

金字塔·考研与学习辅导丛书

机械原理

邱丽芳 孟彩芳
郭卫东 李继婷 编

机械工业出版社

本书是根据原国家教委颁布的《高等工业学校机械原理课程基本要求》的规定，由教授机械原理课程的一线教师结合多年的课堂教学和出题的实践经验而编写的。

全书共 10 章，包括机构的组成和结构，连杆机构，运动分析，凸轮机构，齿轮机构，轮系，其他常用机构，机械系统动力学，机械的平衡，机械中的摩擦与效率。本书总结性地重点介绍了机械原理课程的主要内容，包括基本概念、基本原理和基本公式，主要体现重点章节重点、难点分析及典型例题解题指导、习题与详细题解。书后附有模拟试题及编者所在学校的近几年的硕士生入学试题，并附有参考答案，有助于学生和考研者系统复习和灵活应用。

本书可作为机械原理课程的考研复习资料，也可作为机械类、近机类大学生学习机械原理的参考书，还可供有关专业教师及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械原理 / 邱丽芳等编. —北京：机械工业出版社，
2004.5
(金字塔·考研与学习辅导丛书)
ISBN 7-111-13632-2

I. 机... II. 邱... III. 机构学—研究生—入学考试—自学参考资料 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 115933 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑：冯春生 倪少秋
责任编辑：邓海平 版式设计：张世琴 责任校对：姚培新
蔡开颖
封面设计：陈 沛 责任印制：闫 焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2004 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·11.5 印张·253 千字
定价：28.00 元 (含参考答案)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

机械原理课程是高等工业院校机械类专业普遍开设的一门主干技术基础课，它对培养机械类高级技术人才起着十分重要的作用，也常常作为高校机械类专业硕士研究生入学考试课程。为了帮助学生学习，特别是帮助考研者系统复习应试，我们根据原国家教委颁布的《高等工业学校机械原理课程基本要求》的规定，通过对全国几十所著名院校近两、三年考研试题的分析，由教授机械原理课程的一线教师结合多年的课堂教学和参与考研试卷的编写和批改的经验，精心组织了内容，特编写了此书。本书是“考研与学习辅导丛书”之一。

全书共分 10 章，包括机构的组成和结构，连杆机构，运动分析，凸轮机构，齿轮机构，轮系，其他常用机构，机械系统动力学，机械的平衡，机械中的摩擦与效率。本书总结性地重点介绍了机械原理课程的主要内容，包括基本概念、基本原理和基本公式；主要体现重点章节重点、难点分析及典型例题解题指导、习题与详细题解。书后附有三套模拟试题以及北京科技大学、北京理工大学、天津大学、北京航空航天大学近几年的硕士学位研究生入学考试的真题，并附有参考答案，有助于学生和考研者系统复习和灵活应用。

本书作为研究生入学考试的综合复习类辅导教材，重点突出实战性，强调的是实用性。本书结构紧凑，内容精练。在阐述了主要内容的基础上，给出了学习中应注重的重点和难点问题，在强调基本概念的同时，更注重把解题的思路和方法贯穿在内容当中，特别是通过典型例题的详细讲解，非常便于学习者掌握基本概念和解题方法。通过习题的亲自实践，学习者可以很快地提高解题速度，掌握解题技巧。

本书读者应对机械原理的基本知识、基本概念有一定程度的了解，特别是对机械原理有了一个比较系统的学习后，再来阅读此书会更有帮助。本书对考研人员了解考研试题的类型及解法大有裨益。希望读者在学习应用本书时注意以下几点：

1. 抓住各章的重点，掌握基本概念、基本公式和基本原理，并灵活掌握

和应用这些知识。不但要知其然，而且还要知其所以然。

2. 对每一道典型例题都能认真学习和领会，对所给出的习题能仔细思考，亲自动笔做一做，通过做题来掌握各类题型分析问题和解决问题的方法，认真的实践一定会使你达到举一反三、事半功倍的效果。

3. 在规定的时间内，做几套模拟试题和相应的全真试题，从而尽快达到临考状态。

本书可作为机械原理课程的考研复习资料，也可作为机械类、近机类大学生学习机械原理的学习辅导书，还可供有关专业教师及工程技术人员参考。

参加本书编写的有：北京科技大学邱丽芳（第 1、6、7、8 章）；天津大学孟彩芳（第 2、3、9 章）；北京航空航天大学郭卫东（第 4、10 章），李继婷（第 5 章）。

特别感谢提供硕士生入学试题的北京理工大学孔凌嘉老师、北京科技大学韩建友老师等，对命题的各位老师的辛勤劳动也表示诚挚的感谢。

鉴于编者水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者给予批评指正。

编者
2003 年 7 月

目 录

前言

第 1 章	机构的组成和结构	1
1.1	主要内容	1
1.1.1	基本概念	1
1.1.2	基本原理和公式	2
1.1.3	重点与难点	3
1.2	典型例题分析	4
1.3	习题与详细题解	7
第 2 章	连杆机构	10
2.1	主要内容	10
2.1.1	基本概念、原理和公式	10
2.1.2	平面连杆机构的运动设计	11
2.1.3	重点与难点	15
2.2	典型例题分析	15
2.3	习题与详细题解	20
第 3 章	运动分析	25
3.1	主要内容	25
3.1.1	基本原理	25
3.1.2	基本概念和公式	25
3.1.3	注意事项	28
3.1.4	解析法的基本方法	28
3.1.5	重点与难点	28
3.2	典型例题分析	29

3.3	习题与详细题解	34
第 4 章	凸轮机构	41
4.1	主要内容	41
4.1.1	从动件常用运动规律的特点	41
4.1.2	凸轮机构压力角与机构尺寸的关系	42
4.1.3	盘形凸轮轮廓曲线的设计	42
4.1.4	重点与难点	45
4.2	典型例题分析	46
4.3	习题与详细题解	49
第 5 章	齿轮机构	54
5.1	主要内容	54
5.1.1	渐开线齿廓	54
5.1.2	渐开线标准直齿圆柱齿轮	55
5.1.3	渐开线直齿圆柱齿轮啮合传动	56
5.1.4	渐开线直齿圆柱齿轮机构的传动类型及传动设计	58
5.1.5	斜齿圆柱齿轮机构传动	59
5.1.6	直齿锥齿轮机构传动	60
5.1.7	重点与难点	60
5.2	典型例题分析	62
5.3	习题与详细题解	64
第 6 章	轮系	68
6.1	主要内容	68
6.1.1	基本概念	68
6.1.2	基本原理和公式	69
6.1.3	重点与难点	72
6.2	典型例题分析	72
6.3	习题与详细题解	74
第 7 章	其他常用机构	78
第 8 章	机械系统动力学	80
8.1	主要内容	80
8.1.1	基本概念、原理和公式	80

8.1.2 重点与难点	84
8.2 典型例题分析	84
8.3 习题与详细题解	88
第 9 章 机械的平衡	92
9.1 主要内容	92
9.1.1 基本概念和公式	92
9.1.2 基本原理	93
9.1.3 重点与难点	93
9.2 典型例题分析	93
9.3 习题与详细题解	97
第 10 章 机械中的摩擦与效率	102
10.1 主要内容	102
10.1.1 运动副中摩擦与自锁	102
10.1.2 机械效率与自锁	104
10.1.3 斜面传动与螺旋传动的机械效率	105
10.1.4 重点与难点	107
10.2 典型例题分析	107
10.3 习题与详细题解	110
模拟试题及硕士生入学试题	114
模拟试题 1	114
模拟试题 2	117
模拟试题 3	120
北京科技大学硕士生入学试题 1	123
北京科技大学硕士生入学试题 2	127
北京理工大学硕士生入学试题	132
天津大学硕士生入学试题	135
北京航空航天大学硕士生入学试题 1	136
北京航空航天大学硕士生入学试题 2	139
参考文献	143

第 1 章 机构的组成和结构

1.1 主要内容

本章介绍机构的组成原理和结构分析。主要内容有：机器、机构、零件、构件、运动副、运动链、约束和自由度等基本概念；机构运动简图绘制的方法；机构的组成原理和结构分析的方法，包括高副低代的方法，判断杆组和机构的级别以及Ⅱ级、Ⅲ级机构的分解。

1.1.1 基本概念

(1) 机器 一般由动力系统、传动系统、执行系统、操纵系统和控制系统等部分组成。有以下 3 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能量转换。

(2) 机构 传递运动和动力的装置，主要反映机器的机械运动传递和运动形式转换的特征。

(3) 零件 加工制造的单元体。

(4) 构件 机器中独立的运动单元体，一个构件可以是一个零件，也可以是由若干个零件刚性联接在一起的一个独立运动的整体。

(5) 运动副 两构件直接接触形成的可动联接。两构件上直接参与接触而构成运动副的部分——点、线或面称为运动副元素。根据构成运动副的两构件的接触情况，平面运动副分为低副（面接触）和高副（点或线接触），其运动形式和引入约束数及自由度情况如表 1-1 所示。

表 1-1 平面运动副运动形式和引入约束数及自由度情况

接触形式	运动形式	约束数	自由度
低副	转动、移动	2 (5)	1
高副	转动兼移动	1 (4)	2

(6) 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运动的系统。运动链可以是首末封闭的闭链，也可以是未封闭的开链。

(7) 运动链成为机构的条件 取运动链中一个构件作为机架，运动链相对机架的自由度必须大于零，且主动件数目等于运动链的自由度数。

(8) 平面机构的组成原理 一个机构是由若干个杆组依次联接于主动件和机架而构成的。

(9) 杆组 不可再分解的、自由度为零的运动链。最简单的杆组 $n=2$ ， $P_L=3$ 为 II 级组； $n=4$ ， $P_L=6$ 为 III 级组。

(10) 机构的级别判定 以杆组的最高级别而确定。同一机构若取不同构件为主动件，则机构的级别有可能不同。

(11) 高副低代的条件 必须满足代替前后机构的自由度不变和机构的瞬时速度和瞬时加速度不变。

1.1.2 基本原理和公式

1. 平面运动链自由度 平面运动链自由度的计算公式为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \text{ 或 } F = 3n - 2P_5 - P_4$$

式中， F 是运动链的自由度； n 是活动构件的数目； P_5 或 P_L 是低副的数目； P_4 或 P_H 是高副的数目。

计算自由度时应注意的问题：

(1) 复合铰链 当 m ($m > 2$) 个构件在一处以转动副联接时，则构成复合铰链，其转动副数应为 $(m-1)$ 个，图 1-1 中的 B 点即为复合铰链。

(2) 局部自由度 不影响机构其他构件运动的局部运动自由度。在计算机构自由度时应将其除去。图 1-2a 中滚子绕其自身轴线转动为局部自由度，可将它看成是和从动件焊在一起的一个构件，如图 1-2b 所示。

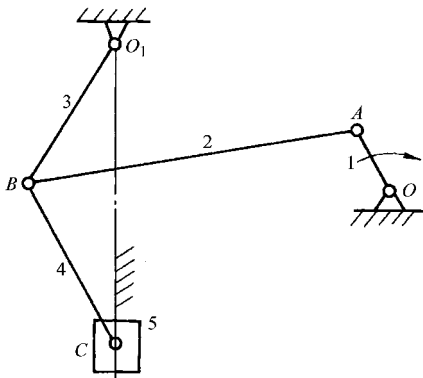


图 1-1 复合铰链

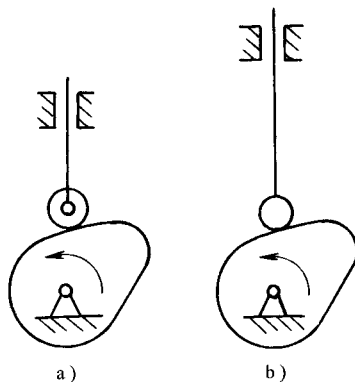


图 1-2 局部自由度

(3) 虚约束 指不起独立限制作用的重复约束。虚约束主要用于改善机构的受力状况，但不影响机构运动，计算自由度时应先将引入虚约束的运动副和

构件除去。虚约束往往不太容易判别，常发生在以下场合：

1) 两构件组成多个移动副，且导路互相平行或重合时；或两构件构成多个转动副，其轴线互相重合时。

2) 两活动构件上某两点的距离在运动过程中始终保持不变。

3) 轨迹重合。

4) 机构中对运动起重复限制作用的对称部分。

2. 机构运动简图的绘制 不考虑构件、运动副的外形和具体构造，只用简单的线条和符号代表构件和运动副，并按比例确定各运动副位置，表示机构的组成和传动情况的机构运动特性的简明图形称为机构运动简图。机构运动简图与原机构具有完全相同的运动特性。

机构运动简图的绘制步骤如下：

1) 分析机构的动作原理、组成情况和运动情况，确定其主动件、机架、执行部分和传动部分。

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

3) 恰当地选择视图平面，通常可选择机构中多数构件的运动平面为视图平面，必要时也可选择两个或两个以上的视图平面，然后将其展到同一图面上。

4) 选择适当的比例尺，定出各运动副的相对位置，并用各运动副的代表符号、常用机构的运动简图符号和简单的线条，绘制机构运动简图。

5) 从主动件开始，按传动顺序标出各构件的编号和运动副的代号。在主动件上标出箭头以表示其运动方向。

绘制运动简图时应注意：

1) 绘制运动副时，应特别注意运动副位置的确定，如转动副的中心位置，移动副的导路位置。

2) 绘制构件时，要注意用最简单的线条和规定的符号表达构件的形状。

3. 平面机构结构分析的步骤

1) 计算机构的自由度，确定主动件。

2) 进行高副低代。

3) 从远离主动件的地方开始试拆杆组。先试拆Ⅱ级杆组，当不可能时，再试拆Ⅲ级杆组。应注意，每拆出一个杆组后，剩下的部分仍能组成机构，且自由度与原机构相同，直至全部拆出只剩下主动件。

4) 确定机构的级别。

1.1.3 重点与难点

本章重点是机构组成要素的基本概念和平面机构自由度的计算，计算机构

自由度时，要特别注意复合铰链、局部自由度和虚约束。机构运动简图绘制是本章的难点。平面机构结构分析是本章的重点也是难点。

1.2 典型例题分析

例 1-1 试计算如图 1-3 所示压铸机合模机构的自由度，并指出其中不起独立限制作用的虚约束。其中构件 9、8、7 分别与构件 2、3、4 对称于中心线。

解 本题中构件 9、8、7 分别与构件 2、3、4 对称于中心线，所以构件 2、3、4 或 7、8、9 为虚约束，应去掉后再计算自由度。

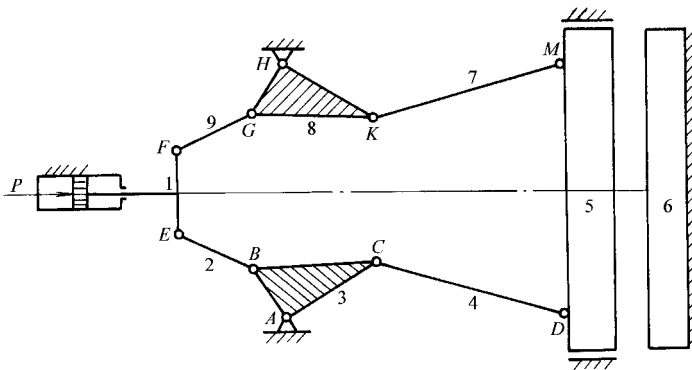


图 1-3 例 1-1 图

去掉虚约束后： $n = 5$ ， $P_L = 7$ ， $P_H = 0$ ，

所以 $F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$

例 1-2 计算图 1-4 所示的惯性筛机构的自由度，并指出复合铰链、局部自由度和虚约束所在的位置。最后判断其是否具有确定的运动规律（标箭头的构件为主动件）。

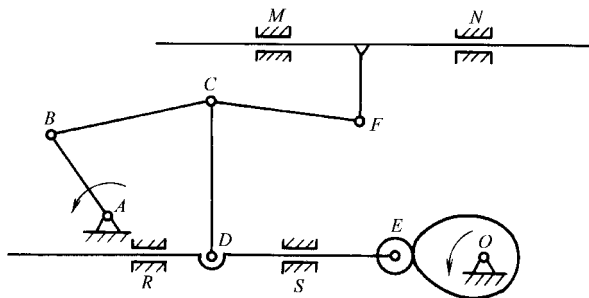


图 1-4 例 1-2 图

解 E 处存在局部自由度, C 为复合铰链, M (或 N)、 R (或 S) 出现虚约束。

$$n = 7, P_L = 9, P_H = 1$$

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

因为主动件数 = F , 所以机构具有确定运动。

例 1-3 计算图 1-5 所示机构的自由度; 分别取构件 1 和 7 为主动件, 拆出所有杆组, 并确定机构的级别 (必须画出各杆组)。

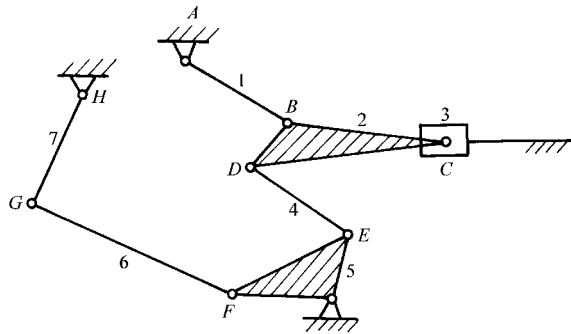


图 1-5 例 1-3 图

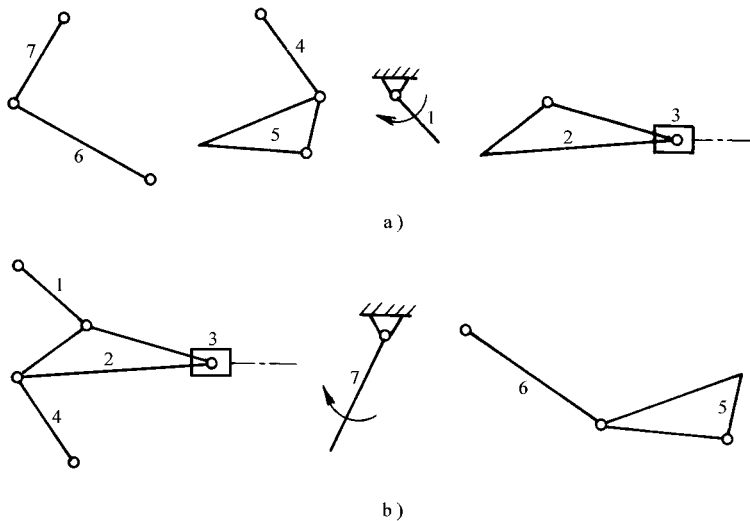


图 1-6 例 1-3 解图

解 (1) 计算自由度

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

1.3 习题与详细题解

习题 1-1 试计算图 1-9 所示机构的自由度数，若有复合铰链、局部自由度或虚约束必须明确提出。并指出杆组的数目与级别以及机构级别。

解 (1) 计算自由度 该机构 J 处为复合铰链， D 或 F 为虚约束。 $n=9$ ， $P_L=13$ ， $P_H=0$ ，因此得

$$\begin{aligned} F &= 3 \times n - 2P_L - P_H \\ &= 3 \times 9 - 2 \times 13 - 0 = 1 \\ F &= \text{主动件数} = 1 \end{aligned}$$

(2) 结构分析如图 1-10 所示。

II 级组数：4 个，机构级别：II 级

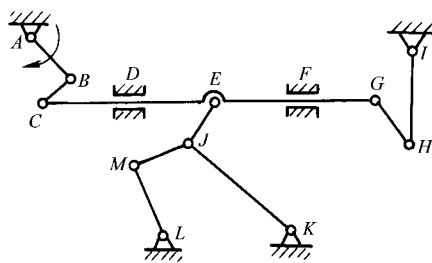


图 1-9 习题 1-1 图

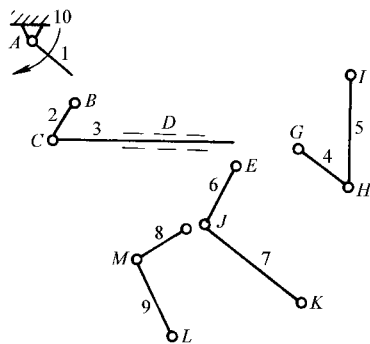
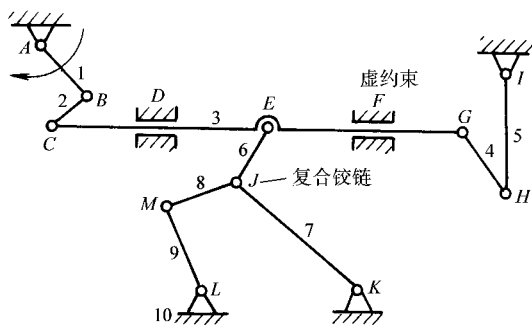


图 1-10 习题 1-1 解图

习题 1-2 求图 1-11 所示机构的自由度数，如有复合铰链、局部自由度和虚约束，需明确指出。图中 $CDFE$ 和 $EFHG$ 均成平行四边形。

解 机构中滚轮 B 处有局部自由度， HG 杆及 H 、 G 两铰链（或 FE 杆及 F 、 E 两铰链）为虚约束。 $n=4$ ， $P_L=5$ ， $P_H=1$ ，因此得

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

习题 1-3 计算图 1-12 所示机构的自由度，并在图上指出其中的复合铰链、局部自由度和虚约束。

解 该机构中 B 为局部自由度， C （或 D ）为虚约束， G 为复合铰链。 $n=7$ ， $P_L=9$ ， $P_H=2$ ，因此得

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

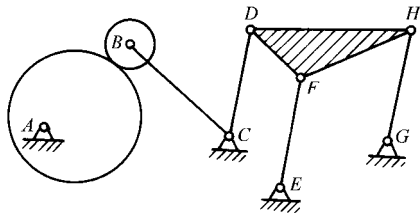


图 1-11 习题 1-2 图

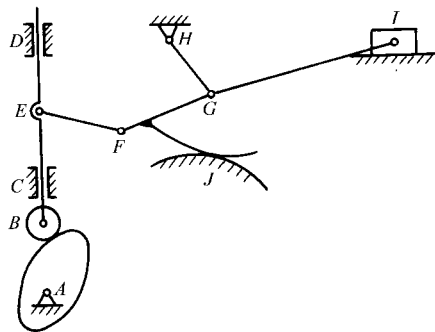


图 1-12 习题 1-3 图

习题 1-4 计算图 1-13 所示机构的自由度，分析机构的组成（拆杆组），并判断机构的级别。

解（1）计算自由度 机构中 $n=5$, $P_L=7$, $P_H=0$ ，因此得

$$F = 3 \times n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

$$F = \text{主动件数} = 1$$

（2）拆杆组如图 1-14 所示。

Ⅲ级杆组数：1 个，机构级别：Ⅲ级

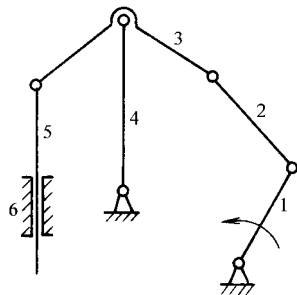


图 1-13 习题 1-4 图

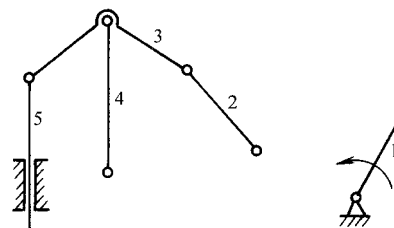


图 1-14 习题 1-4 解图

习题 1-5 计算图 1-15 所示运动链的自由度，判断能否成为机构，若能够成为机构，需要几个主动件？

解 机构中 $n=3$, $P_L=3$, $P_H=2$ ，因此得

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

所以能成为机构，需要一个主动件（ $F = \text{主动件数} = 1$ ）。

习题 1-6 试画出图 1-16 所示机构的运动简图，并计算其自由度。

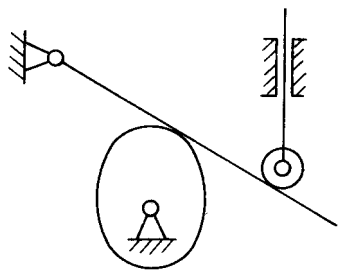


图 1-15 习题 1-5 图

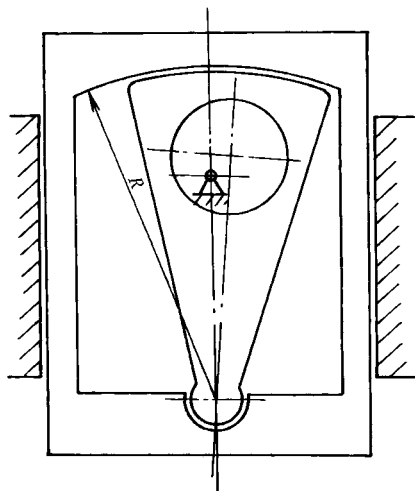


图 1-16 习题 1-6 图



图 1-17 习题 1-6 解图

解 (1) 机构简图如图 1-17 所示。

(2) 计算自由度 机构中 $n=3$, $P_L=4$, $P_H=0$, 因此得

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 3-2\times 4-0=1$$

习题 1-7 试求图 1-18 所示机构的自由度, 并画出高副低代的机构简图。

解 (1) 计算自由度 机构中 $n=6$, $P_L=8$, $P_H=1$, 因此得

$$F=3n-2P_L-P_H=3\times 6-2\times 8-1=1$$

(2) 高副低代后的简图如图 1-19 所示。

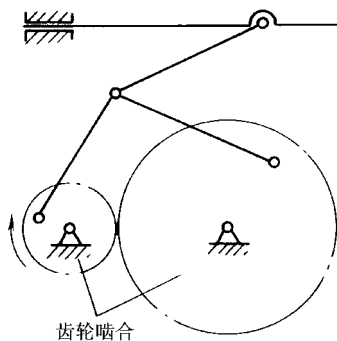


图 1-18 习题 1-7 图

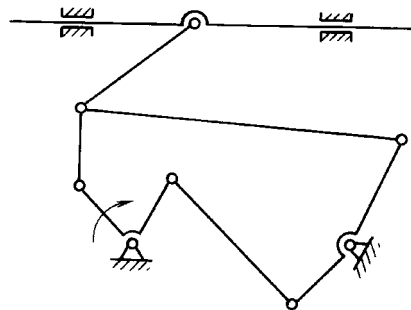


图 1-19 习题 1-7 解图

第2章 连杆机构

2.1 主要内容

连杆机构在生产实践中得到广泛的应用。本章主要介绍平面连杆机构的类型特点和应用，平面连杆机构的运动、动力特性和运动设计。包括铰链四杆机构的基本型式及其演化、曲柄存在的条件，机构的极限位置、摆角、急回特性、极位夹角、行程速比系数、压力角和传动角及死点等概念和平面连杆机构的设计方法。

2.1.1 基本概念、原理和公式

(1) 铰链四杆机构的基本形式及其演化 全部由转动副组成的四杆机构称为铰链四杆机构。其中，固定不动的构件称为机架；与机架相连的构件称为连架杆。能作整周回转的连架杆称为曲柄；不能作整周转动、只能在某一角度内摆动的连架杆称为摇杆。不与机架相连、将两连架杆连在一起的构件称为连杆。铰链四杆机构的基本型式有：曲柄摇杆机构（有一个曲柄）、双曲柄机构（有两个曲柄）和双摇杆机构（有零个曲柄）。演化方法：通过改变构件的形状和相对尺寸将转动副演化为移动副，如通过将曲柄摇杆机构中摇杆的长度增至无穷大并改变为滑块，得到曲柄滑块机构；通过改变运动副的尺寸，如扩大转动副演化成偏心轮机构；通过取不同的构件为机架得到不同的机构。

(2) 铰链四杆机构有曲柄的条件 第一个条件是：最短杆与最长杆的长度之和必须小于或等于其余两杆的长度之和；第二个条件是：连架杆和机架中必有一杆为最短杆。若第一个条件不满足，一定不存在曲柄，是双摇杆机构。第一个条件满足后，再审视固定哪个构件为机架，若固定最短杆的相邻杆为机架就存在一个曲柄，是曲柄摇杆机构；若固定最短杆为机架就存在两个曲柄，是双曲柄机构；若固定最短杆相对的杆为机架就不存在曲柄，是双摇杆机构。

应用上面的条件，将对心（或偏置）滑块机构和导杆机构中的移动副视为转动中心位于垂直于滑块导路无穷远处的转动副，可推导出相应机构曲柄存在的条件。对于滑块机构，若设连杆、偏距和非滑块的连架杆的长分别为 b 、 e 和 a ，则存在曲柄的条件为 $a + e < b$ 。

(3) 机构的极限位置、摆角和极位夹角 θ 往复摆动或往复移动的从动件