



普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



可靠性工程基础

王金武 主编
张兆国 主审



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

可靠性工程基础

王金武 主编

张兆国 主审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统全面地阐述了可靠性工程的基础理论和相关技术。内容包括：可靠性的基本理论，系统可靠性分析，可靠性的预计与分配，机械结构可靠性设计，典型机械零件的可靠性设计，电子系统可靠性设计，故障模式、影响与危害性分析，故障树分析，软件可靠性工程，可靠性试验，可靠性数据分析。

本书在以机械可靠性为主要内容的同时，也对电子系统及软件的可靠性进行了较详细地阐述；同时为了便于学习和掌握，每章都配备了相关思考题。

本书适合作为高等学校机械设计及其自动化、电气工程及其自动化、电子信息、计算机工程、汽车工程等相关工科专业的教材，也可供从事电子和机械产品可靠性设计、制造、试验和管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性工程基础/王金武主编. —北京:科学出版社, 2013. 8

普通高等教育“十二五”规划教材·普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-038469-0

I. ①可… II. ①王… III. ①可靠性工程—高等学校教材 IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 202077 号

责任编辑：朱晓颖 张丽花/责任校对：桂伟利

责任印制：闫磊/封面设计：迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年8月第一版 开本：787×1092 1/16

2013年8月第一次印刷 印张：23 1/2

字数：601 600

定价：49.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

编写人员名单

主 编	王金武		
副 主 编	王 英	尹大庆	王丹阳
编写人员	王 英	(东北农业大学)	
	王丹阳	(沈阳农业大学)	
	王金武	(东北农业大学)	
	王金峰	(东北农业大学)	
	尹大庆	(东北农业大学)	
	付 威	(石河子大学)	
	吴跃成	(浙江理工大学)	
	陈新昌	(河南农业大学)	
	秦春兰	(黑龙江八一农垦大学)	
	葛宜元	(佳木斯大学)	

前 言

可靠性理论及应用是以产品的寿命特征作为主要研究对象的一门新兴的边缘性学科,它在第二次世界大战后从航空航天和电子工业发展起来,涉及基础科学、技术科学和管理科学等众多学科,现已广泛应用于化工、机械等领域,为社会和企业带来了巨大的经济效益。

在经济全球化的今天,中国企业进入世界的大循环圈,竞争日益激烈,各行业对可靠性问题也越来越重视,在很大程度上推动了可靠性的发展,形成了良好的研究势头。但由于种种原因,目前我国的可靠性理论及应用研究与发达国家相比还有一定的差距,特别是加入世界贸易组织后,“中国制造”产品的质量和可靠性面临着国际贸易竞争的严峻考验。一方面我们需要借鉴发达国家的经验,另一方面也需要我国可靠性领域和部门的诸多科研工作者继续努力,大力研究、实施和推广,以促进我国的可靠性工程快速发展。

本书旨在满足大专院校机械类学生和相关专业工程技术人员学习可靠性基础知识的要求。根据参编本书的各高校教师多年的教学实践经验,可靠性对于机械、电子、电气自动化、化工及航空航天等专业的学生尤为重要。根据当今的经济和社会发展趋势,掌握可靠性理论和应用知识是必然趋势。

本书共 12 章,主要内容涵盖了可靠性、可靠性工程以及可靠性与质量管理的关系;可靠性的基本理论,包括常用的可靠性指标;系统可靠性模型,包括经典的串联系统、并联系统等;可靠性的预计与分配;机械结构可靠性设计;典型零件的可靠性设计;电子系统可靠性设计;故障模式、影响与危害性分析;故障树分析法;软件可靠性工程;可靠性试验以及可靠性数据分析。

本书内容安排合理,层次清晰,系统性强,理论体系完整,并且在编写过程中,考虑了不同专业学生及各领域工程技术人员需要问题,章节及知识结构注重由浅入深、循序渐进,内容讲解简明扼要,通俗易懂。

本书由东北农业大学王金武教授主编。参加本书编写的有东北农业大学王金武(第 1 章),沈阳农业大学王丹阳(第 2、5 章),河南农业大学陈新昌(第 3 章),黑龙江八一农垦大学秦春兰(第 4 章),浙江理工大学吴跃成(第 6 章),石河子大学付威(第 7 章),佳木斯大学葛宜元和东北农业大学尹大庆(第 8、11 章),东北农业大学王英(第 9、12 章),东北农业大学王金峰(第 10 章)。全书由王金武教授统稿,由张兆国教授主审。

在本书整理和插图制作过程中,杨芬芬、周军旗、郭兴海、潘振伟、何剑南、刘永军、张春风等研究生做了很多工作,在此一并表示感谢!

本书在编写过程中参阅了很多相关资料,在此对原著作者表示由衷的感谢。

由于作者阅历及水平有限,缺点和疏漏之处在所难免,敬请同行和读者多多批评斧正。

编 者

2013 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1	6.2 圆柱螺旋弹簧的可靠性设计	165
1.1 可靠性的基本概念	1	6.3 轴的可靠性设计	169
1.2 可靠性的特点	3	6.4 圆柱齿轮轮齿强度可靠性设计	171
1.3 可靠性的发展	4	复习思考题 6	178
1.4 可靠性研究的重要意义	6	第 7 章 电子系统可靠性设计	179
1.5 可靠性工程的技术内涵	7	7.1 元器件的筛选与控制	179
1.6 可靠性与质量管理	9	7.2 电路与系统的可靠性设计	181
复习思考题 1	10	7.3 参数优化设计	193
第 2 章 可靠性的基本理论	11	复习思考题 7	194
2.1 可靠性特征量	11	第 8 章 故障模式、影响与危害性分析	195
2.2 维修性特征量	18	8.1 概述	195
2.3 有效性特征量	23	8.2 故障模式及影响分析(FMEA)	196
2.4 可靠性中常见的失效分布	25	8.3 危害性分析	209
复习思考题 2	47	8.4 对 FMECA 的评价	210
第 3 章 系统可靠性分析	49	复习思考题 8	210
3.1 系统可靠性的概念和研究意义	49	第 9 章 故障树分析	211
3.2 系统的组成和功能逻辑框图	50	9.1 概述	211
3.3 不可修复系统的可靠性分析	52	9.2 故障树的构建	215
3.4 可修复系统的可靠性分析	70	9.3 故障树的结构函数	225
复习思考题 3	80	9.4 故障树的定性分析	227
第 4 章 可靠性的预计与分配	81	9.5 故障树的定量分析	233
4.1 概述	81	复习思考题 9	235
4.2 可靠性预计	83	第 10 章 软件可靠性工程	236
4.3 可靠性分配	89	10.1 软件可靠性概述	236
复习思考题 4	101	10.2 软件可靠性建模	245
第 5 章 机械结构可靠性设计	102	10.3 软件可靠性要求的制定与分配	264
5.1 概述	102	10.4 软件可靠性的设计	275
5.2 应力与强度的分布	108	10.5 查错设计	283
5.3 可靠性系数与可靠度	127	10.6 纠错设计	287
5.4 静强度概率可靠性设计	134	10.7 容错设计	288
5.5 疲劳强度的概率可靠性设计	141	10.8 软件可靠性测试	294
复习思考题 5	153	复习思考题 10	295
第 6 章 典型机械零件的可靠性设计	155	第 11 章 可靠性试验	296
6.1 螺栓连接的可靠性设计	155		

11.1 概述.....	296	12.1 概述.....	311
11.2 可靠性寿命试验.....	299	12.2 可靠性数据的收集.....	314
11.3 加速寿命试验.....	301	12.3 可靠性数据的初步整理分析.....	317
11.4 可靠性增长试验.....	302	12.4 分布的拟合优度检验.....	323
11.5 可靠性筛选试验.....	305	12.5 指数分布寿命试验的数据分析	
11.6 可靠性抽样试验.....	308	329
11.7 环境适应性试验.....	309	复习思考题 12	337
复习思考题 11	310	参考文献.....	339
第 12 章 可靠性数据分析	311	附录.....	340

第 1 章 绪 论

工业产品的质量是衡量一个国家工业技术水平的主要标志之一。工业产品的质量一般包括:性能指标、可靠性指标及维修度指标三个指标。产品的性能代表其使用价值,对产品的设计制造起主要作用,但在大量的生产生活中,产品的设计制造往往不能满足人们对其使用的性能要求,产品质量得不到满足。如在产品使用过程中,既能满足使用要求又能长期使用,则认为该产品可靠;但若在使用过程中,产品出现故障或达不到性能指标,那就认为该产品不可靠或不太可靠。产品在出现故障后,有的具有可维修性,但有的产品维修起来就相对困难,这样就出现了产品的可靠性与可维修性这一概念。

1.1 可靠性的基本概念

简单地说,产品可靠性就是产品不易丧失工作能力的性质。研究产品可靠性的工程学科称为可靠性工程学。产品的可靠性本应随产品复杂性的增加而早受重视,但事实上直到第二次世界大战后,它对现代科学技术发起来势凶猛的挑战,才迫使人们耗费大量的财力和物力来研究它,解决它,从而对科学技术的发展起到了巨大的促进作用。与此同时,一门独立的边缘科学——可靠性工程学诞生了。形成可靠性工程学这一学科的原因归纳起来有如下四个方面:

- (1) 产品的性能优异化和结构复杂化之间的矛盾导致可靠性问题日益突出;
- (2) 产品使用场所的广泛性与严酷性对产品的可靠性提出了更高的要求;
- (3) 产品可靠程度与国家及社会安全之间的关系日益密切;
- (4) 可靠性工程学的内部因素有力地推动了可靠性工程学的发展。

1.1.1 可靠性定义

可靠性(reliability)是部件、元件(component)、产品(product)或系统(system)的完整性(integrity)的最佳数量。可靠性是产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠性的概率度量称为可靠度。

这里的产品指的是新版 ISO9000 中定义的硬件和流程性材料等有形产品以及软件等无形产品。它可以大到一个系统或设备,也可以小至一个零件。在农业机械行业中,可以是一台整机,如旋耕机,可以是一个装置甚至一个系统,如施肥装置、播种系统,也可以是一个部件甚至一个元器件,如螺母等。总之,可大可小,视所研究问题的范围而定。随着可靠性工程学的发展,人、语言、方法、程序的软件也可作为产品。

产品终止规定功能就称为失效,也称为故障。产品按从发生失效后是否可以通过维修恢复到规定功能状态,可分为可修复产品和不可修复产品。如汽车属于可修复产品,日光灯管属于不可修复产品。对可修复产品称为故障,对不可修复产品称为失效。

可靠性定义中的“三个规定”是可靠性概念的核心。

1. 规定的条件

“规定的条件”包括使用时的环境条件和工作条件。产品的可靠性和它所处的条件关系极为密切,同一产品在不同条件下工作表现出不同的可靠性水平。“规定的条件”是产品可靠性定义中最重要又最容易忽略的部分。需牢记,不同条件下产品的可靠性是截然不同的,离开具体条件谈论可靠性是毫无意义的。

“规定的条件”有着广泛的内容,一般分为以下几个方面。

(1) 环境条件。指影响产品性能的环境特性。

单一环境参数可分为以下四类。

① 气候环境:主要包括温度、湿度、大气压力、气压变化、周围介质的相对移动、降水、辐射等。

② 生物和化学环境:包括生物作用物质、化学作用物质、机械作用微粒。

③ 机械环境:包括冲击在内的非稳态振动、稳态振动、自由跌落、碰撞、摇摆和倾斜、稳态力。

④ 电和电磁环境:包括电场、磁场、传输导线的干扰。

(2) 动力条件。影响产品性能的动力特性。一般分为以下两类。

① 电源:主要参数为电源电压和频率、电流等。

② 流体源(包括气源和液体源):主要参数为压力、流量等。

(3) 负载条件。影响性能的负载特性,也包括输入信号的特性。

产品的可靠性只有在使用中得以实现,在维护中得到提高。对于使用与维护条件要注意的是完善产品的使用和维护说明书。

(4) 使用和维护条件。

2. 规定的时间

“规定的时间”和产品可靠性关系也极为密切。可靠性定义中的时间是广义的,除时间外,还可以是里程、次数等。工作时间越长,可靠性越低,产品的可靠性和时间的关系呈递减函数关系。

3. 规定的功能

“规定的功能”指的是产品规格书中给出的正常工作的性能指标。衡量一个产品可靠性水平时一定要给出故障(失效)判据。因此,在规定产品可靠性指标要求时一定要对规定条件、规定时间和规定功能给予具体的说明。

可靠性工程(reliability engineering)提供理论和实用的工具,从而使部件、元件、产品或系统在规定的环境下、规定的时间内以给定的置信水平无故障地执行其设计功能的概率(probability)和能力(capability),可以规定、预测、设计、试验或演示部件、元件、产品或系统的可靠性性能,可以监视并反馈到有关组织,提高可靠性。同样,可靠性工程也是提供理论和实用工具使企业以有竞争力的价格水平获得产品或系统的¹最优可用性(availability)、可维修性(maintainability)、安全性(safety)和质量(quality)。

1.1.2 可靠性的分类

一般认为,产品可靠性可近似看做固有可靠性和使用可靠性之分。

固有可靠性是产品在设计、制造中赋予的,是产品的一种固有特性,也是产品的开发者可以

控制的。如对仪器仪表,常指输出范围、精度、线性度、失真度、分辨率、回差、重要性、灵敏度、漂移等。

使用可靠性则是产品在实际使用过程中表现出的一种性能的保持能力的特性,它除了考虑固有可靠性的影响因素之外,还要考虑产品安装、操作使用和维修保障等方面因素的影响。产品生产出来以后,要经过包装、运输、储存、安装、使用、维护保养及修理诸环节。在这些过程中,产品的可靠性会受到种种条件如环境、技术条件、维修方式的影响,使用中的误操作等都将造成产品失效。这些环节中存在的可靠性称为使用可靠性。

产品可靠性还可分为基本可靠性和任务可靠性。基本可靠性是产品在规定条件下无故障的持续时间或概率,它反映产品对维修人力的要求。任务可靠性是产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。评定产品任务可靠性时仅考虑在任务期间发生的影响完成任务的故障。

国外资料表明,产品不可靠的原因及比例如表 1-1 所示。

表 1-1 产品不可靠的原因及比例

可靠性	固有可靠性	零部件材料	30%	技术	电气	30%
		设计技术	40%		机械	10%
		制造技术	10%	制造	20%	
	使用可靠性	使用(运输、环境、操作、安装、维修技术)	20%	现场使用	30%	
				其他	10%	

失效是指产品丧失功能的现象。它是“可靠”的对立面。通过更换元器件或进行调整能够恢复功能的产品称为可修复产品,反之称为不可修复产品。对于可修复产品,失效可称之为故障。

可靠性有狭义可靠性与广义可靠性之分。狭义可靠性仅指产品在其整个寿命期内完成规定功能的能力。通常所说的可靠性就是指的狭义可靠性。广义可靠性通常包含狭义可靠性和维修性两个方面内容,常被称为有效性。

1.2 可靠性的特点

可靠性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能力,或者说是产品能保持其功能的时间。它综合反映了一个产品的耐久性、无故障性、维修性、有效性和使用经济性等,可用各种定量指标表示。可靠性是产品的一项重要质量指标,具有质量的属性,但又有其自身特点,大致归纳如下。

1. 规定条件下的可比性

从上述可靠性的定义看出,一个产品的可靠性受三个“规定”的限制。所以在讨论和评估产品的可靠性时,应明确以上三个“规定”,否则会失去可比性。

2. 时间质量指标

一般产品的功能和性能参数,只要产品制成就能测定,在出厂前可进行检验和考核,故一般称为 $t=0$ (使用时间为零) 的质量。可靠性是指产品在规定时间内保持功能的能力或是保持功能的时间,对它的评定要等产品使用之后,或者通过模拟使用试验后才能进行,故称为 $t>0$ 的质

量。因此,分析评定一个产品的可靠性有两种方法,一是试验,二是利用现场使用数据的反馈,尤其是后者,是研究机电设备可靠性的主要途径。

3. 强调可用性

可靠性和寿命有关,但是和传统的机械设备寿命概念有些不同。可靠性并不是笼统地要求长寿命,而是强调在规定的时间内能否充分发挥其功能,即产品的可用性(可靠性指标之一), $\text{可用性} = \text{可用时间} / (\text{可用时间} + \text{因故障维修等不可用时间}) \times 100\%$ 。提高可用性可以从两个方面入手:或是保证产品在规定的时间内不出故障,少出故障;或是出了故障能迅速修复,目的都是使设备不可利用的时间降到最低程度,为此需要提高产品的无故障性或维修性。尤其是机电设备,大多是可维修产品,从保证可用性的成本角度考虑,对于某些部件要花费很高成本提高寿命和可靠性,不如采用维修性设计,改进维修策略等措施更为有效。

4. 统计、抽样特性

一个产品何时出现故障受许多随机因素影响,致使最终产品的无故障工作时间也具有随机特性,因此产品的可靠性观测值是多少很难预料,可以利用概率统计理论估计整批产品的可靠性。可靠度就是指产品在规定条件、规定时间内完成规定功能的概率,可用百分比表示。如果说某批产品的可靠度是90%,则表示该批产品在规定条件下工作到规定时间时,有10%的产品可能丧失功能而失效,90%的产品有可能完成规定功能。

另外,由于产品的可靠性要经过使用或模拟使用试验后才能评定,一般不能对整批产品逐个试验,需要采用抽样和截尾试验的方式。因为是抽样试验评定,就有判定的风险问题,即以抽样的子样评定结果代表整批产品的可靠性水平的可信程度,称作置信度。例如,我们说某批产品的可靠度的估计值大于90%,置信度为60%,即表示对该批产品抽样试验评定可靠度,若抽样100次,将有60次评定的可靠度结果是大于90%。

所以,评定和分析产品可靠性时需要应用到概率统计理论和抽样试验方面的知识。

5. 指标体系

一般地说,一个产品的可靠性可由多种指标形式表示。因为可靠性是个综合特性,它综合表现了产品的耐久性、无故障性、维修性、可用性和经济性,可分别用各种定量指标表示,形成一个指标体系。具体一个产品采用什么样的指标要根据产品的复杂程度和使用特点而定,一般对于可以修理的复杂系统、机器设备,常用可靠度、平均无故障时间(MTBF)、平均修复时间(MTTR)、有效寿命、可用度和经济性等指标。对于不能或者不予修理的产品,例如耗损件、元器件等,常用可靠度、可靠寿命、故障率、平均寿命(MTTF)等。材料则采用性能均值和均方偏差等特性作为指标。

可靠度弥补了传统的质量、寿命概念的不足,表达了产品的时间质量特性,要符合实际使用目的的要求。因此,现代的全面质量管理、质量保证等活动中都把可靠性作为管理的目标之一。

1.3 可靠性的发展

可靠性和质量不可分离,其前身是伴随着兵器的发展而诞生和发展的。在公元前26世纪的冷兵器时期,到1703年英法两国完全取消长矛为止,在前后经历了4000年发展成长的漫长过程

中,人类已经对当时所制作的石兵器进行了简单检验。在殷商时代已有的文字记载中,就有关于生产状况和产品质量的监督和检验,对质量和可靠性方面已有了朴素的认识。热兵器的成熟期在国际上以第二次世界大战时期德国使用火箭和美国使用原子弹为标志。

现代意义上的可靠性研究,始于第二次世界大战期间。当时,德国发射的火箭不可靠及美国的航空无线电设备不能正常工作。德国使用 V-2 火箭袭击伦敦,有 80 枚火箭没有起飞就爆炸,还有的火箭没有到达目的地就坠落;美国当时的航空无线电设备有 60% 不能正常工作,其电子设备在规定的使用期限内仅有 30% 的时间能有效工作。第二次世界大战期间,因可靠性引起的飞机损失惨重,损失飞机 2100 架,是被击落飞机的 1.5 倍。为了解决这一问题,美国国防部组织人力,开始对电子管的可靠性进行研究,这标志着可靠性研究的起步。

为了进行可靠性研究,美国在 1934 年成立电子管开发委员会(VTD),1946 年成立电子管专业小组(PET)和航空无线电组(ARINC)。1952 年成立的电子设备可靠性咨询小组(AGREE),是由美国国防部成立的一个由军方、工业领域和学术领域三方共同组成的,在可靠性设计、试验及管理的程序及方法上,推动并确定了美国可靠性工程发展方向的组织。AGREE 组织在 1955 年开始制订和实施从设计、试验、生产到交付、储存和使用的全面的可靠性计划,并在 1957 年发表了《军用电子设备可靠性》的研究报告,从九个方面全面阐述可靠性的设计、试验、管理的程序和方法,成为可靠性发展的奠基性文件。这个组织的成立和这份报告的出现,也标志着可靠性学科发展的重要里程碑,此时,它已经成为一门真正的独立的学科。

进入 20 世纪 60 年代,可靠性的发展进入一个新的阶段。随着可靠性学科的全面发展,其研究已经从电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械设备、动力、土木建筑、冶金、化工等部门。在这十年中,美国先后开发出战斗机、坦克、导弹、宇宙飞船等装备,都是按照 1957 年 AGREE 报告中提出的、被美国国防部和国家航空航天局认可的一整套可靠性设计、试验和管理的程序和方法进行设计开发的。此设计、试验、管理程序和方法在新产品的研制中得到广泛应用并发展、检验,逐渐形成一套比较完善的可靠性设计、试验和管理标准。此时,已经形成了针对不同产品制订的较完善的可靠性大纲,并定量规定了可靠性要求,可进行可靠性分配和预测。在理论上,有了故障模式及影响分析(FMEA)和故障树分析(FTA)。在设计理念上,采用了余度设计,并进行可靠性试验、验收试验和老练试验,在管理上对产品进行可靠性评审,使装备可靠性提升明显。美国的可靠性研究使其在军事、宇航领域装备可靠性大大增加。在此十年期间,许多其他工业发达国家,如日本、苏联等国家也相继对可靠性理论、试验和管理方法进行研究,并推动可靠性分析向前迈进。

20 世纪 70 年代,可靠性理论与实践的发展进入了成熟的应用阶段,世界先进国家都在可靠性方面有所应用。

我国从 20 世纪 60~70 年代,首先在电子工业和国防工业开始进行可靠性的研究和普及工作,继而在机械工业等其他部门也逐渐推广应用。目前我国军工产品可靠性技术具有代表性的基础标准。与此同时,各有关工业部门、军兵种越来越重视可靠性管理,加强可靠性信息数据和学术交流。全国军用电子设备可靠性数据交换网已经成立;全国性和专业系统性的各级可靠性学会相继成立,进一步促进了我国可靠性理论与工程研究的深入展开。

可靠性工程专业性强、壁垒高,需要长期积累,且核心竞争力很难复制。从全球范围看,真正能提供专业可靠性工程项目服务的大公司也不多。目前,可靠性工程研究在我国仍然属于边缘学科,仅有几家高校、科研院所与企业成立了专门的可靠性研究实验室。尽管存在着一系列的发展瓶颈,但对于我国可靠性工程的发展前景,仍然是光明的。

可靠性成为一门独立的学科仅仅 60 多年,已经取得了很大的成就,但其在发展研究上也有亟待解决的问题。首先,目前对电子产品的可靠性研究已较成熟,对机械系统的可靠性研究较晚,由于机械零件的失效模式和电子元件相比有很大差别,机械系统的构成也不同于电子系统,机械系统的受载方式更为复杂,其失效的影响因素也更为多样,至今还没有数学模型和分析方法可直接用于机械系统进行可靠性研究。目前应用于机械系统的可靠性分析方法基本沿用以电子元件或设备为对象总结出来的可靠性方法,这就有可能导致对机械系统的可靠性分析与设计走入误区。其次,如何在小样本条件下确定系统的可靠性参数是一个迫切需要解决的问题。最后,常规的可靠性理论是在二态假设和概率假设基础上建立的,但在可靠性工程实际中,很难满足上述两个基本假设,用常规可靠性理论进行系统评价并不能完全反映实际情况。总之,系统可靠性从诞生、发展到应用已经逐步向着各学科渗透,但在现代科技飞速发展的时期,系统可靠性在理论和研究模式上还有欠缺,需要结合其他理论如模糊理论、人工智能等,使可靠性理论、试验和管理能够更成熟、更完善。

1.4 可靠性研究的重要意义

可靠性是与电子工业的发展密切相关的,其重要性可从电子产品发展的三个特点来加以说明。

首先,电子产品的复杂程度在不断增加。人们最早使用的矿石收音机是非常简单的,随之先后出现了各种类型的收音机、录音机、录放相机、通信机、雷达、制导系统、电子计算机以及宇航控制设备,复杂程度不断增长。电子产品复杂程度的显著标志是所需元器件数量的多少,而电子产品的可靠性取决于所用元器件的可靠性,因为电子产品中的任何一个元器件、任何一个焊点发生故障都将导致系统发生故障。一般说来,电子产品所用的元器件数量越多,其可靠性问题就越严重,为保证产品或系统能可靠地工作,对元器件可靠性的要求就非常高、非常苛刻。

其次,电子产品的使用环境日益严酷。从实验室到野外,从热带到寒带,从陆地到深海,从高空到宇宙空间,经受着不同的环境条件,除温度、湿度影响外,海水、盐雾、冲击、振动、宇宙粒子、各种辐射等对电子元器件的影响,导致产品失效的可能性增大。

第三,电子产品的装置密度不断增加。从第一代电子管产品进入第二代晶体管,现已从小、中规模集成电路进入到大规模和超大规模集成电路,电子产品正朝小型化、微型化方向发展,其结果导致装置密度的不断增加,从而使内部温度增高,散热条件恶化。而电子元器件将随环境温度的增高,降低其可靠性,因而元器件的可靠性引起人们的极大重视。

高可靠性产品在社会发展的各个方面和层次都具有重要意义。

1. 高可靠性产品才能满足现代技术和生产的需要

现代生产技术的发展特点之一是自动化水平不断提高。一条自动化生产线是由许多零部件组成,生产线上一台设备出了故障,则会导致整条线停产,这就要求组成线上的产品要有高可靠性,Appolo 宇宙飞船正是由于高可靠性,才一举顺利完成登月计划。现代生产技术的发展的另一特点设备结构复杂化,组成设备的零件多,其中一个零件发生故障会导致整机失效。如 1986 年美国“挑战者”号航天飞机就是因为火箭助推器内橡胶密封圈因温度低而失效,导致航天飞机爆炸和七名宇航员遇难及重大经济损失。由此可见,只有高可靠性产品才能满足现代技术和生产的需要。

2. 高可靠性产品可获得高的经济效益

提高产品可靠性可获得很高的经济效益。如美国西屋公司为提高某产品的可靠性,曾做了一次全面审查,结果是所得经济效益是为提高可靠性所花费用的100倍。另外,产品的可靠性水平提高了还可大大减少设备的维修费用。1961年美国国防部预算中至少有25%用于维修费用。苏联过去有资料统计,在产品寿命期内下列产品的维修费用与购置费用之比:飞机为5倍,汽车为6倍,机床为8倍,军事装置为10倍,可见提高产品可靠性水平会大大降低维修费用,从而提高经济效益。

3. 高可靠性产品,才有高的竞争能力

只有产品可靠性提高了,才能提高产品的信誉,增强日益激烈的市场竞争能力。日本的汽车曾一度因可靠性差,在美国造成大量退货,几乎失去了美国市场。日本总结了经验,提高了汽车可靠性水平,因此使日本汽车在世界市场上竞争力很强。中国加入WTO后,挑战是严峻的。我们面临的是世界发达国家的竞争,如果我们的产品有高的可靠性,那就能打入激烈竞争的世界市场,从而获得巨大经济效益,促进民族工业的发展;相反,则会被别国挤出市场,甚至失去部分国内市场,由此可见生产高可靠性的产品的重要性。

可靠性已经列为产品的重要质量指标加以考核和检验。长期以来,人们只用产品的技术性能指标作为衡量电子元器件质量好坏的标志,这反映了产品质量好坏的一个方面,还不能反映产品质量的全貌。因为,如果产品不可靠,即使其技术性能再好也得不到发挥。从某种意义上说,可靠性可以综合反映产品的质量。

可靠性工程是一个综合的学科,它的发展可以带动和促进产品的设计、制造、使用、材料、工艺、设备和管理的发展,把电子元器件和其他电子产品提高到一个新的水平。正因为这样,可靠性已形成一个专门的学科,作为一个专门的技术进行研究。

1.5 可靠性工程的技术内涵

可靠性工程是为适应产品的高可靠性要求发展起来的新兴学科,是一门综合了众多学科的成果以解决可靠性为出发点的边缘学科。它是为了达到系统可靠性要求而进行的有关设计、管理、试验和生产一系列工作的总和,它与系统整个寿命周期内的全部可靠性活动有关。它研究产品或系统的故障发生原因、消除和预防措施。其主要任务是保证产品的可靠性和可用性,延长使用寿命,降低维修费用,提高产品的使用效益。按照日本工业标准JIS,对可靠性工程技术的定义为“赋予产品可靠性为目的的应用科学和技术”。

可靠性工程是产品工程化的重要组成部分,同时也是实现产品工程化的有力工具。利用可靠性的工程技术手段能够快速、准确地确定产品的薄弱环节,并给出改进措施和改进后对系统可靠性的影响。

1. 可靠性的分类

可靠性按学科分类,一般可分为可靠性数学、可靠性工程、可靠性管理和可靠性物理分支。但是从可靠性技术在生产工程各阶段应用的目的和任务划分,大致可分为以下几类。

(1) 可靠性设计:通过设计奠定产品的可靠性基础,研究在设计阶段如何预测和预防各种可

能发生的故障和隐患。

(2) 可靠性试验:通过试验测定和验证产品的可靠性,研究在有限的样本、时间和试验费用下如何获得合理的评定结果。

(3) 制造阶段的可靠性:通过制造实现产品的可靠性,研究制造偏差的控制、缺陷的处理和早期故障的排除,保证设计目标的实现。

(4) 使用阶段可靠性:通过使用维持产品的可靠性,研究产品运行中的可靠性监视、诊断预测,采用售后服务和维修策略等防止可靠性劣化。

(5) 可靠性试验及可靠性分析:通过试验测定和验证产品的可靠性,研究在有限的样本、时间和使用费用下,如何获得合理的评定结果,找出薄弱环节,并研究导致薄弱环节的内因和外因,研究导致薄弱环节的机理,找出规律,提出改进措施以提高产品的可靠性。

(6) 可靠性管理:组织实施以较少的费用、时间实现产品的可靠性目标,研究可靠性目标的实施计划和数据反馈系统。完善可靠性组织结构,规划出可靠性组织工作的目标,制定出相应的流程,规范可靠性工作,监督可靠性工作的实施培训可靠性知识,增强质量意识,规避设计风险。

也可按照对故障处理的先后程序将可靠性技术划分为事前、事中和事后分析技术。

(1) 事前分析:指在产品设计、制造阶段预测、预防故障和隐患的发生。

(2) 事中分析:指在产品使用阶段通过故障监控、诊断技术预测和预报故障的征兆和发展趋势,以便及时进行预防性维修。

(3) 事后分析:指在产品失效或发生故障后进行失效机理分析,将信息反馈给设计、制造部门,以便采取改进对策。

可靠性的技术基础是概率论和数理统计,材料、结构、物性学,故障物理,基础试验技术,环境技术等。

在可靠性工程中,一方面应用数理统计和现场使用信息反馈等手段,建立起能收集复杂产品可靠性的管理体系;另一方面通过对故障物理、试验技术的研究,提供有关产品故障的机理分析、检测、诊断和设计等技术。

2. 可靠性的特点

可靠性和传统的技术概念有很大不同,其特点是:

1) 管理和技术高度结合

可靠性工程是介于固有技术和管理科学之间的一门边缘学科。日本把可靠性技术比喻为“病疫学”和“病理学”密切结合的技术。所谓病疫学是指分析和追踪故障的起因,产生的环节,从而将信息反馈给有关单位,指导设计、制造环节的改进,即是可靠性管理的任务。“病理学”则是研究具体故障的消除和预防技术,管理和技术结合,通过管理指导技术的合理应用,这就是可靠性技术的基本指导思想。

2) 众多学科的综合

产品、系统的可靠性不是孤立存在的,它受许多环节、因素的影响。因此可靠性技术和很多领域的技术密切相关,需要得到如系统工程、人机工程、生产工程、材料工程、环境工程、数理统计等学科以及以往的失效经验的支持,并综合应用这些领域的技术成果解决产品的可靠性问题。

3) 反馈和循环

一个产品的可靠性首先是靠设计,并通过制造来实现设计目标。为了把可靠性设计到产品中去,必须在设计阶段能预测和预防一切可能发生的故障,而预测、预防的依据要靠使用信息的

反馈。反馈是可靠性管理技术的基本特点,没有反馈就没有可靠性。通过反馈使设计、试验、制造和使用过程形成一个可靠性保证的循环技术体系。循环的反复,使可靠性水平不断提高。

需要指出的是,虽然可靠性技术引入到各个领域,但应用模式并不同。目前除了数理统计、故障物理等基础学科应用基本相同外,对于可靠性管理、可靠性技术的应用程度和范围因受到原有技术基础、管理体制等条件的限制,基本上都是结合具体的特点以独自的形式发展。

3. 可靠性工程的工作步骤

可靠性工程的具体工作步骤为:

- (1) 通过试验或使用,发现系统在可靠性上的薄弱环节;
- (2) 研究分析导致这些薄弱环节的主要内外因素;
- (3) 研究影响系统可靠性的物理、化学、人为的机理及其规律;
- (4) 针对分析得到的问题原因,在技术上、组织上采取相应的改进措施,并定量地评定和验证其效果;
- (5) 完善系统的制造工艺和生产组织。

在影响系统可靠性的主要问题得到解决后,再采用上述步骤解决一些次要的薄弱环节。可靠性工程实质上是对影响系统可靠性的薄弱环节的不断发现和不断改进的过程。为了提高系统的可靠性,从而延长系统的使用寿命,降低维修费用,提高经济效益,在系统规划、设计、制造和使用的各个阶段都要贯彻以可靠性为主的质量管理。

1.6 可靠性与质量管理

质量与可靠性,在许多场合中被当做同义词来使用,然而它们之间是有区别的。无论是部件、整机还是由若干设备组成的系统,其质量一般是指它们在出厂时能否满足规范上的各项性能要求;而其可靠性则是指在满足规范要求的性能下,能维持多长时间,两者的本质区别在于使用寿命的着眼点。从产品的设计一开始,设法使系统在规定的使用条件下,在规定的使用时间内,完成规定任务是产品可靠性设计的重要任务。

当人们的设计思想从单纯考虑传统意义上的性能转变为求得高效能的同时,关于质量的观念也在变革,由过去狭隘的质量观念转向现代的全面的质量观念。现代的质量观念认为:产品质量是产品满足使用要求的特性综合,即具有适用性。性能、可靠性、维修性、安全性、适应性、经济性及时间性都是产品质量的基本目标,如图 1-1 所示。性能、可靠性、维修性、安全性和适应性是产品的内在质量特性。经济性是指产品应具有合理的寿命周期费用;时间性是指应在一定时间内满足用户对产品交货期和数量的要求,这两个质量特性均反映了产品的竞争能力,称之为外延质量特性。产品的质量的优劣取决于以上七个基本目标的综合评价结果,前两项尤为重要。

由此可见,可靠性是产品基本质量的目标之一,是产品质量的重要组成部分。但是长期以来人们往往忽视了可靠性对保证产品全面质量的重要作用。例如,1978 年我国首次自行研制成功了黑白电视机,但出厂不久就出现打火、冒烟、无光、无声及其他故障现象。为什么会出现这样的现象呢?因为我国首次生产的黑白电视机的质量指标虽然包括黑白对比度、音量、音色等性能指标,却没有列入最主要的可靠性指标——环境适应性和平均寿命。为了弄清当时国产电视机的可靠性,进行了国产电视机的可靠性试验。试验结果表明:国产电视机的平均寿命不到 500h,出厂一年内的平均返修率达 86.92%,其中第一个月的早期故障返修率为 20.8%,甚至经受不住运

输振动,从电视机厂运到商店后,开箱不合格率达 23.6%。有些产品即使有很好的性能,如果温度一高就不能正常工作,或工作几十个小时后,产品就出现这样或那样的故障,那么再好的性能又有什么用?由此可以看出产品的可靠性在产品质量中是至关重要的,为了强调“适应性”,必须把“可靠性”从“质量”中分离出来加以强调。

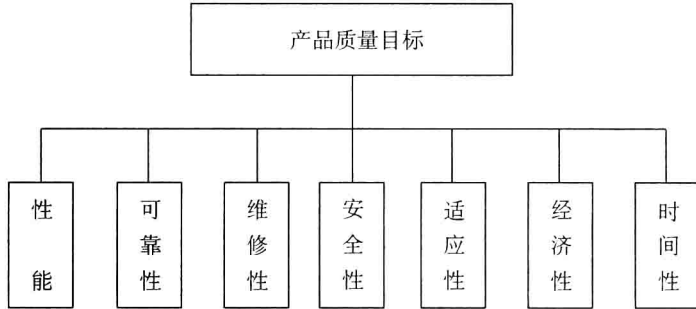


图 1-1 产品质量基本目标

复习思考题 1

- 1-1 简述可靠性的定义及特点。
- 1-2 简述可靠性的分类方式。