

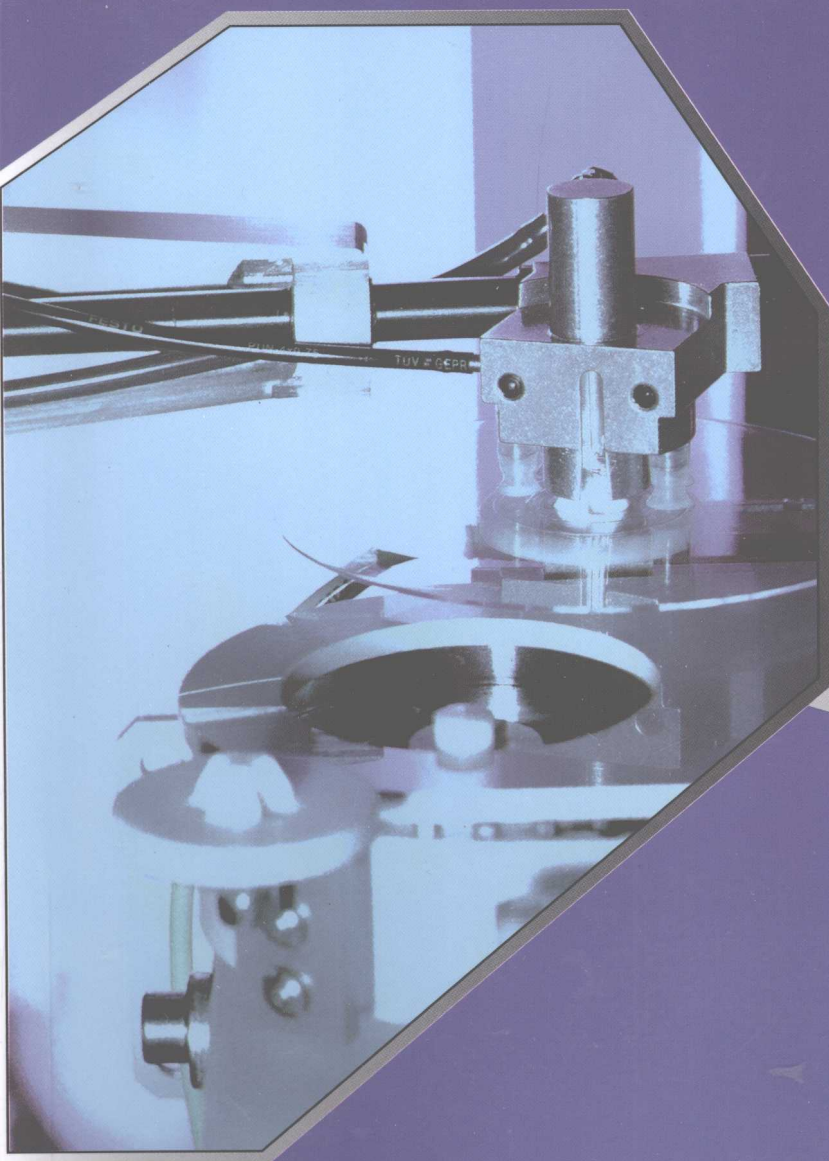


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机 · 电 · 设 · 备 · 系 · 列

机电设备故障诊断 与维修技术

陈则钧 龚 雯 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
机电设备系列

机电设备故障诊断与维修技术

陈则钧 龚 雯 主编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书共八章,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、典型机械设备修理、液压系统维修、机床电气设备维修、数控机床维修、机电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。读者通过学习本书,可以熟悉机、液、电设备故障诊断与维修的基本思路、方法、技术以及必要的基本理论。

本书可作为高职高专、成人高校、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技术/陈则钧,龚雯主编.

—北京:高等教育出版社,2008.10

ISBN 978-7-04-025030-5

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第140394号

策划编辑 罗德春 责任编辑 查成东 封面设计 张申申 责任绘图 尹 莉
版式设计 余 杨 责任校对 杨凤玲 责任印制 陈伟光

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	100120	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	北京七色印务有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2008年10月第1版
印 张	22.5	印 次	2008年10月第1次印刷
字 数	550 000	定 价	29.90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 25030-00

前 言

本书是高职高专机电类和机械类专业的一本必修教材,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。

本书编写遵循以下原则:

1. 注重教材内容的实用性。本书内容的编排是根据应用需要和维修技术的发展现状确定的,适应培养企业需要的实用性人才的需要。本书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。本书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。例如本书的液压系统维修、机床电气设备维修、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。本书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。

通过学习本书,学生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、液压、电气设备故障诊断与维修的基本技术,熟悉卧式铣床维修和大修、数控机床维修的基本技术,了解通用压力机的维修方法。数控机床维修一章可作为选学内容。

本书绪论、第一章、第二章、第六章、第七章由龚雯编写,第三章、第四章、第五章、第八章由陈则钧编写。哈尔滨理工大学司乃钧教授担任主审,参加审稿工作的还有哈尔滨理工大学张学伟教授。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。

由于编者水平有限,书中肯定存在不当之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2008年9月

目 录

绪论	1	第四节 机械设备的修理装配	158
第一章 机电设备故障及零部件失效		第五节 卧式万能升降台铣床的 修理	175
机理	5	第六节 通用压力机的维修	199
第一节 概述	5	复习思考题	213
第二节 机械零件的磨损	9	第五章 液压系统维修	216
第三节 金属零件的腐蚀	13	第一节 概述	216
第四节 机械零件的变形	15	第二节 设备液压部分的修理与调试	219
第五节 机械零件的断裂	17	第三节 液压系统故障诊断与检修 实例	235
复习思考题	20	复习思考题	242
第二章 机电设备故障诊断	21	第六章 机床电气设备维修	243
第一节 概述	21	第一节 电气系统故障检查方法	243
第二节 振动诊断技术	25	第二节 电气设备故障诊断常用的 试验技术	256
第三节 温度诊断技术	51	第三节 常用电气设备故障诊断维修 实例	265
第四节 油样分析与诊断技术	61	复习思考题	288
第五节 无损检测技术	72	第七章 数控机床维修	290
复习思考题	79	第一节 概述	290
第三章 机械设备维修方式与修复 技术	81	第二节 数控机床机械故障诊断	296
第一节 机械设备维修方式	81	第三节 数控系统故障诊断与维修	301
第二节 机械零件修复技术概述	84	第四节 伺服系统故障诊断	314
第三节 机械修复技术	87	第五节 数控机床维修实例	318
第四节 焊接修复技术	91	复习思考题	331
第五节 电镀修复技术	98	第八章 设备维修管理	333
第六节 粘接与粘涂修复技术	106	第一节 设备维修的信息管理	333
第七节 热喷涂和喷焊技术	110	第二节 设备维修的计划管理	338
第八节 表面强化技术	115	第三节 维修技术、工艺、质量管理	345
复习思考题	119	第四节 备件管理	348
第四章 典型机械设备的修理	120	复习思考题	352
第一节 机械设备的大修理	120	参考文献	353
第二节 机械设备的拆卸、清洗与 换修原则	128		
第三节 典型零件的修理	135		

绪 论

一、开展机电设备故障诊断与维修工作的重要意义

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。在“十一五”计划中,作为国民经济重要支柱产业的装备制造业的发展被放在了重要位置,成为重点、优先发展的产业。

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,可以得到这样的启示:在装备现代化设备的企业中,要做到“利好器”,才能“善好事”,本固而后枝荣。

以当前风行的工厂资产管理(PAM)为例,它由以下三个部分组成:PAM = CDT(故障诊断) + QDT(质量诊断) + MST(维修决策)。通过 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,它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,增进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,就可以减少故障停机时间,减少跑、冒、滴、漏造成的能源、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。

二、企业设备现代化对故障诊断与维修工作的新要求

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,因而对故障要求早发现、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、电气维修转向了复杂的机、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。

经过多年的发展,我国机械设备维修技术取得了长足的进步,在修复工艺、故障诊断等方面取得了一批成果,为维修技术持续、快速、健康地发展奠定了技术基础。新的维修技术层出不穷,如表面复合技术、高接技术、高红外技术、液压新技术、虚拟技术、网络技术、绿色维修技术以及人工智能等已应用于设备故障诊断与维修中。但是,我国目前对状态监测与故障诊断的研究和应用还不够广泛、深入,维修保障的综合化、信息化水平仍然较低,维修性的设计与验证技术还很不成熟,软件密集型机械设备的故障与修复机理、腐蚀与防护机理等基础问题的研究也才刚刚起步,维修技术发展仍然面临巨大的挑战,其整体水平与我国现代化建设的需求还存在相当大的差距。特别是在高性能、高技术含量的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。

三、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,将包括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,电动机、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;静设备的无损检测方式也将在今后有所突破。

1. 故障诊断技术的新发展

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的制订简易诊断标准

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,日本有一个企业将使用的设备根据功率大小分为小型 < 10 kW、中型 10 ~ 100 kW 及大型 > 100 kW 三类,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。

(2) 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,对一个测点要测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它。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。

(3) 人工智能应用于设备故障诊断

人工智能(artificial intelligent,简称 AI)是计算机学科中研究、设计和应用计算机去模仿和执行各种拟人任务的一个分支。目前,人工智能最活跃的研究领域主要有:自然语言理解、机器人、自动智能程序设计、人工神经网络以及专家系统等。其中专家系统是其最成功、实用性最强的一个领域。

专家系统是一类包含知识和推理的智能计算机程序。设备故障诊断专家系统是将人类在设备故障诊断方面的多位专家具有的知识、经验、推理、技能,综合后编制成的大型计算机程序。它利用计算机系统帮助人们分析解决只能用语言描述、思维推理的复杂问题,扩展了计算机系统原有的工作范围,使计算机系统有了思维能力,能够与决策者进行“对话”,并应用推理方式提供决策建议。专家系统还能通过不断学习、提高,丰富其知识库,提高故障诊断的准确率。

(4) 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,在此10年的费用中,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,进行效率计算分析,确保水泵以最高效率运行。具体做法是:通过水泵上的压力表、温度计、电动机功率计等仪表,将测量到的动态数据输出到一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,保证其一直以最高效率运行。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。

(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。

2. 维修技术与方式的新发展

先进的维修技术,是以现代维修理论为指导,以信息技术、仿真技术和材料技术等为支撑,保持和恢复机械设备良好技术状态、最大限度地发挥其效能的综合性工程技术。它移植了“并行工程”等理论,深化了“以可靠性为中心的维修”理论,并且基于信息、网络等技术的发展,提出适用于满足分散性和机动性越来越强的“精确保障”、“敏捷保障”等维修保障新理论。未来维修技术和方式的发展,将主要呈现出以下特点和趋势。

(1) 预测维修广泛应用

美国宇航局(NASA)的相关研究表明,设备的故障概率曲线为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,对设备每维修一次,故障率都会相应升高,在维修后一周之内发生故障的设备占60%,此后故障率虽有所下降,但在一个月后又开始上升,总计可达80%左右。从这个意义上来讲,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了。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) 大力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,它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。

(3) 基于绿色制造的设备维修技术发展越来越受到重视

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2400万辆汽车报废,2000年2000万台计算机淘汰,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(Re-engineering)技术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。

基于绿色制造的设备维修技术以最少的资源消耗,保持、恢复、延长和改善设备的功能,实现材料利用的高效率,减少材料和能源消耗,从而提升经济运行质量和效益。一般说来,通过维修恢复一种产品的性能所消耗的劳动量和物质资源,仅是制造同一产品的几分之一甚至十几分之一,这种消耗的减少就意味着对环境污染的减少,有利于社会的持续发展。

基于绿色制造的维修技术包括故障诊断技术、表面工程技术、再制造工程、清洁维修工艺等,还包括面向绿色维修的产品设计和材料的绿色特性选择等。

(4) 信息技术的带动作用更加突出

信息技术以其广泛的渗透性、功能的整合性、效能的倍增性,在维修的作业、管理、训练、指导等诸多方面都有着非常广泛的应用。已经衍生了全部资源可视化、虚拟维修、远程维修、交互式电子技术手册等技术,促进了传统监测与诊断技术进步,产生了基于虚拟仪器的监测与诊断等新仪器及系统,推动了维修决策支持系统的智能化发展,提高了从各种完全不同的、分布极为分散的系统和数据库中检索信息的能力,加速了维修信息系统与维修保障等系统的融合。

(5) 多学科综合交叉发展趋势明显

维修技术是一门典型的综合性工程技术,其发展和创新越来越依赖于多学科的综合、渗透和交叉。如故障诊断系统已经逐步发展成为一个复杂的综合体,其中包含了模式识别技术、形象思维技术、可视化技术、建模技术、并行推理技术和数据压缩等技术。这些技术的综合有效地改善了故障诊断系统的推理、并发处理、信息综合和知识集成的能力,推动故障诊断技术向着信息化、网络化、智能化和集成化的方向发展。

第一章 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。

第一节 概 述

一、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。

二、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他部分功能仍可实现,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。

三、故障的规律

(一) 故障特征量

1. 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

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

2. 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 $N_{\#} = N - n(t)$ ；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

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

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

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

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

$N_{\text{存}}$ ——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

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

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

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

$$\text{MTBF} = \frac{\sum \Delta t_i}{n} \quad (1.5)$$

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损、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。

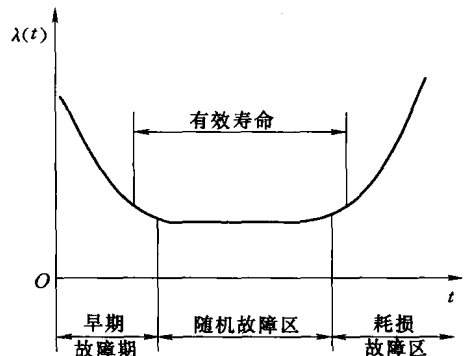


图 1.1 故障率浴盆曲线

第二节 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。

一、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。

二、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。

(一) 磨料磨损

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

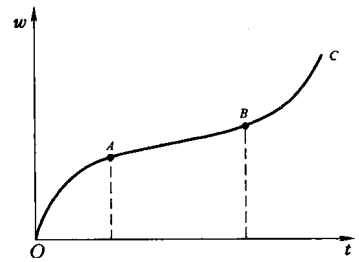


图 1.2 磨损特性曲线

常见、危害最严重的一种失效模式。

1. 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。

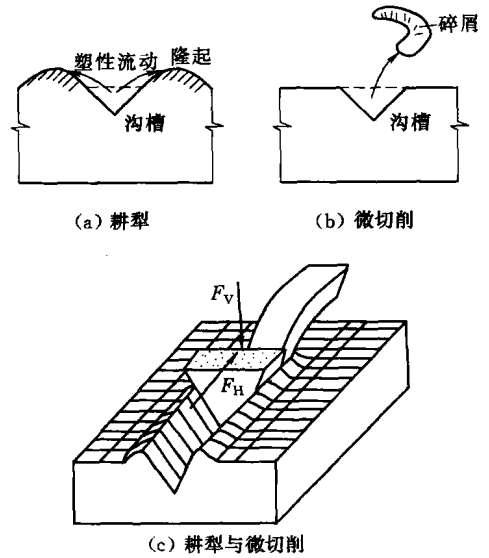


图 1.3 磨料对零件表面的耕犁与切削

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。

2. 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。

(二) 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。

1. 疲劳磨损机理

(1) 滚动接触疲劳磨损机理

滚动接触疲劳磨损会使滚动轴承、传动齿轮等有相对滚动的摩擦副表面间出现点蚀和剥落现象,其产生机理如图 1.4 所示。当一个表面在另一个表面作纯滚动或滚动加滑动时,最大切应力发生在亚表层。在力的作用下,亚表层内的材料将产生错位运动,错位在非金属夹杂物及晶界等障碍处形成堆积。由于错位的相互切割,材料内部产生空穴,空穴集中形成空洞,进而变成原始裂纹。裂纹在载荷作用下逐步扩展,最后折向表面。由于裂纹在扩展过程中互相交错,加上润滑油在接触点处被压入裂纹产生楔裂作用,表层将产生点蚀或剥落。当原始裂纹较浅时,表现为点蚀,若原始裂纹在表层以下大于 $200\ \mu\text{m}$ 时,表层材料呈片状剥落。

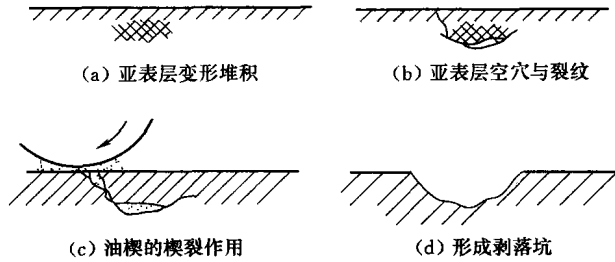


图 1.4 疲劳磨损过程示意图

(2) 滑动接触疲劳磨损机理

任何固体摩擦表面都存在宏观或微观不平性,因而产生表面接触不连续性。在相对运动时,作用于摩擦表面上的法向载荷会使表面产生压平或压入,使触点区产生相应的应力和应变,在摩擦运动的反复作用下,触点处结构、应力状态会出现不均匀、应力集中等现象,从而引发裂纹,最终使部分表面材料以微粒形式脱落、形成磨屑。

2. 影响接触疲劳磨损的主要因素

接触疲劳磨损是由裂纹的萌生和扩展而产生的,所以凡是影响裂纹萌生和扩展的因素都对接触疲劳磨损有影响。

(1) 材质

材料的组织状态、内部缺陷和硬度等,都对疲劳磨损有重要影响。通常晶粒均匀、细小、碳化物成球状均匀分布的组织,其抗疲劳裂纹产生的能力较强;材料内部的缺陷,如钢中存在非金属夹杂物,则极易引起应力集中,使夹杂物边缘形成裂纹,从而降低材料的接触疲劳强度;材料硬度在一定范围内增加,其抗疲劳磨损的能力也随之增加,一般轴承钢和钢制齿轮抗疲劳磨损的最佳硬度值为 $60\ \text{HRC}$ 左右。

需要注意的是摩擦表面的硬度匹配情况也是影响接触疲劳磨损的重要因素之一,其硬度匹配的最佳值,可以根据工作情况和运动方式,通过实验确定。

(2) 接触表面质量

在一定范围内减小表面粗糙度值、形状误差,可以均衡接触应力,从而有效提高抗疲劳磨损的能力。另外,表层在一定深度范围内存在残余压应力,也可以提高弯曲、扭转疲劳抗力和接触疲劳抗力,减少疲劳磨损。残余压应力可通过表面渗碳、淬火、表面喷丸、滚压处理等工艺方法获得。

(3) 其他因素

合理选择润滑油可以使接触区的集中载荷分散。润滑油粘度越高,摩擦副接触区的压应力就越接近平均分布,载荷集中的状况则得到有效改善,同时由于粘度高的润滑油不易渗入表面裂纹中,因此有利于减少疲劳磨损的发生。如果在润滑油中加入适量的固体润滑剂(如 MoS_2),还可进一步提高抗疲劳磨损的性能。

此外,表面应力的尺寸、配合间隙的寸、润滑油使用过程中产生的腐蚀性介质等也都会对疲劳磨损产生影响。

(三) 粘着磨损

当摩擦副表面在相互接触的各点处发生“冷焊”后,在相对滑动时使一个表面的材料迁移到另一个表面上所引起的磨损,称为粘着磨损。

1. 粘着磨损的机理

摩擦副表面在重载条件下工作时,由于润滑不良、相对运动速度高,会产生大量的热,使摩擦副表面的温度升高,材料表面强度降低。在这种情况下,承受高压的凸起部分便会相互粘着,发生冷焊。当两表面进一步相对滑动时,粘着点便发生剪切及材料迁移现象,通常材料的迁移是由较软表面迁移到较硬的表面上。在载荷和相对运动作用下,两接触表面重复进行着粘着一—剪断一再粘着的循环过程,直到最后在表面上脱落下来,形成磨屑。

2. 影响粘着磨损的因素

(1) 摩擦副表面材料成分与组织

构成摩擦副的两摩擦表面的材料,其互溶性越好,越易形成固溶体或金属化合物,粘着倾向越大。同类金属或原子结构、晶体结构相近的材料,比性质有明显差异的材料更易发生粘着磨损。因此,在选择摩擦副的材料时应选用异种材料,且性质差异越大越好。通常在同种材料制成的摩擦副的一个表面上覆盖铅、锡、银等材料,其目的就是为了减少粘着发生。如使用轴承合金作轴承衬瓦的表面材料,就是为了提高其抗粘着能力,从而实现减摩。

(2) 摩擦副表面状态

摩擦副表面洁净、无吸附膜,易产生粘着磨损。金属表面经常存在吸附膜,当有塑性变形后,金属滑移吸附膜被破坏,或者温度升高(一般认为达到 $100 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时),吸附膜也会破坏。吸附膜破坏后,摩擦副两表面直接接触,因此极易导致粘着磨损的发生。工作时,可根据摩擦副的工作条件(载荷、温度、速度等),选用适当的润滑剂或在润滑剂中添加改性物质,如极压剂等,可有效地减轻粘着磨损的发生。

(四) 微动磨损

微动磨损是两个接触物体做相对微振幅振动而产生的一种磨损。它发生在名义上相对静止,实际上存在循环的微幅相对滑动的两个紧密接触的表面上,其滑动幅度非常小,一般为微米量级($2 \sim 20 \mu\text{m}$)。如轴与孔的过盈或过渡配合面、键连接表面、旋合螺纹的工作面、铆钉的工作面等。微动磨损不但可使配合精度下降,紧配合件配合变松,损坏配合表面的品质,还可能导致疲劳裂纹的萌生,从而急剧降低零件疲劳强度。

1. 微动磨损的机理

当两接触表面具有一定压力并产生小幅振动时,接触面上的微凸体在振动冲击力作用下产生强烈的塑性变形和高温,发生相互粘着现象。在随后的振动中,粘着点会被剪断,粘着物在冲