

可靠性技术基础

穆新华

南京航空航天大学

2001年12月

V242/1024

V242
1024-1



2008047698

目 录

前 言

第一章

第二章

第三章

随着科学技术的日益发展，人们在不断提高系统和设备技术性能的同时，也迫切需要系统及设备具有良好的可靠性与维修性，从而达到降低全寿命周期费用的目的。因此，

可靠性技术在现代工程技术的各个领域必将得到广泛的应用。

本书是在参阅许多国内外有关文献及论著基础上，结合作者几年来从事电气系统可靠性科研工作的体会和电气技术专业教学内容，特别是航空航天电气系统有关内容编写而成的。全书共分为十一章，主要内容包括：系统可靠性与维修性分析、系统可靠性指标分配、系统可靠性设计技术、可靠性设计评审与FMECA技术、可靠性试验及评估、软件可靠性、可靠性数据处理与统计分析。

本书可作为电气技术、民航电气工程等相近的电气、电子类专业高年级学生的选修教材。

在本书的编写过程中，曾得到南京航空航天大学博士生导师严仰光教授的多次鼓励和指导，严仰光教授还在百忙之中抽出时间审阅了全稿，提出了许多宝贵的意见，在此，谨表衷心的感谢。

由于编写者水平有限，书中错误和不足在所难免，恳请批评指正。

2008047698

目 录

第一章 概 论	1
第一节 可靠性技术的起源	1
第二节 研究可靠性的意义	1
第三节 可靠性工作的内容	2
第二章 可靠性的基本知识	5
第一节 系统可靠度与系统故障分布函数	5
第二节 系统故障率(失效率)	8
第三节 系统寿命特征	12
第四节 常用的故障分布函数	15
第五节 系统的维修性与可用性	23
第三章 不可修复系统的可靠性	25
第一节 串联系统	25
第二节 并联系统	27
第三节 k/n 表决系统	31
第四节 贮备系统	33
第五节 网络系统	37
第六节 系统可靠性的数字仿真	44
第四章 系统可靠性预计	50
第一节 系统可靠性预计方法	50
第二节 损耗失效分析	56
第三节 电气绝缘绕组热老化过程可靠性分析	57
第五章 可修复系统的可靠性与维修性	61
第一节 系统可用度	61
第二节 预防维修及最佳维修周期	62
第三节 事后维修系统模型	66

第四节	可修复系统的马尔可夫模型	69
第五节	更新过程模型与分析	80
第六章	系统可靠性指标分配	84
第一节	AGREE分配法	84
第二节	航空无线电公司分配法	86
第三节	综合因子评定分配法	88
第四节	系统可靠性的优化技术	90
第五节	系统维修性指标分配	101
第六节	系统可靠性与维修性的权衡	103
第七章	系统可靠性设计技术	108
第一节	降额设计技术	108
第二节	性能可靠性的概率设计	121
第三节	余度技术	126
第四节	机械可靠性设计中的干涉理论	133
第五节	环境防护设计	135
第六节	电磁兼容性设计	141
第八章	设计评审和FMECA、FTA技术	153
第一节	可靠性设计评审	153
第二节	FMECA分析技术	155
第三节	FMEA的矩阵分析法	164
第四节	FTA分析技术	166
第九章	可靠性试验及评估	172
第一节	可靠性增长试验	172
第二节	可靠性验证试验及评估	177
第三节	可靠性增长试验与验证试验的区别	181
第十章	软件可靠性	182
第一节	软件可靠性特点	182

第二节	软件错误及其根源	184
第三节	软件错误分类	184
第四节	软件可靠性模型	185
第十一章	可靠性数据处理与统计分析	189
第一节	可靠性数据的处理	189
第二节	分布参数的点估计	192
第三节	分布参数的区间估计	201
第四节	图估计法	206
附录A	部分飞机电气部件或设备的失效率及寿命指标	211
附录B	可靠性设计审查表	228
附录C	零件失效模式的分布	239
参考文献		242

第一章 概 论

第一节 可靠性技术的起源

本世纪40年代初,即在第二次世界大战后期,美国在远东的军用飞机频发故障而影响了飞机的出战率,主要原因是当时美军飞机使用的电气、电子设备在库存期间就有50%出现故障。调查获悉,电子设备之所以频发故障,是由于电子管50%发生了失效。为解决这个问题,美国国防部组织人力,开始了电子产品可靠性的研究,这标志着可靠性研究的起步。

1952年美国国防部成立了可靠性顾问小组(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment,简称AGREE)。这个小组对电子设备的可靠性含义及影响产品可靠性的因素等问题开始了全面的研究。他们将艾泼斯坦(Epstein)等人在人寿保险统计和生物统计中所得出的指数分布寿命试验的结果,用作可靠性研究的理论基础。在AGREE工作的基础上,1957年美国成立了可靠性委员会,同时陆续制定了军用标准(MIL、MIL-STD),并成为当今世界各国可靠性标准体系的基础。

进入60年代以后,随着美国、苏联等西方发达国家在航空、航天及空间等技术领域的激烈竞争,从而进一步推进了可靠性技术的迅速发展,到70年代已逐渐形成了可靠性工程这门新兴的综合性学科。相对而言,我国的可靠性研究起步较晚,但经过最近十几年的努力,目前,在可靠性数学及理论方面和在某些工程应用领域取得了成果。

第二节 研究可靠性的意义

尽管可靠性技术的发展已有几十年的历史,然而,由于现代航空、航天及核动力等有关系统和设备的技术性能要求的不断提高,结构日趋复杂,组成系统或设备的元部件数量迅速增长,不断给可靠性研究提出新的课题及任务。例如美国的阿波罗登月工程,参加人数达四十二万人,参与制造生产的厂家达一万五千多家,仅电子设备所用元器件数量达七千万之多。象这样庞大的系统,其复杂程度和可靠性问题是可想而知的。再如1983年1月2日,美国的“挑战者”号航天飞机发生大爆炸,震惊全世界,就是由于燃料的密封圈失效引起。1988年1月18日,我国的民航伊尔-18型222

号客机，由于发动机内起动电动机维修不当，发生故障而遇难，机毁人亡。因此，可以说现代航空、航天及空间等技术的发展与可靠性技术的研究密切相关。

美国AD报告(NASA-CR-120939)给出了评价确定1980-1985年机载电源系统发展方向的指标如表1.1所示。

表1.1 评价机载电源系统的指标

指标名称	可靠性	经济性	重量	维修性	性能
各项指标比例	30%	24%	20%	20%	6%

表1.1说明对某些机载系统或设备，可靠性已经被作为首要的要求了。

迫使人们重视可靠性研究的另一个重要因素是经济效益。1963年美国航空兵发生了514次重大事故，毁坏飞机275架，驾驶员死亡272人，损失二亿八千万美元，调查发现，由于产品可靠性低所导致的事故占43%，即由产品可靠性所造成的损失达一亿二千多万美元。澳大利亚仅在1967年，由于产品可靠性造成的经济损失达八十亿美元，并使十五万中小型企业破产。六十年代，美国因产品可靠性低和其它一些质量问题，平均每年损失四百亿美元。由此可见，设备或产品的可靠性直接影响了经济效益。产品可靠度与费用之间关系如图1.1所示。从图中看出，在A点前，提高产品可靠性可以有效地减小维修费用及使用费用，虽然在设计和生产时需采取提高可靠性的措施，费用稍有增加，但寿命周期延长，维修费用降低，从而使总费用减小。

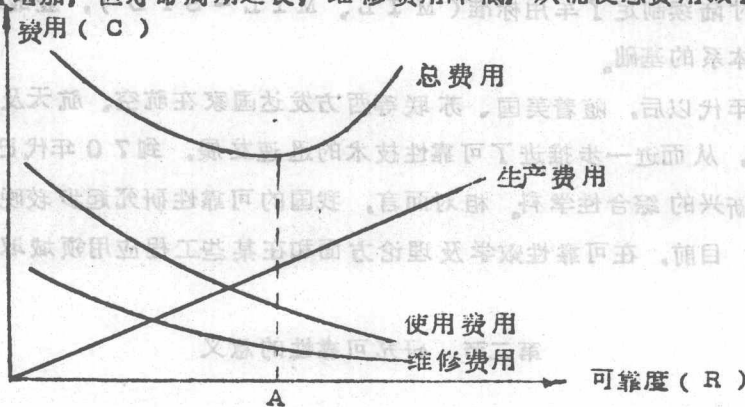


图1.1 各项费用与可靠度关系

第三节 可靠性工作的内容

可靠性技术经过几十年尤其是近二十年的发展以及在其它工程领域的渗透和结合，已逐步形成为包含多个分支的综合性应用学科。就可靠性技术本身，也逐渐形成了一些

相对独立的分支。目前，主要的分支有可靠性数学、可靠性物理、可靠性设计、可靠性试验及评估、可靠性生产及管理。

根据国军标 GJB 450-88，可靠性工作的实施内容如表 1.2 所示。

表 1.2 可靠性工作项目实施表

工作项目	类型	研制生产阶段			
		战术技术指标论证阶段	方案论证及确认阶段	工程研制阶段	生产阶段
制定可靠性工作计划	管理	Δ	Δ	✓	✓
对转承制方和供应方的监督和控制	管理	Δ	Δ	✓	✓
可靠性大纲评审	管理	Δ	Δ ⁰	✓ ⁰	✓ ⁰
建立故障报告、分析和纠正措施系统	工程	×	Δ	✓	✓
故障审查及组织	管理	×	Δ ⁰	✓	✓
建立可靠性模型	工程	Δ	Δ ⁰	✓ ⁰	○ ⁰
可靠性分配	计算	Δ	✓	✓	○ ⁰
可靠性预计	计算	Δ	Δ ⁰	✓ ⁰	○ ⁰
故障模式、影响及危害度分析	工程	Δ	Δ ⁰	✓ ⁰	○ ⁰
潜在电路分析	工程	×	×	✓ ⁰	○ ⁰
电子元器件和电路的容差分析	工程	×	×	✓	○
制定元器件大纲	工程	Δ	Δ ⁰	✓ ⁰	✓ ⁰
确定可靠性关键件和重要件	管理	Δ ⁰	Δ ⁰	✓	✓
确定功能测试、包装、贮存、装卸、运输、维修对可靠性的影响	工程	×	Δ ⁰	✓	○
环境应力筛选	工程	×	Δ	✓	✓
可靠性增长试验	工程	×	Δ ⁰	✓ ⁰	×
可靠性鉴定试验	计算	×	Δ ⁰	✓ ⁰	✓ ⁰
可靠性验收试验	计算	×	×	Δ	✓ ⁰

符号说明:

✓ —— 适用

○ —— 仅设计更改时适用

△ —— 根据需要选用

× —— 不适用

1) —— 要综合考虑费用效益或其它标准要求后确定

从表 1.2 看出, 可靠性工作贯穿在整个系统或产品的设计、研制、生产、试验等各个阶段, 因此, 可靠性工作是一项系统工程, 它的根本任务就是保证系统或产品在设计、制造、试验、贮藏、运行的整个过程中达到所要求的可靠性, 並做到可靠性与经济性的综合平衡。

✓	△	△	✓	设计	系统总体设计
✓	△	△	✓	设计	子系统详细设计
✓	△	×	✓	设计	元器件选择
✓	△	×	✓	设计	可靠性审查
○	✓	△	△	设计	可靠性计算
○	✓	△	△	设计	可靠性试验
○	✓	△	△	设计	可靠性鉴定
○	✓	×	×	设计	可靠性预测
○	✓	×	×	设计	可靠性管理
✓	△	△	△	设计	可靠性培训
✓	△	△	△	设计	可靠性记录
○	✓	△	×	设计	可靠性报告
✓	△	×	×	设计	可靠性改进
×	✓	△	×	设计	可靠性标准
✓	✓	△	×	设计	可靠性规范
✓	△	×	×	设计	可靠性程序

第二章 可靠性的基本知识

根据GJB 451-90, 可靠性是产品在规定的时间内完成规定功能的能力。相反, 产品不可靠即故障是指产品或产品的一部分不能或将不能完成预定功能的事件或状态。一般来说, 在产品或系统出现故障之前, 无法确切知道它将在什么时间, 在什么部位上发生故障。从表面上看产品或系统出现故障是一随机现象, 它的出现似乎是毫无规律的。但大量的观测统计结果和科学分析已证明, 这种随机现象实际上受内部隐藏着的一定规律支配。可靠性研究的任务之一就是分析支配产品或系统故障这一偶然现象的内在规律。

第一节 系统可靠度与系统故障分布函数

为了研究系统可靠性或故障这一随机现象, 引进一个随机变量 X , 设 X 表示系统在规定的条件下和给定的时间内正常工作的时间(即在 X 时间内系统能完成规定的功能), X 是一个定义在正实数域内的随机变量。若 $F(t)$ 表示系统在规定的条件下和规定时间 t 时刻以前发生故障的概率, 则有

$$F(t) = P\{X < t\} \quad (2.1.1)$$

$F(t)$ 称为系统累积故障概率, 也称为系统的累积故障分布函数(以下简称分布函数)。 $F(t)$ 具有随变量分布函数所具有的一切性质, 即

$$f(t) = F'(t) \quad (2.1.2)$$

$f(t)$ 称为系统累积故障概率的分布密度函数(简称分布密度函数)。若已知分布密度函数, 则可通过积分求出分布函数, 即

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2.1.3)$$

工程实际问题中, 先计算出分布密度的值或拟合出分布密度, 然后再通过(2.1.3)式求出分布函数 $F(t)$ 。

系统在规定的条件下和规定时间 t 时刻及 t 时刻以前正常工作的概率为

$$R(t) = P\{X \geq t\} \quad (2.1.4)$$

$R(t)$ 也是以时间 t 为变量的函数, 称 $R(t)$ 为系统的可靠度函数。对于任意固定的

时刻 t_0 ， $R(t_0)$ 就是系统在 t_0 时间内的可靠度。利用事件概率的基本性质可知，

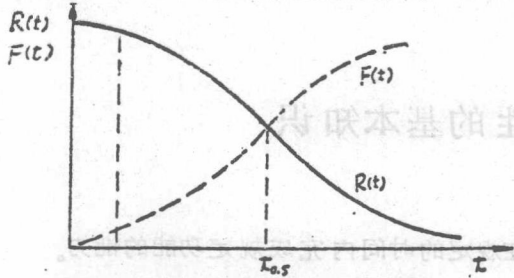


图 2.1 分布函数与可靠度函数曲线

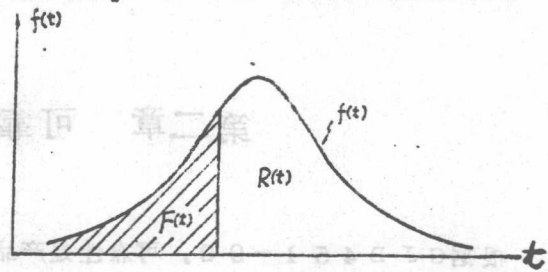


图 2.2 分布密度、分布函数与可靠度函数关系

分布函数 $F(t)$ 和系统可靠度函数 $R(t)$ 之间有如下关系

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.1.5)$$

由 (2.1.5) 式可知 $F(t)$ 与 $R(t)$ 之间的关系恰好是对立的 (见图 2.1)，所以也称 $F(t)$ 为系统的不可靠度。

从 (2.1.5) 式和 $F(\infty) = 1$ ， $F(0) = 0$ 有 $R(0) = 1$ ， $R(\infty) = 0$ 。这说明任何一个系统的寿命都是有限的，即对每一个系统而言，总会在某一有限时刻出现故障；反之，每一个系统开始工作时应是正常的，即是无故障的。

由 (2.1.5) 和 (2.1.3) 式可知

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.1.6)$$

$$f(t) = -R'(t) \quad (2.1.7)$$

$f(t)$ 、 $R(t)$ 、 $F(t)$ 的相互关系示于图 2.2。

系统可靠度是衡量系统可靠性的很重要的尺度，它不受系统类型的限制，通过系统故障时间的原始数据可求出各个时刻内的系统可靠度。这里介绍一种简便的直接推算方法。

(1) 连续时间离散化。因故障时间是连续的，首先应离散化。作法是将连续时间划分为若干区间，然后，按时间先后从小到大编上序号，比如第 1 个区间的长度以 Δt_1 表示，整个故障时间就被离散为 $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k$ 。为计算方便，令 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_k = \Delta t$ 。

(2) 编制系统可靠度计算表。为方便计算，根据实际情况编制系统可靠度计算表。

(3) 由表逐项整理系统故障时间的原始数据。原始数据记录的是故障时间，计算表用的是时间区间的故障数。

表 2.1 系统可靠度计算表

观测区间	观测区间故障数	累积故障数	$f(t_i)$	$F(t_i)$	$R(t_i)$
Δt_1	r_1	r_1			
Δt_2	r_2	$r_1 + r_2$			
\vdots	\vdots	\vdots			
Δt_i	r_i	$\sum_{j=1}^i r_j$			
\vdots	\vdots	\vdots			
Δt_k	r_k	$\sum_{j=1}^k r_j$			

r_i 表示第 i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) 个区间内的故障数。

(4) 逐项计算 $f(t_i)$, $F(t_i)$, $R(t_i)$, 具体计算公式推导如下:

因为分布密度函数 $f(t_i)$ 的定义是单位时间内的故障概率密度, 所以在 Δt 时间内, 系统故障频率为 $f(t) \Delta t$ 。若以 N 表示系统总数, r_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 表示第 i 个区间内的系统故障数, 则

$$n_i = N - \sum_{j=1}^i r_j \quad (2.1.8)$$

是第 i 个区间后系统仍正常工作的个数, 又由

$$f(t_i) \Delta t_i = \frac{r_i}{N} \quad (2.1.9)$$

知 $f(t_i) = \frac{r_i}{N \Delta t_i} \quad (2.1.10)$

而 $F(t_i) = \sum_{j=1}^i f(t_j) \Delta t_j = \sum_{j=1}^i \frac{r_j}{N \Delta t_j} \Delta t_j$

$$= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i r_j \quad (2.1.11)$$

或 $F(t_i) = 1 - \frac{n_i}{N} \quad (2.1.12)$

根据 (2.1.5) 得

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = 1 - \left(1 - \frac{n_i}{N}\right) = \frac{n_i}{N} \quad (2.1.13)$$

第二节 系统故障率（失效率）

工程问题中，人们最关心的问题之一，是一个系统或元件工作时间 t 后，在时刻 t 这个瞬时发生故障的可能性有多大。若发生故障的可能性较大，则可提前采取预防措施。为此引进了瞬时故障率函数的概念。瞬时故障率函数简称故障率。对于不可修复系统或元器件，通常称为失效率。

故障率的定义为：系统或元件工作了 t 时间后，在时刻 t 瞬时发生故障的可能性。故障率随时间的不同而取值不同，它是时间 t 的函数。一般用 $\lambda(t)$ 表示。若以 X 表示系统正常工作的时间，那么系统故障率 $\lambda(t)$ 的数学表达式是

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t \leq X < t + \Delta t \mid X > t\}}{\Delta t} \quad (2.2.1)$$

如果用工程技术和数学相结合的语言来陈述，故障率则是：系统在工作了 t 时间后，在 $t + \Delta t$ 时间的单位时间内，系统发生故障的个数与 t 时刻仍正常工作的个数之比。当 Δt 取得很小时就有

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta r(t)}{n(t) \Delta t} \quad (2.2.2)$$

其中 $\Delta r(t)$ 是在 $[t, t + \Delta t]$ 内系统发生的故障数， $n(t)$ 是 t 时刻系统仍正常工作的数目。

故障率与可靠度均是时间的函数，下面讨论它们之间的关系。

设 $t = 0$ 时有 N 个系统投入工作，在时刻 t 有 $r(t)$ 个系统发生故障，则

$$r(t) = NF(t) \quad (2.2.3)$$

在时刻 t 仍正常工作的系统数为

$$n(t) = N - r(t) = N - NF(t) = NR(t) \quad (2.2.3)$$

在 $t + \Delta t$ 时间内 N 个系统发生故障的个数是

$$r(t + \Delta t) = NF(t + \Delta t) \quad (2.2.5)$$

于是在 Δt 时间内系统发生故障的个数为

$$\Delta r(t) = r(t + \Delta t) - r(t) = N[F(t + \Delta t) - F(t)] \quad (2.2.6)$$

那么在 t 时刻后单位时间内系统发生故障的个数

$$\frac{\Delta r(\tau)}{\Delta t} = \frac{N[F(\tau + \Delta t) - F(\tau)]}{\Delta t} \quad (2.2.7)$$

所以, 时刻 τ 的故障率为

$$\lambda(\tau) = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{N[F(\tau + \Delta t) - F(\tau)]}{n(\tau) \Delta t}$$

$$= \frac{N[F(\tau + \Delta t) - F(\tau)] / \Delta t}{NR(\tau)}$$

$$= \frac{F'(\tau)}{R(\tau)} = \frac{f(\tau)}{R(\tau)} \quad (2.2.8)$$

将 (2.1.7) 代入 (2.2.8) 则有

$$\lambda(\tau) = -\frac{R'(\tau)}{R(\tau)} \quad (2.2.9)$$

式 (2.2.9) 可看作是可靠度函数的微分方程, 即

$$R'(\tau) = -R(\tau)\lambda(\tau)$$

$$\frac{1}{R(\tau)} \frac{dR(\tau)}{d\tau} = -\lambda(\tau)$$

$$d \ln R(\tau) = -\lambda(\tau) d\tau$$

$$\ln R(\tau) = -\int_0^{\tau} \lambda(x) dx - \ln c$$

由初始条件 $\tau = 0, R(0) = 1$, 得 $\ln c = 1$, 于是有

$$R(\tau) = e^{-\int_0^{\tau} \lambda(x) dx} \quad (2.2.10)$$

$$f(\tau) = -R'(\tau) = \lambda(\tau) e^{-\int_0^{\tau} \lambda(x) dx} \quad (2.2.11)$$

人们经过长期观察、调查和分析, 对系统故障率随时间变化而变化的规律, 有了一些认识。虽然各个系统故障率的变化规律各有特点, 但一般说来, 每个系统在使用初期, 发生故障较多, 即故障率较高。这个时期称为系统的早期故障期。在这个期间内系统发生的故障称为早期故障, 也有人称其为初始故障或早期夭折。早期故障的原因容易找到, 归纳起来, 大致有以下几个方面。(1) 元器件未经筛选和老化。(2) 系统中留有多余物。(3) 人为差错, 包括安装和启动不适当, 操作不熟练。(4) 包装和运输过程中对系统内部损伤。(5) 制造工艺本身不合理。(6) 设计、制造过程中没有进行全

面质量管理所造成的隐患。

随着时间增加，系统故障率下降到某一较低的值后稳定下来。从这个时刻开始，系统就进入了使用中期。这个时期，系统发生故障较少，通常是由于外部应力超过设备或元器件的设计强度而导致故障的发生。但要求出外部应力或元器件强度随时间变化的函数关系却是相当困难的。也就是说，在系统中期，系统故障都是由于目前尚未掌握的偶然因素引起的。所以将系统使用中期称为随机故障期或偶然故障期。这个时期内的系统故障称为随机故障。系统使用到某一时刻 t_2 后，情况开始恶化，故障大量出现，系统故障率不再稳定在一个低水平上了，而是随着时间的延长急剧增加。这种情况的出现，通常由于：(1) 系统中的元器件已经老化。(2) 系统中的另部件已经磨损。(3) 长期使用导致系统性能退化。(4) 系统结构强度已超过疲劳极限。(5) 设计本身不均衡。(6) 维护保养条件不好。这个时期称为耗损故障期。这时发生的故障称为耗损故障。描述这三个时期系统故障特性的故障率函数 $\lambda(t)$ ，在图 2.3 中给出。

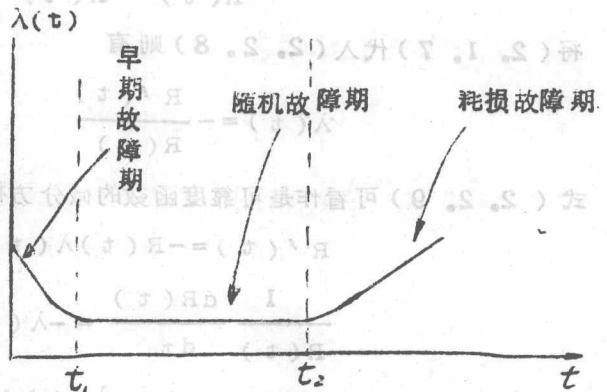


图 2.3 系统或元件失效率的一般规律

从图 2.3 可以看到系统故障率的形状象浴盆，所以又称它为浴盆曲线。

掌握了系统故障率的普遍规律，就可以利用它来解决生产实际问题。从系统故障率的普遍规律来看，早期故障是影响系统可靠性的一个重要因素。所以只要能减少系统的早期故障就可以提高系统的可靠性。

在工程中得到一系列离散的系统故障时间，但故障率函数是时间的连续函数。下面介绍一下如何利用有限的系统故障时间来确定系统故障率连续函数。

第一步 按第一节计算的步骤和方法，用系统故障时间的原始数据算出各个时间区间的系统故障率。根据故障率的定义

$$\lambda(t_i) = \frac{n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)}{n(t_i) \Delta t_i} \quad t_i \leq t < t_i + \Delta t_i$$

$$i = 1, 2, \dots, K \quad (2.2.12)$$

其中 $n(t_i)$ 和 $n(t_i + \Delta t_i)$ 分别为时刻 t_i 和 $t_i + \Delta t_i$ 仍正常工作的系统数目。式 (2.2.12) 也可写成：

$$\lambda(t_i) = \frac{n(t_i) - n(t_{i+1})}{n(t_i)(t_{i+1} - t_i)} \quad t_i \leq t < t_{i+1}$$

$$i = 1, 2, \dots, K \quad (2.2.12)$$

第二步 选取合适的故障率拟合模型。算出各个时间区间内的系统故障率后，在图纸上描出系统故障率的变化曲线。然后，根据故障率曲线的大致形状选取拟合模型。由于系统的故障率曲线比 $F(t)$ 、 $R(t)$ 和 $f(t)$ 曲线能更好地反映系统故障类型的特性，所以用它来确定系统可靠性模型比用 $F(t)$ 、 $R(t)$ 和 $f(t)$ 曲线来确定系统可靠性模型更容易。这也是人们越来越重视系统故障率研究的重要原因之一。

第三步 确定拟合模型中的未知参数。为了选定合适的模型，先将系统划入某一个合适的类型中，再利用系统故障时间的原始数据或者利用算出的各个时间区间的故障率，确定故障率模型的参数。至此确定故障率模型工作全部完成。

在可靠性的分析计算中，引进了可靠度函数 $R(t)$ 、系统故障分布函数（累积故障率函数） $F(t)$ 、系统故障分布密度函数（累积故障密度函数） $f(t)$ 和系统故障率函数 $\lambda(t)$ 等四种函数。下面将这些函数的性质和约束条件列于表中。

表 2. 2 分布函数 $F(t)$ 和密度函数 $f(t)$ 的性质

序号	$0 \leq F(t)$	$0 \leq f(t)$
1	定义域为 $t \geq 0$	定义域为 $t \geq 0$
2	X 在 t_1 与 t_2 之间的概率为 $P\{t_1 < X \leq t_2\} = F(t_2) - F(t_1)$	X 在 t_1 与 t_2 之间的概率为 $P\{t_1 < X \leq t_2\} = \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx$
3	$F(t)$ 是 t 的非降函数 若 $t_2 > t_1$, 则 $F(t_2) \geq F(t_1)$	$f(t)$ 是非负函数 $f(t) \geq 0$
4	$F(0) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$	$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1$

表 2. 3 分布密度函数 $f(t)$ 和故障率函数 $\lambda(t)$ 的约束条件

序号	$\lambda(t)$	$f(t)$
1	定义域 $t \geq 0$	定义域 $t \geq 0$
2	$\lambda(t)$ 是非负函数, $\lambda(t) \geq 0$	$f(t)$ 是非负函数, $f(t) \geq 0$
3	$\int_0^{\infty} \lambda(t) dt \rightarrow \infty$	$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$

表 2.4 分布函数 $F(t)$ 与可靠度函数 $R(t)$ 的比较

序号	$F(t)$	$R(t)$
1	定义域 $t \geq 0$	定义域 $t \geq 0$
2	$P\{t_1 < X \leq t_2\}$ $= F(t_2) - F(t_1)$	$P\{t_1 < X \leq t_2\}$ $= R(t_1) - R(t_2)$
3	$F(t)$ 是 t 的非减函数 若 $t_2 \geq t_1$, 则 $F(t_2) \geq F(t_1)$	$R(t)$ 是 t 的非增函数 若 $t_2 \geq t_1$, 则 $R(t_1) \geq R(t_2)$
4	$F(0) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$	$R(0) = 1$ $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$
5	$F(t)$ 是非负函数 $F(t) \geq 0$	$R(t)$ 是非负函数 $R(t) \geq 0$

表 2.5 故障率函数 $\lambda(t)$ 与可靠度函数 $R(t)$ 的比较

序号	$R(t)$	$\lambda(t)$
1	定义域 $t \geq 0$	定义域 $t \geq 0$
2	$R(t)$ 是非负函数 $R(t) \geq 0$	$\lambda(t)$ 是非负函数 $\lambda(t) \geq 0$
3	$R(0) = 1$ $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$	$\int_0^{+\infty} \lambda(t) dt \rightarrow \infty$
4	$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$\lambda(t) = [-\ln R(t)]'$

第三节 系统的寿命特征

一、MTBF (Mean Time Between Failures)

MTBF 又称为平均故障间隔时间, 或称两次相邻故障间隔的平均时间。由于平均无故障工作时间比较通俗和直观, 易为人们所接受和掌握, 所以, 在可修复寿命型系统