

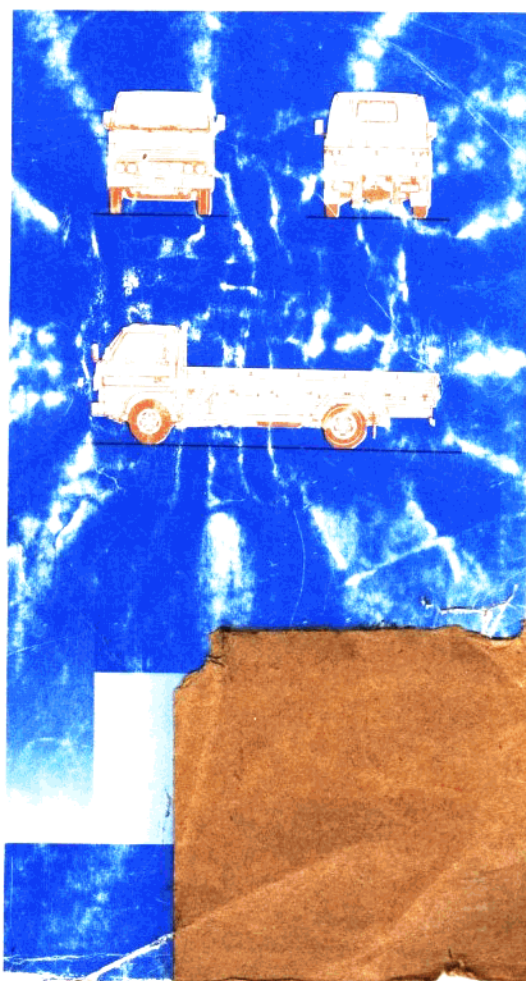
高等学校试用教材

汽车维修理论

(汽车运用工程专业用)

戴冠军 主编

QICHE WEIXIU LILUN
人民交通出版社



高等学校试用教材

QICHE WEIXIU LILUN

汽车维修理论

(汽车运用工程专业用)

戴冠军 主编

人民交通出版社

(京)新登字091号

内 容 提 要

本书是根据全国高等院校汽车运用工程专业协作组制定的“汽车维修理论”教学大纲编写的。全书共分五章，第一、二、三章主要介绍可靠性理论及其应用，第四章研究汽车技术状况的诊断理论，第五章主要研究汽车修理工艺的合理化问题。

本书作为高等学校汽车运用工程专业试用教材，也可供汽车工程技术人员参考。

高等学校试用教材

汽车维修理论

(汽车运用工程专业用)

戴冠军 主编

插图设计：佺文利 正文设计：崔凤莲 责任校对：张捷

人民交通出版社出版

(100013北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：17.5 字数：433千

1991年12月 第1版

1991年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—6500册 定价：4.60元

ISBN 7-114-01158-X

U·00759

前 言

汽车维修理论是一门新兴的学科，它着重研究汽车在使用中的失效过程与规律，探讨如何采取技术和管理措施维持、恢复并正常发挥汽车的性能及延长使用寿命，提高经济效益。因此，它在国民经济建设中日益显示了它的重要作用。

汽车维修理论涉及的范围甚广，本书是根据全国高等院校汽车运用工程专业协作组制定的“汽车维修理论”教学大纲编写的。全书共分五章，第一、二、三章主要介绍可靠性理论及其应用。可靠性理论是汽车维修的基础理论。它研究汽车的失效过程与失效机理，并应用概率论和数理统计的方法研究故障发生、发展的宏观规律，并以此为依据优选维修方式，确定维修周期，选定维修项目，制定合理的维修制度，从而为采用科学的管理措施打下基础。第四章主要研究汽车在不解体的条件下，对汽车技术状况进行诊断的理论和方法，它是以可靠性理论、控制论和系统理论为基础逐步发展起来的，目前尚处于发展和完善阶段。因此，无论在基本理论方面和诊断技术方面，都还存在着许多急待解决的问题。第五章主要研究汽车修理工艺的合理化问题，其目的是为了研究如何利用汽车的潜在工作能力，以最低的社会消耗，保质保量地恢复汽车的工作能力。

本书由西安公路学院戴冠军主编，第一章由吉林工业大学杨万凯编写，第二章由东北林业大学王禹忱编写，第三、四、五章由西安公路学院戴冠军编写。

本书可作为高等学校汽车运用工程专业试用教材，也可供汽车运输和维修部门的工程技术人员工作时参考。

吉林工业大学张焯教授在百忙中对本书进行了认真审阅，提出了很多宝贵的修改意见，在此甚表感谢。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

目 录

第一章 汽车可靠性理论基础	1
第一节 汽车可靠性概述.....	1
一、可靠性发展简介.....	1
二、可靠性概述.....	2
第二节 汽车的故障类型及分布规律.....	5
一、概述.....	5
二、指数分布.....	5
三、正态分布.....	6
四、对数正态分布.....	7
五、威布尔分布.....	8
第三节 可靠性数据的收集和处理.....	10
一、可靠性数据的收集.....	10
二、可靠性试验简介.....	12
三、整机寿命及其可靠性评价.....	13
四、零件的耐磨寿命及其可靠性评价.....	15
五、零件的疲劳寿命及其可靠性评价.....	18
六、少量数据分析及其可靠性评价.....	23
第四节 系统可靠性分析.....	28
一、概述.....	28
二、简单系统的可靠性.....	28
三、指数分布时的系统可靠度及其平均寿命.....	30
四、威布尔分布时的系统可靠度及其平均寿命.....	31
五、故障树分析.....	33
六、故障模式、影响及危害性分析.....	38
七、系统的维修性及其有效度分析.....	41
第二章 汽车零件的失效机理	47
第一节 汽车零件的失效模式与失效机理.....	47
一、失效模式、机理和应力.....	47
二、弹性变形失效.....	48
三、塑性变形失效.....	50
四、快速断裂失效.....	51
五、疲劳断裂失效.....	52
六、蠕变失效.....	54
七、表面损伤失效.....	55

第二节 汽车零件磨损失效形式及其机理	57
一、概述	57
二、摩擦理论	57
三、磨损失效机理与磨损极限	67
四、不同磨损形式的形成及其影响因素	68
五、机构的磨损极限	81
第三节 疲劳失效机理与疲劳寿命	86
一、基本概念及疲劳过程	86
二、疲劳寿命的估算	90
第四节 特异腐蚀失效机理	90
一、应力腐蚀机理	91
二、闭塞电池腐蚀理论	92
三、氢脆理论	93
四、腐蚀疲劳	94
五、气蚀损伤	95
第三章 汽车维护理论基础	96
第一节 汽车维护的基本概念	96
一、汽车技术状况的变化规律	96
二、影响汽车技术状况变化的因素	103
三、汽车的维修思想和维护工作的实质	104
四、汽车的维护类型和维护方式	106
第二节 汽车的维修制度	110
一、汽车维修制度制定的原则和步骤	110
二、汽车维护周期的确定原理和方法	111
三、汽车各级维护作业项目的组合	119
四、维修周期结构的优化	122
五、各国维修制度简介	123
六、汽车维护工作量的确定	127
第四章 汽车技术状况的诊断理论	131
第一节 汽车技术状况诊断的基本原理	131
一、汽车技术状况诊断的系统分析原理	131
二、汽车或总成技术状况的图象分析法	138
第二节 诊断参数	148
一、概述	148
二、诊断参数的选择	149
第三节 诊断规范	155
一、概述	155
二、诊断规范确定的方法	156
第四节 汽车续驶里程的预测和诊断周期的优化	171
一、汽车续驶里程的预测	171

二、诊断周期的优化·····	173
第五章 汽车修理工艺分析原理 ·····	176
第一节 汽车修理的经济效益分析·····	176
一、汽车修理的经济效益分析·····	176
二、汽车修理效益的计算方法·····	180
第二节 汽车潜在工作能力的恢复模型和修理组织方式·····	182
一、汽车潜在工作能力的变化与恢复模型·····	182
二、汽车修理的组织方式·····	185
第三节 汽车修理工艺过程的统筹与优化·····	187
一、汽车修理工艺的统筹方法·····	187
二、统筹图的优化——时间费用分析·····	193
第四节 汽车零件检验分类的标准和制定方法·····	193
一、汽车零件检验分类的技术条件·····	194
二、汽车零件检验分类技术条件的确定方法·····	195
三、汽车零件检验分类方法·····	206
第五节 汽车零件修复方法的选择与零件修复工艺规程的设计·····	206
一、汽车零件修复方法的分类·····	206
二、汽车零件修复方法的选择·····	206
三、汽车零件修理质量的评价·····	212
四、汽车零件修复方法的经济合理性分析·····	214
五、汽车零件修复工艺规程的制定·····	215
第六节 汽车主要总成基础件的变形与修复·····	219
一、汽车主要总成基础件变形的原因·····	219
二、汽车主要总成基础件相对位置偏差对总成工作质量的影响·····	221
三、汽车主要总成基础件位置偏差的测量·····	223
四、汽车主要总成基础件的修理·····	227
第七节 总成的装配原理与磨合试验·····	233
一、总成装配的基本概念·····	233
二、典型配合副的装配原理·····	245
三、总成的磨合和试验·····	251
四、总成装配质量的评价与控制·····	257
第八节 汽车修理质量及其控制·····	259
一、概述·····	259
二、汽车修理质量指标的优化·····	261
三、汽车修理质量管理的统计方法·····	261
四、按工艺指标值对汽车总成修理质量的预测·····	267
主要参考文献·····	272

第一章 汽车可靠性理论基础

第一节 汽车可靠性概述

一、可靠性发展简介

可靠性理论是近二三十年发展起来的一门新兴学科。从 50 年代起,一些工程技术人员和数学家们便开始运用概率论和数理统计方法对产品的可靠性进行了定量研究。随着科学技术的进步,汽车结构、性能日趋复杂和提高,使用部门对车辆要求完好可靠,加之索赔、退货制度的出现,给汽车工业提出了许多急需研究和解决的课题,使可靠性理论越来越被人们所重视。

由于汽车强度、承受载荷、零件状况、性能参数和使用寿命等受多种因素影响,而这些因素的变化及由此而造成的故障现象都具有随机变化的特征。过去,由于对这些随机变化情况无法进行精确估计,在确定汽车零件尺寸参数时采用,安全系数等方法作出不精确的放大。如果采用概率论和数理统计方法来分析汽车零件、总成和整车的结构可靠性(结构不失效而能完成规定的功能)和性能可靠性(某项性能偏差不超限而能完成规定的功能),就可以获得比较精确的更符合实际的结果。汽车可靠性理论就是以概率论和数理统计等为理论基础,以试验和调查数据为资料,以电子计算机为辅助手段,按照系统工程的分析方法,权衡经济得失,进行精确设计,合理制造,正确地使用、维修和进行科学管理,将汽车的可靠性提高到令人满意程度的一门新型学科。

可靠性比其他汽车性能更具重要性,可靠性差将失去信誉,失去市场,失去使用价值。国外近十几年来,汽油机第一次大修里程已增至25万公里左右,柴油机在35~40万公里左右。相比之下,国产汽车、发动机故障率高,耐久寿命短,性能较差。汽车不正常停修对企业的损失很大,有的国家对计划外的停修费用规定为8.1%,用户还要求压缩。在国际市场上,汽车的可靠性指标不同,其价格亦不同。1959年国外小汽车保用期为90天或4千英里,到1969年便提高到5年或5万英里。1969年日本出口到美国的汽车遭到退货的危机,引起了与汽车生产有关的日本各行业的巨大震动,他们组织全社会力量来共同解决这一问题,现在日本汽车在国际上享有盛誉,与它下决心全力解决可靠性问题有极大的关系。日本的汽车、工程机械、彩电、电子产品、钢材、照像机等产品能够畅销全世界,主要在于产品有较高的可靠性。

国外还把可靠性问题提高到节约资源和能源的高度来认识,因为可靠性设计可以得到体积小、重量轻的产品,降低了材料消耗。高可靠性的产品,可以一顶二,甚至一顶十使用,这是日本企业家的经营思想。

汽车可靠性和可维修性对军用汽车更为重要,因为,它也是决定战争胜败的一个重要条件。

近几年,国内外对可靠性工程非常重视。美国人预言,今后只有那些具有高可靠性的产品及其企业,才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。日本人断言,今后产品竞争的焦

点是可靠性。1983年中国汽车工业公司董事会提出了“提高汽车产品质量，要主攻汽车可靠性”这一工作方针。

日本可靠性技术发展的特点是：①可靠性技术与管理的高度结合。从日本一年一度的可靠性和维修性会议报告内容看，可靠性水平提高相当显著，基本包括两个方面：一是提高可靠性关键技术；二是可靠性管理，二者高度结合是日本可靠性发展的特点；②采用可靠性设计等新技术，加强设计检评。据日本对汽车故障的统计，认为约有50%是属于设计问题，因而他们在设计阶段十分重视可靠性，加强对设计的管理，建立设计评审制度；③重视试验和故障分析。丰田汽车的试验项目和评价指标有1500多项，小松大阪工厂可靠性试验设备十分完善，为了打开国际市场，他们采集世界各地的工况载荷进行环境模拟试验和故障分析；④建立国际级、国家级、企业间的数据交换组织；⑤生产过程中自动检测具有普遍性；⑥外协件的可靠性保证体系；⑦加强可靠性学术活动，重视职工的技术培训；⑧科技联盟是日本可靠性影响最大的组织，有一系列出版公司，从71年起每年召开一次年会，为学术界和产业界架起桥梁，还组织三批国外考察队，调查国外可靠性动向，并重视实践。

美国三大汽车公司可靠性研究的特点是：有组织、规模大，且工作扎实。通用汽车公司的别克公司在设计、试验、生产、维修、服务等几个环节都注意以下几点：①制定可靠性目标；②研究设计、工艺、质量管理方法，预测产品可靠性。1966年福特汽车公司把投资几百万美元建成的研究所改作可靠性试验中心，装备100台以上的试验设备。福特汽车公司美北部编制的“汽车可靠性实用手册”，在技术人员中强制普及，成为工作指南。

五十年代国外就有一种论点，设备的维修理论基础就是可靠性理论，它是从故障、故障率及数学模型为研究基础的可靠性知识体系。到六十年代，可靠性科研成果逐渐在美日等国的汽车工业中得到应用，许多汽车公司都建立了可靠性管理体系。1966~1977年美国莫罗主编“维修工程手册”，1974年英国的设备综合工程学被确认并设立了设备综合工程学委员会，欧洲十二国结成的维修联盟正在推广设备综合工程学的理论。70年代英国工业部又颁布以维修设计、维修管理和维修技术三结合的设备综合管理技术，称为维修工程。日本73年提出“全员参加的生产维修”。目前，设备维修工程已得到世界公认，并在1974年被联合国教科文组织正式列入技术科学学科分类目录中。

随着可靠性及维修性工程的不断发展，先进的检测技术的应用及更科学地掌握了设备的故障规律，使得“以防为主”的维修思想得到新的发展，提出了“以可靠性为中心”的维修思想，美国联邦航空局于1970年颁发了以可靠性为中心的维修大纲MSG-2。从而显著地提高了维修效率、减少了维修费用。

二、可靠性概述

汽车可靠性是汽车设计、制造质量和使用维修中的重要指标。它是指系统、总成和零件的功能在一定时间内的稳定程度。抽象地说，就是保证功能，不出故障，可靠性所涉及的问题很广泛，既包括可靠性，维修性，有效性，经济性等内容，又包含管理方面的内容，下面分别介绍其定义和衡量尺度。

1. 可靠度

指系统、总成或零件在规定时间内及使用条件下，完成规定功能的概率。所谓规定的条件包括行驶里程，维护条件，运行条件，载荷变化等。所谓规定时间，是根据用户要求或设计目标决定的期限，对可靠性是个重要条件，有时也用振动次数或行驶距离来表示。所

谓功能, 指达到设计制造要求或规定的工作性能目标, 达不到的叫做故障。故障的含义, 指不能工作; 工作不稳定, 或性能下降等。因此, 在可靠性中必须明确故障内容, 确切地划分故障界限。所谓概率, 是反映随机事件在 n 次试验中发生 r 次故障的可能性。

通常, 概率是通过频率来表达的, 所谓频率是指在 n 次试验中, 产生 r 次某种结果, 那么出现这种结果的频率就是 r/n , 显然 $0 \leq r/n \leq 1$ 。如以 $P(A)$ 表示“随机事件 A 的概率”, 则有:

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (1-1)$$

$P(A) = 1$ 表示随机事件 A 必然发生。

$P(A) = 0$ 表示随机事件 A 不可能发生。

例如有 n 个某种汽车零件, 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, 那么这批零件的可靠度为:

$$R = \frac{n-r}{n} = 1 - \frac{r}{n} \quad (1-2)$$

或

$$R = 1 - F$$

则

$$R + F = 1 \quad (1-3)$$

式中: $F = \frac{r}{n}$ 称为累积故障概率或不可靠度。

一般将不同时间的故障率, 用直方图表示, 以便分析, 如图 1-1 中所示。

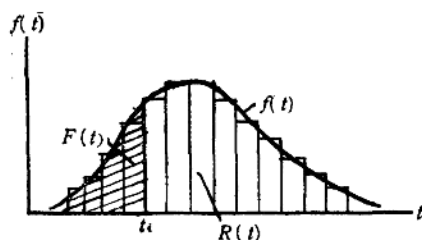


图1-1 故障概率密度函数

2. 故障概率密度函数

用频率衡量故障概率, 方法简便, 但有局限性, 即随机上下波动。如果将抽样数目增多, 区间距缩小, 则直方图将接近于平滑曲线, 称为故障概率密度曲线, 如图 1-1 所示。

图中 $f(t)$ 表示产品出现故障的概率随时间变化的规律, 称为故障时间随机变量的概率密度函数。由此得累积故障概率,

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-4)$$

其可靠度,

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-5)$$

则

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1-6)$$

欲求可靠度, 一般从故障概率着手。如 $f(t)$ 已知, 就不难求出不同 t 时的可靠度与不可靠度。

3. 故障率

故障率 $\lambda(t)$ 系指产品工作到 t 时刻为止尚未发生故障的条件下, 在下一单位时间内发生故障的条件概率。设 N 个零件, 到 t 时刻的故障件数为 $N_f(t)$, 其无故障的残存件数为 $(N - N_f(t))$, 在下一个时间 Δt 内出现的故障件数为 $\Delta N_f(t)$, 单位时间的故障件数为 $\Delta N_f(t)/\Delta t$, 则零件的故障率为:

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

$$= f(t) \frac{1}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-7)$$

故障率表示汽车或零件在使用中工作能力丧失的频繁程度，通常用（每1000小时或1000公里的百分数）来表示。

4. 平均无故障工作时间

它是产品最常用的可靠性指标，通常也叫平均寿命；对可维修的产品是指产品故障的平均间隔时间，记为 MTBF (mean time between failure)

$$MTBF = \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-8)$$

式中： t_i ——两次故障的间隔时间。

5. 维修度

对于一些简单而成本低廉的零部件，通常不进行修复。但对复杂且成本昂贵的零部件或设备，要提出复原速度和复原能力的要求。

维修度是指可维修系统、总成或零件，在规定的条件下、规定的时间内，维修完毕的概率。故维修度 $M(t)$ 是时间 t 的递增函数，对相同的 t 来说， $M(t)$ 愈大，汽车愈易维修完毕。在 $t=0$ 时， $M(0)=0$ ，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $M(\infty)=1$ 。与可维修度互补的函数 $G(t)=1-M(t)$ ，称为不可维修度，是一个递减函数。

6. 平均维修时间

即修复时间的平均值，记为 MTTR (mean time to repair)，当修复时间服从指数分布时，

$$MTTR = \frac{1}{\mu(t)} \quad (1-9)$$

$\mu(t)$ 为修复率，指到某时间还在维修的产品，在该时刻后的单位时间内修复的条件概率。

7. 有效度

将可靠度与可维修度综合起来的一个尺度称为有效度（或称为可利用度）。其定义为：可维修产品在某一特定的瞬时能维持其功能的概率。它分为瞬时有有效度、平均有效度和稳态有效度（或称极限有效度）。

用可能工作时间系数来表示的有效度是产品在长时间使用的平均有效度 A ，其表达式为

$$A = \frac{U}{U+D} \quad (1-10)$$

式中： U ——工作时间；

D ——不能工作时间。

8. 重要度

系统中某一设备发生的故障占整个系统故障的比率，叫做重要度 E ，可用下式表示，

$$E = \frac{N_{sf}}{N_f} \quad (1-11)$$

式中： N_f ——所有设备发生故障的总次数；

N_{sf} ——某设备发生故障而引起系统故障的次数。

9. 经济尺度

常用的经济尺度有：

$$\text{费用比}(\text{CR}) = \frac{\text{全年维修费}}{\text{购置费}}, \quad (1-12)$$

以及

$$\frac{\text{MTBF}}{\text{成本}} \quad (1-13)$$

第二节 汽车的故障类型及分布规律

一、概 述

1. 典型寿命曲线

汽车可能由于各种原因而失效，在可靠性研究中把故障分为三种类型，即早期故障、偶然故障和耗损故障。

早期故障通常是由于设计、制造或检验的差错，以及装配欠佳引起的，一般可通过强化试验或磨合加以排除。其故障率 $\lambda(t)$ 随时间而下降，称为故障率减少型，相当于磨合期，见图1-2A段。

偶然故障多数是由于操作疏忽、润滑不良、维护欠佳、材料隐患、工艺及结构缺陷等偶然原因所引起的。即没有一种特点的失效机理在起主导作用。其故障率 λ 变化甚微，称作故障率恒定型，见图1-2B段。

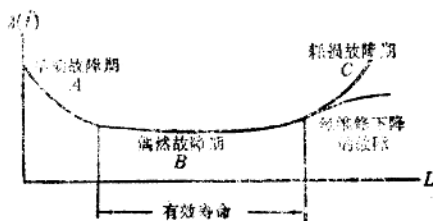


图1-2 典型寿命曲线

耗损故障指汽车经长期使用后，出现老化衰竭而引起的，其故障率随时间的增加而不断升高，如图1-2C段所示。如果在上升期间稍前一点更换或修复即将耗损的零件，可减少故障率，延长汽车使用寿命。

2. 整车、总成或零件的故障分布

在可靠性工程中，常用的分布有指数分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布等。例如复杂机器的故障分布常以指数分布为主，其故障率 λ 为定值，平均无故障工作时间（或称平均寿命）为故障率的倒数 $1/\lambda$ 。

偶然故障、突变失效件，如电器件，气缸垫等，一般亦服从指数分布。磨损件的故障分布可认为服从近似正态分布。疲劳件的故障率同磨损件相仿，为随时间的增加而增加的函数，一般服从对数正态分布或威布尔分布。

当然，不同的总成或零部件其故障规律属于何种分布，应根据获得的故障数据同理论分布的符合程度进行检验。

二、指数分布

指数分布是连续型随机变量分布形式中最基本的一种，由于它计算简便，因而在可靠性工程中获得广泛应用。

指数分布的概率密度函数： $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ (1-14)

累积故障概率： $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ (1-15)

可靠度函数: $R(t) = e^{-\lambda t}$

$$\text{故障率: } \lambda = \frac{1}{\mu} \quad (1-16)$$

$$\text{平均无故障时间: } \text{MTBF} = \mu = \frac{1}{\lambda} \quad (1-17)$$

$$\text{数学期望: } E(t) = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{方差: } D(t) = \int_0^{\infty} [t - E(t)]^2 \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda^2}$$

指数分布的各函数曲线如图1-3所示。

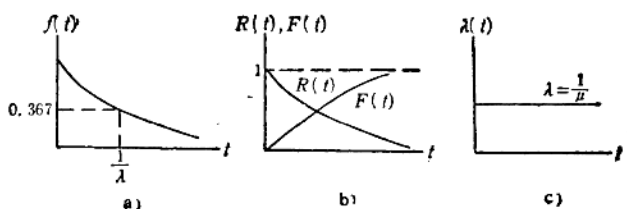


图1-3 指数分布函数曲线
a) 概率密度函数曲线; b) 累积故障概率曲线; c) 故障率曲线

当 $t = \frac{1}{\lambda}$ 时, $F(t) = 1 - e^{-1} = 63.2\%$, 这时的随机变量 $t = \frac{1}{\lambda} = \eta$ 称为特征寿命, 由此可见, 指数分布的特征寿命等于它的平均寿命。

三、正态分布

正态分布是一种最常用的连续型分布, 它可以用来描述许多自然现象和各种物理性能, 也是机械制造、科学实验及测量技术进行误差分析的重要工具。在可靠性工程中, 它对零件强度和应力的分布, 磨损件的失效分布, 可靠性设计等方面都起着重要作用。

1. 正态分布特征

正态分布的概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1-18)$$

累积故障概率 (分布函数) 为:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (1-19)$$

可靠度函数为:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt$$

故障率属于递增型,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\varphi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma \cdot R(t)}$$

式中: t ——故障时间随机变量;

σ ——总体标准差;

μ ——总体的均值。

正态分布如图1-4所示。随机变量取值在 $+\infty$ 与 $-\infty$ 之间是一个必然事件,其概率为1。且大部分面积集中在平均值两侧 3σ 范围内,占总面积99.73%,曲线左右对称, μ 和 σ 是决定正态分布的两个基本参数,常用 $N(\mu, \sigma^2)$ 表示。其中 σ 是决定分布的离散程度, σ 越大,曲线越平坦展开,但曲线内包含的面积始终等于1, μ 不同而 σ 相同时,两正态分布只是在位置上的不同,如图1-5所示。

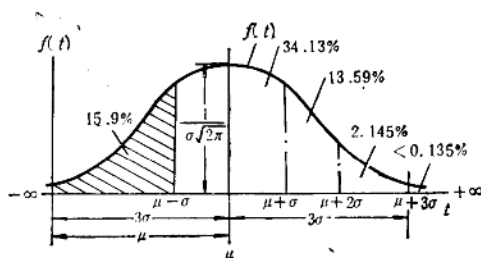


图1-4 正态分布曲线

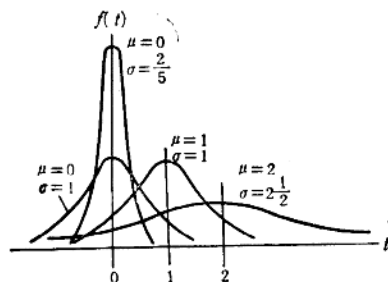


图1-5 不同 μ, σ 时的正态分布曲线

2. 标准正态分布

为便于应用查表法来计算正态分布的 $F(t)$,需将其转换为标准正态分布形式,为此可引入新参量进行代替,令

$$Z = \frac{t - \mu}{\sigma} \quad (1-20)$$

这样 $\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ$

$$\Phi(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ$$

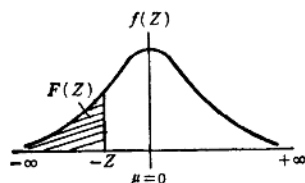


图1-6 标准正态分布曲线

平均值 $\mu=0$,标准差 $\sigma=1$ 的正态分布 $(0, 1)$ 称为标准正态分布,它有着特别重要的作用,如图1-6所示。转化为标准正态分布后,便可通过标准正态分布表,根据 Z 值求取累积故障概率 $F(t)$ 。

3. 正态分布的加法定理

若随机变量 ξ_1 服从 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$, ξ_2 服从 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$,而且 ξ_1 与 ξ_2 独立,则 $\xi = \xi_1 \pm \xi_2$ 服从 $N(\mu_1 \pm \mu_2, \sigma_1^2 \pm \sigma_2^2)$ 。

四、对数正态分布

在材料或零件的疲劳强度和疲劳寿命研究中,大量应用了对数正态分布。其概率密度函数和累积故障概率与正态分布有相似之处,

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_t'\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - t'}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1-21)$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{t\sigma_t'\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - t'}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (1-22)$$

式中: t' 、 σ 、 σ_t' ——对数正态分布的两个参数。

图1-7表示为两种不同 μ 和 σ 值时的对数正态分布密度曲线。

对数正态分布的数学期望为,

$$E(t) = e^{\overline{t'} + \frac{\sigma_t'^2}{2}}$$

或

$$E(t) = 10^{\overline{t'} + \frac{\sigma_t'^2}{2} \ln 10}$$

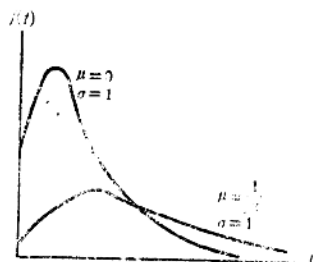


图1-7 对数正态分布密度曲线

五、威布尔分布

1. 威布尔分布函数

威布尔分布在可靠性工程中应用非常广泛, 其函数关系为,

$$f(t) = \frac{m(t-r)^{m-1}}{t_0} \exp \left[-\frac{(t-r)^m}{t_0} \right] \quad (1-23)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\frac{(t-r)^m}{t_0} \right] \quad (1-24)$$

式中: m ——形状参数;

t_0 ——尺度参数;

r ——位置参数。

令 $\eta = t_0^{\frac{1}{m}}$, $t_0 = \eta^m$, 则有

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - R(t) = 1 - \exp \left[-\frac{(t-r)^m}{t_0} \right] \\ &= 1 - \exp \left[-\left(\frac{t-r}{\eta} \right)^m \right] \end{aligned} \quad (1-25)$$

在某些情况下, 如疲劳中的高应力试验, 即交变应力比疲劳极限高很多的情况, 上述三参数的威布尔分布便转化为二参数的威布尔分布, 即 $r=0$ 的情况, 这时

$$F(t) = 1 - \exp \left[-\frac{t^m}{t_0} \right] \quad (1-26)$$

$$\mu = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (1-27)$$

$$\sigma = t_0^{\frac{1}{m}} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-28)$$

式中: Γ —— Γ 函数 (见高等数学 Γ 函数表)

1) 形状参数

首先假定 $r=0$, $t_0=1$, 这时按 $m<1$, $m=1$ 和 $m>1$ 三种情况分别画出威布尔分布的概率密度曲线, 如图1-8所示。其中 r 和 t_0 是仅与横坐标轴 t 的位置和尺度大小有关的参数, 而 m 才是影响威布尔分布密度曲线形状的本质参数。 $m<1$, 曲线代表故障率随时间而减少的情况, 也就是它反映了早期故障过程的数量特征; $m=1$ 则代表了故障率为常数, 它描述了随机故障过程; $m>1$ 代表故障率增长的情况。根据试验求得的 m 值, 就可判断造成该零件失效的原因, 见图1-9。

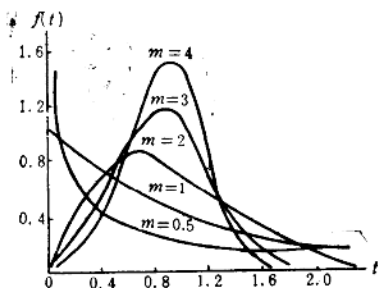


图1-8 威布尔概率密度曲线

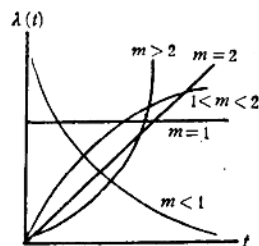


图1-9 威布尔分布的故障率函数曲线

2) 位置参数

在威布尔分布的链条模型中, r 表示链条最薄弱一环的强度, 在可靠性分析中, r 同样有这种极限值的含义。当 $t < r$ 时, 零件就没有失效的可能, 此时 $F(t) = 0$, 当 $t > r$ 时出现失效的可能, 当 t 远大于 r 时, 三参数威布尔分布变成两参数威布尔分布, 见图1-10。

3) 尺度参数

t_0 的影响见图1-11所示。

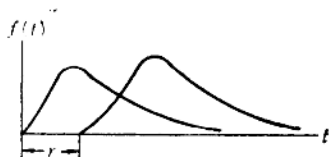


图1-10 $r > 0$ 时的曲线

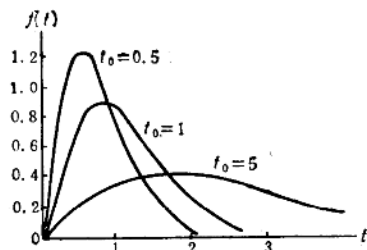


图1-11 令 $m=2$, $r=0$, 改变 t_0 时的 $f(t)$ 曲线

2. 威布尔概率纸原理

要判断某一产品的故障分布是否遵循威布尔分布; 当已知符合威布尔分布后, 又如何估计分布参数, 在实践中, 其简单可行的方法便是图解法。为此, 首先介绍威布尔概率纸原理:

将 $1 - F(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0^m}}$ 式两边各取自然对数, 则

$$\ln[1 - F(t)] = -\frac{t^m}{t_0^m}$$

$$\ln \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{t^m}{t_0^m}$$

再取自然对数

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = m \ln t - \ln t_0$$

令

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = Y \quad \ln t = X \quad \ln t_0 = C$$

则上式变成线性函数, $Y = mX - C$

在 $X-Y$ 坐标中, m 是斜率, $C = \ln t_0$ 是截距, 取概率纸上边为 X 轴, 右边为 Y 轴, 二者均为等刻度坐标; 取概率纸下边为 t 轴, 它与 X 轴对应的值是 $t = e^x$, 其分度按 $\ln$ 刻度; 取概率纸左边为 $F(t)$ 轴, 刻与 Y 轴对应的值, 其分度按 $\ln \ln$ 刻度。这样, 就得到一张四边分别代表 $X-t$ 和 $Y-F$ 其值互相对应的两组坐标系统的概率纸, 如图1-12所示。

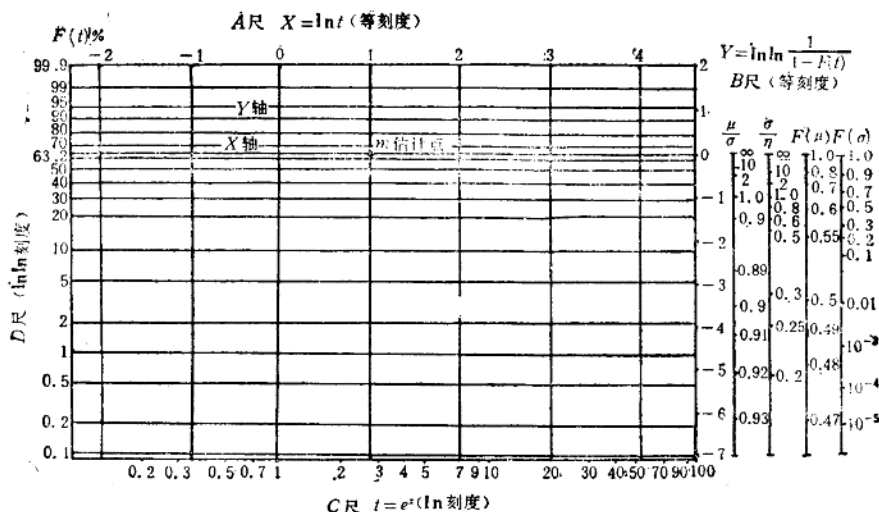


图1-12 威布尔概率纸

图中“ m 估计点”的含意是, 当 $Y = 0$, $X = 1$ 时, $m = c$ 。这样, 如果从试验结果在概率纸中拟合得一条近似直线 (即 $r = 0$), 则过 m 点作此直线平行线交 Y 轴于 c , $m = c$ 为形状参数, 如图1-13所示。

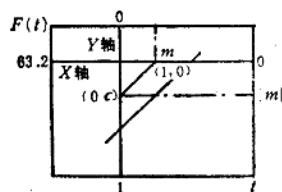


图1-13 形状参数 m 估计点

图1-12中, t 轴的刻度是从0.1到100为止。如果 t 轴单位是小时, 则一张概率纸只能记录100h以内的试验结果。为适应疲劳寿命试验, 可将 t 轴乘上相应的倍数或将几张概率纸接起来。

第三节 可靠性数据的收集和处理

一、可靠性数据的收集

1. 数据收集和分析的重要性

在维持和改进老产品和开发新产品的过程中, 都要进行各种各样的试验, 记录大量的试