

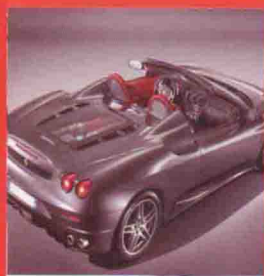


汽车先进技术译丛



Springer

汽车与机械工程 中的可靠性



[德] 贝尔恩德·贝尔舍(Bernd Bertsche) 著
蓝晓理 金春华 汪邦军 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛

汽车与机械工程中的可靠性

[德] 贝尔恩德·贝尔舍 (Bernd Bertsche) 著

蓝晓理 金春华 汪邦军 译

机械工业出版社

可靠性是机械设计与制造中的一个永恒话题。《汽车与机械工程中的可靠性》一书全面介绍了设计与制造过程中的可靠性基础理论、零部件失效方式与分析方法、失效统计的评估分析、试验方法、寿命分析及可靠性保证计划等内容。本书包含大量习题,适合机械设计人员、企业技术领导者及机械、汽车专业的大学师生学习使用。

Translation from English language edition:

Reliability in Automotive and Mechanical Engineering

by Bernd Bertsche

Copyright © 2008, Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体版由德国 Springer 出版社授权机械工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2012-2097 号

图书在版编目(CIP)数据

汽车与机械工程中的可靠性/(德)贝尔舍(Bertsche, B.)著;
蓝晓理,金春华,汪邦军译. —北京:机械工业出版社,2014.4
(汽车先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-45668-1

I. ①汽… II. ①贝… ②蓝… ③金… ④汪… III. ①汽车
工程—可靠性②机械工程—可靠性 IV. ①U461②TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 022885 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:孙 鹏 责任编辑:孙 鹏

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·23 印张·467 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45668-1

定价:98.00 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、维护性和质量是现代科技和生活中的三个重要支柱。这三个要素对企业组织的影响与以往相比越来越重要。虽然这些方面通常被认为是不创造利润的，但如果忽略了这些方面却会带来十分巨大的损失。急剧增加的召回事件很清楚地说明了这一点。具体说，在过去的 15 年里，召回的数量足足增加到了原来的三倍。

就在最近，玩具行业里出现了一次由于铅污染而导致的大规模的召回事件。在汽车行业里经常会因为各种原因出现召回事件。由于产品变得愈加复杂，同时开发时间越来越短，刚才说的三个支柱(可靠性、维护性、质量)的必要性一定会越来越突出。对于像汽车这样典型的复杂产品，考虑到召回事件，消费者在购买时会很自然地把“可靠性”和“质量”列为两个最重要的因素。

人们已经注意到了这种趋势，并不断肯定。鉴于对提升可靠性工作方法的需求日渐增多，并且对可靠性的学习和理解也逐渐重要，我决定编写一本可靠性和维护性方面的专著。这本书原来用德语写成，但是来自欧洲各地和美国的同行与企业的要求促使我推出英文版。这本书介绍了可靠性和维护性的基本知识以及来自各方深入研究的成果。在后面的章节里，基础知识将与实际经验和习题相结合，使读者能更详细全面地理解这些重要的方面。

需要说的是，没有下列各位的帮助我就无法完成这本书，在此我要对他们致以谢意。首先十分感谢本书德语版本的发起人吉斯贝尔特·莱西内尔教授。感谢艾莉西亚·绍次女士和卡尔斯滕·皮卡德先生将本书翻译成英语。他们热情的坚持和投入以及编辑和组织工作成就了这本书。我还要感谢安德丽亚·迪特尔女士的编辑工作和对插图的精心制作。我尤其还要感谢 G. J. 马科努尔提先生提出的可贵的建议。最后，我要感谢 Springer 出版公司的帮助和专业合作。

贝尔恩德·贝尔舍博士，教授
2007 年秋，于斯图加特

目 录

前言

第1章 简介	1
第2章 概率和统计基础理论	6
2.1 概率统计基础	7
2.1.1 失效行为的统计学描述	8
2.1.2 统计值	20
2.1.3 可靠性指标	22
2.1.4 概率的定义	24
2.2 可靠性的寿命分布	25
2.2.1 正态分布	26
2.2.2 指数分布	28
2.2.3 威布尔分布	29
2.2.4 对数正态分布	39
2.2.5 其他类型的分布	41
2.3 采用布尔理论进行系统可靠性的计算	50
2.4 寿命分布的练习	53
2.5 系统计算的练习	56
参考文献	58
第3章 变速器的可靠性分析	61
3.1 系统分析	62
3.1.1 找出系统元件	62
3.1.2 系统元件的确定	63
3.1.3 系统元件的分类	63
3.1.4 可靠性系统的确定	65
3.2 确定系统元件的可靠性	66
3.3 系统可靠性的计算	68
参考文献	70
第4章 失效模式与结果分析(FMEA)	72
4.1 FMEA 方法的基本原理和基础知识	73
4.2 VDA86 中的 FMEA	75
4.3 VDA86 中面向设计的 FMEA 示例	80
4.4 VDA4.2 标准中的 FMEA	82

4.4.1 第1步:系统元件和系统结构	86
4.4.2 第2步:功能和功能结构	89
4.4.3 第3步:失效分析	91
4.4.4 第4步:风险分析	95
4.4.5 第5步:改进与优化	102
4.5 根据 VDA4.2 进行系统级 FMEA 产品分析的示例	104
4.5.1 第1步:变速器的系统元件和系统结构	105
4.5.2 第2步:变速器的功能和功能结构	107
4.5.3 第3步:变速器的失效功能和失效功能结构	107
4.5.4 第4步:变速器的风险评估	108
4.5.5 第5步:对变速器的改进	110
4.6 根据 VDA4.2 进行系统 FMEA 过程分析的示例	111
4.6.1 第1步:输出轴的制造工艺的系统元件和系统结构	111
4.6.2 第2步:输出轴生产工艺的功能和功能结构	112
4.6.3 第3步:输出轴制造过程中的失效功能和失效功能结构	113
4.6.4 第4步:输出轴制造过程中的风险评估	113
4.6.5 第5步:输出轴制造工艺的改进	113
参考文献	116
第5章 失效树分析(FTA)	118
5.1 失效树分析的主要步骤	119
5.1.1 失效模式	119
5.1.2 符号表示	120
5.2 利用失效树进行分析定性	120
5.2.1 定性分析的目标	120
5.2.2 基本步骤	121
5.2.3 FMEA 和 FTA 的对比	122
5.3 利用失效树进行定量分析	123
5.3.1 定量分析的目标	123
5.3.2 布尔模型	123
5.3.3 在系统中的应用	127
5.4 可靠性框图	131
5.5 示例	131
5.5.1 齿轮侧面裂纹	131
5.5.2 径向密封环的失效树分析	134
5.6 失效树分析的练习	136
参考文献	138
第6章 寿命试验失效统计的评价分析	140
6.1 寿命试验计划	140

6.2	顺序统计量和它们的分布	141
6.3	失效时间的图形分析	148
6.3.1	威布尔分布线的确定(双参数威布尔分布)	148
6.3.2	对置信区间的讨论	151
6.3.3	未失效时间 t_0 的考虑(三参数威布尔分布)	153
6.4	不完整数据(删失数据)的分析	156
6.4.1	I类删失和II类删失	157
6.4.2	多重删失数据	159
6.4.3	分组最小值法	159
6.5	失效数量较少时的置信水平	170
6.6	可靠性试验的分析方法	172
6.6.1	矩量法	172
6.6.2	回归分析	174
6.6.3	极大似然法	177
6.7	评估寿命试验的练习	180
	参考文献	181
第7章	一些机器零部件的威布尔参数	183
7.1	形状参数 b	183
7.2	特征寿命 T	185
7.3	未失效时间 t_0 和系数 f_{iB}	187
	参考文献	188
第8章	可靠性试验计划的方法	190
8.1	基于威布尔分布的试验计划	191
8.2	基于二项分布的试验计划	192
8.3	寿命比值	193
8.4	在试验中出现失效的归纳	195
8.5	考虑先验信息(贝叶斯方法)	196
8.5.1	Beyer/Lauster 的方法	197
8.5.2	Kleyner 等人的方法	199
8.6	加速寿命试验	201
8.6.1	时间加速系数	202
8.6.2	步进应力法	203
8.6.3	HALT(高加速寿命试验)	204
8.6.4	退化试验	205
8.7	可靠性测试计划的练习	205
	参考文献	206
第9章	机械零件的寿命分析	208

9.1 外载荷、许用载荷和可靠性	209
9.1.1 静态和永久疲劳极限计算	209
9.1.2 疲劳强度和作业疲劳强度	212
9.2 载荷	215
9.2.1 工作载荷的确定	216
9.2.2 载荷谱	220
9.3 容许载荷、沃勒疲劳曲线、SN 曲线	229
9.3.1 基于应力和基于应变的沃勒疲劳曲线	229
9.3.2 沃勒疲劳曲线的确定	230
9.4 寿命计算	232
9.4.1 损伤累计	232
9.4.2 双参数损伤计算	235
9.4.3 名义应力法和局部应力法	237
9.5 结论	239
参考文献	239
第 10 章 维护与可靠性	243
10.1 维护的基本知识	243
10.1.1 维护工作	243
10.1.2 维护等级	245
10.1.3 维修优先级	246
10.1.4 维护能力	246
10.1.5 维护计划	248
10.2 生命周期成本	249
10.3 可靠性参数	251
10.3.1 状态函数	251
10.3.2 维护参数	253
10.3.3 可用度参数	255
10.4 可修复系统的计算模型	257
10.4.1 周期性维护模型	258
10.4.2 马尔可夫模型	261
10.4.3 布尔—马尔可夫模型	267
10.4.4 一般的更新过程	268
10.4.5 交替的更新过程	271
10.4.6 半马尔可夫过程	276
10.4.7 系统传输理论	279
10.4.8 不同计算模型的比较	282
10.5 可修复系统的练习	283
10.5.1 概念问题	283

10.5.2 计算问题	284
参考文献	285
第 11 章 可靠性保障计划	289
11.1 介绍	289
11.2 可靠性计划的主要方面	290
11.2.1 产品定义	290
11.2.2 产品设计	292
11.2.3 生产和使用	293
11.2.4 在产品开发周期里的其他措施	295
11.3 结论	295
参考文献	296
附录	297
附录 A 习题解答	297
附录 B 参考图表	345

第1章 简介

错误是无法完全避免的，
但我们还是要竭力避免错误。

卡尔·波普尔爵士

如今，可靠性这个词已经成为我们日常用语中的一个常用词，尤其当说到一个产品的功能的时候。一件非常可靠的产品始终能在任何条件下实现它的功能。从技术角度来说，可靠性的定义因为引入了概率而略有不同：可靠性是指产品在一定的工作环境下、在一定的时间内不出现失效的概率（德国科学技术协会标准 VDI4001）。概率这个术语就意味着各种失效事件可能是由于偶然和随机的原因导致的，而且概率只能用数量来表达。这样可靠性就涉及了产品的失效行为，也是评价产品的重要指标。也正因如此，评价产品的可靠性不单纯是评价一个产品的功能属性。

通过访问客户，向他们询问产品最重要的属性是什么，得出的结果是可靠性位列第一，如图 1-1 所示。成本仅仅偶尔会成为更重要的方面，而可靠性则经常保持在第一或第二的位置。尽管可靠性如此重要，但是在当前开发新产品的时候并不总被放在首要位置考虑。

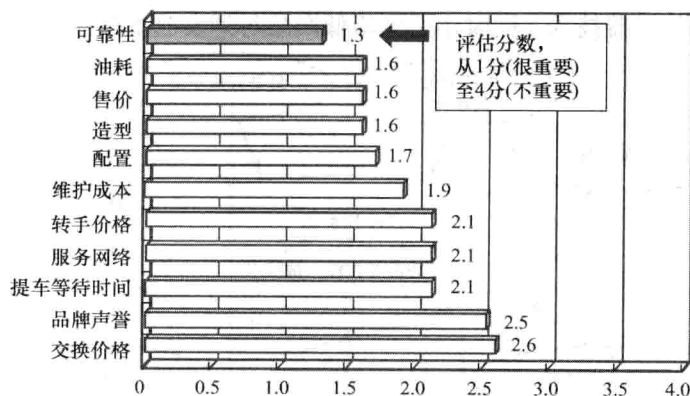


图 1-1 顾客购车时的考虑因素 (DAT 报告, 2007)

既然调查显示顾客喜爱可靠的产品，那么产品开发怎样在实际当中反映这种愿望呢？可以想象，公司会标榜自己的产品有多么可靠。没有人会希望看到自己的产品缺乏可靠性。通常这种事情都是公司机密。这里有一份有趣的数据：德国联邦机动车管理局(Kraftfahrt-Bundesamt)的统计数据表明，因为安全方面的重要缺陷而被召回的数量在过去的10年里增加到原来的3倍(从1998年的55例到2006年的167例)，如图1-2所示。相关的成本增长到8倍！众所周知，保修成本和公司的利润基本相当(有时候还会更高)，达到公司销售额的8%~12%。时间、成本和质量，产品开发过程的这三方面出现失衡。在降低产品成本、开发成本和缩短开发周期的同时降低了产品的可靠性。

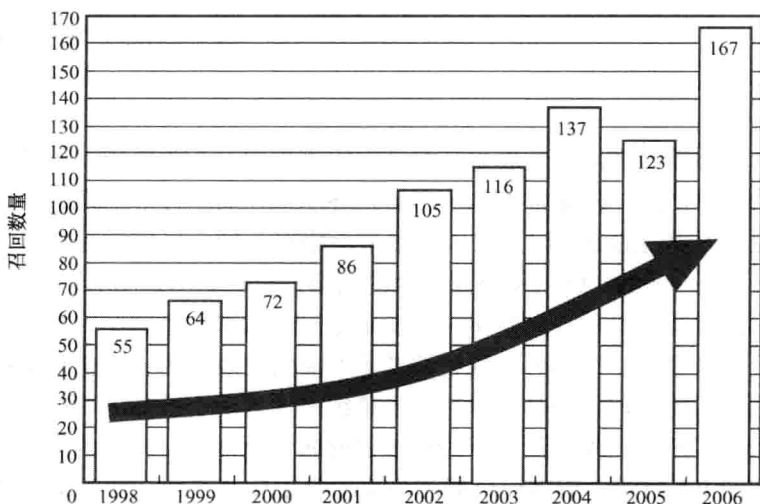


图 1-2 汽车行业里发生的召回事件逐渐增加

今天，现代产品的开发不仅面临着更高的功能需求，包括更复杂、更集成化的硬件、软件和传感器技术，同时还受到降低产品与开发成本的压力。图1-3显示了

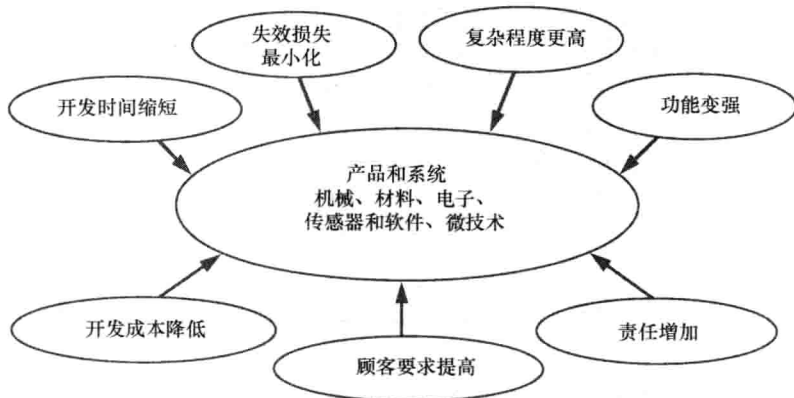


图 1-3 影响可靠性的因素

这些因素和其他因素对可靠性的影响。

为了达到更高的顾客满意度，必须在整个产品开发周期内从顾客的角度来审视系统可靠性，因为他们把可靠性视为最重要的方面。为了这个目的，必须从组织和技术方面都有充分的措施。因为在每个阶段都可能出现失误，最好在开发过程中各个部门都能协同工作。已经有各种定性甚至定量的可靠性工具可以使用，并且可以根据具体情况进行订制。图 1-4 显示在开发周期各阶段选用合适的方法，并协调使用、依次完成就能实现既定目标。

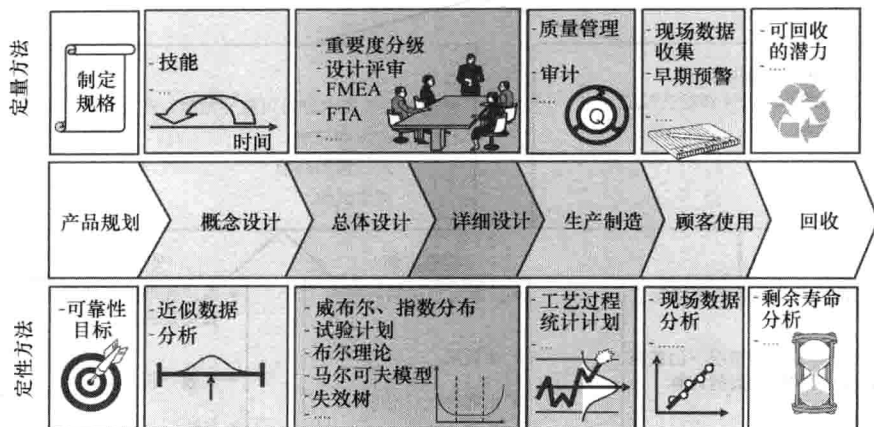


图 1-4 产品生命周期里各阶段的可靠性方法举例

当今，很多公司已经证明通过使用这些工具能够实现很高的系统可靠性。

可靠性分析实施得越早，利润成效越显著。著名的“十倍定律”很清楚地说明了这一点，如图 1-5 所示。通过观察失效成本和产品生命周期之间的关系，很容

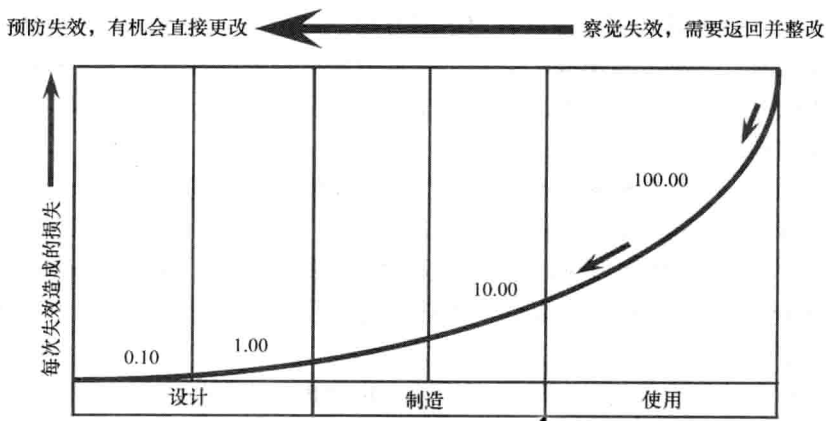


图 1-5 在产品寿命各阶段里失效造成的损失

易得到这样的结论：我们需要把后期的被动措施（例如召回）提前到早期变为预防性的措施。

观测可靠性最简便的方法是在失效已经发生之后。但是如上文所述，最有效的而且更需要的是在开发阶段就能确定可靠性期望值。利用适当的可靠性分析方法，就能够对可靠性进行预测并发现薄弱环节，而且还可以在必要时进行比较试验，如图 1-6 所示。

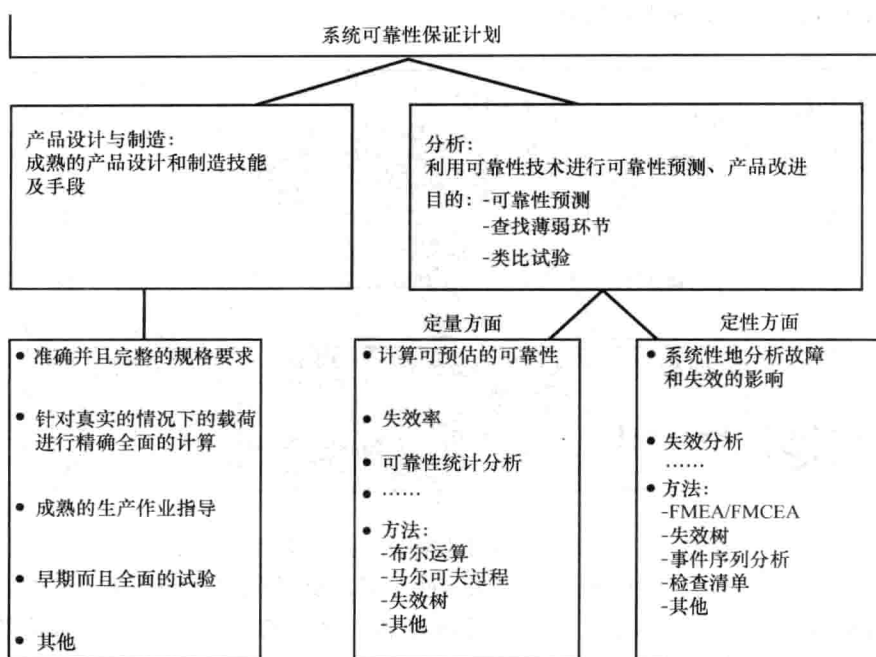


图 1-6 系统可靠性保证计划

可靠性分析可以采用定性或者定量的方法。定量的方法是使用概率和统计理论的方法和步骤。在第 2 章里我们会讲到统计方面最重要的基本概念，而且还会解释一些常用的寿命分布。对在机械行业中最常用的威布尔分布（Weibull Distribution）也会作详细的解释。

第 3 章用一个简单的齿轮传动系统为例，说明了完整的可靠性分析过程。采用的步骤是基于前一章所述的基本知识和方法。

最重要的可靠性定性分析方法是失效模式与结果分析（FMEA, Failure Mode and Effects Analysis）。主要的内容以汽车工业目前使用的标准（VDA4.2）为基础。这将在第 4 章中介绍。

第 5 章介绍的失效树分析既可以用于定量分析，也可以用于定性分析。

本书重点介绍的是第 6 章——寿命试验和失效统计。通过这些分析可以有效地进行整体的失效模式评估。为了描述寿命分布，我们采用了机械行业中最常用的威

布尔分布。在对失效次数的图形进行分析之后，我们会对解析法和其理论基础进行介绍。对“顺序统计”和“置信范围”也会进行详细解释。

涉及机械零部件的失效行为的文献较少。但是理解零件的失效行为对作出在相似条件下的可靠性预测是必要的。在系统理论的帮助下还可能计算出系统的失效行为。在第7章会给出从齿轮、轴和滚子轴承等部件的可靠性数据库得出的结果。在多数情况下，威布尔参数被证明可以用于初始阶段的估算。

为了在生产前就验证可靠性，必须进行相应的试验。在这里，试验的样品数、试验时间以及达到的置信水平都需要考虑。因此第8章介绍了可靠性试验计划。

每一种定量的可靠性方法都涉及高疲劳强度的计算。第9章介绍机械零件寿命计算的基本原理。

含有可修复部件的系统的可靠性和可用性可以通过各种计算模型得到。第10章介绍了复杂程度不等的几种方法以及它们对可修复系统的评估。

为了让系统达到更高的可靠性，必须有集成化的工作流程。因此，我们制定了一个可靠性保障计划。这个计划的主要部分会在第11章进行介绍。在这章的最后会完整地介绍最佳的可靠性工作流程。

每一章后面都有练习题。在附录A中会给出答案。

第2章 概率和统计基础理论

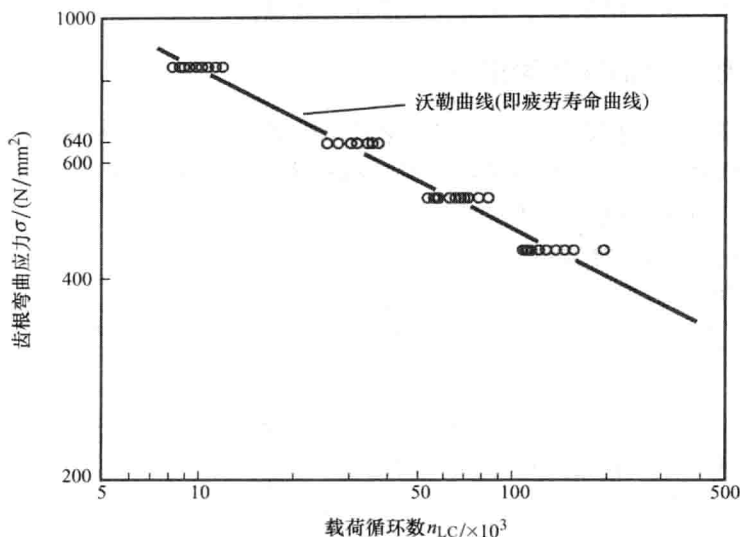
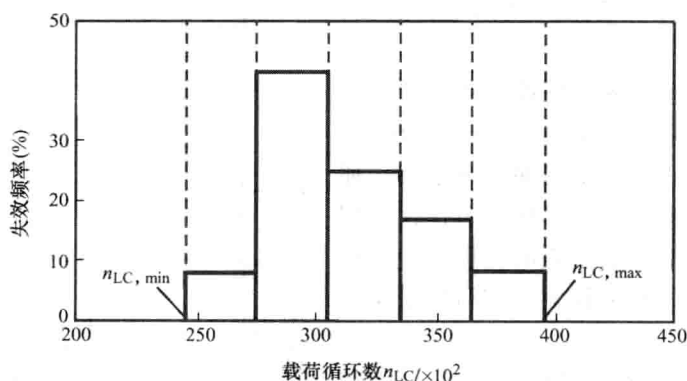
定性的可靠性分析为零件或者系统的置信度提供了概念基础，并且能在设计的后续阶段进行改进。定量的可靠性分析则使用成熟的统计学方法给出概率评估。为此，这一章对各种定性方法和定量方法都进行了介绍，如图 2-1 所示。



图 2-1 可靠性分析的手段

在图 2-2 和图 2-3 中显示的沃勒(Wohler)疲劳试验说明了这一点：尽管条件和载荷相同，但是失效时间却完全不同^[2, 15]。这样的结果是不可能出一条可信的失效寿命曲线的。寿命循环数 n_{LC} 或者寿命时间 t 可以看成是符合某种分布的随机变量^[2, 1, 2, 5, 2, 23, 2, 29, 2, 33]。当从可靠性角度来看的话，关心的是给定的范围从 $n_{LC, \min}$ 到 $n_{LC, \max}$ 里什么时间里出现的失效最多。为此，需要知道寿命是怎样分布的。

如果把失效时间看成随机变量，就可以用概率和统计的概念和方法来描述它。因此，概率和统计里最重要的一些概念和方法会在 2.1 节当中讲到。

图 2-2 轮齿损坏的沃勒试验^[2,15]和失效时间的统计分布图 2-3 在图 2-2 里载荷 $\sigma = 640 \text{ N/mm}^2$ 时出现失效的频率, 用直方图表示

在 2.2 节中我们会讲到常用的寿命分布。在这一节, 会介绍在机械工程中常用的威布尔 (Weibull) 分布。

在 2.3 节中用布尔代数把部件可靠性和系统可靠性联系起来。可以把布尔代数看成是基本的系统理论。其他系统理论可以在第 10 章中看到。

2.1 概率统计基础

零件和系统的失效行为可以通过各种统计方法用图形表示出来。这一节里我们会说明具体怎样做。此外, 我们会介绍统计量的概念, 从而把所有的失效规律用抽

象的图像表示。这个结果能十分简练地描述失效规律。

2.1.1 失效行为的统计学描述

在下面章节里我们会介绍 4 种函数来描述失效行为。每一个函数都来自实际观察到的失效次数并且可以互相转换。每个函数都可以针对适用的失效行为作出判断。要用哪一种函数取决于具体问题。

2.1.1.1 直方图和密度函数

表示失效行为的最简单的直观的方法是使用直方图显示失效频数，如图 2-4 所示。

图 2-4a 的失效时间在一个范围里是随机的。图 2-4b 的图形则是把失效时间进行排列之后的结果。

在图 2-4b 中在某个时段的数据越密集，发生的失效越频繁。为了用图形直观地表示出来，可以使用失效频率直方图，如图 2-4c 所示。

由此，把坐标的横轴按时间分段，称为组距。这样就有了每一组失效的次数。如果一个失效正好发生在两个组之间，那么就在两个组中都各计半次。但是这个问题可以通过仔细设定组距而得以避免。每个组中失效的数量用柱状图的高度来表示。

在 y 方向上或者高度方向上，可以使用绝对频率：

$$h_{\text{abs}} = \text{某一组距中的失效数量} = n_A \quad (2.1)$$

或者更常用的相对频率：

$$h_{\text{rel}} = \text{某一组距中的失效数量} / \text{失效总数} \\ = n_A / n \quad (2.2)$$

在图 2-4c 里，柱的高度表示的是相对频率，这点可以从纵坐标上的百分比看出。

在时间轴上划分并在每个组中计入失效次数的过程称为分组。在这个过程中，会出现信息丢失。这是因为有很多失效被归入一个和实际失效时间无关的频率当

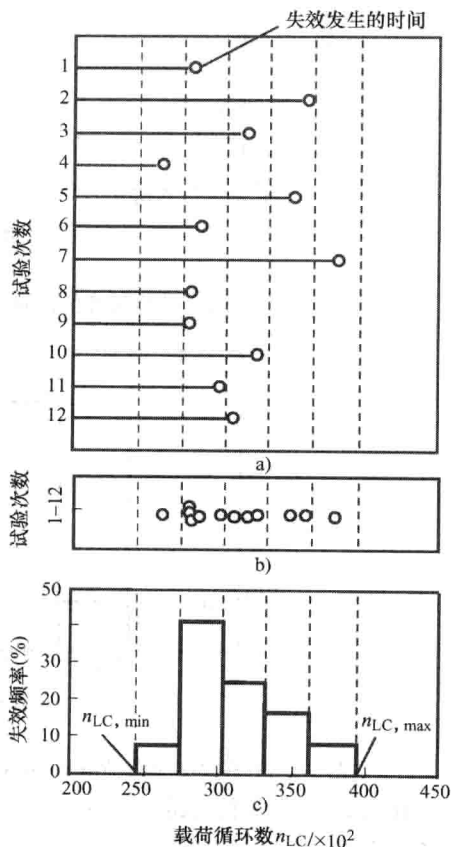


图 2-4 失效时间和失效频率的直方图，数据来自图 2-2，应力为 $\sigma = 640 \text{ N/m}^2$

a) 试验中失效时间汇总 b) 根据失效时间排列
c) 失效频率的直方图，使用经验密度函数