

· 高等专科学校教学用书 ·

矿冶机械 维修工程学

GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

矿冶机械维修工程学

上海冶金高等专科学校 孙家骥 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

图书在版编目 (CIP) 数据

矿冶机械维修工程学/孙家骥主编. -北京:冶金工业出版社, 1994. 10
高等专科学校教学用书
ISBN 7-5024-1491-6

I. 矿… II. 孙… III. ①矿山机械-维修②冶金设备-维修 IV. ①TD407②TF307

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 03235 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行
1994 年 10 月第 1 版, 1994 年 10 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 13.25 印张; 313 千字; 205 页; 1-3600 册
8.00 元

前 言

本书是根据冶金高等专科学校“八五”教材出版规划和高等专科学校冶金机械专业“矿冶机械维修工程学”课程教学大纲编写的。

本书主要论述机械设备技术维护的基本概念、机械设备的润滑、机械设备零部件的装配和修理及机械设备的安装。本书除可作为冶金机械专业和矿山机械专业“矿冶机械维修工程学”课程的教材外，还可供其它有关工程技术人员参考。

本书由沈阳黄金学院张舒迟编写第一章，重庆钢铁高等专科学校徐梦坤编写第二章，上海冶金高等专科学校孙家骥（主编）编写绪论及第三、四章。

长沙工业高等专科学校王子麓老师参加了本书审稿工作。本书在编写过程中得到了武汉钢铁学院谷士强和上钢三厂蒋国兴的帮助与支持，在此一并致谢。

由于水平有限，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

1994年2月

目 录

绪论	(1)
第一章 机械设备技术维护的基本概念	(3)
第一节 故障概念	(3)
第二节 机械设备可靠性和维修性概念	(5)
第三节 故障分析	(10)
第四节 零件缺陷的检测	(33)
第五节 故障诊断技术简介	(35)
第二章 机械的润滑	(45)
第一节 润滑原理	(45)
第二节 润滑材料	(63)
第三节 稀油润滑	(89)
第四节 干油润滑	(110)
第五节 典型零部件的润滑	(126)
第三章 机械设备零部件的装配和修理	(141)
第一节 过盈配合的装配	(141)
第二节 轴和联轴器的装配	(146)
第三节 滑动轴承的装配	(149)
第四节 滚动轴承的装配	(158)
第五节 齿轮和蜗轮传动的装配	(162)
第六节 典型零部件的修复	(168)
第四章 机器设备的安装	(181)
第一节 机器安装的基本概念	(181)
第二节 机器设备安装位置的检测与调整	(187)
第三节 机器设备安装后的试运转	(190)
第四节 典型矿冶设备的安装	(191)

绪 论

一、机械设备维修工程学的性质、任务和内容

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，它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)。它涉及的主要概念是：故障、修理极限、维修性、可靠性、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。

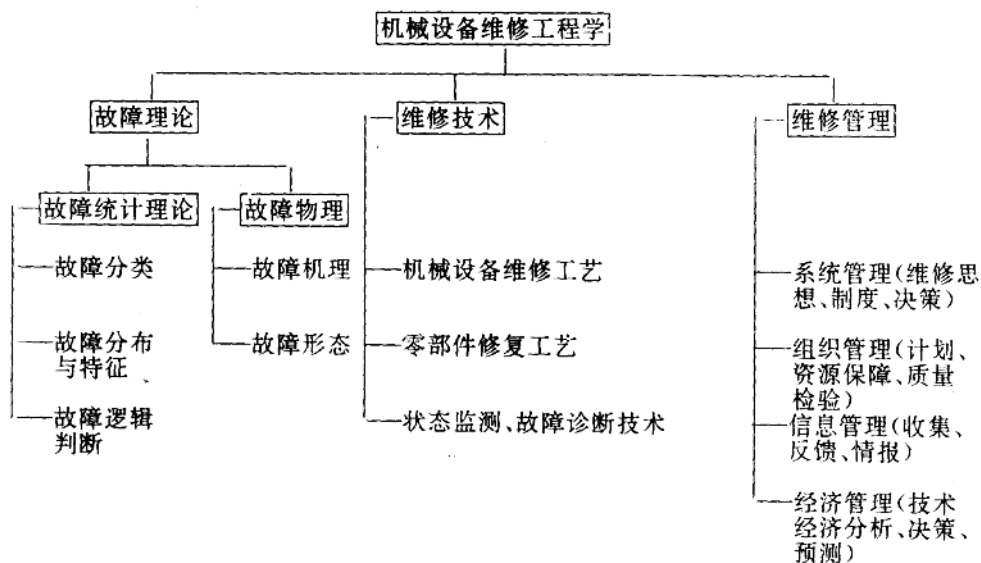
机械设备维修工程学的任务是：

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体系为：



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，它借鉴各工程技术学科的成果，建立发展起来的一套较全面的机械设备维护和零部件修复工艺体系。状态监测和故障诊断技术是根据工程诊断学原理和方法，建立发展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了现代化管理阶段，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决策、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、机械设备维修工程学发展概况

机械设备维修的历史发展,大体上可以分为以下三个阶段。

1. 事后修理阶段

自从有了机械,维修就和机械并存,而且随生产的发展而发展。一直到19世纪,努力提高设备利用率、减少维修费用、增加利润的想法都还未出现,对机械的故障只是在发生了以后才去处理,即事后修理方式。其特征是机械损坏随时修理,维修工作处于完全被动状态,只能适应很低生产力的水平。

2. 预防维修阶段

进入20世纪后,生产力水平有了很大提高,出现了以福特汽车装配线为代表的流水生产作业,生产方式由单件转向批量,生产效率飞跃提高。与此同时,机械设备故障对生产的影响也显著增加。如果某一环节停止运转,则全线停工。于是出现了设备利用率的问题,产生了预防维修的观点。这种观点认为机械设备和人体一样,一进入老年期,由于每个零部件的劣化,将会使故障频发。如在进入老年期之前,把劣化了的零部件更换下来,就可以预防故障的发生。具体讲,就是对机械设备进行定期检查和定期修理。这种维修制度又称计划预修制,20世纪50年代在我国也得到了普遍推广(具体时间为1954年6月),从此维修工作开始走上了有组织有计划的轨道。计划预修制主要包括日常维护保养和不同性质的定期修理(小、中、大修),它能保证机械设备经常地、长期地处于正常运行状态,能明显减少以至消除非计划停机,对连续性的大生产产生了良好的效果。但是,在这个阶段,由于不能定量地确定机械设备的劣化程度和故障时间,对维修周期只能靠经验来定。这就出现两个问题:一是为了保证安全,杜绝事故和非计划停机,往往人为地缩短维修周期,盲目地不必要地增加检修次数,也即所谓的过度维修,造成人力、物力、时间、资金的很大浪费;二是在过度维修下可能出现的一些人为差错,将增大机械设备初期故障的概率。

3. 预知维修阶段

20世纪60年代,由于科学技术的飞速发展,对现代化的机械设备及其零部件的可靠性要求和及时排除故障的要求都越来越高。预知维修首先在宇航、军工部门得到采用。进入70年代,由于状态监测技术和故障诊断技术不断成功、成熟、完善,预知维修开始扩展到国民经济的其它工业部门。今天,先进的状态监测和故障诊断系统是一个专家系统,它能对机械设备的许多信息参数进行动态监测和准确诊断,因而就能实现预知维修。

在我国,1987年7月28日国务院发布了《全民所有制工业交通企业设备管理条例》,其中第七条指出:“企业应当积极采用先进的设备管理方法和维修技术,采用以设备状态监测为基础的设备维修方法,不断提高设备管理和维修技术现代化水平。”可以认为,条例发布之日就是标志着我国企业设备工作开始进入预知维修阶段。

应该指出,当前我国企业设备维修工作发展的水平很不平衡。只有少数装备先进、人员和技术素质高的企业已采用预知维修。统计资料表明,采用预知维修可减少维修费35%。其经济效益和社会效益不言而喻。目前,大多数企业的设备维修工作尚未走出预防维修阶段。有理由深信,随着我国不断的深化改革和扩大开放,国民经济定将飞速发展,一切先进的技术会越来越地被采用、被推广,机械设备维修技术也将会不断进步和发展。

第一章 机械设备技术维护的基本概念

综合分析机械设备全寿命期各阶段有关维修的不同矛盾,研究它们之间的有机联系,把许多有关分支科学地统一起来,从而构成一个完整的知识体系。它具有自己特有的研究对象——有故障的机械设备。

故障理论主要应用了可靠性理论、维修性理论、摩擦、磨损和润滑、工程诊断学、金属物理、断裂力学等学科理论,以及用先进的测试技术同维修实践相结合,从而揭示机械系统进入生产过程后的运动规律,这些构成维修的决策依据。

第一节 故障概念

一切机械设备丧失规定功能的现象统称故障,从微小的机器工作偏差到严重的机械设备事故都是机械故障的表现形式。

一、故障的形成过程

机械设备在使用过程中都承受各种能量的作用。这些能量一方面使机械中各零、部件按规定要求进行工作;另一方面同时造成对机械性能及状态变化有害的过程。随着时间的发展这种有害过程从引起机械零、部件初期参数降低开始,发展到整台设备输出参数的变化,最后导致故障的发生。例如:装岩机在机械能作用下一方面完成其铲装、扬斗、卸载、前进、后退、导正等动作;另一方面出现铲斗、车轮、齿轮、轴承在相对运动中磨损,整个机体在潮湿空气中发生腐蚀,钢丝绳在外力作用下伸长变形,缓冲弹簧承受碰撞冲击等有害过程。当这些磨损、变形、腐蚀等达到一定程度时,装岩机将丧失其完成规定功能的能力,出现故障。

应当注意,引起有害过程的能量必须达到一定数值,有害过程才发生且引起机械零、部件材料的初始性能和状态的变化。随着时间的发展,有害过程将引起零、部件损伤,由于损伤的程度不同,因此可能影响或不影响输出参数。例如,机床导轨的均匀磨损并不会使机床精度下降,因为刀具运动轨迹的不直度仍保持不变。另外,在损伤表现为外部症状之前,经常存在——“作用的累积期”。例如,疲劳裂纹的发展就需交变应力达到一定的循环次数。材料的损伤是指材料的检验性能偏离其初始性能,这种偏离与设备输出功能参数存在一定的相互关系,但是并非所有材料损伤都会影响输出功能参数。所以“损伤”有“允许损伤”与“不允许损伤”的区别,应根据产生原因,对其严重程度作出评价,才能判定其是否导致故障。

故障的形成是若干个相互联系的阶段的最后结果。因此,可以通过方框图来研究故障的发生。用这种方法可以分析故障形成的性质,并且为编制计算机算法程序做准备。

二、故障的分类

1. 按故障发生速度分类

(1) 渐发性故障 渐发性故障的主要特征是在给定的时间段 $t_1 \rightarrow t_2$ 内,发生故障的概

率 $F(t)$ 与设备已经工作过的时间 t_1 有关。使用过的时间越长,发生故障的概率就越高。它与材料的磨损、腐蚀、疲劳、蠕变等过程有密切的关系。大多数机器零、部件的故障都属于这种类型,通常用监控手段可以预测这类故障。

如图 1—1 所示,若 U 为零件损伤量, t 为零件使用时间, r 为损伤过程速度,则 $r = r(t)$ 是时间的函数。这类故障的无损时间间隔 $T_{\text{间隔}}$ 等于零。也就是说当设备一开始使用时,损伤过程也就随之开始,但只有当 U 达到其极限值 U_{max} 时设备才发生故障。

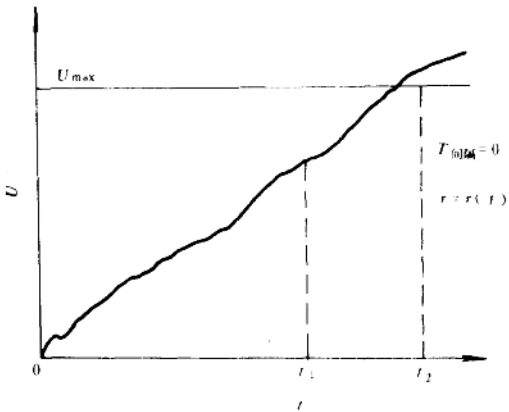


图 1—1 渐发性故障

(2) 突发性故障 突发性故障产生的原因是由各种不同因素及偶然性的外界影响共同作用的结果。这种作用已超出了零件所能承受的限度。如图 1—2 所示,故障往往经过一段时间间隔才发生。此时, $T_{\text{间隔}}$ 则是一个随机量,损伤过程速度进行得非常快 ($r \rightarrow \infty$)。这类故障的主要特征是在给定的时间 $t_1 \rightarrow t_2$ 内,发生故障的概率 $F(t)$ 与设备已使用过的时间 t_1 无关。由于故障是突然发生,事先无任何征兆,所以不能通过监控测试手段进行预测。例如,因润滑油中断而使零件产生热变形,因使用不当出现超负荷而引起零件折断,因各项参数都达极限值(载荷最大、温度最高、材料硬度最低等),而引起零件的变形和断裂。

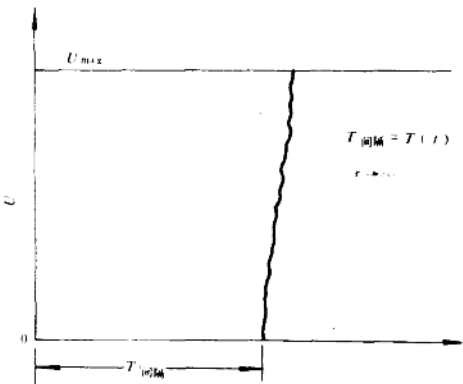


图 1—2 突发性故障

(3) 复合型故障 这类故障的特征是,其故障发生时间是个随机量,与设备已使用过的时间无关,而零件的损伤过程速度 r 则是时间的函数(图 1—3)。例如,由于零件内部存在着应力集中,在受到外界对其作用的巨大冲击(可能是产生疲劳裂纹的根源)后,随着机器的继续使用,裂纹逐渐发展导致折断。

2. 按故障的后果分类

(1) 功能故障 功能故障常是由机器的个别零件损坏或卡滞而造成,因此使机器不能继续完成自己的功能。例如,减速器不能旋转和传递运动,内燃机不能发动,油泵不能供油等。

(2) 参数故障 参数故障表现为机器的输出参数(特性)超出允许的极限值。它并不妨碍机器继续运转。但按技术标准要求来衡量时,这些机器没有工作能力或工作能力不佳。例如,加工精度不合要求、传动效率降低、速度达不到标准值等。

对于现代化机器来说,参数故障具有特别重要的意义。因为现代化机器对输出参数要

求很高,使用有参数故障的机器可能造成严重的经济损失,制造出质量低劣的产品,增加额外的时间和费用损失。在复杂的机器中,零件的参数故障还可能引起功能故障。例如,在许多零件构成的机构中,最后一个从动件本应移动一段微小距离,但因运动副磨损间隙过大,结果使从动零件根本无法移动。因此,零件的参数故障也就形成整机的功能故障。

3. 按故障的危害程度分类

故障的影响与危害性分析方式是一种在机械设备设计阶段广泛应用的分析方法。其目的在于通过分析了解影响机械设备功能的关键性零、部件的失效情况,从而在设计上考虑改进的措施,采取减少或消除故障的具体办法;了解各种故障对机械设备和人身安全的危害程度及对使用环境条件的要求等。

按危害程度分类的方法很多,有的将故障造成的经济损失、停工时间作为评价标准。有的按危害性质分为灾难性故障、使用性故障、经济性故障。在可靠性工程中以无故障工作概率的允许值作为评价故障后果严重程度的尺度,在企业中采用较多的方法是采用故障频繁程度等级、影响程度等级、紧急程度三个方面进行综合评定。程度等级的划分如表 1—1 所示。

表 1—1 故障危害程度等级

等级	影响程度	出现频繁程度	排除故障紧急程度
I	重大故障	非常容易发生	立即
II	严重故障	容易发生	尽量快
III	一般故障	偶而发生	可慢些
IV	轻微故障	极少发生	不受限制

在具体分析中,同一等级的故障并不一定三个方面同时具备。例如,汽车的制动装置失灵属于必需立即处理的故障,否则就将引起重大事故,但它并不是非常容易发生的类型,所以必需进行综合分析。

对同一故障表现形式的后果如何,也必须作具体分析。例如,机床、飞机、运载火箭都使用油泵,油泵故障都将造成供油系统失效这一后果。如机床供油中断则可能导致工作中断,损坏工件或设备。飞机供油中断,如果飞机在飞行中有足够高度,飞行员有足够经验,处理得当可能避免严重事故,但如果在起飞或着陆阶段则都将造成严重事故。对于运载火箭,则后果只是灾难性的重大事故了。

第二节 机械设备可靠性和维修性概念

一、可靠性的概念

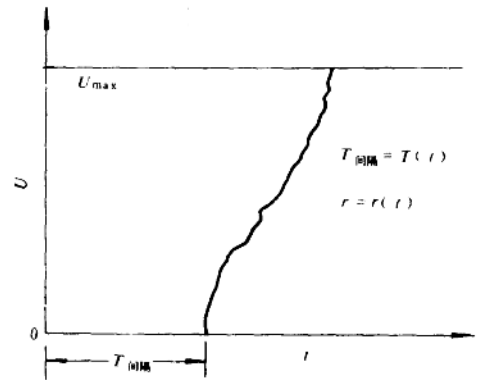


图 1-3 复合故障

可靠性标志着机械设备在其整个使用周期内保持所需质量指标的性能，它表示机械设备无故障工作的可能性。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。”这个概念也就是我们习惯上对某些产品经常提出的是否耐用或不可靠的问题。随着现代科学技术的不断发展，机械设备所承担的工作在质和量的方面都更趋向高级化、复杂化。由于彼此相关的任一部分失效而导致整个系统发生故障的机会显著增加，而整个系统的故障则将会造成经济上甚至生命安全上极大危害。因此，可靠性问题愈来愈多的被重视。自本世纪 50 年代初期以来，可靠性的研究不断发展，已形成并迅速发展成一门年轻的新兴学科——可靠性工程学。

可靠性是一个综合性问题，它涉及到生产和使用的各个方面，生产厂在模拟实际工作条件而进行设计、试验，并予以保证的可靠性称固有可靠性，它与产品内在质量标志与零部件的材料选择、设计、制造等每个环节都有关系。生产厂制造的新设备所具有的固有可靠性，经过运输、存放、安装、调试等阶段，以及操作人员的技术水平、维护保养水平等因素都会影响到设备的可靠性，后一种称为使用可靠性。因此，可靠性技术贯穿于机械设备的研究、设计、制造、试验、使用及维修等各个环节。在这些环节的过程中使产品可靠性得到不断改进和提高。其基本循环过程如图 1—4 所示。

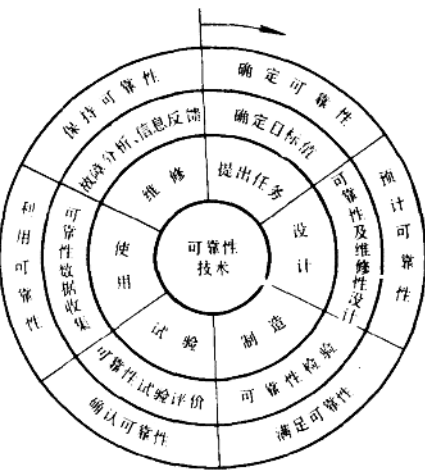


图 1—4 可靠性技术基本循环过程

故障的内在规律。这两个方面现在正汇合形成统一的可靠性科学。

在工程实践中的观测值以及机械设计中大多数设计参数都是随机变量。机械设备的可靠性也具有随机变量的性质，作为一项技术而言，可靠性需要一种能够和其它性能一样定量地加以表示和测定的标准，也就是需要一个表示可靠性的尺度。由于决定产品可靠性的主要原因往往与一些偶然现象有关，故障本身也是一种偶然事件。故障前的使用期或实际工作时间常用随机变量来描述。因此评价可靠性的指标都具有概率的性质。“可靠度”就是用概率论和数理统计方法建立起来的对可靠性的定量尺度。可靠度的定义是，“机械设备在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率”。

可靠性和可靠度的定义基本上是相同的，只是一个表示定性，一个表示定量。其差别

就在定义的最后两个字，一个是“能力”，一个是“概率”。对这两个定义的理解，应明确定义中对象、条件、时间、功能的具体含义。

1. 具体的对象

在提到可靠性的问题时必须联系具体对象。可靠性技术的基本目的就是尽可能少出故障。但是一般说来可靠度是与产品的经济性相联系的，由于高可靠度的产品价格，常是昂贵的，因此，对不同对象就有不同的可靠度要求。例如，宇航设备、制动系统、高压容器等一旦发生故障就会产生极大危害，这就要求有很高的可靠度，除保证其功能要求外，还有满足其安全性要求。而对一般普通设备则常用低可靠度要求，在使用一定时间以后进行更新则更经济。

2. 规定的条件

规定的条件是指机械设备及零、部件在工作时所处的环境条件、运行条件及维修条件等。例如，载荷是否有冲击或振动、环境条件是否恶劣、是否受温度、压力变化的影响，使用及维修人员的技术水平、管理工作是否完善等。

3. 规定的时间

规定的时间是指产品所要求达到的一定的工作期限（使用寿命）。由于机器设备的可靠度是表示时间性的质量，产品的可靠度总是与一定使用时间相联系的。例如，同一台设备在使用初期可靠度高，经过长期使用或超负荷运转以后，则其可靠度必然明显下降。因此，必须注意在提高某机械设备的可靠度时若不指明其工作时间则是毫无意义的。

4. 规定的功能

规定的功能是指保证给定参数处于技术文件规定范围以内，机械设备完成其规定工作所处的状态。例如，金属切削机床的加工精度、成品质量、生产效率等。

二、可靠性的计算

在可靠性工程中最基本的函数为：可靠度函数、故障概率函数、故障概率密度函数、故障率函数。现就可靠度的计算进行说明，其它函数见有关资料。

1. 可靠度函数 $R(t)$

根据可靠度的定义，可靠度函数表示在规定时间间隔内机械设备不发生故障的概率，在故障分析中它常作为评价机械设备无故障性的指标。由于机械设备的可靠性总是与一定的使用时间相联系的。故可靠性与时间的函数式称为可靠度函数，以 $R(t)$ 表示。其取值范围为 $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

2. 故障概率函数 $F(t)$

故障概率函数又称不可靠度函数，它是可靠度的反义词。也就是说它表示在规定时间间隔内机械设备发生故障的概率，以符号 $F(t)$ 表示。它的取值范围也是 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。它与可靠度函数成互补关系，在数值上等于 1 减可靠度函数：

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1-1)$$

对于离散型随机变量，故障概率只能取可数的数值，在处理实际问题时，随机变量的概率分布状况通常是通过该变量的一组实验或观测数据的频率分布来获得。

例：对一批零件进行疲劳试验，抽取试样的总数 $N = 90$ ，若将测定其发生故障的时间

分成若干区间并依次排列, 可得表 1-2 所示数据。

表 1-2 零件疲劳测试数据

顺序号	区间距 Δt (h)	区间中值 t_i (h)	失效数 ΔN_{fi}	累积失效数 N_{fi}	正常工作数 N_0	失效频率 $\bar{f}_i$ (%)	累积失效频率 $F_i = \sum_{j=1}^i f_j$
1	0~100	50	4	4	86	4.44	4.44
2	100~200	150	21	25	65	23.34	27.78
3	200~300	250	30	55	35	33.33	61.11
4	300~400	350	25	80	10	27.78	88.89
5	400~500	450	8	88	2	8.89	97.80
6	500~600	550	2	90	0	2.22	100.00

根据表 1-2 所测数据, 可作成如图 1-5 所示频率分布直方图。若对第 i 个区间 $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, 在这区间中零件发生故障数目为 ΔN_{fi} , 则其故障频率为:

$$f_i = \frac{\Delta N_{fi}}{N} \quad (1-2)$$

在 $t_i < t_n$ 时间内的累积故障数则为:

$$N_{fi} = \sum_{j=1}^i \Delta N_{fj} \quad (1-3)$$

而在 t_i 时间内的累积故障频率 (故障概率) 为:

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta N_{fj}}{N} = \frac{N_{fi}}{N} \quad (1-4)$$

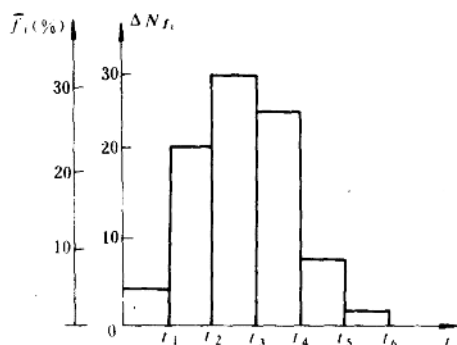


图 1-5 频率分布直方图

根据表 1-2 所测定数据, 在 $t_i = 400$ h 时的故障概率为:

$$\begin{aligned} F(400) &= \sum_{j=1}^i f_j = 0.0444 + 0.2334 + 0.3333 + 0.2778 \\ &= 0.8889 = 88.89\% \end{aligned}$$

$$\text{或 } F(400) = \frac{N_{fi}}{N} = \frac{80}{90} = 0.8889 = 88.89\%$$

同理, 零件在 t_i 时间内的可靠度为:

$$R(t_i) = \frac{N_{si}}{N} = \frac{N - N_{fi}}{N} = 1 - \frac{N_{fi}}{N} = 1 - F_i$$

则在 $t_i = 400$ h 时的可靠度为:

$$R(400) = 1 - F(400) = 1 - 0.8889 = 0.111 = 1.11\%$$

三、维修性

在评定机械设备使用性能时，一方面要考虑这些设备从开始工作到发生故障这段时间的可靠度（固有可靠性）和工作寿命，另一方面还要考虑一旦发生故障之后，是否可以在较短的时间内经过修理恢复到原来工作状态这一条件。后者即为机械设备所具有的维修性。

为保持和恢复机械设备完成规定功能的能力而采取的技术、管理措施称为机械设备维修。全部维修活动受很多因素的影响，例如工人技术水平、管理措施、资料、备件、费用等。但就机械设备和零部件本身而言，其所具有的能够进行维修的难易程度和性质（例如，易接近性、标准化程度、可测试性、结构合理性等），都是在机械设计和安装过程中所确定的一项特性。一台维修性好的设备应能使维修以最少的消耗并在最方便的操作条件下完成。维修性设计的最高奋斗目标目标是使机械设备达到无维修，实现无维修设计。

维修性的定义是“在规定条件下使用的机械设备在规定的时间内按规定程序和方法进行维修时，保持和恢复到能完成规定功能的能力”称为该设备的维修性。由于维修所需的时间 t 是一个随机变量，因此，可以给出一个描述维修时间的概率分布尺度，称为维修度。维修度的定义是“在规定条件下使用的机械设备在规定时间内按规定程序和方法进行维修时，保持和恢复到能完成规定功能的概率。”维修性与维修度二者的定义区别是“能力”与“概率”，在意义上前者表示定性概念，后者则为定量的尺度。

四、维修性基本函数

1. 维修度 $M(t)$

由于维修度是表示可修复系统在规定条件下进行维修，并在规定时间内完成维修的尺度，故维修度 $M(t)$ 是在 $\tau \leq t$ 时间内完成维修的概率，它是时间 t 的单调递增函数。对相同的 t 来说， $M(t)$ 愈大，该系统就愈易维修。当 $t \rightarrow 0$ 时， $M(t) = 0$ ，而当 $t \rightarrow \infty$ 时， $M(t) = 1$ 。它与可靠性基本函数中故障概率函数 $F(t)$ 的规律相一致。

2. 不可维修度 $G(t)$

不可维修度是在 $\tau > t$ 时没有完成维修的概率。它是一个单调递减函数， $t \rightarrow 0$ 时， $G(0) = 1$ ； $t \rightarrow \infty$ 时， $G(\infty) = 0$ 。它也是维修度的互补函数，即 $G(t) = 1 - M(t)$ 。

五、机械设备的有效度

对于可修设备，由于发生故障之后可以修理恢复到正常工作状态，因此，既有从开始工作到发生故障阶段的可靠性问题，也有从发生故障后进行维修，恢复到正常工作阶段的维修性问题。对于能够维修的机械设备，就需要把以上两个阶段中的可靠度与维修度结合起来，用一个统一的尺度来评价这些机械设备在全部过程中能有效地工作的程度，这就是机械设备的有效度（有效利用率）。国家规定考核设备的“可利用率”指标，就是这里讲的设备有效度。

设备的平均故障间隔期可作为衡量设备可靠度的尺度；设备的平均维修时间可作为衡量维修度的尺度。则设备的有效度计算式为：

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 $MTBF$ —— 平均故障间隔期 (h)；

$MTTR$ ——平均维修时间 (h)。

例：某台设备共运转 10000h，在此期间共发生 10 次故障，每次处理故障的时间平均为 9h，计划检修时间共计 300h，试求这台设备的有效度。

解：

$$MTBF = \frac{10000}{10} = 1000h$$

$$MTTR = \frac{300 + 9 \times 10}{10} = 39h$$

$$A = \frac{1000}{1000 + 39} = 0.96 = 96\%$$

第三节 故障分析

故障分析是分析研究机械设备及零部件的故障现象及其规律，从中找出产生故障的主要原因。机械设备宏观性能的变化经常是由于零件或材料的失效引起。常见的失效类型有：磨损失效，变形失效，断裂失效，腐蚀失效。

一、摩擦与磨损

磨损是伴随着摩擦而产生的表层材料微量损失现象。磨损会降低机械设备的运动精度，甚至会使机器完全丧失工作能力；磨损会缩短机器寿命；增加维修时间和费用；增加材料消耗。材料消耗，最终会反映到能源消耗上。据统计在机械设备的故障模式中有 60~80% 是由磨损失效而造成。一般说来磨损使机械运转性能逐渐恶化，虽不致造成事故性灾害，但它往往是机械完全失效的诱因与前奏。因此研究磨损规律，寻求减少磨损的措施，已成为当前机械维修工程中一个重要课题。

磨损并不总是坏事。例如机器跑合阶段的磨损、利用磨损原理进行的机械加工（如研磨、抛光、磨削）等，都是利用磨损为生产服务的。

磨损主要发生在零件表层，所以这一节主要研究零件表层的破坏情况，表层的破坏机理及防止表层破坏的措施。

1. 摩擦的分类

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动（或具有相对运动的趋势时），在接触面间产生的切向运动阻力称为摩擦力，这种现象叫做摩擦。摩擦现象在自然界普遍存在，只要有相对运动就一定有摩擦相伴随。摩擦能使一些物体保持稳定和制动系统的正常工作。但另一方面摩擦消耗大量能量，在现代汽车中发动机约 20% 功率损耗于克服摩擦。纺织机械 85% 功率为克服摩擦而损耗。摩擦与相随出现的磨损是使机械可靠性降低、使用寿命缩短的主要原因之一，摩擦还会导致过度发热而成为限制机械设备工作能力的主要因素。

按摩擦副的运动状态分类，摩擦可分为静摩擦与动摩擦。按摩擦副的摩擦性质分类又可分为滑动摩擦与滚动摩擦。在机械设备摩擦磨损研究中常按摩擦副表面润滑状况来分类。

(1) 干摩擦 在大气条件下，摩擦表面间名义上没有润滑剂存在时的摩擦。

(2) 流体摩擦 相对运动的两物体完全被流体隔开时的摩擦。流体为液体时称为液体摩擦；流体为气体时称为气体摩擦。在流体摩擦时摩擦发生在流体内部。

(3) 边界摩擦 摩擦表面有一层极薄的润滑膜存在时的摩擦。一般边界膜的厚度约为 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 。

(4) 混合摩擦 包括半干摩擦和半液体摩擦。它属于过渡状态的摩擦。同时具有边界摩擦与半干摩擦的情况称半干摩擦；同时具有液体摩擦和干摩擦的状态称半液体摩擦。

2. 摩擦理论

摩擦理论的任务是探讨摩擦机理，研究摩擦是怎样产生的。目前有许多学说企图解释摩擦产生的原因，下面仅介绍几种主要的学说。

(1) 古典摩擦定律（库伦定律） 1785 年库伦根据前人的研究成果进行了比较系统的研究与实验，得出在干摩擦条件下实验的结论是摩擦力与法向载荷成正比。

库伦定律是实验定律，它揭示了摩擦的性质，至今对干摩擦状态仍被认为有一定应用价值，在一般工程计算中仍较广泛应用。但根据近代对摩擦的深入研究，发现其与实际情况有许多不符。

1) 法向压力不大时，对于普通材料，摩擦力和法向载荷成正比，即摩擦系数与摩擦副材料有关。但实际上摩擦系数与温度、表面粗糙度、表面污染情况等有关。另外当压力很大时，实际接触面积接近名义接触面积，对于极硬材料（如钻石）或极软材料（如某些聚合物）摩擦力与法向载荷不成线性比例关系。

2) 对于屈服极限一定的材料（如钢铁）摩擦力与名义接触面积存在某种关系；对于很洁净很光滑的表面，或承受载荷很大时，由于在接触面间出现强烈的分子吸引力，摩擦力与接触面积成正比。

3) 对于弹性材料，静摩擦系数不一定大于动摩擦系数。

(2) 机械啮合说 该理论认为摩擦表面是凹凸不平的，当两个凹凸不平的表面接触时，凹凸彼此交错啮合，当发生相对运动时，互相交错的凸凹就要阻碍物体的运动。摩擦力就是这些啮合总切向阻力的总和。如图 1—6 所示为机械啮合说模型。当 A 固定不动， B 沿箭头方向滑动时，则 B 沿着斜面拱起来，因此相当于斜面的摩擦。用这种假说可以解释一般情况下粗糙表面比光滑表面摩擦力大的原因。但随着近代表面加工技术和真空技术的进步，这种理论受到冲击。例如 1919 年哈迪对经过研磨达到镜面光洁度表面和粗糙表面进行摩擦试验，发现经充分研磨的表面摩擦力反而增大，而且擦伤痕迹表面严重，这是用机械啮合说不能解释的。

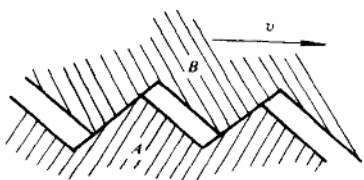


图 1 6 机械啮合说模型

图 1—7 所示为摩擦的分子吸引说模型。设 A 和 B 为相接触的金属。 B 面固定， A 在 B 面上滑动，其表面的金属原子 $a_1, a_2, \dots$ 和 $b_1, b_2, \dots$ 整齐排列成格子状。现设 a_1 对着 b_1 ，随着 A 的运动，在位移很小时 a_1, b_1 间有弹性力发生作用，抵制运动。当 a_1 移过 b_1, b_2 中点后， a_1, b_2 的引力大于 a_1, b_1 的引力。 b_1 便从 a_1 的引力中释放出来，回到原来位置，最后变为热能而失去。

(3) 分子吸引说 1734 年英国物理学家萨古利提出一个新的见解，认为表面愈是光滑，摩擦力就愈大。这是因为表面愈接近，表面分子力的影响就愈增加。摩擦真正的原因应归于表面的分子力。但当时无法实验加以证明。1929 年汤姆林详细研究了晶格内原子力的性质，并推算出固体干摩擦和磨损的表达式。

图 1—7 所示为摩擦的分子吸引说模型。设 A 和 B 为相接触的金属。 B 面固定， A 在 B 面上滑动，其表面的金属原子 $a_1, a_2, \dots$ 和 $b_1, b_2, \dots$ 整齐排列成格子状。现设 a_1 对着 b_1 ，随着 A 的运动，在位移很小时 a_1, b_1 间有弹性力发生作用，抵制运动。当 a_1 移过 b_1, b_2 中点后， a_1, b_2 的引力大于 a_1, b_1 的引力。 b_1 便从 a_1 的引力中释放出来，回到原来位置，最后变为热能而失去。

两表面的各原子多次反复进行这种动作的能量损失，称为摩擦功。

(4) 分子机械说 该理论认为摩擦面的真实接触部分，在很大的单位压力作用下，表面凸峰相互压入和啮合，同时相互接触的表面分子也有吸引力。因此，摩擦过程就是克服亚微观表面凸峰的机械啮合和表面分子吸引力的过程。摩擦力就是在这些接触点上由于机械啮合作用和分子吸引作用所产生的切向阻力的总和。一般常用二项式来说明：

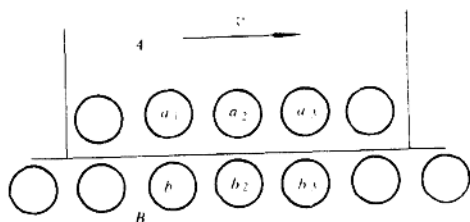


图 1-7 分子说模型

$$F = \beta N + \alpha A_r = \mu N = (\beta + \alpha \frac{A_r}{N}) N \quad (1-6)$$

式中 F —— 摩擦力；

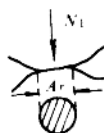
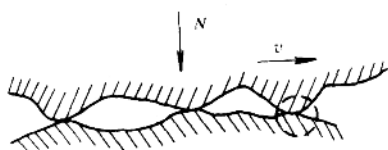
N —— 法向力；

A_r —— 真实接触面积；

α, β —— 分别为由摩擦表面的物理和机械性质决定的系数。

式 (1-6) 说明摩擦系数 $\mu = \beta + \alpha \frac{A_r}{N}$ ，其中 β 是一个定值，它是根据机械啮合理论所确定的摩擦系数。 $\alpha \frac{A_r}{N}$ 是一个变量，它是考虑分子作用力后，对纯机械啮合理论的修正。对于塑性材料，由于真实接触面积与法向载荷成正比，摩擦系数则为一定值。对弹性材料，由于真实接触面积随载荷的增加而缓慢地增加，因而摩擦系数随载荷的增加而减小。由于该理论不但考虑了摩擦表面微凸体的机械啮合，而且还考虑了它们之间的分子作用力。因此，它不仅适用于干摩擦，也适用于边界摩擦。它可以用来解决真实接触面积较大的摩擦问题。

(5) 粘着理论 1945 年澳大利亚科学家鲍顿提出粘着理论，该理论认为所有的表面在微观水平上都是粗糙的，因此当两物体表面相接触时，将以粗糙微凸体的峰顶相互接触，如图 1-8 所示。因为真实接触面积很小，即使法向载荷 N 很小时，在接触微凸体顶部承受的压强也很大，粗糙微凸体起初为弹性变形，最后为塑性变形，从而导致真实接触面积的增加，直到增至真实接触面积恰好能承受所加载荷为止，如图 1-8 中局部放大图所示。对于理想的弹-塑性材料，真实接触面积与载荷的关系式则为：



$$N = A_r \cdot \delta_s \quad (1-7)$$

式中 δ_s —— 材料的屈服极限强度。

在上述接触情况下，在接触点将产生瞬时高温（达 1000℃ 以上，且可持续千分之几秒的时间），引起接触面金属发生粘着（冷焊）。当两表面间存在相对运动

时，在切向力作用下粘着点将受剪切作用，若要使一个粗糙微凸体与相啮合的粗糙微凸体