乘子法	44
3.3 可靠性分配案例	45
3.4 习题	46
第4章 故障模式影响及危害性分析	48
4.1 基本术语	48
4.2 故障模式影响分析	49
4.2.1 故障影响分析	51
4.2.2 电子元器件的故障模式、失效机理和故障分析	54
4.2.3 故障检测方法分析	58
4.2.4 补偿措施分析	58
4.2.5 故障模式影响分析的实施	58
4.3 危害性分析	60
4.3.1 定性分析法	60
4.3.2 定量分析法	61
4.3.3 绘制危害性矩阵	62
4.4 故障模式影响和危害性分析结果	63
4.4.1 FMECA 分析程序	64
4.4.2 FMECA 报告	66
4.5 FMECA 案例	66
第5章 故障树分析	69
5.1 故障树概念	69
5.2 故障树常用事件及其符号	71
5.2.1 故障树的事件符号	71
5.2.2 故障树的逻辑门符号	71
5.3 故障树的建立	72
5.3.1 原始故障树的建造	72
5.3.2 故障树的规范化	73
5.3.3 故障树的简化和模块分解	74
5.4 故障树定性分析	75
5.4.1 求最小割集的方法	76
5.4.2 定性评定故障树中的底事件	78
5.5 故障树定量分析	78
5.5.1 利用结构函数计算事件发生的概率	78
5.5.2 求顶事件发生概率的近似值	80
5.5.3 故障树的数学描述	82
5.6 重要度分析	83
5.6.1 概率重要度	84

5.6.2 关键重要度	84
5.6.3 结构重要度	85
5.7 故障树分析报告的主要内容	86
5.8 故障树分析案例	86
5.9 习题	87
第6章 电子系统的可靠性	88
6.1 电子元器件的可靠性	88
6.2 不同元器件的失效机理	89
6.2.1 电阻	89
6.2.2 电容	89
6.2.3 电感	90
6.2.4 继电器	90
6.2.5 半导体器件	90
6.2.6 集成电路	90
6.3 元器件的正确使用	92
6.3.1 分立半导体器件的使用	92
6.3.2 固定电阻和电位器	92
6.3.3 电容的选用	93
6.3.4 集成芯片的选择	94
6.4 潜在电路分析	95
6.4.1 潜在分析类型	95
6.4.2 网络树的构造	96
6.4.3 潜电路设计规则	97
6.4.4 案例研究	108
6.5 降额设计	111
6.5.1 降额的目的	113
6.5.2 降额方法的使用	113
6.6 可靠的电路设计	115
6.6.1 设计简化	115
6.6.2 采用标准部件和电路	116
6.6.3 瞬态和过应力保护	116
6.7 电路的容差分析	118
6.7.1 产生容差问题的原因	119
6.7.2 容差设计及分析方法	119
6.8 热设计	125
6.8.1 热设计的一般过程	125
6.8.2 常用冷却方法及选择	126
6.8.3 元器件的部件与安装	126
6.8.4 印制电路板的热设计	127
6.9 习题	127

第7章 可靠性试验	129
7.1 可靠性试验的分类	129
7.2 环境应力筛选试验	130
7.3 可靠性增长试验	133
7.3.1 可靠性增长试验的方式	133
7.3.2 可靠性增长模型	134
7.4 可靠性鉴定试验	135
7.5 可靠性验收试验	136
7.5.1 可靠性验收方案的确定	137
7.5.2 可靠性试验的数据分析与处理	139
7.6 习题	140
参考文献.....	141

第1章 可靠性设计基础

随着集成电路、微电子技术在各类仪器中的广泛运用,电子仪器的复杂程度越来越高,传统的仪器只能完成测量、显示功能,而现代的智能仪器往往具有智能诊断、智能学习等能力。因此,在应用系统中,电子仪器起的作用也越来越大,电子仪器能否可靠地完成其任务,也逐渐成为人们越来越关注的问题。某些电子仪器需要在特殊的条件下稳定可靠地工作,这些电子仪器需要满足特殊的要求,例如能够长时间连续工作,或者在较强的电磁场环境、较高的环境温度或较大的环境湿度下仍然能够可靠地工作。在电子仪器出现故障时,人们通常希望仪器本身可以进行诊断和做出正确的判断,以减小维修的次数和时间。

直到20世纪60年代,产品从制造商出厂时,如果没有缺陷或系统故障,则认为该产品的质量指标均已达到要求。随后,日益复杂的设备和系统,以及因为失效而迅速增加的维修成本,迫使人们会最先考虑产品的可靠性、维修性、可用性以及安全性。如今人们期望的是,对于复杂的设备和系统,不仅在刚刚投入使用时没有缺点和系统故障,在规定的时间内完成需要的功能,而且在发生危急或灾难性故障的情况下能有一个安全的行为。在实际应用中,究竟是否能达到这样的期望,需要通过一些测试才能确定答案。所以,对电子仪器而言,在仪器设计阶段,在设计功能实现的同时,也必须对仪器的可靠性加以考虑,因为在这个阶段提高其可靠性需要的费用最少,效果最好。这样设计出来的电子仪器,可以在保证其功能实现的同时还具有合理的可靠性。可靠性高的仪器寿命长,不容易出故障,即使出了故障也很容易找到出现故障的环节,经过短时间的维修之后,能够重新投入使用。可靠性高的仪器在使用过程中对用户和生产厂家而言都是有益的:用户免去了在使用中不得不中断使用而去维修仪器的不便,节省了时间、精力和财力;生产厂家虽然在生产过程中会增加成本,但在投入市场后,在同类仪器之间激烈的竞争中会独具优势,可以增加竞争力;同时,可靠性高的仪器意味着维修费用大大降低,即会减少仪器后期的使用成本。只要生产厂家权衡好两者的关系,必定会从中受益。因此,在现代生活中,仪器的可靠性设计越来越重要。

另外,随着技术的进步,构成仪器的元器件的可靠性虽然增加了,但随着仪器的复杂程度的大幅度提高,仪器的可靠性并没有相应的增长,如何采用可靠性高的电子元器件,使整个成本在合理的预算范围内,利用可靠性行业的专业知识和经验,设计并生产出可靠性高的电子仪器,是亟待解决的问题。

1.1 概述

可靠性是一门综合学科,它涉及统计学、失效物理学、环境科学和系统工程学等学

科。电子仪器方面的可靠性设计工程师除了要掌握以上学科以外,还需要掌握电子设计方面的知识,例如电子元器件的失效机理、电子仪器的设计原理和制造工艺、可靠性设计理论以及以往可靠性设计的成功经验。在可靠性设计后期,可靠性工程师需要在很宽的条件范围内,对构成仪器的组件及整台仪器进行可靠性试验。

可靠性工程的目的是为了开发评价和证明组件、设备和系统的可靠性、维修性、可用性的方法和工具,以及对开发和产品工程师在建立这些特性时给予支持。具体而言包括如下内容:防止或降低发生失效的可能性或频率;如果出现了失效问题,能够确认失效的原因,最好能够将失效的原因排除;如果失效的原因不能排除,能够确定解决发生失效的方法;对于新的设计,能够应用各种方法估计新设计可能具有的可靠性,并对可靠性数据进行定量和定性的分析。

可靠性设计在军事、航空航天以及核工业等行业中尤其重要,在这些行业中使用的仪器,其可靠性设计必须放在首位,否则会产生非常严重的后果。对于某些应用于军事方面的电子仪器,其可靠性不仅会影响仪器的正常使用,而且有时会对战争的胜利起到关键作用;对于某些应用于航空航天的电子仪器,其可靠性非常重要。

对消费类电子仪器设备而言,用于出租的仪器设备的特点是使用频繁而且使用者层次不同,所以对这类仪器设备的可靠性要求高,这些仪器设备的可靠性直接决定出租公司的利润。

我国从 20 世纪 50 年代开始进行可靠性的研究工作,1972 年成立了第一个电子产品可靠性研究所,以后随着工业的发展,各行各业的可靠性研究机构逐步建立并在可靠性设计及发展中起到了越来越重要的作用。

在仪器的可靠性设计过程中,如果一味地提高其可靠性而不考虑其他因素,会使仪器的设计费用大大提高,如果没有经济效益,生产商也就没有积极性。所以在可靠性设计中,设计及生产商需要在可靠性和其他参数,如费用、重量、尺寸和进度等之间进行权衡,一台仪器可靠性与它产生的经济效益是密切相关的。可靠性较高的仪器,可以正常使用的时间较长,不容易出现故障,维修费用低,但是其设计和生产制造成本较高;而可靠性较低的仪器,虽然制造成本较低,但其维修费用较高,这样总的成本也会增加。在仪器设计阶段,需要对其可能的设计成本、生产制造成本及维修成本进行综合考虑,选择适当的可靠性和综合成本,目的是以最低的成本达到或超过规定的可靠性指标,或者以给定的总成本取得最高的可靠性。

图 1-1 所示的是仪器的各种成本与其可靠性的关系,其中设计成本是指制造商为了实现仪器的基本功能和合理的可靠性所付出的设计研究费用。设计成本还取决于仪器的生产规模,如果仪器的生产规模较大,则设计成本就可以分摊给更多数量的仪器,这样每台仪器的成本就会相应减小;反之,对于生产规模较小的情况,每

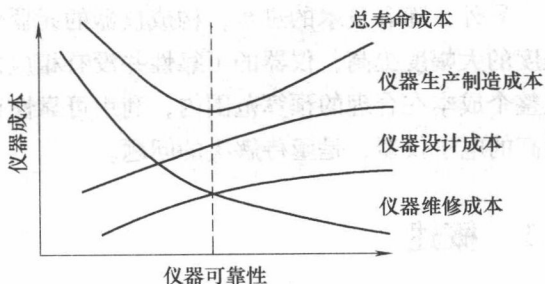


图 1-1 仪器的成本与其可靠性的关系示意图

台仪器的设计成本就会相应较高。

维修成本是仪器的一个附加单元,它不属于制造仪器时的费用,是用来替换出现故障和需要维修的单元,当仪器的可靠性提高时,就不需要多少备用单元。从图 1-1 中可以得知,当整台仪器的可靠性再增高时,虽然仪器的维修成本下降,但其设计成本增加得很快,这样仪器总的成本会增加。

从维修成本与设计成本的关系可知,仪器的可靠性提高到一定程度后,再进一步提高可靠性会增加综合成本。在仪器设计时应该选择可靠性值在仪器综合成本的最低点附近,当然对可靠性有特殊要求或使用条件特殊的仪器另当别论,总的选择成本与可靠性的权衡准则是使仪器的总寿命成本最低。

值得注意的是,在实际中一种仪器的成本与可靠性关系的精确资料很难得到。例如,在制造阶段很难精确预测仪器的维修费用,因为维修故障所花的时间和费用取决于用户的使用情况、修理部件的种类以及维修人员的技能等不确定因素,这时为了得到最佳的可靠性,设计者需要根据一些能够找到的孤立的资料进行分析选择。

1.2 可靠性的基本概念

可靠性是衡量产品质量的一个重要指标。可靠性的定义为: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称为产品的可靠性。

仪器的可靠性是指仪器处于使用状态时,在所规定的时间内是否处于“完好状态”,即仪器在规定的条件下以及规定的时间内完成规定功能的能力。其中的“规定条件”一般指环境条件、使用条件、维护条件和操作条件等;“规定时间”指仪器能完成规定功能的时间,例如动作次数、运行周期、循环次数等;“规定功能”是指技术性能指标和使用要求,例如仪器的精确度、灵敏度等。仪器完成规定功能的能力是仪器可靠性的直接反映,具体以各种可靠性指标表示,例如仪器的可靠度、失效率等。一台仪器的可靠性与“规定条件”是分不开的。这里所说的规定条件是指仪器使用时的应力条件、环境条件和储存时的储存条件等。

规定条件对可靠性有重要的影响,因此必须认真制定。经验表明,半导体器件的工作温度增加 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$,其失效率增加一倍。一台含有半导体器件的仪器,在不同功率输出状态下,其可靠性是不同的。一般的规律是:小于额定功率使用时其可靠性较高,等于额定功率使用时可靠性次之,大于额定功率使用时可靠性较差。

规定时间是指仪器规定的工作时间 t 。一般来说,组成仪器的各元器件经过筛选,整台仪器经过老化后,仪器在较长的时间内可靠性水平较高。此后,随着使用时间的延长,可靠性水平逐渐降低;时间越长,可靠性水平越低。

规定功能指的是仪器指定的任务。例如,对于给定的输入,仪器的输出要在规定的公差内。规定功能需要在任何可靠性分析开始的时候定义,因为规定功能定义完成后,可以定义仪器失效。一台仪器往往具备若干项功能,或者说具有若干项技术指标。仪器在工作时,要完成的是功能的全部而不是其中的一部分,或者说是要达到所有的技术指标而不是

达到某一部分技术指标。

仪器在实际使用中发生的故障往往与各种偶然因素有关。要判断某种仪器可能在什么时间发生故障是无法做到的,但大量的偶然事件中隐藏着一定的规律性,偶然事件中包含着必然性。虽然不能精确地知道发生故障的时间,但可以估计出在从仪器开始使用算起的某段时间内,该仪器完成规定功能的能力大小,这就是仪器可靠性。

1.3 可靠性特征量

仪器的可靠性特征量是用于度量仪器可靠性高低的数量指标。对仪器的可靠性而言,只是定性地加以说明,很多实际问题是不能解决的,特别是对同类仪器的可靠性进行比较时,需要使用定量的方法,或者对仪器的可靠性有明确的要求时,也需要使用定量的分析方法,这都需要通过可靠性特征量进行描述。

可靠性特征量在仪器不同的阶段有不同的作用。在设计和制造仪器时,通过可靠性特征量,利用一些数学方法可以预计仪器的可靠性,如果与可靠性要求不符,可以对设计方案、工艺等进行修改;在仪器生产出来时,通过特定的可靠性试验,可以得出可靠性的特征量,这些特征量可以定量地评定仪器可靠性的高低,或对同类仪器的可靠性进行定量比较。各类定量的指标是通过一些可靠性的特征量实现的,本节主要介绍与电子仪器有关的一些具体的特征量。

1.3.1 可靠度与不可靠度

可靠度与不可靠度都是由与时间相关的函数表示的,电子设备可靠性设计手册 MIL-HDBK-338 中,可靠度的定义为:可靠度是产品在规定的条件和规定的时间范围内完成其预定功能的概率。即可靠度函数表示的是某种仪器到某一时刻之前不发生故障的概率,通常用 $R(t)$ 表示,可靠度函数和不可靠度函数的和为 1。不可靠度函数 $F(t)$ 也称为累积分布函数,定义为在随机试验中,随机变量不大于 t 的概率,其数学表达式为式 (1-1),式中 $f(t)$ 是在发生故障前的时间内,该随机变量的故障密度函数。不可靠度函数 $F(t)$ 代表到某个时刻 t 之前的故障概率

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (1-1)$$

如果随机变量是离散型的,则式 (1-1) 中用加法代替积分。由于不可靠度函数在时间为 $t \leq 0$ 时,其值都为 0,所以式 (1-1) 中的积分下限可以从 0 开始,即

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-2)$$

可靠度函数 $R(t)$ 代表某种仪器到某一时刻之前不发生故障的概率,其数学表达式为

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-3)$$

通过对式 (1-3) 进行微分,可以得到故障密度函数的表达式:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-4)$$

图 1-2 为故障密度函数、可靠度函数以及不可靠度函数的关系示意图, 故障密度函数从 0 到无穷大区间内, 对时间的积分为 1。

1.3.2 失效率

当一个组件不能完成其要求的功能时, 失效就发生了。失效率在可靠性分析中有重要作用, 本节将对其进行简单推导。

假设 n 个相同的、相互独立的、新的电子元器件, 在时间 $t=0$ 时投入使用, 在相同的条件下, 当时间为 t 时, 如果 $N_s(t)$ 表示还没有失效的电子元器件的子集, 则 $N_s(t)$ 为一个连续递减的阶梯函数 (见图 1-3)。

图 1-3 中, $t_1, t_2, \dots, t_n$ 分别是 $t=0$ 开始, n 个电子元器件的失效时间。根据可靠度函数的定义, 根据统计估计的可靠度函数为

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{n} \quad (1-5)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\hat{R}(t)$ 趋近于可靠度函数 $R(t)$ 。对于任意的时间间隔 $(t, t + \Delta t)$, 统计估计的失效率定义为

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \Delta t} \quad (1-6)$$

$\hat{\lambda}(t)$ 是在时间间隔为 $(t, t + \Delta t)$ 时, 元器件失效的个数与 t 时刻没有失效的元器件个数的比值, 将式 (1-5) 代入式 (1-6) 中, 可以得到

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{R}(t) - \hat{R}(t + \Delta t)}{\Delta t \hat{R}(t)} \quad (1-7)$$

与可靠度函数 $R(t)$ 类似, 当 $n \rightarrow \infty$ 并且 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\hat{\lambda}(t)$ 趋近于 (瞬时失效率 $h(t)$)

$$\lambda(t) = h(t) = \frac{-dR(t)/dt}{R(t)} \quad (1-8)$$

由式 (1-6) 和式 (1-8) 得出的失效率 $\lambda(t)$ 的表达式特别适用于不可修复组件 (见图 1-3), 例如电子元器件、各种一体化功能模块等。

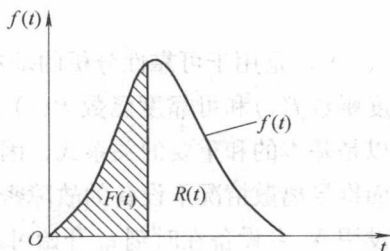


图 1-2 $f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 的关系示意图

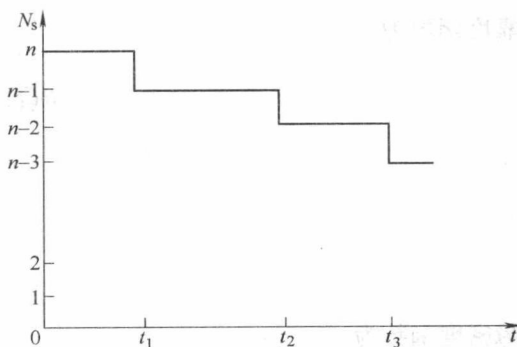


图 1-3 没有失效的元器件个数 N_s 与时间的关系示意图

将故障密度函数的表达式 (1-4) 代入式 (1-8), 得到

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 是用于可靠性分析的基本关系式之一。例如, 如果已知故障前工作时间的故障密度函数 $f(t)$ 和可靠度函数 $R(t)$, 就可以求出任一时刻 t 的瞬时失效率。这个关系式之所以是基本的和重要的关系式, 因为它与所考虑的统计分布无关。

下面推导离散情况下设备的故障密度函数、瞬时失效率函数和失效率函数的表达式。

假设用 N_0 台设备在时刻 t_0 开始可靠性试验。在某一时刻 t 之后, 有 N_f 台发生故障, N_s 台仍然保持完好, 则有

$$N_0 = N_f + N_s$$

可靠度函数为

$$\begin{aligned} R(t) &= \frac{N_s}{N_0} \\ &= \frac{N_0 - N_f}{N_0} \\ &= 1 - \frac{N_f}{N_0} \end{aligned} \quad (1-10)$$

故障密度函数为

$$\begin{aligned} f(t) &= -\frac{dR(t)}{dt} \\ &= \frac{1}{N_0} \frac{dN_f}{dt} \end{aligned} \quad (1-11)$$

瞬时失效率为

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{1}{N_0} \frac{dN_f}{dt} \times \frac{N_0}{N_s} \\ &= \frac{1}{N_s} \frac{dN_f}{dt} \end{aligned} \quad (1-12)$$

失效率为

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \\ &= \frac{1}{N_s} \frac{\Delta N_f}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1-13)$$

从失效率 $\lambda(t)$ 和瞬时失效率 $h(t)$ 的表达式可以看出, 尽管它们在数学上有些差别, 但是在传统的可靠性工程实践中, 它们往往作同义词用。

对于电子仪器系统, 元器件的失效率非常小, 所以通常以每千小时的百分比, 即每

10^6h 的失效数等单位表示。

【例 1-1】有 2000 只 PNP 晶体管，当工作到 1000h 时，一共有 20 只失效，工作到 1200h 时，一共有 24 只失效，求这种晶体管工作到 1000h 的失效率。

解：根据式 (1-13) 可以算出

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \frac{1}{N_s(t)} \frac{N_f(t + \Delta t) - N_f(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{2000 - 20} \times \frac{24 - 20}{1200 - 1000} \text{h}^{-1} \\ &\approx 1.1 \times 10^{-5} \text{h}^{-1}\end{aligned}$$

大量的可靠性数据表明，产品的失效率（瞬时失效率）随时间变化的曲线如图 1-4 所示，称为“浴盆曲线”。这种曲线特别适用于电子设备。该曲线有 3 个阶段，第 I 阶段的特点是失效率随工作时间的增加而降低，第 II 阶段的特点是失效率随工作时间的增加不变，第 III 阶段的特点是失效率随工作时间的增加而升高。

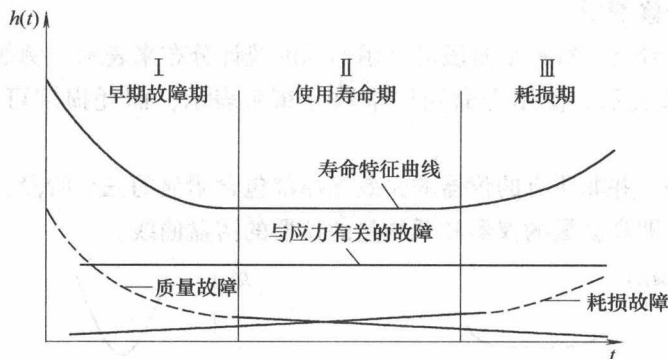


图 1-4 瞬时失效率与工作时间的关系曲线

第 I 阶段是早期故障期。该阶段失效率随时间迅速下降，这个阶段的失效主要是由在材料、组件和生产过程中产生的随机缺陷引起的，例如设计不良、使用了不合格的元器件或在生产过程中缺乏适当的控制等。消除早期故障的一种办法是使设备经过“老练”筛选，在老练期间使设备在和预期的实际工作条件极其接近的应力等级下工作。只有当设备顺利地通过了“老练”筛选，才能出厂投入实际使用；另一种办法是对发现有问题的设计方案进行改进，尽量缩短产品在这一阶段的时间。

第 II 阶段对应的是元器件或者仪器的使用寿命期，在此期间设备的失效率基本上是恒定的，这是使用寿命期的特点。在此期间发生的故障一般都是偶然故障，这种故障纯粹是随机或偶然原因造成的，它们不能靠长期的“老练”或好的预防性维修工作来消除，这些故障经过修复一般都能够排除，仪器能够再次投入正常使用。每种设备都是按照在一定条件下工作并且经受一定应力等级设计的。当由于偶然的未能预测的或未知的事件致使设备在超过这些应力等级下工作时，设备就会发生偶然故障。尽管可靠性理论和实践对这 3 种故障都关心，但主要关心的还是偶然故障，因为它们发生在设备的使用寿命期。图 1-4

的曲线不太符合实际,因为实际上第Ⅱ阶段要比第Ⅰ阶段和第Ⅲ阶段长得多。发生偶然故障的时刻是不能预测的。然而,在使用寿命期的某一给定期间发生故障的可能性或概率却可以通过对设备设计进行分析加以确定。如果偶然故障概率太高,就必须修改设计或降低设备工作的环境应力。

恒定失效率阶段是大多数可靠性工程设计方法运用的依据。由于失效率是恒定的,所以故障前工作的时间为指数分布的形式是适用的,并且是一些可靠性文件(如 MIL-HD-BK-217)中所详细阐述的设计与预计程序的依据。

第Ⅲ阶段是耗损期。这时仪器已经到了使用的后期,耗损期的特征是失效率随工作时间的增加而升高,在这一阶段产品失效大多数是由老化、磨损、疲劳等引起的(如腐蚀、电迁移等)。通过精心设计和良好的维修工作可以使设备的早期故障发生时间推迟,延长设备的使用寿命。防止出现耗损故障的唯一办法是在其发生故障之前更换或修理劣化的零部件。即进入耗损期的设备,针对某些部件,需要定时维修、定时更换或废弃。在可靠性设计中,应尽量使组成仪器的元器件或模块电路同时进入耗损期,避免单个部件提前进入耗损期,以减少维修费用。

从图 1-4 可以看出,每一个阶段可以用不同的统计分布来表示。例如,早期故障期可以用威布尔分布来表示,使用寿命期用指数分布来表示,而耗损期可以用正态分布来表示。

值得注意的是,并非所有的仪器的失效规律都包含明显的三个阶段,例如图 1-5 所示的两种极端情况,即高质量的仪器和低质量的仪器的浴盆曲线。

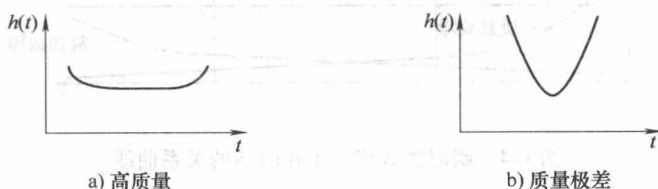


图 1-5 质量不同的两种极端仪器的浴盆曲线示意图

从仪器典型的浴盆曲线可知,对于具体的仪器设备,在第Ⅲ阶段之前要对设备进行维修,以降低仪器的失效率,延长仪器的使用寿命。

1.3.3 可靠度函数的一般表达式

可靠度函数的一般表达式可以从式(1-8)推导得出:

$$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right]$$

则有

$$\frac{dR(t)}{R(t)} = -h(t) dt \quad (1-14)$$

对式(1-14)两边进行积分,得到

$$\int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = - \int_0^t h(t) dt$$

$$\ln R(t) - \ln R(0) = - \int_0^t h(t) dt \quad (1-15)$$

考虑 $t=0$ 时所有元器件都是新的, 即此时 $R(0)=1$, 式 (1-15) 变换为

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t) dt} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 是可靠度函数的一般表达式。对电子设备而言, 大多数情况下, 满足 $h(t)$ 是恒定失效率 λ 条件, 式 (1-16) 成为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 是电子产品中可靠度函数的一般表达式。此时, 无故障时间是随着指数递减的。在这种假设情况下, 失效率可以通过下面的式子进行估算:

$$\hat{\lambda} = k/T \quad (1-18)$$

式中 T ——给定的工作时间;

k ——在工作时间 T 中总的失效次数。

在电子设备的可靠性分析中, 由于绝大多数情况下都满足设备的失效率为恒定值这一条件, 所以经常使用式 (1-17) 来计算设备的可靠度。

1.3.4 故障前平均工作时间

故障前平均工作时间 (Mean-Time-To-Failure, MTTF) 表示的是故障前工作时间的期望值, 如果针对的是不可修复系统, 即出了故障后不可能修理、坏了就扔的仪器的元器件或某些单元, 其故障前平均工作时间也就是这些元器件或单元的平均寿命。根据基本统计理论可以推导出其数学表达式为

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] dt$$

积分后, 得到 MTTF 的表达式

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1-19)$$

在大多数情况下, 式 (1-19) 可以使 MTTF 的计算得到简化, 即如果已知设备的可靠度函数, 则可以通过对可靠度函数的直接积分获得 MTTF, 也可以通过画图近似得到或者蒙特卡罗法模拟获得。对于可修复系统, MTTF 定义为首次故障前的平均工作时间。

当失效率为常数 λ 时, 平均无故障时间为 $1/\lambda$ 。

对于不可修复单元, 其故障前平均工作时间的计算方法如下:

n 个元器件或单元为一组, 试验到全部出故障, 每个元器件或单元的出故障时间分别为: $t_1, t_2, \dots, t_n$, 则

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1-20)$$