

## 平面机构的结构分析

机构是机器的主要组成部分。机构的组成以及机构在什么条件下才具有确定的运动都将在本章中讨论。另外,为了分析旧机械以及设计新机械,都需要将具体的机械抽象成简单的运动学模型,绘制出机构运动简图,本章也将就这一内容进行介绍。

### 3.1 机构的组成

#### 3.1.1 运动副

使两个构件直接接触并能产生一定相对运动的连接,称为运动副。在图 3.1 中,轴承中的滚动体与内、外圈的滚道(图 3.1a)、啮合中的一对齿廓(图 3.1b)、滑块与导槽(图 3.1c),均保持直接接触,并能产生一定的相对运动,因而它们都构成了运动副。构件上参与接触的点(图 3.1a)、线(图 3.1b)、面(图 3.1c),称为运动副元素。

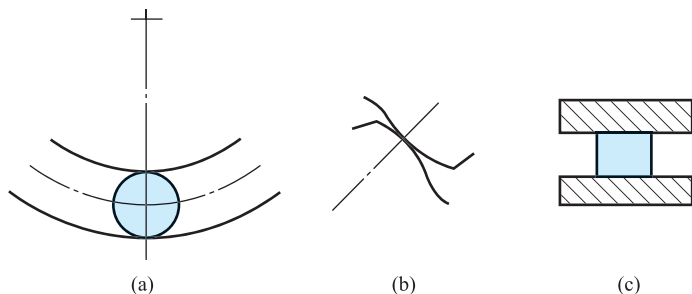


图 3.1 运动副

根据运动副各构件之间的相对运动是平面运动还是空间运动,可将运动副分成平面运动副和空间运动副。所有构件都只能在相互平行的平面上运动的机构称为平面机构。大多数的常用机构都是平面机构,本节也仅就平面运动副和有关的平面机构的组成进行讨论。

#### 3.1.2 自由度和运动副约束

在直角坐标系中,一个处于空间自由状态的刚体(构件),具有 6 个独立运动的参数,即沿三个坐标轴的移动和绕三个坐标轴的转动。而对于一个作平面运动的构件而言,只有 3 个独立运动的参数,即沿  $x$  轴、 $y$  轴的移动和绕垂直于  $Oxy$  平面的轴的转动,可用 3 个独立的参数  $x$ 、 $y$ 、 $\alpha$ (图 3.2)来描述。把构件相对于参考系具有的独立运动参数的数目称为构件的自由度。



两个构件通过运动副连接以后,相对运动受到限制。运动副对成副的两构件间的相对运动所加的限制称为约束。引入 1 个约束条件将减少 1 个自由度,而约束的多少及约束的特点取决于运动副的形式。

### 1. 转动副

图 3.3 所示的运动副限制了轴颈 2 沿  $x$  轴和  $y$  轴的移动,只允许轴颈绕轴承相对转动,这种运动副称为转动副。转动副引入了 2 个约束,保留了 1 个自由度。

### 2. 移动副

图 3.4 所示的运动副,构件之间只能沿  $x$  轴作相对移动,这种沿 1 个方向相对移动的运动副称为移动副。移动副也具有 2 个约束,保留了 1 个自由度。

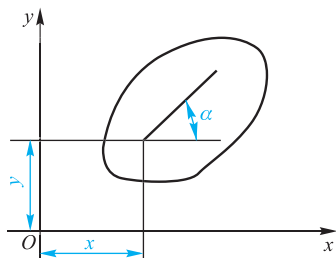


图 3.2 平面运动构件的自由度

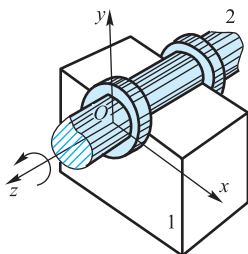


图 3.3 转动副

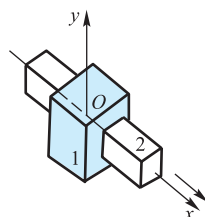


图 3.4 移动副

转动副和移动副都是面接触,统称为低副。

### 3. 平面高副

如图 3.5 所示,在曲线构成的运动副中,构件 2 相对于构件 1 既可沿接触点处切线  $t-t$  方向移动,又可绕接触点  $A$  转动,运动副保留了 2 个自由度,带进了 1 个约束。这种点接触或线接触的运动副称为高副。

#### 3.1.3 运动链和机构

两个以上的构件以运动副连接而构成的系统称为运动链。未构成首末相连的封闭环的运动链称为开链(图 3.6a),否则称为闭链(图 3.6b)。在运动链中选取 1 个构件加以固定(称为机架),当另一构件(或少数几个构件)按给定的规律独立运动时,其余构件均随之作一定的运动,这种运动链就称为机构。机构中输入运动的构件称为原动件,其余的可动构件则称为从动件。由此可见,机构是由原动件、从动件和机架三部分组成的。

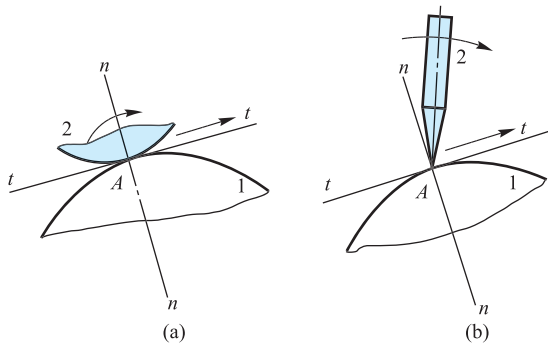


图 3.5 平面高副

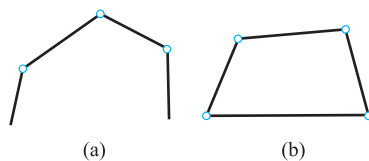


图 3.6 运动链



### 3.2 平面机构的运动简图

由于构件的相对运动是由运动副决定的,在研究机构运动时,为了使问题简化,可以不考虑那些与运动无关的因素(如构件的外形和断面尺寸、运动副的具体构造等),仅仅用简单的线条和符号来代表构件和运动副,并按一定比例表示各运动副的相对位置。这种说明机构各构件间相对运动关系的简单图形称为机构运动简图。

简图中一般应包括下列内容:

- (1) 构件数目;
- (2) 运动副的数目和类型;
- (3) 构件之间的连接关系;
- (4) 与运动变换相关的构件尺寸参数;
- (5) 原动件及运动特性。

机构运动简图可以简明地表达一部复杂机器的传动原理;还可以用图解法求机构上各点的轨迹、位移、速度和加速度等。

#### 3.2.1 运动副及构件的表示方法

##### 1. 构件

构件均用线段或小方块等来表示,画有斜线的表示机架。

##### 2. 转动副

两构件组成转动副时,其表示方法如图 3.7 所示。图面垂直于回转轴线时用图 3.7a 表示;图面不垂直于回转轴线时用图 3.7b 表示。表示转动副的圆圈,其圆心必须与回转轴线重合。一个构件具有多个转动副时,则应把两条线交接处涂黑,或在其内画上斜线,如图 3.7c 所示。

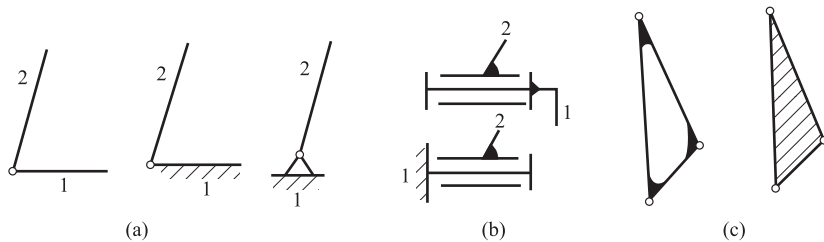


图 3.7 转动副的表示方法

##### 3. 移动副

两构件组成移动副的表示方法如图 3.8 所示,其导路必须与相对移动方向一致。

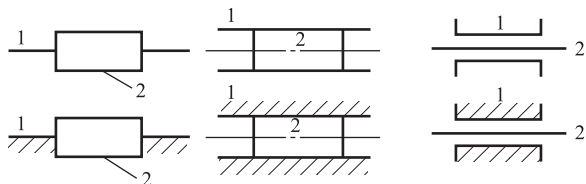


图 3.8 移动副的表示方法



#### 4. 平面高副

两构件组成平面高副时,其运动简图中应画出两构件接触处的曲线轮廓。对于凸轮和滚子,习惯上画出其全部轮廓,如图 3.9a 所示;对于齿轮,常用点画线画出其节圆,如图 3.9b 所示。

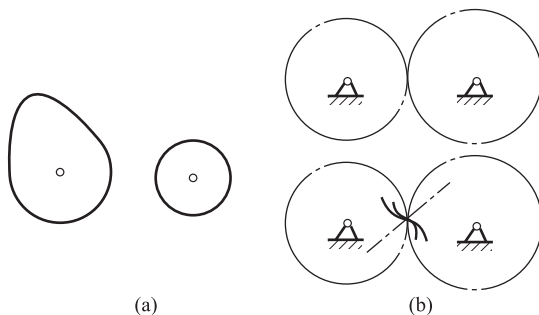


图 3.9 平面高副的表示方法

#### 3.2.2 绘制机构运动简图的步骤

- (1) 认真研究机构的结构及动作原理,分清固定件(机架),确定原动件。
- (2) 循着运动传递的路线,搞清各构件间相对运动的性质,确定运动副的种类。
- (3) 测量出运动副间的相对位置。
- (4) 选择视图平面和比例尺,用规定的符号和线条表示其构件和运动副及相对位置,绘制机构运动简图。

根据图纸的幅面及构件的实际长度,选择适当的比例尺  $\mu_L$  :

$$\mu_L = \frac{\text{构件的实际长度}}{\text{构件的图示长度}} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right)$$

**例题 3.1** 试绘制图 0.1 所示内燃机的机构运动简图。

**解** 从图 0.1 可知,壳体及气缸体 1 是机架,缸内活塞是原动件。活塞 2 与连杆 5 相对转动构成转动副;运动通过连杆 5 传给曲轴 6,连杆 5 与曲轴 6 构成转动副;曲轴 6 将运动通过与之相连的小齿轮 10 传给大齿轮 9,大、小齿轮与机架构成转动副;大齿轮 9 与凸轮 7 同轴,凸轮 7 通过滚子将运动传给顶杆 8,大、小齿轮之间及凸轮与滚子之间都构成高副;滚子与顶杆 8 构成转动副;顶杆 8 与机架构成移动副。

选择适当的比例尺,按照规定的线条和符号,绘出该机构的运动简图,如图 3.10 所示。图中标有箭头的构件 2 是原动件。

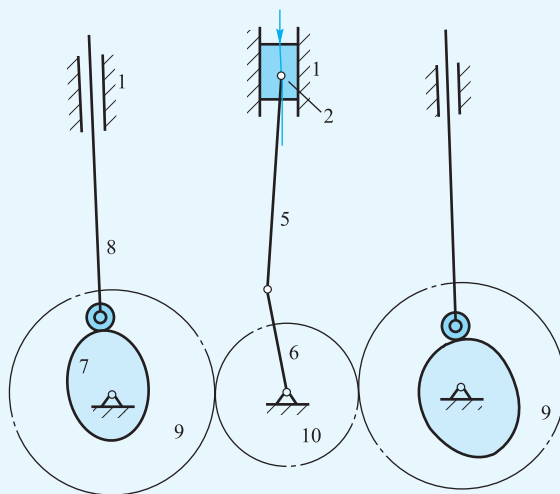


图 3.10 内燃机的机构运动简图



#### 3.3 平面机构的自由度

##### 3.3.1 机构具有确定运动的条件

运动链和机构都是由构件和运动副组成的系统,机构要实现预期的运动传递和变换,必须使其运动具有可能性和确定性。如图 3.11 所示,由 3 个构件通过 3 个转动副连接而成的系统就没有运动的可能性。又如图 3.12 所示的五杆系统,若取构件 1 作为原动件,当给定  $\varphi_1$  时,构件 2、3、4 既可以处在实线位置,也可以处在虚线或其他位置,因此,其从动件的运动是不确定的。如果给定构件 1、4 的位置参数  $\varphi_1$  和  $\varphi_4$ ,则其余构件的位置就都被确定下来。再如图 3.13 所示的曲柄滑块机构,当给定构件 1 的位置时,其他构件的位置也被相应确定。

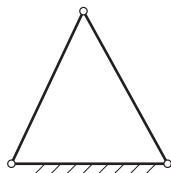


图 3.11 桁架

由此可见,无相对运动的构件组合或无规则乱动的运动链都不能实现预期的运动变换。将运动链的一个构件固定为机架,当运动链中一个或几个原动件位置确定时,其余从动件的位置也随之确定,这种运动链便成为机构。机构具有确定的相对运动。究竟取一个还是几个构件作原动件,这取决于机构的自由度。

机构的自由度就是机构具有独立运动参数的数目。因此,当机构的原动件数等于自由度时,机构就具有确定的相对运动。

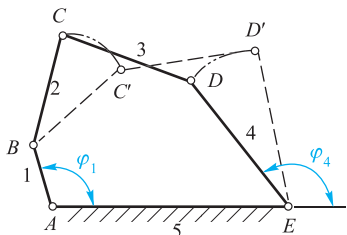


图 3.12 五杆铰链机构

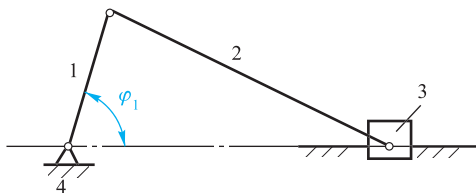


图 3.13 曲柄滑块机构

##### 3.3.2 平面机构自由度的计算

设一个平面运动链包含  $N$  个构件,其中 1 个构件为机架,则有  $n=N-1$  个活动构件,另外设有  $P_L$  个低副和  $P_H$  个高副。由于 1 个活动构件有 3 个自由度,1 个低副引进 2 个约束,1 个高副引进 1 个约束,因此该运动链的自由度  $F$ ,即机构的自由度应为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (3.1)$$

用式(3.1)计算图 3.11 所示运动链的自由度,则为  $F = 3 \times 2 - 2 \times 3 = 0$ ,因此该运动链各构件间无相对运动。计算图 3.12 所示运动链的自由度,则  $F = 3 \times 4 - 2 \times 5 = 2$ ,因此它需要两个原动件才具有确定的相对运动。按同样的方法计算出图 3.13 所示机构的自由度  $F = 1$ ,因此它只需要一个原动件便具有确定的相对运动。

##### 3.3.3 计算机构自由度的注意事项

应用式(3.1)计算机构的自由度时必须注意以下几个问题。

###### 1. 复合铰链

两个以上的构件共用同一转动轴线所构成的转动副称为复合铰链。如图 3.14a 所示,构



件 1、2、3 在同一处构成转动副, 而从图 3.14b 可以看出, 该机构包含 2 个转动副。显然, 如有  $m$  个构件汇集在一处, 应有  $m-1$  个转动副。

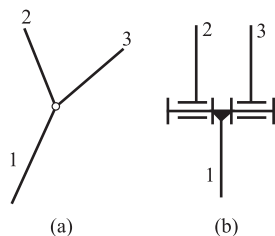


图 3.14 复合铰链

**例题 3.2** 计算图 3.15 所示机构的自由度。

**解** 此机构  $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  四处都是由三个构件组成的复合铰链, 各具有 2 个转动副, 所以对于这个机构可得  $n=7$ 、 $P_L=10$ 、 $P_H=0$ , 由式(3.1)得

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

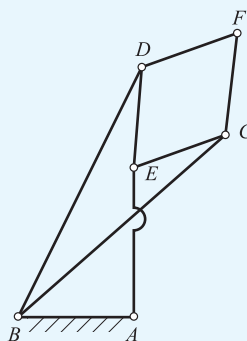


图 3.15 含有复合铰链的机构

## 2. 局部自由度

机构中某些构件所具有的不影响机构输出与输入运动关系的自由度称为局部自由度。如图 3.16a 所示的凸轮机构中, 滚子绕本身轴线的转动不影响其他构件的运动, 该转动的自由度即为局部自由度。计算时先把滚子看成与从动件连成一体, 消除局部自由度(图 3.16b)后, 再计算该机构的自由度。

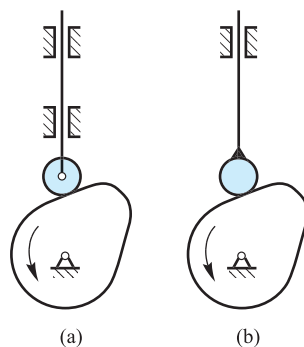


图 3.16 局部自由度

## 3. 虚约束

对运动不起独立限制作用的约束称为虚约束。在计算自由度时应先去除虚约束。

虚约束常在下列情况下发生:

(1) 如果两相连接构件在连接点上的运动轨迹相重合, 则该运动副引入的约束为虚约束。如图 3.17b 所示, 平行四边形机构中, 连杆 3 作平动, 如果  $EF$  平行并等于  $AB$  及  $CD$ , 则杆 5 上  $E$  点的轨迹与杆 3 上  $E$  点的轨迹重合。因此,  $EF$  杆带进了虚约束, 计算时先将其简化成图 3.17a。如果不满足上述几何条件, 则  $EF$  杆带进的为有效约束, 如图 3.17c 所示, 此时该机构的自由度  $F$  等于 0。

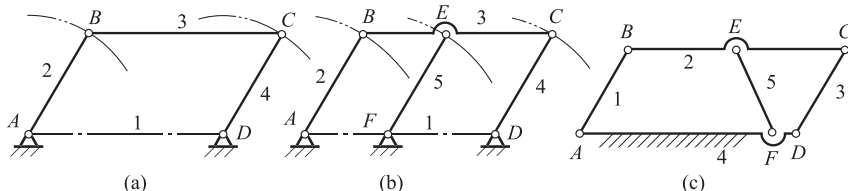


图 3.17 运动轨迹重合引入虚约束



(2) 机构运动时,如果两构件上两点间的距离始终保持不变,将此两点用构件和运动副连接则会带进虚约束,如图 3.18 所示。

(3) 如果两个构件组成多个移动方向一致的移动副(图 3.19),或两个构件组成多个轴线重合的转动副(图 3.20),只需考虑其中一处的约束,其余各处带进的约束均为虚约束。

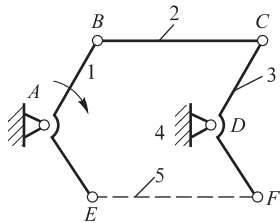


图 3.18 两点间距离不变引入的虚约束

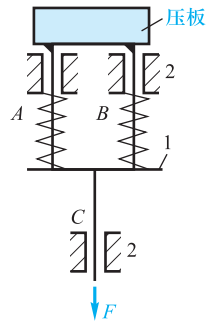


图 3.19 移动方向一致引入的虚约束

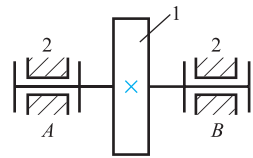


图 3.20 轴线重合引入的虚约束

(4) 机构中对运动不起作用的对称部分引入的约束为虚约束。如图 3.21 所示的差动齿轮系,只需要一个齿轮 2 便可传递运动。为了提高承载能力并使机构受力均匀,图中采用了 3 个完全相同的行星轮对称布置。这里每增加一个行星轮(包括两个高副和一个低副)便引进一个虚约束。

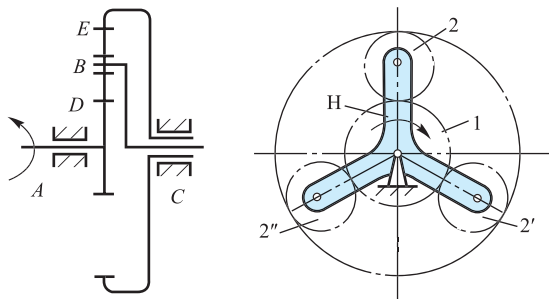


图 3.21 差动齿轮系

因此,可归纳出虚约束具有如下两个特点:

(1) 与另一约束对构件运动形成的限制重复,故将其去掉后其他构件的运动状态不变。如图 3.17b 所示, $EF$  杆对  $BEC$  杆的限制与  $CD$  杆对  $BEC$  杆的限制重复,去掉  $EF$  杆保留  $CD$  杆或反之, $BEC$  运动状态不变;

(2) 虚约束去掉前后计算出的机构自由度不同,如图 3.17b 所示,去虚约束前机构自由度  $F=0$ ,去虚约束后  $F=1$ ,实际上该机构自由度应该为 1。

根据以上两个特点,可以很方便地找出虚约束。

虚约束虽不影响机构的运动,但能增加机构的刚性,改善其受力状况,因而被广泛采用。但是虚约束对机构的几何条件要求较高,因此对机构的加工和装配精度提出了较高的要求。

**例题 3.3** 试计算图 3.22 所示大筛机构的自由度。

**解** 图中滚子  $F$  具有局部自由度。 $E$  和  $E'$  为两构件组成的导路平行的移动副,其中之一为虚约束。 $C$  处为复合铰链。在计算自由度时,将滚子  $F$  与构件 3 看成是连接在一



起的整体,即消除局部自由度,再去掉移动副  $E、E'$  中的任一个虚约束,则可得该机构的活动构件数  $n=7$ ,低副数  $P_L=9$ ,高副数  $P_H=1$ ,按式(3.1)得

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

此机构应当有两个原动件。

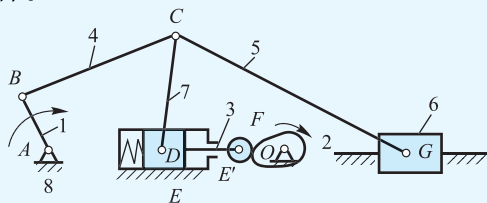
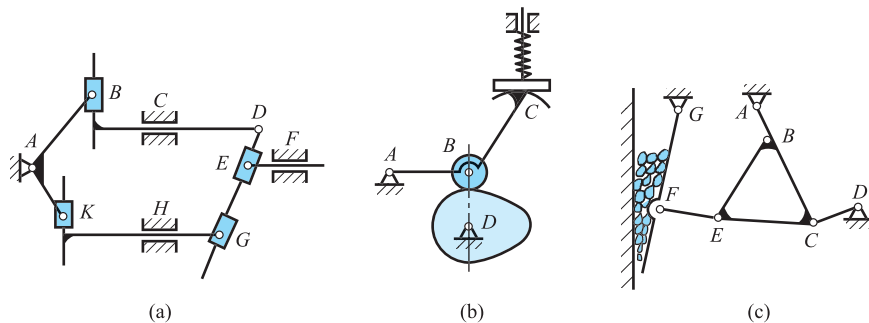


图 3.22 大筛机构

**思考题 3.1** 既然虚约束对机构的运动不起作用,为何机构中仍经常使用虚约束?

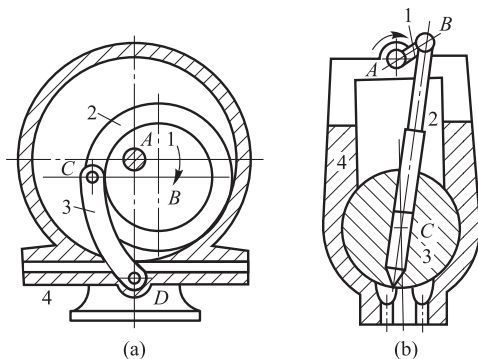
**复习题**

- 3.1 机构具有确定运动的条件是什么?
- 3.2 在计算机构的自由度时要注意哪些事项?
- 3.3 机构运动简图有什么作用? 如何绘制机构运动简图?
- 3.4 计算图示各机构的自由度,并说明欲使其具有确定运动需要有几个原动件。



题 3.4 图

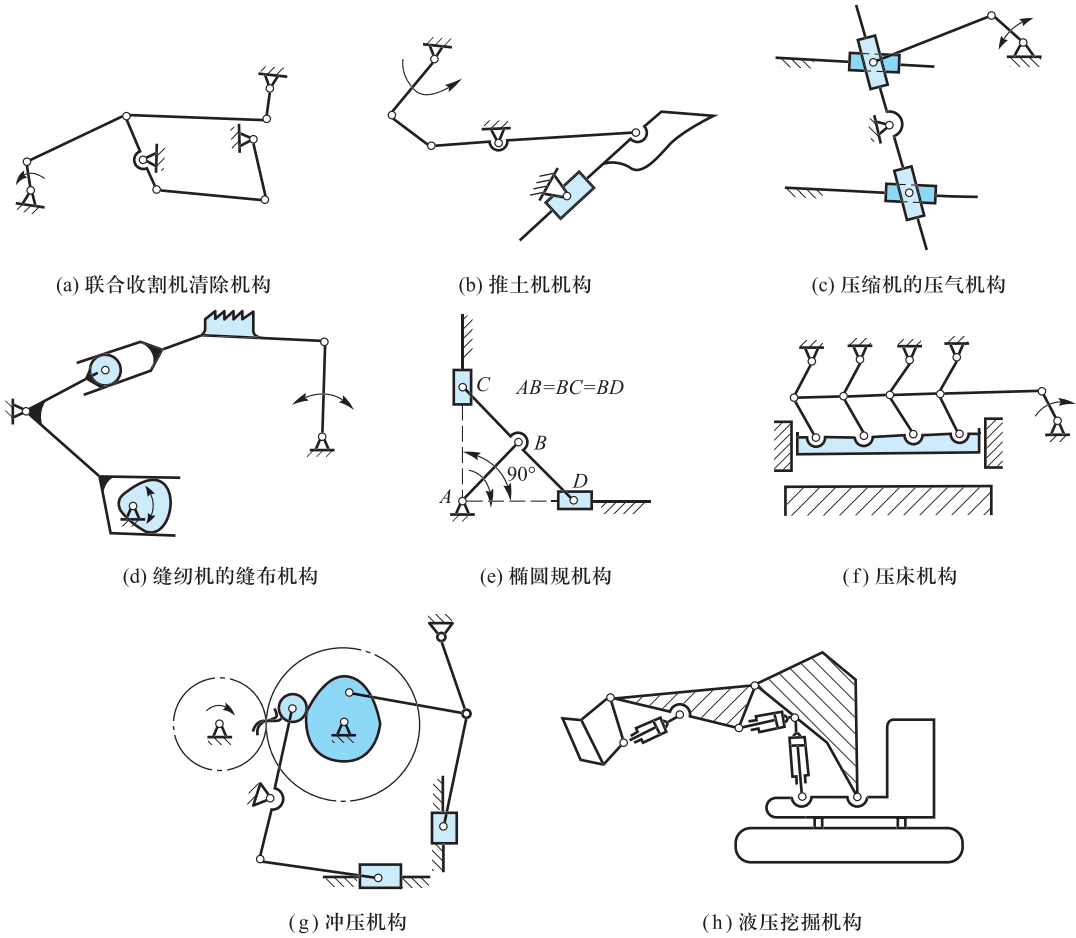
- 3.5 绘制图示各机构的运动简图,并计算其自由度。



题 3.5 图

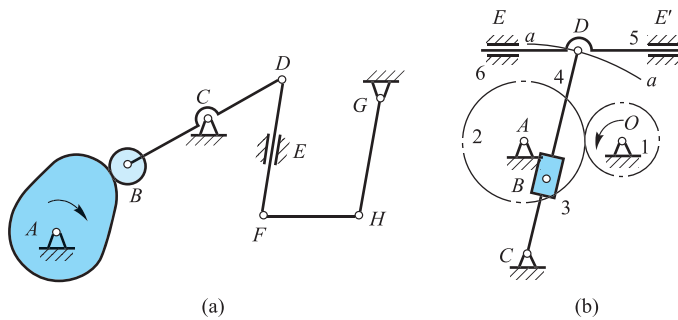


3.6 试计算图示机构的自由度,并判断该机构的运动是否确定(图中绘有箭头的构件为原动件)。



题 3.6 图

3.7 试问图示各机构在组成上是否合理? 如不合理, 请针对错误之处提出修改方案。



题 3.7 图