

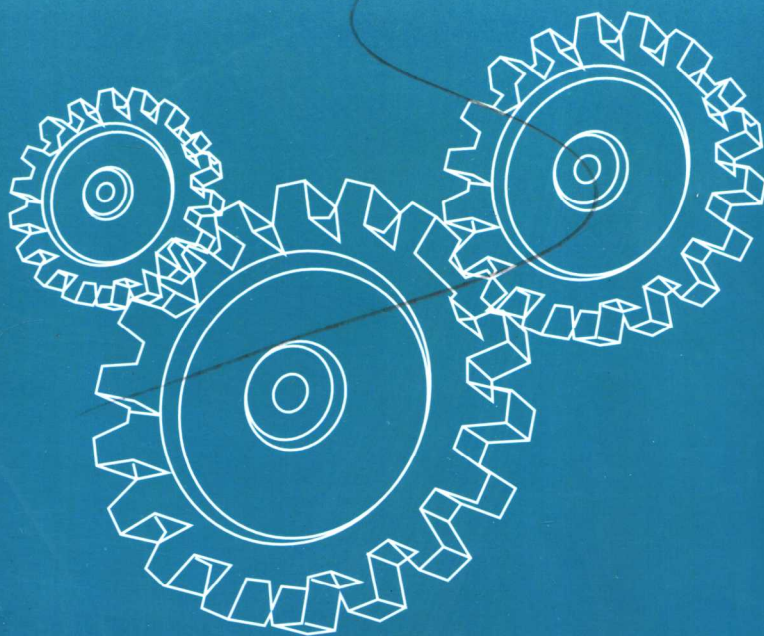
丛书主编 杨黎明

机电一体化设计系列丛书

机械可靠性工程

郝静如 主编

郝静如 米洁 李启光 编著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

TH122/796

2008

机电一体化设计系列丛书

丛书主编 杨黎明

郝静如 主编
郝静如 米洁 李启光 编著

机械可靠性工程

国防工业出版社
<http://www.ndip.cn>

内 容 简 介

本书系统全面地阐述了可靠性工程的基础理论和相关技术。内容包括:可靠性基础理论知识、可靠性设计常用方法、机械可靠性设计的基本内容、可靠性设计中常用的物理量、电子产品可靠性设计与分析、系统可靠性模型与可靠性分配、故障模式影响分析和故障树分析、可靠性试验等。考虑到机电一体化专业技术工作的特点,书的内容在以机械可靠性为主的同时,也对电子产品及系统的可靠性进行了较详细的阐述;为增强本书的工程实用性,相关章节提供了相关资料和实例。为便于学习和掌握,相关章节对主要公式和概念进行了总结,并附有思考题和习题。

本书既可供从事机电产品设计、制造、试验、使用及管理等相关专业工作的工程技术人员学习使用,也可作为高等学校相关专业本科生、研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械可靠性工程/郝静如主编. —北京:国防工业出版社,2008.3

(机电一体化设计系列丛书)

ISBN 978-7-118-05462-0

I. 机... II. 郝... III. 机械设计—结构可靠生 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 177604 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 字数 308 千字

2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序 言

“机电一体化”是指在机械的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能等方面引入电子技术,并将机械装置、电力电子设备及相关技术设备组成的有机整体——机械电子产品或系统的总称。

机电一体化技术发展的状况标志着一个国家机械电子科学技术的发展水平,因此,发展机电一体化技术是发展我国机械电子科学技术的必由之路,也是振兴我国机械电子工业的主攻方向。目前,发达国家机电一体化技术已经很普及,国内一些工厂、企业、科研院所及大专院校在各领域已经开展机电一体化工作,并取得了一定成绩,但开展力度不大,不普遍。

为了促进我国机电一体化技术的发展,国防工业出版社特组织专家、教授和工程技术人员编写出版这套《机电一体化设计系列丛书》。

这套丛书包括:

- 《机构选型与运动设计》
- 《机械零部件选用与设计》
- 《机械优化设计》
- 《机械可靠性工程》
- 《转子现场动平衡技术》
- 《机电传动控制技术》
- 《伺服技术》
- 《传感器检测技术》
- 《精密机械元器件与电子元器件》
- 《机电一体化应用集锦》

编写这套丛书时,着重突出以下特点:

(1)系统性。这套丛书涉及的内容基本覆盖机电一体化技术的相关学科,便于读者系统、深入地学习和应用机电一体化技术。

(2)实用性。这套丛书从实用出发,本着“必需、够用、实际”的原则精选内容,在简要论述原理、方法、结构、标准的基础上,列举了大量的理论联系实际的例题,有较强的设计示范作用。

(3)针对性。这套丛书主要是为中小工厂、企业从事机电一体化技术的人员学习和应用编写的,读者在机电一体化技术相关学科都有一定的理论基础和实践经验。因此,策划丛书书目时,基本是按一门学科或一个子系统一本书的原则划分的。因此,丛书内容专、篇幅小,便于读者根据需要选购。

(4)适用性。这套丛书还可以作为大专院校和职业学校学习机电一体化技术的参考书或教材。因此,这套丛书对促进机电一体化技术的发展具有普及性和适用性。

希望读者喜爱这套丛书,并提出宝贵意见。

杨黎明

2006年9月

前 言

可靠性是贯穿于产品全生命周期内用以衡量产品质量的重要指标,包含于产品的规划、设计、制造、试验、使用、管理以及维护等各个环节中。除了技术性能和经济指标以外,现代产品的寿命和故障率决定了其市场竞争力和优劣胜负。可靠性理论正是以产品的寿命特征作为主要研究对象的一门边缘性学科,涉及到基础学科、专业技术学科和管理学科等多学科领域。

随着现代科学技术的飞速发展,现代机电装备的性能、精度和复杂程度的要求越来越高,工作条件和维修条件也更加严酷,对其可靠程度提出了越来越高的要求。可靠性理论与技术的应用已遍及国民经济的各行各业,其应用的推广已带来了巨大的社会经济效益。

本书针对机电产品可靠性工程的基本知识,详细介绍了其有关数理基础、机械和电子产品的可靠性设计和分析、机电系统的可靠性设计和分析等内容。本书可作为机械工程、电子与控制工程、过程装备及相近专业本科或研究生教学的教材,也可以作为从事机电产品设计、制造、试验、使用及设备技术管理的工程技术人员或企业管理人员的参考用书。

本书的特点是注重工程实际应用,编写注意由浅入深、通俗易懂。各部分内容附有大量实例和习题,供读者参考借鉴。编写内容兼顾机械和电子技术,使用者可根据自身需要取舍。对书中经常使用的公式,尽可能按章节进行了归纳汇总,为便于初学者学习使用,对涉及的一些基础数理知识,还尽可能用形象直观的表达方式,增强了本书的实用可读性。

本书的编写是作者在长期从事本课程教学的经验积累上完成的,并参考了近年来出版的一些技术论著和相关教材。全书共分9章,其中第1章~第4章、第8章、第9章由北京信息科技大学郝静如教授执笔编写;第5章、第6章由米洁副教授执笔编写,第7章由李启光副教授执笔编写,郝静如教授负责全书的统稿和整理工作,高宏老师负责全书的文字和版面工作,在此表示感谢。

由于经验、水平与时间有限,书中难免存在问题和疏漏,诚盼有关专家和读者批评指正(联系方式 E-mail: Haojr@gmail.com)。

编 者
2007年9月

目 录

符号说明	1	2.5.1 连续型分布	22
第 1 章 绪论	2	2.5.2 离散型分布	30
1.1 可靠性工程的发展概况	2	2.6 分布参数的估计	31
1.2 可靠性技术研究的重要性	3	2.6.1 分布参数的点估计	32
1.3 可靠性工程研究的内容	4	2.6.2 分布参数的区间估计	33
1.4 机械可靠性设计方法与传统设计方法的区别和特点	4	思考题	38
思考题	5	习题	38
第 2 章 可靠性的理论基础	6	第 3 章 机械可靠性设计的基本方法	40
2.1 可靠性的定义和要点	6	3.1 机械可靠性设计的主要内容和方法	40
2.2 可靠性特征量	6	3.2 应力—强度分布干涉理论与可靠度的一般表达式	41
2.2.1 可靠度 $R(t)$ 和不可靠度 $F(t)$	6	3.2.1 应力—强度分布干涉理论	41
2.2.2 失效概率密度 $f(t)$	7	3.2.2 可靠度计算的一般表达式	42
2.2.3 失效率 $\lambda(t)$	7	3.3 随机变量进行数学运算的常用方法	43
2.2.4 产品的寿命特征	10	3.3.1 矩法 (Taylor 展开法)	43
2.2.5 维修性特征量	12	3.3.2 变异系数法	45
2.2.6 有效度 (可用度) 特征量	12	3.3.3 代数法	46
2.3 概率的基本概念及基本运算	13	3.4 机械零件的可靠度计算	48
2.3.1 随机事件的概念	13	3.4.1 强度、应力都为正态分布时的可靠度计算	48
2.3.2 随机事件的概率	13	3.4.2 强度、应力都为对数正态分布时的可靠度计算	50
2.3.3 概率运算的基本公式	14	3.4.3 强度、应力在给定寿命条件下的可靠度计算	51
2.4 随机变量的概率分布及其数字特征	18		
2.4.1 离散型随机变量的概率分布	18		
2.4.2 连续型随机变量的概率分布	19		
2.4.3 随机变量的数字特征	20		
2.5 可靠性中常用的概率分布	22		

3.4.4 强度、应力均为指数分布的可靠度计算	54	可靠度	92
3.4.5 强度为正态(指数)分布,应力为指数(正态)分布的可靠度计算	55	5.4 圆柱螺旋弹簧的可靠性设计	94
3.4.6 强度和应力都为威布尔分布时的可靠度计算	55	习题	102
3.5 可靠度与安全系数的关系	56	第6章 系统可靠性模型与可靠性分配	103
习题	59	6.1 系统可靠性模型	103
第4章 可靠性设计中常用的物理量及其相关概念	60	6.2 串联系统的可靠性模型	104
4.1 载荷的统计数据	60	6.3 并联系统的可靠性模型	106
4.2 几何尺寸的统计方法	62	6.4 混联系统的可靠性模型	109
4.3 材料力学特性参数	63	6.4.1 串并联系统	109
4.3.1 材料的弹性模量	63	6.4.2 并串联系统	109
4.3.2 材料的静强度指标	64	6.4.3 一般混联系统	110
4.3.3 材料的疲劳强度	65	6.5 表决系统的可靠性模型	112
4.4 疲劳强度的修正系数	72	6.6 储备系统的可靠性模型	114
4.4.1 应力集中系数 K_σ 、 α_σ	72	6.6.1 储备单元完全可靠的储备系统	114
4.4.2 尺寸系数 ϵ	73	6.6.2 储备单元不完全可靠的储备系统	115
4.4.3 表面质量系数 β	73	6.7 网络系统的可靠性模型	116
思考题	74	6.8 系统可靠性分配	118
习题	75	6.8.1 可靠性分配原理和准则	118
第5章 典型机械零件的可靠性设计	76	6.8.2 等分配法	118
5.1 螺栓联结的可靠性设计	76	6.8.3 相对失效率法与相对失效概率法	119
5.1.1 受拉松螺栓联结的可靠性设计	76	6.8.4 AGREE 分配法	123
5.1.2 受拉紧螺栓联结的可靠性设计	79	6.8.5 成本最小分配法	124
5.1.3 受剪螺栓联结的可靠性设计	85	习题	128
5.2 轴的可靠性设计	88	第7章 电子产品可靠性设计与分析	129
5.2.1 传动轴可靠性设计	88	7.1 概述	129
5.2.2 转轴可靠性设计	90	7.2 电子系统可靠性设计常用方法	131
5.3 滚动轴承的疲劳寿命与		7.2.1 电子元器件的正确选用和使用可靠性	131
		7.2.2 降额设计	136
		7.2.3 潜在通路分析	142
		7.2.4 热设计与分析	148

7.2.5 电磁兼容设计	151	第9章 产品可靠性试验	185
7.2.6 环境设计	155	9.1 可靠性试验概述	185
7.2.7 软件可靠性设计	157	9.1.1 可靠性试验的 目的	185
7.3 小结	162	9.1.2 可靠性试验的 分类	186
思考题	162	9.1.3 可靠性试验的 要素	186
第8章 失效模式影响分析和故障树 分析	164	9.2 典型可靠性试验	187
8.1 FMEA 与 FTA 分析方法概 述	164	9.2.1 环境应力筛选 试验	187
8.2 失效模式影响分析	165	9.2.2 可靠性增长试验	188
8.2.1 FMEA 分析的実施 步骤	165	9.2.3 寿命试验和加速 寿命试验	191
8.2.2 危害度分析	167	习题	197
8.2.3 FMEA 实例	168	附录	198
8.3 故障树分析	170	附表1 标准正态分布表	198
8.3.1 故障树基本术语和 符号	171	附表2 Γ 分布表	204
8.3.2 故障树的建造	172	附表3 t 分布的临界值表	205
8.3.3 故障树的定性 分析	175	附表4 χ^2 分布表	206
8.3.4 故障树的定量 分析	179	参考文献	208
思考题	183		
习题	183		

符 号 说 明

$f(x)$	随机变量 x 的概率密度函数	$f(Z)$	标准正态分布的概率密度函数
$F(x)$	随机变量 x 的累积分布函数	$F(Z)$	标准正态分布的累积分布函数
$R(t)$	可靠度	$\Phi(Z)$	非标准正态分布转化为标准正态分布的累积分布函数
$F(t)$	不可靠度	$Z_{\alpha/2}$	可靠度的双侧置信区间上限
$\lambda(t)$	失效率	$-Z_{\alpha/2}$	可靠度的双侧置信区间下限
θ	平均寿命	Z_{α}	可靠度的单侧置信区间下限
MTBF	平均无故障工作时间	α	可靠度区间估计的风险度
MTTF	平均失效时间	β	威布尔分布的形状参数
MTTR	平均修复时间	η	威布尔分布的尺度参数
$M(t)$	维修度	γ	威布尔分布的位置参数,可靠度区间估计的置信水平
$A(t)$	有效度	S	强度,样本的均方差
$E(x)$	随机变量的数学期望	δ	应力
$V(x)$	随机变量的方差	Z	联结系数,标准变量
$\bar{x}$	样本的均值	ρ	相关系数
μ	母体的均值	σ_b	强度极限
σ	母体的均方差,力学公式中的应力	σ_s	屈服极限
N	失效循环次数	τ_b	剪切强度
n	安全系数,样本量,工作循环次数	τ_s	剪切屈服极限
$N(\mu, \sigma)$	均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布	σ_{-1}	疲劳极限
$N(\mu, \sigma^2)$	均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布	ν	变异系数
$N(0, 1)$	标准正态分布	L_{10}	轴承的额定寿命
$N(\mu_y, \sigma_y)$	当自变量 x 转化为 $y = \ln x$ 后的正态分布	L_{1-R}	可靠度为 R 的轴承寿命

第 1 章 绪 论

1.1 可靠性工程的发展概况

可靠性工程作为一门学科的研究是近 60 年发展起来的,其所以引起工程和学术界的重视,是人们发现用传统的产品质量分析方法难以解释一些产品在使用中出现的故障和问题。在 20 世纪 40 年代第二次世界大战期间,美国在远东的飞机由于自身出现故障而损失的数量是在战争中被击落的 1.5 倍,其原因是电子产品频出故障,而从其设计制造环节却难以发现质量问题,于是就开始了对产品可靠性相关环节的研究,如电子元件的抗震、抗冲击性能等。德国的科学技术人员在火箭的研制中,首先提出火箭系统的可靠度等于所有元器件可靠度乘积的理论,1957 年美国发布了《军用电子设备可靠性报告》,提出产品可靠性指标的建立、系统可靠度指标分配和产品可靠度验证的方法,从而奠定了可靠性学科的初步理论。

20 世纪 50 年代至 60 年代,美国、苏联相继把可靠性应用于航天计划,于是机械系统的可靠性研究得到发展,如随机载荷下机械结构和零件的可靠性,机械产品的可靠性设计、试验验证等。苏联 1961 年发射第一艘载人宇宙飞船时,提出了可靠度达到 0.999 的定量指标。空间科学和航天技术的发展提高了可靠性的研究水平,扩展了其研究和应用范围,其又由电子、机械、航天扩展到电机与电力系统、核能工程、动力、建筑、石油化工等各个工程领域。一些工业发达国家如法国、日本、英国等也都相继开展了可靠性工程的研究。

日本于 20 世纪 50 年代后期引入了可靠性技术后,将可靠性技术推广应用到民用工业取得很大成功,很快设立了全国可靠性研究机构和可靠性工程控制小组。日本预见到以后产品竞争的焦点就在于可靠性,于是将可靠性技术广泛推广至各种机械、电子民用产品,大大提高了其产品的可靠度,例如日本产的汽车、彩电、照相机、收录机、电冰箱等,畅销到全世界,几十年经久不衰,带来巨大的经济效益。

我国在 20 世纪 60 年代已在通信机、雷达等方面提出了可靠性问题,70 年代末改革开放和经济的高速发展,对重点工程元器件的可靠性问题和民用产品的可靠性工作起到巨大的推动作用,经过 10 年努力,使军用元器件可靠性提高了两个数量级;在 5 年时间里,使电视机平均故障间隔时间提高了一个数量级。到 20 世纪 80 年代,我国已开始形成一批可靠性研究人员和技术骨干,并在国家各部委的组织下,开始了深入的可靠性工程实施工作。从 90 年代起,我国民用产品和许多军工产品的质量都产生了质的飞跃,许多民用机电产品都制定了可靠性指标,使产品质量达到了新水平。

综上所述,可靠性工程的发展是社会发展和科学技术发展的需要,是高质高效发展经济实现飞跃的需要,也是创造社会财富、提高人们物质生活水平的需要。可靠性理论和技

术的研究吸引了世界各国大量人力、物力的投入,我国近年来虽在此项工作中有了较快的发展,但与发达国家相比还有很大差距。我们应当加强对可靠性研究与实施的重要性的认识,树立现代化质量观念,把可靠性指标作为现代质量管理的明确指标和必要手段,把可靠性技术管理推广应用到国民经济的各个部门,使可靠性理论与技术转变成巨大的生产力。作为科技研究和工程技术人员,应该加强对可靠性理论的学习研究,善于将可靠性技术应用到工程实践中去,这样我们的科学技术工作才能跟上现代化的脚步,从而取得更大的成效,我国的国民经济才能得到更快的发展。

1.2 可靠性技术研究的重要性

“可靠性”顾名思义,指的是“安全性”、“无故障”,人们进行的一切生产实践都是被期盼安全和成功的。比如一台设备被期望安全运转,一座建筑被期望长期牢固,一项工程被期望顺利完成。

在工程中可靠性是用以衡量产品质量的动态指标。一台设备或系统的性能,可以用性能指标来描述,如发动机的输出功率、机床主轴转数和进刀量、汽车的行驶速度等。而可靠性则描述了设备或系统在特定条件下保持规定性能指标的能力,该种能力就是质量。就是说具有同样性能指标的产品,它们的寿命和故障率却可能不同。在现代科技飞速发展、新型产品不断涌现的国际化市场中,只有那些具有高可靠性指标的产品和生产企业,才能在日益激烈的市场竞争中存活下来。所以可靠性的研究具有十分重要的意义。可靠性的重要性具体体现在以下几个方面。

1. 可靠性高的产品具有安全性

提高产品的可靠性,可以防止事故和故障的发生,尤其避免灾难性事故的发生。1986年,美国“挑战者”号航天飞机由于一个密封圈失效,起飞 76s 后爆炸,造成 12 亿美元的经济损失;1992 年,我国发射“澳星”时,由于一个零件的故障,使“澳星”发射失败,造成巨大经济损失;2003 年,美国“哥伦比亚”号太空船在返回地面大气层时,由于机身上的一块隔热板被外挂油箱的脱落泡沫击中而刺穿,太空船烧成火球后解体。现代高科技产品,由于其功能的严格性和结构的复杂性,对安全性提出了更高的要求。如“阿波罗”号宇宙飞船,具有 720 万个零件,有 120 所大学 15000 多个研究部门约 42 万人参与研制,如此规模庞大、内容复杂的工程,任一环节的失误都可能导致严重后果,必须运用可靠性技术与工程管理才能保证其安全性。

2. 可靠性高的产品具有实用性

提高产品的可靠性,可以减少停机时间和维护人员,提高产品使用率。现代产品工作环境变得更加严酷,从陆地、海洋到太空,严酷的环境对系统高可靠性、高安全性等综合特性提出了挑战,系统要求的持续无故障任务时间加长,如太空探测器的长时间无故障飞行要求,潜水机器人、人造心脏、心脏起搏器的长期安全工作等,迫使系统必须有良好的可靠性。

3. 可靠性高的产品能创造大的经济效益

产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费减少,使产品生产和使用的总费用降低;产品可靠性的提高可减少系统中的备用台数,降低了设备投资;产品用可靠性设计

可以设计出相对体积小质量小的产品,避免了用传统经验方法估算安全系数取值偏大而造成材料的浪费。更重要的是,可靠性高的产品可以提高品牌和企业信誉,具有竞争力,从而占领市场,取得战略性成功和大的经济效益。

1.3 可靠性工程研究的内容

可靠性作为一门工程学科,在其发展过程中形成了相互关联的3个方面,即可靠性数学、可靠性物理分析和可靠性工程。可靠性数学是研究可靠性问题建立的数学模型和数学方法,研究分析产品故障的统计规律、产品的可靠性设计,分析、预测、分配、评估和验收检验等技术中的数学问题;可靠性物理分析是对产品失效机理和检测方法进行的研究,包括用传统样机试验和现代检测仪器及计算机计算分析技术等手段;可靠性工程则是包括了产品全生命周期内的全部技术环节。

可靠性工程的主要内容有以下几点。

(1)可靠性设计。可靠性设计是可靠性工程中的重要部分。产品的可靠性在很大程度上取决于设计的正确性,传统机械设计用安全系数方法保证结构的性能要求,机械可靠性设计的特点,是其采用了可靠度等可靠性指标,在机械可靠性设计中,将载荷、材料性能、零部件尺寸等物理变量,都看做属于一定概率分布的随机变量,通过对这些随机变量进行分析运算,得到较为合理的设计变量取值范围,进而根据设计需要的可靠度指标确定设计参数。

可靠性预测是可靠性设计的重要内容之一,除在设计阶段根据掌握的设计参数分布和失效率经验数据预报零部件和系统的预期可靠度外,还可在设备运行中根据采集到的监测数据进行失效预期分析,对设备的实际寿命和失效进行预报。

系统可靠性分析和可靠性指标分配也是可靠性设计的重要内容,其将系统规定的允许失效率合理分配给系统的零部件,使在较小的经济代价下达到较高的系统可靠度。

(2)可靠性分析与试验。进行可靠性试验以证实和评价产品的可靠性;采用失效分析理论和方法对产品失效进行试验研究;运用概率论与数理统计方法对相关参数和产品寿命进行评估计算,给可靠性设计提供理论根据。

(3)可靠性制造、检验与管理。采用能确保可靠性的制造工艺进行制造,完善质量管理与质量检验以保证产品的可靠性。

(4)可靠性使用与维修。指导用户对产品的正确使用,制定科学的产品维修保养周期和方法,提供优良的维修保养服务来维持产品的可靠性。

1.4 机械可靠性设计方法与传统设计方法的区别和特点

机械可靠性设计与传统的机械设计方法不同,传统机械设计把参数物理量视为确定不变的单值,而在机械可靠性设计中的物理量是呈随机分布的函数。如图1-1所示应力和强度的取值对比,图(a)中的应力 δ 和强度 S 都是一个确定的单值,而在图(b)、(c)中应力和强度都是呈某种分布的随机量,在图(c)中,强度分布曲线的左尾取值甚至小于应力分布曲线的右尾取值,此时零件将会发生失效。

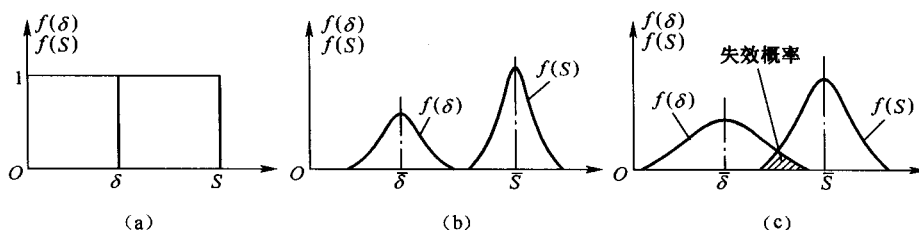


图 1-1 单值和多值的应力 δ 和强度 S 对比

(a) δ 、 S 单值；(b) δ 、 S 分布；(c) δ 、 S 分布干涉。

基于以上前提,机械可靠性设计比传统设计方法有以下主要优点。

(1)传统设计中的安全系数取单值 $n = S/\delta$;可靠性设计中应力、强度数值呈曲线分布,安全系数不仅取决于应力、强度的均值 $\bar{\delta}$ 、 $\bar{S}$,还取决于它们分布曲线的离散程度,安全系数也是分布函数。后者较科学地反映了实际情况,具有真实性。

(2)在机械可靠性设计中,考虑到强度会随着时间的增长而减弱,即图(b)、(c)中的 $f(S)$ 曲线由于时间 t 的增加而会向左移动,则其将与应力 δ 曲线发生更大面积的干涉,其结果导致可靠度降低。所以可靠度的表达有时间性,通常的提法是:“这个零件在经过多少小时之后,失效的概率是多少。”由此可靠度设计可以预测零件的寿命。

(3)在可靠性设计中,考虑到环境条件对产品可靠性和寿命的影响,如温度变化、冲击振动、环境介质等,这些因素往往起了重要作用。所以可靠性设计具有环境性。

(4)可靠性设计包括产品从设计制造到使用、管理过程的全生命周期。所以其具有系统性。

思考题

1-1 为什么要重视和研究可靠性?

1-2 可靠性工程涉及哪些技术领域?

第2章 可靠性的理论基础

2.1 可靠性的定义和要点

可靠性的常用定义是:产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。可靠度就是用“概率”对该“能力”的表达,用 $R(t)$ 表示。

可靠性定义的要点包括:

(1)产品:包括零件(元件)、设备和系统,其既可以是有形的硬件,也可以是软件和人机系统。

(2)规定条件:主要指工作环境条件、使用和维修条件、动力和载荷条件、操作人员的技术条件。

(3)规定时间:可靠度是具时间性的指标,其是随时间而变化的,时间可指区间 $(0, t)$,也可指区间 (t_1, t_2) 。通常的时间单位是小时、年,广义的时间单位可用工作循环次数、回转零件转数、车辆行驶里程数等表示。

(4)规定功能:功能通常指产品的工作性能,可靠性设计分析中主要强调产品是否丧失了工作性能,失效即产品丧失了规定功能,故障即可修复产品暂时丧失了功能。

2.2 可靠性特征量

产品的可靠性特征量是对产品在规定条件和规定时间内完成规定功能的能力的描述,鉴于可靠性所研究的产品的广泛性和复杂性,故对它们性能的描述也是各有侧重的,在可靠性分析中采用的各种数量指标,即是从不同角度对产品可靠程度的定性和定量的表达,这些数量指标即称为可靠性特征量。

2.2.1 可靠度 $R(t)$ 和不可靠度 $F(t)$

可靠度(Reliability)是“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率”,因为它是时间的函数,故以 $R(t)$ 表示,称为可靠度函数。 $R(t)$ 描述了产品在 $(0, t)$ 时间段内保持正常功能的概率,其取值范围是

$$\begin{aligned} 0 \leq R(t) \leq 1 \\ R(0) = 1, R(+\infty) = 0 \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中 t —— 规定时间。

与可靠度相对应的有不可靠度,表示“产品在规定条件下和规定时间内不能完成规定功能的概率”,因此又称为失效概率,以 $F(t)$ 表示,其又称为累积失效概率。显然有

$$\begin{cases} R(t) + F(t) = 1 \\ F(t) = 1 - R(t) \end{cases} \quad (2-2)$$

设有 N 个同批产品,从开始工作($t=0$)后到任意时刻 t 时,有 $n(t)$ 个失效,则

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad \left(\frac{\text{到 } t \text{ 时刻仍正常工作的产品数}}{\text{产品总数}} \right) \quad (2-3)$$

$$F(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (2-4)$$

产品从开始工作($R(t)=1$)时,随着工作时间增加,失效数不断增多,故可靠度就相应降低,因此可靠度 $R(t)$ 为递减函数,反之不可靠度 $F(t)$ 为递增函数,如图 2-1(a) 所示。

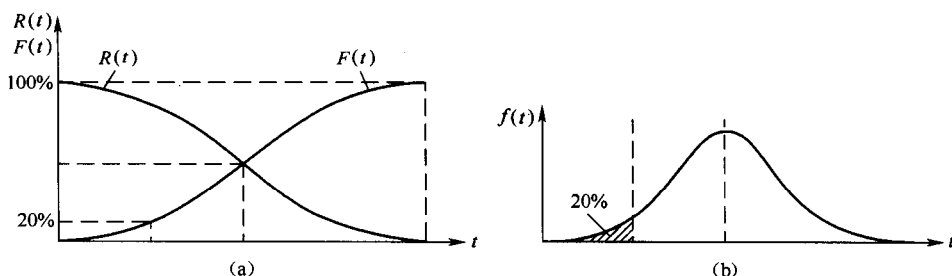


图 2-1 可靠度、不可靠度及失效概率密度
(a)可靠度、不可靠度曲线; (b)失效概率密度曲线。

2.2.2 失效概率密度 $f(t)$

产品在单位时间内失效个数占产品总数的概率称为失效概率密度,对不可靠度函数 $F(t)$ 求导则得失效概率密度函数 $f(t)$, 即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2-5)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2-6)$$

在可靠度函数 $R(t)$ 与不可靠度函数 $F(t)$ 如图 2-1(a) 所示的情况下,失效概率密度 $f(t)$ 则如图 2-1(b) 所示。由图可见,不可靠度函数 $F(t)$ 为累积失效概率密度函数。

将式(2-6)代入式(2-2)得

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt \quad (2-7)$$

2.2.3 失效率 $\lambda(t)$

1. 失效率 $\lambda(t)$ 的概念

失效率是“工作到某时刻 t 时尚未失效的产品,在该时刻 t 以后的下一个单位时间内发生失效的概率”,也称为失效率函数,记为 $\lambda(t)$ 。

设有 N 个产品,从 $t=0$ 开始工作,到时刻 t 时产品的失效数为 $n(t)$,而到时刻 $(t + \Delta t)$ 时产品的失效数为 $n(t + \Delta t)$,即在 Δt 时间内有 $\Delta n(t) = n(t + \Delta t) - n(t)$ 个产品失

效,则定义该产品在时间区间 $(t, t + \Delta t)$ 内的平均失效率为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{\text{自 } t \text{ 时刻起单位时间内的产品失效数}}{t \text{ 时刻时没失效的产品数}} \right) \quad (2-8)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,则得到 t 时刻的瞬时失效率

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} \quad (2-9)$$

因失效率 $\lambda(t)$ 是时间 t 的函数,故又称 $\lambda(t)$ 为失效率函数。则有累积失效率为

$$M(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (2-10)$$

失效率 λ 的单位是 1/小时(1/h)。

【例 2-1】 有 1000 个相同零件,已知其工作到 3、4、5 年末时失效零件数分别为 10 个、30 个、60 个,试计算这批零件在第 3、4 年末时的失效率。

解:按式(2-8),时间以年为单位,则 $\Delta t = 1$ 年

$$\bar{\lambda}(3) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} = \frac{30 - 10}{(1000 - 10) \times 1} = 2.02\% / \text{年}$$

$$\bar{\lambda}(4) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} = \frac{60 - 30}{(1000 - 30) \times 1} = 3.09\% / \text{年}$$

如取得多年的失效零件数,则可计算出系列 $\bar{\lambda}(t)$ 值,并画出该批零件的失效率曲线。

2. 失效率 $\lambda(t)$ 与可靠度 $R(t)$ 、失效概率密度 $f(t)$ 的关系

将式(2-8)的分子、分母同除以产品总数 N ,并用 $\lambda(t)$ 代表 $\bar{\lambda}(t)$,则有

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t)/N}{\Delta t} \cdot \frac{1}{[N - n(t)]/N} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2-11)$$

由式(2-11)可知,失效率 $\lambda(t)$ 可称为 $R(t)$ 条件下的 $f(t)$,是产品工作到某一时刻止保持的可靠度 $R(t)$ 在下一单位时间内可能发生故障的条件概率。

由式(2-11)有

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)}$$

可得

$$\lambda(t) dt = -\frac{dR(t)}{R(t)}$$

将上式积分

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t)$$

即

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2-12)$$

由式(2-12)可知,如已知失效率函数 $\lambda(t)$,可求得可靠度函数 $R(t)$ 。

【例 2-2】 某电子元件的可靠度函数为 $R(t) = e^{-\lambda t}$,求其失效率 $\lambda(t)$ 。

解:据式(2-2)

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

据式(2-5)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$$

据式(2-11)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda$$

3. 失效率函数的类型及曲线

1) 失效率函数的类型

产品的失效率随工作时间的变化具有不同的特点,其决定了产品的可靠性变化和使用特性。失效率函数有 3 种类型,即随时间的增长而分别呈递增、递减和保持定值,在图 2-2 所示 3 组曲线情况中,失效率可分别称为早期失效型、偶然失效型和耗损失效型。

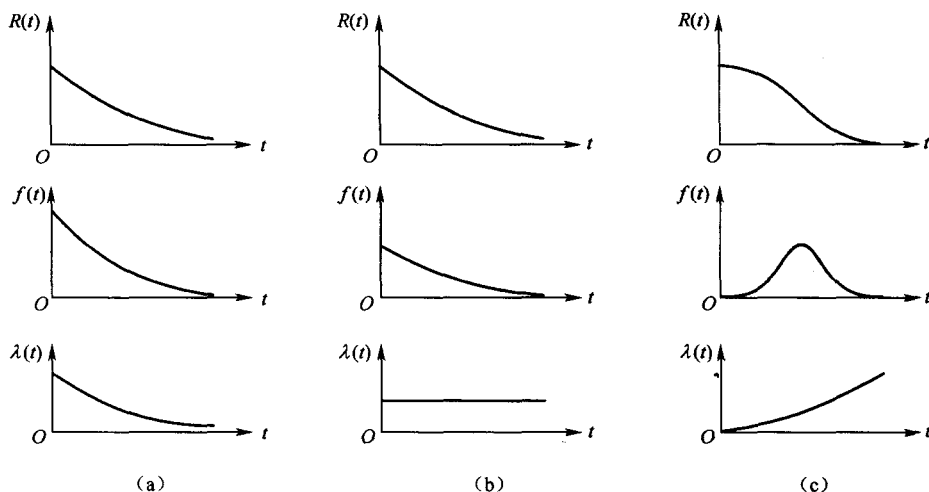


图 2-2 $R(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 的相互关系图
(a) 早期失效型; (b) 偶然失效型; (c) 耗损失效型。

2) 典型失效率曲线

据经验和统计发现,由许多零件构成的机器、设备或系统,在不进行预防性维修时,或对于不可修复的产品如电子产品,其失效率曲线的典型形态如图 2-3 所示。由于该曲线形似浴盆,所以称为浴盆曲线。它明显地分别由递减、恒定、递增型 3 部分曲线组成,反映了产品在其全部工作过程中的 3 个不同阶段。

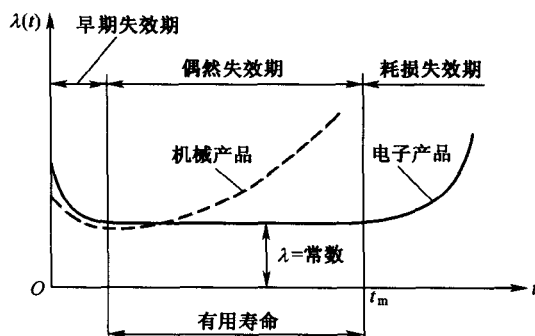


图 2-3 典型失效率曲线