

///
新世纪

GAOXIAO GUIHUA JIAOCAO

高校机械工程规划教材



机械原理习题集及学习指导

主编 王继荣 师忠秀

新世纪高校机械工程规划教材



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

习题集及学习指导

主 编	王继荣	师忠秀
副主编	张继忠	
参 编	戴作强	张艳萍
主 审	李庆领	

机 械 工 业 出 版 社

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

机械原理课程是机械类专业的一门主干基础课,在机械设计课程体系中占有重要地位。学好机械原理课程,一方面能培养学生的机械系统创新设计能力,另一方面也为学好后续课程打下坚实基础。“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的实施,对机械原理课程的课程体系和教学内容等提出了新的要求。为了配合机械原理课程体系改革,我们在总结长期教学经验的基础上,根据新的教材体系,编写了这本学习指导与习题。

本书共 10 章,每章均包括教学基本要求、本章重点和难点内容、典型例题解析、习题和综合测试题五个部分,书末附有习题和综合测试题参考答案。教学基本要求可以使学生对本章的要求有一个清晰的了解。本章重点和难点内容对学生应掌握的基本概念、基本公式、基本理论及基本方法进行了总结,对各章的重点和难点进行了全面的分析说明。典型例题解析注重解题思路、解题方法和解题技巧的讲解,提供了解题规范,对解题中的常见错误进行了分析,能起到举一反三的作用。习题主要从机械原理教材、习题集以及国内各高校研究生入学考试中精选,类型多,覆盖面宽,难度适宜。每章后的综合测试题可供教师上习题课或学生自测使用。

本书的主要特点是在编排上独树一帜,既有典型例题的精讲,也有精选、精编的试题。在组织各章例题时,优选一些能突出教材难点及重点的例题,开阔学生思路,激发学生的思想火花,提高学生的学习主动性和积极性。通过必要的习题,有助于学生对所学知识的基本理论的复习、巩固和提高;有助于把理论和实际运用有机地、紧密地联系起来,提高分析问题和解决问题的能力。

本书注重培养学生的思维深度与广度,不仅重视逻辑思维的培养,而且重视发散式思维培养,符合学分制改革的要求和缩减机械原理课时的要求,利于提高学生的自学能力,是机械原理课程的重要参考书,可与 60~80 学时的机械原理教材配套使用。本书既可作为学生学习相关专业机械原理课程的辅助教材,也可作为教师教学的参考书和考研人员学习参考。

本书由青岛大学王继荣和师秀担任主编,并编写第 2、3、7、10 章,张继忠担任副主编,并编写第 1、5 章,戴作强编写第 4、8 章,张艳萍编写第 6、9 章。青岛科技大学机械工程系的李庆领审阅了书稿并提供宝贵的修改意见,这里深表谢意。在本书编写和出版过程中,山东省高校机械工程系列教材编委会及机械工业出版社给予了大力支持,在此致以衷心的感谢。对所有曾经给予本书的编

写和出版以关心和支持过的老师和学生表示诚挚的谢意。

本书的出版必将为机械原理和机械原理课程设计教学改革、为机械类学生的创新教育和机械工业高层次人才培养作出贡献。书中的不足之外，恳请各位同行及读者予以批评和指正。

编 者

2003 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 机构的组成和结构分析	1
1.1 教学基本要求	1
1.2 本章重点和难点内容	1
1.3 典型例题解析	4
1.4 习题	7
1.5 综合测试题	10
第 2 章 平面机构的性能分析	12
2.1 教学基本要求	12
2.2 本章重点和难点内容	12
2.3 典型例题解析	17
2.4 习题	24
2.5 综合测试题	28
第 3 章 连杆机构及其设计	31
3.1 教学基本要求	31
3.2 本章重点和难点内容	31
3.3 典型例题解析	34
3.4 习题	42
3.5 综合测试题	44
第 4 章 凸轮机构及其设计	46
4.1 教学基本要求	46
4.2 本章重点和难点内容	46
4.3 典型例题解析	49
4.4 习题	54
4.5 综合测试题	57
第 5 章 齿轮机构及其设计	60
5.1 教学基本要求	60
5.2 本章重点和难点内容	60
5.3 典型例题解析	62
5.4 习题	69
5.5 综合测试题	71
第 6 章 轮系及其设计	73

6.1 教学基本要求	73
6.2 本章重点和难点内容	73
6.3 典型例题解析	76
6.4 习题	79
6.5 综合测试题	83
第 7 章 其他常用机构	86
7.1 教学基本要求	86
7.2 本章重点和难点内容	86
7.3 典型例题解析	88
7.4 习题	90
7.5 综合测试题	91
第 8 章 机械的平衡	93
8.1 教学基本要求	93
8.2 本章重点和难点内容	93
8.3 典型例题解析	94
8.4 习题	97
8.5 综合测试题	100
第 9 章 机械系统动力学设计	103
9.1 教学基本要求	103
9.2 本章重点和难点内容	103
9.3 典型例题解析	106
9.4 习题	110
9.5 综合测试题	114
第 10 章 机械系统的运动方案及机构的创新设计	116
10.1 教学基本要求	116
10.2 本章重点和难点内容	116
10.3 典型例题解析	122
10.4 习题	129
10.5 综合测试题	132
附录一 习题参考答案	134
附录二 综合测试题参考答案	140
附录三 2002 年硕士生入学考试试题(共 3 份试卷)	143
参考文献	155

第1章 机构的组成和结构分析

1.1 教学基本要求

1) 掌握构件、运动副及运动链的定义，特别是掌握机构运动简图的绘制方法，能够将实际机构或机构的结构视图绘成机构运动简图，并学会在工程设计中运用机构运动简图。

2) 熟练掌握机构自由度的计算方法。能准确计算机构自由度，尤其是平面机构自由度。正确识别平面机构中存在的特殊情况，如复合铰链、局部自由度和虚约束，并做出正确计算。

3) 掌握运动链成为机构的条件。

4) 掌握机构的组成原理和结构分析的方法。了解高副低代的方法；能判定基本杆组、杆组的级别和机构的级别；学会根据机构的组成原理，用基本杆组、原动件和机架组成一个构思新颖的新机构的方法；学会把Ⅱ级、Ⅲ级机构分解为机架、原动件和若干基本杆组的方法。

1.2 本章重点和难点内容

本章的重点和难点是机构运动简图的绘制、机构自由度的计算、机构具有确定运动的条件以及机构的组成原理。

1. 基本概念

(1) 构件 一个独立影响机械功能并能独立运动的单元体。它既可以是一个零件，也可以由几个零件刚性联接而成。

(2) 运动副 凡两构件直接接触而又能做一定相对运动的可动联接。运动副按接触形式分为高副(即点或线接触的运动副)和低副(即面接触的运动副)。又可按所能产生的运动形式分为回转副、移动副、螺旋副及球面副等。此外还可以按运动副引入的约束数来分类，引入一个约束的运动副称为1级副、引入两个约束的运动副称为2级副，依此类推，还有3级副、4级副、5级副。

(3) 运动链 两个或两个以上的构件通过运动副联接而成的相对可动的系统。如果组成运动链的各构件构成首尾封闭的系统，则构成闭链。如果组成运动链的各构件未构成首尾封闭的系统，则构成开链。

(4) 机构 将运动链中的一个构件加以固定, 当它的另一个或几个构件按给定运动规律相对于固定件运动时, 其余各构件即随之作确定的相对运动, 则此运动链便称为机构。机构中的固定件称为机架, 按给定的已知运动规律运动的构件称为原动件, 其余活动构件称为从动件。

(5) 运动链的自由度 确定运动链中各构件相对于其中某一构件的位置所需的独立参变量的数目称为运动链的自由度。运动链成为机构的条件是: 取运动链中一个构件相对固定作为机架, 运动链相对于机架的自由度必须大于零, 且原动件的数目等于运动链的自由度数。

2. 机构运动简图及其绘制

1) 从原理方案设计的角度看, 机构能否实现预定的运动和功能, 是由原动件的运动规律及各运动副的类型和机构的运动学尺寸来决定的, 与联接各构件的运动副的具体结构、外形(高副机构的轮廓形状除外)、断面尺寸、组成构件的零件数目及固联方式等无关。因此, 根据机构的运动尺寸, 按一定的比例尺定出各运动副的位置, 再用国家标准规定的简单符号和线条代表运动副和构件, 将机构的运动情况表示出来, 这种简单的图形称为机构运动简图。

2) 机构运动简图的绘制方法和步骤如下:

a. 分析机械的动作原理、组成情况和运动情况, 确定其组成的各构件, 何者为原动件、机架、执行部分和传动部分。

b. 沿着运动传递路线, 逐一分析每两个构件间相对运动的性质, 以确定运动副的类型和数目。

c. 合理选择投影面。选择时应以简单清楚地把机构的运动情况表示出来为原则。一般选机构中多数构件的运动平面为投影面。

d. 选择适当的比例尺。根据机构的运动尺寸, 先确定出各运动副的位置, 并画上相应的运动符号, 然后用简单的线条或几何图形连结起来绘出机构运动简图。在机架上加上阴影线, 在原动件上标上箭头, 按传动路线给各构件依次标上件号 1、2、3……将各运动副标上字母 A、B、C……

3. 机构自由度的计算

(1) 平面机构自由度计算 平面机构自由度的计算公式为

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

式中 n ——机构活动构件的数目;

P_L ——低副的数目;

P_H ——高副的数目。

在利用上式计算机构自由度时, 应注意处理好以下三种情况:

1) 复合铰链。是指两个以上构件在同一处以转动副相连时组成的运动副。准确识别复合铰链的关键是要分辨哪几个构件在同一处形成了转动副。

复合铰链的正确处理方法是：若有 k 个构件在同一处形成复合铰链，则其转动副的数目应为 $(k-1)$ 个。

2) 局部自由度。是机构中某些构件所具有的自由度，它仅仅局限于该构件本身，而并不影响其他构件的运动。局部自由度常发生在为减少高副磨损而将滑动摩擦变成滚动摩擦所增加的滚子处。在计算机构自由度时，可将产生局部运动的构件与其相连的构件视为焊接在一起，以达到去除构件中局部自由度的目的。

3) 虚约束。是机构中不产生实际约束效果的重复约束。在计算机构自由度时，可将引入虚约束的构件及其运动副除去不计，然后用自由度公式进行计算。

要正确判断机构中存在的虚约束，应注意以下几点：

第一，搞清虚约束的概念。在机构中，两构件构成运动副所引入的约束是用来限制某些相对运动的。但在机构中，某些运动链所带人的约束可能与机构所受的其他约束相重复，即对相对运动的限制产生了重复，因而对机构运动实际上起不到约束作用，这种约束就是虚约束。

第二，了解机构在什么情况下存在虚约束。

虚约束常发生在以下场合：

a. 两构件间构成多个运动副，但其轴线互相重合；两个构件组成若干个移动副，但其导路互相平行或重合；两构件组成若干个平面高副，但各接触点之间的距离为常数。在这些情况下，各只有一个运动副起约束作用，其余运动副所提供的约束均为虚约束。

b. 两构件上某两点间的距离在运动过程中始终保持不变。如用双转动副杆将此两点相联，则引入了一个虚约束。

c. 机构中对运动不起作用的对称部分。

综上所述，机构中的虚约束都是在一些特定的几何条件下出现的。要特别强调的是如果这些几何条件不满足，则所引入的约束不再是虚约束，而变成了有效的约束，此时机构也就不能运动了。

(2) 空间机构自由度计算 空间机构自由度的计算公式为

$$F = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1$$

式中 n ——空间机构中活动构件的数目；

P_i ——空间机构中所含有第 i 级运动副的数目，且 $i = 1、2、3、4、5$ 。

机构中每个构件都受到由于运动副的特殊配置带来的约束称为公共约束。若机构存在 q 个公共约束，则自由度计算应使用下式

$$F = (6 - q)n - \sum_{k=q+1}^5 (k - q)P_k$$

式中 k ——运动副的级别，其取值范围为 $(q+1) \sim 5$ ；

q ——公共约束数，其可取之值为 $0、1、2、3、4$ 。

4. 高副低代

为了研究机构的结构分类, 以便于进行机构的运动分析和力分析, 将平面机构中的高副用低副所组成的运动链来代替。要求代替前后机构的自由度和机构的瞬时运动相同。代替高副的最简单的低副链应为一个具有两个低副的构件。

5. 机构组成原理及结构分析

(1) 基本杆组 杆组是指自由度为零且不能够再分的构件组。最常见的基本杆组是Ⅱ级组(又称双杆组)和Ⅲ级组。

(2) 机构的级别 机构的级别是以机构中所含杆组的最高级别来定义的。同一机构, 当取不同构件为原动件时, 机构的级别有可能会发生变化。

(3) 结构分析方法 机构结构分析的过程又称为拆杆组, 它是本章的难点之一。为了正确地拆除杆组, 应遵循下述原则:

1) 由离原动件最远的部分开始试拆;

2) 每拆除一个杆组后, 机构的剩余部分仍应是一个完整机构;

3) 试拆杆组时, 最好先按Ⅱ级组来试拆; 如果无法拆除(指拆除之后剩余部分不能构成一个完整机构), 意味着拆除有误, 再试拆高一級杆组;

4) 拆杆组结束的标志是只剩下原动件和机架所组成的Ⅰ级机构。

这里所谓离原动件“最远”, 主要不是指在空间距离上离原动件最远, 而是指在传动关系和传动路线上离原动件最远。此外, 每拆除一个杆组, 剩余的部分应该仍为一个完整的机构, 这是判别拆除过程是否正确的准则, 必须遵守。

1.3 典型例题解析

例 1-1 指出图1-1所示机构中的复合铰链、局部自由度和虚约束, 计算机构的自由度。

解 在该机构中, E 处有复合铰链, G 处有局部自由度, K 处有虚约束。此外, 注意到凸轮与大齿轮相固联, 得活动构件数目 $n = 9$, $P_L = 10 + 2 = 12$ (其中有 10 个转动副, 2 个移动副), $P_H = 2$ 。机构自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 9 - 2 \times 12 - 2 = 1$$

例 1-2 在图1-2所示机构中, AB 、 EF 、 CD 三杆相互平行且长度相等。试计算其自由度。

解 由题意知, 此平面机构 $ABEFCD$ 具有特定的几何条件, 故为平行四边形机构。由构

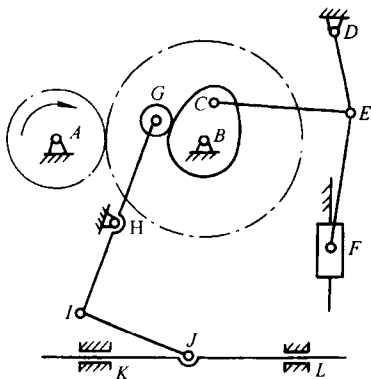


图 1-1

件 EF 及转动副 E 、 F 引入的一个虚约束； G 处的滚子转动为局部自由度； C 处为复合铰链； G 及 I 为两构件在两处接触处的高副，因过两接触线的公法线重合，故 G 、 I 处只能算一个高副。去掉机构中虚约束和局部自由度，则 $n=6$ ， $P_L=7$ ， $P_H=2$ 。机构自由度为 $F=3n-2P_L-P_H=3\times 6-2\times 7-2=2$

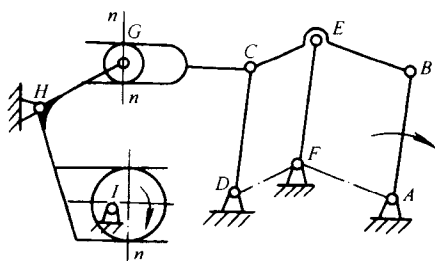


图 1-2

例 1-3 图1-3所示为一飞机水平尾翼操纵机构简图。其中，构件1为机架，操纵杆2为原动件，有时还可以从襟翼输入（即构件12摆动）或从稳定增效器输入（即构件7相对构件14移动），构件8为输出杆。试求各种输入方式下机构的自由度。

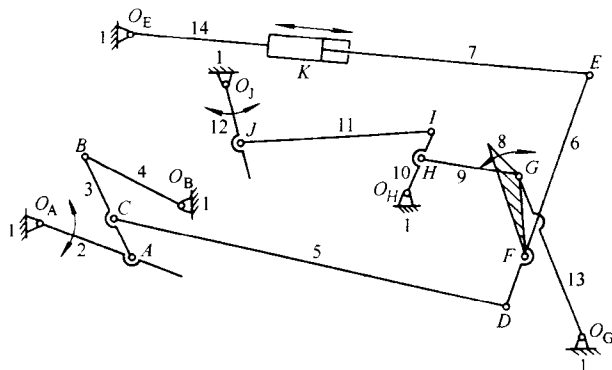


图 1-3

解 该机构有四种输入方式

(1) 仅从操纵杆输入 当襟翼不输入运动时，杆9、10、11、12和13均不运动， G 为固定铰链；当稳定增效器不输入运动时，杆7与杆14为一定长杆，可视为一个构件。此时 $n=7$ ， $P_L=10$ ， $P_H=0$ 。机构自由度为

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

(2) 由操纵杆和襟翼同时输入 此时 $n=12$ ， $P_L=17$ （其中 G 为复合铰链）， $P_H=0$ 。机构自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 12-2\times 17-0=2$$

(3) 由操纵杆和稳定增效器输入 此时杆7和杆14为两个活动构件， $n=8$ ， $P_L=11$ （其中有10个转动副，1个移动副）， $P_H=0$ 。机构自由度为

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 8-2\times 11-0=2$$

(4) 由操纵杆、襟翼、稳定增效器同时输入 此时 $n=13$ ， $P_L=18$ （其中有

17 个转动副, 1 个移动副), $P_H = 0$ 。机构自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 13 - 2 \times 18 - 0 = 3$$

例 1-4 绘制图 1-4a 所示活塞泵的机构运动简图。

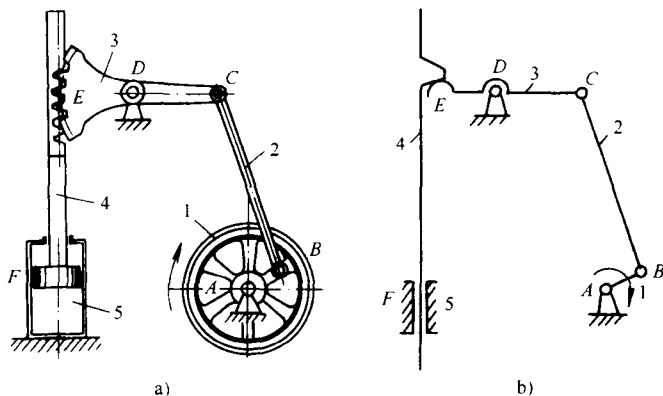


图 1-4

a) 活塞泵 b) 活塞泵的机构运动简图

解 活塞泵有曲柄 1、连杆 2、扇形齿轮 3、齿条活塞 4 和机架 5 共 5 个构件所组成。曲柄 1 是原动件, 2、3、4 为从动件。当原动件 1 回转时, 活塞在气缸中作往复运动。

各构件之间的联接如下: 构件 1 和构件 5、构件 2 和构件 1、构件 3 和构件 5 之间有相对转动, 分别构成转动副 A、B、C、D。构件 3 的轮齿与构件 4 的齿构成平面高副 E。构件 4 与构件 5 之间为相对移动, 构成移动副 F。

选取适当的比例, 按图 1-4a 尺寸, 用构件和运动副的规定符号画出机构运动简图, 如图 1-4b 所示。

例 1-5 确定图 1-5a 所示机构的自由度, 并将其中的高副换成低副, 确定机构所含的杆组和机构的级别(凸轮为原动件)。

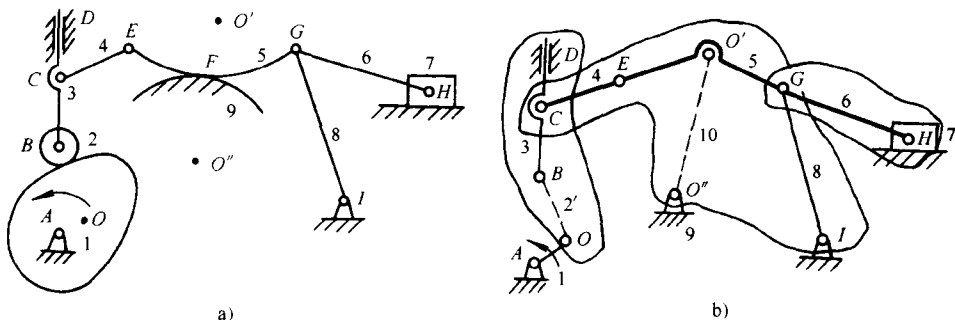


图 1-5

a) 机构运动简图 b) 高副低代后的机构运动简图

解 (1) 计算机构的自由度 B 处有局部自由度, G 处为复合铰链, $n = 7$, $P_L = 9$, $P_H = 2$ 。机构自由度为

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

(2) 高副低代 如图 1-5b 所示。

(3) 确定机构的杆组及机构的级别 该机构是由原动件 1、机架 9、两个Ⅱ级杆组(2'—3 和 6—7)和一个Ⅲ级杆组(4—5—10—8)组成的, 故该机构为Ⅲ级机构。

例 1-6 计算图 1-6 所示机构的自由度, 并确定机构所含杆组的数目和级别以及机构的级别(图中原动件用箭头表示)。

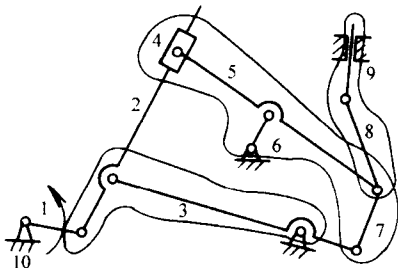


图 1-6

解 在图示机构中, $n = 9$, $P_L = 13$ (其中 11 个回转副, 2 个移动副, 一处有复合铰链), $P_H = 0$ 。机构自由度为

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

该机构是由原动件 1、机架 10、两个Ⅱ级杆组(8—9 和 2—3)和一个Ⅲ级杆组(4—5—6—7)组成的, 因为各杆组中的最高级别为Ⅲ级, 故该机构为Ⅲ级机构。

1.4 习题

1-1 绘出图 1-7 所示唧筒机构的机构运动简图。

1-2 绘出图 1-8 所示叶片式油泵的机构运动简图。

1-3 绘出图 1-9 所示回转柱塞泵的机构运动简图。

1-4 绘出图 1-10 所示冲床刀架机构的机构运动简图。

1-5 试判断图 1-11、图 1-12 所示运动链能否成为机构, 并说明理由。若不能成为机构, 请提出修改办法。

1-6 计算图 1-13 至图 1-20 所示各机构的自由度, 并指出其中是否含有复合铰链、局部自由度或虚约束, 说明计算自由度时应做何处理。

1-7 计算图 1-21 至图 1-26 所示各机构的自由度, 用低副代替高副, 并确定机构所含杆组的数目和级别以及机构的级别。

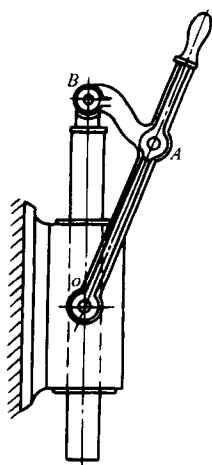


图 1-7

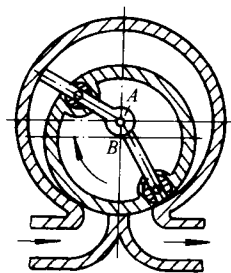


图 1-8

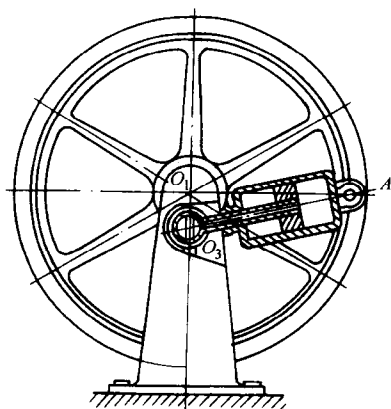


图 1-9

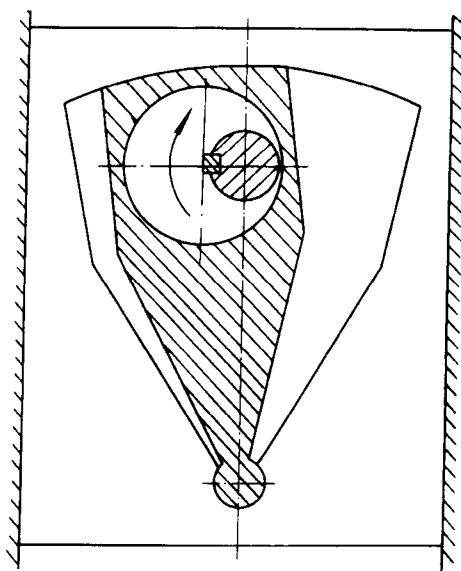


图 1-10

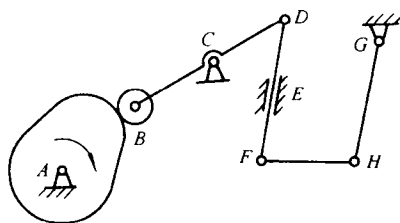


图 1-11

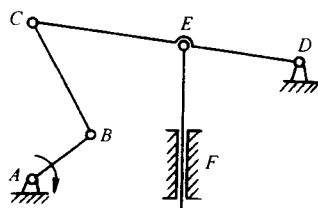


图 1-12

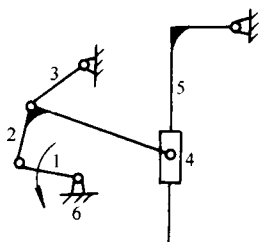


图 1-13

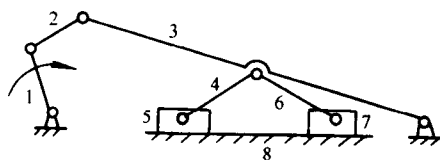


图 1-14

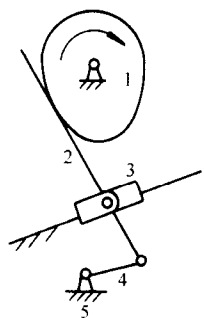


图 1-15

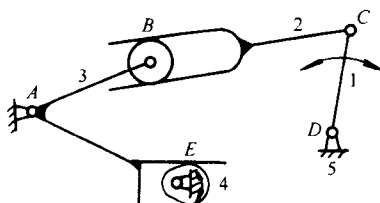


图 1-16

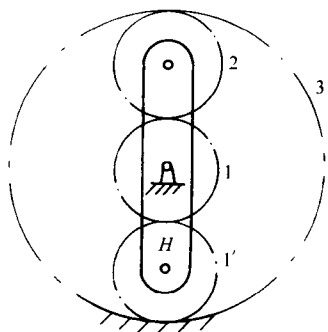


图 1-17

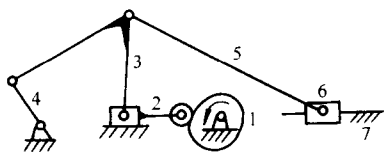
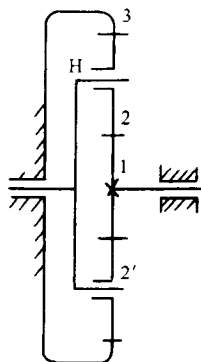


图 1-18

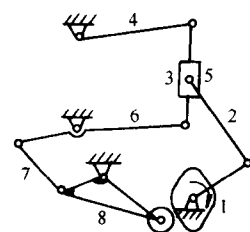


图 1-19

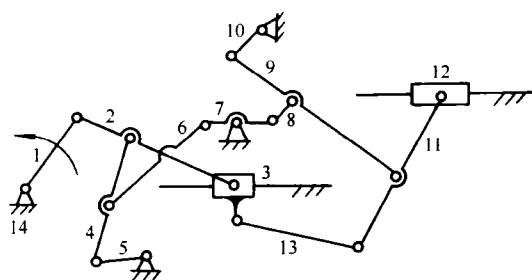


图 1-20

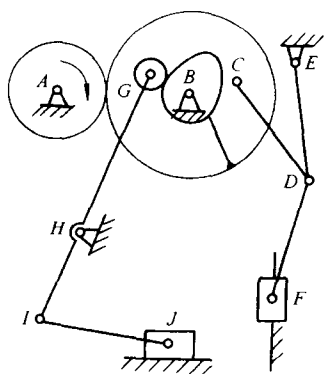


图 1-21

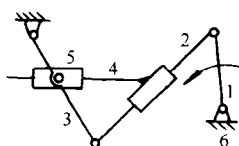


图 1-22

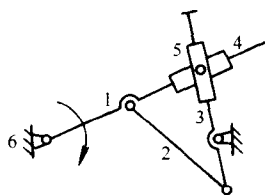


图 1-23

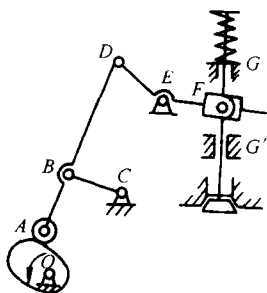


图 1-24

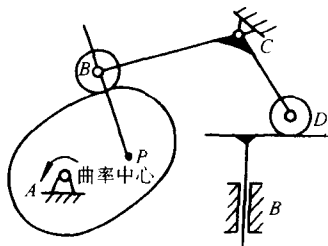


图 1-25

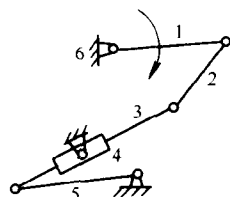


图 1-26

1.5 综合测试题

1-1 填空题及简答题。

(1) 平面机构中若引入一个高副将带入_____个约束，而引入一个低副将带入_____个约束。

(2) 高副低代必须满足的条件是_____，_____。

(3) 何谓运动链？运动链具备什么条件才具有运动的可能性？具备什么条件才具有运动的确定性？运动链具备什么条件才能成为机构？

(4) 何谓机构运动简图？绘制的步骤如何？

(5) 机构具有确定运动的条件是什么？

(6) 在计算平面机构自由度时应注意哪些事项？

(7) 杆组具有什么特点？如何确定杆组的级别？