



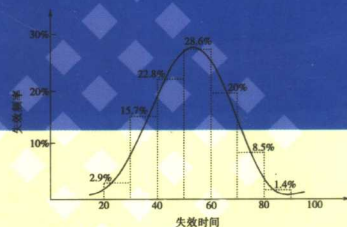
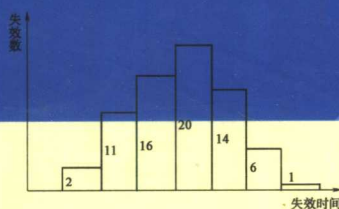
普通高等教育十五国家级规划教材

PUTONGGAODENGJIAOYUSHIWU
GUOJIAJIGUIHUAJIAOCAI

汽车可靠性技术

【车辆工程、汽车服务工程专业用】

● 明平顺 李晓霞 主编



人民交通出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

Qiche Kekaoxing Jishu

汽车可靠性技术

(车辆工程、汽车服务工程专业用)

明平顺 李晓霞 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍汽车可靠性理论基础、汽车可靠度分配、汽车可靠性设计、汽车可靠性试验、汽车失效性和维修性等方面的内容。

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,可供交通类、车辆类专业的师生使用,也可供从事交通安全、汽车工程的科学技术人员参考,亦可作为相关专业研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车可靠性技术/明平顺,李晓霞主编. —北京:人民交通出版社, 2004.12

ISBN 7-114-05334-7

I. 汽… II. ①明…②李… III. 汽车-可靠性
IV. U461.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 110331 号

普通高等教育“十五”国家级规划教材

书 名:汽车可靠性技术

著 作 者:明平顺 李晓霞

责任编辑:张大勇

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:9

字 数:216千

版 次:2005年1月第1版

印 次:2005年1月第1版第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-05334-7

印 数:0001—5000册

定 价:18.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

《汽车可靠性技术》被国家教育部(教高函[2002]17号)列入“十五”国家级规划教材。它可作为高等学校车辆工程类专业、汽车服务工程专业、交通运输类专业、机械制造类专业的必修课或选修课教材。同时,也可作为产品设计、产品制造、企业管理、产品售后技术服务等方面的工程技术人员的重要参考文献。

本教材注重内容的新颖性和应用性;注重文字的简洁性和通俗性。主要介绍了汽车可靠性理论基础、汽车系统可靠性分配、汽车可靠性设计、汽车可靠性实验、汽车失效性和维修性等方面的内容。力求反映车辆工程诸多方面的新技术和发展趋势,贯彻少而精,理论联系实际的原则。书中列举了许多类型的工程实例,便于读者掌握可靠性技术的基础知识和方法,便于加深对汽车产品全部过程的可靠性的认识。

本书由武汉理工大学明平顺教授、长安大学李晓霞副教授主编,参加编写者有武汉理工大学明平顺教授(第一章、第二章)、武汉理工大学余晨光讲师(第三章)、湖北汽车工业学院肖生发教授(第四章)、武汉理工大学讲师王宇宁(第五章的第一、二节)、宋晓冰讲师(第五章第三节)、长安大学李晓霞副教授(第六章),全书由明平顺教授统稿。

在本教材编写中参考了大量文献资料,在此谨向这些文献的作者深表谢意。

在此感谢张腊梅、杨利强、蔡永华、甘浩在编写过程中的辛勤工作。

由于汽车可靠性技术还是一门发展中的新兴学科,加之编者水平有限,在编写中难免有不妥甚至错误之处,诚恳希望使用本教材的师生和广大读者指正。

编 者
2004年8月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 汽车可靠性理论基础	4
第一节 可靠性函数	4
第二节 可靠性理论分布	10
第三节 可靠性数据分析	21
习题	28
第三章 汽车可靠度分配	30
第一节 汽车可靠性分配的目的	30
第二节 简单系统可靠度分配	32
第三节 复杂系统可靠度分配	35
习题	43
第四章 汽车可靠性设计	44
第一节 可靠性设计原理	44
第二节 可靠性设计要求	53
第三节 可靠性设计方法	56
习题	69
第五章 汽车可靠性试验	70
第一节 汽车可靠性抽样试验	70
第二节 汽车可靠性验证试验	81
第三节 汽车可靠性寿命试验	85
习题	104
第六章 汽车失效分析	106
第一节 失效模式	106
第二节 失效分析方法	108
第三节 失效机理及其预防	116
第四节 汽车维修性	119
习题	121
附录	122
附表 A-1 标准正态分布表 $\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz = P\{Z \leq z\}$	122
附表 A-2 t 分布值	125
附表 A-3 χ^2 -分布的上侧分位数 $[\chi_a^2(v)]$ 表	126
附表 A-4 柯氏检验的临界值 (D_n, α) 表 $\rho(D_n > D_n, \alpha) = \alpha$	127
附表 A-5 相关系数 ρ 的起码值	128
附表 A-6 调质结构钢的疲劳极限的均值和标准差	130

目 录

附表 A-7 $\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right)$ 及 $\Gamma\left(1+\frac{2}{m}\right)$ 值	134
参考文献	135

第一章 绪 论

一、可靠性工程及其任务

可靠性工程是研究如何评价、分析、提高产品可靠性的工程技术。逐步形成了一门基础性的应用科学,属于系统工程的一个分支。

可靠性工程的任务:确定产品的可靠性、研究产品的参数作随机变化时,其可靠度的变化规律及其分析。

二、可靠性工程的发展阶段

20 世纪 40 年代是可靠性工程的萌芽阶段:

第二次世界大战,美国的军用电子设备失效,使用寿命降低,于 1943 年成立专门机构研究可靠性问题。

20 世纪 50 年代是可靠性的创建阶段:

美国在朝鲜战场上,武器系统常出现故障,促使系统可靠性的研究。于 1952 年成立“国防部电子设备可靠性顾问委员会”(AGREE),1957 年发表了“军用电子设备的可靠性”报告,为可靠性的发展奠定了基础。随后,日本、德国、前苏联开始了研究。

20 世纪 60 年代是可靠性工程全面发展的阶段:

美国在可靠性设计和实验方面,取得了重要的成果。许多国家成立了可靠性研究机构,开展各种有关的活动,制定可靠性标准。

20 世纪 70 年代是可靠性工程深入发展阶段:

从单纯重视可靠性发展到对产品的要求达到一定的可靠性维修性指标,即从重视性能发展到重视效能。此阶段,计算机软件可靠性的理论获得很大发展。

三、我国可靠性工程发展概况

1965 年,在钱学森同志建议下,在原七机部成立了“可靠性质量管理研究所”(705 所),进行了开拓性的工作;

1978 年,在钱学森同志关心下在国防系统召开第一次可靠性会议;

1979 年,中国电子学会成立“可靠性与质量管理学会”;

1982 年,国家标准局成立“全国产品可靠性与维修性标准化技术委员会”,相继制定了一系列国家标准,使我国可靠性研究蓬勃开展起来;

1984 年,颁布了《电子设备可靠性预计手册》;

20 世纪 90 年代原机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”的发展模式,取得了较大成绩。

四、可靠性工程的适用意义

可靠性工程发展之迅速、应用之广泛、效果之显著、受社会之重视,均非一般应用科学所能

比拟。究其原因,可靠性揭示了产品质量的本质,是产品质量的永恒的主题。

1. 可靠性是产品质量的一项重要指标

现代质量观念认为:产品质量是产品满足使用要求的特性总和。即包括性能、可靠性、安全性、适应性、经济性和时间性。汽车是典型的可靠性产品,对性能、可靠性、安全性、适应性、经济性和时间性都有十分明确的要求。

日本人认为:“今后产品竞争的焦点是可靠性”。

美国军方:可靠性是“武器力量的倍增器”。

中国政府:“以可靠性为中心的全面质量管理”。

2. 产品日趋复杂、可靠性日趋突出

随着产品向高性能、多功能、高新技术方向发展,其可靠性日益突出。例如:为提高汽车的动力性,发展了电子点火;为加强操纵稳定性,增加了防抱死装置(ABS);为保证安全性,增加了安全气囊。因此,可靠性又扩大到了电子系统。随着多用途、高速、舒适性好的车辆的出现,对可靠性的要求必然会越来越高。

3. 使用环境的严酷性,对可靠性要求更高

随着科学的进步,需要开发适应各种地域环境如戈壁、沙滩、高原、沼泽地的车辆。要能经受高(低)温、空气稀薄、冲击、振动等各种特殊环境的考验。如沙漠汽车、高原扫雪车、两栖车辆,在恶劣环境中,使可靠性下降。对于这些车辆就存在着可靠性的问题。

4. 全寿命周期费用的增长,可靠性要高

全寿命周期费用包括:购买费用、使用费用、维修费用等。用户往往只注意购买费用、生产单位只计算生产成本,而很少去考虑全寿命周期费用。

可靠性高的产品,故障少,维修费用低,零部件更换费用低,全寿命周期费用降低,使产品单位时间的效益增加。

五、我国汽车可靠性工程的状况

从 1983 年到 1984 年,汽车行业开展了空前规模的汽车可靠性试验,试验车辆数 53 台,总里程为 36 万 km。开展了以“汽车可靠性考核与试验方法研究”为中心的科学研究活动,并取得了如下成果:

a. 初步弄清了国产汽车可靠性状况,其平均故障间隔里程(MTBF)仅为 500~1 000km;早期故障率高,在 2 500km 之前故障甚多,大多属于生产管理、设计及协作件的故障。

b. 试验结果引起骨干汽车企业(一汽、二汽)的高度重视,发动大规模的质量攻关活动,使汽车可靠性有了明显的改善,其平均故障间隔里程成倍增长。

c. 把可靠性评价方法列入“汽车产品质量评定方法”(即“蓝皮书”)中。在全行业贯彻实施,在质量管理体系举办了“可靠性”研讨班,被各企业的领导和工程技术人员所接受。

1988 年在海南汽车试验场对重型、中型、轻型和微型货车进行了 25 000km 可靠性试验,其 MTBF 分别为 1 875km、2 083km、3 276km、2 000km。有所提高,但与先进国家的标准(一万千米)相距甚远。

六、可靠性的重要意义

对于汽车产品来说,可靠性与人身安全、经济效益密切相关。汽车是由很多总成、部件、零件组成。现代轿车中又由许多电子系统和元件组成了控制系统。如果一个零件损坏,一个元

件失效,都可能造成事故,引起严重的后果。

提高产品可靠性的意义:可以防止事故的发生,尤其是避免灾难性事故的发生,从而保障人民生命财产的安全;产品可靠性的提高使得维修费大大减少,使总使用成本降低;可以减少停车检查时间,提高产品的利用率和工作效率,相应也降低了成本;对生产企业来讲可以改善企业信誉,创造汽车品牌,扩大产品销路,提高经济效益;可以减少产品责任赔偿案件的发生,以及其它处理事故费用的支出,避免不必要的经济损失。

为了提高产品的可靠性必须在产品的设计、生产、管理、售后服务的各个环节作出努力,因此从事产品开发、研究、企业管理、生产组织、业务采购、市场预测、售后服务的技术人员,必须熟悉和掌握提高可靠性的方法和手段。

第二章 汽车可靠性理论基础

第一节 可靠性函数

一、可靠性的有关概念

1. 可靠性

指产品在规定的使用条件下,规定的时间内保持规定功能的能力。

2. 可靠度(R)

指产品在规定的使用条件下,规定的时间内保持规定功能的概率。

以汽车产品为例:

(1)规定的使用条件:包括行驶里程、运行条件、载荷大小、维护条件。

(2)规定的时间:根据市场、用户或设计目标决定的期限。

(3)功能:指达到所设计制造要求或规定的工作性能目标。

(4)概率:随机事件在 n 次试验中发生 r 次故障的可能性的多少。

例如:有 n 个汽车零件,在规定的工作条件下和规定的时间内,有 r 个失效,其余 $(n - r)$ 个还在继续工作,则可靠度为:

$$R = \frac{n - r}{n} = 1 - \frac{r}{n} = 1 - F$$
$$R + F = 1$$

式中: $F = r/n$ 称为不可靠度,或是累积故障概率。如图 2-1 所示:

设产品的规定时间为 t_0 ,产品从开始到发生故障的连续工作时间为 T 。现设有 n 个汽车零件,从开始使用到出现故障时的数目为 $r(t)$,则产品的可靠度由下式表示:

$$R(t) = P(T > t_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n - r(t)}{n}$$
$$0 \leq R(t) \leq 1$$

具有可维修的产品的可靠度,可以从可靠度和维修度两个方面来考虑。汽车是典型的可维修产品,既要提高可靠度,又要考虑维修度。有的产品(如灯泡)只能考虑可靠度,不用考虑维修度

可靠度与成本费用、维修费用之间的关系如图 2-2 所示:

3. 不可靠度

定义:产品在规定条件下和规定时间内不能完成规定功能的概率或发生故障的概率记为 $F(t)$ 。

与可靠度相对应: $F(t) = P(T \leq t_0) = 1 - R(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{r(t)}{n}$

不可靠度和可靠度的关系: $F(t) + R(t) = 1$

在可靠性的研究中,通常以 $F(t)$ 为主要研究对象。因为 $F(t)$ 的大小直接反映故障的概率,反映了在 t 时刻以前累积故障的情况,也反映了故障与时间 t 的函数关系,故又称 $F(t)$ 为累积故障概率,也称为故障分布函数。如图 2-3 所示:

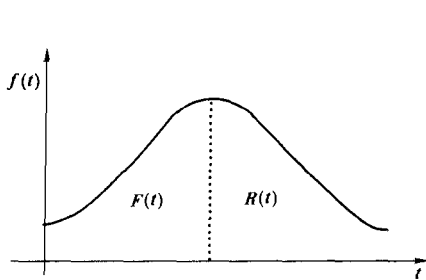


图 2-1 可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$

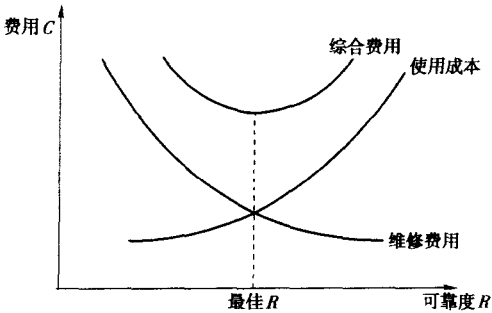


图 2-2 最佳可靠度

4. 故障密度

由概率论知:若故障分布函数 $F(t)$ 连续可导,则故障密度函数 $f(t)$ 可由 $F(t)$ 求得得出:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

上式表示产品出现故障的概率随时间变化的规律。即反映了单位时间的失效概率。

$f(t) = \frac{r}{n} \cdot \frac{1}{\Delta t}$, 如图 2-4 所示:

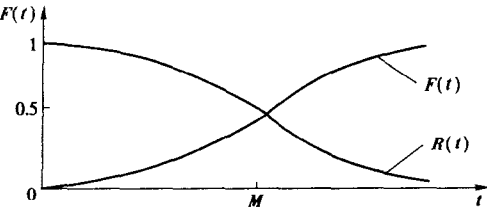


图 2-3 可靠度与不可靠度曲线

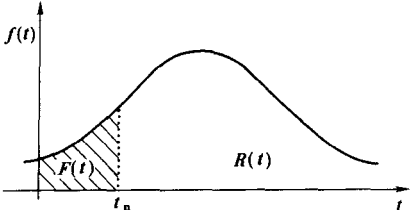


图 2-4 故障密度曲线

若 n 为有限个产品时,则故障概率密度:

$$f(t) = \frac{\Delta r_i}{\Delta t_i} \cdot \frac{1}{n}$$

式中: Δt_i ——单位时间;

Δr_i —— Δt_i 内的故障数;

n ——产品数;

$\Delta r_i / \Delta t_i$ —— Δt_i 内的平均故障数;

$\frac{\Delta r_i}{\Delta t_i} \cdot \frac{1}{n}$ —— Δt_i 内平均故障数相对于产品数的概率。

5. 故障率 $\lambda(t)$

在对产品进行可靠性分析时,人们希望知道单位时间内有多少产品发生故障,或者说在某时刻 t 以后单位时间内有多少产品失效。而这些失效产品在时刻 t 以前应是处于无故障工作状态,由此引入了故障率的概念。

定义:工作到某时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生故障的概率,称为该产品在 t 时刻的故障率。

设 n 为零件数, $r(t)$ 为到 t 时刻的故障数,则 $n - r(t)$ 为无故障的残存数,又设 $\Delta r(t)$ 为 t 时刻以后 Δt 内出现的故障数,则 $\Delta r(t)/\Delta t$ 为单位时间的故障数。

故障率为:

$$\lambda = \frac{\Delta r(t)}{[n - r(t)] \cdot \Delta t} = \frac{\Delta r(t)}{n \left[1 - \frac{r(t)}{n} \right] \cdot \Delta t}$$

$$= \frac{\Delta r(t)}{\Delta t \cdot n} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{r(t)}{n} \right]} = f(t) \cdot \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

故障率是产品在使用中工作能力表示的频繁程度,用 $\lambda \%/h$ 或 $\lambda \%/km$ 表示。若以时间为横坐标,故障率为纵坐标,其故障曲线可由 $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ 的关系得到,见图 2-5。

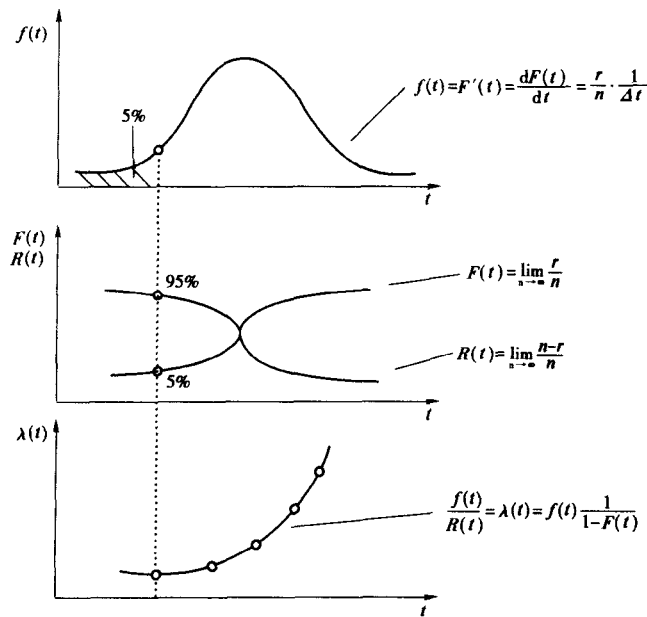


图 2-5

例 2-1:在同一批汽车零件中,随机抽样试验,其抽样数为 $n = 70$,使其在规定的条件下工作,记录的抽样零件数的失效时间分布如图 2-6 所示,试求可靠性函数。

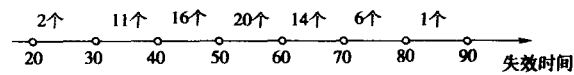


图 2-6 随机抽样试验的失效时间分布

- (1)离散型数据可用图 2-7 失效频数的直方图表示。分布中心(平均时间):55h。
- (2)连续型数据可用图 2-8 失效频率的直方图表示。

将根据此例计算的可靠度 $R(t)$,不可靠度 $F(t)$,故障率 $\lambda(t_{i-1}, t_i)$,故障密度 $f(t)$ 列于表 2-1。

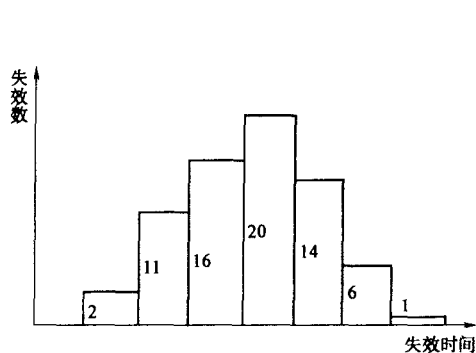


图 2-7 失效频数的直方图

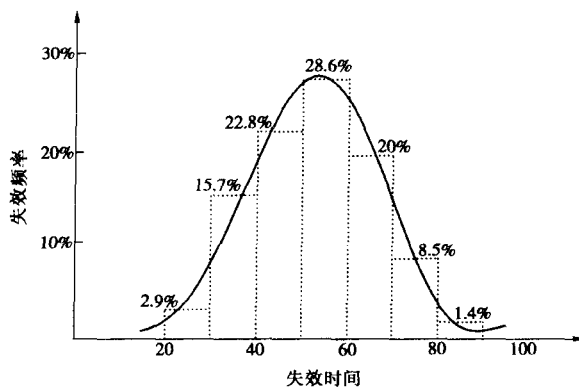


图 2-8 失效频率的直方图

表 2-1

序号 i	观测 时间 t_i	工作样品数 $r_i = n_{i-1} - n_i$	故障数 $\sum_{j=1}^i r_j = n - n_i$	各区间故障密度 (%/小时) $f(t_i) = \frac{r_i}{n} \cdot \frac{1}{\Delta t}$	累积失效概率 (不可靠度)% $F(t_i) = \sum_{j=1}^i f(t_j) \Delta t$ $= 1 - \frac{n_i}{n}$	可靠度 (%) $R(t_i) = 1 - F(t_i)$ $= \frac{n_i}{n}$	故障率 (%) $\lambda(t_{i-1}, t_i)$ $= \frac{r_i}{n_{i-1}} \cdot \frac{1}{\Delta t}$
1	20	70	0	0	0	100	0
2	30	68	2	0.29	2.9	97.1	0.029 (2/70)
3	40	57	13	1.57	18.6	81.4	0.162 (11/68)
4	50	41	29	2.28	41.4	58.6	0.28 (16/57)
5	60	21	49	2.86	70	30	0.488 (20/41)
6	70	7	63	2	90	10	0.666 (14/21)
7	80	1	69	0.85	98.6	1.4	0.858 (6/7)
8	90	0	70	0.14	100	0	1 (1/1)

将计算的 $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ 数据在相应的坐标中描点, 可得出四个可靠性参数曲线如图 2-9、图 2-10 所示。

若 $\Delta t \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$, 其可靠性函数为连续型:

$$\text{连续型} \begin{cases} F(t) = \int_0^t f(t) dt \\ R(t) = \int_t^\infty f(t) dt \\ f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \\ \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt} \end{cases} \text{由此式可得出 } R \text{ 和 } \lambda \text{ 的关系。}$$

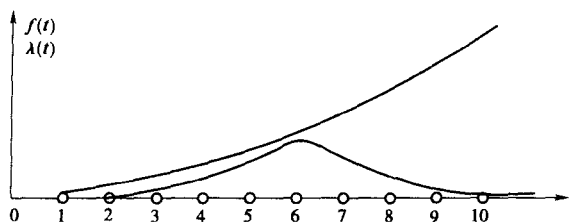


图 2-9 故障密度曲线及失效率曲线

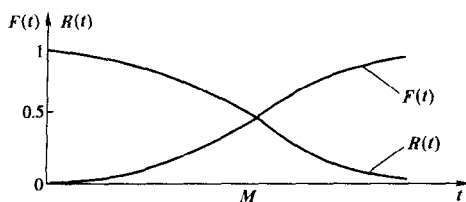


图 2-10 不可靠度曲线及可靠度曲线

可靠度函数也可由故障率求出,两边积分得:

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

则

$$R(t) = \exp\{- \int_0^t \lambda(t) dt\}$$

由此:

$$F(t) = 1 - \exp\{- \int_0^t \lambda(t) dt\}$$

$$f(t) = \lambda(t) \exp\{- \int_0^t \lambda(t) dt\}$$

[若 $\lambda(t) = \text{常数}$, 则 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 为指数分布]

由以上推导可得 $R(t), F(t), f(t), \lambda(t)$ 关系(表 2-2):

表 2-2

可靠性函数	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$		$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(t) dt$	$\exp[- \int_0^t \lambda(t) dt]$
$F(t)$	$1 - R(t)$		$\int_0^t f(t) dt$	$1 - \exp[- \int_0^t \lambda(t) dt]$
$f(t)$	$- dR(t)/dt$	$dF(t)/dt$		$\lambda(t) \exp[- \int_0^t \lambda(t) dt]$
$\lambda(t)$	$- d \ln R(t) / dt$	$F'(t) / (1 - F(t))$	$f(t) / \int_0^\infty f(t) dt$	

$$\left. \begin{array}{l} \text{故障密度: } f(t_i) = \frac{r_i(\text{故障数})}{n(\text{总数})} \cdot \frac{1}{\Delta t} \\ \text{可靠度: } R(t_i) = \frac{r_i(\text{残存数})}{n} \\ \text{不可靠度: } F(t_i) = 1 - \frac{r_i}{n} \\ \text{故障率: } \lambda(t_{i-1}, t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_{i-1})} = \frac{r_i}{n_{i-1}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \end{array} \right\} \text{离散型}$$

二、产品的寿命特征

对不可修复的产品,其寿命是指故障前的工作时间;如灯泡,是不可修复的产品,只用了 10 天,10 天就是其寿命。

对可修复产品,其寿命是指两故障间的平均工作时间,也称无故障工作时间。

在可靠性工程中,规定了一系列与寿命有关的指数:平均寿命,可靠寿命,中位寿命等。这些指标统称为可靠性寿命特征。

1. 平均寿命(T)

所谓平均寿命就是寿命的平均值,或平均无故障工作时间,MTBF (mean time between failures) 当故障密度 $f(t)$ 为连续时,

$T = \int_0^\infty tf(t) dt$; 当 $f(t)$ 为离散时, 则

$MTBF = \sum_{i=1}^n t_i f_i^*$ 。

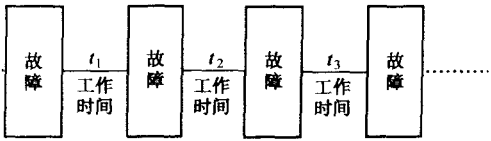


图 2-11 MTBF 示意图

图 2-11 为 MTBF 示意图。

2. 可靠寿命(T_R)

产品可靠度到达定值 R_0 时所用的时间,称为该产品的可靠寿命 T_R 。

$R(T_R) = R_0$

若寿命服从指数分布,则

$\therefore R(T_R) = e^{-\lambda t} = R_0$
 $e^{-\lambda T_R} = R_0$

$\therefore T_R = -\ln R_0 / \lambda = -T \ln R_0$

(注:当该产品寿命服从指数分布时,可证明: $T = 1/\lambda$)

此式可求出指数分布下任意可靠度水平的可靠寿命。

3. 中位寿命($T_{0.5}$)

可靠度为 0.5 时产品的寿命称为中位寿命。当产品工作时间达 $T_{0.5}$ 时,其失效概率和不失效概率各占一半。

4. 特征寿命

当可靠度 $R = e^{-1} = 0.368$ 时的产品寿命,称为特征寿命,记为 $T_{0.368}$,一般电子产品多数服从指数分布,特征点 e^{-1} 认为是老化期的开始点。

以上分析的可靠性函数 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 以及特征寿命相互之间的关系如图 2-12 所示:

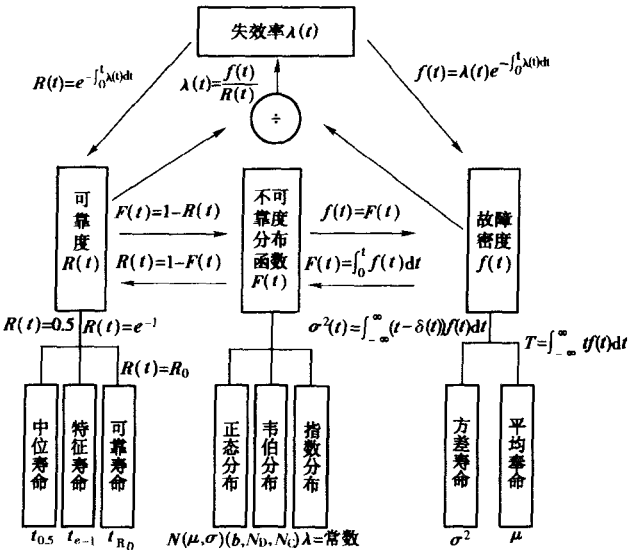


图 2-12 可靠性函数、特征寿命相互关系

第二节 可靠性理论分布

汽车可靠性研究中所用的理论分布类型很多,常用的分布有:正态分布、对数正态分布、指数分布、威布尔分布。

一、正态分布

(1)正态分布的故障密度函数为 $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, 如图 2-13 所示。

其特征为:

- a. μ 为均值;
- b. σ 为标准差, $f(t)$ 曲线在 $\chi = \mu \pm \sigma$ 处存在拐点;
- c. $f(t)$ 曲线在 $\chi = \mu \pm \sigma$ 区间的面积为 68.26%; 在 $\chi = \mu \pm 2\sigma$ 区间面积为 95.46%; 在 $\chi = \mu \pm 3\sigma$ 区间的面积为 99.73%。

(2)正态分布的不可靠度函数:

$$F(\chi) = \int_{-\infty}^{\chi} f(\chi) d\chi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\chi} e^{-\frac{(\chi-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\chi$$

如图 2-14 所示:

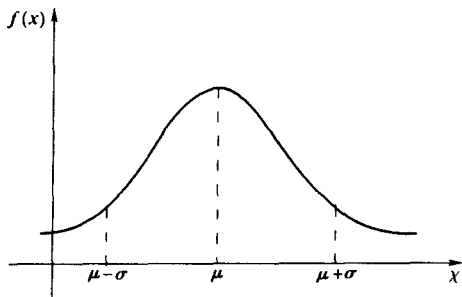


图 2-13 正态分布的概率密度

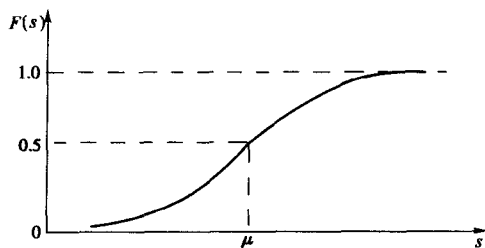


图 2-14 正态分布的不可靠度函数

其特征为:

- a. $F(\chi)$ 为一非减函数;
- b. $0 \leq F(\chi) \leq 1$;
- c. $F'(\chi) = \frac{dF(\chi)}{d\chi} = f(\chi)$ 。

标准正态分布故障密度函数(图 2-15):

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}, \mu = 0, \sigma = 1, u = \frac{\chi - \mu}{\sigma} \text{ (此式称为标准化置换式)}$$

标准正态分布不可靠度函数(图 2-16):

$$\phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du = \Phi\left(\frac{\chi - \mu}{\sigma}\right)$$

(3)正态分布的可靠度函数为:

$$R(x) = \int_{x_1}^{\infty} f(x)dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

标准正态分布的可靠度函数： $R(x) = 1 - \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$

故障率函数为：

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx}$$

标准正态分布的故障率函数：

$$\lambda(x) = \frac{\Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\sigma^{-1}}{1 - \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}$$

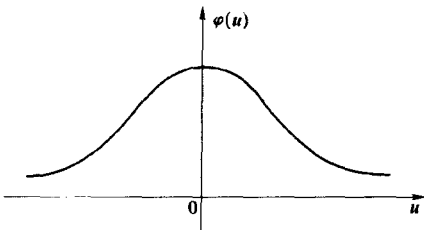


图 2-15 标准正态分布故障密度函数

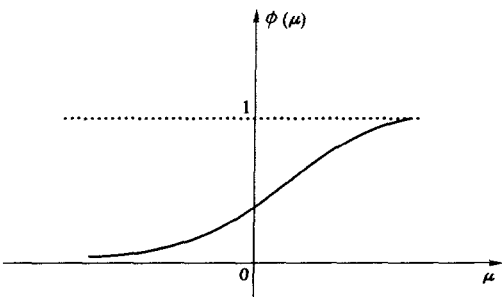


图 2-16 标准正态分布不可靠度函数

若产品的工作寿命是正态分布的随机变量,则其寿命的特征值如下:

- 平均寿命为: $E(X) = \mu$
- 方差寿命为: $D(X) = \sigma^2$
- 可靠寿命为: $T_R = U_P \cdot \sigma + \mu$
- 式中: $U_P = \frac{T_R - \mu}{\sigma}$
- 中位寿命为: $T(0.5) = \mu$

(4)正态概率坐标纸及其应用。

设 $\Phi(U)$ 为标准正态分布的不可靠度, $\tilde{\Phi}(U)$ 为标准正态分布的可靠度,则:

$$\Phi(U) = 1 - \tilde{\Phi}(U)$$

由正态概率表可查得 $U, \Phi(U), \tilde{\Phi}(U)$ 的值如表 2-3 所示:

U, Φ(U), $\tilde{\Phi}(U)$ 数值							表 2-3
U	-3	-2	-1	0	1	2	3
Φ(U)	0.00135	0.023	0.159	0.5	0.841	0.977	0.99865
$\tilde{\Phi}(U)$	0.99865	0.977	0.841	0.5	0.159	0.023	0.00135

以 $(U, \Phi(U))$ 为坐标点,在 $\Phi(U)$ 坐标系中描点,再用平滑的曲线连接各点,得不可靠度