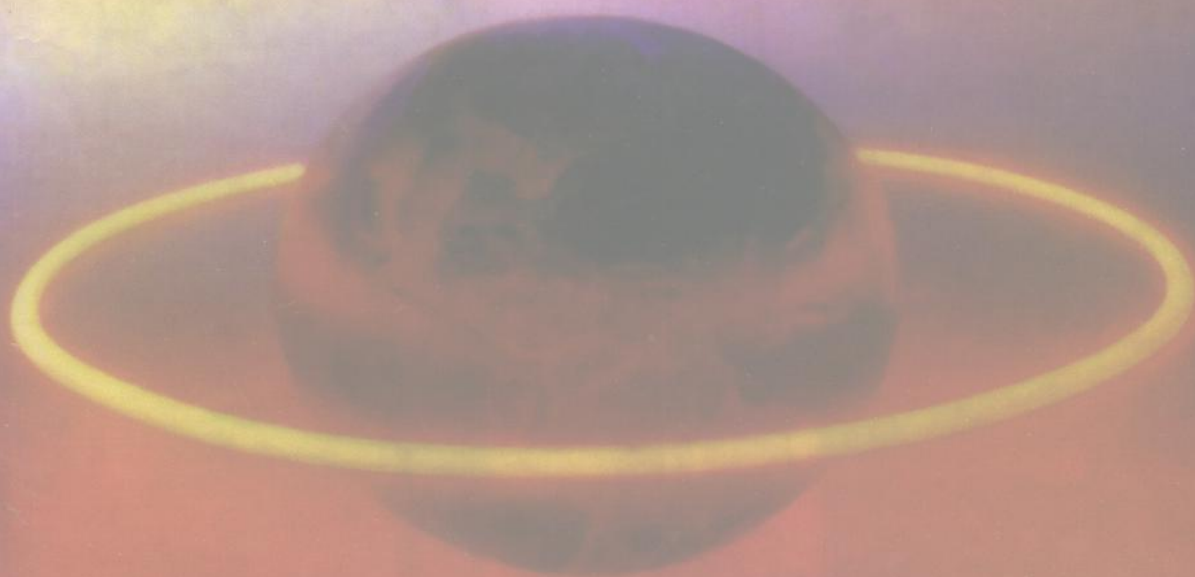


机电产品可靠性应用

高等学校试用教材

机电产品可靠性应用

钟毓宁 邬华芝 唐家才 编著



中国计量出版社

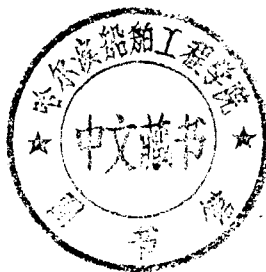


453598

高等学校试用教材

机电产品可靠性应用

钟毓宁 郎华芝 唐家才



00453598

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

机电产品可靠性应用/钟毓宁等编著. -北京:中国计量出版社,1999.7

高等学校试用教材

ISBN 7-5026-1189-4

I. 机… II. 钟… III. 机电设备-可靠性 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 13274 号

内 容 提 要

本书全面阐述了机电产品可靠性的基本概念、技术指标、失效分布、可靠性试验的方法以及数据处理技术、可靠性分析和可靠性管理等基本理论和应用技术。本书注重与国际、国家可靠性标准的紧密结合,及时更新和反映可靠性基本概念,重点突出产品的可靠性试验及其相关技术。

本书可作为高等学校质量工程、机械工程、测控技术及仪器等专业教材或教学参考书,也可供技术监督、机械、电子等行业的技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16开本 印张 15.5 字数 373 千字

1999年5月第1版 1999年5月第1次印刷

*

印数 1—2500 定价: 22.00 元

前 言

可靠性是机电产品重要的质量指标。原国家机械工业委员会下达的《关于加强机电产品可靠性工作的通知》和制订的机械工业《七五期间机电产品可靠性工作规划》，标志着我国机电产品可靠性工作进入了有组织、有领导、有计划的发展阶段。八五和九五期间，可靠性工程技术取得了不断的发展，机电产品可靠性工作不断深入。随着科学技术的发展，可靠性工程越来越为世界各国所重视。

本书是根据第二届全国质量工程学科建设研讨会确定的教材编写精神编写而成的，旨在为培养从事技术监督和质量工作的各类专业人才，提供一本理论与实践、质量与标准相结合的可靠性教材。本书还可作为工程技术人员进行可靠性工程培训或自学用教材。全书共分九章，其中第一、二、四、五章由钟毓宁编写，第三、七、八、九章由邬华芝编写，第六章由唐家才编写。全书由钟毓宁负责统编并定稿。

在本书的编写和出版过程中，得到了常州工业技术学院质量工程系蔡华麟副教授、湖北工学院机械工程系产品质量检验工程教研室沈邦兴教授、安徽机电学院质量管理系唐家驹教授、中国计量学院质量工程系主任陈丽薇副教授、中国计量出版社田建华编辑等同志的大力支持和帮助，参考了大量的文献资料（限于篇幅书末仅列出了主要参考文献）。在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中难免有不妥之处，恳请读者不吝指正。

编 者

1999年3月

目 录

第一章 可靠性概论	(1)
第一节 可靠性工程的任务	(1)
第二节 可靠性工程的发展	(2)
第三节 可靠性标准体系	(3)
习题一	(4)
第二章 可靠性的基本概念及其主要数量特征	(5)
第一节 可信性	(5)
第二节 可靠性	(5)
第三节 维修性	(10)
第四节 可用性	(12)
习题二	(14)
第三章 产品寿命规律与常用分布	(15)
第一节 失效率曲线和寿命期	(15)
第二节 常用寿命分布及其背景	(17)
第三节 常用离散型失效概率分布	(34)
第四节 抽样分布	(35)
习题三	(40)
第四章 可靠性试验	(42)
第一节 可靠性试验概述	(42)
第二节 可靠性试验计划与实施	(46)
第三节 可靠性筛选试验	(49)
第四节 可靠性增长试验	(54)
第五节 可靠性鉴定试验	(62)
第六节 可靠性验证试验	(68)
第七节 加速寿命试验	(75)
习题四	(78)
第五章 可靠性试验数据分析	(80)
第一节 成败型试验的数据分析	(80)
第二节 指数分布时寿命试验的数据分析	(82)
第三节 威布尔分布时寿命试验的数据分析	(87)
第四节 正态分布和对数正态分布时寿命试验的数据分析	(96)
第五节 恒定应力加速寿命试验的图估计法	(98)
第六节 分布类型的假设检验	(100)
习题五	(104)

第六章 失效分析方法	(106)
第一节 机电产品常见失效模式	(106)
第二节 故障模式、效应及危害度分析	(108)
第三节 故障树分析	(114)
习题六	(131)
第七章 可靠性设计	(133)
第一节 概述	(133)
第二节 系统可靠性模型	(135)
第三节 可靠性预测	(145)
第四节 可靠性分配	(149)
第五节 机械零件可靠性设计基础	(156)
第六节 电子元器件的可靠性	(170)
习题七	(173)
第八章 维修性	(175)
第一节 维修性概述	(175)
第二节 维修性的基本要求	(178)
第三节 维修性验证和评估	(180)
第四节 维修策略	(187)
习题八	(193)
第九章 可靠性管理	(194)
第一节 概述	(194)
第二节 寿命周期与费用效益分析	(199)
第三节 可靠性计划	(202)
第四节 设计阶段的可靠性管理	(204)
第五节 制造阶段的可靠性管理	(208)
第六节 维修阶段的可靠性管理	(210)
第七节 可靠性增长管理	(210)
第八节 可靠性组织	(212)
第九节 可靠性数据管理	(214)
第十节 用户服务和信息反馈	(217)
习题九	(221)
附表 1 标准正态分布数值表	(222)
附表 2 Γ 函数表	(223)
附表 3 χ^2 分布的分位数表	(224)
附表 4 t 分布的分位数表	(225)
附表 5 F 分布的分位数表	(226)
附表 6 正态分布表容许限 k_p 表	(227)
附表 7 相关系数检验表	(233)
附表 8 中位秩表	(234)

附表 9 10%和 90%秩置信限	(235)
习题答案	(237)
主要参考文献	(239)

第一章 可靠性概论

第一节 可靠性工程的任务

产品的质量是指反映产品满足明确和隐含需要的能力的特性总和。对于机电产品,一般可以从性能、可信性、安全性、适应性、经济性和时间性等方面评价其质量的好坏。

人们不仅希望产品能满足性能上的需要,具有某种使用价值,而且希望它能“经久耐用”。可信性就反映了产品可用的程度及其影响因素——可靠性、维修性和维修保障性。而产品的维修性、安全性、经济性与可靠性密切相关。可见,产品的质量离不开可靠性。

可靠性指标已成为决定产品市场竞争能力的重要质量特性。日本汽车家用电器之所以深受用户欢迎,主要是由于它们的可靠性好。事实说明,高的可靠性直接带来好的经济效益。另一方面,现代化军用装备、通讯系统、交通设施、医疗设备、工业自动化系统以及空间技术所使用的设备日趋复杂,应用环境条件也愈加恶劣,因而对其可靠性的要求也愈来愈高。可靠性差导致的事故往往是灾难性的,如1985年中国大同电厂和1988年中国秦岭电厂的200 MW汽轮发电机组断轴毁机的严重事故,1986年1月28日由于主推火箭燃料箱的“O”型密封圈故障引起的美国“挑战者”号航天飞机空中爆炸事件等。这些实例充分说明了可靠性的重要性。

可靠性工程是系统工程的重要分支,它的任务是研究系统或设备在设计、制造、试验和使用的各个阶段,定性与定量的分析、控制、评估和改善系统和设备的可靠性,并在设计中达到可靠性与经济性综合平衡。图1—1描述了可靠性与寿命周期总费用的关系。从经济效果来说,确定产品的可靠性指标存在着最佳选择点。

可靠性工程的基本内容概括起来可以分为可靠性技术与可靠性管理。可靠性技术包括可靠性系统分析、可靠性设计、可靠性生产、可靠性维护、可靠性试验以及失效分析、可靠性数据收集、处理和交换等。而可靠性管理涉及范围也很广,包括国家领导机关制订可靠性规划、为实施该规划调度所必需的人力物力、制订可靠性标准、开展可靠性教育,以及企业为提高产品的可靠性而进行的贯穿于产品的研制、设计、生产、检验和销售等各个环节的管理工作,如建立可靠性管理机构、制订可靠性计划和可靠性标准化文件、督促可靠性措施的实施、组织可靠性信息反馈、实施可靠性增长计划、组织可靠性全员培训等。

企业可靠性工作应该统一纳入产品的设计、试验和生产计划,以及保证必要的资源、进度、管理措施,并注意相互间的密切协调,见表1—1。

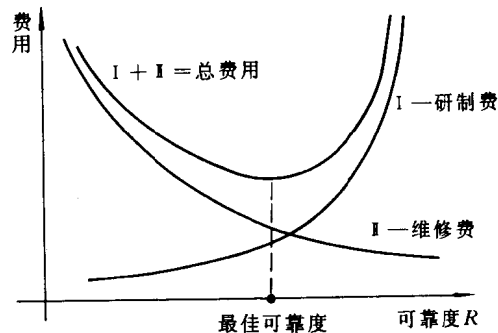


图 1—1 可靠性与费用的关系

表 1—1

产品寿命周期内的主要可靠性活动

产品寿命各阶段	可靠性活动基本体系	可靠性工作的主要内容
概念与定义阶段	确定可靠性的指标	对性能、可靠性、维修性、成本等作综合粗略分析；制定可靠性与维修性的方案与目标
	对可靠性初步评估	对可靠性、维修性及成本作详细分析
设计与研制阶段	作可靠性工程设计与可靠性增长	作可靠性预测、分配； 选取高可靠性的元器件、材料； 进行失效模式与效应分析； 进行可靠性增长试验验证； 对工程素质、能力作可靠性分析
	设计评定	对可靠性及成本作详细综合分析； 从性能、可靠性、维修性及成本方面综合评审设计质量； 对可靠性管理机能进行评审
制造与安装阶段	按可靠性指标生产	对选购的元器件、材料作可靠性筛选和寿命试验； 进行失效分析与质量反馈； 对工艺、生产设备人员进行培训、素质审核； 对产品作可靠性验收试验； 提供文件和数据
	对产品可靠性评价	厂内作产品可靠性评估； 产品使用的可靠性评估
使用与维护阶段	进行以可靠性为中心的维修活动	提出产品的维修方式，确定维修方法； 对有关人员培训； 收集产品质量信息，进行可靠性分析及质量反馈
处理阶段	处理产品	处理、毁坏或更新产品

第二节 可靠性工程的发展

可靠性学科是起源于军事领域，是在第二次世界大战期间为适应武器装备的需要而产生的，经过半个多世纪的迅速发展，现在已成为一门涉及面十分广泛（如各种工程技术、数学、物理学、管理学、心理学等）的综合性应用学科——可靠性工程。

早在 40 年代，德国在 V-Ⅱ 火箭的研制中，建立了关于可靠性的一些基本概念，美国对飞机及雷达上使用的真空管的故障作了深入的调查研究，最先提出了对产品可靠性的定量要求。50 年代是可靠性工程崛起的时期，1952 年美国国防部成立了电子设备可靠性顾问团（简称 AGREE），1957 年出版了《电子设备可靠性报告》，该报告较完整地阐述了可靠性的理论基础与研究方法；1958 年日本成立了可靠性研究委员会；这就是可靠性工程发展的第一阶段，即调

查研究阶段。第二阶段(1957~1962年)是统计试验阶段,主要是对电子产品进行统计寿命试验及环境试验,定量地得出电子元器件或整机的可靠性水平,同时,美国陆续制订了军用规格、标准(MIL, MIL—STD),成为今日可靠性标准体系的基础。第三阶段(1963~1968年)为可靠性物理研究阶段,主要对可靠性问题的本质(故障或失效的模式及其机理)进行研究,并探讨和提出各种加速试验的方法。60年代是可靠性工程在世界各发达国家处于蓬勃发展的阶段,国际间的可靠性活动也开始活跃起来。1965年国际电工委员会(IEC)成立了可靠性技术委员会(1977年改名为可靠性与维修性技术委员会),从此开始了国际可靠性标准化活动。第四阶段(1968年以后)为可靠性保证阶段,全面实现以可靠性为中心的管理,1971年建立了各国相互承认的电子元器件认证机构及认证制度。

我国的可靠性工作起始于50年代末期,起步并不迟。1959年建成了亚热带环境研究所,但只有三四年的时间就夭折了。由于众所周知的原因,在60年代可靠性工程在我国还是一片空白。70年代我国的可靠性工作是从引进国外标准资料开始的,1976年颁发了第一个可靠性的标准SJ1044—76《可靠性名词术语》,1979年颁发了第一个可靠性国家标准GB 1977—79《电子元器件失效率试验方法》,可靠性工程应用在电子、航天、电力、机械、仪表等部门取得不同程度的进展。80年代,我国的各种可靠性机构、学术团体象雨后春笋般迅速发展。在可靠性数学和可靠性理论上已达到一定水平,然而,可靠性技术在工业和企业中的应用还不广泛,与先进国家相比还存在着较大差距。

第三节 可靠性标准体系

任何一个系统或设备,在设计和开发阶段就应当确立其可靠性要求,同时制订一个为达到这个要求的可靠性保证规划。其工作重点应放在防止、发现和纠正可靠性设计中的缺陷、生产过程中的薄弱环节和可靠性管理中的漏洞上。一系列的可靠性工作需要通过标准化的手段来加以实现。

纵观工业标准化,可将与工业技术标准有关的可靠性标准分为可靠性基础标准、专业可靠性基础标准和有可靠性要求的产品标准。可靠性基础标准是应用可靠性理论,采用可靠性技术解决可靠性工程问题的基本准则。而专业可靠性基础标准是指在某一门类产品中共用的可靠性标准。这里我们主要介绍各类产品都要用到的可靠性基础标准。

可靠性基础标准研究的总体对象是构成一项工程的基础件(元器件、组件、部件等)、软件(各种管理方法、制度、设计和分析程序等)、设备、系统和人为因素的可靠性以及寿命周期费用问题。

由于可靠性工程涉及广泛的理论和实践问题,需要有一系列的标准,建立起一个完整的可靠性基础标准体系,才能适应各种不同复杂程度的产品(包括系统、设备、元器件等)开展可靠性工作的需要。若把标准化研究的对象作为横坐标,将标准化经常使用的配套方法作为纵坐标,我们就可以构成一个矩阵式的可靠性基础标准体系(见表1—2)。可靠性基础标准体系是从标准化的角度,对可靠性工作的内在联系的综合反映,它与国家经济体制、结构、政策、科技水平、生产组织方式、工业标准化水平等大的原则息息相关。它存在于一定的时间和空间之中,而且在一定的时间和空间中发展。因此,它是由三维空间构成的。根据其内在结构,就可以列出近期需要制订和修订的标准项目和内容。

表 1—2

可靠性基础标准矩阵形体系表

标准化对象	基础件			软件			设备			寿命	系统			人员
	不可修	可修		不可修	不可修	可修		费用	周期	不可修	可修			
		R	R			MMSR	M				AMS	R	R	
可靠性配套技术	R	R	MMSR	M	AMS	R	R	MMSA	费用	周期	不可修	R	MMSA	R
A1 术语	※※	※※	※※※				※※	※			※※	※		
A2 基本原理和数学	※	※	※※				※	※	※※		※	※		※
B 管理/保证	※※※	※※※					※※※	※※※	※※		※※※	※※※		※
C 规范	※※※	※※※					※	※	※	※	※	※		※
D1 分析技术	※※※	※※※					※※※	※※※		※	※※※	※※※		※
D2 改进技术	※※	※※					※※※	※※※			※※※	※※※		
E1 试验条件	※	※					※※※	※※※			※※※	※※※		
E2 评价、检验	※※	※※					※※※	※※※		※	※※※	※※※		※
E3 估计方法	※※※						※	※			※	※		
H 数据收集	※						※	※			※	※		
G 工作指南														

注：R——可靠性，M——维修性，A——可用性，MS—维修保障；

表中的任一方格都可能制订一个或若干个标准，表中有※号表示已有相应的标准或草案。

习 题 一

1. 解释图 1—1 中可靠性与费用的关系？
2. 产品寿命周期分哪几个阶段？
3. 企业可靠性工作的任务有哪些？
4. 对照表 1—2，分析可靠性基础标准体系的现状及不足之处。

第二章 可靠性的基本概念 及其主要数量特征

第一节 可 信 性

在可靠性工程中,产品可以是指作为单独研究和分别试验对象的任何元件、器件、设备或系统。对产品总能力的要求一般用术语“效能”来反映。效能是指产品在规定条件下满足给定定量特性和服务要求的能力。它是产品技术性能、可信性及操作性能和人的操作能力的综合反映,见图 2—1。图 2—1 表示了产品的效能与可信性和可靠性之间的关系。从中可以看出,可信性是效能的一个重要的要素,也是可靠性的一个基本概念。

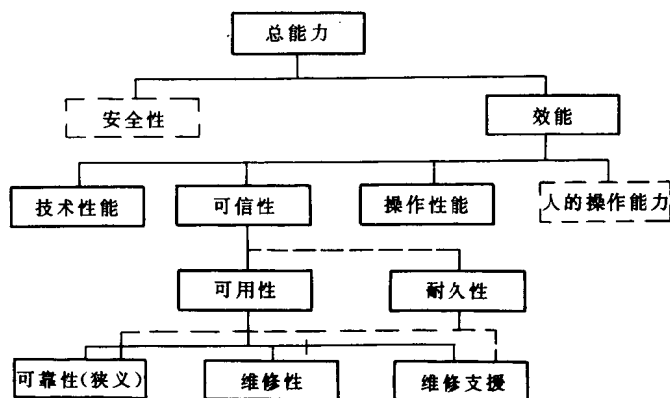


图 2—1 可靠性与产品其他性能的关系

可信性是用来描述产品可用性及其影响因素——可靠性、维修性及维修保障性的一个集合术语,又称广义可靠性。通常仅用于非定量描述可靠性的场合,用以说明产品在执行任务时的状态,即在需要产品工作时它能工作的可能性。

根据产品发生失效后的处置方式,产品可以分为可修复产品和不可修复产品。可修复产品是指产品在失效后是可以修复的,如机床、汽车、飞机等;而不可修复产品是指产品在失效后将不能或不值得去修复,如各种电子元器件、组件、机械零件等。

对于可修复产品,可信性的量化特征是可用性。可用性概念在本章后面单独介绍。对于不可修复产品,常常用“耐久性”来作可信性的量化特征。耐久性是指产品在规定的使用与维修条件下,直到极限状态前,完成规定功能的能力,其中产品的极限状态可以由使用寿命的终止、经济或技术上已经不适宜等来描述。

第二节 可 靠 性

一、可靠性的定义

可靠性的定义是:产品在规定的条件下和在规定的时间内,完成规定功能的能力。

可靠性的定义包含了四个要点:

(1) 定义的对象

首先要明确定义中“产品”的具体含义(范围)——零件、元器件、部件、设备或系统。

单个零件如齿轮、轴承、螺栓、弹簧等,元器件如电阻、电容、电感、晶体管、芯片等,它们都是机电产品的基础件。由它们构成部件、机械和设备,如电动机、机床、汽车、电视机等。若干种机器设备的集合,组成系统。当然,系统还可以是硬件和软件综合的系统、广义的人机系统。从系统可靠性角度出发,系统及其组成部分之间的关系可以建立一个金字塔模型,见图 2—2。该模型反映了材料的质量和基础件的可靠性直接影响系统的可靠性。

(2) 规定的条件

规定的条件是指:① 使用和维护条件,如动力、负载条件(供电电压、输出功率、载荷等),使用方法,使用频次(连续使用、间歇使用),操作人员的技术水平,维修方法等;② 环境条件,如气候环境(包括温度、湿度、气压、宇宙辐射等),生物和化学环境(包括生物作用物质霉菌、化学作用物质盐雾、臭氧和机械作用微粒等),机械环境(包括振动、冲击等),电磁环境(电场、磁场、电磁场等);③ 贮存条件包括运输、保管条件等。这些条件对产品的寿命都可能产生影响。离开了具体条件谈论可靠性是毫无意义的。

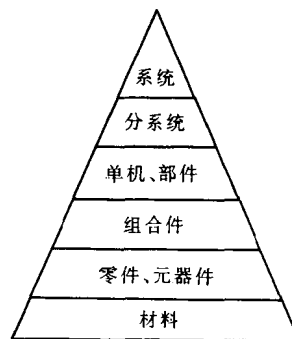


图 2—2 系统可靠性综合金字塔模型

(3) 规定的时间

规定的时间是以时间为尺度度量产品的可靠性特性,它是可靠性区别于产品其他特性的重要特征。它一般是指对象正常发挥功能的时间(工作期限)。时间度量可以用一般时间(如小时、天)、工作次数(如开关)、重复次数(如事件数、齿轮的应力循环次数)、距离(如汽车的行车公里数)等来表示。规定时间的长短随产品种类、使用目的和费用允许条件的不同而不同。

寿命是可靠性的基本概念,对不可修复的产品指失效前的工作时间,而对可修复的产品而言指相邻两故障间的工作时间。

(4) 规定的功能

规定的功能是指表征产品能完成任务的各种技术指标,如仪器仪表的准确度及其它静态、动态性能指标等。若对“产品完成规定的功能”只注意“性能”和“结构”两方面,其一是认为产品性能不超过规定的范围,要求“性能可靠”,其二是结构不产生破损,要求“结构可靠”,即要求只表示产品在某一规定时间内不发生故障的可能性,则这种可靠性称为狭义可靠性。相对于术语“可信性”而言,术语“可靠性”即为狭义可靠性。产品不能实现规定功能时,即称为功能失效,如果是可修复产品则称为“故障”。

应当注意,对以上四方面内容必须有明确完整的定义,研究产品可靠性才有意义。

二、固有可靠性与使用可靠性

某种机械产品的统计数据表明:产品故障起因于设计质量的占故障总数的 43%,起因于制造质量的占 20%,起因于使用条件的占 30%,原因不明的占 7%。

因此,为确保产品应有的可靠性水平,首先要做到设计质量高、制造工序质量高,然后保持正确的使用方法。

从产品可靠性的形成过程看,产品的可靠性由固有可靠性和使用可靠性组成。固有可靠性是在产品设计和制造过程中已经确定并最终在产品上得到实现的可靠性。而使用可靠性是产品在规定的条件下保证固有可靠性发挥的程度。一般来说,固有可靠性 $\geq$ 使用可靠性。

在使用中,固有可靠性和使用可靠性的综合,形成产品的工作可靠性。因此,在质量管理中,只有通过提高设计质量与制造质量,以提高固有可靠性,并通过改善使用条件,加强使用中的保养和维修,提高操作者的技术水平,以提高使用可靠性之后,才能提高工作可靠性。

三、可靠性特征量

用来表示产品总体可靠性高低的各种可靠性数量指标称为可靠性特征量。其真值是理论上的数值,实际上是未知的。根据样本的观测数据,经一定的统计计算所得到的特征是量真值的估计。估计值可以是点估计,也可以是单边或双边的区间估计。按可靠性标准的具体定义而计算出来的特征量的估计值称为特征量的观测值。特征量的观测值是较易计算的,但从统计意义上讲,未必是最优的。

1. 可靠度

可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。一般记为 R ,它是时间的函数,故也记作 $R(t)$, $R(t)$ 称为可靠度函数。

设 T 为产品寿命的随机变量,其分布密度为 $f(t)$, t 表示某一指定时刻,则

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2-1)$$

根据可靠度的定义,可以得出 $R(0)=1, R(\infty)=0$ 。即开始使用时,所有产品都是好的;只要时间充分大,全部产品都会失效。

对于不可修复的产品,可靠度的观测值按式(2-2)计算:

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} = 1 - \frac{n_f(t)}{n} \quad (2-2)$$

式中, n ——开始投入工作产品总数;

$n_s(t)$ ——到 t 时刻完成规定功能的产品数,即残存数;

$n_f(t)$ ——到 t 时刻未完成规定功能的产品数,即失效数。

对于可修复的产品,可靠度的观测值是指一个或多个产品的无故障工作时间,达到或超过规定时间的次数与观察时间内无故障工作的总次数之比,即

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} \quad (2-3)$$

式中, n ——观察时间内无故障工作的总次数,每个产品的最后一次无故障工作时间若不超过规定的时间则不予计入;

$n_s(t)$ ——无故障工作时间达到或超过规定时间的次数。

例 2-1 在规定条件下对 10 件某不可修复产品进行无替换试验,试验结果如图 2-3(a) 所示,在某观测时间内对 3 件某可修复产品进行试验,试验结果如图 2-3(b) 所示,两图中“×”均为产品出现故障时的时间, t 为规定时间(500 h),求以上两种情况的产品可靠度的观测值。

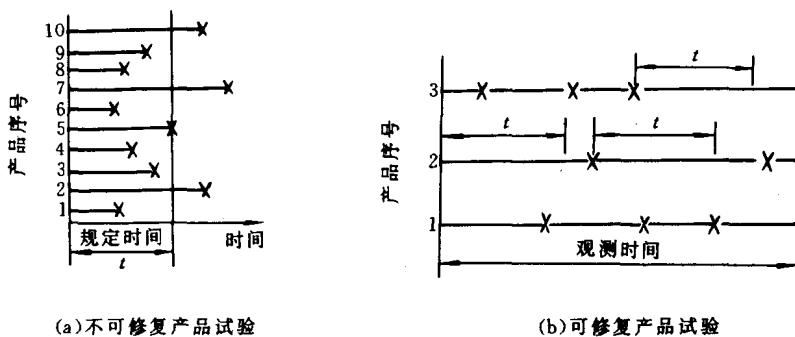


图 2—3 例 2—1 产品试验图

解：①不可修复产品试验由图 2—3(a)统计可得 $n_f(t)=7, n=10$, 由式(2—2)有

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} = 1 - \frac{n_f}{n} = 1 - \frac{7}{10} = 0.3$$

②可修复产品试验由图 2—3(b)统计可得 $n_s(t)=3, n=9$, 由式(2—3)有

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} = \frac{3}{9} = 0.3333$$

上述可靠度的时间 t 是由 0 算起的, 实际使用中常需知道工作过程中某一段执行任务时间的可靠度, 即需要知道已经工作 t_1 后再继续工作 t_2 的可靠度。

从时刻 t_1 工作到时刻 t_1+t_2 的条件可靠度称为任务可靠度, 记为 $R(t_1+t_2|t_1)$ 。由条件概率可得:

$$R(t_1+t_2|t_1) = P(T > t_1+t_2 | T > t_1) = R(t_1+t_2)/R(t_1) \quad (2-4)$$

2. 累积失效概率

累积失效概率是产品在规定的条件下和规定的时间内未完成规定功能(即发生失效)的概率, 也称为不可靠度, 记为 F 或 $F(t)$ 。其数值等于 1 -可靠度, 即

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - P(T > t) = 1 - R(t) \quad (2-5)$$

可靠度、累积失效概率和失效分布密度之间的关系如图 2—4 所示。

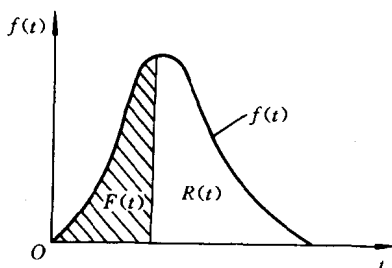


图 2—4 $R(t), F(t), f(t)$ 关系

3. 失效率

失效率是工作到某一时刻尚未失效的产品, 在该时刻后单位时间内发生失效的概率, 记为 λ 或 $\lambda(t)$, 称为失效率函数, 有时也称为故障率函数或风险函数。失效率的单位用单位时间的失效数表示, 如 $1/h, 1/km, 1/次$ 等。对高可靠性则用菲特(Fit)为单位, $1 \text{ Fit} = 10e-9/h$ 。

按上述定义, 失效率是在时刻 t 尚未失效的产品在 $t \sim t+\Delta t$ 的单位时间内发生失效的概率, 即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (2-6)$$

它反映 t 时刻失效的速率,也称为瞬时失效率。

不难证明:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2-7)$$

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (2-8)$$

失效率的观测值是在某时刻后单位时间内发生失效的产品数与到该时刻尚未失效的产品数之比,即

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n_1(t)}{n_s(t) \cdot \Delta(t)} = \frac{n_1(t + \Delta t) - n_1(t)}{n_s(t) \cdot \Delta t} \quad (2-9)$$

平均失效率是指在某一规定的时间内失效率的平均值。在 (t_1, t_2) 内失效率的平均值

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (2-10)$$

平均失效率的观测值,对于不可修复的产品是指在一个规定时期内失效数与累积工作时间之比。对于可修复的产品是指它的使用寿命期内的某个观察期间一个或多个产品的故障发生次数与累积工作时间之比。即

$$\hat{\bar{\lambda}}(t) = \frac{r}{\sum t} \quad (2-11)$$

例 2—2 设有 100 件不可修复的产品投入试验,试验至 500 h 时有 3 件失效,继续试验至 600 h 又有 2 件失效,至试验结束时所有产品失效,并有累积工作时间 800 000 h。试求 500 h 时的失效率和该产品的平均失效率。

解: 由题意可知, $n=100$, $n_s(500)=97$, $\Delta r=2$, $\Delta t=100$ h, $\sum t=800\ 000$ h, $r=100$, 且所求值均为观测值。根据公式(2—9)和(2—11)可得:

$$\hat{\lambda}(500) = 2/(97 \times 100) = 2.062/10^4 \text{ h}$$

$$\hat{\bar{\lambda}} = 100/800\ 000 = 1.250/10^4 \text{ h}$$

4. 寿命特征量

在可靠性工程中,规定了一系列与寿命有关的指标如平均寿命、可靠寿命、特征寿命和中位寿命等等,这些指标统称为寿命特征量。它们是直接用时间度量产品可靠性的尺度。

(1) 平均寿命 θ

平均寿命是最常用的寿命特征量。平均寿命,对不可修复的产品是指从开始使用到发生故障的平均时间,记为:MTTF(Mean Time To Failures);对可修复的产品是指平均失效间隔时间,即两次相邻故障之间的平均工作时间,又称平均无故障工作时间,记为 MTBF(Mean Time Between Failures),它一般可表示为寿命的数学期望 $E(T)$,记作 θ 。

当失效密度函数 $f(t)$ 已知,且连续分布,那么,总体的平均寿命 θ 可按式计算:

$$\theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-12)$$

平均寿命的观测值的表达式为

$$\hat{\theta} = \frac{\text{所有产品的总工作时间}}{\text{总失效数}} = \frac{T}{r} \quad (2-13)$$

(2) 寿命方差和寿命标准差

寿命方差和寿命标准差反映产品寿命分布的离散程度。

当 t 为连续型随机变量, 分布已知时, 总体的寿命方差为

$$\sigma^2 = D(T) = \int_0^{\infty} (t - \theta)^2 f(t) dt \quad (2-14)$$

寿命标准差为

$$\sigma = \sqrt{D(T)} \quad (2-15)$$

在可靠性工程中, 一般用样本方差和样本标准差作为总体寿命方差和标准差的估计值, 即

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \\ \hat{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \end{aligned} \quad (2-16)$$

式中, n ——试验总数;

t_i ——第 i 个失效时间;

$\bar{t}$ ——平均寿命。

(3) 可靠寿命、中位寿命和特征寿命

可靠度等于给定值 R 时的产品寿命称为可靠寿命, 记作 t_R , 即 $R(t_R) = R$ 。可靠寿命的表达式为

$$t_R = R^{-1}(R) \quad (2-17)$$

式中, $R^{-1}(R)$ —— R 的反函数。

当 $R=0.5$ 时, 可靠寿命 $t_{0.5}$ 称为中位寿命。

当 $R=e^{-1} \approx 0.368$ 时, 可靠寿命 $t_{e^{-1}}$ 称为特征寿命。

(4) 更换寿命

如果对产品预先给定允许的失效率值 λ_0 , 则满足方程

$$\lambda(t) = \lambda_0 \quad (2-18)$$

的解 $t=t_{\lambda_0}$, 称为更换寿命 t_{λ_0} 。

针对 $\lambda(t)$ 是随时间而递增的函数来讲, “更换”的意思是, 产品工作到 t_{λ_0} 时必须加以更换, 否则失效率会高于 λ_0 。而对于 $\lambda(t)$ 是随时间而递减的函数来讲, 只要在 t_{λ_0} 前进行筛选, 在 t_{λ_0} 后不失效的产品投入使用, 其失效率低于 λ_0 , 故此时 t_{λ_0} 又称为筛选寿命。

第三节 维 修 性

维修性与可靠性并不是同时发展起来的。详细的和定量的维修性研究, 直到 50 年代才开始。直至 80 年代后, 维修性才被视为设计过程的要素和一个固有的设计特性, 被写入产品规范, 并可以进行验证, 且同诸如可靠性和后勤保障特性一起作权衡分析。