

可靠性工程概论

王时任 陈继平

华中工学院出版社

114

内 容 提 要

本书介绍了可靠性学科的重要分支——可靠性工程的基本内容。全书共分七章，内容包括基础知识、可靠性试验及数据处理、可靠性预测、可靠性设计、可靠性分配以及可维护度和可利用度等。

本书可供工程技术人员及管理人员阅读，也可供大专院校工科学生及教师参考。

可 靠 性 工 程 概 论

王时任 陈继平 编

责任编辑 郑兆昭

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售

湖北省咸宁县印刷厂印装

开本：787×1092 1/32 印张：6.94 字数：160,000

1983年7月第一版 1983年7月第一次印刷

印数：1—4,000

统一书号：15255—007 定价：1.00元

前 言

可靠性工程是可靠性学科的一重要分支。由于宇航与军事工业以及国际市场产品竞争的需要，它的发展十分迅速。在工业发达国家的工厂中，普遍设立了可靠性工程师室，对产品都要进行可靠性设计和可靠性估计。在美国，从事这方面工作的工程技术人员多达五十万。这些都说明工业发达国家对可靠性问题是十分重视的。

我国由于各方面的原因，特别是十年动乱的影响，可靠性学科的发展比较缓慢。自从党的十一届三中全会以来，随着国民经济状况的不断好转，产品可靠性的问题逐渐受到了人们的重视，因而希望学习和掌握可靠性学科的人逐渐增多。为了满足这种日益迫切的需要，我们编写了这本内容比较系统而理论又不太深奥的读物。

本书包括四部分内容：第一部分是可靠性工程的基本知识（第一章、第二章、第六章）；第二部分是可靠性预测（第四章）；第三部分是可靠性试验及数据处理（第三章）；第四部分是可靠性设计（第五章、第七章）。读者可根据需要进行选读。

可靠性工程在分析和提高工业产品质量方面为人们提供了科学的、有效的理论和方法，因此对我国的“四化”建设有重要的现实意义。

本书如果能在普及可靠性工程知识，推广和应用可靠性工程技术，从而为提高我国工业产品的质量和增强市场竞争能力等方面有所裨益的话，我们将认为自己的耕耘取得了最

好的收获。

本书第一、三、五章为王时任编写，第二、四、六、七章为陈继平编写。

由于我们水平有限，书中难免存在着许多缺点和错误，希读者批评指正。

编者

1982.11

符号索引

第一章

$P(A)$ ——随机事件 A 的概率。

R ——可靠度。

F ——不可靠度(失效概率)。

t ——寿命。

$F(t)$ ——不可靠度函数。

$R(t)$ ——可靠度函数。

$f(t)$ ——寿命的概率密度函数。

λ ——失效率。

$h(t)$ ——失效率函数。

MTTF——失效前的平均工作时间。

MTBF——平均无故障工作时间。

θ ——平均寿命。

第二章

$E(x)$ ——随机变量 x 的数学期望。

μ ——平均值(母体均值)。

\bar{x} —— x 的算术平均值(样品均值)。

ϕ ——中位数。

n ——子样容量。

ν ——自由度。

exp——自然对数的指数, $\exp(-\lambda t) = e^{-\lambda t}$ 。

Z ——标准正态变量。

β ——威布尔分布的形状参数。

α ——威布尔分布的尺度参数。

γ ——威布尔分布的位置参数。

- t_a ——威布尔分布的特征寿命(尺度参数)。
- t_0 ——威布尔分布的最小保证寿命(位置参数)。
- λ ——失效率。
- θ ——平均寿命。
- L_{xx} ——变量 x 的方差。
- L_{yy} ——变量 y 的方差。
- L_{xy} ——变量 x 与变量 y 的协方差。

第三章

- $F(t)$ ——不可靠度函数。
- r ——失效数。
- $\hat{\theta}$ ——平均寿命 θ 的估计值。
- T ——总试验时间。
- θ_U ——平均寿命 θ 的置信上限。
- θ_L ——平均寿命 θ 的置信下限。
- α ——显著性水平, 危险率。
- $1-\alpha$ ——置信度。
- $\hat{\mu}$ ——平均值 μ 的估计值。
- $\hat{\sigma}^2$ ——方差 σ^2 的估计值。
- μ_U ——平均值上限。
- μ_L ——平均值下限。
- σ_U^2 ——方差上限。
- σ_L^2 ——方差下限。
- ν ——自由度。

第四章

- R_s ——系统可靠度。
- F_A —— A 零件的失效概率(不可靠度)。
- R_A —— A 零件的可靠度。

第五章

- R^* ——系统规定的可靠度。

R_i^* ——分配给单元*i*的可靠度, $i=1, \dots, n$ 。
 λ^* ——系统的失效率。
 λ_i^* ——单元*i*的失效率。
 λ_i ——单元*i*预计的失效率。
 E_i ——单元*i*的重要度。
 T ——系统的工作时间。
 λ ——系统预计失效率。
 N ——系统的总组件数。
 n_i ——单元*i*的组件数。
 R_i ——单元*i*的可靠度。
 R_i' ——对于单元*i*提出的可靠度指标。
 $G(R_i, R_i')$ ——单元*i*的可靠度水平从 R_i 提高到 R_i' 的所需发展费用函数。

第六章

\overline{M} ——可维修度。
 M ——平均维修时间。
 μ ——修复率。
 λ ——失效率。
 t ——维修时间的随机变量。
 P ——转移矩阵。
 P^* ——极限状态矩阵。
 A ——可利用度(有效度)。
 M_Δ ——可维修度增量。
 P_f ——失效概率。
 T ——总运行时间。
 P_s —— T 时间内“零失效”的概率。

第七章

η ——安全系数。
 $N(\mu, \sigma)$ ——均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布。

A ——面积。
 S ——应力随机变量。
 δ ——强度随机变量。
 $f(S)$ ——应力随机变量 S 的概率密度函数。
 $g(\delta)$ ——强度随机变量 δ 的概率密度函数。
 P ——外载荷。
 M ——外弯矩。
 I ——惯性矩。
 τ ——剪切应力。
 G ——剪切弹性模量。
 θ ——单位长度的扭转角。
 T ——施加扭矩。
 $D(x)$ ——随机变量 x 的方差。

目 录

第一章 绪论

- §1-1 可靠性学科发展简史 (1)
- §1-2 可靠性研究的必要性 (3)
- §1-3 可靠性学科的基本内容与发展动向 (6)
- §1-4 可靠性的尺度及其定义 (12)

第二章 有关的概率统计基础

- §2-1 概率的基本运算法则 (24)
- §2-2 统计的基本概念 (26)
- §2-3 主要统计分布介绍 (35)
- §2-4 概率分布的概率纸检验 (44)

第三章 可靠性试验与数据分析

- §3-1 可靠性试验的分类 (55)
- §3-2 指数分布形式的寿命试验与参数估计 (57)
- §3-3 正态分布时的参数估计 (68)
- §3-4 现场数据的收集 (75)
- §3-5 假设检验 (77)

第四章 可靠性预测

- §4-1 零件的可靠性预测 (86)
- §4-2 系统的可靠性预测 (89)

第五章 可靠度的分配

- §5-1 概述 (108)
- §5-2 等同分配法 (110)
- §5-3 按相对失效率比的分配方法 (111)
- §5-4 按相对失效率比和重要度的分配方法 (114)
- §5-5 AGREE分配方法 (118)

§5-6 花费最小的分配方法..... (120)

§5-7 利用动态规划作可靠度分配..... (124)

第六章 可维护度与可利用度

§6-1 可维护度..... (136)

§6-2 马尔可夫过程..... (141)

§6-3 可维修系统的可靠度..... (145)

§6-4 可利用度(有效度)..... (147)

§6-5 两系统工作贮备与非工作贮备的可利用度..... (150)

第七章 概率工程设计

§7-1 概述..... (156)

§7-2 必要的数学方法简介..... (158)

§7-3 应力与强度的干涉理论..... (165)

§7-4 概率设计实例..... (173)

第一章 绪 论

§1-1 可靠性学科发展简史

自古以来人们就广泛采用“可靠性”来作为衡量某些物品质量的指标之一。但那时只能定性地反映这一指标，人们根据使用经验，得出某一物品很可靠、比较可靠、不大可靠或根本不可靠这样一些抽象的评价。到了第二次世界大战末期，德国的V-Ⅱ型火箭的诱导装置和美国军用雷达装置，与以往的电子设备相比，均达到了更精密和复杂的程度。这些设备在运输、储存和实战过程中都出现过大量的故障而失去作战机能，并导致人员的严重伤亡，甚至使某些战役遭到失败。据统计，美国对日作战中使用的电子设备，有一半经过运输、储存到达战场后不能正常工作。美国海军统计表明，当时电子设备在规定的使用期间内，仅有30%的时间能有效地工作。可见可靠性问题在现代技术中的重要性。为了更好地表达可靠性的准确含义，不能仅仅从定性的方面来评述它，而需要用一些定量的尺度来衡量它。第二次世界大战末期，德国的火箭研究者之一R. Lusser首先提出了利用概率乘积法则，把一个系统的可靠度看成为该系统的子系统的可靠度乘积，从而算得V-Ⅱ型火箭诱导装置的可靠度为75%，第一次定量地表达了产品的可靠性。从五十年代初期开始，可靠性问题就作为一门新的学科被系统地加以研究了。

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当时电子设备产生故障的主要元件——真空管的可靠性作了深入的调查研究。

1952年美国成立了“电子设备可靠性顾问团”(AGREE: Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)。该机构对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、输送、使用等各方面的可靠性问题,作了全面的调查研究,经过五年时间,于1957年写出了《电子设备可靠性报告》。该报告比较完整地阐述了可靠性的理论基础与研究方法。

1954年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。

1958年日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。

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。同年美国还召开了第一届电子设备故障物理学术会议,以后也是每年举行一次。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。

同年,英国出版了《可靠性与微电子学》(Reliability And Microelectronics)杂志。法国国立通讯研究所也在这年成立了“可靠性中心”,进行数据的收集与分析。

1963年法国出版了《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,至1977年已先后召开了四次这样的会议。

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年改名为可靠性与可维修性技术委员会),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（计算系统的耐故障性）国际会议。同年还召开了日本、法国电子产品可靠性讨论会和第一届日本可靠性学术讨论会。

1975年召开了国际软件可靠性学术讨论会。

我国有关可靠性问题的研究，从第一个五年计划以来，第四机械工业部的有关研究所和工厂做了不少工作，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试验》两种刊物，还进行了一些可靠性技术普及工作。

如上所述，对可靠性的研究是从四十年代起由于处理电子产品所面临的问题而开展起来的。六十年代，由于空间科学和宇航技术的发展，可靠性的研究水平得到了进一步的提高，其研究的范围从电子产品逐渐扩展到了机械系统。七十年代初集成电路的迅速发展又更进一步促进了可靠性的研究。

§1-2 可靠性研究的必要性

可靠性成为重要的研究课题，归纳起来有以下一些原因。

一、设备的复杂程度增加

近几十年来科学技术迅速发展，要求一些设备具有非常优良的性能，因而这些设备的构成就变得非常复杂，所采用的零部件数量也相应增多，例如阿波罗宇宙飞船总共使用了7100000个以上的零件。除了以后要叙述的贮备系统以外，随着设备零件数量的增加，设备的可靠性也会相应地降低，

因为其中一个零件发生故障，就可能影响设备某些功能的实现。

再者，随着设备复杂程度的增加，设计、制造、销售和使用该设备的有关单位和人员必然增多，因而在他们之间的联系配合中更易出现差错，也会增加不可靠的因素。

随着设备复杂程度的增加，人-机关系也就更加复杂。由于人的能力存在一定的限度，即使写出详细的设备使用说明书和操作程序，也不可能完全避免过失和错误。虽可使操作更加自动化来解决这个问题，但这样一来设备将变得更加复杂，于是又将降低可靠性。

总之，随着设备复杂程度的增加，对设备的可靠性将提出更高的要求。

二、提高经济效益

有人认为推行可靠性技术，在经济上是不合算的，因为提高产品的可靠性将花费不少资金。实际上，提高产品的可靠性不仅能提高产品的信誉，而且有时还可以获得直接的经济利益。例如，美国西屋公司为了提高某种产品的可靠性，曾对其作了一次设计审查，结果所得收益（产品成本下降）为提高可靠性所花费用的一百倍以上。

不仅如此，由于设备可靠性的提高，还将大大减少设备的日常维护费用。五十年代美国的调查表明，对一些设备的维修所消耗的备用件及其保管费用等维护费的总额；在五年内可达该设备价值的十倍以上。1961年美国国防预算中至少有25%用于维修方面。显然，如果适当提高产品的可靠性，将会节约大量的维护费用。

再者，由于科学技术的进步，许多设备与以往的相比，具有更高级的性能，结构更为复杂，价格也更为昂贵。这样的设备如果出现故障，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，因此它们的可靠性就显得更为重要了。

三、机械的可靠性问题日益突出

机械可靠性问题的提出比电子设备的要迟些，因为，一般机械在使用中产生故障的可能性比电子产品的要小；以往机械设备的实际寿命常常比所要求的要长；机械可靠性所涉及的问题比较复杂。为了确保机械的可靠性，以往的做法是加大零件的安全系数；采用较好的材料；定期更换某些易损零件。但这些做法往往不适当地增加了设备的材料用量或成本。

随着时间的推移，机械可靠性问题逐渐为人们所重视，其原因如下：

1. 电子产品的可靠性逐渐提高后，机械设备的可靠性问题就突出了。

2. 机械系统日趋复杂化（如巨型油轮、超大型喷气式飞机、自动化机械、自动线、自动化车间、自动化工厂等），而复杂系统出现故障的可能性大大增加，由此而造成的损失也随之增大。

3. 机械系统所处的工作环境日益严酷。有些机械处在超高（低）压，超高（低）温等环境下工作；人造卫星、航天飞机、超音速飞机等要在特殊条件下运行；原子能动力站的工作环境更为恶化。为了满足这些技术要求，仅仅用提高

安全系数的方法来获得可靠性是不够的，必须采用新技术、新材料、新工艺，并利用可靠性技术才能保证设备的可靠运行。

4. 对机械系统的要求日益提高，既要求尺寸小、重量轻，又要求性能良好、价格低廉，而且还要高度可靠。

由于科学技术的发展，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；还成功地应用概率理论来作机械及其零件的可靠性分析。因此，近年来机械可靠性的研究逐渐有了进展，研究领域扩展到了人造卫星、宇宙航行、飞机、船舶、常规动力站、核动力站、车辆、建筑机械、货物输送系统、机床和各种机械零件等方面。

§1-3 可靠性学科的基本内容 与发展动向

一、基本内容

可靠性学科所包含的内容是相当广泛的，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。

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、基础实验以及人在操作过程中的可靠性等。

可靠性应用技术包括使用要求的调查，现场数据的收集与分析，失效分析，零件、机器、系统的可靠性设计与预

测，软件的可靠性，可靠性评价与验证，包装、运输、保管、使用的可靠性规范，可靠性试验，可靠性标准等。

可靠性学科也可分为管理、设计、分析、理论、数据、试验和评价六个分支。

二、发展动向

1. 可靠性学科的发展

图1-1表示可靠性学科文献页数随年度而变化的情况。虽然该图是按英文文献（以美国发表的文献为主）的统计数字绘制的，但能大致反映可靠性学科的发展动向。

由图可知，可靠性学科的发展速度从1950年初到1960年是逐渐增长的，1960年左右增长较为显著，1963年开始减慢，到1970年左右又有较快的增长，以后又减慢，甚至出现降低的趋向。

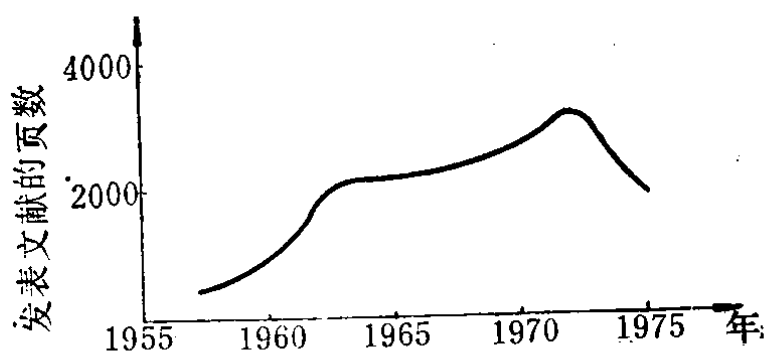


图1-1 可靠性学科发表文献页数的统计

1950年初至1960年主要集中于研究电子产品的可靠性。1960年左右快速增长的主要原因是美国推行阿波罗登月计划，在研究方面进行了大量的投资。以后主要由于美国经费开支紧缩加上学科日趋成熟，故发展速度减慢。1970年左右