

可靠性工程教材之(七)

# 可靠性工程专题选编

中国航空学会 科普与教育工作委员会

1984.8.

可靠性工程教材之(七)

# 可靠性工程专题选编

中国航空学会 科普与教育工作委员会

1984.8.

## 内 容 提 要

本教材是《可靠性工程教材》的专题选编。其主要内容包括可靠性的发展、串联系统贮备度的最佳配置、不维修网络可靠度的计算、抽样及加速寿命试验、余度技术、可靠性与费用、可靠性与决策分析、以及可靠性对作战能力的影响等方面的专述。书中有上述各方面的原理、方法、计算程序和实例。它是《可靠性工程教材》之(一)~(六)的补充、扩展。

本教材可供工程技术人员及从事可靠性分析、设计人员考虑有关问题时参考。

# 说 明

为了满足广大读者学习可靠性工程的需要，我们组织编写了这套可靠性工程教材，内容包括《可靠性的数学基础》、《系统可靠性分析与设计》、《系统可靠性数字仿真》、《失效模式影响及其后果分析》、《可靠性数据处理与寿命评估》、《环境工程概论》和《可靠性工程专题选编》等七册。

这套教材在编写过程中，力求作到内容由浅入深、讲述详细、文字通俗，并侧重于实际应用。书中安排有较多的实例和习题，还附有计算机程序、各种图表和有关标准。因此，这套教材可供开设可靠性工程有关课程使用，也可供从事可靠性工程的技术人员和大专院校师生参考，并适合于自学。

这套教材由北京航空学院第一研究所负责编写，并得到航空工业部三〇一研究所的帮助。在编辑出版过程中还得到航空工业部六一二研究所的大力支持和帮助，在此一并致谢。

**中国航空学会科普与教育工作委员会**

一九八四年四月

## 目 录

可靠性工程的发展 .....	曾天翔 (1)
可靠性串联系系统贮备度最佳配置的 数学规划法 .....	高 和 (34)
不维修网络可靠度的不交型算法及 最小路集电算程序 .....	殷遇春 (74)
可靠性抽样试验方法 .....	苏德清 (97)
加速寿命试验方法介绍 .....	李沛琮 (141)
冗余系统可靠性预测综述 .....	姚一平 (164)
可靠性费用分析 .....	吴真真 (190)
决策理论在可靠性工程中的应用 .....	张莘莘 (213)
武器系统的可靠性与维修性对作战能力的 影响分析 .....	刘亢虎 (242)

# 可靠性工程的发展

航空工业部情报研究所

曾天翔

## 摘 要

本文从工程应用的角度讨论了可靠性工程的基本任务，并较详细地介绍了可靠性工程的兴起、形成及发展过程。主要介绍美国可靠性工程的发展过程及经验教训，也简单谈及苏联、日本、英国、法国、印度及以色列的情况。最后介绍我国可靠性工程发展的简况以及对航空工业部门如何发展可靠性工程提出几点看法。

可靠性工程是一门以概率论、统计学为基础，与系统工程、环境工程、价值工程、运筹学、工程心理学、物理学、化学、质量控制技术、生产管理技术及计算机技术等学科密切相关的综合性学科。广义上讲，可靠性工程是研究为提高产品的可靠性在设计、研制、生产及使用中所进行的各项工程和管理活动的学科。常说的广义可靠性指的是产品在整个寿命期内完成规定功能的能力，包括狭义可靠性、可用性、耐久性、维修性及后勤支援。狭义可靠性则指产品在规定时间内无故障完成规定功能的能力。它是描述产品质量随着时间变化的基本属性。

## 一、可靠性工程的基本任务

在发展一个重大的工程项目时，如研制一种新型战斗机，从制订计划、签订合同开始，直到设计、研制、生产及使用各阶段，

都必须制定周密的可靠性工程计划，进行严格的可靠性管理、设计和试验，以达到所要求的可靠性指标。概括起来，可靠性工程的基本任务有三项：

1. **确定产品的可靠性** 通过对元件、部件及系统的可靠性分析、预计、分配、评估及各种试验来确定产品的可靠性；

2. **提高产品的可靠性** 通过设计、研制、生产及使用各个环节的可靠性管理及设计来提高产品的可靠性；

3. **获得最佳的可靠性** 通过权衡对比研究，在一定的重量、体积、费用下获得最高的可靠性，或者在一定的可靠性下获得最轻的重量，最小的体积及最少的费用。

具体说来，在一项产品的设计、研制及生产各阶段中，可靠性工程包括可靠性管理、可靠性设计及可靠性试验三项18条任务（见表1）。应当指出，上述各项任务并不是所有产品都采用，而应根据产品的种类、用途、复杂程度及特性而选用。

表1 可靠性工程的基本任务

任 务 内 容		各计划阶段的适用性			
		初步设计	验证审批	工程研制	成批生产
可 靠 性 管 理	制定可靠性计划	选用	选用	通用	通用
	对供应厂的可靠性监督与控制	选用	选用	通用	通用
	计划评审	选用	选用	通用	通用
	建立失效报告、分析和改正系统	不适用	选用	通用	通用
	设立失效评审委员会	不适用	选用	通用	通用
可 靠 性 设 计	建立可靠性模型	选用	选用	通用	仅设计更改用
	可靠性分配	选用	选用	通用	仅设计更改用
	可靠性预计	选用	选用	通用	仅设计更改用
	失效模式、影响及后果分析	选用	选用	通用	仅设计更改用
	潜能电路分析	不适用	不适用	通用	仅设计更改用
	电子元件/电路的容差分析	不适用	不适用	通用	仅设计更改用
	部件选择及控制	选用	选用	通用	通用

(续表 1)

任 务 内 容	各计划阶段的适用性				
	初步设计	验证审批	工程研制	成批生产	
可靠性设计	确定可靠性关键部件 确定功能试验、储存、装卸、 包装、运输及维修的影响	选用 不适用	选用 选用	通用 通用	通用 仅设计更改用
可靠性试验	环境应力筛选试验 可靠性增长试验 可靠性鉴定试验 可靠性验收试验	不适用 不适用 不适用 不适用	选用 选用 选用 不适用	通用 通用 通用 选用	通用 不适用 通用 通用

## 二、可靠工程的形成及发展

航空、航天及电子等工业的迅速发展、历次战争的教训、市场的竞争以及不可靠产品造成的巨大经济损失等因素都促进了可靠性工程的发展。可靠性不仅影响一个产品的性能，而且关系到一个国家的经济及安全。例如，美国空军在1960年时因飞机事故造成426架飞机坠毁，数百名飞行员丧生；但随着可靠性、维修性的不断改善，1983年因事故造成的飞机坠毁减少到58架，飞行员死亡减少到数十人。人们正是从大量的经验教训中不断地认识到可靠性工程的重要性，并发展了可靠性工程。它的发展大致经历了下述几个阶段：

### 1. 可靠性工程的准备及萌芽时期(三十至四十年代)

在这一时期中，产生了可靠性概念，并从定性概念过渡到定量概念，可靠性理论开始出现并得到应用。主要是通过改进材料性能、工艺水平及开展质量控制来提高产品的可靠性。这一阶段的活动主要集中在德国及美国。

**可靠性概念的产生** 可靠性的概念最早来源于航空。在两次



世界大战之间，飞机已成为一种交通工具，空中飞行事故不断增加，故要求计算多发飞机一台发动机失效的概率以及在一段飞行时间内不失效的概率。这便是可靠性的初始概念，即在一定时间内，一定环境条件下不发生失效的概率。1939年，英国航空委员会出版的《适航性统计学注释》一书中，首次把飞机安全性及可靠性作为概率的概念，提出了飞机由于各种失效造成的事故率不应超过0.00001/小时的定量要求。这相当于飞机在一小时飞行中的安全可靠度 $R_R=0.99999$ ，这可以认为是最早的飞机安全性及可靠性的定量要求。

**可靠性理论的产生及应用** 二次世界大战期间，德国在V1火箭的研制中，最早提出了系统可靠性的基本理论，认为N个部件组成的系统，其可靠度等于N个部件可靠度的乘积，也就是现在常用的串联系统可靠性乘积定律。根据这一理论研制的火箭的可靠度达到75%。因此V1火箭成为第一个在研制后期运用系统可靠性理论的航空飞行器。后来，因为德国战败，可靠性工程在德国的发展也就中止，而一批从事可靠性研究的专家却流到了美国。

**开展电子管的可靠性研究** 二次世界大战期间，雷达等各种复杂的电子设备相继出现，电子设备的可靠性严重地影响着武器的使用效果。美国60%的机载电子设备运到远东后不能使用，50%的电子设备在储存期间失效。电子设备失效的主要问题是电子管可靠性太差，于是1943年美国成立了电子管研究委员会专门研究电子管的可靠性问题。1946年，为发展新型电子管成立了航空无线电公司，该公司与康纳尔大学共同对电子管失效问题进行大量分析研究，并指出影响电子管可靠性的主要因素是电气及环境因素，这为以后的发展提供了基础。空军研究发现，使用中的每个电子管要有7个备件，每250个电子管需要有一个电子设备师来维修。提高电子管可靠性的途径，主要是通过采用新材料及新工艺的工程方法和发展质量控制及检验的统计技术。

为推动可靠性研究及学术交流，1949年，美国无线电工程师

学会成立了可靠性技术组——第一个可靠性专业学术组织。

## 2. 可靠性工程的兴起及形成阶段(五十年代)

五十年代初期,美国在侵朝战争中发现,不可靠的电子设备不仅影响战争的进行,而且需要大量的维修费。军用电子设备每年的维修费用为其成本的两倍。为了解决军用电子设备的可靠性问题、美军有计划地开展电子设备的可靠性研究活动。五十年代中发展的DC-8、F-4等飞机已开始应用可靠性工程。1955年举行了美国第一届质量控制及可靠性年会。1957年发表了第一份可靠性研究报告《军用电子设备可靠性》,可靠性工程从此成为一个独立的学科。这一阶段的可靠性工程活动主要集中在美国。

**组织可靠性研究力量、制定可靠性管理大纲** 五十年代初,为解决面临的可靠性问题,美国军方、制造公司及学术界都卷入了可靠性研究。1951年美国航空无线电公司开始了军用电子管可靠性研究计划,专门研究三军电子设备的可靠性问题。1952年成立了一个由军方、工业界及学术界组成的电子设备可靠性咨询组(AGREE)。这个组的任务是推动可靠性工程的发展,提出改善军用电子设备的措施。1955年,AGREE制定了一项可靠性发展计划,包括从设计、研制、试验、生产、交货、储存及使用等各阶段的可靠性研究。1953年兰德公司在空军的资助下,进行了可靠性的调查,提出衡量一个武器系统优劣的七项指标——性能、可靠性、精度、易损性、可操纵性、维修性及可获性。

国防部于1958年成立导弹可靠性特设委员会(ACGMR),研究可靠性管理问题,为美国空军武器系统司令部起草设计、研制及生产的可靠性管理大纲。同年,ACGMR发表了研究报告《导弹的可靠性监控大纲》,这是一份可靠性管理的政策性文件,适用于飞机、导弹、地面电子系统及分系统的可靠性管理。

1959年1月,美国空军导弹系统分部出版AFMM-58-10《弹道导弹及航天系统的可靠性大纲》,这个报告后来成为空军采购用的主要可靠性管理规范,MIL-R-27542《航宇系统、分系统及

设备的可靠性大纲要求》。1959年3月，空军颁发MIL-R-25717C《电子设备可靠性保证大纲》，规定了试生产及批生产电子设备可靠性保证的一般要求。

**确定可靠性设计及试验的方法及程序** AGREE经过几年的研究，于1957年6月发表了可靠性研究报告《军用电子设备可靠性》。这个报告指出了可靠性工程是工程设计的一个重要组成部分，确定了美国可靠性工程发展的方向，成为美国可靠性工程发展的奠基性文件。它从九个方面阐述了可靠性设计及试验的方法及程序：

(1) 确定各种军用电子设备可靠性的最低要求，并根据系统各部件的重要性、技术水平等来分配系统的可靠性。

(2) 建立研制样机的可靠性评估方法、平均无故障工作时间(MTBF)的测量方法及基于指数分布的序贯试验计划，以证实研制样机满足最低的可靠性要求。

(3) 制定试生产及批生产产品的可靠性评估程序，和基于指数分布的MTBF及寿命试验计划。

根据(2)及(3)项内容，美国国防部于1959年6月颁发MIL-R-26667A《电子设备可靠性要求通用规范》。这个规范成为后来发表的MIL-STD-781的前身。

(4) 制定电子设备研制程序，以保证研制的设备具有合同所要求的固有可靠性。以这个程序为基础，1958年6月美国国防部颁发了MIL-STD-441《电子设备可靠性》，它规定了在设计及研制阶段采用的可靠性设计技术，如可靠性预计、热设计、余度技术等。

(5) 基于失效率(作为时间及环境应力的函数)，制定电子元部件可靠性的分析方法及准则。

(6) 确定已有的采购及合同的条例与可靠性文件的相容性，提出必要的修改建议。

(7) 确定运输、包装对产品可靠性的影响，提出改进措施。

(8) 确定存储对设备可靠性的影响, 提出改进措施。

(6) 确定在使用中如何保持设备固有的设计可靠性水平的方法及程序。

1958年, 罗姆航空发展中心出版了第一份基于应力分析的可靠性预计技术报告; 第一个空军合同提出了可靠性要求。

**建立失效数据收集及处理系统** 五十年代初期, 美国电子管咨询委员会就开始收集并出版电子管的可靠性数据。美国航空无线电公司根据美国三军及制造厂的要求, 从事数据收集、处理、分析方法及程序的研究, 派技术人员到现场收集数据, 并出版有关的报告。工业部门及三军已陆续建立各种失效数据收集系统, 在DC-8、F-4等飞机的研制过程中, 通过建立失效数据收集及处理系统来改善飞机的可靠性。

**苏、日等国开始发展可靠性工程** 苏联在五十年代后期已认识到发展现代化设备不仅需要质量控制及质量检验, 还需要可靠性工程, 并开始了可靠性及寿命试验工作。日本企业界也认识到要在国际市场上竞争, 必须开展可靠性研究。1958年, 日本科学技术联盟成立了“可靠性研究委员会”, 并开始举行可靠性训练班。但是, 苏、日等国的可靠性工程是在六十年代以后才全面开展的。

### 3. 可靠性工程迅速、全面发展的年代(六十年代)

六十年代是美国经济发展较快的时期, 也是航空及航天工业迅速发展的年代, 故被称为“航宇年代”。在这十年中, 美国先后发展了YF-12A/SR-71、F-111、A-7、C-141、DC-9、波音-737等各种军民用飞机, 并投入使用; 六十年代后期, F-14、F-15、S-3A、C-5A、波音747、DC-10、L-1011等更先进的飞机也开始研制; 此外, “民兵”、“双子星座”、“水星”、“阿波罗”等航天飞行器也相继进行研制。这些先进的飞行器都装备了复杂的电子系统, 并要求它们在严酷的环境下能可靠工作, 以完成预定任务。因此, 五十年代由AGREE发展起来的可靠性设计及试

验方法被NASA及国防部接受，在航空及航天工业，特别是在航空电子系统中，得到广泛应用并迅速发展。

**改善可靠性管理、建立可靠性研究中心** 五十年代中，在美国国防部及某些公司已建立了可靠性管理及研究机构。六十年代开始，重点是研究如何改善可靠性管理；如何在一个合同、一家公司或研究机构中加强可靠性管理、设置合适的可靠性组织机构、制定可靠性计划；如何在设计、研制、生产及使用等各阶段来控制可靠性，确定可靠性与系统可用性及费用的关系；如何更有效地利用可靠性数据；如何发展用于可靠性的决策技术；如何培养可靠性专业人员等。基于多年的研究，美国空军于1961年颁发了MIL-R-27542《系统、分系统及设备的可靠性大纲》，大纲规定了系统及分系统在预定时间内达到合同可靠性指标的各项要求，包括收集及报道可靠性数据的要求；1965年国防部公布可靠性管理标准MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》，把可靠性工程活动与传统的设计、研制及生产的工程活动结合起来，以保证在产品的研制初期能测出并排除潜在的可靠性问题，获得最好的经济效益。1969年颁发了MIL-STD-785A。

为加强可靠性研究工作，美国空军系统司令部决定，在罗姆航空发展中心(RADC)组建可靠性分析中心。该中心于1963年组建，1966年建成。主要从事与电子设备有关的电子及机电、机械元器件及整个电子系统的可靠性研究，包括可靠性预计、可靠性试验、可靠性物理、数据采集、分析与分配等。该中心主要负责收集、储存、处理分析及分配元器件的可靠性数据；出版各种军用标准、手册、技术规范、技术报告、可靠性分析报告、试验报告及计算机程序。该中心现有85人，其中有55名专业人员，包括工程师、物理学家、数学家、化学家及冶金专家等。除了开展中心内部的可靠性研究外，还以合同形式将研究课题承包给各大学。

**制定可靠性试验标准、发展新的可靠性试验方法** AGREE在1957年的研究报告中新提出的一套可靠性试验方法，经过几年

的实际应用，得到不断地完善。1963年美国国防部在AGREE 报告的基础上，颁发了可靠性试验标准MIL—STD—781《可靠性试验(指数分布)》，1965年修改为MIL—STD—781A，1967年又进一步修改，颁发了MIL—STD—781B，改名为《可靠性设计鉴定试验及产品验收试验(指数分布)》，规定了一组较完善的可靠性试验计划、试验程序及试验条件，并附有各种图表可供使用，这一个标准在国际上得到广泛应用。

由于晶体管及半导体集成电路等新式器件的出现，电子元器件的可靠性大大提高，要验证一种用于“民兵”导弹、失效率为 $10^{-8}$ /小时的功率晶体管，需要投入23,000个晶体管，试验10,000小时，而不出现失效，于是迫切需要更有效的试验方法。六十年代初，美国罗姆航空发展中心发展了两种新的试验方法。

一种是加速寿命试验，通过加大试验应力的方法来缩短寿命试验时间。1960年罗姆航空发展中心进行了第一次加速寿命试验，并于1962年首次应用于武器系统的采购中。随后，在半导体器件、电阻、电容等寿命试验中得到广泛应用。

另一种是快速筛选试验，它能够在规定时间及应力的条件下挑选出95%的可能失效元件，以便尽早地消除不可靠的元器件。当时已发展一种简单的应力筛选试验方法，在20秒内能测定出90%的某种晶体管的主要失效。到六十年代中期，已发展各种快速筛选试验方法，并得到广泛应用。

**发展新的可靠性预计技术、颁发可靠性预计手册及标准** 五十年代已发展两种较简便的可靠性预计技术，一种是根据一个电子系统中的有源元件数来估算系统的MTBF；另一种是根据单个元部件的失效率来估算复杂设备或系统的失效率。虽然这两种方法都被广泛应用，但由于这两种方法存在着没有考虑失效模式及重要部件参数漂移的影响等问题，六十年代初又发展了按系统功能及参数预计可靠性及蒙特卡罗模拟等新的可靠性预计技术。

罗姆航空发展中心基于雷达发射机的输出功率、雷达接收机

的噪声系数以及通讯设备的信噪比来建立地面雷达及通讯系统的可靠性预计方程。此外，还根据系统的复杂性、工作频率、最大直流电压、功耗等参数来建立系统可靠性的预计方程。

由于元部件参数随着时间及应力变化而产生的漂移将可能导致系统失效，需要采用更好的方法来分析系统及电路的参数变化。为了简化并能自动地分析由于元件参数漂移引起的电路特性下降，在六十年代初发展了蒙特卡罗模拟技术。已知电路的转换函数、元部件及它们的参数随时间及应力变化的特性，人们便可快速地预计将来任何时候转换函数变化的概率分布。由于缺少元部件的变化数据、不能精确地描述合适的转换函数以及这种技术本身的复杂性，当时它的实际应用受到限制。随着数字计算机的发展，蒙特卡罗模拟技术在系统可靠性分析中已得到广泛应用。

美国国防部基于罗姆航空发展中心多年的研究成果，1962年出版了可靠性军用手册MIL—HDBK—217《电子设备可靠性预计》，1965年修改成MIL—HDBK—217A。该手册提供了大量的电子元器件可靠性数据及分析方法，作为电子设备及系统可靠性预计的基础，被称为电子设备可靠性的“圣经”，在世界各国得到广泛应用。此外，1961年10月国防部颁发了MIL—STD—756《可靠性预计》的军用标准，1963年5月修改为MIL—STD—756A，作为飞机、导弹、卫星及电子设备在各个研制阶段可靠性定量预计的标准，以便及时地发现设计弱点，为定量的可靠性分配打下基础。

**开辟失效物理研究新领域、发展新的失效模式分析技术** 元器件的可靠性是系统可靠性及维修性的基础，为解决元器件的可靠性问题，罗姆航空发展中心于六十年代初首先开展失效物理(又称可靠性物理)的研究，发展失效分析方法及技术，研究各种电子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及物理模型。例如硅半导体器件的失效机理及气体特性对行波管可靠性的影响等。这些研究成果在B-58飞机及“民兵”导

弹的研制中得到了应用。基于各种元器件失效机理的研究，发展了各种元器件的加速寿命试验及筛选试验的方法，改善元器件生产中质量控制及可靠性设计的方法。在罗姆航空发展中心的倡导下，1962年召开了美国第一届电子设备失效物理年会，1967年改名为可靠性物理年会。

为了分析失效模式对可靠性的影响，在五十年代后期和六十年代初相继发展了失效模式、影响及后果分析和失效树分析两种新技术，并得到广泛应用。

失效模式、影响及后果分析是由NASA发展的一种有效的可靠性设计技术，开始用于航天飞行器的可靠性分析，随后在航空、电子等工业领域得到广泛应用。它通过对组成系统的各部件潜在的各种失效模式的分析，确定失效对系统成功运行或人员安全的影响，并根据影响的严重程度和失效出现概率的综合效应来排列系统可能发生的失效的顺序，提出可能采用的预防及改正措施。这种方法的主要优点是应用简单，适用于各种复杂的模拟式系统。但只适用于单项失效分析，而对同时产生的多项失效分析不适用。

失效树是美国贝尔电话实验室1961年提出的一种复杂系统的分析技术。首先用于“民兵”导弹发射控制系统的安全性分析。后来波音飞机公司进行了改进，用于计算机系统的分析。1965年，这种技术进一步得到改善，可利用计算机进行分析，从而在原子能、航空、航天及电子工业得到越来越多的应用，特别适用于各种复杂的数字式航空电子系统的可靠性分析。它与失效模式、影响及后果分析的主要区别在于它是对整个系统从整体到局部(自上而下)地进行分析，而后者则是从基本元部件到整个系统(自下而上)地进行分析。这种技术的主要缺点是复杂、使用不便、对分析人员要求高等。

**建立更有效的数据系统** 五十年代建立的数据系统存在着采集数据不全、缺少自动处理及分析能力等缺点。六十年代初，美



国空、海军及某些制造公司都建立起更有效的综合数据系统。例如,空军建立了AFM66-1数据采集系统;罗姆航空发展中心建立可靠性数据中心;海军所属的海军航空安全中心,航空供应办公室等五个部门也建立专门向合同商提供可靠性数据的数据采集系统,后来又发展了海军维修、材料及管理数据系统(3M系统);六十年代中期,桑得斯特朗公司建立了自动数据采集系统,它可采集来自空军基地、维修中心及修理厂的数据,经计算机分析及处理,自动地输出设备的拆卸及修理信息;此外,海陆空三军还建立了军种间弹道导弹数据交换网(IDEP),海军建立了导弹数据交换网(GMDEP)及失效率数据交换网(FARADA)。为了提高数据的利用率、扩大数据来源,IDEP、FARADA及GMDEP相继合并,并于1966年与NASA数据系统合并,构成全国性的数据交换网。

**重视机械部件的可靠性研究** 常规的机械部件的设计大多是采用安全系数法,通常认为安全系数大于2.5的设计是很可靠的。长期的使用经验证实,这对于某些部件是有效的,但是,对于另一些部件来说,则可能因过设计而增加重量及体积,或者可能发生失效。这是因为大部分机械部件的应力及强度是个随机变量,具有一定的分布规律。因此,结构部件的可靠性取决于其强度及应力分布的平均值、标准偏差或其他分布参数。可是,安全系数法只考虑平均值而忽视标准偏差等参数的影响。因此,对于标准偏差值很大的部件,即使安全系数值取得很大,也可能发生失效。例如,1963年NASA发射的同步卫星SYNCOMI,因高压容器壳体破裂而在空间消失;NASA的“水手Ⅲ”航天飞行器也因机械部件失效而失败。

随着高性能航天飞行器及飞机的发展,重量、体积、可靠性及安全性都是设计的关键参数,迫切需要更精确的设计方法。可靠性工程从理论上及实践上为机械设计提供了更精确的工具——机械概率设计。它利用应力与强度相干理论导出了机械的可靠性设计公式,从而避免了安全系数法存在的缺点。NASA在六十年代中