

液压可靠性工程基础

许耀铭 主编

A large decorative graphic on the book cover. It features a central rectangular area with a complex, interlocking green geometric pattern. This central area is set against a background of concentric blue circles. The entire cover is framed by a light blue border with a repeating diamond pattern.

哈尔滨工业大学出版社

液压可靠性工程基础

许耀铭 主编

哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第 4 号

内 容 简 介

本书主要论述液压元件和系统的可靠性。内容包括：可靠性的概率统计基础、液压产品的失效分析、液压元件的可靠性设计、液压系统的可靠性设计与预测、液压产品的可量性试验、可靠性试验的数据处理与评价等。

本书可作为高等院校流体传动及控制专业研究生的教材。也可作为液压产品的设计、生产部门举办可靠性培训班的教材。对液压行业的领导干部、工程技术人员、高等院校教师和高级本科学生，均有参考价值。

液压可靠性工程基础

许耀铭 主编

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨市外文印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张10.875 插页1 字数244 000

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数1—4 000

ISBN 7-5603-0363-3/TH·26 定价：3.00元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应，二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践

性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书是根据中国船舶工业总公司制订的“七五”教材规划对“液压可靠性工程基础”课程的教学基本要求，作为液压专业的研究生课程教材而编写的。本书经中船总公司液压专业教材编审小组评选、推荐出版。

可靠性工程是一门只有几十年发展历史的新兴边缘学科，越来越受到人们的重视。我国机电产品的可靠性差，是与发达国家同类产品技术水平的主要差距之一，也是我国机电产品打入国际市场的主要障碍。1990年2月，机械电子工业部发布了《加强机电产品设计的规定》，提出机电产品设计的原则是“可靠性、适应性、经济性三性统筹”，并把开展可靠性设计列为加强设计工作的重要内容。

液压产品作为机电行业各主机的基础产品，应用量大，应用面广，但却是可靠性的薄弱环节，更要求本行业的科学技术人员尽快掌握可靠性的设计、试验等基础知识，并把它与液压产品的特点结合起来，以期提高我国液压产品的可靠性水平。

作为高等院校的液压专业，无论对研究生或本科生，一直没有开设有关可靠性的课程；已在工作岗位的液压工程技术人员，也缺乏可靠性方面的理论和实践知识，这与我国当前的技术发展形势很不适应。

自1987年以来，我们接受机械电子工业部机械基础产品

司的委托，先后在哈尔滨、北京，为液压行业的科研、设计、生产部门的科技人员，办了两期液压可靠性短期培训班，并编写了讲义；我校的研究生也结合自己的研究方向，把讲义作为参考教材。这本书便是在已有讲义的基础上加以充实、改编而成的。

在本书的编写过程中，我们力求遵循下列原则：一是密切结合液压产品的特点（一般性的可靠性书籍国内已出版不少，但以液压产品为对象的可靠性书籍尚未见到）；二是内容少而精，不追求理论上的全面与系统，而更侧重于它的实用性；三是力求反映近年来国内外一些单位和我校的研究成果；四是使本书既适合于液压专业研究生作为课程教材，又适合于液压行业在职科技人员作为自学或短训班教材之用。

本书第一、二、三章由许耀铭编写，第四、五章由许耀铭、王建平合写，第六、七章由许耀铭、亢建平合写，博士生孙毅刚为第四、五章提供了部分例题。全书由许耀铭主编。本书由上海交通大学陈兆能教授主审，并提出许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

可靠性工程是一门新兴学科，液压可靠性工程在我国还处于起步阶段。由于作者水平所限，缺点错误难以避免，恳请读者不吝指正。

哈尔滨工业大学教授

许耀铭

1991年3月

目 录

第一章 绪论	(1)
1-1 可靠性工程的任务和意义.....	(1)
1-2 可靠性工程的产生与发展.....	(2)
1-3 可靠性的尺度及其定义.....	(8)
1-4 决定可靠性的因素.....	(14)
1-5 液压可靠性工程的特点.....	(16)
参考文献.....	(19)
第二章 可靠性的概率统计基础	(21)
2-1 概率的基本运算法则.....	(21)
2-2 统计的基本概念.....	(26)
2-3 概率统计的指数分布.....	(34)
2-4 概率统计的正态分布.....	(36)
2-5 概率统计的威布尔分布.....	(41)
2-6 几种分布的比较及其应用范围.....	(46)
参考文献.....	(50)
第三章 液压产品的失效分析	(52)
3-1 概述.....	(52)
3-2 失效的定义与失效判据.....	(54)
3-3 失效的分类与等级划分.....	(57)

3-4	失效模式与失效机理	(60)
3-5	失效的物理模型	(65)
3-6	液压元件的粘着磨损与耗损失效	(68)
3-7	摩擦副的粘铜、烧伤与早期失效	(76)
3-8	液压元件的疲劳磨损失效	(79)
3-9	液压元件的污染磨损失效	(82)
3-10	液压元件的疲劳断裂失效	(86)
	参考文献	(92)

第四章 液压元件的可靠性设计 (94)

4-1	概述	(94)
4-2	固有可靠性与可靠性设计	(97)
4-3	静态可靠度计算	(99)
4-4	应力和强度分布及分布参数的确定	(102)
4-5	各类强度-应力分布模式的可靠度计算	(106)
4-6	液压元件的概率设计方法	(113)
4-7	机械零件的概率设计方法举例	(117)
4-8	与时间有关的应力-强度模型	(121)
4-9	液压元件的可靠性设计示例	(124)
	参考文献	(139)

第五章 液压系统的可靠性设计与预测 (141)

5-1	概述	(141)
5-2	系统的可靠性模型	(144)
5-3	可靠性分配及优化	(151)
5-4	失效模式、效应及后果分析	(159)
5-5	失效树分析方法	(172)

5-6	液压系统中元件的可靠性预测·····	(184)
5-7	液压系统的降额设计·····	(188)
5-8	液压系统的冗余设计·····	(191)
5-9	液压系统的可靠性设计与预测举例·····	(196)
	参考文献·····	(201)
第六章	液压产品的可靠性试验·····	(203)
6-1	可靠性试验的目的与分类·····	(203)
6-2	可靠性常规寿命试验与加速(强化)寿命 试验·····	(208)
6-3	液压元件的疲劳强化验证试验·····	(211)
6-4	液压元件的磨损强化寿命试验·····	(223)
6-5	液压元件的可靠性增长与部件模拟试验··	(228)
6-6	可靠性的计算机仿真模拟试验·····	(234)
6-7	可靠性的抽样试验·····	(241)
6-8	可靠性的序贯寿命抽样试验·····	(249)
	参考文献·····	(255)
第七章	可靠性试验的数据处理·····	(257)
7-1	样品数量和试验时间·····	(257)
7-2	指数分布时的参数估计·····	(260)
7-3	正态分布时的参数估计·····	(270)
7-4	威布尔分布时的参数估计·····	(279)
	参考文献·····	(297)
附表	·····	(298)
	附表一 标准正态积分表·····	(298)

附表二	$\chi^2(f)$ 分布的下侧分点 $\chi^2_{\alpha}(f)$ 表	(306)
附表三	标准正态分布的双边分位数 $(u_{\frac{\alpha}{2}})$ 表	(310)
附表四	t 分布双侧分位数 $(t_{\frac{\alpha}{2}})$ 表	(312)
附表五	χ^2 分布分位数表	(314)
附表六	中位秩表	(316)
附表七	10%和90%秩置信限	(318)
附表八	5%和95%秩置信限	(322)
附表九	2.5%和97.5%秩置信限	(326)
附表十	0.5%和99.5%秩置信限	(330)
附表十一	相关系数 ρ 的临界值 $(\rho_{\alpha, n})$ 表	(334)

第一章 绪 论

1-1 可靠性工程的任务和意义

可靠性工程学，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、人-机工程、质量控制技术、生产管理技术等学科密切相关的综合性学科。它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。

可靠性工程的基本任务是：

一、**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。

二、**提高产品的可靠性**——通过设计、研制、生产及使用各个环节，来提高产品的可靠性。

三、**获得最佳的可靠性**——通过权衡对比研究，在一定的重量、体积和费用下，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、最小的体积和最少的费用。

随着科学技术的迅速发展，产品的结构日益复杂，使用环境更加严酷，因而对产品的可靠性要求越来越高。如在设计、制造、使用中稍有不当，引起产品失效（故障），则往往造成重大的经济损失和人身伤亡。

几年前发生的美国挑战号航天飞机在空中爆炸，苏联切尔诺贝利核电站放射性物质溢出事故，都是震惊世界的在政

治上、经济上造成重大损失的特大事故。而它们的发生，则往往来自于某个部件的不可靠，或使用操作中的某种不可靠因素。

美国空军在第二次世界大战期间，由于飞行事故而损失的飞机达两万一千架，比被击落的飞机多一点五倍⁽¹⁾。

60年代，我国一艘万吨远洋货轮，在返航途经台湾海峡时，发生舵机的主液压泵配流盘烧坏，操舵失灵，只得停航并打电报到上海，用直升飞机运去部件更换，才得以续航。

由于产品的不可靠性，对航天、航空、舰船、核电站等这样一些价值昂贵、关系重大的设备所带来的损失和危害，是显而易见的。

对于一般民用产品，提高其可靠性也有很大的经济意义。以液压行业为例，我国生产的液压元件与国外产品的主要差距之一，就是产品的寿命短、可靠性差。如果通过可靠性研究，把现有产品的寿命提高一倍，就等于增加了一倍的产量，其效益多么可观。

随着我国对外贸易的增长，出口产品日益增多，但外商往往要求我方对产品给出可靠性指标。这就要求我们对产品进行可靠性评价，这也是可靠性工程的重要内容之一。

正是因为可靠性工程对国民经济和国防建设有如此重大的意义，所以，无论在世界上以及在我国都引起了普遍的重视，可靠性研究已摆到各行各业的重要日程上，同时也列入了液压行业的重点科技攻关计划。

1-2 可靠性工程的产生与发展

早在可靠性的概念尚未明确提出之前，人们已经在很多

场合用耐久性、寿命、安全性等术语来表示产品的质量了。但可靠性工程作为一门学科，还只有五、六十年的发展历史。

航空、航天及电子等工业的迅速发展，第二次世界大战中大量武器装备失效事故的经验教训，以及市场竞争中不可靠产品造成的巨大经济损失等因素，促进了可靠性工程的发展。人们正是从大量的经验教训中，不断认识到可靠性工程的重要性，并发展了可靠性工程这门新兴学科。它的发展大致经历了下述几个阶段(2)。

一、可靠性工程的准备及萌芽时期 (30~40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。这一阶段的活动主要集中在德国及美国。

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，要求计算多发动机飞机一台发动机失效的概率，以及在一段时间内飞机不失效的概率，这便是可靠性的初始概念。

二次世界大战期间，德国在V-1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V-1火箭成为第一个在研制后期应用系统可靠性理论的航空飞行器。后来，因为德国战败，一批从事可靠性研究的专家流到美国。

二次大战期间，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，专门研究电子管可靠性问题，指出影响电子管可靠性的主要因素是电气及环境因素，提高电子管可靠性的途径，主要是通过采用新材料、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，这是第一个可靠性专业学术组织。

二、可靠性工程的兴起及形成阶段（50年代）

50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，美国有计划地开展电子设备的可靠性研究活动。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。50年代中美国研制的DC-8、F-4等飞机，已开始应用可靠性工程。1955年美国举行了第一届质量控制及可靠性学术会议。

苏联在50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”。但苏、日等国的可靠性工程是在60年代以后才全面开展。

三、可靠性工程迅速、全面发展阶段（60年代）

60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。在这一时期，美国先后发展了多种军民用电机，研制出多种型号的航天飞行器，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。这就进一步地促进了可靠性设计和可靠性试验技术的发展，并在可靠性管理上日益健全、完善。

这一发展阶段的主要特点是：改善可靠性管理，建立可靠性研究中心；制定了可靠性试验标准，发展了新的可靠性试验方法（加速寿命试验法和快速筛选试验法）；发展了新的可靠性预测技术，颁布了可靠性预测手册及标准；开辟了失效物理（又称可靠性物理）研究的新领域，发展了新的失效模式分析技术；建立了更有效的可靠性数据采集系统，形成了美国全国性的数据交换网；在电子设备可靠性研究的基础上，又扩充到机械部件的可靠性研究，提出了机械概率设计的新方法；注意人为可靠性及安全性的研究；重视维修性的研究；创建可靠性教育课程。到60年代后期，约40%的美国大学都设置可靠性工程课程，有的还招收研究生，授予硕士和博士学位。

在这一发展阶段，苏、日、英、法相继全面开展可靠性工程的研究。

苏联根据1958年的统计，因工业生产的废品给国民经济总收入损失了四分之一。60年代初，苏联从技术上、组织上采取措施来促进可靠性工程的发展。例如，加强可靠性教育，召开各种可靠性学术会议，出版可靠性书籍，建立由总工程师领导下的可靠性组织机构及有关可靠性试验室等。在

可靠性研究方面，也取得一些世界公认的成果，如在寿命分布的研究中，采用指数分布作为电子设备及器件的寿命模型，而正态分布作为具有耗损失效部件的寿命模型等。1962年，苏联出版了第一本较完善的可靠性教科书《可靠性及质量控制统计方法》。

日本从美国引进可靠性工程，把美国在航空、航天及军事工业的可靠性研究成果应用到民用工业中，特别是电子工业中。60年代中期，成立了日本电子元件可靠性中心，专门负责电子器件可靠性数据的存储、处理、分配，并进行国际数据交换。

英国的可靠性工程也是从电子、航空及军事工业开始的。60年代中期，在英国标准局成立电子设备可靠性委员会，并从1966年开始出版可靠性系列标准，标准 BS4200《电子设备及元件的可靠性指南》，包括可靠性术语，可靠性计划，可靠性数据采集，外场数据反馈及可靠性试验等内容。

法国可靠性工程发展的特点是强调集中管理，重视元器件的可靠性研究。1962年，在国立电讯研究中心建立了可靠性中心，负责收集、综合并出版各种可靠性资料，分析、处理及分配各种可靠性数据，研究可靠性试验方法。1966年，可靠性中心开始制定各种可靠性文件来规定产品各个研制阶段的可靠性要求，进行可靠性预测，及可靠性试验的方法和程序。

四、可靠性工程深入发展的阶段（70年代以后）

在70年代，尽管美国出现严重的经济萧条，航空、航天及军费预算削减，但是，人们认识到可靠性工程是减少产品寿命期费用的重要工具，它仍然得到深入的发展并日趋成