

交通系统高等院校内部教材

船舶机械可靠性技术

江彦桥 编著
李杰仁 主审

上海海运学院

前 言

船舶的使用质量很大程度上决定于船舶机械设备的可靠性。船舶机械的管理、使用维修人员应当掌握可靠性管理的方法。可靠性理论是最近几十年发展起来的一门新兴学科。目前国内外都在研究用可靠性理论指导船舶机械的科学管理问题。研究船舶机械可靠性的目的是, 保证船舶机械设备无故障地工作, 保障其在整个寿命周期中的技术维护和修理费用最低。

本书主要阐述可靠性技术的原理及其在船舶机械方面的应用。书中在介绍可靠性技术的一般原理的基础上, 突出可靠性在船舶机械使用、维修管理方面的实际应用, 讨论了船舶柴油机、船舶辅助机械的可靠性、维修性、故障特点、维修方针, 以及维修间隔期的选择等实际问题。

本书注意培养学生掌握可靠性的基本分析方法。在内容上涉及到船舶机械的故障规律、特征、寿命特点、故障数据分析、维修特点、维修策略; 在方法上则注意采用诸如故障模式效应分析、故障树分析以及人一机工程等学科的新方法, 因而本书亦适合不同层次不同专业技术人员自学。

上海海运学院轮机管理专业本科自 1987 年开设“船舶机械可靠性技术”课程, 编者曾编写过一本试用教材。本书基于这一油印教材, 接合编者为轮管专业 7 届本科和 2 届研究生的授课体会以及为上海远洋公司轮机长机务管理人员的十余次专题讲座讲稿的基础上, 并收进了国内外较新的有关文献资料编写而成。

本书承上海海运学院付院长李杰仁教授审阅, 编者在此表示感谢。

目前, 有关船舶机械可靠性理论方面的研究还不够充分, 统计资料及故障数据尚待进一步收集, 一些问题还在研究探索之中, 因此本书仅是引玉之砖, 且限于水平, 书中错误之处在所难免, 读者如能给予批评指正, 将是对编者最好的支持和鞭策。

编者

1993 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 可靠性学科发展简史	1
§ 1-2 可靠性的定义	2
§ 1-3 船舶机械可靠性的特点及研究现状	3
第二章 可靠性的特征量	6
§ 2-1 可靠度	6
一、故障分布函数	6
二、可靠度	7
§ 2-2 故障密度函数与故障率	8
一、故障密度函数	8
二、故障率	9
§ 2-3 平均寿命和可靠寿命	10
一、平均寿命	10
二、可靠寿命	12
三、中位寿命	12
四、特征寿命	13
第三章 船舶机械故障的分类、模式和规律	14
§ 3-1 故障的分类及故障模式	14
一、故障模式	14
二、故障的分类	16
§ 3-2 故障规律	17
第四章 船舶机械常见的故障分布	20
§ 4-1 指数型故障分布	20
一、分布特性	21
二、适用范围	22
三、特征量求法	22
§ 4-2 正态型故障分布	22
一、分布特性	23
二、适用范围	24
三、特征量求法	24
§ 4-3 威布尔型故障分布	25
一、分布特性	25
二、威布尔型分布的应用	27
三、特征量求法	27
§ 4-4 用威布尔概率纸求故障分布函数	28

一、威布尔概率纸的原理	28
二、威布尔概率纸的使用步骤	29
第五章 船舶机械系统可靠性分析与计算	32
§ 5-1 系统可靠性的基本概念	32
一、系统与单元	32
二、可靠性逻辑框图	32
§ 5-2 系统可靠性分析与计算	33
一、串联系统的可靠性分析与计算	34
二、并联系统的可靠性分析与计算	35
三、复杂系统的可靠度	41
第六章 故障模式和效应分析与故障树分析	43
§ 6-1 故障模式和效应分析	43
一、FMEA的特点及功用	43
二、FMEA的基本步骤	43
三、FMEA例	44
§ 6-2 故障树分析	45
一、FTA 的应用符号	46
二、故障树的建造	47
三、故障树的定性分析	48
四、故障树的定量分析	51
五、故障树分析举例	55
第七章 可维修系统的可靠性	58
§ 7-1 概 述	58
一、维修的三个基本要素	58
二、系统的时间要素	58
§ 7-2 维修性	59
一、维修性的定义	59
二、维修性的特征值	60
三、产品寿命周期费用和维修性	62
§ 7-3 马尔可夫过程与可维修系统的可靠性	63
一、马尔可夫过程	63
二、确定可维修系统可靠度的步骤	63
三、两单元工作储备系统的可靠度	64
四、两相同单元可维修旁联系统的可靠度	67
§ 7-4 有效度	69
一、单部件系统的有效度	69
二、两单元工作储备系统的有效度	71
第八章 船舶机械的维修策略	73
§ 8-1 维修方针对机电设备可靠性的影响	73

一、事后维修	73
二、预防维修	74
三、维修思想的新发展	75
§ 8 - 2 定时(期)维修的最佳维修间隔期	75
一、零部件的更换方式和修理方式	75
二、有效度最大的预防维修间隔期	76
三、按设备维修总费用最小原则确定最佳维修周期	78
§ 8 - 3 状态监测技术及其在视情维修中的作用	79
一、性能参数监测	80
二、振动监测	82
三、磨损监测	84
§ 8 - 4 以可靠性为中心的维修	86
一、RCM 的基本观点	87
二、RCM 的具体方法	87
三、RCM 的特点及应用	89
第九章 船舶机械故障数据管理	90
§ 9 - 1 船舶机械故障数据收集	90
一、船舶机械使用运行阶段的故障数据收集	90
二、船舶机械故障数据收集管理体制	91
三、船舶机械故障报告单	92
四、故障数据库的建立和故障数据的编码	93
§ 9 - 2 船舶机械各类故障统计数据举例	93
一、船舶动力装置各部件故障数据	94
二、锅炉故障统计数据	95
三、离心泵的故障统计数据	96
四、船舶自动化设备故障修理统计分析	97
第十章 提高船舶机械可靠性的途径	99
§ 10 - 1 固有可靠性和使用可靠性	99
§ 10 - 2 船舶机械设计的可靠性要求	100
§ 10 - 3 船舶机械的维修性设计	101
§ 10 - 4 制造与可靠性	103
§ 10 - 5 提高操作管理人员的可靠性	104
§ 10 - 6 船舶机械可靠性管理例	106
一、柴油发电机组有效性和成本问题	106
二、船舶维修管理系统	108

第一章 绪 论

§1-1 可靠性学科发展简史

可靠性问题最早是由美国军用航空部门提出的。他们首先认识到设备装置因不可靠而付出的代价实在太大了。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为21000架,比被击落的数字多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,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。

50年代起,美国的可靠性问题越来越突出。因此,在1952年11月成立了电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)。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及手册,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,举行学术年会。在1958年~1962年间,各发达国家都相继仿效,大力开展可靠性的研究工作。

从60年代起,在工业发达的国家内,由于产品的复杂化和工作环境条件的严酷,对产品的可靠性要求越来越高。除了航空、航天、尖端武器和电子等工业之外,可靠性工程技术和管埋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、通讯和医药等。从最复杂的宇宙飞船到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车,乃至细小的可置于人体内的心脏起搏器,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-11号飞船,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,这样多的零(元、器)件非具有高可靠性不可。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。登月成功后,美国宇航局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之后,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,在于具有高可靠性。日本由此获得巨额利润。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。而日本人则断言,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6400km,而到70年代初提高到5年或80000km。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, 是由冷凝器循环泵发生故障和人为因素造成的。1984年12月, 美国联合碳化物公司设在印度中央邦首府博帕尔的农药厂, 由于地下毒气罐阀门失灵造成了3000人死亡的严重事故。这些事例都说明了对机械产品的可靠性进行研究的必要性和重要性。

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。有些部门甚至规定, 没有可靠性指标, 未进行可靠性设计的产品不得投产。

§ 1—2 可靠性的定义

所谓可靠性, 对设备来讲是指设备处于使用状态下, 在规定时间内保持“完好状态”的能力。人们对设备不仅要求有良好的功能, 还要求能长时间持续地完成规定的功能。因此, 可靠性是一项时间性的质量标准。对不可修复的产品(如灯泡、电子管等)和发生故障后可以修复的产品(如水泵、柴油机等)其意义略有不同。对于前者, 要求不发生故障, 以可靠性表示; 对于后者则要求一旦发生故障应易于排除, 尽快恢复正常状态, 以维修性和有效性表示。

GB3187—82(可靠性基本名词术语及定义)规定的可靠性定义是: “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。”如果用概率来表示和度量这种能力, 就是可靠度。

可靠性定义的要点如下:

1. “分析的对象”。定义中的分析对象称为“产品”。“产品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, 可以表示产品的总体、样本等”。产品不同, 其可靠性要求也不相同。

在研究可靠性问题时, 首先要明确被分析的是一个什么对象, 是零件、设备, 还是系统。在可靠性理论中, 分析元件的可靠性和分析系统可靠性在方法上有很大的差异。如果是系统, 是否包括人的因素在内。要明确故障是由于什么原因引起的, 因为有时系统的故障不是由设备引起的, 而是人为因素引起的, 在这种情况下, 需要从人——机系统的观点出发去观察和分析问题。

2. “规定的条件”。包括产品在运输、储存和使用中所在的环境(如温度、湿度、气压、噪声和腐蚀等)和工作条件(如载荷、转矩、电流、电压、振动和冲击等)。如电机, 在陆上和海上使用的可靠性就不同, 低负荷和超负荷使用的可靠性也不同。此外, 使用方法、维修措施、操作技术水平的高低对产品可靠性也有很大影响。

3. “规定的时间”。可靠性是时间性的质量指标。产品只能在一定的时间范围内达到目标可靠度, 不可能永远保持目标可靠度不降低。因此对时间的规定一定要明确。这里的时间是广义的, 根据产品的不同, 有时可能是应力循环次数、转数, 或里程数等相当于时间的量。

4. “规定的功能”。常用产品的各种性能指标来刻画。通过试验, 产品的各项规定的性能指标都已达到, 则称该产品完成规定功能。否则称该产品丧失规定的功能。我们把

产品丧失规定功能的状态叫做产品发生“故障”或“失效”。相应的各项性能指标就叫做产品“故障判据”或“失效判据”。在具体进行可靠性工作中，合理明确地给出“失效判据”是很重要的，否则可靠性问题就会争论不休。

例如，晶体管作为失效判据的有 PN 结正向电压降、反向漏电流、击穿电压、线性漂移等。这些指标都必须在规定的允许值以内，若超过了允许值就是失效——即不可靠。

5. “能力”。可靠性定义中的“能力”具有统计学的意义。这是由于产品在工作中发生故障带有偶然性，所以不能仅看一个产品的工作情况，而是应该在观察大量的同类产品之后，方能确定其可靠性的高低。为此，产品在规定的时间内和规定的条件下，失效数与产品数之比愈小，其可靠性就愈好，或者产品在规定的条件下，平均无故障工作时间愈长，其可靠性也就愈高。由于可靠性所研究的产品相当广泛，各种各样，因此用来度量产品可靠性的“能力”也是多种多样的。这里的“能力”通常指的是各种可靠性指标。常用的可靠性指标有“可靠度”、“平均寿命”、“失效率”等。这些可靠性指标构成了可靠性研究中的基本概念，将在第二章中逐个讨论。

需要指出的是，可靠性与质量管理不是一回事，两者之间既有联系，又有区别。从历史发展来看，产品质量管理经历了统计质量管理 (SQC) → 质量保证 (QA) → 全面质量管理 (TQC) → 可靠性保证 (RA) 的过程。

可靠性在理论、方法和技术上都有新的内容，它不能被传统的质量管理所包含和代替。60 年代提出的“全面质量管理 TQC”，实质上是从产品设计、研制、制造直到使用的各个阶段都要贯彻以可靠性为重点的质量管理。

可靠性与质量管理的第一个区别是时间因素与度量。可靠性关心的是 $t > 0$ 的质量，即“明天的质量”。它所使用的度量都与时间有关，例如前述的可靠度、失效率和平均寿命等。而质量管理关心的是 $t = 0$ 的质量，即“今天的质量”，或出厂检验时的质量。第二个区别是，传统的质量管理是从制造阶段开始，而可靠性必须从设计阶段开始，并且贯穿于从设计、研制一直到使用、维修、报废的全过程。

§ 1-3 船舶机械可靠性的特点及研究现状

船舶机械与其他陆用机械相比，其工作条件和运行使用有很大的差异。

首先，船舶是一个远离陆地的孤立系统，一旦发生故障，就不能得到及时的修理和备件的补充。因此为完成船舶的各项任务，应保证这个系统能够较长时间的安全运行。

其次，海洋气象环境复杂，工作环境严峻，局部部件发生故障可能导致海损事故的发生，结果不仅影响到运输任务的完成，还有可能对人员生命和财产造成危害，而且事故本身还会对周围海域的环境带来污染。

船舶动力装置的工作参数范围变化大，工作条件严酷，发生故障后要由船员判断，并采取应急措施。因此要求船员不仅懂得操纵，还要了解设备的原理和结构，了解和认识故障的客观规律，以掌握较高的维修技术和管理方法。

近年来，随着新技术革命的成果在船舶上的广泛应用，新造船舶的航速逐渐增加，自动化程度也相应得到提高。另外，随着自动化水平的提高，船舶实现了一定时间的机舱无人值班制度。船员的编制逐年减少，从 60 年代 50 余人减少到目前不足 20 人。这些发展

趋势,对船舶机械的可靠性提出了新的要求。

动力装置和辅助系统的发展,自动化程度的提高,使得机电设备日趋复杂。元件数量的增加,导致了船舶机械可靠性下降。

高投资(投资密集型)船舶(例如集装箱船舶)从营运上要求提高有效利用率的程度,比普通船舶的要求更为强烈。因为这些船舶即使延误较短的航运时间,也可能带来较大的损失。

这些由于船舶机械的复杂化,使用环境的恶劣,设备不可靠带来的严重损失,以及高自动化的需要和对经济效益的追求等等,都使得人们逐渐认识到,传统的凭经验定性孤立的分析方法已远不能适应现代航运的要求。另一方面,近年来陆上工业、航空航天、电子、计算机等工程领域广泛应用的现代管理思想、技术已十分成熟,这些可望大大提高船舶设备的可靠性。因此国内外都十分重视对船舶机械可靠性问题的研究。

船舶机械可靠性研究现状可归纳为以下几条:

- (1) 介绍可靠性概念,引入其理论,成立研究机构;
- (2) 船舶机械可靠性理论方法研究;
- (3) 运用可靠性理论,分析装置、设备的可靠性;
- (4) 收集船舶机械可靠性数据,建立故障数据库;
- (5) 将可靠性理论用于船舶的维修。

美国海军在60年代就开始探讨如何将可靠性理论应用于船舶。海军部门组织编制颁发了一批可靠性标准,建立数据收集系统,大力推动学术界的研究。如今可靠性和维修性技术已得到普及。如在80年代初,美国海军海上系统司令部对所属DDG—2和FAG—1级舰的22种设备作了寿命可靠性分析,得到了许多有益的结论,并使用计算机模拟来预测海军每次新设计的可靠性和维修性,将可靠性和维修性设计方法用于90年代DDG—51型驱逐舰而研制的燃——蒸联合动力装置的设计中。

日本在民用船舶可靠性研究方面做了许多工作。日本造船研究会在60年代组成了专门的研究班子,用了4年的时间对28艘船进行了跟踪调查随访,收集了柴油机主机累积运行30万小时的近1万个故障数据,将这些故障进行了对比分析,作出了专题调研报告。报告分析了故障和维修工作的关系,提出把提高全寿命成本的效益作为设计船舶动力装置的指导思想,强调要加强动力装置的负荷变化及燃料质量对动力装置故障影响的研究。

据介绍,日本在船舶可靠性研究方面的课题可概括为以下几个方面:

(1) 掌握船舶动力系统整体可靠性,确立各设备可靠性对整体影响的评价方法。研究项目有:

- a) 动力装置故障树分析;
 - b) 动力装置维修性及复杂性调查。
- (2) 确定“以可靠性为中心的维修”的适情修理方式的评估方法。研究项目有:
- a) 主机故障危险程序分析;
 - b) 维修性和可靠性与船龄相关分析;
 - c) 柴油发电机故障、维修工作分析;
 - d) 最佳维修时机的选择。

(3) 研究船用动力装置故障特征的宏观规律及外界条件对故障的影响。具体项目有:

- a) 季节、航线对故障影响分析;
 - b) 重大故障原因分析及实况统计;
 - c) 故障率与复杂性分析;
 - d) 重大故障分析。
- (4) 研究不同设备、零件的微观故障特点, 具体研究项目包括:
- a) 海水冷却管系可靠性分析;
 - b) 各类动力装置可靠性分析;
 - c) 柴油机主机故障率比较;
 - d) 发电机故障及维修分析;
 - e) 自动控制设备故障原因分析;
 - f) 泵故障分析。
- (5) 维修性宏观分析, 研究的项目包括:
- a) 主机维修性与复杂性分析;
 - b) 维修影响因素调查;
 - c) 维修性统计分析。

我国有组织的船舶可靠性研究工作始于 80 年代初期。迄今为止, 开展了不少可靠性、维修性知识的普及工作; 建立了研究组织; 培养了一批从事可靠性研究的技术人材; 取得一批科研成果; 部分开展了可靠性指标论证和可靠性设计工作; 制定了一批可靠性、维修性标准; 并用“以可靠性为中心”的理论来指导维修改革。

应当看到, 无论在国内还是在海外, 对船舶可靠性理论的研究都很不充分。为此, 船舶可靠性理论和应用有着广阔的天地, 有待我们去开发, 这是历史赋予我们的使命。

第二章 可靠性的特征量

为了利用数学方法对可靠性各个方面的特征进行确切的定量计算、比较和预测，有必要给它们以各种定量表示，故引入如下特征量。

§ 2-1 可靠度

一、故障分布函数

在可靠性研究中，我们往往对于某个特定时间 t 之前发生故障的概率感兴趣。在 t 时刻前机件的故障是观测的随机事件，与此随机事件有关的随机变量 τ 为故障前工作时间。

在 t 时刻发生故障的概率为 $F(t)$

$$F(t) = P(\tau < t) \quad (2-1)$$

即设备的无故障工作时间 τ 小于给定的时间间隔 t 的概率。

由式 (2-1) 可知，故障概率 $F(t)$ 是随机变量 τ 的分布函数，所以，称为故障分布函数。这种分布函数的形式如图 2-1 所示。故障分布函数连续而单调递增： $t=0$ 时， $F(0)=0$ 和 $t \rightarrow \infty$ 时， $F(t) \rightarrow 1$ 。故障分布函数可以根据观测机件的使用数据近似地求得。

N 表示同一种类机件的个数，在 $t=0$ 时开始使用或试验， t 时刻前机件故障数为 $n(t)$ 。由于某个事件的概率可由大量试验中该事件发生的频率来估计。因此，经验故障分布函数 $F^*(t)$ 可表示为

$$F^*(t) = \frac{n(t)}{N}$$

即某一时刻的经验故障分布函数可用到该时刻出了故障的产品数量与投入使用或试验的产品数量之比来表示。

根据大数定理，当 $N \rightarrow \infty$ 时，

$$F^*(t) \rightarrow F(t)$$

因此，当 N 数相当大时，

$$F^*(t) = \frac{n(t)}{N} \approx F(t) \quad (2-2)$$

经验分布函数 $F^*(t)$ 是在给定时间间隔内故障概率的统计估计。

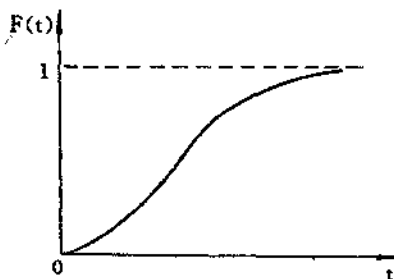


图 2-1 $F(t)$ 与时间的关系

二、可靠度

在规定条件下, 在规定时间内产品完成规定功能的概率。

$$R(\tau) = P\{\tau > t\} \quad (2-3)$$

即在给定的时间 t 的可靠度 $R(t)$ 为随机变量 τ 大于时间 t 的概率。

故障和无故障工作是对立的事件, 因此

$$R(\tau) = 1 - F(t) \quad (2-4)$$

概率 $R(t)$ 也称为可靠度函数, 它大概的形状如图 2-2 所示。可靠度函数是单调递减函数: $t=0$ 时, $R(0)=1$; $t \rightarrow \infty$ 时, $R(t) \rightarrow 0$ 。因此, 任何设备无故障工作概率值, 在 $1 \sim 0$ 的范围内变化, 且随着设备工作时间的增加而减少。

如果同型机件的数量相当大时, 则可靠度也可根据统计数据确定

$$R^*(t) = \frac{N - n(t)}{N} \approx R(t) \quad (2-5)$$

可靠度的选择是一个值得研究的课题。对用户而言, 故障少、可靠度高就是好的设备。然而, 设备的可靠度过高, 会使购置费大大地增加, 这又成了弊病。对于系统、设备, 不能片面地为了提高可靠度而不顾其它。如飞机, 若过份强调可靠性, 就会过于笨重, 承载能力下降, 而成本增加。为此, 应全面地综合平衡功能、可靠性、成本等方面的要求, 否则, 即使可靠性再好, 也是无意义的。

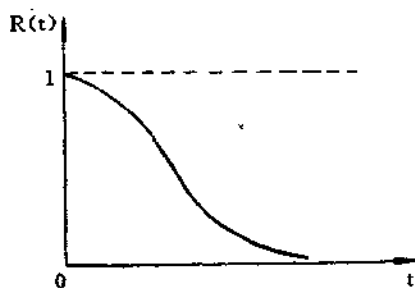


图 2-2 可靠度与时间的关系

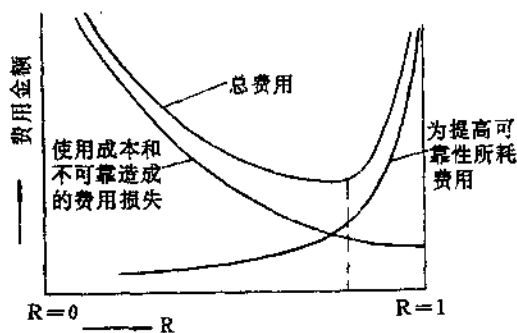


图 2-3 费用与可靠度

为了提高产品的可靠性, 满足各方面的要求, 要权衡开展可靠性研究的费用和因产品不可靠造成的费用损失, 找出最佳可靠度。为此, 应采取有效措施提高费用有效度(可靠度/费用), 使单位费用所能达到的可靠度最高。

§ 2-2 故障密度函数与故障率

一、故障密度函数

从概率论中知道, 当分布函数连续可导时, 其密度函数可由分布函数求导而得。如果故障分布函数 $F(t)$ 连续可导, 则故障密度函数应是

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2-6)$$

故障密度函数的一般意义表示产品在 t 时刻故障的变化速度。

值得注意的是, 如果故障分布函数 $F(t)$ 不是连续可导时, 就不能用上述微分公式来求得(瞬时)故障密度 $f(t)$, 应该用经验(平均)密度公式。事实上, 经验密度公式在现统计中最常用, 因为它不必考虑故障是什么分布或是否连续可导, 只要有一定数量的观察数据就行了。

设有 N 个产品, 到 t 时刻的故障数为 $n(t)$, 到 $t + \Delta t$ 时的故障数为 $n(t + \Delta t)$, 即在 Δt 时间内的故障数为 $\Delta n(t) = n(t + \Delta t) - n(t)$, 则用经验公式有:

$$f(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} \approx \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{n \cdot \Delta t} \quad (2-7)$$

由式(2-7)可知, 故障密度可定义为: 产品在一定的条件下工作, 在 Δt 的单位时间内可能发生的故障数与产品原有全部工作数之比。

因为:
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

则
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (2-8)$$

通常, 产品故障密度 $f(t)$, 可以通过分析和处理产品寿命试验(或产品使用)的统计资料而得到。因此, 通过产品故障密度来计算或分析产品故障概率和可靠度是可靠性计算中的一个重要方法。但要得到准确的故障密度函数 $f(t)$, 就需要在产品寿命试验中收集和处埋产品工作时间 $[0, \infty)$ 内的大量且完整的数据, 这是比较费时和麻烦的。在实践中, 往往容易得到某一段时间的局部数据。为了能够运用这些局部资料对产品进行可靠性计算, 引进另一个衡量产品可靠性的尺度——故障率 $\lambda(t)$ 。

二、故障率

假设已知某个产品工作到 t 时刻尚未发生故障,再工作 Δt 时间,它会不会在这个 Δt 间隔内发生故障呢?这是一个条件概率问题。故障率 $\lambda(t)$ 正是反映产品在 Δt 时间内由完好状态转向故障状态的概率。

故障率 $\lambda(t)$ 的定义为:产品工作到某一时刻 t 后,在仍能正常工作的产品中,在下一 Δt 的单位时间内发生故障的概率。根据定义有

$$\lambda(t) = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t} \approx \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t} \quad (2-9)$$

式中, N ——产品总数;

$n(t)$ ——产品到 t 时刻的故障数;

$n(t+\Delta t)$ ——产品到 $t+\Delta t$ 时刻的故障数;

$N - n(t)$ ——在 t 时刻仍能正常工作的产品数(也称残存产品数)。

故障率也可定义为:产品工作到某一时刻 t 后,在下一 Δt 单位时间内故障的产品数与 t 时刻时仍能正常工作的产品数之比。

故障率是衡量产品可靠性常用的尺度之一。故障率越低,则可靠性越好。

故障率的单位用时间表示时,有二种表示法:一种单位叫“菲特(fit)”,它适用于可靠度很高的产品(如电子产品等)的故障率,即1菲特 $= 10^{-9}$ /小时。另一种单位是每千小时的故障百分率,即 $\% / 10^3$ 小时 $= 10^{-5}$ /小时 $= ' / 10^3$ 小时。

讨论:

(1) $\lambda(t)$ 与 $f(t)$ 的比较

$\lambda(t)$ 与 $f(t)$ 含义上有所不同; $\lambda(t)$ 是一条件概率,与时刻 t 以前的状况有关,它有“到 t 时刻为止仍能正常工作的产品数”这一条件为前提;而 $f(t)$ 为无条件概率,它与时刻 t 以前的状况无关。

$\lambda(t)$ 与 $f(t)$ 都是反映产品故障速度的,但 $\lambda(t)$ 比 $f(t)$ 反映更灵敏。 $\lambda(t)$ 是反映在某一个时刻 t 时能正常工作的产品的故障速度的指标;而 $f(t)$ 是反映在整个过程中所有产品的故障速度。

(2) $\lambda(t)$ 与 $f(t)$ 、 $R(t)$ 的关系

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t} \\ &= \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \frac{\frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{\Delta t \cdot N}}{\frac{N - n(t)}{N}} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$f(t) = \frac{-dR(t)}{dt}$$

$$\text{故 } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{-dR(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{-d \ln R(t)}{dt} \quad (2-11)$$

经变换后两边积分得:

$$\ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2-12)$$

由式(2-12)可知, 产品可靠度是以故障率 $\lambda(t)$ 的时间积分为指数的函数。此式为可靠度 $R(t)$ 的一般方程, $\lambda(t)$ 为变量。

从式(2-12)看, 引进故障率 $\lambda(t)$ 来计算可靠度, 似乎没有带来多大的便利, 因为要得到故障率函数 $\lambda(t)$, 仍要求 t 在区间 $[0, \infty)$ 内的大量完整数据。然而, 当 $\lambda(t) = \text{常数}$ 时, 即 $\lambda(t) = \lambda$, 则 $R(t) = e^{-\lambda t}$

此时, 故障率 λ 就与时间 t 无关。这样运用从局部故障资料得到的故障率 λ , 即可很方便地计算任意时间的可靠度 $R(t)$ 。 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 时的可靠度 $R(t)$ 是属于最简单的指数分布。实践证明, 通常机电产品在正常工作期的故障率 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 。而对用户有现实意义的恰恰就是产品的正常工作期的可靠度。因此, 最简单的指数分布在可靠性研究中, 是应用颇为广泛的基本分布之一。

§ 2-3 平均寿命和可靠寿命

一、平均寿命

1. 定义

定义: 产品投入运行到发生故障(或失效)的工作时间的平均值称为产品平均寿命。

平均寿命分为两种情况: 一种是对不可修复的产品的平均寿命, 称为失效前的平均工作时间, 记为MTTF(mean time to failure)。另一种是对可修复的产品相邻两次故障(从一次故障到下一次故障)之间的平均寿命, 称为平均故障间隔时间, 记为MTBF(mean time between failures)。

MTTF与MTBF是等效的, 统称为平均寿命 m 。

2. 计算

假定有 n 台设备, 到 t_1 时刻发生故障的有 r_1 台, 从 t_1 到 t_2 时刻发生故障的有 r_2 台, ..., 从 t_{k-1} 到 t_k 时刻发生故障的有 r_k 台, 而且 $\sum_{i=1}^k r_i = n$, 则这批设备的平

均寿命就是总工作时间除以故障总个数所得的平均工作时间, 即

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i r_i}{\sum_{i=1}^k r_i} = \sum_{i=1}^k t_i \frac{r_i}{n} = \sum_{i=1}^k t_i f_i \quad (2-14)$$

式中 f_i 为设备在 t_i 时刻的平均故障 (失效) 频率。

当 k 无限增大时, 频率 f_i 就趋向概率 p_k , 则上述平均寿命便为数学期望。寿命为离散型的, 其平均寿命为

$$E(T) = \sum_{k=1}^{\infty} t_k p_k \quad (2-15)$$

连续型时, 即为

$$E(T) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt \quad (2-16)$$

3. 平均寿命 m 与失效 (故障) 率 λ 的关系

$$\text{因 } f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}$$

$$m = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) dt = - \int_0^{\infty} t dR(t)$$

用分部积分法积分上式得

$$m = - [tR(t)]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} R(t) (-dt) = - [tR(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt$$

$$\because R(0) = 1, R(\infty) = 0, - [tR(t)]_0^{\infty} = 0$$

$$\therefore m = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-17)$$

因为可靠度函数的一般方程式为 $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$, 对于 $R(t)$ 呈最简单指数分布, 即当 $\lambda(t) = \lambda = \text{常数}$ 时, $R(t) = e^{-\lambda t}$,

$$\begin{aligned} \text{则 } m &= \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(\frac{-1}{-\lambda} \right) dt \\ &= -\frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) = -\frac{1}{\lambda} [e^{-\lambda t}]_0^{\infty} \\ &= -\frac{1}{\lambda} [e^{-\infty} - e^0] = \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (2-18)$$

于是得 $m = \frac{1}{\lambda}$

即可靠度呈最简单指数分布时的平均寿命 m 恰好等于故障率的倒数。

例 1 设某机件的寿命服从指数分布, 其可靠度 $R(t) = e^{-\lambda t}$, 试求:

(1) 故障密度函数 $f(t)$;

(2) 机件工作到平均寿命时的可靠度 $R(m)$ 。

解: (1) $f(t) = F'(t) = [1 - R(t)]' = -R'(t)$

$$\therefore f(t) = -(e^{-\lambda t})' = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0)$$

$$(2) R(m) = e^{-\lambda \cdot m} = e^{-\lambda \left(\frac{1}{\lambda}\right)} = e^{-1} \approx 0.368$$

表示机件工作到平均寿命时, 其可靠度已下降到 36.8%。

二、可靠寿命

由前面已知可靠度函数 $R(t)$ 是时间 t 的递减函数, 从 $R(0) = 1$ 逐渐下降到 $R(\infty) = 0$ 。如果具体的 $R(t)$ 函数式已确定, 则可由已知的时间 t_r 求其对应的 $R(t_r)$ 。反过来, 也可由已知的可靠度 r 来求其对应的时间 t_r 。

定义: 当产品的可靠度下降到规定的可靠度 r 时产品已工作的时间, 称为可靠寿命, 即满足 $R(t_r) = r$ 的时间 t_r 称为可靠寿命。

经常要用到二个特殊的可靠寿命, 就是下面的中位寿命与特征寿命。

三、中位寿命

定义: 当可靠度下降到 0.5 时产品已工作的时间, 即满足 $R(t) = 0.5$ 的可靠寿命称为中位寿命, 记为 $t_{0.5}$ 。

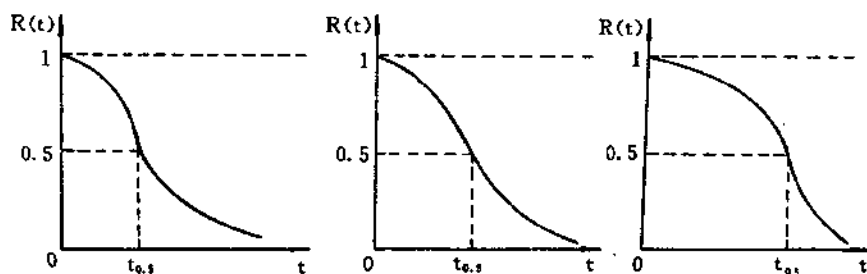


图 2-4 中位寿命的位置

中位寿命只表示可靠度下降一半时已工作的时间, 并不表示全寿命的一半。“中位”二字是对可靠度而言的, 不是对寿命而言的。至于中位寿命落到整个寿命的哪一点上, 与具体的可靠度的分布 $R(t)$ 有关。从图 2-4 可以看到: 对于不同的 $R(t)$, 纵坐标为 0.5 时对应的横坐标可能在寿命期中间, 也可能在前期或后期。