



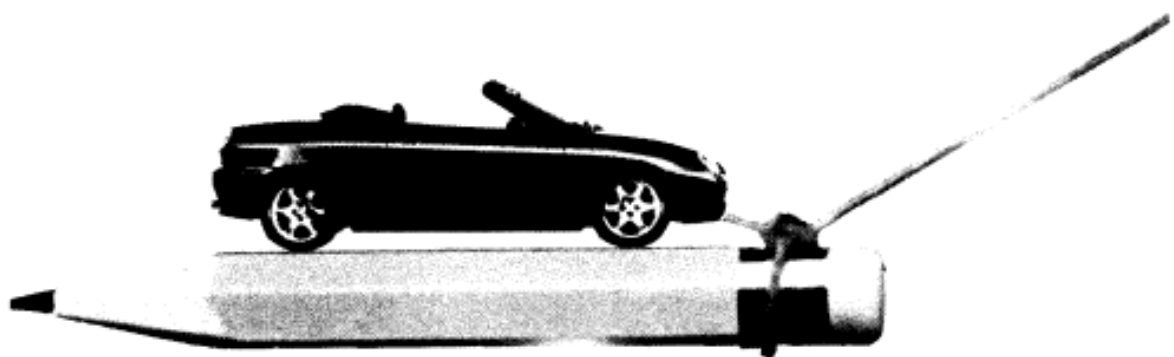
普通高等教育“九五”国家级重点教材

PUTONGGAODENGJIAOYUJIUWUGUOJIAJIZHONGDIANJIAOCAI

# 汽车维修工程

〔汽车运用工程专业用〕

戴冠军 / 主编  
高延龄 / 主审



人民交通出版社

普通高等教育“九五”国家级重点教材

Qiche Weixiu Gongcheng

# 汽车维修工程

(汽车运用工程专业用)

戴冠军 主编  
高延龄 主审

ND32/18

人民交通出版社

521

## 内 容 提 要

本书共分三篇,第一篇主要介绍汽车可靠性基础理论,汽车零部件失效模式及其分析,汽车维护的基础知识等;第二篇主要介绍汽车修理工艺,内容包括汽车修理经济效益分析,汽车修理工艺过程,汽车零部件清洗,检查与零件修理方法,汽车修理质量评价等;第三篇主要介绍汽车发动机及底盘主要总成电控装置的维修及车身维修,内容包括发动机集中控制系统、自动变速控制系统、制动防抱死控制系统及车身的基本知识及维修等。

本书可作为高等院校汽车运用工程专业本科教材,也可供汽车运输和维修部门的工程技术人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车维修工程/戴冠军主编. —北京:人民交通出版社

, 1999. 8

ISBN 7-114-03251-X

I. 汽… II. 戴… III. 汽车—车辆修理—工艺 IV. U472.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03918 号

高等学校试用教材

**汽车维修工程**

(汽车运用工程专业用)

戴冠军 主编

高延龄 主审

责任印制:孙树田

插图设计:李京辉 版式设计:周 园 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

新世纪印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:456 千

1999 年 8 月 第 1 版

1999 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—5000 册 定价:23.50 元

ISBN 7-114-03251-X

U · 02315

# 前 言

《汽车维修工程》教材是根据全国汽车运用工程专业教学指导委员会制订的教学大纲，在广泛征求各有关院校意见后编写的，编写学时为 90 学时。初稿经交通部组织“国家重点教材专家评审组”评审后，根据专家意见对部分编写内容作了较大的修改。全书共分三篇：第一篇主要介绍汽车可靠性基础理论、汽车零部件失效模式及其分析、汽车维护的基础知识等；第二篇主要介绍汽车修理工艺，内容包括：汽车修理经济效益分析、汽车修理工艺过程、汽车零部件清洗、检查与零件修理方法、汽车修理质量评价等；第三篇主要介绍汽车发动机及底盘主要总成电控装置的维修及车身维修等，内容包括：发动机集中控制系统的维修、自动变速控制系统的维修、制动防抱死控制系统的维修及车身维修等。

本书由西安公路交通大学编写，主编为戴冠军。第一篇第一章由李晓霞编写，第二章由刘瑞孖编写，第三章由刘双乾编写；第二篇第一、三章由戴冠军编写，第二章由李宪民编写；第三篇由戴冠军和秦川编写。

本书由吉林工业大学高延龄教授主审。高延龄教授在百忙中对本书进行了认真审查，提出了许多宝贵的修改意见，再次表示感谢。

本书可作为高等院校汽车运用工程专业本科教材，也可供汽车运输和维修部门的工程技术人员工作时作为学习和参考用。

由于编者水平有限，书中若出现缺点、错误，望读者给予指正，并提供资料，以便再版时修订补充。

编 者

1998 年

# 目 录

## 第一篇 汽车维修基础知识

<b>第一章 汽车可靠性理论基础</b> .....	1
<b>第一节 汽车可靠性概述</b> .....	1
一、引言.....	1
二、汽车可靠性与维修.....	1
三、汽车可靠性的评价指标.....	2
<b>第二节 汽车故障类型及故障分布规律</b> .....	4
一、汽车故障模式及故障类型.....	4
二、汽车可靠性研究中常用的故障分布.....	5
三、可靠性数据的统计推断.....	10
<b>第三节 汽车可靠性数据的采集与分析</b> .....	16
一、汽车可靠性数据的采集.....	16
二、汽车可靠性数据的分析.....	18
<b>第四节 系统可靠性的基本概念</b> .....	26
一、基本概念.....	26
二、简单不可修复系统的可靠性分析.....	26
三、系统维修性的基本概念.....	30
<b>第二章 汽车零部件的失效模式及其分析</b> .....	31
<b>第一节 汽车零部件失效的概念及分类</b> .....	32
一、失效的概念.....	32
二、失效的基本类型.....	32
三、零件失效的基本原因.....	32
<b>第二节 汽车零部件磨损失效模式与失效机理</b> .....	33
一、磨料磨损及其失效机理.....	34
二、粘着磨损及其失效机理.....	36
三、表面疲劳磨损及其失效机理.....	37
四、腐蚀磨损及其失效机理.....	38
五、微动磨损及其失效机理.....	40
<b>第三节 汽车零部件疲劳断裂失效及其机理</b> .....	41
一、疲劳断裂失效的分类.....	42
二、疲劳断裂失效机理.....	42
三、疲劳断口宏观形貌特征.....	43

四、提高汽车零件抗疲劳断裂的方法 .....	45
第四节 汽车零部件腐蚀失效及其机理 .....	45
一、化学腐蚀失效机理 .....	45
二、电化学腐蚀失效机理 .....	45
三、汽车零件的老化 .....	46
第五节 汽车零部件变形失效机理 .....	46
第六节 汽车零部件失效分析方法 .....	47
一、失效分析的基本思路 .....	47
二、金属的断裂断口分析技术 .....	51
三、失效分析的步骤 .....	54
四、失效分析举例 .....	56
<b>第三章 汽车维护基础知识</b> .....	57
第一节 汽车维护的基本概念 .....	58
一、汽车技术状况的变化规律 .....	58
二、汽车维修思想 .....	58
三、汽车的维护类型和维护方式 .....	60
四、汽车维修制度简介 .....	65
第二节 汽车维护制度 .....	67
一、汽车维护制度的制定原则和步骤 .....	67
二、汽车各级维护作业项目的确定 .....	68
三、汽车维护周期的确定 .....	68
四、汽车维护作业分类和工艺组织 .....	71

## 第二篇 汽车修理工艺

<b>第一章 汽车修理工艺概论</b> .....	74
第一节 汽车修理的经济效益分析 .....	74
一、汽车修理的经济效益 .....	74
二、汽车合理更新的决策方法 .....	76
第二节 汽车修理工艺过程 .....	77
一、汽车修理工艺过程 .....	77
二、汽车修理工艺过程的统筹与优化 .....	79
三、汽车修理的作业组织 .....	83
四、汽车的验收 .....	84
第三节 汽车及零部件清洗工艺 .....	84
一、汽车外部清洗 .....	84
二、汽车零件清洗 .....	85
第四节 汽车零件的检验分类 .....	88
一、汽车零件检验分类的技术条件 .....	89
二、汽车零件检验分类技术条件的确定方法 .....	89

三、零件检验方法的分类 .....	92
四、零件隐蔽缺陷的检验 .....	93
<b>第五节 汽车总成装配的技术要求与磨合试验</b> .....	95
一、汽车总成装配的一般技术要求 .....	95
二、汽车总成装配原理与试验 .....	96
三、汽车主要总成的磨合与试验 .....	99
<b>第二章 汽车零件修复方法</b> .....	103
<b>第一节 汽车零件修复方法简介</b> .....	103
一、机械加工修复法 .....	104
二、焊接和堆焊修复法 .....	108
三、喷涂与喷焊修复法 .....	115
四、电镀和电刷镀修复法 .....	118
五、粘接修复法 .....	122
<b>第二节 汽车零件修复方法的选择</b> .....	123
一、汽车零件修复质量的评价 .....	123
二、汽车零件修复方法的选择 .....	125
<b>第三章 汽车修理质量及其评价</b> .....	126
<b>第一节 汽车修理质量</b> .....	126
一、汽车修理质量的评价指标 .....	126
二、汽车修理质量的控制 .....	128
<b>第二节 汽车修理质量的评价</b> .....	132
一、总成装配质量的评价 .....	132
二、车身涂层质量的评价 .....	133
三、汽车大修竣工出厂技术条件 .....	134

### 第三篇 汽车主要总成修理工艺

<b>第一章 汽车集中电子控制发动机总成的维修</b> .....	136
<b>第一节 汽车集中控制发动机电控系统的组成与控制原理</b> .....	136
一、概述 .....	136
二、电控汽油喷射发动机的点火控制 .....	136
三、燃油喷射系统控制 .....	138
四、电控汽油喷射发动机的怠速控制 .....	142
五、废气再循环 (EGR) 控制 .....	143
六、自诊断系统控制 .....	144
<b>第二节 电控汽油喷射发动机电控系统的维修</b> .....	145
一、电控汽油喷射发动机故障检测基础 .....	145
二、电控汽油喷射式发动机电控系统维修的一般操作技术 .....	151
三、自诊断故障代码的提取与清除 .....	154
四、电控发动机代码故障的诊断 .....	157

五、电控发动机汽油喷射系统主要部件的检修	167
六、电控发动机无代码故障的诊断	177
第三节 电控发动机机械系统的维修	182
一、发动机总成修理工艺概述	182
二、气缸体、气缸盖和曲柄连杆机构的修理	184
三、配气机构的修理	192
四、发动机机械系统的装配及其调试	199
<b>第二章 自动变速器的维修</b>	202
第一节 电控液动式自动变速器结构概述	202
一、液力变矩器	202
二、行星齿轮机构	205
三、液压控制系统	212
四、电子控制系统	214
第二节 电控液动式自动变速器的维修	214
一、自动变速器的维修步骤	215
二、自动变速器的基础检查	215
三、自动变速器的试验	217
四、自动变速器的自诊断	222
五、自动变速器主要元件的测试	224
六、自动变速器故障的就车诊断	228
七、机械和液压系统失效的故障诊断	229
<b>第三章 汽车防抱死制动系统的维修</b>	231
第一节 汽车防抱制动系统的组成与工作原理	231
一、概述	231
二、防抱死制动系统的工作原理	234
三、典型汽车的防抱制动系统	236
第二节 电子防抱制动系统的维修	241
一、电子防抱制动系统（ABS）的初步检查诊断	241
二、ABS 系统故障检修前的常规性检查	242
三、ABS 系统故障的诊断	242
四、电子防抱制动装置的就车检查	248
<b>第四章 汽车车身的修理</b>	252
第一节 汽车车身常见的损伤形式	252
一、载货汽车车身常见的损伤形式	252
二、轿车车身常见的损伤形式	253
第二节 车身（车架）尺寸的测量	254
一、碰撞损伤的类型	255
二、车身（车架）碰撞损伤的检查	257
三、车身尺寸的测量	259
第三节 轿车车身的校正	261



一、轿车车身的校正原理·····	262
二、车身和车架的校正技术和设备·····	262
第四节 汽车覆盖件及车身构件的修理·····	272
一、车身钣件的修理·····	272
二、轿车车身构件连接部位的修理·····	275
第五节 车身表面涂层的修复·····	277
一、车身钣件表面小伤痕的修补·····	277
二、汽车车身表面涂层的重涂·····	280
参考文献·····	285

# 第一篇 汽车维修基础知识

## 第一章 汽车可靠性理论基础

### 第一节 汽车可靠性概述

#### 一、引言

随着现代生产和科学技术的发展,可靠性问题越来越受到重视,对汽车而言,其可靠性标志着汽车在整个使用寿命周期内保持所需质量指标的性能。由于汽车在整个寿命周期内,因零件磨损、疲劳等而消耗在维修上的费用,往往是新车原值的4~6倍。而汽车的使用可靠性在很大程度上取决于汽车的正确使用与维修。

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,正确的使用、维修和进行科学管理,将汽车的可靠性提高到令人满意的一门新兴学科。

#### 二、汽车可靠性与维修

“产品”,通常是指作为单独研究或单独试验对象的任何元器件、零件,甚至一台完整的设备,如汽车、发动机或气缸体等。

“可靠性”,是指产品在规定的使用条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。

产品的可靠性分为固有可靠性和使用可靠性。“固有可靠性”是指产品从设计到制造整个过程中确定的内在可靠性,它是产品的固有属性。“使用可靠性”则考虑了使用、维修对产品可靠性的影响,包括使用维护方法以及操作人员的技术熟练程度等都会对产品的寿命及功能的发挥产生重大影响。“维修”,是指在系统投入运行后,为保持或在系统发生故障后恢复产品完成规定功能的能力而采取的技术与管理措施。

汽车的使用可靠性取决于汽车本身的固有可靠性以及汽车的使用维修水平,并与汽车的使用条件有关。汽车使用时间增长,其出现故障的可能性随之增大,使用可靠性下降。若从汽车开始运行到其工作至 $T$ 时开始对汽车实施维护,则称时间 $T$ 为维护周期。在达到维护周期之前,汽车出现故障的可能性增大,经维护后,使汽车的技术性能在一定程度上得到恢复。汽车经过长期使用、多次维护后,其技术性能会明显下降,这时只有通过修理才能使技术性能有大幅度的提高。当汽车使用到其性能达到极限状态时,则相应达到汽车极限行驶里程。

可见,汽车维修只能在一定程度上维持汽车的技术状况,提高使用可靠性,但不能完全恢复其固有可靠性水平。故经过相当里程的行驶(即达对极限里程时)后汽车就得报废。

### 三、汽车可靠性的评价指标

汽车可靠性是汽车所具有的寿命质量方面的一种能力，它可以从不同的角度、用不同的评价指标来描述，常用的可靠性评价指标如下：

#### 1. 可靠度

产品(此处指汽车，以下同)在规定的使用条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率，称为产品的可靠度，记为  $R(t)$ 。

所谓规定的使用条件，包括使用时的环境条件，如温度、湿度、振动、冲击、辐射，使用时的应力条件、维修条件，储存时的储存条件以及使用时对操作人员技术等级的要求等。所谓规定的时间，是根据用户要求或设计目标决定的期限，此处是指广义的时间，可以是次数、周期、行驶里程、运行时间(秒、小时或年)等。所谓规定的功能，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。所谓概率是用来刻划事件发生可能性大小的数量指标，事件  $A$  的概率以  $P(A)$  表示，有

$$R(t) = P(A) = P(T > t) \quad (1-1-1)$$

并且

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

#### 2. 累积故障概率(亦称失效度)

产品在规定的条件下，在规定的时间内丧失规定功能(即发生故障)的概率称为累积故障概率或失效度，记为  $F(t)$ 。

由于出现故障与不出现故障是两个对立的事件，故

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-1-2)$$

$$F(t) = P(\bar{A}) = P(T \leq t) \quad (1-1-3)$$

#### 3. 故障概率密度函数

由于产品发生失效是随机的，所以  $T$  是一个随机变量。不同产品、不同工作条件，寿命  $T$  取值的统计规律是不同的。若  $F(t)$  为产品失效的分布函数，如果  $F(t)$  是可微的，则称  $\frac{dF(t)}{dt}$  为“故障概率密度函数”，记为  $f(t)$ 。有

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

$$dF(t) = f(t)dt \quad (1-1-5)$$

则

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (1-1-6)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (1-1-7)$$

#### 4. 故障率函数

产品的故障率是可靠性理论中的重要概念，在实践中，它又是产品可靠性的重要指标，不少产品就是用故障率的大小来确定其等级的。

故障率函数  $\lambda(t)$  是指产品到  $t$  时刻为止尚未发生故障的条件下，在下一个单位时间内发生故障的条件概率。

设在规定条件下产品的寿命为  $T$ ，其累积故障概率为  $F(t)$ ，故障率密度函数为  $f(t)$ ， $t$  为规定的工作时间，则用“ $T > t$ ”表示“产品工作到时刻  $t$  尚未发生故障”事件，“ $t < T \leq t + \Delta t$ ”表示“产品在  $(t, t + \Delta t)$  内失效”事件。于是“产品工作到  $t$  时刻后，在  $(t, t + \Delta t)$  内发生故障”的

条件概率为  $P(t < T \leq t + \Delta t / T > t)$ , 把此条件概率除以时间间隔  $\Delta t$ , 就得到  $\Delta t$  时间内的平均故障率, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  就可得到  $t$  时刻的失效率

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t / T > t)}{\Delta t}$$

由条件概率性质和事件包含关系, 可知

$$\begin{aligned} P(t < T \leq t + \Delta t / T > t) &= \frac{P(t < T \leq t + \Delta t, T > t)}{P(T > t)} = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} \end{aligned}$$

于是

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1-1-8)$$

若用频率描述上述定义中的概率, 则便于正确的理解故障率的物理含义。设在  $t=0$  时刻有  $N$  个产品开始工作,  $t$  时刻的故障件数为  $N_f(t)$ , 则  $t$  时刻仍在工作而未发生故障的残存件数为  $N - N_f(t)$ ; 若在下一个时间  $\Delta t$  内出现故障件数为  $\Delta N_f(t)$ , 单位时间内的故障件数为  $\Delta N_f(t) / \Delta t$ , 则

$$\lambda(t) = \frac{\frac{\Delta N_f(t)}{\Delta t}}{N - N_f(t)} = \frac{\Delta N_f(t)}{[N - N_f(t)] \Delta t} \quad (1-1-9)$$

上式中分母  $N - N_f(t)$  是随着“产品工作到时刻  $t$  尚未发生故障”这一条件而变化的, 因此可以明显地看出:  $\lambda(t)$  能够非常灵敏地指出产品出现故障的变化速度。

**例 1-1-1** 图 1-1-1 所示为 50 个某类型汽车轮胎调查数据, 试分别求出行驶到 3.5 万 km 及 5.5 万 km 时的故障率。

**解:** 根据题意  $N=50$  个,  $\Delta N_f(3.5)=7$  个  
 $\Delta t=4-3.5=0.5$  (万 km)

$$N_f(3.5) = \sum_0^{3.5} \Delta N_f(t) = 1 + 3 + 2 + 5 = 11 \text{ (个)}$$

由  $\lambda(t)$  的定义式可以列出

$$\lambda(3.5) = \frac{7}{(50 - 11) \times 0.5 \times 10^4} = 3.6\% / \text{万 km}$$

而  $t=5.5$  万 km 时,  $\Delta N_f(5.5)=3$  个

$$N_f(5.5) = 1 + 3 + 2 + 5 + 7 + 10 + 9 + 6 = 43 \text{ (个)}$$

$$\lambda(5.5) = \frac{3}{(50 - 43) \times 0.5 \times 10^4} = 8.6\% / \text{万 km}$$

故障率  $\lambda(t)$  的单位可由其定义式推得, 一般用 %/万 km, 1/小时, 或非特。其中 1 菲特 =  $10^{-9}$  1/小时。

## 5. 汽车可靠性寿命评价指标

### 1) 平均寿命

平均寿命是一个标志产品平均能工作多长时间的量, 它是对整批产品而言的一个指标。

设产品寿命  $T$  的故障概率密度函数为  $f(t)$ , 那么它的数学期望  $E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$  就称为产

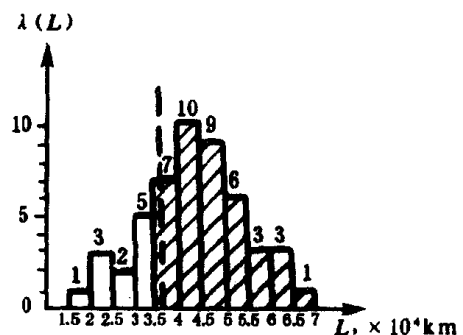


图 1-1-1 轮胎寿命直方图

品的平均寿命。对于可维修产品是指产品的平均无故障工作时间,记为 MTBF (Mean time between failure); 对于不可维修产品是指产品的平均寿终时间,记为 MTTF (Meantime to failure)。如果仅考虑首次失效前的一段工作时间,那么两者就没有什么区别了。

## 2) 可靠寿命

可靠度是工作寿命  $t$  的函数,是用可靠度函数  $R(t)$  表示的,故对于一批产品而言,当给定时间  $t$ ,就确定了相应的可靠度;反之,若确定了可靠度,即可求出相应的寿命,以  $t_R$  表示。例如用  $t_{0.99}$  表示可靠度  $R(t)=99\%$  时产品的可靠寿命。

在可靠寿命中有以下特殊情况:

(1) 特征寿命 可靠度  $R=e^{-1}=36.8\%$  的可靠寿命称为特征寿命,记为  $\eta$ 。亦即累积故障概率  $F=63.2\%$  时的寿命。

(2) 中位寿命 可靠度  $R=50\%$  的可靠寿命称为中位寿命,记为  $t_{0.5}$ 。

(3) 额定寿命 可靠度  $R(t)=90\%$  的可靠寿命称为额定寿命,记为  $t_{0.9}$ 。

对于可靠度有一定要求的产品,工作到了可靠寿命  $t_R$  时就要替换,否则就不能保证其可靠度。

## 第二节 汽车故障类型及故障分布规律

### 一、汽车故障模式及故障类型

#### 1. 汽车故障模式

所谓故障或失效是指产品丧失了保持原有功能的能力。要判断失效,必须预先确定失效的判别标准。在产品的试制、生产、使用及维护各个阶段中都可能出现失效现象,而失效的机理也依产品的种类、系统的结构及零件材料的不同而异,不能一概而论。故障模式则是指由失效机理所显示出来的各种失效现象或失效状态。汽车上常见的故障模式如下:

(1) 损坏型故障模式。如:断裂、碎裂、开裂、裂纹、点蚀、烧蚀、击穿、变形、拉伤、龟裂、压痕等。

(2) 退化型故障模式。如:老化、变质、剥落、磨损等。

(3) 松脱型故障模式。如:松动、脱落等。

(4) 失调型故障模式。如:压力过高或过低、行程失调、间隙过大或过小、干涉、卡滞等。

(5) 堵塞与渗漏型故障模式。如:堵塞、气阻、漏油、漏水、漏气、渗油等。

(6) 性能衰退或功能失效型故障模式。如:功能失效、性能衰退、公害超标、异响、过热等。

通过对故障模式的分析,可了解影响系统功能的关键性零部件的失效情况,从而在设计上考虑改进的方法(如重新考虑系统结构、改换材料、采取有储备系统设计方法等以提高系统的可靠度),这种分析称为失效模式与分析 FMEA (Failure mode and effect analysis)。FMEA 只进行定性分析。

在系统设计过程中,通过对系统各组成单元潜在的各种故障模式及其对系统功能的影响与产生后果的严重程度进行分析,提出可能采取的预防改进措施,以提高产品可靠性,这种设计方法称为故障模式影响及危害分析 FMECA (Failure mode effect and Criticality analysis)。FMECA 可进行定量分析。

#### 2. 汽车故障类型

汽车可能由于各种原因而产生故障，按照故障率函数特点可把故障分为三种类型：早期故障型、偶然故障型和耗损故障型。图 1-1-2 所示为著名的浴盆状故障率函数曲线。

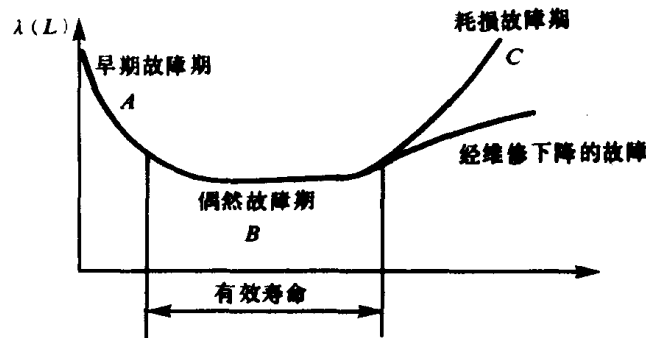


图 1-1-2 浴盆状故障率函数曲线

早期故障型的故障率，是产品在开始使用时发生故障的可能性很大，随着时间的延长而逐渐下降，称为故障率减少型，相当于磨合期，见图 1-1-2 中 A 段。此类故障多是由于设计、制造、管理、检验的差错及装配不佳而致，一般可通过强化试验或磨合加以排除。

偶然故障型的故障是与时间无关的常数，见图 1-1-2 中 B 段，其故障率变化甚微，称为故障率恒定型，相当于正常使用期。此类故障多是由于操作疏忽、润滑不良、维护欠佳、材料隐患、工艺及结构缺陷等原因所致，故障具偶然性。

耗损故障是指产品经长期使用后，出现老化衰竭而引起的，其随时间的延长而逐渐增加，称为故障率增长型，见图 1-1-2 中 C 段。因此若在故障率开始上升前提前更换或修复好将要耗损的零部件，则可以减小故障率，延长汽车的使用寿命。

## 二、汽车可靠性研究中常用的故障分布

确定汽车的故障分布是可靠性研究的基本内容之一，它能很好地描述随机变量的性质，揭示其内在规律。判定随机变量的分布类型及表征这些分布的相应参数值，可为产品可靠性的评价和改进提供依据。下面介绍汽车上常用的几种连续型随机变量的故障分布。

### 1. 指数分布

指数分布是随机变量分布形式中最基本的一种。产品处于偶然故障期时，其故障率  $\lambda = \text{常数}$ ，得到如下指数分布的表达式：

$$\text{故障概率密度函数} \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (1-1-10)$$

$$\text{可靠度函数} \quad R(t) = e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (1-1-11)$$

$$\text{累积故障概率} \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (1-1-12)$$

其数字特征为：

$$\text{数学期望} \quad E(t) = \frac{1}{\lambda} \quad (1-1-13)$$

$$\text{方差} \quad D(t) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (1-1-14)$$

$$\text{平均寿命} \quad \mu = \frac{1}{\lambda} \quad (1-1-15)$$

可见，指数分布时故障率为常数；当  $t = \frac{1}{\lambda}$  时， $R(t) = e^{-1} = 36.8\%$ ，即指数分布时也只有

指数分布时, 平均寿命  $\mu = \text{特征寿命 } \eta = \frac{1}{\lambda}$ 。

指数分布是一种单参数分布函数, 只要确定了故障率  $\lambda$ , 就确定了可靠度函数; 其特点是可靠度与起始时间无关(即无记忆性)。

## 2. 正态分布

正态分布又称高斯分布, 是一种最常用的连续分布, 很多自然现象都可以用它来描述, 如工艺误差、测量误差、材料性能、应力分布、汽车零件的强度和寿命等。

### 1) 正态分布的定义及特性

若随机变量的概率密度函数  $f(t)$  为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty \leq t \leq +\infty \quad (1-1-16)$$

其累积故障概率分布为

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad -\infty \leq t \leq +\infty \quad (1-1-17)$$

可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad -\infty \leq t \leq +\infty \quad (1-1-18)$$

这种分布称为正态分布, 记为  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

式中:  $\mu$ ——均值, 是母体集中趋势的尺度, 也是数学期望, 即  $E(t) = \mu$ ;

$\sigma$ ——标准差, 反映分布的离散程度, 其平方值即为方差, 即  $D(t) = \sigma^2$ 。

正态分布是一种两参数的分布, 只要确定  $\mu$  和  $\sigma$  两个参数, 曲线的形状也就被确定了。故  $\mu$  和  $\sigma$  就是正态分布的数字特征, 如图 1-1-3 所示, 其概率密度曲线是一种以  $\mu$  值处为中心线的单峰对称曲线, 其峰值为  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ ;  $\sigma$  值决定分布的离散程度,  $\sigma$  值越大, 曲线就展开得越宽越平坦, 但曲线下面所包容的面积均等于 1, 且大部分面积集中在平均值  $\mu$  的两侧各  $3\sigma$  范围内, 占总面积 99.73%。相同的  $\mu$  而  $\sigma$  不同时, 两正态分布的曲线在同一  $t$  坐标位置上, 而其平坦度不同;  $\mu$  不同而  $\sigma$  相同时, 两个正态曲线只是位置不同, 如图 1-1-4 所示。

### 2) 标准正态分布

$\mu=0, \sigma=1$  时的正态分布称为标准正态分布, 其表达式如下

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (1-1-19)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (1-1-20)$$

工程上为了计算方便, 给出了标准正态分布表, 从表中可直接查出  $F(t)$  的积分值。

对于非标准正态分布, 需将其转化为标准正态分布, 为此, 令  $Z = \frac{t-\mu}{\sigma}$ , 则  $dt = \sigma dZ$ , 代入式(1-1-17)、(1-1-18)中, 有

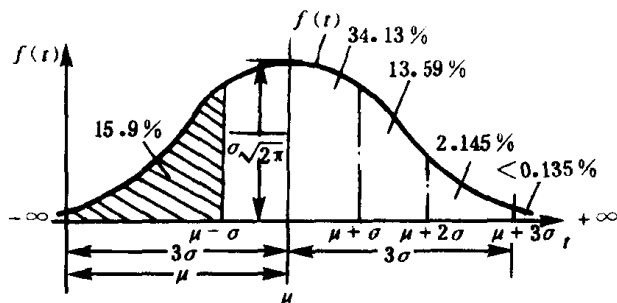


图 1-1-3 正态分布曲线

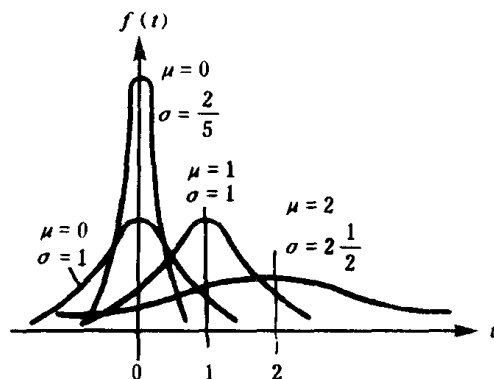


图 1-1-4 不同  $\mu, \sigma$  时的正态分布曲线

$$\varphi(Z) = \sigma \cdot f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right)$$

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

$$R(Z) = 1 - \Phi(Z)$$

可见，作  $Z = \frac{t - \mu}{\sigma}$  变换可使非标准正态分布转化为标准正态分布，根据所得  $Z$  值可查表得到累积故障概率  $F(t)$ ；标准正态分布实质上是单参数分布。

### 3. 对数正态分布

在机械部件的疲劳寿命、疲劳强度及耐磨寿命等研究中，大都属于不对称分布。对数正态分布就是描述零件寿命与耐久性的一种较好的分布函数。

若随机变量  $T$  的对数值  $\ln t$  服从正态分布，则该随机变量  $T$  就服从对数正态分布。此处引进另一个相关的随机变量  $X$ ， $X = \ln t$ ，或  $t = e^x$ 。即  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ， $T \sim \ln(\mu, \sigma^2)$ ，且

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

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

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1-1-21)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{t\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dt \quad (1-1-22)$$

与正态分布一样，对数正态分布也可通过变量代换转换成标准正态分布，令  $Z = \frac{\ln t - \mu}{\sigma}$  代入上式即可。对数正态分布的数字特征为

$$E(t) = \mu_t = \bar{t} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (1-1-23)$$

$$D(t) = \sigma_t^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (1-1-24)$$

图 1-1-5 表示对数正态分布的密度曲线，可以看出改变  $\mu, \sigma$  值对曲线形状的影响。

### 4. 威布尔分布

#### 1) 威布尔分布的定义与特征



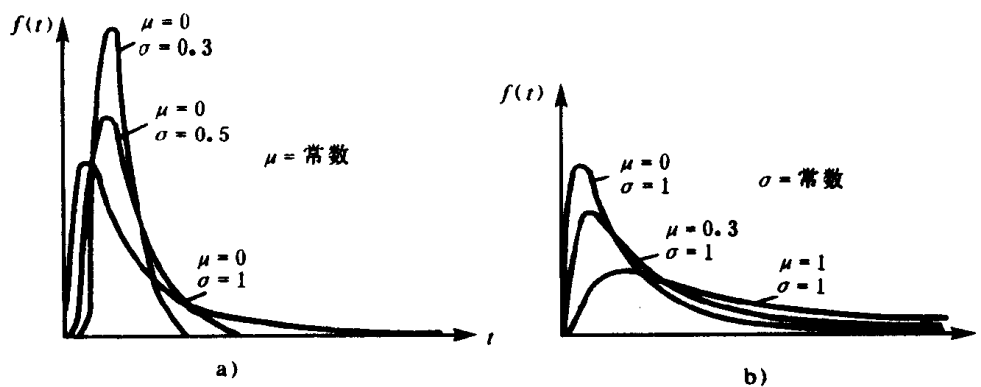


图 1-1-5 对数正态分布密度曲线

威布尔分布是基于最弱环模型为物理背景导出的。两端受拉力的一根由很多链环串联而成的链条，当最弱环节断裂时，整根链条就告失效。广义地说，凡是由若干个独立部件串联构成的产品，只要其中某个部件失效，整个产品就告失效，即属于最弱环模型。受变载荷作用的滚动轴承、齿轮与汽车钢板弹簧等零件的疲劳寿命都可用威布尔分布来描述。

威布尔分布的基本形式为一种三参数分布，其概率密度函数为

$$f(t) = \frac{m(t - \gamma)^{m-1}}{t_0} \exp\left[-\frac{(t - \gamma)^m}{t_0}\right] \quad t \geq \gamma \quad (1-1-25)$$

概率分布函数为

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

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} \quad (1-1-27)$$

式中： $m$ ——形状参数；

$t_0$ ——尺度参数；

$\gamma$ ——位置参数。

其数字特征为

$$\begin{cases} E(t) = \gamma + t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \\ D(t) = t_0^{\frac{2}{m}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \end{cases} \quad (1-1-28)$$

式中： $\Gamma$ ——Gamma 函数，可查  $\Gamma$  函数表。

将威布尔分布用另一种形式表示，令  $\eta = t_0^{\frac{1}{m}}$ ， $t_0 = \eta^m$ ，则有

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1-1-29)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1-1-30)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1-1-31)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta^m} (t - \gamma)^{m-1} \quad (1-1-32)$$