

维修工程学

徐维新

编著

何杰

刘慧军

徐志敏

电子工业出版社

维修工程学

徐维新

编著

刘梦军 何 杰 徐志敏

电子工业出版社出版

(京)新登字第 055 号

【内容摘要】 本书系统地介绍了现代维修管理的理论和方法,并重点介绍现代维修理论所需的理论——可靠性基本理论,举例众多,便于自学。

本书适用于大专院校学生作教材,可供产品总体设计、技术设计和管理者参考。

维 修 工 程 学

徐维新

编著

刘梦军 何 杰 徐志敏

*

电子工业出版社出版

(北京万寿路)

东方印刷厂印装

新华书店北京发行所经销

787×1092 毫米 1/16 开 27.5 印张 66 千字

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-5053-1775-X/TN·88

印数 1—2 000 册 定价: 17.50 元

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 可靠性特征量	(7)
§ 2.1 可靠度	(7)
§ 2.2 故障密度	(11)
§ 2.3 故障率	(12)
§ 2.4 平均寿命及其方差	(15)
§ 2.5 故障率曲线	(20)
§ 2.6 常用分布	(24)
第三章 单元可靠性估计	(33)
§ 3.1 估计问题概述	(33)
§ 3.2 用图分析法进行统计推断	(36)
§ 3.3 用数值分析法检验假设	(48)
§ 3.4 用数值分析法估计参数	(59)
第四章 典型系统可靠性分析	(88)
§ 4.1 系统可靠性分析概述	(88)
§ 4.2 系统可靠性模型的建立	(96)
§ 4.3 串联系统的可靠性	(101)
§ 4.4 并联系统的可靠性	(104)
§ 4.5 串—并联系统和并—串联系统的可靠度	(108)
§ 4.6 k/n 系统的可靠性	(110)
§ 4.7 冗余系统	(115)
§ 4.8 一般网络的可靠性	(123)
§ 4.9 多阶段任务系统可靠性的分析——任务最小割集法	(132)
第五章 故障模式、影响及危害度分析	(138)
§ 5.1 概述	(138)
§ 5.2 FMECA 的实施步骤	(139)
§ 5.3 举例	(144)
第六章 故障树分析法	(147)
§ 6.1 概述	(147)
§ 6.2 确定顶事件建造故障树	(152)
§ 6.3 故障树的结构函数	(157)
§ 6.4 故障树的定性分析	(161)
§ 6.5 故障树的定量分析	(166)
第七章 可修系统的可靠性	(185)
§ 7.1 单部件系统的可靠性	(185)

§ 7.2	马尔可夫型可修串联系统	(191)
§ 7.3	马尔可夫型可修并联系统	(196)
§ 7.4	马尔可夫型可修 k/n 系统	(201)
§ 7.5	马尔可夫型可修贮备系统	(202)
§ 7.6	有优先权的两部件冷贮备系统	(208)
第八章	人的可靠性	(210)
§ 8.1	基本概念	(210)
§ 8.2	提高人可靠性的途径	(213)
第九章	系统可靠性指标的确定、分配和预计	(220)
§ 9.1	可靠性要求的确定	(220)
§ 9.2	可靠性分配	(221)
§ 9.3	系统的可靠性预计	(248)
第十章	系统的维修性	(260)
§ 10.1	维修性概述	(260)
§ 10.2	对维修性的定性要求	(263)
§ 10.3	维修性特征量	(265)
第十一章	系统的可用性	(282)
§ 11.1	可用性	(282)
§ 11.2	系统可用度计算	(287)
§ 11.3	可用性分配	(288)
第十二章	维修管理技术概述	(290)
§ 12.1	以可靠性为中心的维修思想	(290)
§ 12.2	维修决策的一般程序	(292)
第十三章	逻辑分析决断法与维修周期	(295)
§ 13.1	逻辑分析决断法	(295)
§ 13.2	预防维修周期	(300)
附录	参数漂移失效数学模型	(314)
第十四章	维修数据的统计处理	(317)
§ 14.1	维修数据的统计与整理	(317)
§ 14.2	维修数据的分析	(319)
第十五章	维修备件管理	(329)
§ 15.1	维修备件的确定	(329)
§ 15.2	备件贮备策略	(339)
§ 15.3	确定性存贮模型	(341)
§ 15.4	随机性存贮模型	(346)
第十六章	计划评审技术	(349)
§ 16.1	概述	(349)
§ 16.2	网络图	(350)
§ 16.3	网络图的计算	(358)

§ 16.4	网络计划的优化.....	(373)
§ 16.5	网络图在执行中的检查和调整.....	(385)
§ 16.6	决策网络.....	(387)
第十七章	装备的效能—费用分析概述.....	(392)
§ 17.1	装备全寿命费用.....	(392)
§ 17.2	全寿命费用分析的准则.....	(395)
§ 17.3	全寿命费用的估算方法与模型.....	(397)
§ 17.4	装备“效能”的定义与数学模型.....	(409)
§ 17.5	决策指标——效费比.....	(411)
附表		417
主要参考书目		432

第一章 绪 论

现代科学技术的发展,使技术系统(如武器装备、航空航天系统等)迅速发展,功能理想化,结构复杂化,维修难度和要求更高了,特别要求节省维修时间和费用,确保全系统全寿命期的效能—费用达到最优化。这就使得人们去研究维修工程,使得维修工程从经验维修发展为科学维修,至今已形成维修工程学。它不仅适用于军用技术系统,而且也适用于民用技术系统。

一、维修工程学的形成

技术系统的维修并不是什么新问题,它是随着技术系统的产生而产生的,只是以往的系统简单,且其故障影响小,维修工作只限于检查保养和排除故障,从维修技术到维修管理,以及维修人员的训练都较简单,没有形成系统的理论。

在第二次世界大战的推动下,现代科学技术的迅速发展使得军用技术系统发展很快,应用技术的现代化,系统规模大型化,结构复杂,保证了系统功能多样化,威力巨大,成为战斗力诸因素的重要因素。同时,一旦发生故障造成的损失也是巨大的,甚至贻误战机,影响战争的胜负,这既是重大的军事问题,又是政治问题。因此,战争迫使维修保障系统能以最短的时间、利用最少的人、时间和物力等资源将系统修复好。当然,这是非常困难的。据美军 50 年代统计表明,空军的维修人员和费用分别占空军总人数和总费用的 $1/3$; 60 年代的军用飞机,维修工作量相当于 15 年前的 3 倍。我国某飞机 15 年的维修费用相当于购置费的 6 倍。因此,迫使人们研究维修技术、费用和管理。维修工作涉及的范围广,尤其是诸如维修指导思想、维修策略、维修决策、维修体制和方式等,以及在有限的人力、时间和资源的约束下,怎样取得最大的维修效果;怎样对故障进行系统地研究,从宏观上掌握故障发生和发展的规律;怎样进行宏观管理,合理地确定维修周期,发展新的维修技术和方法等。所有这些问题,都必须运用现代化技术,运用系统工程的思想、方法,从装备论证、研制、生产、使用维修,直到退出现役的全过程,进行全系统全寿命的分析和管理的,才能获得好的维修效果和效能—费用。

60 年代前后,许多新兴学科,如可靠性理论、运筹学、系统工程、现代管理学、人素工程等相继出现和成熟,为解决维修工程问题提供了理论基础;计算机的出现和利用为故障诊断、分析和数据分析提供了手段;维修实践积累了经验,发展了理论,在理论指导下不断改革维修技术和管理,逐渐形成以可靠性为中心的维修思想和全系统全寿命效能—费用分析的观念。这就使维修技术和管理从个别和具体的维修活动、维修技术和管理中抽象出来形成一门新兴和多学科的边缘性学科——维修工程学。

二、维修工程学研究的主要内容

维修工程学是多学科的边缘性学科,从全系统全寿命的高度来统筹效能—费用问题,确保对系统实施快速、经济、有效的维修,充分发挥系统的效能。

在维修工程学指导下,根据需求和可能,在论证阶段提出系统的效能指标(含性能指标,可靠性指标,维修性指标)和后勤保障方案。在设计阶段,将上述指标设计到系统中

去，赋予系统效能。在生产阶段，要把可靠性和维修性加工到系统中，并且考核是否达到指标。在使用维修阶段，系统地全面地搜集和分析使用、维修、费用等方面的资料和数据，及时地掌握系统的可靠性水平，适时地组织维修，确保系统能有效地经济地保持和恢复可靠性；同时，向采购部门、设计制造单位反馈可靠性和维修性信息，作为修改设计和研制新系统的依据。

维修工程贯穿全系统全寿命各阶段，涉及到设计、生产、使用维修等许多部门和专业，需要各方面的人员参加，具有系统工程的特点，已成为系统工程的一个分支。

就其内容来说，它仍在发展中，尚未定论，说法不一。基本上可分为以下几个方面：

(一) 维修工程技术方面

1. 可靠性和维修性理论

当今评价系统质量的优劣，通常用效能、经济性、安全性的综合水平来衡量，其中效能用系统的性能、可靠性和维修性三要素表示。

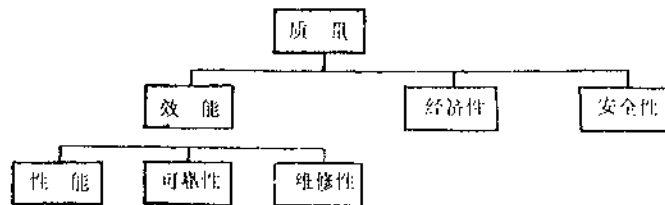


图 1.1

性能——系统具有的功能及技术指标，表示系统有什么用；

可靠性——系统具有不易发生故障的能力，表示系统保持功能的能力有多大；

维修性——系统一旦发生故障便于维修的能力，表示使系统恢复规定功能的能力有多大。

上述三要素都是在设计时赋予系统的品质，具有先天性。

2. 故障理论和维修技术

故障理论是研究故障发生机理的，如故障物理、自动检测技术、故障诊断等。维修技术主要包括对系统维护保养、维修等技术，通过研究，寻求合理、经济、有效的维修方式和技术等。各门专业课主要研究这些问题，故在维修工程学中，一般不再涉及它。

3. 维修手段

维修手段包括维修中直接和间接用于维修的种种工具、仪器、设备、设施，以及有关的文件——各种技术文件，如系统的性能参数、维修规范等。

(二) 维修管理方面

以导弹武器系统维修工程为例，它是一个多层次、多环节、多专业、多部门的系统工程，不亚于制造工程。为了使维修工程运转灵活，取得高效率低费用，必须应用系统工程的方法进行全系统全寿命的维修管理。主要包括：

1. 维修策略

它是从维修总体上研究维修体制和编制、维修等级，研究指导维修工程的思想、方针

和原则,拟定维修规章制度、维修人员培训管理等。

2. 维修决策理论

它是对具体系统研究确定维修计划、内容、方式、方法等决策的理论。包括线性规划、计划评审技术等最优化技术,预测技术,仿真技术,以及备件贮备——库存论等

3. 维修质量管理

它是直接控制维修活动的理论。包括维修数据统计分析、维修质量分析,控制图等理论和方法。

4. 技术经济分析

不仅要分析使用维修阶段的费用与各种维修方案的关系,而且要分析全系统全寿命总费用,对总费用与效能进行综合权衡。

5. 维修信息管理

维修信息是维修决策的基础。维修信息管理包括维修数据的收集、分析、传递、贮存等,是维修管理的重要内容。

总之,维修工程学是现代科学技术和现代管理理论同维修实践相结合的产物。它涉及的内容非常广,既有物理(工程技术理论),又有事理(管理工程理论)。主要从总体研究领导部门和维修决策性问题,同时也研究使用单位维修的组织和技术问题;既研究全系统全寿命的效能—费用问题,同时也研究使用维修阶段的使用维修费用问题。

本书受学时所限,只能对维修工程学的基本概念、理论和方法作简要阐述。考虑到管理方面的许多内容已在管理科学中讲过,故障理论已在各专业课中讲过,故障诊断另有课程,本书就不再重复。另外,考虑到可靠性理论的重要,现代维修思想是以可靠性为中心,可靠性理论是维修工程学的基础,它是新兴的理论过去没有学过,故本书用相当大的篇幅阐述了可靠性基本理论。至于可靠性和维修性设计和评价的诸多问题,将在《可靠性工程基础》中阐述,读者也可参考国军标和美军标。

学习和掌握维修工程学,对于从事技术管理保障工作、设计工作、论证工作,以及采购工作均有重要意义,尤其是从事技术管理工作很有意义。现在我国的军用装备维修,民用设备维修基本上是沿用过去的计划定时维修,只管使用阶段的工作;设计者在设计时也只是考虑性能,很少或不自觉地进行可靠性、维修性、维修保障等设计,等到投入使用,暴露出可靠性、维修性差,使维修工作被动,许多昂贵的装备不能充分发挥作用。等到使用单位把这些信息反馈到研制单位,再进行改进设计,就会浪费巨大的财力和时间。

三、维修工程的工作

维修理论来源于维修工程实践,又反过来能动地指导维修工程实践。从全系统全寿命的高度上统筹兼顾,综合权衡,使得效能的各指标达到总体优化,确保全系统全寿命各阶段的工作做得自觉,做得全面,做得科学,如图 1.2 所示。

这里所谓全系统包括装备本身,及其服务系统,以导弹系统为例,它包括导弹,以及发射系统、制导系统、电源系统,还有维修保障设备等。

所谓全寿命也叫寿命周期,是指系统从论证开始,直到最后淘汰为止的全过程的时间。一般,寿命分为 5 个阶段,如图 1.2 所示。

1. 论证阶段

在本阶段应根据上级指示论证所研究系统的必要性和可行性,根据系统的使命分析任

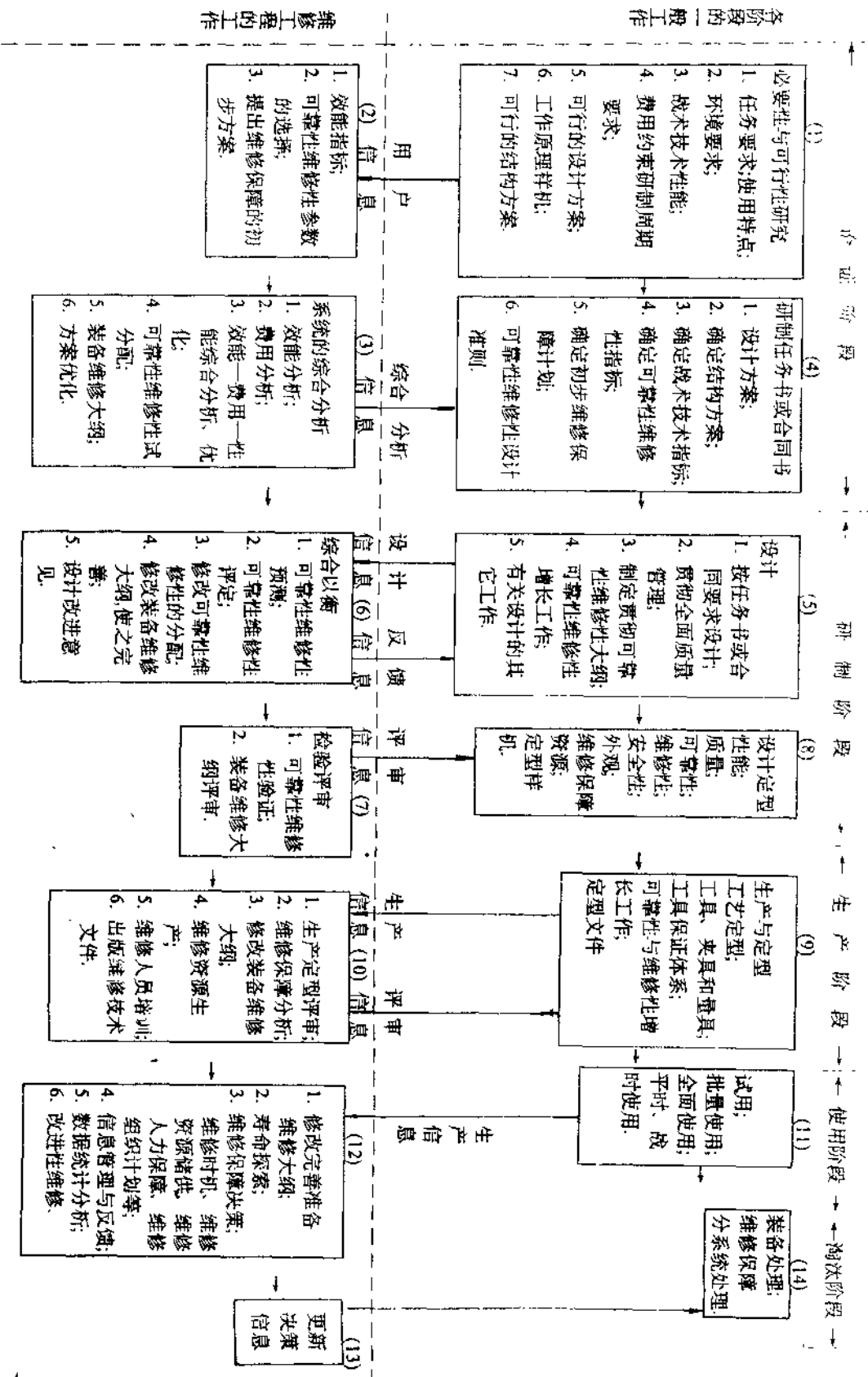


图 1.2 全寿命周期内维修工程主要工作框图

务剖面、环境剖面、费用约束、研制周期等。提出效能指标（含性能指标、可靠性指标、维修性指标）和初始维修方案（如分几段维修、哪些等级、各级维修所需人员、设备、备件、哪些部分进行预防维修、哪些部分进行视情维修、哪些部分进行修复维修等）。

本阶段提出的要求很重要，它是与承制方签合同的依据。但是，要使指标很合理也很困难，这就需要系统工程的办法进行综合权衡，如进行效能分析、费用分析、维修保障分析等。在此基本上形成设计方案、结构方案、性能指标、可靠性指标、维修性指标和设计准则、维修保障方案等。并将它们写在设计任务书或合同书中。

在论证阶段维修工程所起的作用十分重要，综基础上决定了系统的效能和维修方案。如图中(1)~(4)项所示。

(二) 研制阶段

本阶段的任务是将可靠性和维修性指标和要求（或称设计准则）设计到系统中，赋予它应有的可靠性和维修性，要多次进行上述两指标的预计、分配和评审，进行必要的试验，在进行维修性设计时必须考虑维修保障方案，二者要协调，如图中(5)~(6)两项所示。

应该指出，在性能设计评审和定型评审时，要同时评审可靠性、维修性和维修保障方案，如图中(7)~(8)两项所示。

(三) 生产阶段

本阶段的任务是加强全面质量管理，从而得到可靠性增长信息和维修性信息。有了具体系统，使可进一步完善上述指标和初始维修保障方案，同时也为维修单位生产维修设备、备件，培训使用维修人员提供信息，如图(9)~(10)两项所示。

(四) 使用维修阶段

在本阶段，常领先使用个别或少数系统，取得信息，修改和完善维修方案，探索维修周期，结合使用情况和条件进行维修保障管理（如维修时机、维修资源的保障、维修组织计划等）；搜集维修数据，进行统计分析，加强维修全面质量管理；提出改进维修大纲的建议；必要时对系统进行改装等，如图中(11)~(12)两项所示。

如果系统没有初始维修方案，应结合其可靠性水平、工作条件和现有维修保障条件，拟定一个维修方案。

(五) 淘汰处理阶段

本阶段的任务是进行系统报废决策；分析系统淘汰后维修保障分系统的调整及其它遗留问题；收集、管理、分析该全系统全寿命周期的数据和资料，进行信息管理和反馈，如图中(13)~(14)两项所示。

总之，在维修工程学指导下研究全系统全寿命过程中的整体优化工作，是维修工程的工作内容，也是维修工程学研究对象。

四、研究维修工程学的意义

维修工程学作为科学技术及复杂装备发展的产物，已为越来越多的人所接受。不仅使用维修人员要掌握维修工程学，而且与装备直接有关的论证、设计、研制、生产和管理等部门也要研究、应用维修工程学，指导装备的全系统全寿命过程中的有关工作，提高装备的军事效益、经济效益，最终归结为提高部队战斗力。

海湾战争突出地表明，人类将继续冷兵器战争、热兵器战争和核战争之后进入高技术战

争，这是科学技术飞速发展、武器装备性能日益提高的结果。然而，武器装备的复杂程度也随着其性能的提高而提高。用同样水平的元件构成的装备越复杂，其可靠性越低，假设元件的可靠度均为 0.99，用 10 个元件串联组成的系统的可靠度为 0.90；而用 80 个元件中联组成的系统，其可靠度仅为 0.48。可靠性降低，故障增多，维修频数增大，必将严重影响部队的战斗力。

要提高部队的战斗力，必须研制出高效能的武器装备。高效能不仅包括战术技术性能，目前更重要的是要包括可靠性和维修性，美军已把可靠性和维修性（维修工程学的主要问题）作为武器装备研制中的第一位事情来抓，海湾战争中多国部队共出动作战飞机 11 万架次，共损失飞机 90 架，其中非作战（故障）损失只有 22 架，占出动总架次的万分之二。美军 F-18 战斗机在空中发生故障可由机内自动测试设备向飞行员显示故障情况，然后由飞行员向地面报告飞机故障情况，地勤人员对收到的故障情况进行分析，制定维修方案并准备好维修器材，一般在飞机着陆后燃油加注的时间（10 分钟）内将飞机修好，不致影响飞机下一次紧急起飞。可见，部队战斗力依赖于先进的武器装备，而先进的武器装备必须由可靠性和维修性来保证。可靠性和维修性是维修工程学的重要内容，它们贯穿于装备的全寿命，从装备论证开始，就要应用维修工程学知识提出使用维修要求，并在以后各阶段得以完善和落实。

对于民品来说，产品常出故障，故障后又难以进行迅速、有效的维修，必然会造成较大的经济损失及其它后果。为此，必须在论证开始，就依维修工程学提出各种要求，如可靠性、维修性、维修周期、维修停机时间及维修费用等；在设计时贯彻这些要求；在生产中保证落实设计指标；在使用过程中按规定实施保养、维修，使产品发挥出最大的效能。为做好这些工作，就要求我们深入研究、应用维修工程学，全系统全寿命地考虑问题，减少各种损失。

研究、应用维修工程学还有更深远的意义，产品的可靠性不高，维修工作等售后服务跟不上，必然影响产品的信誉，长此下去就会使产品失去竞争力，甚至使用户忿忿不平、怨声载道，转化为政治问题。例如，全国第一届电视机质量评比时，上海产电视机得到了第一、二、三名，1979 年 1 月拿到了奖状。到同年 5 月份在广州使用上海产电视机大量出现打火冒烟、无光、无声等故障。后来其它地方的用户也反映出现这类故障。群众反映：上海产电视机要配套电风扇，边扇边看，甚至边歇边看，边敲边看。致使用户强烈不满，在报纸上批评上海产电视机只有四个节目“多瑙河之波”（屏幕上只有波状条纹），“冲破黎明前的黑暗”，“看不见的战线”，“今天我休息”。群众来信告到中央及国务院，中央领导作了重要批评说：“这已不仅是经济问题，而成为政治问题了。”之所以如此，是因当时上海产的电视机可靠性差，售后维修等服务工作跟不上需要。后来，厂方狠抓可靠性、维修性等问题，使上海产电视机恢复了信誉。

总之，不深入研究，应用维修工程学，会影响军队武器装备的军事效益，会影响厂方的经济效益，甚至会影响社会效益。因此，我们必须对维修工程学予以高度重视，给予其应有的地位。每一工程技术人员及技术管理干部都要把维修工程学当作必修课，学习它、掌握它、宣传它和应用它。

第二章 可靠性特征量

前面介绍了可靠性的定性的概念，在工程中只有定性的概念是不够的，还必须有定量的参数，用之表示可靠性水平的高低，以便在用户和厂方签订合同时提出和商定适当的可靠性指标；厂方在设计中，把它设计到产品中，奠定产品固有可靠性，在生产中，保证产品的固有可靠性；用户在接受产品时，有明确的验收标准；用户在使用维修中，验证产品可靠性有明确的标准；同时它也是用户向厂方索赔的依据。可靠性指标还可以使厂方在设计阶段就可以预计产品是否能满足用户要求，缩短研制周期；在设计阶段就可以预计到维修周期、维修所需的备件等。而用户，尤其是军队可以根据产品可靠性下降的程度决定是否进行维修，是否应该报废；还可以依此估计装备的势力，为作战和后勤决策提供定量的依据。

定量地表示可靠性水平的参数通常又叫做可靠性特征量。

对于不可修产品来说，可靠性特征量有可靠度、故障率、故障密度、平均寿命和可靠寿命等；对可修产品来说，还有维修度、维修率、维修密度、平均维修时间，以及可用度等。

本章将介绍可靠性特征量的概念和计算方法，以及它们之间的关系。

§ 2.1 可靠度

一、可靠度的定义

表示产品可靠性水平高低的特征量，常常用可靠度表示。

所谓产品的可靠度是产品在规定的条件下和规定的时间内能完成规定功能的概率。

在此定义中包含的4个要素在可靠性的定义中已经讨论过了，这里要着重说明的是为什么能用概率来表示可靠性水平的高低。研究产品的可靠性总是从研究产品的故障入手的。产品从开始工作的时刻到发生故障的时刻之间的时间叫做该产品的无故障工作时间，通常又叫做该产品的寿命。同一型号的一批产品，虽然是按同一张图纸用相同的材料和方法生产出来的，但是它们的寿命也是不同的，而且无法预先知道某一产品何时发生故障。这是因为生产过程中不管质量管理多么严格，所使用的原材料和元器件总是存在某些差异，在生产过程中要经过许多工序，由于设备、生产条件和操作者的技术水平的不同，使产品的精度不同，给产品带来的缺陷也不同，这些都会使产品的固有可靠性不同；产品在运用阶段，因包装、运输、贮存、安装、维修中各种条件的不同，对每个产品的危害也不同；在工作中，每个产品所受的工作应力不同，以及操作者水平不同，使产品寿命的耗损也不同。上述因素的综合作用，使得即使是同一批同型号的产品的寿命是不同的，而且产品何时发生故障也无法预先确切地知道。但是，对于一大批同型号产品来说，寿命总是具有某一统计规律的。这就是说，一批产品的寿命是具有某一分布的随机变量。因此，可以

用表示随机变量特征的方法来表示寿命特征。产品的可靠性越高，则无故障工作概率也越大。同样条件下工作的产品，产品寿命越长，在规定的时间内可靠度越高。

这里要特别指出，可靠度是表示一大批产品可靠性的统计特性的，而不能表示个别或少数产品的可靠性。

例如，产品工作到 500h 的可靠度是 95%，它表示用 100 个同型产品在规定的条件下进行很多次试验，在 500h 里平均每次有 95 个能成功地完成规定的功能。但是，不能事先肯定某个产品在哪个试验中试验了多少时间时发生故障，或不发生故障。

二、可靠度函数

对于同一种产品来说，在规定的条件和功能的情况下，其可靠度是规定时间的函数。如果产品寿命 T 大于规定的时间 t ，即 $T > t$ ，则产品能在时间 t 内完成规定的功能；否则，当 $T \leq t$ 时，则产品不能在时间 t 内完成规定的功能。对于同一水平的产品，若规定的时间 t 越长，其可靠度越低。于是，可靠度随时间的变化可用一单调递减函数表示之。此函数称作可靠度函数，记作 $R(t)$ 。即

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (2-1)$$

而将

$$F(t) = P\{T \leq t\}$$

称为故障分布函数，或故障概率，或不可靠度。

由于产品在同一时间 t 里不是能完成规定的功能就是不能完成规定的功能，二者是对立事件，因此其概率和总是 1 (如图 2.1 所示)，即

$$R(t) + F(t) \equiv 1 \quad (2-2)$$

由此可见，对于任意时刻 t ，只要知道其中之一，就可算出另一个。例如，已知 $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ ，则 $R(t) = 1 - F(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)] = \exp(-\lambda t)$ 。当然若已知可靠度函数，就可以求出故障分布函数，即

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2-3)$$

设有同型号的 n (相当大) 个产品，从时刻 $t_0 = 0$ 开始试验 (使用)，到时刻 t 有 n_f 个产品发生故障，余下 n_s 个 (幸存数) 产品未发生故障。显然， n_f 和 n_s 是时间的函数，记作 $n_f(t)$ 和 $n_s(t)$ 。假定产品发生故障后，没有替换，则

$$n_f(t) + n_s(t) = n$$

是常数。

根据概率的定义知，一个随机事件的发生概率可用大量试验中该事件发生的频率来估计。这种概率的估计值叫做经验概率或估计概率。因此，经验可靠度函数可表示为

$$\hat{R}(t) = \frac{n_s(t)}{n} \quad (2-4)$$

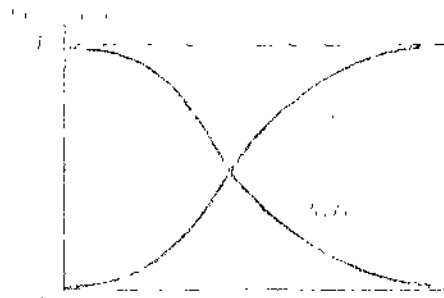


图 2.1

即在 $[t_0, t]$ 内, 产品的经验可靠度等于到时刻 t 能正常工作的产品数(幸存数) $n_s(t)$ 与在开始时刻 t_0 参加试验的产品数 n 之比, 它是产品在 $[t_0, t]$ 内能工作的频率。

同样, 经验故障分布函数

$$\hat{F}(t) = \frac{n_f(t)}{n} \quad (2-5)$$

即在 $(t_0, t]$ 内产品的经验故障分布函数等于到时刻 t 前发生故障的产品数 $n_f(t)$ 与在开始时刻 t_0 参加试验的产品数 n 之比, 它是产品在 $(t_0, t]$ 内发生故障的频率。

只有 n 很大的条件下, 频率才等于概率, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_s(t)}{n} = R(t) \quad (2-6)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_f(t)}{n} = F(t) \quad (2-7)$$

如果 n 很小, 用频率代替经验概率就不可信。

通常, 假定开始试验时产品都是好的, 即 $n_s(0) = n$, $n_f(0) = 0$, $R(0) = 1$, $F(0) = 0$ 。随着试验时间的增加, 故障数 $n_f(t)$ 递增, 幸存数 $n_s(t)$ 递减, 且前者的增加数等于后者的减少数。因此, 故障分布函数 $F(t)$ 是 t 的递增函数, 可靠度函数 $R(t)$ 是 t 的递减函数。在长期试验(使用)中产品最终都要发生故障, 即 $n_f(\infty) = n$, $n_s(\infty) = 0$, 故 $R(\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$ 。

显然, $R(t)$ 和 $F(t)$ 具有下列性质:

1. $R(0) = 1$, $R(\infty) = 0$, $0 \leq R(t) \leq 1$;
2. $F(0) = 0$, $F(\infty) = 1$, $0 \leq F(t) \leq 1$;
3. $R(t) + F(t) \equiv 1$ 。

三、剩余可靠度

工程中常常研究这样的问题: 例如, 航炮已正常发射了 x 发炮弹, 问再能正常发射 Δx 发的概率是多少? 又如, 瞄准具已工作了 t h, 问再能正常工作 Δt h的概率是多少?

定义 产品在规定的条件下, 已正常工作了时间 t , 而再能继续工作一段时间 Δt 的概率, 叫做任务可靠度, 又叫剩余可靠度。

计算剩余可靠度实际上是计算条件概率, 即

$$\begin{aligned} R(t + \Delta t|t) &= P(T > t + \Delta t | T > t) = \frac{P(T > t + \Delta t, T > t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{P(T > t + \Delta t)}{P(T > t)} \\ R(t + \Delta t|t) &= \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2-8)$$

(2-8)式就是剩余可靠度的表达式。

例 2.1 设 $R(t) = \exp(-\lambda t)$, 则

$$R(t + \Delta t|t) = \frac{\exp[-\lambda(t + \Delta t)]}{\exp(-\lambda t)} = \exp(-\lambda \Delta t)$$

即对于故障时间服从指数分布的产品, 如果在时刻 t 处于正常状态, 则从时刻 t 开始再继续工作 Δt 同从时刻 0 开始工作 Δt 的可靠度相等。这说明, 指数分布具有无记忆性, 或者叫做无后效性, 或者叫做永远年轻性。

如果已知 n , $n_s(t)$ 和 $n_s(t + \Delta t)$, 则经验可靠度

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

和

$$\hat{R}(t + \Delta t) = \frac{n_s(t + \Delta t)}{n}$$

于是, 得到

$$\hat{R}(t + \Delta t|t) = \frac{n_s(t + \Delta t)}{n_s(t)} \quad (2-9)$$

例 2.2 在某批产品 n 个中, 已有 88 个正常工作到 2400h, 再继续工作 800h, 这时还有 66 个能正常工作, 问在这 800h 里的可靠度是多少?

解 显然, 这是在已知可靠性数据的条件下求任务可靠度的问题, 可以求出不同时间的经验可靠度, 故可用(2-9)式计算。

$$n_s(t) = n_s(2400) = 88$$

$$n_s(t + \Delta t) = n_s(2400 + 800) = n_s(3200) = 66$$

故

$$\hat{R}(2400 + 800|2400) = \frac{n_s(3200)}{n_s(2400)} = \frac{66}{88} = 75\%$$

即当该批产品已正常工作 2400h 后, 再继续工作 800h 的可靠度为 75%。

不难看出, $R(t + \Delta t|t) > R(t + \Delta t)$ 。这是因为 $R(t + \Delta t|t)$ 是以在时刻 t 之前产品无故障为前提条件, 而 $R(t + \Delta t)$ 在 t 之前可能有故障。

例 2.3 假设瞄准具的故障分布函数服从指数分布, 故障率 $\lambda = 10^{-4} / \text{h}$, 它已工作了时间 t 以后, 问再在时间 $\Delta t = 10\text{h}$ 能里继续工作的可靠度是多少?

解 显然, 这是已知分布函数求剩余可靠度的问题。由(2-3)式可得

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) = \exp(-\lambda t)$$

同理

$$R(t + \Delta t) = \exp[-\lambda(t + \Delta t)]$$

由(2-8)式知

$$\begin{aligned} R(t + \Delta t|t) &= \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} = \frac{\exp[-\lambda(t + \Delta t)]}{\exp(-\lambda t)} = \exp(-\lambda \Delta t) \\ &= \exp(-10^{-4} \times 10) = 0.999 \end{aligned}$$

§ 2.2 故障密度

从可靠度函数或故障分布函数中,不易看出产品发生故障随时间的变化率,为此引入故障密度函数。

一、故障密度的定义

产品在时刻 t 附近的瞬时平均单位时间里发生故障的概率,叫做产品在时刻 t 的故障密度。故障密度随时间的变化关系,叫做故障密度函数,可用 $F(t)$ 的导数来计算,即

$$f(t) = \frac{P(t < T \leq t + dt)}{dt} = \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2-10)$$

即故障密度函数是故障分布函数的导数

$$f(t) = F'(t) \quad (2-11)$$

注意: $f(t)$ 是有单位的,其单位总是 t 的单位的倒数。如 t 的单位为h、km、循环等,则 $f(t)$ 的单位为 $1/h$ 、 $1/km$ 、 $1/\text{循环}$ 等。

例 2.4 已知某产品的故障分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp(-2t^2)$$

今有 100 个产品进行试验,问试验到 1h 时的故障密度和 1h 后的瞬间 1h 能发生多少个故障。

解 由(2-11)式,可知

$$f(t) = [1 - \exp(-2t^2)]' = 4t \exp(-2t^2)$$

故

$$f(1) = 4 \times 1 \times \exp(-2 \times 1^2) = 0.54 \quad 1/h$$

在 1h 后的瞬间 1h 里能发生的故障数为

$$\Delta n_f(1) = n f(t) = 100 f(1) = 100 \times 0.54 = 54 \quad \text{个}$$

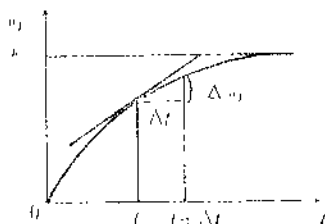


图 2.2

在工程中,一般 $f(t)$ 是未知的,是依统计数据估计的。如果已知故障数据,则可求出在不同时刻 t 后的时间间隔 Δt 里的故障数 $\Delta n_f(t)$ (如图 2.2 所示)。于是,可求出每个时间间隔里的平均经验故障密度作为故障密度的估计值。

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n_f(t)}{n \Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t}$$

即经验故障密度 $\hat{f}(t)$ 是在时刻 t 后(如图

2.2 所示)的单位时间里发生故障的产品数 $\frac{\Delta n_f(t)}{\Delta t}$ 与投入试验的产品数 n 之比。

显然,当 Δt 越小,且 n 越大时,经验故障密度函数越趋近于故障密度函数。即