

可靠性工程—— 设计 试验 分析 管理

上 册

主编 胡昌寿

审校 何国伟

宇航出版社

内 容 提 要

本书分上、下两册，全面介绍可靠性设计、试验、分析、管理诸方面的内容。上册主要讲可靠性设计，包括两篇十三章。第一篇包括环境条件、系统可靠性模型、预测和分配、FMECA和FTA等可靠性设计基础技术。第二篇是以应力分析为主的设计技术，同时包括容错设计、三次设计、电磁兼容性、潜电路分析、人机工程、软件可靠性、质量可靠性成本及寿命周期总费用等专题。

本书可作为培训各种不同专业工程设计人员的教材，也可供可靠性专业人员、工科高年级大学生和研究生、以及从事研制生产的企业管理人员学习和参考。

可 靠 性 工 程——

设计、试验、分析、管理

(上册)

航天工业部可靠性工程通用教材

(试用)

主编 胡昌寿

审校 何国伟

责任编辑：林茂燕

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

纺织工业出版社印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：20.75 字数：550千字

1988年12月第1版第1次印刷 印数：1—2000册

ISBN 7-80034-164-X/TB·042 定价：8.50元

《可靠性工程——设计、试验、分析、管理》

编审委员会

顾问：梁思礼、卢庆骏、杨嘉墀

主编：胡昌寿

审校：何国伟

编委：（按姓氏笔划为序）

邢蓓蓓、何国伟、张翰英

周正伐、周宏佐、周百里

周炽九、林庆松、胡昌寿

徐福荣、廖炯生

作者：（按姓氏笔划为序）

王泰俭、李一鸣、邢蓓蓓

严孝安、何国伟、吴廉亿

张翰英、周广涛、周正伐

周炽九、周源泉、胡昌寿

洪祖峻、徐福荣、虞 鹏

钱 襄、廖炯生

曲 突 徙 薪

“传说齐人淳于髡见邻人灶直突而旁有积薪，告以改直突为曲突，并远徙其薪，否则将失火。邻人不从，后竟失火，幸共救得息。于是杀牛置酒，先言曲突徙薪者不为功，而救火者焦头烂额为上客。”“后因以曲突徙薪喻防患于未然。”

——《辞源》第二册1458页《曲突徙薪》条

出版说明

为了在航天工业系统普及可靠性知识，全面开展可靠性工作，编写一本通用的可靠性工程教材，航天工业部质量技术司于1984年二月组织成立了以第一研究院为主，五院、二院、七〇八所等可靠性专家和科技人员参加的可靠性教材编委会。经过两年多以业余时间为主的紧张的编写，多次试用于对工程设计人员、技术管理人员和研究生的讲课和反复修改，已胜利完成了任务，现可供进一步推广试用。

本书结合航天部二十几年可靠性工作的经验，并参考国内外的资料，把可靠性的概念具体化和系统化，全面介绍一般可靠性工程的设计、试验、分析、管理诸方面的内容，而侧重于设计技术，注意实用性，并介绍理论和方法的新发展及一些新兴的专门技术。本书又是通用教材，可供航天部以及其他一些工业部门培训工程设计人员之用，也可供可靠性专业人员、工科高等院校高年级学生和研究生，以及从事研制生产的企业管理人员学习和参考。

本书是集体智慧的结晶。在此，谨向一切参加编写、审阅本书的单位和有关专家、工程技术人员和部内外有关单位和个人表示衷心的感谢。

航天工业部质量技术司

一九八六年八月

代 序

可靠性是质量保证的关键

推荐《可靠性工程——设计、试验、分析、管理》

随着生产的发展，产品越来越复杂化，过去沿用的一套设计、生产、检验的质量管理方法已经不能适用于现代化工业。我们所谓实行“三包”（包退、包换、包修）已经不合时代的要求；因为产品质量不好，给用户造成的损失不是这些事后措施所能弥补的。特别是军工产品，关系战争的胜负，国家的存亡和人民的安危，产品质量有问题，后果是不堪设想的。对于一些大型和高技术产业，如电力系统、原子能电站、化学工业、航空宇航运载系统，一次质量事故所造成的损失也不是可以用金钱来衡量的。至于民用工业如汽车、家用电器等大批量生产的企业，生产厂家必须出具质量保证单，不仅对新品要求质量保证，而且要求在售后的保证期内，仍要负责产品的质量。只是修理或退换不能使用户信得过；而且这样做对生产者也要增加开支，给企业经营带来更大困难。因此，生产者必须建立一套足以在售后使产品仍能充分发挥其使用性能的质量保证体系。把质量问题消除在产品出厂以前，这是建立产品信誉的必要措施。

质量保证体系涉及从新产品研究开发、设计生产、到销售使用等一系列环节。产品的质量包括性能、可靠性、寿命、安全性等都是重要的，还有一些制约因素，如价格、使用条件等也要考虑；因此要用系统工程的方法，进行分析，权衡利弊，充分论证，选择和分配这几方面的指标，使产品满足一定的使用要求，满足市场的需要。可靠性研究从一开始就是同产品质量紧密联系在一起。可靠性表示产品在规定的使用条件下和在一定时间内

完成其规定功能的能力,因此可靠性是质量保证的关键。按影响可靠性的因素,有三方面的内容,即设计和生产中实现的可靠性;即固有可靠性;实际使用中表现出来的可靠性,即使用可靠性;和产品使用环境对可靠性的影响,即环境适应性。这三方面是互相联系的,但是固有可靠性是产品可靠性的根本;其中可靠性设计更是提高产品可靠性的重点。

这本《可靠性工程》是航天工业部工程技术人员根据长期的工作实践,并参考了国外资料编写而成。从工程应用观点,着重介绍设计、试验、分析方面的内容,使可靠性这个不很明确的概念具体化,也结合一定的质量控制和可靠性管理方面的内容,使读者了解可靠性设计在全部质量保证体系中的地位。这本书的出版将有助于使我国工业产品不但能满足国内四化建设的需要,还能进入国际市场进行竞争。

杨嘉墀

编者序

本书主要目的是在工程设计人员中普及现代可靠性工程，特别是可靠性设计的实用知识。前七机部的可靠性研究工作从60年代即已开始。我们试图结合航天部的一些经验，以不太大的篇幅系统化地全面介绍可靠性工程的设计、试验、分析、管理诸方面的内容，而以可靠性设计为重点。各章内容以实用的工程技术为主，同时也从工程应用的角度简单介绍理论和方法的发展。

在编写过程中，我们考虑得最多的是内容的系统性。实际工作的自然顺序是：设计→试验→分析→生产→使用，而可靠性管理则贯彻始终。本书内容按此排列，系统介绍可靠性工作的程序和方法，而以可靠性管理为最后一章。除了材料的编排以外，很重要的一点是使读者注意到各个不同方面的概念都是连贯的。从工程上看，最基本的概念是可靠性的三大指标：可靠性、有效性 (*availability*)、和贮存寿命。弄清三者的含义及相互间的关系是非常重要的。本书正文（可靠性概论）就从这里开始。希望读者能从本书获得系统化的可靠性工程的概念。

在概论之后，分五篇二十二章。第一、二篇都是可靠性设计。这是保证产品可靠性的第一步，也是最重要的一步。所谓可靠性设计是指一系列旨在提高与保证可靠性的分析和设计技术，多数是六十年代以后发展起来的。最重要的发展是失效模式、后果、与严重度分析 (FMECA) 和故障树分析 (FTA) 的出现。分析任何工程技术问题总是首先建立物理模型，然后才能建立数学模型。FMECA和FTA两种失效因果关系分析法正是建立物理模型的方法。这是进行可靠性定量分析之前必须做的工作。

(FTA本身也包括定量分析)。在某些不便进行定量分析的情况下，例如产量很少的复杂产品，失效因果关系分析也就是保障

可靠性的主要分析方法。以前人们只是不很自觉地、无计划、无系统地作这种分析。自从这两种方法出现以后，可靠性的工程、物理分析发生了一个飞跃的变化。本书给这两种分析法分配了比较充分的篇幅。

第一篇包括可靠性设计概述，环境条件，系统可靠性模型，指标论证，可靠性预测和分配，FMECA，FTA等。这都属于可靠性设计的基础技术，适用于各种不同的专业。

系统可靠性模型为概率模型，第三篇则介绍统计模型。可靠性预测和分配在缺乏数据的情况下是困难的。（现在国内已开始积累一些数据，即将编成电子产品可靠性预测手册）。国外有许多公布的数据，但是我们不能盲目利用那些数据。数据须经过核实才能使用。而数据的可信性则以生产质量的稳定性为基础。开始抓设计可靠性时，无须拘泥于那么理想的预测和分配，而应该实事求是地通过充分的调查研究，尽可能把预测和分配做得好一点，然后在研制过程中不断地积累数据，再修正预测和分配值。数据的积累需要时间。同时也要注意，在一定的情况下，相对可靠性（例如，相似产品可靠性的比较，或一个系统内各组成部分可靠性的比较）比绝对可靠性数字的准确性更为重要。这是一个例子，说明实际的可靠性工作常常是复杂的，需要在实践中不断地总结经验，逐步做好。

第二篇是以应力分析为主的设计技术。在第六章第一节内介绍了失效率曲线（或“浴盆曲线”，以及产品寿命的分期）。此曲线的重要性不仅在于说明可靠性增长试验以及电子产品老炼和筛选的作用，并且也说明两类不同的失效，即偶然失效（随机失效，与平均寿命或平均无故障工作时间相联系）和耗损（或老化）失效都是客观存在的，同时也就说明把贮存寿命（或老化寿命）包括在可靠性的概念之内不是人为的而是自然的。至于在很多机械产品的寿命期内没有失效率为常数的时期这一情况并不影响两类失效和两种寿命这些基本概念本身。这一篇包括电子元器

件的选用与控制，电路的设计和分析、热设计、抗环境设计、冗余技术与容错设计，机械-结构设计等；此外还有潜电路分析，人机工程，软件可靠性，可靠性成本分析与寿命周期总费用等新发展的专题。第八章所介绍的三次设计是在日本兴起的一种优化设计技术，是解决高可靠性和高成本之间矛盾的技术。防静电和防电磁干扰是从基本组件——印制板开始就存在的问题。对于复杂的电子、电气设备和大系统来说，这个问题发展成为需要专门研究、设计、试验、管理的“电磁兼容性”专题。这与可靠性工程有密切关系，但已成为一门独立的技术。第九章对此作扼要介绍。

第三篇是可靠性试验与分析。第十四章讨论可靠性试验。讲到寿命试验时，按可靠性的概念，既包括与随机失效相联系的寿命试验，又包括耗损（或老化）寿命试验。所谓分析包括失效物理分析和数理统计分析。失效物理（可靠性物理）是另一门可靠性学科，是具体的可靠性工作中所需依靠的一门重要的可靠性研究。本书所编入的可靠性统计分析不算很多，但包括了最基本的分析和实际工作中常用到的方法，以及Monte Carlo模拟和Bayes方法等。

第四篇是生产与使用可靠性。质量管理在历史上是随着大量生产发展起来的，着重于管生产质量。可靠性是质量的一部分。可靠性技术是随着复杂系统（电子产品）和大系统（首先是航天系统）发展起来的，着重于管设计质量。由于重点管理对象不同，各有各的具体方法。然而二者最终目的一致，因而互相联系，互相依靠，不可分割。第二十章扼要介绍统计质量控制，其中一些方法在可靠性工作中也是要用上的。

维修理论在国内已经得到一些研究。可维修性工程的研究在国内还少见。但可维修性是很重要的设计属性。维修工程界很希望设计工作者能更加重视这个问题，更好地满足维修工作的需要。第二十一章介绍可维修性工程的基本内容，同时也包括有效

性分析和基本的维修理论。

可靠性工程是以控制失效概率为目的的管理技术。可靠性和可维修性计算（在美国称为可靠性会计工作）是重要的，产品的使用效能和全寿命期费用的估计以及可靠性控制计划与监督和所需投资与进度的安排都以此为依据。具体保障产品可靠性则需着重抓好各项可靠性工程技术工作。一切工作的计划安排和控制则属于可靠性管理工作。第五篇即第二十二章介绍极为重要的可靠性管理的基本内容。

在可靠性保障工作中，标准化是极为重要的。本书各章都结合具体内容介绍国内外重要的有关标准。

本书所介绍的是一般的可靠性工程，这也就是基础。至于各种不同专业的特殊问题，则须阅读专著。有些问题还有待于开展研究。因此，虽然本书各章讨论的主要对象常为电子系统和大系统（特别是航天系统），然而各种基本原理和许多方法也适用于各种不同的系统、设备、以至零件。

本书每章末尾有小结，并列参考文献目录。许多章末附有习题。参考文献序号上带星号（*）的是供进一步学习的推荐读物。书末附有设计检查清单的例子、习题答案和常用数表。

本书许多章节是请研究该项专题或从事该项工作的同志编写的，这样得到的好处是明显的，不可避免的缺点是也带来了体例和讨论深度的某些不一致。但全书提纲和编写要求是事先经过几次讨论修改后拟订的，全书整体意图已经实现。

本书内容较多，实际讲授时可根据具体情况选取最合适的部分。多准备一些内容供读者自己阅读，也供教师挑选，这是编写本书时的一种意图。如果把所有带星号（*）的章节都省略，余下的便是对工程设计人员最基本最重要的内容，可在四十小时内讲完。

阅读本书的读者应具备一定的工程知识，并掌握高等数学和概率统计基础知识。

* * * *

参加全书编审的还有廖炯生、周正伐等。负责编辑工作的先后为邢蓓蓓、周正伐、贺进夫、董丽云等同志。

应邀为本书写稿的还有徐中秀、李洪鸣和丁以华（电子工业部可靠性与环境试验研究所）等同志，但是由于本书篇幅等原因，他们的手稿最后没有用上，编写组感谢他们对本书的支持。为本书审阅部分初稿的还有赵人濂、梅启智（清华大学核能研究所）、曹晋华（中国科学院应用数学所）等同志。陆寿茂同志为本书第八章提供了实例分析，王基祥同志为本书提供了许多重要参考资料。编写组向他们表示衷心感谢。本书在编写过程中参阅了国内外大量的文献。除了已在各章末尾注明的以外，还有更多的资料未能一一注明。我们向一切这些文献的作者表示感谢。我们还必须感谢参加历次学习班的学员，特别是1984年11月南京航天部管理干部学院可靠性研究班的学员，他们对本书初稿提出了宝贵的意见。最后，感谢航天部一院一部为本书的编辑事务提供了人力支援。

欢迎读者对本书提出批评建议。

本书编写组

1986年8月

目 录

| | |
|------------|-----|
| 可靠性概论..... | (1) |
|------------|-----|

第一篇 可靠性设计 (一) 基础技术

| | |
|-------------------------------------|------|
| 引言 (可靠性设计概述) | (26) |
| * 第一章 环境条件..... | (30) |
| 1.1 概述..... | (30) |
| 1.2 环境分类..... | (31) |
| 1.3 环境影响与失效模式..... | (33) |
| 1.4 核辐射效应..... | (36) |
| 1.5 复合环境..... | (39) |
| 小结..... | (41) |
| 参考文献 | (41) |
| 第二章 系统可靠性模型 | |
| 2.1 产品定义和可靠性框图的建立..... | (43) |
| 2.2 布尔代数和容斥原理简介..... | (48) |
| 2.2.1 布尔代数..... | (48) |
| 2.2.2 容斥原理..... | (52) |
| 2.3 串联系统..... | (55) |
| 2.4 并联系统..... | (56) |
| 2.5 贮备冗余系统..... | (58) |
| 2.6 表决系统..... | (61) |
| 2.6.1 “n中取k” (k-out-of-n:G) 系统..... | (61) |
| *2.6.2 n:k交叉贮备系统..... | (66) |
| *2.6.3 “n中取k至r”系统[17]..... | (70) |
| *2.6.4 “n中取连续k”系统[13-15], [20]..... | (71) |
| *2.7 一般网络可靠性..... | (74) |

| | | |
|-------|---------------|------|
| 2.7.1 | 结构函数 | (74) |
| 2.7.2 | 状态枚举法 | (77) |
| 2.7.3 | 概率图法 | (78) |
| 2.7.4 | 全概率分解法 | (79) |
| 2.7.5 | 最小路法 | (81) |
| 2.8 | 网络可靠性的不交型算法 | (83) |
| 2.8.1 | 不交型布尔代数及其运算规则 | (83) |
| 2.8.2 | 直接不交化算法 | (87) |
| 2.8.3 | 不交最小路法[6] | (90) |
| | 小结 | (94) |
| | 习题 | (95) |
| | 参考文献 | (97) |

第三章 可靠性预测和分配

| | | |
|-------|----------------------|-------|
| 3.1 | 系统可靠性指标论证 | (99) |
| 3.2 | 可靠性预测[1][2] | (102) |
| 3.2.1 | 可靠性预测的目的、意义和方法 | (102) |
| 3.2.2 | 元器件计数可靠性预测法 | (103) |
| 3.2.3 | 元器件应力分析可靠性预测法 | (105) |
| 3.2.4 | 讨论 | (109) |
| 3.2.5 | 全寿命期可靠性预测模型[3] | (110) |
| 3.3 | 可靠性分配 | (112) |
| 3.3.1 | 可靠性分配的原则、方法和步骤 | (112) |
| 3.3.2 | 串联系统可靠性分配 | (113) |
| 3.3.3 | 有并联冗余单元时的可靠性分配 | (115) |
| 3.3.4 | 可靠性分配的代数方法 | (116) |
| 3.3.5 | 可靠性分配的“努力最小算法” | (118) |
| *3.4 | 冗余系统可靠性优化 | (120) |
| 3.4.1 | 概述 | (120) |
| 3.4.2 | LaGrange 乘子法 | (121) |
| 3.4.3 | 动态规划法 | (123) |
| 3.4.4 | 求解冗余系统可靠性极大的一个直接寻查法 | (129) |
| 3.4.5 | 求耗用资源极小的一个直接寻查算法[12] | (133) |

| | |
|---------------------------------|-------|
| 小结..... | (139) |
| 习题..... | (141) |
| 参考文献..... | (141) |
| 第四章 失效模式、后果与严重度分析 | |
| 4.1 概述..... | (142) |
| 4.2 FMEA..... | (143) |
| 4.2.1 FMEA方法..... | (143) |
| 4.2.2 FMEA实例..... | (151) |
| 4.2.3 电子系统的FMEA..... | (159) |
| 4.2.4 FMEA评审准则..... | (166) |
| 4.2.5 FMEA的用途..... | (167) |
| 4.3 失效严重度分析..... | (168) |
| 4.3.1 定性分析..... | (169) |
| 4.3.2 分量分析..... | (169) |
| 4.3.3 严重度分析实例..... | (172) |
| 4.3.4 严重度矩阵..... | (172) |
| 4.3.5 严重度分析的用途..... | (177) |
| 小结..... | (177) |
| 习题..... | (178) |
| 参考文献..... | (178) |
| 第五章 故障树分析 | |
| 5.1 故障树分析法概说..... | (179) |
| 5.2 建造故障树..... | (181) |
| 5.2.1 建树的准备工作..... | (183) |
| 5.2.2 建树基本规则..... | (185) |
| 5.2.3 演绎法建树举例——压力罐系统故障树的建造..... | (188) |
| 5.2.4 信号流图法建树..... | (198) |
| 5.2.5 关于用计算机辅助建树..... | (212) |
| 5.3 单调关联系统故障树的定性分析..... | (213) |
| 5.4 单调关联系统故障树定量分析..... | (223) |
| 5.4.1 由最小割集计算顶事件概率..... | (223) |
| 5.4.2 量化的近似方法..... | (226) |

| | | |
|-------|------------------|-------|
| 5.4.3 | 可修系统故障树顶事件发生频率计算 | (228) |
| 5.4.4 | 重要度划算 | (229) |
| 5.5 | NP困难和FTA新途径 | (233) |
| 5.6 | FTA研究趋势 | (243) |
| 5.6.1 | 非单调关联系统故障树分析 | (243) |
| 5.6.2 | 多状态故障树分析 | (249) |
| 5.6.3 | 共因失效事件分析 | (253) |
| | 小结 | (258) |
| | 习题 | (259) |
| | 参考文献 | (261) |

第二篇 可靠性设计 (二)

线路与产品应力分析及若干专题

| | |
|----|-------|
| 引言 | (623) |
|----|-------|

第六章 电子系统可靠性设计

| | | |
|-------|-----------------|-------|
| 6.1 | 元器件的选用与控制 | (266) |
| 6.1.1 | 电子元器件的失效 | (267) |
| 6.1.2 | 典型的失效率曲线 | (268) |
| 6.1.3 | 失效速率模型 | (270) |
| 6.1.4 | 元器件现场失效率模型的建立 | (272) |
| 6.1.5 | 环境因子 | (274) |
| 6.1.6 | 元器件的筛选和老炼 | (275) |
| 6.1.7 | 电子元器件的降额使用 | (283) |
| 6.1.8 | 我国电子元器件标准概况 | (287) |
| | 附录6-1 | (289) |
| | 参考文献 | (292) |
| 6.2 | 电路与系统的可靠性设计 | (293) |
| 6.2.1 | 元器件的正确使用及选用优选电路 | (293) |
| 6.2.2 | 尽可能简化设计及简化的原则 | (295) |
| 6.2.3 | 最坏情况设计及边缘性能试验 | (296) |
| 6.2.4 | 电路漂移分析 | (300) |
| 6.2.5 | 误差及统计性分析 | (302) |

| | | |
|--------|-------------------------------|-------|
| 6.2.6 | 稳定性分析 | (308) |
| 6.2.7 | 过渡过程的分析 | (308) |
| | 小结 | (310) |
| | 习题 | (312) |
| | 参考文献 | (313) |
| *6.3 | 潜电路分析 | (313) |
| 6.3.1 | 潜电路分析的重要性 | (313) |
| 6.3.2 | 潜电路的分析方法 | (314) |
| 6.3.3 | 数字逻辑的潜电路分析 | (319) |
| 6.3.4 | 软件的潜通路分析 | (320) |
| 6.3.5 | 硬件及软件的综合性分析 | (321) |
| | 参考文献 | (322) |
| 6.4 | 热设计 | (323) |
| 6.4.1 | 概述 | (323) |
| 6.4.2 | 传热路径和热流动方式 | (326) |
| 6.4.3 | 元器件的热设计 | (328) |
| 6.4.4 | 印刷电路板的热设计 | (331) |
| 6.4.5 | 机箱的热设计 | (332) |
| 6.4.6 | 热设计中热管的应用 | (334) |
| 6.4.7 | 电子设备热设计程序 | (334) |
| | 参考文献 | (337) |
| *6.5 | 耐环境设计 | (337) |
| 6.5.1 | 温度防护 | (338) |
| 6.5.2 | 湿气防护[12][13] | (339) |
| 6.5.3 | 盐雾和腐蚀防护 | (339) |
| 6.5.4 | 低气压防护 | (344) |
| 6.5.5 | 霉菌防护 | (345) |
| 6.5.6 | 冲击、振动和噪声的防护 | (345) |
| 6.5.7 | 防爆[13] | (348) |
| 6.5.8 | 瞬时核辐射的防护和加固[6][9][10][11][16] | (348) |
| 6.5.9 | 核电磁脉冲的防护和加固[7][8][16] | (350) |
| 6.5.10 | 空间电子设备抗辐射设计 | (351) |