



普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

机械可靠性 设计及应用

◎ 胡启国 主 编
◎ 刘元朋 副主编



➤ 产品的可靠性已成为
衡量产品质量和技术
措施的重要指标之一

➤ 以本科教学为出发
点，系统介绍机械可靠
性设计的基础理论与方法

➤ 创建专业教师交流平台，
探讨问题、研究教学方法、
共享教学资源



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

机械可靠性设计及应用

胡启国 主 编
刘元朋 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书从工程实用角度出发,全面系统地介绍了机械可靠性设计的理论及方法,内容包括:可靠性的基本概念和有关术语及定义,可靠性基础数学,机械可靠性设计原理与可靠度计算,机械静强度可靠性设计,机械系统可靠性设计,故障模式影响及危害性分析与故障树分析,机械零部件可靠性设计应用,可靠性试验等。为便于教学,书中列举了较多的可靠性设计实例及计算用表,并附有一定数量的习题。

本书可作为高等院校工科机械、车辆、船舶、航空航天等相关专业高年级和研究生的教材及教学参考书,也可供有关工程技术人员使用与参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机械可靠性设计及应用/胡启国主编.——北京:电子工业出版社,2014.1

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

ISBN 978-7-121-21905-4

I. ①机… II. ①胡… III. ①机械设计—可靠性设计—高等学校—教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第274698号



策划编辑:李 洁

责任编辑:刘真平

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:428.8千字

印 次:2014年1月第1次印刷

定 价:39.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

专 家 编 审 委 员 会

主 任 委 员 黄传真

副主任委员 许崇海 张德勤 魏绍亮 朱林森

委 员（排名不分先后）

李养良	高 荣	刘良文	郭宏亮	刘 军
史岩彬	张玉伟	王 毅	杨玉璋	赵润平
张建国	张 静	张永清	包春江	于文强
李西兵	刘元朋	褚 忠	庄宿涛	惠鸿忠
康宝来	宫建红	李西兵	宁淑荣	许树勤
马言召	沈洪雷	陈 原	安虎平	赵建琴
高 进	王国星	张铁军	马明亮	张丽丽
楚晓华	魏列江	关耀奇	沈 浩	鲁 杰
胡启国	陈树海	王宗彦	刘占军	

前 言

随着科学技术的飞速发展,可靠性技术已被广泛地应用于各个行业。可靠性是一门新兴的工程学科,它涉及基础科学、技术科学和管理科学的许多领域,是一门多学科交叉的边缘学科。它把随机方法(概率论和数理统计)应用于工程设计,不仅解决了传统设计所不能处理的一些问题,而且能有效地提高产品的设计水平和质量,降低产品的成本,满足现代化及市场竞争对产品质量的要求,产品的可靠性已成为衡量产品质量和技术措施的重要指标之一。因此,先进的各工业国家都在机械产品的设计中运用了这种现代设计方法。可靠性设计受到重视在国外已有40多年的历史了,在机械、车辆、电子技术、航天、航空等领域得到了很大的发展及应用,有力地提高了产品的可靠性水平。因为任何产品和技术,尤其是高科技产品、大型设备及超大型设备的制造,尖端技术的发展,都要以可靠性技术为基础,同时科学技术的发展又要求高的可靠性,这促使了可靠性工程技术逐步在各个工业领域内得到了发展和应用,人们也逐步认识到产品的可靠性技术与企业的生命、国家的安全紧密相关,而且产品性能优化、结构复杂化要求有很高的可靠性。同时,产品更新速度的加快,使用场所的广泛性、严酷性,要求有很高的可靠性。此外,国内外企业界普遍认识到产品竞争的焦点是可靠性,大型产品的可靠性同时又是一个企业、一个国家科技水平的重要标志。

然而由于种种原因,我国可靠性理论与应用工作还比较薄弱,缺乏广泛性,许多从事可靠性工作的工程技术人员和管理人员还没有系统地掌握可靠性技术,许多高等院校还没有系统地开设可靠性理论与应用方面的课程。本书是编者在多年从事机械可靠性设计本科教学、研究生教学以及相关可靠性研究工作的基础上,经过补充、修改而完成的。本书以大学本科教学为出发点,系统介绍了机械可靠性设计的基础理论与方法,可满足大学本科、研究生教学使用,同时也适合广大从事可靠性工程技术的工作人员学习和参考。

本书由重庆交通大学胡启国教授编写第1~3章,郑州航空工业管理学院刘元朋编写第4章,重庆交通大学束海波、陆兆峰和马丽英编写第5~9章。全书由胡启国教授担任主编并负责统稿,刘元朋担任副主编。在编写过程中,参阅了国内外同行的教材、手册及相关科技文献,除在本书参考文献中列出之外,也向这些参考文献的作者,致以衷心的感谢!研究生刘依路、胡小华、张如华、叶丹、庾奎及谢国宾参加了本书的编写,为本书的绘图、排版及内容编写等工作,付出了辛勤的劳动,在此表示感谢。

由于编者水平有限,本书难免存在疏漏或不妥之处,敬请广大读者不吝批评指正。

编 者

2013年12月

目 录

第 1 章 绪论	(1)	3.3.1 常用的离散型随机变量 的分布	(47)
1.1 概述	(1)	3.3.2 常用的连续型随机变量 的分布	(49)
1.1.1 研究可靠性的重要意义	(1)	3.3.3 概率分布的应用	(61)
1.1.2 可靠性技术的发展史	(1)	习题	(62)
1.2 机械可靠性设计的内容、特点和 方法	(3)	第 4 章 机械可靠性设计理论与可靠度 计算	(63)
1.2.1 机械可靠性设计的内容	(3)	4.1 安全系数法与可靠性设计方法	(63)
1.2.2 机械可靠性设计的特点	(4)	4.1.1 安全系数设计法	(63)
1.2.3 机械可靠性设计的方法与 步骤	(5)	4.1.2 可靠性设计方法	(64)
1.2.4 机械可靠性定性设计准则	(7)	4.2 应力强度干涉理论及可靠度计算	(66)
1.3 零件传统设计法与可靠性设计法的 比较	(9)	4.2.1 应力强度干涉理论	(66)
习题	(12)	4.2.2 可靠度计算方法	(68)
第 2 章 可靠性的定义及评价指标	(13)	4.3 机械零件的可靠度计算	(72)
2.1 可靠性的定义	(13)	4.3.1 应力强度都为正态分布时 的可靠度计算	(72)
2.2 失效的概念	(14)	4.3.2 应力与强度均呈对数正态 分布时的可靠度计算	(74)
2.3 可靠性尺度	(16)	4.3.3 应力与强度均呈指数分布 时的可靠度计算	(77)
2.3.1 可靠性概率指标及其函数	(17)	4.3.4 应力与强度均呈威布尔分布 时的可靠度计算	(78)
2.3.2 可靠性寿命指标	(24)	4.3.5 疲劳应力下零件的可靠度 计算	(80)
2.3.3 维修性及其主要数量指标	(26)	习题	(81)
2.3.4 有效度	(27)	第 5 章 机械静强度可靠性设计	(82)
2.3.5 系统有效性	(29)	5.1 安全系数与可靠度	(82)
2.3.6 重要度	(29)	5.1.1 经典意义下的安全系数	(82)
2.3.7 经济指标	(29)	5.1.2 可靠性意义下的安全系数	(82)
2.3.8 与人为差错有关的可靠性 尺度	(29)	5.2 设计参数数据的统计处理与计算	(85)
习题	(30)	5.2.1 载荷的统计分析	(85)
第 3 章 可靠性的数学基础	(31)	5.2.2 材料机械性能的统计分析	(88)
3.1 随机事件与概率	(31)	5.3 机械静强度可靠性设计	(96)
3.1.1 随机事件及其运算	(31)	5.3.1 机械静强度可靠性设计 概述	(97)
3.1.2 概率及其特点	(32)	5.3.2 梁的静强度可靠性设计	(101)
3.2 随机变量	(34)	5.3.3 承受转矩的轴的静强度 可靠性设计	(103)
3.2.1 随机变量的定义	(34)		
3.2.2 随机变量的数字特征	(36)		
3.2.3 随机变量函数的概率分布 和数字特征	(40)		
3.3 可靠性工程常用的几种概率分布	(47)		

5.3.4 受弯扭联合作用的轴的静强度可靠性设计	(105)	7.2.4 故障模式影响及危害性分析的应用	(161)
习题	(108)	7.3 故障树分析	(163)
第6章 机械系统可靠性设计	(110)	7.3.1 故障树分析概述	(163)
6.1 概述	(110)	7.3.2 故障树的建立	(164)
6.1.1 机械系统可靠性概念	(110)	7.3.3 故障树的定性分析	(169)
6.1.2 系统的结构框图与可靠性框图	(111)	7.3.4 故障树的结构函数	(174)
6.1.3 系统可靠性模型的建立	(112)	7.3.5 故障树的定量计算	(177)
6.1.4 系统可靠性模型的应用	(113)	7.3.6 机械系统故障树建立举例	(183)
6.2 系统可靠性模型	(114)	习题	(185)
6.2.1 串联系统	(114)	第8章 机械零件可靠性设计应用	(187)
6.2.2 并联系统	(116)	8.1 概述	(187)
6.2.3 混联系统	(118)	8.2 螺栓连接的可靠性设计	(188)
6.2.4 储备系统	(119)	8.2.1 受拉伸载荷螺栓连接的可靠性设计	(189)
6.2.5 表决系统	(121)	8.2.2 静载荷受剪切螺栓连接的可靠性设计	(195)
6.2.6 复杂系统	(123)	8.2.3 变载荷受剪切螺栓连接的可靠性设计	(197)
6.3 机械系统可靠性预测	(127)	8.3 齿轮的可靠性设计	(199)
6.3.1 可靠性预测的定义及目的	(127)	8.3.1 齿轮轮齿的故障模式及其特征	(200)
6.3.2 可靠性预测的程序	(127)	8.3.2 齿面接触疲劳强度的可靠性设计	(201)
6.3.3 单元可靠性预测	(128)	8.3.3 齿根弯曲疲劳强度的可靠性设计	(209)
6.3.4 系统可靠性预测	(130)	8.4 轴的可靠性设计	(214)
6.3.5 可靠性预测的注意事项	(135)	8.4.1 轴的失效模式	(215)
6.4 机械系统可靠性分配	(136)	8.4.2 转轴的可靠性设计	(215)
6.4.1 系统可靠性分配的定义及原则	(136)	8.4.3 心轴的可靠性设计	(218)
6.4.2 系统可靠性分配方法	(137)	8.4.4 传动轴的可靠性设计	(219)
6.5 系统可靠性最优化	(144)	8.4.5 轴的刚度可靠性设计	(223)
6.5.1 花费最少的优化分配方法	(144)	8.5 滚动轴承的可靠性设计	(225)
6.5.2 拉格朗日乘法	(147)	习题	(228)
6.5.3 动态规划法	(148)	第9章 可靠性试验	(230)
习题	(152)	9.1 概述	(230)
第7章 故障模式影响及危害性分析与故障树分析	(154)	9.2 寿命试验设计	(231)
7.1 故障模式影响及危害性分析概述	(154)	9.2.1 寿命试验目的	(231)
7.2 故障模式影响及危害性分析	(154)	9.2.2 寿命试验分类	(231)
7.2.1 故障模式影响及危害性分析概念	(154)	9.2.3 寿命试验内容	(233)
7.2.2 故障模式影响及危害性分析的特点	(155)		
7.2.3 故障模式影响及危害性分析的基本思路与程序	(157)		

9.3 寿命试验的分布及参数估计.....	(234)	9.4.1 加速寿命试验的原理与 类型	(240)
9.3.1 一般分布完全寿命试验的 数据处理	(234)	9.4.2 恒定应力加速寿命试验 设计	(242)
9.3.2 指数分布寿命试验及参数 估计	(236)	9.4.3 加速寿命试验与方程	(243)
9.3.3 正态分布寿命试验及参数 估计	(238)	9.4.4 影响加速寿命试验因素之间 的关系	(243)
9.3.4 威布尔分布寿命测试及参数 估计	(239)	习题	(249)
9.4 加速寿命试验	(240)	附录 A	(251)
		参考文献	(258)

第 1 章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 研究可靠性的重要意义

随着科学技术的发展,产品质量的含义也在不断地扩充。以前产品的质量主要指产品的性能,即产品出厂时的质量,而现在产品的质量已不仅仅局限于产品的性能这一指标。目前,产品质量的定义是:满足使用要求所具备的特性,即适用型。这表明产品的质量首先是指产品的某种特性,这种特性反映着用户的需求。概括起来,产品质量特性包括:性能、可靠性、经济性和安全性四个方面。性能是产品的技术指标,是出厂时($t=0$)产品应具有的质量特性,显然,能出厂的产品就应满足性能指标;可靠性是产品出厂后($t>0$)所表现出来的一种质量特性,是产品性能的延伸和扩展;经济性是在确定的性能和可靠性水平下的总成本,包括购置成本和使用成本两部分;安全性则是产品在流通和使用过程中保证安全的程度。

在上述产品质量特性所包含的四个方面中,可靠性占主导地位。性能差,产品实际上是废品;性能好,也并不能保证产品的可靠性水平高。反之,可靠性水平高的产品在使用中不但能保证其性能的实现,而且故障发生的次数少,维修费用及因故障造成的损失也少,安全性也随之提高。由此可见,产品的可靠性是产品质量的核心,是生产厂家和用户努力追求的目标。

在我国加入 WTO 之后,我国的经济要与国际接轨,我国的企业将参与国际市场的竞争,进入国际经济的大循环圈,这是经济发展的必然趋势。用户不仅要求产品性能好,更重要的是要求产品的可靠性水平高,这是产品占领市场的关键。美国人曾预言:今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业,才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。而日本人则断言:今后产品竞争的焦点是可靠性。因此,产品的质量尤其是产品的动态质量(可靠性)就显得尤为重要。

另外,研究产品可靠性的意义还在于产品责任法的建立。在美国等技术发达国家的产品责任法中规定:只要是因产品缺陷、故障对用户造成的损失,制造者要承担法律和经济责任。据 1975 年美国《质量进展》杂志,由于产品责任向用户请求赔偿金额达 50 亿美元。在产品责任法中同时还规定:如果制造者能出示进行了可靠性设计和可靠性保证等活动的资料证明,则可以排除责任。从这点也可看出研究产品可靠性的重要意义。

1.1.2 可靠性技术的发展史

人类从制造最简单的工具开始,就知道工具应该耐用、少出毛病,如遇故障,容易修好再用的道理,这就是可靠性最初的概念。但是,可靠性发展成为一门科学并应用到工业生产上还是近代的事,其历史大约可以追溯到 40 多年前。为便于叙述,把可靠性的发展过程分为四个时期。

1. 摇篮期

20 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,储藏时间一长往往就会失效。据报道第二次世界大战期间,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 年间美国通信设备中有 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,可靠性研究工作首先在电子领域开展起来,并取得初步成果。从此开始对电子设备不失效的质量指标——可靠性进行系统的研究。

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。

2. 奠基期

可以看出,可靠性问题是直接影响经济、生命、军事和政治等的重大问题。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,对可靠性理论作出了广泛的研究。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,提出了在生产、试制过程中对产品可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法,标准规范的编制,研究规范极广,其基本设想今天仍在使用,这个报告被公认为是可靠性的奠基文献。与此同时,其他国家相应成立了可靠性机构并开展了许多工作。从此可靠性理论的研究开始进入了实用阶段。美国成立了可靠性管理机构,制定了可靠性工程大纲和可靠性标准,出版了可靠性手册,建立了可靠性数据中心,举行了各种可靠性学术会议。可靠性工程开始形成一门独立的工程学科。在此期间,完成对可靠性的基础研究后,又遵循着两条不同的道路继续研究,并取得了进展。其一是从使用角度考虑的可靠性以及从经济上考虑的维修性和成本效果等的研究。其二是对零件的故障进行物理性能的研究,并形成了一门新的学科——可靠性物理(或称失效物理)。过去对故障发生的原因总是靠经验和宏观的观察来推测,可靠性物理的出现,令人放弃了那种认为故障是不可避免的想法,而是采取了科学的态度,认真研究发生故障的原因,设法从根本上预防故障。

3. 普及期

1960 年以后,可靠性工程从电子工业向其他工业部门迅速推广。从最复杂的有 720 万个元件的阿波罗登月飞船,到洗衣机、汽车、电视机、心脏起搏器等,都应用了可靠性设计、可靠性管理技术,且有了明确的可靠性指标。从 1959 年开始实行汽车保用里程制度。在质量管理(QC)活动中,提出了质量保证(QA)的概念,既要管 $t=0$ 的质量(出厂质量),又要保证($t>0$)的质量(可靠性)。

1969 年 7 月阿波罗 11 号飞船登月成功时,美国国防部长说:“归根结底,可靠性是工程最实际的形式。”美国宇航局(NASA)在总结此项工程经验时认为,可靠性工程技术是其三大技术成就之一。

日本从 1951 年接受可靠性思想, 1956 年引进可靠性技术。1958 年日本科学技术协会设立了可靠性研究委员会, 并开始普及有关可靠性方面的工作。1960 年成立可靠性及质量控制专门小组。1969 年日本汽车行业以退货为转机, 对可靠性更加关注, 并时时注视着汽车可靠性理论的发展趋势。1970 年在日本国家标准中规定了可靠性术语。全国铁路新干线、电报电话网、日本航空公司的运行、安全管理, 以及在飞机、电子仪器、汽车、推土机等公司的各领域内大力开展了可靠性研究。

4. 成熟期

进入 20 世纪 70 年代, 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的重视。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, 而现在要求它不仅运输, 而且要求能无故障运行 20 万千米, 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, 只有可靠性好的产品才是廉价的产品, 而廉价的产品必须是可靠性好的产品。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。同样, 人们在消费主义思想的支持下, 提出了大量产品责任的问题。它是指因产品缺陷而使消费者受到损失, 从而引起在法庭上进行赔偿损失的争议问题。因此, 使企业高度重视产品责任预防的工作, 而可靠性技术是解决产品责任预防工作的重要手段。

1975 年, 美国质量管理学会的月刊《质量进展》中预测, 美国当年度因产品责任问题而请求赔偿的金额达 500 亿美元。为此, 企业采取了以下措施: ①依靠设计评审工作来防止重大故障; ②建立质量保证体系, 尽快取得故障信息; ③经营者加强质量意识。这一时期, 可靠性工程已成为质量保证的一个重要环节。

1991 年海湾战争的“沙漠风暴”行动和科索沃战争表明, 未来的战争是高技术的较量。现代化技术装备, 由于采用了大量的高技术, 极大地提高了系统的复杂性, 为了保证战备完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用, 可靠性工程将大力扩展, 需要更多可靠性技术作为保证, 需要更加严密的可靠性管理系统。

在此时期, 日本产品的可靠性工作取得了很大成就。可靠性研究工作在世界范围内已达到了成熟期。我国关于可靠性理论的研究是从 20 世纪 60 年代末 70 年代初开始的, 现在, 已建立了相应的可靠性组织, 对这项工作给予了足够的重视。80 年代在汽车行业也开始了可靠性研究工作。现在, 世界上一些国家正致力于推行可靠性设计法以取代传统的设计方法。我国对许多产品也提出了运用可靠性设计的要求, 有的对产品提出了明确的可靠性指标, 可靠性设计方法在全国逐步得到推广和普及。

1.2 机械可靠性设计的内容、特点和方法

1.2.1 机械可靠性设计的内容

机械设备和系统的可靠性设计内容最基本的有以下几方面:

(1) 确定可靠性指标及其度量值。根据产品设计要求决定采用什么可靠性指标, 而指标的

高低则取决于产品的重要性。要重视过去的经验、用户的要求及市场调查。

(2) 可靠性预测。可靠性预测是指在设计开始时, 运用以往的可靠性数据资料计算系统可靠性的特征量并进行详细设计, 即通过合适手段所获得的数据得出比较确切的可靠性指标, 并加以验证。在不同的阶段, 系统的可靠性预测要反复进行几次。

(3) 对可靠性指标进行合理的分配。将可靠性指标分配到各子系统, 并与各子系统能达到的指标相比较, 判断是否需要改进设计。再把改进设计后的可靠性指标分配到各子系统。根据同样的方法, 可把可靠性指标进一步分配到各个零件。

(4) 把规定的可靠度直接设计到零件中去。

1.2.2 机械可靠性设计的特点

机械可靠性设计与以往的传统机械设计方法不同, 具有以下基本特点:

1) 以应力和强度为随机变量作为出发点

认识到零部件所受的应力和材料的强度均非定值, 而为随机变量, 具有离散性质, 数学上必须用分布函数来描述, 这是由于载荷、强度、结构尺寸、工况等具有变动性和统计本质。

2) 应用概率和统计方法进行分析、求解

这是基于应力和强度都是随机变量这一客观事实和认识的。

3) 能定量地回答产品的失效概率和可靠度

首先承认所设计的产品存在一定的失效概率, 但不能超过技术文件所规定的允许值, 并能定量地给出所设计产品的失效率和可靠度。

4) 有多种可靠性指标供选择

与传统的设计方法中将安全系数作为唯一的评价项目和度量完全不同, 可靠性设计要求根据不同的产品、场合而采取不同的可靠性指标。传统的机械设计方法仅有一种可靠性评价指标, 即安全系数; 而机械可靠性设计则要求根据不同产品的具体情况选择不同的、最适宜的可靠性指标, 如失效率、可靠度、平均无故障工作时间 (MTBF)、首次故障里程 (用于车辆)、维修度、有效度等。开始设计阶段就应当选定可靠性指标以及评价方法等。

5) 强调设计时对产品可靠性的主导作用

强调产品的可靠性从根本上来说, 是由设计决定, 设计决定了产品的固有可靠性, 由制造保证固有可靠度。如果设计不当, 则不论制造工艺有多好和管理水平有多高, 产品都是不可靠的。在设计中赋予零件以足够的固有可靠性, 该零件就会本质上可靠。后者意味着零件的应力分布和强度分布的尾部不发生干涉, 不产生随机失效。

6) 必须考虑环境的影响

可靠性设计必须考虑环境的影响。高温、低温、冲击、振动、潮湿、盐雾、腐蚀、沙尘、磨损等环境激励对可靠度有很大影响。研究表明, 应力分布的尾部比强度分布的尾部对可靠度的影响要大得多, 因此对环境的质量控制比对强度的质量控制会带来更大的效益。

7) 必须考虑维修性

对维修性的考虑, 在浴盆曲线的耗损失效期及当有效度是主要可靠性指标时, 都必须考虑维修性。以有效度为可靠性指标的产品, 例如, 对于工程机械等, 不论产品设计的固有可靠性有多好, 都必须考虑维修性 (因为它与使用和环境等一同影响产品的使用可靠性), 否则不可能使产品维持高的有效度。因此, 从设计一开始, 就必须将固有可靠性和使用可靠性联系起来作为整体考虑, 分析为了使设备或系统达到规定有效度, 究竟是提高维修度还是提高可靠度更为

合理。

8) 从整体的、系统的观点出发

从整体的、系统的、人机工程的观点出发考虑设计问题,并更重视产品在寿命期间的总费用而不只是购置费用。

9) 承认在设计期间及其以后都需要可靠性增长

可靠性设计承认在设计阶段及其以后的阶段都需要可靠性增长。在产品的最初设计、研制、试验期间,产品的可靠性会经常得到改善,这种改善是由于一些因素的变化。例如,在发生故障后,分析其原因就提供了改善可靠性的信息,并且在设计、研制过程中,随着经验的积累也会改进设计、制造工艺,提高产品的可靠性。因此,如果在产品设计、研制、试验、制造的初始阶段,定期地对产品的可靠性进行评估,将会发现可靠性特征量会逐步提高。可靠性得到了改善,这种现象称为可靠性增长。GB/T 15174—1994《可靠性增长大纲》关于可靠性增长的定义是:“随着产品设计、研制、生产各阶段工作的逐步进行,产品的可靠性特征量逐步提高的过程”。当可靠性水平接近于设计的固有可靠性时,可靠性增长将趋于饱和。可靠性增长的这些预测和报告给出了达到可靠性目标的进程,在确定能否按计划达到预计的可靠性水平方面提供了依据,使得能及早发现问题以便及早地进行对设计的调整。

1.2.3 机械可靠性设计的方法与步骤

1. 机械可靠性设计的方法

现代复杂而昂贵的零件和系统要求高可靠度,所以必须保证把规定的目标可靠度设计到零件中去,从而设计到系统中去。机械可靠性设计的主要方法有:概率设计法、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)以及失效模式、影响及危害性分析法(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)。

零件的强度和工作应力均为随机变量,呈分布状态,若能将这两种统计分布连接起来,则不难算得与分布相关的可靠度、所希望的可靠度的置信水平以及置信区间。可靠度若达到了目标可靠度,则认为设计是可以接受的;若小于目标可靠度,则应进行迭代调整。调整那些最敏感,对强度分布和应力分布影响最显著的设计参数最为有效,直至调整到规定的可靠度指标为止。

2. 机械可靠性设计的步骤

1) 提出设计任务,规定详细指标

常以设计任务书的形式提出设计任务及详细的技术指标、性能指标和可靠性指标等。

2) 确定有关的设计变量及参数

设计变量及参数应当是对设计结果有影响的、能够量度和相互独立的。

3) 失效模式、影响及危害度分析(FMECA)

研究系统与零部件的相互关系,以便确定可能失效部位、失效模式和失效机理,确定每一失效模式对系统及其零部件产生的影响,认识危害程度并提出可采取的预防改进措施,以提高产品的可靠性。

4) 确定零件的失效模式是否是相互独立的

若零件的失效模式是相互独立的,则一种失效模式下的应力与强度计算不受其他失效模式的影响,否则,应对受到影响的失效模式下的应力与强度加以修正,以使计算出的每种失效模

式的可靠度相互独立。

5) 确定失效模式的判据

机械零部件可能的失效模式有：材料屈服、断裂、疲劳、过度变形、压杆失稳、腐蚀、磨损、振幅过大、噪声过大、蠕变等。较常用的判据有：最大正应力、最大剪应力、最大变形能、最大应变能、最大应变、最大变形、疲劳下的变形能、疲劳下的最大总应变、最大许用腐蚀量、最大许用磨损量、最大许用振幅、最大允许声强、最大许用蠕变等。

6) 得出应力公式

对于每种失效模式，在确定载荷、尺寸、物理性质、工作环境、时间等设计变量及参数之间的函数关系后，得出应力公式。

7) 确定每种失效模式下的应力分布

根据应力分布公式，画出零部件应力分布图。

8) 确定强度计算公式

一旦零件的强度被工作应力超过，就会导致一定的失效模式，这种失效模式发生的概率，就是不可靠度。零件的强度数据可由材料的强度数据用一些修正参数加以修正后得到。

9) 确定每种失效模式下的强度分布

零件的强度分布可由试件的强度分布（材料的强度分布）用每个强度修正系数加以修正后得到。由实验直接得出零件的强度分布则更可靠。

10) 确定每种致命失效模式下与应力分布和强度分布相关的可靠度

当零件只有一种致命失效模式时，则仅需按这一种失效模式的判据来计算其可靠度，如果还有其他致命失效模式，则应计算所有致命失效模式的可靠度。

11) 确定零件的可靠度

如果在确定每种失效模式下的应力分布和强度分布时已经考虑了其他失效模式的影响， n 为可能的失效模式数（ $n \geq 1$ ）， R_i 为第 i 种失效模式下的可靠度，则零件的可靠度为

$$R_c = R_1 R_2 \cdots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1-1)$$

这时，其中任何一种失效模式出现时零件即失效。

另一种方法是根据最有可能发生的那种（例如说是第 i 种）失效模式下的可靠度来确定。显然，这种失效模式的发生概率最高而其下的可靠度最低，若用 $R_{i(\min)}$ 表示，则零件的整个可靠度为

$$R_c = R_{i(\min)} \quad (1-2)$$

显然，式（1-1）给出的是零件的最小可靠度，而式（1-2）给出的为最大可靠度。如果零件的实际可靠度为 R ，则有

$$\prod_{i=1}^n R_i \leq R \leq R_{i(\min)}$$

上式表示，零件确是由于单一的失效模式引起失效，则其实际可靠度将接近（小于）或等于 $R_{i(\min)}$ ；如果是由于多种原因引起失效，则零件的实际可靠度将接近（大于）或等于 $\prod_{i=1}^n R_i$ 。

12) 确定零件可靠度的置信水平

可靠度是对于零件而言的，而置信水平是对于样本试验结果而言的。例如，说某零件在可靠度为98%的置信水平为90%时，表示在对该零件任意抽取的10个样本（容量 $n=100$ ）进行试验时，9个样本中将有2个或少于2个零件失效；有1个样本中将有2个以上的零件失效。

13) 按上述步骤求出系统中所有关键零部件的可靠度

14) 计算子系统和整个系统的可靠度

当计算的系统可靠度达不到要求时,则应对设计进行迭代调整,直到达到规定的目标值为止。

15) 必要时可对某些设计内容进行优化

例如,可对性能或性能匹配、可靠性分配、维修性、安全性、费用、重量、体积、操作性、制造过程的匹配、交货日程表等进行优化。

1.2.4 机械可靠性定性设计准则

可靠性设计准则是指在进行产品设计时工程设计人员应该遵循的规章、原则,是进行产品设计的重要依据,也是保证产品可靠性的重要前提条件。在进行产品设计时,如果工程设计人员遵循了可靠性的设计准则,就能保证产品的可靠性,否则就达不到产品的可靠性要求,甚至造成严重后果。

机械可靠性一般可分为结构可靠性和机构可靠性。结构可靠性主要考虑机械结构的强度,以及由于载荷的影响使之疲劳、磨损、断裂等引起的失效;机构可靠性主要考虑的不是强度问题引起的失效,而是考虑机构在动作过程中由于运动学问题而引起的故障。

机械可靠性设计可分为定性可靠性设计和定量可靠性设计。所谓定性可靠性设计,就是在进行故障模式影响及危害性分析的基础上,有针对性地应用成功的设计经验使所设计的产品达到可靠的目的。所谓定量可靠性设计,就是在充分掌握所设计零件的强度分布和应力分布,以及各种设计参数的随机性基础上,通过建立隐式极限状态函数或显式极限状态函数的关系设计出满足规定可靠性要求的产品。

机械可靠性设计方法是目前开展机械可靠性设计的一种最直接有效的常用方法,可靠性定量设计虽然可以按照可靠性指标设计出满足要求的零件,但由于材料的强度分布和载荷分布的具体数据目前还很缺乏,加之其中要考虑的因素很多,从而限制其推广应用,一般在关键或重要的零部件设计中采用。

机械可靠性设计由于产品的不同和结构的差异,可以采用的可靠性设计方法也不同。

1. 简单化设计准则

在满足预定功能的情况下,机械设计应力求简单,零部件的数量应尽可能减少,越简单越可靠是可靠性设计的一个基本原则,是减少故障提高可靠性的最有效方法。但不能因为减少零件而使其他零件执行超常功能或在高应力的条件下工作。否则,简单化设计将达不到提高可靠性的目的。

2. 模块化、组件化、标准化设计准则

机械产品一般属于串联系统,要提高整机可靠性,首先应从零部件的严格选择和控制做起。例如,尽量采用模块化、通用化设计方案;优先选用标准件,提高互换性。在通用化设计时,应使接口、连接方式是通用的;选用经过使用分析验证的可靠的零部件;严格按标准选择及对外购件的控制;充分运用故障分析的成果,采用成熟的经验或经分析试验验证后的方案。日本一些企业的专家认为:一个新产品的的设计,其80%是采用原有产品或相似产品的设计经验,只有20%是因为产品的功能、性能的变化需要进行重新设计。

3. 降额设计和安全裕度设计准则

降额设计是使零部件的使用应力低于其额定应力的一种设计方法。降额设计可以通过降低零件承受的应力或提高零件的强度的办法来实现。工程经验证明,大多数机械零件在低于额定承载应力条件下工作时,其故障率较低,可靠性较高。为了找到最佳降额值,需做大量的试验研究。当机械零部件的载荷应力以及承受这些应力的具体零部件的强度在某一范围内呈不确定分布时,可以采用提高平均强度(如通过加大安全系数实现),降低平均应力,减少应力变化(如通过对使用条件的限制实现)和减少强度变化(如合理选择工艺方法,严格控制整个加工过程,或通过检验或试验剔除不合格的零件)等方法来提高可靠性。对于涉及安全性的重要零部件,还可以采用极限设计方法,以保证其在最恶劣的极限状态下也不会发生故障。

4. 合理选材准则

在机械可靠性的影响因素中,零部件材料的影响程度占到总体可靠性的 30%,在齿轮、轴类零件、轴承、弹簧等基础性零部件中,其失效模式在很大程度上取决于材料的选择。众所周知的美国“挑战者”号航天飞机爆炸事故,就是由于燃料箱密封装置材料在低温下失效而引起的,可见材料的性能在可靠性设计中占有非常重要的地位。因此,合理选择零部件的材料是机械可靠性设计必须遵循的准则之一。机械零部件原材料的选择按如下原则进行:

(1) 选用的零部件原材料除满足结构尺寸、重量、强度、刚度要求外,还应满足使用环境和寿命要求。

(2) 压缩零部件原材料的种类和规格,优先采用符合军标、国标和专业标准的通用件和标准件。

5. 冗余设计准则

冗余设计(余度设计)是对完成规定功能设置重复的结构、备件等,以备局部发生失效时,整机或系统仍不至于发生丧失规定功能的设计。当某部分可靠性要求很高,但目前的技术水平很难满足,如采用降额设计、简化设计等可靠性设计方法,还不能达到可靠性要求;或者提高零部件可靠性的改进费用比重重复配置还高时,冗余技术可能成为唯一或较好的一种设计方法,例如采用双泵或双发动机配置的机械系统。但应注意,冗余设计往往使整机的体积、重量、费用均相应增加。冗余设计提高了机械系统的任务可靠度,但基本可靠性相应降低了,因此采用冗余设计时要慎重。

6. 耐环境设计准则

耐环境设计是在设计时就考虑产品在整个寿命周期内可能遇到的各种环境影响,例如装配、运输时的冲击、振动影响,储存时的温度、湿度、霉菌等影响,使用时的气候、沙尘、振动等影响。因此,必须慎重选择设计方案,采取必要的保护措施,减小或消除有害环境的影响。具体地讲,可以从认识环境、控制环境和适应环境三方面加以考虑。认识环境是指不应只注意产品的工作环境和维修环境,还应了解产品的安装、储存、运输的环境。在设计和试验过程中必须同时考虑单一环境和组合环境两种环境条件;不应只关心产品所处的自然环境,还要考虑使用过程所诱发的环境。控制环境指在条件允许时,应在小范围内为所设计的零部件创造一个良好的工作环境条件,或人为地改变对产品可靠性不利的环境因素。适应环境指在无法对所有环境条件进行人为控制时,在设计方案、材料选择、表面处理、涂层防护等方面采取措施,以提高机械零部件本身耐环境的能力。

7. 失效安全设计准则

系统某一部分即使发生故障,也应使其限制在一定范围内,不致影响整个系统的功能,如传动系统中的安全剪切销、扭矩轴等。

8. 防错设计准则

进行防错设计,采用不同的安全保护装置,如灯光、音响等报警装置,监视装置,保护性开关、防误插定位卡、定位销等,并有符合国家标准的醒目的识别标志、防差防错或危险标志;防止误动作引起重大事故,主要用于产品或设备的操作系统设计。

9. 维修性设计准则

进行产品或设备的结构设计应充分考虑其维修性能的优劣,如采煤机底托架燕尾槽结构、滚筒的连接等。

10. 人机工程设计准则

人机工程设计的目的是为减少使用中人的差错,发挥人和机器各自的特点以提高机械产品的可靠性。当然,人为差错除了人自身的原因外,操纵台、控制及操纵环境等也与人的误操作有密切的关系。因此,人机工程设计是要保证系统向人传达的信息的可靠性。例如,指示系统不仅要有显示器,而且要有显示的方式,显示器的配置都使人易于无误地接受;控制、操纵系统可靠,不仅仪器及机械有满意的精度,而且适于人的使用习惯,便于识别操作,不易出错。与安全有关的部件,更应具有防误操作的功能;设计的操作环境尽量适合于人的工作需要,减少引起疲劳、干扰操作的因素,如温度、湿度、气压、光线、色彩、噪声、振动、沙尘、空间等。

当然,机械可靠性设计的方法绝不能离开传统的机械设计和其他一些优化设计方法,如机械计算机辅助设计、有限元分析等。

1.3 零件传统设计法与可靠性设计法的比较

传统的机械零件设计方法是基于这样的前提:它认为零件的强度 δ 和应力 S 都是单值的,因为安全系数也是单值的,见图 1-1 (a)。众所周知的公式是 $n=\delta/S$ 。

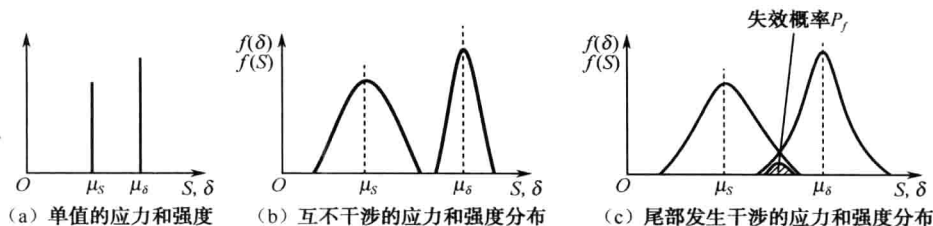


图 1-1 单值的和多值的(分布的)应力与强度

在传统设计中,只要安全系数大于某一根据实际使用经验规定的数值,就认为零件是安全的。安全系数法对问题的提法是:“这个零件的安全系数是多少?”。但是安全系数本身实质是一个未知系数,安全系数的概念包含了一些无法定量表示的影响因素在内。因此,安全系数不能够给出一个精确的度量,说明所设计的零件究竟在多大程度上是安全的。