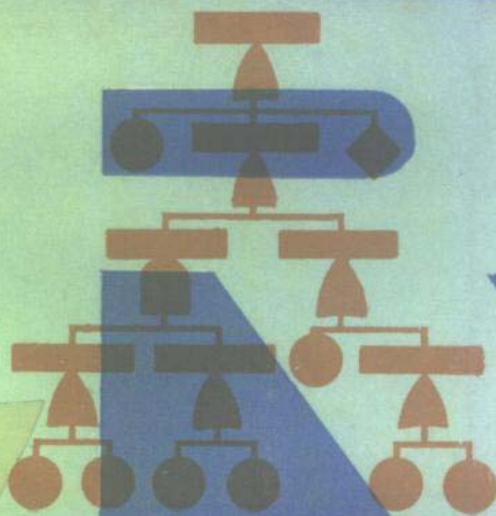


机电产品现代设计统一培训教材

可靠性设计

牟致忠 主编



机械工业出版社

7E
M

机电产品现代设计统一培训教材

可靠性设计

牟致忠 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

(京) 新登字054号

0212/0

内 容 简 介

本书是可靠性工程基础教材,书中尽可能地介绍了与可靠性有关的各个领域。

全书共分13章,系统地说明了可靠性的基本概念与特征量,进行可靠性设计、试验和验证的理论、方法和技术,并介绍了国内外的许多应用实例,同时还介绍了维修性设计和可靠性设计评审的主要内容。

本书可供机电专业的工程技术人员、管理人员和高等院校的:大学生、研究生参考或自学。

可 靠 性 设 计

责任编辑:林 波 版式设计:朱淑珍

封面设计:姚 毅

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京通县向阳印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 11.875 · 字数 320 千字
1993年 2月北京第1版·1993年 2月北京第1次印刷
印数 0.001-9.000 · 定价: 9.00元

*

ISBN 7-111-03544-5/TH·414

编辑委员会

主任委员：郭志坚

副主任委员：李宜春 潘兆庆

委	员：	周长源	孙靖民	张存库	杨敢新	刘元杰
		陈康民	赵松年	赵学仁	万耀青	李光泉
		郭青山	范祖尧	束鹏程	毕振南	计有为
		卢玉明	雷闻宇	徐宗俊	薛继良	许大中
		黄纯颖	欧宗瑛	周 济	洪如娟	韩中光

序 言

在各级领导部门、高等院校的倡导和宣传下,机电行业的现代设计方法推广和培训工作取得了很大进展,并且已经见了成效。1990年,机电部颁发了机电科[1990]213号文件及附件《加强机电产品设计工作的规定》,明确地指出了推广和普及现代设计方法的重要性,并把现代设计方法推广纳入了宏观管理的轨道。从1989年到现在,有关部委和地方的机电制造主管部门在充分酝酿和讨论的基础上,制定了机电产品现代设计试点项目共1401项。至目前为止,1/3的项目已经完成。一些企业在完成这些项目的过程中,创造了明显的经济效益,尝到了甜头。

管理干部培训对现代设计方法推广起了很大的促进作用。从1988年到现在,有关部委和几乎所有的地方主管部门都举办了各种形式的管理干部现代设计方法学习班、研讨班,大部分领导同志都是通过这些培训才对现代设计方法有所了解,并认识到了推广现代设计方法的紧迫性。很多负责同志在接受培训后积极主动地要求承担项目试点任务。

推广现代设计方法的中心环节和中心内容是设计人员尤其是骨干设计人员的培训。因为只有让大多数设计人员掌握了现代设计理论和设计技术,并将之应用于产品开发和设计,从根本上提高机电产品的设计水平和产品水平,才会产生巨大的经济效益,促进整个行业的迅速发展。为此,机电部科技司于1990年9月在上海专门召开了一次由行业主管部门、高等院校的领导、专家、学者参加的现代设计统一培训联席会议,决定对设计人员进行有计划、有步骤的统一培训,并由一直协助科技司进行现代设计方法推广工作的机电产品设计信息中心负责组织有关专家编写一套融科学性 with 实用性为一体的培训教材,即《机电产品现代设计统一培训

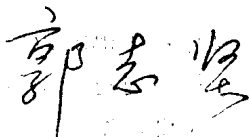
教材》。这套教材共分14册，各分册的名称是：计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、工业艺术造型设计、设计方法学、反求工程技术、有限元法、价值工程、机械动态设计、三次设计、疲劳设计、专家系统、智能工程、模块化设计。

现代设计方法，既不是单纯指计算机技术，也不单纯指以设计的一般规律和一般途径为研究对象的设计方法学。它应当包括一切先进的设计理论、设计技术和设计方法，是一切先进而行之有效的设计思想的集成与统一。现代设计培训应当把学以致用作为基本原则。正因为如此，被邀请参加编写教材的作者大都是现代设计方法推广中有丰富实践经验的专家和学者，而这套教材不仅系统地介绍了现代设计方法的基本内容，还列举了大量应用实例。

设计是一项涉及多种学科、多种技术的交叉工程。它既需要方法论的指导，也依赖于各种专业理论和专业技术，更离不开技术人员的经验和实践。现代设计方法是在继承和发展传统的设计方法的基础上融汇新的科学理论和新的科学技术成果而形成的。因此，推广现代设计方法，并不是要完全抛弃传统方法和经验，而是要让广大设计人员在传统方法和实践经验的基础上掌握一把新的思想钥匙。

设计是产品生产和经营的后盾，企业实现自主设计是我国企业自力更生的主要标志。要想以优秀的产品占领国内外市场，就要在设计上下大工夫。这就要求我们尽快更新设计人员的知识结构，更新设计基础数据和设计手段，提高产品开发和改进的速度和效益。希望大家在实践中了解和学习这套教材，更希望现代设计方法在产品开发的实践中结出累累硕果！

机械电子部副总工程师



1991年8月

前 言

自从美国人 Robert Lusser 1952 年在美国 San Diego 提出了可靠性的科学定义以来，可靠性工程作为一门边缘性的工程学科受到重视已近 40 年。在此期间，可靠性工程广泛应用于航空、航天、冶金、石油化工、造船、铁路、医疗、交通运输、食品加工等各个工业部门中，其发展之迅速，应用之广泛，远非一般应用科学所可比拟。1981 年，美国的 E. Henley 和日本的 H. Kumamoto 指出：“在过去的 10 年内，没有其它应用科学象安全、风险和可靠性分析那样得到惊人的发展和推广，可能只有环境科学和计算机技术是例外。”1984 年，A. Coppola 甚至认为：“可靠性工程已经更强烈地反映出历史发展的趋势”。

可靠性工程研究的内容，包括机械和结构的、电子和电气的、零（元）件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。可靠性试验数据是可靠性设计的基础，但是试验本身不能提高产品的可靠性，只有设计才能决定产品的固有可靠性。国内外的实践经验表明，产品的可靠性是由设计决定，而由制造和管理来保证的。在产品的整个寿命期内，从设计、研制、制造、装配、调试、使用、维修直到报废，都必须进行可靠性管理，只有这样，才能保证产品有满意的可靠性。

可靠性是产品的主要属性之一，是考虑到时间因素的产品质量，对于提高系统的有效性，降低寿命期费用和防止产品发生故障具有重要意义。日本的坪内和夫在 1971 年写道：“在美国，可靠性问题涉及的范围极广，甚至连基层中小企业的产品也具有高可靠性，所以对每个小零件均可放心使用；可是，日本中小企业的水平却很低，所以现在必须彻底解决可靠性问题。”从那时以来，日本在民用产品上推广和应用可靠性工程技术取得巨大成

功，日本的机电产品得以畅销全球，主要是因为其质量好，可靠性高。日本人因此断言：“今后产品竞争的焦点是可靠性。”这些历史的经验值得我们借鉴。

我国机械电子工业部1986年11月25日发出的《关于加强机电产品可靠性工作的通知》指出：“各级机械工业管理部门和企业，都必须把提高产品可靠性工作当作一件大事来抓。”此后，机电产品可靠性工作逐步地得到了企业的重视。

本书是为机械电子工业部大中型骨干企业技术人员培训而编写的教材。全书共分13章，由10位专家合编而成。他们是：林青（第2章），陈文吉（第5章），陈健元（第6章），李玉华（第7章），黄祥瑞（第8章），孙凤斌、胡进平（第10章），陈继平（第11章），阚树林（第13章），牟致忠（其余各章）。全书由牟致忠任主编。希望本书的出版能有助于可靠性工作在企业中普及和推广。

书中引用了许多中外学者的论文和著作，谨在此深表谢意。限于水平，也限于时间和篇幅，书中难免有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编者

1991年10月

符 号 表

- A ——有效性；有效度
 $A(t)$ ——瞬时有效度；可用率
 $C.L.$ ——置信度
 $f(x)$ ——随机变量 x 的概率密度函数
 $F(x)$ ——随机变量 x 的累积分布函数
 $g(t)$ ——修复时间 t 的概率密度函数
 L ——寿命；载荷
 L_q ——失效百分数为 q 时的寿命
 m ——平均寿命
 M ——维修性；维修度
 $M(t)$ ——瞬时维修度
 MR ——中位秩
 $MTBF$ ——平均无故障工作时间
 $MTTF$ ——平均失效时间
 $MTTFF$ ——平均首次故障时间
 $MTTR$ ——平均修复时间
 N ——失效循环次数
 n ——安全系数；样本量；工作循环次数
 $N(\mu, \sigma)$ ——均值为 μ ，标准差为 σ 的正态分布
 $N(\mu, \sigma^2)$ ——均值为 μ ，方差为 σ^2 的正态分布
 $N(0, 1)$ ——标准正态分布
 $P(A)$ ——事件 A 发生的概率
 $P(A|B)$ ——事件 B 已经发生的条件下事件 A 发生的概率
 P_f ——失效概率
 $Q(t)$ ——不可靠度
 R ——可靠性；可靠度
 $R(t)$ ——可靠度

- r —— 应力比; 失效数
- R_{U1} —— 可靠度的单侧置信区间上限
- R_{U2} —— 可靠度的双侧置信区间上限
- R_{L1} —— 可靠度的单侧置信区间下限
- R_{L2} —— 可靠度的双侧置信区间下限
- S —— 强度
- s —— 应力
- s^2 —— 样本的方差
- σ_s —— 应力幅
- σ_m —— 平均应力
- V —— 变异系数
- V_S —— 强度的变异系数
- V_s —— 应力的变异系数
- $V(x)$ —— 随机变量 x 的方差
- $\hat{x}$ —— 随机变量 x 的估计值
- $\bar{x}$ —— 样本的均值
- $\tilde{x}$ —— 中位值
- z —— 联结系数; 标准变量
- β —— 威布尔分布的形状参数; 威布尔斜率
- γ —— 威布尔分布的位置参数; 风险
- ζ —— 强度与应力的差
- η —— 威布尔分布的尺度参数; 特征寿命
- λ —— 失效率
- $\lambda(t)$ —— 瞬时失效率
- μ —— 总体的均值
- $\mu(t)$ —— 瞬时修复率
- ν —— 泊松比; 自由度
- ρ —— 相关系数
- σ —— 总体的标准差
- σ_s —— 强度极限
- σ_e —— 屈服极限
- σ_{ss} —— 应力幅的标准差

- σ_{-1} ——持久极限
- σ_{s_n} ——平均应力的标准差
- τ ——切应力
- τ_{-1} ——剪切持久极限
- $\Phi(z)$ ——标准正态累积分布函数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 可靠性定义及尺度	7
1.3 影响机械设备和电子、电气设备可靠性的因素	10
第 2 章 可靠性数学基础	13
2.1 概率	13
2.2 随机变量	18
2.3 常用概率分布	20
2.4 数理统计	36
第 3 章 确定应力分布和强度分布的方法	54
3.1 概述	54
3.2 影响应力分布的物理参数和几何参数的统计数据	57
3.3 呈分布状态的 $S-N$ 曲线	62
3.4 复合疲劳应力下的强度分布	63
3.5 确定工作应力分布和强度分布的方法	66
第 4 章 应力—强度分布干涉理论和机械零件的可靠度 计算	78
4.1 应力—强度分布干涉理论	78
4.2 可靠度的计算方法	81
4.3 机械零件的可靠度计算	87
4.4 可靠度与安全系数的关系	98
4.5 可靠度的置信区间	100
第 5 章 系统的可靠性	110
5.1 系统可靠性逻辑模型的建立	110
5.2 串联系统的可靠性	111
5.3 冗余系统的可靠性	113

5.4 复杂系统的可靠性	120
第6章 可靠性预测和分配	124
6.1 可靠性预测	124
6.2 可靠性分配	131
第7章 失效模式、影响及致命度分析(FMECA)	145
7.1 概述	145
7.2 FMECA的内容和实施步骤	146
7.3 FMECA应用实例	150
第8章 故障树分析(FTA)	162
8.1 概述	162
8.2 FTA的术语与符号	164
8.3 故障事件的分类	169
8.4 故障树的建造	170
8.5 故障树的定性分析	179
8.6 故障树的定量分析	184
8.7 重要度分析	191
8.8 通用多功能微机 FTA 程序包	194
第9章 可靠性试验	197
9.1 可靠性试验的分类	197
9.2 指数分布寿命试验	200
9.3 威布尔分布寿命试验	215
9.4 加速寿命试验	220
第10章 机电产品的可靠性设计	238
10.1 概述	238
10.2 产品可靠性指标及其量值的确定	239
10.3 机械产品的可靠性设计	242
10.4 电子产品的可靠性设计	256
第11章 可用度与维修性设计	273
11.1 维修度与可用度	273
11.2 可用度、可靠性与维修度权衡	278
11.3 可用度、失效率与修复率的分配	283

X

11.4 关于维修性设计	289
第12章 机械可靠性的几个专题与应用实例	298
12.1 疲劳与断裂的可靠性设计	298
12.2 磨损的可靠性设计	301
12.3 振动的可靠性设计与分析	309
12.4 腐蚀的可靠性设计与分析	315
12.5 机械可靠性应用实例	325
第13章 可靠性设计评审	344
13.1 设计评审的定义与目的	344
13.2 设计评审的分类与组织	345
13.3 设计评审的内容与程序	347
附录	352
参考文献	363

第1章 绪 论

1.1 概述

1.1.1 为什么要研究可靠性

可靠性问题最早是由美国军用航空部门提出的。他们首先认识到不可靠性的代价实在太太。第二次世界大战期间，美国空军由于飞行故障事故而损失的飞机达21000架，比被击落的多1.5倍，运往远东的作战飞机上的电子设备，经运输后有60%不能使用，在储存期间有50%失效，在使用中失效率更高，且难以维护。这些事实引起美国军方对可靠性问题的高度重视。

从50年代起，美国的可靠性问题越来越得到普遍的重视，在1952年成立了AGREE(电子设备可靠性咨询委员会)。1957年6月，AGREE发表了著名的“军用电子设备的可靠性”报告，提出了在研制及生产过程中对产品的可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法，提出了电子产品在生产、包装、储存和运输等方面要注意的问题及要求等。这个报告被公认为是电子产品可靠性理论和方法的奠基性文件。从此，可靠性工程发展成为一门独立的工程学科。

接着，美国设置了可靠性管理机构，制订可靠性管理计划，颁布军用可靠性标准手册，建立全国性的可靠性数据交换中心。美国许多学会成立了可靠性委员会，出版专刊及论文集，举行一年一度的学术年会。最有代表性的是1962年开始的可靠性与维修性年会。在1958~1962年间，各工业发达国家相继仿效，大力开展可靠性的研究工作。

对机械可靠性的研究始于60年代初期。它的发展也与美国的航天计划有关。当时，机械故障和电子—机械故障是NASA(宇

航局)主要关心的事,因为由于机械故障而引起的事故很多,损失很大。例如,1963年同步通讯卫星SYNCOMI由于高压容器断裂引起的故障,在空中坠毁;1964年人造卫星Ⅱ号也因机械故障而损坏。因此,从1965年起,NASA开始进行以下几项机械可靠性研究:(1)用过载试验方法进行可靠性验证;(2)在随机动载荷下结构和零件的可靠性;(3)把规定的可靠度目标值,直接设计到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件中去。

从60年代起,在工业发达国家内,由于产品的复杂化和工作环境的严酷,对产品的可靠性要求越来越高。于是,除在航空、航天、尖端武器和电子等行业之外可靠性工程技术和管 理 也 逐步推广应用到许多工业部门,包括原子能、机械、电气、冶金、化工、铁道、船舶、电站设备、建筑、食品加工、通讯、医药等。从最复杂的宇宙飞船,到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车,到细小的可置于人体内的心脏起搏器等,都应用了可靠性设计,有明确的可靠性指标。1969年7月登月成功的美国阿波罗飞船,有720万个零(元、器)件,共有120所大学、15000个单位的42万人参加研制,这样的零(元、器)件非具有高可靠性不可。有时,一个零件的失效可导致整个系统的故障,造成灾难性的后果。为了预测价值数十亿美元的飞船是否能成功地完成任务,美国通用电气公司研制了“用仿真方法预测阿波罗飞船完成任务的概率”的计算机程序。在登月成功之后,NASA将可靠性工程技术列为三大技术成就之一。

可靠性工程能带来巨大的经济效益。例如日本从美国引进可靠性工程技术后,在民用工业中应用和推广取得成功。日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、照相机等产品能够畅销全球,在于具有可靠性。日本由此而获得巨额利润。美国人曾预言,今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业,才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。而日本人断言,今后产品竞争的焦点是可靠性。事实上,随着国外公司经理们对可靠性作用的觉

醒, 可靠性越来越多地成为商品广告的内容。例如, 1959年国外小汽车的保用期为90天或4000英里, 而到70年代初提高到3年或50000英里。在国际市场上, 可靠性指标不同的产品, 其价格是不同的。

产品的可靠性影响到国家的安全与声誉。例如, 1979年3月美国三哩岛核电站发生的放射性物质泄漏事故, 是由于冷凝器循环泵发生故障和人为因素等造成的。所以, 对于重要的大型成套设备如电站、冶金、化工设备等都应进行可靠性、安全性设计及风险评估, 并控制其故障率。

国外还把可靠性问题提高到节约资源和能源的高度来认识, 因为可靠性设计可以得到体积小、重量轻的产品, 降低材料消耗和加工工时。高可靠性产品可以以一顶二, 甚至以一顶十。

目前, 越来越多的工业部门认识到可靠性问题的重要意义, 把产品的可靠性看得与产品的性能同样重要。有的部门甚至规定, 没有可靠性指标、未进行可靠性设计的产品不得投产。

1.1.2 可靠性的范畴

自从可靠性的科学概念和理论、方法得到确认以来, 已在下列几个领域中得到了发展。

1. 可靠性数学 主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法, 它属于应用数学的范畴, 涉及的面比较广, 主要内容是概率论和数理统计、随机过程、运筹学等。研究领域较多的有: 相干结构理论, 更新理论, 可用性理论, 极值分布理论, 最佳维修方针, 贝叶斯理论, 冗余的最优化, 多变量寿命分布, 蒙特卡洛模拟, 随机过程, 失效树分析等。

2. 可靠性物理 是研究失效现象及其机理和检测方法的学科。美国 Rome 航空发展中心 (RADC) 于60年代初首先进行失效物理的研究, 发展失效分析方法及技术, 研究各种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, 发展了各种元器件的加速寿命试验及筛选试验方法。1962年美国召开了第一届失效物理年会, 1967年改名为可靠性物理年