

68

教育部高职高专规划教材

机械设计基础

陈立德 主编



A0938154

高等教育出版社

内容提要

本书是根据教育部制定的《高职高专教育机械设计基础课程教学基本要求》以及目前教学改革发展的要求编写的,突出高等职业教育的特点,并贯彻最新的国家标准。

本书将机械原理与机械零件的内容有机地结合在一起,适应了目前教学改革的需要。各章内容基本上是按照工作原理、结构、强度计算、使用及维护的顺序编写的。全书除绪论外共分十七章,包括机械设计概述,摩擦、磨损及润滑概述,平面机构的结构分析,平面连杆机构,凸轮机构,间歇运动机构,螺纹联接与螺旋传动,带传动,链传动,齿轮传动,蜗杆传动,齿轮系,轴与轴毂联接,轴承,其他常用零、部件,机械的平衡与调速、机械设计 CAD 简介等内容。各章配有一定数量的思考题和复习题等供学习时选用。

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机械类及近机类专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/陈立德主编. —北京:高等教育出版社, 2000
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-04-008723-5

I. 机… II. 陈… III. 机械设计-高等教育:职业教育-教材 IV. TH12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 26706 号

机械设计基础
陈立德 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京地质印刷厂

开 本	787×1092 1/16	版 次	2000 年 8 月第 1 版
印 张	21	印 次	2000 年 8 月第 1 次印刷
字 数	500 000	定 价	17.90 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

前 言

本书是根据教育部制定的《高职高专教育机械设计基础课程教学基本要求》(机械类专业适用),并结合编者多年从事教学、生产实践的经验编写而成的,可供机械类、近机类专业使用,参考学时数为90~100学时。

本书的特点如下:

- (1) 将机械原理、机械零件两部分内容有机地结合在一起。
- (2) 以培养技术应用性人才为目标,贯彻基本理论以“必需、够用”为度的原则,删减了理论性较强的内容,而突出了实用性强的教学内容。
- (3) 适当介绍了机械设计CAD的方法以及机械零、部件的新型式和新结构。
- (4) 一律采用国际单位制,采用已正式颁布的最新国家标准。
- (5) 加强了复习题部分,并在有关章节中适当地加入思考题,以深化教学内容,加强应用理论知识解决实际问题能力的训练。对有关章节还给出了课堂讨论题目。

参加本书编写的有:苏州市职业大学吕慧瑛(第3、4、5章,第10章的第10.1~10.7节,第16章),南京金陵职业大学李晓辉(第6、12、15章),陈立德(绪论,第1、13章,全书的思考题、复习题及课堂讨论题),沈阳电力高等专科学校沈冰(第7、8、14章),天津职业大学牛玉丽(第2、9章,第10章的第10.8~10.14节,第11、17章)。全书由南京金陵职业大学陈立德教授主编,负责全书的统稿。

南京机械高等专科学校徐锦康教授仔细地审阅了全部文稿和图稿,提出了很多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2000年2月

0.1 机器的组成及特征

在人们的生产和生活中广泛使用着各种机器。图 0.1 所示为单缸内燃机，它由气缸体 1、活塞 2、进气阀 3、排气阀 4、连杆 5、曲轴 6、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 9 和 10 等组成。通过燃气在气缸内的进气—压缩—爆燃—排气过程，使其燃烧的热能转变为曲轴转动的机械能。

图 0.2 所示为颚式破碎机，由电动机 1、带轮 2、V 带 3、带轮 4、偏心轴 5、动颚板 6、肘板 7、定颚板 8 及机架等组成。电动机的转动通过带传动带动偏心轴转动，进而使动颚板产生平面运动，与定颚板一起实现压碎物料的功能。

机器的种类繁多，结构型式和用途也各不相同，但总的来说机器有三个共同的特征：(1) 都是一种人为的实物组合；(2) 各部分形成运动单元，各单元之间具有确定的相对运动；(3) 能实现能量转换或完成有用的机械功。同时具备这三个特征的称为机器，仅具备前两个特征的称为机构。所谓的机构是多个实物的组合，能实现预期的机械运动。如图 0.1 所示的齿轮机构，将曲轴的转动传递给凸轮轴，而凸轮机构则将凸轮轴的转动变换为顶杆的直线往复运动，保证了进、排气阀有规律的启闭。由此可见机器是由机构组成的，但从运动观点来看两者并无差别，工程上统称为“机械”。

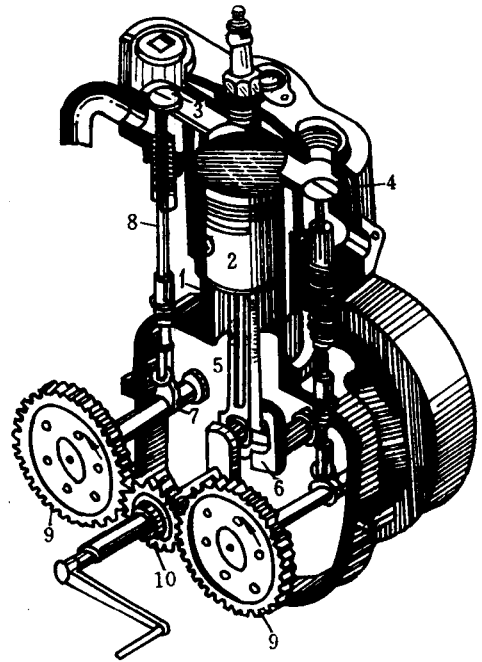


图 0.1 单缸内燃机

组成机械的各个相对运动的实物称为构件，机械中不可拆的制造单元体称为零件。构件可以是单一零件，如内燃机的曲轴 6 (图 0.1)；也可以是多个零件的刚性组合体，如内燃机的连杆 5 (图 0.1)。由此可见，构件是机械中运动的单元体，零件是机械中制造的单元体。

零件可分为两类：一类是通用零件，是在各种机器中都经常使用的零件，如螺栓、螺母等；另一类是专用零件，是仅在特定类型机器中使用的零件，如活塞、曲轴等。

随着近代科学技术的发展，人类综合应用各方面的知识和技术，不断创造出各种新型的机器，因此“机器”也有了新的含义。更广泛意义上的机器定义是：一种用来转换或传递能量、

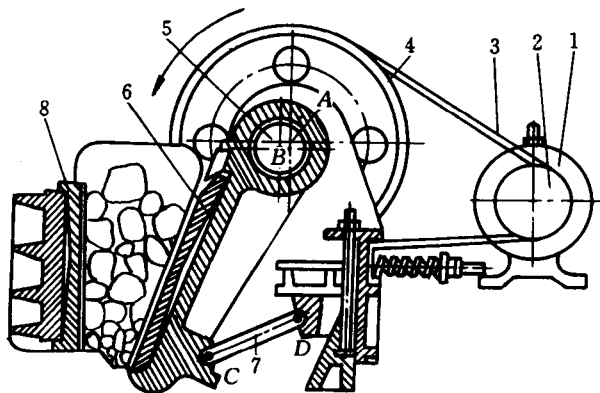


图 0.2 颚式破碎机

物料和信息的，能执行机械运动的装置。

0.2 本课程的内容、性质和任务

本课程研究的对象为机械中的常用机构及一般工作条件下和常用参数范围内的通用零、部件，研究其工作原理、结构特点、运动和动力性能、基本设计理论、计算方法以及一些零部件的选用和维护。本课程是一门重要的专业基础课，综合应用各先修课程的基础理论和生产知识，解决常用机构及通用零部件的分析和设计问题。

本课程的任务为：

1. 使学生了解常用机构及通用零、部件的工作原理、类型、特点及应用等基本知识。
2. 使学生掌握常用机构的基本理论和设计方法，掌握通用零、部件的失效形式、设计准则与设计方法。
3. 使学生具备机械设计实验技能和设计简单机械及传动装置的基本技能。

总之，本课程是理论性和实践性都很强的机械类及近机类专业的主干课程之一，在教学中具有承上启下的作用，是机械工程师及机械管理工程师的必修课程。

0.3 学习方法

本课程是从理论性、系统性很强的基础课和专业基础课向实践性较强的专业课过渡的一个重要转折点，因此，学生学习本课程时必须在学习方法上有所转变，应注意几个特点：

1. 本课程将多门先修课程的基本理论应用到实际中去，解决有关实际问题，因此，先修课程的掌握程度直接影响到本课程的学习。

2. 学生一接触本课程就会产生“没有系统性”、“逻辑性差”等错觉，这是由于学生习惯了基础课的系统性所造成的。本课程中，虽然不同研究对象所牵涉到的理论基础不相同，且相互之间无多大关系，但最终的研究目的只有一个，即设计出能应用的机构、零件等。本课程的各部分内容都是按照工作原理、结构、强度计算、使用维护的顺序介绍的，有其自身的系统

性，在学习时应注意这一特点。

3. 由于实践中所发生的问题很复杂，很难用纯理论的方法来解决，因此常常采用很多经验公式、参数以及简化计算（条件性计算）等，这样往往会给学生造成“不讲道理”、“没有理论”等错觉，这点必须在学习过程中逐步适应。

4. 计算步骤和计算结果不像基础课那样具有唯一性。

5. 计算对解决设计问题虽然很重要，但并不是唯一所要求的能力。学生必须逐步培养把理论计算与结构设计、工艺等结合起来解决设计问题的能力。

第 1 章

机械设计概述

本章扼要阐述机械设计的基本要求、内容与步骤以及设计计算准则等。

1.1 机械设计的基本要求

机械设计包括以下两种设计：应用新技术、新方法开发创造新机械；在原有机机械的基础上重新设计或进行局部改造，从而改变或提高原有机机械的性能。设计质量的高低直接关系到机械产品的性能、价格及经济效益。

机械零件是组成机器的基本单元，在讨论机械设计的基本要求之前，首先应初步了解设计机械零件的一些基本要求。

1.1.1 设计机械零件的基本要求

零件工作可靠并且成本低廉是设计机械零件应满足的基本要求。

零件的工作能力是指零件在一定的工作条件下抵抗可能出现的失效的能力，对载荷而言称为承载能力。失效是指零件由于某些原因不能正常工作。只有每个零件都能可靠地工作，才能保证机器的正常运行。

设计机械零件还必须坚持经济观点，力求综合经济效益高。为此要注意以下几点：(1) 合理选择材料，降低材料费用；(2) 保证良好的工艺性，减少制造费用；(3) 尽量采用标准化、通用化设计，简化设计过程从而降低成本。

1.1.2 机械设计的基本要求

机械产品设计应满足以下几方面的基本要求。

1. 实现预定功能

设计的机器能实现预定的功能，并在规定的工作条件下、规定的工作期限内能正常运行。

2. 满足可靠性要求

机器由许多零件及部件组成，其可靠度取决于零、部件的可靠度。机械系统的零、部件越多，其可靠度也就越低，因此在设计机器时应尽量减少零件数目。但就目前而言，对机械产品

的可靠度难以提出统一的考核指标。

3. 满足经济性要求

经济性指标是一项综合性指标，要求设计及制造成本低、机器生产率高、能源和材料耗费少、维护及管理费用低等。

4. 操作方便、工作安全

操作系统要简便可靠，有利于减轻操作人员的劳动强度。要有各种保险装置以消除由于误操作而引起的危险，避免人身及设备事故的发生。

5. 造型美观、减少污染

运用工业艺术造型设计方法对机械产品进行工业造型设计，使所设计的机器不仅使用性能好、尺寸小、价格低廉，而且外形美观，富有时代特点。机械产品的造型直接影响到产品的销售和竞争力，当前在机械设计中是一个不容忽视的环节。

尽可能地降低噪声，减轻对环境的污染。从某种意义上来说，噪声也是反映机械质量的一种综合指标。

1.2 机械设计的内容与步骤

机械设计是一项复杂、细致和科学性很强的工作。随着科学技术的发展，对设计的理解在不断地深化，设计方法也在不断地发展。近年来发展起来的“优化设计”、“可靠性设计”、“有限元设计”、“模块设计”、“计算机辅助设计”等现代设计方法已在机械设计中得到了推广与应用。即使如此，常规设计方法仍然是工程技术人员进行机械设计的重要基础，必须很好地掌握。常规设计方法又可分为理论设计、经验设计和模型实验设计等。

机械设计的过程通常可分为以下几个阶段：

(1) 产品规划

产品规划的主要工作是提出设计任务和明确设计要求，这是机械产品设计首先需要解决的问题。通常是人们根据市场需求提出设计任务，通过可行性分析后才能进行产品规划。

(2) 方案设计

在满足设计任务书中设计具体要求的前提下，由设计人员构思出多种可行方案并进行分析比较，从中优选出一种功能满足要求、工作性能可靠、结构设计可行、成本低廉的方案。

(3) 技术设计

在既定设计方案的基础上，完成机械产品的总体设计、部件设计、零件设计等，设计结果以工程图及计算书的形式表达出来。

(4) 制造及试验

经过加工、安装及调试制造出样机，对样机进行试运行或在生产现场试用，将试验过程中发现的问题反馈给设计人员，经过修改完善，最后通过鉴定。

与设计机器时一样，设计机械零件也常需拟定出几种不同方案，经过认真比较选用其中最好的一种。设计机械零件的一般步骤如下：

(1) 根据机器的具体运转情况和简化的计算方案确定零件的载荷。

(2) 根据零件工作情况的分析，判定零件的失效形式，从而确定其计算准则。

(3) 进行主要参数选择, 选定材料, 根据计算准则求出零件的主要尺寸, 考虑热处理及结构工艺性要求等。

(4) 进行结构设计。

(5) 绘制零件工作图, 制订技术要求, 编写计算说明书及有关技术文件。

对于不同的零件和工作条件, 以上这些设计步骤可以有所不同。此外, 在设计过程中, 这些步骤又是相互交错、反复进行的。

应当指出, 在设计机械零件时往往是将较复杂的实际工作情况进行一定的简化, 才能应用力学等理论解决机械零件的设计计算问题, 因此, 这种计算或多或少带有一定的条件性或假定性, 称为条件性计算。机械零件设计基本上是按条件性计算进行的, 如注意到公式的适用范围, 一般计算结果具有一定的可靠性, 并充分考虑了机械零件的安全性。为了使计算结果更符合实际情况, 必要时可进行模型试验或实物试验。

本课程在介绍各种零件设计时, 其内容的安排顺序基本上是按照上述设计步骤进行的。

1.3 机械零件的失效形式及设计计算准则

机械零件丧失预定功能或预定功能指标降低到许用值以下的现象, 称为机械零件的失效。由于强度不够引起的破坏是最常见的零件失效形式, 但并不是零件失效的唯一形式。进行机械零件设计时必须根据零件的失效形式分析失效的原因, 提出防止或减轻失效的措施, 根据不同的失效形式提出不同的设计计算准则。

1.3.1 失效形式

机械零件最常见的失效形式大致有以下几种。

1. 断裂

机械零件的断裂通常有以下两种情况: (1) 零件在外载荷的作用下, 某一危险截面上的应力超过零件的强度极限时将发生断裂 (如螺栓的折断); (2) 零件在循环变应力的作用下, 危险截面上的应力超过零件的疲劳强度而发生疲劳断裂。

2. 过量变形

当零件上的应力超过材料的屈服极限时, 零件将发生塑性变形。当零件的弹性变形量过大时也会使机器的工作不正常, 如机床主轴的过量弹性变形会降低机床的加工精度。

3. 表面失效

表面失效主要有疲劳点蚀、磨损、压溃和腐蚀等形式。表面失效后通常会增加零件的摩擦, 使零件尺寸发生变化, 最终造成零件的报废。

4. 破坏正常工作条件引起的失效

有些零件只有在一定的工作条件下才能正常工作, 否则就会引起失效, 如带传动因过载发生打滑, 使传动不能正常地工作。

1.3.2 设计计算准则

同一零件对于不同失效形式的承载能力也各不相同。根据不同的失效原因建立起来的工作

能力判定条件，称为设计计算准则，主要包括以下几种。

1. 强度准则

强度是零件应满足的基本要求。强度是指零件在载荷作用下抵抗断裂、塑性变形及表面失效（磨粒磨损、腐蚀除外）的能力。强度可分为整体强度和表面强度（接触与挤压强度）两种。

整体强度的判定准则为：零件在危险截面处的最大应力（ σ ， τ ）不应超过允许的限度（称为许用应力，用 $[\sigma]$ 或 $[\tau]$ 表示），即

$$\sigma \leq [\sigma]$$

或

$$\tau \leq [\tau]$$

另一种表达形式为：危险截面处的实际安全系数 S 应大于或等于许用安全系数 $[S]$ ，即

$$S \geq [S]$$

表面接触强度的判定准则为：在反复的接触应力作用下，零件在接触处的接触应力 σ_H 应小于或等于许用接触应力值 $[\sigma_H]$ ，即

$$\sigma_H \leq [\sigma_H]$$

对于受挤压的表面，挤压应力不能过大，否则会发生表面塑性变形、表面压溃等。挤压强度的判定准则为：挤压应力 σ_p 应小于或等于许用挤压应力 $[\sigma_p]$ ，即

$$\sigma_p \leq [\sigma_p]$$

2. 刚度准则

刚度是指零件受载后抵抗弹性变形的能力，其设计计算准则为：零件在载荷作用下产生的弹性变形量应小于或等于机器工作性能允许的极限值。各种变形量计算公式可参考材料力学课程，本书不再赘述。

3. 耐磨性准则

设计时应使零件的磨损量在预定期限内不超过允许量。由于磨损机理比较复杂，通常采用条件性的计算准则，即零件的压强 p 不大于零件的许用压强 $[p]$ ：

$$p \leq [p]$$

4. 散热性准则

零件工作时如果温度过高将导致润滑剂失去作用，材料的强度极限下降，引起热变形及附加热应力等，从而使零件不能正常工作。散热性准则为：根据热平衡条件，工作温度 t 不应超过许用工作温度 $[t]$ ，即

$$t \leq [t]$$

5. 可靠性准则

可靠性用可靠度表示，对那些大量生产而又无法逐件试验或检测的产品，更应计算其可靠度。零件的可靠度用零件在规定的使用条件下、在规定的时间内能正常工作的概率来表示，即用在规定的寿命时间内能连续工作的件数占总件数的百分比表示。如有 N_T 个零件，在预期寿命内只有 N_S 个零件能连续正常工作，则其系统的可靠度为

$$R = N_S / N_T$$

1.4 机械零件设计的标准化、系列化及通用化

有不少通用零件，例如螺纹联接件、滚动轴承等，由于应用范围广、用量大，已经高度标准化而成为标准件。设计时只需根据设计手册或产品目录选定型号和尺寸，向专业商店或工厂订购。此外，有很多零件虽使用范围极为广泛，但在具体设计时随着工作条件的不同，在材料、尺寸、结构等方面的选择也各不相同，这种情况则可对其某些基本参数规定标准的系列化数列，如齿轮的模数等。

按规定标准生产的零件称为标准件。标准化给机械制造带来的好处是：(1) 由专门化工厂大量生产标准件，能保证质量、节约材料、降低成本；(2) 选用标准件可以简化设计工作，缩短产品的生产周期；(3) 选用参数标准化的零件，在机械制造过程中可以减少刀具和量具的规格；(4) 具有互换性，从而简化机器的安装和维修。设计中选用标准件时，由于要受到标准的限制而使选用不够灵活，若选用系列化产品则从一定程度上解决了这一问题。例如，对于同一类型、同一内径的滚动轴承，按照滚动体直径的不同使其形成各种外径、宽度的滚动轴承系列，从而使轴承的选用更为方便、灵活。

通用化是指在不同规格的同类产品或不同类产品中采用同一结构和尺寸的零件、部件，以减少零、部件的种类，简化生产管理过程，降低成本和缩短生产周期。

由于标准化、系列化、通用化具有明显的优越性，所以在机械设计中应大力推广“三化”，贯彻采用各种标准。

我国现行标准分为国家标准（GB）、行业标准和专业标准等，国际上则推行国际标准化组织（ISO）的标准，我国也正在逐步向 ISO 标准靠近。

复 习 题

- 1.1 机械设计过程通常分为哪几个阶段？各阶段的主要内容是什么？
- 1.2 常见的失效形式有哪几种？
- 1.3 什么叫工作能力？计算准则是如何得出的？
- 1.4 标准化的重要意义是什么？

第 2 章

摩擦、磨损及润滑概述

随着现代科学技术的发展，对摩擦、磨损的研究已经形成一门新的学科领域——摩擦学 (tribology)。为了节约能源、提高效率及延长机械零件的寿命，润滑是必不可少的。本章对摩擦、磨损作简要的介绍，重点将介绍润滑方式、润滑装置和密封装置。了解并掌握这方面的知识有利于正确地设计、使用和维护机器。

2.1 摩擦与磨损

各类机器在工作时，其各零件相对运动的接触部分都存在着摩擦，摩擦是机器运转过程中不可避免的物理现象。摩擦不仅消耗能量，而且使零件发生磨损，甚至导致零件失效。据统计，世界上 $1/3 \sim 1/2$ 的能源消耗在摩擦上，而各种机械零件因磨损失效的也占全部失效零件的一半以上。磨损是摩擦的结果，润滑则是减少摩擦和磨损的有力措施，这三者是相互联系不可分割的。

2.1.1 摩擦及其分类

在外力作用下，一物体相对于另一物体运动或有运动趋势时，两物体接触面间产生的阻碍物体运动的切向阻力称为摩擦力。这种在两物体接触区产生阻碍运动并消耗能量的现象，称为摩擦。摩擦会造成能量损耗和零件磨损，在一般情况下是有害的，因此应尽量减少摩擦。但有些情况下却要利用摩擦工作，如带传动，摩擦制动器等。

根据摩擦副表面间的润滑状态将摩擦状态分为四种：干摩擦、液体摩擦、边界摩擦和混合摩擦（见图 2.1）。

1. 干摩擦

如果两物体的滑动表面为无任何润滑剂或保护膜纯金属，这两个物体直接接触时的摩擦称为干摩擦，如图 2.1a 所示。干摩擦状态产生较大的摩擦功耗及严重的磨损，因此应严禁出现这种摩擦。

2. 液体摩擦

两摩擦表面不直接接触，被油膜（油膜厚度一般在 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 以上）隔开的摩擦称为液

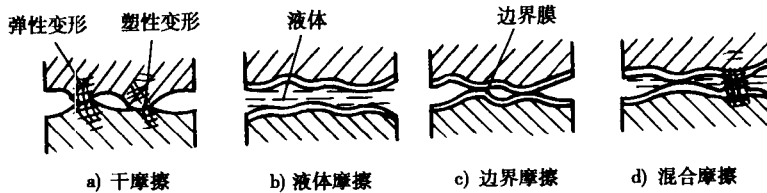


图 2.1 摩擦副的表面润滑状态

体摩擦，如图 2.1b 所示。

3. 边界摩擦

两摩擦表面被吸附在表面的边界膜（油膜厚度小于 $1\ \mu\text{m}$ ）隔开，使其处于干摩擦与液体摩擦之间的状态，这种摩擦称为边界摩擦，如图 2.1c 所示。

4. 混合摩擦

在实践中有很多摩擦副处于干摩擦、液体摩擦与边界摩擦的混合状态，称为混合摩擦，如图 2.1d 所示。

由于液体摩擦、边界摩擦、混合摩擦都必须在一定的润滑条件下才能实现，因此这三种摩擦又分别称为液体润滑、边界润滑和混合润滑。

2.1.2 磨损及其过程

运动副之间的摩擦将导致零件表面材料的逐渐损失，这种现象称为磨损。单位时间内材料的磨损量称为磨损率。磨损量可以用体积、质量或厚度来衡量。

机械零件严重磨损后，将降低机器的工作效率和可靠性，使机器提早报废。因此，预先考虑如何避免或减轻磨损，是设计、使用、维护机器的一项重要内容。但另一方面，磨损也并非全都是有害的，工程上常利用磨损的原理来减小零件表面的粗糙度，如磨削、研磨、抛光、抛光等。

在机械的正常运转中，磨损过程大致可分为以下三个阶段。

1. 跑合（磨合）磨损阶段

在这一阶段中，磨损速度由快变慢，而后逐渐减小到一稳定值。这是由于新加工的零件表面呈尖峰状态，使运转初期摩擦副的实际接触面积较小，单位接触面积上的压力较大，因而磨损速度较快，如图 2.2 中磨损曲线的 Oa 段。

跑合磨损到一定程度后，尖峰逐渐被磨平，磨损速度即逐渐减慢。

2. 稳定磨损阶段

在这一阶段中磨损缓慢、磨损率稳定，零件以平稳而缓慢的磨损速度进入零件正常工作阶段，如图 2.2 中的 ab 段。这个阶段的长短即代表零件使用寿命的长短，磨损曲线的斜率即为磨损率，斜率愈小磨损率就愈低，零件的使用寿命就愈长。经此磨损阶段后零件进入剧烈磨损阶段。

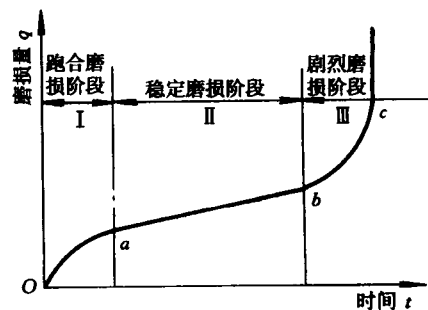


图 2.2 零件的磨损过程

3. 剧烈磨损阶段

此阶段的特征是磨损速度及磨损率都急剧增大。当工作表面的总磨损量超过机械正常运转要求的某一允许值后，摩擦副的间隙增大，零件的磨损加剧，精度下降，润滑状态恶化，温度升高，从而产生振动、冲击和噪声，导致零件迅速失效，如图 2.2 中的 *bc* 段。

上述磨损过程中的三个阶段，是一般机械设备运转过程中都存在的。必须指出的是，在跑合阶段结束后应清洗零件，更换润滑油，这样才能正常地进入稳定磨损阶段。

2.1.3 磨损分类

按照磨损的机理以及零件表面磨损状态的不同，一般工况下把磨损分为磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损等。

1. 磨粒磨损

由于摩擦表面上的硬质突出物或从外部进入摩擦表面的硬质颗粒，对摩擦表面起到切削或刮擦作用，从而引起表层材料脱落的现象，称为磨粒磨损。这种磨损是最常见的一种磨损形式，应设法减轻这种磨损。为减轻磨粒磨损，除注意满足润滑条件外，还应合理地选择摩擦副的材料、降低表面粗糙度值以及加装防护密封装置等。

2. 粘着磨损

当摩擦副受到较大正压力作用时，由于表面不平，其顶峰接触点受到高压作用而产生弹、塑性变形，附在摩擦表面的吸附膜破裂、温升后使金属的顶峰塑性面牢固地粘着并熔焊在一起，形成冷焊结点。在两摩擦表面相对滑动时，材料便从一个表面转移到另一个表面，成为表面凸起，促使摩擦表面进一步磨损。这种由于粘着作用引起的磨损，称为粘着磨损。

粘着磨损按程度不同可分为五级：轻微磨损、涂抹、擦伤、撕脱、咬死。如气缸套与活塞环、曲轴与轴瓦、轮齿啮合表面等，皆可能出现不同粘着程度的磨损。涂抹、擦伤、撕脱又称为胶合，往往发生于高速、重载的场合。

合理地选择配对材料（如选择异种金属），采用表面处理（如表面热处理、喷镀、化学处理等），限制摩擦表面的温度，控制压强及采用含有油性极压添加剂的润滑剂等，都可减轻粘着磨损。

3. 疲劳磨损（点蚀）

两摩擦表面为点或线接触时，由于局部的弹性变形形成了小的接触区。这些小的接触区形成的摩擦副如果受变化接触应力的作用，则在其反复作用下，表层将产生裂纹。随着裂纹的扩展与相互连接，表层金属脱落，形成许多月牙形的浅坑，这种现象称为疲劳磨损，也称点蚀。

合理地选择材料及材料的硬度（硬度高则抗疲劳磨损能力强），选择粘度高的润滑油，加入极压添加剂或 MoS_2 及减小摩擦面的粗糙度值等，可以提高抗疲劳磨损的能力。

4. 腐蚀磨损

在摩擦过程中，摩擦面与周围介质发生化学或电化学反应而产生物质损失的现象，称为腐蚀磨损。腐蚀磨损可分为氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损、气蚀磨损等。腐蚀也可以在没有摩擦的条件下形成，这种情况常发生于钢铁类零件，如化工管道、泵类零件、柴油机缸套等。

应该指出的是，实际上大多数磨损是以上述四种磨损形式的复合形式出现的。

2.2 润 滑

在摩擦副间加入润滑剂，以降低摩擦、减轻磨损，这种措施称为润滑。润滑的主要作用是：(1) 减小摩擦系数，提高机械效率；(2) 减轻磨损，延长机械的使用寿命。同时润滑还可起到冷却、防尘以及吸振等作用。

2.2.1 润滑剂的性能与选择

常用的润滑剂除了润滑油和润滑脂外，还有固体润滑剂（如石墨、二硫化钼等）、气体润滑剂（如空气、氢气、水蒸气等）。

1. 润滑油

润滑油是目前使用最多的润滑剂，主要有矿物油、合成油、动植物油等，其中应用最广泛的为矿物油。

润滑油最重要的一项物理性能指标为粘度，它是选择润滑油的主要依据。粘度的大小表示了液体流动时其内摩擦阻力的大小，粘度愈大，内摩擦阻力就愈大，液体的流动性就愈差。

粘度可用动力粘度、运动粘度、条件粘度（恩氏粘度）等表示。我国的石油产品常用运动粘度来标定。

(1) 动力粘度 η 对于 1 m^3 的液体，如果其上下表面发生相对速度为 1 m/s 的相对运动时所需切向力为 1 N ，则称该液体的粘度为 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($= 1\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)。

(2) 运动粘度 ν 液体的动力粘度与液体在相同温度下密度 ρ 的比值称为该液体的运动粘度。

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.1)$$

式中 η 为动力粘度，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； ρ 为密度，单位为 kg/m^3 ； ν 为运动粘度，单位为 m^2/s 。

一般润滑油的牌号就是该润滑油在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ （或 $100\text{ }^\circ\text{C}$ ）时运动粘度（以 mm^2/s 为单位）的平均值，如 L-AN46 全损耗系统用油在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时的运动粘度为 $41.4 \sim 50.6\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 条件粘度 在规定的温度下从恩氏粘度计流出 200 ml 样品所需的时间与同体积蒸馏水在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时流出所需的时间之比值称为该液体的条件粘度，以 $^\circ\text{E}$ 表示。国际上有许多国家采用恩氏粘度（即为条件粘度）。

运动粘度和恩氏粘度之间可通过下式进行换算：

$$\text{当 } 1.35 \leqslant ^\circ\text{E} \leqslant 3.2 \text{ 时} \quad \nu = 8.0^\circ\text{E} - \frac{8.64}{^\circ\text{E}} \quad (2.2)$$

$$\text{当 } ^\circ\text{E} > 3.2 \text{ 时} \quad \nu = 7.6^\circ\text{E} - \frac{4.0}{^\circ\text{E}} \quad (2.3)$$

润滑油的主要物理性能指标还有凝点、闪点、燃点和油性等。润滑油的粘度并不是固定不变的，而是随着温度和压强而变化。粘度随温度的升高而降低，而且变化很大，因此，在注明某种润滑油的粘度时，必须同时标明它的测试温度，否则便毫无意义。粘度随压强的升高而加大，但当压强小于 20 MPa 时，其影响甚小，可不予考虑。

常用润滑油的性能和用途见表 2.1。

表 2.1 工业常用润滑油的性能和用途

类别	品种代号	牌号	运动粘度 ^① mm ² /s	闪点 (°C) 不低于	倾点 (°C) 不高于	主要性能和用途	说明
工业闭式齿轮油	L-CKB 抗氧防锈 工业齿轮油	46	41.4 ~ 50.6	180	- 8	具有良好的抗氧化性、抗腐蚀性、抗浮化性等性能,适用于齿面应力在 500 MPa 以下的一般工业闭式齿轮传动的润滑	L—润 滑 剂类
		68	61.2 ~ 74.8				
		100	90 ~ 110	200			
		150	135 ~ 165				
		220	198 ~ 242				
		320	288 ~ 352				
	L-CKC 中载荷工 业齿轮油	68	61.2 ~ 74.8	180	- 8	具有良好的极压抗磨和热氧化安定性,适用冶金、矿山、机械、水泥等工业的中载荷 (500 ~ 1 100 MPa) 闭式齿轮的润滑	
		100	90 ~ 110				
		150	135 ~ 165	200			
		220	198 ~ 242				
		320	288 ~ 352				
		460	414 ~ 506				
	680	612 ~ 748	- 5				
	L-CKD 重载荷二 业齿轮油	100	90 ~ 110	180	- 8	具有更好的极压抗磨性、抗氧化性,适用于矿山、冶金、机械、化工等行业重载荷齿轮传动装置	
		150	135 ~ 165				
		220	198 ~ 242	200			
		320	288 ~ 352				
		460	414 ~ 506				
680		612 ~ 748	- 5				
主轴油	主轴油 (SH 0017 —90)	N2	2.0 ~ 2.4	60	凝点 不高于 - 15	主要适用于精密机床主轴轴承的润滑及其他以油浴、压力、油雾润滑为润滑方式的滑动轴承和滚动轴承的润滑。N10 可作为普通轴承用油和缝纫机用油	SH 为石 化部标 准代 号
		N3	2.9 ~ 3.5	70			
		N5	4.2 ~ 5.1	80			
		N7	6.2 ~ 7.5	90			
		N10	9.0 ~ 11.0	100			
		N15	13.5 ~ 16.5	110			
		N22	19.8 ~ 24.2	120			
		全损耗系统用油	L-AN 全损 耗系统用油 (GB 443— 89)	5			
7	6.12 ~ 7.48			110			
10	9.00 ~ 11.00			130			
15	13.5 ~ 16.5			150			
22	19.8 ~ 24.2						
32	28.8 ~ 35.2						
46	41.4 ~ 50.6						
68	61.2 ~ 74.8			160			
100	90.0 ~ 110			180			
150	135 ~ 165						

① 在 40 °C 的条件下。

思考题 2.1 机械式手表中对润滑油性能的要求除了要考虑粘度外,还应考虑什么?

思考题 2.2 如果冬天在液压系统中加入 L-AN22 润滑油是合适的,不会漏油,而在夏天加入则产生漏油现象,这是为什么?如何设法改变?

2. 润滑脂

润滑脂是在润滑油中加入稠化剂（如钙、钠、锂等金属皂基）而形成的脂状润滑剂，又称为黄油或干油。

润滑脂的主要物理性能指标为滴点、锥入度和耐水性等。润滑脂的流动性小，不易流失，所以密封简单，不需经常补充。润滑脂对载荷和速度变化不是很敏感，有较大的适应范围，但因其摩擦损耗较大，机械效率较低，故不宜用于高速传动的场合。

(1) 滴点 是指润滑脂受热后从标准测量杯的孔口滴下第一滴油时的温度。滴点标志着润滑脂的耐高温能力，润滑脂的工作温度应比滴点低 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 锥入度 即润滑脂的稠度。将重量为 1.5 N 的标准锥体在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温下，由润滑脂表面自由沉下，经 5 s 后该锥体可沉入的深度值（以 0.1 mm 为单位）即为润滑脂的锥入度。锥入度表明润滑脂内阻力的大小和流动性的强弱。锥入度越小，表明润滑脂越稠，承载能力越强，密封性越好，但摩擦阻力也越大，流动性越差，因而不宜填充较小的摩擦间隙。

目前使用最多的是钙基润滑脂，其耐水性强，但耐热性差，常用于在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下工作的各种轴承的润滑，尤其适用于在露天条件下工作的机械轴承的润滑。钠基润滑脂的耐热性好，可用于 $115\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下工作的情况，但其耐水性差。锂基润滑脂的性能优良，耐水耐热性好，可以在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内广泛适用。

3. 润滑剂的选用

润滑剂选用的基本原则是：在低速、重载、高温、间隙大的情况下，应选用粘度较大的润滑油；而在高速、轻载、低温、间隙小的情况下应选粘度较小的润滑油。润滑脂主要用于速度低、载荷大、不需经常加油、使用要求不高或灰尘较多的场合。气体、固体润滑剂主要用于高温、高压、防止污染等一般润滑剂不能适用的场合。对于润滑剂的具体选用，可参阅有关手册。

思考题 2.3 夏天时发现液压系统中的油变稀了，有人将润滑脂加入，调均后使油变稠。这样做行吗？

2.2.2 润滑方法和润滑装置

机械设备的润滑，主要集中在传动件和支承件上。各种零、部件的润滑将在相关各章节中介绍，这里仅作简单概述。

油润滑的方法多种多样，其分类标准大概有四种：集中润滑或分散润滑，连续润滑或间歇润滑，压力润滑或无压力润滑，循环式润滑或非循环式润滑。分散润滑比集中润滑简便。集中润滑需要一个多出口的润滑装置供油，而分散润滑中各摩擦副的润滑装置则是各自独立的。对于轻载、低速的摩擦副可采用间歇无压力润滑或间歇压力润滑，可利用油壶、油枪将油注入油杯进行润滑。油杯可采用 GB 1152—89 ~ GB 1157—89 中的适当形式。连续无压力润滑可采用油绳、油垫、针阀式油杯、油环、油轮等润滑装置。而连续压力润滑需采用油泵、喷咀装置，高速时还可采用油雾发生器实现油雾润滑。

脂润滑的装置较为简单，加脂方式有人工加脂、脂杯加脂和集中润滑系统供脂等。对于单机设备上的轴承、链条等部位，由于润滑点不多，大多采用人工加脂或涂抹润滑脂。对于润滑点多的大型设备，如矿山机械、船舶机械等，则采用集中润滑系统。