

工 科 核 心 课 程 学 习 辅 导 丛 书

机械原理

学习要点与习题解析

杨昂岳 主编

依 据 教学大纲

紧 扣 权威教材

利 于 自学 辅导 考研

精 选 例 题 提示解题方法

模 拟 自 测 提供答案详解

国防科技大学出版社

工科核心课程学习辅导丛书

机电类

机械原理

学习要点与习题解析

杨昂岳

主编

杨昂岳

吴石林

夏尊凤

罗 昆

编著

国防科技大学出版社

·长沙·

内 容 简 介

本书是根据国家教育部颁布的高等工科大学《机械原理课程教学基本要求》及《机械设计基础课程教学基本要求》编写的“机械原理”课程学习辅导教材,全书共分十一章,各章包括内容提示、重点难点分析、例题详解、思考题与习题及习题答案等内容。

本书例题及习题大都选自 26 所重点大学的考试试卷,具有广泛的代表性。本书可作为本、专科大学生学习“机械原理”的辅导教材及自考生的自学教材,还可作为报考硕士研究生人员的考前复习教材,也是教师们备课、命题的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理·学习要点与习题解析/杨昂岳等编著. —长沙:国防科技大学出版社, 2004.8

(工程核心课程教学辅导丛书)

ISBN 7-81099-087-X

I. 机… II. 杨… 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(2004)第 053369 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.bn.cn

责任编辑:徐飞 责任校对:唐卫葳

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张:18 字数:427 千

2004 年 8 月第 1 次印刷 印数:1-3000 册

ISBN 7-81099-087-X/TH·3

定价:28.00 元

前言

类申附

《机械原理》是高等工科院校机械类专业的一门主干技术基础课程，它的主要任务是培养学生掌握机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能，并初步具有确定机械运动方案、分析和设计机构的能力。《机械原理》在机械类本科教学体系中占有十分重要的地位，也是机械工程一级学科各专业硕士研究生入学考试的课程之一。该课程内容较多，具有很强的理论性与实践性，初学者往往感到内容抽象，难以理解，不容易抓住重点等等。本书以如何正确理解基本概念和原理，掌握解题方法和技巧，突出重点和难点为原则，对具有普遍性的重点、难点问题，详尽地给予了分析和解答。

本书根据教育部高教司制定的“机械原理课程教学基本要求”及作者多年的教学经验，参考了国内较广泛使用的几种相关教材，以及全国 26 所重点大学的《机械原理》、《机械设计基础》及《机械原理与零件》等一百余套考试试卷，精心编写而成。全书共十一章，各章内容包括内容提示、重点难点分析、例题详解、思考题与习题及习题答案等。在内容提示中，概述了主要内容、基本要求及重点、难点；在重点难点分析中，对应掌握的基本知识、基础理论和基本方法，尤其是重点、难点内容进行了分析、归纳和指导；在例题详解中，通过典型例题示范解答，分析了解题要点、思路 and 技巧；在思考题与习题中，每章按简答、填空、选择填空和判断题四种题型归纳了概念性思考题与习题，并选择了较多的分析计算、作图类习题；除简答题外，全部给出了参考答案。

本书概念性习题较多，旨在帮助学生深入理解基本概念，可作为自测题和复习思考题。本书习题基本上选自重点大学考试试题，面广且有代表性，具有重要参考价值。

本书附录选择了课程期末考试试题和研究生入学考试试题各四套，并全部给出了参考答案，供读者模拟自测用。需要说明的是，由于各高校使用的教材不尽相同，为保持试题的“原汁原味”，本书例题、习题中所选各校考试试题中个别符号也不尽一致。

本书是在校本科生及广大自考人员学习本课程的辅导材料和自学指南，也是考研人员复习备考的参考书，还是教师们备课、命题的重要参考资料。

由于编著者水平及时间有限，书中错漏不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2004 年 2 月

工科核心课程学习辅导丛书

机电类:

1. 机械原理·学习要点与习题解析

2. 机械设计·学习要点与习题解析

3. 电工电子基础·学习要点与习题解析

4. 理论力学·学习要点与习题解析

5. 材料力学·学习要点与习题解析

6. 机械电子学·学习要点与习题解析

策划: 徐飞 唐卫葳

书 刊

IS 号 4005

目 录

(08)	示量容内	一
(08)	港位点数点重	二
(28)	轴轴轴轴	三
(29)	轴轴轴轴轴轴	四
(401)	案答轴轴	五

第一章 平面机构的结构分析

(011)	示量容内	一
(011)	内容提示	(1)
(11)	重点难点分析	(1)
(11)	例题详解	(4)
(11)	思考题与习题	(11)
(11)	习题答案	(15)

第二章 平面机构的运动分析

(011)	示量容内	一
(011)	内容提示	(20)
(11)	重点难点分析	(20)
(11)	例题详解	(24)
(11)	思考题与习题	(35)
(11)	习题答案	(38)

第三章 平面机构的力分析

(011)	示量容内	一
(11)	内容提示	(44)
(11)	重点难点分析	(44)
(11)	例题详解	(46)
(11)	思考题与习题	(52)
(11)	习题答案	(55)

第四章 机械中的摩擦和机械效率

(011)	示量容内	一
(11)	内容提示	(59)
(11)	重点难点分析	(59)
(11)	例题详解	(62)
(11)	思考题与习题	(70)
(11)	习题答案	(75)

第五章 平面连杆机构及其设计

一、内容提示	(80)
二、重点难点分析	(80)
三、例题详解	(85)
四、思考题与习题	(96)
五、习题答案	(104)

第六章 凸轮机构及其设计

一、内容提示	(110)
二、重点难点分析	(110)
三、例题详解	(114)
四、思考题与习题	(119)
五、习题答案	(126)

第七章 齿轮机构及其设计

一、内容提示	(130)
二、重点难点分析	(130)
三、例题详解	(142)
四、思考题与习题	(152)
五、习题答案	(165)

第八章 齿轮系及其设计

一、内容提示	(173)
二、重点难点分析	(173)
三、例题详解	(175)
四、思考题与习题	(181)
五、习题答案	(183)

第九章 其他常用机构

一、内容提示	(187)
二、重点难点分析	(187)
三、思考题与习题	(189)
四、习题答案	(192)

第十章 机械的运转及其速度波动的调节

一、内容提示	(194)
二、重点难点分析	(194)

三、例题详解	(197)
四、思考题与习题	(202)
五、习题答案	(209)

第十一章 机械的平衡

一、内容提示	(213)
二、重点难点分析	(213)
三、例题详解	(215)
四、思考题与习题	(218)
五、习题答案	(222)

附1 本科生期末考试试题及答案

期末考试试题一	(224)
期末考试试题二	(227)
期末考试试题三	(230)
期末考试试题四	(233)
期末考试试题一答案	(235)
期末考试试题二答案	(239)
期末考试试题三答案	(242)
期末考试试题四答案	(245)

附2 研究生入学考试试题及答案

考研试题一	(249)
考研试题二	(251)
考研试题三	(254)
考研试题四	(257)
考研试题一答案	(260)
考研试题二答案	(264)
考研试题三答案	(268)
考研试题四答案	(274)

参考文献	(280)
------------	-------

第一章 平面机构的结构分析

一、内容提示

机构的结构分析是机构运动分析、动力分析及机构综合的必要前提,也是机构创新设计的基础。本章主要解决用平面机构自由度计算公式来判断运动链运动的可能性和确定性问题。

本章主要内容是:

1. 机构组成要素中的一些基本概念:构件、运动副(高副、低副)、自由度、约束、运动链、机构等;
2. 机构运动简图的绘制;
3. 机构具有确定运动的条件;
4. 平面机构(包括一般平面机构及纯移动副平面机构)自由度的计算;
5. 平面机构结构分类及平面机构中的高副低代。

本章重点内容是一般平面机构自由度的计算;难点是复合铰链、局部自由度及虚约束问题的判断及正确处理。

二、重点难点分析

1. 有关机构组成的基本概念

机构是组成机器的基础,任何一部机器都是由若干个机构组成的。

机构是由多个零件组合而成的,零件是机构的制造单元体。一个零件或几个零件的刚性联接体称为构件,构件是机构的运动单元体,简称为“杆”。构件是机构中的刚性系统,构件中各零件间不能相对运动,机构中各构件之间保持一定的相对运动。

运动副是两构件直接接触组成的可动联接。形成运动副的可动联接限制了两构件之间的某些相对运动(称之为约束),又允许另一些相对运动存在(称之为自由度)。两构件组成运动副至少应有一个约束,也至少要保留一个自由度。组成运动副的两构件上参与直接接触的点、线或面称为运动副元素。运动副按其两构件的相对运动情况分为平面

运动副和空间运动副；按其两构件的接触情况分为低副（面接触）和高副（点接触或线接触）；按其两构件所能产生的相对运动形式分为转动副、移动副、平面滚滑副（高副）及空间运动副的螺旋副、球面副、球销副等。此外，还可以根据保持运动副两构件上运动副元素互相接触的方式分为形封闭运动副和力封闭运动副。形封闭是利用几何形状来保持运动副两元素互相接触的，也称几何封闭；力封闭是利用外力（如弹簧力）或构件本身的重力来保持两运动副元素互相接触的。根据运动副引入的约束数目，运动副又可分为Ⅰ级副、Ⅱ级副、Ⅲ级副、Ⅳ级副和Ⅴ级副。

运动链是两个或两个以上构件通过运动副联接而构成的相对可动的系统。运动链可分为闭式运动链（首末杆封闭的）和开式运动链（首末杆未封闭的）。如果构件通过运动副联接构成的是相对不可动系统，则为桁架或结构体，亦即成为一个构件。

如果将运动链中某一构件固定而成为机架，并有一个或几个构件给定运动规律（原动件），使其余各构件（从动件）具有确定的相对运动，则该运动链便成了机构。所以说，机构是具有确定相对运动的构件组合体。任何机构都包括机架、原动件和从动件三个部分。

机器是能做有用的机械功或转换机械能的机构组合系统。单从结构与运动观点看来，机器与机构并无区别。

机械是机器和机构的总称。

2. 机构运动简图

机构运动简图是用规定的简单线条和符号代表构件和运动副，按比例尺定出各运动副的位置，准确表达机构运动特征的简单图形。机构运动简图一定要严格按比例尺绘制，否则只能称为机构示意图。

绘制机构运动简图的步骤及方法：

(1) 分析机构的运动及组成

先分析机构中相邻构件之间的相对运动及运动副，再弄清构件的种类和数目以及运动传递路线等。

(2) 选择投影面

对平面机构选运动平面或与运动平面平行的平面为投影面。

(3) 选择比例尺 μ_l (m/mm)

具体画法是：先根据机构的运动尺寸，确定出各运动副的位置（转动副的中心、移动副的导路方位及高副的接触点等），画上相应的运动副符号；再用简单的线条代表构件，将各运动副连接起来；最后，要标出构件号数字及运动副的代号字母，画出原动件的运动方向箭头。

绘制机构运动简图的关键点是要根据相接触两构件间的联接方式（即运动副）的几何特征，分析出两相邻构件之间的运动性质。此外，在用简单线条画构件时，要表达的是构件上与运动有关的因素，构件上与运动无关的因素（复杂形状）应全部略去。

3. 一般平面机构自由度的计算

平面机构自由度的计算公式为

$$F = 3n - (2p_l + p_h) \quad (1.1)$$

式中： F 为机构自由度；

n 为机构中活动构件数；

p_l 为机构中的低副数；

p_h 为机构中的高副数。

在利用上式计算机构自由度时，应特别注意下列三个问题：

(1) 正确计算运动副的数目

①两个以上的构件在同一轴线处以转动副相联接，则构成复合铰链， m 个构件以复合铰链相联接时，构成转动副的数目为 $(m-1)$ 个。

②两构件在多处配合而构成转动副，且各转动轴线重合，计算运动副数目时也只能算作一个转动副。

③两构件在多处接触而构成移动副，且移动方向彼此平行或者重合，计算运动副数目时只能算作一个移动副。

④两构件在多处接触而构成平面高副，且各接触点处的公法线彼此重合者，计算运动副数目时也只能算作一个平面高副。如果两构件在两处接触而构成平面高副，各接触点处公法线方向并不重合，而是彼此相交或平行者，则在计算运动副数目时，应算作两个平面高副或相当于一个低副。

(2) 除去局部自由度

局部自由度是机构中某些构件具有的不影响其它构件运动的自由度。在计算机构自由度时，可将产生局部运动的构件和与其相联接的构件视为焊接在一起，以达到除去局部自由度的目的。

(3) 除去虚约束

虚约束是机构中与其它约束重复而不起限制运动作用的约束。在计算机构自由度时，可将引入虚约束的运动副或运动链部分去掉不计，以达到除去虚约束的目的。虚约束出现在特定的几何条件下，具体情况较为复杂，需要仔细分析判断。

在计算机构自由度时，要正确计算运动副数目，除去局部自由度及虚约束；再用式(1.1)进行计算；最后还应检查机构的自由度数目与原动件数目是否相等。当自由度数目大于原动件数目时，某些构件运动不确定（晃动）；当自由度数目小于原动件数目时，各构件间卡住不动，这两种情况都不成为机构。只有当自由度数目等于原动件数目时，各构件间才具有确定的相对运动，运动链才成为机构。

计算机构自由度的另一种方法是在确定了运动副数目 p_l 、 p_h 及局部自由度数目 F' 、虚约束数目 p' 后，再按下式计算机构的自由度。

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' \quad (1.2)$$

式中： n 、 p_l 、 p_h 为未排除局部自由度及虚约束时机构的活动构件数、低副数及高副数；

虚约束数目 p' (组成虚约束的构件数 n' , 低副数 p'_l , 高副数 p'_h):

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n'$$

值得注意的是: 对同一机构, 用式 (1.1) 与用式 (1.2) 计算 F 的结果是一样的, 但两式中 n 、 p_l 、 p_h 虽符号一样, 但数值可能不一样。另外, 式 (1.2) 中 p' 的计算也是容易出错的。

4. 纯移动副平面机构自由度的计算

在纯移动副组成的平面机构中, 每一个没有装配的活动构件都不能转动, 只有移动运动, 所以只有 2 个自由度, 因此, 纯移动副平面机构自由度的计算不能用式 (1.1) 与式 (1.2), 可用下式:

$$F = 2n - 2p_l \quad (1.3)$$

式中: n 为机构中的活动构件数;

p_l 为机构中的移动副数。

5. 平面机构结构分类

机构的拆组分析: 将机构分解为机架和原动件及若干个基本杆组 (不能再拆的自由度为零的杆件组), 然后, 对相同的基本杆组以相同的方法进行运动分析或力分析。

由 2 个构件和 3 个低副构成的基本杆组称 II 级组; 由 4 个构件和 6 个低副组成, 且都含有一个具有 3 个低副构件的基本杆组称为 III 级组 (更高级的基本杆组很少见, 不作要求)。同一机构中可以包含不同级别的基本杆组, 机构的级别就是其基本杆组中的最高级别。同一机构取不同构件为原动件时, 机构的级别可能有变化。

6. 平面机构的高副低代

高副低代是将机构中的高副虚拟地以低副来代替。替代后机构的自由度不变, 机构的瞬时速度、瞬时加速度也不变。高副低代便于对机构进行自由度计算、机构组成分析和机构运动分析, 但不能用于机构的力分析。

高副低代的方法是: 首先找到两个高副元素接触点处的曲率中心, 再用一个虚拟的杆将这两个曲率中心连起来, 两曲率中心处为两转动副。若两高副元素之一为直线, 则其曲率中心在无穷远处, 低代时虚拟杆与高副直线元素联接的运动副为移动副。

三、例题详解

本章习题类型有: 机构运动简图的绘制、平面机构自由度的计算、高副低代、杆组分解、基本杆组级别判定及机构级别判定等。其中主要题型是平面机构自由度的计算。

计算平面机构自由度可用式 (1.1) 和式 (1.2) 两种方法, 大多数《机械原理》教材都只讲用式 (1.1) 的一种算法, 本书的例题及习题解答都用两种方法。

【例 1.1】 计算图示油泵的机构运动简图, 图中 $l_{AB} = 120\text{mm}$, $l_{AC} = 400\text{mm}$ 。

解:

第一步 分析机构: 图示机构中构件 3 为一带横孔的圆柱体, 构件 4 为机架, 构件 1 为原动件, 构件 2、3 为从动件; 构件 1 分别与构件 4、2 相接触 (圆柱销), 均可相对转动, 故构件 1 与构件 4、2 均以转动副相联接, 转动副的回转中心分别在 A、B 点; 构件 2 与 3 之间也是以圆柱面相接触, 但其相对运动为移动, 故构件 2 与 3 以移动副相联接, 移动迹线为构件 2 的轴心线 BC; 构件 3 与 4 之间以大圆柱面相接触, 其相对运动为转动, 故构件 3 与 4 以转动副联接, 转动副的回转中心在 C 点。

第二步 作图: 选取比例尺 $\mu_l = 0.02\text{m/mm}$; 任取一点画出构件 4、1 间的回转副 A, 并标出机架 4; 运动简图上 A、C 间的距离应为

$$l_4 = l_{AC} / \mu_l = 0.4 / 0.02 = 20\text{mm}$$

据 l_4 画出构件 4、3 间的回转副 C; 运动简图上 A、B 点间的距离应为

$$l_1 = l_{AB} / \mu_l = 0.12 / 0.02 = 6\text{mm}$$

据 l_1 画出构件 1、2 间的回转副 B (B 点可在以 A 为圆心, 以 6mm 为半径的圆上任意选定); 在 C 点处画移动副滑块, 移动方向为 BC 向; 滑块即构件 3; 连 A、B 为构件 1, 由 B 点过滑块 3 画直线即构件 2。

说明:

(1) 机构运动简图与机构运动示意图的区别在于前者必须严格按比例尺 μ_l 绘制, 而后者不必。

(2) 机构运动简图的比例尺

$$\mu_l = \frac{\text{实物尺寸}}{\text{图纸尺寸}} \quad (\text{m/mm})$$

而机械制图的比例尺是

$$\frac{\text{图纸尺寸 (mm)}}{\text{实物尺寸 (mm)}}$$

二者的区别在于: 分子、分母不相同; 实物尺寸所用单位不同, μ_l 有单位 (m/mm), 而机械制图比例尺无单位。

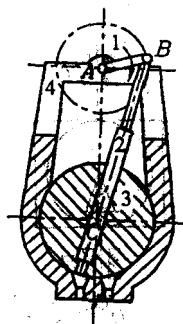
(3) 机构运动简图比例尺 μ_l 中实物尺寸单位取为 m, 其好处是与以后运动分析中速度单位 (m/s)、加速度单位 (m/s^2) 对应。也有的教材中 μ_l 实物尺寸单位取 mm。

【例 1.2】 计算图示的自由度, 并指出存在的复合铰链、局部自由度和虚约束处。

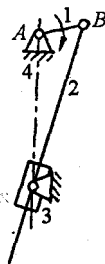
解: (a)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 6 - (2 \times 7 + 2) = 2$$

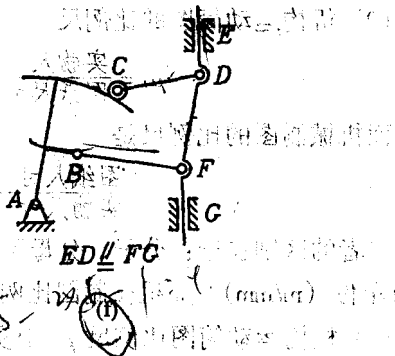
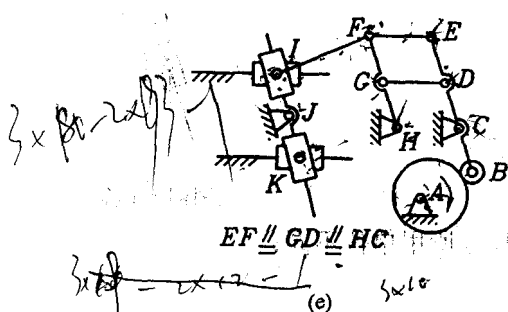
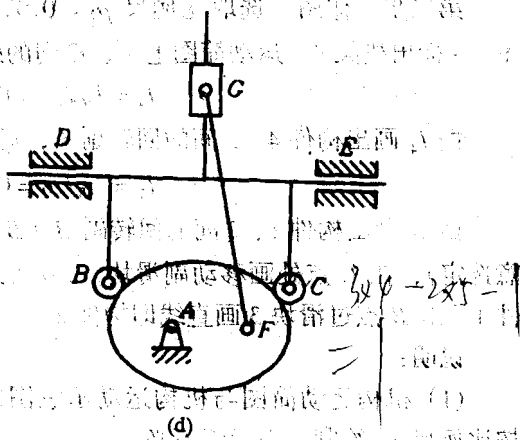
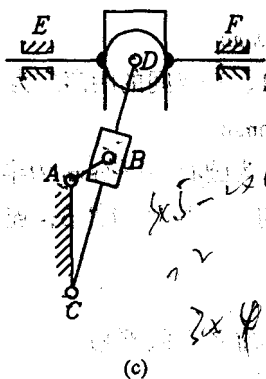
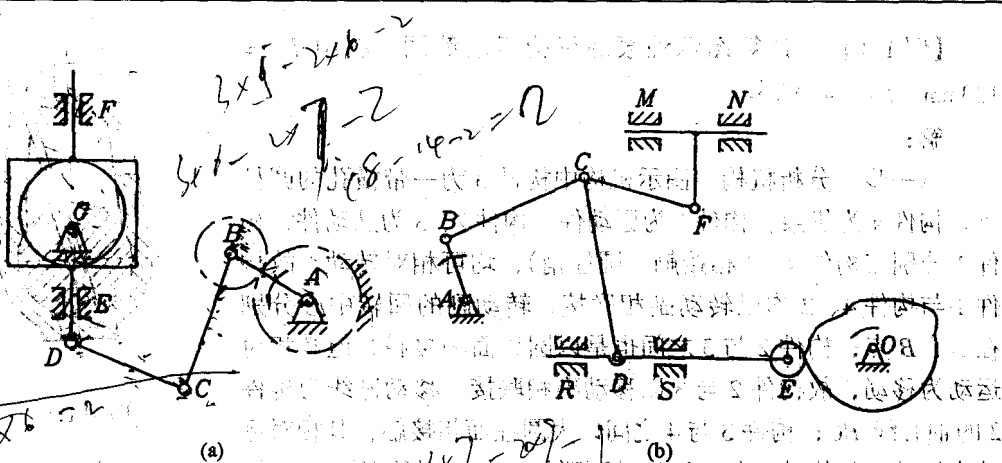
或



图例 1.1



图例 1.1 答



图例 1.2

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 6 - (2 \times 8 + 3 - 3) - 0 = 2$$

式中两处虚约束：凸轮处及导轨 E、F 处：

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2 \times 1 + 1 - 0 = 3$$

因只有一个单自由度原动件，机构自由度为 2，所以运动不确定。

若将活动齿轮与连杆 BC 固定成一个构件，则



$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 5 - (2 \times 6 + 2) = 1$$

机构就具有确定的相对运动了。

(b)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 7 - (2 \times 9 + 1) = 2$$

或

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 8 - (2 \times 12 + 1 - 4) - 1 = 2$$

该机构中 E 处有一个局部自由度； C 处为复合铰链； M 与 N 、 R 与 S 均有一个虚约束。该机构具有确定的相对运动。

说明：

1) C 处为 3 个构件组成的复合铰链，其转动副数目为 2；

2) M 与 N 、 R 与 S 均为两个构件在两处组成移动副，且轴线重合，所以，均有一个虚约束。其虚约束数为：

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2 \times 2 + 0 - 0 = 4$$

(c)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 4 - (2 \times 5 + 1) = 1$$

或

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 5 - (2 \times 7 + 2 - 3) - 1 = 1$$

D 处有局部自由度； E 、 F 中有一个虚约束，滚子外廓两处高副接触，有一处为虚约束，约束数为：

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2 \times 1 + 1 - 0 = 3。$$

(d)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 4 - (2 \times 5 + 1) = 1$$

或

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 6 - (2 \times 8 + 2 - 2) - 1 = 1$$

B 、 C 处有局部自由度； E 、 C 与 D 、 B 对称（移动副、转动副及高副各一个）为虚约束，约束数为：

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2 \times 2 + 1 - 3 = 2$$

说明： C 滚子及其运动副当做虚约束除去，就不再按局部自由度除去了。

(e)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 10 - (2 \times 14 + 1) = 1$$

或

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 12 - (2 \times 17 + 1 - 1) - 1 = 1$$

I 与 F 处均为复合铰链， GD 杆为虚约束， B 处为局部自由度。虚约束数为：

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2 \times 2 + 0 - 3 \times 1 = 1$$

(f)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 4 - (2 \times 5 + 1) = 1$$

或

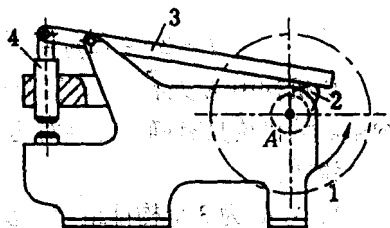
$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 5 - (2 \times 7 + 1 - 2) - 1 = 1$$

C 处为局部自由度；因 $ED \parallel FD$ ，所以 E 、 D 移动副有一为虚约束，虚约束数为：

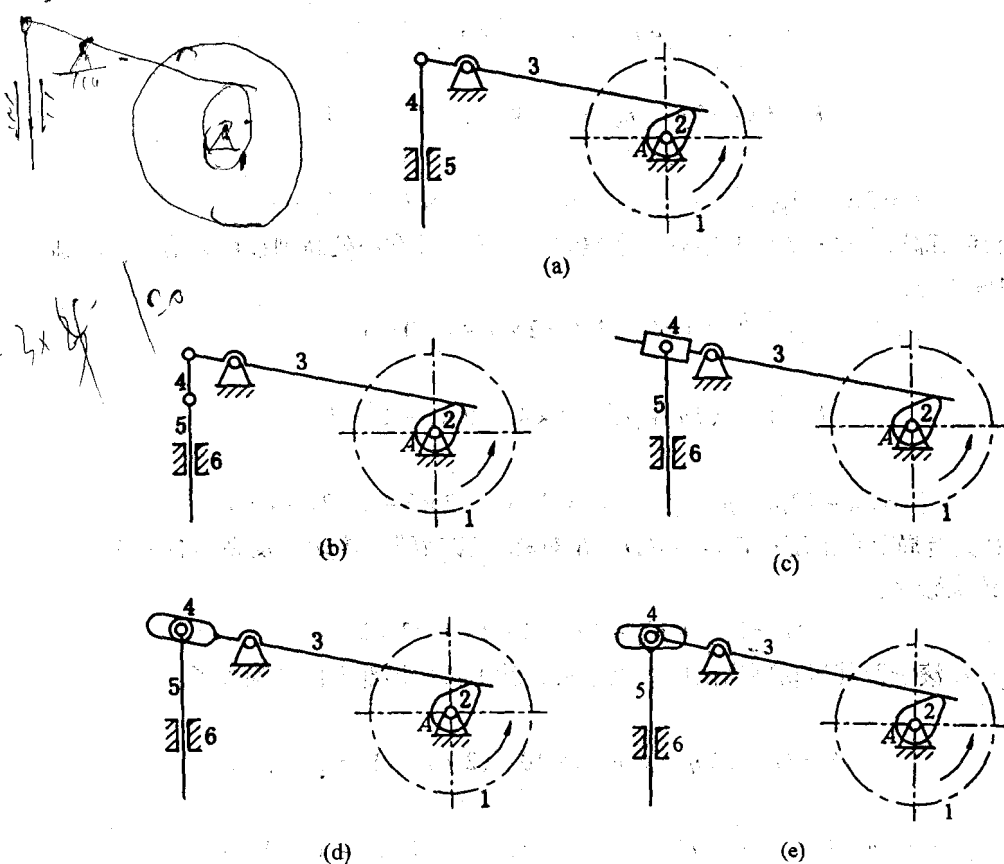
$$p' = 2 \times p_l' + p_h' - 3n' = 2 \times 1 + 0 - 0 = 2$$

【例 1.3】 图示为一简易冲床的初拟设计方案。设计者的思路是：动力由齿轮 1 输入，使轴 A 连续回转，而固装在轴 A 上的凸轮 2 与杠杆 3 组成的凸轮机构将使冲头 4 上、下运动以达到冲压的目的。试绘出其机构示意图，并分析其运动是否确定，提出修改措施（要求用机构示意图表示出来）。

解：机构示意图见图例 1.3 答 (a) 示。



图例 1.3



图例 1.3 答

自由度

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 3 - (2 \times 4 + 1) = 0$$

或

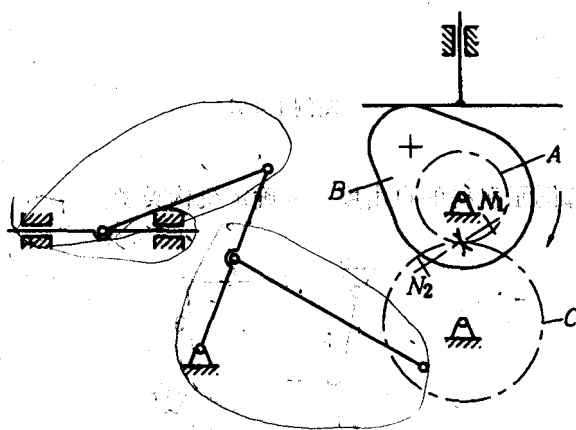
$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 3 - (2 \times 4 + 1 - 0) - 0 = 0$$

该简易冲床设计方案的机构不能运动。

修改措施:

- ①在构件 3、4 之间加一连杆及一个转动副 (图例 1.3 答 (b) 示);
- ②在构件 3、4 之间加一滑块及一个移动副 (图例 1.3 答 (c) 示);
- ③在构件 3、4 间加一局部自由度滚子及一个平面高副 (图例 1.3 答 (d) 及 (e) 示)。

【例 1.4】 图示机构中齿轮 A 与凸轮 B 固联为一体的构件 (标有箭头) 为原动件, N_1 、 N_2 分别为齿轮 A、C 齿廓接触点公法线与两基圆的内公切点。



图例 1.4

- 1) 求该机构的自由度;
- 2) 将其中的高副化为低副, 画出高副低代后的机构示意图;
- 3) 画出该机构所含各杆组, 并确定杆组的级别和机构的级别。

解:

1)

$$F = 3n - (2p_l + p_h) = 3 \times 7 - (2 \times 9 + 2) = 1$$

或

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' = 3 \times 7 - (2 \times 10 + 2 - 2) - 0 = 1$$

其中

$$p' = 2p'_l + p'_h - 3n' = 2p'_l = 2$$

- 2) 高副低代后的机构示意图如图例 1.4 答 (a) 示。

3) 构件 2、3 组成 II 级杆组; 构件 4、5 组成 II 级杆组; 构件 6、7 组成 II 级杆组, 构件 8、9 组成 II 级杆组, 共四个 II 级杆组。各杆组如图例 1.4 答 (b) 示。该机构为 II 级机构。