

■ 大学公共课系列教材

机械原理学习指导与解题范例

JIXIE
YUANLI XUEXI ZHIDAO YU JIETI FANLI

李滨城 李纯金◎主 编

DAXUE GONGGONGKE XILIE JIAOCAI



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

■ 大学公共课系列教材

机械原理学习指导与解题范例

J
IXIE
YUANLI XUEXI ZHIDAO YU JIETI FANLI

李滨城 李纯金◎主 编



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械原理学习指导与解题范例 / 李滨城, 李纯金主编 — 北京: 北京师范大学出版社, 2011.2
ISBN 978-7-303-12102-1

I. ①机… II. ①李…②李… III. ①机构学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TH111

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第017167号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街19号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京中印联印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 13
字 数: 221 千字
版 次: 2011 年 2 月第 1 版
印 次: 2011 年 2 月第 1 次印刷
定 价: 24.00 元

策划编辑: 范 林	责任编辑: 范 林
美术编辑: 毛 佳	装帧设计: 毛 佳
责任校对: 李 菡	责任印制: 李 啸

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

内容简介

本书是对第 1 版进行修订而成的，修订依据是教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会制定的“机械原理课程教学基本要求”和“机械原理课程教学改革建议”的精神，以及近几年来教学改革实践的经验。

本书共分 11 章，包括机构的结构分析、平面机构的运动分析、机械中的摩擦和机械效率、平面连杆机构及其设计、凸轮机构及其设计、齿轮机构及其设计、齿轮系及其设计、其他常用机构、机械的运转及其速度波动的调节、机械的平衡和计算机在机构分析与设计中的应用。每章按内容提要、本章重点、典型例题、复习思考题、习题五个部分编写。最后，附录给出了第 11 章典型例题的源程序。

本书可作为高等工科院校机械类、机电类、近机类专业师生学习“机械原理”、“机械设计基础”等课程的辅助教材，可供机械工程技术人员和自学机械原理与设计课程的人员参考，对考研人员具有很好的辅导作用，对青年教师备课也有帮助。

前言

机械原理课程是高等院校机械类专业普遍开设的一门重要的技术基础课程,在培养机械类高级技术人才的全局中起着十分重要的作用,具有很强的理论性、基础性和延续性,本课程在机械类各个专业教学计划中都占有十分重要的地位。学习中应注重理论结合实际,在扎实掌握本课程的基本理论、基本知识和基本技能的基础上,提高解决基本理论问题和工程实践问题的能力,锻炼计算机等现代工具的应用能力。

本书内容丰富,实用性强。为帮助学生更好地学习本课程,掌握知识和提高能力,我们根据多年的教学经验编写本书,引导学生深入地了解 and 掌握各章主要内容、要求、特点和难点,形成行之有效的学习方法,取得更好的学习效果。本书共 11 章,每章内容包括内容提要、本章重点、典型例题、复习思考题、习题五个部分。本书总结说明了本课程中学生应掌握的有关基本概念、基本理论和典型机构分析与设计的基本方法。通过若干典型例题的详细分析求解,使学生掌握不同类型题目的解题方法和解题技巧,培养学生分析问题和解决问题的能力。书中还安排了一定数量的复习思考题和习题,目的在于帮助学生巩固所学知识,进一步加深对本课程内容的理解。最后,附录给出了第 11 章典型例题的源程序。

本书可作为教师组织辅导课、习题课的依据,同时可作为本科、专科大学生学习机械原理课程的主要参考书,也可作为报考研究生者的复习资料。

参加本书编写工作的有李滨城（第2章、第11章、附录），李纯金（第1章、第4章、第5章），徐超（第3章、第6章、第10章），刘志强（第7章），王淑妍（第8章）和田桂中（第9章）。全书由李滨城和李纯金统稿。

由于编者水平所限，书中疏漏和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2010年12月

目 录

第 1 章 机构的结构分析	(1)
一、内容提要	(1)
二、本章重点	(1)
三、典型例题	(5)
四、复习思考题	(11)
五、习 题	(11)
 第 2 章 平面机构的运动分析	(16)
一、内容提要	(16)
二、本章重点	(16)
三、典型例题	(22)
四、复习思考题	(35)
五、习 题	(35)
 第 3 章 机械中的摩擦和机械效率	(43)
一、内容提要	(43)
二、本章重点	(43)
三、典型例题	(47)
四、复习思考题	(52)
五、习 题	(53)

第 4 章	平面连杆机构及其设计	(60)
一、	内容提要	(60)
二、	本章重点	(60)
三、	典型例题	(64)
四、	复习思考题	(70)
五、	习 题	(71)
第 5 章	凸轮机构及其设计	(77)
一、	内容提要	(77)
二、	本章重点	(77)
三、	典型例题	(82)
四、	复习思考题	(86)
五、	习 题	(87)
第 6 章	齿轮机构及其设计	(93)
一、	内容提要	(93)
二、	本章重点	(93)
三、	典型例题	(101)
四、	复习思考题	(107)
五、	习 题	(109)
第 7 章	齿轮系及其设计	(114)
一、	内容提要	(114)
二、	本章重点	(114)
三、	典型例题	(118)
四、	复习思考题	(123)
五、	习 题	(124)

第 8 章 其他常用机构	(128)
一、内容提要	(128)
二、本章重点	(128)
三、典型例题	(132)
四、复习思考题	(133)
五、习 题	(134)
第 9 章 机械的运转及其速度波动的调节	(138)
一、内容提要	(138)
二、本章重点	(138)
三、典型例题	(143)
四、复习思考题	(147)
五、习 题	(148)
第 10 章 机械的平衡	(155)
一、内容提要	(155)
二、本章重点	(155)
三、典型例题	(157)
四、复习思考题	(160)
五、习 题	(160)
第 11 章 计算机在机构分析与设计中的应用	(167)
一、内容提要	(167)
二、本章重点	(167)
三、典型例题	(170)
四、习 题	(180)
附 录	(183)
附录 1 铰链四杆机构的运动分析程序清单	(183)
附录 2 铰链六杆机构的运动分析程序清单	(186)
附录 3 偏置直动滚子推杆盘形凸轮轮廓的设计程序清单	(193)
附录 4 摆动滚子推杆盘形凸轮轮廓的设计程序清单	(196)

第1章 机构的结构分析

一、内容提要

- (一)机构的组成
- (二)机构运动简图
- (三)平面机构的自由度
- (四)平面机构组成原理及结构分析

二、本章重点

(一)机构的组成

1. 构件

机器是由零件经装配成构件的组合体。构件是机器中独立的运动单元体，是组成机构的基本要素，而零件则是机器中制造的基本单元体。构件可能是一个零件，考虑到结构和工艺性，构件也可能是由几个零件刚性连接在一起的。

2. 运动副

两个构件直接接触形成的可动连接部分称为运动副，它是组成机构的又一基本要素。两构件接触的几何元素称为运动副元素(点、线、面)。两构件用运动副连接后至少会失去一个相对的运动形式，也至少保留一个相对运动形式，至于失去与保留的运动形式和数目要看运动副的类型。

运动副分类：

(1)按运动副所引入的约束数目分：引入1个约束的运动副称为Ⅰ级副，引入2个约束的运动副称为Ⅱ级副，依此类推，还有Ⅲ级副、Ⅳ级副和Ⅴ级副。

(2)按运动副元素分：凡两构件通过点或线接触而构成的运动副统称为高副；而两构件通过面接触而构成的运动副则称为低副。

(3)按保留的相对运动形式分:转动副(或称回转副、铰链);移动副(或称棱柱副);螺旋副;球面副。

此外,把构成运动副的两构件之间的相对运动为平面运动的运动副统称为平面运动副,两构件之间的相对运动为空间运动的运动副统称为空间运动副。

3. 运动链

运动链是两个或两个以上的构件通过运动副连接而成的相对可动的系统。根据运动链中各构件的相对运动形式可分为空间运动链和平面运动链。若系统是首尾封闭的,则称为闭链,否则称为开链。若构成的是相对不可动的系统,则称为桁架或结构体,可视为一个构件。

4. 机构

机构是用来传递运动和动力的构件系统。如将运动链中某一构件加以固定,则该运动链变成为机构。机构中固定的构件或相对固定的构件称为机架,按给定的已知运动规律独立运动的构件称为原动件,而其余随原动件运动的活动构件称为从动件。

(二)机构运动简图

用简单的线条和规定的符号来代表构件和运动副,并且按一定的比例定出各运动副的相对位置,以表示机构运动传递情况的简化图形称为机构运动简图。由于机构的运动仅与机构中运动副的类型和各运动副的相对位置有关,而与各构件的形状大小无关,所以机构运动简图能够准确表达机构运动特性,并可进行力分析。设计机构就是确定其运动方案和定出各构件的运动尺寸,即设计机构运动简图。

如果只是为了表明机构的结构特性和工作原理而简单绘制的图(没有按比例绘)称之为机构示意图。

机构运动简图绘制步骤和方法如下:

- (1)首先弄清所要绘制机械的结构和动作原理;
- (2)从原动件开始,按运动传递的顺序,分析各构件之间相对运动性质,确定运动副的类型和数目;
- (3)合理选择视图平面,通常选择与大多数构件的运动平面相平行的平面;
- (4)选取适当的比例尺 $[\mu_l = \text{实际尺寸(m)}/\text{图上长度(mm)}]$ 进行绘图。

(三) 平面机构的自由度

机构的自由度是指机构中各构件相对于机架所能有的独立运动数目(或能够确定机构位置的广义坐标数目)。

机构具有确定运动的条件是: 机构自由度要大于零, 并且原动件数等于机构自由度数。

平面机构自由度的计算式为

$$F = 3n - (2P_l + P_h)$$

式中, F ——机构的自由度;

n ——机构中活动构件数目;

P_l ——机构中低副数目;

P_h ——机构中高副数目。

要正确计算机构自由度, 必须正确判断机构中 n 、 P_l 和 P_h 的数目, 因此, 计算平面机构自由度时应注意的事项有:

1. 正确计算运动副的数目

(1) $m(m > 2)$ 个构件同在一处以转动副连接时, 则构成复合铰链, 其转动副数目应为 $m-1$ 个。

(2) 如果两构件在多处接触而构成移动副, 且移动方向彼此平行或重合, 则只能算 1 个移动副。

(3) 如果两构件在多处相配合而构成转动副, 且转动轴线重合, 则只能算 1 个转动副。

(4) 如果两构件在多处相接触而构成平面高副, 且各接触点处的公法线彼此重合, 则只能算 1 个平面高副。如各接触点处的公法线方向并不彼此重合, 则应算 2 个高副(相当 1 个低副)。

2. 除去局部自由度

在机构中如某些构件所产生的局部运动, 并不影响其他构件的运动, 称这种局部运动的自由度为局部自由度。含有局部自由度的机构自由度应为

$$F = 3n - (2P_l + P_h) - F'$$

式中, F' ——机构的局部自由度数。

3. 除去虚约束

在机构中，有些运动副带入的约束对机构的运动起重复约束作用，我们称之为虚约束。

虚约束常出现于以下几种情况：

(1)若两构件上某两点之间的距离始终保持不变，又用双转动副杆将此两点相连，这样就带入1个虚约束。

(2)用转动副连接的是两构件上运动轨迹相重合的点，则该转动副引入1个虚约束。

(3)在机构中，输入构件和输出构件之间用多组完全相同的运动链来传递运动时，只有一组起独立传递运动作用，其余各组重复部分带入虚约束。

需要注意的是，虚约束都是在一些特定的几何条件下出现的，如果加工及安装误差太大，破坏了特定的几何条件，虚约束就变为实际约束，就会改变机构的自由度，导致机构无法运动。而机构设计引入虚约束是为了增加构件的刚性，改善其受力状况。

(四)平面机构的组成原理及结构分析

1. 平面机构中的高副低代

为了使对平面低副机构的研究适合所有平面机构，根据一定条件把机构中的高副虚拟地以低副代替，这样所有对平面机构的研究，可归结为对平面低副机构的研究。高副低代必须满足的条件如下：

(1)代替前后机构的自由度不变；

(2)代替前后机构的瞬时速度和瞬时加速度不变。

代替方法是用两个转动副和一个构件来代替一个高副，这两个转动副分别处在高副两轮廓接触点的曲率中心处。如果两个接触轮廓之一为点，因点可看成半径无穷小的圆，所以该轮廓曲率中心就是该点。如果两个接触轮廓之一为直线，因直线的曲率中心在无穷远处，所以该转动副演化成移动副。

2. 平面机构的组成原理

不可再分的自由度为零的运动链称为基本杆组。杆组的级别是由杆组中包含的最高级别封闭多边形来确定的，常见的有Ⅱ级杆组和Ⅲ级杆组。任何机构

都可以看成是由若干个基本杆组依次连接于原动件和机架上而构成的，这就是机构组成原理。

3. 平面机构的结构分析

机构结构分析的目的是为了了解机构的组成，并确定机构的级别，便于对机构进行运动分析和力分析。

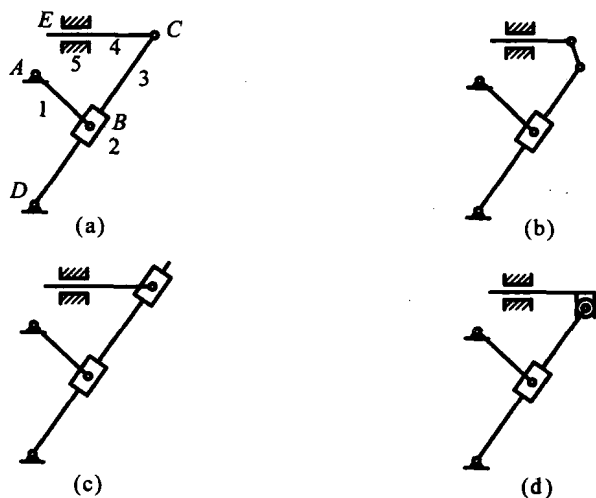
结构分析的过程与由杆组依次组成机构的过程正好相反，因此通常也把它称为拆杆组。拆分步骤如下：

- (1) 机构中的高副全部低代，计算机构自由度，确定原动件(用箭头标出)；
- (2) 从远离原动件的构件开始拆杆组，先拆Ⅱ级杆组，若不成，再拆Ⅲ级杆组。

机构的级别是由拆分下的最高级别杆组决定的。同一机构因所取的原动件不同，有可能成为不同级别的机构。

三、典型例题

例 1-1 图(a)所示为牛头刨床的一个机构设计方案简图。设计者的意图是动力由曲柄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往复移动以达到刨削的目的。试分析该方案有无结构组成原理上的错误(需说明理由)。若有请提出修改方案。

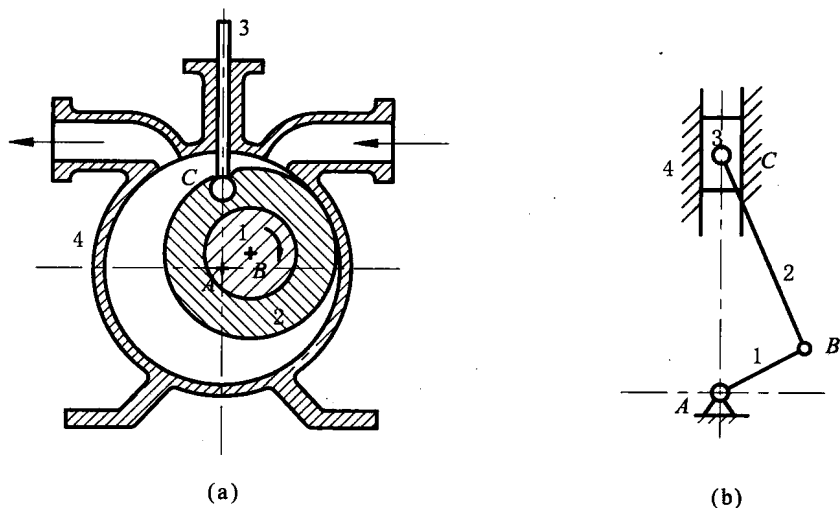


例 1-1 图

解 由图(a)知, 活动构件 $n=4$, 低副数 $P_l=6$, 机构无高副, 则该机构自由度为 $F=3n-(2P_l+P_h)=3\times 4-(2\times 6+0)=0$ 。计算结果表明该牛头刨床机构的初拟设计方案无自由度, 机构根本就不能动, 蜕变为一结构件。

为了使机构能运动, 需增加 1 个自由度, 有两种方案: 一种是通过添加 1 个构件和 1 个低副, 如图(b)和图(c); 一种是把原方案中的 C 转动副用 1 个高副代替, 如图(d)。

例 1-2 绘制图(a)所示液压泵机构的运动简图, 并判断该机构是否具有确定的运动。图中偏心轮 1 绕固定轴心 A 转动。



例 1-2 图

解 从图(a)分析知道该机构是由 4 个构件组成的, 构件 1 为偏心轮, 它的几何中心 B 为构件 1 和 2 的相对回转中心, A 为构件 1 和机架 4 的绝对回转中心, 构件 2 和构件 3 在 C 处用回转副连接, 构件 3 和机架 4 之间为相对移动形成移动副。

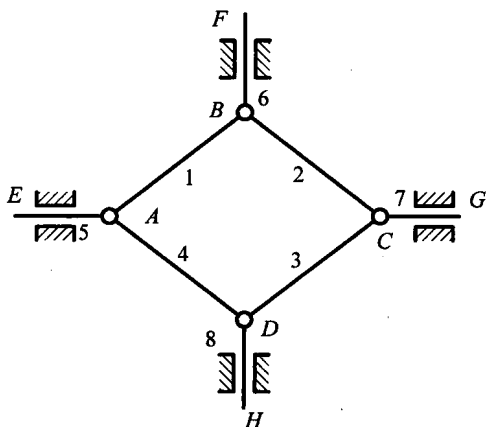
选择合适的比例尺, 从图(a)中量取尺寸绘制的机构运动简图如图(b)。

此机构为曲柄滑块机构。由图(a)可知, 活动构件 $n=3$, 低副数 $P_l=4$, 机构无高副, 则该机构自由度为 $F=3n-(2P_l+P_h)=3\times 3-(2\times 4+0)=1$, 又因该机构只有 1 个原动件, 所以此机构具有确定的运动。

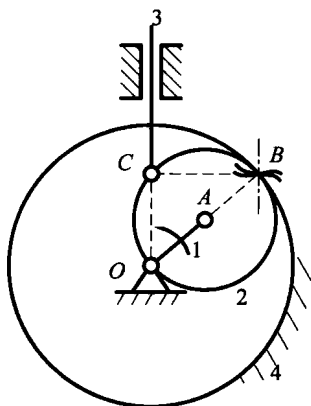
例 1-3 如图所示的对称八杆机构中, 已知导路 $EG\perp FH$, 构件 1、2、3 和 4 的长度相等, 试计算该机构的自由度。

解 构件 1、2、3 和 4 的长度相等, 因此在构件 5、6、7 和 8 中, 除原动

件外, 在计算自由度时还应从其余 3 个构件中去掉 1 个。这是因为连接点和被连接点的轨迹相重合而引入 1 个虚约束。例如, 假设构件 5 为原动件, 则应从构件 6、7 或 8 中去掉任意一个。不妨假设去掉构件 8, 由于构件 8 上各点运动轨迹均为直线, 而构件 3 与 4 组成转动副 D , 其运动轨迹也是直线, 且和构件 8 的运动轨迹重合, 所以在 D 处形成 1 个虚约束。这样, 该机构自由度则为 $F = 3n - (2P_l + P_h) = 3 \times 7 - (2 \times 10 + 0) = 1$ 。



例 1-3 图



例 1-4 图

例 1-4 图示为直线运动机构, 已知 $AB=AC=AO$ 。试证明铰链 C 因轨迹重合而产生虚约束。将铰链 C 改为高副之后, 计算此机构的自由度。

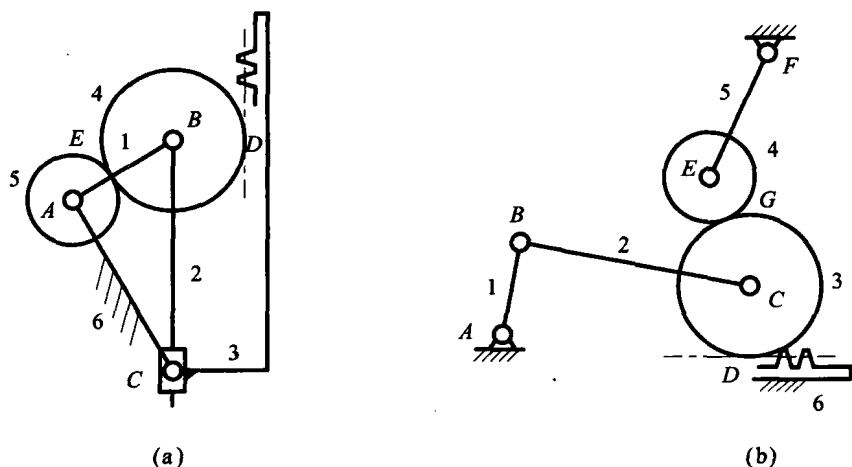
解 因齿轮 2 和齿轮 4 的相对运动可以看成是一对节圆之间的纯滚动, 所以图中 B 点即为它们的瞬心(绝对瞬心)。构件 2 在 C 点的速度 v_{c2} 垂直于 CB , 由已知几何条件知, $\triangle OCB$ 为直角三角形, 所以 v_{c2} 平行于 OC , 所以构件 2 上的 C 点的轨迹始终在过 O 点的铅垂线上(也即 OC 始终为铅垂线)。而构件 3 上的 C 点轨迹也始终在 OC 线上。如用铰链把两构件在 C 点铰接, 则带来 1 个虚约束, 也就是说铰链 C 相当于 1 个高副。若将铰链 C 改为高副之后, 机构的自由度为

$$F = 3n - (2P_l + P_h) = 3 \times 3 - (2 \times 3 + 2) = 1$$

例 1-5 计算图示的齿轮连杆组合机构的自由度。

解 本题涉及的机构属于含有齿轮副的机构, 齿轮副根据两轮相对位置的关系, 有时只提供 1 个约束, 有时提供 2 个约束(相当于 1 个低副)。

(1) 图(a)所示的齿轮连杆机构中, 齿轮 4 和齿轮 5 的回转中心都铰接在构



例 1-5 图

件 1 上, 两轮的相对位置被约束, 齿轮 4 和齿条 3 的相对位置被构件 3 和构件 2 形成的移动副约束, 所以两对齿轮啮合处都是只有一侧齿廓接触(有侧隙安装)。又因无论有几对轮齿进入啮合, 各对轮齿的公法线是重合的(即为基圆的内共切线的某一条)。因此 D、E 处只提供 1 个约束。另外, 须注意的是机构在 A、B 两处为复合铰链。通过以上分析可知, 机构活动构件数 $n=5$, 低副数 $P_l=6$, 高副数 $P_h=2$, 则该机构的自由度为

$$F = 3n - (2P_l + P_h) = 3 \times 5 - (2 \times 6 + 2) = 1$$

(2) 图(b)所示的齿轮连杆机构中, 齿轮 3 和齿条 6 的相对位置未被约束(是靠重力保持的), 齿轮 4 和齿轮 3 的相对位置也是通过重力来保持的, 所以两对齿轮啮合处都是两侧齿廓接触(无侧隙)。又因两侧齿廓接触处的公法线为基圆的两条内共切线, 所以公法线不重合。因此 D、G 处各提供 2 个约束。通过以上分析可知, 机构活动构件数 $n=5$, 低副数 $P_l=5$, 高副数 $P_h=4$, 则该机构的自由度为

$$F = 3n - (2P_l + P_h) = 3 \times 5 - (2 \times 5 + 4) = 1$$

例 1-6 计算图示的刨床机构的自由度。若以构件 1 为原动件, 机构为几级机构? 若以构件 4 为原动件, 机构为几级机构?

解 (1) 计算机构的自由度

在图示的机构中, 机构的活动构件数 $n=5$, 低副数 $P_l=7$, 高副数 $P_h=0$, 则该机构的自由度为