

GZ

普通高等工科教育机电类规划教材

机械设备 维修工程学

李新和 主编

机械工业出版社

普通高等工科教育机电类规划教材

11027131

机械设备维修工程学

主 编	李新和	
副主编	汪海良	李志荣
参 编	李登伶	高瑞春
主 审	曹中一	



机械工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了机械创新设计的基础知识、机械创新设计的基本理论和方法,并列举了机械创新设计的实例。

第一章为绪论,介绍了创新设计的概念及机械创新设计的内容。

第一篇为机械创新设计的基础知识篇,第二章介绍了机械创新设计的基础知识,第三章介绍了机械运动与控制。

第二篇为机械创新设计的理论与方法篇,主要介绍了机械创新设计的基本理论和基本方法。第四章介绍了机构的组合原理与创新,第五章介绍了机构的演化、变异原理与创新,第六章介绍了机构再生运动链原理与创新,第七章介绍了机械运动方案及其创新设计,第八章介绍了反求工程与创新。

第三篇为机械创新设计的应用实例篇,主要介绍了一些创新设计的实例分析。

附录中介绍了中国古代机械发明创造史、西方机械发展简史,最后介绍了即将到来的知识经济与现代的机械文明。

本书可作为高等工业学校机械工程专业的教材,也可供有关的教师及工程技术人员参考。

机械创新设计

张春林 曲继方 张美麟 编著

*

责任编辑:王世刚 钱飒飒 版式设计:冉晓华

封面设计:海之帆 责任校对:肖新民

责任印制:路 琳

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京机工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·印张11.5·字数278千字

1999年4月第1版第1次印刷

印数 0 001—5 000 定价:17.00元

*

ISBN 7-111-07152-2/TH·960(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

随着科学技术的迅猛发展, 各行各业的技术装备水平越来越高, 特别是资金密集、技术密集的现代化设备, 往往具有结构复杂、自动化程度高、生产率高、价格昂贵等特点。如何管好、用好、修好这些设备是现代企业必须高度重视的一个课题, 它不仅关系到设备本身的寿命, 而且直接影响到企业的生产计划、产品 (或服务) 质量、市场信誉、经济效益, 甚至关系到企业的兴衰成败。

自从 60 年代以来, 发达的工业国家纷纷对设备管理与维修进行研究和探讨, 对维修与管理的模式进行改革, 研讨与改革的结果, 不仅为这些国家带来丰厚的经济效益, 而且, 一门新兴的学科——设备工程学应运而生。1974 年, 联合国教科文组织将这门学科正式列入了技术科学学科分类目录, 在现代化的大生产中, 这一学科正日益显示出强大的生命力和坚实的学术地位。

在我国社会主义经济建设中, 大力推进设备管理与维修的现代化, 对于实施可持续发展战略具有举足轻重的意义。科技要发展, 教育须先行。全国高等工程专科机械工程类专业教学指导委员会已确定将“机械设备维修工程学”纳入专业教学计划, 制订了相应的教学大纲。该教材也一并纳入普通高等工程专科学校机电类“九五”教材出版规划, 使本书有幸与读者见面。

在本书中, 主要介绍了机械设备维修与管理的基本知识, 故障、失效的机理与对策, 润滑技术、故障诊断技术、失效零件修复技术及机械设备安装调试等内容。

在本书的编写过程中, 作者注意到对理论问题的阐述应深入浅出, 简明扼要, 突出理论与实践的结合, 强调本学科的理论在工程实践中的应用。因此, 本书既可作为普通高等学校及普通高等工程专科学校机电类专业的通用教材, 也可供有关工程技术人员参考。

本书由中南工业大学李新和主编, 并编写第二章、第六章, 沈阳大学汪海良编写绪论、第一章、第七章, 中南工业大学李登伶编写第三章, 洛阳工业高等专科学校李志荣编写第四章, 兰州工业高等专科学校高瑞春编写第五章。全书由中南工业大学曹中一主审。

本书在编写过程中得到了各位编者所在学校和其他院校的大力协助, 在此一并致谢。

书中难免有庇漏之处, 恳请专家与读者批评指正。

编者 1998 年 10 月

目 录

前言		
绪论	1	
第一章 机械设备维修与管理的		
基础知识	5	
第一节 机械设备的老化	5	
第二节 机械设备的故障	7	
第三节 机械设备维修方式及发展趋势	13	
第四节 维修的经济技术分析	18	
第二章 机械零件的失效及分析	24	
第一节 基本概念	24	
第二节 零件的磨损失效	25	
第三节 零件的断裂失效	32	
第四节 零件的腐蚀失效	39	
第五节 零件的畸变失效	46	
第三章 机械设备的润滑与保养	49	
第一节 润滑基础知识	49	
第二节 润滑材料	57	
第三节 润滑油、脂的选用	60	
第四节 润滑方法与装置	62	
第五节 设备的保养	64	
第四章 机械设备的故障诊断	66	
第一节 故障诊断基础知识	66	
第二节 机械设备的简易诊断	70	
第三节 振动诊断技术	75	
第四节 油样分析技术	83	
第五节 无损探伤技术	92	
第五章 机械零件的修复技术	105	
第一节 概述	105	
第二节 机械修复法	107	
第三节 焊接修复法	111	
第四节 电镀修复法	122	
第五节 热喷涂修复法	127	
第六节 粘接修复法	132	
第七节 修复层的机械加工	135	
第八节 修复层的表面强化	138	
第六章 设备维修管理	141	
第一节 设备维修的信息管理	141	
第二节 设备维修的计划管理	146	
第三节 设备维修技术与工艺管理	151	
第四节 备件管理	157	
第五节 设备维修的经济管理	161	
第七章 机械设备的安装	163	
第一节 安装的基本概念	163	
第二节 机械设备安装位置的检测与调整	170	
第三节 机械设备安装后的试运转	172	
参考文献	174	

绪 论

一、本学科的研究对象，任务及内容

机械设备维修工程学是一门新兴的综合性学科。它所研究的对象是有故障的机械设备，所研究的领域是机械设备故障的机理和维修技术（故障排除），涉及到的主要概念是故障、修理极限、维修性、可靠度、有效度等。近 100 年来，这门学科的理论 and 重要地位已经在生产实践中得到了发展和考验。因此，联合国科教文组织在 1974 年把它正式列入了技术科学学科分类目录中。

机械设备维修工程学的任务是：

1) 研究机械工程设备工作性能恶化的规律和机理，寻求延长机械设备寿命和改善其可靠性的途径。

2) 应用现代科学技术成果，研究适用的维修安装技术和工艺。

3) 以最佳经济效益为准则，研究维修管理理论和方法，为维修决策提供科学依据。

机械设备维修工程学的内容为：从基本理论上讲，有摩擦学理论，统计学理论，控制论，信息论等；从维修技术上说，有机械设备维护保养技术，机械设备改造技术，零部件修复技术，机械设备维修工艺，设备故障诊断技术，计算机技术等，从维修管理上看，有计划管理、技术、工艺、质量管理，组织管理（计划、资源保障、质量检验），信息管理（归集、反馈情报），备件管理，经济管理（技术经济分析、决策、预测）等。

故障理论是本学科的理论基础。它揭示了机械设备投入生产后的运动规律，是维修的决策依据。故障理论是在可靠性、维修性、摩擦磨损润滑学、工程诊断学等学科的基础上建立发展起来的一门综合性理论。

维修技术是指具体的生产技术。它是在各工程技术学科的成果之上建立发展起来的一套全面的机械设备维护和零件部件修复工艺体系。状态监测和故障诊断技术是根据工程诊断学的原理和方法建立起来的一套完善的检测和诊断系统。这种系统的建立标志着机械设备进入现代化的管理阶段，并使机械设备实现预知维修成为可能。

维修管理主要是对机械设备维修提供政策性指导和最优政策，筹划维修资源保障，对维修生产进行控制，以实现机械设备正常技术状态所需的人力、物力、财力、信息等的最佳组合。

二、本学科在国民经济中的地位和作用

机械设备维修管理是企业管理的重要组成部分。机械设备维修管理的水平和现代化程度无疑将直接影响企业的生产能力、产品质量、生产成本、劳动生产率以及能源消耗和环境保护等，因而将直接影响国民经济的发展速度。

建国以来，我国人民通过艰苦奋斗已经打下了十分可观的工业基础。到 1994 年，我国工业固定资产达 33441.5 亿元，其中机器设备占半数以上。我国金属切削机床等设备的拥有量已居世界前列。这些机器设备是我们进行社会主义现代化建设的宝贵的物质基础，只有把它们管好、用好、修好才能充分发挥它们的作用。这正如李鹏同志在第二次全国机械设备维修

管理工作会议的讲话中所说的：“管好、用好、修好设备不仅是保证简单再生产的必不可少的条件，而且对提高企业经济效益、推动国民经济持续、稳定、协调的发展，有着极为重要的意义，我们一定要把设备管理和维修工作抓紧、抓好。”

为了加强设备管理，提高生产技术装备水平和经济效益，保证安全生产和设备正常运行，1987年国务院发布了“全民所有制工业交通企业设备管理条例”。这个条例作为我国政府制定的第一个法规文件，对做好企业设备的管理工作，实现我国经济长期稳定发展具有十分重要的指导意义。

维修工作在国民经济中具有举足轻重的地位。据前几年统计，前苏联的修理企业或单位有13万多个，在修理部门工作的人数有8百万人。在机器制造业中，基本生产工人与修理工人之比，前苏联是5:1，美国为10:1。前苏联从事金属切削设备维修的工人数量，要比生产这些设备的工人数量多3倍，美国保养和修理汽车的工人要比汽车工业工人多10倍。这两个国家消耗在汽车、拖拉机、机床等设备的维修费比设备的原来价格要高出几倍到几十倍。我国的修理企业、车间、站、所等单位就更是种类繁多，遍及各个部门，消耗在设备修理上的资金比率就更加突出了。由此可见，修理工作已不再是从属的第二位的工作。

随着科学技术的不断发展，生产设备已逐渐的由单台设备全部由操作人员掌握向着多人掌握并相互联系的机械化、半自动及全自动生产线的方向发展。随着计算机的广泛应用，各种参数的测量、采集和控制也逐渐由计算机担任。在这种发展趋势下，企业对操作工人的要求从数量上和技术上都降低了，有高技术工人向熟练工发展的趋势。与此同时，由于维修工作的对象从单一的机械、电气转向复杂的连动线、半自动生产线和自动生产线等机电一体化设备，又由于生产线对设备工作的可靠性要求很严，因而对维修工作提出了更高的要求，使维修管理逐步向更高的层次发展，因此，对维修的技术要求越来越高。在用新技术装备的企业中，在产品流程基本稳定的情况下，维修成了主要的技术工作，维修人员同运行人员同属企业的主要力量。那种把维修技术放在附属地位的观点，是与当前技术的迅速发展不相适应的陈旧观点。

在设备的寿命周期中，设备的使用、维修阶段是时间最长的阶段，也是最重要的阶段。对设备进行计划和投资的目的就在于通过设备的使用运行，生产出产品，获取经济效益。

在实际生产中，从设备规划、采购，到设备到厂并安装调试，设备管理部门面临的最多的和最重要的工作就是维修工作。所以，维修工作是设备管理中的一个极为重要的环节。

三、机械设备维修工程在国内外的的发展状况

1. 近年来国外设备维修工程的新发展

近年来，随着科学技术的迅猛发展，现代化的机器设备大量涌现。其特点是结构复杂，价格昂贵，自动化程度高，生产率成倍增长。但是，这些设备一旦出现故障就会打乱生产计划，造成停产，带来很大经济损失。故障的不断出现迫使人们不得不重视设备的管理和维修，尤其是70年代以来，世界能源、资源、环境污染危机的出现，促使人们更加认真地考虑如何以最少的能源、资源消耗获取最大的经济效益，促使人们寻求新的设备管理方法和维修技术，以适应企业发展的需要。在研究方法和研究范围上，突破了单纯讨论局部技术问题，而转向从整体、系统、全局出发研究设备的管理、维修、经济效益及人才培养等方面的理论和方法，从而将设备管理维修工作与系统工程、可靠性工程和现代化科学技术的其他学科联系起来，使现代管理和维修在理论与实践上都得到了迅速发展。

70年代初期形成的英国的“设备综合工程学”，受到很多工业发达国家的重视。这一新的设备工程学的定义是：“为谋求经济的全寿命费用而应用于实物资产（即工厂、机械、装置、建筑物、构筑物）的有关管理、财务、工程技术以及其业务的综合学科”。这门学科的具体内容涉及：“装备、机械、设备、建筑物和构筑物等的可靠性与维修性技术要求和设计，以及安装、运转、维修、改装和更换，还有设计、使用与费用等方面的数据资料的反馈”。设备综合工程学是设备管理现代化的重要理论。它实际上是系统论、控制论、信息论的基本原理在设备管理中的体现和运用。

美国军事工程方面的“维修工程学”和“后勤工程学”运用系统论的观点和方法研究和解决设备的维修管理问题。它强调设备由设计制造到使用维修全过程的整体规划，强调使用部门就机器的可靠性和维修性向设计制造部门提出保障要求，以促进设备的改进和更新。它强调设备的综合管理，重视全寿命周期费用。

日本的“全员生产维修”，即 TPM (Total Productive Maintenance)，是日本从本国的国情出发，吸收美、英等国的经验而创立的。它以追求设备的综合效率最高为目标，确立以设备一生为对象的全系统的生产维修，TPM 的突出特点是“全员参加”，特别是“操作者的自主维修”。

前苏联的计划预修制度已有很长的历史。70年代中期，前苏联就开始推广预防检测技术，以减少设备故障及生产损失。他们还组织备件的专业化生产，推广先进的维修工艺，改进设备管理体制，加强维修费用核算。

由上可见，美、英、日等工业发达国家的设备管理维修理论，都是以追求寿命周期费用的经济性为目标的。事实上，最早提出追求寿命周期费用经济性的是美国国防部。从1966年起，他们就着手研究这个问题。1974年后，美国国防部对武器以及其他大型成套设备器材，均要求按寿命周期费用签订合同。在贯彻上述新的维修思想的实践中，这些国家都取得了明显的经济效益，如日本推行 TPM 后，使不少企业的设备维修费降低 $1/2$ ，故障停机时间减少 $3/4$ 。

2. 目前我国机械设备维修工程的形势

近年来，在党中央和国务院的正确领导下，我国设备维修工程取得了可喜的进展，并开始进入现代化管理新阶段。其表现为：

1) 改变了旧的设备管理概念，树立了新的设备综合管理概念，即以提高经济效益为中心，追求设备寿命周期费用的经济性和设备综合效率。

2) 改变以往简单修复的办法，树立管理、更新和改造相结合的做法。

3) 在企业中逐步推广维修方式的改革，推广维修新技术和状态监测技术。

4) 加强人才培养。经常举办设备管理、维修短训班，并在高等院校开设“设备工程”及其相近专业，以便培养高的工程技术人才。

5) 推广现代化的管理办法，提高设备的科学管理水平。

6) 建立了多种形式的设备维修经济责任制，加强设备管理维修的横向联系。

在推进我国设备现代化管理的过程中，1982年成立的中国设备管理协会起了重要的作用。它在配合政府部门改革设备管理维修体制，推广现代化管理方法，推进技术进步，搞好设备修理、改造，开展国内外学术和经验交流等方面做了大量工作。目前，它正团结国内专家学者及设备管理维修界同行，为实现我国设备管理现代化而继续奋斗。

四、学习本课程的目的与要求

通过本课程的学习,应使学生掌握机械设备维修工程的基本理论与技术,了解新技术、新工艺、新材料在维修中的应用,培养学生在设备运行、维护、修理、安装实践中分析与解决实际问题的能力。对学生的基本要求是:

- 1) 掌握机械设备故障发生与发展的基本规律和特征等基本理论。
- 2) 掌握机械设备运行、维护、安装方面的基本知识。
- 3) 掌握机械设备监测与故障诊断的基本技能与失效零件的分析与判断能力。
- 4) 掌握失效零件的修复技能及新技术、新工艺在修理中的应用能力。
- 5) 获得试验技能的基本训练。

第一章 机械设备维修与管理的基础知识

第一节 机械设备的老化

机械设备在使用或闲置中会逐渐发生老化。老化分为有形老化和无形老化两种形式。

一、有形老化

运转中的机械设备在力的作用下，零部件会发生摩擦、振动和疲劳现象，导致机械设备的实体产生老化。这种老化叫作第Ⅰ类有形老化。它一般表现为：

- 1) 零部件的原始尺寸，甚至形状发生改变；
- 2) 零部件之间的公差配合性质发生变化，精度降低；
- 3) 零件破坏。

这类老化，以金属切削机床为例，会使加工精度、表面粗糙度和生产效率等降低。老化到一定程度后，设备就不能正常工作，甚至发生事故。

由于自然力的作用造成设备的有形老化，叫作第Ⅱ类有形老化。它与生产过程的作用无关，设备在闲置或封存时会产生这种老化。第Ⅱ类有形老化是由于机械生锈、金属腐蚀、材料老化等原因造成的，时间久了会自然丧失精度和工作能力。

科技进步对设备的有形老化是有影响的，如耐用材料的出现、零部件加工精度的提高、结构可靠性的增大，以及正确的预防维修制度和先进的修理技术的采用等，都会减少有形老化的发生。但随着高效的生产技术、自动化管理系统、数控技术等应用，会大大减少设备的辅助时间，加大机动时间。此外，技术进步又常与提高速度、压力、载荷和温度相联系，这些又都会加剧设备的有形老化。

可以利用下面的经济指标估价机械设备的有形老化：

$$\alpha_p = \frac{R}{K_1}$$

式中 α_p ——设备的有形老化程度（用占其再生产价值的百分比表达）；

R ——修复全部老化零件所用的修理费用；

K_1 ——在确定设备老化程度时该种设备再生产的价值。

设备有形老化程度指标不能超过 $\alpha_p=1$ 的极限。

二、无形老化

无形老化又叫经济老化。它是由于非使用和非自然力作用引起的设备价值的损失，在实物形态上看不出来。无形老化分两种形式：

1) 由于相同结构设备再生产价值的降低而产生的原有设备价值的贬低（如技术进步使生产率提高、劳动耗费降低，原设备贬值），叫作第Ⅰ种无形老化。

2) 由于不断出现性能更完善、效率更高的设备而使原有设备显得陈旧落后，而产生的经济老化（原设备的价值相对降低），叫第Ⅱ种无形老化。

设备使用价值的降低与技术进步的具体形式有关,比如在加工方法基本不变的情况下,先进的新设备的出现将使原设备的使用价值大大降低;当用新材料取代旧材料时,加工旧材料的设备将会被淘汰;当改变原生产工艺时,原生产工艺线上的设备将失去使用价值。

在技术进步影响下的无形老化程度,用设备价值降低系数来表示,即

$$\alpha_1 = \frac{K_0 - K_1}{K_0} = 1 - \frac{K_1}{K_0}$$

式中 α_1 ——设备无形老化程度;

K_0 ——设备的原始价值;

K_1 ——考虑到第 I、II 种无形老化时设备的再生价值。

计算 α_1 时, K_1 必须反映技术进步的两个方面对现有设备贬值的影响:一是相同设备再生价值的降低;二是具有较好功能和更高效率的新设备的出现。这时, K_1 可用下式表示:

$$K_1 = K_n \left(\frac{q_0}{q_n} \right)^\alpha \left(\frac{c_n}{c_0} \right)^\beta$$

式中 K_n ——新设备的价值;

q_0 、 q_n ——使用相应的旧设备、新设备时的年生产率;

c_0 、 c_n ——使用相应的旧设备、新设备时的单位产品耗费;

α 、 β ——劳动生产率提高指数和成本降低指数。指数取值范围: $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$ 。

三、综合老化

设备的有形老化和无形老化均将引起设备原始价值的贬低。有了两种老化的指标,就可计算同时发生两种老化的综合指标。

设备有形老化的残余价值(用原始价值的比率表示)为 $1 - \alpha_p$;设备无形老化的残余价值(用原始价值的比率表示)为 $1 - \alpha_1$;两种老化同时发生后的设备残余价值为 $(1 - \alpha_p)(1 - \alpha_1)$ 。

因而,计算设备综合老化程度的公式为

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_p)(1 - \alpha_1)$$

式中 α ——设备综合老化程度(用原始价值的比率表示)。

任何时刻设备在两种老化作用下的残余价值 K , 可用下式表示:

$$K = (1 - \alpha)K_0$$

代入 α 整理得

$$K = (1 - \alpha)K_0 = [1 - 1 - (1 - \alpha_p)(1 - \alpha_1)]K_0 =$$

$$\left(1 - \frac{R}{K_1} \right) \left(1 - \frac{K_0 - K_1}{K_0} \right) K_0 = K_1 - R$$

可见, K 值等于设备再生产的价值减去修理费用。

例如:设备的原始价值 $K_0 = 30000$ 元,当前需要修理,其修理费用 $R = 10000$ 元,若该种设备再生产时价值 $K_1 = 22000$ 元,则:

$$\alpha_p = \frac{10000}{22000} = 0.455$$

$$\alpha_1 = \frac{30000 - 22000}{30000} = 0.267$$

$$K = (22000 - 10000) \text{ 元} = 12000 \text{ 元}$$

四、设备老化的补偿

设备的有形老化和无形老化造成的经济后果是有差别的。有形老化严重的设备在修理之前常常不能正常工作，而无形老化严重的设备却不影响它的继续使用。

如果能使设备的有形老化期与无形老化期相互接近，即当设备需要大修时正好出现效率更高的新设备，这时，便无需进行旧设备的大修理，可更换新设备。假如设备已遭到严重有形老化，而无形老化还没有到来，便需要对设备进行大修理或更换一台相似的设备。假如无形老化期早于有形老化期（在科学技术飞速发展的时期，常常是这样），是更新还是继续使用旧设备，这就要在经济上做全面考虑。

根据设备不同的老化形式，应采取不同的补偿方式。补偿分为局部补偿和完全补偿两种。有形老化的局部补偿是修理，无形老化的局部补偿是现代化的改装。有形老化和无形老化的完全补偿则是更换。

第二节 机械设备的故障

一、故障及其分类

在现代化生产中，由于企业的设备结构复杂，自动化程度很高，各部门、各系统的联系非常紧密，因而设备的故障，哪怕是局部的失灵，都会造成整个设备的停转，整个流水线、整个自动化车间的停产。设备故障给企业带来巨大经济损失和造成严重事故危害的例子，是不胜枚举的。正因为这样，世界各国，尤其是各工业发达国家都十分重视设备故障及其管理的研究。

本节简要介绍机械设备故障的宏观分析和管理方法。

（一）故障的概念

一般，将故障定义为：设备（系统）或零部件丧失了规定功能的状态。

通常，把设备丧失规定的功能称为功能故障，简称故障。这里，必须明确什么是规定的功能，设备的功能丧失到什么程度才算出了故障。比如汽车制动不灵，在规定的速度下刹车，停车超过了允许的距离，那么就认为是制动系统故障。“规定的功能”只有在机械设备运行中才能显现出来，如设备已丧失规定功能而设备未开动，则故障就不能显现。有时，设备还尚未丧失功能，我们根据某些物理状态、工作参数、仪器仪表检测，可以判断即将发生故障，并可能造成一定的危害，因此，应当在故障发生之前进行有效的维护或修理。这种根据某些物理状态、工作参数而事先鉴别出设备即将发生的故障，称为潜在故障。通过有效手段诊断潜在故障并及时予以排除，是现代维修技术中所要解决的一个重要课题。

（二）故障的分类

设备故障按其性质、原因、影响、特点等情况，可做如下分类：

1. 按故障性质划分

- （1）间断性故障 只是短期内丧失某些功能，稍加修理调试就能恢复，不需要更换零件。
- （2）永久性故障 某些零部件已损坏，需要更换或修理才能恢复。

2. 按影响程度划分

永久性故障按造成的功能丧失程度可划分为：

- （1）完全性故障 导致完全丧失功能（这是从广义而言，应随使用情况而定）。

(2) 部分性故障 导致某些功能的丧失。

3. 按故障发生的快慢划分

(1) 突发性故障 不能靠早期试验或测试来预测的故障。

(2) 渐进性故障 能够通过早期试验或测试来预测的故障。

4. 按故障程度和故障快慢划分

(1) 破坏性故障 既是突发性又是完全性的故障。

(2) 渐衰失效性故障 既是部分性又是渐进性故障。

5. 按故障原因划分

(1) 磨损性故障 在设计设备时就预料到的正常磨损所造成的故障。

(2) 错用性故障 由于使用的应力超过设计规定值所造成的故障。

(3) 固有的薄弱性故障 使用时的应力虽未超过规定值,但此值本身已不适用而导致的故障。

6. 按故障的发生、发展规律划分

(1) 随机故障 故障发生的时间是随机的。

(2) 有规则故障 故障的发生比较有规则。

每一种故障都有其主要特征,即所谓故障模式或故障状态。各种机器设备,结构千变万化,即使一个系统、一台机器,其功能也是复杂的。罗列各种设备的故障状态是相当复杂的,但归纳它们的共同形态,可列出以下数种:异常振动、磨损、疲劳、裂纹、破断、过度变形、腐蚀、剥离、渗漏、堵塞、松弛、溶融蒸发、绝缘劣化、短路、击穿、异常声响、油质劣化、材料劣化、粘合、污染、不稳定及其他。

二、设备的可靠性

一种产品(包括设备、机件、元器件等)质量的好坏,一般应有三个标准。首先是技术性能指标,即功能。除此之外,还有两个共同的标准,那就是:①出故障要尽量少;②出了故障要容易修复。即设备的可靠性和维修性。可靠性和维修性是研究产品的故障情况的两个重要的概念。从根本上讲,可靠性是主要的。如果设备很可靠,很少出故障,那也就很少需要维修,维修的工时、费用等就自然低。因而,从广义上讲,可靠性中包含有维修性。在不少资料里,维修性都归为可靠性中的一部分。下面先从可靠性的概念谈起。

(一) 可靠性的概念

可靠性是体现产品耐用和可靠程度的一种性能。它是在设计时赋予产品的。

可靠性的定义是: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。

所谓“规定的条件”是指设计时考虑的环境条件(如温度、压力、湿度、振动、大气腐蚀等)、负荷条件(载荷、电压、电流等)、工作方式(连续工作或断续工作)、运输条件、存贮条件及使用维护条件等。设备处于不同条件下,其可靠性是不同的。设备对上述各种条件的适应性越强,则其可靠性越好。

可靠性还是一项时间性质量标准。人们都希望设备能够长时间地保持规定的功能,但是随着时间的推移,设备的可靠性将越来越低,设备只能在某一时限范围内是可靠的,不可能永远可靠。设备在设计时应规定其时间性指标,如使用期、有效期、行驶里程、作用次数等。

设备的可靠性与“规定的功能”有着极密切的联系。“规定的功能”是指设备的性能指标,这里所说的“规定功能的完成”是指若干功能的全体,而不是其中的一部分。

设备的可靠性又分为固有可靠性、使用可靠性和环境适应性三方面。固有可靠性是指设备在设计、制造之后所具有的可靠性。使用可靠性是设备在使用和维修过程中表现出来的可靠性。环境可靠性是设备在周围环境的影响下所具有的可靠性。固有可靠性是设备所能达到的可靠性的最高水平。由于各种因素的影响,设备的使用可靠性与其固有可靠性会有很大的差距,例如,航空设备的使用可靠性比其固有可靠性有时相差几倍甚至几十倍。

可靠性问题的研究是从第二次世界大战开始的,主要用于电子元器件、兵器、航空等方面。可靠性的全面发展时期是在60年代和70年代。可靠性问题之所以受到重视,是由于现代设备日益复杂,使用环境日益严酷,新技术、新材料从研究开发到应用的周期大大缩短,产生不可靠不安全的因素日趋增多,设备发生故障造成的危害和损失显著增大。

可靠性问题的研究主要有两个方面:一是研究可靠性的数学估计方法和使用信息的统计处理方法等;二是研究故障物理学(磨损、疲劳、腐蚀等)、机器及零部件的有关计算和各种保证机器可靠性的工艺方法、维修管理措施等。可靠性的问题涉及面广,内容多。它包括了从科研、设计、制造、贮存、包装、运输到使用、维修的整个过程,涉及到数学、基础自然科学、环境工程、系统工程、机械工程、故障物理学、计划管理、质量管理等多学科的基础理论和研究成果。

(二) 可靠性的量度

可靠性的定义只是一个定性的概念,在研究可靠性问题时,还需要有定量的指标。一台设备的可靠性不能停留在“好”或“不好”、“可靠”或“不可靠”这样笼统的评价上,而必须具体地确定可靠性的数量是多少。下面介绍几种可靠性的主要指标:

1. 可靠度 $R(t)$

可靠性用概率表示时称为可靠度。它的定义是:产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。用 $R(t)$ 表示。

可靠度的最大值为1,称为100%地可靠;最小值为0,称为完全不可靠。由此可见, $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

可靠度也可以理解为在规定条件下和规定的时间内,不发生任何一个故障的概率。所以,有人把可靠度叫作无故障工作概率(或可靠性函数)。

产品在使用中发生故障是带有随机性的,但是,当我们在试验中投入了大量的产品,就会发现到某个规定时刻为止,没有出故障的产品与投入试验的样品总数 N 的比值是遵循一定规律的。如果对同一产品进行多次试验,随着试验样品数 N 的增大,这个比值就愈来愈稳定于一个常数,这个常数就是该产品在规定时间内完成规定功能的能力的量度,即可靠度。比如说,某型仪表在工作800h的可靠度为98%,这就意味着,如果多次抽取100个同样仪表,在规定的条件下工作800h,平均有98个能完成规定的功能。

2. 不可靠度 $F(t)$

产品在规定条件下和规定的时间内发生故障的概率为不可靠度(或故障分布函数),用 $F(t)$ 表示。

设 N 足够大, $n(t)$ 是从开始工作到时间 t 时,产品出故障的个数,则 $R(t)$ 和 $F(t)$ 可近似地表示为

$$R(t) \approx \frac{N - n(t)}{N}$$

$$F(t) \approx \frac{n(t)}{N}$$

二者的关系为

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

由于 $n(t)$ 是产品从开始工作到时间 t 为止的累积故障数, 所以 $F(t)$ 又叫累积故障率。它是故障对时间的累积分布函数。

开始使用或试验 ($t=0$) 时, 认为产品都是好的, 故 $n(0)=0, R(0)=1, F(0)=0$; 随着使用时间的增加, $n(t)$ 不断增加, $R(t)$ 递减, $F(t)$ 递增; 由于不管寿命多长, 产品总是要失效的, 因而 $n(\infty)=N, R(\infty)=0, F(\infty)=1$ 。 $R(t)$ 和 $F(t)$ 随时间的变化关系曲线见图 1-1。

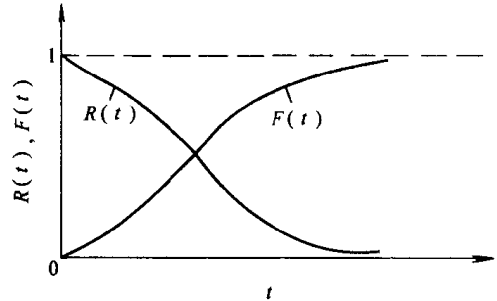


图 1-1 $R(t)$ 、 $F(t)$ 随时间的变化曲线

3. 故障密度 $f(t)$

从可靠度的大小, 可以看出某一时刻可靠性的情况, 但却看不出可靠度随时间变化的情况。为了表示可靠度 (或者不可靠度) 随时间的变化情况, 采用了故障密度。

不可靠度 $F(t)$ 对时间的微分, 称为故障密度 (或故障密度函数), 用 $f(t)$ 表示, 即

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{N} \frac{dn(t)}{dt}$$

故障密度反映了可靠度 (或不可靠度) 随时间变化的快慢。某一时间的故障密度大, 则这时可靠度下降得快, 或不可靠度增加得快。如果在 Δt 时间间隔内产品发生故障的数量为 $\Delta n(t)$, 则有

$$f^*(t) = \frac{1}{N} \frac{\Delta n(t)}{\Delta t}$$

以上 $f^*(t)$ 表示 t 时刻给定的一段时间 Δt 内, 同一类产品在单位时间发生故障的数量 ($\Delta n(t)/\Delta t$) 与 N 的比值, 该比值又叫作经验故障密度 (单位为 h^{-1})。例如 1000 只晶体管工作时间在 900~950h 这段区间内, 有 10 只失效, 则

$$\begin{aligned} f^*(900) &= \frac{1}{1000} \frac{\Delta n(900)}{t} = \\ &= \frac{1}{1000} \times \frac{10}{50} \text{h}^{-1} = \\ &= 2 \times 10^{-4} \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

如果把 1000 只晶体管从开始使用到全部失效的数据都统计出来, 将得到的数据列表, 作直方图。当 N 足够大、且直方图的 Δt 分得很小时, 我们可得到晶体管的故障密度曲线。此过程见图 1-2。

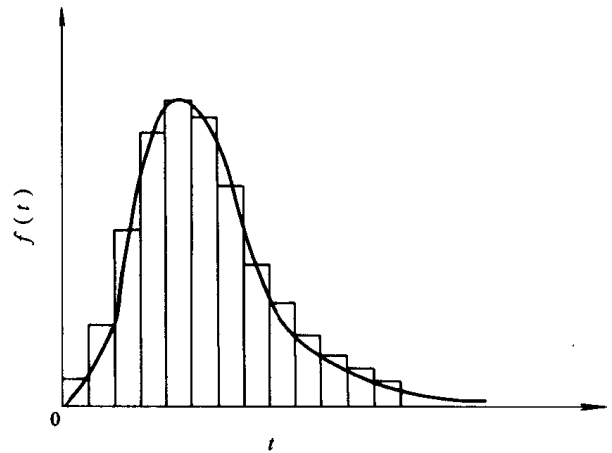


图 1-2 故障密度曲线

故障密度与可靠度的关系见图 1-3。当产品工作到某时刻 t_1 时, 在 $f(t)$ 曲线与横坐标轴所包围的面积内, t_1 以前的部分代表不可靠度, (即 $t_1 = \int_0^{t_1} f(t) dt$), t_1 以后的部分代表可靠度。

4. 故障率 $\lambda(t)$

用故障密度度量可靠性存在的不足是：到了使用或试验后期，残存的产品数越来越少，在同一 Δt 内的 $\Delta n(t)$ 也越来越少，最后故障密度趋于零，这时用故障密度难以准确地反映可靠性。为此，引入故障率的概念。故障率分两种：

(1) 瞬时故障率 产品在某一瞬时 t 的单位时间内发生故障的概率，叫做瞬时故障率，有时简称故障率，用 $\lambda(t)$ 表示。

设有 N 个产品从 $t=0$ 时开始工作，到 t 时刻的故障数为 $n(t)$ ，残存数为 $N_{\#} = N - n(t)$ ；若在 t 到 $t + \Delta t$ 区间内有 $\Delta n(t)$ 个产品发生故障，当 Δt 趋于零时，瞬时故障率为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{N_{\#}} \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} = \frac{1}{N_{\#}} \frac{dn(t)}{dt}$$

(2) 平均故障率 产品在某一段时刻内单位时间发生故障的概率，叫作平均故障率，以 $\bar{\lambda}(t)$ 表示

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_{\#} \Delta t}$$

式中 $\Delta n(t)$ ——在 Δt 这段时间内发生故障的数量；

$N_{\#}$ ——在 Δt 这段时间内产品的平均残存数，它等于这段时间开始时的残存数加上结尾时的残存数被 2 除。

例如，有 800 个元件在 400h 的使用时间内有 32 个出故障，则

$$N_{\#} = \frac{800 + (800 - 32)}{2} = 784$$

$$\lambda(400) = \frac{32}{784 \times 400} \text{h}^{-1} = 1.02 \times 10^{-4} \text{h}^{-1}$$

故障率的常用单位是 $10^{-4}/\text{h}$ 、 $10^{-5}/\text{h}$ 。故障率越低，可靠性越高。

注意，故障率是单位时间内故障数与残存数的比值，故障密度是单位时间内故障数与总数的比值， $\lambda(t)$ 比 $f(t)$ 反映故障情况更灵敏。

可以推出，瞬时故障率可用故障密度与可靠率之比来表达，即

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

可靠度可以表示为以 $\lambda(t)$ 的时间积分为指数的指数型函数，即

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]$$

5. 平均故障间隔期 (MTBF) 和平均寿命时间 (MTTF)

对不可修复产品，从开始使用到失效前的平均工作时间，叫作平均寿命时间 MTTF (Mean Time to Failure)。对可修复产品，在相邻两次故障间的平均时间，称为平均故障间隔期 MTBF (Mean Time Between Failure)。

寿命服从于指数分布的产品，当工作到平均故障间隔期 MTBF 或平均寿命时间 MTTF

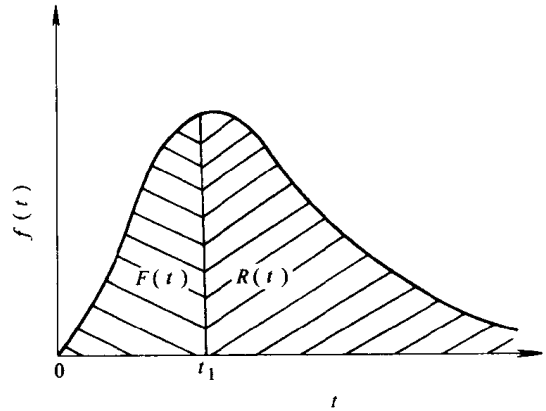


图 1-3 $f(t)$ 与 $F(t)$ 、 $R(t)$ 的关系

时,不出故障的数量只占总数的 36.8%;而寿命服从正态分布的产品,工作到该时间时,未出故障的占总数的 50%。

(三) 故障规律

使用经验及试验表明,一些设备的故障率随时间的变化规律如图 1-4 所示。该曲线两头高,中间低,形状像个浴盆。设备的故障率随时间的变化大致分三个阶段:早期故障期、随机故障期和耗损故障期。

(1) 早期故障期 早期故障出现在设备工作的早期。其特点是故障率较高,且故障随时间的增加而迅速下降。早期故障一般是由于设计、制造上的缺陷等原因引起的,设备进行大修理或改造后,再次使用也会出现这种情况。设备在接近使用条件下的“磨合”或“调试”,可使不合格的设备预先被淘汰。

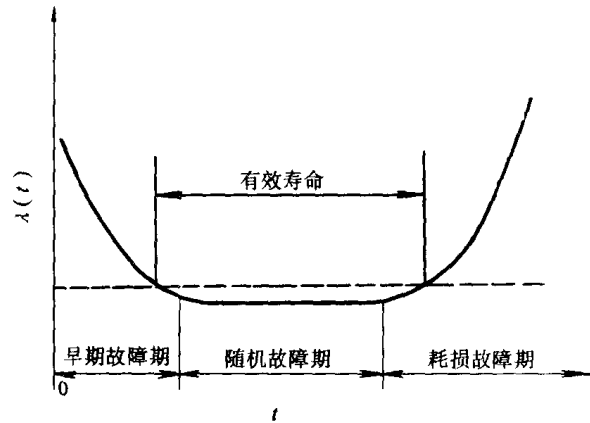


图 1-4 故障率浴盆曲线

(2) 随机故障期 随机故障期在设备的有效寿命期内,在这个阶段,故障率低而稳定,近似为常数。随机故障是由于偶然因素引起的。随机故障不可预测,不能通过延长磨合期来消除。设计上的缺点、零部件缺陷、维护不良、操作不当等都会造成随机故障。

(3) 耗损故障期 耗损故障出现在设备使用的后期。其特点是故障率随运转时间的增加而增高。耗损故障是由于设备零部件的磨损、疲劳、老化、腐蚀等造成的。这类故障是设备接近寿命末期的征兆。如事先进行预防性维修,可经济而有效地降低故障率。

并不是所有设备都具有以上三个故障期。不少设备只具有其中一个或两个故障期,如有些没有早期故障期,有些则达不到耗损故障期。

(四) 维修性及其量度

1. 维修性的概念

维修性是系统在规定的条件下进行维修时,在规定时间内完成维修的可能性。也就是说,维修性就是产品进行维修的难易程度。

维修性和维修是两个不同的概念。我们平时常说的维修,是指维护和修理所进行的所有活动,包括保养、修理、改装、翻修、检查、状态监控和防腐蚀等。而维修性是指产品在维修方面所具有的特性和能力。

产品的维修性是在设计时被赋予的。它是一种设计特性。维修性对于可修复产品来讲的,是根据维修的需要而提出的。对于不需要或不可以维修的产品,如只能使用一次的导弹,就不存在维修性的问题。

对维修性的基本要求是维修简便、维修停机时间短、维修费用低、对维修技术要求不高。

与维修工作密切相关的要素是:维修对象(被维修设备)、维修人员的技术水平和维修所用的装备设施。这三者互相关联,共同决定维修效果。

2. 维修性的量度

(1) 维修度 $M(t)$ 可修复产品在规定的条件下和在规定的时间内完成维修的概率叫维