

可靠性原理及其应用

石培忠 编著

贵州教育出版社



7P325

IB114.3

3

可靠性原理及其应用

石培忠 编著

可靠性原理及其应用

可靠性原理及其应用

贵州教育出版社出版发行

(贵阳市中华北路289号)

贵州新华印刷厂综合车间印刷

开本850×1168毫米32开本13.75印张345千字

印数1—2,100

1991年6月第1版 1991年8月 第1次印刷

ISBN 7—80583—192—0/G·191 定价：5.90 元

序

可靠性是一门综合性、多元性、定量性的交叉学科。它以现代数学、物理学、化学和环境科学为基础，以产品的使用寿命及其质量指标的变化规律为研究对象。随着生产和科学技术的发展，可靠性工程技术已经渗透到电子、航空航天、机械、电力、建筑及仪器仪表等诸多领域，受到普遍重视并得到广泛应用。

生产实践中，产品或系统的设计，在于保证达到预期的工作职能，也就是要做到满足使用上、经济上、安全上及外观上的要求。实践证明，使用上的可靠、经济上的合理、安全上的保证是设计者考虑的首要问题。科学技术的发展，特别是现代数学、物理学的发展和工程实践经验的积累，人们对客观事物的认识逐步深化，给人们掌握和运用可靠性理论与可靠性工程技术提供了条件。利用科学理论指导产品和系统的设计，才能提高设计的科学性，提高设计质量，从而使传统的设计方法在新的科学理论的基础上得到发展和提高。

可靠性贯穿于产品或系统从设计、制造到使用、维修等各个环节。自动化技术的发展与应用，使人们更加重视可靠性理论的应用，以确保自动化技术在产品或系统中发挥其最大作用。

随着科学的发展和技术的进步，可靠性理论与技术已成为机电产品设计、制造的重要基础，成为分析产品质量的有力工具，可靠性指标已列入机电产品质量指标的主要内容，可靠性管理已成为质量管理的重要组成部分。而机电产品的使用部门，则可应用可靠性理论与技术确定维修策略，制订维修计划，对提高产品寿命和有效度、降低维修费用、节约能源资源均具有重要意义。

内 容 简 介

这是一本旨在将可靠性科学由军用向民用转移的书籍。全书共分十章，包括可靠性数学基础、可靠性的数量特征、可靠性寿命试验、可靠性抽样、系统可靠性分析、系统可靠性预测和分配等基本原理，以及机械系统可靠性、电力系统可靠性和可靠性优化等应用内容。本书论证清晰，行文简捷，着笔于物理概念和工程意义的阐述，并结合实际产品编写了大量的例题和习题。适合于工矿企业中产品设计、质量管理和设备管理等方面的工程技术人员阅读参考，也可用作大专院校有关专业的教材和工矿企业培训工程技术人员及管理干部的教材或参考书。

目 录

第一章	可靠性概述	(1)
§ 1—1	可靠性问题的提出.....	(2)
§ 1—2	可靠性的形成和发展.....	(3)
§ 1—3	可靠性和经济性.....	(7)
§ 1—4	可靠性的内容和概念.....	(9)
§ 1—5	可靠性与产品质量.....	(13)
	思考题	
第二章	可靠性工程的数学基础	(18)
§ 2—1	概率论的基本概念和基本定理.....	(18)
§ 2—2	随机变量与分布函数.....	(27)
§ 2—3	可靠性研究中常用的统计分布.....	(36)
	习题	
第三章	可靠性的数量特征	(48)
§ 3—1	可靠性指标的特点.....	(48)
§ 3—2	可靠性特征量.....	(50)
§ 3—3	可靠性寿命特征.....	(58)
§ 3—4	失效及其统计特征.....	(66)
§ 3—5	可修复系统的可靠性特征量.....	(76)
§ 3—6	计算举例.....	(83)
	习题	
第四章	可靠性寿命试验	(91)
§ 4—1	可靠性试验的内容和分类.....	(91)
§ 4—2	可靠性寿命试验的设计.....	(98)

§ 4—3	产品失效的物理模型	(106)
§ 4—4	可靠性分析中常用概率纸	(113)
§ 4—5	可靠性寿命试验分析—图估计法	(123)
§ 4—6	加速系数 τ 及有关常数的计算	(135)

习题

第五章	可靠性抽样	(151)
------------	--------------	-------

§ 5—1	一般的抽样特性曲线	(151)
§ 5—2	失效率抽样检验方案	(154)
§ 5—3	指数分布的寿命抽样检查方案	(163)
§ 5—4	威布尔分布的寿命抽样方案	(171)

习题

第六章	系统可靠性分析	(178)
------------	----------------	-------

§ 6—1	系统可靠性的研究内容和方法	(178)
§ 6—2	串联系统及其可靠度的计算	(179)
§ 6—3	并联系统及其可靠度的计算	(186)
§ 6—4	备份冗余系统	(192)
§ 6—5	一般网络结构的可靠度计算	(204)

习题

第七章	系统可靠性的预测和分配	(234)
------------	--------------------	-------

§ 7—1	元器件的应用分析	(234)
§ 7—2	系统可靠性预测方法	(237)
§ 7—3	系统有效性预测	(247)
§ 7—4	系统可靠性分配	(249)
§ 7—5	系统的有效性分配	(263)

习题

第八章	机械系统的可靠性	(269)
------------	-----------------	-------

§ 8—1	概述	(269)
§ 8—2	机械零件的通用可靠性模型	(276)

§ 8—3	机械零件的可靠性分析和设计	(282)
§ 8—4	可靠度的近似解—图解法	(304)
§ 8—5	可靠性与安全性	(308)
§ 8—6	机械零件的疲劳寿命及可靠度的 计算	(314)
§ 8—7	机械零件的磨损寿命及可靠度的 计算	(319)
§ 8—8	失效物理分析中常用仪器简介	(329)
	习题	
第九章	电力设备及电力系统可靠性	(341)
§ 9—1	概述	(341)
§ 9—2	电力系统的可靠性定义及指标 体系	(349)
§ 9—3	马尔科夫过程—状态的转移及其 描述	(355)
§ 9—4	电力设备和系统的可靠性模型	(363)
§ 9—5	电力系统可靠性分析和评价	(382)
	习题	
第十章	可靠性的经济分析	(396)
§ 10—1	产品设计的寿命周成本分析	(396)
§ 10—2	产品购置的寿命周期成本分析	(402)
§ 10—3	冗余备份系统的优化	(406)
§ 10—4	最佳维修策略	(411)
附录一	正态分布函数代数运算	
附录二	行列式和矩阵	
附录三	γ函数及其性质	
附录四	拉普拉斯变换	

第一章 可靠性概述

可靠性是一门研究技术装备和系统的质量指标变化规律及其使用寿命的科学，并在研究的基础上制定出以最短的时间、最低的费用，保证实现技术装备和系统所需的工作寿命和无故障工作时间的方案。可靠性科学在预测系统的状态和行为的基础上，建立优选最佳方案的理论，以达到期望的可靠性水平。

可靠性是一门实用性强，应用范围广的年轻学科。从五十年代初开始提出可靠性问题起，到六十年代已逐步形成一门比较成熟的学科。目前，可靠性科学已渗透到宇航、电子、机械、仪器仪表、冶金、化工以及电工设备制造和电力工业等许多工业部门，受到普遍的重视，并得到推广应用。

可靠性是一门跨学科、跨专业纵横渗透的综合性、定量性、多元性的交叉学科。它包括可靠性数学、可靠性物理、可靠性工程和可靠性管理等内容；它涉及到近代数学、物理学、化学和环境科学等的有关理论，并尽量利用现代物理学的实验手段，能充分揭示现代产品的属性、特征、规律和规划。

可靠性科学具有实用性、科学性和时间性三大特点。实用性是指可靠性科学从它“呱呱坠地”开始，就与工程实践密切结合，具有强大的生命力；科学性是指可靠性理论是建立在现代数学、物理学、化学和环境科学基础上的，同时在试验设计、数据的统计与处理、元器件或零部件的失效分析、系统的可靠性定量评价、运行维护、以及可靠性与经济性的协调等方面，都具有其独特的方法；时间性是指可靠性存在于技术装备和系统从设计、研制、试验、制造、贮存和使用的全过程中。

可靠性已成为现代广义设计科学中功能论方法的核心内容，成为现代技术装备和系统设计思想的首要因素，这是可靠性科学得以受到普遍重视和广泛应用的原因。

§ 1—1 可靠性问题的提出

当代是科学技术迅猛发展的时代，科学的发展和技术的进步都是与制造更精密、更完善的技术装备紧密相连的。而现代技术装备的发展方向是：提高自动化程度和工作参数（速度、温度、载荷等），提高工作精度和工作效能（生产率、功率等），缩小外形尺寸和减小重量，并将各种技术装备纳入集中控制的系统。这就要求现代技术装备要充分利用各种科学成就来进行设计和制造，使之成为光、机、电高度结合的自动化系统。

随着生产和科学技术的发展，电子设备已经由比较简单的传递信息的工具，发展成为控制人类各种复杂活动过程的重要手段了。在自动化生产中，电子设备占有极其重要的地位。不应用电子设备，工业、农业、交通和通讯中的自动化是无法实现的；建立现代化的自动控制、自动检测和自动调节系统也是不可能的。但是，应当看到，当使用自动化的技术装备和系统去代替人类的复杂劳动时，只可能是这些技术装备比人的工作更准确、更迅速和更可靠才是有价值的。如果技术装备的工作不可靠，发生故障或产生误差，甚至其中个别元件或零件失效，都可能导致生产停顿，整个生产过程被破坏，尤其在冶金、化工、石油开采等工业部门，如果自动化的技术装备的工作不可靠，便会造成严重的，无法弥补的事故。

在现代科学技术领域和国防现代化建设中，自动化技术装备日益被广泛应用，而且对其要求越来越高，如在原子能、导弹、火箭、人造卫星等方面所使用的技术装备，既要求有高度控制的

准确度，又要求能高度可靠地工作。1970年4月24日，我国成功地发射了第一颗人造地球卫星，在技术上达到准确入轨、及时预报、安全可靠的要求，做到了首次发射，一举成功。这除了有各门科学（如天体力学、天文学、气象学、计算数学等）和各种工业（如冶金、化工、机械、电子等）的互相配合外，要使卫星发射成功，必须严格控制运载火箭的运行速度和方向，这就需要有高精度、高可靠性的测速系统、定位系统、控制系统等，如果这些控制系统失效，就必然导致失败，而在政治上、经济上造成重大损失。

科学和技术的高度结合是当代科学技术革命的重要特征。科学上的最新发现很快就能解决技术问题，而新技术也可以立即成为科学研究的新工具。科学的“技术化”和技术的“科学化”促使科学技术直接变为生产力，从而产生生产科学化。人在生产劳动中的地位发生了质的变化，从直接参加生产劳动转变为主要负责控制生产，生产劳动逐步变为科学劳动、智能劳动。这一切都离不开设计、制造和使用自动化的技术装备，这就必然会提出许多新的科学技术问题，而自动化的技术装备的设计、制造和使用中的主要课题之一就是可靠性。

可靠性是社会生产发展和科学技术进步的产物，同时它又与生产实践和科学实践密切结合，促进生产的发展和科学技术的进步。

§ 1—2 可靠性的形成和发展

可靠性是一门年轻的学科，从本世纪50年代提出可靠性问题起，到60年代已形成一门比较成熟的学科，它的发展过程可以分为三个阶段。

第一阶段为暴露故障和统计故障阶段，时间是第二次世界大

战前后,当时,由于无线电电子设备质量较差,对元器件和设备的可靠性没有给予应有的注意,因此电子设备无法满足使用要求。据国外1949年资料,当时无线电通讯设备有14%的时间处于故障状态,水声设备有48%的时间处于故障状态,雷达设备有84%的时间处于故障状态。据国外1953—1955年的资料报道,由于电子元器件的工作不可靠,美国海军为了使其装备上的16万台无线电电子设备保持工作状态,每年必须更换一百多万个元件;美国空军在其仓库中为其装备上的一个电子管要保存9个备用品;美国空军的飞机尽管在每次起飞之前,都要对其所装备的无线电电子设备进行检查,但其无线电电子设备的修理时间间隔仍然无法提高到20小时以上,因此价值1美元的飞机用电子设备每年要花费2美元的维护费用。

这一阶段主要是暴露故障和统计故障,促使人们去搞清这类不可靠的原因和规律,还谈不上对可靠性问题进行研究。

第二阶段为预测故障阶段,时间大约是1955—1962年。这一阶段对无线电电子设备进行了大量的调查工作,根据在此之前出现的大量故障进行统计分析,并着手大规模的有组织的试验论证工作,从而开始了对电子设备和电子元器件的故障强度进行预测。美国从1955年起每年定期召开可靠性物理学年会,交流可靠性研究的情况和经验。由于开展了大量工作,这段时间电子元器件和电子设备的可靠性有所提高,如1959年航海用无线电通讯设备的故障停机时间为7.7%,水声设备的故障停机时间为6.7%,雷达设备的故障停机时间为2.9%。可以看出,虽然无线电电子设备更加复杂了,但故障停机时间却大大缩短,元器件和设备的可靠性都有所提高。但在这段时间由于尚处在故障预测和对现有的电子元器件及设备的可靠性进行试验论证,可靠性问题并未获得根本解决,所以电子设备的可靠性仍然满足不了使用要求。美国由于设备的可靠性不高,为了保证设备的正常工作,不得不耗费

大量的人力物力去从事设备预防维护和修理工作。1959年美国军队在自己的仓库中保存了价值210亿美元的备用器材,而且这种经费每年以20亿美元递增。在美国国防部的所属系统内,有七分之一的军人和五分之一的职工在从事设备的预防维护和修理工作。

第三阶段为分析故障和预防故障阶段,时间大约在1963年以后。在这一阶段,美国、苏联、日本等国家都相继建立了有关可靠性的研究组织,出版有关的刊物和书籍,大量开展测试方法、分析方法、可靠性设计方法以及失效机理的研究。在美国颁布了有关可靠性标准,如“可靠性手册”、“海军失效率手册”等。美国于1963年筹备,于1968年开始工作的“美国可靠性分析中心”,是美国国防部关于集成电路与半导体分立元器件可靠性数据与使用数据的收集、贮存、处理、审核、评价与分析的中心机构,由罗姆空军研究中心领导。其主要工作集中在收集电路与器件在制造、试验和使用过程中发生的失效模式与机理,研究电应力和环境应力对器件失效的影响。美国、苏联、日本等国家还要求在所有各种电子设备样机的技术条件中,除了各项技术参数外,还必须具备可靠性指标。

这一阶段可靠性研究的特点之一是把故障预测分析与严格的工艺规范及质量控制结合起来,要求从设计和工艺上对提高元器件的可靠性提出有力措施,如制订“可靠性保证计划”,“元器件质量保证计划”等等,可靠性已成为系统设计思想的首先因素。例如美国主要战略武器之一的“民兵”导弹系统中的“民兵Ⅱ”从1963年开始研制,计划1965年完成,其中制导计算机是第一台集成电路计算机,全机用了2173块集成电路。计划要求计算机的平均无故障工作时间为1万小时,因此对集成电路提出了极高的可靠性指标,要求其失效率不得高于0.0008%/千小时。当时集成电路的失效率只能达到0.07%/千小时,大大满足不了制导计算机的可靠性要求。所以在1965年后的好几年时间里,由于制导

计算机生产不出来，致使大批导弹不能服役。其后才制定了“民兵可靠性保证计划”和“元器件质量保证计划”，并投入大量的人力、物力和财力保证计划的执行。可靠性保证计划强调要建立一条工艺稳定，能重复生产某些品种的元器件的生产线，作为实现整个计划的先决条件。质量保证计划则要求对元件进行系统的摸底试验，对每一批产品要根据随机抽样取得样本进行可靠性寿命试验，有意识地加速其失效，在试验后进行失效分析，找出失效模式，采取纠正措施，研制下批产品。这些计划执行后，在1964年到1966年的两年多时间内，使集成电路的失效率由0.07%/千小时降低到0.0008%/千小时，即可靠性提高了近100倍，到1969年“民兵Ⅱ”的制导计算机的可靠性才达到了计划要求。

这一阶段可靠性研究的特点之二是普及、宣传可靠性知识，培训可靠性技术人员和管理人员。在苏联高等学校的理工科有关专业必须把可靠性的基础理论作为必修课。美国空军要求从事可靠性工作的人员，必须是取得空军工艺学院可靠性学士学位的可靠性工程师，或是有工程、物理学同等学位的军人。在日本从事可靠性工作的人员，应具有工科学士或理科学士学位。

综上所述，可靠性起源于电子工业，而在军事工程中得到迅速的发展。但在近一二十年来，可靠性理论和可靠性技术已广泛地应用于民用机械产品从设计、制造和使用的全过程；而把可靠性的一般原理和方法与电力系统的工程问题相结合，便形成了电力系统可靠性，这是60年代后期才发展起来的一门新兴应用科学，它渗透到电力系统的划规、设计、运行和管理等各个方面；在现代化企业管理中，把可靠性的指标纳入产品质量的指标体系，将进一步深化和强化全面质量管理。将可靠性的基本原理用于设备管理，对于设备的预防维修，更新改造更将科学化。

§1—3 可靠性和经济性

任何产品从研究、设计、试制、生产，直到用户使用的全过程中所支付的全部费用，称为产品的寿命周期成本。产品的寿命周期成本可分为制造成本和使用成本两部分。产品的制造成本包括研究、试验、设计、试制和生产费用；使用成本包括产品使用过程中的能源消耗、预防维修、管理费用以及报废后拆除所需费用等。当把可靠性的有关指标纳入产品技术规范的范围后，产品的制造成本必将上升。就电子设备和机电设备而言，要制造高可靠性的设备，就得选用高可靠性的元器件和零部件，其代价就高，制造成本将增加，因而用户购置设备的初次费用就高，但是由于使用高可靠性的设备，其使用寿命和平均无故障工作时间就长，相应就会降低年折旧费用，减少维修人员和维修费用，因而减少设备的使用成本。只要不是无限度的追求产品的高可靠，总可能找出一个可靠性的最佳值，使设备的寿命周期成本最低。如图1—1所示，一般而言，提高设备的可靠性就必然增加制造成

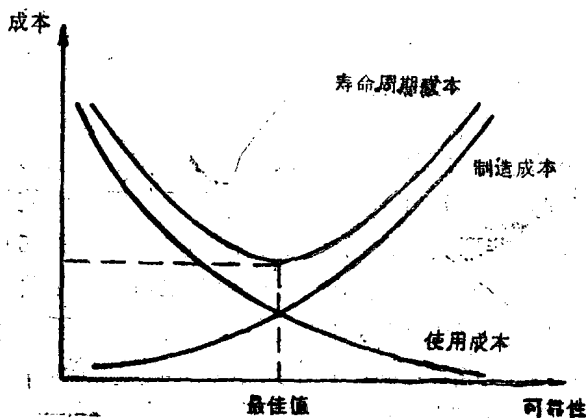


图1—1 可靠性与成本的关系

本，可靠性越高，制造成本越高；同时，提高设备的可靠性就会降低使用成本，可靠性越高，使用成本越低。由图可见，在寿命周期成本曲线最低点所对应的可靠性，就是可靠性的最佳值。大量实例表明，适当地花费一定的成本用于提高产品的可靠性，可以大大降低产品的寿命周期成本。

例如美国空军所使用的中远程导航设备塔康系统，是由美国霍夫曼电子公司承制的。原来每台造价为4000美元，平均无故障工作时间为17.5小时。若以每台设备使用时间2000小时计算，需要维修费用15560美元，为造价的3—4倍，为了提高该设备的可靠性，霍夫曼电子公司花费了总投资的3%用于提高元器件的可靠性，结果该设备的平均无故障工作时间由17小时提高到150小时，可靠性提高近9倍，每台设备的维修费用降低到1818美元，而且制造费用也降低了30%。这说明花费一些费用提高可靠性反而节约了费用。

反之，不重视元器件和零部件的可靠性，设备的可靠性也不能得到保证，制造成本可能低一些，但却会大大增加使用成本，并使产品的寿命周期成本增加，甚至造成巨大损失，这类事例是不胜枚举的。

例如美国1957年发射“先锋号”卫星多次失败，其原因就是元器件的可靠性不高。其中一次发射价值220万美元的卫星，就是由于一个价值2美元的元件失效，而导致发射失败的。1971年苏联“敬礼号”飞船，由于一个部件失效而坠毁，致使杜保和斯基、胡高夫与柏萨耶夫等三名宇航员丧命。1978年3月25日、1979年9月13日和9月29日美国宇航局三次发射卫星失败，共损失1.7亿多美元，也是由于某些元器件和零部件的可靠性不高造成的。1979年10月到1981年3月间，日本兵库县川崎重工公司曾3次发生“机器人杀人案件”，其原因均是由于控制系统的工作不可靠，发生故障后，机器人误将工人作为原料投入运转的机器中造成

的。1986年美国“挑战者号”航天飞机升空不久爆炸，更是高科技领域发生的前所未有的大灾难，造成的损失是7名男女宇航精英全部遇难，价值10亿多美元的航天飞机变为坠落到太平洋的一堆破铜烂铁，事故原因只是由于一个价值900美元的小垫片的爆裂造成的。

以上事例说明，要提高产品的可靠性就得投入一定的成本，投入这部分成本就可以保证工程目标的实现，提高产品的使用价值。政治经济学告诉我们，商品具有两重性，即价值与使用价值。凝结在商品中的一般的人类劳动称为商品的价值，而能够满足人们某种需要的属性称为商品的使用价值。无论是资本主义制度还是社会主义制度，商品都具有这样的两重性。马克思指出：“无论财富的社会形态怎样，使用价值都形成财富的物质内容。”他还指出：“任何一物，要不是一种有用的物品，就不能有价值。如果它是无用的，其中包含的劳动也是无用的，不能算作劳动，因此也不形成价值。”（《资本论》第一篇第一章P6、P12，人民出版社1973年出版）。因此，任何产品如果性能不稳定，工作不可靠，经常出现故障，就无法满足人们的某种需要，它就是缺乏使用价值的产品。生产可靠性不高的产品往往造成积压和浪费，能提供使用的产品却很少。花费一定的成本用于提高产品的可靠性，从而提高产品的使用价值，这是完全符合马克思主义的政治经济学原理的。

§ 1—4 可靠性的内容和概念

可靠性问题最初是从电子产品的生产和使用中提出来的，可靠性的基本理论和试验技术也产生于电子工业部门，并随着电子工业的发展而逐渐成熟。可靠性的基本理论包括三个互相关联的分支，这就是：