

机械零件与 系统可靠性模型

吴 波 黎明发 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

机械零件与系统可靠性模型

吴 波 黎明发 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

机械零件与系统可靠性模型/吴波, 黎明发编著. —北京:
化学工业出版社, 2002.11
ISBN 7-5025-4031-8

I. 机… II. ①吴…②黎… III. ①机械元件-强度-可
靠性②机械系统-系统可靠性-模型 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 070762 号

机械零件与系统可靠性模型

吴 波 黎明发 编著

责任编辑: 李玉晖

文字编辑: 韩庆利 张燕文 梁玉兰

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 13¼ 字数 358 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4031-8/TH·104

定 价: 28.00 元



版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

机械产品的可靠性是衡量机械产品质量的一个重要指标。随着科学技术的飞速发展,对机械产品的可靠性要求也日益提高。自20世纪80年代以来机械可靠性技术在我国得到广泛的应用,机械产品的可靠性越来越受到重视,有关部门制订了一系列标准和规范,例如对研制的新产品必须给出衡量其可靠性水平的指标数值。

提高机械产品的可靠性,必须首先从设计上解决机械产品的固有可靠性要求,然后在制造中加以保证。对工程技术人员来说,从事机械零件与系统的可靠性预测、评价及可靠性设计是达到提高机械产品可靠性的惟一途径。而机械零件与系统的可靠性预测、评价及可靠性设计是基于机械零件与系统可靠性模型进行的。目前,国内关于机械零件与系统可靠性模型的著作尚难找到。

本书对机械零件与系统的可靠性模型及其应用作了较全面、详细的论述,且重点突出工程应用。本书具有以下特点。

① 书中介绍的机械零件与系统可靠性模型大多经试验验证,是准确、可行和有效的。

② 注重引用国产常用材料和零件的可靠性试验数据,而这些数据对机械产品的可靠性预测、评价、设计具有重要作用。

③ 针对机械零件与系统可靠性模型中的计算问题,本书着重介绍工程实用的近似方法。读者可直接应用本书的数学模型,其数学推导用于读者在对结果有疑义时溯前推算。

本书对机械工程技术人员和机械工程及其他相关专业大专院校师生和研究生均有较大的实用价值。

全书共分9章,第2、3、4、9章和第6章的1、3节由吴波撰写,第1、5、7、8章和第6章的第2节由黎明发撰写。

本书如能对读者从事机械可靠性工作提供帮助，那就是作者最大的愿望。由于水平有限，书中难免存在不足，恳请读者批评指正。

作 者

2002 年 4 月

内 容 提 要

机械产品的可靠性是衡量机械产品质量的一个重要指标。为便于工程技术人员掌握机械零件与系统的可靠性预测、评价及可靠性设计,本书对机械零件与系统的可靠性模型及其应用作了较为全面、详细的介绍,内容包括机械零件强度、机械系统、轴的强度、齿轮的强度、弹簧的强度、螺栓连接强度等的可靠性模型及应用以及滚动轴承及系统可靠性模型等。本书所收集的模型大多经过试验验证,所收集的试验数据对可靠性预测、评价、设计具有一定的参考价值。

本书可供机械工程技术人员和大院校机械工程及相关专业的师生和研究生阅读参考。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机械可靠性分析的基本概念	1
1.1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.2 可靠性的评价尺度	3
1.1.3 机械零件可靠性分析的基本概念	7
1.2 机械零件的应力、强度及寿命	9
1.2.1 应力	9
1.2.2 强度	11
1.2.3 寿命	12
1.2.4 应力、强度和寿命的关系	12
1.3 常用随机变量的统计分布	13
1.3.1 指数分布	13
1.3.2 正态分布	14
1.3.3 对数正态分布	16
1.3.4 威布尔分布	18
1.3.5 伽马分布	22
1.4 随机变量的代数运算	22
1.4.1 正态随机变量的代数运算	22
1.4.2 随机变量函数的数学期望与方差的近似计算	25
参考文献	26
第 2 章 机械零件强度可靠性模型及应用	28
2.1 机械零件应力、强度“干涉”模型	28
2.1.1 机械零件应力、强度“干涉”模型	28
2.1.2 应力、强度“干涉”模型的应用	31
2.2 机械零件强度可靠性精确计算模型	34
2.2.1 应力和强度均呈正态分布的可靠性模型	34
2.2.2 应力和强度不均呈正态分布的可靠性模型	34

2.2.3 计算实例	39
2.3 机械零件强度可靠性近似计算模型	40
2.3.1 图解近似计算模型	40
2.3.2 概率分布的 Edgeworth 级数渐近展开近似计算模型	43
2.3.3 机械零件强度可靠性的 Monte Carlo 近似计算模型	49
2.3.4 最大失效概率法	52
2.3.5 机械零件强度可靠度的二维高斯积分法	56
2.3.6 应力、强度均呈威布尔分布的 Gauss-Laguerre 及 Gauss-Legeudre 求积近似方法	62
2.3.7 等效正态分布近似计算方法	68
2.3.8 等效威布尔分布法	79
2.4 存在未知(模糊)信息时的机械零件强度可靠性计算模型	82
2.4.1 机械零件强度可靠性的灰色预测法	82
2.4.2 机械零件的强度模糊可靠度计算模型	87
参考文献	91
第3章 机械系统的可靠性模型及应用	93
3.1 系统可靠性模型的建立	93
3.1.1 可靠性框图	93
3.1.2 系统可靠性模型的建立步骤	95
3.1.3 系统可靠性模型的应用	96
3.2 简单机械系统的可靠性模型	97
3.2.1 串联系统	97
3.2.2 纯并联系统	99
3.2.3 表决系统	100
3.2.4 等待系统	100
3.2.5 均分载荷并联系统可靠性纯灭模型	102
3.2.6 能力相关的机械系统可靠性模型	107
3.3 复杂机械系统可靠性模型	109
3.3.1 上下限近似计算模型	109
3.3.2 网络系统的可靠性计算模型	112
3.4 系统可靠性分配模型	114
3.4.1 系统可靠性分配准则	115
3.4.2 等分配模型	116

3.4.3 按预计失效率(或故障率)的分配模型	117
3.4.4 按预计失效率(或故障率)和重要度的分配模型	118
3.4.5 AGREE 分配模型	120
3.4.6 花费最小的最优化分配模型	122
3.4.7 系统可靠性分配模型的选择	124
参考文献	125
第4章 轴的强度可靠性模型及应用	126
4.1 轴的力学模型	126
4.2 对称循环下轴静强度与无限寿命的强度可靠性模型	131
4.2.1 传动轴的强度可靠性模型	131
4.2.2 心轴的强度可靠性模型	140
4.2.3 转轴的强度可靠性模型	143
4.2.4 修正系数的统计确定	144
4.2.5 有限寿命下轴的疲劳强度可靠性模型	150
4.3 非对称循环载荷下轴的疲劳强度可靠性模型	161
4.3.1 无限寿命下的轴疲劳强度可靠性模型	162
4.3.2 有限寿命下的轴疲劳强度可靠性模型	165
4.4 轴的刚度可靠性模型	166
4.5 顺序加载下轴的累积疲劳损伤可靠性模型	168
4.6 多失效模式下轴的强度可靠性模型	172
4.6.1 单一载荷下轴的多失效模式可靠性模型	173
4.6.2 弯扭组合载荷下多失效模式可靠性模型	177
4.7 轴强度可靠性模型的应用	179
4.7.1 轴的强度可靠性预测	179
4.7.2 轴的可靠性设计	188
参考文献	191
第5章 齿轮的强度可靠性模型及应用	193
5.1 渐开线圆柱直齿轮的力学模型	193
5.1.1 齿轮齿面接触应力力学计算模型	193
5.1.2 齿轮轮齿弯曲应力力学计算模型	194
5.2 齿轮的静强度可靠性模型	195
5.2.1 接触应力下齿轮静强度可靠性模型	195
5.2.2 弯曲应力下齿轮静强度可靠性模型	197

5.3 齿轮的疲劳强度可靠性模型	198
5.3.1 齿轮接触疲劳强度可靠性模型	198
5.3.2 齿轮弯曲疲劳强度可靠性模型	200
5.4 齿轮多失效模式下的可靠性模型	203
5.5 齿轮可靠性模型中的随机变量分布及系数的确定	205
5.5.1 齿轮可靠性模型中的随机变量分布	205
5.5.2 齿轮可靠性模型中系数的确定	206
5.6 齿轮可靠性预测实例	215
本章符号说明	219
参考文献	221
第 6 章 弹簧的强度可靠性模型及应用	222
6.1 螺旋弹簧的强度可靠性模型及应用	222
6.1.1 圆柱螺旋弹簧的力学模型	222
6.1.2 螺旋弹簧的主要失效形式及可靠性计算准则	227
6.1.3 圆柱形压缩螺旋弹簧强度可靠性模型	228
6.1.4 圆柱形压缩螺旋弹簧疲劳累积损伤可靠性模型	235
6.1.5 压缩螺旋弹簧强度可靠性模型的应用	240
6.2 钢板弹簧的强度可靠性模型及应用	250
6.2.1 钢板弹簧的力学模型	250
6.2.2 钢板弹簧主要失效形式与强度可靠性计算准则	255
6.2.3 钢板弹簧的静强度可靠性模型	256
6.2.4 钢板弹簧在随机应力下的强度可靠性模型	259
6.2.5 车用钢板弹簧在随机应力下的疲劳累积损伤可靠性模型	261
6.3 碟形弹簧的强度可靠性模型及应用	266
6.3.1 碟形弹簧的力学模型	266
6.3.2 碟形弹簧的常见失效形式及可靠性计算准则	268
6.3.3 静载荷下碟形弹簧的可靠性模型	269
6.3.4 碟形弹簧承受交变载荷的强度可靠性模型	271
6.3.5 碟形弹簧可靠性模型的应用	276
参考文献	281
第 7 章 螺栓连接强度的可靠性模型及应用	283
7.1 螺栓连接的力学模型	283
7.1.1 螺栓组的受力形式及螺栓的工作载荷	283

7.1.2 单个螺栓连接的工作应力	285
7.2 螺栓连接强度的可靠性模型	288
7.2.1 螺栓连接静强度可靠性模型	288
7.2.2 螺栓连接的疲劳强度可靠性模型	293
7.3 连杆螺栓的可靠性模型	301
7.3.1 连杆螺栓连接的失效分析和螺栓可靠性计算准则	302
7.3.2 连杆螺栓连接力学模型与最小预紧力	303
7.3.3 连杆螺栓工作应力分布	306
7.3.4 连杆螺栓疲劳强度极限分布	313
7.3.5 连杆螺栓强度的可靠性模型	318
7.3.6 连杆螺栓强度可靠性的随机模拟评价	319
7.3.7 发动机连杆螺栓强度可靠性预测实例	321
参考文献	324
第8章 滚动轴承及系统可靠性模型	325
8.1 普通滚动轴承及系统可靠性模型	325
8.1.1 普通滚动轴承的可靠性模型	325
8.1.2 滚动轴承的当量动负荷	328
8.1.3 滚动轴承系统可靠性模型	330
8.2 大型轧机用滚动轴承可靠性模型	333
8.2.1 轧辊轴承使用条件和失效形式	333
8.2.2 轧辊轴承可靠性预测模型	334
8.3 大型滚动轴承可靠性通用强度模型	349
8.3.1 大型滚动轴承的寿命分布与可靠性系数 a_1	349
8.3.2 大型滚动轴承可靠性通用强度模型	351
8.3.3 大型滚动轴承可靠性通用强度模型预测实例	358
参考文献	359
第9章 其他机械零件与系统可靠性模型及应用	361
9.1 机械磨损零件的可靠性模型	361
9.1.1 机械磨损的基本规律与磨损寿命线图	361
9.1.2 给定寿命下的机械零件耐磨性可靠性模型	364
9.2 V带传动的可靠性模型及应用	366
9.2.1 V带传动的力学模型	367
9.2.2 V带传动的失效模式	368

9.2.3 V 带传动可靠性模型	370
9.2.4 V 带传动疲劳强度可靠性模型	372
9.3 滚柱式超越离合器可靠性优化设计	378
9.3.1 滚柱式超越离合器系统可靠性模型	378
9.3.2 滚柱式超越离合器的零件失效力计算与零件可靠性 模型的选用	380
9.3.3 滚柱式超越离合器的可靠性优化设计	384
9.3.4 滚柱式超越离合器可靠性优化设计实例	389
参考文献	390
附录	391
附录 1 标准正态分布积分表	391
附录 2 威布尔分布的偏度和峰度	407

第 1 章 概 论

1.1 机械可靠性分析的基本概念

1.1.1 可靠性的基本概念

(1) 可靠性的定义

简单地说可靠性是指零部件（或系统）在规定的时间内能保持正常工作能力的特性，是人们用以衡量零部件质量的重要指标之一。有关可靠性的定义表述有多种，归纳起来应用较普遍且具有代表性的表述有：

所谓可靠性（reliability）是指零部件（或系统）在规定的的时间和条件下，完成规定功能的可能性。

所谓可靠性是指“系统、机器、零部件等的功能在时间上的稳定性”。

上述两种定义的表述中，中国与欧美等国家多采用第一种表述，而日本等国家则采用第二种表述。两种表述在文字上不同，但其实质性含义是一致的，在定义中包含了可靠性的对象、规定的功能、规定的条件、规定的时间四大要素。

① 可靠性对象 包括系统、机器、零部件等。它可以是非常复杂的产品，也可以是一个简单的零件。单个零件，如机械零件的齿轮、轴、弹簧等；电子零件，如电阻、电容、集成块等；机器，如机床、汽车、飞机、轮船、发动机等。如果对象为一个系统，则它不仅包括硬件（系统本身），而且包括软件和人的因素在内。

② 规定的功能 系指零部件、系统的预期功能，即它应实现的使用目的。功能，如电灯泡的照明功能，汽车的运行功能，机床进行金属毛坯的切削加工功能等。如果对象在实际使用中，不能实

现规定的功能时，就称为对象发生故障或功能失效，反之则称为对象可靠，能正常工作。功能失效在研究对象的可靠性时必须明确。例如一台8缸发动机，当有一个汽缸火花塞不良，而其他7个汽缸正常，汽车仍能在规定的时间内完成运输功能，这时就不一定算功能失效；如果8个汽缸火花塞都有毛病，出现很大爆破声，直到完全熄火，这时就应称为功能失效。一般地，功能失效是一个模糊的界限，不容易分清。

③ 规定的条件 包括环境条件、维护条件及使用条件。环境条件，如环境温度、湿度、振动、润滑状况等；维护条件，如能否维修保养、维修条件、使用者的技术水平等；使用条件，如使用方法、使用频率等。对象如果超载运行、误用、操作不当或故意的破坏行为等情况均会产生对象的功能失效，故研究对比可靠性必须规定条件。

④ 规定的时间 是指对象的工作期限，或经济寿命期(ELT)，可以用时间表示，也可以随对象的不同采用诸如次数、周期、距离等表示。例如，滚动轴承的工作期限用时间，车辆的工作行程用公里数，齿轮的寿命用应力循环次数表示。

(2) 广义可靠性与狭义可靠性

系统、机器、零部件等一般随着使用时间的增长会产生损坏或故障，当发生故障一般有两种处置方式，即废弃或修复故障恢复功能继续使用。针对废弃的不可修零部件而言，它们的可靠性称为狭义可靠性，而后一种可修系统、机器的可靠性称为广义可靠性。它除考虑狭义可靠性外还要考虑发生故障后修理的难易程度即维修性。狭义可靠性、维修性和广义可靠性三者之间存在下述关系，即

$$\text{狭义可靠性} + \text{维修性} = \text{广义可靠性}$$

(3) 固有可靠性和使用可靠性

通过设计、制造形成的系统、零部件等可靠性称为固有可靠性，而系统等在广义使用条件的作用下，保证固有可靠性的发挥程度称为使用可靠性，一般地，它们使下式成立：

固有可靠性 $\geq$ 使用可靠性

在使用中,固有可靠性与使用可靠性的综合,则形成了系统的工作可靠性。

1.1.2 可靠性的评价尺度

为了评价机械零部件、机器、系统等的可靠性,必须对可靠性制定一些行之有效的指标,并加以数量化作为衡量可靠性的尺度,而且可靠性这一重要质量指标的数量化也是可靠性学科诞生的标志之一。

衡量可靠性的尺度主要有可靠度、失效率、平均寿命、维修度、有效度、重要度等。

从以上衡量指标可知可靠性尺度具有以下特点。

① 可靠性尺度具有多指标性。在不同的场合和不同的情况下,可用不同的指标来表示系统等的可靠性。

② 可靠性尺度具有随机性。对象在规定的时间内保持正常功能的可靠性是随机的,一般用概率方法进行定量衡量。

③ 可靠性具有定量表示的时间性,即定量指标多是时间的函数。

(1) 可靠度 (reliability)

可靠度系指零部件或系统在规定的条件下和规定的时间内,能正常行使功能的概率。

假设 E 表示上述定义中的对象在诸条件下正常行使功能的事件,则出现该事件的概率即为它的可靠度,即

$$R(t) = P(E) \quad (1.1)$$

因可靠度是时间的函数,不同的工作时间其可靠度不同,故它的另一种表述形式为零部件或系统的寿命 T 不低于时间 t 的概率。

$$R(t) = P(T > t), 0 \leq t < \infty \quad (1.2)$$

例如,有 1000 个某种零件,在工作了 10 年后,有 80 个发生了故障(或失效),其余的 $1000 - 80 = 920$ 个零件仍能继续工作,那么其可靠度为

$$R(10) = \frac{920}{1000} = 0.92 = 92\%$$

与可靠度对立的是不可靠度，它表示零部件或系统的不可靠程度，即

$$F(t) = P(\bar{E}) \quad (1.3)$$

或

$$F(t) = P(T \leq t), 0 \leq t \leq \infty \quad (1.4)$$

可靠度与不可靠度存在下述关系，即 $R(t)$ 与 $F(t)$ 互补（见图 1.1）。

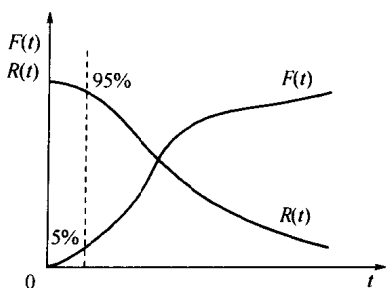


图 1.1 可靠度与不可靠度曲线

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.5)$$

(2) 失效率(failure rate)

失效率系指零件、产品、系统工作到 t 时刻后在单位时间内失效的概率，它反映了研究对象在任一瞬时失效概率的变化趋势。

设有 N 个零件，从 $t=0$ 开始工作，到时刻 t 时失效总数为 $n(t)$ ，则残存数 $N - n(t)$ ，又设在 $(t + \Delta t)$ 时间内又有 $\Delta n(t)$ 个零件失效，则定义时刻 t 的失效率为

$$\lambda(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} \quad (1.6)$$

例 1.1 100 个某种零件工作了 6 年失效了 27 个零件，工作了 7 年失效了 39 个零件，单位时间为年，试求 $t=6$ 年时的失效率。

解

$$\begin{aligned} \lambda(6) &= \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t} = \frac{39 - 27}{(100 - 27) \times 1} \\ &= 0.164 (\text{年}^{-1}) \end{aligned}$$

将零部件或系统的失效率 $\lambda(t)$ 随时间变化的函数用曲线在坐标 $\lambda(t)-t$ 上绘出，则反映了零部件或系统工作全过程的失效趋势变化情况。见图 1.2 所示，它反映了零件失效率的不同阶段与工作

时间。从图中可以看出它的形状与浴盆的剖面十分相似，故又称为浴盆曲线，它反映了失效的三个特征时期。

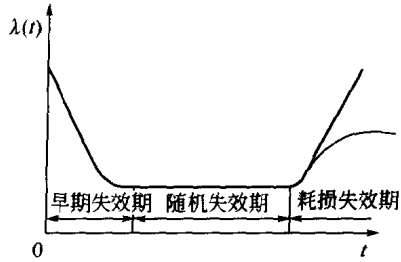


图 1.2 失效率曲线

① 早期失效期 它的特征在于一开始工作时失效率较高，但随工作时间的增长呈下降趋势。通常是由于设计、制造、工艺缺陷或检验等原因引起的，它可以通过筛选、检验、强化试验等方法加以排除。

② 随机失效期 它的特征是失效率很低且在数值上基本保持恒定，失效处于完全不可预测的状态。零部件或系统的失效是由偶然原因所引起的，这一时期是零部件或系统的正常工作时期，因此总希望其失效率低且持续时间长。

③ 耗损失效期 它的特征是失效率随时间逐渐上升，且上升趋势较快，此种形式多见于机械零件的磨损寿命。该类型的失效是由零部件或系统的耗损与老化所引起的，一般可以通过“事前维修”来加以防止。

(3) 平均寿命

平均寿命对不可修与可修的零部件或系统其含义不同。针对不可修系统是指它的平均无故障工作时间 $MTTF$ (Mean Time To Failure)，其数学表达式为

$$\bar{t} = MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.7)$$

式中， N 为样品数； t_i 为第 i 个零件的无故障工作时间。

对可以修复的系统而言平均寿命系指平均故障间隔时间 $MTBF$ (mean time between failure)，其数学表达式为

$$\bar{t} = MTBF = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij} \quad (1.8)$$