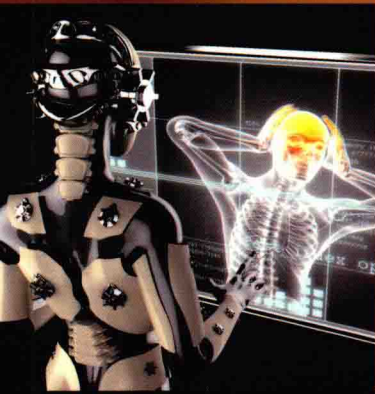




普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十三五”规划教材



# Fundamentals of Mechanical Design

## 机械设计基础

第③版

主 编 ◎ 朱东华 李乃根 王秀叶  
副主编 ◎ 姜 雪 赵 娥

3



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”  
普通高等教育“十三五”



Fundamentals of Mechanical Design

# 机械设计基础

第3版

主 编 朱东华 李乃根 王秀叶

副 编 姜 雪 赵 娥

参 编 刘金松 张学军

主 审 吴宗泽



机械工业出版社

本书根据教育部高等学校机械基础课程教学指导委员会关于“机械设计基础”课程教学基本要求的精神进行了修订。在修订中,我们根据各高校意见对部分章节顺序进行了调整,对基本理论及相关公式进行了简化,同时,增加了部分例题。本书力求做到概念把握准确,叙述深入浅出,主、次与薄、厚处理得当,辞章规范;强调“能比较”“能选择”“能设计”的基本能力的培养,并在启迪学生现代机构设计的思维和理念、提高读解能力和设计能力方面有所突破。

本书的主要内容包括:机械零件设计概论、平面机构、凸轮机构、带传动与链传动、齿轮传动、蜗杆传动、螺纹连接、滑动轴承和离合器等。

本书适合于70学时教学。

本书可供高等院校本科近机类、非机类各专业以及专科机械类专业学习与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/朱东华,李乃根,王秀叶主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2017.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-56962-6

I. ①机… II. ①朱… ②李… ③王… 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(2017)第119127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 安桂芳 任正一

责任校对:杜雨霏 封面设计:张静

责任印制:孙炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2017年8月第3版第1次印刷

184mm×260mm·16.25印张·393千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56962-6

定价:39.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

# 第3版前言

《机械设计基础》是近机类专业必修的一门专业技术基础课，它在整个教学流程中起着承上启下、举足轻重的作用。本课程主要研究组成机械的一些通用零部件、常用机构等机械传动装置的工作原理、结构特点及基本的设计理论和方法。通过本课程的学习，使近机类学生能够认识并了解机械，分析和掌握机械设计的基本方法，并初步具备分析和设计零部件的能力。

## 本次修订的主要特点：

1) 根据国家机械工业发展的新动向、新策略，以开阔视野、扩展思路、增强工程实践意识为主要抓手，引入创新思维与实践内容，注重提高学生的创新意识和分析问题、解决问题的能力。

2) 在学生掌握机械设计共性规律和基本方法的前提下，进一步淡化理论演绎、简化公式推导，力争做到“由繁变简”“由厚变薄”。

3) 对多媒体课件进行了重新整合，构筑了一种虚拟实际场景的教学氛围，进一步提高了本书的“可读性”和“自学性”。

4) 进一步强调“能比较、能选择、能设计”的基本原则，为学习后续的专业课程和新的技术学科打下坚实的基础。

5) 对照最新国家标准进行了有针对性的修订。

参加本次修订工作的有：朱东华（第一、七、八章）、李乃根（第五、十、十二、十五、十六章）、王秀叶（第二、三、六、九、十四章）、姜雪（第四、十三章、多媒体课件编辑制作之一）、赵娥（第十一、十七章、多媒体课件编辑制作之二）。张学军负责本书的校对、添色及课件中课程设计指导部分的修订，刘金松负责本书各章节的汇总及课件中专业用语的英译汉修订。

本书由朱东华、李乃根、王秀叶担任主编，姜雪、赵娥担任副主编，张学军、刘金松参编；由清华大学吴宗泽教授担任主审。在此，谨对本书主审以及使用单位提出的宝贵意见和建议表示衷心的感谢！

限于编者水平，修订后的教材难免还存在错误与不足，再次希望广大读者给予斧正。

编者

2017年3月

## 第2版前言

本书是在第1版的基础上,根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材的选题与编写要求和国家教育部课程指导委员会《高等工科大学机械设计基础课程教学基本要求》的精神,以及多年来各高校使用的实践,重新整合、修订而成的。这次修订力求做到:

1) 体现教材整体知识构架的科学性、系统性和新颖性,使之进一步适应教学改革和课程建设的发展需要。

2) 贯彻概念准确、章节连贯、删繁就简、由浅入深的原则,对部分章节及内容进行了必要的调整与删减。

3) 配置了辅导用光盘,其中有电子教案、课程学习指导、课程设计指导、中英文技术术语对照等内容,便于学生自学、复习与练习。

4) 采用了国家最新标准规定的名词术语和符号。

参加本次修订的有朱东华(第一、七、八章)、樊智敏(第五、六、十一章)、牛玲(第三、十二、十三章)、李乃根(第十、十五、十六章)、王秀叶(第二、九、十四章)、姜雪(第四章)、赵娥(第十七章)。参加光盘编辑、制作的有:姜雪、赵娥、朱东华、宋宝玉、张锋。

本书由朱东华、樊智敏任主编,牛玲、李乃根、王秀叶任副主编,姜雪、赵娥参编。哈尔滨工业大学陈铁鸣教授、宋宝玉教授担任主审,他们对本书的修订工作提出了许多宝贵的意见和建议。在此,对陈铁鸣教授、宋宝玉教授表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免有错误和不足,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2006年11月

# 第 1 版前言

本规划教材是在满足国家教育部 2002 年颁发的“高等学校机电专业机械设计基础课程”教学基本要求的前提下,结合近几年来高等院校机械设计基础课程教学改革的经验编写而成的。本教材的主要特色为:

1) 根据全国高校教学指导委员会关于机械设计基础课程的教学基本要求的精神,对教材中传动部分的内容进行了新的整合和删减,同时增加了“传动系统方案设计与创新设计”等新的章节。对基本理论及相关公式也进行了简化,并略去了以往繁琐的论证和推导。本书更加强调对学生“能比较”“能选择”“能设计”的基本能力的培养。

2) 本书力求做到概念把握准确、叙述深入浅出、主次分明、内容适量、辞章规范、语句流畅,以体现较强的“可读性”和“可教性”。

3) 本书充分重视对新技术、新结构、新设计方法等新的知识点的引入,力求在启迪学生现代机构设计的思维和理念、提高读解能力和设计能力方面有所突破。

4) 此外,本书尽量引用最新标准和规范,采用国家标准规定的名词术语和符号。

参加本书编写的人员有:朱东华(第一、六、七、十七章)、樊智敏(第二、五、十三章)、牛玲(第四、十、十一章)、李乃根(第十二、十五、十六章)、王秀叶(第三、八、十四章)、姜雪(第九章)。

本书由朱东华、樊智敏任主编,牛玲、李乃根、王秀叶任副主编,姜雪参编。

本书承哈尔滨工业大学陈铁鸣教授精心审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,编者谨此表示衷心的感谢。

限于编者的水平和时间,书中定有缺点和错误存在,谨望广大读者批评指正。

编者

2002 年 11 月

# 目 录

第 3 版前言	
第 2 版前言	
第 1 版前言	

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 本课程研究的对象和任务 .....	1
第二节 本课程在教学中的地位与展望 .....	2
第三节 课程的内容体系和基本要求 .....	3
思考题 .....	4
<b>第二章 平面机构</b> .....	5
第一节 平面机构的运动简图及其自由度 .....	5
第二节 平面连杆机构的类型及应用 .....	10
第三节 平面四杆机构存在曲柄的条件及 基本特性 .....	15
第四节 平面四杆机构的设计 .....	18
思考题 .....	22
习题 .....	23
<b>第三章 凸轮机构</b> .....	26
第一节 凸轮机构的应用和分类 .....	26
第二节 从动件的常用运动规律 .....	28
第三节 凸轮机构的压力角和基圆半径的 选择 .....	32
第四节 图解法设计凸轮轮廓 .....	34
第五节 解析法设计凸轮轮廓 .....	38
思考题 .....	40
习题 .....	40
<b>第四章 间歇运动机构</b> .....	41
第一节 棘轮机构 .....	41
第二节 槽轮机构 .....	44
思考题 .....	46
习题 .....	46
<b>第五章 机械零件设计概论</b> .....	47
第一节 机械零件的强度及设计准则 .....	47

第二节 机械零件的常用材料及其选择 .....	49
第三节 机械零件的结构工艺性和标准化 .....	54
思考题 .....	55
<b>第六章 带传动与链传动</b> .....	56
第一节 带传动的类型和特点 .....	56
第二节 带传动的受力分析 .....	59
第三节 V 带传动的设计 .....	63
第四节 V 带轮设计及 V 带传动的维护 .....	69
第五节 同步带传动简介 .....	71
第六节 链传动简介 .....	71
思考题 .....	73
习题 .....	73
<b>第七章 齿轮传动</b> .....	74
第一节 齿轮传动的特点和类型 .....	74
第二节 齿廓实现定角速比的条件 .....	75
第三节 渐开线齿廓 .....	76
第四节 齿轮各部分名称及渐开线标准 齿轮的基本尺寸 .....	78
第五节 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....	80
第六节 渐开线齿轮的切齿原理及根切与 变位 .....	82
第七节 齿轮传动的精度 .....	86
第八节 齿轮的失效形式和设计准则 .....	87
第九节 齿轮材料与热处理方法 .....	89
第十节 直齿圆柱齿轮的强度计算 .....	90
第十一节 斜齿圆柱齿轮传动 .....	96
第十二节 锥齿轮传动 .....	101
第十三节 齿轮的结构设计 .....	104
第十四节 齿轮传动的润滑方式 .....	105
思考题 .....	106
习题 .....	107
<b>第八章 蜗杆传动</b> .....	108
第一节 蜗杆传动的特点和类型 .....	108
第二节 普通圆柱蜗杆传动的主要参数和 几何尺寸 .....	110

第三节 蜗杆传动的失效形式、设计准则 和材料选择 .....	112	第四节 单个螺栓的受力和强度 计算 .....	183
第四节 普通圆柱蜗杆的强度计算 .....	113	第五节 螺栓组连接的设计 .....	189
第五节 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡 计算 .....	115	第六节 螺旋传动 .....	191
第六节 蜗杆和蜗轮的结构 .....	118	思考题 .....	194
思考题 .....	120	习题 .....	194
习题 .....	120	<b>第十三章 轴及轴毂连接</b> .....	196
<b>第九章 轮系</b> .....	122	第一节 轴的分类和材料 .....	196
第一节 轮系的分类及应用 .....	122	第二节 轴的结构设计 .....	199
第二节 定轴轮系及其传动比 .....	124	第三节 轴的设计计算 .....	202
第三节 周转轮系及其传动比 .....	126	第四节 轴毂连接 .....	205
第四节 复合轮系及其传动比 .....	129	思考题 .....	210
第五节 几种特殊行星轮系传动简介 .....	129	习题 .....	211
思考题 .....	132	<b>第十四章 联轴器和离合器</b> .....	212
习题 .....	132	第一节 联轴器 .....	212
<b>第十章 滚动轴承</b> .....	134	第二节 离合器 .....	217
第一节 滚动轴承的类型和代号 .....	134	思考题 .....	220
第二节 滚动轴承的选择计算 .....	140	习题 .....	220
第三节 滚动轴承的组合设计 .....	147	<b>第十五章 弹簧</b> .....	221
第四节 滚动轴承的润滑和密封 .....	152	第一节 弹簧的功用和类型 .....	221
思考题 .....	154	第二节 圆柱螺旋弹簧的材料和许用 应力 .....	222
习题 .....	155	第三节 圆柱螺旋弹簧的设计 .....	224
<b>第十一章 滑动轴承</b> .....	156	思考题 .....	230
第一节 摩擦状态 .....	156	习题 .....	230
第二节 润滑剂和润滑装置 .....	157	<b>第十六章 机械动力学</b> .....	231
第三节 滑动轴承的结构形式 .....	160	第一节 机械速度波动的调节 .....	231
第四节 轴瓦及轴承衬材料 .....	161	第二节 回转件的平衡 .....	234
第五节 非液体摩擦滑动轴承的设计 计算 .....	164	思考题 .....	238
第六节 液体动压滑动轴承简介* .....	166	习题 .....	238
第七节 静压轴承与空气轴承简介* .....	168	<b>第十七章 创新设计与方案设计</b> .....	239
思考题 .....	169	第一节 创新设计概述 .....	239
习题 .....	170	第二节 机械传动方案设计的一般原则 .....	243
<b>第十二章 螺纹连接与螺旋传动</b> .....	171	第三节 方案评价与决策 .....	246
第一节 螺纹概述 .....	171	思考题 .....	251
第二节 螺纹连接的基本类型和标准 连接件 .....	177	习题 .....	251
第三节 螺纹连接的预紧和防松 .....	180	<b>参考文献</b> .....	252



## 绪 论

### 第一节 本课程研究的对象和任务

机械是减轻或替代体力劳动、提高生产率的重要辅助工具，是人类在长期的生产实践中不断地创造与发展起来的。在当今，机械的设计水平和机械现代化的程度已成为衡量一个国家工业发展水平的重要标志。

机械是机器和机构的总称。在机械系统中，将其他形式的能量转换为机械能的机器称为原动机，如内燃机、电动机等；利用机械能去转换或传递能量的机器称为工作机，如发动机（机械能转换为电能）、起重机（传递物料）、金属切削机床（使物料变形）等都属于工作机。机器一般包含动力部分、传动部分、控制部分和执行部分等四个基本组成部分。动力部分可采用电力、热力、风力和液力等作为动力源，其中以利用电力和热力作为原动机动力源的最为广泛。传动部分和执行部分由各种机构组成，是机器的主体。控制部分包括各种控制机构、电器装置、计算机和液压、气压控制系统等。

图 1-1 所示为专用装配机器人，它由机械臂 1（大臂、小臂）、机械手 2、气动装置 3、电气装置 4 和计算机控制系统 5 组成。在计算机控制系统的指令下，大臂、小臂可进行有规

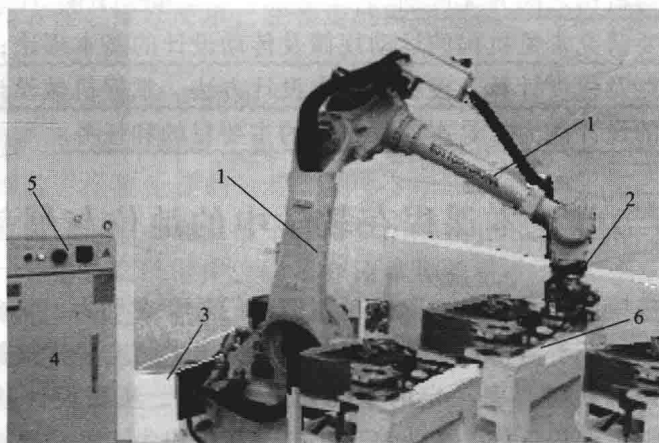


图 1-1 专用装配机器人

1—机械臂 2—机械手 3—气动装置 4—电气装置 5—计算机控制系统 6—汽车涡流增压部件

律的运动,机械手夹持着待装配的微器件可在三维空间中不断地变换角度对某一型号的汽车涡流增压部件6进行装配。在这部机器中,机械手和机械臂是传递运动和执行任务的装置,是机器的主体部分,气动装置和电气装置提供动力,计算机控制系统则提供全程控制指令。

图1-2所示为单缸内燃机。图中活塞3、连杆2、曲轴1和气缸体10组成曲柄滑块机构,将活塞的直线运动变为曲轴的连续转动;凸轮7、顶杆6和气缸体10组成凸轮机构,将凸轮轴的连续转动变为顶杆6、气门4有规律的摆动和直线移动;曲轴上的齿轮12和带轮5与气缸体10分别组成齿轮机构和带轮机构。所以,单缸内燃机的主体部分是由曲柄滑块机构、凸轮机构、齿轮机构和带轮机构等若干个机构组成的。

从上述两例可以看出,虽然机器的构造、用途和性能有所不同,但都具有以下几个相同的功能。

- 1) 是许多人为实物的组合。
- 2) 各实物之间具有确定的相对运动。
- 3) 能完成有用的机械功或转换机械能。

凡具有上述三个功能的实物组合体称为机器;其中,诸多具有各自特定功能的制造单元体称为零件,如轴、齿轮、带轮等通用零件和气缸体、活塞、气门、曲轴、空气过滤器等专用零件;诸多具有各自特定运动的运动单元体称为构件,它可以是单个零件,也可以是多个零件,如单个的键、轴、齿轮组合在一起称为齿轮构件;诸多以一定的连接方式组成的构件系统称为机构,如两个齿轮构件相互啮合,各自具有确定的相对运动,传递运动和力,称为齿轮机构。机器中最常用的机构有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系和间歇运动机构等,连接各个机构的固定构件称为机架(如气缸体)。机构与机器的区别在于:机构只满足上述三个功能的前两项功能。但在研究机构的运动和受力情况时,机器与机构之间并无区别。

机械设计基础主要研究常见机构的运动规律及传动设计的基本理论;研究各类通用零件的工作原理、结构特点及强度计算、校核等基本设计方法。掌握机械设计的基本知识和具备一定的通用机械零件的设计能力,是本课程学习的主要目的和任务。

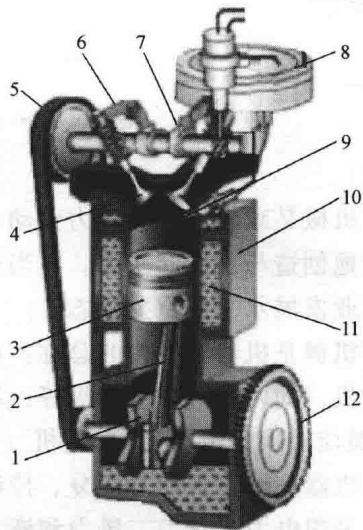


图1-2 单缸内燃机

- 1—曲轴 2—连杆 3—活塞 4—气门  
5—带轮 6—顶杆 7—凸轮  
8—空气过滤器 9—喷油嘴  
10—气缸体 11—冷却水道 12—齿轮

## 第二节 本课程在教学中的地位与展望

随着机械化生产规模的日益扩大,除机械制造部门外,在动力、采矿、冶金、石油、化工、土建、轻纺和食品工业等各部门工作的工程技术人员,将会经常接触到各种类型的通用和专用机械,他们应当对机械具备一定的基础知识。因此,机械设计基础同机械制图、电工、电子学和工程力学等课程一样,成为高等工科院校近机类、非机类专业重要的技术基础课。它将为这些相关专业的学生学习专业机械设备课程提供必要的理论基础,使其在了解各种机械的传动原理、设备的正确使用和维护及设备的故障分析等方面获得必要的基本知识。

通过本课程的学习和课程设计实践,可培养学生初步具备运用手册设计机械传动装置和简单机器的能力,为日后从事技术改造与创新设计创造条件。

机械设计基础是许多理论和实际知识的综合运用,是一门理论性和实践性很强的课程。本课程的先修课程主要有机械制图、工程力学、金属工艺学等课程。只有在学习和掌握了这些主要的先修课程基本知识的基础上才能进入本课程的学习。此外,考虑到许多近代机械设备中包含复杂的动力系统和控制系统,各相关专业还应当了解液压和气压传动、电子技术和计算机等有关知识。

面对全球工业转型热潮以及新技术形态的挑战,工业化和信息化的深度融合开始成为世界各国在新一轮产业革命中积极抢占的制高点。国家实施“中国制造2025”战略规划,是推动中国制造业从大国向强国转变的第一步,目前国企和民企各大制造业都在为增强国际竞争力而加速实施机械化、自动化、信息化的深度融合。以智能制造为切入点,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,将对实现中国经济的再度腾飞产生深远的影响。可以预计,在21世纪,机械设计这门学科将创新出更多、更先进的设计方法和设计软件,并在我国智能制造的高速发展中发挥越来越大的作用。

### 第三节 课程的内容体系和基本要求

本课程的内容体系主要包含三个方面:一是各类常见机构的运动分析、动力分析、机构的图解法设计和解析法设计,以及各类通用零件的失效形式、设计准则、受力分析、强度计算、校核和结构设计等方面的基本内容;二是提高通用机械的运动精度、工作效率、可靠性以及各类零部件的强度、寿命的方法与措施方面的拓展内容;三是有关各类设计方案的选择与比较,以及现代设计方法方面的创新内容。要求学生在重点掌握基本内容的基础上,熟悉拓展内容,了解创新内容,初步具备设计和分析基本机构、设计简单机械和普通机械传动装置的能力。

设计的机械应满足的基本要求是:实现预期功能。在满足预期功能的前提下,还应保证其性能好、造型美、效率高、成本低、操作方便、维修简单,在预定的寿命期限内安全可靠等。

一部机器的诞生,从某种需求到萌生设计念头,再经过调研、论证、设计、校核、制造、鉴定一直到产品定型,是一个复杂、细致、反复论证的过程。图1-3所示为机械设计制造的一般程序框图。虚线框中,列举了现代企业中常用的一些设计方法;实线框中,除了介绍常见的机械设计过程外,还对能否通过评估验收、市场认同等进行了反复的研判,它反映出注重市场调节、信奉客户至上的现代设计理念。

设计人员必须善于把设计构思、设计方案用语言、文字和图形方式传递给主管者和协作者,以获得认同和批准。除具体技术问题外,还要论证以下问题:

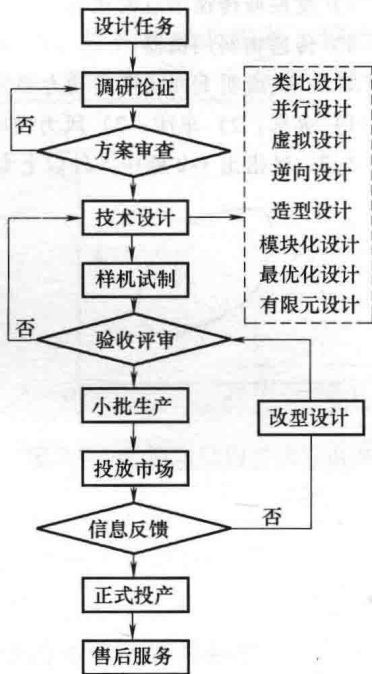


图 1-3 机械设计制造的一般程序框图

- 1) 此设计是否确为市场所需。
- 2) 功能与造型是否有特色。
- 3) 能否与同类产品竞争。
- 4) 制造成本是否经济。
- 5) 维修保养是否方便。
- 6) 社会效益与经济效益如何。

设计人员应富有创新精神,应从实际出发,深入调查研究,广泛听取工艺人员、销售人员的意见。在设计、加工、安装和调试过程中应及时发现问题、反复修改,以期取得最佳的效果。应结合书本知识对一些典型产品进行类比分析,从中积累设计经验。不能只顾强度计算,忽略结构设计;只顾内在质量的物质功能作用,忽略外观质量的精神功能作用;只顾产品设计,忽略市场信息反馈;只顾书本知识,忽略现场实际。除此之外,在学习、掌握传统设计方法的基础上,还应不断地学习和了解国内外新的设计方法和创新理念,应不断地拓宽自己的知识面,不断地更新知识。只有这样,才能逐步提高自己的综合设计能力,不断地创新设计出质量可靠、造型美观、性价比高、用户喜闻乐见的名牌产品。

## 思 考 题

1-1 对下列机器各举出两个实例:

- 1) 将机械能变换为其他形式能量的机器。
- 2) 将其他形式的能量变换为机械能的机器。
- 3) 变换或传递信息的机器。
- 4) 传递物料的机器。

1-2 试说明下列机器的动力部分和执行部分:

- 1) 火车; 2) 车床; 3) 风力发电机; 4) 洗衣机; 5) 摩托车。

1-3 试指出 1-2 题中 5 种以上专用零件和通用零件。

# 平面机构

## 第一节 平面机构的运动简图及其自由度

机构是有确定相对运动的构件的组合，而不是无条件的任意组合。所以，讨论机构在满足什么条件下才具有确定的相对运动，对于分析现有机构或设计新机构都是十分重要的。

机构及构件的实际外形及结构往往都很复杂，为便于机构设计和分析，需用简单的线条和符号以机构运动简图的形式来表示。因此，需掌握其绘制方法。

所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构，否则称为空间机构。

### 一、运动副及其分类

如图 2-1 所示，一个做平面运动的自由构件有三种独立运动，即构件沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的移动及在  $xOy$  平面内的转动。构件所具有的独立运动的数目，称为构件的自由度。显然，一个做平面运动的自由构件有三个自由度。

机构是由许多构件以一定的方式连接而成的，这种连接应能保证构件间产生一定的相对运动。这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的连接称为运动副。例如，轴颈与轴承、活塞与气缸、相啮合的两齿轮的轮齿间的连接等都构成运动副。

当构件用运动副连接后，它们之间的某些独立运动将不能实现，这种对构件间相对运动的限制，称为约束。自由度随着约束的引入而减少，不同的运动副，引入不同的约束。

运动副的类型可按接触方式的不同分为两大类。

#### 1. 低副

两构件通过面接触所组成的运动副称为低副。它包括转动副和移动副两种。

(1) 转动副 若运动副只允许两构件做相对的回转，这种运动副称为转动副或铰链，如图 2-2a 所示。

(2) 移动副 若运动副只允许两构件沿某一方向做相对移动，这种运动副称为移动副，

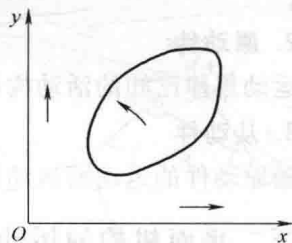


图 2-1 平面运动构件的自由度

如图 2-2b 所示。

转动副只能在一个平面内相对转动，移动副只能沿某一轴线方向移动。因此，一个低副引入两个约束，即减少两个自由度。

## 2. 高副

两个构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。

图 2-3a 中凸轮 1 与从动件 2、图 2-3b 中轮齿 3 与轮齿 4 在接触处  $A$  分别组成高副。形成高副后，彼此间的相对运动是沿接触处切线  $t-t$  方向的相对移动和在平面内的相对转动，而沿法线  $n-n$  方向的相对移动受到约束。所以一个高副引入一个约束，即减少一个自由度。

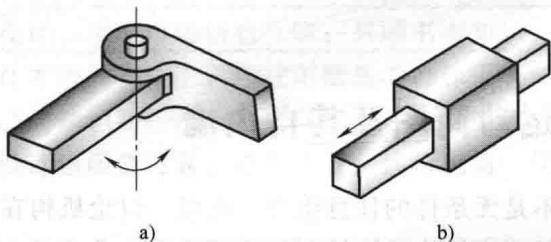


图 2-2 平面低副

a) 转动副 b) 移动副

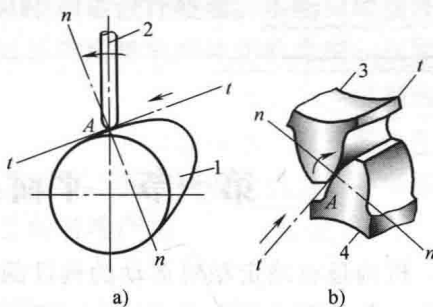


图 2-3 平面高副

a) 凸轮副 b) 齿轮副

1—凸轮 2—从动件 3、4—轮齿

## 二、机构中构件的分类

### 1. 固定件 (机架)

用来支承活动构件的构件。如内燃机中的气缸体就是固定件，它用来支承活塞、曲轴等。

### 2. 原动件

运动规律已知的活动构件。如内燃机中的活塞就是原动件，它的运动是由外界输入的。

### 3. 从动件

随原动件的运动而运动的其余活动构件。如内燃机中的连杆、曲轴等都是从动件。

## 三、平面机构的运动简图

在设计新机构或对现有机构进行运动分析时，为了便于设计和讨论，常常忽略那些与运动无关的因素（如构件的外形、组成构件的零件的数目、运动副的具体构造等），仅用简单的线条和符号来代表构件和运动副，并按一定比例确定各运动副的相对位置。这种表示机构中各构件间相对运动关系的简单图形，称为机构运动简图。

机构运动简图中，运动副的表示方法如图 2-4 所示。转动副用小圆圈表示，小圆圈的圆心应画在回转中心处；移动副的导路必须与相对移动方向一致。图中画斜线的构件代表固定件。

构件的表示方法如图 2-5 所示。图 2-5a 表示参与组成两个运动副的构件，图 2-5b 表示参与组成三个运动副的构件。对于机构中常用的构件和零件，有时还可采用惯用画法，如用

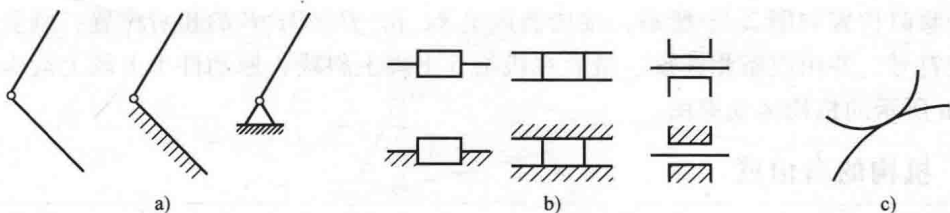


图 2-4 平面运动副的表示方法

a) 转动副 b) 移动副 c) 高副

粗实线或点画线画出一对节圆来表示互相啮合的齿轮，用完整的轮廓曲线来表示凸轮。其他常用零部件的表示方法可参看 GB/T 4460—2013。

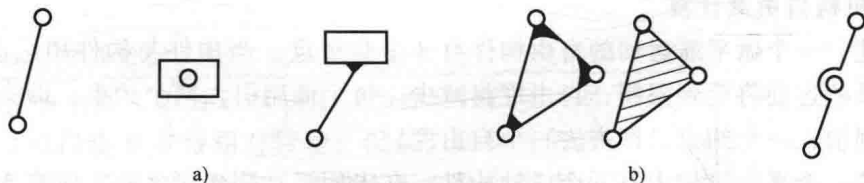


图 2-5 构件的表示方法

下面以压力机为例说明机构运动简图的绘制方法和步骤。

### 1. 分析机构组成和运动情况，找出固定件、原动件和从动件

如图 2-6 所示为一具有急回作用的压力机，它由菱形盘 1、滑块 2、构件 3（3 与 3' 为同一构件）、连杆 4、冲头 5 和机架 6 组成。菱形盘 1 为原动件，绕 A 轴转动，通过滑块 2 带动构件 3 绕 C 轴转动，然后再由做平面运动的连杆 4 带动冲头 5 沿机架 6 上下移动，完成冲压工件的任务。滑块 2、构件 3、连杆 4 及冲头 5 为从动件。

### 2. 确定运动副的类型和数目

根据各构件的相对运动可知，菱形盘 1 与机架 6，菱形盘 1 与滑块 2，构件 3 与机架 6，圆盘 3' 与连杆 4，连杆 4 与冲头 5 均构成转动副，其转动中心分别为 A、B、C、D、E；而滑块 2 与构件 3，冲头 5 与机架 6 则组成移动副。

### 3. 选择适当的视图平面和原动件位置

在合适的视图平面上选定一个恰当的原动件的位置，以便此时最能清楚地表达构件间的相互关系。因压力机是平面机构，故选构件运动平面为视图平面。

### 4. 表达运动副和构件

选择适当的比例尺，依照运动的传递顺序，定出各运动副的相对位置，用构件和运动副的规定符号绘制出机构运动简图。

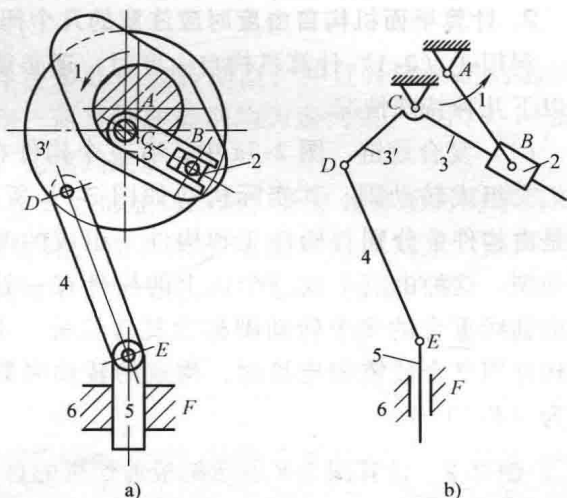


图 2-6 压力机及其机构运动简图

1—菱形盘 2—滑块 3—构件  
4—连杆 5—冲头 6—机架

原动件的瞬时位置如图 2-6a 所示，按比例定出 A、B、C、D、E 的相对位置，画上代表转动副的规定符号，并用线条相连接。最后在机架 6 上画上斜线，原动件 1 上画上箭头，便得到如图 2-6b 所示的机构运动简图。

#### 四、机构的自由度

机构的自由度是指机构具有确定运动时所需外界输入的独立运动的数目。机构要进行运动变换和力的传递就必须具有确定的运动，其运动确定的条件就是机构原动件的数目应等于机构的自由度数目。若机构的原动件数目小于机构的自由度数时，机构运动不确定；若机构的原动件数目大于机构的自由度数时，机构将在强度最薄弱处破坏。因此，在分析现有机器或设计新机器时，必须考虑其机构是否满足机构具有确定运动的条件。

##### 1. 平面机构自由度计算

如前所述，一个做平面运动的自由构件有 3 个自由度，当构件与构件用运动副连接后，构件之间的某些运动将受到限制，自由度将减少。每个低副引入两个约束，即失去两个自由度；每个高副引入一个约束，即失去一个自由度。

因此，若一个平面机构中有  $n$  个活动构件，在未用运动副连接之前，应有  $3n$  个自由度；当用  $P_L$  个低副和  $P_H$  个高副连接成机构后，共引入  $(2P_L + P_H)$  个约束，即减少了  $(2P_L + P_H)$  个自由度。如用  $F$  表示机构的自由度数，则平面机构自由度计算公式为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (2-1)$$

下面举例说明机构自由度的计算。

**例 2-1** 计算图 2-6 所示压力机的自由度，并判定机构是否具有确定的运动。

**解** 该机构的活动构件数  $n=5$ 、低副数  $P_L=7$ 、高副数  $P_H=0$ ，代入式 (2-1) 得

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

菱形盘为原动件，则机构的自由度数等于原动件数目，所以压力机的运动是确定的。

##### 2. 计算平面机构自由度时应注意的几个问题

利用式 (2-1) 计算机构自由度时，还必须注意以下几种特殊情况。

(1) 复合铰链 图 2-7a 中，有三个构件在 A 处汇交组成转动副，其实际构造如图 2-7b 所示，它是由构件 1 分别与构件 2 和构件 3 组成的两个转动副。这种由三个或三个以上的构件在一处组成的轴线重合的多个转动副称为复合铰链。由  $K$  个构件用复合铰链相连接时，构成的转动副数目应为  $(K-1)$  个。

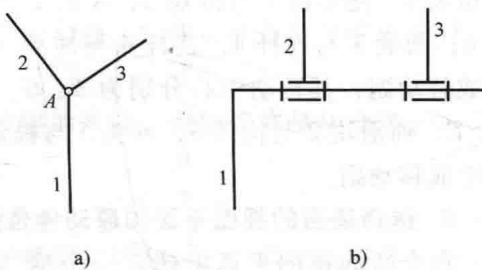


图 2-7 复合铰链

**例 2-2** 计算图 2-8 所示钢板剪切机的自由度，并判定其运动是否确定。

**解** 由图知  $n=5$ ,  $P_L=7$ ,  $P_H=0$

其中，B 处为复合铰链，含两个转动副。得机构自由度

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$



机构自由度等于原动件机构的数目，则机构具有确定的相对运动。

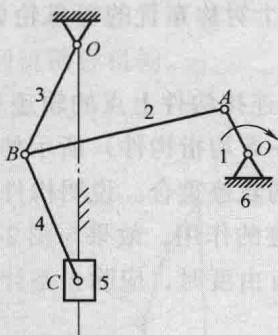


图 2-8 钢板剪切机

在机构自由度计算时，应注意识别复合铰链，以免漏算运动副。

(2) 局部自由度 如图 2-9a 所示，当原动件凸轮 1 回转时，滚子 2 可以绕 B 点做相对转动，但是，该构件的转动对整个机构的运动不产生影响。这种不影响整个机构运动的局部的独立运动，称为局部自由度。计算机构自由度时，可以设想滚子 2 与杆 3 固结成一体，如图 2-9b 所示。计算机构自由度时应将局部自由度除去不计。

图 2-9a 中的局部自由度经上述处理后，则机构自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$$

计算结果与实际相符，机构自由度等于原动件数，此时机构具有确定的运动。

(3) 虚约束 在实际机构中，与其他约束重复而不起限制运动作用的约束称为虚约束。计算机构自由度时应将虚约束除去不计。

在平面机构中，虚约束常出现于以下情况：

1) 转动副轴线重合的虚约束。若两构件在多处形成转动副，并且各转动副的轴线重合，则其中只有一个转动副起实际的约束作用，而其余转动副均为虚约束。如图 2-10 所示的齿轮机构中，转动副 A (或 B)、C (或 D) 为虚约束。

2) 移动副导路平行的虚约束。若两构件在多处形成移动副，并且各移动副的导路互相平行，则其中只有一个移动副起实际的约束作用，而其余移动副均为虚约束。如图 2-11 (图中序号 1~4 均指构件) 所示的曲柄滑块机构中，移动副 D (或 E) 为虚约束。

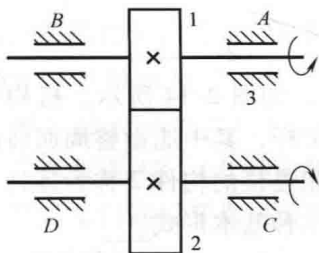


图 2-10 转动副轴线重合的虚约束

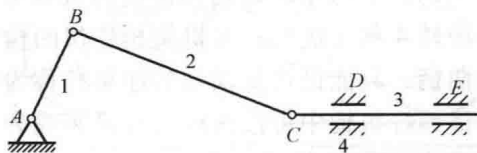


图 2-11 移动副导路平行的虚约束