

● 机械设计丛书

机械零件可靠性设计

牟致忠 编著

● 机械工业出版社

本书是中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写的机械设计丛书之一，是专为机械设计人员编写的。

可靠性设计是现代设计理论和方法的主要内容之一。作者在本书中通过国内外的实例详细介绍了如何把可靠性直接设计到机械零件中去，从而设计到产品中去。本书的特点是：内容新颖、系统、全面，实例多，实用性强。全书共十章，由四部分内容组成：一、机械可靠性设计总论与数学基础（第一、二章）；二、进行机械零件可靠性设计的内容、方法与步骤，以及设计数据的获得方法（第三～八章）；三、机械零件可靠性设计实例（第九章）；四、机械的维修性设计（第十章）。

本书还可供其他工程技术人员、技术革新者、管理人员和大专院校研究生、本科生参考或自学。

机械设计丛书
机械零件可靠性设计
牟致忠 编著

*

责任编辑：夏曼苹
封面设计：方 芬

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 11⁷/₈·字数 308 千字
1988年 3 月重庆第一版·1988年 3 月重庆第一次印刷
印数 0,001—9,300 ·定价：3.90 元

*

ISBN 7-111-00365-9/TH·63

编辑委员会

主任委员 陈湖

副主任委员 周延佑

委员(姓氏笔划序)

傅梦蘧

郭可谦

徐家宗

江 斌

任光华

刘存智

刘恒愉

何国伟

陈立周

吴宗泽

辛一行

周勤芝

林东初

郑效忠

徐 灏

高庆荣

夏曼苹

黄致甲

曾 英

专业编审组

1. 机械设计理论方法专业编审组

组长 周延佑

组员 陈立周

曾 英

傅家骥

刘光宁

万耀青

2. 机械结构强度专业编审组

组长 傅梦蘧

组员 刘存智

高镇同

丁奎元

周辛庚

张如一

3. 机械零部件设计专业编审组

组长 郭可谦

组员 吴宗泽

林东初

舒森茂

余梦生

姜 勇

(其他专业编审组暂缺)

编 者 的 话

当前,国民经济各部门都迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的机械产品。而机械设计工作是决定机械产品质量、水平和经济效益的重要环节。一个机械产品的设计水平如果不高,即使制造得再好,也是一个落后的产品。所以必须加紧提高机械设计水平。

近三十年来,世界上科学技术的发展速度很快,机械设计工作也出现了崭新的局面。由于广泛运用了各学科和各技术领域里的新成就,尤其是采用了电子计算机技术,在机械设计领域里,新原理、新方法、新技术与新结构不断涌现,从而,大大提高了设计水平和速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品,改变了因设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。于是,许多大型、高精密度、高参数的质量高、效率高、消耗低和可靠耐用的各种机械产品,竞相出现。丰富了市场,并不断更新,以满足用户日益增长的需求。

在我国,随着国民经济的迅速发展,新产品的开发和老设备的技术改造工作日益增多,对机械设计工作的要求越来越高,机械设计人员迫切需要运用新的科学技术知识进行设计工作,但苦于缺乏学习和参考的资料。近几年来,一些进行产品研究、设计和教学的同志,一方面结合我国经验进行创新设计,一方面消化国外引进技术,均获得了可喜成果。这些成果也需要总结推广。因此,中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写了这套机械设计丛书,以飨读者。

这套丛书编写的指导思想是:内容先进、实用。着重介绍新理论、新方法、新技术和新结构;对于传统的设计计算方法,要做总结提高工作。书中注意贯串整机设计思路。要求阐明本专题

前 言

可靠性工程作为一门边缘的工程学科受到重视，在国外已有三十年了。在此期间，可靠性工程不仅在航天、航空、电子技术中的应用得到了很大发展，同时，从六十年代起也逐步地应用到各个民用工业部门中去。我国对于可靠性工程技术的应用和推广虽然起步较晚，但近些年来发展势头很猛，企业领导和工程技术人员急需学习和掌握这一新的设计理论和方法，本书正是为了适应这一需要而编写的。

可靠性工程研究的主要内容是产品的可靠性设计、试验和验证。可靠性试验数据是可靠性设计的基础。但是试验不能提高产品的可靠性，只有设计才能决定产品的固有可靠性。国内外的实践经验都表明，产品的可靠性是由设计决定的，而由制造和管理来保证。在产品的整个寿命期内，从设计、研制、制造、装配、调试、使用、维修直到报废，都必须进行可靠性管理，只有这样，才能保证产品有满意的可靠性。

因为机械设备是由零部件组成的，所以，为了提高机械设备的可靠性，首先必须提高零部件的可靠性。往往由于一个关键性零部件的可靠性不好，以致使整机在短时间的运行中失效，从而造成灾难性的后果，这样的事例三十年来一直在不断地发生。因此，机械的可靠性必须首先从零部件的可靠性做起。

机械可靠性设计的应用和推广比较困难，原因是多方面的：
(1)传统的机械设计方法使用了相当大的安全系数，掩盖了可靠性与经济性的矛盾；(2)可靠性设计需要足够的呈分布状态的设计数据，而获得这些数据并非一日之功，不仅需要进行可靠性试验，更需要首先建立起一整套自上而下的可靠性管理制度和机构，建立起必要的设计评审制度、可靠性标准、可靠性数据中

的基本原理，避免深邃的数学，着重介绍物理概念及设计要点，给出实用的设计方法和计算公式、步骤、实际效果及经国内试验的数据、图表和实例。叙述深入浅出，分析透彻，使具有微积分数学知识的大中专程度的设计人员读得懂、用得上。花较少时间得到较大收获。

由于机械设计涉及面广，本丛书题目的选定，原则上是根据上述指导思想成熟一个定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书编写及出版时间将比较长。将采取分批出版的方式陆续出版。第一批13本将在近两年内出齐。它们是：《价值分析在产品中的应用》、《可靠性设计》、《电阻应变测量》、《光弹性应力分析》、《防断裂设计》、《抗疲劳设计》、《振动特性计算》、《轴的设计》、《现代带传动设计》、《机械零件可靠性设计》、《机械结构设计》和《耐磨损设计》、《联轴器》。

尽管我们朝上述设想作了许多努力，但因缺乏经验，并受水平限制，一定还存在一些缺点和不足之处，欢迎读者提出批评改进意见。

机械设计丛书编辑委员会

心，等等；（3）可靠性试验是一种既费时又费钱的试验，不可能由少数单位完成，而机械零件和设备的可靠性试验比电子、电气元件和设备的可靠性试验要难得多，等等。

尽管如此，对机械零件和设备进行可靠性和维修性设计是势在必行。越来越多的机械产品被要求必须具备可靠性指标，因为可靠性是考虑了时间因素的质量。可以断言，只有可靠性高的产品，才能在国际市场的激烈竞争中取胜。因此，在机械工业领域大力推广和贯彻可靠性，实在是当务之急。

到目前为止，国内出版的关于机械可靠性方面的书刊甚少，而且应用举例不多。本书在介绍机械可靠性设计理论和方法的同时，着重介绍了过去二十年间国内外机械可靠性设计的一些实例，希望有助于机械可靠性设计方法在我国的普及与推广。

限于水平，也限于时间和篇幅，书中难免有错误和不当之处，请读者批评指正。书中引用了许多中外学者的论文和资料，谨在此深表谢意。本书承北京航空学院郭可谦教授仔细审阅和指导，承何国伟、黄文敏、曾天翔和唐金松等专家和同志们提供宝贵意见，谨在此深表谢意。

牟致忠 1986年春于上海工业大学

符 号 表

A ——有效性; 有效度

$A(t)$ ——有效度

CDF, cdf ——累积分布函数

CL ——置信度

$E(x)$ ——随机变量 x 的数学期望 (均值)

$F(t)$ ——失效时间 t 的累积分布函数; 不可靠度

$F(x)$ ——随机变量 x 的累积分布函数

$f(x)$ ——随机变量 x 的概率密度函数

$g(t)$ ——修复时间的概率密度函数

L ——寿命, 载荷

L_q ——失效百分数为 q 时的寿命

M ——维修性; 维修度

$M(t)$ ——维修度

$MTBF$ ——平均无故障工作时间

$MTTF$ ——平均失效时间 (失效前平均工作时间)

$MTTR$ ——平均修复时间

N ——失效循环次数

n ——安全系数; 样本容量; 工作循环次数

$N(\mu, \sigma)$ ——均值为 μ 、标准离差为 σ 的正态分布

$N(\mu, \sigma^2)$ ——均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布

$N(0, 1)$ ——标准正态分布

P ——概率

$P(A)$ ——事件 A 发生的概率

$P(A/B)$ ——在事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的条件概率

PDF, pdf ——概率密度函数

P_f ——失效概率

R ——可靠性; 可靠度

$R(t)$ ——可靠度

r ——应力比

R_{L1} ——可靠度的单侧置信区间的下限

R_{L2} ——可靠度的双侧置信区间的下限

R_{U2} ——可靠度的双侧置信区间的上限

S ——强度

s ——应力; 样本的标准离差

s^2 ——样本的方差

s_σ ——应力幅

s_m ——平均应力

V ——变异系数

V_S ——强度的变异系数

V_s ——应力的变异系数

$V(x)$ ——随机变量 x 的方差

$\hat{x}$ —— x 的估计值

$\bar{x}$ ——样本的均值

$\tilde{x}$ ——样本的中位值

z ——联结系数; 标准正态分布随机变量的值

β ——威布尔分布的形状参数, 威布尔斜率

γ ——威布尔分布的位置参数; 风险

ε ——误差

ζ ——强度与应力的差

η ——威布尔分布的尺度系数, 特征寿命

λ ——失效率

$\lambda(t)$ ——瞬时失效率

μ ——母体的均值

$\hat{\mu}$ ——均值的估计值

$\mu(t)$ ——修复率

ν ——泊松比; 自由度

ρ ——相关系数

σ ——母体的标准离差

$\hat{\sigma}$ ——标准离差的估计值

σ_b ——强度极限

σ_s ——屈服极限

σ_{-1} ——持久极限

σ_{S_n} ——应力幅的标准离差

σ_{S_i} ——应力的标准离差

σ_{S_m} ——平均应力的标准离差

τ ——剪应力

τ_{-1} ——剪切持久极限

$\Phi(z)$ ——标准正态分布函数

目 录

前言

符号表

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
一、为什么要研究可靠性	1
二、可靠性的范畴	3
三、可靠性工程部门的职责	4
四、可靠性管理	6
第二节 可靠性定义及尺度	7
一、可靠性定义	7
二、可靠性尺度	9
第三节 影响机械设备和电子、电气设备可靠性的因素	11
第四节 现行的几种机械可靠性设计方法	11
一、概率设计法	11
二、失效树分析法(FTA)	11
三、失效模式、影响及致命度分析(FMECA)	21
第五节 概率机械设计法与传统的机械零件设计法的比较	28
第二章 可靠性的数学基础	33
第一节 概率	33
一、概率的基本概念	33
二、古典概率与统计概率	35
三、概率的基本定理与运算	36
第二节 随机变量	43
一、离散型随机变量	43
二、连续型随机变量	44
三、累积分布函数(CDF)	46
四、概率密度函数(PDF)	47
五、随机变量的数字特征	49

第三节 可靠性工程常用的几种概率分布	50
一、伯努利试验和二项分布	51
二、泊松分布	52
三、正态分布	54
四、对数正态分布	61
五、威布尔分布	63
六、指数分布	75
七、概率分布的确定和应用	76
第四节 数理统计	78
一、数理统计的基本概念	78
二、分布参数的估计	79
三、总体的分布函数的假设检验	86
四、回归分析	90
第三章 机械可靠性设计的内容和步骤	94
第一节 可靠性设计在可靠性计划中的地位	94
第二节 可靠性设计的特点	98
第三节 可靠性设计的内容	101
第四节 可靠性设计的方法和步骤	102
第四章 确定应力分布的方法	110
第一节 概述	110
第二节 影响应力分布的物理参数及几何参数的统计数据	114
一、弹性模量 E	114
二、泊松比 ν	115
三、几何尺寸	115
四、断面模量 W 及其它断面要素	117
第三节 用代数法综合应力分布	117
第四节 用矩法综合应力分布	126
一、一维随机变量	126
二、多维随机变量	127
第五节 用蒙特卡洛模拟法确定应力分布	130
第五章 确定强度分布的方法	134
第一节 概述	134
第二节 呈分布状态的 $S-N$ 曲线	137

第三节 复合疲劳应力下的强度分布	138
第四节 用代数法综合强度分布	140
一、尺寸系数 ϵ 的统计数据	141
二、表面质量系数 β 的统计数据	142
三、疲劳应力集中系数 k_f 的统计数据	142
第五节 用矩法综合强度分布	142
第六节 用蒙特卡洛模拟法确定强度分布	145
第六章 应力—强度分布干涉理论与可靠度计算	147
第一节 概述	147
第二节 可靠度函数与失效率	148
第三节 应力—强度分布干涉理论与可靠度的一般表达式	151
第四节 应力和强度分布都呈正态分布的可靠度计算	156
第五节 应力和强度分布都呈对数正态分布的可靠度计算	159
第六节 可靠度的计算方法	165
一、数值积分法	165
二、图解法	165
三、蒙特卡洛模拟法	168
第七节 应力呈威布尔分布、强度呈正态分布的可靠度计算	171
第八节 已知应力幅、失效循环次数分布和寿命要求, 疲劳应力下 的可靠度计算	174
第九节 已知强度分布和最大应力幅, 规定寿命下的可靠度 计算	178
第十节 复合疲劳应力下的可靠度计算	179
第十一节 顺序加载下的累积疲劳强度可靠度计算	180
第十二节 可靠度与安全系数的关系	189
第七章 可靠度的置信度和置信区间	194
第一节 概述	194
一、置信度、置信区间与风险	194
二、可靠度的置信度和置信区间	195
第二节 可靠度的单侧置信区间下限 R_{L1}	197
第三节 置信度对可靠度单侧置信区间下限 R_{L1} 的影响	209
第四节 样本容量 n 对可靠度的单侧置信区间下限 R_{L1} 的影响	210
第五节 在规定的置信度下把目标可靠度设计到零件中去	211

第八章 机械零件可靠性设计数据及获得方法	214
第一节 概述	214
一、由试验得到的 $S-N$ 分布曲线图	214
二、按经验方法作出的 $S-N$ 线图	215
第二节 静强度分布数据	217
第三节 失效循环次数 N 的分布数据	218
第四节 有限寿命下的强度分布数据	223
一、由试验数据确定有限寿命下的强度分布	223
二、根据试验数据估计有限寿命下的强度分布	227
第五节 长期寿命下的强度分布——持久极限分布	229
第六节 呈分布状态的古德曼线图的确定	232
第七节 用经验方法得到强度分布数据	237
第八节 可靠性数据库	237
第九章 可靠性设计应用举例	242
第一节 机械零件可靠性设计应考虑的问题	242
第二节 可靠性设计应用举例	242
一、螺栓联接的可靠性设计	242
（一）受拉螺栓联接	243
（二）受剪螺栓联接	253
二、过盈联接的可靠性设计	258
三、花键联接的可靠性设计	261
四、焊缝强度的可靠度计算	271
五、轴的可靠性设计	274
（一）传动轴	274
（二）转轴	275
（三）轴的刚度	279
（四）轴的振动	283
六、滚动轴承的可靠性设计	288
七、滑动轴承的可靠性设计	293
八、联轴器的可靠性设计	295
九、摩擦离合器的可靠性设计	301
十、齿轮传动的可靠性设计	303
十一、链传动的可靠性设计	307

十二、弹簧的可靠性设计	311
(一) 压缩螺旋弹簧	311
(二) 螺旋扭转弹簧	319
(三) 板簧	320
(四) 异型弹簧	322
十三、钢丝绳的可靠性设计	326
十四、压力容器的可靠性设计	329
十五、压杆的可靠性设计	331
第十章 机械的维修性设计	333
第一节 概述	333
一、为什么要研究维修性	333
二、维修性的定义和尺度	334
三、维修的分类	336
第二节 维修性设计	336
一、维修性设计的基本内容和设计准则	336
二、修复时间的分布	337
三、维修度函数 $M(t)$	344
四、修复率 $\mu(t)$	348
附录	351
附表1 标准正态分布表	351
附表2 Γ 函数	358
附表3 t 分布的临界值表	359
附表4 χ^2 分布表	360
附表5 $K-S$ 表	361
参考文献	362

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、为什么要研究可靠性

可靠性问题最早是由美国军用航空部门提出的。他们首先认识到不可靠性的代价实在太大。第二次世界大战期间，美国空军由于飞行故障事故而损失的飞机为21000架，比被击落的数字多1.5倍；运往远东的作战飞机上的电子设备，经运输后有60%不能使用，在储存期间有50%失效，在使用中失效率高、难以维护，这些事实引起美国军方对可靠性问题的高度重视。

五十年代起，美国可靠性问题越来越突出。因此，在1952年11月成立了电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)。1957年6月，AGREE发表了著名的“军用电子设备的可靠性”报告，提出了在研制及生产过程中对产品的可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法，提出了电子产品在生产、包装、储存和运输等方面要注意的问题及要求等。这个报告被公认为是电子产品可靠性理论和方法的奠基性文件。从此，可靠性工程发展成为一门独立的工程学科。

接着，美国设置了可靠性管理机构，制订可靠性管理计划，颁布军用可靠性标准及手册，建立全国性的可靠性数据交换中心。美国许多学会成立了可靠性委员会，出版专刊及论文集，举行一年一度的学术年会。最有代表性的是1962年开始的可靠性与维修性学术年会。在1958~1962年间，各发达国家都相继仿效，大力开展可靠性的研究工作。

对机械可靠性的研究始于六十年代初期。它的发展也与美国的航天计划有关。当时，机械故障和电子—机械故障是NASA(宇航局)主要关心的事。因为由于机械故障而引起的事故很多，

损失很大。例如，1963年同步通讯卫星SYNCOM I号由于高压容器断裂引起的故障，在空中坠毁；1964年人造卫星水星Ⅲ号也因机械故障而损坏。因此，从1965年起，NASA开始进行以下几项机械可靠性研究：(1)用过载试验方法进行可靠性验证；(2)在随机动载荷下结构和零件的可靠性；(3)把规定的可靠度目标值，直接设计到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件中去。

从六十年代起，在工业发达的国家内，由于产品的复杂化和工作环境条件的严酷，对产品的可靠性要求越来越高。于是，除了航空、航天、尖端武器和电子等工业之外，可靠性工程技术和工程逐步推广应用到许多工业部门，包括原子能、机械、电气、冶金、化工、铁道、船舶、电站设备、建筑、食品加工、通讯、医药等。从最复杂的宇宙飞船，到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车，到细小的可置于人体内的心脏起搏器，都应用了可靠性设计，有明确的可靠性指标。1969年7月登月成功的美国Apollo-11号飞船，有720万个零（元、器）件，共有120所大学、15000个单位的42万人参加研制，这样的零（元、器）件非具有高可靠性不可。有时，一个零件的失效可能导致整个系统的故障，造成灾难性的后果。为了预测价值数十亿美元的飞船是否能成功地完成任务，美国通用电气公司研制了“用仿真方法预测阿波罗飞船完成任务的概率”的计算机程序。在登月成功之后，美国航空和航天局(NASA)将可靠性工程技术列为三大技术成就之一。

可靠性工程能带来巨大的经济效益。例如日本从美国引进可靠性工程技术之后，在民用工业中应用和推广取得成功。日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、照相机等产品能够畅销全球，在于具有高可靠性。日本由此而获得巨额利润。美国人曾预言，今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业，才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。而日本人则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。事实上，随着国外公司经理们对可靠性作用的觉醒，可靠性越来越多地成为商品广告的内容。例如，