

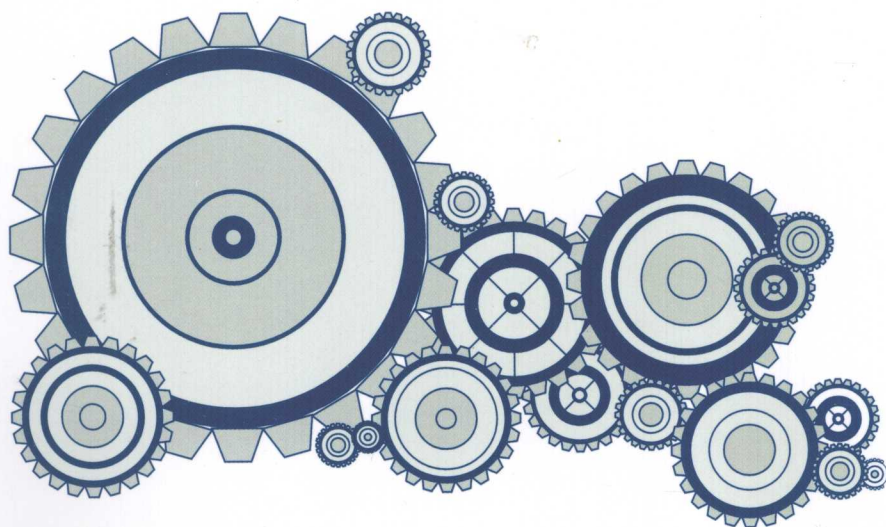
普通高等院校机械工程学科“十一·五”规划教材

机械可靠性设计

JIXIE KEKAOXING SHEJI

主 编 刘混举

副主编 赵河明 王春燕



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材

机械可靠性设计

主 编 刘混举

副主编 赵河明 王春燕

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书从工程实用角度出发,全面系统地介绍机械可靠性设计的基本理论与方法。内容包括:可靠性基本概念、可靠性数学基础、机械可靠性设计原理与可靠度计算、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、机械零部件的可靠性设计、机械可靠性优化设计及可靠性提高、可靠性试验等。每章都配备了习题。

本书可作为高等学校机械设计制造及其自动化、车辆工程、探测制导与控制技术等专业的机械可靠性设计教材,也可供从事机电产品设计、制造、试验、使用与管理的工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械可靠性设计 / 刘混举主编. —北京:国防工业出版社,
2009.1

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-05937-3

I. 机... II. 刘... III. 机械设计:可靠性设计-高等
学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 136551 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 100048)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 335 千字
2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 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

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材 编委会名单

名誉主任	艾 兴	山东大学
	王先逵	清华大学
主 任	吕 明	太原理工大学
副 主 任	庞思勤	北京理工大学
	朱喜林	吉林大学
秘 书 长	杨胜强	太原理工大学
委 员	吴宗泽	清华大学
	潘宏侠	中北大学
	軋 刚	太原理工大学
	任家骏	太原理工大学
	陈 明	北华航天工业学院
	谭晓兰	北方工业大学
	李德才	北京交通大学
	杨 康	佳木斯大学
	石望远	北华航天工业学院
	王好臣	山东理工大学
	王卫平	东莞理工学院
	张平宽	太原科技大学
	赵 波	河南理工大学

序

国防工业出版社组织编写的“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”即将出版,欣然为之作“序”。

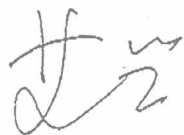
随着国民经济和社会的发展,我国高等教育已形成大众化教育的大好形势,为适应建设创新型国家的重大需求,迫切要求培养高素质专门人才和创新人才,学校必须在教育观念、教学思想等方面做出迅速的反应,进行深入教学改革,而教学改革的主要内容之一是课程的改革与建设,其中包括教材的改革与建设,课程的改革与建设应体现、固化在教材之中。

教材是教学不可缺少的重要组成部分,教材的水平将直接影响教学质量,特别是对学生创新能力的培养。作为机械工程学科的教材,不能只是传授基本理论知识,更应该是既强调理论,又重在实践,突出的要理论与实践结合,培养学生解决实际问题的能力和创新能力。在新的深入教学改革、新课程体系的建立及课程内容的发展过程中,建设这样一套新型教材的任务已经迫切地摆在我们面前。

国防工业出版社组织有关院校主持编写的这套“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”,可谓正得其时。此套教材的特点是以编写“有利于提高学生创新能力培养和知识水平”为宗旨,选题论证严谨、科学,以体现先进性、创新性、实用性,注重学生能力培养为原则,以编出特色教材、精品教材为指导思想,注意教材的立体化建设,在教材的体系上下功夫。编写过程中,每部教材都经过主编和参编辛勤认真的编写和主审专家的严格把关,使本套教材既继承老教材的特点,又适应新形势下教改的要求,保证了教材的系统性和精品化,体现了创新教育、能力教育、素质教育教学理念,有效激发学生自主学习能力,提高学生的综合素质和创新能力,为培养出符合社会需要的优秀人才服务。丛书的出版对高校的教材建设、特别是精品课程及其教材的建设起到了推动作用。

衷心祝贺国防工业出版社和所有参编人员为我国高等教育提供了这样一套有水平、有特色、高质量的机械工程学科规划教材,并希望编写者和出版者在与使用者的沟通过程中,认真听取他们的宝贵意见,不断提高该套规划教材的水平!

中国工程院院士



2008年6月

V

前 言

可靠性是一门新兴的工程学科,它涉及到基础科学、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性学科。产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一。近年来,世界各发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来,有力地提高了产品的可靠性水平。20 世纪 60 年代以来,可靠性工程技术逐步地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与企业的生命、国家的安全紧密相关,而且产品性能的优化、结构的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。

国家发展和改革委员会和科学技术部联合发布的重大产业技术开发专项中强调重点开发可靠性设计技术和防疲劳断裂设计等技术。国家 863 计划先进制造技术领域四个专题中“重大产品和重大设施寿命与预测技术”将寿命与可靠性设计与分析技术、寿命与可靠性试验方法与评估技术作为重点研究课题给予资助,可见国家对可靠性设计技术给予足够的重视。

然而由于种种原因,我国的可靠性理论与应用工作还比较薄弱,许多从事可靠性工作的工程技术人员和管理人员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。本教材是作者在多年从事机械可靠性设计本科教学、研究生教学以及有关可靠性研究工作的基础上,经过补充、修改而完成的。本教材以大学本科教学为出发点,系统介绍机械可靠性设计的基础理论与方法,可满足大学本科 40 学时至 60 学时的教学使用,同时又可为广大从事可靠性工程技术的工作人员学习和参考。

全书共分 8 章,其中太原理工大学刘混举编写第 1 章,中北大学魏秀业编写第 2 章和第 7 章,高强编写第 3 章,赵河明和王峰编写第 4 章,山西北方惠丰机电有限公司范志应编写第 5 章,太原科技大学王春燕编写第 6 章,高有山编写第 8 章。全书由刘混举教授担任主编并负责统稿,赵河明教授和王春燕教授任副主编,成都电子科技大学的黄洪钟教授主审。在编写过程中,参阅了国内外同行的教材、手册及科技文献,李刚、贺声阳等为本教材的编写做了大量的工作,在此一并表示谢意。

由于作者水平有限,缺点和不足在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 6 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 可靠性研究的历史	1
1.2 可靠性研究的重要性及其意义	3
1.3 可靠性的定义和特征量	5
1.3.1 可靠性的定义	5
1.3.2 可靠性的特征量	5
1.4 机械可靠性设计的内容、特点和方法	10
1.4.1 机械可靠性设计的基本特点	10
1.4.2 机械可靠性设计的主要内容	11
1.4.3 机械可靠性设计的方法与步骤	12
1.4.4 机械可靠性定性设计准则	14
习题	16
第2章 可靠性数学基础	18
2.1 随机事件与概率	18
2.1.1 随机事件及其运算	18
2.1.2 概率及其特点	19
2.2 随机变量	19
2.2.1 随机变量的定义	19
2.2.2 随机变量的数字特征	20
2.3 常用的概率分布	21
2.3.1 常见的离散型随机变量的分布	21
2.3.2 重要的连续型随机变量及其分布	22
2.3.3 概率分布的应用	25
2.4 数理统计	25
2.4.1 分布参数估计	26
2.4.2 假设检验	29
习题	31
第3章 机械可靠性设计原理与可靠度计算	33
3.1 安全系数设计法与可靠性设计方法	33
3.1.1 安全系数设计法	33
3.1.2 可靠性设计方法	34
3.2 应力强度干涉理论及可靠度计算	35

3.2.1	应力强度分布干涉理论	35
3.2.2	可靠度的计算方法	38
3.3	机械零件的可靠度计算	42
3.3.1	应力和强度分布都为正态分布时的可靠度计算	42
3.3.2	应力和强度分布都为对数正态分布时的可靠度计算	44
3.3.3	已知应力幅水平、失效循环次数的分布和规定的寿命要求时零件的 可靠度计算	46
3.3.4	已知强度分布和最大应力幅在规定寿命下的零件可靠度计算	48
3.3.5	疲劳应力下零件的可靠度计算	48
3.3.6	应力和强度分布都为指数分布时的可靠度计算	48
	习题	49
第4章	机械系统可靠性设计	50
4.1	概述	50
4.1.1	机械系统可靠性概念	50
4.1.2	基本可靠性模型和任务可靠性模型	51
4.1.3	系统的结构框图与可靠性框图	51
4.1.4	系统可靠性模型建立的步骤	53
4.1.5	系统可靠性模型的应用	53
4.2	系统可靠性模型	54
4.2.1	串联系统	54
4.2.2	并联系统	56
4.2.3	混联系统	57
4.2.4	贮备系统	58
4.2.5	复杂系统	63
4.3	系统可靠性预计	67
4.3.1	可靠性预计的定义及目的	67
4.3.2	可靠性预计的程序	68
4.3.3	单元可靠性预计	69
4.3.4	系统可靠性预计的一般方法	70
4.3.5	可靠性预计时注意事项	76
4.4	系统可靠性分配	76
4.4.1	系统可靠性分配的定义和原则	76
4.4.2	可靠性分配的方法	77
4.5	可靠性设计方法	85
4.5.1	结构可靠性设计	85
4.5.2	冗余设计	87
4.5.3	耐环境设计	88
4.5.4	耐热设计	95
	习题	96

第5章 故障模式影响及危害性分析与故障树分析	99
5.1 概述	99
5.1.1 故障的分类	99
5.1.2 故障率	100
5.2 故障模式影响及危害性分析	101
5.2.1 故障模式、影响及危害性分析的概念	101
5.2.2 故障模式、影响及危害性分析的特点	101
5.2.3 故障模式、影响及危害性分析的程序	103
5.2.4 故障模式、影响及危害性分析的应用	106
5.3 故障树分析	109
5.3.1 故障树分析概述	109
5.3.2 故障树分析中的常用符号	110
5.3.3 故障树的建立	113
5.3.4 故障树的定性分析	115
5.3.5 故障树的定量计算	118
5.3.6 机械系统故障树建立举例	122
习题	125
第6章 机械零部件的可靠性设计	127
6.1 概述	127
6.2 螺栓联接的可靠性设计	130
6.2.1 受拉伸载荷螺栓联接的可靠性设计	130
6.2.2 受剪切载荷螺栓联接的可靠性设计	137
6.3 弹簧的可靠性设计	140
6.3.1 圆柱螺旋压缩弹簧的静强度可靠性设计	142
6.3.2 圆柱螺旋压缩弹簧的疲劳强度可靠性设计	143
6.4 齿轮的可靠性设计	147
6.4.1 齿轮轮齿的故障模式及其特征	147
6.4.2 齿面接触疲劳强度的可靠性设计	147
6.4.3 齿根弯曲疲劳强度的可靠性设计	159
6.5 轴的可靠性设计	165
6.5.1 轴的失效模式	165
6.5.2 转轴的可靠性设计	166
6.5.3 心轴的可靠性设计	171
6.5.4 传动轴的可靠性设计	173
6.5.5 轴的刚度可靠性设计	174
6.6 滚动轴承的可靠性设计	176
6.6.1 滚动轴承的寿命与可靠度之间的关系	176
6.6.2 滚动轴承的额定动载荷与可靠度之间的关系	178
习题	179

第7章 机械可靠性优化设计及可靠性提高	181
7.1 概述	181
7.1.1 可靠性优化设计的概念	181
7.1.2 以可靠度指标为约束条件的可靠性优化设计	181
7.1.3 以总费用指标为约束条件的可靠性优化设计	183
7.1.4 机械可靠性优化设计实例	184
7.2 可靠性提高	189
7.2.1 可靠性增长概述	189
7.2.2 可靠性增长方法	190
7.2.3 人—机—环境系统可靠性	191
习题	197
第8章 可靠性试验	198
8.1 概述	198
8.2 寿命试验设计	198
8.2.1 寿命试验目的	198
8.2.2 寿命试验分类	199
8.2.3 寿命试验内容	200
8.3 寿命试验结果的统计分析及参数估计	202
8.3.1 一般分布完全寿命试验的数据处理	202
8.3.2 指数分布截尾寿命试验及参数的点估计	204
8.3.3 正态分布寿命试验及参数的点估计	206
8.3.4 威布尔分布寿命试验及参数的点估计	207
8.4 加速寿命试验	208
8.4.1 加速寿命试验的原理与类型	208
8.4.2 恒定应力加速寿命试验设计	210
8.4.3 加速寿命试验与方程	211
8.4.4 影响加速寿命试验三因素之间的关系	212
习题	218
附表 A 标准正态分布数值表	219
附表 B χ^2 分布的分位数表	221
附表 C Γ 函数表	222
附表 D t 分布的分位数表	223
附表 E F 分布的分位数表	224
参考文献	226

第1章 绪论

1.1 可靠性研究的历史

可靠性是一门新兴的工程学科。产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一。近年来,世界各发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来,有力地提高了产品的可靠性水平。

可靠性工程的诞生可以追溯到20世纪40年代,即第二次世界大战期间。当时,由于战争的需要,迫切要求对飞机、火箭及电子设备的可靠性进行研究。最早提出可靠性理论的是德国的科学技术人员,德国在V-1火箭的研制中,提出了火箭系统的可靠性等于所有元器件可靠度乘积的理论,即把小样本问题转化为大样本问题进行研究。到了20世纪50年代初期,美国为了发展军事的需要,投入了大量的人力、物力对可靠性进行研究。美国先后成立了“电子设备可靠性专门委员会”、“电子设备可靠性顾问委员会(AGREE)”等研究可靠性问题的专门机构。1957年6月4日,美国的“电子设备可靠性顾问委员会”发布了《军用电子设备可靠性报告》,这就是著名的“AGREE”报告。这一报告提出了可靠性是可建立的、可分配的及可验证的,从而为可靠性学科的发展提出了初步框架。“AGREE”报告是美国可靠性工程学发展的奠基性文件。

20世纪50年代,苏联为了保证人造地球卫星发射与飞行的可靠性,开始了可靠性的研究工作。同时,为了解决作战导弹可靠性的要求,一些国家也先后开展了对可靠性的研究与应用。也就在这一时期,日本企业家认识到,要在国际市场的竞争中取胜,必须进行可靠性的研究。1958年,日本科学技术联盟成立了“可靠性研究委员会”,专门对可靠性问题进行研究。

1961年,苏联发射第一艘有人驾驶的宇宙飞船时,宇航局对宇宙飞船安全飞行和安全返回地面的可靠性提出了0.999的概率要求,可靠性研究人员把宇宙飞船系统的可靠性转化为各元器件的可靠性进行研究,取得了成功,满足了宇航局对宇宙飞船系统提出的可靠性要求。也就在这一时期,苏联对可靠性问题展开了全面的研究。20世纪60年代是美国航空航天事业迅速发展的时期。美国国家航空航天管理局(NASA)和美国国防部接受并发展了20世纪50年代由“AGREE”发展起来的可靠性设计及实验方案。与此同时,计算机硬件也从晶体管到集成电路,并朝着超大规模集成(VLSI)方向发展,计算机的进步主要源于硬件的进步,那时软件的重要性还不显著。软件可靠性问题获得重视是20世纪60年代末的事。这时,苏联、法国、日本、英国等国家也相继开展了可靠性工程的研究。20世纪60年代我国在雷达、通信机、电子计算机等方面也提出了可靠性问题。

20世纪70年代,各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中。电子设备的可靠性直接影响着生产的效率、系统、设备以及

人们的生命安全,对可靠性问题的研究显得日益重要。同时,人们也开始了对非电子设备(如机械设备)可靠性的研究,以解决已有的电子设备可靠性设计及试验技术对非电子设备使用时受到限制和结果不理想的问题。

20 世纪 70 年代由于我国国家重点工程的需要(元器件的可靠性问题),以及消费者的强烈要求(电视机的质量问题),对各行业开展可靠性的研究起了巨大的推动作用。从 1973 年起,原国防科工委和原四机部为了解决国家重点工程元器件的可靠性问题,多次召开有关提高可靠性的工作会议。1978 年提出《电子产品可靠性“七专”质量控制与反馈科学实验》计划,并组织实施。经过 10 年努力,使军用元器件可靠性有了很大的提高,保证了运载火箭、通信卫星的连续发射成功和海底通信电缆的长期正常运行。1978 年,国家计划委员会、电子工业部及广播电视总局陆续召开了有关提高电视机质量的工作会议。对电视机等产品明确提出了可靠性、安全性的要求和可靠性指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了大规模的、以可靠性为重点的全面质量管理。在 5 年的时间里,使电视机平均故障间隔时间提高了一个数量级,配套元器件使用可靠性也提高了一至二个数量级。

20 世纪 80 年代可靠性研究继续朝广度和深度发展,其中心内容是实现可靠性保证。1985 年,美国军方提出在 2000 年实现“可靠性加倍,维修时间减半”这一新的目标,并已开始实施。20 世纪 80 年代初,我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的第一高潮,组织编写可靠性普及教材。在原电子工业部内普遍开展可靠性教育,形成了一批研究可靠性的骨干队伍。1984 年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网,并颁布了 GJB 299—87《电子设备可靠性预计手册》,有力地推动了我国电子产品可靠性工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准,使可靠性管理工作纳入标准化轨道。在 20 世纪 80 年代,软件可靠性理论研究停滞不前,没有质的飞跃。但软件可靠性的工程实践经验得到不断积累,不少软件可靠性技术在软件工程实践中得以应用。某些技术达到实用化程序,如软件可靠性建模技术、管理技术等。可以说这一时期,软件可靠性从研究阶段逐渐迈向工程化阶段。

20 世纪 90 年代初,原机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”,沿着管起来—控制好—上水平的发展模式开展可靠性工作,兴起了我国第二次可靠性工作的高潮,取得了较大的成绩。进入 20 世纪 90 年代后,由于软件可靠性问题的重要性更加突出和软件可靠性工程实践范畴的不断拓展,软件可靠性逐渐成为软件开发者需要考虑的重要因素,软件可靠性工程在软件工程领域逐渐取得相对独立的地位,并成为生机勃勃的分支。

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,为了保证战备的完好性、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,需要更多的可靠性技术作保证,需要更加严密的可靠性管理系统。

综上所述,可靠性工程的诞生、发展是社会的需要,与科学技术的发展,尤其与电子技术的发展是分不开的。虽然可靠性工程起源于军事领域,但从它的推广应用和给企业与社会带来的巨大经济效益的事实中,人们更加认识到提高产品可靠性的重要性。世界各国纷纷投入大量人力、物力进行研究,并在更广泛的领域里推广应用。

我国可靠性工程虽然发展快,但应该看到,目前与发达国家相比还有很大差距。为尽快改变我国可靠性工作落后的局面,各级领导和各类人员应尽快从认识上转变观念,树立当代质量观,“以质量求生存,求发展”。把产品性能和可靠性同等看待,这是推动可靠性发展的关键。与此同时,要有效的推动可靠性工程,应将可靠性理论研究成果和可靠性工程技术应用与可靠性工程实践中,把对产品的可靠性要求纳入产品指标体系,并要有相应的考核要求和办法。

1.2 可靠性研究的重要性及其意义

可靠性问题的提出,首先是从军用航空电子设备开始的。在第二次世界大战期间,军用航空电子设备的失效率高,难以维护,引起了对可靠性问题的高度重视。

20 世纪 60 年代以来,可靠性工程技术逐步地在各个工业领域内得到了发展和应用,而且日益得到重视。可靠性研究的重要性及其意义体现在以下几个方面:

1. 产品的可靠性与企业的生命、国家的安全紧密相关

原国防科工委在总结中国两弹一星的成功经验时,将可靠性列为三大技术成就之一;第二次世界大战中美国空军由于技术故障造成的飞机事故多于被击落的损失;1979 年 3 月 28 日美国三里岛核电站发生的放射性物质泄漏事故是由于硬件(冷凝器循环泵)故障和操作人员的不可靠所造成的;而 1986 年 4 月苏联切尔诺贝里核电站爆炸事故,对国家的安全和声誉造成了严重损害。所以,对于重要的大型成套设备如电站、冶金、化工设备等,都应进行可靠性和安全性设计与风险评估,以控制其最低失效概率。

2. 产品性能的优化、结构的复杂化要求有很高的可靠性

随着现代科学技术的发展,机械产品(包括机电一体化产品)的结构日益复杂,如图 1-1 所示,性能参数越来越高,可靠性指标要求同样越来越高。

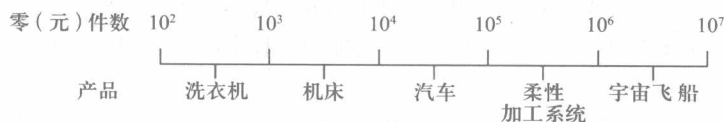


图 1-1 产品结构的复杂化

美国研制 F-105 战斗机时,投资 2500 万美元,使其可靠度从 0.7263 提高到 0.8986,每年节约维修费用 5400 万美元。而 20 世纪 50 年代末,美国迪尔公司在研发新系列发动机和拖拉机时,由于采用了一系列的新结构、新技术,使可靠性大大降低,年维修费用增加 1 倍~2 倍。在可靠性工程领域,人们经常会提到:宁可牺牲先进性,也要保证可靠性。

3. 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

机械产品在工作过程中,往往因一个零件的失效而造成灾难性的后果。1986 年 1 月 28 日美国航天飞机“挑战者”号在发射后进入轨道前,因助推火箭燃料箱密封装置在低温下失效,使燃料溢出而引起爆炸,造成 7 名宇航员牺牲,经济损失达 12 亿美元,如图 1-2 所示。

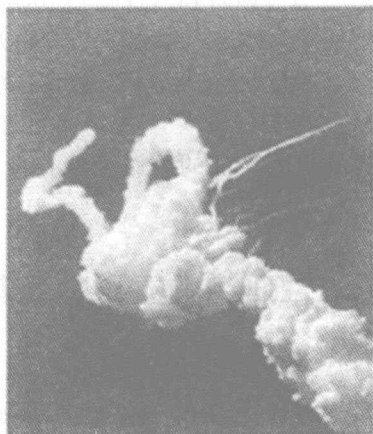


图 1-2 “挑战者”号爆炸情景

4. 产品竞争的焦点是可靠性

一台 300MW 汽轮发电机组因叶片失效被迫停机一天,则少发电 $7.2 \times 10^6 \text{kW} \cdot \text{h}$, 直接损失为 65 万元,间接损失约为 1000 万元。因为国产设备的可靠性不高,每年不得不进口很多机电成套设备,耗费大量外汇。据统计,1985 年和 1986 年进口的机电设备费用分别为 170 亿美元和 190 亿美元,而煤机产品的年进口费用同样高达 250 亿美元左右。

国际市场上机械产品的价格与可靠性水平的高低直接相关。许多产品在投标、签订合同和鉴定、验收时都采用了可靠性指标。在商品广告中利用可靠性特征量的内容越来越多。在发达国家,产品质量和可靠性几乎没有一天不成为新闻。

早在 20 世纪 60 年代初,美国有人预言,今后在激烈的国际市场竞争中,只有可靠性高的产品及其企业才能生存下来。在 20 世纪 80 年代,日本有人断言,今后国际市场上产品竞争的焦点是可靠性。而苏联,更是将可靠性纳入 25 年科技发展规划。日本从美国引进可靠性工程技术之后,在民用产品上的应用十分成功,其汽车、工程机械、发电设备、日用设备(复印机、洗衣机、电冰箱等)能够畅销全球,根本原因是由于其质量及可靠性高,这使日本获取了巨额的利润。

目前在国际上盛行的产品责任法、保质期、索赔制等也都与产品的可靠性有关。例如,1959 年美国小汽车的保质期仅为 4 个月或 6400km,而到 20 世纪 70 年代提高到 5 年或 80000km。

5. 大型产品的可靠性是一个企业、一个国家科技水平的重要标志

1969 年 7 月美国阿波罗登月成功,美国宇航局将可靠性工程列为重大技术成就之一;“神舟五号”载人航天飞船成功的关键是解决了可靠性问题,飞船系统的可靠性指标达到 0.97,而航天员安全性指标达到 0.997。

在美国,几乎所有的军事订货合同中都有可靠性与维修性条款。20 世纪 70 年代后期,美国的国防技术政策有了引人注目的变化,从过去主要追求武器系统的高性能转为更加重视武器系统的可靠性与维修性。

为了提高产品的可靠性,必须在生产的各个环节上做出努力,但最重要的是设计阶段。如果设计不合理,想通过事后的修理来达到所期望的可靠性,这几乎是不可能的。因

此,从事机械研究和系统设计的科研人员,应该熟悉和掌握保证可靠性的各种方法与手段。

1.3 可靠性的定义和特征量

1.3.1 可靠性的定义

根据 GB 3187—1982《可靠性基本名词术语及定义》,可靠性(reliability)的定义是:产品在规定的条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。

理解这一定义应注意下列几个要点:

(1)“产品”,指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、零件、部件、设备、机组等,甚至还可以把人的因素也包括在内。在具体使用“产品”这一词时,必须明确其确切含义。

(2)“规定的条件”,一般指的是使用条件、维护条件、环境条件、操作技术,如载荷、温度、压力、湿度、振动、噪声、磨损、腐蚀等。这些条件必须在使用说明书中加以规定,这是判断发生故障时有关责任方的关键。

(3)“规定的时间区间”,可靠度是随时间而降低的,产品只能在一定的时间区间内才能达到目标可靠度。因此,对时间的规定一定要明确。需要指出的是这里所说的时间,不仅仅指的是日历时间,根据产品的不同,还可能是与时间成比例的次数、距离等,如应力循环次数、汽车的行驶里程等。

(4)“规定的功能”,首先要明确具体产品的功能是什么,怎样才算是完成规定的功能。产品丧失规定的功能称为失效,对可修复产品也称为故障。怎样才算是失效或故障,有时是很容易判定的,但更多的情况是很难判定的。例如,对于某个齿轮,轮齿的折断显然就是失效,但当齿面发生了某种程度的磨损,对某些精密或重要的机械来说该齿轮就是失效,而对某些机械并不影响正常运转,因此就不能算失效。对一些大型设备来说更是如此。因此,必须明确地规定产品的功能。

(5)“能力”,只是定性的分析是不够的,应该加以定量的描述。产品的失效或故障具有偶然性,一个确定的产品在某段时间的工作情况并不能很好地反映该种产品可靠性的高低。应该观察大量该种产品的运转情况进行合理的处理后才能正确反映该种产品的可靠性。因此,这里所说的能力具有统计学的意义,需要用概率论和数理统计的方法来处理。

1.3.2 可靠性的特征量

表示产品总体可靠性水平高低的各种可靠性指标称为可靠性特征量。可靠性特征量的真值是理论上的数值,实际中是不知道的。根据样本观测值,经一定的统计分析可得到特征量的真值的估计值。估计值可以是点估计,也可以是区间估计。按一定的标准给出具体定义而计算值。

常用的可靠性特征量有可靠度、失效概率(或不可靠度)、失效率、平均寿命、可靠寿命与中位寿命等。

1. 可靠度

可靠度是产品在规定的条件下和规定的时间区间内,完成规定功能的概率。一般记为 R , 由于它是时间的函数, 故也记为 $R(t)$, 称为可靠度函数。

如果用随机变量 T 表示产品从开始工作到发生失效或故障的时间, 概率密度为 $f(t)$, 则该产品在某已指定时刻 t 的可靠度, 如图 1-3 所示。

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1-1)$$

对于不可修复产品, 可靠度的观测值是指直到规定的时间区间终了为止, 能完成规定功能的产品数 $N_s(t)$ 与在该区间开始时投入工作的产品数 N 之比, 即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (1-2)$$

式中, $N_f(t)$ 为到 t 时刻未完成规定功能的产品数。

对可修复产品, 可靠度观测值是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间的次数与观测时间内无故障工作的总次数之比(图 1-4), 即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} \quad (1-3)$$

式中, N 为观测时间内无故障工作的总次数, 每个产品的最后一次无故障工作时间若未超过规定时间则不予计入; $N_s(t)$ 为无故障工作时间达到或超过规定时间的次数。

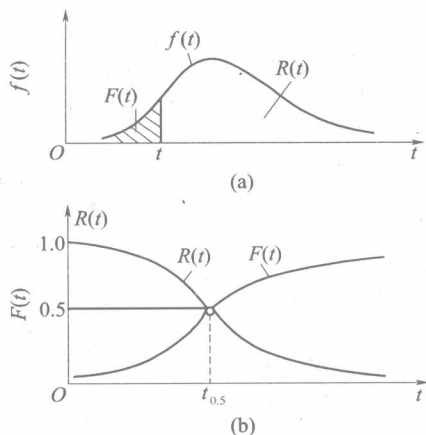


图 1-3 可靠度、失效概率与时间的关系

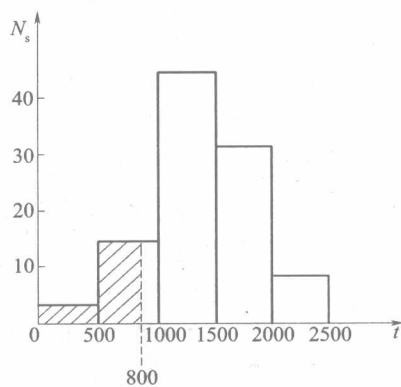


图 1-4 可靠度观察值

上述可靠度公式中的时间是从零算起的, 实际使用中常需知道工作过程中某一段执行任务时间的可靠度, 即需要知道已经工作 t_1 后再继续工作 t_2 的可靠度。

从时间 t_1 工作到 $t_1 + t_2$ 的条件可靠度称为任务可靠度, 记为 $R(t_1 + t_2 | t_1)$ 。由条件概率知

$$R(t_1 + t_2) = P(T > t_1 + t_2 | T > t_1) = \frac{R(t_1 + t_2)}{R(t_1)} \quad (1-4)$$

根据样本的观测值, 任务可靠度的观测值为

$$\hat{R}(t_1 + t_2 | t_1) = \frac{N_s(t_1 + t_2)}{N_s(t_1)} \quad (1-5)$$

2. 失效概率

失效概率是产品在规定的条件下和规定的时间区间内未完成规定功能(即发生失效)的概率,也称为不可靠度。一般记为 F 或 $F(t)$ 。

因为完成规定功能与未完成规定功能是对立事件,按概率互补定理有

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (1-6)$$

累积失效概率的观测值可按概率互补定理得

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) \quad (1-7)$$

失效概率与可靠度的关系如图 1-3 所示。

3. 失效率

失效率是工作到某时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生失效的概率。一般记为 λ ,它也是时间 t 的函数,故也记为 $\lambda(t)$,称为失效率函数。

按上述定义,失效率为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t \leq T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (1-8)$$

它反映了 t 时刻产品失效的速率,也称为瞬时失效率。

失效率的观测值是在某时刻后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比,即

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t) \Delta t} \quad (1-9)$$

平均失效率是指在某一规定时间内失效率的平均值。例如,在 (t_1, t_2) 内失效率平均值为

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (1-10)$$

失效率的单位用单位时间的百分数表示。例如, $\% \cdot 10^{-3} \cdot h^{-1}$, 可记为 $10^{-5} \cdot h^{-1}$ 。失效率的单位也常取成 h^{-1} 、 km^{-1} 、 $次^{-1}$ 等。常用零部件失效率的概略值如表 1-1 所列。

表 1-1 常用零部件失效率 λ 的概略值

零部件名称	λ [失效数/($10^6 h$)]		
	最 上 限	平 均	最 下 限
机床铸件(基础铸件)	0.70	0.175	0.015
一般轴承	1.0	0.50	0.02
球轴承(高速、重载)	3.53	1.80	0.075
球轴承(低速、低载)	1.72	0.875	0.035
轴套或轴承	1.0	0.50	0.02
滚子轴承	0.02	0.002	0.004
凸轮	1.10	0.40	0.001