

可靠性

在机械强度设计和 寿命估计中的应用

凌树森 编著



宇航出版社

可靠性在机械强度设计 和寿命估计中的应用

凌树森 编著

宇航出版社

内 容 提 要

本书系统、全面地介绍了可靠性理论在机械产品设计和疲劳寿命估计中的应用。全书共八章。内容包括：可靠性的基本概念和数学基础，静强度的可靠性设计，机械零部件疲劳强度的可靠性设计，零部件疲劳寿命的可靠性估计，概率设计的工程方法，安全系数的统计分析，概率断裂力学——带裂纹零部件的可靠性设计和巴叶斯理论及工程中不确定性的估计。

各章均有带启发性的实用例题，并附了参考文献。

本书可供高等学校力学、机械、航空、造船和汽车等专业的高年级学生和研究生使用，也可作为工程设计人员和有关专业科技人员的参考书。

可靠性在机械强度设计和寿命估计中的应用

凌树森 编著

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京科技印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/32 印张：16.125 字数：375 千字

1988 年 6 月第 1 版第一次印刷 印数：1-5500 册

定价：4.80 元

ISBN 7-80034-090-2/TB·028

前 言

可靠性理论是一门新兴的学科,它是在解决电子元件(或机械零件)和设备失效问题中生长起来的。

为了阐述可靠性理论在机械产品的强度设计和疲劳寿命估计中的应用,本书安排了下述内容:

第一章可靠性的基本概念和数学基础,介绍了各种可靠性指标的统计定义及其相互关系,以及进行可靠性设计所需的基本概率运算方法。第二章介绍了静载荷作用下的机械零件的可靠性设计方法。

鉴于机械零部件承受的载荷多半是交变载荷,这时疲劳问题就显得特别突出。常规的疲劳设计方法因没有考虑设计变量的随机性,从而与实际结果有一定的差距。为此,对疲劳强度进行可靠性设计和对疲劳寿命进行可靠性估计就具有重要的实用意义。本书的第三章和第四章分别地讨论了这两个问题。

工程结构(或称建筑结构)的可靠性设计,目前已进入了工程实用阶段,并初步形成了一套设计的程式。为了借鉴,本书第五章特地介绍了概率设计的工程方法。

在机械产品中,缺陷和裂纹往往是不可避免的,本书把载荷、裂纹和材料的断裂韧性都看作随机变量,从而对带裂纹零部件进行可靠性设计,这就是第七章概率断裂力学介绍的内容。

在机械产品的设计中,安全系数和不确定性是两个重要

的问题。如何对这两个概念进行概率分析，这不但具有理论意义还具有重要的应用价值。本书第六章安全系数的统计分析和第八章巴叶斯理论和工程中不确定性的估计，就这两个问题作了讨论，希望引起读者的注意。

可靠性理论还在发展，它在机械产品中的应用还有许多问题要解决。作为入门教材，本书如能在推进我国机械产品可靠性设计方面有所贡献的话，我将感到无限的欣慰。当然，由于我的水平和阅历的限制，书中的缺点和错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

最后，本书在选择例题、计算、制图和抄写等工作中，得到朱莉珍、凌波和丁奇英等同志的帮助和配合，谨致谢意。

凌树森

1986年2月

目 录

第一章 可靠性的基本概念和数学基础	1
1.1 可靠性的基本概念、内容和方法	1
1.1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.2 可靠性问题的提出(历史背景)	2
1.1.3 可靠性的工作范围和内容	4
1.1.4 可靠性的研究方法	5
1.2 产品可靠性指标的定义	6
1.2.1 可靠性的定义	6
1.2.2 可靠性的各种统计指标	7
1.2.3 可靠性指标间的关系	17
1.2.4 产品的失效规律及类型	19
1.3 设计变量的统计处理	22
1.3.1 手册或文献中数据的摘引	22
1.3.2 设计变量作为随机变量时的代数运算方法	23
1.4 可靠度(或失效概率)的计算方法	32
1.4.1 强度和应力为任意分布时可靠度的计算(强度-应力干涉理论)	32
1.4.2 强度和应力均为正态分布和对数正态分布时可靠度的计算	37
1.4.3 几种特定分布下可靠度的计算	51
1.4.4 经验分布的作图法	58
参考文献	65
第二章 静强度的可靠性设计	67
2.1 载荷的统计分析	68

2.1.1 静载荷与动载荷	68
2.1.2 载荷与载荷效应	70
2.1.3 载荷的统计方法	73
2.1.4 载荷的组合问题	79
2.2 抗力的统计分析	82
2.2.1 计算强度和材料强度系数	82
2.2.2 单一材料构件抗力 R 的统计分析	83
2.2.3 材料静强度的概率分布	85
2.3 零部件静强度的可靠性设计	112
2.3.1 拉杆的可靠性设计	113
2.3.2 梁的可靠性设计	118
2.3.3 轴的可靠性设计	125
2.3.4 压力容器的可靠性设计	134
参考文献	138
第三章 机械零部件疲劳强度的可靠性设计和分析	140
3.1 载荷的统计	140
3.1.1 疲劳载荷的形式	140
3.1.2 随机载荷的统计分析	142
3.1.3 载荷谱	147
3.2 给定寿命下的疲劳强度分布	150
3.2.1 由 $P-N$ 实验得到 $P-S-N$ 曲线从而得到 $P-S$ 的方法	151
3.2.2 由升降法直接测 $P-S$ 的方法	155
3.3 材料疲劳强度的统计数据	157
3.4 疲劳极限线图	199
3.5 零部件疲劳强度的统计分布	204
3.5.1 三个修正系数的统计值	204
3.5.2 零部件的疲劳极限	210
3.6 拉杆的疲劳可靠性设计计算	215
3.7 轴的疲劳可靠性设计计算	219
3.8 压力容器疲劳强度的可靠性计算	229

3.9 某飞机前起落架旋转臂分模面的疲劳可靠性计算	233
3.10 疲劳剩余强度 R 的确定方法	237
3.10.1 引言	237
3.10.2 疲劳过程的剩余强度的考虑	242
3.10.3 $P-R-S-N$ 曲线的作法	247
3.10.4 多级载荷下 $P-R-S-N$ 曲线的作法及寿命估计	257
参考文献	260
第四章 零部件疲劳寿命的可靠性预测	261
4.1 疲劳寿命预测的重要性	261
4.1.1 工程设计方面	261
4.1.2 制定检修计划	265
4.1.3 制定验收标准	266
4.1.4 其他方面	266
4.2 等幅交变载荷下疲劳强度和寿命的可靠性预测	266
4.2.1 等幅交变载荷下零部件的疲劳寿命及可靠度	266
4.2.2 等幅交变载荷下零部件的疲劳强度及可靠度	273
4.2.3 滚动轴承的强度和寿命的可靠性预测	278
4.3 多级载荷下疲劳强度和寿命的预测	285
4.3.1 载荷(应力)累积频次分布图	285
4.3.2 疲劳累积损伤理论	286
4.3.3 用程序载荷谱估计疲劳寿命	293
4.3.4 疲劳寿命可靠性估计的递推法	299
4.4 随机疲劳的寿命估计	303
4.4.1 引言	303
4.4.2 随机载荷下疲劳寿命估计的流程图和方法	306
4.4.3 相当应力法	313
4.4.4 局部应力-应变法	319
4.4.5 功率谱法	343
参考文献	349
第五章 概率设计的工程方法	351

5.1 中心点法	353
5.1.1 极限状态	353
5.1.2 可靠指标	354
5.1.3 分离函数和分项系数	356
5.2 验算点法	359
5.2.1 方法的特点和内容	359
5.2.2 两个正态分布的情况	361
5.2.3 多个正态变量的情况	364
5.2.4 基本变量为非正态分布的情况	372
参考文献	382
第六章 安全系数的统计分析	383
6.1 强度安全系数的统计分析	383
6.1.1 经典意义下的安全系数	383
6.1.2 可靠性意义下的安全系数	384
6.1.3 安全系数与可靠度的关系	387
6.1.4 可靠性安全系数的应用	389
6.1.5 安全系数的统计分析方法	394
6.1.6 安全系数统计分析的近似方法	397
6.2 疲劳寿命安全系数-散布因子的确定方法	405
6.2.1 飞机结构疲劳寿命设计问题的提出	405
6.2.2 YS-11 运输机安全寿命的确定	408
6.2.3 修正的散布因子 (<i>Revised Scatter Factor</i>)	411
参考文献	416
第七章 概率断裂力学——带裂纹零部件的可靠性设计和分 析	418
7.1 引言	418
7.1.1 断裂力学的作用	418
7.1.2 存在的问题	418
7.1.3 概率断裂力学(PFM)的内容和方法	419

7.2 概率断裂力学的统计基础	420
7.2.1 正态分布和对数正态分布下可靠度的计算方法	420
7.2.2 K_1 和 K_{1c} 为任意分布时可靠度的计算方法	421
7.2.3 断裂力学判据中概率方法的引入	422
7.2.4 概率断裂力学的一般统计基础	425
7.3 带裂纹零部件强度的可靠性设计和分析	427
7.3.1 PFM 在设计中的应用	427
7.3.2 简单的设计算例	429
7.3.3 PFM 在强度分析中的应用	435
7.4 带裂纹零部件疲劳寿命的可靠度计算	437
7.5 可靠性在材料和工艺选择中的应用	444
7.6 核压力容器的可靠性分析	454
7.6.1 问题的提出	454
7.6.2 概率模型	457
7.6.3 参数敏感性分析	459
7.6.4 应用实例	461
参考文献	464
第八章 工程中不确定性的巴叶斯估计	467
8.1 巴叶斯 (Bayes) 理论和公式	467
8.1.1 离散情况下的巴叶斯公式	467
8.1.2 连续情况下的巴叶斯公式	473
8.2 巴叶斯理论在可靠性设计中的应用	481
8.3 不确定性的来源和工程估计方法	485
8.3.1 不确定性的来源和分类	485
8.3.2 不确定性估计的工程方法	486
8.3.3 算例	489
参考文献	494
附录 本书有关的力学单位换算	495
表 1 力的单位换算表	495

表 2 力矩和扭矩的单位换算表.....	495
表 3 压力和应力的单位换算表.....	496
表 4 断裂韧性的单位换算表.....	497
符号说明	498

第一章 可靠性的基本概念和数学基础

1.1 可靠性的基本概念、内容和方法

1.1.1 可靠性的基本概念

反映产品质量的指标很多,对于出厂检验合格的产品来说,还有一个保持这些指标的数值而不致失效的问题,这就是产品的可靠性问题。因此,可靠性也是产品的一个质量指标,而且只有在引进了可靠性指标后,才能和其他质量指标一起,对产品质量作全面的评定。当然,可靠性问题的进一步含义还涉及到设备(或系统),当组成该设备(或系统)的元件或子系统的性能参数随时间而变化时,人们迫切需要了解这些变化对设备的影响,也即设备是否会失效,它的可靠性如何。从这个极粗略的引言中可以看出:

- (1) 产品的可靠性指标是与时间有关的一个参量;
- (2) 这个指标是与失效方式、失效定义有关的综合指标;
- (3) 产品的可靠性可分为“固有可靠性”及“使用可靠性”两种,前者决定于设计和生产,后者则与使用条件有关。

产品的质量指标都有一定的衡量方法,可靠性如何呢?用什么尺度来衡量产品的可靠性?怎样分析、研究和评价产品的可靠性?“产品不可靠的原因何在?怎样提高产品的可靠性?这些就是可靠性研究的内容,也是提高产品质量的努力方向。

1.1.2 可靠性问题的提出(历史背景)^[1]

1) 二十世纪 40~50 年代, 电子设备已渗透到军事及生产等各个领域, 其中大部分平时都是处于非工作状态, 由于时间一长往往都会失效. 据报导: 二次大战期间, 美国运到远东的航空设备有 60% 不能使用. 1949 年时有 70% 的航海无线电设备平时处于非工作状态, 其中 50% 在仓库中就失效了. 1950~1952 年间美国通讯设备中有 14% 处于非工作状态, 水声设备有 48% 处于非工作状态, 雷达有 84% 处于非工作状态, 如何保持它们的质量指标而不失效这个问题就提到日程上来了, 因此, 美国便开始研究电子元件和系统的可靠性问题.

2) 德国在第二次世界大战中, 由于研制 V-1 火箭的需要, 开始进行了可靠性工程的研究.

3) 电话通讯的发展, 也促进了可靠性理论的发展, 1876 年人类实现了第一次通话, 后于 1915 年正式建成第一条通讯线. 其后逐渐发展为上万条、10 万条、100 万条, 并进展到现在采用光导纤维, 这样就必须解决干扰问题. 可靠性理论也就在解决这类问题中得到了发展.

4) 随着航空航天事业的发展, 电子设备的元件数增多, 例如: 二十世纪 40 年代美国飞机上平均有电子元件 1000 多个;

50 年代 B-47 飞机平均有电子元件 2 万多个; B-52 飞机平均有电子元件 5 万多个;

60 年代 B-58 飞机平均有电子元件 9 万多个;

中程导弹上平均有电子元件 1~2 万个;

洲际导弹上平均有电子元件几十万个.

对串联系统来说,假定单个元件的可靠性为 99.5%,如果用 40 个元件串联起来,则可靠性降至 82%。假定我们要求某系统具有 $R = 95\%$ 的可靠性,而它是由 30 万个元件组成的串联系统,则要求每个元件的可靠性高达 $R = 99.9999\%$ 。所以一般地说系统复杂程度增加,它的可靠性往往会降低。

1957 年美国先锋号卫星就是由于一个 2 美元的元件失效,而造成 220 万美元的损失。

又如,1986 年 1 月 28 日,美国“挑战者号”航天飞机,就是因为火箭助推器内的橡胶密封垫圈因温度低而失效,结果引起航天飞机爆炸,造成了七名宇航员的全部遇难和重大的经济损失。

由此可见,可靠性问题是直接影响经济、生命、军事和政治等的大问题。鉴于这个原因各国都先后成立了相应的机构(研究机构、学会和协会),采取了对策,对可靠性理论作了广泛的研究。现今,比较重要的机构有:

(1) 国际电工委员会 (IEC): 1904 年成立,有 76 个技术委员会。其中有专门从事可靠性研究的委员会,于 1965 年在东京开会,统一了名词术语,制定了标准。

(2) 美国: 它是可靠性研究的策源地和中心。1905 年成立了海、陆、空三军的“国防部电子设备的可靠性专门工作组”,1952 年该工作组发表了报告(17 项建议)。同年又改名为“国防部电子设备可靠性顾问团 (AGREE)”。1957 年,AGREE 发表了“军用电子设备可靠性”的重要报告,被公认为是可靠性的奠基文献,一直沿用至今。1959 年该组织成员达 150~175 人。

与此同时,其他国家也相应成立了可靠性机构并开展了

许多工作。

1.1.3 可靠性的工作范围和内容

1) 可靠性与费用: 图 1-1 表示了可靠性与成本费用和

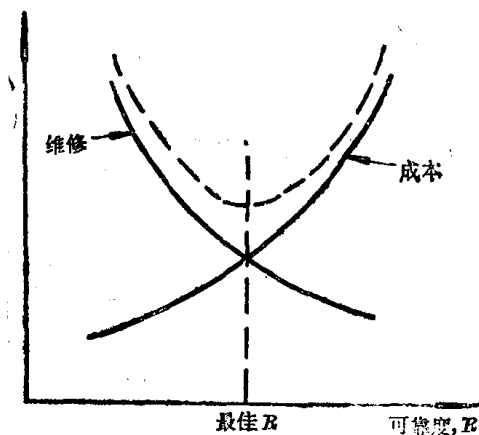


图 1-1 最佳可靠度

维修费用之间的关系,综合考虑,可得到最佳可靠性数值 R 。

2) 可靠性的工作范围大体包括: 可靠性组织管理,可靠性数据收集、整理与反馈,失效分析,可靠性设计,可靠性试验,可靠性理论等。从历史的发展来看,可靠性已成长为一门新学科,它包含了三个相互有关的分支:

(1) 可靠性工程: 零部件的可靠性分析,可靠性设计及系统的可靠性工程等;

(2) 可靠性物理: 研究零部件失效的物理原因,物理模型,提出改进措施等;

(3) 可靠性数学: 研究可靠性的定量规律。

二十世纪六十年代开始,可靠性技术逐渐向机械工程(机械零件及系统)渗透。这时,由于空间设备和宇航设备的发展,大型成套设备的研制以及关键零部件的研制等,迫切需要引进可靠性分析技术。所以,自此以来,国外除了人造卫星、飞机、核电站等外,其他机械产品如压力容器、电机和汽轮机转子、舰船、汽车、齿轮和轴承等也都应用了可靠性分析方法。

目前,可靠性在机械工程中的应用已深入到结构设计、强度分析、带裂纹零部件的强度和寿命分析(已形成断裂力学的一个新分支——概率断裂力学)、选材(成分及热处理工艺的选择)和失效分析领域中来了。

1.1.4 可靠性的研究方法

研究产品的可靠性主要有两种方法:

(1) 经验的方法: 一种定型的产品,无论在设计、加工、制造、试验和使用等方面,都积累了一定的经验,把这些经验综合起来,便可使它成为判断和改进产品可靠性的依据。因此,对整个过程中各个阶段的各种数据进行收集和分析(这就是一般所称的情报活动)在可靠性技术中占有极重要的地位。一个工程师对于他设计的产品的安全系数的取值,就完全取决于他的经验;同样,人们也可以根据某些产品的实际工作寿命,估计出该产品的平均寿命。经验方法的优点是直观,实践性强;其缺点是缺乏理论根据,它回答不了“当某项基本因素变化一定数量后,产品可靠度将发生多大的变化?”这一类定量问题。

(2) 模型方法: 对产品的可靠度建立一个分析计算的模型。一方面把材料强度看作随机变量,且它是一些影响强度的基本随机变量的函数(基本变量如温度、介质、尺寸、表面光

洁度和切槽等等)。另一方面,把零件的应力也看作一些基本随机变量的函数,(诸如,应力集中程度,温度高低,不同加载方式下应力的组合……等等)。然后,确定一种失效准则,建立强度、应力和可靠度三者的联系。(即干涉理论)。这就是模型方法的实体内容。它的优点是能定量地判断产品的可靠度或失效概率。而且能定量地回答,当某一基本因素变化时,产品可靠度的变化。其缺点是计算工作量大,且模型的好坏,对结果的影响很大。

在现代可靠性问题的研究中,往往把两种方法结合起来应用,取长补短,这样更能奏效。

1.2 产品可靠性指标的定义

1.2.1 可靠性的定义

电子产品或机械产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力,就叫做产品的可靠性。

1) 产品的规定条件: 如温度,气压,震动,冲击,介质,载荷等。

2) 产品的规定时间: 对保持产品的质量和性能要有一定的时间要求,对于不同的零件,其时间要求也不一样。

3) 产品的规定功能: 是什么功能? 用什么指标来衡量? 什么叫失效(故障)? 对于每一个产品、部件或零件,这些都要有明确的定义。

4) 在规定的条件、规定的时间和规定的功能下,产品可能完成任务,也可能完不成任务;也就是说它可能有这个能力,也可能不具有这个能力。我们称它为随机事件,而随机事件可以用概率来定量地描述,因此,在可靠性研究中度量产品