

# 机械原理与机械零件

(上 册)

北京工业学院机械設計教研室

一九七三年七月

在科学上面是没有平坦的大路可走的，只有那在崎岖小路的攀登  
上不畏劳苦的人，有希望到达光辉的顶点。

——马 克 思

在任何学校里，最重要的是课程的思想政治方向。

——列 宁

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都  
得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁  
就简。

要自学，靠自己学。

要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上，……

我们一定要有无产阶级的雄心壮志，敢于走前人没有走过的道  
路，敢于攀登前人没有攀过的高峰。

——毛 泽 东

# 第一章 机构的组成

## 提 要

“认识的真正任务在于经过感觉而到达于思维。到达于逐步了解客观事物的内部矛盾，了解它的规律性，了解这一过程和那一过程间的内部联系，即达到于理论的认识。”

本章主要介绍平面机构是怎样组成的，其组成规律是什么。而机构又是机械在符合各构件间力学关系、运动学关系的抽象模型。它是人们在实践中，对机械本身的大量感性认识的基础上，得出的概括的认识，并经过实践证明，它是确切地反映了机械在力学、运动学方面的本质。因此，通过本章的学习，要求达到对常见机械能有一个概括的认识。

### § 1—1 本课程研究的对象

顾名思义，本课程研究的对象是机械（或机器）。机械的种类很多，究竟研究那种机械呢？回答是：研究所有的机械，但不是机械的所有问题。

机械本身的问题很多，就大的方面来说，有机械的设计、制造及安装维修三方面，而就

机械设计方面又包括：机械的组成、动力的传递、零件的可靠性、寿命、公差尺寸及结构工艺性等问题。本课程的原理部分（1—6章）只研究：机械的组成及其动力的传递问题，而把其余问题只作外部联系（即非本质

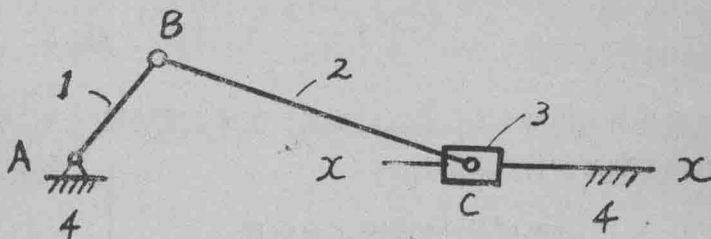


图 1—1

方面）看待，这样，就使问题大为简化，并有可能在短的时间内搞清复杂问题的某几个特定的方面。

例如以后会多次遇到的曲柄滑块机构，如图 1—1 所示，构件 1 为曲柄，它可绕构件 4（固定件）上的 A 点作整周的回转，构件 3 为滑块，它沿构件 4 上的导路 x—x 作直线运动。构件 2 为做平面运动的连杆。

在运动上，这个机构可以实现：

回转运动  $\rightleftharpoons$  直线运动

如往复活塞发动机、冲床、空气压缩机、活塞泵……等都是用的这个机构，在机械原理的范围内来说，它们之间是没有本质区别的。

人们在阶级斗争、生产实践、科学实验三大革命斗争中所使用的机械种类很多，无法说清它们的数字，但组成这些机械的机构并不很多，主要有：

1. 连杆机构
2. 凸轮机构
3. 齿轮机构
4. 摩擦轮机构
5. 挠性传动机构：皮带传动、链传动
6. 间歇机构
7. 螺旋机构
8. 液动、气动、电动机构

我们常见的各种机械，如：汽车、飞机、坦克、拖拉机、各种金属切削机床及各种自动和半自动武器等，就都是这些机构组成的。上述这些机构除液动、气动、电动机构之外，在本课程中将逐一加以讨论。毛主席教导我们：“人们总是首先认识了许多不同事物的特殊的本质，然后才有可能更进一步地进行概括工作，认识诸种事物的共同的本质。”上述这些机构就是人们在三大革命运动中，对各种机械的概括认识，这个概括的过程中，贯穿着“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的改造制作工夫，”因此，我们学习这几种机构以后，就可以对机械在其组成和动力传递的本质方面有所了解。而这正是机械的共同本质之一，这也是学习本课程的一个目的。

## § 1—2 机构的组成

机械是由机构组成的，那么机构又是怎样组成的呢？为了解决这一问题，我们首先介绍一下自由度和运动付的概念。

### (一) 作平面运动的刚体的自由度

如理论力学中已指出的，刚体在平面内的位置只要用三个独立参数就可以确定。如图 1—2 所示，在  $xoy$  坐标系中，刚体  $T$  上任意直线  $AB$ ，如果  $A$  点的座标  $x$ 、 $y$  和  $AB$  直线与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  确定后，则刚体  $T$  在  $xoy$  坐标系中的位置就完全确定了。这三个参数  $x$ 、 $y$ 、 $\alpha$ ，是完全独立的，即互不相关的。若

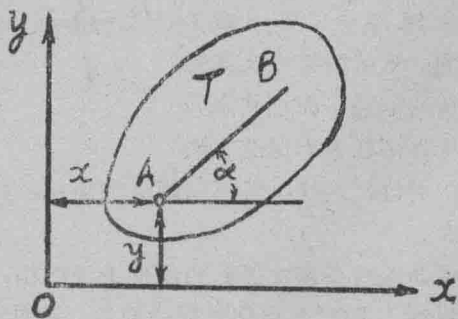


图 1—2

固定  $x$ 、 $y$  的数值，则刚体只能绕  $A$  点转动，即只有  $\alpha$  角的变化。若固定  $y$ 、 $\alpha$  的数值，则刚体只能沿  $x$  轴移动而使  $x$  座标值发生变化，同理，刚体可在  $x$ 、 $\alpha$  不变的情况下而沿

y 轴移动, 以使 y 座标值发生变化。

我们把刚体可以完成的独立运动 (如沿 x、y 轴的移动和绕 A 点的转动) 的数目叫做刚体的自由度数目。因此, 一个作平面运动的刚体有三个自由度, 自由度也就是决定刚体位置的独立参数的数目。

## (二) 平面机构的运动付

毛主席指出: “人的认识物质, 就是认识物质的运动形式……” 讨论机构的自由度给我们提供了认识机构运动形式的条件。

两个构件\* 通过接触来限制它们之间的某些相对运动而又保留一定的相对运动, 我们称它为组成了运动付。这样, 两构件组成运动付之后, 其自由度必然减少, 它所减少的自由度数目, 就是该种联接方式所带来的约束条件数目。工程上平面机构中的运动付有以下三种形式: (参见表 1-1)

### 1) 铰链联接

联接前, 两构件之间的相对自由度数等于 3, 联接后, 构件 2 相对构件 1 (或 1 相对于 2) 只能绕轴线 0-0 转动, 相对运动自由度数等于 1。由此可见, 铰链联接的约束条件数为 2。

### 2) 滑块联接

构件 2 相对于构件 1 只能沿 x-x 轴线方向移动, 相对运动自由度等于 1。故滑块联接的约束条件数为 2。

### 3) 点与曲面 (或两曲面) 联接

杆 2 相对于曲面 1 在接触前 (即联接前), 有 3 个自由度, 接触后 (即联接后), 杆 2 相对曲面 1 就不能沿法线 n-n 方向运动, 杆 2 只能沿曲面运动和绕 A 点摆动。故相对自由度为 2, 约束条件数为 1。对于这种联接形式, 为保持两构件间的接触, 应附加封闭装置, 如弹簧等。凸轮机构便是这种联接方式。

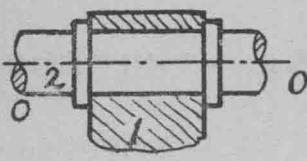
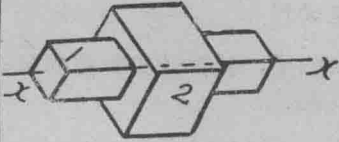
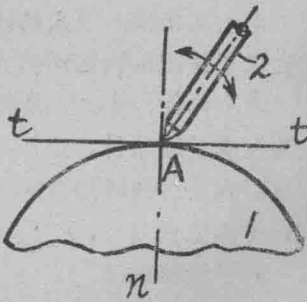
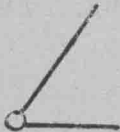
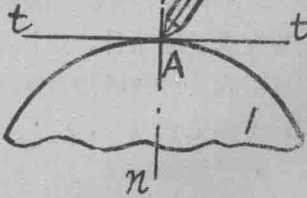
上面几种联接方式就是平面机构中的运动付形式, 联接方法不同时, 杆件的运动情况就不一样, 都 “为自己的特殊的矛盾所规定。”

---

构件\*: 机构中的构件, 可能是多个零件组成的, 但各零件之间在机构中没有相对运动而成为一个整体, 故作为一个刚体看待, 统称为 “构件”。

联接处的特性分析

表 1-1

| 名 称             | 铰链（销子）联接                                                                           | 滑块（导槽）联接                                                                           | 点（曲面）与曲面联接                                                                         |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 结 构             |   |   |  |
| 符号表示            |   |   |  |
| （一杆为机架）<br>符号表示 |  |  | 用接触点处曲面的真实形状表示。                                                                    |
| 相对运动情况          | 绕轴线 O—O 转动                                                                         | 沿轴线 X—X 移动                                                                         | 沿曲面运动和绕 A 点摆动                                                                      |
| 自由度             | 1                                                                                  | 1                                                                                  | 2                                                                                  |
| 约束条件数           | 2                                                                                  | 2                                                                                  | 1                                                                                  |
| 接触特性            | 面 接 触                                                                              | 面 接 触                                                                              | 点（线）接触                                                                             |
| 应 举 用 例         | 汽车、拖拉机、坦克、发动机、机床、农业机械上都有应用。                                                        | 汽车、拖拉机、坦克、发动机、机床、农业机械上都有应用。                                                        | 凸轮机构、齿轮机构、自动武器等都有应用。                                                               |

### （三）平面机构自由度的计算

一些构件，用运动付联接起来，叫运动链。机构是由封闭的运动链组成的，所谓封闭就是指首末两构件相联之意。

从表 1-1 中可以得出这样的结论：

- 1) 两构件是面接触的联接时, 约束条件数为 2。……常称为低付。
- 2) 两构件是点或线接触的联接时, 约束条件数为 1。……常称为高付。

請考虑一下, 如下的一个算术题:

一个封闭的运动链, 它是由  $n$  个构件组成的, 链中有  $P_2$  个面接触的运动付,  $P_1$  个点、线接触的运动付。取链中一个构件为机架 (即固定不动) 试计算这个运动链对机架的自由度是多少?

解: 设运动链对机架的自由度为  $W$ 。

在没组成运动付时, 对机架自由度的总数为:  $3(n-1)$ 。组成  $P_2$  个低付所失去的自由度为  $2P_2$ , 组成  $P_1$  个高付所失去的自由度为  $P_1$ 。故

$$W = 3(n-1) - 2P_2 - P_1$$

上式称为平面机构自由度计算公式。

运用平面机构自由度计算公式, 就能对平面机构进行分析, “找出其行动的规律, 並且应用这些规律于自己的行动。”

公式应用举例:

例 1-1 往复式发动机机构简图如图 1-3 所示, 试求其自由度。

解:  $n=4$ ,  $P_2=4$ ,  $P_1=0$ 。

$$\begin{aligned} \therefore W &= 3(n-1) - 2P_2 - P_1 \\ &= 3(4-1) - 2 \times 4 - 0 = 1 \end{aligned}$$

得机构的自由度为 1。

例 1-2 如图 1-4 所示之齿轮机构及凸轮机构试分别计算其自由度。

解: (a)  $n=3$ ,  $P_2=2$ ,  $P_1=1$ ,

$$\begin{aligned} \therefore W &= 3(n-1) - 2P_2 - P_1 \\ &= 3(3-1) - 2 \times 2 - 1 = 1 \end{aligned}$$

(b)  $n=3$ ,  $P_2=2$ ,  $P_1=1$ ,

$$\begin{aligned} \therefore W &= 3(n-1) - 2P_2 - P_1 \\ &= 3(3-1) - 2 \times 2 - 1 = 1 \end{aligned}$$

例 1-3 求图 1-5 所示运动链对机架的自由度

解: (a)  $n=5$ ,  $P_2=5$ ,  $P_1=0$ ,

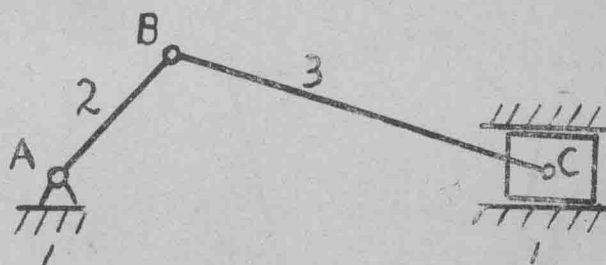


图 1-3

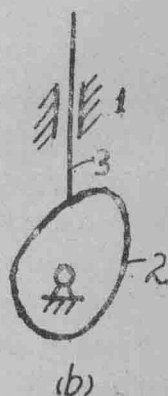
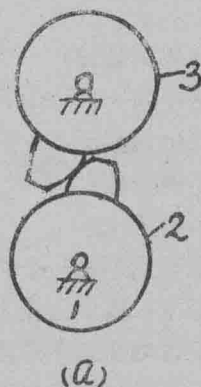


图 1-4

$$\begin{aligned} \therefore W &= 3(n-1) - 2P_2 - P_1 \\ &= 3(5-1) - 2 \times 5 - 0 = 2。 \end{aligned}$$

$$(b) \quad n=6, \quad P_2=7, \quad P_1=0,$$

$$\begin{aligned} W &= 3(n-1) - 2P_2 - P_1 \\ &= 3(6-1) - 2 \times 7 - 0 = 1。 \end{aligned}$$

通过上述的分析计算，大家考虑一下，运动链对机架的自由度等于1（或2）说明什么

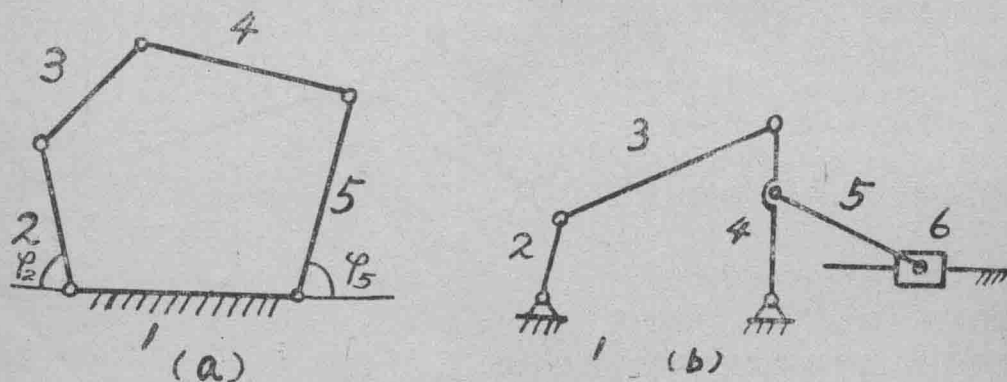


图 1-5

呢？从自由度的含义可知：自由度为1（或2）表示要确定运动链中构件的位置所需独立参数的数目是1（或2）。例如：图1-3， $W=1$ ，就是说确定构件2、3、4相对构件1（机架）的位置需要一个参数，设构件2与机架成 $\varphi$ 角，则 $\varphi$ 角确定之后，2、3、4的位置就都确定了。又如图1-5(a)，其 $W=2$ ，就是说确定2、3、4、5相对1的位置须两个独立参数，设2和5分别与机架1成 $\varphi_2$ 和 $\varphi_5$ 角。则当 $\varphi_2$ 和 $\varphi_5$ 确定之后，各构件的位置就都确定了。这里独立参数 $\varphi$ 的变化规律在前例中就是构件2的运动规律。在后一例中就是构件2( $\varphi_2$ )和5( $\varphi_5$ )的运动规律。工程上把具有独立运动规律的构件称为原动件。在图上都用箭头标出来。

至此，我们可得出如下的重要结论：

一个运动链，它相对于链中某一构件的自由度数，等于其原动构件数时，则这个运动链就有确定的运动规律，即成为机构。反之，则不是机构。

这个结论回答了两个方面的问题：

- 1) 机构是怎样组成的。
- 2) 怎样判断一个运动链是或不是一个机构。

当用自由度公式进行计算时，应该遵循毛主席的教导：“我们必须具体地研究各种矛盾斗争的情况，不应当将上面所说的公式不适当地套在一切事物的身上。”“对具体的事物要作具体的分析。”为此，在计算时要注意以下几种情况：

- 1) 确定复杂接头处运动付的数目

如图 1-6 所示之摇筛机构，在计算运动付数目时，应注意在 C 点处是两个运动付，一个是 2 与 4 组成的，一个是 3 与 4 组成的，如图 1-6(b) 所示，这类的接头，其运动付数目比组成该接头的杆数少 1。

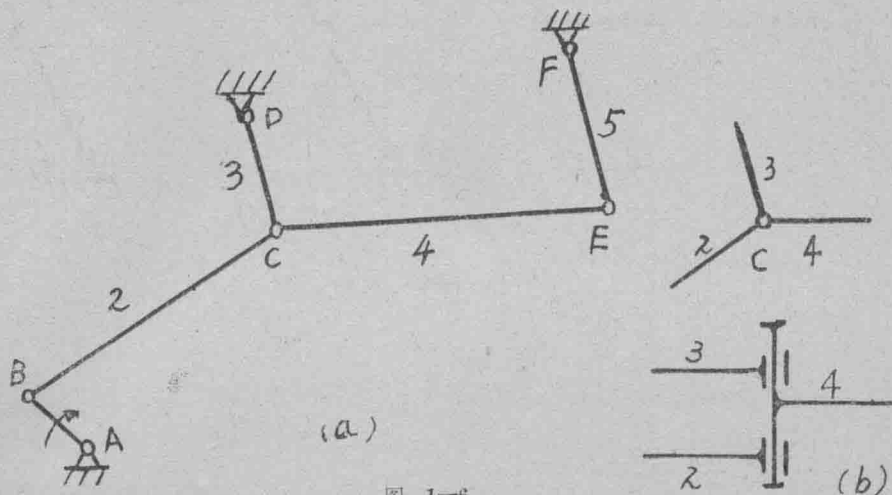


图 1-6

## 2) 带有滚子的机构自由度的确定。

如图 1-7 所示之凸轮机构，

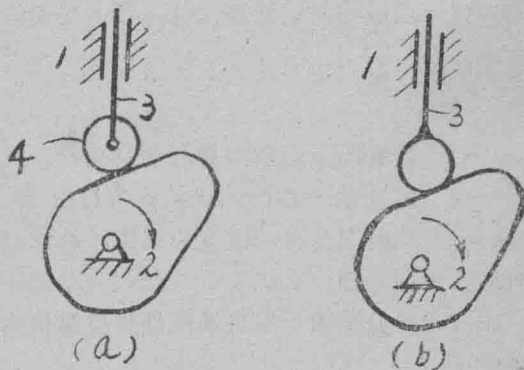
在图 1-7(a) 中，

$$n=4, P_2=3, P_1=1,$$

$$W=3(n-1)-2P_2-P_1$$

$$=3(4-1)-2\times 3-1=2$$

从计算结果看，要使机构有确定的运动，必须给定两个原动件。实际上，凸轮机构是用来把凸轮的回转运动变成从动件的往复运动，当凸轮的运动给定时，从动件的运动情况就完全确定。圆柱滚子 4 的转动并不引起其它构件的运动，它是用来减少凸轮与从动件之间的磨损的。从机构的组成观点看来，机构中一个构件的运动并不引起其他构件的运动，则这个构件就是多余的构件，在计算时要把它去掉，即把它看成与某构件是固接的。对图 1-7(a) 进行计算时，滚子 4 就是多余构件，应把它看成图 1-7(b) 所示情况。这样计算的结果  $W=1$ ，与实际情况相符。



## 3) 去掉重复约束的构件

如图 1-8(a) 所示之平行四杆机构，各杆

图 1-7

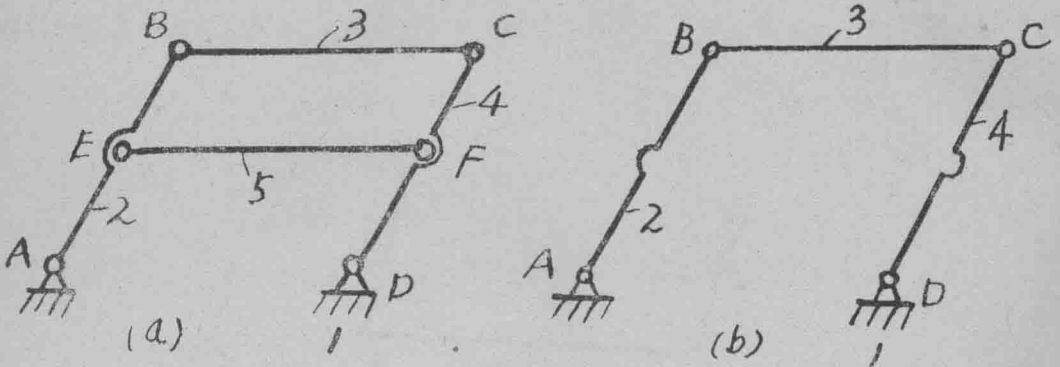


图 1-8

长度之间有如下关系：

$$l_{AB} = l_{CD}, \quad l_{AD} = l_{BC} = l_{EF},$$

$$W = 3(n-1) - 2P_2 - P_1$$

$$= 3(5-1) - 2 \times 6 - 0 = 0。$$

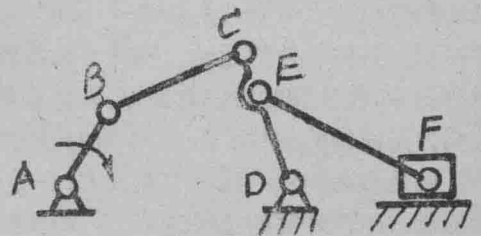
自由度等于零，说明这些构件组合后是不能动的，但是由直接观察即可看出，它是一个机构，这是由于杆件长度间的特殊关系，使构件 3 和 5 所起的运动约束作用重复之故。例如构件 5 所起的直接作用为：保证构件 2 上 E 点与构件 4 上 F 点的距离为  $l_{EF}$ ，但在题示杆长关系成立之下，去掉杆 5 后（如图 1-8b）仍可保证 E、F 两点间之距离为  $l_{EF}$ ，因此，在计算自由度时，图 1-8(a) 应按图 1-8(b) 计算，这样计算的结果， $W=1$  与实际相符，（计算时也可保留构件 5 而去掉构件 3）。

毛主席教导我们：“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”

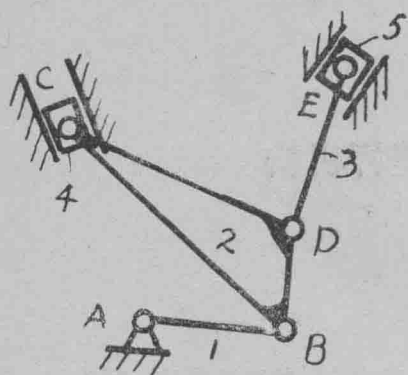
本章通过以上的分析，已正面地回答了“机械是怎样组成的？”这一问题，并得出了明确的结论，以后的问题就是如何运用与提高的问题。

### 习 题：

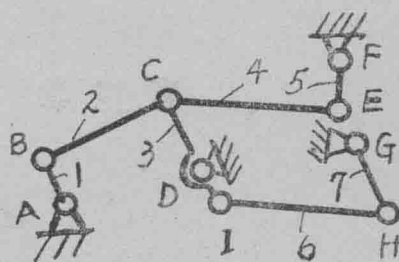
- 1-1 判断图示运动链是否为机构？
- 1-2 试计算 V 形发动机机构的自由度。
- 1-3 欲使图示运动链成为机构时，试计算应有几个原动件。
- 1-4 试计算图示半自动插秧机操纵机构的自由度。
- 1-5 试计算图示压床机构的自由度，并指出其重复约束条件的几何关系。



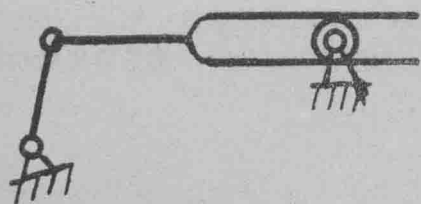
习图 1-1



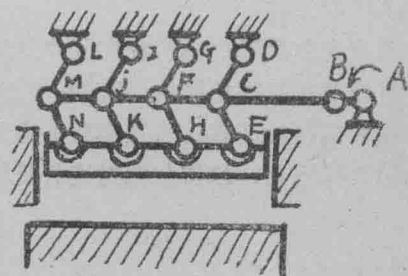
习图 1-2



习图 1-3



习图 1-4



习图 1-5

## 第二章 平面连杆机构

### 提 要

“任何运动形式，其内部都包含着本身特殊的矛盾。这种特殊的矛盾，就构成一事物区别于他事物的特殊的本质。……研究所有这些矛盾的特性，都不能带主观随意性，必须对它们实行具体的分析。……”

本章首先介绍连杆机构在实际中的应用，在这个基础上讲述连杆机构的几个特性，这里所谓的特性是相对其他机构而言的，对连杆机构本身来说，这正是他的共性，它是正确使用和设计连杆机构的基础，也是本章的主要内容。常见型式和设计方法的介绍都是连杆机构某些特性的具体运用，以便加深对连杆机构特性的理解。

### § 2—1 连杆机构在机械中的应用实例及简图表示法。

如前章表 1—1 中的铰链联接，因相联两构件能相对回转，故称它为回转付。表中的滑块联接，因相联两构件能相对移动，故称为移动付（或滑动付）。用回转付、移动付联成的机构称为连杆机构（又称低副机构）。机构中各构件的运动均平行于一个共同的平面，则称为平面机构。本章所讨论的平面连杆机构是平面机构中的一种。

连杆机构是机械中最早应用的机构之一。由于它具有一系列特点，目前已被广泛地应用于各种原动机、工作机、仪表和操纵机构中。今以下列各例来说明这一情况。

例 1. 如图 2—1 所示为广泛应用的 V 型发动机结构简图，图 2—2 为其机构简图。两边的汽缸轮流工作使曲轴连续回转，从机构图上看，就是两个作往复移动的滑块交替为原动件而推动曲柄连续回转。

例 2. 如图 2—3(a) 所示为颚式轧碎机，它是一种常用的粉碎设备。摆动颚间的工作空间成楔形，原料块从上面装入，轧碎后往下穿过两颚间隙口落下。一般用来粉碎石灰石、煤块、粘土块等原料块。

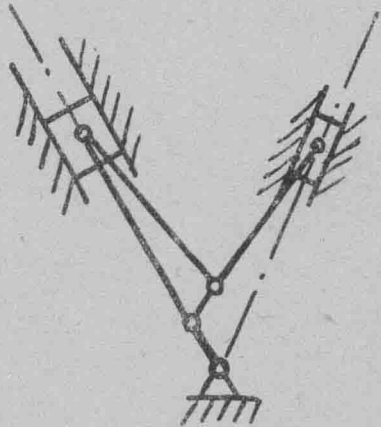


图 2—2

当主轴回转时，带动连杆 3 运动，通过压板 4、5 使摆动颚 6 绕支点 F 往复摆动，从而将进入的原料块轧碎。图 2-3(b) 为其机构图，由图可见，颚式轧碎机的主要机构是一平面连杆机构。

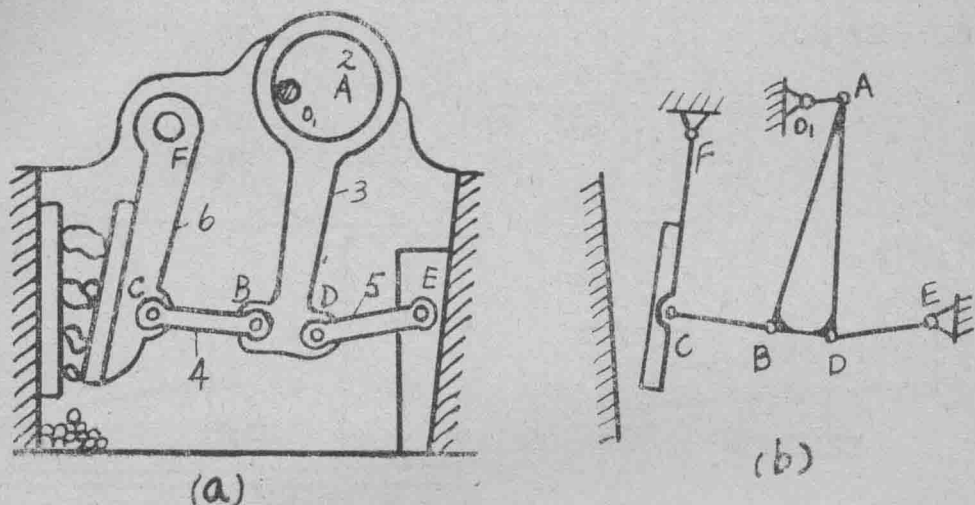


图 2-3

例 3. 图 2-4(a) 为一牛头刨床

当齿轮回转时，通过滑块 2、摆杆 3、连杆 4 而使刨头作往复直线运动。工作行程时，刨头要求作近似等速运动，回程时，刨头作急回运动，以利提高生产率。

例 4. 图 2-5 为用于信号开关触头的机构。当转动手柄 AB 由开始位置到最后位置以前，连杆上触点 F 的位移与速度都很小，当 AB 在将到最后位置时，触点 F 的速度很大，以达到快速闭合的目的。

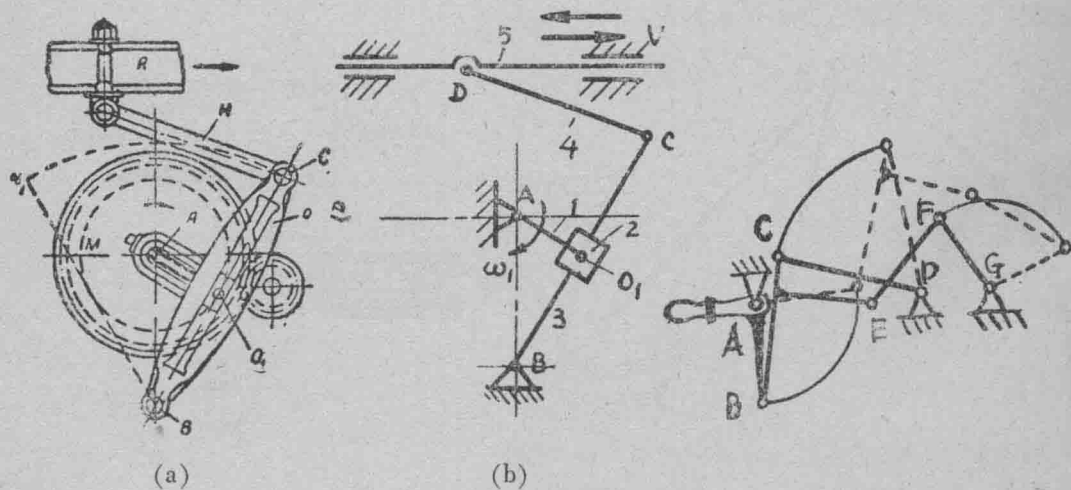


图 2-4

图 2-5

例 5. 图 2-6 为一天秤的示意图, 其中 ABCD 及 CDEF 为平行四边形机构, 它保证托盘 1 与 2 永处于水平位置。

例 6. 图 2-7 为推料机构, 曲柄 AB 转动时; 摇杆 ED 在一定角度内摆动, 经过推杆将坯料推进一定距离。

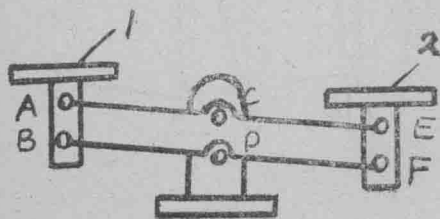


图 2-6

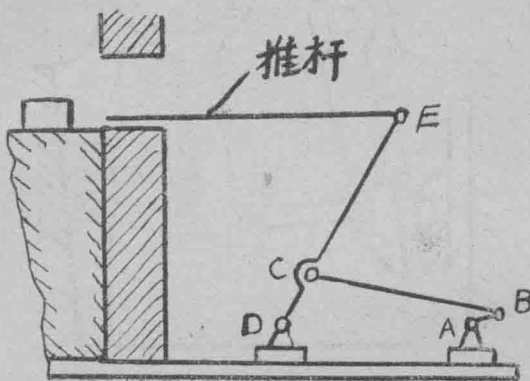


图 2-7

例 7. 图 2-8 所示为一用于计算机中的对数机构, 当 B 点移动弧长  $x$  时, 机构的尺寸使得 C 点移动弧长  $y = \log x$ 。

例 8. 图 2-9 所示为一示功器用的近似直线机构。当活塞杆 1 受压而运动时, 推动机构, 机构的尺寸使得杆 4 上的 M 点近似地沿直线运动, 当转筒转动时, M 点即在转筒上划出活塞所受压力的变化曲线。

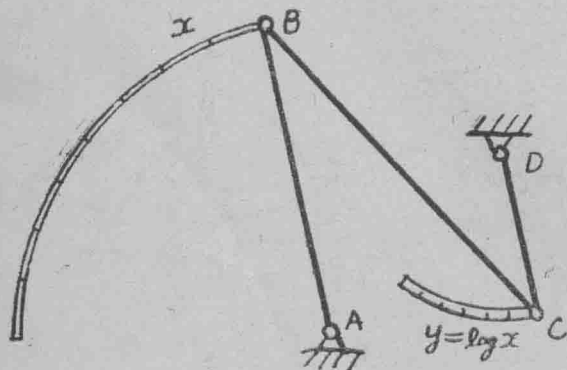


图 2-8

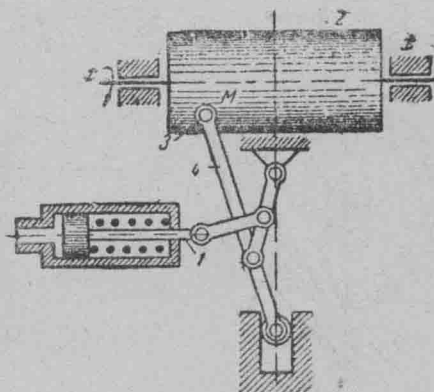


图 2-9



机构共同的本质和相互之间的关系，使我们不致把这些机构看成孤立的僵死的东西，又要看到各种机构的特殊的本质和它们彼此之间的区别。只有这样，才能为我们今后合理选用和设计机构，创造广阔的途径。

连杆机构的主要特性有如下几点：

### (一) 有曲柄的条件

连杆机构中的最简单的是四杆机构，它也是连杆机构的基本形式。

四杆机构中，固定杆为机架，与机架相连的两个杆中，能绕机架作整周回转的叫曲柄，否则叫摇杆，不与机架相连的叫连杆。

四杆机构的有无曲柄，决定着它所能实现的运动转换能力，如无曲柄，在运动转换上就只能把摆动变摆动，或移动，如有曲柄，就可能将转动变摆动或移动。因此，四杆机构的有无曲柄是它运动转换能力的一个分界，也是它在类型上的分界。为此，四杆机构在什么条件下有曲柄，在什么条件下没有曲柄，就是设计或者选用应该首先知道的，以便使其符合使用上的要求。

在比较两个四杆机构的异同时，其杆件数、运动付数都是相同的，运动付的大小又不影响杆件之间的相对运动，因此，两个四杆机构的唯一不同处，就在其各杆长度之间的相对比例。杆件的相对长度变了，机构的运动情况就改变，其类型也就不同。杆件的相对长度不变，机构的运动情况就一样，其类型也就相同。下面就分析一下四杆机构的杆长之间具有什么关系，才会具有曲柄。设图 2-11 为一曲柄摇杆机构。

设各杆长分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 。

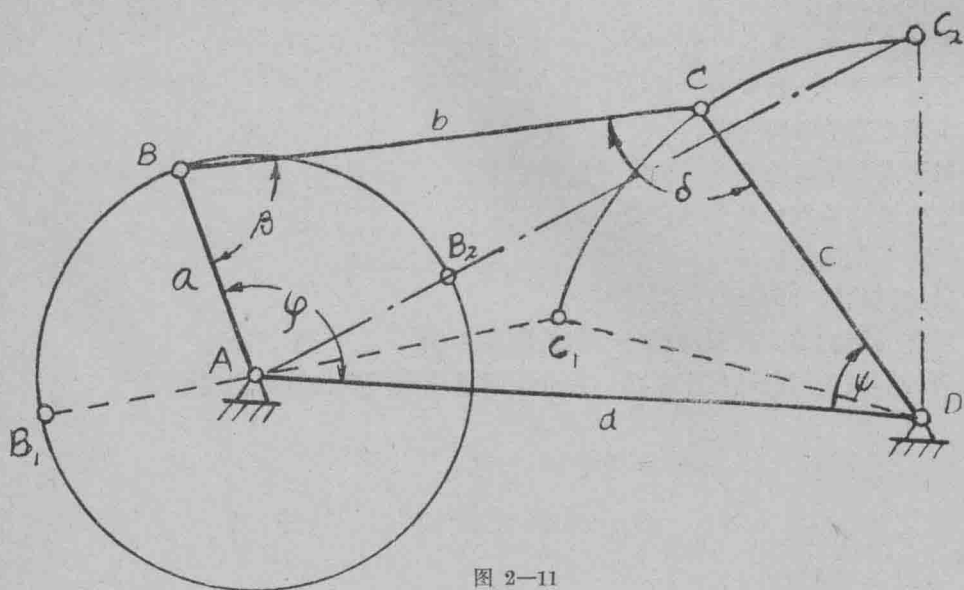


图 2-11

如前所述，当曲柄回转一周时，它一定与连杆共线两次。这时，曲柄分别位于位置  $AB_1$  和  $AB_2$ ，摇杆则处于  $C_1D$  和  $C_2D$ 。

各杆之间分别构成两个三角形  $AC_1D$  和  $AC_2D$

由  $\triangle AC_1D$  可得: (三角形两边之和大于第三边)

$$(b-a) + d \geq c$$

$$(b-a) + c \geq d$$

$$\therefore c + a \leq b + d \quad (1)$$

$$d + a \leq b + c \quad (2)$$

$$\text{由 } \triangle AC_2D \text{ 得: } b + a \leq c + d \quad (3)$$

将(1)至(3)式中的每两项相加, 化简后得:

$$a \leq b \quad (4)$$

$$a \leq c \quad (5)$$

$$a \leq d \quad (6)$$

由此可得如下结论:

1. 曲柄摇杆机构中, 曲柄为最短杆。
2. 四杆机构中, 当: 最短杆 + 最长杆  $\leq$  另外两杆长之和时, 则: 固定最短杆之相邻杆, 最短杆即为曲柄。

以上各式中的等号是对特殊情况而言的, 即指四个杆件可以同时共线的情况。在有曲柄的四杆机构中, 有某个杆长与曲柄长相等, 则另外两杆长亦必相等。设  $c = a$ , 则由(2)得:

$$d \leq b$$

$$\text{由(3)得 } b \leq d$$

如取不等式, 则这两个结果就相互矛盾了, 故必须是:

$$b = d$$

这就是四杆机构中的平行四边形机构和反平行四边形机构。(见表 2-1 中图 3、4)

此外, 当杆机构中的杆长关系是:

最短杆 + 最长杆  $>$  另外两杆长之和时, 则无论固定那个构件, 都没有曲柄。这也是可以证明的, 这里就不再讲了。

## (二) 快回作用与行程速度变化系数 $K$

如图 2-12 所示:

AB 杆为曲柄, CD 杆为摇杆, 且曲柄 AB 作等速回转运动, 通过连杆 BC 的作用推动摇杆 CD 来回摆动。

由图可见, 曲柄在回转一周的过程中, 有两次与连杆 BC 共线, 这时, 摇杆 CD 分别位于极限位置  $C_1D$  和  $C_2D$ 。当曲柄顺时针转过  $\varphi_1$  时, 摇杆自  $C_1D$  摆至  $C_2D$ 。而当曲柄再转