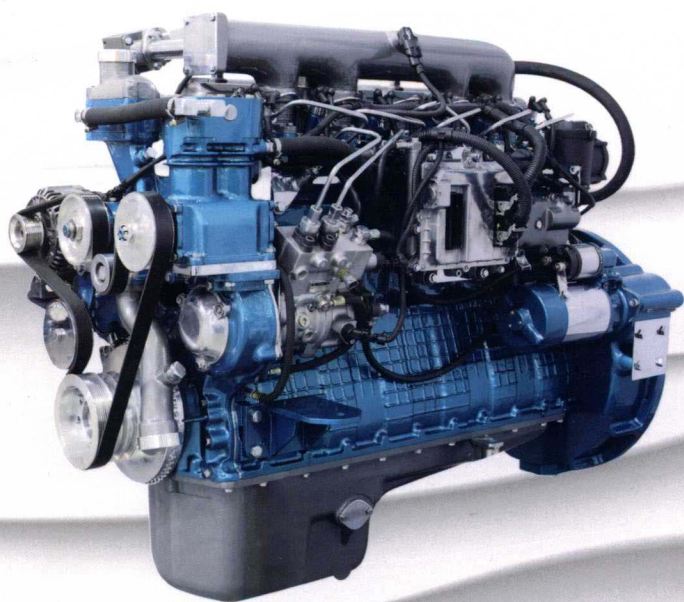


普通高等教育“十三五”规划教材

RELIABILITY DESIGN OF MECHANICAL SYSTEM

机械系统可靠性基础

王学文 主编



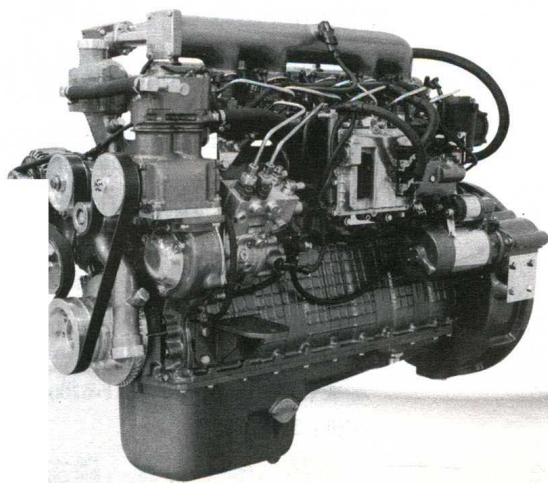
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”规划教材

RELIABILITY DESIGN OF MECHANICAL SYSTEM

机械系统可靠性基础

主 编 王学文
副主编 李 博 谢嘉成
参 编 夏 蕊



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书从系统角度出发,结合机械产品的特点,较全面地介绍了机械系统可靠性分析与设计的基础理论、基本原理与方法。

本书内容主要包括:绪论(可靠性的研究历史、基本概念、特点、数学基础等),可靠性特征量与常用概率分布,系统可靠性模型,系统可靠性预计,系统可靠性分配,系统可靠性设计,系统故障模式、影响及危害性分析,系统故障树分析,人机系统可靠性等。每章附有一定的算例,并配备了习题。习题可提供参考答案,有需要者可与出版社或主编联系。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械工程、车辆工程等相关专业的可靠性教学用书,也可作为相应专业成人高等教育的可靠性教学用书,还可作为从事机械、船舶、车辆等设计、制造、试验、使用与管理的工程技术人员的学习与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统可靠性基础/王学文主编. —北京:机械工业出版社, 2019. 4
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-62060-0

I. ①机… II. ①王… III. ①机械系统—系统可靠性—高等学校—教材
IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 032091 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:余 皞 责任编辑:余 皞 章承林

责任校对:张晓蓉 封面设计:张 静

责任印制:张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13 印张·321 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62060-0

定价:34.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-68326294

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

系统可靠性是衡量系统性能（或产品质量）的重要指标之一。系统可靠性工程的诞生、发展是社会的需要，与科学技术的发展密不可分。系统可靠性工程起源于军工与电子领域，它的推广应用，给企业与社会带来了巨大的经济效益。

应用于机械系统的可靠性研究方法基本沿用以电子元件或设备为对象总结的可靠性研究方法，同时，机械系统可靠性研究也有自己的特点。机械系统可靠性设计与分析的目的，是使机械系统在满足规定的可靠性指标、完成预定功能的前提下，使系统的技术性能、质量指标、制造成本及使用寿命等取得协调并达到最优化，设计出高可靠性机械系统。

本书共9章。第1章从总体上概述了系统可靠性研究的历史、发展及意义，介绍了可靠性研究的基本概念、基本特点和主要研究内容，简要回顾了可靠性数学基础概率论的知识。第2章介绍了可靠性常用特征量和常用概率分布。第3章针对若干系统可靠性模型及其可靠度计算方法进行了详细分析。第4章和第5章详细阐述了如何进行可靠性预计和可靠性分配的若干方法。第6章以应力-强度分布干涉理论和系统耐环境设计为主，分析了系统可靠性设计基础原理与基本方法。第7章介绍了系统故障模式、影响及危害性分析，内容包括系统故障模式及影响分析和系统危害性分析。第8章系统地描述了故障树分析原理与方法，包括故障树的基本概念、建树方法、规范化与简化、定性分析与定量计算、及可靠性框图的等效转换等内容。第9章针对人机系统可靠性的基本概念、功能匹配、影响因素、度量指标、系统设计等内容进行了详述。针对重点和难点内容，每章均精心编写了若干算例和习题，可以引导学生掌握主要基础理论，并培养学生解决机械系统可靠性工程领域实际问题的能力。

本书由王学文担任主编，李博和谢嘉成担任副主编，夏蕊参编。其中，王学文拟定了本书大纲，编写了第1章、第6章、第7章和第8章，并对全书进行了统稿；李博编写了第2章和第3章；谢嘉成编写了第4章和第5章；夏蕊编写了第9章和附录。

由于编者水平所限，书中若有不足之处，敬请读者批评指正，以便修订时改进。

目 录

前 言

第1章 绪论	1
1.1 系统可靠性研究的历史与发展	1
1.2 系统可靠性研究的意义	5
1.3 可靠性的基本概念	7
1.4 机械系统可靠性研究的特点与内容	9
1.5 可靠性数学基础概率论基本原理	12
习题	16

第2章 可靠性特征量与常用概率分布	17
2.1 可靠性特征量	17
2.2 可靠性常用概率分布	27
习题	33

第3章 系统可靠性模型	34
3.1 系统可靠性概述	34
3.2 串联系统模型	39
3.3 并联系统模型	41
3.4 混联系统模型	43
3.5 表决系统模型	46
3.6 旁联系统模型	48
3.7 复杂系统模型	51
3.8 若干典型可靠性框图的可靠度表达式	55
3.9 单元故障对系统可靠性模型的影响	57
3.10 系统可靠性模型的应用	58
习题	59

第4章 系统可靠性预计	60
4.1 系统可靠性预计概述	60
4.2 数学模型法	64
4.3 元器件计数法	66
4.4 相似设备法	68
4.5 评分预计法	69
4.6 上下限法	70
4.7 修正系数法	74
4.8 系统可靠性预计的注意事项与局限性	75
习题	76

第5章 系统可靠性分配	77
5.1 系统可靠性分配概述	77
5.2 比例组合法	79

5.3 评分分配法	80
5.4 等分配法	82
5.5 再分配法	83
5.6 代数分配法 (AGREE 法)	84
5.7 相对失效率法与相对失效率法	87
习题	91

第6章 系统可靠性设计	92
6.1 系统可靠性设计概述	92
6.2 应力-强度分布干涉理论与可靠度计算	96
6.3 已知应力-强度分布时机械零件的可靠度计算	102
6.4 系统耐环境设计	108
习题	116

第7章 系统故障模式、影响及危害性分析	118
7.1 系统故障模式、影响及危害性分析概述	119
7.2 系统故障模式及影响分析	125
7.3 系统危害性分析	130
7.4 系统故障模式、影响及危害性分析实例应用	134
习题	137

第8章 系统故障树分析	138
8.1 系统故障树的基本概念	139
8.2 建造系统故障树	145
8.3 系统故障树的规范化与简化	148
8.4 系统故障树的定性分析与定量计算	152
8.5 系统故障树与系统可靠性框图	164
8.6 系统故障树实例分析	168
习题	171

第9章 人机系统可靠性	174
9.1 人机系统的定义	174
9.2 人机的功能与特点分析	175
9.3 人机功能匹配	178
9.4 人机系统可靠性的人因分析	181
9.5 人机系统的可靠性指标	191
9.6 人机系统可靠性设计	195
习题	200

附录	201
参考文献	204

绪 论

1.1 系统可靠性研究的历史与发展

系统可靠性和产品质量不可分离，系统可靠性是衡量系统性能（或产品质量）的重要指标之一。

可靠性的前身是伴随着兵器的发展而诞生和发展的，从公元前 26 世纪的冷兵器时期，人类已经对当时所制作的石兵器进行了简单检验。在殷商时代已有的文字记载中，就有关于生产状况和产品质量的监督和检验，说明当时的人们对质量和可靠性已有了简单朴素的认知。

可靠性最主要的理论基础概率论早在 17 世纪初就逐步确立；另一主要理论基础数理统计学在 20 世纪 30 年代初期也得到了迅速发展；1939 年瑞典人威布尔为了描述材料的疲劳强度而提出了威布尔分布，后来成为可靠性最常用的分布之一。

20 世纪 40 年代是热兵器的成熟期，即第二次世界大战期间。当时，德国使用 V-2 火箭袭击伦敦，有 80 枚火箭没有发射就爆炸，还有的火箭没有到达目的地就坠落。美国当时的航空无线电设备有 60% 不能正常工作，其电子设备在规定的使用期限内仅有 30% 的时间能有效工作，因此类可靠性问题使飞机损失惨重。

最早提出系统的可靠性理论的是德国的科学技术人员，德国的 V-1 火箭是第一个运用系统可靠性理论计算的飞行器。V-1 火箭研制后期，提出用串联系统理论，得出火箭系统的可靠度等于所有元器件、零部件乘积的结论。根据系统可靠度乘积法则，计算出该火箭系统的可靠度为 0.75。

20 世纪 50 年代初期，为了发展军事的需要，美国投入了大量的人力、物力对可靠性进行研究，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。其中，AGREE 是由美国国防部成立的一个由军方、工业领域和学术领域三方共同组成的组织。AGREE 在 1955 年开始制订和实施从设计、试验、生产到交付、储存、使用的全面可靠性计划，并在 1957 年发表了《军用电子设备可靠性》的研究报告，即著名的 AGREE 报告。该报告从 9 个方面全面阐



述了可靠性设计、试验、管理的程序和方法，成为可靠性发展的基础性文件。

20 世纪 50 年代，为了保证人造地球卫星发射与飞行的可靠性，苏联开始了系统可靠性的研究工作。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。

几乎同一时期，日本企业家也认识到，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。

20 世纪 60 年代是可靠性工程全面发展的阶段，可靠性研究已经从电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械设备、动力、土木建筑、冶金、化工等部门。在此期间，美国航空航天事业迅速发展，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试验方案，美国的战斗机、坦克、导弹、宇宙飞船等装备，都是按照 1957 年 AGREE 报告提出的可靠性设计、试验、管理等方法或程序进行设计开发的。此时，已经形成了针对不同产品制订的较完善的可靠性大纲，并定量规定了可靠性要求，可进行可靠性分配和预测；在理论上，有了故障模式及影响分析（FMEA）和故障树分析（FTA）；在设计理念上，采用了余度设计，并进行可靠性试验、验收试验和老练试验；在管理上，已经可对产品进行可靠性评审，使装备可靠性提升明显。在此期间，其他工业发达国家，如日本、苏联等国家也相继对可靠性理论、试验和管理方法等进行了更加深入的研究；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技领域、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生产效率和安全性，可靠性问题研究显得日益重要，系统可靠性理论与实践的发展也进入了成熟应用阶段。例如美国建立集中统一的可靠性管理机构，负责组织、协调可靠性政策、标准、手册和重大研究课题，成立全国数据网，加强政府与工业部门间的技术信息交流，并制订了完善的可靠性设计、试验及管理的方法和程序。在项目设计上，从一开始设计对象的型号论证开始，就强调可靠性设计，在设计制造过程中，通过加强对元器件的控制，强调环境应力筛选、可靠性增长试验和综合环境应力可靠性试验等来提高设计对象的可靠性。同时，人们开始了对非电子设备（如机械设备）可靠性的研究，以解决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 年代是我国可靠性研究的重要时期。期间我国国家重点工程的需要（如元器件的可靠性问题）与消费者的强烈需求（如电视机的质量



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,为了解决国家重点工程元器件的可靠性问题,国防科工委和四机部多次召开有关提高可靠性的工作会议。1978年,我国提出《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、电子工业部与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1~2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,在技术上深入开展软件可靠性、机械可靠性、光电器件可靠性和微电子器件可靠性的研究,全面推广计算机辅助设计技术在可靠性领域的应用,采用模块化、综合化和超高速集成电路等可靠性高的新技术来提高设计对象的可靠性。该时期的核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。

同一时期,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,形成了一批可靠性研究的骨干队伍。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—1987《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。

20世纪90年代,可靠性向综合化、自动化、系统化和智能化方向发展。综合化是指统一的功能综合设计而不是分立单元的组合叠加,以提高系统的信息综合利用和资源共享能力;自动化是指设计对象具有一定的自动执行能力,可提高产品在使用过程中的可靠性;系统化是指研究对象要能构成有机体系,发挥单个对象不能发挥的整体效能;智能化将计算技术引入,采用例如人工智能等先进算法,提高产品系统的可靠性和维修性。

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,系统可靠性工程及可靠性管理系统得到大力发展。

20世纪90年代初,我国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,并成为一



勃勃的分支。

20 世纪 90 年代后一段时期, 可靠性研究工作相对落入低谷, 标志性成果较少, 出成果较慢。

进入 21 世纪后, 可靠性工作有些升温, 升温动力主要来源于企业对产品质量的重视。许多工业部门将可靠性工作放在了重要的地位, 军工集团也陆续成立了可靠性中心。如 2008 年, 我国在 1991 年建立兵器可靠性中心的基础上, 建立了国防科技工业机械可靠性研究中心, 使得具有完全自主知识产权的可靠性技术成果不断得到推广应用。

2015 年 5 月 19 日, 我国正式印发《中国制造 2025》, 其中与可靠性有关的表述包括: “加强可靠性设计、试验、验证技术的研究和应用; 推广先进的在线故障预测与诊断技术及后勤系统; 国产关键产品可靠性指标达到国际先进水平。” 中国制造要从大国走向强国之路, 企业必须狠抓质量和可靠性。

近几年, 云计算与大数据技术蓬勃发展, 可靠性可以借助云计算与大数据技术这些新的工具达到一个新的高度。系统可靠性领域的可靠性评估、仿真、计算、健康检测与预管理 (PHM) 技术、可靠性试验, 都需要大规模数据来进行支撑才能产生好的效果, 以往这些数据都不全并且收集困难, 而随着互联网 + 的大数据时代的来临, 可靠性与质量数据的收集正迎来一个充满生机的时代。云计算与大数据必将对系统可靠性工程领域的理论、技术、方法等带来前所未有的影响, 也为未来各行业的系统可靠性工程带来全面提升。

综上所述, 系统可靠性工程的诞生、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。可靠性发展正在从单一领域研究发展到多学科交叉渗透; 可靠性工程起源于军事领域, 但它的推广应用, 给企业与社会带来了巨大的经济效益。

目前, 可靠性成为一门独立的学科已有数十年, 并取得了很大的成就, 但其在发展研究上也有亟待解决的问题。首先, 目前对电子产品的可靠性研究已较为成熟, 对机械系统的可靠性研究较晚, 由于机械零件的失效模式和电子元件相比有很大差别, 机械系统的构成也不同于电子系统, 机械系统的受载方式更为复杂, 其失效的影响因素也更为多样, 至今还没有数学模型和分析方法可直接用于机械系统进行可靠性研究。目前, 应用于机械系统的可靠性分析方法基本沿用以电子元件或设备为对象总结出来的可靠性方法, 这就有可能导致对机械系统的可靠性分析与设计走入误区。其次, 如何在小样本条件下确定系统的可靠性参数是一个迫切需要解决的问题。最后, 常规的可靠性理论是在两态假设和概率假设基础上建立的, 但在可靠性工程实际中, 很难满足上述两个基本假设, 用常规可靠性理论进行系统评价并不能完全反映实际情况。总之, 系统可靠性从诞生、发展到应用已经逐步向各学科渗透, 但在现代科技飞速发展的时期, 系统可靠性在理论和研究模式上还有欠缺, 需要结合其他理论如模糊理论、人工智能

等，使可靠性理论、试验和管理能够更成熟、更完善。

在我国，系统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的落后局面，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，是推动可靠性发展的关键。与此同时，要有效地推动可靠性工程，应将可靠性理论研究成果和可靠性工程技术应用于可靠性工程实践中，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 系统可靠性研究的意义

1. 系统性能的优化、产品结构的复杂化要求具备很高的系统可靠性

随着现代科学技术的发展，系统（或产品）的结构日益复杂（图 1-1），性能参数越来越高，可靠性指标要求同样越来越高。

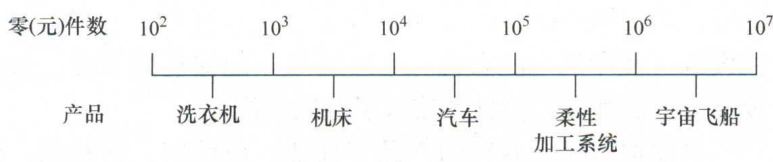


图 1-1
产品结构复杂化

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。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。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。

2. 产品更新速度的加快，使用场所的广泛性、严酷性，要求具备很高的系统可靠性

产品在工作过程中，往往因一个零件的失效而造成灾难性后果。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。

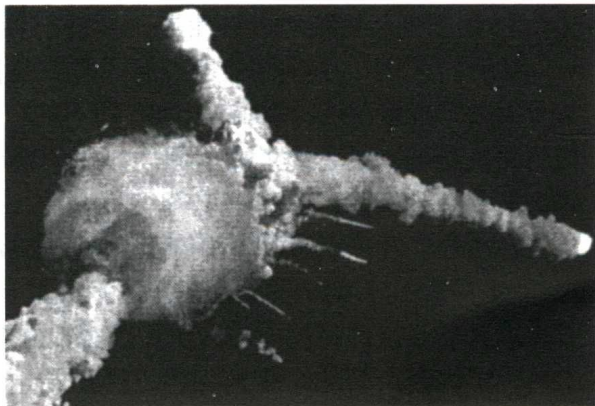


图 1-2
“挑战者”号
爆炸情景



3. 产品竞争的焦点是系统可靠性

若一台 300MW 的汽轮发电机组因叶片失效被迫停机一天,则少发电能 $7.2 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 直接损失为 65 万元, 间接损失超过 1000 万元。因为国产设备的系统可靠性不高, 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。

国际市场上机械产品的价格与系统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、验收时都采用了系统可靠性指标。在商品广告中利用系统可靠性特征量的内容越来越多。在发达国家, 产品质量和系统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, 只有系统可靠性高的产品及其企业才能幸存下来。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系统可靠性。而苏联更是将系统可靠性纳入 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, 根本原因是其质量及系统可靠性高, 使日本获取了巨额利润。

目前在国际上盛行的产品责任法、质保期、索赔制, 也都与产品的系统可靠性有关。例如, 1959 年美国小汽车的质保期仅为 4 个月或 6400km, 而到 20 世纪 70 年代已提高到 5 年或 80000km。

4. 产品的系统可靠性与企业的生命、国家的安全紧密相关

我国在总结“两弹一星”的成功经验时, 将系统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; 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。

因此, 对于重要的大型成套系统, 都应进行系统可靠性和安全性设计与风险评估, 以控制其最低失效概率。

5. 大型复杂系统的可靠性是企业和国家科技水平的重要标志

1969 年 7 月, 美国阿波罗登月成功, 美国宇航局将系统可靠性工程列为重大技术成就之一。2003 年 10 月, 我国“神舟五号”载人航天飞船成功的关键是解决了系统可靠性问题, 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, 都有系统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。

为了提高产品的系统可靠性, 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，应熟悉和掌握保证系统可靠性的各种方法与手段。

1.3 可靠性的基本概念

1.3.1 可靠性的定义

最早的可靠性定义是由美国 AGREE 在 1957 年的报告中提出的。1966 年美国的 MIL-STD-721B 较正规地给出了可靠性的定义，即“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力”。该定义为世界各国的标准所引证，我国的 GB 3187—1982《可靠性基本名词术语及定义》给出的可靠性定义也与此相同。

(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、系统等，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) “规定条件” 一般指使用条件、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) “规定时间” 可靠度随时间而降低，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” 只有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。应该观察大量该产品的运转情况进行合理的处理后才能正确反映该产品的可靠性。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 可靠性的分类

可靠性在具体使用过程中可分为很多类型，在维修性、工作可靠性、可靠性模型、可靠性设计等方面一些常用的可靠性分类如下：



1. 狭义可靠性与广义可靠性

狭义可靠性：上文的可靠性定义常称为狭义可靠性，它仅表示产品（或者一个评价系统）在某稳定时间内发生失效（或者故障）的难易程度。但是事实上，除了一部分元件外，大多数设备（子系统）和系统都是可以维修的。所以要表示其完成功能的能力还必须考虑其维修性，即系统失效后能否很快地恢复其功能而继续工作。这样，从维修产品的角度出发，可靠性的含义就应该更广泛一些。

广义可靠性：是指“产品在其整个寿命期限内完成规定功能的能力”。它包括可靠性（即狭义可靠性）与维修性。由此可见，广义可靠性对于可修复的产品和不可修复的产品有不同的意义。对于可修复的产品，除了要考虑提高其可靠性外，还应考虑提高其维修性；而对于不可修复的产品，由于不存在维修的问题，只需考虑提高其可靠性即可。

与广义可靠性相对应，不发生故障的可靠度（即狭义可靠度）与排除故障（或失效）的维修度合称为广义可靠度。

2. 固有可靠性与使用可靠性

产品运行时的可靠性，称为工作可靠性（Operational Reliability），它包含了产品的制造和使用两方面因素，用“固有可靠性”和“使用可靠性”来反映，见表 1-1。

表 1-1 固有可靠性与使用可靠性

	类 别	百分比	备 注
不可靠性	零部件材料缺陷	30%	固有可靠性
	设计技术缺陷	40%	
	制造技术缺陷	10%	
	使用（运输、环境、操作、安装、维修、技术）不当	20%	使用可靠性

固有可靠性（Inherent Reliability）：即在生产过程中已经确立了的可靠性。它是产品内在的可靠性，是生产企业在模拟实际工作条件的标准环境下，对产品进行检测并给以保证的可靠性。它与产品的材料、设计与制造工艺及检验精度等有关。

使用可靠性（Use Reliability）：与产品的使用条件密切相关，受到使用环境、操作水平、保养与维修等因素的影响。使用者的素质对使用可靠性影响很大。因为即使是一个可靠性很高的产品，如果由于包装、运输安装、使用维修等环节中受到各种不良因素的影响也会降低其可靠性。譬如运输过程中受到的冲击，使用中环境的变化、操作的失误，都会使产品失效或寿命下降，因此，可靠性不仅与生产而且与产品所涉及的各个环节都有关。

3. 基本可靠性与任务可靠性

基本可靠性和任务可靠性属于可靠性模型范畴。

基本可靠性定义为“产品在规定条件下无故障的持续工作时间和概率”。基本可靠性模型用以估计产品及组成元件引起的维修及保障要求。系



统中任一单元（包括储备单元）发生故障后，都需要维修或更换，故而可以把它看作度量使用费用的一种模型。基本可靠性模型是一个全串联模型，即使存在冗余单元，也都按串联处理。所以，储备元件越多，系统的基本可靠性越低。

任务可靠性定义为“产品在规定的任务范围内，完成规定功能的能力”。任务可靠性模型是用以估计产品在执行任务过程中完成规定功能的概率，描述完成任务过程中产品各单元的预定作用，用以度量工作有效性的一种模型。系统中的储备单元越多，则其任务可靠性越高。

在建立基本可靠性模型和任务可靠性模型时，需要在人力、物力、费用和任务之间权衡。例如在某设计方案中，为了提高其任务可靠性而大量采用储备元件，则其基本可靠性必然降低，即需要许多人力、设备、备件等来维修这些储备单元。在另一设计方案中，为减少维修及保障要求而采用全串联模型（无储备单元），则其任务可靠性必然较低。设计者的责任就是要在不同的设计方案中利用基本可靠性及任务可靠性模型进行权衡，在一定的条件下得到最合理的设计方案。

4. 定性可靠性与定量可靠性

机械可靠性设计可分为定性可靠性设计与定量可靠性设计。

定性可靠性设计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。

定量可靠性设计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。定量可靠性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的设计时采用。

1.4 机械系统可靠性研究的特点与内容

1.4.1 机械系统可靠性研究的基本特点

1. 以应力和强度为随机变量作为出发点进行可靠性设计

因机械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，且载荷、强度、结构尺寸、工况等都具有变动性和统计本质。

2. 应用概率和统计方法进行可靠性设计

基于应力和强度都是随机变量这一客观事实和基本认识，机械系统可靠性设计需应用概率和统计方法进行分析 and 求解。

3. 能定量地回答系统或产品的失效率和可靠度

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系统或产品的失效率和可靠度。

4. 有若干可靠性指标供选择和使用

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，机械系统可靠性设计要求根据不同的产品、场合采取不同的可靠性指标。机械系统可靠性设计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。在设计开始阶段就应当选定可靠性指标以及评价方法等。

5. 强调设计对系统可靠性的主导作用

机械系统的可靠性从根本上来说，是由设计决定的，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，系统（或产品）都是不可靠的。在设计中赋予机械零件以足够的固有可靠性，该零件就会本质上可靠。

6. 考虑环境对可靠性的影响

机械系统可靠性设计必须考虑环境影响。高温、低温、冲击、振动、潮湿、盐雾、腐蚀、沙尘、磨损等环境激励对机械系统可靠度有很大影响。

7. 设计过程考虑维修性

在机械产品的耗损失效期及有效度是主要可靠性指标时，机械系统可靠性设计都必须考虑维修性。以有效度为可靠性指标的产品，例如工程机械，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共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，为使系统达到规定的有效度，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，分析究竟是提高维修度还是提高可靠度更为合理。

8. 基于系统角度进行可靠性设计与分析

从系统的、整体的、人机工程的观点出发考虑机械系统可靠性设计问题，并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

机械系统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和制造工艺，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”。

1.4.2 机械系统可靠性研究的主要内容

机械系统可靠性研究的内涵丰富，本书主要涉及以下内容：



1. 系统可靠性指标

选取何种可靠性指标取决于系统的类型、设计要求以及习惯和方便性等，而系统可靠性指标的等级或量值，则应依据设计要求或已有的试验、使用和修理的统计数据、设计经验、产品的重要程度、技术发展趋势及市场需求等来确定。例如，对于汽车，可选用可靠度、首次故障里程、平均故障间隔里程等作为可靠性指标，对于工程机械则常采用有效度。

2. 系统可靠性模型

搜集、分析与掌握某机械系统在使用过程中零件材料的老化、损伤和失效等的有关数据及材料的初始性能对其平均值的偏离数据；揭示影响老化、损伤这一复杂的物理化学过程的本质因素；追寻故障的真正原因；研究以时间函数形式表达的材料老化、损伤的规律，从而估计产品在使用条件下的状态和寿命。用统计分析的方法使故障（失效）机理模型化，建立计算用的可靠度模型或故障模型，为机械系统可靠性设计奠定物理数学基础。

3. 系统可靠性预测

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。

4. 系统可靠性分配

将系统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，将确定的产品可靠性指标的量值合理地分配给零部件，以确定每个零部件的可靠性指标值，后者与该零部件的功能、重要性、复杂程度、体积、重量、设计要求与经验、已有的可靠性数据及费用等有关，这些构成对可靠性指标值的约束条件。可采用优化设计方法将系统可靠性指标值分配给各个零部件，以求得到最大经济效益下的各零部件可靠性指标值的最合理匹配。

5. 系统可靠性设计

“产品的可靠性是设计出来的，生产出来的，管理出来的”。要从本质上提高产品的固有可靠性，必须通过各种具体的可靠性设计。系统可靠性设计是为了在设计过程中挖掘、分析及确定隐患和薄弱环节，并采取设计、预防和改进措施有效地消除隐患和薄弱环节，提高系统和设备的可靠性。

6. 系统故障模式影响及危害性分析

故障模式影响及危害性分析，是通过分析系统中各个零部件的所有可能的故障模式及故障原因以及对系统的影响，并判断这种影响的危害度有多大，从而找出系统中潜在的薄弱环节和关键的零部件，采取必要的措施，以避免不必要的损失和伤亡。



7. 系统故障树分析

故障树以系统所不希望发生的事件（故障事件）作为分析的目标，先找出导致这一事件（顶事件）发生的所有直接因素和可能的原因，然后将这些直接因素和可能原因作为第二级事件，再往下找出造成第二级事件发生的全部直接因素和可能原因，并依此逐级地找下去，直至追查到那些最原始的直接因素。

8. 人机系统可靠性

人机系统是指人与其所控制的机器相互配合、相互制约，并以人为主导完成规定功能的工作系统。在人机系统可靠性设计中，首先按照科学的观点分析人和机器各自所具有的不同特点，以便研究人与机器的功能分配，从而扬长避短，各尽所长，充分发挥人与机器的各自优点；然后从设计开始就尽量防止产生人的不安全行为和机器的不安全状态，做到安全生产。

1.5 可靠性数学基础概率论基本原理

为了观察工程中大量随机事件的规律，确定系统（或产品）的可靠性特征量，必须根据概率论的方法建立有关数学模型和进行计算。

1.5.1 概率论基本概念

1. 随机现象

在一定条件下可能出现也可能不出现的现象称为随机现象。

2. 随机试验

在概率论中，随机试验（或观察）满足以下三个条件：①试验可以在相同的条件下重复进行；②每次试验至少有两个可能结果，且在试验结束之前可以明确知道所有的可能结果；③进行一次试验之前不能确定哪一个结果会出现。随机试验常用字母 E 表示。

3. 样本空间

随机试验 E 的所有可能结果组成的集合称为样本空间，记为 S 。

4. 样本点

样本空间的元素，即试验 E 的每一个结果，称为样本点。

5. 随机事件

随机试验 E 的样本空间 S 的子集称为 E 的随机事件，简称事件。常用 A 、 B 、 C 等大写字母来表示。

基本事件：由一个样本点组成的单点集。

复合事件：由若干基本事件组合而成的事件。

必然事件：在一定条件组下必然发生的事件。

不可能事件：在一定条件组下必然不发生的事件。

对立事件：必然事件的对立面是不可能事件，不可能事件的对立面是必然事件，它们互称为对立事件。