

高等学校机械基础课程系列教材

机械原理学习与考研辅导

主编 荣 辉



附光盘



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TH111/78D

2007

高等学校机械基础课程系列教材

机械原理学习与 考研辅导

主编 荣 辉

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是针对高等学校机械类专业的学生进行《机械原理》课程的课后自学、复习、应考以及报考机械类专业研究生所编写的。每章按基本要求、基本概念和基础知识、学习重点及难点、例题精选、试题自测及答案五部分编写,书后附北京理工大学近年本科生和研究生考试试题及参考答案。本书对于学生的期末应考和考研,具有很强的针对性和很高的实用价值。

本书除供机械类专业学生应考和考研参考外,还可作为教师备课、命题的参考资料,也可供有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械原理学习与考研辅导/荣辉主编. —北京:北京理工大学出版社,2007.7

(高等学校机械基础课程系列教材)

ISBN 978-7-5640-0950-2

I. 机… II. 荣… III. 机构学-高等学校-教学参考资料
IV. TH111

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第071253号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京圣瑞伦印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/12.75

字 数/299千字

版 次/2007年7月第1版 2007年7月第1次印刷

印 数/1~4000册

定 价/26.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书是针对高等学校机械类专业的学生进行《机械原理》课程的课后自学、复习、课程应试以及报考机械类专业研究生学习而编写的，涵盖了《机械原理》课程的基本内容。

本书内容丰富，实用性强。为使学生在较短的时间内掌握《机械原理》课程的精髓及主要内容，本书在编写过程中，在对基本内容有针对性阐述的基础上，注重强调各章的重点、难点，并附有习题及解答。每章是按基本要求、基本概念和基础知识、学习重点及难点、例题精选、试题自测及答案五部分编写。书后附北京理工大学近年本科生和研究生考试试题及参考答案，对于学生的期末应考和考研，具有很高的实用价值。

全书由荣辉副教授负责统稿。参加本书编写的有：王艳辉（第一章、第八章、第九章和第十章）；荣辉（第二章、第三章、第四章、第七章和附录）；付铁（第五章、第六章和第十一章）；苏伟（第十二章、第十三章、第十四章和第十五章）。

全书由张春林教授主审。张春林教授在本书的评审过程中提出了许多宝贵意见，还有张同庄教授、丁洪生教授、何放老师也对本书编写提出了宝贵建议，编者在此表示衷心的感谢！另外，本书在编写及出版过程中，得到北京理工大学出版社的大力支持和帮助，在此表示感谢！

由于编者的水平有限，时间仓促，本书错误之处，在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	(1)
一、基本要求	(1)
二、基本概念和基础知识	(1)
第二章 平面机构的结构分析	(3)
一、基本要求	(3)
二、基本概念和基础知识	(3)
三、学习重点及难点	(8)
四、例题精选	(8)
五、试题自测及参考答案	(12)
第三章 平面连杆机构的运动分析	(16)
一、基本要求	(16)
二、基本概念和基础知识	(16)
三、学习重点及难点	(21)
四、例题精选	(21)
五、试题自测及参考答案	(27)
第四章 平面机构的受力分析	(34)
一、基本要求	(34)
二、基本概念和基础知识	(34)
三、学习重点及难点	(39)
四、例题精选	(39)
五、试题自测及参考答案	(44)
第五章 平面连杆机构及其设计	(48)
一、基本要求	(48)
二、基本概念和基础知识	(48)
三、学习重点及难点	(51)
四、例题精选	(52)
五、试题自测及参考答案	(56)
第六章 凸轮机构及其设计	(60)
一、基本要求	(60)
二、基本概念和基础知识	(60)
三、学习重点及难点	(67)
四、例题精选	(67)
五、试题自测及参考答案	(69)

第七章 齿轮机构及其设计	(76)
一、基本要求	(76)
二、基本概念和基础知识	(76)
三、学习重点及难点	(85)
四、例题精选	(85)
五、试题自测及参考答案	(91)
第八章 间歇运动机构及其设计	(95)
一、基本要求	(95)
二、基本概念和基础知识	(95)
三、学习重点及难点	(96)
四、例题精选	(96)
五、试题自测及参考答案	(98)
第九章 空间连杆机构及机器人机构	(100)
一、基本要求	(100)
二、基本概念和基础知识	(100)
三、学习重点及难点	(101)
四、例题精选	(101)
五、试题自测及参考答案	(102)
第十章 实现其他功用的机构简介	(103)
一、基本要求	(103)
二、基本概念和基础知识	(103)
三、学习重点及难点	(104)
四、例题精选	(104)
五、试题自测及参考答案	(105)
第十一章 轮系及其设计	(109)
一、基本要求	(109)
二、基本概念和基础知识	(109)
三、学习重点及难点	(111)
四、例题精选	(111)
五、试题自测及参考答案	(113)
第十二章 机构组合与创新设计	(119)
一、基本要求	(119)
二、基本概念和基础知识	(119)
三、学习重点及难点	(120)
四、例题精选	(120)
五、试题自测及参考答案	(123)
第十三章 机械系统运动方案的设计	(125)
一、基本要求	(125)
二、基本概念和基础知识	(125)

三、学习重点及难点	(126)
四、例题精选	(127)
第十四章 机械系统动力学	(130)
一、基本要求	(130)
二、基本概念和基础知识	(130)
三、学习重点及难点	(132)
四、例题精选	(132)
五、试题自测及参考答案	(135)
第十五章 机械的平衡设计与实验	(141)
一、基本要求	(141)
二、基本概念和基础知识	(141)
三、学习重点及难点	(144)
四、例题精选	(144)
五、试题自测及参考答案	(146)
附录 机械原理试卷及参考答案	(152)
参考文献	(195)

第一章 绪 论

一、基本要求

- (1) 明确机械原理的研究对象和课程的内容。
- (2) 明确机械原理课程在人才培养中的地位和作用。
- (3) 了解机械原理学科的发展和此课程的学习方法。

二、基本概念和基础知识

机械原理又称机器理论与机构学,它的研究对象是机构和机器。机械原理是研究机构和机器的运动及动力特性,以及机械运动方案设计的机械工程的基础学科。它是机械设计理论和方法学科中的重要分支。它对于机械的设计、制造、运行、维修等方面都有十分重要的作用。

1. 基本概念

本章介绍了机器、机构、机械等名词,并通过实例说明:机器的主要组成部分是各种机构,从而明确了机构是本课程的主要研究对象。

机器是一种由人为物体组成的具有确定机械运动的装置,它用来完成一定的工作过程,以代替人类的劳动。一般由动力系统、传动系统、执行系统、控制系统等部分组成。有以下三个共同特征:

- (1) 是人们根据某种使用要求而设计创造的一种装置(人为的实物组合)。
- (2) 各部分之间具有确定的相对运动。
- (3) 能完成有用的机械功或实现能量转换。

机构只具有特征(1)、(2),通常将机构与机器统称为机械。

2. 课程内容

机械原理从教学观点出发,其主要内容可分为以下四部分:

(1) 机构的组成与分析。首先研究机构是怎样组成的,机构的组成情况对其运动的影响,以及机构具有确定运动的条件;其次要研究机构的组成原理及机构的结构分类;最后还要研究如何用简单的图形把机构的结构状况表示出来(即如何绘制机构运动简图的问题),以便据此对机构进行运动及动力分析。

(2) 基本机构的设计。基本机构(亦称机构的基本型)是指结构最简单、且不能再进行分割的机构。

(3) 机构组合系统的设计。各种机器即便是非常复杂的机器,其机械部分也无非是由齿轮、凸轮、连杆等一些常用的机构组合而成的。所以对这些常用机构的运动及工作特性进行分析并探索其设计方法是十分必要的。另外由于机器人在现代工业中的应用日益广泛,故对机器人的机构也做了必要的介绍。

(4) 机械系统的动力学。主要研究两类基本问题:其一是分析机器在运转过程中其各构件的受力情况,以及这些力的做功情况;其二是研究机器在已知外力作用下的运动,主要包括

机器真实运动方程的建立与求解,机器速度波动的调节和不平衡惯性力的平衡问题。

从工程观点常把机械原理的内容划分为三大领域:① 机构的结构学;② 运动学;③ 动力学。

3. 机械原理的发展和具体学习方法

机械原理学科是机械设计及理论学科的重要组成部分,是机械工程和现代科学技术发展的重要基础。由于电子学、信息科学、计算机技术、生物科学向机械设计及理论学科的渗透和结合,使机械原理学科已向现代化方向迈出一大步。一方面使传统机构学中的典型机构,如连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构、组合机构等在分析和设计方法上有很大发展。另一方面在机器人机构、微机构、广义机构、可控机构、机构系统设计、机构动态设计等方面均有不少新的研究成果。这些方面的深入研究为现代机器的设计提供了理论基础。

要学好本课程除对机械原理学科发展现状和趋势有所了解,还应注意以下几个方面:

(1) 充分运用已经学过的相关课程的基本知识、基本理论和基本方法。

(2) 注意学习方法从纯基础理论课到专业课的转变。

(3) 机械原理课程是理论性和设计性很强的课程,其分析与设计方法不是唯一的,有时设计计算结果具有多值性。因而在学习本课程时,要把逻辑思维和形象思维相结合,想象力与工程实际相结合,才能提高创新设计的能力。

(4) 本课程的学习要求可分为掌握、理解和了解性的内容,应依据重要程度有针对性的学习。

总而言之,复习相关课程的知识,认真听课,独立完成作业,勤于思考,参加实验,理论与实践相结合,是学好本课程的关键。

第二章 平面机构的结构分析

一、基本要求

- (1) 了解机构的组成,搞清运动副、运动链、约束和自由度等有关机构的基本概念。
- (2) 能正确绘制实际机械的机构运动简图。
- (3) 掌握平面机构的自由度的计算方法及机构具有确定运动的条件。
- (4) 掌握平面机构中将高副用低副进行替代的方法。
- (5) 理解平面机构组成的基本原理,会对平面机构进行结构分析并能判断机构的级别。

二、基本概念和基础知识

1. 与机构相关的基本概念

(1) 构件。构件是组成机构的基本要素,由一个或多个零件刚性连接而成。构件是机器运动的最小单元,而零件则是机器制造的最小单元。

(2) 运动副。构件之间的可动连接称为运动副,是组成机构的又一基本要素。两构件上参加接触而构成运动副点、线、面部分称为运动副元素。运动副可分为平面运动副和空间运动副两类,通常平面运动副按下列方法进行分类:

① 按两构件的接触方式分为高副(点或线接触)、低副(面接触)。

② 按两构件之间的相对运动方式分为转动副(相对运动为转动)、移动副(相对运动为移动)等。

(3) 运动链。若干个构件通过运动副连接起来组成的相互间可作相对运动的构件系统称为运动链。若运动链中的各构件构成了首尾封闭的系统,则称之为闭链,否则称为开链。

(4) 机构。在运动链中,若选定某个构件为机架,则该运动链变为机构。机构中各构件的运动平面若互相平行,则称为平面机构;若机构中至少有一个构件不在相互平行的平面上运动,或至少有一个构件能在三维空间中运动,则称为空间机构。完全由低副连接而成的机构为低副机构;机构中只要含有一个高副,就称之为高副机构。

2. 机构的运动简图

机构的运动简图是研究机构的结构、对机构进行运动分析和受力分析时的表述工具,会画机构的运动简图是机械原理课对学生的最基本要求。

(1) 定义。用规定的符号代表运动副,简单线条或几何图形代表构件,根据机构的运动尺寸(即确定各运动副相对位置的尺寸),按一定比例绘制的、能准确反映机构中各构件之间运动关系的简图称为机构的运动简图。如不按比例尺画,则称为机构示意图。

(2) 机构运动简图绘制步骤:

① 搞清机器的实际构造和运动情况。首先找出机架、原动件和从动件,然后使机构缓缓运动,观察其组成情况和运动情况,沿主动件到从动件的运动传递路线找出构件数目和运动副

的数目与种类。

② 恰当选择投影面。一般选择大多数构件所在的运动平面为投影面。

③ 测量各运动副之间的尺寸,选取适当的比例尺,定出各运动副之间的相对位置,画出相应的运动副符号,然后用简单线条或几何图形将同一构件上的运动副符号连接起来,从而完成机构运动简图的描述。

3. 机构自由度计算

(1) 计算公式。平面机构自由度的计算公式为

$$F = 3n - 2p_L - p_H$$

式中, n 为机构中活动构件的数目; p_L 为机构中低副的数目; p_H 为机构中高副的数目。

机构的自由度计算公式是判断机构是否具有确定运动的理论判别依据,只有当机构的自由度 $F \geq 1$ 且在连架杆为原动件的前提下,机构中原动件数目与机构的自由度数相等时,机构才能具有确定的运动。

(2) 计算机构自由度的注意事项:

① 复合铰链。两个以上构件在同一处以转动副连接,构成复合铰链(图 2-1)。三个构件组成复合铰链,共构成两个转动副。 m 个构件以复合铰链相连接,转动副数目等于 $(m-1)$ 个。图 2-2 所示的机构中, B 、 C 、 D 、 F 四处都是由三个构件构成复合铰链,各有两个转动副。

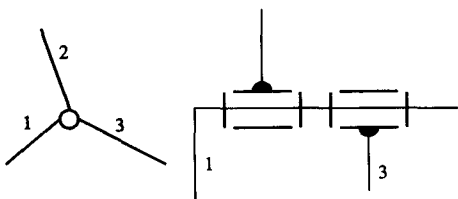


图 2-1 复合铰链

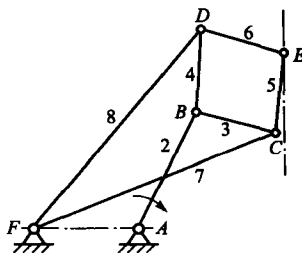


图 2-2 含复合铰链的机构

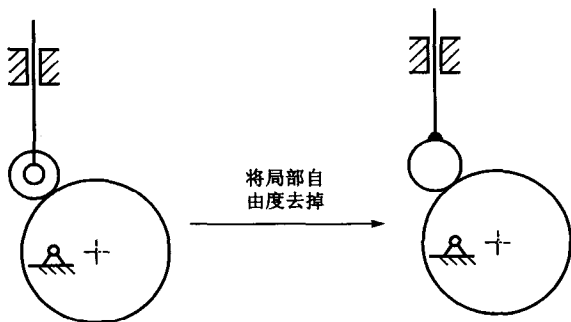


图 2-3 局部自由度及处理方法

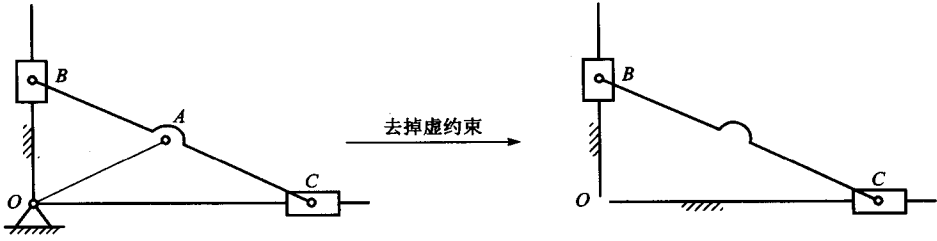
② 局部自由度。不影响其他构件运动,仅与其自身的局部运动有关的自由度称为局部自由度。局部自由度常见于将滑动摩擦变为滚动摩擦时添加的滚子,轴承中的滚子等场合。在计算机构自由度时,应将局部自由度去掉。具体做法是将小滚子与安装滚子的构件焊接在一起(图 2-3),然后进行计算。

③ 虚约束。在机构中不起独立限制作用的重复约束称为虚约束。计算机构自由度时应将虚约束除去,然后再按公式计算。图 2-4 所示为虚约束常发生的场合。

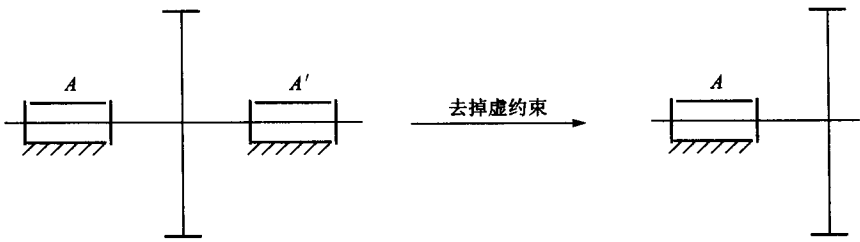
④ 三角形构件。三角形构件按一个构件计算(如图 2-5 所示)。



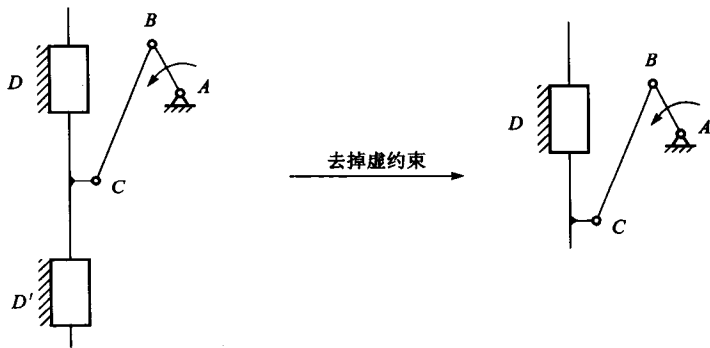
(a)



(b)

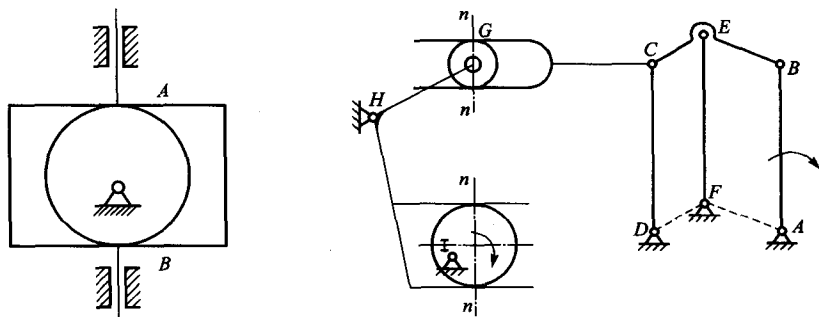


(c)

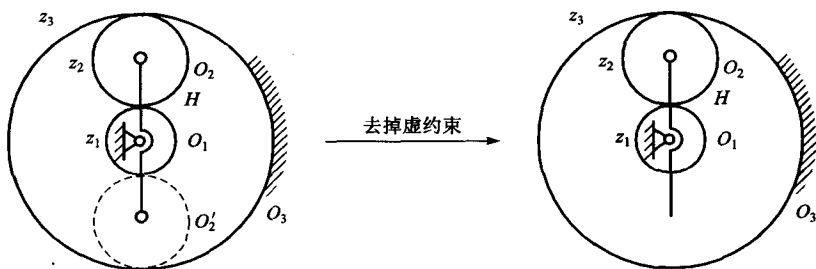


(d)

图 2-4 虚约束及其处理方法



(e)



(f)

图 2-4 虚约束及其处理方法(续)

- (a) 用双转动副杆连接两构件上距离保持不变的两点; (b) 两构件上运动轨迹重合的点用转动副连接;
 (c) 两构件在多处形成转动副, 且各转动副的轴线重合, 则只有一处转动副起作用, 其余均为虚约束;
 (d) 两构件在多处用移动副连接, 且各移动副的导路平行, 则只有一处移动副是真实约束, 其余均为虚约束;
 (e) 两构件在多处用高副连接, 且各高副的公法线重合, 这时只计一处高副的约束, 余者为虚约束;
 (f) 在输入输出构件之间用多组完全相同的运动链传递运动时, 只有一组起独立传递运动的作用, 其他各组通常都是虚约束

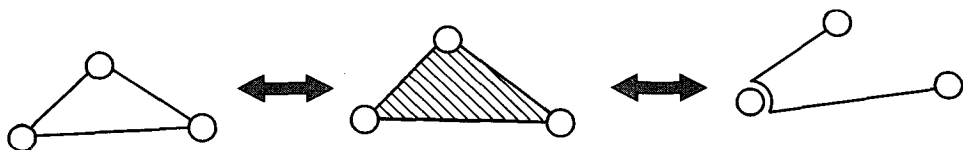


图 2-5 三角形构件

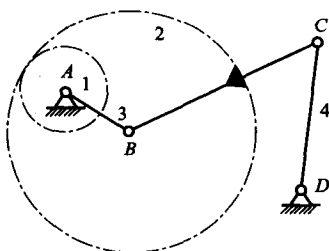


图 2-6 焊接符号

⑤ 焊接符号。用焊接符号连接的两个零件或组件构成一个构件。图 2-6 中, 齿轮 2 与连杆 BC 为同一构件。

4. 机构的结构分析

(1) 高副低代。在含有高副的机构中, 将高副虚拟地用低副替代称为高副低代。替代的原则为: ① 代换前后机构的自由度不变; ② 代换前后机构的运动关系不变。机构中常见的几种高副低代方法如图 2-7 所示。

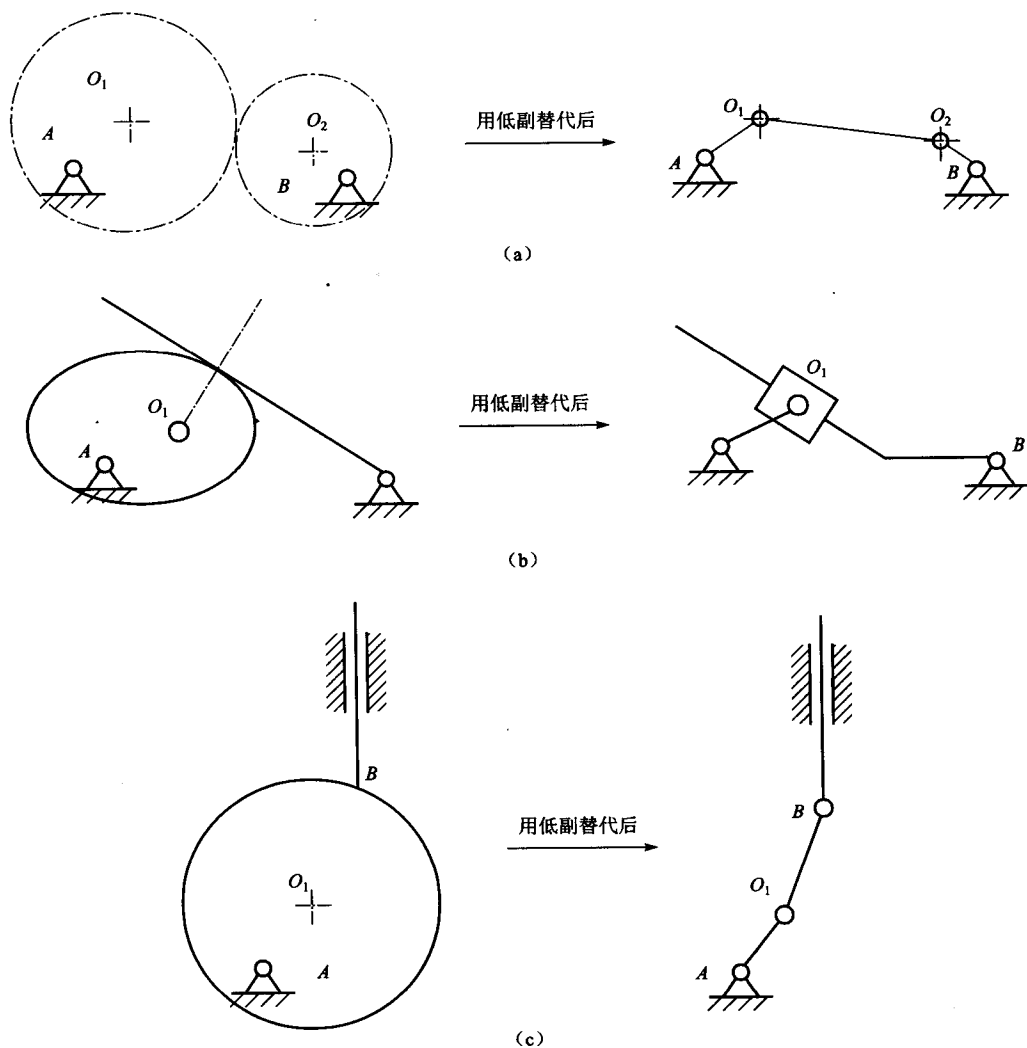


图 2-7 高副低代的常见情况

(a) 两曲面接触构成高副; (b) 曲面与平面接触构成高副; (c) 点与曲面接触构成高副

(2) 基本杆组。自由度为零且不能再拆分的构件系统称为基本杆组。最简单的基本杆组由两个构件和三个运动副组成,称为 II 级组(如图 2-8 所示)。

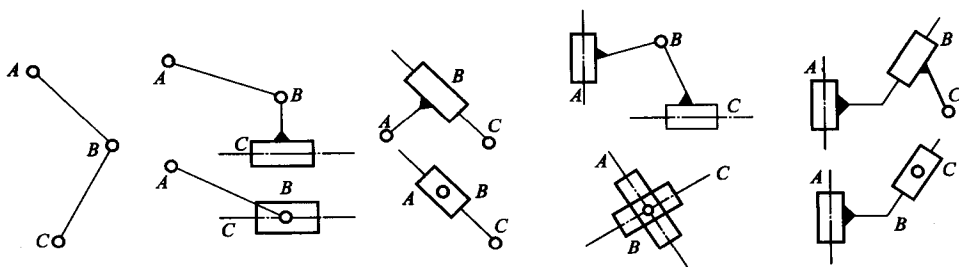


图 2-8 II 级组

四个构件和六个运动副构成的基本杆组中,图 2-9 所示为Ⅲ级组。图 2-10 所示为Ⅳ级组。

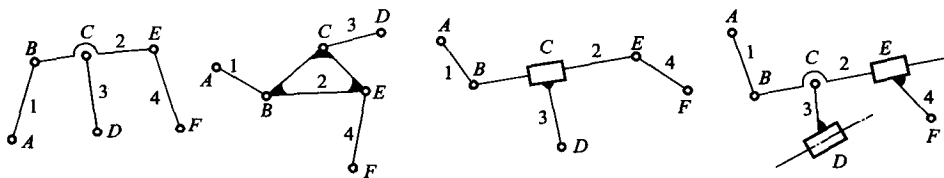


图 2-9 Ⅲ级杆组

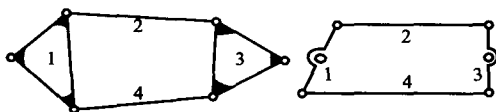


图 2-10 Ⅳ级组

(3) 结构分析步骤。首先去除机构中的虚约束并对局部自由度进行处理,计算机构的自由度并确定原动件(同一机构中,原动件不同,机构的级别可能不同);然后对机构进行高副低代;之后从远离原动件的部位开始拆杆组,首先

考虑Ⅱ级组,拆下的杆组是自由度为零的基本杆组,最后剩下的原动件数目与自由度数相等。机构中基本杆组的最高级别极为机构的级别。

三、学习重点及难点

(1) 学习重点。运动副和运动链等概念、机构运动简图的绘制、机构自由度的计算及机构具有确定运动的条件。

(2) 学习难点。含有虚约束的机构的自由度的计算、机构级别判断。

四、例题精选

例题 2-1 图 2-11(a)所示机构中,构件 1 为运动输入构件(原动件),构件 4 为运动输出构件(从动件),A、B、C 为固定铰链。

(1) 画出该机构的运动示意图。

(2) 计算机构的自由度。

(3) 判断该机构的级别。

解 (1) 图 2-11(a)所示机构中,构件 1 绕固定轴心 A 转动,另外构件 1 沿构件 2 的导路滑动;构件 3 绕固定轴心 B 转动,另外构件 3 与构件 2 之间绕轴心 O 相对转动;构件 4 与构件 3 高副接触且绕固定转动中心 C 转动。选取合适的长度比例尺 μ_l 绘制机构的运动简图。图 2-11(b)所示为机构运动示意图(没按比例尺绘制)。

(2) 计算机构的自由度。由图 2-11(b)可知: $n=4, p_L=5, p_H=1$, 因此机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_L - p_H = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

(3) 对机构进行高副低代,高副低代后简图如图 2-11(c)所示,拆出基本杆组如 2-11(d)所示。基本杆组的最高级别为Ⅱ级,故此机构为Ⅱ级机构。

例题 2-2 试对图 2-12 所示翻台机构(图中箭头所在构件为原动件):

(1) 绘出机构运动示意图。

(2) 计算自由度。

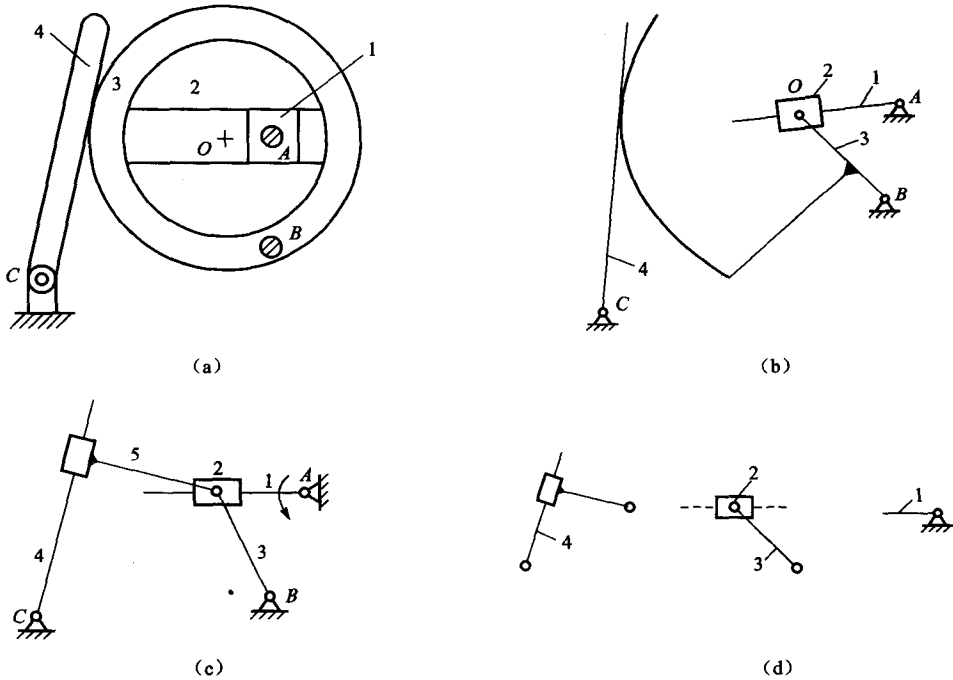


图 2-11 例题 2-1 图

(a) 机构结构简图; (b) 机构运动示意图; (c) 机构高副低代后运动示意图; (d) 杆组分析图

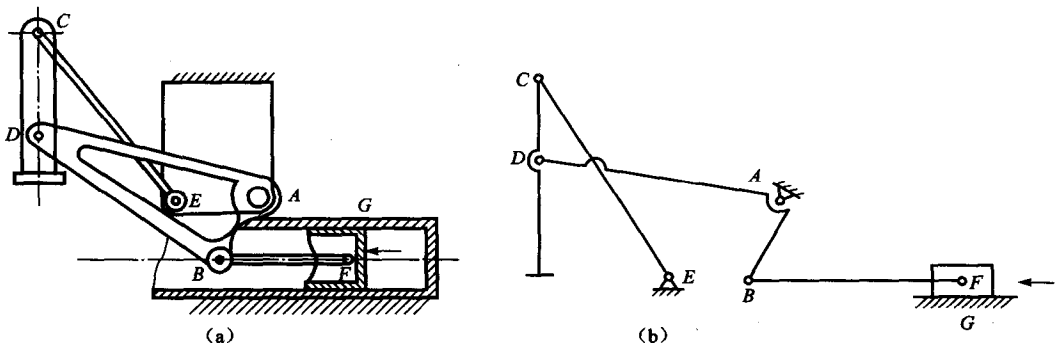


图 2-12 翻台机构

(a) 翻台机构结构简图; (b) 机构运动示意图

(3) 判断机构是否具有确定运动。

解 (1) 图 2-12(a) 机构中, 各构件之间均以低副连接, 选取合适的长度比例尺 μ_l 绘制机构的运动简图。如图 2-12(b) 所示。

(2) 计算机构的自由度。由图 2-12(b) 可知: $n=5, p_L=7$, 因此机构的自由度为

$$F=3n-2p_L-p_H=3 \times 5-2 \times 7=1$$

(3) 该机构有一个原动件, 故该机构具有确定运动。

例题 2-3 计算下列图示机构的自由度(图 2-13), 如有复合铰链、局部自由度和虚约束, 必须指明。

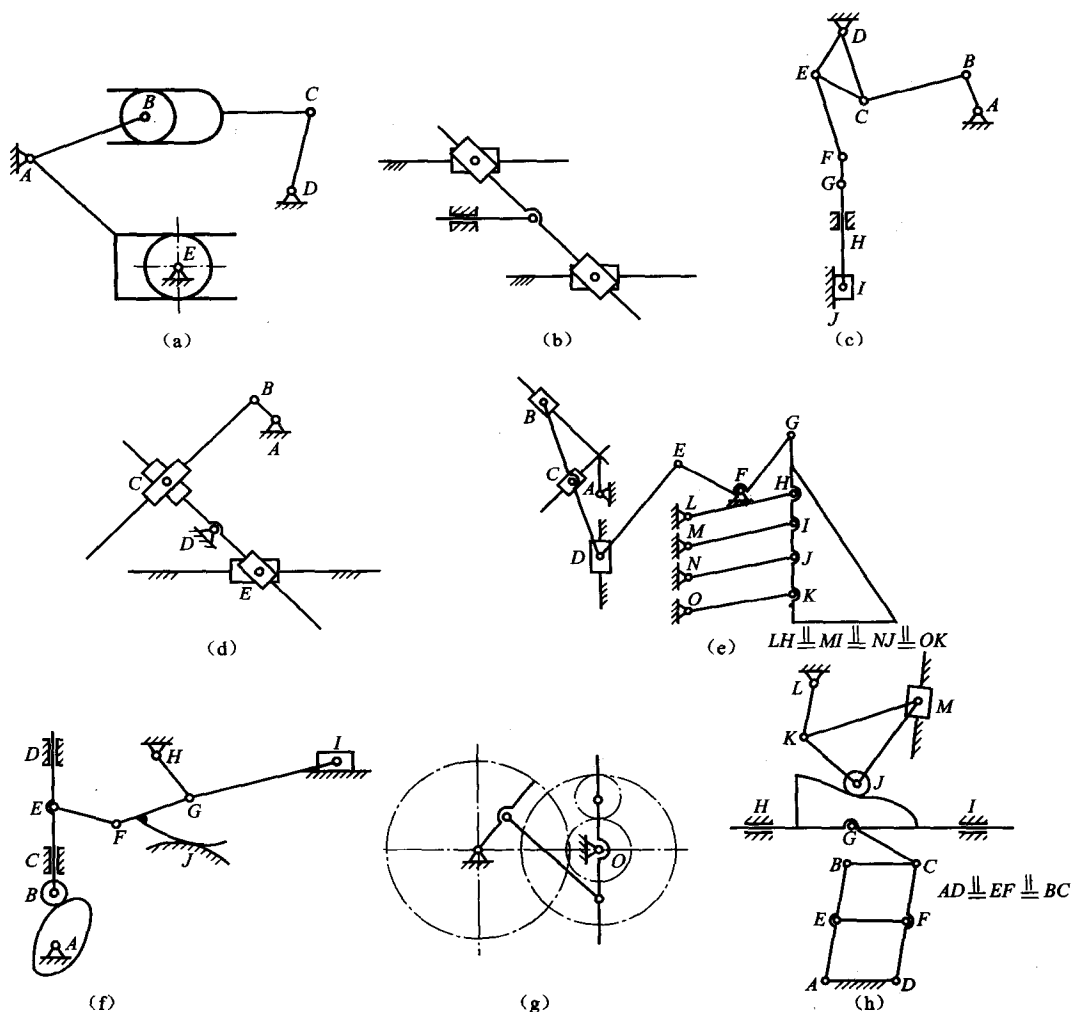


图 2-13 例题 2-3 图

解 (a) 由图中结构知 AB 为固定件, B 处滚子有局部自由度。两边接触处只考虑一边接触, 另一边接触为虚约束, 去掉局部自由度和虚约束后 $n=2, p_L=2, p_H=1$, 故

$$F=3n-2p_L-p_H=3 \times 2-2 \times 2-1=1$$

$$(b) F=3n-2p_L-p_H=3 \times 6-2 \times 8-0=2$$

(c) J 处为虚约束, 需去除。三角形构件 DEC 为一个构件, 所以构件数 $n=6, p_L=8, p_H=0$, 故

$$F=3n-2p_L-p_H=3 \times 6-2 \times 8-0=2$$

$$(d) F=3n-2p_L-p_H=3 \times 7-2 \times 9=3$$

(e) MI, NJ 杆及铰链 M, I, N, J 为虚约束。

$$F=3n-2p_L-p_H=3 \times 10-2 \times 15-0=0$$

因自由度为零, 因此无法运动。

(f) B 为局部自由度; C (或 D) 为虚约束; G 处为复合铰链。