

“十二五”国家重点图书

KEKAOXING YU ZHINENG WEIHU

可靠性与智能维护

• 闫纪红 编著



NLIC2970887985



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书

KEKAOXING YU ZHINENG WEIHU

可靠性与智能维护

闫纪红 编著



NLIC2970887985

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书是“十二五”国家重点图书。

本书系统地介绍了可靠性、维修性及预测性智能维护的基本概念、基本理论及其工程应用。全书内容有三部分:第一部分为可靠性工程,包括基础知识、常用分布函数、可靠性系统、可靠性设计、故障模式影响及危害性分析、故障树分析等;第二部分为智能维护系统,包括维护管理系统、维修性和可用性、预测性智能维护等;第三部分为相关技术论题,包括有效维护的备件管理、智能维护集成工具关键技术。

本书可作为高等院校工业工程、机械工程及自动化等相关专业的研究生、本科生教材,也可作为从事可靠性与智能维护研究的科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

可靠性与智能维护/闫纪红编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.9
ISBN 978-7-5603-3237-6

I. ①可… II. ①闫… III. ①可靠性工程
IV. ①TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038386 号

责任编辑 田新华
封面设计 高永利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 381 千字
版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3237-6
定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

可靠性工程作为一门独立学科受到重视已经有五十多年的历史,可靠性工程不只应用于航空、航天、兵器、船舶、核工业、电子等技术部门,而且在机械、汽车、冶金、建筑、石油化工等民用工业中也逐渐得到应用。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交叉学科,它涉及基础科学、技术科学和管理科学的许多领域,其推广和应用已给企业和社会带来了巨大的经济效益。

智能维护属于预测性维护,智能维护系统的采用将极大地促进国家的经济发展。智能维护技术的出现进一步提高了企业设备的开动率,并且随着技术的发展,可使企业的制造设备达到近乎于零的故障停机性能。智能预诊技术为智能维护的实施提供了依据。只有以准确的预诊结果为基础,智能维护才有现实的意义。预诊技术越来越受到研究者和工业界的重视。最近,在美国和我国,先后成立了 PHM (Prognostic and Health Management) 委员会,致力于预诊技术的研究和预诊产品的开发。2009 年 9 月 27 日到 10 月 1 日,在美国的圣地亚哥召开了第一届 PHM 年会,对最新的预诊技术的发展进行了介绍。

我国的可靠性、维修性及预测性智能维护起步较晚,无论从发展需求还是与国外水平相比都有明显的差距。为适应当前装备建设的新形势,尽快扭转我国与国外水平的差距,首先必须加强对可靠性、维修性及预测性智能维护工作的管理,大力发展相关方面的技术,同时也必须重视专业人才培养,这对促进我国可靠性、维修性综合保障工程的深入发展,更有效地提高装备质量具有重要的意义。鉴于这一目的,我们参考国内外有关文献,结合作者在预测性智能维护方面的研究成果,编写了《可靠性与智能维护》一书。

本书较为系统地介绍了可靠性、维修性和预测性智能维护的基本概念、基本理论及其工程应用。本书分为三部分,共由 9 章组成。第一部分包括 1~4 章,主要介绍了可靠性基础知识、常用分布函数、可靠性系统、可靠性设计、故障模式影响及危害性分析、故障树分析等内容。第二部分包括 5~7 章,主要介绍了智能维护系统,是本书的核心内容,结合编者在智能维护方面的研究成果编写而成,包括维护管理系统、维修性和可用性、预测性智能维护等内容。第三部分包括 8、9 两章,主要介绍了有效维护的备件管理、智能维护集成工具关键技术等内容。

本书注重内容的新颖性,反映预测性智能维护的最新研究状况和发展趋势;内容论述循序渐进,由浅入深,理论联系实际。在论述中结合编者在智能预诊方面的研究实例,帮助读者进一步理解预测性智能维护的实际应用。本书是可靠性与智能维护方面较为合适的基础性用书。本书可作为高等院校工业工程、机械工程及自动化等相关专业的研究生、本科生教材,也可作为从事可靠性与智能维护研究的科研人员的参考书。

本书参阅了国内外可靠性理论与应用方面的大量文献和书籍,在编者对预测性智能维护方面研究成果的基础上,加以系统整理和精心编写而成。本书初稿曾在哈尔滨工业大学研究

生、高年级本科生中讲授,并在此基础上广泛吸取许多读者的建议,经过全面修改和补充而成。在此谨向广大读者表示深切的谢意。

本书由哈尔滨工业大学工业工程系主任闫纪红教授(博导)撰写。感谢智能维护工程实验室博士生李林、郭超众、赵德滨、卢磊、冯春花、孟悦,硕士生王玉燕、熊星满、段立莹、化定国、王伟、王子墨、陈宇等在本书编写中所做的收集资料工作。同时,本书的顺利完成得到哈尔滨工业大学出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

作者

2012年6月于哈尔滨

目 录

第一部分 可靠性工程

第1章 可靠性概论	1
1.1 可靠性的基本概念	1
1.1.1 可靠性的发展历程	1
1.1.2 可靠性技术研究的重要性	4
1.1.3 可靠性的定义	4
1.2 可靠性的特征量	6
1.2.1 可靠度与不可靠度	6
1.2.2 失效密度函数	7
1.2.3 失效率	9
1.2.4 失效率 $\lambda(t)$ 与可靠度 $R(t)$ 、失效概率函数 $f(t)$ 的关系	11
1.2.5 失效率曲线	11
1.2.6 平均寿命	13
1.2.7 可靠寿命	14
1.2.8 有效度(可用度)特征量	15
1.3 概率的基本概念及基本运算	15
1.3.1 随机事件的概念	15
1.3.2 随机事件的概率	15
1.3.3 概率运算的基本公式	16
习题一	20
第2章 可靠性问题中常用的分布函数	21
2.1 二项分布	21
2.2 泊松分布	21
2.3 指数分布	22
2.4 正态分布	24
2.4.1 标准正态分布	25
2.4.2 截尾正态分布	27
2.5 对数正态分布	28
2.6 韦布尔分布	29
2.7 次序统计分布	33
2.8 极值分布	34
2.8.1 I型极大值分布	35
2.8.2 I型极小值分布	36
习题二	36

第3章 可靠性系统	37
3.1 串联系统	38
3.2 并联系统	39
3.3 混联系统	42
3.3.1 串-并联系统	43
3.3.2 并-串联系统	44
3.4 表决系统	45
3.5 储备系统	47
3.5.1 储备单元完全可靠的储备系统	48
3.5.2 储备单元不完全可靠的储备系统	50
3.6 复杂系统	51
习题三	52
第4章 可靠性设计	54
4.1 可靠性预计	54
4.1.1 单元可靠性预计	56
4.1.2 系统可靠性预计	56
4.2 可靠性分配	62
4.2.1 平均分配法	62
4.2.2 加权分配法	63
4.2.3 再分配法	64
4.2.4 代数分配法	65
4.2.5 相对失效率与相对失效概率法	67
4.2.6 按可靠度变化率的分配方法	69
4.2.7 动态规划分配法	70
4.3 故障分析	71
4.3.1 FMECA 列表分析法	71
4.3.2 FMECA 矩阵分析方法	74
4.4 系统安全与故障分析树	75
4.4.1 系统安全	75
4.4.2 故障树分析	75
习题四	87

第二部分 智能维护系统

第5章 维护管理系统介绍	89
5.1 设备维护管理发展历程	89
5.1.1 维护管理的阶段划分	89
5.1.2 维护管理的发展	90
5.1.3 欧美国家设备维护管理现状	90

5.1.4 我国设备维护管理现状	91
5.2 设备维护管理模型	94
5.3 设备维护管理系统的构建	98
5.3.1 维护管理系统结构	98
5.3.2 维护管理的理论层面	99
5.3.3 维护管理的应用实现层面	101
习题五	109
第6章 维修性、维修和可用性	110
6.1 维修性的概念	110
6.2 停机时间分析	111
6.3 维修性参数	112
6.4 维修时间分布	114
6.4.1 维修时间服从指数分布	115
6.4.2 维修时间服从对数正态分布	115
6.5 维修类型	116
6.6 预防性维修策略	117
6.7 维修费用	120
6.8 维修优化	122
6.8.1 最优更换时间	123
6.8.2 修理与更换	124
6.9 维修性验证	125
6.10 可用性	126
6.10.1 概念及内涵	127
6.10.2 指数可用度模型	128
6.10.3 系统可用度	129
6.11 后勤保障	132
习题六	137
第7章 预测性智能维护	139
7.1 原理与优势	139
7.2 信号处理与在线监测技术	141
7.2.1 信号处理	141
7.2.2 在线监测	148
7.3 数据融合技术	150
7.3.1 数据融合的级别	150
7.3.2 数据融合的技术和方法	151
7.4 数据挖掘	154
7.4.1 数据挖掘的分类	156
7.4.2 数据挖掘的智能计算方法	163
7.4.3 数据挖掘的支撑技术	165

7.4.4 数据挖掘与统计分析	167
7.5 智能预诊技术	168
7.5.1 预诊方法在转子不平衡中的应用	171
7.5.2 预诊信息的 WEB 发布	176
习题七	178

第三部分 相关技术论题

第 8 章 有效维护的备件管理	179
8.1 备件管理的定义和目的	179
8.1.1 备件管理的定义	179
8.1.2 备件管理的目的	180
8.1.3 备件管理模式的选择	180
8.1.4 备件管理的内容	182
8.2 备件消耗与库存模型	182
8.2.1 备件技术管理	182
8.2.2 备件消耗定额	183
8.2.3 备件储备定额	184
8.2.4 备件储备定额的计算和库存模型确定	185
8.3 备件的 3A 管理模型	192
8.4 备件计划管理	202
8.4.1 备件计划管理流程和部门职责	202
8.4.2 备件计划的编制和调整	205
习题八	207
第 9 章 智能维护集成工具关键技术	208
9.1 基于 J2EE 的智能维护集成工具	208
9.1.1 基于 J2EE 的智能预诊集成工具构成	208
9.1.2 基于 J2EE 的智能预诊实现	209
9.2 基于 J2EE 平台的智能维护关键技术	210
9.2.1 Java 和 Matlab 交互实现预诊算法	210
9.2.2 JSP 技术数据库技术及数据库连接池技术	212
9.2.3 Ajax 异步刷新技术	213
9.2.4 Jfree Chart 绘图技术	214
9.2.5 Joone 开源神经网络技术	216
9.3 基于 J2EE 的智能维护集成工具开发	218
9.3.1 基于 J2EE 的智能维护集成工具结构设计	219
9.3.2 实时动态监测模块	220
9.3.3 数据查询模块与数据表分页	221
9.3.4 特征提取模块	222

9.3.5 特征选择模块	224
9.3.6 智能预诊模块	225
习题九	227
参考文献	228

第一部分 可靠性工程

第1章 可靠性概论

1.1 可靠性的基本概念

1.1.1 可靠性的发展历程

可靠性是产品的重要质量指标,它标志着产品不会丧失工作能力的可能程度。可靠性概念的产生,可以追溯到1939年,当时美国航空委员会提出飞机事故率的概念和指标要求,这是最早的飞机安全性和可靠性定量指标。在早期,人们对“可靠性”这一概念的理解仅仅从定性方面,没有数值量度。但是为了更好地表达可靠性的准确含义,应有定量的尺度来衡量它。在第二次世界大战后期,德国火箭专家 R. Lusser 首先提出概率乘积法则,将系统的可靠度看做其各子系统的可靠度乘积,从而算得 V-II 型火箭诱导装置的可靠度为 75%,首次定量地表达了产品的可靠性。但是从 20 世纪 50 年代初期开始,在可靠性的测定中更多地引进了统计方法和概率概念以后,定量的可靠性才得到广泛应用,可靠性问题才作为一门新的学科被系统地加以研究。可靠性技术是以提高产品质量为核心,以概率论、数理统计为基础,综合应用电子学、物理学、化学、机械工程学、现代管理学等各领域知识的一门综合性和边缘性学科。

美国对可靠性的研究始于第二次世界大战,当时雷达系统发展迅速而电子元件却屡出故障。因此,早期的可靠性研究,重点放在故障占大半的电子管方面,不仅重视其电气性能,而且重视其耐震、耐冲击等可靠性方面的研究。1942 年美国麻省理工学院(MIT)对真空管的可靠性作了深入的调查研究。1952 年 11 月美国成立了“电子设备可靠性顾问团”(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment——AGREE)。该团对电子产品的设计、试制、生产、储存、运输、使用等各个方面的可靠性问题,进行了全面的调查研究,并于 1957 年 6 月发表了著名的《军用电子设备的可靠性报告》。该论文除论述了产品在上述各个环节中的可靠性问题外,还比较完整地论述了可靠性的理论基础及研究方法。1954 年美国召开了第一届可靠性与质量管理学术会议。1962 年又召开了第一届可靠性与可维修性学术会议及第一届电子设备故障物理学术会议,将对可靠性的研究扩展到对可维修性的研究,进而深入到研究产品故障的机理方面。

美国对于机械可靠性的研究,开始于 20 世纪 60 年代初期,其发展与航天计划有关。当时在航天方面由于机械故障引起的事故多、损失大,于是美国宇航局(NASA)从 1965 年开始进行机械可靠性研究。例如,用超载负荷进行机械产品的可靠性试验验证;在随机动载荷下研究机械结构和零件的可靠性;将预先给定的可靠度目标直接落实到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件的设计中去等。

日本在 1956 年由美国引进可靠性技术。1958 年日本科学技术联盟设立了可靠性研究委员会。1960 年在日本成立了可靠性及质量控制专门小组。1971 年日本召开了第一届可靠性学术讨论会。日本将可靠性技术推广应用到民用工业部门并取得很大成功,大大地提高了其产品的可靠度,使其可靠性产品,例如汽车、彩电、照相机、收录机、电冰箱等,畅销到全世界,带来巨大的经济效益。日本人曾预见今后产品竞争的焦点在于可靠性。

英国于 1962 年出版了《可靠性与微电子学》(Reliability and Microelectronics)杂志。法国国立通讯社也在这一年成立了“可靠性中心”,进行数据的收集与分析,并于 1963 年出版了《可靠性》杂志。前苏联在 20 世纪 50 年代就开始了可靠性理论的研究,1964 年,当时的苏联及东欧各国在匈牙利召开了第一届可靠性学术会议,至 1977 年已先后召开了四次这样的会议。

国际电子技术委员会(IEC)于 1965 年设立了可靠性技术委员会,1977 年又更名为可靠性与可维修性技术委员会。它对可靠性的定义、用语、书写方法、可靠性管理、数据收集等方面,进行了国际的协调工作。

20 世纪 60 年代以来,空间科学和宇航技术的发展提高了可靠性的研究水平,扩展了其研究范围。对可靠性的研究,已经从电子、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等一般产业部门,以及工业产品的各个领域。当今,提高产品的可靠性已经成为提高产品质量的关键。今后只有提高那些高可靠性的产品及其企业,才能在激烈的竞争中生存下来。不仅如此,国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识。这不仅是因为高可靠性产品的使用期长,而且通过可靠性设计,可以有效地利用材料,减少加工工时,获得体积小、质量轻的产品。

在我国,最早是由电子工业部门开始开展可靠性方面工作的,在 20 世纪 60 年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。70 年代初,航天部门首先提出了电子元器件必须经过严格筛选。70 年代中期,由于中日海底电缆工程的需要,提出可靠性元器件验证试验的研究,促进了我国可靠性数学的发展。从 1984 年开始,在国防科工委的统一领导下,结合中国国情并积极汲取国外的先进技术,组织制订了一系列关于可靠性的基础规定和标准。1985 年 10 月国防科工委颁发的《航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定》是我国航空工业的可靠性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987 年 5 月,国务院、中央军委颁发《军工产品质量管理条例》明确了在产品研制过程中要运用可靠性技术。1987 年 12 月和 1988 年 3 月先后颁发的国家军用标准 GJB 368—78《装备维修性通用规范》和 GJB 450—88《装备研制与生产的可靠性通用大纲》,可以说是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,这些都进一步促进了我国可靠性理论与工程研究的深入开展。

在现代生产中,可靠性技术已经贯穿于产品的初期研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及维修保养等各个环节。

从经济学的观点来讲,为了减少维修费用,提高产品的利用率,高可靠性是非常必要的。但也不是可靠性最好时总的消耗费用一定最低,因为还有产品的制造成本问题,需要综合考虑、优化选择,以找出使总费用最低的最佳可靠度。

利用概率论的方法可以把产品发生故障的规律作为随机现象来研究。所以,通常所说的可靠度,一般不是指某一特定的可靠程度,而是针对该种型号产品总体的可靠程度而言。当

然,就单件产品而言,如果能在其长期运行的条件下,观测其故障规律,则不仅能够估计出一些产品的可靠性,也能估计出该产品总体的可靠性。

可靠性理论在其发展过程中形成了以下三个主要领域。

1. 可靠性数学

可靠性数学是可靠性研究的最重要的理论基础之一。它主要研究与解决各种可靠性问题的数学方法模型,研究可靠性的定量规律;属于应用数学范畴,涉及概率论、数理统计、随机过程、运筹学及拓扑学等数学分支;应用于可靠性的数学收集、数据分析、系统设计及寿命试验等方面。

2. 可靠性物理

可靠性物理又称失效物理,是研究失效的物理原因与数学物理模型及检测方法与纠正措施的一门可靠性理论。它使可靠性工程从数理统计方法发展到以理化分析为基础的失效分析方法。它是从本质上、从机理方面探究产品的不可靠因素,从而为研制、生产高可靠性产品提供科学的依据。

3. 可靠性工程

可靠性工程是对产品(零部件、元器件、总成设备或系统)的失效及其发生的概率进行统计、分析,对产品进行可靠性设计、可靠性预计、可靠性试验、可靠性评估、可靠性检验、可靠性控制、可靠性维修及失效分析的一门包含了许多工程技术的边缘性工程学科。它是立足于系统工程方法,运用概率论与数理统计等数学工具(属可靠性数学),对产品的可靠性问题进行定量的分析;采用失效分析方法(可靠性物理)和逻辑推理对产品故障进行研究,找出薄弱环节,确定提高产品可靠性的途径,并综合地权衡经济、功能等方面的得失,将产品的可靠性提高到满意的程度的一门学科。它包括了对产品可靠性进行工作的全过程,即从对零件、部件和系统等产品的可靠性方面的数据进行收集与分析做起,对失效机理进行研究,在这一基础上对产品进行可靠性设计;采用能确保可靠性的制造工艺进行制造;完善质量管理与质量检验以保证产品的可靠性;进行可靠性试验来保证和评价产品的可靠性;以合理的包装和运输方式来保证产品的可靠性;指导用户对产品的正确使用、提供优良的维修保养和社会服务来维持产品的可靠性。即可靠性工程包括了对零件、部件和系统等产品的可靠性数据的收集与分析、可靠性设计、预测、试验、管理、控制和评价。

在可靠性工程中,很重视对现场使用的数据和实验数据的收集与交换。许多国家都有全国性的数据收集与交换组织,建立有各种数据库。因为数据是可靠性设计和可靠性研究的基础。在整个可靠性工程中,都是通过可靠性数据和信息反馈来改进产品可靠性的。

可靠性设计是可靠性工程的一个重要分支,因为产品的可靠性在很大程度上取决于设计的正确性。在可靠性设计中要规定可靠性和维修性的指标,并使其达到最优。

可靠性预计是可靠性设计的重要内容之一,它是一种预报方法,在设计阶段即从所得的失效率数据预报零部件和系统实际可能达到的可靠度,预报这些零件、部件和系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率。在设备设计的初期,及时完成可靠性预计工作,可以了解该设备中各零、部件之间可靠度的相互关系,找出提高整个设备的可靠度的有效途径。

可靠性设计的另一重要内容是可靠性的分配,它是将系统规定的容许失效概率合理地分配给该系统的零部件。在可靠性设计中采用最优化方法进行系统的可靠性分配是当前可靠性研究的重要方向之一,称为可靠性优化设计。

由于在不同的领域中可靠性工程所处理的具体问题有所不同,内容也有差异,但都是以系统的方法、综合的方法,以长远眼光来研究问题,不仅重视技术,也重视管理,以取得系统的最大经济效益和运行的安全可靠为目的。

1.1.2 可靠性技术研究的重要性

“可靠性”顾名思义,指的是“安全性”、“无故障”,人们进行的一切生产实践都是被期盼为安全和成功。比如一台设备被期望安全运转,一座建筑被期望长期牢固,一项工程被期望顺利完成。

在工程中可靠性是用以衡量产品质量的动态指标。一台设备或系统的性能,可以用性能指标来描述,如发动机的输出功率、机床主轴转速和进刀量、汽车的行驶速度等。而可靠性则描述了设备或系统在特定条件下保持规定性能指标的能力,该种能力就是质量。就是说具有同样性能指标的产品,它们的寿命和故障率却可能不同。在现代科技飞速发展、新型产品不断涌现的国际化市场中,只有那些具有高可靠性指标的产品和生产企业,才能在日益激烈的市场竞争中存活下来。所以,可靠性的研究具有十分重要的意义。可靠性的重要性具体体现在以下几个方面。

1. 可靠性高的产品具有安全性

提高产品的可靠性,可以防止事故和故障的发生,尤其是避免灾难性事故的发生。1986年,美国“挑战者”号航天飞机由于一个密封圈失效,起飞 76 s 后爆炸,造成 12 亿美元的经济损失;1992 年,我国发射“澳星”时,由于一个零件的故障,使“澳星”发射失败,造成巨大经济损失;2003 年,美国“哥伦比亚”号太空船在返回地面大气层时,由于机身上的一块隔热板被外挂油箱的脱落泡沫击中而刺穿,太空船烧成火球后解体。现代高科技产品,由于其功能的严格性和结构的复杂性,对安全性提出了更高的要求。如“阿波罗”号宇宙飞船,具有 720 万个零件,有 120 所大学 15 000 多个研究部门约 42 万人参与研制,如此规模庞大、内容复杂的工程,任一环节的失误都可能导致严重后果,必须运用可靠性技术与工程管理才能保证其安全性。

2. 可靠性高的产品具有实用性

提高产品的可靠性,可以减少停机时间和维护人员,提高产品使用率。现代产品工作环境变得更加严酷,从陆地、海洋到太空,严酷的环境对系统高可靠性、高安全性等综合特性提出了挑战,系统要求的持续无故障任务时间加长,如太空探测器的长时间无故障飞行要求,潜水机器人、人造心脏、心脏起搏器的长期安全工作等,迫使系统必须有良好的可靠性。

3. 可靠性高的产品能创造大的经济效益

产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费减少,使产品生产和使用的总费用降低;产品可靠性的提高可减少系统中的备用台数,降低了设备投资;产品用可靠性设计可以设计出相对体积小、质量小的产品,避免了用传统经验方法估算安全系数取值偏大而造成材料的浪费。更重要的是,可靠性高的产品可以提高品牌和企业信誉,具有竞争力,从而占领市场,取得战略性成功和巨大的经济效益。

1.1.3 可靠性的定义

最早的可靠性定义是由美国的 AGREE 在 1957 年的报告中提出来的。1966 年美国的 MIL-STA-721B 又较正规地给出了传统的或经典的可靠性定义,即“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”。它为世界各国的标准所引用。

在上述可靠性定义中,含有以下因素。

1. 对象

可靠性问题的对象是产品,它是泛指,可以是元件、组件、零件、部件、总成、机器、设备,甚至整个系统。研究可靠性问题时首先要明确对象。不仅要确定具体的产品,而且还应该明确它的内容和性质。如果研究对象是一个系统,不仅包括硬件,而且也包括软件和人的判断和操作等因素在内,则需要从人-机系统的观点去观察和分析问题。

2. 使用条件

使用条件包括运输条件、储存条件、使用时的环境条件(如温度、压力、湿度、载荷、振动、腐蚀、磨损等等)、使用方法、维修水平、操作水平以及运输、储存与运行条件,对可靠性都会产生很大影响。

3. 规定时间

与可靠性关系非常密切的是关于使用期限的规定,因为可靠度是一个有时间性的定义。对时间性的要求一定要明确。时间可以是区间 $(0, t)$,也可以是区间 (t_1, t_2) 。有时对某些产品给出相当于时间的一些其他指标可能会更明确,例如对汽车的可靠性可规定行驶里程(距离);有些产品的可靠性则规定周期、次数等会更恰当。

4. 规定功能

研究可靠性要明确产品的规定功能的内容。一般来说,所谓“完成规定功能”是指在规定的使用条件下能维持所规定的正常工作而不失效(不发生故障),即研究对象(产品)能在规定的功能参数下正常运行。应注意,“失效”不一定仅仅指产品不能工作,因为有些产品虽然还能工作,但由于其功能参数已漂移到规定界限之外了,即不能按规定正常工作,也视为失效。要弄清该产品的功能是什么,其失效或故障(丧失规定功能)又是怎样定义的。

5. 概率

“可靠度”是可靠性的概率表示,把概念性的可靠性用具体的数学形式——概率表示,这就是可靠性技术的出发点。因为用概率来定义可靠度后,对元件、组件、零件、部件、总成、机器、设备、系统等产品的可靠程度的测定、比较、评价、选择等才有了共同的基础,对产品的可靠性方面的质量管理才有了保证。

因此,讨论产品的可靠性问题时,必须明确对象、使用条件、使用期限、规定的功能等因素,而用概率来度量产品的可靠性时就是产品的可靠度。可靠性定量表示的另一特点是其随机性。因此,广泛采用概率论和数理统计方法来对产品的可靠性进行定量计算。

产品运行时的可靠性,称为工作可靠性(Operational Reliability),它包含了产品的制造和使用两方面因素,且分别用固有可靠性和使用可靠性来反映。

固有可靠性(Inherent Reliability)是指在生产过程中已经确立了的可靠性。它是产品内在的可靠性,是生产厂在模拟实际工作条件的标准环境下,对产品进行检测并给以保证的可靠性。它与产品的材料、设计与制造工艺及检验精度等有关。

使用可靠性(Use Reliability)与产品的使用条件密切相关,受到使用环境、操作水平、保养与维修等因素的影响。使用者的素质对使用可靠性影响很大。

对于实行维修制度的产品,一旦发生故障或失效,总是修复后再使用。因此,对于这类产

品不发生故障或可靠性好固然很重要,发生故障或失效后能迅速修复以维持良好而完善的状态也很重要。产品的这种易于维修的性能,通常称为产品的维修性。

维修性和维修度的提出,使得可靠性与可靠度又有广义与狭义之分,一般谈到可靠性,是指上述的狭义可靠性。

广义可靠性(Generalized Reliability)是指在其整个寿命期限内完成规定功能的能力。它包括可靠性(即狭义可靠性)与维修性。由此可见,广义可靠性对于可能维修的产品和不可能维修的产品有不同的意义。对于可能维修的产品来说,除了要考虑提高其可靠性外,还应考虑提高其维修性,而对于不可能维修的产品来说,由于不存在维修的问题,只需考虑提高其可靠性即可。

与广义可靠性相对应,不发生故障的可靠度(即狭义可靠度)与排除故障(或失效)的维修度合称为广义可靠度。

因此,可靠性与维修性都是相对于失效或故障而言的。不言而喻,明确失效(故障)的定义,研究失效(故障)的类型和原因,对于研究可靠性和维修性及广义可靠性等都很重要。

失效(Failure),对于可修复的产品,统称为故障,其定义为产品丧失规定的功能。这不仅指规定功能的丧失,亦包括规定功能的降低等。

1.2 可靠性的特征量

在上一节中,我们讨论了可靠性的定义,说明了可靠性是产品的一种基本属性。这种属性不仅要定性,还要定量表示。在产品可靠性研究中,和其他的产品技术指标一样,必须要有一个数量指标,这个数量指标称为可靠性指标。

可靠性特征量是用来表示产品总体可靠性高低的各种可靠性数量指标的总称。

可靠性特征量的实际数值称为真值,它是一个很难求得理论值。因为不同的计算和统计方法得到的同一个特征量可能有不同的数值。真值在理论上是严密的,唯一存在的,但实际上是难知的。在实际的可靠性工作中,特征量通常是通过若干个样本试验所得的观测数据,经过一定的数理统计而得到的数值,这个值仅是对真值的估计,称为特征量估计值。这种估计值可以是多种方法估计得到的,如点估计、单边估计和双边估计等。如果这个估计值是按国家规定标准所给出的要求值(即理论希望的真值)的估计值,那么这个估计值又称为特征量的观测值。这种观测值是比较容易计算的,也是可靠性工作者用各种方法,使之接近真值而努力的方向。还有一种是借助前人经验、手册而得到的,常称为预计值。对主要的可靠性特征量在下面进行一一介绍。

1.2.1 可靠度与不可靠度

可靠度(Reliability)是“产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率”。显然,规定的时间越短,产品完成规定的功能的可能性越大;规定的时间越长,产品完成规定功能的可能性就越小。可见,可靠度是时间 t 的函数,故也称为可靠度函数,记为 $R(t)$,通常表示为

$$R(t) = P(T \geq t) \quad 0 \leq t \leq +\infty \quad (1.1)$$

式中, t 为规定的时间; T 为产品寿命。根据可靠度的定义可知, $R(t)$ 描述了产品在 $(0, t)$ 时间段内完成规定功能的概率。

与可靠度相对应的是不可靠度,表示产品在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定

的功能的概率,因此又称为失效概率,记为 F 。失效概率 F 也是时间 t 的函数,故又称为失效概率函数或不可靠度函数,并记为 $F(t)$ 。它也是累积分布函数,故又称为累积失效概率。显然,它与可靠度成互补关系,即

$$\begin{aligned} 0 \leq R(t) + F(t) &= 1 \\ F(t) &= 1 - R(t) = P(T < t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

由定义知,可靠度与不可靠度都是对一定时间而言,若所指时间不同,则同一产品的可靠度值也就不同。

假如在 $t=0$ 时有 N 件产品开始工作,而到 t 时刻有 $n(t)$ 个产品失效,仍有 $N-n(t)$ 个产品继续工作,则 $R(t)$ 的估计值(观测值)为

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (1.3)$$

$$F(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (1.4)$$

例 1.1 有 50 个在恒定载荷条件下运行的某规格轴承,运行记录如表 1.1 所示,求这个规格轴承分别在 100 h, 400 h 时的可靠度观测值和不可靠度观测值。

解 按照式(1.3),可得两个时刻的可靠度观测值

$$R(100) = \frac{N - n(100)}{N} = \frac{34}{50} = 0.68$$

$$R(400) = \frac{N - n(400)}{N} = \frac{22}{50} = 0.44$$

表 1.1 运行时间及失效数

运行时间/h	10	25	50	100	150	250	350	400	500	600	700	1 000
失效数/个	4	2	3	7	5	3	2	2	0	0	0	0

产品开始工作($t=0$)时,都是好的,故有 $n(t)=n(0)=0$, $R(t)=R(0)=1$, $F(t)=F(0)=0$ 。随着工作时间的增加,产品的失效数就不断增多,可靠度就相应降低。当产品的工作时间 t 趋向于无穷大时,所有的产品不管其寿命有多长,最后都要失效的。因此, $n(t)=n(\infty)=N$,故 $R(t)=R(\infty)=0$, $F(t)=F(\infty)=1$ 。即可靠度函数 $R(t)$ 在 $[0, +\infty)$ 时间区间内为递减函数,而 $F(t)$ 为递增函数。如图 1.1(a)所示, $F(t)$ 与 $R(t)$ 的形状正好相反。

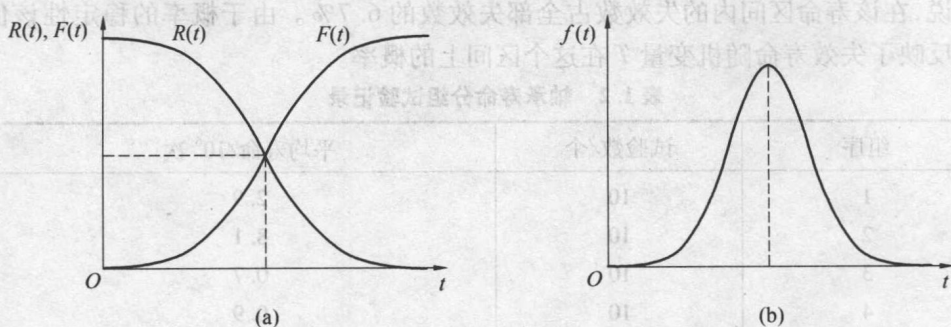


图 1.1 可靠度、不可靠度及失效密度函数

1.2.2 失效密度函数

如果 $F(t)$ 为可微的,即 $dF(t)/dt$ 存在,那么称 $f(t)=dF(t)/dt$ 为失效密度函数(见图 1.1