

“十二五”国家重点图书出版规划项目配套教材

# 机械设计基础考研指导书 ——机械原理

焦映厚 闫辉 主编

JIXIE SHEJI JICHU KAOYAN ZHIDAO SHU  
——JIXIE YUANLI



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目配套教材

# 机械设计基础考研指导书 ——机械原理

焦映厚 闫辉 主编

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书是为高等学校本科生复习和考研而编写的“机械原理”课程复习指导书,主要帮助学生解决学习本课程的基本要求、重点和难点等问题。特别是针对“机械原理”课程解题方法和思路较难掌握的特点,本书每章“例题精选与答题技巧”部分列举了大量例题,并给出了详细的解答。为学生指明了解题的要点、思路和方法。

本书主要内容包括:第1章平面机构的结构分析;第2章连杆机构分析和设计;第3章凸轮机构及其设计;第4章齿轮机构及其设计;第5章轮系;第6章其他常用机构;第7章机械的运转及其速度波动的调节;第8章机械的平衡。各章均包括基本要求、内容提要(重点和难点)、例题精选与答题技巧、思考题与习题。

本书附录中给出了哈尔滨工业大学1999~2017年硕士研究生入学考试机械原理试题及2011~2017年硕士研究生入学考试机械原理试题参考答案,供学生复习之用。本书内容全面、重难点突出、例题量大,具有较强的指导性,是一本有效的“机械原理”课程复习和考研指导书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础考研指导书. 机械原理/焦映厚, 闫辉主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2017. 10  
ISBN 978-7-5603-7011-8

I. ①机… II. ①焦… ②闫… III. ①机械设计-研究生-入学考试-自学参考资料 ②机构学-研究生-入学考试-自学参考资料 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 261531 号

策划编辑 黄菊英  
责任编辑 范业婷  
封面设计 卜秉利  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨久利印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.75 字数 410 千字  
版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-7011-8  
定 价 38.80 元



(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

“机械原理”是高等工科大学机械类专业普遍开设的一门重要技术基础课,也是机械类专业硕士研究生入学考试的重要考试科目之一。随着招生规模的不断扩大和选考“机械原理”或“机械设计基础”考生人数的逐年增加,每年都有大量考生要求举办该科目的考试辅导班,并要求购买历年来考研试题或相关复习资料。为了帮助考生系统地复习本门课程,结合几年的教学经验和体会,在参阅大量相关参考书的基础上,编写了这本《机械设计基础考研指导书——机械原理》。本书可有效地指导和帮助本科生与考研究生的同学复习本课程。

考虑到本课程的特点和考生的实际要求,本书与所使用的教材和考研指定参考书配合使用,期望起到辅助和指导的作用。编写本书的目的是帮助考生明确本课程的基本要求、重点和难点,特别是帮助考生解决基本内容自认为比较熟悉或已掌握,但是一作题就感觉较难,甚至有些题目感觉无从下手的问题。针对这一情况,本书在每一章节的“试题精选与答题技巧”部分列举了大量例题,指出了解题要点和详细的解题过程,力图使备考者融会贯通、深刻全面地掌握本门课程的知识点和解题难点,扩大其解题思路,培养分析和解决问题的能力。同时在每章的最后给出了部分思考题和习题,以便考生复习时试作。

本书主要是针对报考哈尔滨工业大学硕士研究生的考生编写的,同时也兼顾了本专科生期末复习备考。要指出的是,近年来随着机械原理课程教学体系改革的深入进行,各高等学校使用教材的不同,同一门课程讲课范围和考试重点还有一些差别。请读者在使用中给予关注。

本书主要与高等教育出版社出版的《机械原理》(王知行等主编)和《机械原理》(孙桓等主编)两本教材配合使用。书中每章内容分为四部分:一、基本要求;二、内容提要(重点和难点);三、试题精选及答题技巧;四、思考题与习题。书后附录部分给出了哈尔滨工业大学1999~2017年硕士研究生入学考试机械原理试题及2011~2017年硕士研究生入学考试机械原理试题参考答案,供学生复习之用。

在本书的编写过程中,李瑰贤教授提供了大量有关参考书,作者真诚地向

李老师表示感谢。

特别是在本书的编写和出版过程中,得到了哈尔滨工业大学国家机械基础教学基地的立项支持;同时得到了陈明教授、陈照波教授、李明章副教授等同志的鼓励、支持和帮助,在此一并表示深深的谢意。

由于作者水平有限,书中一定存在不妥和遗漏之处,恳请读者批评指正。

作者

2017年8月

# 目 录

<b>第1章 平面机构的结构分析</b>	
1.1 基本要求 .....	(1)
1.2 内容提要 .....	(1)
1.3 例题精选与答题技巧 .....	(4)
1.4 思考题与习题 .....	(10)
<b>第2章 连杆机构分析和设计</b>	
2.1 基本要求 .....	(13)
2.2 内容提要 .....	(13)
2.3 例题精选与答题技巧 .....	(21)
2.4 思考题与习题 .....	(41)
<b>第3章 凸轮机构及其设计</b>	
3.1 基本要求 .....	(46)
3.2 内容提要 .....	(46)
3.3 例题精选与答题技巧 .....	(52)
3.4 思考题与习题 .....	(60)
<b>第4章 齿轮机构及其设计</b>	
4.1 基本要求 .....	(65)
4.2 内容提要 .....	(65)
4.3 例题精选与答题技巧 .....	(69)
4.4 思考题与习题 .....	(98)
<b>第5章 轮系</b>	
5.1 基本要求 .....	(102)
5.2 内容提要 .....	(102)
5.3 例题精选与答题技巧 .....	(105)
5.4 思考题与习题 .....	(117)
<b>第6章 其他常用机构</b>	
6.1 基本要求 .....	(121)
6.2 内容提要 .....	(121)
6.3 例题精选与答题技巧 .....	(123)
6.4 思考题与习题 .....	(125)
<b>第7章 机械的运转及其速度波动的调节</b>	
7.1 基本要求 .....	(127)

7.2	内容提要 .....	(127)
7.3	例题精选与答题技巧 .....	(129)
7.4	思考题与习题 .....	(142)
<b>第8章 机械的平衡</b>		
8.1	基本要求 .....	(146)
8.2	内容提要 .....	(146)
8.3	例题精选与答题技巧 .....	(148)
8.4	思考题与习题 .....	(163)
<b>附录 哈尔滨工业大学 1999 ~ 2017 年硕士研究生入学考试试题及部分参考答案</b>		
1999	年硕士研究生入学考试试题 .....	(166)
2000	年硕士研究生入学考试试题 .....	(168)
2001	年硕士研究生入学考试试题 .....	(171)
2002	年硕士研究生入学考试试题 .....	(174)
2003	年硕士研究生入学考试试题 .....	(177)
2004	年硕士研究生入学考试试题 .....	(180)
2005	年硕士研究生入学考试试题 .....	(184)
2006	年硕士研究生入学考试试题 .....	(188)
2007	年硕士研究生入学考试试题 .....	(192)
2008	年硕士研究生入学考试试题 .....	(195)
2009	年硕士研究生入学考试试题 .....	(201)
2010	年硕士研究生入学考试试题 .....	(204)
2011	年硕士研究生入学考试试题 .....	(209)
2011	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(214)
2012	年硕士研究生入学考试试题 .....	(222)
2012	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(227)
2013	年硕士研究生入学考试试题 .....	(231)
2013	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(236)
2014	年硕士研究生入学考试试题 .....	(241)
2014	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(246)
2015	年硕士研究生入学考试试题 .....	(254)
2015	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(260)
2016	年硕士研究生入学考试试题 .....	(266)
2016	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(268)
2017	年硕士研究生入学考试试题 .....	(272)
2017	年硕士研究生入学考试试题参考答案 .....	(274)
<b>参考文献 .....</b>		<b>(278)</b>

# 第1章 平面机构的结构分析

## 1.1 基本要求

- (1) 掌握组成机构的零件、构件、运动副、运动链及机构的基本概念和联系。掌握运动副的常用类型及特点。
- (2) 掌握常用机构构件和运动副的简图符号及机构运动简图的绘制方法。
- (3) 掌握机构自由度的意义和机构具有确定运动的条件;掌握平面机构自由度的计算公式,并正确识别出机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束,并做出正确处理。
- (4) 掌握机构的组成原理和结构分析方法,重点掌握用基本杆组法进行机构的结构分析。

## 1.2 内容提要

### 1.2.1 本章重点

有关机构组成中的构件、运动副、运动链及机构等概念;机构具有确定运动的条件,机构运动简图的绘制和平面机构自由度的计算;机构的组成分析和机构的级别判别。

#### 1. 机构组成的基本概念及机构具有确定运动的条件

构件是机构运动的单元体,是组成机构的基本要素。而零件是制造的单元体。实际的构件可以是一个零件,也可以是由若干个零件固连在一起组成的一个独立运动的整体,是机构运动的单元体。

运动副是由两构件直接接触而又能产生一定相对运动的可动连接,也是组成机构的又一基本要素。把两构件参与接触而构成运动副的部分,称为运动副元素。运动副可按其接触形式,分为高副(即点或线接触的运动副)和低副(面接触的运动副);又可按所能产生相对运动的形式,分为转动副、移动副、螺旋副及球面副等。由于两构件构成运动副之后,它们之间能产生何种相对运动是决定于该运动副所引入约束的情况,所以运动副常根据其所引入约束的数目,分为 I 级副、II 级副、III 级副、IV 级副、V 级副五类,如表 1.1 所示。

运动链是由两个或两个以上构件通过运动副连接而构成的相对可动的系统。如果运动链中构件构成首末封闭的系统,则称为闭式链,否则称为开式链。



表 1.1 常用运动副及其简图

名称	图 形	简图符号	副级	自由度	名称	图 形	简图符号	副级	自由度
球面高副			I	5	圆柱套简副			IV	2
柱面高副			II	4	转动副			V	1
球面低副			III	3	移动副			V	1
球销副			IV	2	螺旋副			V	1

如果将运动链中的一个构件固定作为参考系,则这种运动链就成为机构。从结构功能来理解,机构是一种用来传递运动和力的可动装置;从机器的特征来看,机构是具有相对运动规律的构件组合;而从机构组成来看,机构是具有固定构件的运动链。机构中的固定构件,称为机架;按给定已知运动规律独立运动的构件,称为原动件;而其余活动构件,称为从动件。从动件的运动规律决定于原动件的运动规律和机构的结构。

机构的自由度是机构具有确定位置时所必须给定的独立运动参数数目。在机构中引入独立运动参数的方式,通常是使其原动件按给定的某一运动规律运动,所以,可以认为机构的自由度也就是机构应当具有的原动件数目。机构的自由度  $F$ 、机构原动件的数目和机构的运动有着密切的关系:① 若机构自由度  $F \leq 0$ ,则机构不能动;② 若  $F > 0$ ,且与原动件数相等,则机构各构件间的相对运动是确定的,因此,机构具有确定运动的条件是:机构的原动件数等于机构的自由度;③ 若  $F > 0$ ,而原动件数小于  $F$ ,则构件间的运动是不确定的;④ 若  $F > 0$ ,而原动件数大于  $F$ ,则构件间不能运动或产生破坏。

## 2. 机构运动简图的绘制

为了便于研究机构的运动,可以撇开构件、运动副的外形和具体构造,而只用简单的线条和符号代表构件和运动副,并按比例定出各运动副的位置,表示机构的组成和传动情况。这样绘制出能够准确表达机构运动特性的简明图形,就称为机构运动简图。机构运动简图与原机构具有完全相同的运动特性,就可以根据运动简图对机构进行运动分析和动力分析。

有时,只是为了表明机构的运动状态或各构件的相互关系,也可以不按比例来绘制运动简图,通常把这样的简图称为机构示意图。

表 1.2 中给出了绘制机构运动简图时的常用机构示意图代表符号(摘自 GB 4460—2013)。

表 1.2 常用机构示意图代表符号

	两运动构件形成的运动副		两构件之一为机架时所形成的运动副	
转动副				
移动副				
构件	二副元素构件	三副元素构件		多副元素构件
凸轮及其他机构	凸轮机构	棘轮机构		带传动
齿轮机构	外齿轮	内齿轮	圆锥齿轮	蜗杆蜗轮

绘制机构运动简图时应注意的问题:

(1) 必须搞清楚机械的实际构造和运动情况。首先确定机构的原动件和执行构件,两者之间为传动部分,由此确定组成机构的所有构件,然后确定构件间运动副的类型。

(2) 恰当地选择投影面。一般选择与多数构件的运动平面相平行的面为投影面,必要时也可以就机械的不同部分选择两个或两个以上的投影面,然后展开到同一平面上。

(3) 做完上述准备工作之后,便可选择适当的比例尺,根据机构的运动尺寸定出各运动副之间的相对位置,然后用规定的符号画出各类运动副,并将同一构件上的运动副符号用简单线条连接起来,这样便可绘制出机构的运动简图。总之,绘制机构运动简图要以正确、简单、清晰为原则。

### 3. 机构自由度的计算

平面机构自由度的计算公式

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (1.1)$$

式中  $n$ ——机构中活动构件的数目;

$P_L$ ——机构中低副的数目;

$P_H$ ——机构中高副的数目。

在计算机构自由度时,应特别注意处理好以下三种情况:

(1) 复合铰链。由两个以上构件在同一处构成的重合转动副,称为复合铰链。由  $m$  个构件汇集而成的复合铰链应当包含  $(m-1)$  个转动副。

(2) 局部自由度。在一些机构中某些构件所产生的不影响整个机构运动的局部运动的自由度,称为局部自由度。在计算机构自由度时,局部自由度应当舍弃不计。即在计算自由度时,可以将产生局部自由度的构件视为焊成一体,然后进行计算。

(3) 虚约束。在运动副所加的约束中,有些约束所起的限制作用可能是重复的,这种不起独立限制作用的约束,称为虚约束。计算机构自由度时,应在计算结果中加上虚约束数;或先将产生虚约束的构件和运动副去掉,然后再进行计算。

### 1.2.2 本章难点

本章难点是机构自由度计算中有关虚约束的识别和处理问题。

常见的虚约束有以下几种情况:

(1) 当两构件组成多个移动副,且其导路互相平行或重合时,则只有一个移动副起约束作用,其余都是虚约束。

(2) 当两构件构成多个转动副,且轴线互相重合时,则只有一个转动副起作用,其余转动副都是虚约束。

(3) 如果机构中两活动构件上某两点的距离始终保持不变,此时若用具有两个转动副的附加构件来连接这两个点,则将会引入一个虚约束;必须注意,为使两动点间的距离始终保持不变,除要求它们具有相同的轨迹之外,还必须有相同的运动规律。

(4) 机构中对运动起重复限制作用的对称部分也往往会引入虚约束。

## 1.3 例题精选与答题技巧

**【例 1.1】** 图 1.1(a) 所示为牛头刨床设计方案草图。设计思路为:动力由曲柄 1 输入,通过滑块 2 使摆动导杆 3 做往复摆动,并带动滑枕 4 做往复移动,以达到刨削的目的。试问图示的构件组合是否能达到此目的? 如果不能,该如何修改?

**解题要点:**

① 增加一个低副和一个活动构件;

② 用一个高副代替低副。

**【解】** 首先根据图 1.1(a) 所示方案草图计算自由度,即

$$n=4 \quad P_L=6 \quad P_H=0$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 4-2 \times 6=0$$

说明如果按此方案设计不能成为机构,是不能运动的。必须做修改,以达到设计的目的。

修改方案如图 1.1(b) ~ 1.1(i) 所示。

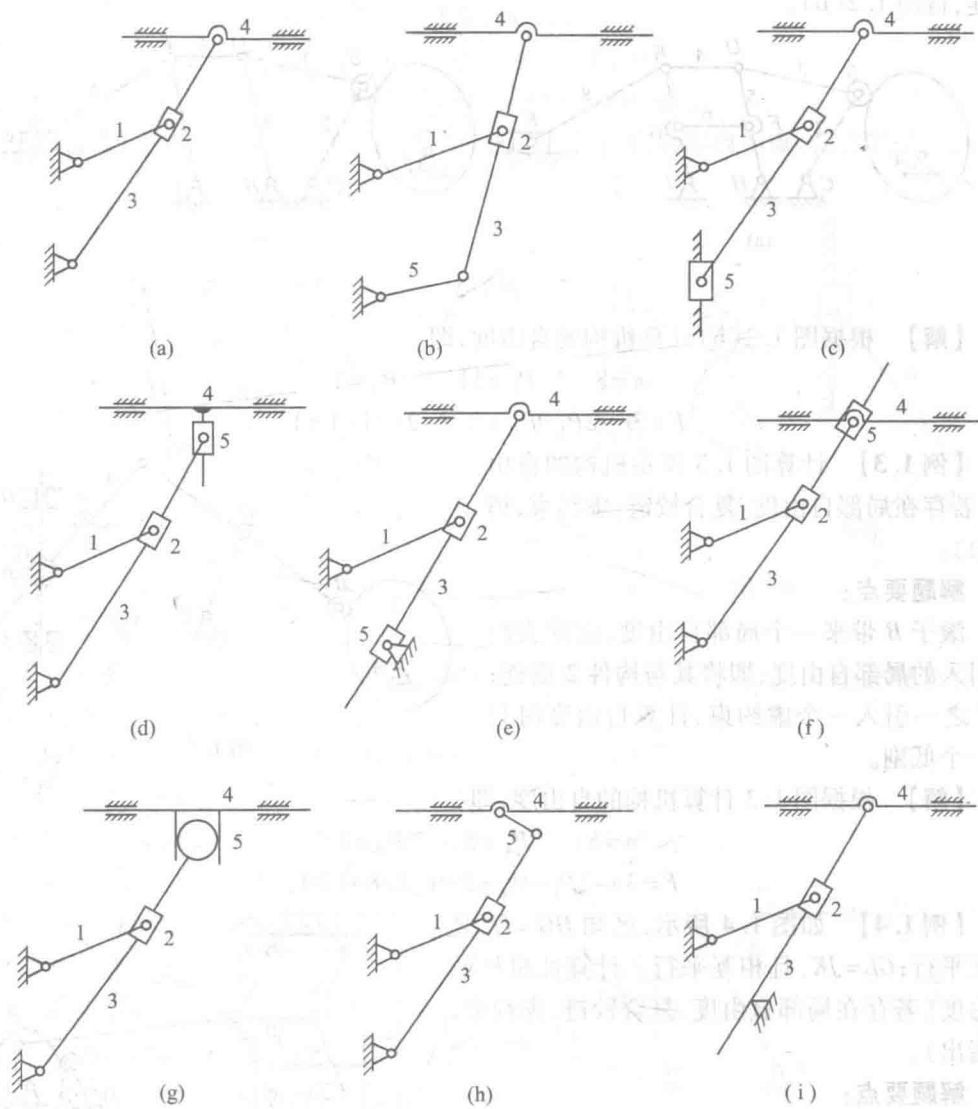


图 1.1

【例 1.2】如图 1.2(a) 所示, 已知  $DE = FG = HI$ , 且相互平行;  $DF = EG$ , 且相互平行;  $DH = EI$ , 且相互平行。计算此机构的自由度 (若存在局部自由度、复合铰链、虚约束, 请指出)。

解题要点:

这是同时具有复合铰链、局部自由度和虚约束的典型例题。计算自由度时, 要注意  $D$ 、 $E$  为复合铰链; 滚子绕自身几何中心  $B$  的转动自由度为局部自由度; 由于  $DFHIGE$  的特殊几何关系, 构件  $FG$  的存在只是为了改善平行四边形  $DHIE$  的受力状况等目的, 对整个机构的受力不起约束作用, 故  $FG$  杆及其两端的转动副所引入的约束为虚约束。在计算机构自由度时, 除去  $FG$  杆及其带人的约束、除去滚子引入的局部自由度, 并将其与杆 2



【解】 根据图 1.5 计算机机构的自由度,即

$$n=7 \quad P_L=10 \quad P_H=0$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 7-2 \times 10=1$$

【例 1.6】 计算如图 1.6 所示机构的自由度(若存在局部自由度、复合铰链、虚约束,请指出)。

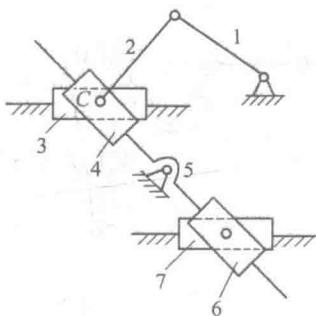


图 1.5

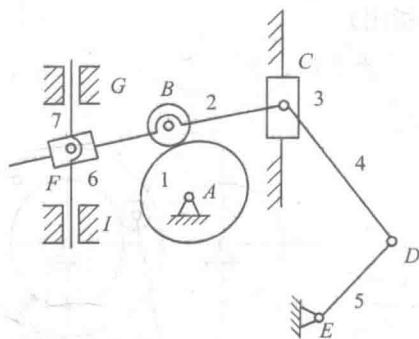


图 1.6

解题要点:

$C$  为复合铰链; $G$ 、 $I$  之一为虚约束;滚子  $B$  带来一个局部自由度,应除去滚子引入的局部自由度,即将其与构件 2 固连。

【解】 根据图 1.6 计算机机构的自由度,即

$$n=7 \quad P_L=9 \quad P_H=1$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 7-2 \times 9-1=2$$

【例 1.7】 计算如图 1.7 所示机构的自由度, $GI=HI=IJ$ (若存在局部自由度、复合铰链、虚约束,请指出)。

解题要点:

$D$  为复合铰链; $HI$  或滑块 9 之一为虚约束;滚子  $B$  带来一个局部自由度,应除去滚子引入的局部自由度,即将其与构件 2 固连。

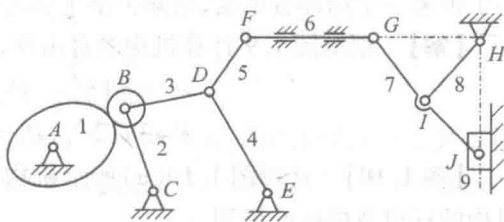


图 1.7

【解】 根据图 1.7 计算机机构的自由度,即

$$n=8 \quad P_L=11 \quad P_H=1$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 8-2 \times 11-1=1$$

【例 1.8】 计算如图 1.8 所示机构的自由度, $\triangle ECF \cong \triangle HDG$ ,且  $FCDG$  为平行四边形(若存在局部自由度、复合铰链、虚约束,请指出)。

解题要点:

$G$  为复合铰链; $CD$  为虚约束;滚子  $B$  带来一个局部自由度,应除去滚子引入的局部自由度,即将其与构件 2 固连。

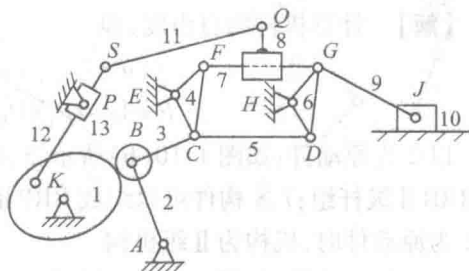


图 1.8

【解】 根据图 1.8 计算机构的自由度,即

$$n=12 \quad P_L=17 \quad P_H=1$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 12-2 \times 17-1=1$$

【例 1.9】 如图 1.9 所示,已知  $AD \parallel BE \parallel CF$ , 并且  $AD=BE=CF$ ;  $LN=MN=NO$ , 构件 1、2 为齿轮, 且齿轮 2 与凸轮 10 固连。试计算其自由度 (若存在局部自由度、复合铰链、虚约束, 请指出)。

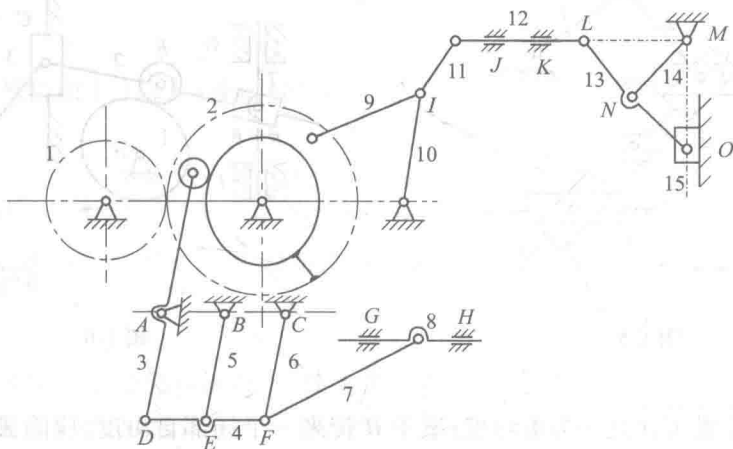


图 1.9

解题要点:

$F$ 、 $I$  为复合铰链;  $BE$ 、 $MN$  或滑块 15 之一为虚约束,  $G$ 、 $H$  之一及  $J$ 、 $K$  之一为虚约束; 滚子带来一个局部自由度, 应除去滚子引入的局部自由度, 即将其与构件 3 固连。

【解】 根据图 1.9 计算机构的自由度, 即

$$n=13 \quad P_L=18 \quad P_H=2$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 13-2 \times 18-2=1$$

【例 1.10】 计算图 1.10(a) 所示机构的自由度, 分别以构件 2、4、8 为原动件, 确定机构的杆组及机构的级别。

解题要点:

正确区分 II 或 III 级杆组。

【解】 计算机构的自由度, 即

$$n=7 \quad P_L=10 \quad P_H=0$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 7-2 \times 10-0=1$$

以 2 为原动件: 如图 1.10(b) 所示, 3、4 构件可以组成 RRP II 级杆组; 5、6 构件可以组成 RRR II 级杆组; 7、8 构件可以组成 RRP II 级杆组。该机构的基本杆组最高级为 II 级, 故以 2 为原动件时, 机构为 II 级机构。

以 4 为原动件: 如图 1.10(c) 所示, 2、3 构件可以组成 RRR II 级杆组; 5、6 构件可以组成 RRR II 级杆组; 7、8 构件可以组成 RRP II 级杆组。该机构的基本杆组最高级为 II 级, 故以 4 为原动件时, 机构为 II 级机构。

以 8 为原动件:如图 1.10(d)所示,6,7 构件可以组成 RRR II 级杆组;2,3,4,5 构件可以组成 III 级杆组;该机构的基本杆组最高级为 III 级,故以 8 为原动件时,机构为 III 级机构。

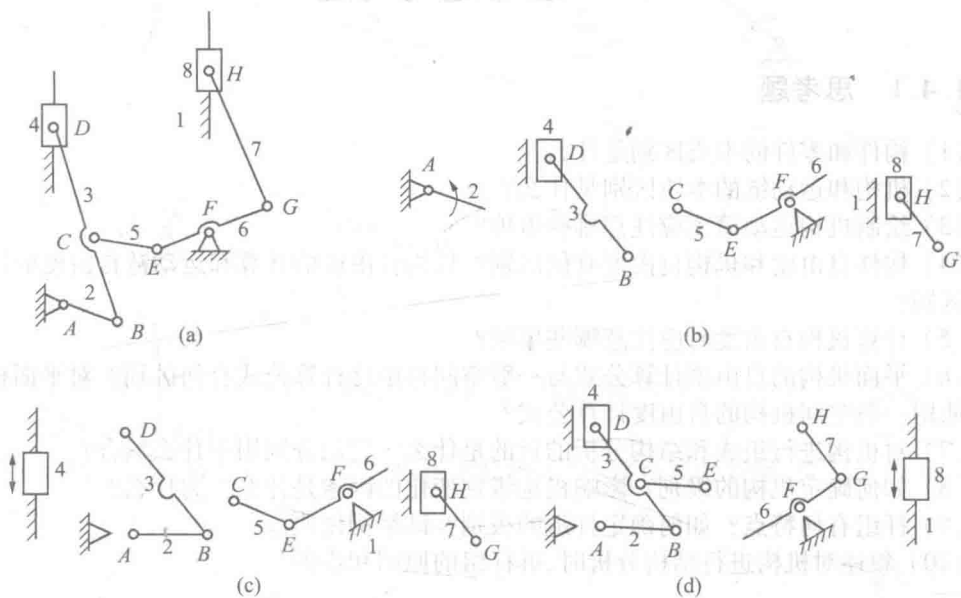


图 1.10

**【例 1.11】** 计算图 1.11(a)所示机构的自由度,并确定机构的杆组及机构的级别。

**解题要点:**

正确区分 II 级或 III 级杆组。

**【解】** 计算机构的自由度,即

$$n=9 \quad P_L=13 \quad P_H=0$$

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 9-2 \times 13-0=1$$

如图 1.11(b)所示,2,3 构件可以组成 RRR II 级杆组;4,5,6,7 构件可以组成 III 级杆组;8,9 构件可以组成 RRR II 级杆组;该机构的基本杆组最高级为 III 级,故机构为 III 级机构。

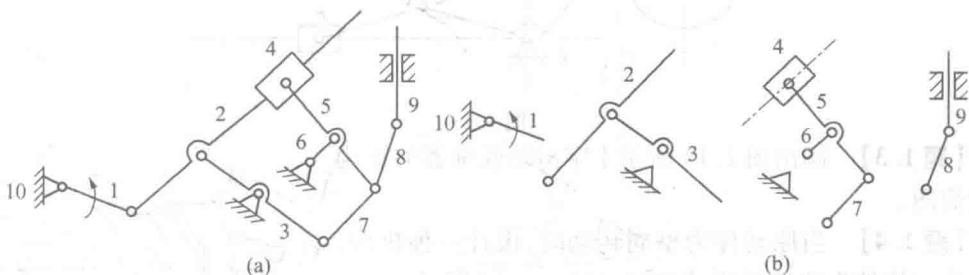


图 1.11



## 1.4 思考题与习题

### 1.4.1 思考题

- (1) 构件和零件的本质区别是什么?
- (2) 机构和运动链的本质区别是什么?
- (3) 绘制机构运动简图应注意哪些事项?
- (4) 构件自由度和机构自由度有何区别? 机构自由度的计算和运动链自由度的计算有何区别?
- (5) 计算机构自由度时应注意哪些事项?
- (6) 平面机构的自由度计算公式与一般空间自由度计算公式有何区别? 对平面机构能否使用一般空间机构的自由度计算公式?
- (7) 对机构进行组成和结构分析的目的是什么? 它们分别用于什么场合?
- (8) 如何确定机构的级别? 影响机构级别变化的因素是什么? 为什么?
- (9) 杆组有何特点? 如何确定杆组的级别? 试举例说明。
- (10) 叙述对机构进行结构分析时, 拆杆组的原则和步骤。

### 1.4.2 习题

【题 1.1】 试验算如图 1.12 所示机构的运动是否确定? 如果机构的运动不确定, 请提出使此机构具有确定运动的修改方案。

【题 1.2】 计算图 1.13 所示机构的自由度, 机构中  $CD=DE=DF$ ,  $EC \perp CF$ 。若机构中有复合铰链、局部自由度、虚约束, 请在图中标出。

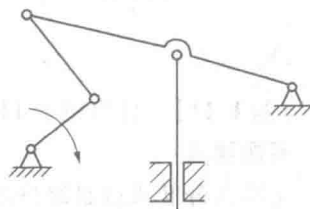


图 1.12

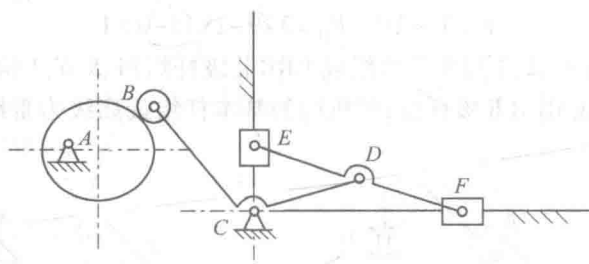


图 1.13

【题 1.3】 画出图 1.14 所示十字滑块联轴器的机构运动简图。

【题 1.4】 当原动件为整周转动时, 设计一种机构, 使其执行构件为往复摆动, 如图 1.15(a)、(b) 所示。

当原动件为整周转动时, 设计一种机构使其执行构件为往复直线运动, 如图 1.15(c)、(d) 所示。

【题 1.5】 如图 1.16 所示机构中, 已知  $ML$  与  $ON$  平

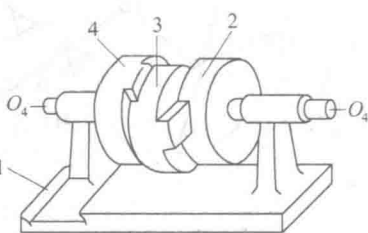


图 1.14