



新世纪高职高专教改项目成果教材

XIN SHI JI GAO ZHI GAO ZHUAN JIAO GAI XIANG MU CHENG GUO JIAO CAI

机械制造及机电一体化系列

机电设备故障诊断 与维修

陈则钧 龚 雯 编著



高等教育出版社

新世纪高职高专教改项目成果教材

机电设备故障诊断与维修

陈则钧 龚雯 编著



高等教育出版社

内容提要

本书是新世纪高职高专教改项目成果教材。全书除绪论外共 8 章,主要介绍机电设备故障及零部件失效机理、机电设备故障诊断、机械设备维修方式与修复技术、典型机械设备的修理、液压系统维修、机床电气设备维修、数控机床的维修、设备维修管理等内容。每章都有导学和复习思考题。

本书内容丰富、结构完整、先进实用。读者通过本书学习,可以熟悉机械设备中机、液、电装置故障诊断与维修的基本思路、方法和技术以及必要的基本理论。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校机电类及机械类专业的教材,也可作为从事设备维修与管理的技术人员、工人的参考用书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

机电设备故障诊断与维修/陈则钧,龚雯编著. —北京:高等教育出版社,2004.4 (2005 重印)

ISBN 7-04-014673-8

I. 机... II. ①陈...②龚... III. ①机电设备-故障诊断-高等学校:技术学校-教材②机电设备-维修-高等学校:技术学校-教材 IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 020922 号

策划编辑 赵亮 责任编辑 陈大力 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 张岚 责任校对 俞声佳 责任印制 杨明

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京机工印刷厂		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2004 年 4 月第 1 版
印 张	21.5	印 次	2005 年 12 月第 3 次印刷
字 数	530 000	定 价	26.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 14673-00

出版说明

为认真贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》，研究高职高专教育跨世纪发展战略和改革措施，整体推进高职高专教学改革，教育部决定组织实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》（教高〔2000〕3 号，以下简称《计划》）。《计划》的目标是：“经过五年的努力，初步形成适应社会主义现代化建设需要的具有中国特色的高职高专教育人才培养模式和教学内容体系。”《计划》的研究项目涉及高职高专教育的地位、作用、性质、培养目标、培养模式、教学内容与课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面，重点是人才培养模式的改革和教学内容体系的改革，先导是教育思想的改革和教育观念的转变。与此同时，为了贯彻落实《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》（教高〔2000〕2 号）的精神，教育部高等教育司决定从 2000 年起，在全国各省市的高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校的职业技术学院（以下简称高职高专院校）中广泛开展专业教学改革试点工作，目标是：在全国高职高专院校中，遴选若干专业点，进行以提高人才培养质量为目的、人才培养模式改革与创新为主题的专业教学改革试点，经过几年的努力，力争在全国建成一批特色鲜明、在国内同类教育中具有带头作用的示范专业，推动高职高专教育的改革与发展。

教育部《计划》和专业试点等新世纪高职高专教改项目工作开展以来，各有关高职高专院校投入了大量的人力、物力和财力，在高职高专教育人才培养目标、人才培养模式以及专业设置、课程改革等方面做了大量的研究、探索和实践，取得了不少成果。为使这些教改项目成果能够得以固化并更好地推广，从而总体上提高高职高专教育人才培养的质量，我们组织了有关高职高专院校进行了多次研讨，并从中遴选出了一批较为成熟的成果，组织编写了一批“新世纪高职高专教改项目成果”教材。这些教材结合教改项目成果，反映了最新的教学改革方向，很值得广大高职高专院校借鉴。

新世纪高职高专教改项目成果教材适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2002 年 11 月 30 日

前 言

本书是高职高专机电类和机械类专业教材,亦可供从事机电设备故障诊断与维修工作的工程技术人员、工人和管理人员参考。

本教材编写遵循以下原则:

1. 注重教材内容的实用性。本教材内容的编排是根据应用的需要和维修技术的发展现状确定的,适应培养企业实用性人才的需要。本教材从实用性的原则出发,确定了基本理论部分的内容,使该部分内容精炼、易懂,为学生学好本课程奠定基础。

2. 注重理论联系实际。本教材中突出了应用基础理论解决实际问题的训练,通过对典型设备故障的诊断和维修实例进行分析,使课程学习与生产实际有机地结合起来。例如本教材的液压系统维修、机床电气系统维修、数控机床维修各为一章,不但体现了液、电系统故障诊断与维修的特点和机电结合的故障诊断与维修技术的综合性和先进性,而且详细介绍了故障分析和排除的方法,对设备维修人员有较大的参考价值。

3. 注重教材内容的先进性。本教材编入了机电设备故障诊断与维修技术领域中的一些新理论、新技术和新工艺,为在生产中应用这些先进技术提供了参考。

通过本教材学习,读者应掌握必要的故障诊断与维修的基本知识、基本理论,熟悉机械设备中机械、液压、电气系统故障诊断与维修的基本技术。第7章数控机床的维修可作为选学内容。

本书绪论、第1章、第2章、第6章、第7章由龚雯编写,第3章、第4章、第5章、第8章由陈则钧编写。哈尔滨理工大学司乃钧教授审阅。在本书的编写过程中,一些高职高专院校的教师提出了宝贵意见。在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中肯定存在不当之处,希望读者批评指正。

作 者

2003年9月

目 录

绪论	1
第1章 机电设备故障及零部件失效机理	5
1.1 概述	5
1.2 机械零件的磨损	9
1.3 金属零件的腐蚀	13
1.4 机械零件的变形	15
1.5 机械零件的断裂	17
复习思考题	20
第2章 机电设备故障诊断	21
2.1 概述	21
2.2 振动诊断技术	25
2.3 温度诊断技术	49
2.4 油样分析与诊断技术	58
2.5 无损检测技术	68
复习思考题	76
第3章 机械设备维修方式与修复技术	77
3.1 机械设备维修方式	77
3.2 机械零件修复技术概述	80
3.3 机械修复技术	83
3.4 焊接修复技术	87
3.5 电镀修复技术	94
3.6 粘接与粘涂修复技术	103
3.7 热喷涂和喷焊技术	107
3.8 表面强化技术	112
复习思考题	116
第4章 典型机械设备的修理	118
4.1 机械设备的大修理	118
4.2 机械设备的拆卸、清洗与换修原则	127
4.3 典型零件的修理	133
4.4 机械设备的修理装配	156
4.5 卧式万能升降台铣床的修理	173
复习思考题	199

第5章 液压系统维修	202
5.1 概述	202
5.2 液压元件故障与维修	205
5.3 液压系统故障诊断与检修实例	214
5.4 设备液压部分的修理与调试	221
复习思考题	228
第6章 机床电气设备维修	229
6.1 电气系统故障检查方法	229
6.2 电气设备故障诊断常用的试验技术	242
6.3 常用电气设备故障诊断维修实例	251
复习思考题	275
第7章 数控机床的维修	277
7.1 概述	277
7.2 数控机床机械故障诊断	284
7.3 数控系统故障诊断与维修	288
7.4 伺服系统故障诊断	291
7.5 数控机床维修实例	303
复习思考题	316
第8章 设备维修管理	317
8.1 设备维修的信息管理	317
8.2 设备维修的计划管理	322
8.3 维修技术、工艺、质量管理	329
8.4 备件管理	332
复习思考题	336
参考文献	337

绪 论

一、开展机电设备故障诊断与维修工作的重要意义

在 21 世纪伊始,我国进入了全面建设小康社会的重要历史阶段,这将是我国国民经济的又一个新的、高速发展时期,作为国民经济重要支柱产业的装备制造业以及数控装备的发展被放在重要位置,成为重点、优先发展的对象。

机电设备是制造业的重要装备,是企业生产的重要手段和物质基础。马克思曾经说过:“劳动生产率不仅取决于劳动者的技艺,而且也取决于它的工具的完善程度。”我国也有“工欲善其事,必先利其器”的古语。从这些至理名言蕴涵的深刻哲理中,我们可以得到这样的启示:在装备有现代化设备的企业中,要做到“利好器”,才能“善好事”,本固而枝荣。

以当前国外风行的工厂资产管理(PAM)为例,它由以下 3 个部分组成: $PAM = CDT(\text{故障诊断}) + QDT(\text{质量诊断}) + MST(\text{维修决策})$ 。PAM 的组成充分反映了设备状态监测与故障诊断技术在企业生产经营活动中的地位。因此,搞好设备管理与维修工作对企业有十分重要的意义。

设备管理与维修工作是一项系统工程,故障诊断是实施这一工程的重要手段之一。这项工作的好坏是反映一个企业的经营、管理水平、经济效益高低的重要标志。它几乎涉及企业生产活动的各个方面,与企业的生产发展和经营目标密切相关。搞好设备管理与维修工作是提高产品质量,降低物质消耗,实现安全生产,提高企业经济效益的重要保证。设备的管理与维修做得好,就能使设备经常处于良好的技术状态,不发生故障或少发生故障,确保生产秩序的正常进行,从而保证产品产量、质量指标的完成;设备维修及时,可以减少故障停机时间,减少跑、冒、滴、漏而造成的能源、资源浪费,节省维修费用,减少环境污染;利用诊断手段早期发现设备故障还可以有效地避免设备事故和由此引起的人身安全事故。

近年来在我国机械制造企业中,现代化制造装备的数量越来越多,特别是以数控机床为代表的高自动化、高集成化、高生产率设备的广泛应用,使企业从生产方式、管理理念等方面发生了脱胎换骨的变化,从而也带来了设备维修技术与方式的革命。由于现代化制造装备综合应用光、机、电和人工智能等先进技术,在生产过程中运用计算机或各种仪器实现了各种参数的自动测量、采集和控制,有较高的自动化程度。因此,从某种意义上讲,现代化加工设备对操作人员的技能要求降低了,而对维修工作却提出了更新、更高的要求。其原因:一是因为这些设备发生故障后,对生产的影响很大,给企业造成的经济损失较大,因而要求对故障要早发现、早处理,尽量避免设备故障停机。要达到这个要求,依靠传统的维修技术是不可能做到的。因此,就要在设备管理与维修工作中,采用新技术,故障诊断就是保障这一目标实现的重要手段之一。二是由于现代化设备综合应用了多种新技术,因此设备维修工作的内容也由单一的机械、电气维修转向到复杂的机、电、液一体化维修。要求维修人员的技术要全面,业务素质要高。不但要懂得机械、液压等

系统的维修知识,而且要掌握电气系统的维修技术;不但能通过自己的维修工作经验排除设备故障,而且要善于从书本上、从他人的经验中获取知识提高自己。

加入世贸组织给我国制造业带来了更多的发展机会,企业将能够进一步扩大国际经济技术合作,更多地利用外资,引进先进技术装备。另外,加入世贸组织还给我国制造业充分利用国际资源,实行优化配置,改善企业装备结构,提高企业装备水平,为技术进步和产品升级提供了更加便利的条件。所有这些都将促进企业设备的现代化,加快高新技术设备进入生产领域的步伐。

在我们为企业装备水平迅速提高而欢欣鼓舞的同时,还应清醒地认识到:企业装备水平的提高,已经对机电设备故障诊断与维修工作提出了新的要求。而目前我国企业中,设备故障诊断与维修技术工作的水平与这一要求还有一定的差距,特别是在数控装备的故障诊断与维修方面差距更大。企业中,数控装备故障停机后,因本企业维修力量薄弱不能修理,而等待生产厂商前来修理的现象较为普遍。近年来,国内一些从事产品研究的科研院所、大专院校,凭借本身的人才、技术优势在设备故障诊断与维修技术方面进行了大量的研究,极大地促进了设备故障诊断与维修技术的发展,使新的维修技术层出不穷,如表面复合技术、高红外技术、液压新技术、虚拟技术以及网络技术等已开始和设备维修中应用。在设备故障诊断与状态监测方面,其理念与技术也有了较大的发展。

二、故障诊断与维修技术的新发展

故障诊断技术是设备维修方式不断发展的产物。维修方式的发展阶段可以概述为:从事后维修逐步发展到定时的预防维修;再从预防维修发展到有计划的定期检查以及按检查发现的问题安排近期的预防性计划修理;维修方式的最新发展是预测维修,即通过对设备状态进行检测,获得相关的设备状态信息,根据这些信息判断出故障发生的时间、部位和形式,从而在故障发生前对设备进行维修,以消除故障隐患,做到防患于未然。显而易见,预测维修方式特别适合于高自动化、高技术、结构复杂的现代化设备,它可以有效地减少设备的停机时间,从而实现以最小的维修投入和经济损失获取最大的效益。

实现预测维修的核心技术是设备故障诊断技术。目前,诊断技术在与信息有关的检测功能发展上,包括6个方面:(1)状态监视功能;(2)精密诊断功能;(3)便携和遥控点检功能;(4)过渡状态监视功能;(5)质量及性能监测功能;(6)控制装置的监视功能。另外,电机、电器诊断技术与仪器的研究将受到更多的重视,以改变过去在该方面投入较少的局面;设备的无损检测方式也将在今后有所突破。

目前设备故障诊断与维修领域的最新理论认为,设备故障诊断技术应在下述几个方面进一步转变观念:

1. 应在企业中大力推广预测维修

美国宇航局(NASA)的相关研究表明,设备的故障概率曲线可以分为6种,其中第F类适用于一些复杂的设备,如发电机、汽轮机、液压气动设备及大量的通用设备,而该类设备故障概率曲线表明,在整个工作期内设备的随机故障是恒定不变的。这说明对大多数设备采用以时间为基础的维修(TBM)是无效的。日本的研究还发现,对设备每维修1次,故障率都会相应升高,在维修后1周之内发生故障的设备占60%,此后故障率虽有所下降,但在1个月后又开始上升,总计可达80%左右。从这个意义上讲,以时间为基础的维修对相当一部分设备来说不仅无益,反

而有害。对于结构复杂、故障发生随机性很强的现代化设备,就更不宜采用以时间为基础的维修方式。因此,随着企业中现代化设备的迅速增加,要大力倡导预测维修方式。

2. 应更加重视现场设备简易诊断方式的应用,应根据现场工作经验尽可能多地制订简易诊断标准

一些设备诊断专家的最新观点认为:精密诊断是重要的,而简易诊断更为重要。因为简易诊断方法容易掌握,便于推广应用,日常维修人员只要懂得一些基本方法即可开展对设备状态的监测。例如,日本有一个企业,他们将使用的设备根据功率大小分为小型(小于 10 kW)、中型(10 ~ 100 kW)及大型(大于 100 kW)3 类,实际工作中,状态检测人员只要记下设备正常工作时的振动平均幅值 \bar{X} ,根据 2×10 法则,就可以确定各类型设备的注意值为 $2\bar{X}$,报警值为 $10\bar{X}$ 。这样就大大提高了监测效率,减少了监测仪器的投入费用。

3. 发展基于风险的维修(RBM)

在美国一些企业中,倡导“最好的维修就是不要维修”。因此,他们推出了基于风险的维修方式(RBM),这种维修方式是和设备故障率及损失费用相关联的。作为风险维修应考虑 3 个权重因子,它们分别是偶发率(O)、严重度(S)及可测性(D),合成为 $RBM = S \times O \times D$,其中每个分项各有其相关参数及计算方法。基于风险的维修实践同样表明:严重的故障并不多见,而一般不严重的故障却经常发生,在 RBM 中有两个指标,即安全因数(safety factor)和安全指数(safety index)来反映这一情况。

4. 设备精密诊断技术向多变量参数综合监测分析方向发展

鉴于现代生产企业对故障停机时间的要求越来越严格。因此,为进一步提高故障诊断的准确性,设备精密诊断技术开始向多变量参数综合监测分析方向发展。例如,对于轴承旋转的振动监测,采用多变量综合分析时,对 1 个测点要测 3 个方向(水平、垂直和纵向),过去由此造成的数据量增大,劣化趋势管理图中趋势曲线的互相重叠等问题,解决起来比较困难,现在可以充分利用现代化技术的各项成果来解决。如采用神经网络、遗传算法或主分量分析法等处理复杂的数据。

5. 远程诊断是诊断技术的发展趋势

通过远程诊断可以实现远隔万里的设备制造厂商与设备用户之间的信息交流,从而实现设备故障诊断。远程诊断可进行数据和图像的传输,不仅可以目视,还可以做计算机图像处理。这样就可以提高故障诊断的效率和准确性,有效地减少设备故障停机时间。

6. 设备诊断应向更广更深的领域发展

当前,设备诊断除包括故障、过程和质量诊断外,国外还盛行设备的效率诊断。以通用水泵为例,水泵的寿命一般为 10 年,在 10 年寿命费用中,能源消耗约占 95%,维修费用占 4%,购置费占 1%。由此可见,要降低生产成本必须抓 95% 的能耗成本,方法就是及时进行设备效率诊断。水泵效率诊断的基本思想是,测量液体的压力、温度,进行效率表算分析,确保水泵在最高效率处运行。具体做法是:通过水泵上的压力表、温度计、电动机功率表等仪表,将测量到的动态数据输出到 1 台泵效分析仪进行集成,并在微机上将结果显示出来。通过对水泵效率进行监测,及时对其进行必要的维修调整,保证其一直在最高效率处运行,在水泵的全部工作期中,一般可降低 10% 的能耗,其节约价值相当于 2 倍的维修费用。

人们公认,知识经济和信息时代是 21 世纪的主要特征。但是,有专家预测由于地球资源的

浪费和短缺以及人类生存条件的日益恶化,注重环境保护和生态的“环境经济”与注重资源节约和合理利用的“朴素经济”也将会逐渐成为时代的重要特征。

目前,造成全球环境污染的排放物有 70% 以上来自制造业,它们每年产生 55 亿吨无害废物和 7 亿吨有害废物,人类生存环境面临日益增长的机电产品废弃物压力及资源日益缺乏问题。如 1996 年全球 2 400 万辆汽车报废,2000 年 2 000 万台计算机淘汰,机电产品日益增长的报废品数量使人们进一步认识到了机电产品维修方式变革的必要性和重要性。因此,支持可持续发展的再造工程技术(re-engineering)和能够减少机电产品废弃物对环境污染的绿色维修(green maintenance)技术应运而生,并将成为 21 世纪机电设备维修技术的发展方向。

第1章 机电设备故障及零部件失效机理

导学:在本章学习中,学生应注意下列知识的学习和掌握:

1. 明确机电设备故障的概念,了解故障的分类,掌握故障发生的规律。
2. 了解机电设备零部件失效的主要模式,对磨损失效、腐蚀失效、变形失效和断裂失效机理有较深刻的理解。
3. 掌握不同失效模式下减少或消除机械设备零部件失效的方法和途径。

1.1 概 述

1.1.1 故障的含义

随着现代工业和现代制造技术的发展,制造系统的自动化、集成化程度越来越高。在这样的生产环境下,一旦某台设备出现了故障而又未能及时发现和排除,就可能会造成整台设备停转,甚至整个流水线、整个车间停产,从而造成巨大的经济损失。因此,对设备故障的研究越来越受到人们的重视。

故障研究的目的是要查明故障模式,追寻故障机理,探求减少故障的方法,提高机电设备的可靠程度和有效利用率。通常人们将故障定义为:设备(系统)或零部件丧失了规定功能的状态。从系统的观点来看,故障包含两层含义:一是机械系统偏离正常功能。其形成的主要原因是机械系统(含零部件)的工作条件不正常引起的,这类故障通过参数调节或零部件修复即可消除,系统随之恢复正常功能;二是功能失效。此时系统连续偏离正常功能,并且偏离程度不断加剧,使机械设备基本功能不能保证,这种情况称之为失效。一般零件失效可以更换,关键零件失效,则往往导致整机功能丧失。

在对故障进行研究时,要注意明确以下几个问题:

1. 故障状况随规定对象的变化而不同

规定对象是指1台单机或某些单机组成的系统或机械设备上的某个零部件。不同的对象在同一时间将有不同的故障状况,例如:在1条自动化生产线上,某单机的故障造成整条自动线系统功能丧失时,表现出的故障状态是自动线故障;但在机群式布局的车间里,就不能认为某单机的故障是全车间的故障。

2. 故障状况是针对规定功能而言的

例如:同一状态的车床,进给丝杠的损坏对加工螺纹而言是发生了故障;但对加工端面来说却不算发生故障,因为这两种加工所需车床的功能项目不同。

3. 故障状况应达到一定的程度,即应从定量的角度来估计功能丧失的严重性。

1.1.2 故障的分类

机电设备故障可以从不同角度进行分类,不同的分类方法反映了故障的不同侧面。对故障进行分类的目的是为了估计故障事件的影响程度,分析故障的原因,以便更好地针对不同的故障形式采取相应的对策。从故障性质、引发原因、特点等不同角度出发,可将故障做如下分类。

1. 按故障性质

间歇性故障 设备只是在短期内丧失某些功能,故障多半由机电设备外部原因如工人误操作、气候变化、环境设施不良等因素引起,在外部干扰消失或对设备稍加修理调试后,功能即可恢复。

永久性故障 此类故障出现后必须经人工修理才能恢复功能,否则故障一直存在。这类故障一般是由某些零部件损坏引起的。

2. 按故障程度

局部性故障 机电设备的某一部分存在故障,使这一部分功能不能实现而其它部分功能仍可实现,即局部功能失效。

整体性故障 整体功能失效的故障,虽然也可能是设备某一部分出现故障,但却使设备整体功能不能实现。

3. 按故障形成速度

突发性故障 故障发生具有偶然性和突发性,一般与设备使用时间无关,故障发生前无明显征兆,通过早期试验或测试很难预测。此种故障一般是由工艺系统本身的不利因素与偶然的外界影响因素共同作用的结果。

缓变性故障 故障发展缓慢,一般在机电设备有效寿命的后期出现,其发生概率与使用时间有关,能够通过早期试验或测试进行预测。通常是因零部件的腐蚀、磨损、疲劳以及老化等发展形成的。

4. 按故障形成的原因

操作或管理失误形成的故障 如机电设备未按原设计规定条件使用,形成设备错用等。

机器内在原因形成的故障 一般是由于机器设计、制造遗留下的缺陷(如残余应力、局部薄弱环节等)或材料内部潜在的缺陷造成的,无法预测,是突发性故障的重要原因。

自然故障 机电设备在使用和保有期内,因受到外部或内部多种自然因素影响而引起的故障,如正常情况下的磨损、断裂、腐蚀、变形、蠕变、老化等损坏形式都属自然故障。

5. 按故障造成的后果

致命故障 危及或导致人身伤亡、引起机电设备报废或造成重大经济损失的故障。如机架或机体脱离、车轮脱落、发动机总成报废等。

严重故障 是指严重影响机电设备正常使用,在较短的有效时间内无法排除的故障。例如发动机烧瓦、曲轴断裂、箱体裂纹、齿轮损坏等。

一般故障 影响机电设备正常使用,但在较短的时间内可以排除的故障。例如传动带断裂、操纵手柄损坏、钣金件开裂或开焊、电器开关损坏、轻微渗漏和一般紧固件松动等。

此外,故障还可按其表现形式分为功能故障和潜在故障;按故障形成的时间分为早期故障、

随时间变化的故障和随机故障;按故障程度和故障形成快慢分为破坏性故障和渐衰失效性故障等。

从上述故障的分类可以看出,机电设备故障类型是相互交叉的,并且,随着故障的发展,故障还可以从一种类型转移到另一种类型,每一种机电设备故障最终都会表现为一定的物质状况和特征。

1.1.3 故障的规律

一、故障特征量

(一) 故障概率

机电设备故障的发生有两个显著特点:一是发生故障的可能性随设备使用年限的增加而增大;二是故障的发生具有随机性,无论哪一种故障都很难预料发生的确切时间,因而在设备使用寿命内,发生故障的可能性可用概率表示。

由概率理论可知,故障概率的分布是其密度函数 $f(t)$ 的积累函数,它可用公式表示为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (1.1)$$

式中, $F(t)$ ——故障概率;

$f(t)$ ——故障概率分布密度函数;

t ——时间。

当 $t = \infty$ 时,即 $F(\infty) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1$

机电设备在规定的条件下和规定的时间内不发生故障的概率称无故障概率,用 $R(t)$ 表示。显然,故障概率与无故障概率构成一个完整事件组,即

$$F(t) + R(t) = 1 \text{ 或 } R(t) = 1 - F(t)$$

(二) 故障率

故障率是指在时间 t 之前尚未发生故障,而在随后的 dt 时间内可能发生故障的条件概率,用 $\lambda(t)$ 表示,其数学关系式为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.2)$$

通过此式可以看出故障率为某一瞬时可能发生的故障相对于该瞬时无故障概率之比。

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 $N_{\text{存}} = N - n(t)$;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

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n(t)}{N_{\text{存}} \Delta t} = \frac{dn(t)}{N_{\text{存}} dt} \quad (1.3)$$

2. 平均故障率 产品在某一时间段内单位时间发生故障的概率,称为平均故障率,以 $\bar{\lambda}(t)$ 表示

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_{\text{存}} \Delta t} \quad (1.4)$$

式中, $\Delta n(t)$ ——在 Δt 这段时间内发生故障的数量;

$N_{存}$ ——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 400 h 的使用时间内有 32 个出故障,则

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

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

故障率的常用单位是 10^{-4} h^{-1} 、 10^{-5} h^{-1} 。故障率越低,可靠性越高。

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。

3. 平均故障间隔期(MTBF) 它是可修复设备在相邻两次故障间隔内正常工作时的平均时间,称为 MTBF(mean time between failure)。例如:某设备自投入运行开始工作 1 000 h 后发生了故障,修复后工作了 2 000 h 又发生了故障,再次修复后又工作了 2 400 h 后发生故障,则该设备的平均故障间隔时间为

$$(1\ 000 + 2\ 000 + 2\ 400)\text{h}/3 = 1\ 800 \text{ h}$$

平均故障间隔时间可用公式表示为

$$\text{MTBF} = \frac{\sum \Delta t_i}{n} \tag{1.5}$$

式中, Δt_i ——第 i 次故障前的无故障工作时间或两次大修间的正常工作时间;

n ——发生故障的总次数。

二、故障率曲线

如前所述,大多数故障出现的时间和频率与机电设备的使用时间有密切联系。工程实践经验和实验表明,机电设备的故障率变化分为早期故障期、随机故障期和耗损故障期 3 个阶段,如图 1.1 所示。

1. 早期故障期

早期故障的特点是故障率较高,但故障随设备工作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,因此设备进行大修理或改造后,早期故障期会再次出现。

2. 随机故障期

随机故障期内故障率低而稳定,近似为常数。随机故障是由于偶然因素引起的,它不可预测,也不能通过延长磨合期来消除。设计上的缺陷、零部件缺陷、维护不良以及操作不当等都会造成随机故障。

3. 耗损故障期

耗损故障的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耗、疲劳、老化、腐蚀等造成的。这类故障是设备接近大修期或寿命末期的征兆。

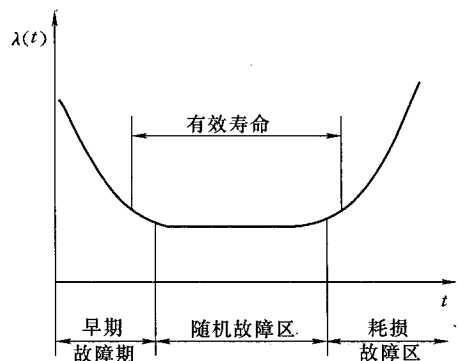


图 1.1 故障率浴盆曲线

1.2 机械零件的磨损

机械零件的磨损是零件失效的主要模式。在一般机械设备中约有 80% 的零件失效报废是由磨损引起的。美国每年因磨损失效造成的损失高达 1 000 亿美元, 直接材料损失达 200 亿美元。磨损不仅会影响机电设备的效率、降低工作可靠性, 而且还可能会导致机电设备的提前报废。因此, 开展对机电设备磨损机理的研究可以掌握各种零部件的磨损特点, 为制定合理的维修策略和计划提供依据, 为提高设备使用寿命服务。

1.2.1 零件磨损的一般规律

磨损是一种微观和动态的过程, 零件磨损时会出现各种物理、化学和机械现象, 其外在的表现形态是表层材料的磨耗, 磨耗程度的大小通常用磨损量度量。在正常工况下, 零件的磨损过程分为 3 个阶段, 如图 1.2 所示, 图中 w 表示磨损量。

1. 磨合阶段 OA

又称跑合阶段, 发生在设备使用初期。此时摩擦副表面具有微观波峰, 使得零件间实际接触面积较小, 接触应力很大, 因此运行时零件表面的塑性变形与磨损的速度很高。随着磨合的进行, 摩擦表面粗糙峰逐渐磨平, 实际接触面积逐渐增大, 表面塑性变形导致冷作硬化, 所以磨损速率下降, 当达到 A 点时, 正常磨损条件已建立, 磨损速率稳定, 且具有最低值。选择合理的磨合载荷、相对运动速度、润滑条件等参数是缩短磨合期的关键因素。

2. 稳定磨损阶段 AB

这一阶段的磨损特征是磨损速率小且稳定, 因此该阶段的持续时间较长。但到中后期, 磨损速率相对较快, 但此时仍可继续工作一段时间, 当磨损速率增至 B 点时, 磨损速率迅速提高, 进入急剧磨损阶段。合理地使用、保养与维护设备是延长该阶段的关键。

3. 急剧磨损阶段 BC

进入此阶段后, 由于摩擦条件发生较大的变化, 如润滑条件改变、零件几何尺寸发生变化、配合零件间隙增大、产生冲击载荷等使磨损速率急剧增加。此时, 机械效率明显下降, 精度降低, 若不采取相应措施有可能导致设备故障或意外事故。因此, 及时发现和修理即将进入该阶段工作的零部件具有十分重要的意义。

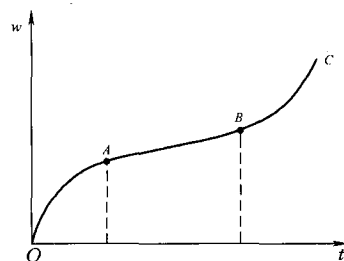


图 1.2 磨损特性曲线

1.2.2 磨损的类型

根据磨损结果磨损分为点蚀磨损、胶合磨损、擦伤磨损等; 根据磨损机理磨损分为磨料磨损、疲劳磨损、粘着磨损、腐蚀磨损、微动磨损等。

磨料磨损是指摩擦副的一个表面上硬的凸起部分和另一表面接触, 或两摩擦面间存在着硬的质点, 如空气中的尘土、磨损造成的金属微粒等, 在发生相对运动时, 两个表面中的一个表面的材料发生转移或两个表面的材料同时发生转移的磨损现象。在磨损失效中, 磨料磨损失效是最

常见、危害最严重的一种失效模式。

(一) 磨料磨损的机理

磨料磨损的过程实质上是零件表面在磨料作用下发生塑性变形、切削与断裂的过程。磨料对零件表面的作用力分为垂直于表面与平行于表面的两个分力。垂直分力使磨料压入材料表面,在其反复作用下,塑性好的材料表面产生密集的压痕,最终疲劳破坏;而脆性材料,表面不发生变形就产生脆性破坏;平行分力使磨料向前滑动,对表面产生耕犁与微切削作用。对于塑性材料,以耕犁为主,磨料会在摩擦表面上切下一条切屑,并使犁沟两侧材料隆起;对于脆性材料以微切削作用为主,磨料会从表面上切下许多碎屑。塑性材料在反复耕犁以后,也会因冷作硬化效应变硬变脆,由以耕犁为主转化为以微切削为主,如图 1.3 所示。随着零件表面材料的脱离与表面性能的不断劣化,最终导致表面破坏和零件失效。

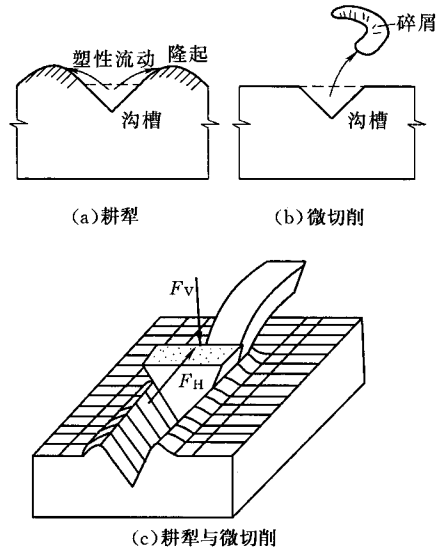


图 1.3 磨料对零件表面的耕犁与切削

磨料磨损的显著特点是:磨损表面上有与相对运动方向平行的细小沟槽;磨损产物中有螺旋状、环状或弯曲状细小切屑及部分粉末。

(二) 影响磨料磨损的主要因素

1. 摩擦副材料

一般情况下金属材料的硬度越高,耐磨性就越好。具有马氏体组织的材料耐磨性较高,而在相同硬度条件下,贝氏体又比马氏体更耐磨;同样硬度的奥氏体与珠光体相比,奥氏体的耐磨性要高得多。

2. 磨料

磨料磨损与磨料的粒度、几何形状、硬度有密切的关系。金属的磨损量随磨料尺寸的增大而增加,但当磨料增大到一定尺寸(临界尺寸一般为 $60 \sim 100 \mu\text{m}$)时,磨损速率就基本保持不变了。棱角尖锐的磨料,比圆滑磨料切削能力更强,因此磨损速率较高;磨料硬度高,相对于摩擦表面材料硬度越大,磨损速率越高,磨损越严重。

3. 压力

磨损速率与压力成正比。因为压力减小,磨料嵌入深度减小,作用在表面上的力也减小,所以磨损速率下降。

1.2.3 疲劳磨损

疲劳磨损是指摩擦副材料表面上局部区域在循环接触应力作用下,产生疲劳裂纹,分离出微片或颗粒的一种磨损形式。根据摩擦副间的接触和相对运动方式可将疲劳磨损分为滚动接触疲劳磨损和滑动接触疲劳磨损两种形式。实际工作中纯滚动疲劳磨损很少,大多数情况下为滚动加滑动的磨损。

一、疲劳磨损机理