

设备设计与管理

设备维修管理工程学

于庆有 崔永焕 主编

黑龙江科学技术出版社

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 维修管理工程的基本概念	(1)
第二节 设备综合管理的基本概念	(5)
第三节 设备维修管理工程的发展	(6)
第二章 设备可靠性、维修性概述	(9)
第一节 设备可靠性	(9)
第二节 设备维修性	(20)
第三节 可靠性、维修性参数选择和指标的确定	(27)
第三章 设备故障与极限技术状态	(36)
第一节 设备故障及其特征	(36)
第二节 机械设备的极限技术状态	(41)
第四章 设备系统特性	(51)
第一节 设备系统的可用度	(51)
第二节 设备系统的效能	(66)
第三节 设备系统的寿命周期费用	(73)
第五章 设备维修保障系统	(80)
第一节 维修保障系统的组成及评价参数	(80)
第二节 维修保障分析的主要工作	(82)
第三节 维修保障分析	(85)
第四节 维修网点的合理布局	(89)
第五节 修理厂(车间)的工艺设计	(95)
第六章 维修制度与维修周期的确定	(98)
第一节 机器设备维修制度	(98)
第二节 最佳维修周期的确定方法	(106)
第七章 设备管理	(118)
第一节 设备的前期管理	(118)
第二节 设备的使用与维护管理	(128)
第三节 设备的资产管理	(137)
第八章 设备大修、改造、更新及其技术经济分析	(143)
第一节 磨损理论	(143)
第二节 设备最优大修时机及大修经济界限	(148)
第三节 设备改造及其技术经济分析	(153)
第四节 设备更新及其经济性分析	(156)
第五节 设备大修、改造、更新的经营决策	(164)

第九章 备件存贮及管理	(167)
第一节 概述.....	(167)
第二节 备件存贮管理的内容及影响因素.....	(169)
第三节 备件存贮量.....	(170)
第四节 经济订货批量 Q_0 经济订货间隔期 t_0	(175)
第五节 备件的 A、B、C 分类管理法	(182)
第十章 现代管理技术在设备管理与维修中的应用	(185)
第一节 网络计划技术及其在设备管理与维修中的应用.....	(185)
第二节 价值工程及其在设备管理与维修中的应用.....	(199)
第三节 线性规划.....	(211)
第四节 排队论及其在维修中的应用.....	(218)
第五节 蒙特卡洛模拟法简介.....	(222)
第十一章 维修工程信息管理系统	(225)
第一节 维修工程信息管理.....	(225)
第二节 维修工程信息计算机管理系统.....	(232)
第三节 维修保障系统的模型举例—计算机备件管理系统.....	(236)
参考文献	(248)

第一章 绪 论

近些年来,由于现代科学技术取得一系列重大成就,促进国民经济各个领域的迅速发展,由此而产生的明显特征之一,是现代高效能的设备日趋复杂、昂贵,同时为设备的使用、维修和管理提出了新的课题。

设备的维修,是保持或恢复产品规定功能的重要手段,已被实践证明。对现代设备的维修既要继承和发扬已有的好经验好做法,更要运用现代科学技术的理论和方法,深入研究设备的故障模式、故障原因和具体的维修技术,并且注重从宏观上去把握维修保障和设备发展之间的关系,对各种复杂的因素加以综合分析和判断,制定出经济而有效的决策。

第一节 维修管理工程的基本概念

设备维修管理工程就是设备维修工程。设备管理是对设备从设计、制造、使用、维修直至报废整个一生的管理,而维修管理是设备管理的重要组成部分。

维修的对象是设备,设备是人们从事生产活动或执行某项工作,为满足某种需要所必须的成套设施。我国国家标准《可靠性基本名词术语及定义》(GB3187—82)给维修下的定义是“为保持或恢复产品能完成规定功能的能力而采取的技术管理措施”。这个定义中明确提出了维修的目的和时机,不仅包括了产品在使用过程中发生故障时必须恢复其完成规定功能的能力,而且包括了为达上述目的而采取的各项技术措施,如检测、换件、加注润滑剂等等,而且还包含了各种管理措施,其中既有维修的管理;又有设备管理;如使用或贮存条件的监测,使用时间及频率的控制等。

一、维修的分类

维修的种类有不同的划分方法,按照维修活动的目的和时机可以划分为:

1. 预防性维修

预防性维修是使设备保持在规定的状态所进行的全部活动。预防性维修通常采用定期维修和视情维修两种形式。

(1)定期维修或称定时维修:指在规定的间隔期或固定的累计工作时间的基礎上,按事先安排的计划进行维修。定期维修适用于已知寿命分布规律且确有耗损期的设备。耗损故障与使用时间有明确的关系;另外,对于一些重要的机件很难检查和判断其技术状态时,则定期维修方式较为有效。其优点是便于安排维修工作,组织维修的人力和物质资源;缺点是对磨损以外的故障模式,如疲劳、锈蚀以及材质等原因造成的故障未能考虑。

(2)视情维修又称按需维修:是通过监控掌握设备的运行状况,根据实际需要确定

维修时机。适用于耗损故障初期有明显劣化特征的机件；用于能定出评价技术状态标准的机件；对于故障直接危及安全，而且有极限参数可以监测的机件才是有效的。应当指出，视情维修需要有适当的监控或诊断手段。其优点是维修的针对性强，能够充分利用机件的工作寿命又能有效地预防故障。

以上两种预防性维修各有其适用范围和特点，并无优劣之分。能正确的运用定期维修和视情维修相结合的原则，才能在保证设备完好率的前提下节约维修人力和物力。

2. 修复性维修

修复性维修又称事后维修或称故障维修。它是不控制维修时机，当设备或机件发生故障后进行维修，使其恢复到规定状态。适用于发生故障，但不影响总成和系统的安全性；对于故障规律不清楚的偶然性故障；或虽属耗损型故障，但用事后维修更经济的机件。

3. 改进性维修

改进性维修是利用完成设备维修任务的时机，对设备进行现代化改装，以提高设备的性能、可靠性或维修性，或使之适合某一特殊的用途。在我国国力有限，设备不可能大批更新，而技术发展又很快的形势下，这种维修方式无疑是一种特别有意义的维修策略。

二、维修的地位和作用

设备维修是国民经济各部门维持再生产的必要手段。完好的设备是生产力的重要因素，也是人类进行各种生产活动的条件。在我国以及工业发达国家的大多数设备，都是靠维修来保持或恢复其性能的。例如，我国农机系统拥有大中型拖拉机 60 余万台，若每三年大修一次，每年需修 20 余万台，这远远超过全国大中型拖拉机 10 余万台的年产量。如果不进行维修，仅靠年产量将无法满满足工农业生产的需要。因此，可以肯定地说，维修本身就是生产力。

维修具有巨大的经济效益。设备维修的经济效益在于恢复或保持设备的规定状态后，通过设备的运转或运营来实现。例如，年产 30 万吨合成氨的企业，因设备原因停产一天，就要损失利税 15 万元；武钢一米七轧机停产一天将损失 70 万元。若把这些设备管理、维修好，延长一天使用期或缩短一天维修期，其经济效益相当可观。

经验表明，生产越发展，维修越重要，它在国民经济中所处的地位和作用就越来越大。据统计，瑞典全国制造业维修工人占职工总数的比例，1971 年为 5.5%，1979 年上升到 6.5%；同期职工总数减少 6.8%，维修工人却增加 10.7%。据有关部门统计，全国工交企业拥有固定资产 7000 多亿元，其中属于设备部分约有 4000 多亿元，占 60% 左右。同时，还有一支 500 多万人的设备维修与管理队伍，每年用于设备维修的费用达 300 亿元。在全国拥有的 300 万台机床中，设备维修行业占有 100 万台。这些数字表明，设备维修在国民经济发展中有着举足轻重的作用，是我国现代化建设中不可缺少的组成部分。

三、设备维修工程的意义

1. 维修工程的定义

维修工程是设备维修保障的系统工程，它应用设备全系统全寿命过程的观点，运用

现代科学技术的方法和手段,优化设备的维修保障总体设计并进行宏观管理,使设备具有良好的有关维修的设计特性;并与维修保障系统之间达到最佳匹配与协调,以实现及时、有效而经济的维修。

从以上定义可以看出:设备维修工程研究的对象是有关维修特性和维修保障系统;研究的目的是要使维修保障有效而经济;研究的范围是可靠性、维修性与维修保障;研究的手段是应用系统工程的理论和方法及其它有关技术;并强调维修工程贯穿设备的全寿命过程。

2. 维修工程与各专业工程的关系

设备维修工程是设备设计与维修保障之间的纽带。为保证设备具有整体优化的技术性能,要通过对以下各专业工程提出要求来影响设计,如可靠性、维修性、安全性、人机工程等。

(1)与可靠性工程的关系 维修工程参与确定对设计的最初可靠性要求,而后又根据可靠性工程所设计的设备固有可靠性和维修性工程所设计的维修性,并考虑到生产、使用以及操作等各个环节可能的影响,来确定对维修保障系统及其各项维修资源的要求。

(2)与维修性工程的关系 维修性工程的目标是要设计出能够满足要求的,能经济而方便地维修的设备。这二者的关系是:维修工程对维修性提出要求,参与维修性设计评审、维修性的试验与评定,并对设计和维修保障系统进行分析 and 综合权衡,提出适当的要求。维修性工程则根据维修工程提出的维修性要求确定其设计特点,并把这些维修性设计特点落实到设备的设计中去。

(3)与安全性和人机工程的关系 安全性和人机工程两者是紧密联系的。安全性工程的目标是使所设计的设备能够安全地使用和维修;而人机工程的目标则是使设备及其各项维修资源在使用和维修时能够适应人的人体量度、心理和生理反应以及承受能力。维修工程对这两者的要求,是以积累的经验 and 数据、设计分析以及对硬件使用和维修的考察为基础的,安全工程与人机工程则将设计资料 and 安全措施输送给维修工程,用以进一步改进维修保障系统。

此外,诸如对运输和搬运设备的适应性,适当的栓系点和起吊点,以及关于包装和保存技术的适用性等。

四、维修工程的任务和目标

设备维修工程的基本任务是:对设备的维修保障系统实施全系统、全寿命过程的科学管理。以维修工程分析和综合权衡作为手段,论证和确定可靠性、维修性等要求来影响设备的设计,保证设备具有整体优化的技术性能,同时作出该设备维修保障系统的总体设计;通过对现役设备的可靠性、维修性和维修数据进行分析 and 评价,以便作为改进设备、改进维修以及新设备研制的依据,并为用户和生产厂家提供技术决策服务和咨询服务。

通过维修工程的活动,保证以最低的寿命周期费用,使设备获得经济、有效而及时的维修。维修工程的主要活动是:分析、权衡、规划和监督评审。就是说,维修工程提出可靠

性、维修性和维修资源要求,建立这些要求之间的相互关系,作出维修保障方面的所有重大决策和规划,进行维修保障系统设计,并通过监督评审保证这一切得以实现。

根据上述维修工程的基本任务,设备维修工程的总目标是:通过影响设备设计和生产,保证所得到的设备具有整体优化的技术性能,使用可靠,便于维修;及时提供一个与设备相匹配的、有效而经济的维修保障系统。

这个总目标包括两个方面的工作,即设备设计和设备维修保障,要使二者间达到最佳平衡。为了实现上述的总目标,还应有若干具体目标,在此不详细介绍了。

五、寿命周期内各阶段维修工程的目标和主要活动。

1. 技术指标论证阶段

这一阶段维修工程的目标是要为即将研制的新设备论证可靠性、维修性和维修保障要求。与维修工程密切相关的使用要求一般有:

(1)工作任务和工作方式;

(2)负载情况,如功率、工作循环、操作速度等;

(3)工作和维修环境;

(4)运输、安装、储存和保管条件;

在确定和分析设备使用要求的基础上,论证和确定可靠性和维修性的定性、定量指标以及维修保障要求。

2. 方案确定阶段

本阶段维修工程的目标是在确定了设备的可靠性、维修性和维修保障要求的基础上,为设备选择一种设计方案和维修方案,使之能最好地满足所确定的使用要求。在确定方案时,尚须考虑其它因素,如科学技术水平、费用限制、使用环境、研制进度等。此阶段的活动是:维修工程首先提供经验数据和资料,并从保障的有效性和经济性方面影响设计方案;提出一个或几个备选维修方案,将现有条件与方案进行对比、评价、分析、权衡,并参照以前的经验数据加以判断,对备选方案进行抉择。

3. 工程研制阶段

这一阶段维修工程的目标是制订一套能够适用于维修保障各个要素的技术方案和维修保障规划,研制并提供各项维修资源,使之达到能够用于实际试验的程度。在此期间,维修工程主要活动是广泛开展维修工程分析,确定设计变更的要求,在设计中修正维修资源的要求,同时编制维修技术资料 and 维修保障计划。

4. 生产阶段

本阶段维修工程的目标是使生产的产品质量符合标准,并与计划中的维修保障系统匹配。在全面生产后,要有足够的维修保障资源。维修工程在此期间的主要活动是:在小批量生产时,帮助鉴定试验结果;在生产过程中,要保证维修保障系统与设计的一致性,并监督维修资源的取得及质量。

5. 使用阶段

本阶段维修工程的目标是在部署、使用设备的同时,考察维修保障系统的作用是否能与现有的维修保障系统相容,是否能够对设备实施及时、有效而经济的维修。此期间维

修工程接受并分析关于设备可靠性、维修性和维修保障的数据资料,提出改进的建议,并鉴定其它机构提出的有关维修保障的建议。

6. 报废阶段

这一阶段的目标是把报废设备及其维修保障系统中某些不能继续保留的部分撤销。维修工程将提出在执行这一阶段任务中应用的技术原则,如报废的定级标准以及有关报废或处理的技术性建议等。

第二节 设备综合管理的基本概念

一、现代设备管理的重要意义

我们所说的设备管理,是指以设备为研究对象,追求设备综合效率与寿命周期费用的经济性,应用一系列理论、方法,通过一系列技术、经济、组织措施,对设备的物质运动和价值运动进行全过程的科学管理。这是一个宏观的管理概念,涉及到政府经济管理部门、设备设计研究单位、制造厂家、使用部门等,包含设备全过程中的计划、组织、协调、控制和决策等工作。

谈到设备管理,常常碰到设备工程这个词,它的含义是指为了最有效地发挥设备效能,提高企业的生产效率和经济效益而对设备进行的设计、选型、维修、改进等各种技术活动和管理活动的总和。就是说,设备工程和现代设备管理是同义语。设备工程可分为设备规划工程和设备维修工程,前者是指设备诞生之前(即前半生)的管理,包括设备的规划、设计、制造;后者是指设备诞生之后(即后半生)的管理,包括设备的购置、安装、使用、维修、改造等。

作为企业管理的一个重要组成部份,设备管理的重要意义是:

1. 设备管理是企业生产经营管理的基础工作

现代企业依靠机器和机器体系进行生产,生产过程的连续性和均衡性主要靠机器设备的正常运转来保持。设备在长期使用中技术性能逐渐劣化,就会影响生产定额的完成;一旦出现故障停机,会造成某些环节中断,甚至引起生产全线停顿。因此,只有加强设备管理,正确地操作使用、精心地维护保养、进行设备的状态监测、科学地修理改造,保持设备处于良好的技术状态,才能保证生产连续、稳定地进行。

2. 设备管理是产品质量的保证

产品是通过机器生产出来的,如果生产设备特别是关键设备的技术状态不良,必然造成产品质量下降,甚至造成废品。

3. 设备管理是提高企业经济效益的重要途径

企业要想获得良好的经济效益,必须适应市场需要,做到产品物美价廉。不仅产品的高产优质有赖于设备,而且产品原材料、能源的消耗、维修费用的摊销都和设备直接相关。就是说,设备管理既影响企业产出(产量、质量),又影响企业的投入(产品成本),因而是影响企业经济效益的重要因素。

此外,搞好设备管理有助于安全生产和环境保护。设备的技术状态落后或管理不善,

会导致发生设备事故和人身伤亡;设备排放有毒、有害物质,会污染环境。

科学技术进步是推动经济发展的主要动力。企业的科学技术进步主要表现在产品的开发、生产工艺的革新、生产设备技术水平的提高上,所以说设备管理是企业长远发展的重要条件。

二、设备综合管理的基本内容和特点

设备综合管理就是设备寿命周期过程的管理。这个过程包括从设备的规划、设计、制造、选型、购置、安装、使用、维修、改造、更新直至报废的全部内容。在实施设备综合管理时,可以把上述全过程看成是一个系统,而把其中的每个环节看成是子系统。把设备出厂前看作它的前半生,而从使用单位投产开始看作后半生。按照系统工程观点,局部最优不一定全局最优,只有全系统(设备管理的全过程)最优才是合理的。

设备综合管理从设备的技术、经济、管理这三个侧面进行,而这三者是相互联系的一个整体。其中技术是基础,经济是目的,管理是手段,只有三者结合,才能实现综合管理的目标。

设备综合管理的目标是追求设备寿命周期费用的经济性。对于使用单位,不仅要考虑购置时的原始费用(购置费),还要考虑设备在运行阶段的使用费(即维持费)。但要注意,购置费是一次性支付,维持费则是逐年支出的,两者不能简单相加。所以在设备的购置阶段,要进行技术经济分析。

费用仅是评价设备经济性的一个方面,此外还有综合效率问题,它指的是:产量,质量,成本,交货期,安全环保和人机匹配。只有综合效率高;寿命周期费用低,才能取得好的经济效益。

设备的可靠性与维修性是设备综合管理中的重要内容,是影响寿命周期费用的关键因素。广义的设备可靠性是指设备在运行中达到准确、安全、可靠;设备的维修性是指设备发生故障后便于维修,而且能很快维修好。

此外,设备综合管理强调专业人员管理和职工群众的管理相结合;又强调信息反馈作用,就是说,无论是设备的全过程管理、设备的前期管理、设备的后期管理,都要重视信息反馈。

第三节 设备维修管理工程的发展

一、设备维修管理的发展简史

根据社会经济发展的需要,机器设备随着科学技术的发展而不断变革、进步,而设备维修管理也随着机器设备的产生和发展而不断演变。

1. 事后维修阶段

所谓事后维修,是指机器设备在生产过程中发生故障或损坏之后才进行修理。18世纪后期,企业采用机器生产的规模不断扩大,机器设备日益复杂,维修这些机器设备的难度和费用也日渐增加,出现生产操作工人和维修工人分离而形成专职的维修队伍,主要

进行事后维修。

2. 预防性定期修理阶段

20 世纪以来,科学技术不断进步,工业生产不断发展,设备的技术水平不断提高,企业管理进入了科学管理阶段。由于机器设备发生故障或损坏而停机修理,引起生产中断,使企业的生产活动不能正常进行,带来很大的经济损失。特别是在钢铁、化工、石油等作业连续性很强的行业里,设备突发性故障造成的经济损失更为严重,这时继续采用事后维修的方式已成为发展生产的障碍。于是,出现了为防止意外故障而预先安排修理,以减少停机损失。这就是预防性定期维修阶段。

在这个阶段中,世界上形成两大设备维修体系,一个是前苏联的“计划预修制”(ПНП),并在东欧、中国得到广泛应用;另一个是美国的“预防维修制”(PM),这种制度在西欧、北美、日本得到推广。

3. 综合管理阶段

无论是前苏联的计划预修制还是美国的预防维修制,都仅局限于设备维修和维修管理的范围。这种管理体制已经不能适应现代设备与现代企业管理发展的需要,其局限性在于:传统的设备管理只重视设备后一生的管理,不重视设备一生的管理;只管技术,不重视设备的经济管理和组织管理;只重视专业部门的管理,忽视有关部门的协调配合;只重视专业维修人员的作用,忽视广大职工的积极参与。因此,60 年代后期,在一些工业发达的国家里,为适应现代设备发展的需要,提出对设备实行综合管理的新思想、新观念,从而把设备管理推进到一个新阶段即综合管理阶段。

二、国外设备维修管理简介

美国在 50 年代发现,设备在使用阶段历年支出的维修费用的总和往往是购置费的几倍,难以承受。60 年代中期,他们着手研究寿命周期费用问题,认为要使设备在寿命周期内的费用优化,在相当程度上就要谋求维修保障的优化,就是要在设计阶段就考虑设备的可靠性、维修性以及与此紧密相关的维修保障系统。

1975 年在美国陆军部主持下,由航天局编写了《维修工程技术》一书。书中对维修工程的各项任务和所用的方法进行全面的讨论,这些任务是为保证设备的使用、维修和取得经济效益所必须完成的。

1970 年在英国形成一门学科叫“设备综合工程学”。其实质与维修工程并无大的差异,只是其研究和涉及的范围更广一些,对象更侧重于企业的设备。1974 年英国工商业部给设备综合工程学下的定义是:为了求得经济的寿命周期费用而把适用于有形资产的有关工程技术、管理、财务及有关业务加以综合的学科。其内容涉及到设备、机器、装备、建筑物与构筑物的规划和设计的可靠性与维修性,它们的安装、投产试车、维修、改造和更新,以及有关设计、性能和费用信息方面的反馈。

70 年代,日本引进了美国的行为科学、系统工程、后勤学、英国的设备综合工程学,形成了有日本特色的“全员生产维修”(TPM)。1971 年日本维修工程师协会对 TPM 下的定义是:以达到设备综合效率最高为目标;确立以设备一生为对象的全系统的预防维修;涉及设备的计划部门、使用部门、维修部门等所有部门;从领导者到第一线职工全体参加;

通过小组自主活动推进预防维修。TPM的特点是:全效率、全系统、全员参加。

前苏联自1975年以后,开始推广预防检测技术以减少设备故障及生产损失,与此同时,他们还组织备件的专业化集中生产,推行先进的维修工艺,改进设备管理体制,实行大修工业化,加强维修费用核算等。同IPIP相比,已有了很大的改进和提高。

近年来,国外在设备管理和维修方面的活动非常活跃,如瑞典在设备的诊断技术和状态监测方面取得了相当大的进展。

设备维修管理工程是一门发展中的边缘学科,我们应当本着“洋为中用、博采众长”的原则,吸取国外的有用经验和先进的理论和方法。

三、我国设备维修管理的发展

我国工业交通企业的设备管理工作,也大体上经历了从事后维修、计划预防维修到综合管理,即经验管理、科学管理到现代管理三个发展阶段。

1. 经验管理阶段

从1949年到第一个五年计划开始之前的三年经济恢复时期,我国工交企业一般都沿袭旧中国的设备管理模式,采用设备坏了再修的做法,处于事后维修阶段。

2. 科学管理阶段

1953年,我国开始执行第一个五年建设计划。在前苏联的援助下,全面引进前苏联的设备计划预防维修制,建立各级设备管理组织,培训设备管理人员和维修骨干,按照修理周期结构安排设备的大修、中修、小修,推行“设备修理复杂系数”等一整套技术标准定额,把我国的设备管理从事后维修推进到计划预防修理阶段。由于实行预防维修,设备的故障停机大大减少,有力地保证了我国工业建设项目的顺利投产和正常运行。

3. 现代管理阶段

60~70年代是世界经济迅速发展的时期,同时,国际上设备管理的理论与实践也出现了重大的发展。在党的十一届三中全会以后,一些企业和行业率先起步,引进国外现代设备管理的理论和方法,探索赶上国际先进水平的途径。自1979年开始,一些企业和行业通过办培训班、派人出国考察等方法学习国外先进的设备管理经验;在国内介绍英国的设备综合工程学和试行日本的全员生产维修制。这期间,各级政府成立了相应的设备管理机构,也成立了许多有关设备维修管理的学术团体。在这些大量工作的基础上,于1987年7月1日国务院发布了《国营工业交通企业设备管理条例》。该条例明确规定了我国设备管理工作的主要任务和要求,是我国设备管理工作的一个法规性文件。

第二章 设备可靠性、维修性概述

设备可靠性与维修性是密切相关的两个概念。产品发生故障后,可通过维修使其功能恢复到正常状态。维修性的好坏又将直接影响到产品可靠性的一些量值大小。因此在研究产品可靠性时,还要研究其维修性问题。

第一节 设备可靠性

在进行维修工程分析确定系统的保障要求或维修任务时,要用到可靠性工程的一些方法和技术,又因为维修与保障要求对可靠性参数影响极大,所以维修工程分析人员应当首先掌握可靠性工程的基本概念。

一、可靠性的基本概念

1. 可靠性

可靠性的定义是:产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。从这一定义中,应该明确它所包含的基本要素:产品、规定条件、规定时间、规定功能。

这里所指的产品是一个广义概念,包括零件、部件、组件、单元体、机组、装置、子系统或系统,也可以是设备的总体、样品。如果产品是系统,则不仅包括硬件,而且也包括软件 and 人的因素在内。所以讨论可靠性时,必须明确其产品是什么。

产品的可靠性是与“规定条件”分不开的。这里所指的规定条件包括使用时的环境条件,如温度、压力、湿度、振动、冲击、辐射及大气腐蚀等;负荷条件,如载荷、电压、电流等;使用条件,如连续工作或间断工作;维修条件;运输条件;储存条件;以及对操作人员技术等级的要求。产品在不同规定条件下其可靠性是不同的。产品对上述各种条件的适应性越强,则可靠性越强。

产品的可靠性还与规定的功能有密切关系,这里所指的规定功能就是产品应具备的完成任务所需的性能。怎样才叫完成规定的功能事先一定要有明确的故障判据准则,才能对产品是否发生故障有明确的判断。

产品的可靠性分为基本可靠性和任务可靠性。

基本可靠性是指产品在规定条件下,无故障的持续时间或概率。它反应了对维修的要求。确定其特征量时,应统计产品所有寿命单位和所有故障,而不局限于发生在任务期间的故障或只危及任务成功的故障。

任务可靠性是指产品在规定的任务内完成规定功能的能力。这里任务是指产品在完成规定的任务这段时间内所经历的事件和环境时间的描述。任务可靠性只统计任务期间危及任务成功的故障。

根据现代科学技术的发展和国民经济的需求,对设备的可靠性提出了更高的要求。

最近美国国防部将可靠性定义为：“系统及其组成部分在无故障、无退化或对保障系统无要求的情况下执行其功能的能力”。显然，对可靠性的要求是提高了。

2. 可靠度

定义：产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率，用 $R(t)$ 表示

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

式中 T ——产品无故障完成任务时间；

t ——规定时间。

将产品在规定的条件下，在规定的时间内丧失规定的功能（对于不可维修产品称失效，下同）的概率记为 $F(t)$ 。 $F(t)$ 称为累积故障概率，也称累积分布函数或不可靠度。既

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

由于故障与无故障这两个事件是对立的，所以

$$R(t) + F(t) = 1$$

由概率的定义又知，某个事件的概率可用大量试验中该事件发生的频率来估计。因此，为了估计一种产品在一定时间内的可靠度及故障概率（不可靠度），可以通过这类产品的大量试验来确定。例如有 N_0 个产品在规定的条件下工作到某规定的时间 t 有 $n(t)$ 个产品出故障，则此时的统计不可靠度（观测值）

$$F^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}$$

当 N_0 足够大时

$$F(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{n(t)}{N_0}$$

而可靠度的观测值 $R^*(t) = 1 - F^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$

可靠度

$$R(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (2-2)$$

从可靠度的定义可知，可靠度是对一定时间而言的。所以规定时间不同，故障数不同，可靠度的数值就不一样。由此可知可靠度 R 是时间 t 的函数，称为可靠度函数。产品在开始使用瞬间（即 $t = 0$ ），所有产品都是好的，故障数 $n(0) = 0$ ，则 $R(0) = 1$ 。随着使用时间增加，总的故障数也不断增加，可靠度相应地降低。所有产品，在使用中最后是要有故障的，因此 $n(t) = N_0$ ， $R(\infty) = 0$ 。从而可知可靠度函数是在 $[0, \infty]$ 区间内的非增函数，取值范围为

$$0 \leq R(t) \leq 1$$

例 2-1 有 1000 个电子管，开始工作至 500h 内有 100 个失效，工作至 1000h 时共计有 500 个失效，求 500h 和 1000h 的可靠度观测值。

解：

$$N_0 = 1000 \text{ 个}$$

$$n(500) = 100 \text{ 个}$$

由式(2-2)

$$R^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$$

$$R^*(500) = \frac{1000 - 100}{1000} = 0.9$$

$$n(1000) = 500 \text{ 个}$$

$$R^*(1000) = \frac{1000 - 500}{1000} = 0.5$$

由计算可知,这批(1000个)电子管,从开始工作至500h时,其可靠度观测值为0.9,即意味着这批电子管在规定的条件下使用时,到规定时间500h,仍有90%(即900个)的电子管在可靠地工作。而使用到1000h时,只有50%的电子管能完成规定的功能。

3. 故障密度函数 $f(t)$

如前所述, $F(t)$ 是累积故障概率, 又称累积故障分布函数。它表示在时刻 t , 产品累积故障数占产品总数的比例, 是时间的函数。为反应任意时刻故障概率的变化, 取 $F(t)$ 的导数

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2-3)$$

称故障密度函数, 显然

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2-4)$$

则统计故障密度函数 $f^*(t)$ 的观测值

$$f^*(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t)/N_0}{\Delta t} \quad (2-5)$$

式中 $\Delta n(t)$ —— 间隔时间 Δt (由时刻 t 到时刻 $t+\Delta t$) 的故障数。

例 2-2 如例 2-1 数据, 当 $t+\Delta t=501$ h 时, $n(t+\Delta t)=102$ 个, 求 $f^*(500)=?$

解: 由式 (2-5)

$$f^*(500) = \frac{102 - 100}{1000 \times 1} = 0.2\% (1/h)$$

$f(t)$ 、 $F(t)$ 和 $R(t)$ 之间的关系如图 2-1 所示, 图中曲线 $f(t)$ 下的总面积为 1。

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

$$\therefore R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(t) dt$$

4. 瞬时故障率 $\lambda(t)$

瞬时故障率 $\lambda(t)$ 的定义: 工作到某时刻 t 尚未发生故障的产品, 在该时刻后单位时间内发生故障的概率。瞬时故障率 $\lambda(t)$ 是时间的函数。

由定义可知, 在时刻 t 的故障率观测值由下式估算

$$\begin{aligned} \lambda^*(t) &= \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N_s(t) \cdot \Delta t} \\ &= \frac{\Delta n(t)/N_s(t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中 $N_s(t)$ —— 工作到 t 时刻的残存产品数, $N_s(t) = N_0 \cdot R(t)$ 。

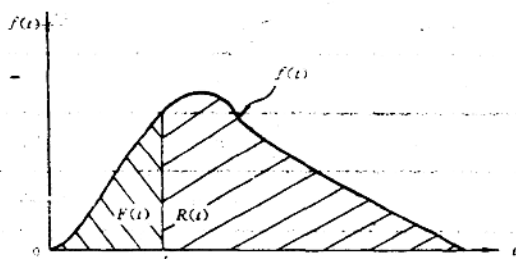


图 2-1 $f(t)$ 、 $F(t)$ 和 $R(t)$ 的关系图

例 2-3 如例 2-1 及例 2-2 之数据, 求 $\lambda^*(500)=?$

解: 已知 $n(t)=100, n(t+\Delta t)=102$

$$N_s(t)=N_0 \cdot R^*(500)=900$$

$$\Delta t=1$$

由式(2-6)可知

$$\lambda^* = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N_s(t) \cdot \Delta t} = \frac{102 - 100}{900 \times 1} = 0.22\% \quad (1/h)$$

显然, $\lambda(t)$ 与 $f(t)$ 的不同之处在于: $f(t)$ 单位时间故障数与产品总数之比; 而 $\lambda(t)$ 是单位时间故障数与残存产品数之比。二者关系

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

或

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)}{dt \cdot R(t)}$$

$$\lambda(t) dt = -\frac{1}{R(t)} \cdot dR(t)$$

两边积分

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln R(t) \Big|_0^t$$

因为 $t=0$ 时, $R(t)=1, \ln R(t)=0$, 故有

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(u) du} \quad (2-8)$$

特别当 $\lambda(t)=\lambda$ 为常数时(即寿命为指数分布时)

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2-9)$$

$f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 的关系如表 2-1 所示

表 2-1 $f(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 和 $\lambda(t)$ 的关系

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$\lambda(t)$
$f(t) =$		$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$
$F(t) =$	$\int_0^t f(t) dt$		$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$
$R(t) =$	$\int_t^\infty f(t) dt$	$1 - F(t)$		$e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$
$\lambda(t) =$	$f(t) / \int_0^\infty f(t) dt$	$\frac{dF(t)/dt}{1 - F(t)}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	

二、可靠性的主要参数

为了量度产品的可靠性水平, 需要用可靠性参数。下面介绍一些便于统计分析的可靠性参数。

1. 故障率 λ

故障率是产品可靠性的一个基本参数。其量度方法为：在规定的条件下和规定的时间内，产品的故障总数与寿命单位总数之比。寿命单位是对产品使用持续期的量度。如工作小时、年、公里、次数等。这里的故障率 λ ，实际上是指在这段规定时间内的平均故障率。对于指数分布，瞬时故障率 $\lambda(t) = \lambda$ 。

2. 平均故障间隔时间 $\bar{T}_{BF}$ (MTBF)

平均故障间隔时间是可修复产品可靠性的一种基本参数。其量度方法为：在规定的条件下和规定的时间内，产品的寿命单位总数与故障总数之比。显然

$$\bar{T}_{BF} = \frac{1}{\lambda} \quad (2-10)$$

3. 使用寿命 L_t

产品从制造完成到出现不可修复的故障或不能接受的故障率时的时间长度。

4. 储存寿命 L_s

产品在规定条件下储存时，仍能满足规定质量要求的时间长度。

5. 可靠寿命 T_r

给定可靠度 $R(T_r) = r$ 所对应的产品工作时间 T_r 。例如可靠度 $R(T_r) = 0.9$ 或 0.95 时对应的工作时间 $T_{0.9}$ 或 $T_{0.95}$ ，分别表示可靠度为 0.9 或 0.95 的可靠度寿命。

6. 平均故障前时间 $\bar{T}_r$ (MTTF)

不修复产品可靠性的一种参数。其量度方法为：在规定的条件下和规定的时间内，产品寿命单位总数与故障产品总数之比。

7. 平均维修间隔时间 $\bar{T}_{BM}$ (MTBM)

与维修方针有关的一种可靠性参数。其量度方法为：在规定的条件下和规定的时间内，产品寿命单位总数与该产品计划维修和非计划维修事件总数之比。

三、常用的寿命分布(或故障前时间分布)

对于一批产品来讲，其中每一个产品故障前的工作时间有长有短，参差不齐，具有随机性；对于一个特定的产品，什么时间发生故障完全是随机的，但它们都遵循着一定的规律，分布函数就是反应这种规律的。可靠性的各个特征量都与分布函数有密切的关系，因此在研究可靠性问题时，常常需要找出它的分布函数。表 2—2 给出了常用的几种寿命分布类型及其适用范围。

表 2—2 常用的几种寿命分布类型及其适用范围

分布类型	适用范围
指数分布	具有恒定故障率的部件；在耗损故障前正常使用的复杂系统或由随机高应力导致故障的部件；在一段规定的使用期内出现的故障为弱耗损型的部件，也可视为指数分布
威布尔分布	滚动轴承、继电器、开关、断路器、某些电容器、电子管、磁控管、电位计、陀螺、电动机、航空发电机、蓄电池、机械液压恒速传动装置、液压泵、空气涡轮发动机、齿轮、活门、材料疲劳等
对数正态分布	电动绕组绝缘、半导体器件、硅晶体管、直升机旋翼叶片、飞机结构、金属疲劳等
正态分布	轮胎磨损、变压器、灯泡及某些产品

1. 指数分布

指数分布是可靠性分析中最常用的寿命分布, 它的故障密度函数

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\lambda > 0) \quad (2-11)$$

它的分布函数为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2-12)$$

所以, 可靠度

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (2-13)$$

根据故障率函数的定义, 可以得到

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda \quad (2-14)$$

指数分布的重要性质是“无记忆性”, 即一个产品的寿命 T 服从指数分布, 当时刻 t 产品正常时, 则它在 t 以后的剩余寿命与新的产品一样, 故障率与 t 无关。可以通过以下数学方法来证明它。设产品寿命 T 服从指数分布, 则对任意的 2 个正数 s 和 t , 有

$$\begin{aligned} P(T > t + s | T > t) &= \frac{P(T > t + s, T > t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{P(T > t + s)}{P(T > t)} \\ &= \frac{R(s + t)}{R(t)} = \frac{e^{-\lambda(s+t)}}{e^{-\lambda t}} = R(s) = P(T > s) \end{aligned}$$

这就表明, 如果已知产品工作了 t (h), 则它再可靠地工作 s (h) 的概率与已工作过的时间 t 长短无关, 就像一个新产品刚开始工作那样。

按照可靠度的定义 $R(T_r) = r$, 则

$$e^{-\lambda T_r} = r \quad (2-15)$$

故有可靠寿命

$$T_r = -\frac{\ln r}{\lambda} \quad (2-16)$$

$$T_{0.5} = \frac{-\ln 0.5}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

按照特征寿命的定义, 即 $R(T_e) = e^{-1}$ 时的 T_e 有

$$T_e = -\frac{\ln(e^{-1})}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \quad (2-17)$$

产品的平均寿命为

$$\bar{T}_{BF} = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2-18)$$

寿命方差为

$$D(t) = \sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - [E(T)]^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2-19)$$

因此, 当寿命服从指数分布时, 故障率 λ 是常数, 其平均寿命, 寿命标准差 (σ) 和特征寿命均相等, 都是故障率的倒数。

根据统计规律表明, 许多电子产品和较复杂的机械产品在使用期内的寿命绝大多数