

高等学校教学参考书

卢玉明 编

# 机械零件的 可靠性设计

高等教育出版社

高等学校教学参考书

# 机械零件的可靠性设计

卢玉明 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是在编者讲授“机械零件的可靠性设计”课程讲稿的基础上编写的。

本书的主要内容包括：可靠性设计的数学基础；机械零件可靠度计算的基本方法；机械零件疲劳强度、耐磨性的可靠度计算；系统的可靠度；安全系数与可靠度；零件的可靠性试验；螺纹联接、圆柱形螺旋弹簧、轴的可靠性设计；滚动轴承的可靠性；渐开线圆柱齿轮强度的可靠度计算。

本书可作为高等工业学校机械类专业研究生及本科生的教学用书，也可供有关教师和工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

### 机械零件的可靠性设计

卢玉明 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 17.125 字数 410 000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数 0001—3 665

ISBN7-04-001083-5/TH·169

定价 4.50 元

# 前 言

可靠性从一个模糊的定性概念发展为以概率论及数理统计学为基础的定量概念——可靠度或失效概率,它可以被计算、检验和证明,标志着可靠性理论和技术已进入工程实用阶段,这是技术进步和设计经验积累的必然结果。

可靠性是产品在使用过程中质量指标的反映,因此,可靠性问题的特点是和产品的设计、制造和使用各个阶段密切联系的,每个阶段都在为创造最经济而又具有所要求的可靠性水平的产品而努力。为了提高机械产品的可靠性,首先必须在设计上满足可靠性要求。为此,要求机械设计人员在掌握常规机械设计方法的基础上,进一步了解和熟悉机械可靠性设计的基本思想和方法。这样,不仅可以拓宽和补充常规的设计理论,加深对常规设计的全面认识,而且对推广可靠性设计,提高设计质量,无疑是十分必要的。

本书的目的在于向学习过“机械设计”课程的大学生、研究生以及从事机械设计的工程技术人员,介绍机械可靠性设计的专门知识及方法。编者认为,机械可靠性设计作为一种现代机械设计方法,只是常规设计方法的进一步发展和深化。尽管可靠性设计引入了设计参数及变量随机化的思想及方法,但在具体的设计计算中,仍然要用到现有机器和零件、部件的设计计算以及制造工艺等方面的成果。因此,对于机械设计人员来讲,在掌握必要的数学基础上,阅读本书不是很难的。

为了叙述的系统性,便于讲授、自学,书中对可靠性设计所需的数学基础作了必要的介绍。没有学过“概率论及数理统计”课程

的读者,通过有关章节的学习,即可掌握可靠性设计必需的数学基础。为了便于自学,书中列举了各种类型的例题,以加深对理论内容及设计方法的理解。

本书承西北工业大学王步瀛教授审阅,提了不少宝贵意见。本书的编写还得到南京工学院余长庚教授、杨可桢教授的大力支持。编者在此一并致谢。

本书是根据编者为研究生讲授“机械零件的可靠性设计”讲稿整理的。书中引用了一些参考文献的资料及数据,谨向原作者、编者表示感谢。

目前,有关机械产品的可靠性理论还不完善,有些问题还在研究之中,况且统计资料及设计数据缺乏,因此本书仅是抛砖引玉,不妥之处,欢迎批评指正。

编 者

1987. 9.

## 主要符号表

|                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| $X, Y$                      | 随机变量                    |
| $T$                         | 时间随机变量                  |
| $f(x), g(y)$                | 随机变量 $X, Y$ 的概率密度函数     |
| $f(t)$                      | 随机变量 $T$ 的概率密度函数        |
| $F(t)$                      | 失效分布函数                  |
| $R(t)$                      | 可靠度函数                   |
| $R$                         | 可靠度                     |
| $R_s$                       | 系统可靠度                   |
| $P_f$                       | 失效概率                    |
| $\lambda(t)$                | 失效率函数                   |
| $\lambda$                   | 失效率                     |
| $E(X), \mu_x$               | 随机变量 $X$ 的期望值           |
| $\text{Var}(X), \sigma_x^2$ | 随机变量 $X$ 的方差            |
| $\sigma_x$                  | 随机变量 $X$ 的标准差           |
| $C_x$                       | 随机变量 $X$ 的变异系数          |
| $C$                         | 置信度                     |
| $\bar{x}$                   | 随机变量 $X$ 的样本均值(期望值的估计值) |
| $s_x$                       | 随机变量 $X$ 的样本标准差         |
| $\phi(u)$                   | 标准正态随机变量的概率密度函数         |
| $\Phi(u)$                   | 标准正态随机变量的分布函数           |
| $u$                         | 标准正态随机变量                |
| $u_p$                       | 失效概率为 $P$ 时正态分布的分位数     |
| $u_R$                       | 可靠度系数                   |
| $\beta$                     | 威布尔分布的形状参数              |
| $\gamma$                    | 威布尔分布的位置参数              |
| $\eta$                      | 威布尔分布的尺度参数              |

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| $\theta$          | 指数分布的平均寿命          |
| $\Gamma(\cdot)$   | 伽玛函数               |
| MTBF              | 平均故障间隔时间           |
| MTTF              | 失效前的平均时间           |
| $\sigma_S$        | 材料屈服极限的期望值的估计值     |
| $s_{\sigma_S}$    | 材料屈服极限的样本标准差       |
| $\sigma_B$        | 材料强度极限的期望值的估计值     |
| $s_{\sigma_B}$    | 材料强度极限的样本标准差       |
| $\sigma_{-1}$     | 材料对称循环疲劳极限的期望值的估计值 |
| $s_{\sigma_{-1}}$ | 材料对称循环疲劳极限的样本标准差   |
| $\sigma_r$        | 应力循环特性为 $r$ 的疲劳极限  |
| $\sigma_m$        | 平均应力               |
| $\sigma_a$        | 应力幅                |
| $\sigma_{\max}$   | 最大应力               |
| $\sigma_{\min}$   | 最小应力               |

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第一章 机械可靠性设计概论</b> ..... | 1  |
| 1-1 概述.....                | 1  |
| 1-2 机械零件可靠性设计的特点及研究内容..... | 4  |
| 一、设计特点.....                | 4  |
| 二、研究内容.....                | 4  |
| 1-3 机械可靠性的基本概念及指标.....     | 6  |
| 一、产品及功能参数.....             | 6  |
| 二、产品的工作能力.....             | 7  |
| 三、故障、失效.....               | 7  |
| 四、可靠性、可靠度.....             | 8  |
| 五、维修性、维修度.....             | 10 |
| 六、失效率及失效率曲线.....           | 11 |
| 七、可靠性水平等级.....             | 16 |
| 八、可靠性的经济指标.....            | 19 |
| <b>第二章 可靠性的数学基础</b> .....  | 21 |
| 2-1 基本概念.....              | 21 |
| 一、随机事件.....                | 21 |
| 二、概率.....                  | 22 |
| 三、随机变量.....                | 23 |
| 四、概率分布.....                | 25 |
| 五、总体、个体和样本.....            | 27 |
| 六、平均值和中值.....              | 28 |
| 七、方差、标准差和变异系数.....         | 29 |
| 八、置信度的概念.....              | 31 |
| 九、置信度和可靠度.....             | 33 |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 2-2 正态分布和截尾正态分布       | 33  |
| 一、概率密度函数和分布函数         | 33  |
| 二、标准正态分布              | 35  |
| 三、截尾正态分布              | 39  |
| 2-3 正态概率坐标纸           | 41  |
| 一、正态概率坐标纸的制作原理        | 41  |
| 二、正态概率纸的应用            | 42  |
| 2-4 对数正态分布            | 50  |
| 一、概率密度函数和分布函数         | 50  |
| 二、均值和标准差              | 52  |
| 三、对数正态概率纸             | 56  |
| 2-5 威布尔分布             | 59  |
| 一、失效概率密度函数和失效分布函数     | 59  |
| 二、威布尔分布的参数            | 60  |
| 三、威布尔分布的可靠性数量特征       | 62  |
| 四、零件疲劳寿命试验用的威布尔分布表达式  | 63  |
| 五、威布尔分布在滚动轴承寿命计算中的应用  | 64  |
| 2-6 威布尔概率坐标纸          | 68  |
| 一、概率纸制作原理             | 68  |
| 二、威布尔概率纸的应用           | 69  |
| 2-7 极值分布              | 79  |
| 一、极小值分布               | 80  |
| 二、极大值分布               | 82  |
| 三、极值概率纸               | 84  |
| 2-8 指数分布              | 86  |
| 2-9 伽玛( $\Gamma$ )分布  | 91  |
| 2-10 统计分布在机械可靠性设计中的应用 | 94  |
| 2-11 分布参数的分析法估计       | 104 |
| 一、正态分布的参数估计           | 104 |
| 二、对数正态分布的参数估计         | 108 |
| 三、指数分布的参数估计           | 110 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 四、威布尔分布的参数估计·····                           | 113 |
| 2-12 分布函数的假设检验·····                         | 116 |
| <b>第三章 随机变量函数的分布及数字特征</b> ·····             | 119 |
| 3-1 随机变量函数的分布·····                          | 119 |
| 一、一维随机变量的函数·····                            | 119 |
| 二、 $n$ 维随机变量的函数·····                        | 122 |
| 3-2 数学期望及方差的基本公式·····                       | 126 |
| 3-3 线性函数的均值及方差·····                         | 127 |
| 3-4 独立随机变量乘积的均值及方差·····                     | 132 |
| 3-5 一般函数的均值及方差的近似值·····                     | 136 |
| 一、一维随机变量函数·····                             | 136 |
| 二、 $n$ 维随机变量函数·····                         | 140 |
| 三、切贝雪夫(Chebyshev) 不等式的应用·····               | 148 |
| 3-6 基本随机变量的统计数据·····                        | 150 |
| <b>第四章 零件可靠度计算的基本方法</b> ·····               | 155 |
| 4-1 应力-强度干涉模型法·····                         | 155 |
| 一、基本概念·····                                 | 155 |
| 二、失效概率(干涉概率)的确定方法·····                      | 158 |
| 4-2 几种常用分布的可靠度计算·····                       | 161 |
| 一、应力、强度均为正态分布时的可靠度计算·····                   | 161 |
| 二、应力、强度均为对数正态分布时的可靠度计算·····                 | 166 |
| 三、应力、强度均为威布尔分布时的可靠度计算·····                  | 171 |
| 四、应力为正态分布、强度为威布尔分布时的可靠度计算·····              | 175 |
| 五、应力为指数分布、强度为正态分布时的可靠度计算·····               | 179 |
| 六、应力为伽玛( $\Gamma$ )分布、强度为正态分布时的可靠度计算·····   | 180 |
| 七、应力为 I 型极大值分布、强度为 I 型极小值分布时的可靠度<br>计算····· | 181 |
| 八、应力为 I 型极大值分布、强度为威布尔分布时的可靠度计算·····         | 182 |
| 九、应力为瑞利(Ragleigh)分布、强度为正态分布时的可靠度<br>计算····· | 182 |
| 4-3 用蒙特卡罗(Monte Carlo)法求应力、强度的干涉解·····      | 188 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 4-4 按等效正态分布法计算零件的可靠度 .....                  | 186 |
| 一、极限状态的概念 .....                             | 186 |
| 二、极限状态方程中只有两个正态随机变量的情况 .....                | 187 |
| 三、极限状态方程中有多个正态随机变量的情况 .....                 | 189 |
| 四、极限状态方程中有非正态随机变量的情况(等效正态分布法) .....         | 192 |
| 五、计算安全指标 $\beta$ 的框图 .....                  | 194 |
| 4-5 可靠度计算中的安全指标及载荷粗糙度 .....                 | 203 |
| 一、安全指标及载荷粗糙度 .....                          | 203 |
| 二、安全指标、载荷粗糙度与可靠度的关系 .....                   | 206 |
| 4-6 可靠度的置信区间 .....                          | 207 |
| <b>第五章 零件疲劳强度的可靠度计算</b> .....               | 211 |
| 5-1 全概率疲劳曲线( $P$ - $\sigma$ - $N$ 曲线) ..... | 211 |
| 5-2 零件疲劳极限的中值及变异系数 .....                    | 214 |
| 5-3 分布化的疲劳极限应力图 .....                       | 224 |
| 一、根据分布化的极限应力图建立疲劳强度的可靠度模型 .....             | 226 |
| 二、近似的分布化极限应力曲线 .....                        | 231 |
| 5-4 稳定变应力下疲劳强度的可靠度计算 .....                  | 242 |
| 5-5 规律性的非稳定变应力下的零件可靠度 .....                 | 255 |
| 一、根据疲劳损伤线性累积假说计算疲劳寿命的可靠度 .....              | 257 |
| 二、疲劳寿命可靠度的顺序算法 .....                        | 262 |
| 三、零件的 $P$ - $\sigma_r$ - $N$ 曲线 .....       | 266 |
| 四、应力分量随机变化时复合应力状态下的疲劳寿命可靠度计算 .....          | 267 |
| <b>第六章 机械零件耐磨性的可靠度计算</b> .....              | 271 |
| 6-1 磨损的基本规律 .....                           | 271 |
| 6-2 给定工作寿命下零件耐磨性的可靠度计算 .....                | 275 |
| 6-3 给定可靠度下零件磨损寿命的计算 .....                   | 279 |
| <b>第七章 系统的可靠度</b> .....                     | 285 |
| 7-1 基本概念 .....                              | 285 |
| 7-2 串联系统的可靠度 .....                          | 287 |
| 一、复杂系统 .....                                | 289 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 三、串联系统与最薄弱环节模型 (串联链式模型)..... | 290 |
| 7-3 并联系统的可靠度.....            | 292 |
| 7-4 串并联系统的可靠度.....           | 294 |
| 7-5 系统的可靠度分配 .....           | 298 |
| 一、等分配法.....                  | 299 |
| 二、按相对失效率和重要度分配.....          | 299 |
| 三、按单元的复杂程度及重要度分配.....        | 302 |
| <b>第八章 安全系数与可靠度</b> .....    | 306 |
| 8-1 概述.....                  | 306 |
| 8-2 可靠性设计的定值安全系数.....        | 307 |
| 8-3 随机变量安全系数.....            | 315 |
| 一、均值安全系数.....                | 315 |
| 二、中值安全系数.....                | 321 |
| <b>第九章 零、部件的可靠性试验</b> .....  | 324 |
| 9-1 可靠性试验的目的及分类.....         | 324 |
| 9-2 可靠性加速试验.....             | 326 |
| 一、试验时间与环境应力的关系.....          | 327 |
| 二、样本容量与环境应力的关系.....          | 329 |
| 三、样本容量与试验时间的关系.....          | 333 |
| 四、可靠性加速试验实例.....             | 339 |
| 9-3 零、部件的分组最短寿命试验.....       | 343 |
| <b>第十章 螺纹联接的可靠性设计</b> .....  | 347 |
| 10-1 常用机械零件的可靠性设计概述.....     | 347 |
| 10-2 受轴向静载荷的紧螺栓联接的设计.....    | 349 |
| 一、强度随机变量的概率模型.....           | 349 |
| 二、应力随机变量的概率模型.....           | 352 |
| 10-3 受轴向变载荷的紧螺栓联接的设计.....    | 365 |
| 一、螺栓联接的疲劳试验及统计分析.....        | 366 |
| 二、螺栓联接的疲劳极限应力幅均值.....        | 375 |
| 三、螺栓联接的极限应力图.....            | 376 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 10-4        | 受横向载荷的普通紧螺栓联接的设计          | 381        |
| 10-5        | 承受剪切、挤压载荷的联接件的设计          | 387        |
| 一、          | 受静载荷的受剪螺栓联接的设计            | 387        |
| 二、          | 受变载荷的受剪螺栓联接的设计            | 389        |
| <b>第十一章</b> | <b>圆柱形压缩和拉伸螺旋弹簧的可靠性设计</b> | <b>394</b> |
| 11-1        | 圆柱压缩(拉伸)螺旋弹簧的静强度设计        | 394        |
| 一、          | 应力随机变量                    | 396        |
| 二、          | 静强度随机变量                   | 399        |
| 11-2        | 圆柱压缩(拉伸)螺旋弹簧的疲劳强度设计       | 407        |
| 一、          | 变应力随机变量                   | 407        |
| 二、          | 极限应力图                     | 408        |
| 三、          | 分布化的极限应力图                 | 411        |
| <b>第十二章</b> | <b>轴的可靠性设计</b>            | <b>416</b> |
| 12-1        | 心轴的可靠性设计                  | 416        |
| 12-2        | 传动轴的可靠性设计                 | 432        |
| 12-3        | 转轴强度的可靠性设计                | 442        |
| 12-4        | 轴的刚度的可靠性设计                | 453        |
| <b>第十三章</b> | <b>滚动轴承的可靠性</b>           | <b>460</b> |
| 13-1        | 轴承寿命的基本公式                 | 460        |
| 13-2        | 可靠性系数 $a_1$               | 461        |
| 13-3        | 材料系数 $a_2$ 及润滑系数 $a_3$    | 470        |
| <b>第十四章</b> | <b>渐开线圆柱齿轮强度的可靠度计算</b>    | <b>473</b> |
| 14-1        | 齿面接触应力计算                  | 473        |
| 14-2        | 齿面接触疲劳强度                  | 476        |
| 14-3        | 轮齿弯曲疲劳强度的可靠度计算            | 481        |
| 一、          | 齿根弯曲应力计算                  | 481        |
| 二、          | 齿根弯曲疲劳极限计算                | 482        |
| 14-4        | 齿轮减速器的可靠性优化设计             | 491        |
| <b>附表 1</b> | <b>正态分布表</b>              | <b>500</b> |

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 附表 1-A | 标准正态分布的纵坐标表          | 508 |
| 附表 2   | 中位秩表                 | 510 |
| 附表 3   | 10% 和 90% 秩置信限       | 511 |
| 附表 4   | 5% 和 95% 秩置信限        | 513 |
| 附表 5   | $t$ 分布表              | 515 |
| 附表 6   | $\chi^2$ 分布表         | 516 |
| 附表 7   | 正态分布容许限 $k$ 表        | 518 |
| 附表 8   | $\Gamma$ 函数表         | 528 |
| 附表 9   | 应力为正态分布及强度为威布尔分布的可靠度 | 522 |
| 主要参考文献 |                      | 529 |

# 第一章 机械可靠性设计概论

## 1-1 概 述

近代科学技术的迅速发展,要求机器制造业不断提供更加完善、更加现代化的机器设备。因为,一切工业产品最终都要具体化为“硬件”,而实现“硬件化”必须使用各种各样的机器设备。为了满足社会发展和市场竞争的需求,机械设备作为一种社会化的生产工具,其功能水平及自动化程度愈来愈高,结构及组成愈来愈复杂。众所周知,机器发生故障的可能性随着机器的零、部件数量的增加而增大。换言之,自动化、复杂化使机械设计人员面临着一个重要的问题:如何提高和保证机械产品的可靠性。

可靠性作为机械产品的性能特征,它表示产品在规定的工作条件下及规定的使用期限内保持规定质量指标的能力。尽管我们引用的可靠性只是一个抽象的名词,缺少数量的概念,但是人们却易于理解。因为人们总是希望所用的产品,从复杂的机器和电子设备直到简单的家用电器和机械,能有效可靠地工作。显然,不可靠或可靠性差的产品是不能在规定条件下有效地完成预期的工作的,就机器而言,无论是个别零、部件的损伤,或者由于功能水平下降到允许水平之下而造成停机,都可能带来巨大的经济损失,甚至造成灾难性的后果。即使在工业发达的国家,也常因机械设备的可靠性不符合技术要求而遭受重大的损失,这类例子屡见不鲜。

可靠性问题是个综合性问题,它与机器的设计、制造以及使用等各个阶段紧密相关。每个阶段都在为创造最经济而又具有一定

要求的可靠性水平的机器而努力。设计阶段为产品的可靠性水平奠定基础,因为,机器的可靠性取决于机器和零部件的结构、材料、各种安全保护措施、润滑系统以及维修的适应性等因素。制造和使用阶段保证了机器可靠性设计指标的实现。经验证明,在设计、制造和使用三个阶段中,设计决定了产品的可靠性水平,即产品的固有可靠度,而制造和使用对提高机器的可靠性指标,虽然也有积极的影响,但其主要的任务是保证产品可靠性指标的实现。因此,产品可靠性设计的重要性就不言而喻了。

50年代以来,由于军事、宇航及电子设备的迅速发展,其复杂程度及功能水平大大超过了人们的预料。高性能电子设备的复杂化,导致故障率增加,美国和苏联在航天事业中,也曾由于电子元件失灵而付出了昂贵的代价。因此,电子产品的可靠性问题引起了一些工业发达国家的高度重视。他们集中了大量人力、物力、财力进行了系统的理论和试验研究。目前,无论在理论上或实践上都取得了显著的成就,例如,电子基础产品的平均使用失效率可达到  $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-12}$  (1/小时)数量级水平。随着电子产品可靠性问题的深入研究和不断解决,机械产品的可靠性问题就日趋突出了,所以,60年代末,机械产品的可靠性设计问题已引起设计人员的广泛重视,并开始在机械设计中应用。

可靠性从一个模糊的定性概念逐渐发展为以概率统计为基础的定量概念——可靠度或失效概率,它可以被计算、检验和证明,从而在工程设计中得到应用,这是设计经验积累和技术进步要求产品系列化、标准化的必然结果。

工程设计中应用可靠性概念,始于30年代后期。当时主要用于结构力学中进行工程结构静强度的破坏概率计算。随后,在材料的疲劳破坏理论和强度试验中引入了失效概率概念和概率统计方法,取得了很大的进展。从可靠性设计的观点来看,材料疲劳强



度方面的重要成就有:制订了疲劳验试数据的统计处理方法,从而可以作出材料的全概率疲劳曲线;提出了“薄弱环节”强度模型和明确材料疲劳寿命的分布函数;将疲劳过程作为随机过程,说明损伤累积是非线性的;发展了断裂力学的新分支——概率断裂力学。材料疲劳强度方面的成就,为机械零件的强度可靠性设计提供了理论和试验基础。

在通用零件方面,滚动轴承的批量大、工艺成熟,最早引用了可靠性概念,制定了额定寿命的可靠性指标并付诸实用。在齿轮传动方面,一些齿轮强度计算标准(如:AGMA180, ISO/TC60/WG6(199E, 200E), ГОСТ21354—75, GB3480—83等)都相继引进了可靠性指标。此外,在国外的一些机械设计教科书中,已把应力-强度干涉模型作为一种基本的教学内容,这些都是可靠性技术在机械零、部件设计中的新发展。

随着人们对机械零件失效机理认识的逐步深化,以及对机械零件随机失效规律的初步掌握,在这基础上建立了机械产品的可靠度计算模型。计算模型的建立为机械可靠性设计提供了理论基础,标志着机械可靠性设计已进入实用阶段。随着企业质量管理水平的提高,有关机械零、部件可靠性数据的不断积累和整理,机械可靠性设计将得到更为广泛的应用和重视。

正如参考文献[7]所指出的那样,在目前的机械可靠性设计方法中,往往出现不加分析地将电子产品的计算方法用于机器制造,忽略了那些计算方法仅仅反映了电子产品这个特定对象的特性,诸如:电子元件是大批量生产的;更换失效元件方便;在不同的电子设备中采用大量相同的元件;可以大量储备备用元件;工作无故障概率要求很高;可以采用冗余系统等等。对机械零、部件而言,一般不具备电子产品的上述特点,因此,不能机械地照搬电子产品的可靠性理论和试验方法。