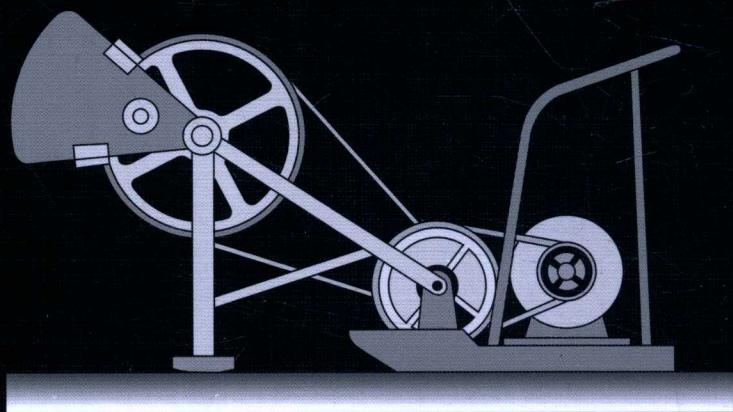


普通高等教育“十二五”规划教材

机械原理全程辅导 与习题解答

邱丽芳 韩建友 毕佳 编

JIXIE YUANLI QUANCHENG FUDAO
YU XITI JIEDA



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

机械原理全程辅导与习题解答

邱丽芳 韩建友 毕 佳 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是普通高等教育“十一五”规划教材《机械原理》第二版（韩建友、邱丽芳编）的配套辅导教材。本书的主要内容包括四个部分，第一个部分包括绪论、机构基础知识概述、连杆机构的传动特性及构成分析、连杆机构综合、连杆机构的运动分析、凸轮机构设计、齿轮系、平衡、动力分析、机械系统的效率，各章均有基本要求和重点难点、典型例题分析、复习思考题、习题。第二部分为机械原理大作业。第三部分为实验指导书。第四部分为附录，包括美国英文教材习题选编、习题参考解答。

本书可作为高等院校机械类本科生教材，也可为其他近机类、非机类专业本科生和相关工程技术人员提供参考。

图书在版编目（CIP）数据

机械原理全程辅导与习题解答/邱丽芳，韩建友，毕佳编. —北京：化学工业出版社，2016.2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-25866-3

I. ①机… II. ①邱… ②韩… ③毕… 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（2015）第 299221 号

责任编辑：李 娜
责任校对：陈 静

装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：北京云浩印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 252 千字 2016 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：24.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为提高机械原理教学质量,使学生更好地掌握“机械原理”教材中的重点精华内容,也为了配合普通高等教育“十一五”国家级规划教材《机械原理(第2版)》(韩建友、邱丽芳编)的使用,我们编写了这本《机械原理全程辅导与习题解答》。本书在体系和内容上是以《机械原理(第2版)》教材为基础,根据编者多年授课的经验和要求编写而成,每章都包括基本要求和重点难点、典型例题分析、复习思考题和习题(包含答案),为了使学生学以致用和实践创新,编入了编者多年的教学实践内容(三个大作业),以利于学生参考、学习和创新,还编入了机械原理实验指导。此外,为了使学生了解美国的教学内容和学习机械原理专业英语,我们选编了部分英语习题,供学生学习和参考。

本书第3章、第4章由韩建友编写,实验指导书由毕佳编写,其余章节及大作业附录等由邱丽芳编写,谢仲添在书稿的文字与图形的绘制与处理中做了大量工作,在此表示诚挚的谢意。

北京航空航天大学郭卫东教授、北京科技大学于晓红教授对书稿进行了全面细致的审阅,提出了很多宝贵有益的修改意见,在此表示深深的、衷心的感谢!

特别感谢于晓红教授在本书前期校内讲义“机械原理习题集”中对典型例题和习题所做的大量工作。感谢北京科技大学教务处对本书的出版所给予的大力支持和帮助。本书的编写和出版得到了北京科技大学“十二五”教材建设经费的资助。

由于编者水平所限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 基本要求和重点难点	1
1.2 复习思考题	1
第 2 章 机构基础知识概述.....	2
2.1 基本要求和重点难点	2
2.2 典型例题分析	3
2.3 复习思考题	6
2.4 习题	7
第 3 章 连杆机构的传动特性及构成分析.....	9
3.1 基本要求和重点难点	9
3.2 典型例题分析.....	12
3.3 复习思考题.....	12
3.4 习题.....	13
第 4 章 连杆机构综合	17
4.1 基本要求和重点难点.....	17
4.2 典型例题分析.....	17
4.3 复习思考题.....	25
4.4 习题.....	27
第 5 章 连杆机构的运动分析	33
5.1 基本要求和重点难点.....	33
5.2 典型例题分析.....	34
5.3 复习思考题.....	36
5.4 习题.....	37
第 6 章 凸轮机构设计	39
6.1 基本要求和重点难点.....	39
6.2 典型例题分析.....	40
6.3 复习思考题.....	46
6.4 习题.....	47
第 7 章 齿轮系	49
7.1 基本要求和重点难点.....	49
7.2 典型例题分析.....	59
7.3 复习思考题.....	69
7.4 习题.....	71

第 8 章 平衡	81
8.1 基本要求和重点难点	81
8.2 典型例题分析	84
8.3 复习思考题	87
8.4 习题	89
第 9 章 动力分析	91
9.1 基本要求和重点难点	91
9.2 典型例题分析	95
9.3 复习思考题	101
9.4 习题	103
第 10 章 机械系统的效率	105
10.1 基本要求和重点难点	105
10.2 典型例题分析	106
10.3 复习思考题	108
10.4 习题	109
机械原理大作业	111
机械原理大作业 I 机构分析与综合	111
机械原理大作业 II 齿轮机构分析与设计	112
机械原理大作业 III 机构运动方案设计	113
实验指导书	115
实验一 机构简图测绘	116
实验二 机构运动参数测定	123
实验三 平面机构综合与创新	126
实验四 齿轮范成原理	131
实验五 渐开线直齿圆柱齿轮参数的测定	137
实验六 刚性转子的动平衡	143
附录	149
附录 A 美国英文教材 (参考文献 [1]) 习题选编	149
附录 B 习题参考解答	156
参考文献	158

第 1 章 绪 论

1.1 基本要求和重点难点

【基本要求】 了解机械原理课程的研究对象、研究内容、地位及学习本课程的目的和学习方法。了解机械产品的一般设计过程和特点。

【重点】 什么是机械原理、何谓机械、何谓机器、何谓机构、机器与机构的特征。

1.2 复习思考题

1-1 机械原理的研究对象、研究内容是什么？

1-2 机械、机器、机构的特征是什么？机器与机构有何异同？

第2章 机构基础知识概述

本章是机构基础知识介绍,是后续章节机构分析与综合的基础,介绍一些基本概念,如构件、运动副、运动链、机构及结构、过载结构等,详细说明了自由度的概念和机构自由度的计算方法。

介绍一些常用的机构类型,几种典型间歇机构、螺旋机构、组合机构、微机构和柔性机构等的功能及工作原理。

2.1 基本要求和重点难点

【基本要求】

- (1) 熟练掌握基本概念;
- (2) 熟练掌握机构运动简图绘制的方法,能够用运动简图表达自己的设计构思;
- (3) 熟练掌握平面机构自由度的计算方法,能够准确判别机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束。

【重点】

- (1) 基本概念;
- (2) 平面机构自由度的计算方法,能够准确判别机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束。

【难点】 机构运动简图绘制的方法,用运动简图表达自己的设计构思。

【主要内容】

(1) 基本概念

零件——制造的单元,即在加工中不可分割的单元体。

构件——运动的单元,即在运动中是不可再分的单元体。

运动副——两构件直接接触形成的可动连接。

运动副元素——构件上参与接触的部分。

自由度——独立运动的数目。

约束——运动副对构件的独立运动所施加的限制。

运动链——两个以上的构件通过运动副连接而成的系统。

机构——若干个自由度为零的基本杆组与原动件和机架的组合。

机构具有确定运动的条件为:机构的自由度数 F 与原动件数相等。即:

$$F = \text{原动件数}$$

(2) 平面机构中的运动副,如表 2-1 所示。

运动副是一种两个或两个以上构件的连接,连接允许构件间有某些运动,或可能的运动。运动副可按下列几种方法分类:

解：机构简图如图 2-2 所示。

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

例 2-2 试计算图 2-3 所示偏心回转油泵机构的自由度。

解：机构简图如图 2-4 所示。

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

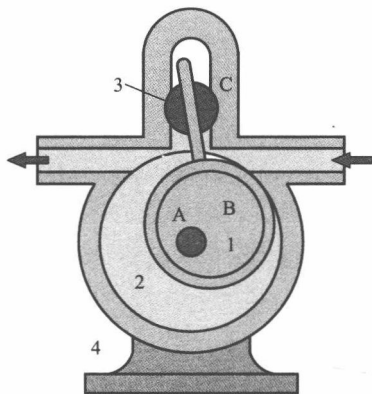


图 2-3 偏心回转油泵

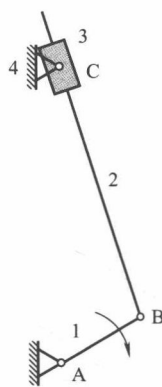


图 2-4 机构简图

例 2-3 计算图 2-5 所示大筛机构的自由度。

解：去掉局部自由度和虚约束的大筛机构如图 2-6 所示。

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 = 2$$

需要两个原动件。

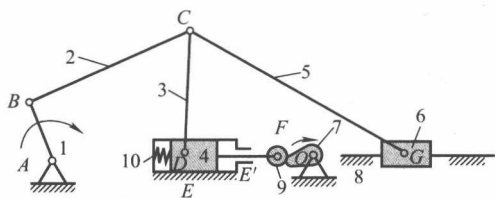


图 2-5 大筛机构

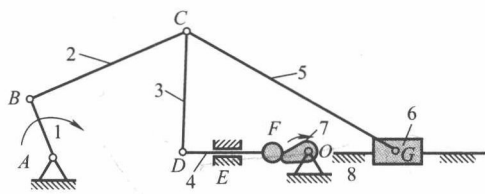


图 2-6 去掉局部自由度和虚约束的大筛机构

例 2-4 计算图 2-7 所示机构的自由度。

解： $F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1$

构件 3、4、5 形成复合铰链。

例 2-5 计算图 2-8 所示机构的自由度。

解： $F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 1 = 0$

构件 4、5、6 形成复合铰链。

例 2-6 如图 2-9 所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 回转，而固定在 A 轴上的凸轮 2 与杠杆 3 组成的凸轮机构将使冲头 4 上下运动达到冲压的目的。试绘出运动简图，分析是否能实现设计意图，并提出修改方案。

解：(1) 绘制机构运动简图。选定一适当的比例尺和视图平面，并依次定出各转动副的位置和移动副导路的方位；画出各运动副的符号，并用线条连接，即得该初拟方案的运动简图，如图 2-10 所示。

(2) 计算其机构自由度。由机构运动简图可知，该机构具有三个活动构件 1、3、4，三个

转动副 A、B、C，一个移动副和一个高副，没有局部自由度和虚约束，故此机构的自由度为：

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 1 = 0$$

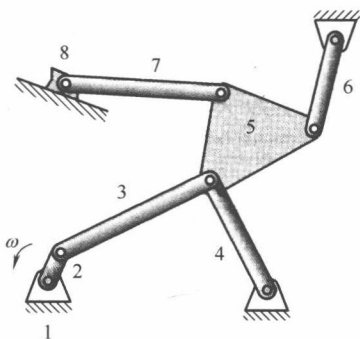


图 2-7 例 2-4 图

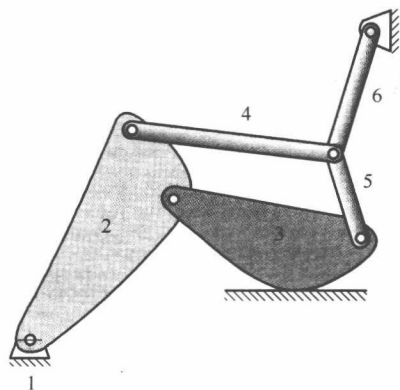


图 2-8 例 2-5 图

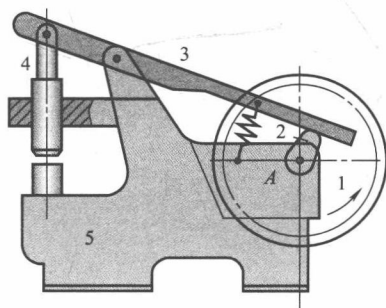


图 2-9 简易冲床

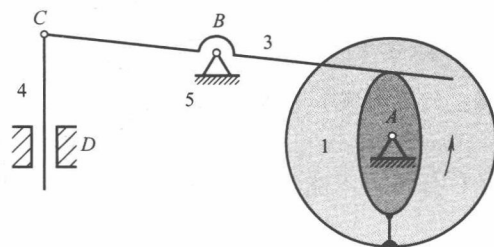


图 2-10 机构运动简图

(3) 分析能否实现设计意图。 $F=0$ ，说明该方案不能实现设计意图。从图中 C 的运动也可分析出：构件 3 上 C 点的运动轨迹应为圆弧，而构件 4 上的 C 点的运动轨迹应为直线，显然不可能实现设计意图。

(4) 实现设计意图。需在 C 处增加一个自由度，其改进后的方案如图 2-11 所示。

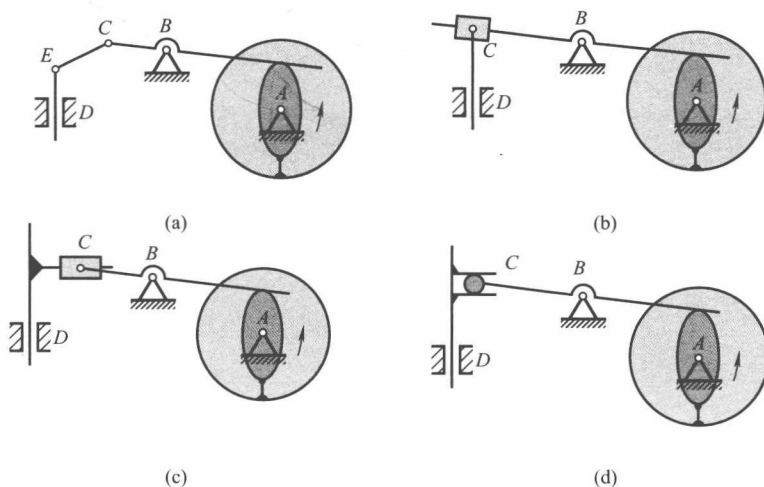


图 2-11 改进方案

例 2-7 图 2-12 所示为一机构初拟方案, 设计意图是实现从动件的直线移动, 试分析是否可行。

解: 首先必须搞清设计者的意图, 计算其自由度, 然后分析能否实现设计意图。

(1) 计算运动链的自由度:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$$

(2) 分析: 能够实现直动从动件的往复移动, 满足设计意图的要求。

例 2-8 如图 2-13 所示为一机构初拟方案, 设计意图是实现从动件 DE 的直线移动, 试分析是否可行。

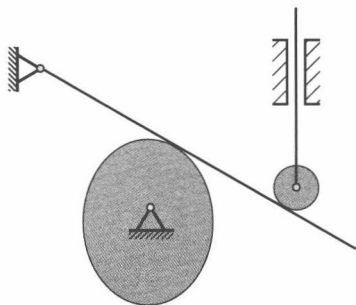


图 2-12 初拟方案

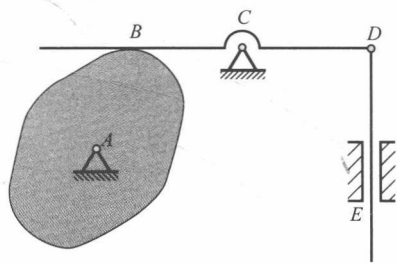


图 2-13 初拟方案

解: (1) 计算运动链的自由度:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 1 = 0$$

(2) 分析: 不能实现直动从动件的往复移动, 设计意图不能满足。

2.3 复习思考题

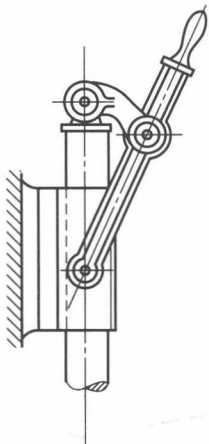
2-1 何谓零件、构件、运动副、运动链、机构?

2-2 运动链成为机构的条件是什么?

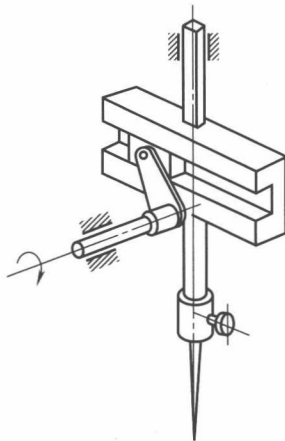
2-3 平面运动副, 最少有几个自由度? 最多有几个自由度? 最少可以引入几个约束? 最多可以引入几个约束?

2.4 习 题

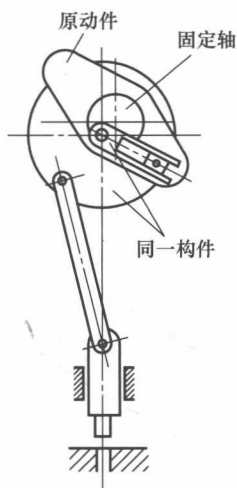
2-1 试绘出下列平面机构的运动简图，并计算其自由度。



(a) 唧筒机构



(b) 缝纫机针杆机构

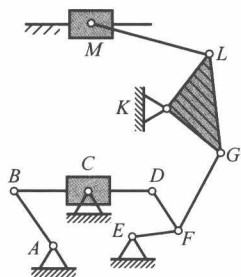


(c) 冲床机构

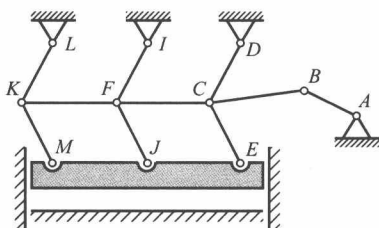
习题 2-1 图

班级_____姓名_____学号_____

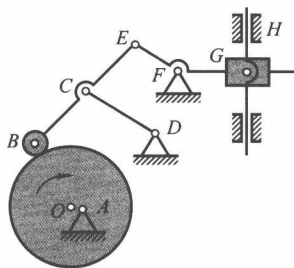
2-2 计算下列机构的自由度，若有复合铰链、局部自由度或虚约束必须明确指出。



(a)



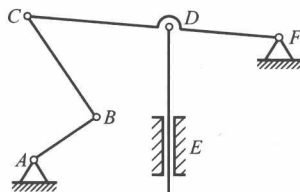
(b)



(c)

习题 2-2 图

2-3 下图所示为机构初拟方案，设计意图是实现从动件 DE 的直线移动，试分别分析是否可行，并提出修改方案。



习题 2-3 图

第3章 连杆机构的传动特性及构成分析

本章主要介绍连杆机构的运动和动力特性。铰链四杆运动链有整转副存在时，三种机构的运动特点；给出机构极限点的概念及可动性与驱动构件选取的关系；急回运动的产生及衡量指标，动力特性中介绍衡量动力学特性的一个重要指标——传动角或压力角；给出死点的定义及其与压力角（或传动角）的关系。

最后介绍机构变换，以及机构构成的杆组法。阐述杆组法在计算机普遍应用的今天所具有的特殊意义。

3.1 基本要求和重点难点

【基本要求】

- (1) 熟练掌握铰链四杆机构的曲柄存在条件、明确极限点和死点的区别；
- (2) 明确急回运动的意义，熟练掌握机构急回运动的确定方法；
- (3) 明确机构压力角（或传动角）的定义、掌握确定压力角时一定明确原动件；
- (4) 明确死点位置所对应压力角和传动角的大小，并熟练掌握各种机构压力角和传动角的确定方法；
- (5) 了解通过运动副和构件数量和类型的变换可以得到不同的运动链或机构；
- (6) 了解机架变换可以得到不同的机构；
- (7) 了解机构杆组的拆分与机构的杆组构成法。

【重点】 Grashof 条件、曲柄存在条件、极限位置、急回特性；传动角或压力角、死点与压力角（或传动角）的关系。

【难点】 机构杆组构成与杆组拆分法。

【主要内容】

(1) **Grashof 条件** Grashof 条件是用来预测四杆机构各种机架变换形式的转动特性或可转性的一个非常简单的关系式，它仅依赖于构件的长度。

设： S = 最短构件的长度

L = 最长构件的长度

P = 其余构件之一的长度

Q = 其余另一构件的长度

如果有：

$$S + L \leq P + Q \quad (3.1)$$

则该连杆机构是 Grashof 机构，且至少有一个构件相对机架平面能够转整周。此类运动链称为第Ⅰ类运动链。如果不等式不满足，则机构为非 Grashof 机构，且没有构件对任何其他构件能转整周。此类运动链称为第Ⅱ类运动链。

注意，上述关系式与构件的装配顺序无关。即，Grashof 条件的确定可以对一组非装配

的构件。以后装配成怎样的运动链，是以 S 、 L 、 P 、 Q ，或以 S 、 P 、 L 、 Q ，或以任何其他顺序装配都不改变 Grashof 条件。

四杆机构可能运动的形式既取决于 Grashof 条件，又取决于机架的选择。机架选取将相对最短构件定义。运动形式为：

对第Ⅰ类情况 $S+L < P+Q$

最短构件的相邻构件为机架将获得曲柄摇杆机构，在此机构中最短构件可转整周，另一连架杆只能摆动。

以最短构件为机架，将得到双曲柄机构，在此机构中，两连架杆和连杆都能转整周。

以最短构件的对面构件为机架将得到 Grashof 双摇杆机构，在此机构中，两连架杆都作摆动，只有连杆能转整周。

对第Ⅱ类情况 $S+L > P+Q$

所有变换形式均为三摇杆的非 Grashof 机构，在此机构中没有能转整周的构件。

对第Ⅲ类情况 $S+L = P+Q$

把这种特殊情况的 Grashof 运动链归属为第Ⅲ类运动链，所有变换形式要么是双曲柄机构，要么是曲柄摇杆机构，但输入曲柄每转一周，在所有构件共线的位置将有“变换点”。在变换点处输出行为是不定的。因为机构的位形可假设为两种位形之一，因此机构的行为是不能预测的。此种机构的运动必须加以限制以避免到达变换点，或者附加一个不同相的构件以保证通过变换点。

(2) 极限位置 极限位置由运动构件的两个共线位置确定。一个双或三摇杆四杆机构至少具有两个极限位置，在该位置连杆机构呈现三角形位形。当机构处于三角形（极限）位置时，不允许从其中的一个摇杆构件的一个方向输入运动，此时只能驱动另外一个摇杆来使连杆机构离开极限位置。Grashof 四杆曲柄摇杆机构也有两个极限位置，当最短构件与连杆共线时为极限位置。这时不能反驱动摇杆来通过共线位置，但是当以曲柄为主动件时，机构可以通过这两个极限位置，因为有曲柄存在。

(3) 急回四杆机构 摇杆两个位置之间进程与回程时间相等的曲柄摇杆机构，称为无急回连杆机构，它是急回情况的一种特例。

在极限点位置（定义为曲柄和连杆的共线位置）之间曲柄转过的角度不相等。当曲柄以等角速度转动时，因角度不等引起时间不等。在图 3-1 中这两个角度标为 α 和 β ，其比值 β/α 称为时间比或行程速比系数，用 K 表示。

在用图解方法综合急回 Grashof 四杆机构时，需要根据给定的时间比确定极位夹角，即

$$K = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{180^\circ + \theta}{180^\circ - \theta}, \alpha + \beta = 360^\circ \quad (3.2)$$

于是得到

$$\theta = \frac{K-1}{K+1} 180^\circ \quad (3.3)$$

(4) 压力角、传动角与机构的死点位置

压力角和传动角：也要考虑其受力特性，压力角

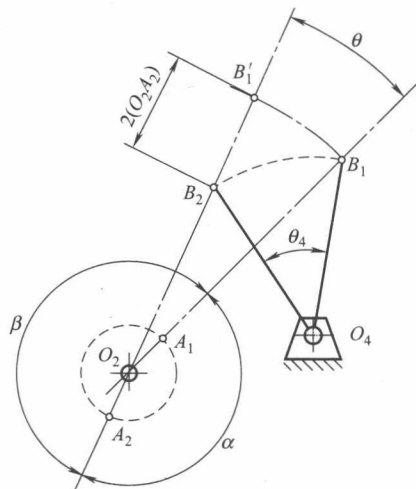


图 3-1 急回 Grashof 四杆曲柄摇杆机构各参数示意图

(或传动角)就是要考虑动力特性的一个重要指标。压力角 α 的余角 γ 称为传动角。注意,传动角只能预测输入和输出构件是与机架连接时的力或力矩传递的质量,如果载荷是加在浮动构件上(如连杆),则传动角就没有意义了。这时可采用不同的度量指标。

机构的死点位置: 摇杆作为原动件,曲柄为从动件,机构在曲柄与连杆共线的两个位置,传动角为 0° ,称为机构的死点位置(dead-center position)。

死点也有其有利的一面。因为机械在死点位置,无论驱动力有多大,机构都将不能运动,因此可以起到“锁紧”作用,比如飞机起落架机构和钻床夹紧机构。

(5) **连杆机构变换** 连杆机构变换是指构件或运动副变换、机架变换。

(6) **基本杆组构成** 机构由原动件、从动件系统和机架组成,而机构的原动件数必须等于机构的自由度数,故机构从动件系统的自由度为零。

将从动件系统拆成不可再分解的自由度为零的运动链,这种运动链称为基本杆组,简称杆组,也称阿苏尔杆组。

因此,机构可以认为是将若干个自由度为零的基本杆组连接到原动件和机架上所组成。不同的机构可以认为是由不同的杆组所组成。这里讨论的杆组理论只针对低副机构。如果机构中含有高副,可以通过附加一个二副构件进行高副低代,如前所述迭代后的自由度不变,为使瞬时运动不变,只需将附加构件的转动中心与高副曲线的曲率中心重合即可。

II级杆组基本形式有五种,如图3-2所示,都是由两个二副元素构件所组成。

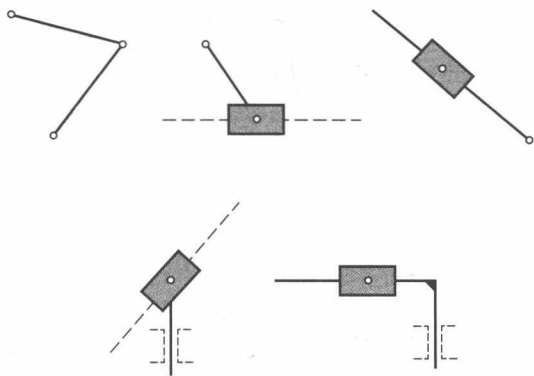


图 3-2 五种 II 级杆组

当 $n=4$, $p_5=6$, 含有 3 个内接副, 称为 III 级杆组, 如图 3-3 所示, 有如下几种形式。

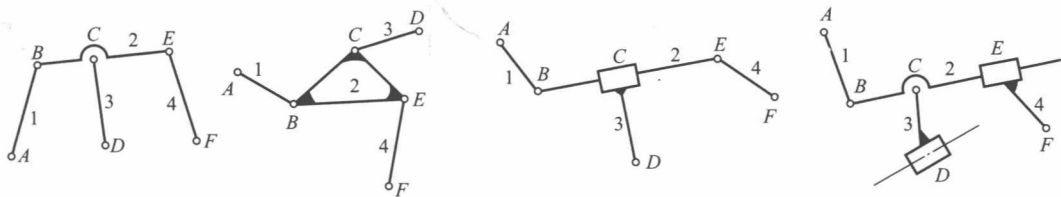


图 3-3 四种 III 级杆组

(7) **基本杆组分析** 机构的级别是由构成机构的基本杆组的最高级别确定。机构的级别和原动件的选取有关,同一个机构选择不同的原动件可能为简单的 II 级机构,也可能为复杂的 III 级机构。

拆杆组通常从远离原动件的部分开始试拆,每拆除一个杆组后,机构剩余部分仍应是一