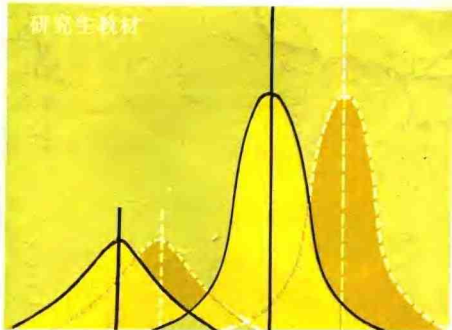


研究生教材



机械
可靠性
设计
基础

JIXIE

KEKAOXING

SHIJI

JICHU

内 容 提 要

本书系统地介绍了机械可靠性设计的基础知识和理论。全书共分七章：第一、二、三章为可靠性的基本概念与基础数学知识；第四、五章为系统的可靠性预测及可靠度分配；第六、七章为机械零件的可靠性设计与机械的维修性设计。

本书取材新颖，内容系统，例题较多，深度适宜，可作为高等工科院校机械类专业研究生和本科生的教材，也可供从事机械设计的工程技术人员、管理人员参考。

机械可靠性设计基础

Jixie Kekaoxing Shejijichu

齐 良 编

大连理工大学出版社出版 辽宁省新华书店经销

(大连市凌水河) 大连理工大学印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：6 1/4 字数：143 千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数：0001—2000册

责任编辑：于明珍 责任校对：寸 土

封面设计：羊 戈

ISBN 7-5611-0262-3/TB·10 定价：1.31 元

前 言

可靠性工程是一门新兴的边缘学科。它是从 40 年代研究电子产品故障开始，50 年代才作为一门独立的学科进行了有组织的研究。60 年代由于空间科学和宇航技术的发展使可靠性研究的水平得到了进一步的提高，研究的范围扩展到结构、机械、机电系统以及由上述系统组成的综合系统。当前，可靠性工程的应用范围也从尖端的工业部门（如宇航、航空、电子、原子能、军事等部门）扩展到了一般的工业部门。可以说，机械产品的可靠性设计和分析已成为机械设计的一个重要方面，是产品发展和竞争中不可缺少的一环。

可靠性工程涉及数学、物理、化学、电子、机械、管理以及人机工程等各个领域，它致力于提高产品的可靠性，包括从研制到使用、维护直至报废的全寿命周期，是一项十分复杂的系统工程。它研究的主要内容是可靠性设计、可靠性试验和维修性设计。产品的可靠性是由设计决定的，由制造工艺来保证。设计可靠性与制造可靠性共同决定了产品的固有可靠性，而可靠性试验的数据又是可靠性设计的基础，使用与维修是维持产品可靠性的重要手段。为保证产品有满意的可靠性，在整个寿命周期内都必需进行可靠性管理。

提高产品的可靠性，是提高产品质量的重要环节。实践表明，可靠性工程的应用会为社会带来巨大的经济效益。在工业发达国家中，可靠性工程受到高度重视，普遍建立各种专门的研究机构，进行广泛的研究和交流。在工厂里设有可

靠性工程师室，对产品进行可靠性设计和可靠性估计，以确保产品质量。

在我国，随着国民经济的迅速发展，由于新产品的开发和技术改造的需要，产品的可靠性问题受到重视。为了满足教学和生产实践日益迫切的需要，解决教材和有关资料缺乏的问题，特编写了这本内容比较系统而理论又不太深奥的教材。

本书共分七章：第一、二、三章为机械可靠性基本概念和基础数学知识；第四、五、六、七章为可靠性设计的理论和方法。

本书可作为高等工科院校研究生与本科生的教材。也可作为从事机械设计的工程技术人员的参考书。

本书经由大连理工大学数学系滕素珍副教授审阅，并提出宝贵的修改意见，在此表示衷心地感谢。

机械可靠性设计是一门新兴的学科，加之编者水平所限。书中难免存在着缺点和错误，敬希读者批评指正。

编者

1989. 11. 20

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 可靠性学科发展简史.....	(1)
§ 1.2 可靠性在机械产品设计中应用的必要性.....	(4)
§ 1.3 可靠性学科研究的基本内容.....	(7)
§ 1.4 可靠性设计方法与安全系数设计法的差别.....	(10)
第二章 可靠性的数学基础	(14)
§ 2.1 随机事件与概率.....	(14)
§ 2.2 概率的基本运算法则.....	(17)
§ 2.3 随机变量及其分布函数.....	(20)
§ 2.4 随机变量的数字特征.....	(24)
第三章 可靠性的基本概念及常用的几种概率分布	(30)
§ 3.1 可靠性的基本概念.....	(31)
§ 3.2 常用的几种概率分布.....	(41)
§ 3.3 概率分布的概率纸检验.....	(55)
§ 3.4 威布尔分布在滚动轴承设计中的应用.....	(65)
第四章 可靠性预测	(70)
§ 4.1 系统可靠性的基本概念.....	(70)
§ 4.2 零件的可靠性预测.....	(75)
§ 4.3 系统结构模型分类.....	(77)
§ 4.4 串联系统的可靠度计算.....	(82)
§ 4.5 工作储备系统的可靠度计算.....	(86)
§ 4.6 非工作储备系统的可靠度计算.....	(96)
§ 4.7 混联系统的可靠度计算.....	(101)

第五章 系统可靠度的分配	(105)
§ 5.1 概述.....	(105)
§ 5.2 等同分配法.....	(108)
§ 5.3 按相对失效率比的分配方法.....	(109)
§ 5.4 AGREE 分配法.....	(114)
§ 5.5 花费最小的分配方法.....	(117)
§ 5.6 动态规划分配法.....	(120)
第六章 静强度的可靠性设计	(127)
§ 6.1 概述.....	(127)
§ 6.2 分布函数的运算方法简介.....	(129)
§ 6.3 可靠性设计的“干涉”理论.....	(136)
§ 6.4 可靠性设计实例.....	(140)
§ 6.5 安全系数可靠性设计法.....	(157)
第七章 可维修系统的可靠性设计	(165)
§ 7.1 概述.....	(165)
§ 7.2 维修度.....	(167)
§ 7.3 可用度(有效度).....	(171)
§ 7.4 可维修系统的马尔柯夫过程.....	(172)
§ 7.5 可维修系统的可靠度计算.....	(179)
附录	(187)
附表 1 标准正态积分表.....	(187)
附表 2 相关系数 r 的起码值.....	(188)
参考文献	(190)

第一章 绪 论

§ 1.1 可靠性学科发展简史

在人类的语言中，很早就使用了“可靠性”这个词汇，但是，那时人们只能凭经验对产品的可靠性作出定性的评估，如可靠、比较可靠、不太可靠等。在工程上对可靠性进行定量的系统研究是从第二次世界大战末期开始的。当时，美国对日作战使用的电子设备经过储存、运输到达远东战场后，由于电子管大量出现故障而失去作战机能。据统计，运往远东飞机上的电子设备 60% 不能使用，储存期间的失效率竟高达 50%，致使由于故障原因损失 2.1 万架飞机，比被击落的还要多。在朝鲜战争中，美国电子设备不可靠问题进一步暴露。当时，雷达出故障不能工作时间达 84%，空军在 5 年中电子设备的维修费用超出购置费用的 10 倍。这些不仅带来大量的经济损失，还会导致人员的严重伤亡，甚至战役的失利。在这种形势下，为了保证军用产品的高度可靠性而受到重视，美国是系统地研究可靠性学科最早的国家。1942 年美国麻省理工学院某研究室对真空管的可靠性作了深入的调查研究，从 50 年代起，一些工程技术人员和数学家们运用概率论和数理统计学对产品的可靠性问题作了定量研究，于是可靠性理论逐渐发展成为一门新兴的学科。其发展过程如下：

1950 年起，由美国三军参谋长联席会议、军需局、学会团体等组成国防部电子设备可靠性专家工作组，总结电子

产品的故障并制订可靠性规划。

1952 年 8 月，改组为国防部电子设备可靠性顾问团，简称 AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)。其任务是制定从技术上和组织上能够提高电子设备和元件可靠性的方法与途径。

1954 年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。

1957 年 7 月，AGREE 发表了《电子设备可靠性报告》。提出有关电子工业产品可靠性建议：建立可靠性指标；在研制与生产中对产品可靠性指标进行试验、评定和鉴定的方法；在生产、包装、储存、运输等方面需注意的问题及要求等。该报告对美国可靠性问题的研究和发展起过重大作用，直到目前仍有参考价值。

1957 年美国成立了国防部导弹可靠性专门委员会，1958 年发表了研究报告。

1962 年美国召开了第一届可靠性与可维修性学术会议，以后每年举行一次。同年还召开了第一届电子设备故障物理学术会议，将可靠性的研究扩展到对可维修性的研究，并深入到了了解产生故障的机理方面。

1965 年国际电子技术委员会 IEC (International Electrotechnical Commission) 设立了可靠性技术委员会 TC—56，1977 年改名为可靠性与维修性技术委员会，协调各国间的可靠性用语和定义、可靠性管理、数据的收集及书写方法等。

1971 年举行了第一届 FTC (计算机系统耐故障性) 国际会议。

1975 年召开了国际软件可靠性学术讨论会。

其他一些发达国家，可靠性的研究工作都晚于美国。如：

1958 年日本科学技术联盟建立了可靠性研究委员会。

1962 年英国出版了《可靠性与微电子学》杂志。

1962 年法国国立通讯研究所成立了“可靠性中心”，进行数据的收集与分析，1963 年出版了《可靠性》杂志。

1964 年苏联和东欧各国在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议。

可靠性理论在机械工程领域里的应用，起始于本世纪60年代。1961 年，F. B. Stulen 在机械设计中考虑了材料疲劳极限的概率分布问题，1965 年，H. C. Baker 对铝蜂窝结构进行了可靠性分析。1964~1968 年，E. B. Haugen 对二个正态分布函数的代数运算进行分析，并在以后的机械设计中应用，从 1970 年开始，D. Kececioglu 提出机械可靠性设计的一套方法，从而进入实用阶段。

我国对可靠性问题的研究日趋重视，从第一个五年计划以来，原第四机械工业部（电子工业部）的有关研究所和工厂作了不少工作，并出版了《可靠性与环境试验》和《国外电子产品可靠性与环境性试验》两种刊物，颁布了一些可靠性的国家标准，开展了可靠性研究、可靠性教育与技术普及工作，并取得了一定的成果。

可靠性理论从 40 年代研究电子产品故障开始，60 年代由于空间科学和宇航技术的发展使可靠性研究的水平进一步地提高，研究范围逐渐扩展到结构、机械、机电系统以及由上述系统组成的综合系统的可靠性问题，70 年代初集成电路的迅速发展又进一步促进了可靠性的研究。当前，可靠性应用范围也从尖端的工业部门（宇航、航空、电子、原子能电站、军事等）扩展到了一般的工业部门，从而可靠性设计和分析将成为产品发展和竞争中不可缺少的一环。

§ 1.2 可靠性在机械产品设计中应用的必要性

机械工业是国民经济的基础部门之一，机械工业发展水平在很大程度上决定了其它部门技术水平的高低、发展速度的快慢和经济效益的大小。而机械产品质量的好坏也直接关系到四化的建设，影响着人民的生活。特别是在改革开放的新形势下，增强产品在国际市场上的竞争力和经济效益，关键之一就是要提高机械产品的质量。按国家标准GB3935.1—83《标准化工作导则、标准化基本术语》，质量定义为“产品、过程或服务满足规定要求的特征和特征的总和”。一个产品能否满足规定要求的特征，主要从两个方面考核：一是产品的性能是否达到满足功能要求的各项技术指标；二是在工作过程中能否继续满足功能要求。前者是产品的技术性能问题；后者为产品的可靠性问题，它研究产品满足规定功能的可能性与工作时间的关系和产品不能满足规定功能的原因以及改进措施。因此，可靠性是产品质量的重要内容。

可靠性在机械产品设计中应用的必要性有以下几个方面：

一、产品日趋复杂，可靠性越加重要

近几十年来，科学技术发展很快，要求一些设备具有非常优良的性能。因此，这些设备的结构变得很复杂，所采用的零部件数量也相应地增多。例如，阿波罗宇宙飞船总共使用了 710 万个以上的零件，1.5 万个单位、42 万多人参加研制。除储备系统外，随着零件数量的增加，设备的可靠性就会相应地降低，于是可靠性就变得更加突出。例如由 1000 个零件组成的设备，若每个零件的可靠度均为 0.999，则设备的可靠度仅为 0.3677。反之，如某设备是由 100 万

个零件组成的，如要求设备的可靠度为 0.95，则每个零件的可靠度应大于 0.999 999 9。

另外，随着产品日趋复杂，使得设计、制造、销售和使用该产品的单位与人员必然增多，人-机关系也更复杂化。在相互配合和操作中更易出差错，从而增加了不可靠的因素。

总之，随着产品日趋复杂，对产品的可靠性将会提出更高的要求，变得更加突出。

二、可靠性是提高经济效益、增强竞争力的需要

提高产品的可靠性虽然要花费一定的资金，但由于产品质量提高以后增加了产品的信誉，增强了在市场上的竞争力，从而会带来显著的经济效益。例如，美国西屋公司提高某产品的可靠性后，可靠度提高所需的花费仅为其经济效益的 1%。日本 50 年代从美国引进可靠性技术后，汽车、彩电、工程机械……畅销全球，从而获得巨额利润。上海某电视机厂，1978 年生产的黑白电视机平均无故障工作时间为 500h，开箱不良率 23.6%，早期返修率 20.8%，全年亏损 936 万元。开展可靠性设计与管理后，5 年内 MTBF 提高到 5000h，开箱不良率与早期返修率均降低到 2% 以下。1983 年全年盈利 6680 万元。

另外，由于设备提高可靠性后，可大量减少设备的维修费用。据美国 50 年代的调查表明，一些设备维修费用的总额，5 年内可达该设备价值的 10 倍以上。1961 年美国国防预算中至少有 25% 用于维修方面，如适当提高产品的可靠性，将会节约大量的维修费用。例如，美国塔康的电子设备系统，平均无故障工作时间由 17 小时提高到 150 小时后，每台设备使用 2000 小时的维修费用由 15 560 美元降低到 1818 美元。波音 727 飞机上的自动导航设备的可靠度为 0.999 99，所以维修费用很低。

再者，由于科技的迅速发展，许多设备具有更高级的性能，结构更复杂，价格也更加昂贵，如一旦出现故障，往往要造成巨大的经济损失，甚至引起严重的人员伤亡事故。例如 1979 年 3 月，三里岛核电站因冷凝器循环泵故障而引起放射性物质泄露事故；1984 年 12 月美国联合碳化物公司在印度的农药厂，由于毒气罐阀门失灵造成 3000 人死亡；1986 年 7 月美国挑战者号因密封圈失效而烧毁等等，由此可见，可靠性技术就显得更为重要了。

三、机械产品的可靠性问题日益突出

40~50 年代，一般机械在使用中产生故障的可能性比电子产品的可能性要小。因真空管易出故障，所以可靠性的研究主要集中在电子产品方面。60 年代，由于半导体、集成电路等先进技术的出现，电子产品的可靠性明显地提高，而机械产品的可靠性问题突出了，机械系统更加复杂化（如巨型油轮、超大型喷气式飞机、自动化机械等）。复杂系统出现故障的可能性加大，从而对可靠性的要求也更高了。

由于空间科学、宇航技术的发展，使机械系统的使用条件多变、恶化。如有些产品处于超高（低）压、超高（低）温、高速、腐蚀、幅射等环境下工作，人造卫星，航天飞机要在特殊气象条件下高速运行；原子能动力站的工作环境更为恶化。为满足这些要求，必须采用新技术、新材料、新工艺，并应用可靠性技术才能保证机械系统的可靠运行。为此对机械系统的要求更高了，既要求尺寸小、重量轻，又要求性能好、成本低，而且还要高度可靠。例如，过去为提高机械零件的安全程度，采取加大安全系数的办法。而现在产品受到重量、体积、成本等因素限制，无限增大安全系数是有困难的。有些产品要求安全系数很低，如航空产品零件的安全系数一般为 1.25~1.5，宇航零件仅为 1.1，小的安全系

数又要有足够的可靠度，因此必需采用可靠性设计。

由于科学技术的进步，人们对机械破坏机理的认识以及对机械及其零件的失效规律的了解日益深化；同时通过实践也积累了大量现场使用的数据资料，成功地应用概率理论来进行机械及其零件的可靠性分析。近年来机械可靠性的研究逐渐有了进展，可靠性理论的分析方法和设计已应用于人造卫星、宇航设备、飞机、船舶、常规动力站、核动力站、车辆、压力容器、建筑机械、机床和各种机械零件等方面。

§ 1.3 可靠性学科研究的基本内容

可靠性学科所包含的内容相当广泛，大致可分为可靠性理论基础、可靠性应用技术、可靠性组织管理、可靠性教育与交流四个方面。

一、可靠性理论基础

可靠性理论基础包括可靠性数学、可靠性物理、可靠性设计技术、预测技术、环境技术、数据处理技术、基础实验等。

可靠性数学主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法，它属于应用数学的范畴，涉及面较广，其主要内容是概率论与数理统计、随机过程和运筹学等。

可靠性物理是研究失效现象及其机理和检测方法的学科。美国 Rome 航空发展中心于 60 年代初首先进行失效物理的研究，在失效分析及技术方面作大量工作，研究各种元器件的失效机理及失效模式，建立各种器件及材料失效的数学与物理模型，发展了各种元器件的加速寿命试验及筛选试验的方法。1962 年美国召开了第一届失效物理年会，1967 年改名为可靠性物理年会。

二、可靠性技术

可靠性技术包括对产品（零件、部件、设备及系统）的失效现象及发生概率进行分析、预测、试验、评定和控制等方面，它研究的对象为电子和电气的、机械和结构的、零件和系统的、软件和硬件的可靠性设计、试验和评定。

1. 设计方面 研究可靠性要求及指标、可靠度分配、样品设计与试验，综合过去的经验和技術进行设计审查，列出推荐使用的零、部件清单、失效影响和后果分析、经济性分析（见图 1.1）、冗余设计与储备方式、可靠性与维修性设计、可靠性试验及检查（加速寿命试验、筛选、定级、验收）、收集和分析失效及应力数据、失效模式及机理研究、信息反馈及纠正措施等。

2. 制造方面 质量管理、生产方式与技术水平的管理、生产环境、设备维修、材料与零、部件的供应与保管、各种试验及筛选等。

顺便指出，可靠性与质量管理不是一回事，两者之间既有联系又有区别。

第一个区别是：可靠性关心的是 $t > 0$ 的质量，即产品使用中的质量。可靠性的各项指标都与时间有关，如可靠度、失效率、平均寿命等。而质量管理关心的是 $t = 0$ 的质量，即出厂检验时的质量。第二个区别是：传统的质量管理是从制造阶段开始的，而可靠性必须从设计阶段开始考虑，并贯穿于设计、研制、使用、直到报废的全过程。

3. 销售服务 包装、运输、标志、出厂说明书、维修

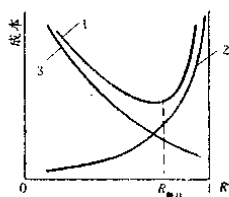


图 1.1 可靠性与费用

- 1—总费用
- 2—为提高可靠性所需费用
- 3—因不可靠使用中维修所付的费用

服务、收集失效及使用情况、备件的设备等。

三、可靠性管理

可靠性管理是根据用户要求，在时间与费用允许条件下，为生产出高可靠性的产品，在设计、研制、生产、使用与维修的整个寿命期内所进行的一切组织、计划、协调、控制等综合性工作，其核心内容是制订并贯彻执行一项可靠性计划（也称可靠性大纲）。为此，需要建立可靠性组织机构和人事管理，制订可靠性保证计划与措施、人员培训与教育等。

据估计，目前美国的可靠性工程技术人员有 50 余万，可靠性工程师人数约占工程师总人数的 6%。工业企业中可靠性组织机构的主要职责是：（1）通过设计把可靠度设计到产品中去；（2）以合适的制造工艺、完善的质量管理与检验来保证可靠性；（3）通过周密的可靠性试验来证实和评定可靠性；（4）以合适的包装和运输作业来保持可靠性；（5）以优质的现场服务、正确使用来保证使用可靠性；（6）收集可靠性数据和信息反馈来改进产品的可靠性。

不同的国家、不同的企业其可靠性组织机构有不同的形式，它取决于企业的规模、产品的特点、重要性、竞争力和领导人的决策等因素。

欧州国家通常采用以质量管理为基础的可靠性机构，如图 1.2 所示。在这种机构里可靠性工程人员与设计部门协同合作，而质量控制人员与生产部门直接联系，密切合作，共同完成任务。

另一种形式是以工程发展为基础的可靠性机构，如图 1.3 所示。该机构中可靠性工程由工程处经理直接负责，而质量管理处只负责控制生产质量。这种机构在美国较为通用，它适用于产品经常改型的工厂。

可靠性管理在整个可靠性工作中处于领导和保证地位，离开了可靠性管理，各项可靠性技术活动将难以进行。可靠性管理可分为宏观管理（由政府主管部门实施，如政策、法规、条例、国家标准等）与微观管理（由企业、研究所等基层单位实施，如规章制度、组织机构，可靠性计划、设计与评审等）。其中，可靠性宏观管理起着决定性的作用。

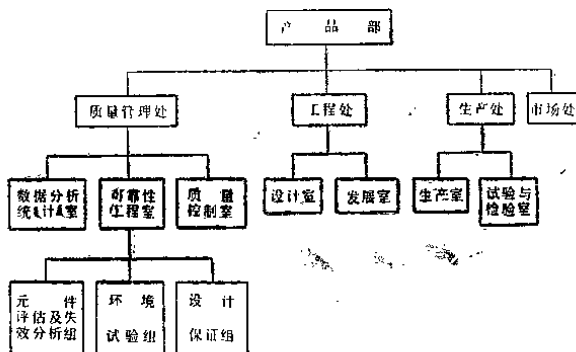


图 1.2 以质量管理为基础的可靠性机构

§ 1.4 可靠性设计方法与安全系数设计法的差别

安全系数设计方法即为沿用至今的传统设计方法。这种设计方法的基本出发点是将零件的强度 $\bar{\sigma}$ 和应力 $\bar{S}$ 均看成是单值的，如图 1.4 所示（强度与应力均取平均值）。当 $\bar{\sigma} > \bar{S}$ 时认为零件是安全的，也可写成安

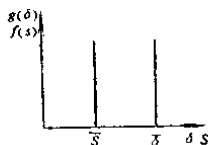


图 1.4 单值的应力与强度

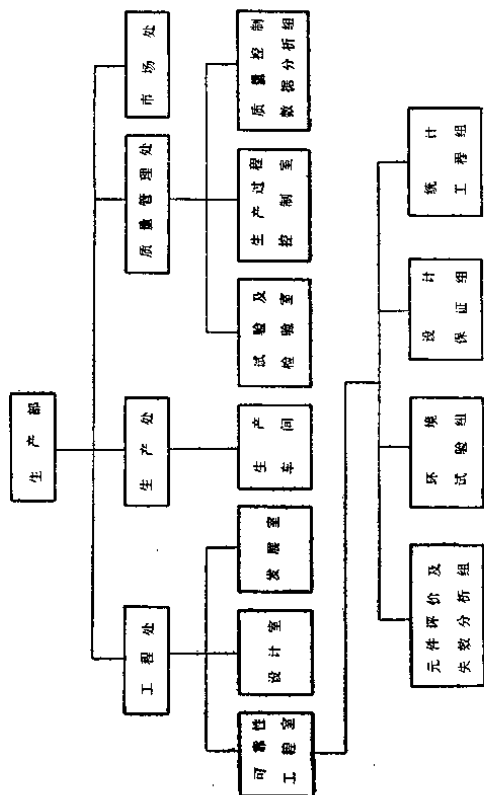


图 1.3 以工程为基础的可靠性机构