

新世纪

GAOXIAO GUIHUA JIAOCAO

高校机械工程规划教材



机械原理

主 编 刘会英 杨志强
副主编 张明勤 刘加光



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



新世纪高校机械工程规划教材

机 械 原 理

主 编	刘会英	杨志强
副主编	张明勤	刘加光
参 编	王砚军	隋金玲
主 审	张 策	



机 械 工 业 出 版 社

本教材是根据教育部提出的“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的基本思想,以满足新世纪教学改革和教材改革为指导思想进行编写的,全书以培养机械系统方案创新设计能力为目标,在内容编排上贯穿了以设计为主线的思想,将全书内容进行了有机的组合,共分为十章,主要内容包括:机构的结构分析,机构的性能分析,平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系及其设计,其他常用机构及其设计,机构系统动力学设计,机械系统的运动方案及机构的创新设计。为了方便读者掌握重点内容和拓宽知识面,每章后均有“知识要点与拓展”的内容。

本书在注重培养学生逻辑思维能力的同时,还配有多媒体教学软件,为开发学生的形象思维能力创造了条件。

本书主要作为普通高等院校机械类专业的教学用书,也可作为非机械类专业学生及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/刘会英,杨志强主编. —北京:机械工业出版社,2003.1

新世纪高校机械工程规划教材

ISBN 7-111-11371-3

I. 机... II. ①刘...②杨... III. 机构学—高等学校—教材
IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 102789 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:高文龙 汪光灿 版式设计:霍永明 责任校对:韩 晶

封面设计:姚 毅 责任印制:闫 焱

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 9.25 印张 · 359 千字

0001—4000 册

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

新世纪高校机械工程规划教材编审委员会

顾 问：艾兴（院士）

领导小组：张 慧 高振东 梁景凯 高文龙
赵永瑞 赵玉刚

委 员：张 慧 张进生 宋世军 沈敏德
赵永瑞 程居山 赵玉刚 齐明侠
高振东 王守城 姜培刚 梅 宁
昃向博 梁景凯 方世杰 高文龙
王世刚 尚书旗 姜军生 刘镇昌

前 言

教育部提出的“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的基本思想，体现在机械设计系列课程体系中改革的总体目标是培养学生的综合设计能力。而机械原理课程作为机械类专业的主干技术基础课，在培养学生的综合设计能力的全局中，承担着培养学生机械系统方案创新设计能力的任务，在机械设计系列课程体系中占有十分重要的地位。机械原理的具体任务是进行机械运动方案的构思、执行机构类型和尺度的综合等。这就需要教材增加机构创新设计的内容，以适应市场快速发展的需要。从机械原理课程在机械设计系列课程总体框架中所处的地位出发，以培养和提高学生机械系统方案创新设计的能力为目标，本着“以设计为主线，分析为设计服务”的思想，本教材在以下几方面进行了改进和提高：

1. 在章节编排上，将传统的运动分析、力分析、摩擦和效率有机地合并为机械的性能分析，与机构分析一起放在了教材的前面，集中体现了分析为设计服务的思想。将机械速度波动的调节与平衡合并为机械动力学设计，使整篇内容更具系统性和可读性。

2. 在内容阐述上，注重知识面的扩大和三基（基本理论、基本知识和基本技能）的掌握以及实际问题能力的培养，充实了广义机构的内容，加强了机构设计、机构系统设计和机构创新设计的内容，每章内容前有引言，后有知识总结，便于系统掌握各章内容和自学。

3. 在内容取舍上，注意了实用性和先进性的关系。舍弃了一些陈旧的传统内容，有选择地保留了实际工程中并不先进但实用性很强的内容；由于学时数的限制，对学科前沿的最新发展不可能做到详尽介绍，因此，在每章后附有“知识拓展”，在教材的最后附有“展望”，介绍本学科的最新发展动态，让读者有目的地了解到本学科最前沿的信息与成果。

4. 在教材模式上，注重了适应 21 世纪教育与教学模式的变化。本教材配有多媒体教学软件，充分利用计算机多媒体的各种功能，将图形、动画、音像、文字、声音有机地结合起来，展示各种机构在实际机械中的应用实例，并注意对每章提出的问题，做到前后呼应，注重启发式教学，为学生创造一种轻松、活泼、自主的学习环境，激发学生对机械原理课程的兴趣，培养学生的形象思维能力和创新意识，从而提高教学质量。

参加本书编写的有哈尔滨工业大学（威海）刘会英（第一、六、七章）、青

岛建筑工程学院杨志强（第三、四章）、山东建筑工程学院张明勤（第一、二、十章）、烟台大学刘加光（第五章）、济南大学王砚军（第九章）、山东科技大学隋金玲（第八章）。全书由刘会英、杨志强担任主编。

本书由教育部机械基础课委员会副主任、天津大学机械工程学院院长张策教授审阅。哈尔滨工业大学王知行教授，为本书的编写提了许多好的建议；哈尔滨工业大学（威海）彭锡鸿教授审阅了部分书稿，并提出了宝贵意见；在此对他们的大力支持表示衷心感谢。

由于作者水平有限，不当及欠妥之处在所难免，真诚希望同行教师 and 广大读者批评指正。

编 者
2002 年 8 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 机械的基本概念	1
第二节 机械原理的研究对象和内容	4
第三节 机械原理课程的地位和学习本课程目的	4
第四节 如何进行本课程的学习	5
第二章 机构的组成和结构分析	7
第一节 机构的组成	7
第二节 机构运动简图及其绘制	10
第三节 机构自由度的计算	13
第四节 平面机构的组成原理和结构分析	20
知识要点与拓展	26
思考题	26
习题	26
第三章 平面机构的性能分析	30
第一节 平面机构的运动分析	30
第二节 平面机构的力分析	46
知识要点与拓展	58
思考题	59
习题	60
第四章 连杆机构及其设计	65
第一节 平面四杆机构的基本类型及其演化	66
第二节 平面四杆机构的基本特性	72
第三节 平面连杆机构设计	75
第四节 多杆机构	86
知识要点与拓展	88
思考题	89
习题	89
第五章 凸轮机构及其设计	92
第一节 凸轮机构的类型及应用	92
第二节 推杆运动规律设计	95
第三节 平面凸轮轮廓设计	100

第四节 凸轮机构基本尺寸设计	106
第五节 空间凸轮机构简介	111
知识要点与拓展	112
思考题	113
习题	113
第六章 齿轮机构及其设计	115
第一节 齿轮机构的特点及类型	115
第二节 齿轮齿廓的设计	117
第三节 渐开线齿廓的啮合特性	120
第四节 渐开线标准齿轮的基本参数及几何尺寸	121
第五节 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动	125
第六节 渐开线齿廓的加工与变位	130
第七节 斜齿圆柱齿轮传动	140
第八节 交错轴斜齿轮传动机构	146
第九节 蜗杆传动机构	148
第十节 圆锥齿轮传动	152
第十一节 非圆齿轮机构	155
第十二节 其他齿轮机构简介	156
知识要点与拓展	158
思考题	159
习题	160
第七章 轮系及其设计	162
第一节 轮系及其分类	162
第二节 定轴轮系的传动比	164
第三节 周转轮系的传动比	166
第四节 复合轮系的传动比	170
第五节 轮系的功用	173
第六节 行星轮系的效率计算	176
第七节 行星轮系的类型选择及设计	178
第八节 其他类型行星传动简介	182
知识要点与拓展	186
思考题	187
习题	187
第八章 其他常用机构	191
第一节 棘轮机构	191
第二节 槽轮机构	196
第三节 不完全齿轮机构	202
第四节 万向联轴器	206

第五节 广义机构	208
知识要点与拓展	211
思考题	211
习题	211
第九章 机械系统动力学设计	213
第一节 机械的质量平衡与功率平衡	213
第二节 基于质量平衡的动力学设计	215
第三节 基于功率平衡的动力学设计	228
知识要点与拓展	239
思考题	240
习题	241
第十章 机械系统的运动方案及机构的创新设计	244
第一节 机械系统的设计过程	244
第二节 机械系统的总体方案设计	245
第三节 机械执行系统的运动方案设计	248
第四节 机械传动系统的方案设计	260
第五节 原动机及其选择	263
第六节 机构的创新设计	266
知识要点与拓展	278
思考题	278
习题	278
展望——机械原理学科的发展趋势	280
附录	283
参考文献	286

第一章 绪 论

引言：何为机械？何为机械原理？机械原理是一门什么性质的课程？为什么要学习机械原理？机械原理研究哪些内容？怎样学习机械原理这门课程？学习机械原理可以培养哪些方面的能力？

第一节 机械的基本概念

机械是机器和机构的总称。

一、机器

机器的概念人们已耳熟能详，如家庭用的缝纫机、洗衣机、电风扇，交通运输用的汽车、飞机、轮船，工程建设用的起重机、装载机、翻斗车，机械加工用的各种机床，提供动力用的内燃机、电动机、发电机，现代办公用的打字机、绘图仪、传真机等等，这些都是机器。机器的种类繁多，其用途和性能也各不相同，下面通过两个实例来分析其性能特征，从而给机器下一个定义。

内燃机是汽车、飞机、轮船、装载机等各种流动性机械最常用的动力装置。如图 1-1 所示即为一最简单的单缸内燃机，通过汽缸 1、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4

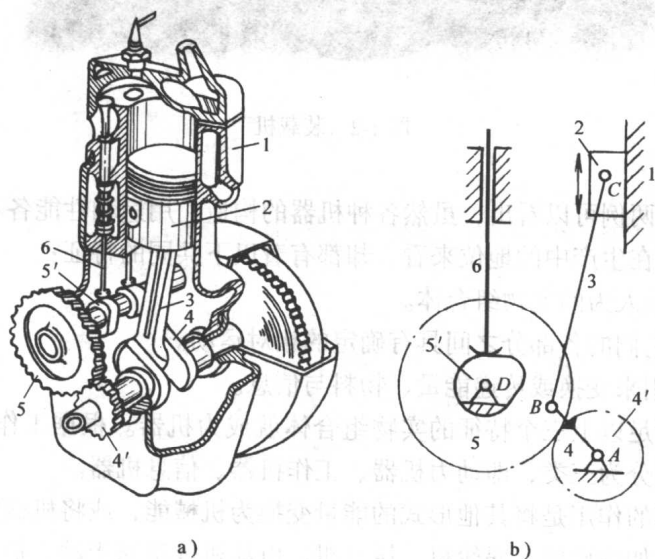


图 1-1 内燃机

1—汽缸 2—活塞 3—连杆 4—曲轴 4'、5—齿轮 5'—凸轮轴 6—推杆

组成的连杆机构，可以实现将活塞的直线运动变换成曲轴的回转运动；由齿轮 4' 和齿轮 5 及机体组成的齿轮机构将曲轴的回转运动传递到凸轮轴 5'；由凸轮轴 5' 和推杆 6 及机体组成的凸轮机构将凸轮的回转运动转换为推杆的直线运动。通过以上各种机构的协调配合动作，便能将燃料燃烧时产生的热能转变为曲轴转动的机械能。

装载机是一种常用的工程建设机械，图 1-2 即为某种装载机的实物图。工作时，内燃机带动高压泵打出高压油驱动液压缸活塞，再通过一系列杆件的运动传递与变换，实现铲斗的平面复杂运动，从而完成物料的铲、装、卸作业；通过驾驶整车行走，可以实现运载作业。

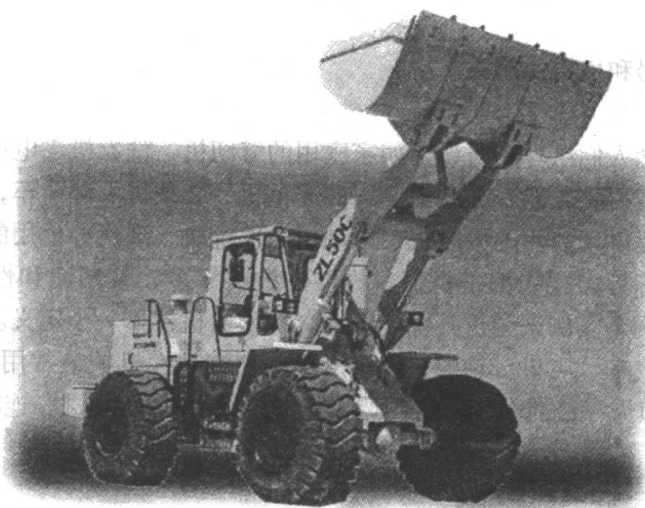


图 1-2 装载机

通过以上两例可以看出，虽然各种机器的构造、用途和性能各不相同，但从其力学特性及在生产中的地位来看，却都有着以下共同的特征：

- 1) 它们是人为的实物组合体。
- 2) 组成它们的各部分之间具有确定的相对运动。
- 3) 能够用来变换或传递能量、物料与信息。

凡同时满足以上三个特征的实物组合体就成为机器。根据工作类型的不同，机器一般可以分为三类，即动力机器、工作机器、信息机器。

动力机器的作用是将其他形式的能量变换为机械能，或将机械能变换成其他形式的能量。如内燃机、涡轮机、压气机、电动机等都属于动力机器。

工作机器的用途是完成有用的机械功或搬运物料。例如金属切削机床、起重

机、缝纫机、机车、汽车、包装机等都属于工作机器。

信息机器是用来完成信息的传递和变换。如果信息是以数字形式表示的,则该信息机器就称为计数机或机械式计算机。例如,打印机、绘图仪就属于这一类。而电子计算机,由于它并不依靠机械运动来获取和变换信息,因此,按照机器的定义,它不能算是机器。

现代机器通常由动力部分、传动系统、执行机构以及信息检测、处理和控制系统等组成。其中信息处理和控制在由电子计算机来完成的,实现机电一体化,成为现代机械系统。如加工中心、机器人、全自动照像机等。但无论现代机器多么先进,机器与其他装置的主要不同点是产生确定的机械运动,并通过运动来实现能量、物料和信息的变换。

二、机构

通过以上两例还可以看出,机器是由机构组成的。正是由于这些机构的协调运动才使得机器能够完成有用的机械功或进行能量转换。一部比较复杂的机器,可能包含多种类型的机构,例如上述的内燃机就是由如图 1-3 所示的连杆机构、齿轮机构和凸轮机构组成的。

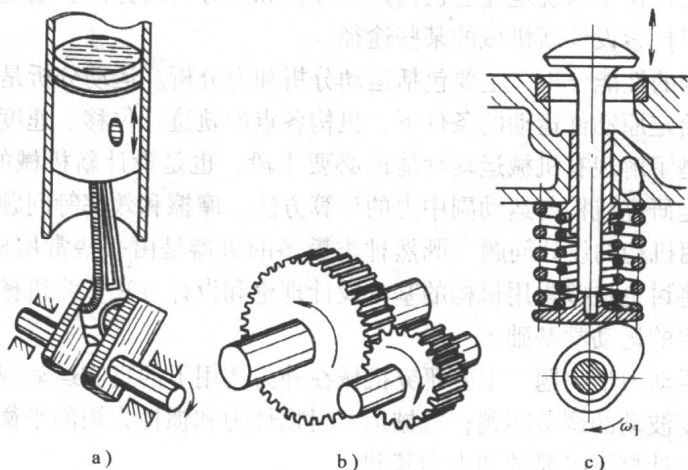


图 1-3 组成内燃机的机构

a) 连杆机构 b) 齿轮机构 c) 凸轮机构

机器能够用来变换或传递能量、物料与信息,而机构在机器中可以认为仅仅起着传递运动和转换运动形式的作用,它具有以下两个特征:

- 1) 机构是人为的实物组合。
- 2) 组成机构的各实物之间具有确定的相对运动。

由于机构具有机器的前两个特征,所以从结构和运动的观点来看,两者之间

并无区别。因此，人们常用机械一词作为它们的总称。

第二节 机械原理的研究对象和内容

机械是机器和机构的总称，所以机械原理又称为机器与机构的理论（Theory of machines and mechanisms），是机械工程学科的重要基础理论之一。

机器的种类是无穷无尽的，但组成这些机器的基本机构的种类却不是很多，即使是最复杂的机器，也无非是由连杆机构、齿轮机构、凸轮机构、间歇运动机构等一些常用机构组合而成的；机器虽然不同，但组成他们的主要机构却可以是相同的，所以各种常用机构是机器的共性问题，也是本课程研究的主要对象。

本课程的内容可分为以下几个方面：

（1）机构的结构分析 首先，我们研究机构是怎样组成的，如何用简单的图形把机构的结构状况表现出来，即绘制机构运动简图（如图 1-1b 所示）的问题，这样便于对机构进行运动和力分析，如机构的组成情况对其运动的影响，以及机构运动的可能性和具有确定运动的条件；其次，研究机构的组成原理及对机构的结构进行分类，便于系统地建立机构运动分析和力分析的方法。通过机构类型的型综合，可以探索设计新机械的某些途径。

（2）机构的性能分析 主要包括运动分析和力分析。运动分析是以几何的观点来研究在给定原动件运动的条件下，机构各点的轨迹、位移、速度和加速度等运动特性，是了解现有机械运动性能的必要手段，也是设计新机械的重要步骤。力分析主要是研究机构各运动副中力的计算方法、摩擦和效率等问题。

（3）常用机构的设计问题 既然种类繁多的机器是由一些常用机构组成的，那么本课程将讨论这些常用机构的基本设计理论和设计方法，为机械系统的方案设计打下必要的运动学基础。

（4）机器动力学问题 主要研究机械在外力作用下的真实运动规律；机械运转过程中速度波动的调节问题；机械运转时惯性力和惯性力矩的平衡问题，为机械系统方案设计打下必要的动力学基础。

（5）机械系统方案设计 主要介绍机械总体方案的设计步骤、功能创新、机构创新、执行机构的运动规律和机构系统运动协调设计的基本原则等，使学生初步具有拟定机械系统方案的能力。

第三节 机械原理课程的地位和学习本课程目的

机械原理是一门培养学生具有机械基本设计能力的技术基础课。一方面它比物理和工程力学等基础课更接近实际，另一方面，它又不同于汽车设计、机械制

造设备等专业课,机械原理是研究各种机械所具有的共性问题,而专业课是研究某一类机械所具有的特殊性,因此,它比专业课具有更宽的研究面和更广的适应性。在教学中起着承上启下的作用,是高等院校中机械类各专业的一门重要的主干技术基础课,同时在机械设计系列课程体系中占有非常重要的地位。

通过对机械原理课程的学习,为学习机械类有关专业课打下良好的基础,因为任何一部机器不仅要研究其特殊性,更需要研究其共性问题,机械原理正是为研究其共性问题而开设的,同时在研究问题的方法上也适合于专业课的研究。

机械设计与制造业是国民经济的支柱产业。作为机械类各专业的学生,在今后的学习和工作中总会遇到许多关于机械设计和使用方面的问题,而本课程所讲授的机构分析与设计的基本理论和方法,不仅用于解决本课程所学的机构设计,而且对今后的课程设计、毕业设计以及今后工作中遇到技术问题的解决,都会提供必要的基础知识,为机械产品的创新设计打下良好的基础。

对于现有机件,要想充分发挥其机械设备的潜力,必须掌握机构和机器的分析方法,才能了解机械的性能和更合理的使用机械;掌握机构和机器的设计方法,才能对现有机件的革新改造提出可行性方案,通过对本课程的学习,将为现有机件的合理使用和技术革新打下基础。

在创新机器过程中,机构的正确运用,机械运动方案的合理选择,各种机构的设计和创新都需要机械原理的知识。尤其是进入 21 世纪的今天,计算机和计算技术快速发展,需要把计算机快速计算和图形处理功能引入机械设计中,改进和革新机械分析与设计方法,把机械设计的方法与技术推向新阶段。这就要求我们在学习和研究机构分析与设计的基本理论的同时,注意更新观念,把机、电、液、气的技术结合起来考虑问题,并积极应用计算机和计算技术,发展和创新机械,推动机械学科的发展。

第四节 如何进行本课程的学习

由于本课程的性质不同于基础课,所以在学习方法上要作相应的调整,以便在有限的时间内学得更好,注意做到以下几点:

1) 机械原理是一门技术基础课,它的先修课程是高等数学、物理、理论力学及工程制图等。其中,本课程与理论力学的知识联系尤为紧密,它把理论力学的有关原理应用于实际机械,在学习的过程中,应注意灵活运用理论力学的有关知识。

2) 学习知识和培养能力两者是相辅相成的。在本课程的学习中,应把重点放在掌握研究问题的基本思路和方法上,着重于能力的培养。这样就可以利用你的能力去获取新的知识,在知识更新速度加快的当今世界尤为重要。

3) 深入理解和全面掌握本课程的基本研究方法。这些基本研究方法包括：杆组法、转换机架法、等效法、机构演化法等。这些方法能使我们非常容易的对各种机构进行分析和设计，同时也是今后各专业课中经常使用的研究方法。

4) 本书把结构和性能分析集中讨论，放在了前面，为的是体现以设计为主，分析为设计服务的思想。注意在学习中进行前后联系，融会贯通，例如利用瞬心法对凸轮机构、齿轮机构进行分析等。

5) 学习内容的改变，引起研究方法的改变，同时学习方法也在发生改变。在学习本课程的过程中，要注意在发展逻辑思维的同时，重视形象思维能力的培养。这样更有利于解决实际问题 and 进行创造性的设计。

6) 机械原理课程与工程实际联系密切，在学习的过程中，要特别注意理论联系实际。与本课程有关的教学环节有实验、课程设计、机械设计大奖赛及课外科技活动等，都是理论联系实际的好方法，把现实中的各种不同机构融入到学习中，从中得到启示，对学好本课程是很有好处的。

综上所述，机械原理是机械类各专业的一门重要的技术基础课程，它一方面介绍对已有机械进行结构分析、运动分析和动力分析的方法，一方面探索根据运动和动力性能要求设计新机械的途径与方法。通过本课程学习，可以掌握有关机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能，锻炼工程实践能力和开发创新能力。

创新是技术与经济发展的原动力，是国民经济发展的基础。我们不仅要善于学习，更要勇于创新。如图 1-1 所示的内燃机，自创始发明以来，经过历代革新，至今已有 140 余年的历史，目前仍在广泛应用，但这并不能说明它是尽善尽美的，通过分析，可知它存在机构组成复杂、振动冲击大、转速受限、效率低等许多缺点。在本课程的最后，针对这一实例还要进一步展开讨论，希望读者能够举一反三，从中得到启发，培养和锻炼创新的意识与能力。

第二章 机构的组成和结构分析

引言：如绪论所述，组成机构的各实物具有确定的相对运动。那么，机构是怎样组成的？在什么条件下机构才具有确定的运动？如何来判断机构运动的可能性与确定性？为保证机构运动的可能性与确定性，在组成机构时，有没有什么规律可循？

第一节 机构的组成

如前所述，机器是由机构组成的，即机器中的各个机构通过协调有序的运动和动力传递来最终实现能量转换或完成有用的机械功。而机构是由具有确定相对运动的“实物”——即一些相对独立运动的单元体组成，这些单元体称为构件。如图 1-1 和图 1-2 所示。可以看出，各构件组成机构时是按一定的方式联接而成的，构件之间的联接在机构中称为运动副。所以，构件和运动副是机构组成的两个要素。

一、构件及其分类

构件是机构中的运动单元体。图 1-1 中的连杆机构就是由汽缸 1、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4 四个构件组成的。而一个构件可能是一个零件，也可能是由几个零件固定联接而成。如图 2-1 所示，曲轴是一个构件，也是一个零件；连杆是一个构件，它是由连杆体 1、连杆盖 2、轴瓦 3、4 和 5、螺栓 6、螺母 7、开口销 8 等零件组成的。组成一个构件的各零件之间没有相对运动。构件与零件的本质区别在于：构件是运动的单元体，而零件是制造的单元体。本课程以构件作为基本研究单元。

根据构件在机构中所起的作用不同，可将构件分成机架（或固定件）、原动件（或主动件）和从动件。机构中固接于定参考系的构件称为机架（或固定件）；机构中可相对于机架运动的构件称为活动构件，其中按照给定运动规律独立运动的构件称为原动件（主动件），而其余活动构件称为从动件。如图 1-1 所示的连杆机构中，汽缸 1 为机架，活塞 2 为原动件，而连杆 3 和曲轴 4 为从动件。

需要说明的是，从现代机器发展趋势来看，机构中的各构件可以是刚性的，某些构件也可以是挠性的或弹性的，或是由液压、气动、电磁件构成的。所以说，现代机器中的机构也不再是纯刚性构件的机构。

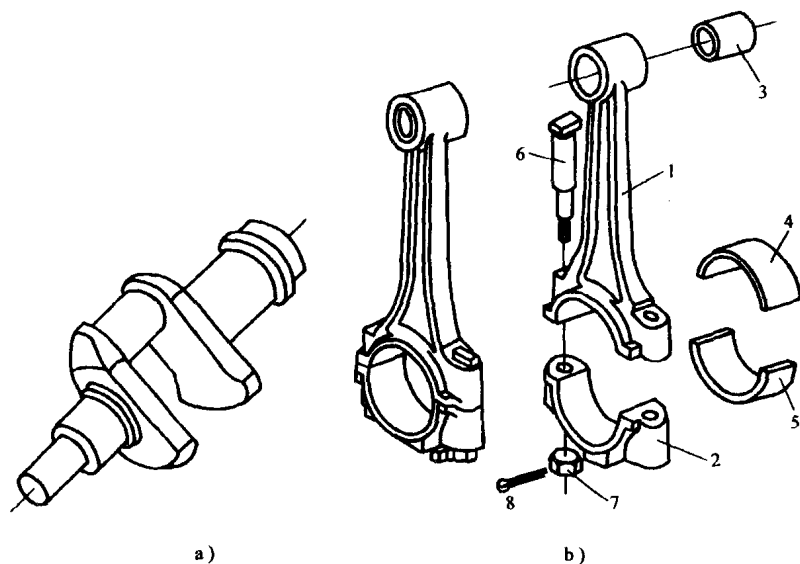


图 2-1 构件与零件

a) 曲轴 b) 连杆

1—连杆体 2—连杆盖 3、4、5—轴瓦 6—螺栓 7—螺母 8—开口销

二、运动副及其分类

构件组成机构时，需要以一定的方式把各个构件彼此联接起来，而且每个构件至少要与另一构件相联接。显然这种联接应保证被联接的两构件之间仍能产生一定的相对运动。我们把这种由两个构件直接接触组成的可动的联接称为运动副。运动副中构件间的接触形式有点、线、面三种，称此点、线、面为运动副元素。

根据组成运动副两构件间作相对空间运动或平面运动，可将运动副分为空间运动副（图 2-2）与平面运动副（图 2-3）。根据组成运动副两构件间的接触形式，面接触的运动副称之为低副（图 2-2c、d、e、f 和图 2-3a、b），点或线接触的运动副称之为高副（图 2-2a、b 和图 2-3c、d）。根据组成平面低副的两构件之间的相对运动性质，又可将其分为转动副（图 2-3a）和移动副（图 2-3b）；常见的平面高副有齿轮齿廓接触组成的齿轮副（图 2-3c）；凸轮从动件端部与凸轮轮廓之间的点或线接触所组成的凸轮副（图 2-3d）等。

三、运动链与机构

构件都是用运动副彼此相联接的，构件间的运动与力都是通过运动副来传递的。我们把若干个构件用运动副联接而成的构件系统称为运动链。如果运动链中的每个构件上至少有两个或两个以上运动副元素，且各构件用运动副联接起来组成闭环构件系统，则称之为闭式运动链，简称为闭式链，如图 2-4b、c 所示均为闭式链，其中图 b 为单闭环链，图 c 为双闭环链，还有多闭环链的情况。如果运