

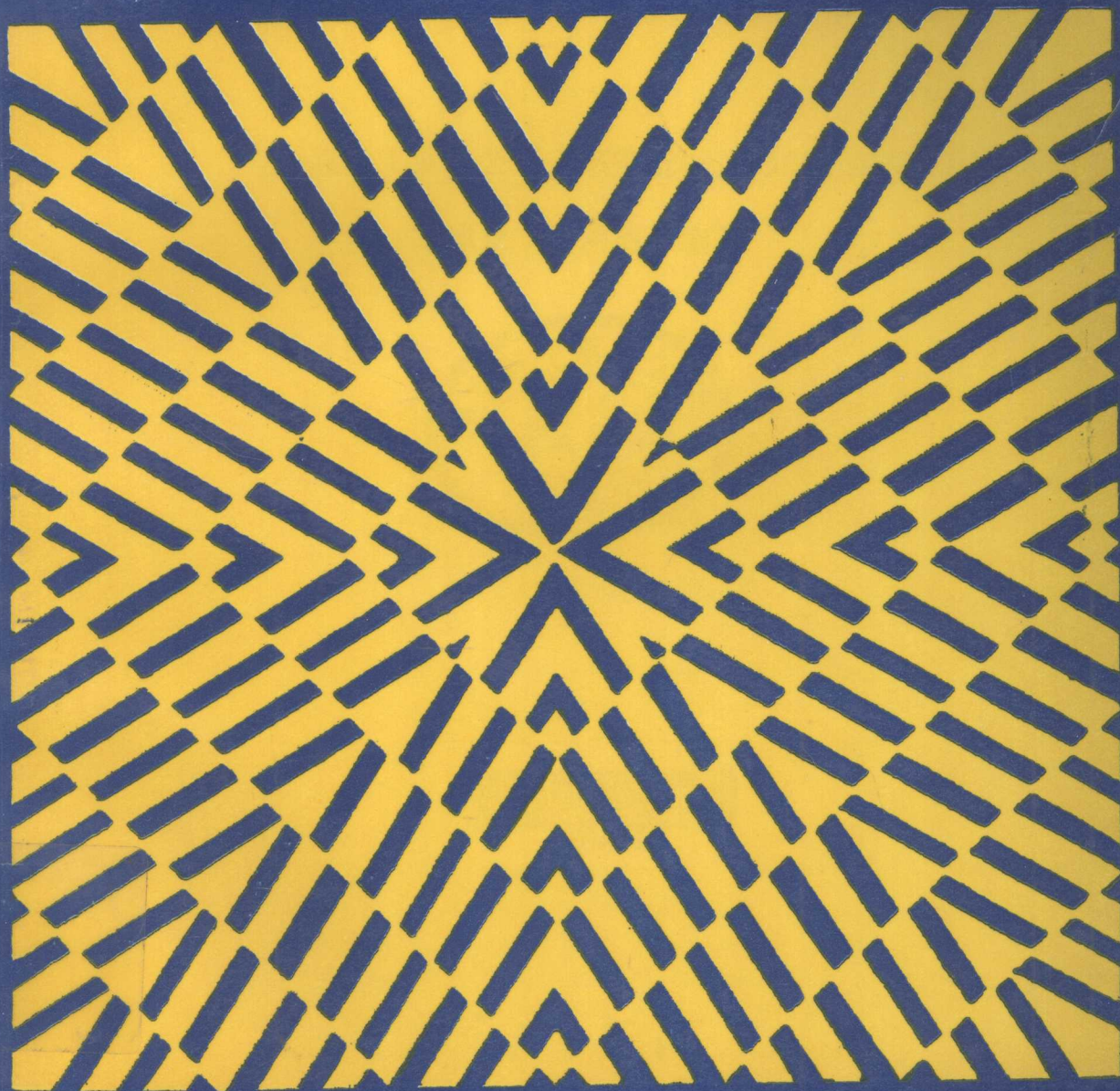


普通高等教育航天类规划教材

固体火箭发动机系统 可靠性分析与设计

中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写

方国尧 张鸿涛 编著



V435
1019-4

普通高等教育航天类规划教材

固体火箭发动机系统 可靠性分析与设计

中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写

方国尧 张鸿涛 编著



200540136

宇航出版社

200540136

(京)新登字 181 号

内 容 简 介

本书从系统可靠性的基本概念讲起,全面地介绍了系统可靠性设计的理论基础,系统可靠性分析与设计,网络系统可靠性分析,数据统计分析与寿命评估,故障模式分析(FMEA)及致命性分析(FMECA)和故障树分析(FTA),最后介绍了固体火箭发动机可靠性设计。书中附有适当的例题,每章后附有习题,重要内容附有FORTRAN程序及说明。

本书主要作为高等院校机械、电子专业的本科生和研究生教科书,也可供有关专业科技和工程人员学习和参考。



普通高等教育航天类规划教材
固体火箭发动机系统可靠性分析与设计
中国航天工业总公司人事劳动教育部组织编写
方国尧 张鸿涛 编著
责任编辑 李振刚

*

宇航出版社出版发行
各地新华书店经销
北京市燕文印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.125 字数: 427 千字
1994年12月第1版第1次印刷 印数: 1~1000册
ISBN 7-80034-774-5/V·167 定价: 10.00 元

航天专业本科系列教材

编委会

主任 白拜尔
副主任 李志黎 杜善义
委员 张乃通(常务) 陈达明(常务)

(以下按姓氏笔划为序)

于 翹 王文超 王本华 王希季
李成忠 李世培 刘国雄 邹德兴
郑济民 姜明河 栾儒生

编辑部成员 (按姓氏笔划为序)

丁晓桦 李定建 肖业伦 邹振祝
闵汉群 赵长安 修志伟 贾世楼
曹 英 谢蔚民 董少英 蔡增寿

出版说明

按照国家教委关于高等学校教材工作分工原则，中国航天工业总公司负责组织全国高等学校航天类专业教材的规划、编审和出版。根据航天教育发展规划，为适应航天事业发展的需要和满足航天院校本科教学的要求，在航天工业总公司教材编审委员会的主持下，成立了航天专业本科系列教材编辑委员会，负责组织编审、出版“八五”期间航天专业本科系列教材。这套书分成航天器、导弹、飞行力学、发动机、控制与制导、空间电子学六类。适应的专业范围为：飞行器系统工程、飞行器总体设计、飞行器结构与强度、飞行器动力工程、飞行器制造工程、飞行器控制与制导、飞行器发射技术与装置、飞行器环境与模拟工程、飞行力学、宇航光电工程、空间工程和卫星与卫星应用等。

编委会为这套教材制订的出版原则是：

1. 教材应保证思想性、科学性、先进性和启发性，注意理论联系实际。内容的深度与广度应有利于培养学生的自学能力，创造能力及解决实际问题的能力。

2. 由于部、院、所技术专家长期从事航天科研工作，学校教师长期从事教学，他们各自都积累了丰富的经验。为使这套航天本科系列教材既有一定的理论水平，又能很好地联系实际，因此，要求教材的编审必须具有下列形式中的一种：

- 1) 技术专家主编，学校教师参编；
- 2) 学校教师主编，技术专家参编；
- 3) 技术专家独立编写，主审者中有一名是学校教师，从教学要求把关；
- 4) 学校教师独立编写，其编写大纲须由编委会聘请有关技术专家审阅。

无论以上哪一种编写方式，均由编委会聘请部、院、所有关技术专家主审。

3. 这套教材除作为航天航空高等院校本科教材外，也可作为相应专业研究生参考书和航天领域工程技术人员继续教育的教学参考书以及有关科技人员的参考书。

限于水平和经验，这套教材的编审出版工作肯定有不少缺点和不足之处，欢迎使用教材的单位、广大教师、同学和有关技术人员提出宝贵意见，以进一步提高航天类专业本科教材的质量。

中国航天工业总公司人事劳动教育部

1994年3月

前 言

工业产品的质量是衡量一个国家工业技术水平的主要标志之一。工业产品的质量通常包括三项指标：功能指标、可靠性指标和维修性指标。产品的功能代表其使用价值，故为产品的主要质量指标。实践证明，产品在使用过程中，并不经常按照人们的预想去实现其功能；在实现功能的时候，满足用户要求的程度也不相同。如果产品在使用过程中，能实现其预定的功能，达到规定的质量要求，则认为产品可靠，否则认为不可靠或不太可靠。产品出现故障后，有的容易维修，有的不容易维修。这就出现了产品的可靠性和维修性问题。

产品在使用中达不到预定的功能指标，则无可靠性和维修性指标可言。但只有功能指标，没有可靠性和维修性指标，产品的质量指标也不完全。产品的功能是否得到发挥，在很大程度上取决于可靠性、维修性水平。尽管产品的功能很先进，但不可靠、不便于维修，也影响该产品的使用价值，并产生严重的后果。例如一台电视机性能很好，音响、色彩和清晰度均很好，但容易出故障，出了故障后又不容易维修，这样的电视机质量不是好的。又如1986年1月26日，美国航天飞机“挑战者”号，在发射后不久，由于航天飞机右侧的固体火箭助推器的密封装置失效，燃气外泄，喷出火舌，引起液体推进剂贮箱爆炸，使“挑战者”号在开始它的第10次太空飞行时遇难，同机的七名宇航员也全部殉难。这些都是产品的可靠性不高所造成的严重后果。

提高产品可靠性的最主要的手段是系统可靠性分析与设计。以往的经验告诉我们，产品的故障绝大部分是由设计上的缺陷所造成的。因此，在过去的三十多年中，人们把研究可靠性的重点放在研究系统可靠性分析与设计上。

本书为了适应目前导弹和飞机巨大变革的需要而编写，它取材较广泛，力求先进性，同时又保留基础理论的系统性和完整性，并注重与实际应用相结合。

全书由方国尧任主编，共六章，第一章至第五章由北京航空航天大学宇航学院方国尧编写，第六章由航空航天部41研究所张鸿涛编写。

感谢航空航天部四院研究员阮崇智、高级工程师王秉勋的精心审校和指正。感谢宇航出版社李振刚编辑悉心审校和修正。

由于编著者水平所限，书中可能有错误和不妥当之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 可靠性的基本概念	(1)
第一节 可靠性的基本概念	(1)
一、可靠性定义	(1)
二、维修性定义	(2)
三、广义可靠性	(2)
四、固有可靠性和使用可靠性	(2)
五、可靠性特征	(3)
第二节 可靠性发展简史及重要性	(3)
一、发展简史	(3)
二、可靠性的重要性	(4)
第三节 可靠性的数量指标	(6)
一、用概率计量的指标	(6)
二、用时间计量的指标	(10)
三、用单位时间比率计量的指标	(13)
第四节 提高系统可靠性的途径	(16)
一、一般途径	(16)
二、采用余度技术	(17)
三、采用容错技术	(19)
第五节 常见的分布	(20)
一、指数分布	(20)
二、正态分布	(21)
三、威布尔分布	(23)
习 题	(26)
第二章 系统可靠性分析与设计	(27)
第一节 概述	(27)
一、任务分析	(27)
二、系统可靠性分析	(28)
第二节 系统可靠性模型与可靠度计算	(30)
一、串联系统	(31)
二、贮备系统	(32)
三、混联系统	(37)
四、用二项式展开法求系统的可靠度	(39)
五、用条件概率求系统的可靠度	(40)
第三节 可靠性预测和分配	(41)
一、系统可靠性指标论证	(41)
二、系统可靠性预测	(42)
三、系统可靠性分配	(52)
四、系统可靠性的最优分配	(63)
习 题	(75)

第三章 网络系统可靠性分析	(78)
第一节 网络的基本概念	(78)
一、基本定义	(78)
二、图的矩阵表示法	(79)
三、网络可靠性计算时的假设	(82)
第二节 直接法	(82)
一、真值表法	(82)
二、概率图法	(83)
三、全概率分析法	(85)
第三节 网络分解法	(86)
一、最小路集法	(87)
二、大型网络最小路的计算机算法	(91)
三、最小路与最小割的互化	(95)
第四节 网络可靠性的不交型算法	(96)
一、不交型布尔代数及其运算规则	(96)
二、直接不交化算法	(98)
三、不交最小路法	(100)
第五节 设计时提高网络系统可靠性的方法	(104)
习 题	(105)
第四章 数据统计分析与寿命评估	(107)
第一节 可靠性数据的收集	(107)
一、数据收集的目的	(107)
二、数据的来源	(107)
三、数据收集的方法	(108)
四、数据收集的注意事项	(108)
五、数据收集中应记载的主要项目	(108)
第二节 可靠性寿命试验的类型	(109)
第三节 可靠性数据的处理和分析	(109)
一、主次图法	(109)
二、因果图法	(111)
三、直方图法	(112)
四、样本的均方差与平均失效率曲线	(114)
第四节 可靠性指标的评估	(115)
一、按定义计算可靠性指标	(116)
二、样本容量较小时的计算	(119)
三、不规则截尾寿命试验情况	(120)
四、具有两种修复状态的残存比率法	(122)
第五节 分布参数的确定——估计法	(124)
一、正态分布参数的点估计	(124)
二、威布尔分布参数的点估计	(127)
第六节 寿命评估	(139)
一、寿命评估所选用的指标	(139)
二、首次翻期寿命的确定	(140)
三、寿命评估的程序框图	(142)
附 录	(143)

习 题	(144)
第五章 故障模式影响及危害度分析方法和故障树分析法	(146)
第一节 故障模式影响分析 (FMEA —— Failure Mode and Effect Analysis)和故障模式影响及危害度分析 (FMECA —— Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)	(146)
一、概述	(146)
二、故障模式	(147)
三、FMEA 和 FMECA 实施步骤	(147)
四、危害性分析	(148)
五、FMEA 和 FMECA 表格及实例	(151)
第二节 故障树分析 (FTA —— Fault Tree Analysis)	(153)
一、概述	(153)
二、故障树的建造	(155)
三、故障树的数学描述	(161)
四、故障树的定性分析	(166)
五、故障树定量化计算	(173)
六、故障树的简化	(181)
七、重要度及在设计时的应用	(187)
八、FTA 法的评价	(190)
九、FTA 法的应用实例	(191)
十、FTA1~FTA4 微机失效树分析	(197)
十一、FMEA 矩阵分析法和计算机程序	(202)
习 题	(225)
第六章 固体火箭发动机可靠性设计	(228)
第一节 应力-强度干涉模型及可靠性设计	(228)
一、应力-强度干涉模型	(228)
二、解析法求可靠度	(229)
三、用数值积分求可靠度	(237)
四、用图解法求可靠度	(238)
第二节 结构零件的可靠性设计	(240)
一、概率设计与一般表达式	(240)
二、函数均值与方差的近似计算	(242)
三、发动机结构零件设计	(245)
第三节 发动机性能可靠性评定	(251)
一、性能可靠性置信下限评定	(252)
二、异常数据处理	(254)
第四节 系统综合评定	(256)
一、金字塔可靠性综合	(256)
二、修正的最大似然估计 (MML) 法	(256)
三、系统综合的 L-M 方法	(258)
四、环境因子估算方法	(259)
五、系统可靠度综合评定	(260)
习 题	(263)
参考文献	(264)

第一章

可靠性的基本概念

系统是由相互作用和相互依赖的一些部分（其中可以包括人）组合而成，它是具有特定功能的有机整体。同时，系统的概念是相对的，如导弹是由包括战斗部、发动机、制导部分和操纵部分等组成的大系统。而发动机又是由燃烧室、装药、喷管组件和点火器等部件组成的一个分系统。从事物可分性的观点看问题时，绝大多数事物都可看成一个系统。

系统可靠性预测是利用概率模型，从部件的寿命分布或特征量的有关信息出发，来推断与系统有关的信息，在产品生产出来以前的设计方案论证阶段进行。系统可靠性预测有三个要素：可靠性数学模型、算法和数据。

系统可靠性试验与评估是利用统计模型，通过观察数据、分析处理数据来对部件或系统的寿命进行估计、综合及检验等，在产品生产出来以后进行。

部件或系统丧失规定功能称为失效或故障，一般对不可修系统产品称为失效，而对可修系统称为故障。为了方便起见，将产品丧失规定的功能状态，不论可否修复统称为“失效”，有时往往难以区别，故把失效和故障视为同义词。

第一节 可靠性的基本概念

一、可靠性定义

可靠性定义：产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。

这里的产品是指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备和系统，可以是产品的总体、样品等。“规定的条件”包括使用时的环境条件，如温度、湿度、振动、冲击、辐射；使用时的应力条件，维护方法，贮存时贮存条件以及使用时对操作人员技术等级的要求。在不同的规定条件下产品的可靠性是不同的。

“规定的时间”指产品在一定的时间内是否完成任务的能力，这种能力随着时间的增加而减少，不同的规定时间，将有不同程度的可靠性。另外，不同的产品对应的时间指标也不同，如火箭发射装置，可靠性对应的时间以秒计，海底通讯电缆则可以年计，而且应将时间看作是广义含义，即某些产品也可以用次数、周期等（如继电器动作次数）来计算。

“规定的功能”就是产品应具备的技术指标，也就是失效标准。这个准则就是产品技术标准规定的所有物理性能参数的容许范围或公差。当有一个或多个参数超过了该标准所容许的范围时就判定产品失效。怎样才叫完成规定的功能，事先一定要明确；只有对规定的产品功能有了清晰的概念，才能对产品是否发生故障有确切地判断。可见产品的可靠性和寿命

与失效标准有密切的关系，标准越严则失效概率就越大。

从上述可见，产品的可靠性和寿命都与施加应力类型大小和技术标准有关，但可靠性与寿命是不同的，可靠性必须明确规定“在什么时间内”。总之，必须预先明确规定应力类型大小，时间范围和技术标准三个条件，否则讨论可靠性就没有意义。

寿命是一个随机变量，一个产品从开始使用到第一次发生故障的时间事先无法确切知道，对不可修复产品来说，产品的“寿命”是指产品发生失效前的时间，产品若一开始使用就处于工作状态，称为工作寿命，如雷达上的元器件；有的从开始就处于贮存状态，真正工作时间很短，称为贮存寿命。对可修复产品来说，两次故障之间的时间，称为“寿命”或“无故障工作时间”。

二、维修性定义

工业产品一般分为可维修和不可维修产品两种，不可维修产品是指产品失效后，不能或不值得修理，如灯泡、电池等。对于可维修产品，为了保持或恢复其功能，所采取的技术管理措施称为维修。显然，对维修的影响，除了条件和时间外，还与维修方式有关。因此，将维修性定义为：产品在规定条件下实施维修时，在规定时间内，完成维修的能力。维修性是指可修复产品所具有的维修难易程度。

三、广义可靠性

对于可维修产品，维修性与可靠性不能分开来考虑，于是提出了综合考虑可靠性和维修性的广义可靠性。一般讲，不可维修产品的可靠性称为狭义可靠性或者称为可靠性；可维修产品的可靠性称为广义可靠性。在广义可靠性的概念下，除考虑产品的无故障性质，即狭义可靠性外，还应考虑发生故障后修理难易程度，即维修性。所以，广义可靠性可以用下式表示：

$$\text{广义可靠性} = \text{可靠性} + \text{维修性}$$

广义可靠性是指可维修产品在使用中不发生故障，通过预防性维修来实现，如发生故障也易于维修，因而经常处于可用状态。例如汽车进行越野比赛是广义可靠性的典型模式。汽车在高速下能正常运行——狭义可靠性。同时，汽车因长途奔驰，难免因磨损，破坏而发生零件故障。因而必须沿途设置维修点，以便快速消除故障，使汽车能很快正常工作。所以，长途赛车的可靠性即广义可靠性。

四、固有可靠性和使用可靠性

从产品可靠性的形成过程看，可将可靠性分为固有和使用两种可靠性。某种机械产品的统计数据表明：产品故障由于设计质量引起占故障总数的 43%；由于制造质量引起占 20%；由于使用条件和使用方法引起占 30%；其它原因引起的占 7%。通过设计、制造形成的产品可靠性，称固有可靠性。固有可靠性所考虑的中心问题是狭义可靠性。产品在使用条件（包括产品运输、保管、操作和环境等）作用下，保证固有可靠性发挥的程度，称为使用可靠性。使用可靠性考虑的中心问题是包括维修性在内的广义可靠性。

因此，为确保产品具有高的可靠水平，首先要做到设计质量、制造质量都高，然后还要保持正确的使用方法。固有可靠性是通过设计、制造过程所形成的最高可靠性。使用可靠性

既受设计、制造质量影响，又受使用条件影响。所以，一般讲：

固有可靠性 \geq 使用可靠性

因此，只有通过提高设计质量与制造质量，以提高固有可靠性；通过提高使用质量，提高使用可靠性后，才能提高产品的工作可靠性。

五、可靠性特征

和产品的其他质量特性相比较，可靠性具有如下特征：

(1) 可靠性与专业技术关系密切。由于可靠性是从故障研究开始，所以可靠性与专业技术关系密切。要想提高可靠性，必须综合运用专业技术与管理技术知识。

(2) 产品可靠性水平受各种使用条件和环境条件影响。即使可靠性水平相同，由于市场诸因素不同，其功能特性、故障模式及其严重程度也不尽相同。所以，提高可靠性应注意外在条件。

(3) 产品质量方面的缺陷，往往是在出厂后，在使用过程中，以故障或重大缺陷形式表现出来。因而对产品质量缺陷要有预防手段，往往通过故障分析与预测，采取事前对策，设计出可靠性高的产品。

(4) 从人机系统来考虑时，可靠性通过人机工程因素，冗余系统和安全装置等设计加以考虑。

(5) 对可靠性问题的分析，要定性定量并重，重点应在预防故障出现和防止故障重复出现。

第二节 可靠性发展简史及重要性

一、发展简史

可靠性工程发展为成熟的工程技术学科是近 20 年来的事。维修性工程发展还慢些，只是在十多年前才逐渐成熟起来。在可靠性工程发展过程中，军用装备、军用系统的研制是积极的和主要的动力。

40 年代到 50 年代期间，军用电子设备在飞速发展中遇到了因可靠性很差而严重地影响了使用效果的问题，促使美国于 1950 年成立了“电子设备可靠性调查委员会”，以进行全面、彻底的调查研究。1952 年又把该委员会升级为“电子设备可靠性咨询委员会 (AGREE)”，负责对电子设备的设计、开发、生产、供应、使用、维修及人员培养等各方面进行可靠性的监督。这段时期可以说是美国可靠性工程兴起和奠基的阶段。1957 年 6 月发表的“军用电子设备的可靠性报告 (AGREE 报告)”可以说是一个关于在美国开展可靠性工程研究的基础性文件，建立了可靠性工程的框架。

直到 1954 年，关于维修性的研究还没有形成一个确定的专业，某些生产者只是在产品研制过程的后期在设计上加上一些与维修相关的特征。美国空军于 1959 年颁发的 MIL-M-26512 规范可以说是第一份正式提出有关装备的维修性要求的规范。

60 年代，可靠性工程在美国进入了全面发展阶段。以可靠性作为主题的各种军用标

准、规范和手册陆续出版，如 1963 年颁发的 MIL-HDBK-217“电子设备可靠性手册”，1963 年颁发的 MIL-STD-781“可靠性试验、指数分布”和 1965 年颁发的 MIL-STD-785“系统与设备的可靠性大纲要求”等，这些都成为今日的可靠性标准体系的基础。

60 年代中，苏联、法国和日本等国也都相继深入地开展了可靠性的研究。1965 年国际电工委员会（IEC）可靠性专业委员会 TC56 成立，使可靠性技术成为国际化的技术。

作为独立的工程技术学科，可靠性工程和维修性工程也是美国率先形成的。可靠性工程在美国的兴起、成长与成熟的过程具有代表性。

可靠性工程趋于成熟还远不是它的发展进程的结束，它们还在继续向更高水平、更广阔和更深入的内涵发展。比如，以寿命周期费用为约束的可靠性的权衡优化设计，具有更高可靠性的系统研制、软件可靠性的研究、可靠性试验方法的改进、先进的机内自测试技术的开发以及统一的管理机构与数据库的建立和促进国际间的协调发展等。有关的研究成果和新进展又适时地反映到相应的新标准、新规范等的制订和原有标准、规范等的修订中去。

从可靠性工程的发展过程中，可以看出正是客观现实条件的变化：设备日趋复杂，使用运行环境日益严酷、财力与人力资源受到严格限制、可靠性技术不断发展等，导致人们在观念上产生了变化，从单纯地追求某些技术性能目标，转向主要以寿命周期费用体现出来的综合目标，转向要求系统的效能和费用间求得合理的平衡。高的可靠性和高的维修性对提高系统的效能和降低其寿命周期费用起着举足轻重的作用。正是这样，可靠性工程自 70 年代以来取得了长足的进展。

可靠性在工程项目发展中的地位日益提高，按美国空军的提法，可靠性与维修性是“战斗力的乘数”，他们提出“今天的可靠性与维修性，就是明天的战斗力”。美国军方预期在 2000 年时，要做到至少在新飞机和导弹发展项目的可靠性比现有水平提高一倍。

在我国最早也是由电子工业部门开始开展可靠性工作的，在 60 年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。以后经过各有关部门的持续努力，从 1984 年开始，在国防科工委的统一领导下，结合中国国情并积极汲取国外的先进技术内容，组织制定了一系列关于可靠性的基础规定和标准。1985 年 10 月科工委颁发的“航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定”，是我国航空工业的可靠性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987 年 5 月，国务院、中央军委颁发“军工产品质量管理条例”，明确了在产品研制中要运用可靠性技术。此后，1987 年 12 月和 1988 年 3 月先后颁发的国家军用标准 GJB368-87“装备维修性通用规范”和 GJB450-88“装备研制与生产的可靠性通用大纲”，可以说是目前具有代表性的基础标准。总的来说，我国的可靠性工程与维修性工程尚处于打基础的阶段。

现代可靠性工程虽然在我国发展较晚，但已开始对航空航天工业及其它工业的发展产生了重要的影响。新产品的可靠性设计已有了良好的开端，有关基础理论和应用科学的研究工作已有所进展，今后要提高到新的水平。

二、可靠性的重要性

进入 60 年代，美、英、法、联邦德国和苏联等开始进行可靠性技术的普及工作。从 1961 年起，把可靠性技术应用到“阿波罗”号宇宙飞船的研制。1969 年 7 月，“阿波罗”号宇宙飞船在月球着陆成功，显示了可靠性技术的效果。以后，可靠性技术从航天领域迅速扩展到其它生产领域。从人造卫星、电子通讯到计算机，从机床、飞机、汽车、到家用电器等的研

究、开发和设计制造，都将可靠性技术作为重要的工具。因此，可以说 60 年代是可靠性的普及时期。进入 70 年代，许多工业国家已将可靠性技术用于民用机械产品。

我国从 60 到 80 年代，首先在国防和电子工业部门开始了可靠性的研究和普及工作，继而逐步在机械工业等部门也推广应用起来，收到了良好的效果。

今天，可靠性研究更加受到人们的重视，这是由于：

1. 产品复杂程度不断增加

随着科学技术的发展，产品的复杂程度不断增加。由于产品结构和系统组成的复杂化，要求产品功能的多样化，必然使产品、系统的零件数目增多。例如汽车制造企业为满足汽车无公害、节能和安全的社会要求，为满足重量轻、舒适、平稳和方便等多样化的用户要求，已使汽车结构日益复杂化，其组成的零件数目由万件向十万件逼近。又如，由 130 万个零件组成的导弹，其零件故障率即使只有百万分之一，导弹也难以完全实现预期的功能。因为导弹可能正常运行的概率只有

$$(1 - 10^{-6})^{1300000} \approx 0.27 = 27\%$$

这表明，每发射 100 枚导弹，平均只有 27 枚可能成功。由此可见，随着产品的复杂化，零件数目加多，导致不可靠的因素加多，更应提高产品零件的可靠性。随着产品结构复杂化，设计、生产、装配和试验中的失误显著增加，管理失误也显著增加，因此应更加重视产品可靠性的提高。

2. 产品的工作环境日益严酷

由于要求产品的功能不断提高，使其受到的应力水平、温度条件、振动条件和腐蚀环境等不断变坏。为了提高发动机的推重比，通常增加涡轮进口处的温度以增加推力。同时，可能用增加应力水平、降低强度储备的方法，以减轻发动机重量。这都使发动机的工作条件变坏，更必须重视产品可靠性的提高。

3. 提高产品经济性的需要

为了提高产品的可靠性，需要在设计、制造和试验中增加费用，但却可以在使用 and 维修中减少费用。为了使产品的总成本最小，需要慎重选择其可靠性指标。例如，西屋公司为提高产品的可靠性，作了一次彻底地设计审查和修改。据统计，在规定的可靠性指标下，设计审查和修改花费的每 1 美元所得的利润为 23 美元。如不适当地过分提高可靠性指标，也会使总成本增加，这就不恰当。

4. 国内、外竞争形势的需要

为了在市场上建立信誉，提高产品的竞争能力，不但要求产品的功能好，而且还要求其可靠性高，价格便宜。例如，美国海军将可靠性技术引入 F404 发动机的关键构件，制定了 F404 可靠性大纲，其目的在于识别早期潜伏的故障，并确保快速修理。结果使该发动机降低了使用维修费用，延长了寿命，降低了成本，提高了在市场的竞争能力。

第三节 可靠性的数量指标

可靠性既然是产品的质量指标，不能只有定性说明，应该有定量表示的数量指标。实践经验表明，产品的可靠性很难用一个数量指标表示。有时着重于产品完成规定功能的概率；有时用几个指标表示。另外，可靠性指标还有一定的随机性。对一特定产品在某一特定时刻只能处于故障或正常两种状态之一，不存在任何中间状态，因此判断产品是否故障的标准必须十分明确。由概率论知，在一定条件下，可能发生也可能不发生的事件为随机事件，“一个产品在规定的时间内不发生故障”是一个随机事件。随机事件的发生与否带有随机性，因此研究可靠性数量指标时，必须应用概率统计理论。

一般来说，可靠性数量指标应具有以下特征：

- (1) 能确切测定，即能数据化；
- (2) 能判定产品的寿命；
- (3) 能判定产品可靠性的优劣，即水平的高低；
- (4) 能判定产品使用时间与故障发生的关系；
- (5) 能预测、估计使用中产品的未来工作状态。

总的说来，可靠性数量指标可以分三类。第一类用概率计量的指标，包括可靠度(R)、维修度(M)和有效度(A)等。第二类是用时间计量的指标，包括平均故障前工作时间(MTTF)，平均故障间隔时间(MTBF)和平均维修间隔时间(MTTR)等。第三类是用单位时间比率计量的指标，包括故障率(λ)和维修率(μ)等。

一、用概率计量的指标

1. 可靠度(R)

可靠度的定义：产品在规定条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。这个定义指出了可靠性的对象、功能、使用条件、时间和概率值等五方面的因素。狭义可靠度为是否发生故障作为一个判断界限。也就是说，在规定条件下，在预期时间内，产品不发生故障的概率，这就是可靠性。即可靠度就是使用者想使用时，产品能按使用者的期望发挥功能的概率。例如人们买电视机目的在于欣赏电视节目，如果在规定寿命时间10000小时内接收1000次，在1000次收看中有1次发生故障，则其可靠度大约为99.9%。

把抽象的可靠性用概率值定义后，产品或系统的可靠性，在测量、比较、选择和控制等方面，就有了统一基础，并且可与其它质量指标相平衡。

按上述可靠性定义，可以知道可靠度为时间的函数，且其值在0和1之间，即

$$R = R(t)$$

与定义可靠度相似，也可以定义不可靠度 F ，即在规定条件下，在规定时间内，产品丧失规定功能的概率。显然不可靠度也是时间的函数，因此可用 $F(t)$ 表示。由于可靠和不可靠是两种对立事件，故

$$R(t) + F(t) = 1.0 \quad (1-1)$$

设有一批产品共 N_0 个，在规定条件下，连续工作到时间 t ，如 r 为时间从 0 到 t 的累积失效数，显然 $r = r(t)$ ，随着工作时间的延续，累积失效数 $r(t)$ 逐渐增加，设 $t = t_{N_0}$ 时， $r(t_{N_0}) = N_0$ ，即产品完全失效（故障）。累积失效数 $r(t)$ 随时间 t 的变化曲线一般可通过实测的直方图画出，如图 1-1 所示。

如将累积失效数 $r(t)$ 与产品总数 N_0 的比值定义为累积失效频率，在 N_0 足够大时，该值可以近似看作概率，则称其为累积失效概率或不可靠度 $F(t)$ ：

$$F(t) = r(t) / N_0 \quad (1-2)$$

当 $t = t_{N_0}$ 时，因 $r(t_{N_0}) = N_0$ ，故 $F(t_{N_0}) = 1.0$ 。累积失效概率 F 随时间 t 的变化曲线见图 1-2，也可以通过实测由直方图近似画出。

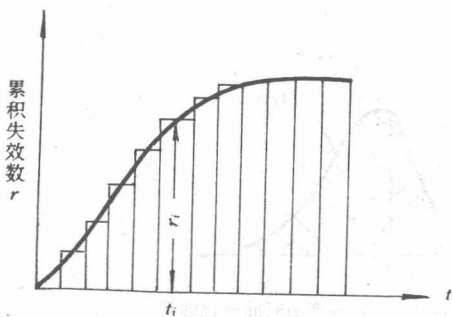


图 1-1 累积失效数随时间变化曲线

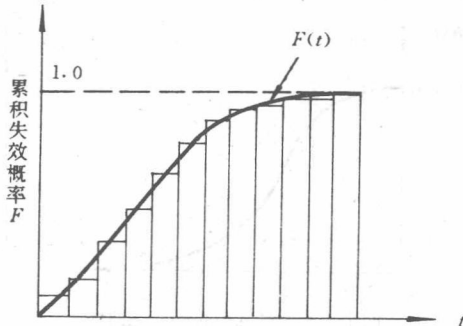


图 1-2 累积失效概率随时间变化曲线

根据(1-1)式，可得可靠度 $R(t)$ 的表达式：

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - r(t) / N_0 \quad (1-3)$$

可靠度 $R(t)$ 随时间的变化曲线如图 1-3 所示。从曲线中可以看出， $t=0$ 时，产品尚未使用， $r(0) = 0$ ， $F(0) = 0$ ，故 $R(0) = 1.0$ 。随着时间 t 的增加，产品在不断使用， $r(t)$ 不断增加， $F(t)$ 不断增加，故 $R(t)$ 不断减小。直到 $t = t_{N_0}$ 时， $r(t_{N_0}) = N_0$ ，产品全部失效， $F(t_{N_0}) = 1.0$ ，此时 $R(t_{N_0}) = 0$ 。

如果对产品的观测点非常多，可将累积失效数看成时间的连续函数，则可将 (1-2) 式改写为

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0} = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt \quad (1-4)$$

令

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} \quad (1-5)$$

称 $f(t)$ 为失效密度函数。它表示在时刻 t 后的一个单位时间内，产品的失效（故障）数与产品总数之比，它也是时间函数。

引入 $f(t)$ 后，(1-4)式可改写为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1-6)$$

当 $t = t_{N_0}$ 时，

$$F(t) = \int_0^{t_{N_0}} f(t) dt = 1.0$$

这表示在失效密度随时间的变化曲线图中， $f(t)$ 曲线与横坐标所围成的面积为 1.0。如图 1-4 所示。图中示出的面积 A 为 $F(t)$ 值，面积 B 则根据(1-1)式应为 $R(t)$ 值。失效密度曲线有时简称为分布曲线，它表示产品失效概率随使用时间的变化规律。如已知该曲线，则可以得到不同使用时间下的可靠度和不可靠度。

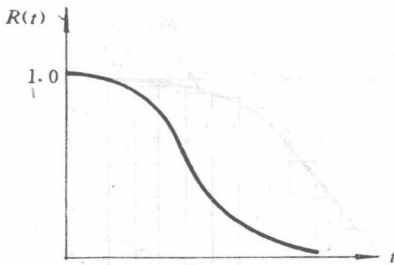


图 1-3 可靠度随时间变化曲线

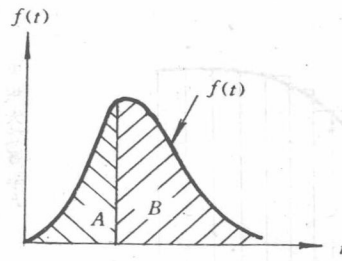


图 1-4 失效密度随时间变化曲线

对于一批产品，其中每个产品失效前的工作时间有长有短，参差不齐，具有随机性。对某个产品，在规定时间内，它可能失效，也可能不失效，也具有随机性。但它们都遵循一定的规律。使用经验证明，失效密度函数曲线，反映了这种分布规律。表 1-1 中给出了常用的几种分布规律及其适用范围。

表 1-1 常用的几种分布规律及其适用范围

分布规律	适用范围
指数分布	具有恒定失效率的构件、无余度的复杂系统。在耗损失效前进行定时维修的产品、故障设备经过修理或更换的系统、由随机高应力导致失效的构件、使用寿命期内由于部件质量差而引起失效、耗损影响小的构件。
威布尔分布	滚珠轴承、继电器、开关、断路器、某些电容器、电子管、磁控管、电位计、陀螺、电动机、航空发动机、蓄电池、机械液压恒速传动装置、液压泵、空气涡轮启动机、齿轮、活门、材料疲劳等。
对数正态分布	电动绕组绝缘、半导体器件、硅晶体管、直升机旋翼叶片、飞机结构、金属疲劳等。
正态分布	飞机轮胎磨损、变压器、灯泡及某些机械产品等。