

机械产品的可靠性

● 零件与系统的可靠性估计 ●

Zuverlässigkeit im Maschinenbau
Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

〔德〕G. 莱希纳 B. 贝尔契 著

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械产品的可靠性

机械工业出版社

T81143
L07

377570

~~377539~~

~~377539~~

机械产品的可靠性

零件与系统的可靠性估计

Zuverlässigkeit im Maschinenbau

Ermittlung von Bauteil-und System-Zuverlässigkeiten

[德] G. 莱希纳 B. 贝尔契 著

吴振环 刘全坤 译

孟惠荣 柯 丹

孟惠荣 校



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书围绕机械产品的可靠性理论与实践问题进行了较详细的叙述。全书共有 10 章:介绍了可靠性分析的数学基础;用寿命分布对可靠性进行数学描述,详细讨论了机械制造中常用的威布尔分布;静态干涉和动态干涉模型;介绍了重要机械零部件的可靠性数据,对系统可靠性估计的定性和定量方法,以及可靠性数据获取的方法;重点介绍了寿命试验和故障统计的评价及解析评价的方法,引进了“秩”和“置信区间”的概念;还对齿轮变速箱实例进行了可靠性分析;最后阐述了建立企业内部可靠性保证机构的必要性。

全书条理清楚,层次分明,图文并茂。不仅可作为大专院校的教学用书,同时可作为广大机械工程技术人员进行机械产品可靠性设计和评估的实用指南。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械产品的可靠性:零件与系统的可靠性估计/

(德) 莱希纳 (Lechne, G.), (德) 贝尔契 (Bertsche, B.) 著; 吴振环等译. —北京: 机械工业出版社, 1994. 10

书名原文: Zuverlässigkeit im Maschinenbau

Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten

Springer-Verlag, Berlin 1990

ISBN 7-111-04136-4

I. 机… II. ①莱… ②贝… ③吴… III. ①机械设计: 可靠性设计②可靠性设计: 机械设计 IV. TH122

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘小慧 版式设计: 冉晓华 责任校对: 贾立萍

封面设计: 姚毅 责任印制: 卢子祥

河北三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994 年 10 月第 1 版·1994 年 10 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32·7 印张·175 千字

0 001--2400 册

定价: 13.50 元

前 言

在机械制造和汽车工业中，由于引进了电子技术而使得开发的产品越来越复杂。这种向高效益、复杂化和经济性方向发展的产品又总是对其可靠性提出更高的要求。迄今为止，“可靠”的产品，首先是通过设计质量和关键零部件的加工质量来保证的，而现在必须在开发阶段就要对整个系统的可靠性给予全面的考虑。

航空和航天技术的发展完善了对一个复杂系统的技术可靠性的保障措施。在以往的机械和汽车工业中，产品开发工程师总是偏爱于考虑单个零件的可靠性。他们运用自己的专门知识，并通过许多试验来确保零件有足够的可靠性，如轴、齿轮、轴承、螺钉、弹簧等。这样，人们就把握了对整个系统有决定影响的零部件。尤其在汽车工业中，售后服务和用户评价表明，系统的可靠性已不再只与单个零件有关，而同时也与系统的其它零件有关，如密封、插接件、拨叉等，因而与整个系统有关。很显然，用户对他们购进的产品总是对其总体的可靠性和适用性更感兴趣，而不会崇尚产品研制者的名望，更不可能对产品的危险零部件了如指掌。

为了满足对产品可靠性分析和方法的日益增长的需要，使我们有必要对现有的可靠性理论和实践作一个入门的考察。实践的经验与科学的先导是紧密相联的。由德国科研协会和工业界资助的可靠性方面的各种研究项目在一如既往地实施中。在企业界和进修班举行了一系列这方面的学术讲座。

本书的编写是基于这样的考虑：它可以作为机械工程师的可靠性理论知识的入门书。对于已经有一定实际知识的可靠性专家来说，也可以作为他们的参考书和继续深造的读物。为此，在确立本书各章节的内容时特别考虑到易于理解 and 一目了然。

如果没有许多同事的帮助，本书的诞生几乎是不可能的。这里特别要感谢工学博士 H. v. Eiff 先生。由于他的促进、支持、提供宝贵的意见和出色的编辑工作使得本书的问世成为可能。

我们还要感谢 B. Häussler 女士，P. Brodbeck 工程师，吴振环博士，H. Lang 工程师，F. Müller 和 A. Flaig 先生等，他们都为本书的插图，文章的编排，以及对最后的文稿的审定做出了很大的贡献。

对于 Springer 出版社的亲密无间的合作、理解和支持，我们也表示诚挚的感谢。

G. Lechner, B. Bertsche

1990 年春于斯图加特

译 序

机械产品的可靠性是衡量产品质量水平和先进性的一个重要指标。国外许多产品都以可靠性作为设计基本指标,运用可靠性知识对产品的零部件和整个系统进行寿命预测,作出可靠性及安全性估计,从而使产品的质量得以进一步完善和提高。机械工程可靠性是一门新兴学科,对它的深入研究,无疑将有利于我国产品的质量迅速与国际水平接轨。

本书编例新颖,取材丰富。叙述深入浅出,简明扼要,概念清晰。在内容取舍上,均经作者精选,重点突出,着重工程应用。图表、公式、数据等都经过精心设计,醒目易查,便于读者掌握及应用。

有关可靠性基础理论的阐述,文字简练、定义明确、透澈,内容针对机械工程实际的需要,并附有计算实例。典型机械产品“变速箱的可靠性分析”,取材于作者为汽车工业完成的科学研究成果,是工程实践的高度概括,对产品的可靠性设计实践具有重要的指导意义。

可靠性分析和估计的结果是否正确与有效,完全要靠可靠性基础数据库来保证。对产品如缺少系统和定量的失效数据记录、返修统计评价、试验检测评价、用户使用评价等档案数据,而侈谈可靠性理论计算方法,其研究势必如无源之水、无根之木,而估算结果亦将毫无意义。这正是国内可靠性研究中的一个薄弱环节。因此,“可靠性数据的获取”一章的内容就显得十分重要,它以汽车传动系产品为例,详细介绍了可靠性数据的获取、处理和定量等具体方法,以及企业内部产品可靠性数据库的建立和联网等要点。末章介绍了“企业内部的可靠性保证机构”的设置与任务,为企业质量监管体系提出了新的工作方向。以上章节的内容均来自

作者亲身的实践经验，这是本书的一个重要特色，也正是目前众多的可靠性书籍中所缺少的内容。

作者莱希纳 (G. Lechner) 教授现任德国斯图加特大学副校长、机械设计研究所 (IMA) 所长，早年为国际著名学术权威尼曼 (G. Niemann) 教授的高足，在机械传动、可靠性、CAD、人工智能等高技术研究领域具有深厚的学术造诣，他发表的众多研究成果，为各国所引用，饮誉国际学术论坛。其新著《车辆传动》最近由施普林格出版社出版。他为德国和其他国家培养了大批博士研究生 (本书译者中合肥工业大学的刘全坤教授和在德国 FAG 轴承公司工作的吴振环博士亦是他的学生)。莱希纳教授曾多次来华，曾在合肥工业大学、中国矿业大学、上海机械学院、北京理工大学、哈尔滨电工学院和承德试验机厂等讲学和访问。1986 年受中国机械工程学会特邀，出席了该学会成立 35 周年纪念大会，作了精采的学术报告。他热爱中国，是中国人民的老朋友。莱希纳教授也是我多年的挚友，是我钦佩的同行专家，他不仅学识广博，治学严谨，学风端正，而且对中国人民所怀有的深厚感情也非同一般，他曾让他的爱女苏珊 (Susanne) 专修了中文，并力促本书中译本的出版，为中德两国人民学术交流和合作架起了友谊的桥梁。

本书另一主要作者贝尔契 (B. Bertsche) 教授、博士是莱希纳教授的高材生，其博士论文即以“机械工程的可靠性”作为研究课题，在本研究领域造诣极深，研究成果受到各界的重视。为此受聘于奔驰 (Benz) 汽车公司专事客车、轿车传动系的高级研究工作。自 1992 年以来，贝尔契教授在一所高等专科学校从事教学工作，并同时兼任奔驰汽车公司的顾问。

本书中译本的出版无疑将为推动我国机械可靠性研究的进一步发展以及提高机械产品的质量作出重要贡献。

本书中译工作由吴振环、刘全坤、孟惠荣、柯丹完成，吴振环博士为主译，全书由刘全坤教授悉心整理、加工及补译，孟惠荣教授审校。

中译本出版过程中,国际著名的施普林格出版社(Springer-Verlag)在版权转让中给予了大力支持。合肥工业大学、中国矿业大学、以及斯图加特大学在译本的出版事宜中亦给予了帮助。在此一并致以衷心的感谢!

由于译、审者水平所限,译文如有词不达原意及失误之处,敬请专家和广大读者不吝指正。

孟惠荣(教授、博士生导师)

1994年7月6日于中国矿业大学北京研究生部

莱希纳教授简历



工学博士莱希纳(G. LECHNER)教授, 1933 年出生, 1956 年毕业于慕尼黑工业大学机械系。后留该校机械设计研究所及 FZG 齿轮研究中心在著名学者 G. Biemann 教授门下任科研助理。1966 年获工学博士学位(导师 Niemann)。长期从事齿轮胶合及摩擦学等研究工作, 为享有盛誉的齿轮专家。1967 年起在 ZF 齿轮厂担任航空及车辆传动装置的开发研究及领导工作。1977 年至今执教于斯图加特大学, 任机械设计研究所所长, 其间还担任过系主任, 现为该大学主管科研的副校长。研究领域为车辆传动装置、系统可靠性、啮合技术、CAD 及仿真技术等。研究成果丰硕, 发表论著 80 多篇, 获有多项专利, 并担任德国科研协会(DFG)评审委员, 重点科研项目“STUT-CAD”负责人, 是一名学术造诣很深的著名学者。

贝尔契教授简历



工学博士贝尔契(B. BERTSCHE)教授生于1957年,1984年毕业于斯图加特大学机械制造系,主修设计方法学,材料力学和材料科学。1984年后在该校机械设计研究所任科研助理,从事“机械产品系统可靠性优化计算”研究工作,1989年获工学博士学位(导师G. Lechner),研究成果为同行所瞩目,发表论、著10余篇。1989年获FAG基金会科技奖,1991年获德国机械工程师学会(VDI)荣誉奖。1989~1992年在奔驰汽车公司工作,负责新型轿车自动变速及可靠性等开发研究。1992年后在Albstadt-Sigmaringen高等工业学校任教授,讲授设计方法学及材料力学等课程。

符号索引

A	失效、事件	P	检验统计
$A(t)$	可用性	$P(A)$	A 的概率
$A_{\text{stat}}(t)$	稳定可用性	$P(E)$	肯定事件的概率
B_1	失效概率为 1% 时的寿命	$R(t)$	可靠度、可靠性
B_{10}	失效概率为 10% 时的寿命	$R^*(t)$	经验可靠度
$E(X_i)$	期望值	$R_B(t)$	零部件的可靠性
$F(t)$	分布函数、失效概率	$R_S(t)$	系统可靠性
$F(t_i)$	原始分布在 t_i 时的失效概率	S	检验统计
$F^*(t)$	经验分布函数	T	特征寿命、转矩
$F_\beta(\nu_1, \nu_2)$	贝塔分布	X_i	对数秩
H	累积频度	a	直线斜率
$H(m)$	第 m 级累积频度	c	截距、失效数
K_A	处于工作状态 A 的元素	e	欧拉常数
$K_{\bar{A}}$	处于失效状态 A 的元素	b	形状参数、失效斜度、斜率、齿宽
K_0	标准价格	f	失效数
H_X	不足或过量设计变速箱的价格	$f(t)$	密度函数
L	似然函数	$f(t_i)$	原始分布在 t_i 下时的密度函数
L_0	标准寿命	$f^*(t)$	经验密度函数
L_X	不足或过量设计变速箱的寿命	f_B	密度函数
N	抽样空间	f_{tB}	无故障时间 t_0 系数
$N(t_i)$	增长	h_{abs}	绝对频度
		h_{rel}	相对频度
		h_x	一个定值的频度
		$j(t_i)$	平均秩数
		$j(t_{i-1})$	先前秩数
		k	总和变量、维勒线斜率、等量抽样组数、抽样容量

m	零件或元素数目、检验抽样时的最大秩数、模数	y	纵坐标
n	失效数、试验或元素的数目、抽样容量、总体容量	x	变位系数
n_A	某级的失效数	z	齿数
n_K	级数	Γ	伽玛函数
s	经验标准偏差	Δk	级宽
s^2	经验方差	Δt	检验时间
t	时间、负载时间、载荷循环次数、执行次数	$\Phi(x)$	标准正态分布
t_0	无故障时间	α	置信水平
t_i	寿命值、秩	$\lambda(t)$	失效率
t'_i	修正失效时间	$\lambda^*(t)$	经验失效率
t_m	失效时间的经验算术平均值	μ	均值
t_x	失效时间	$\mu(t)$	维修率
u	贝塔变量	γ_i	贝塔分布参数
x	横坐标	σ	标准差、离散度、应力
		σ_B	负荷(应力)
		σ_H	赫兹应力
		σ_w	承载能力(强度)
		σ_x	负荷值(应力值)
		$\phi(t)$	威布尔分布的指数
		$\phi(t_i)$	秩的密度函数

下标符号

B	负荷(应力)	j	元素号
Getr	变速箱	m	抽样数
Mot	发动机	median	中位数
W	阻抗	modal	众数
i	级号、元素号	n	系统冗余度、抽样容量

缩写符号

A	出现概率, 输出	DI	密封
AV	轴向连接	E	输入、发现概率
B	意义	EF	研制缺陷
BG	组件	EW	输入轴
BM	零件特征	F	空转、功能责任
BT	零件	FMEA	故障模式和效果分析

FMECA	故障模式、效果和风险分析	U	中断
K	卡住	UV	周向连接
LV	对数正态分布	W	轴
LW	载荷循环次数	WN	轴毂连接
NV	正态分布	Z	可靠性部门
P	极、产品责任	ZE	啮合
RPZ	风险系数	max	最大值
S	系统	min	最小值
SV	螺纹连接	stat	稳定
TS	子系统	Δ	差值

目 录

前言

译序

符号索引

1 引言	1
2 统计学和概率论的基本概念	7
2.1 失效状态的统计描述和表达	7
2.1.1 直方图和密度函数	7
2.1.2 分布函数和失效概率	11
2.1.3 可靠度和可靠性	14
2.1.4 失效率	16
2.2 统计学参数	20
2.3 概率的定义	22
2.4 示例	24
3 用寿命分布对可靠性进行数学描述	30
3.1 正态分布	30
3.2 指数分布	32
3.3 威布尔分布	34
3.3.1 基本概念和公式	34
3.3.2 威布尔概率纸	38
3.3.3 威布尔分布的历史形成过程	42
3.3.4 威布尔分布概率论的建立	45
3.4 对数正态分布	46
4 负荷和承载能力的干涉	50
4.1 静态干涉模型	50
4.2 动态干涉模型	53

5 寿命试验及失效统计的规划和评估	55
5.1 寿命试验规划	55
5.2 秩及其分布	57
5.3 用威布尔概率纸图形估计失效时间	66
5.3.1 威布尔直线的估计 (双参数威布尔分布)	67
5.3.2 考虑置信范围 (置信区间)	68
5.3.3 考虑无故障时间 t_0 (三参数威布尔分布)	73
5.4 威布尔参数的解析估计	77
5.4.1 参数 T 和 b 的估计	77
5.4.2 无故障时间 t_0 的估计	80
5.5 试验策略	84
5.5.1 夭折试验	84
5.5.2 强化负荷试验	88
5.5.3 不完全试验	89
6 若干机械零件的威布尔参数	90
6.1 形状参数 b	91
6.2 特征寿命 T	93
6.3 无故障时间 t_0 或系数 f_{iB}	96
7 确定系统的可靠性	98
7.1 故障模式和影响分析	98
7.2 故障树分析	103
7.3 马尔可夫理论	105
7.4 布尔系统理论	108
8 变速箱的可靠性分析 (示例)	113
8.1 系统分析	114
8.2 确定系统元素的可靠性	120
8.3 计算系统的可靠性	124
9 可靠性数据的采集	127
9.1 确定产品的结构层次	127
9.2 通过试验获取数据	130

9.3 保修和售后服务统计、外来文献资料	133
9.4 可靠性数据库	138
10 企业内部的可靠性保证机构	140
参考文献	146
附录	162

1 引言

产品的可靠性描述了其在给定的功能和工作条件下所定义的时间间隔内不发生失效的能力（参见 2.1.3 节的定义）。可靠性反映了一个产品的失效状态，因此，除了性能之外，它是评价产品的一个重要指标。

最简单的是用事后对失效的评估来确定产品的可靠性。然而，更好的且日益需要的是，在产品的开发阶段就已经可以估计产品的预计可靠性。用相应的可靠性分析可以预测产品的可靠性，明了产品的薄弱环节以及在需要时进行对比研究，见图 1.1。

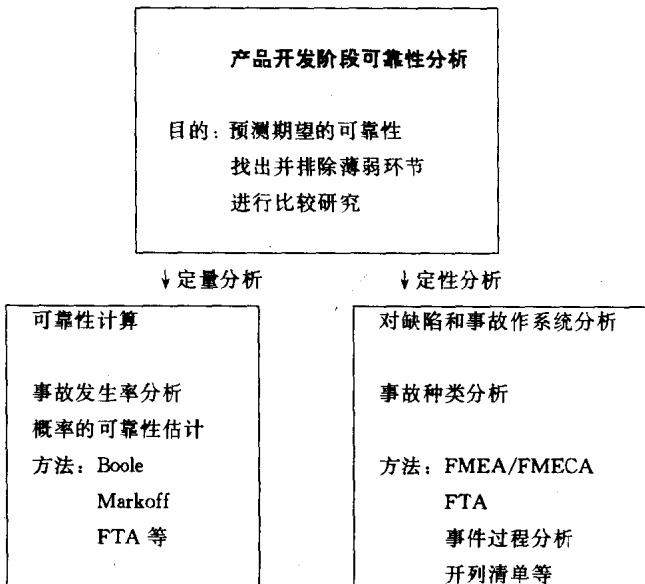


图 1.1 产品开发阶段可靠性分析的可能性

在可靠性分析时可以采用定性或定量分析方法。定量分析法