

机械强度的可靠性设计

徐 灏 编 著



机 械 工 业 出 版 社

机械强度的可靠性设计

徐 灏 编 著



机 械 工 业 出 版 社

本书介绍了可靠性设计的概貌。系统地讲述了机械强度可靠性设计的原理，静强度的可靠性设计和疲劳强度的可靠性设计。书中有例题，书末有附表。

本书主要供工厂和设计院的机械设计人员阅读，也可供高等院校机械系师生参考。

机械强度的可靠性设计

徐 灏 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{3}{4}$ · 字数 189 千字

1984 年 2 月北京第一版·1984 年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001-18,500 · 定价 1.10 元

*

统一书号：15033·5467

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。如何提高机械产品的可靠性，首先应从设计上满足可靠性的要求，然后在制造中采用质量控制加以保证。

机械设计的发展历史，从类比法到静强度设计，虽然在分析方法上引入了数学力学的知识，但是把载荷简化成静止不动，与大多数机械的失效是不符合的。事实上，机械设备的断裂事故，几乎 80% 是属于疲劳破坏。为了解决静载荷假设与实际不符的矛盾，五十年代的机械设计中，一般采用两种办法。一是在载荷中引入动载系数，二是加大安全系数。这种处理办法往往使所设计的机械尺寸过大，成为“傻大黑粗”的产品。既然绝大多数机械受的是动载荷，疲劳是主要的破坏形式，所以国外很多机械，规定必须要用疲劳强度设计。由于疲劳强度计算的出发点是局部应力，疲劳裂纹首先在应力最高部位产生。因此，只要设法将局部应力的峰值降低或使材料的局部的疲劳极限提高，就能达到减轻重量提高寿命的目的。这可以采取改进零部件的几何形状或采用强化工艺等措施。因此，推广疲劳强度设计方法，可以促使某些落后的机械产品达到更新换代的目的。

但是常规的疲劳强度设计，没有将载荷、材料的疲劳性能、零部件的尺寸等数据，作为有分散性的随机统计量来处理，而是用安全系数来考虑数据的分散性和其它不确切的因素，并且这个安全系数主要是凭设计者的经验来确定，所以

使所设计的机械零部件，有可能偏于危险，也有可能偏于保守。就是说，根据不同的设计人员的经验，答案可能很多，说不清那种设计是最佳的。而疲劳强度的可靠性设计，由于考虑了工作应力和强度数据的分散性，就能将零部件在规定寿命运行过程中的破坏概率，限制在某一给定的很小值下，使零部件的重量做到恰到好处的减轻。对于承受载荷变化不大的零部件，可用静强度可靠性设计来处理。

可靠性设计是一种新的设计方法，它的应用已越来越广泛。如反复进行可靠性计算，就可能得到可靠耐用的最佳结构，所以它也是优化设计的一个主要的组成部分。本书仅限于机械强度方面的可靠性设计。凡是具有大学水平从事机械设计的工程技术人员，都能看懂本书。本书所用的数理统计知识很少，对涉及到的内容，书中作了简明扼要的叙述。有关安全系数及疲劳强度常规设计知识，可参阅作者另两本书《安全系数和许用应力》〔29〕和《疲劳强度设计》〔21〕。

本书是为广大的机械设计人员所编写的，也可作为高等院校机械设计类型专业的广大教师和学生的参考书。

最后，本书摘引了国内外资料中的一些原始试验数据，作者对此进行了整理和加工。对提供试验数据的单位和个人，在此一并致谢。

徐 灏

1981年4月

采用符号

- f —— 密度函数
 F —— 失效概率
 K_σ —— 有效应力集中系数
MTBF —— 平均故障间隔
MTTF —— 失效前平均时间
 n —— 子样容量, 安全系数
 n_e —— 有效子样容量
 N —— 以循环数计算的寿命
 P —— 概率, 力, 载荷
 q —— 应力集中敏感系数
 $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ —— 循环不对称系数 (或称应力比)
 R —— 可靠度
 R' —— 考虑置信水平下的可靠度
 s —— 子样的标准离差
 s^2 —— 子样的方差
 s_σ —— 应力幅的标准离差
 s_l —— 应力 (载荷) 的标准离差
 s_m —— 平均应力的标准离差
 s_r —— 不对称系数为 r 的疲劳极限的标准离差
 s_s —— 强度的标准离差
 $s_{\bar{x}}$ —— 子样均值 $\bar{x}$ 的标准离差
 $s_{\bar{x}}^2$ —— 子样均值 $\bar{x}$ 的方差
 t° —— 威布尔分布的尺度参数
 t_α —— 风险为 α 的 t 分布的置信极限
 u_p —— 标准正态偏量

X

- $\bar{x}$ ——子样的均值
- $\bar{\bar{x}}$ ——子样均值的均值
- x_l ——应力（载荷）变量
- $\bar{x}_l$ ——应力的均值
- x_s ——强度变量
- $\bar{x}_s$ ——强度的均值
- z ——可靠度系数
- α ——生产者的风险，威布尔分布的尺度参数
- α_0 ——理论应力集中系数
- β ——使用者的风险，威布尔分布的形状参数，表面系数
- γ ——威布尔分布的位置参数
- δ ——强度与应力的差数
- ϵ ——尺寸系数
- λ ——失效率
- μ ——母体的均值
- $\hat{\mu}$ ——母体均值的估值
- ν ——自由度，频数
- ν^* ——有效自由度
- σ ——母体的标准离差
- $\hat{\sigma}$ ——母体标准离差的估值
- σ^2 ——母体的方差
- $\hat{\sigma}^2$ ——母体方差的估值
- σ_a ——应力幅
- σ_b ——材料的强度极限
- σ_m ——平均应力
- σ_{max} ——最大应力
- σ_{min} ——最小应力
- σ_r ——不对称系数为 r 的疲劳极限
- σ_s ——材料的屈服极限
- σ_{-1} ——对称循环 ($r = -1$) 的疲劳极限

目 录

前言

采用符号

第一章 绪论	1
第一节 可靠性概念	1
1 引言	1
2 可靠性技术	2
3 衡量可靠性的尺度	5
第二节 可靠性设计的概念	8
第二章 统计分析的基础知识	11
第一节 概率	11
1 随机变量	11
2 概率的概念	13
3 概率的运算法则	14
第二节 母体、个体和子样	16
第三节 集中趋势的度量	18
1 均值	18
2 中值	20
第四节 分散性的度量	21
1 分散性	21
2 分散性的尺度	24
3 标准离差的计算	27
第五节 正态分布的概率密度函数	34
第六节 抽样分布	37
1 t 分布	39
2 χ^2 分布	47

3 F 分布	51
第三章 可靠性设计中常用的函数	56
第一节 可靠度函数	56
第二节 指数分布	59
第三节 正态分布	61
1 标准正态偏量	61
2 正态概率坐标纸	63
3 正态分布的可靠度	67
4 对数正态分布	68
第四节 威布尔分布	77
1 威布尔分布函数	77
2 威布尔分布的参数	82
3 威布尔概率坐标纸	84
第五节 正态分布函数的代数运算	96
1 两个正态分布函数的加法	97
2 两个正态分布函数的减法	98
3 两个正态分布函数的乘法	99
4 两个正态分布函数的除法	102
5 正态分布函数的立方	104
第四章 静强度的可靠性设计	107
第一节 材料的静强度分布	107
第二节 可靠性设计理论	115
第三节 拉杆的静强度可靠性计算	123
第四节 梁的静强度可靠性计算	131
1 求支座反作用力	131
2 求最大弯曲应力	132
第五节 扭转圆杆的静强度可靠性计算	139
第六节 转轴的静强度可靠性计算	141
第五章 疲劳强度的可靠性设计	147
第一节 工作载荷计数法	147

1 穿级计数法	149
2 峰值计数法	151
3 振程计数法	153
4 振程对计数法	154
5 雨流法	156
第二节 给定寿命下的材料强度分布	162
1 疲劳试验方法	162
2 金属材料的疲劳极限的统计数据	170
第三节 疲劳极限线图	186
第四节 疲劳强度的可靠性计算	191
1 强度的修正系数	191
2 零部件的疲劳极限	197
3 疲劳强度的可靠性设计	203
第五节 应力是威布尔分布、强度是正态分布的可靠性 计算	221
第六节 顺序加载的疲劳强度的可靠度计算	225
1 常规疲劳的有限寿命设计	225
2 疲劳强度可靠性设计的递推法	228
第七节 疲劳强度可靠性设计确定安全系数	232
第六章 可靠度的置信水平	235
第一节 子样均值 $\bar{x}$ 的分布	235
第二节 假设检验	240
1 t 检验	241
2 似然 t 统计量	244
第三节 考虑置信水平下的可靠度	246
附录	
附表一 t 分布值	250
附表二 χ^2 分布的分位数	252
附表三 χ^2/ν 分布的分位数	254

附表四	F 分布值 ($\alpha = 0.10$)	256
附表五	F 分布值 ($\alpha = 0.05$)	258
附表六	F 分布值 ($\alpha = 0.025$)	260
附表七	F 分布值 ($\alpha = 0.01$)	262
附表八	F 分布值 ($\alpha = 0.005$)	264
参考文献		266

第一章 绪 论

第一节 可靠性概念

1 引言

评价一种机械产品的质量好坏，可以从技术性能、经济指标和可靠性三方面来考虑。机械产品的技术性能，是指产品的功能、制造和运行状况的一切性能。例如，载重汽车的载重量和耗油量等是载重汽车的主要的技术性能；金属切削机床的加工范围、加工质量的稳定性和生产率等是金属切削机床的主要的技术性能等。经济指标是指机械产品在科研、设计、制造及运行中的费用，如研制投资费用、使用维修费用等。可靠性是指机械产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。所以说，机械产品的可靠性，是衡量机械产品质量的一个重要的指标。

我们买一辆自行车，总希望自行车在骑的过程中，不要有掉链、损坏滚珠或断轴等事故发生，这些事故称为“故障”。故障越少的自行车，骑起来越安全可靠，不会因在半路出故障而上班晚点。常常听人议论，这种自行车比那种自行车经久耐用，这是人们对两种自行车的可靠性的比较，可靠性的这种讲法仅是定性的，没有包括数值量度。

在工程上开始定量的可靠性的研究，是在第二次世界大战时从飞机上及雷达上所用的真空管常出故障引起的。当时是二次世界大战正激烈的时期，美国在远东的军用飞机很多不能起飞，原因是真空管出了故障。这些真空管是按图纸制

造的，每一步都经过了严格的检查，完全符合出厂指标，所以作了这样的推论：真空管的事故，是因为在真空管的设计、制造和检查技术中，没有考虑可靠性的结果。由于真空管出现故障，就最先提出了对产品可靠性的要求。但是，对可靠性作系统的研究，是从1950年开始的。当时美国国防部组成了研究电子设备可靠性的专门机构，1957年发表了研究报告，包括生产和试制时的可靠性测定值，标准规范的编制方法等，范围极广。总的来讲，可靠性研究的发展过程，是从军用发展到民用，从小的真空管发展到大型设备。

1960年美国阿波罗登月火箭发射成功，其成功的关键之一是采用了可靠性技术。在完成了对可靠性技术基础的研究后，又从设计和使用的角度来考虑实现预期的可靠性，以及从经济上考虑维护性和成本效用等。到1970年，先进的工业国家已将可靠性技术应用于很多民用的机械产品，从制造厂到整个社会，产品的可靠性受到了极大重视。例如，用户对产品提出三点要求：即质量好，价低廉，交货快。以载重汽车为例，从前只要求装上货物能够完成运输的功能就行，而现在要求它不仅能够运输，而且要求能无故障运行二十万公里，即它必须具有无故障运行的可靠性，才能算是质量好的产品。关于价低廉，从前是指用户买产品时一次付出的买价少，而现在还要包括使用时所付出的维修费少。因此，只有具有可靠性好的产品才是廉价的产品，而廉价的产品必须是具有可靠性好的产品。可见，可靠性在产品的设计、制造和使用中，具有十分重要的意义。

2 可靠性技术

在讲可靠性技术之前，先看一个例子。例如我们说：这个千斤顶在汽车修理中长期使用不会压坏。这句话有四层含

义：（1）使用的是千斤顶，指机械产品；（2）在汽车修理厂中使用，指使用条件；（3）长期使用，指时间；（4）千斤顶不会压坏，指完成规定功能的能力。因此，可靠性可以定义为：产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

可靠性技术的研究对象——产品，可以是一个零件，也可以是由许多零件装配而成的机器，或由许多机器（包括主机和辅机）组成的机组和成套设备（以下简称系统）。所以讨论可靠性时，包括了系统、机器和零部件在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

各种产品的使用寿命都是有限的，在使用中会不断磨损、产生裂纹或老化，以致发生故障。发生故障的产品有两种情形：一种是产品发生故障后就报废；另一种是发生故障后还可以修复，继续使用。前者叫做不可修复品，后者叫做可修复品。一般将不可修复品的可靠性叫做狭义可靠性，将可修复品的可靠性叫做广义可靠性。

为制造尽可能少发生故障的产品所采用的一切方法，和在运行中为避免故障的发生所采取的一切措施，都可以叫做可靠性技术。也就是说，在产品的研究、设计、制造、运输、安装、使用和维修等各个环节，都既有造成故障的可能，也有发现故障的原因和给予改善的可能。所以每个环节都需要有可靠性技术。

根据以往的经验，产品的可靠性主要决定于研究和设计阶段，其中包括生产中的质量控制设计及使用维护规程的设计。至于以后的各个阶段，则存在有使可靠性下降的因素，而提高可靠性的因素则不多。此外，随着科学技术的发展，产品被淘汰的速度也加快，因此，研究新产品的速度必须加

快。这样，想通过对试制样品做长时间的使用试验之后再修改设计，就难以达到这个要求了。为此要求在设计阶段，就把可靠性考虑进去。

在设计和制造中所保持的产品的可靠性，叫做产品的固有可靠性，属于狭义可靠性。对于可以修复的产品，还需要考虑其维护性。维护性的定义是指：为了保持某种产品的可靠性而采取的措施。它包含有下面三层意义：（1）维护的对象是可以修复的产品，如轧钢机、汽车、船舶和飞机等，不可修复的产品不能成为维护的对象；（2）维护的目的是为了维护产品的可靠性，使被维护的对象能恢复到无故障运行的状态；（3）维护的措施是实际的维修工作，其中包括检查、修理、调整和更换零部件等，即从防止故障到排除故障，直到使设备重新恢复功能为止。

设计的产品是否易于维修，取决于从事维修工作者技术水平的高低，维修用的备件状况和设备状况。这是维修工作的三项条件，它们是相互关联的，并且直接影响维修的效果，因为维修的关键是如何更快的修复。

维护性技术的出现比可靠性技术的出现晚。到本世纪六十年代初期，才开始研究具体的维护性评价和具体的设计方法。设备经实际使用后所体现出来的可靠性，称为使用可靠性，它包括维护性在内。所以也可以这样说：狭义可靠性加上可维护性，等于广义可靠性。在可靠性技术中，常用的就是这种广义可靠性，即产品的使用可靠性。

使用可靠性是受维修方法的制约的。特别像运输机和规模很大的生产设备，其维修工作量是很大的，因而受维修方法的影响也就更大。据美国 1959 年的统计，当时美国国防预算的 25% 是用于维修的开支，两年中花在设备维护上的

费用，与用于采购设备的款项几乎相等。因此，与其着眼于设备的采购费用，不如着眼于以后的设备保养维修费用，即设备寿命维持费。从这一分析得出结论，维护性与经济性有关。

图 1-1 描述了可靠性与费用的关系。图中横坐标的可靠性包括维护性在内的可靠性。曲线 1 为研制投资费用，曲线 2 为使用费用，包括使用和维修费用，及因偶然事故而停工的损失，维修费用以虚曲线 3 表示，曲线 4 为曲线 1 和 2 之和，为总成本。由图可以看出，产品

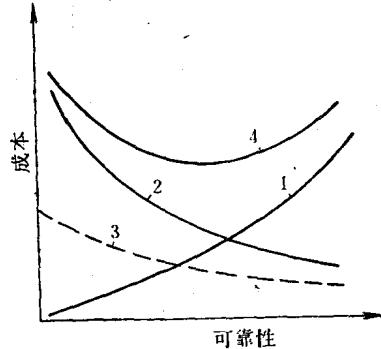


图 1-1 可靠性与费用的关系曲线

1—研制投资费用 2—使用费用
3—维修费用 4—总成本

可靠性的提高，要导致购买费用（投资费用）增加，但使用费用（包括维修费用）却随着可靠性的提高而降低。反之，如可靠性降低，就必然导致使用费用大大增加，甚至造成报废，在经济上造成极大损失。在某一可靠性的数值下，存在着总费用的极小值，这是价值上的最佳点。

3 衡量可靠性的尺度

可靠性在工程上应用时，需要用量来表示。衡量可靠性的尺度有二：即概率指标和寿命指标。可靠性用概率表示时称为可靠度，即完成功能的概率。反之，完不成规定功能的概率，就叫做不可靠度，或称故障概率或失效概率或破坏概率。可靠性的寿命指标有平均故障间隔（MTBF）和失效前平均时间（MTTF）。

(1) 可靠度 可靠度就是产品在规定时间内在规定的使用条件下, 无故障地完成规定功能的概率。可靠度的这个定义, 应明确下列诸要点: (a) 可靠性问题的对象是什么? 是零部件, 还是设备, 还是系统, 还是人机都在内的大系统。(b) 这些对象 (零部件、设备或系统) 的功能是什么? 丧失功能 (即发生故障) 是如何定义的。例如在一个复杂的设备中, 如有一个对全局无大影响的零件损坏了, 设备勉强可以运行, 这时, 就设备而言, 就可以不算是故障。故障的定义是很难下的, 有时还涉及制造单位与使用单位的责任界限划分问题。(c) 关于时间的规定。时间随对象而有所不同, 有的要求在几十年后仍发挥作用, 有的只要求保证在极短时间内发挥作用, 有的要求在存放期间性能不下降等等。(d) 关于使用条件的规定。除了温度、湿度、气压、冲击、振动和腐蚀环境等条件外, 操作方法和维护方法, 对设备或系统的可靠性都有很大影响, 都应具体指明。(e) 可靠度用概率表示, 如可靠度为 99.9% 或 99.99% 等。

由于把抽象的可靠性用概率形式表示后, 在技术上有了衡量可靠性程度的统一明确的尺度, 使产品的可靠程度的测量、比较、选择、保证和管理等有了基础。现在, 对产品预测故障, 预测运行时间等工作已进入实用阶段, 这是由于采用了概率这一概念的结果。

(2) 失效率 失效率是指产品工作到某一时刻时, 在单位时间内发生故障的概率。典型的失效率曲线如图 1-2 所示。图中区域 I 为早期失效期, 区域 II 为偶然失效期, 区域 III 为耗损失效期。 λ_1 为规定的失效率, 由此得到使用寿命。

在早期失效期 I 中, 产品因在设计和制造工艺上的缺陷等因素而导致失效。如原材料有缺陷, 制造工艺措施不当,