



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高职高专机电类规划教材

机械设备修理工艺学

第2版

晏初宏 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电子 课 件
教 师 免 费 下 载

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高职高专机电类规划教材

机械设备修理工艺学

第2版

主编 晏初宏
参编 苏 杭 贺建明 吴先文 周秦源
主审 唐礼盛 刘 坚



机械工业出版社

本书是高等职业技术教育机电设备维修与管理专业的适用教材。全书共七章,主要介绍了机械设备修理的基本知识、机械设备的拆卸与装配、机械修理中的零件测绘设计、机械失效零件的修复技术、机械设备修理的检研具的选用、机械设备修理精度检验和典型机械设备的修理等内容,各章后均附有思考题与习题。书中采用了新国标规定的名词术语,较系统地介绍了尺寸链知识在机械设备修理中的应用,以及在机械设备修理中所采用的新理论、新材料、新工艺、新技术和新方法。

本书可作为高等职业技术教育院校、业余职工大学有关专业的教材,也可供大专院校和从事机械设备维修与管理工作的工程技术人员阅读参考,或作为企业、工厂中设备维修部门、管理部门工人的自学教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械设备修理工艺学/晏初宏主编. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2010. 7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专机电类规划教材

ISBN 978-7-111-30731-0

I. ①机… II. ①晏… III. ①机械维修—高等学校:
技术学校—教材 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 091925 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 郑 丹 责任编辑: 刘良超

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 509 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30731-0

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书自1999年出版以来,受到了广大师生和机械维修界同行的支持与帮助,于2006年8月被教育部评审为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,编者在此谨表示衷心的感谢。

随着工业现代化的发展,宇航、军工、机械、电子等行业对机械设备的精度要求越来越高。要提高机械设备的修理质量,就必须深入研究机械设备修理领域中的新理论和各种工艺误差因素对修理质量影响的规律,同时需要进行大量的科学试验和生产实践,并采用新理论、新材料、新技术、新工艺、新方法以及科学管理等措施。在本次修订过程中,编者正是本着这一理念努力做好修订工作,为读者推出了《机械设备修理工艺学》的第2版。

修订后的《机械设备修理工艺学》主要有以下特点:

1) 在保留本书第1版总体框架的基础上,删除了锥齿轮的测绘、蜗杆蜗轮的测绘、万能升降台铣床的修理和桥式起重机的修理等内容,调整了部分章节的结构,减少了篇幅,精简了内容,使全书结构更紧凑、内容更精湛、问题阐述更全面。

2) 按教育部的要求,突出了高等职业技术教育培养特色,本教材遵循以应用为主的原则,围绕机械设备修理的技术问题组织内容,注重培养学生对机械设备进行修理和故障分析的能力,解决机械设备现场修理技术问题的能力,在机械设备修理过程中采用新理论、新材料、新技术、新工艺和新方法的能力。

3) 适应了“准确服务于培养目标,更新技术方法和提高技术应用水平”的社会新形势,本书所阐述的机械设备修理的基本理论、机械失效零件的修复技术和典型机械设备的修理工艺等内容,突出了“实际、实用、实效”的原则,体现了以能力为本位培养学生创新精神和实践能力的教育教学思想。

本书可作为高等职业技术教育院校、业余职工大学有关专业的教材,也可供从事机械设备修理维护与管理工作的工程技术人员阅读参考,或作为工厂企业设备维修、管理部门工人的自学教材。

本书的修订工作,主要由张家界航空工业职业技术学院晏初宏老师主持完成。张家界航空工业职业技术学院的周秦源老师负责了第四、五、六章的修订工作,凡进军老师设计和制作了本书的电子教案。刘坚副教授在百忙中审阅了全书的修订稿,并提出了许多宝贵的意见和修改建议。此外,本书的编写和修订也参考了唐季盛编写的《机械设备修理工艺学讲义》,在此表示感谢。

由于编者水平有限,修订工作仓促,书中的缺点在所难免,恳请读者能一如既往地给予批评指正。

编者

第1版前言

本书是高等职业技术学校机械设备维修与管理专业的适用教材,是根据国家教育委员会试行的《高等职业技术学校专业目录》要求和机械工业部初步审定的招收初中毕业生、学制五年的教学大纲(试行稿)编写的。除供高等职业技术学校、业余职工大学、中专、职工中专等有关专业选用外(若中专、职工中专选用该教材,可删除有关章节或少讲有关章节的内容。如第二章的第四节的内容可少讲,第三章的第五、六、七节和第七章的三、四节等内容可删除),也可供大专院校和从事机械设备维修与管理工作的工程技术人员参考,或作为企业设备维修、管理部门工人的自学教材。

本书编写的指导思想是围绕机械设备修理的技术问题组织内容,注重培养机械设备的修理和故障分析的能力,解决机械设备现场修理的技术问题的能力,在机械设备修理中采用新理论、新工艺、新技术的能力,以适应现代化建设过程中对机械设备维修与管理工作的需要。

全书共七章,分别介绍了机械设备修理的基本知识、机械设备的拆卸与装配、机械修理中的零件测绘设计、机械失效零件的修复技术、机械设备修理的检研具的选用、机械设备修理精度检验和典型机械设备的修理等内容。书中采用了新国标规定的名词术语,各章都较系统地介绍了机械设备修理的新理论、新工艺、新技术,全书着重介绍了尺寸链知识在机械设备修理中的应用。为巩固所学知识,启发学生思考问题,各章后均附有思考题与习题。

本书的绪论、第一、二、三章由大庸航空工业学校晏初宏老师编写,第四章由四川机械工业学校吴先文老师编写,第五、六章由大庸航空工业学校贺建明老师编写,第七章由山东机械工业学校苏杭老师编写,晏初宏老师为本书主编。

本书由重庆机器制造学校唐礼盛高级讲师主审。参加审稿会的除编审人员外,还有浙江机械工业学校沈绍槐高级讲师和严鹤峰高级讲师、贵州机械工业学校周楠高级讲师、重庆机器制造学校龚奇平高级讲师、四川机械工业学校李登万高级讲师、黑龙江机器制造学校张庆斌高级讲师。他们在审稿会前和会中对书稿提出了许多宝贵的意见。另外,北京机械工业学校陈万利讲师、福建高级工业专门学校范光松高级讲师、长治机电工业学校郭卫军讲师和张淑珍讲师也对编写工作提出了很好的建议。在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

编 者

目 录

第2版前言	
第1版前言	
绪论	1
思考题与习题	6
第一章 机械设备修理的基本知识	7
第一节 机械零件的失效	7
第二节 设备修理前的准备工作	16
第三节 尺寸链	21
第四节 修理基准和典型修理作业的内容	44
第五节 设备零件修理更换的原则	50
思考题与习题	53
第二章 机械设备的拆卸与装配	56
第一节 机械设备的拆卸	56
第二节 零件的清洗和检验	63
第三节 机械零部件的装配	67
第四节 装配方法	83
思考题与习题	104
第三章 机械修理中的零件测绘	
设计	108
第一节 零件测绘设计的工作过程和一般方法	108
第二节 一般零件的测绘方法	118
第三节 标准件和标准部件的处理方法	126
第四节 圆柱齿轮的测绘	127
第五节 凸轮的测绘	152
思考题与习题	157
第四章 机械失效零件的修复技术	161
第一节 零件修复工艺概述	161
第二节 零件的修复工艺	165
第三节 刮研技术	187
第四节 机床导轨修理工艺	194
思考题与习题	204
第五章 机械设备修理的检具、研具的选用	206
第一节 平尺、平板、角尺	206
第二节 检验棒	209
第三节 研磨棒和研磨套	211
第四节 水平仪和准直仪	213
思考题与习题	222
第六章 机械设备修理精度检验	223
第一节 机械设备修理精度检验概述	223
第二节 机械设备几何精度的检验方法	226
第三节 装配质量的检验和机床试验	246
第四节 机床的特殊检验	250
第五节 机床大修质量检验通用技术要求	254
思考题与习题	257
第七章 典型机械设备的修理	258
第一节 轴与轴承的修理	258
第二节 丝杠螺母副和曲轴连杆机构的修理	270
第三节 分度蜗杆副的修理和传动齿轮的修理调整	274
第四节 固定联接和壳体类零件的修理	280
第五节 卧式车床的修理	284
思考题与习题	321
参考文献	323

绪 论

一、修理技术在国民经济中的地位

机械设备在使用的过程中，零部件的破坏往往自表面开始，表面的局面损坏又往往造成整个零件失效，最终导致机械设备的损坏和停产。机械零部件的失效形式主要为变形、断裂、磨损和腐蚀。

零部件的变形(特别是基础零部件变形)，使零部件之间相互位置精度遭到破坏，影响了各组成零部件的相互关系。国内外汽车行业对发动机缸体(包括使用和长期存放的备用缸体)测试的结果表明，几乎全部缸体均有不同程度的变形，80%以上的缸体变形超出其规定的标准。有人估算变形对寿命的影响在30%左右，对于金属切削机床类的设备，由于精度要求较高，变形的影响就更加突出。

绝大多数的机械零件、工程构件产生断裂往往是由疲劳引起，在某些工业部门，疲劳破坏占断裂事故的80%~90%。通常疲劳破坏起源于表面或内部缺陷处，逐渐形成微裂纹，在循环应力作用下裂纹扩展，最后断裂。起源于表面的疲劳破坏比起源于内部缺陷的疲劳破坏更为常见。

机械零部件的磨损全部发生在表面，据我国冶金、矿山、农机、煤炭、电力和建材等部门的统计，每年仅因磨料磨损引起的损失就需补充100万吨钢材。目前，我国进口机电设备磨损的零部件，每年需花数亿美元外汇去购买补充。

机械零部件与腐蚀介质接触和反应会出现表面腐蚀，其种类很多。据美国、德国等国公布的一些腐蚀损失资料，腐蚀造成的直接经济损失约占国民经济总产值的1%~4%。因腐蚀造成的停产、效率降低、成本增高、产品污染和人身事故等间接损失更为惊人。目前世界钢铁年产量约7亿吨，其中有1.4亿吨因腐蚀而消耗。

机械设备修理技术在修复关键零部件、替代进口配件、提高设备维修质量、扩大维修范围、节约能源和材料等方面都发挥了重要作用。比如，重载车辆的轴承磨损失效后，其内外圈配合面采用刷镀技术修复，相对耐磨性比原用新件高6.5倍。变速箱的输出法兰盘采用超音速火焰喷涂修复后，其使用寿命是原用新件的2.26倍。醋酸泵的密封环和轴套采用等离子喷涂氧化铬涂层技术进行修复，使用寿命提高10倍以上。

又如，唐山水泥机械厂6.3m双柱龙门车床，进口价格相当于1吨黄金，因年久失修和地震的损伤，几乎报废，采用电刷镀技术使机床起死回生，工作良好，成本仅为4万元。首都钢铁厂从比利时引进的二手连铸设备，以废钢铁的价格廉价购进，其中三百多件大轴承座和轧辊，经刷镀修复，已在生产线上正常使用。长江三峡工程中挖泥船的发动机曲轴因局部磨损，不能工作，当时如从日本购买新轴，加上运费和进口关税等需人民币120多万元，从订购到交货需三个月以上的时间，其停工损失更为可观，而采用电弧喷涂技术修复，总费用仅3.5万元，不足曲轴价格的3%。聚乙烯生产线上的造粒模板，进口价为3万美元，由于磨损，使用一年后即需更新，采用激光熔敷技术进行修复所需费用不足进口价格的1/10。

再如,煤矿井筒处于阴暗、潮湿、淋水环境之中,相对湿度大,腐蚀十分严重。目前用涂装防护,其使用年限仅为三至五年,因此在井筒服役期间需多次更换新件,价格昂贵。专家估计,我国煤炭系统的井筒每年因腐蚀造成的损失超过 10 亿元。1990 年,有关单位先后对淮北桃园煤矿、山西晋山煤矿、河南铁王沟煤矿井筒钢结构件进行了电弧喷涂,其预计寿命增至三十年以上。大庆石油化工总厂 1996 年对乙烯三期工程 ABS 装置中的 ABS 粉料料仓采用碳钢加表面喷涂铝代替不锈钢,施工面积达 1800m^2 ,节约投资 50% (达 406 万元)。首钢冶金机械厂制造的 7.5t 钢包回转台,其 $\phi 500\text{mm}$ 的柱塞尺寸小了 0.12mm,采用电刷镀技术弥补了偏差,按时完成了安装任务。

由此可见,修理技术能直接对许多完全失效或局部失效的零部件进行修复强化,以达到重新恢复其使用价值或延长其使用寿命的目的。若再考虑在能源、原材料和停机等方面节约的费用,其经济效益和社会效益是难以估量的。修理技术在国民经济中发挥了重要作用,已成为国民经济中最重要的技术支柱之一。

二、我国修理技术的发展概况

设备修理技术是一门理论与实践紧密结合的应用科学,在我国发展的重要标志是 20 世纪 60 年代初,原一机部设备动力司与中国机械工程学会共同组织编写的机械工业第一部修理技术大型工具书《机修手册》的问世。紧接着,1965 年在沈阳举行了全国机械设备维修学术会议,现场展览并演示了金属喷涂、振动堆焊、金属扣合、无槽电镀(刷镀)、环氧树脂粘接等修复新工艺,提倡修旧利废,降低修理费用。会上,代表们共同倡议筹组中国机械工程学会设备维修学会。

20 世纪 70 年代末,设备维修学会恢复筹备,并在福建省漳州市召开了学术年会。会上,决定创办会刊《设备维修》杂志。同年,与日本设备工程师协会开展了国际学术交流活动。

20 世纪 80 年代初,在成都召开的学术年会上,正式成立了中国机械工程学会设备维修学会。会后,设备维修学会开发应用了设备诊断技术,举行各种专题学术讨论会,并加强了《设备维修动态》的编辑发行工作。

20 世纪 80 年代的中、末期,设备维修学会组织编写了《设备管理维修术语》、《静压技术在机床改造上的应用》、《设备管理与维修》等书籍。特别是我国的表面工程技术在这段时期的发展异常迅速,为现代修理技术开辟了广阔的前景。例如,中国机械工程学会于 1987 年建立了学会性质的表面工程研究所,1988 年创办了《表面工程》期刊并连续出版至今。

20 世纪 90 年代初,中国机械工程学会表面工程分会成立,并在国内召开了多次国际或全国性的表面工程学术会议,提出了表面工程的学科体系,如图 0-1 所示。

为了更有效地发挥表面工程技术的应用效果,在确定采用某种技术之前,要进行科学的表面工程技术设计,表面工程的技术设计体系如图 0-2 所示。

我国表面工程的研究与应用多从修理入手,并逐步扩展到了新设备与新产品的设计和制造中。通过在设备修理领域和制造领域推广应用表面工程技术,我国已经取得了几百亿元的经济效益。一些国内外知名专家预言,表面工程将成为主导 21 世纪工业发展的关键技术之一。

三、修理技术的发展趋势

随着世界科学技术的发展,现代修理技术主要依靠计算机技术、状态监测与设备故障诊

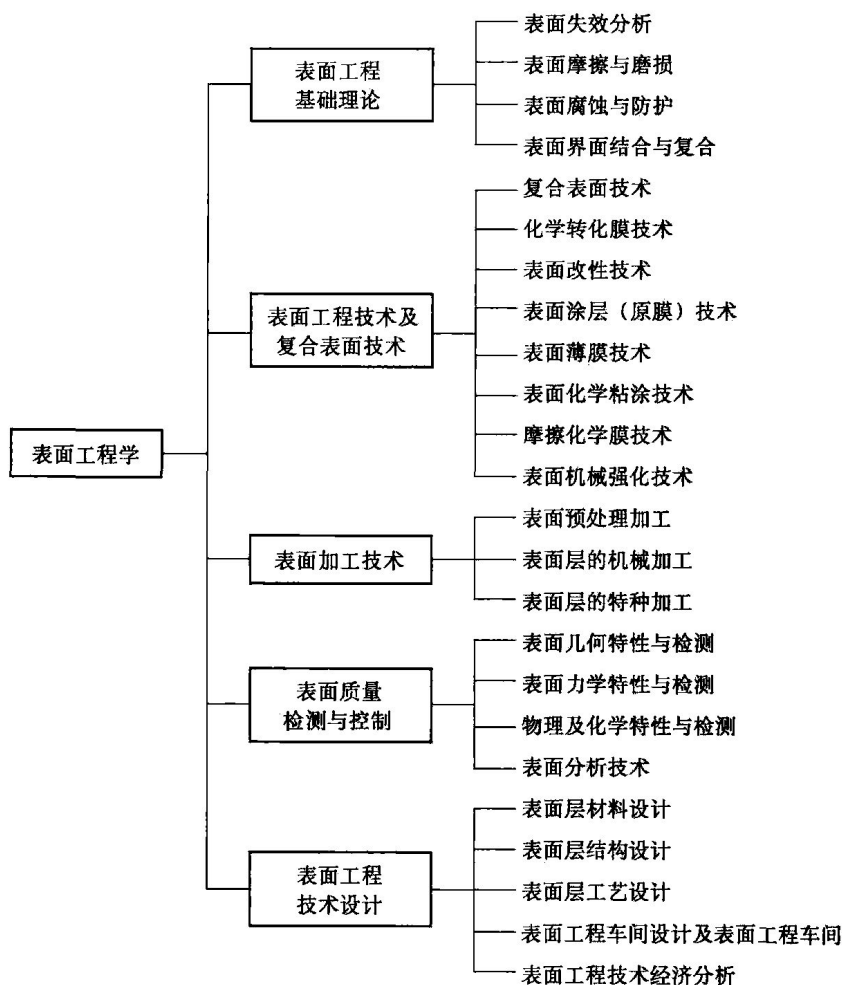


图 0-1 表面工程的学科体系

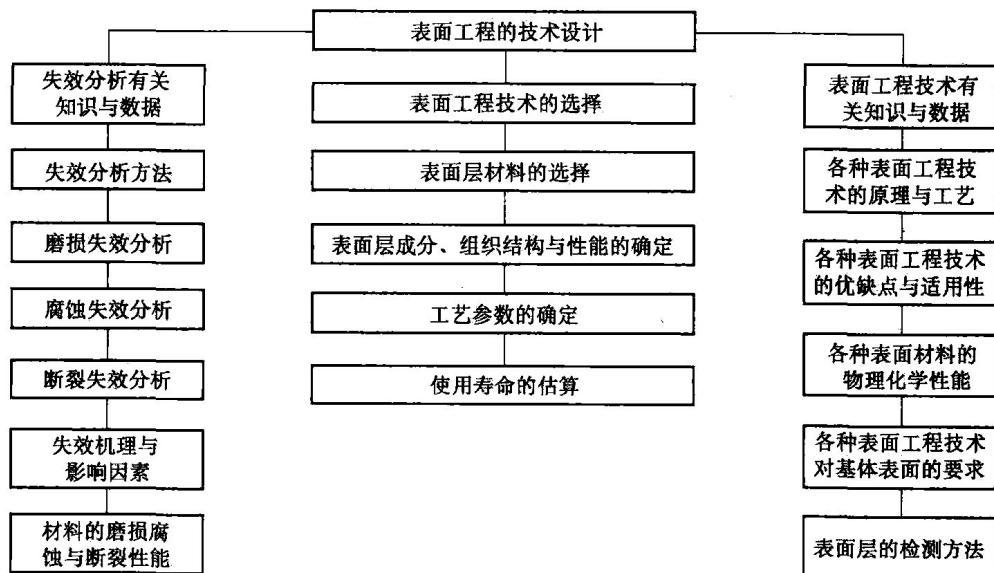


图 0-2 表面工程的技术设计体系

断技术和表面工程技术这三项通用技术。

1. 计算机技术

计算机技术的发展使在修理技术领域实现修理工艺设计自动化成为了可能,通过向计算机输入被修理零部件的原始数据、修理条件和修理要求,由计算机自动地进行编码、编程直至最后输出经过优化的修理工艺规程卡片的全过程,称为计算机辅助修理工艺规程设计。

用计算机直接与修理过程连接,对修理过程及其工装设备进行监视和控制,这是计算机辅助修理的直接应用。

计算机不与修理过程直接连接,而是用来提供修理计划、进行技术准备与发出各种指令和有关信息,以进一步指导和管理修理过程,这就是计算机辅助修理的间接应用。

随着计算机技术在各部门的广泛应用,人们越来越认识到,单纯孤立地在各个部门用计算机辅助进行各项工作,远没有充分发挥出计算机控制的潜在能力,只有用更高层的计算机将各个环节集中和控制起来,组成更高水平的修理系统,才能取得更大更全面的经济效益,这就是计算机辅助修理系统。

一个大规模的计算机辅助修理系统包含有二级或三级计算机分级结构,如用一台微机控制某一个单过程,一台小型计算机负责监控一群微机,再用一台中型或大型计算机负责监控几台小型计算机,这样就形成了一个计算机网络。用这个网络对复杂的修理过程进行监督和控制,同时进行如零部件修理程序设计和安排修理作业计划等各种生产准备和管理工作。

2. 状态监测与设备故障诊断技术

设备故障诊断技术,有其发展形成的过程。早期曾有“故障检测技术”、“自动检查技术”、“状态监测技术”和“机械健康监测技术”等多种命名,直至后来被统一称为“设备故障诊断技术”。

设备故障诊断技术,初步可定义为:在设备运行过程或基本不拆卸的情况下,了解和掌握设备的运行技术状态,确定其整体或局部正常与否,及时发现故障及其原因,判断故障的部位和程度,预测故障发展趋势和今后的技术状态变化的一门技术。简要地讲是一种能够定量地监测设备的状态量,并预测其未来趋势的技术。

设备状态监测的含义是人工或用专用仪器、工具,按照规定的监测点进行间断或连续的监测,掌握设备异常的征兆和劣化程度。状态监测与故障诊断既有联系、又有区别,有时往往把状态监测称为简易诊断,因为两者的含义和功能是十分相近的。状态监测通常是通过测定设备的一个或几个单一的特征参数,例如振动、温度等参数,检查其状态是否正常,当特征参数在允许范围内时,则可认为是正常的,若超过允许范围,即可认为是异常的,若特征参数值将要达到某个设定极限值时,就应判定安排停机修理。

设备诊断技术包括检出设备存在的问题的第一次诊断(简易诊断),以及对问题作出判定的第二次诊断(精密诊断)两部分。这两种诊断要求掌握理论和设备结构方面的知识并具有充分的经验,特别是精密诊断,需要更高一级的技术知识。为提高这方面的效率并用于支援专家们的诊断工作,20世纪80年代在人工智能的基础上开发了设备诊断专家系统。

专家系统是用特定领域中的专门知识模拟人类专家解决实际问题的思维模式,将多义的、不确定的、模糊的知识和专家的经验知识汇存而成的系统。美国GE公司为排除内燃电力机车故障,1981年开始,借助于高级工程师David Smhh四十年的工作经验,开发了专家系统。到1983年,该系统有530条规则,可处理50%的故障问题;到1984年,该系统拥有

1200 条规则,改进到可处理 80% 的疑难问题,能用图像及电视片回答问题,用菜单形式显示出故障区域图像及维修方案。图 0-3 所示为该系统的总体结构,它具有一般专家系统结构的代表性特点。

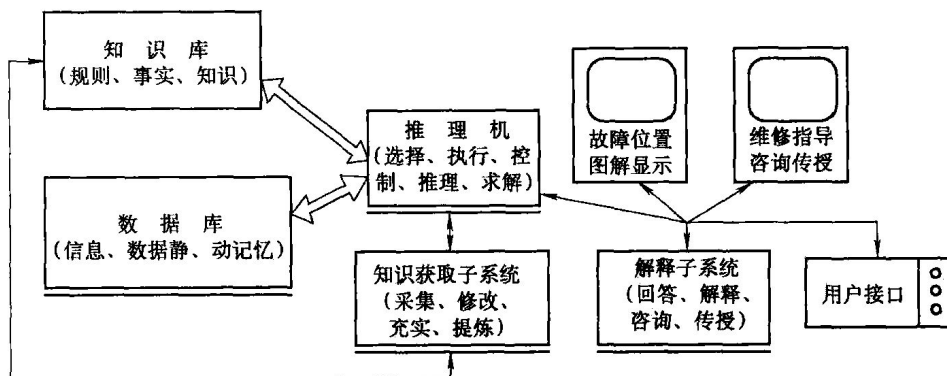


图 0-3 美国 GE 公司内燃电力机车故障诊断 DELTA/CATS 专家系统总体结构

回转机械的设备诊断专家系统(MDES-1)是日本 1987 年 4 月公布的新产品,它的知识结构包括问诊(对话)、简易诊断、精密诊断三部分,可按照专家提出的步骤进行诊断。该系统的构成如图 0-4 所示。

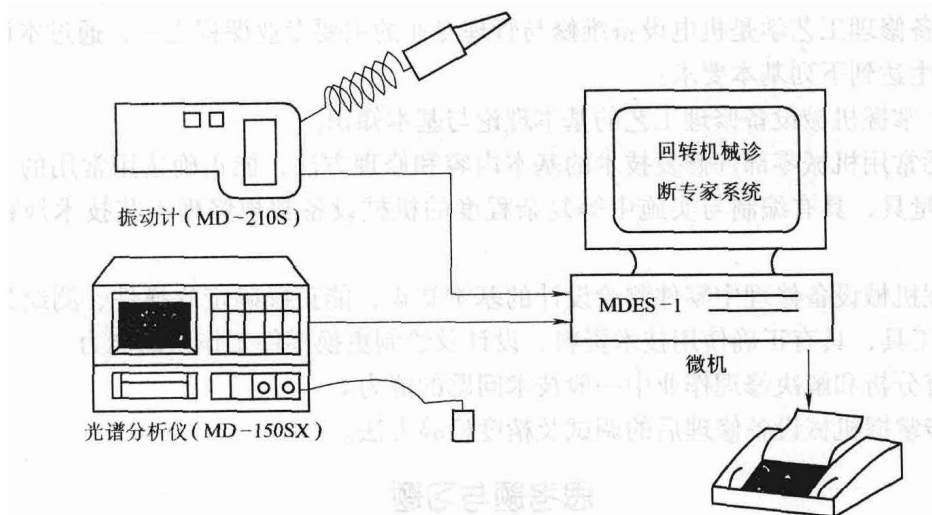


图 0-4 MDES-1 系统构成图

3. 表面工程技术

我国的表面工程技术在过去的十几年中,已获得了重大发展,在国民经济中发挥了重要作用。但表面科学与工程在理论研究和工程应用的总体水平上,与工业发达国家相比仍有较大差距,原因是各部门的研究自成体系,力量分散,没有综合、复合,设备落后,攻关力量薄弱,尚难以承担对国民经济建设具有重大影响、关系全局的重点工程和关键技术的攻关。

表面工程技术的发展方兴未艾、前景广阔。相信在我国表面工程专家及工程技术人员共同努力下,随着表面工程学科和技术的发展及其产业化,表面工程技术对加速和推进我国工业现代化进程,推动我国设备修理工程的高新技术的发展,将起到不可估量的促进作用。

四、机械设备修理工艺学课程的性质和任务

机械设备修理工艺学就是以机械设备修理中的工艺问题为研究对象的一门专业技术课程。由于生产实践中的修理工艺问题牵涉面极为广泛,因此要解决好机械设备修理工艺问题应从优质、高产、低消耗(即质量、生产率和经济性)三个方面的指标来衡量。

首先,随着工业现代化的发展,宇航、军工、电子等行业对机械设备的精度要求越来越高。要提高机械设备的修理质量,就必须深入研究在设备修理过程中的各种工艺误差因素对修理质量影响的规律,同时需要通过大量的科学实验和生产实践、采用新工艺以及科学管理等措施来保证和提高修理质量。

其次,机械设备修理工艺另一个重要的发展趋势是不断地提高劳动生产率,即采用高效率的修理方法和工装设备。精密修理工艺、表面工程技术、状态监测与设备诊断技术以及计算机技术等先进技术的应用使机械设备修理工艺进入一个崭新的阶段。

机械设备修理工艺中的经济性是与质量、生产率有密切联系的一个综合性问题。在给定的修理对象和技术要求的条件下,选择什么修理工艺方法和什么修理工装设备来修理,就需要通过经济分析或经济论证加以确定。为了提高机械设备的修理质量或者提高劳动生产率而采用某种新的工艺方法和措施时,必须考察其获得的经济效果如何。

质量、生产率和经济性三者具有辩证关系,在解决某一具体的修理工艺技术问题时,需要全面地加以考虑。

机械设备修理工艺学是机电设备维修与管理专业的主要专业课程之一,通过本课程的学习,应使学生达到下列基本要求:

- 1) 初步掌握机械设备修理工艺的基本理论与基本知识。
- 2) 熟悉常用机械零部件修复技术的基本内容和修理方法,能正确选用常用的工具、检具、研具、量具,具有编制与实施中等复杂程度的机械设备常规修理工艺技术规程的基本能力。
- 3) 掌握机械设备修理中零件测绘设计的基本知识,能正确确定修换件、测绘失效零件及选用测绘工具,具有正确使用技术资料、设计及绘制更换零件工作图的能力。
- 4) 具有分析和解决修理作业中一般技术问题的能力。
- 5) 初步掌握机械设备修理后的调试及精度检验方法。

思考题与习题

- 0-1 修理技术在国民经济中有何地位?
- 0-2 我国修理技术发展的重要标志是什么?
- 0-3 现代修理技术主要依靠哪些通用技术?
- 0-4 本门课程的性质是什么?

第一章 机械设备修理的基本知识

第一节 机械零件的失效

一、零件的变形

一个结构或零件，特别是基础零件在外加载荷的作用下发生变形，将导致零部件之间相互位置精度遭到破坏，影响各组成零件的相互关系。据估算，变形对零部件寿命的影响在30%左右。对于金属切削机床类设备，由于精度要求较高，变形的影响就更加突出。在修理实践中发现，修理质量低、大修周期短的一个重要原因就是零部件的变形。

1. 零件变形的原因

材料的变形可分为弹性变形和塑性变形。弹性变形是可以恢复的变形，应力消除后变形消失；应力超过材料的屈服强度，则产生塑性变形，应力消除后变形不能完全恢复，被保留下来的部分变形就是塑性变形。机械零件的变形有以下四个方面的原因：

(1) 毛坯制造 铸造、锻造、焊接等热加工零件由于温度差异、冷却和组织转变的先后不一都会形成残余的内应力，尤其是铸造毛坯，形状复杂，厚薄不均，在浇铸后的冷却过程中，形成拉伸、压缩等不同的应力状态，可能发生变形或断裂。经热处理的零件也存在内应力。毛坯的内应力是不稳定的，通常在12~20个月的时间内逐步消失。但随着应力的重新分布，零件会产生变形。

(2) 机械加工 在切削加工过程中，由于装夹、切削力、切削热的作用，零件表层会发生塑性变形和冷作硬化，因而产生内应力，引起变形。如果毛坯是在有内应力的状态下进行切削加工，切除一部分表面层后，破坏了内应力的平衡，由于内应力重新分布，零件将发生变形。对毛坯虽然安排了消除内应力的工序，在切削加工中也达到了精度要求，然而制成后的零件经过一段时间，在残余应力的长期作用下，会发生内应力松弛而变形（就是弹性极限降低，且产生减少内应力的塑性变形）。特别是箱体类零件和长而大的基础零件，因厚薄过渡很多，极易产生残余应力，而发生内应力松弛的变形。

(3) 操作使用 工程机械、矿山机械、冶金设备、锻压设备及其他热加工机械设备等，在较恶劣的工况下工作，其个别零部件在极限载荷或超载荷的情况下运行，高温导致零部件屈服强度降低，从而使零部件产生变形。由于操作不当使设备过载或产生高温，从而使零部件变形，直至因变形过大而使零部件失效。

(4) 修理质量 在设备修理过程中，如果不考虑被修零件已经变形，常常会造成零件更大的变形或增加变形的危害。例如用机械加工方法修复零件（磨削导轨），制定修复工艺、确定定位基准和安装夹紧零件时，不考虑零件原来变形的情况，或修理操作不当，均会引起零件形位误差加大。特别是采用焊接、热处理、塑性变形等修复工艺方法修复零件时，没有考虑热应力、相变应力的作用，压力加工没有考虑弹性后效（应变逐渐恢复而落后于应力的现象），以及内应力松弛等，都将会产生应力和变形。

2. 零件的变形失效

零件产生变形后, 如果出现不能承受规定的载荷、不能起到规定的作用或与其他零件的运转发生干扰等情况时, 零件则产生了变形失效。变形失效可以是弹性变形失效, 也可以是塑性变形失效。变形失效主要有两个特征, 即体积发生变化和几何形状发生变化。例如一辆汽车的发动机在运行几千公里后, 出现失去速度控制和压力控制的情况, 而且发出一种不均匀的排气声。拆开发动机分析后, 发现排气阀的外层弹簧在使用中产生了 25% 的塑性变形, 致使弹簧不能正常工作。又例如一支商品猎枪, 由于枪筒在上千次的发射试验后外表面产生膨胀而无法继续使用。这种由于尺寸的变化和几何形状的变化而引起的变形失效, 在机械零件的失效中是经常发生的。

(1) 弹性变形失效分析 当一个零件没有明显的永久变形或涉及复杂的应力场时, 必须考虑弹性变形失效, 因为变形失效包含一次加载屈服, 而且大部分零件在载荷的作用下将发生弹性弯曲。例如一个曾经用高弹性模量合金制成的零件, 如果改用低弹性模量的合金制作, 那么在给定载荷的条件下零件的弯曲量将比用高弹性模量合金制作的要大得多。这在机床主轴的刚度计算时尤为重要, 因为零件材料弹性模量的高低反映了零件工作时的刚度条件, 零件的材料弹性模量高则零件工作时的刚度高, 反之则零件工作时的刚度低。

(2) 累积应变失效分析 当某一零件在承受稳态载荷时, 还承受与主动方向不同的一个循环变化的叠加载荷, 循环变化的载荷所产生的应变使零件的两端每半周一次交替发生超过屈服点(σ_s)的应变。塑性应变将随循环周次的增加而累积, 这种累积将使一个构件或零件的总体尺寸沿稳态应力方向均匀地变化, 累积应变的结果是导致构件或零件发生韧性断裂或低周疲劳断裂。有些材料具有循环应变软化现象, 即当叠加一个在比例极限和屈服强度之间的交变应力时, 弹性极限或弹性模量出现连续下降的趋势。

(3) 过载变形失效分析 每一个构件或零件都有一个承载极限, 当承载载荷超过此极限时则称为过载, 机械零件在过载情况下会发生变形或断裂。在强度理论定量设计中以及零件强度极限分析中, 大多数情况是将应力完全限制在弹性范围内, 并把材料屈服强度作为结构或零件变形失效的合理依据。

1) 应力分析: 在机械设计中常用的许用应力为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0.2}}{n} \quad (1-1)$$

式中 $\sigma_{0.2}$ ——屈服强度;

n ——安全系数。

一般在静载荷作用的情况下, 对塑性材料规定的安全系数为 1.2 ~ 2.0, 对脆性材料规定的安全系数为 2.0 ~ 3.5。

2) 极限分析: 在工程力学的计算中, 往往将材料看成一均匀的连续体, 因此在外载作用下认为该材料在达到一定的屈服强度后, 材料的性质是塑性的, 然而它并不产生加工硬化, 而是在应力不变的情况下一直发生塑性变形。当一个结构或零件在被破坏前允许有一定塑性变形的情况下, 对结构或零件本身的安全性可以采取这种极限分析的方法。

3) 变形量分析: 在上述两种设计计算分析中, 屈服强度都被假定为是计算承受静载结构的安全载荷的判断依据, 而在具体的设计工作中并未考虑将会经常碰到的变形量问题, 但这些变形量问题也正是机械零件变形失效中不可忽略的问题。

3. 减轻零件变形危害的措施

零件变形是不可避免的,我们只能根据其规律,采取相应的措施,减轻其危害。

1) 在机械设计中不仅要考虑零件的强度,还要考虑零件的刚度和制造、装配、使用、拆卸修理等有关问题。合理选择零件的结构尺寸,改善零件的受力状况,使零件的壁厚尽量均匀,以减少毛坯制造时的变形和残余应力。同时在设计中还应注意应用新技术、新工艺和新材料。

2) 在机械加工中要采取一系列工艺措施防止和减小变形,对毛坯要进行时效处理以消除其残余内应力。时效处理可以进行自然时效处理(在自然条件下,把毛坯在露天存放1~2年,内应力逐渐消失)也可以进行人工时效处理(将毛坯高温退火、保温缓冷而消除内应力),还可以利用振动的作用消除内应力。在制定零件机械加工工艺规程或在机械加工过程中,均要在工序和工步安排上、工艺装备和操作上采取减少变形的工艺措施,如采用粗精加工分开的原则等。在切削加工中和修理中减少基准的转换,保留切削加工基准留给修理时使用,如保留轴类零件的中心孔等。

3) 加强生产技术管理,制定并严格执行操作规程,不超负荷运行,避免局部超载和过热,加强设备的检查和维护。

4) 在设备修理中,不仅要恢复零件的尺寸、配合精度、表面质量等,还要检查和修复主要零件的形状和位置误差,制定出与变形有关的标准和修理规范。尤其是要注意铸件的修理,进行必要的时效处理以消除其残余内应力,防止变形。机械加工修复零件时,注意定位基准表面本身的精度,并要注意切削加工时和装夹的变形。采用热加工和压力加工工艺修复零件时,要采取相应措施来减小应力和变形,如施焊时,尽量减小热影响区,非施焊表面采取降温措施等。

二、零件的断裂

断裂是指在外力的作用下发生的几个原子间距的正向分离与切向分离,断裂是材料或零件的一种复杂现象,在不同的力学、物理和化学环境下会有不同的断裂形式。例如,机械零件在循环应力作用下会发生疲劳断裂,在高温持久应力作用下会发生蠕变断裂,在腐蚀环境下会发生应力腐蚀或腐蚀疲劳。在实际工程应用上常根据工程构件或机械零件的断口的宏观形态特征将断裂分为韧性断裂和脆性断裂,或按载荷性质分为一次加载断裂和疲劳断裂。

1) 韧性断裂是超过强度极限前发生韧性变形后而发生断裂,多数为穿晶断裂,即裂缝是割断晶粒而穿过,一般是在切应力作用下发生,又称为切变断裂。

2) 脆性断裂一般发生在应力达到条件屈服强度前,没有或只有少量的塑性变形,多为沿晶界扩展而突然发生,又称为晶界断裂,断口呈结晶状,平滑而光亮,称为解理面,因此这种断裂也称为解理断裂。低温、高应变速率、应力集中、晶粒粗大和脆性材料均有利于解理,由于裂纹扩展速率快,往往造成严重的破坏事故。

3) 一次加载断裂是零件在一次静拉伸、静压缩、静扭转、静弯曲或一次冲击下的断裂。

4) 疲劳断裂为反复加载断裂,即经历反复多次的应力作用或能量负荷循环后才发生断裂的现象。据估计,机械零件的断裂失效中疲劳断裂失效占80%左右。

1. 零件疲劳断裂的基本原理

零件承受循环载荷时,在局部将出现很大的塑性变形,表面将出现一些滑移线或滑移

带, 滑移带中产生一些缺口峰, 如图 1-1 所示。峰底处将产生高度应力集中, 在持续反复载荷作用下, 经过一定周期, 发展成微观裂纹, 称为疲劳核心, 一般从晶界与表面相交处开始。材料表面层有夹杂物、零件表面加工痕迹、表面划伤及其他缺陷也可认为是一些微观裂纹。微观裂纹形成后, 进一步加强了滑移带的应力集中, 在循环负荷作用下, 裂纹将继续向内部发展。在通常情况下, 裂纹的扩展占据了大部分的疲劳寿命, 这一阶段叫疲劳裂纹的亚临界扩展。很多裂纹的深度增加, 连接成为一个主导裂纹, 当其达到临界长度后, 发生突然断裂, 称为疲劳裂纹的临界扩展。根据疲劳裂纹扩展的规律, 应用断裂力学的原理计算, 可以定量判别哪些裂纹会发展, 哪些裂纹不会发展, 已经有裂纹的零件还能安全工作多少时间。

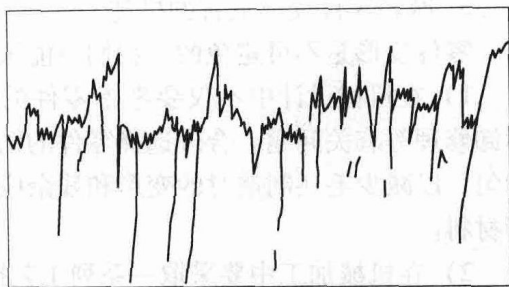


图 1-1 在滑移带中产生的缺口峰

几乎所有零件, 由于冶金、机械加工和使用等种种原因, 均有宏观或微观裂纹, 只是裂纹的大小不同而已。断由裂发展而来, 断裂事故的后果是严重的, 所以目前修理中对发现裂纹的零件都要加以修复或更换, 重要零件一旦发现裂纹则立即报废。有裂纹的零件不一定立即就断裂, 都有一段亚临界扩展时间, 一定条件下, 裂纹还可以不发展, 就是说有裂纹的零件也可以不断裂。国外某些航空发动机, 对于一些重要零件都有明确规定的允许使用的裂纹长度、必须修理的裂纹长度和必须报废的裂纹长度, 既保证了安全使用, 又节约了大量的材料。当知道零件现有裂纹尺寸后, 计算亚临界扩展的速率, 可以推断出零件达到使用期限前的剩余寿命。例如英国 50 万 kW 发电机转子运行 3500h 后, 发现其惯性槽底普遍存在深达 200mm 左右的裂纹, 按断裂力学方法进行疲劳剩余寿命估算, 最保守估计还可安全运行 7000h, 实践已证明该发电机在转子严重带伤条件下可继续运行。又如我国刘家峡化肥厂一个高压桶, 发现一处严重裂纹, 当时没有备用高压桶, 通过断裂力学分析, 确认可安全使用 6 个月, 在此期间买到了该部件, 把停产损失减到了最低程度。

2. 减轻断裂危害的措施

影响断裂的因素是多方面的, 要减轻断裂的危害, 只有深入研究断裂的机理, 充分认识断裂的规律之后, 才能提出减轻断裂危害的有效措施。

(1) 在机械设计中要尽量减少应力集中 如焊缝通常是疲劳断裂失效的起源区域, 对 T 形焊接接头, 采取适当的几何形状, 焊后打磨圆角或钻孔, 均能减轻应力集中的程度。零件截面改变处采用组合圆角比采用单一半径圆角能成倍增加疲劳寿命。图 1-2a 所示为设计不当的直角结构, 拐角 A 处有严重的应力集中; 图 1-2b 所示为小幅度改进设计, 虽增加了三角加强肋, 得到较小改进, 拐角 B 处仍有较严重的应力集中; 图 1-2c 所示为改进了的设计, 使应力集中减轻, 并使焊缝离开应力集中处; 图 1-2d 所示为接头拐角处设计成圆角; 图 1-2e 所示为用组合圆角代替普通圆角。选择适当的材料也十分重要, 应全面考虑材料的力学性能, 尤其是设计重载荷结构或零件时, 往往倾向于选择高强度材料, 材料屈服强度提高会大幅度降低材料对脆性断裂的抗力, 因此不应片面追求强度储备。为防止裂纹的发生和扩展进而防止断裂失效, 设计时可以采用“裂纹防止结构”, 如设计金属结构时采用组合肋板。

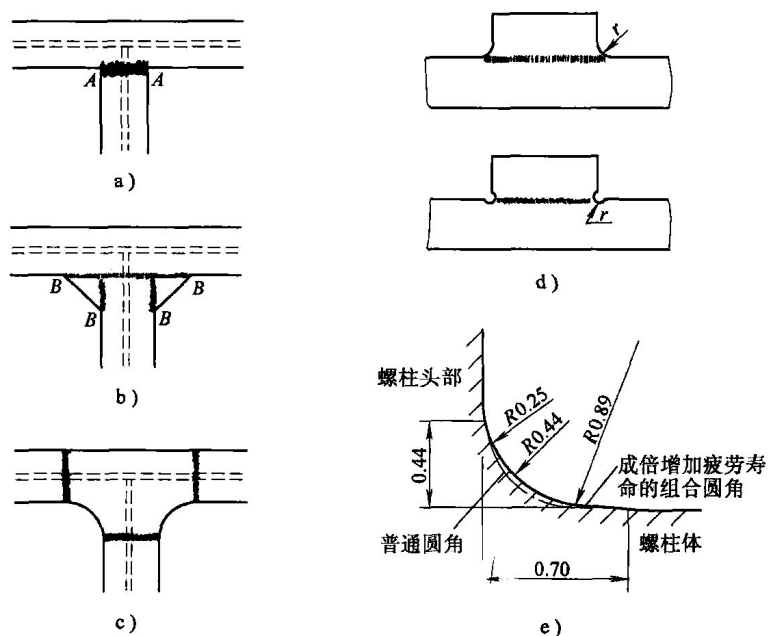


图 1-2 焊接结构及零件截面几何形状的改变

(2) 在机械制造工艺方面 延长零件疲劳寿命的最有效途径是引入残余压应力,如喷丸强化处理、冷滚压加工等。利用金属纤维在不同方向上力学性能的差别提高疲劳寿命,如锻造螺柱的疲劳寿命是机械加工螺柱的疲劳寿命的三倍,滚压螺纹的疲劳寿命也可延长很多。对零件进行表面热处理和化学处理,提高零件表层的强度和硬度,也能延长其疲劳寿命。

(3) 机械设备在使用中的注意事项 要注意及时发现零件裂纹,定期进行无损探伤;尽量减轻零件的腐蚀损伤,因为腐蚀会增加裂纹扩展的速率;尽可能减少设备运行中各部分的温差,如发动机启动时各部分温差很大,如果立即高速大负荷运转,会加大温差,由热应力引起应力集中加速有关零件疲劳损坏;设备使用中还要严格避免设备超载并尽量减少冲击。

(4) 机械设备在修理中的注意事项 要注意以下几点:

1) 注意对断裂零件进行断口分析,以确定零件断裂的形式、原因、起源和超载程度等。断口分析以宏观分析为主,还可利用光学显微镜和电子显微镜进行微观分析。分析前要注意断口的保护,对断口要进行清洗和防锈,避免损伤。如图 1-3 所示,疲劳断口一般都有两个明显的区域,比较光滑的区域和比较粗糙的区域。疲劳裂纹发生、发展中,在循环载荷作用下多次发生撞击和研磨,形成外表光滑的疲劳区。断裂区表面粗糙,韧性材料呈纤维状,脆性材料呈结晶状。一次加载断裂则没有光滑区。从疲劳源(应力集中较大点)找出原因(如整架飞机可以毁于螺旋桨上一个检验标记),减少局部应力集中(如材料缺陷、加工痕迹、表面粗糙、圆角过小、碰伤等)往往是防止疲劳断裂的有效措施。断口光滑程度大,说明载荷不大,正常工作时间长。瞬间断裂区偏心小说明疲劳源

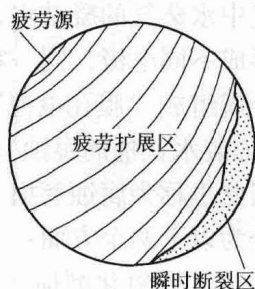


图 1-3 疲劳断口的宏观形象