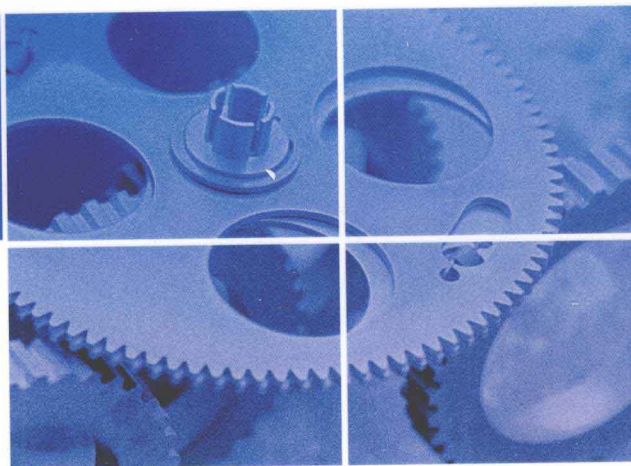


普通高等教育“十二五”规划教材



机械设计基础

李建功 主 编
王春雨 冯立艳 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

机械设计基础

主 编 李建功
副主编 王春雨 冯立艳
参 编 刘慧鹏 王宝香 蔡玉强 齐家璋
 张雪雁 卫 静 翁江翔
主 审 陈国定



机械工业出版社

本书依据教育部高等学校“机械基础系列课程教学基本要求”编写而成，主要讨论常用机构和通用机械零件的工作原理、结构特点和设计方法。作为“机械设计基础”课程的教材，主要供高等学校近机械类和非机械类各工科专业的学生使用，较适宜的课内学时为60学时左右。此外，本书也可供有关工程技术人员参考。

全书共十五章，大体分为六个部分：第一、二章为机械零件设计和机构的基础知识；第三、四、五章为常用的机构；第六章为机械中常用的联接；第七、八、九、十章和第六章第七节为常用的机械传动；第十一、十二、十三章为轴系零部件；第十四、十五章为其他部分，包括机械的平衡与调速和弹簧。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计基础/李建功主编. —北京：机械工业出版社，2012.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-38187-7

I. ①机… II. ①李… III. ①机械设计-高等学校-教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 081990 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：刘小慧 责任编辑：刘小慧 韩旭东 冯 铨
版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉
封面设计：张 静 责任印制：乔 宇
三河市宏达印刷有限公司印刷
2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·15.75 印张·388 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-38187-7
定价：29.00 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

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书根据教育部高等学校“机械基础系列课程教学基本要求”编写而成。

编写中本着删繁就简、少而精的原则选编教学内容；着重讨论常用机构和通用机械零件的工作原理、结构特点和设计方法；淡化公式的推导，简化理论分析过程；注重培养学生将相关理论知识应用于工程实践的能力；力求重点突出，叙述简明准确，图表简洁、清晰、易懂；采用最新国家标准。

为了便于教学，每章之后均有适当数量的思考题和习题。思考题基本涵盖一章的主要知识点，是对该章内容的概括和总结。习题则以相关机械零件和机构的设计及分析计算为主。

参加本书编写工作的有：李建功（第一、七章），刘慧鹏（第二、十章），王宝香（第三、四章），蔡玉强、翁江翔（第五、九章），齐家璋（第六章），张雪雁（第八、十五章），冯立艳、卫静（第十一、十三章），王春雨（第十二、十四章）。本书由李建功担任主编，王春雨、冯立艳担任副主编。

本书承蒙西北工业大学陈国定教授审阅。他提出了许多宝贵意见和建议，对提高本书的编写质量具有很大帮助；机械工业出版社的编审人员在本书的出版过程中做了大量细致的工作，全体编者在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。意见请寄河北省唐山市新华西道46号河北联合大学机械工程学院李建功收，邮编063009。

编 者

目 录

前言		
第一章 绪论	1	
第一节 机器的组成及本课程的研究内容	1	
第二节 机械设计的基本程序和要求	3	
第三节 机械零件的计算准则	4	
第四节 机械零件的磨损和润滑概述	8	
第五节 机械零件的常用材料及钢的热处理	11	
思考题	14	
第二章 平面机构的运动简图和自由度	15	
第一节 平面机构的运动简图	15	
第二节 平面机构的自由度	19	
思考题	22	
习题	22	
第三章 平面连杆机构	24	
第一节 平面连杆机构的类型及应用	24	
第二节 平面四杆机构的运动特性	30	
第三节 平面四杆机构的设计	34	
思考题	36	
习题	36	
第四章 凸轮机构	38	
第一节 凸轮机构的应用和分类	38	
第二节 从动件的运动规律	40	
第三节 凸轮轮廓曲线的设计	43	
第四节 凸轮机构的压力角及基本尺寸的确定	46	
思考题	48	
习题	49	
第五章 间歇运动机构	50	
第一节 棘轮机构	50	
第二节 槽轮机构	53	
思考题	55	
习题	55	
第六章 联接	56	
第一节 概述	56	
第二节 螺纹	57	
第三节 螺纹副的受力分析、效率与自锁	59	
第四节 螺纹联接的类型和预紧	62	
第五节 螺纹联接的强度计算	64	
第六节 设计螺纹联接需注意的问题	71	
第七节 螺旋传动简介	73	
第八节 键、花键和过盈联接	75	
思考题	81	
习题	81	
第七章 带传动和链传动	84	
第一节 带传动的类型、特点和应用	84	
第二节 普通 V 带和 V 带轮	86	
第三节 带传动的工作情况分析	89	
第四节 普通 V 带传动的设计计算	92	
第五节 带传动的张紧装置及安装维护	99	
第六节 链传动概述	100	
第七节 链传动的运动特性与受力分析	104	
第八节 滚子链传动的设计计算	107	
第九节 链传动的正确使用和维护	113	
思考题	114	
习题	114	
第八章 齿轮传动	115	
第一节 概述	115	
第二节 渐开线及渐开线直齿圆柱齿轮	116	
第三节 渐开线齿轮传动的啮合特性	119	
第四节 直齿圆柱齿轮传动的正确啮合和连续传动条件	121	
第五节 渐开线齿轮轮齿的切削及变位齿轮	122	
第六节 齿轮的失效形式和材料	125	
第七节 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	128	
第八节 斜齿圆柱齿轮传动	134	
第九节 直齿锥齿轮传动	139	
第十节 齿轮的结构	143	
思考题	145	
习题	145	
第九章 蜗杆传动	147	

第一节	蜗杆传动的特点和类型	147	第八节	液体摩擦滑动轴承简介	208
第二节	蜗杆传动的主要参数与几何尺寸	148	思考题		210
第三节	蜗杆传动的润滑和效率	152	习题		210
第四节	蜗杆传动的材料和结构	153	第十三章 联轴器和离合器		212
第五节	蜗杆传动的失效形式和受力分析	154	第一节	联轴器	212
第六节	蜗杆传动的承载能力计算	156	第二节	离合器	218
思考题		159	思考题		220
习题		159	习题		221
第十章 轮系		161	第十四章 机械的平衡与调速		222
第一节	轮系的分类	161	第一节	机械的平衡	222
第二节	定轴轮系的传动比计算	162	第二节	机械速度波动的调节	226
第三节	周转轮系的传动比计算	164	思考题		228
第四节	混合轮系的传动比计算	167	习题		228
第五节	轮系的功用	167	第十五章 弹簧		230
思考题		169	第一节	概述	230
习题		169	第二节	圆柱螺旋弹簧的材料、许用应力和结构	231
第十一章 轴		171	第三节	圆柱螺旋压缩(拉伸)弹簧的设计	234
第一节	概述	171	思考题		239
第二节	轴的结构设计	174	习题		239
第三节	轴的强度计算	179	附录		241
思考题		183	附录表 1	普通螺纹的基本尺寸	241
习题		183	附录表 2	六角头螺栓的基本尺寸	242
第十二章 轴承		185	附录表 3	六角头铰制孔用螺栓的基本尺寸	242
第一节	滚动轴承的构造与类型	185	附录表 4	径向滑动轴承的配合及其极限间隙	243
第二节	滚动轴承的代号	188	附录表 5	凸缘联轴器	243
第三节	滚动轴承的寿命计算和静强度计算	190	附录表 6	弹性套柱销联轴器	244
第四节	滚动轴承的组合设计	196	参考文献		245
第五节	滑动轴承的类型、结构和材料	200	读者信息反馈表		
第六节	滑动轴承的润滑	204			
第七节	非液体摩擦滑动轴承的计算	206			

第一章 绪 论

物质生产是人类社会生存发展的基础。机械工业肩负着为人类的物质生产提供各种技术装备的重任。机械工业的生产水平是一个国家现代化程度的重要标志。通过大量设计制造和广泛使用各种各样的先进机器，必将大大促进国民经济的发展，加速我国的社会主义现代化建设。

第一节 机器的组成及本课程的研究内容

一、机器、机构和机械

在人类的劳动生产过程中，发明创造出了各种各样的先进生产工具，例如机床、汽车、起重机、轧钢机、缝纫机和洗衣机等。通常，我们将诸如此类的物体称为“机器”。那么，从机械学科的角度来讲，如何对机器进行定义呢？

经分析可以发现，所谓“机器”，都是我们人类生产制造出来的实物组合，而不是自然界中本来就有的；都是为人类服务的，都能够完成某些（或某项）工作；在完成具体工作时，机器的各个部分都按某种规律作有规则的运动。由此可归纳出机器的三个特征：

- 1) 都是人为的实物组合体。
- 2) 各部分之间都具有确定的相对运动。
- 3) 都能够代替或减轻人类的劳动而完成有用的机械功或进行能量转换。

反过来讲，凡是具备上述三个特征的实物组合体就可称为机器。

如果只具备上述机器的前两个特征，而不具备第三个特征，则称之为机构。常用的机构有齿轮机构（也称为齿轮传动）、连杆机构、凸轮机构、螺旋机构（也称为螺旋传动）、棘轮机构和槽轮机构等。

显然，机构与机器的区别在于是否能够代替或减轻人类的劳动。从结构和运动的角度来看，两者之间并无区别。可以认为机器是由机构组成的，简单机器可以只由一个机构组成，但多数机器往往由若干个机构组成。

例如，图 1-1 所示的单缸内燃机就是由一个曲柄滑块机构（由活塞、连杆、曲柄和气缸组成）、一个凸轮机构（由凸轮、推杆和弹簧组成）和两个齿轮构成的齿轮机构组成的。工作时，燃料在气缸中爆炸，推动活塞往复移动，通过连杆带动曲柄连续转动。同时，通过齿轮机构带动凸轮转动，进而带动固定在推杆端部的气阀

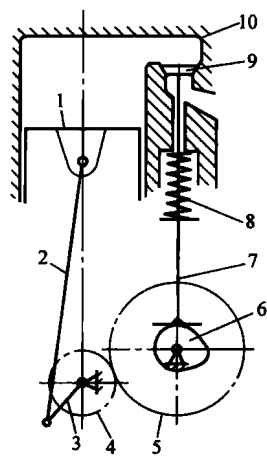


图 1-1 单缸内燃机示意图

- 1—活塞 2—连杆 3—曲柄 4、5—齿轮
6—凸轮 7—推杆 8—弹簧
9—气阀 10—气缸

适时地打开或关闭。

机械是机器和机构的总称。机械的种类繁多，功能各异。按行业划分有运输机械、冶金机械、建筑机械、食品机械、化工机械等。

二、机器的组成

机器的发展经历了一个由简单到复杂的过程。一部现代化的机器中，除了机械系统以外，还常包含电气、润滑、冷却、信号、检测等系统。概括起来，按功能的不同，一部完整的机器主要由五部分组成，如图 1-2 所示。

原动机是驱动整部机器完成预定功能的动力源。一部机器通常只有一个原动机，有些复杂的机器也可能有两个或两个以上的原动机。目前，各种机器中广泛使用的原动机主要有各种形式的电动机和内燃机。工作中它们输出的是回转运动和一定的转矩。

执行机构（也称工作机）是机器中直接完成工作任务的部分。例如轧钢机的轧辊，洗衣机的波轮，起重机的卷筒、吊臂和吊钩等。对于不同类型的机器，由于用途不同，执行机构的运动形式和速度不尽相同。

传动装置是在原动机和执行机构之间转换并传递运动的装置。实际中的机器是多种多样的，其执行机构的运动形式、运动和动力参数也是多种多样的。而原动机的运动形式、运动和动力参数则是有限的。当两者不同时，需要传动装置将原动机的运动转换成执行机构所需要的运动，并传递给执行机构。常用的传动装置有机械传动、液压传动、气动和电动等。其中，机械传动应用最广。

简单的机器通常只有上述三个组成部分。对于能够实现复杂功能的先进机器，除了以上三个部分以外，还会有控制系统和由润滑、照明装置等组成的辅助系统。

从制造的角度来讲，每部机器都由若干个零件组成，也都是以各个零件为基本单元加工制造的。所以说，零件是机器的制造单元。

机械零件分为两大类：一类是在各种类型的机器中经常用到的零件，称为通用零件，如齿轮、带轮、轴、轴承、螺栓等；另一类是只在某种特定类型的机器中才用到的零件，称为专用零件，如内燃机中的曲轴及活塞、汽轮机中的叶片、飞机的螺旋桨等。

此外，把为完成同一使命彼此协同工作的一组零件的组合物称为部件，如滚动轴承、联轴器、减速器等。

在本课程中，机械零件这一术语常用来泛指零件和部件。

在机器和机构中，彼此作相对运动的各个部分称为构件。从运动的角度来看，机器是由若干个构件组成的。构件是机器和机构运动时的最小基本单元，简而言之就是，构件是机构的运动单元。

构件和零件之间既有区别也有联系。两者之间的联系在于构件是由零件组成的。构件可以本身就是一个单一的零件，也可以由多个零件组成。例如，图 1-3 所示为内燃机中的连杆，工作时连杆作为一个整体一起运动，是一个构件。但从构成上来讲，它又是由连杆体、

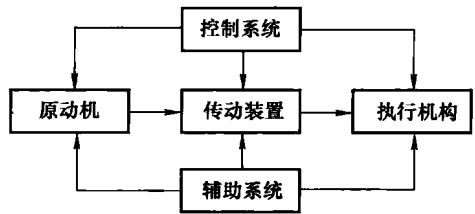


图 1-2 机器的组成

连杆盖、轴瓦、轴套以及联接螺栓等多个零件组成的。

三、本课程的性质、任务和内容

机械设计基础课程主要研究常用机构和通用零件的工作原理、结构特点、基本设计理论和计算方法，是高等学校非机械类各工科专业的一门重要的技术基础课。通过本课程的学习，使学生获得正确使用和维护机械设备的基础知识，初步培养学生运用标准、规范、手册等相关技术资料设计简单机械传动装置的能力，为以后学习有关专业的机械设备课程打下必要的基础。

本课程的具体内容由以下几部分构成：

1) 基础理论部分。包括第一章绪论和第二章平面机构的运动简图和自由度。

2) 常用机构部分。包括第三章平面连杆机构、第四章凸轮机构和第五章间歇运动机构中的棘轮机构和槽轮机构。

3) 联接部分。主要是第六章联接，包括螺纹联接、键联接、花键联接等。

4) 传动部分。包括第六章第七节螺旋传动、第七章带传动和链传动、第八章齿轮传动、第九章蜗杆传动和第十章轮系。

5) 轴系部分。包括第十一章轴、第十二章轴承以及第十三章联轴器和离合器。

6) 其他部分。包括第十四章机械的平衡与调速和第十五章弹簧。

在本课程的学习中，除了掌握各种零件的相关理论和计算方法以外，更要重视零件的材料选择、类型选择、参数选择以及结构设计等内容。材料、类型、参数的选择及结构设计是否合理，直接决定着一个机械零件设计的成败。

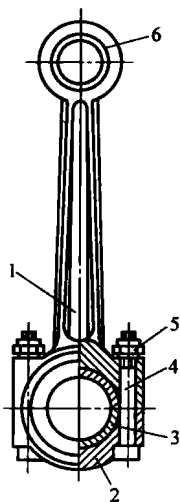


图 1-3 内燃机中的连杆

1—连杆体 2—连杆盖 3—轴瓦
4—螺栓 5—螺母 6—轴套

第二节 机械设计的基本程序和要求

一、机械设计的基本程序

机械设计是指规划和设计实现预期功能的新机械或改进原有机械的性能。

一部新机器，从提出设计任务到形成定型产品，通常需要经过以下几个阶段（图 1-4）。

1) 明确设计任务。根据实际需要确定机器应具有的功能范围和指标，在工作环境、经济性以及寿命等各方面，提出全面的设计要求和设计条件，并形成设计任务书。同时对提出的设计任务进行可行性分析。

2) 方案设计。首先进行机器功能分析，分析清楚应该实现哪些主要功能，多项功能之间有无矛盾，相互之间能否代替等。之后，进行设计方案分析，根据预期的功能，确定机器的工作原理及技术要求。通常应提出多种不同的设计方案，并对每种方案在经济、技术方面进行评价，选出其中最好的作为最终的设计方案。

本阶段是决定整个设计成败的关键。在这一阶段，设计工作中的创新性体现得最为

充分。

3) 技术设计。首先, 通过总体设计确定机器的各主要组成部分以及各部分的总体布置方案, 产生机器的总装配图。之后, 进行零、部件设计, 产生各主要部件的装配图和零件的工作图。同时, 对关键零件进行必要的计算, 形成计算说明书。

4) 试制评价, 定型投产。按技术设计产生的图样试制出样机并进行试验后, 根据试验结果对样机进行全面的评价, 以决定设计方案是否可用。必要时修改设计(甚至重新设计)后, 重新进行试验, 直至达到预期目标为止。对于各方面指标都达到预期的设计, 则可形成定型产品进行正式生产。

设计工作是一个综合的反复实践的过程, 往往需要经过多次修改后, 才能获得比较好的设计结果。这个过程实际上是一个宏观的逐步优化过程。

二、机械设计的基本要求

机械设计一般应满足以下几方面的要求:

- 1) 功能要求。机械产品必须具有设计任务书中规定的功能。这就要求设计时必须正确确定机器的工作原理, 并选用适当的执行机构、传动装置和原动机。必要时, 还需要合理配置控制系统和辅助系统。
- 2) 可靠性要求。在预期的使用期限内, 能够安全可靠地工作, 是对机械产品的基本要求之一。为满足此项要求, 在设计阶段往往需要进行强度、刚度、寿命等方面的计算。
- 3) 经济性要求。机械产品的经济性体现在设计、制造和使用的全过程中。设计制造的经济性主要表现为低成本, 使用中的经济性主要表现为生产效率高, 能源、材料消耗少以及管理、维护费用低等方面。
- 4) 社会性要求。主要是指机械产品不应对人、环境和社会造成不良影响。例如操作要舒适, 要保证操作者的安全, 要符合国家在环境保护方面的法规等。

以上是各种机械都必须满足的基本要求。对于不同的机械, 可能还有一些其他方面的要求。

第三节 机械零件的计算准则

机械零件由于某种原因不能正常工作称为失效。实际机械零件可能的失效形式有很多, 但归结起来, 最为常见的是由于强度、刚度、耐磨性、温度及振动稳定性等方面的原因所引起的失效。同一个机械零件可能产生的失效形式往往有数种。例如, 高速旋转的轴可能会产

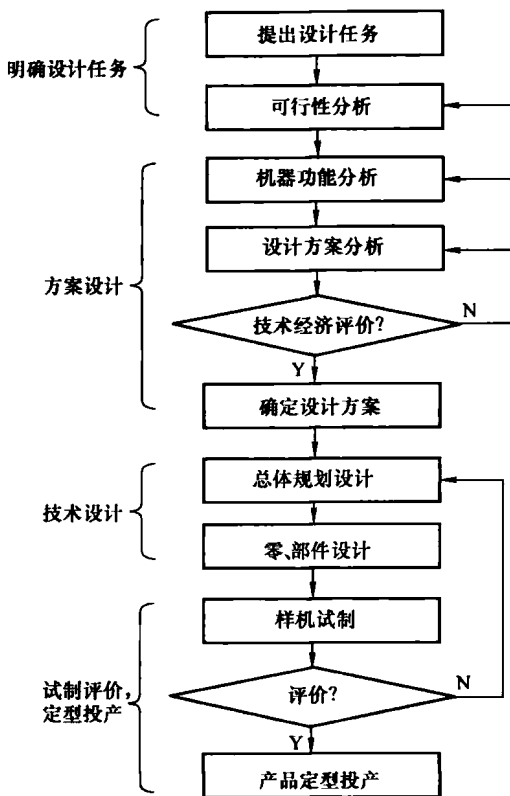


图 1-4 机械设计的基本程序

生断裂、过大的弹性变形以及共振等几种不同的失效形式。

机械零件在一定条件下抵抗失效的能力称为工作能力。用载荷表示的工作能力称为承载能力。为防止发生某种失效而应满足的条件称为机械零件的计算准则。不同失效形式所对应的计算准则各不相同。计算准则是设计机械零件的理论依据。

通常，在保证所设计的零件不发生失效的前提下，希望其尺寸小，质量轻。为此，设计时需要以计算准则为依据进行必要的计算。计算方法（过程）有两种：根据零件可能的失效形式所对应的计算准则，通过计算确定满足该准则的零件尺寸，这样的计算称为设计计算；参照已有实物、图样或根据经验先确定零件尺寸，然后再核算零件尺寸是否满足计算准则，这样的计算称为校核计算。校核计算时，如不满足计算准则，则应修改零件尺寸，重新计算，直到满足计算准则为止。虽然两种计算的过程不同，但目的都是为了防止所设计的零件在将来的工作中发生失效。

设计机械零件时，常用的计算准则主要有强度准则、刚度准则、摩擦学准则等，分述如下。

一、强度准则

强度是指机械零件抵抗破坏（断裂或塑性变形）的能力。强度准则是防止零件发生破坏失效而应满足的条件，也称为强度条件。

工作中机械零件所受的正应力（拉、压、弯曲）和切应力（剪切、扭切），通常都产生在零件材料的较大体积内，往往会导致零件的整体破坏，这种状态下的强度可称为整体强度；而对于工作中接触受压的两个零件，在接触面上产生的表面应力作用下，破坏通常发生在零件的接触面表层，这种状态下的强度可称为表面强度。表面强度分为表面接触强度（两零件之间理论上为点、线接触）和挤压强度（两零件之间理论上为面接触）。

在理想平稳工作条件下零件所受的载荷称为名义载荷。但实际工作中，由于冲击、振动以及运动产生的惯性力等因素的影响，使机器及其零件受到附加载荷。因此，机器在工作中实际受到的载荷通常会大于名义载荷。用载荷系数 K （只考虑工作情况的影响时，则为工作情况系数 K_A ，简称工况系数）计入附加载荷的影响。载荷系数与名义载荷的乘积称为计算载荷，它代表机器或零件实际所受的载荷。

按照是否随时间变化，应力分为两类：不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力；随时间变化的应力称为变应力。

（一）整体强度

1. 强度条件

为了防止零件发生破坏失效，应满足如下条件

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \tau \leq [\tau] \quad (1-1)$$

式中 σ 、 τ ——零件危险截面上的最大正应力和最大切应力，设计中按计算载荷求得；

$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ——零件材料的许用正应力和许用切应力，按式（1-2）计算。

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{S}, \quad [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{S} \quad (1-2)$$

式中 σ_{lim} 、 τ_{lim} ——零件材料的极限正应力和极限切应力；

S ——安全系数。

2. 静强度计算的极限应力

计算许用应力时, 需根据零件材料的种类和应力的性质合理确定极限应力。

零件受静应力时, 需计算其静强度。如静强度不足, 塑性材料零件的可能失效形式是产生塑性变形; 脆性材料零件的可能失效形式是断裂。故有

1) 塑性材料零件, 以材料的屈服强度作为极限应力, 即

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_s, \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_s \quad (1-3)$$

2) 脆性材料零件, 以材料的强度极限作为极限应力, 即

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_b, \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_b \quad (1-4)$$

只受正应力或只受切应力时, 按式 (1-1) 进行强度计算即可。

同时受正应力和切应力时, 需按材料力学中的强度理论计算危险截面上的当量应力 σ_e 。对于塑性材料零件, 按第三或第四强度理论计算, 相应的强度条件为

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

3. 疲劳强度计算的极限应力

零件受变应力时, 可能的失效形式是疲劳破坏, 设计中需计算其疲劳强度。疲劳强度条件与静强度相同, 只是应以材料的疲劳极限作为极限应力。

(1) 循环应力 周期性变化的应力称为循环应力 (图 1-5), 一个变化周期也称为一个应力循环。循环应力有五个参数 (图 1-5c): 最大应力 σ_{max} 、最小应力 σ_{min} 、平均应力 $\sigma_m = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}})/2$ 、应力幅 $\sigma_a = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}})/2$ 和应力比 $r = \sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$, 其中只有两个参数是独立的。

当 $\sigma_{\text{max}} = -\sigma_{\text{min}}$ 时, $r = -1$, 称为对称循环应力 (图 1-5a), 其 $\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{\text{max}} = -\sigma_{\text{min}}$ 。当 $\sigma_{\text{min}} = 0$, $\sigma_{\text{max}} \neq 0$ 时, $r = 0$, 称为脉动循环应力 (图 1-5b), 其 $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{\text{max}}/2$ 。这是在实际中最常见的两种典型的循环应力。而静应力可看作是循环应力的特例, 其 $\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{min}}$, $r = +1$ 。变应力的类型不同, 其相应的疲劳极限也不同。

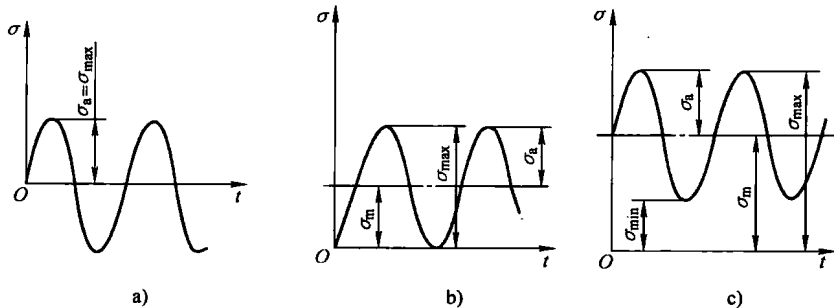


图 1-5 循环应力

(2) 疲劳极限 在应力比为 r 的循环应力作用下, 材料经受 N 次应力循环而不发生疲劳破坏时所能承受的最大应力 (σ_{max} 、 τ_{max}) 称为材料的疲劳极限, 常用 σ_{rN} 、 τ_{rN} 表示。

应力比不同或循环次数不同时, 疲劳极限 σ_{rN} 也不同。在应力比 r 一定时, 表示疲劳极限 σ_{rN} 与循环次数 N 之间关系的曲线称为疲劳曲线。研究表明, 大多数钢的疲劳曲线如图 1-6 所示。

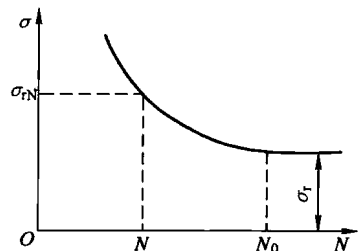


图 1-6 疲劳曲线

由图 1-6 可见, 疲劳极限 σ_{rN} 随循环次数 N 的增大而降低。但是, 当 N 超过某一次数 N_0 时, σ_{rN} 不再减小, 曲线趋于水平, N_0 称为循环基数。以 N_0 为界, 疲劳曲线分为两个区段:

1) 当 $N \geq N_0$ 时, 疲劳曲线为水平直线, 对应的疲劳极限为一定值, 用 σ_r 表示。一般可以认为, 当材料受到的应力不超过 σ_r 时, 则可经受无限次的应力循环而不破坏, 故将 σ_r 称为持久疲劳极限。它是表征材料疲劳强度的重要指标。最典型、最常用的是对称循环与脉动循环应力下的疲劳极限 σ_{-1} 和 σ_0 。

2) 当 $N < N_0$ 时, 不同循环次数 N 所对应的疲劳极限 σ_{rN} 各不相同。为了与 σ_r 相区别, 将此段内的疲劳极限 σ_{rN} 称为有限寿命疲劳极限。

如所设计的零件在预期使用期限内需经受的应力循环次数 $N \geq N_0$, 则应以材料的持久疲劳极限 σ_r 为极限应力。例如当零件所受的应力为对称循环时, 则应取 $\sigma_{lim} = \sigma_{-1}$; 当零件的应力为脉动循环时, 则应取 $\sigma_{lim} = \sigma_0$; 如果 $N < N_0$, 则应以相应的有限寿命疲劳极限 σ_{rN} 为极限应力。

与上述正应力下的各疲劳极限相对应, 切应力下的各疲劳极限分别表示为 τ_r 、 τ_{-1} 、 τ_0 。

(二) 表面接触强度

对于理论上为点、线接触的零件, 在载荷作用下材料发生弹性变形后变为面接触, 此时零件在接触部位产生的应力称为表面接触应力 (简称接触应力)。在接触应力作用下的强度称为表面接触强度。最大接触应力 σ_H 发生在接触面的中心 (或中线) 上, 如图 1-7 所示。

通常情况下, 零件的接触部位是周期性变化的, 这导致接触应力也周期性变化。在接触变应力的反复作用下, 首先在零件表层产生微裂纹, 之后, 裂纹沿着与表面呈锐角的方向扩展, 到达一定深度后又越出零件表面, 最后有小片材料脱落下来, 在零件表面形成小坑 (图 1-7), 这种现象称为疲劳点蚀 (简称点蚀)。点蚀是接触变应力下的失效形式。

防止点蚀应满足的强度条件为

$$\sigma_H \leq [\sigma_H] \quad (1-5)$$

式中 σ_H ——零件的最大接触应力 (MPa), 可根据弹性力学理论计算;

$[\sigma_H]$ ——许用接触应力 (MPa), 按式 (1-6) 计算。

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} \quad (1-6)$$

式中 σ_{Hlim} ——零件材料的接触疲劳极限 (MPa);

S_H ——接触疲劳强度的安全系数。

(三) 挤压强度

理论上为面接触的两个零件, 承载时在接触面上受到的压应力称为挤压应力, 用 σ_p 表示。挤压应力作用下的强度称为挤压强度。挤压强度不足时的失效形式为压溃 (表面断裂或表面塑性变形)。

防止压溃应满足的强度条件为

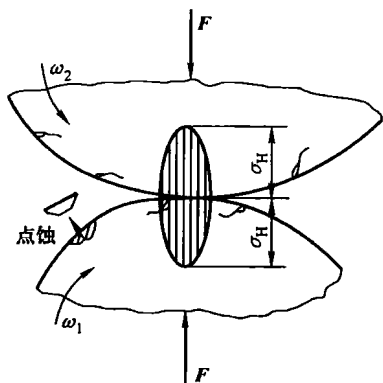


图 1-7 接触应力与疲劳点蚀

$$\sigma_p \leq [\sigma_p] \quad (1-7)$$

式中 σ_p ——零件的挤压应力 (MPa);

$[\sigma_p]$ ——许用挤压应力 (MPa)。

当接触面为曲面时, 挤压应力在接触面上的分布往往比较复杂。通常, 按接触面在载荷方向的投影面积计算挤压应力 σ_p 。

二、刚度准则

刚度是指机械零件抵抗弹性变形的能力。如果机器中的某些零件刚度不足, 工作时将会产生过大的弹性变形, 从而影响机器的正常工作。例如机床主轴刚度不足将会影响被加工工件的精度。因此, 对于某些零件, 在设计时需要进行刚度计算, 应满足的刚度条件为

$$x \leq [x] \quad (1-8)$$

式中 x ——实际变形量, 可通过计算或实际测量确定其大小, 但在设计阶段只能由计算确定。

根据受载形式的不同, x 可以是拉压变形 ΔL 、挠度 y 、转角 θ 、扭转角 φ 等;

$[x]$ ——许用变形量, 是机器正常工作所允许的最大变形量。

提高零件刚度的主要措施有: 减小力臂和支点距离、增加辅助支承、选择合理的截面形状、加大截面积以及采用加强筋等。

三、摩擦学准则 (也称耐磨性准则)

在滑动摩擦下工作的零件, 常因过度磨损而失效。由于影响磨损的因素很多且比较复杂, 因此, 到目前为止尚无完善的磨损计算方法。通常采用条件性计算, 通过限制影响磨损的主要因素 (压强 p 、滑动速度 v 和 pv 值) 来防止产生过大的磨损。

滑动速度低, 载荷大时, 只需限制压强 p 不超过许用压强 $[p]$, 即

$$p \leq [p] \quad (1-9)$$

滑动速度较高时, 往往由于摩擦生热, 温度过高 (使润滑油膜破坏), 导致润滑失效。因此, 除了限制压强以外, 还需限制压强与滑动速度的乘积 pv (此乘积越大, 在单位时间内, 单位接触面上的摩擦功耗越大, 温升越大) 不超过许用值 $[pv]$, 即

$$pv \leq [pv] \quad (1-10)$$

高速时, 往往由于滑动速度高而引起过快过大的磨损。所以, 还需要限制滑动速度 v 不超过许用滑动速度 $[v]$, 即

$$v \leq [v] \quad (1-11)$$

第四节 机械零件的磨损和润滑概述

摩擦会使机械的效率降低, 温度升高。机械零件工作表面的磨损会使配合间隙增大, 振动加剧, 使用寿命缩短。据估计, 全世界每年消耗的能量约有 1/3 用于克服摩擦, 在报废的机械零件中, 大约有 80% 是由于过度磨损造成的。可见, 设法减小机械中的摩擦和磨损是很有意义的。润滑是减小摩擦和磨损最有效、最常用的方法。

一、磨损

磨损是指摩擦表面的材料在摩擦过程中不断损失的现象。

1. 机械零件的磨损过程

如图 1-8 所示, 在正常情况下, 机械零件的磨损过程大致分为三个阶段:

(1) 磨合磨损阶段 这个阶段为机械零件的初期磨损, 新的摩擦表面只是微观凸峰接触, 接触面积很小, 压强较大, 故磨损量增加较快。

(2) 稳定磨损阶段 经过磨合磨损以后, 表面的微观凸峰被磨平, 实际接触面积增大, 压强减小, 磨损的速度下降且趋于稳定。

(3) 剧烈磨损阶段 经过长时间的稳定磨损, 磨损量累积到一定程度, 两摩擦表面之间的间隙增大, 机器工作时的振动加剧, 磨损量急剧增加, 很快导致零件不能工作而报废。

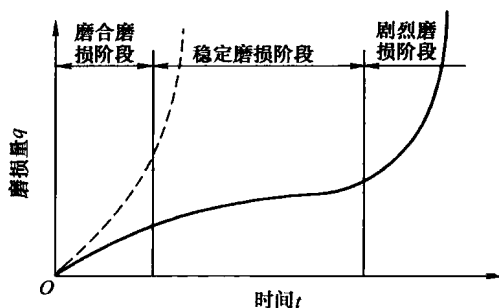


图 1-8 机械零件的磨损过程

上述三个阶段实际并无明显的界限。若磨合阶段的压力过大, 或速度过高, 或润滑不良, 则可能不经稳定磨损而直接进入剧烈磨损阶段 (如图 1-8 中虚线所示)。为了延长稳定磨损阶段, 延长机械零件的使用寿命, 经磨合后应进行清洗, 并换上清洁的润滑油。

2. 磨损的基本类型

按磨损的机理不同, 机械零件的磨损有以下四种基本类型:

(1) 粘着磨损 承受很大载荷时, 两摩擦表面的材料发生粘着, 随着两表面的相对运动, 较软的材料被撕下来, 粘到另一表面上, 这样形成的磨损即为粘着磨损。

(2) 磨粒磨损 是由进入摩擦表面之间的硬颗粒或表面上的硬突起物造成的磨损。

(3) 表面疲劳磨损 实际上就是疲劳点蚀。

(4) 腐蚀磨损 在摩擦过程中伴有化学或电化学反应时, 造成摩擦表面的材料损失, 这样形成的磨损即为腐蚀磨损。

3. 减小磨损的常用措施

1) 设计时合理选择摩擦零件的材料。例如, 两摩擦表面选择性能差异比较大的材料, 可有效减小发生粘着磨损的可能。

2) 在使用中进行可靠的润滑。

3) 合理提高摩擦表面的精度和质量。例如, 表面粗糙度值越小, 表面硬度越高, 则产生的磨损就越小。

4) 进行可靠的密封等。

二、润滑

(一) 润滑状态的分类

机械中摩擦表面的润滑有以下三种状态:

(1) 流体润滑 (或流体摩擦) 这种润滑状态下, 两摩擦表面被一层具有压力的流体 (通常是润滑油) 完全隔开, 摩擦性质取决于流体内部分子之间的摩擦, 摩擦阻力很小, 几乎不产生磨损, 是一种理想的润滑状态。

(2) 边界润滑 (或边界摩擦) 靠吸附在摩擦表面的一薄层润滑油 (称为边界膜) 起

润滑作用，由于边界膜没有压力，故两摩擦表面的材料将直接接触而产生磨损。

(3) 混合润滑（或混合摩擦） 这种润滑状态下，有边界膜存在，同时两摩擦表面之间的润滑油也有压力，但压力不够大，不足以将两表面完全隔开，故仍会产生磨损。由于润滑油有压力，使得这种状态下的摩擦和磨损比边界润滑要小得多。

有时也将边界润滑和混合润滑统称为非液体润滑（或非液体摩擦）。

(二) 润滑剂

润滑除了能够减小摩擦和磨损以外，还具有防锈、降温、缓冲吸振等作用。为了获得良好的润滑效果，需要合理选择润滑剂和润滑方法。

按物质形态的不同，润滑剂分为液体润滑剂（润滑油、水和液态金属等）、半固体润滑剂（主要是润滑脂）、固体润滑剂（石墨、二硫化钼等）和气体润滑剂（空气等）。一般机器中常用的是润滑油和润滑脂。以下简要介绍润滑油和润滑脂的主要性能指标。

1. 润滑油及其性能

目前应用的润滑油主要是矿物油。常用的润滑油有多种类型，例如全损耗系统用油、工业齿轮油、汽轮机油、汽油机油等。采用润滑油润滑具有以下特点：摩擦阻力小，润滑可靠，散热效果好，但密封比较困难。常用于高速、高温的场合。

润滑油的性能指标主要有粘度、油性、闪点、燃点和倾点等。

(1) 粘度 粘度用于表征润滑油内部分子之间摩擦阻力的大小。粘度越大，润滑油的内摩擦阻力就越大，流动性越差。粘度是润滑油最重要的性能指标，是选择润滑油的主要依据。

粘度的大小常用动力粘度 η 和运动粘度 ν 表示。

1) 动力粘度（简称粘度） η 。现利用图 1-9 来说明粘度的物理意义。设相互平行的两个平板 A 与 B 之间充满润滑油，让 B 板静止不动，A 板以速度 v 沿两板平行的方向移动。在润滑油内摩擦力的作用下，两板之间各油层的速度 u 呈直线分布。研究表明，油层之间的内摩擦切应力 τ 与油层的速度梯度 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 成正比，即

$$\tau = -\eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1-12)$$

比例系数 η 即为润滑油的动力粘度，其国际单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；“-”号表示油层的速度 u 随 y 的增大而减小。

2) 运动粘度 ν 。运动粘度 ν 是指润滑油的动力粘度 η 与同温度下该油品的密度 ρ 之比，即 $\nu = \eta/\rho$ ，其国际单位为 m^2/s ，这个单位太大，不便于使用，工程上常用的单位是 mm^2/s 。

我国润滑油牌号中末尾的数字即表示润滑油在 40°C 下的运动粘度平均值。例如牌号为“L—AN68”的全损耗系统用油，其在 40°C 时的运动粘度 $\nu = 68\text{mm}^2/\text{s}$ 。

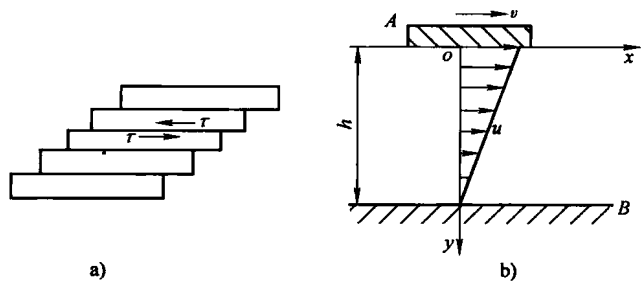


图 1-9 润滑油的流动模型

(2) 油性 油性用于表征润滑油吸附于摩擦表面形成边界膜的能力。油性越大, 则吸附能力就越强, 越容易形成边界膜。

(3) 闪点和燃点 闪点是指润滑油蒸气在火焰下闪烁时的最低温度; 燃点是指闪烁持续 5s 以上的最低温度。这两个指标用于表征润滑油耐高温的能力。

(4) 倾点 倾点是指润滑油在规定条件下不能自由流动时的最高温度。用于表征润滑油耐低温的能力。

2. 润滑脂及其性能

润滑脂是由润滑油和稠化剂混合而成的膏状物质, 俗称黄油。按照调制润滑脂时采用的稠化剂不同, 润滑脂分为钙基润滑脂、钠基润滑脂、铝基润滑脂和锂基润滑脂等。钙基和铝基润滑脂的抗水性好, 但耐热性较差; 钠基润滑脂则与之相反; 锂基润滑脂有良好的抗水性、耐热性, 故应用较广。

润滑脂的承载能力大, 不易流失, 便于密封和维护, 且能防止灰尘、潮气等侵入。但转速较高时, 功率损失较大, 故主要用于速度较低の場合。

润滑脂的主要性能指标有锥入度和滴点等。

(1) 锥入度 锥入度用于表征润滑脂的稀稠程度。锥入度越小, 润滑脂越稠, 其承载能力越高; 反之, 润滑脂的流动性越强, 承载能力越低。

(2) 滴点 滴点是指在规定的加热条件下, 润滑脂从标准测量杯的孔口滴下第一滴液体时的温度。用于表征润滑脂的耐高温能力。

常用润滑油和润滑脂的类型、牌号、性能及应用, 请参阅《机械设计手册》。

第五节 机械零件的常用材料及钢的热处理

一、机械零件的常用材料

机械零件的常用材料有钢铁材料(钢和铸铁)、非铁金属材料、非金属和复合材料等, 其中以钢铁材料应用最广。

(一) 钢铁材料

常用的钢铁材料有碳素钢和合金钢、铸钢和铸铁。

1. 碳素钢和合金钢

碳素钢的产量大, 价格低, 应用最广泛, 是一般机械零件的首选材料。碳素钢又分为碳素结构钢和优质碳素结构钢。

碳素结构钢主要用于受力不大, 且基本上只承受静载荷的零件。其中以 Q235、Q275 等较为常用。“Q”是碳素结构钢的代号, 数字表示钢的屈服强度 σ_s , 例如 Q235 钢的 $\sigma_s = 235\text{MPa}$ 。

优质碳素结构钢的性能优于碳素结构钢。主要用于受力较大, 而且承受变应力或冲击载荷的零件。其中以 45 钢最常用。牌号数字表示钢中碳的质量分数, 例如, 45 钢中碳的平均质量分数为 0.45%。

合金钢中都含有一种或几种合金元素。不同的合金元素, 使钢得以改善的性能各不相同。例如铬可以提高钢的硬度、高温强度和耐蚀性; 锰可以提高钢的强度、韧性和耐磨性;