

平面连杆机构

由若干个构件通过低副连接,且所有构件在相互平行平面内运动的机构称为平面连杆机构。只携带转动副的构件,称为“杆”。由4个构件通过低副连接而构成的平面连杆机构,称为平面四杆机构。它是平面连杆机构中最常见的形式,也是组成多杆机构的基础。

平面连杆机构的主要优点有:由于组成运动副的两构件之间为面接触,因而承受的压强小、便于润滑、磨损较轻,可以承受较大的载荷;构件形状简单,加工方便,工作可靠;主动件等速运动时,如各构件的相对长度不等,从动件可以实现多种形式的运动,满足多种运动规律的要求。

主要缺点有:低副中存在间隙会引起运动误差,设计计算比较复杂,不易实现精确、复杂的运动规律;连杆机构运动时产生的惯性力也不适用于高速的场合,因而在应用上受到了一定的限制。

平面连杆机构的类型很多,构件多呈杆状,其中最常用的是由4个杆组成的平面四杆机构。因此,本章主要介绍平面四杆机构的类型、应用、特性及设计方法。

3.1 铰链四杆机构的基本形式及曲柄存在条件

3.1.1 铰链四杆机构的基本形式及应用

当四杆机构各构件之间以转动副连接时,称该机构为铰链四杆机构。图3.1所示的铰链四杆机构中,固定不动的杆4称为机架,与机架相连的杆1与杆3,称为连架杆;其中能相对机架做整周回转的连架杆称为曲柄,仅能在某一角度范围内做往复摆动的连架杆称为摇杆;连接两连架杆的杆2称为连杆,连杆2通常做平面复合运动。

根据连架杆运动形式的不同,铰链四杆机构可分为曲柄摇杆机构、双曲柄机构,双摇杆机构三种基本形式。

1. 曲柄摇杆机构

具有一个曲柄、一个摇杆的铰链四杆机构,称为曲柄摇杆机构(图3.1)。

在曲柄摇杆机构中,曲柄1为主动件时,可将曲柄的连续等速转动经连杆2转换为从动摇杆3的变速往复摆动。图3.2所示的送料机构即由两个完全相同的曲柄摇杆机构组合而成。

摇杆3为主动件时,可将摇杆的不等速往复摆动经连杆2转换为从动曲柄1的连续转动。图3.3所示为缝纫机踏板机构简图,当脚踏动踏板3(相当于摇杆)使其做往复摆动

时, 通过连杆2带动曲轴(相当于曲柄)做连续转动, 使缝纫机进行缝纫工作。

动画

曲柄摇杆机构

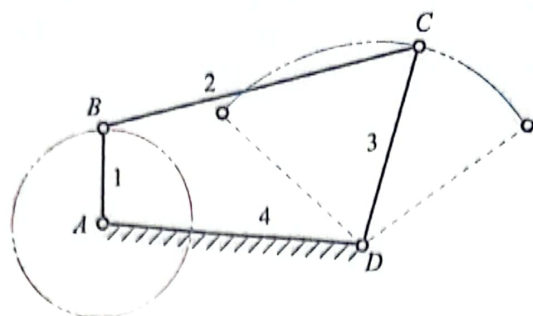


图3.1 曲柄摇杆机构

动画

送料机构

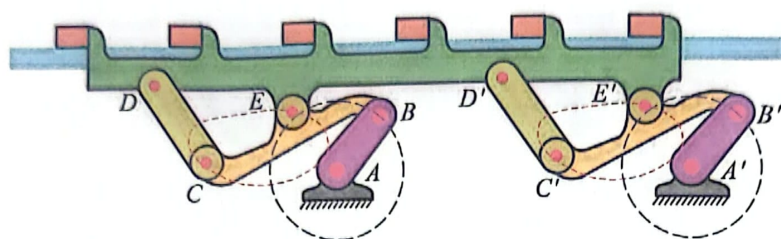


图3.2 送料机构

2. 双曲柄机构

具有两个曲柄的铰链四杆机构, 称为双曲柄机构(图3.4)。

动画

缝纫机踏板机构



动画

双曲柄机构

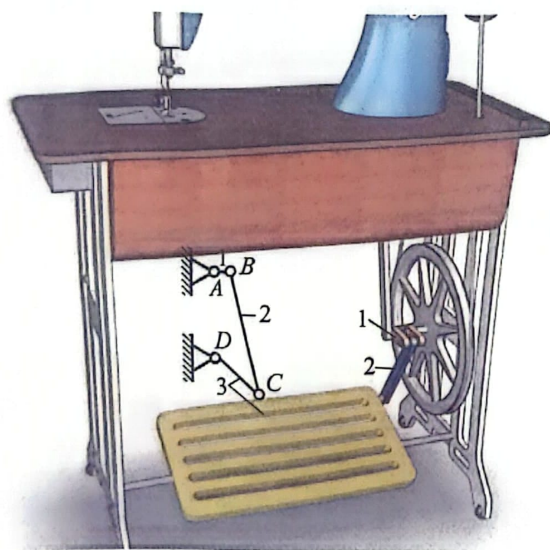


图3.3 缝纫机踏板机构简图

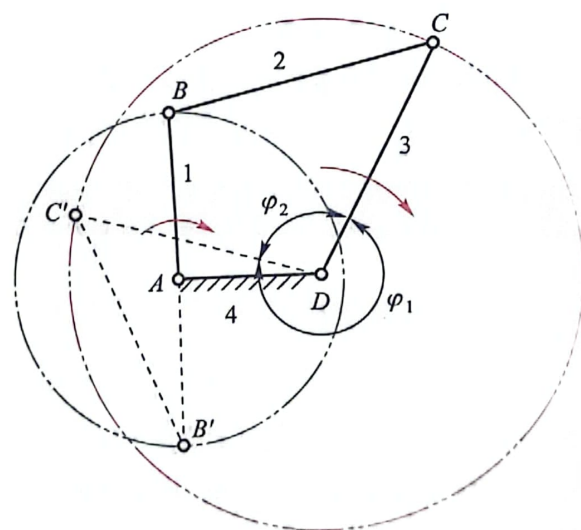


图3.4 双曲柄机构

在双曲柄机构中, 两曲柄可分别为主动件。若曲柄1为主动件, 当曲柄1由 AB 转 180° 至 AB' 时, 从动曲柄3由 CD 转至 $C'D$, 转角为 φ_1 ; 当主动曲柄继续再转 180° 由 AB' 转回至 AB 时, 从动曲柄也由 $C'D$ 转回至 CD , 转角为 φ_2 , 显然 $\varphi_1 > \varphi_2$ 。这表明主动曲柄匀速转动一周, 从动曲柄变速转动一周。在图3.5所示的惯性筛中, $ABCD$ 为双曲柄机构, 当曲柄1做等角速度转动时, 曲柄3做变角速转动, 通过连杆2使筛体产生变速直线运动, 筛面上的物料由于惯性来回抖动, 从而达到筛分物料的目的。

双曲柄机构中, 常见的还有平行四边形机构和逆平行四边形机构。



(1) 平行四边形机构。如图3.6所示, 两曲柄长度相等, 且连杆与机架的长度也相等, 呈平行四边形。平行四边形机构的运动特点是: 当主动曲柄1做等速转动时, 从动曲柄3会以相同的角速度沿同一方向转动, 连杆2则做平行移动。图3.7所示的机车车轮联动机构就是平行四边形机构的应用实例, 它保证了机车车轮运动完全相同。

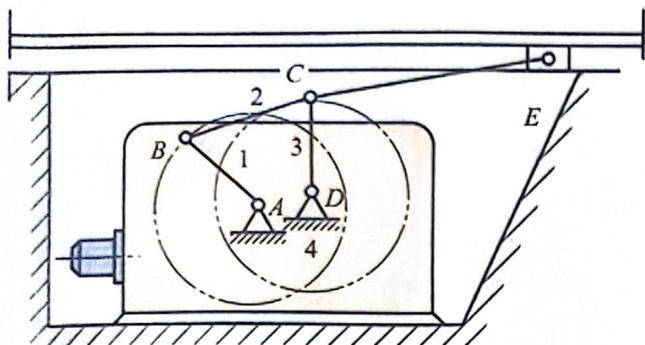


图3.5 惯性筛

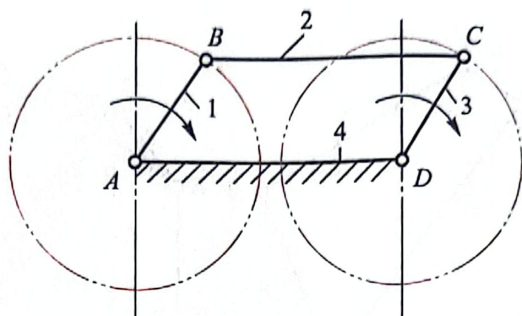


图3.6 平行四边形机构

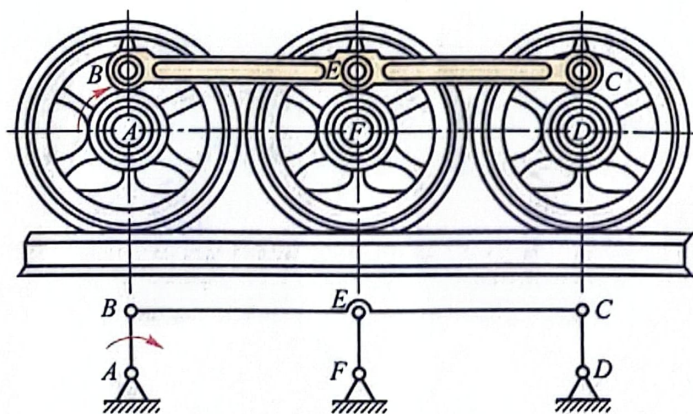


图3.7 机车车轮联动机构

(2) 逆平行四边形机构。如图3.8所示, 两曲柄长度相等, 且连杆与机架的长度也相等但不平行。逆平行四边形机构的运动特点是: 当主动曲柄1做等速转动时, 从动曲柄3做变速转动, 并且转动方向与主动曲柄相反。图3.9所示的车门机构采用了逆平行四边形机构, 以保证与曲柄1和3固连的车门能同时开和关。

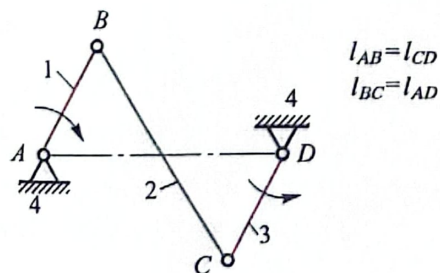


图3.8 逆平行四边形机构

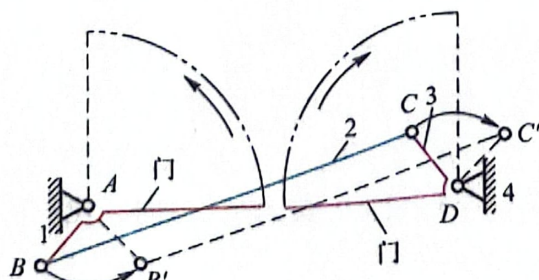


图3.9 车门机构

3. 双摇杆机构

铰链四杆机构中, 若两连架杆均为摇杆, 则称为双摇杆机构 (图3.10a)。

在双摇杆机构中, 两摇杆均可作为主动件。当主动摇杆1往复摆动时, 通过连杆2带动从动摇杆3往复摆动。图3.10b所示门座起重机的变幅机构即为双摇杆机构, 当主动摇

动画

惯性筛



动画

平行四边形机构



AR

机车车轮联动机构



动画

逆平行四边形机构



AR

车门机构





动画

双摇杆机构



杆1摆动时,从动摇杆3随之摆动,使连杆延长部分上的E点(吊重物处)在近似水平的直线上移动,避免因不必要的升降而消耗能量。

图3.11所示的汽车前轮转向机构也是双摇杆机构,两摇杆长度相等,四杆组成一等腰梯形,车轮分别固连在两摇杆上,当推动摇杆时,前轮随之转动,使汽车顺利转弯。

动画

门座起重机的变幅机构



AR

门座起重机的变幅机构

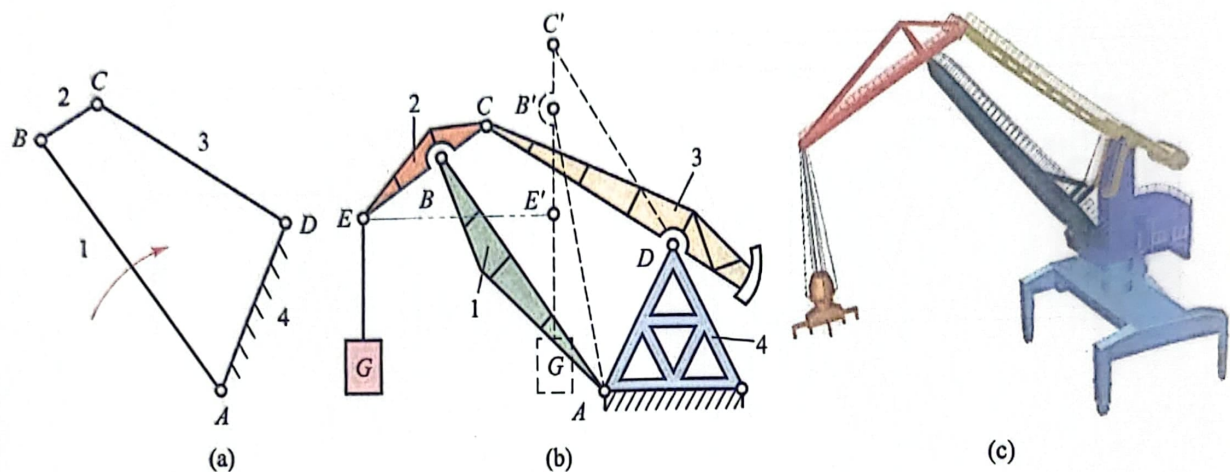


图3.10 双摇杆机构及门座起重机的变幅机构

动画

汽车前轮转向机构



AR

汽车前轮转向机构

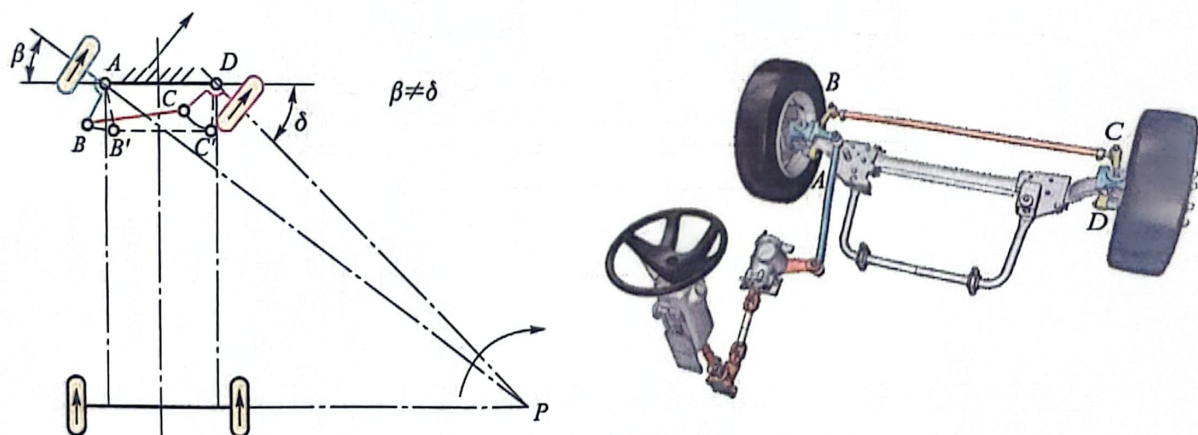


图3.11 汽车前轮转向机构

3.1.2 铰链四杆机构曲柄存在条件

铰链四杆机构是否有曲柄,与机构中各杆的相对长度有关。

图3.12所示为曲柄摇杆机构,AB为曲柄,BC为连杆,CD为摇杆,AD为机架,各杆长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 。为保证曲柄能做整圈旋转,曲柄AB必须能顺利通过与连杆BC共线的两个位置 AB_1 和 AB_2 ,这时,机构各杆分别构成 $\triangle AC_1D$ 与 $\triangle AC_2D$ 。

在 $\triangle AC_1D$ 中

$$l_2 - l_1 + l_4 \geq l_3$$

$$l_2 - l_1 + l_3 \geq l_4$$

在 $\triangle AC_2D$ 中

$$l_1 + l_2 \leq l_3 + l_4$$



所以

$$\left. \begin{aligned} l_3 + l_1 &\leq l_2 + l_4 \\ l_4 + l_1 &\leq l_2 + l_3 \\ l_2 + l_1 &\leq l_3 + l_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

上式两两相加得

$$\left. \begin{aligned} l_1 &\leq l_2 \\ l_1 &\leq l_3 \\ l_1 &\leq l_4 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

分析式(3.1)和式(3.2)可得铰链四杆机构有一个曲柄的条件为:

- (1) 最短杆与最长杆长度之和应小于或等于其余两杆长度之和;
- (2) 曲柄为最短杆。

由图3.12可见,因 AB 是曲柄,能做 360° 旋转,所以 AB 与相邻两杆 l_2 、 l_4 之间的夹角 β 和 φ 可在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化。根据相对运动原理,连杆 BC 和机架 AD 也可以相对曲柄做整圈旋转;而相对摇杆 CD 只能做小于 360° 的摆动。若取 AB 为机架,则 BC 杆和 AD 杆均为曲柄。由此,可得铰链四杆机构存在曲柄的条件为:

- (1) 最短杆与最长杆长度之和应小于或等于其余两杆长度之和;

- (2) 连架杆与机架中至少有一个是最短杆。

铰链四杆机构中,若最短杆与最长杆长度之和小于或等于其余两杆长度之和,当最短杆是连架杆时,则为曲柄摇杆机构;当最短杆是机架时,则为双曲柄机构;当最短杆是连杆时,则为双摇杆机构。

铰链四杆机构中,若最短杆与最长杆长度之和大于其余两杆长度之和,则无论取任何杆为机架,都只能得到双摇杆机构。此外,对于两边分别相等的铰链四杆机构,不论取哪个杆为机架,均存在两个曲柄,该机构为平行四边形机构或逆平行四边形机构。

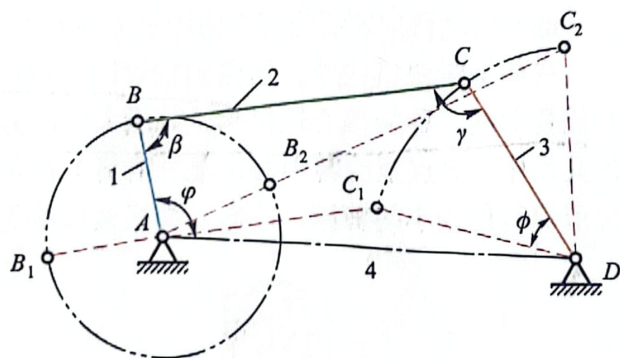


图3.12 曲柄摇杆机构

动画
曲柄摇杆
机构



3.2 铰链四杆机构的演化形式

3.2.1 曲柄滑块机构和偏心轮机构

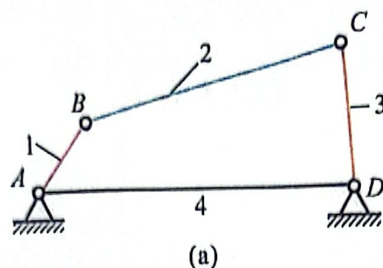
图3.13a所示的曲柄摇杆机构中,若将摇杆3变为直线运动的滑块(滑块是与一构件构成移动副,又与其他构件构成转动副的构件),转动副 D 改为移动副,则机构变化为图3.13b所示的曲柄滑块机构。若 C 点的运动轨迹 mm 正对曲柄转动中心 A ,则称为对心曲柄滑块机构(图3.13b);若 C 点运动轨迹 mm 的延长线与曲柄回转中心 A 之间存在偏距



e , 则称为偏置曲柄滑块机构(图3.13c)。滑块两个极限位置之间的距离称为行程, 通常用 h 表示。

动画

对心曲柄滑块机构



AR

对心曲柄滑块机构

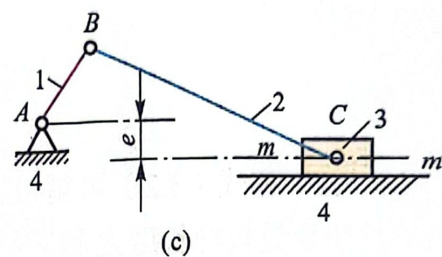
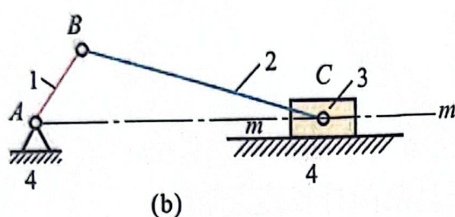


图3.13 曲柄滑块机构

曲柄滑块机构广泛应用于内燃机(图3.14)、空气压缩机、送料机构(图3.15)等。

在曲柄滑块机构中, 当曲柄较短时, 往往用一个旋转中心与几何中心不重合的偏心轮代替曲柄, 称为偏心轮机构, 如图3.16所示。图中构件1为偏心轮, 偏心距 e (偏心轮的几何中心 B 点至旋转中心 A 点的距离) 相当于曲柄长度。偏心轮机构常用于受力较大且滑块行程较小的剪床、冲床、颚式破碎机等。

动画

偏置曲柄滑块机构



AR

内燃机

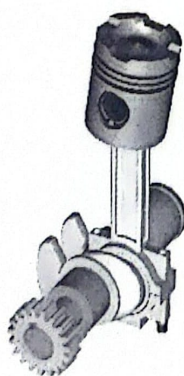


图3.14 内燃机

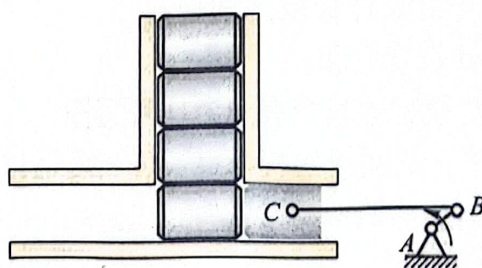


图3.15 送料机构

动画

送料机构



动画

偏心轮机构

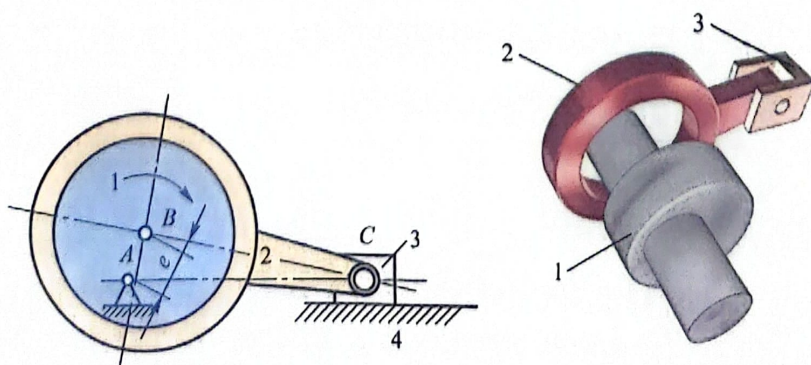


图3.16 偏心轮机构



3.2.2 导杆机构

导杆机构可看成是改变曲柄滑块机构中的机架演化得来的。图3.17a所示的曲柄滑块机构，若取杆1为机架，则得到图3.17b所示的导杆机构。其中杆4对滑块3的运动起导路作用，故称为导杆，滑块3相对导杆4滑动，并随导杆4一起绕A点转动。当 $l_1 \leq l_2$ 时（图3.17b），杆2和导杆4均可整周回转，故称为曲柄转动导杆机构；当 $l_1 \geq l_2$ 时（图3.18），杆2做整周回转，导杆4只能往复摆动，称为曲柄摆动导杆机构。图3.19所示的牛头刨床机构是曲柄摆动导杆机构的应用，图3.20所示的插床机构是转动导杆机构的应用。

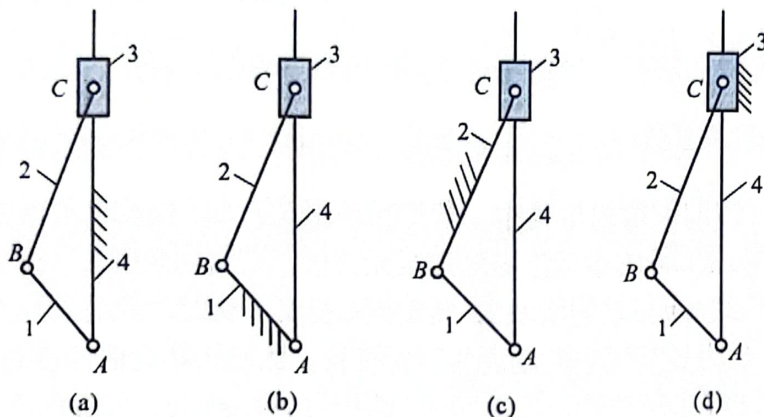


图3.17 曲柄滑块机构的演化

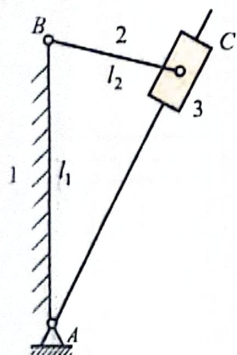


图3.18 曲柄摆动导杆机构

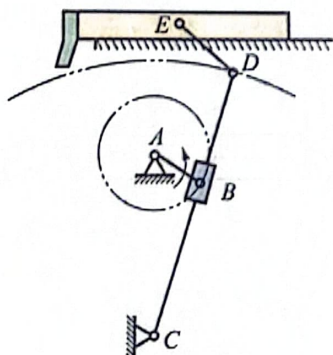


图3.19 牛头刨床机构

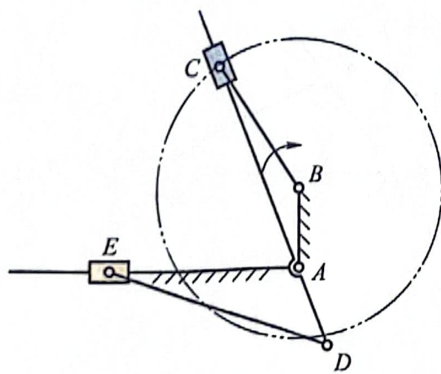


图3.20 插床机构

动画

曲柄转动导杆机构



动画

曲柄摆动导杆机构



动画

牛头刨床机构



3.2.3 移动导杆机构和曲柄摇块机构

1. 移动导杆机构

在图3.17a所示的曲柄滑块机构中，若取滑块3为机架，则演化为导杆在滑块中移动的移动导杆机构（图3.17d）。图3.21所示的抽水唧筒即为其应用实例。

2. 曲柄摇块机构

在图3.17a所示的曲柄滑块机构中，若取杆2为机架，则演化为曲柄摇块机构（图3.17c）。该机构中杆1为曲柄，绕B点回转时，杆4相对于滑块3滑动，并与滑块3一起绕C点摆动。这种机构广泛应用于摆缸式内燃机和液压驱动装置中。例如：在图3.22所示自卸汽车的车厢自动翻转卸料机构中，当摆动液压缸3内的压力油推动活塞杆4从摆动液压缸3中伸出，车厢1绕车身2的B点倾转，将货物自动卸下。

动画

插床机构





动画

抽水唧筒



动画

自卸汽车

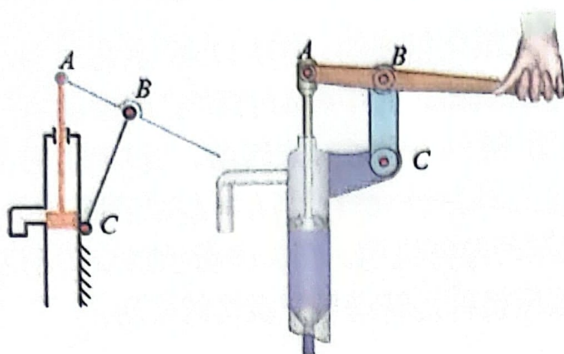
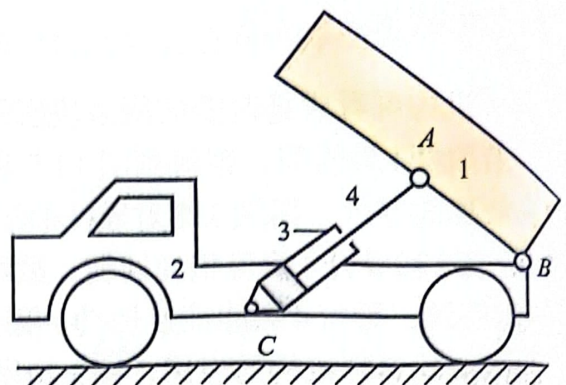


图 3.21 抽水唧筒



1—车厢；2—车身；3—摆动液压缸；4—活塞杆

图 3.22 自卸汽车

3.2.4 曲柄移动导杆机构

图 3.23a 所示的曲柄滑块机构中，若将转动副 B 扩大，则该机构可等效为图 3.23b 所示的机构。若圆弧槽 $\widehat{mm}$ 的半径逐渐增加至无穷长，则演化为图 3.23c 所示的机构。此时连杆 2 转化为沿直线 mm 移动的滑块 2，转动副 C 变成移动副，滑块 3 转化为移动导杆。曲柄滑块机构便演化为具有两个移动副的四杆机构，此机构称为曲柄移动导杆机构。由于此机构在主动件 1 等速回转时，从动导杆 3 的位移 $y = l_{AB} \sin \alpha$ ，故又称正弦机构，如缝纫机引线机构（图 3.24）等。

动画

曲柄移动导杆机构

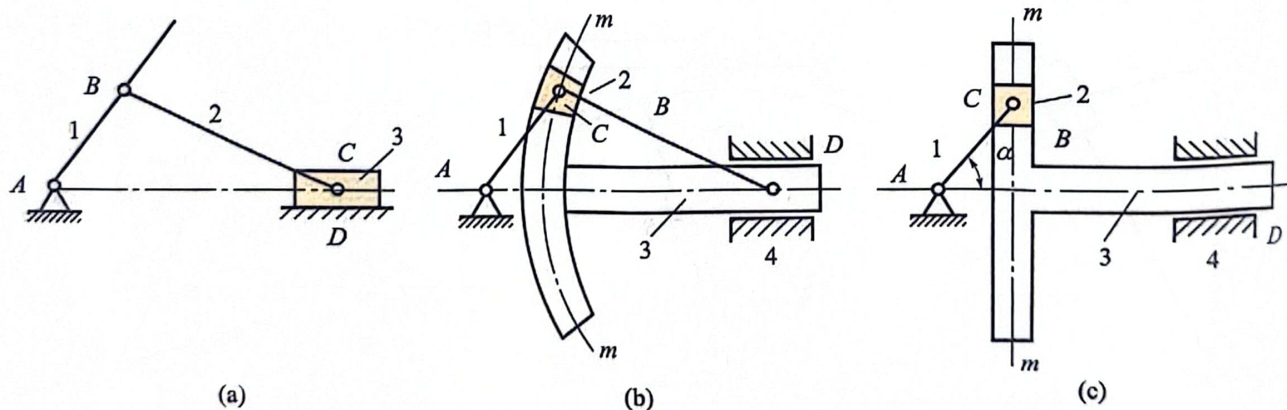


图 3.23 曲柄移动导杆机构的演化

AR

缝纫机引线机构

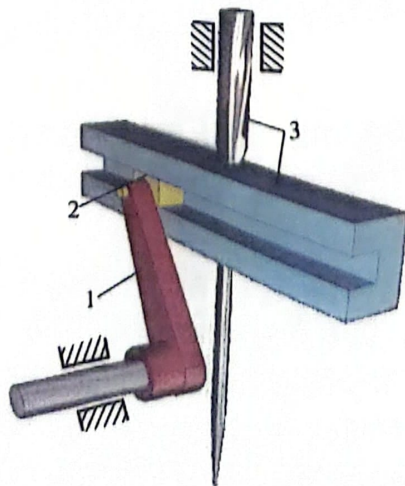


图 3.24 缝纫机引线机构



3.3 平面四杆机构的传动特性

3.3.1 急回特性

在图3.25所示的曲柄摇杆机构中, 曲柄 AB 是主动件, 以 ω 做等角速度转动, C_1D 为 CD 杆的左极限位置, C_2D 为 CD 杆的右极限位置, 摇杆在两极限位置之间所夹角称为摇杆的摆角, 用 ψ 表示。当曲柄 AB 顺时针从 AB_1 转到 AB_2 , 摇杆 CD 由 C_1D 摆动到 C_2D 位置时, 所需时间为 t_1 , 其平均速度为 $v_1 = \frac{\widehat{C_1C_2}}{t_1}$, 曲柄转过角度 $\varphi_1 = 180^\circ + \theta$; 当曲柄 AB 等速顺时针从 AB_2 转到 AB_1 , 摇杆 CD 由 C_2D 摆回到 C_1D 位置时, 所需时间为 t_2 , 其平均速度为 $v_2 = \frac{\widehat{C_1C_2}}{t_2}$, 曲柄转过的角度 $\varphi_2 = 180^\circ - \theta$ 。因为 $\varphi_1 > \varphi_2$, 所以 $t_1 > t_2$, 则有 $v_2 > v_1$, 说明曲柄 AB 等角速度转动时, 从动件摇杆 CD 往复摆动的平均速度不相等, 返回时速度较大, 这一性质称为机构的急回特性。

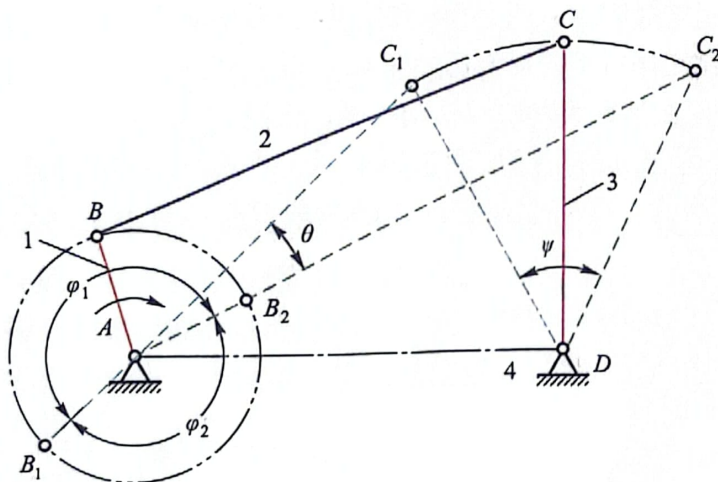


图3.25 四杆机构的急回特性

动画
四杆机构的
急回特性



机构急回特性通常用行程速度变化系数 K 来表示, 即在急回运动机构中, 做往复运动的从动件在空行程中的平均速度与工作行程中的平均速度之比值。可用下式表示

$$K = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\widehat{C_1C_2}/t_2}{\widehat{C_1C_2}/t_1} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{180^\circ + \theta}{180^\circ - \theta} \quad (3.3)$$

式中, θ 称为极位夹角, 即摇杆(从动件)在极限位置时, 曲柄两位置之间所夹锐角。

θ 表示了急回程度的大小, θ 越大, K 值越大, 机构急回的程度越高, 但从另一方面看, 机构运动的平稳性就越差; 当 $\theta=0^\circ$ 时, 机构无急回特性。

设计机构时通常给定 K 值求算出 θ 角, 在一般机械中取 $1 \leq K \leq 2$ 。

综上所述, 可得连杆机构从动件具有急回特性的条件是:

- (1) 主动件为曲柄, 做等速整周转动;
- (2) 从动件做往复运动(有极限位置);
- (3) 极位夹角 $\theta > 0^\circ$ 。



3.3.2 传力特性

平面连杆机构不仅要保证实现预定的运动要求,而且应当运转效率高,并具有良好的传力特性。通常以压力角或传动角表明连杆机构的传力特性。

在图3.26所示的曲柄摇杆机构中,若忽略各杆的质量和转动副中摩擦力的影响,则连杆2是二力杆,主动曲柄1通过连杆2传给从动摇杆3的力 F 沿 BC 方向。从动件 C 点的力 F 方向与速度 v_C 方向所夹的锐角 α 称为压力角,压力角的余角 γ 称为传动角。 F 分解为两个分力 F_t 和 F_r ,分别为

$$\left. \begin{aligned} F_t &= F \cos \alpha = F \sin \gamma \\ F_r &= F \sin \alpha = F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

显然,压力角越小,使从动件运动的有效分力越大,机构传动的效率也越高,所以可用压力角的大小判断机构的传力特性。

为了度量方便,常用压力角 α 的余角 γ 判断机构性能。由图3.26可知,传动角 γ 是连杆与摇杆所夹的锐角。因 $\gamma = 90^\circ - \alpha$, α 越小或 γ 越大,机构传力性能越好;当 γ 过小时,机构就不能传动。机构运转过程中,压力角 α 和传动角 γ 随从动件的位置而变化。为了保证机构能正常工作,要限制工作行程的最大压力角 $\alpha_{\max}$ 或最小传动角 $\gamma_{\min}$,一般设计时应使最小传动角 $\gamma_{\min} \geq 40^\circ$;对于高速和大功率的传动机械,应使 $\gamma_{\min} \geq 50^\circ$ 。

铰链四杆机构运转时的情况如图3.26所示,在曲柄与机架共线的两个位置,均可出现传动角 γ 的最小值,可通过计算或作图量取两个位置的传动角,其中最小值即为 $\gamma_{\min}$ 。

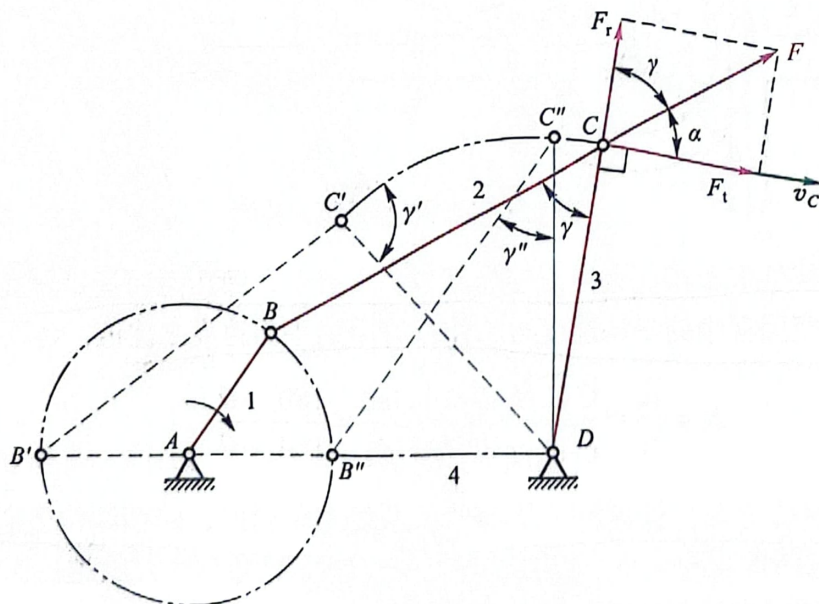


图3.26 压力角和传动角

对于偏置曲柄滑块机构(图3.27),曲柄为主动件时,其传动角 γ 为连杆与导路垂线所夹的锐角,因此当曲柄处于与偏距方向相反一侧垂直导路的位置时出现 $\gamma_{\min}$;对于曲柄摆动导杆机构(图3.28),当曲柄 BC 为主动件时,因滑块对导路的作用力始终垂直于导杆,故其传动角 γ 恒为 90° ,这说明曲柄摆动导杆机构具有良好的传力性能。

动画

压力角和传动角



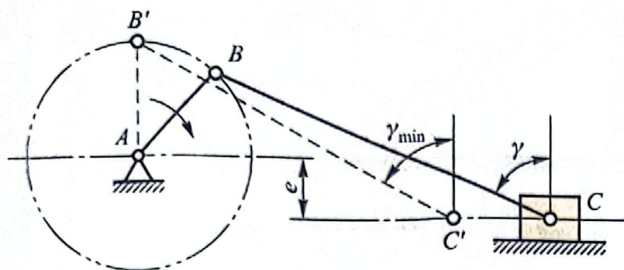


图 3.27 偏置曲柄滑块机构最小传动角

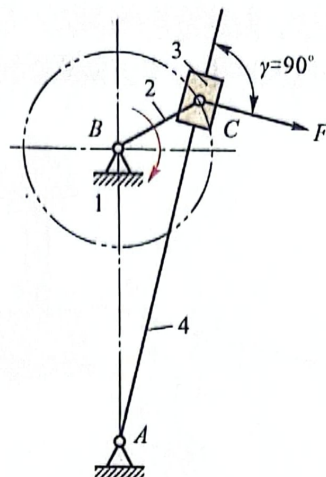


图 3.28 曲柄摆动导杆机构传动角

3.3.3 死点位置

在图3.29所示的曲柄摇杆机构中，若摇杆 CD 为主动件、曲柄 AB 为从动件，当连杆 BC 与曲柄 AB 处于共线位置时，连杆 BC 与曲柄 AB 之间的传动角 $\gamma=0^\circ$ ，压力角 $\alpha=90^\circ$ ，这时摇杆 CD 经连杆 BC 传给从动曲柄 AB 的力通过曲柄转动中心 A ，转动力矩为零，从动件或不转，机构停顿，或运动不确定，机构所处的这种位置称为死点位置，有时把死点位置简称死点。对于连续运转的机器，常采取以下措施使机构顺利地通过死点位置：

(1) 利用飞轮或从动件的惯性顺利地通过死点位置。例如：家用缝纫机的踏板机构中大带轮就相当于飞轮，利用其惯性通过死点位置。

(2) 采用错位排列的方式顺利地通过死点位置。例如：V型发动机（图3.30），由于两机构死点位置互相错开，当一个机构处于死点位置时，另一机构不在死点位置，可使曲轴始终获得有效力矩。

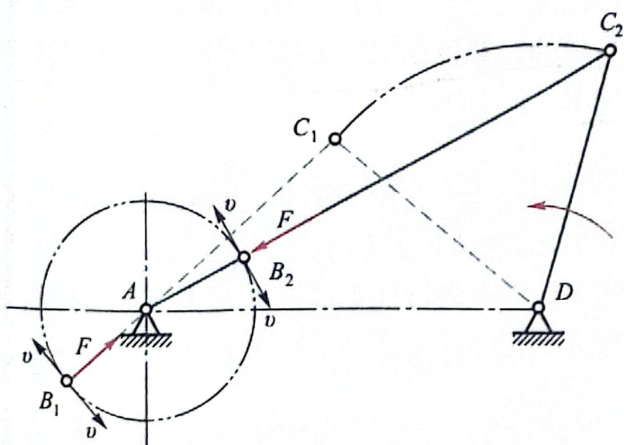


图 3.29 曲柄摇杆机构的死点

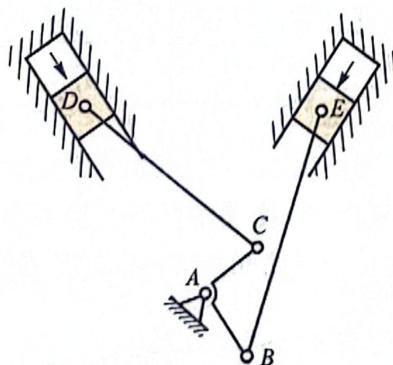


图 3.30 V型发动机

动画

曲柄摇杆机
构的死点

动画

V型发动机



在工程实际中的不少场合也是利用死点位置来实现一定的功能。如图3.31所示的夹紧机构，当工件5被夹紧后，四杆机构的铰链中心 B 、 C 、 D 处于同一条直线上，工件经杆1传给杆2、杆3的力通过回转中心 D ，转动力矩为零，杆3不会转动，因此当力去掉后仍能夹紧工件。再如图3.32所示的飞机起落架机构，飞机起飞和降落时，飞机起落架处于放下机



轮的位置,此时连杆 BC 与从动件 AB 处于一条直线上,机构处于死点位置,故机轮着地时产生的巨大冲击力不会使从动件反转,从而保持着支承状态。

动画

夹紧机构

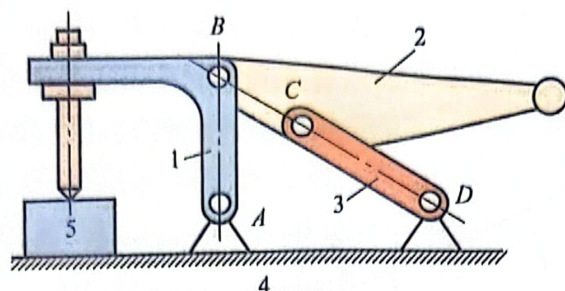


图 3.31 夹紧机构

动画

飞机起落架机构

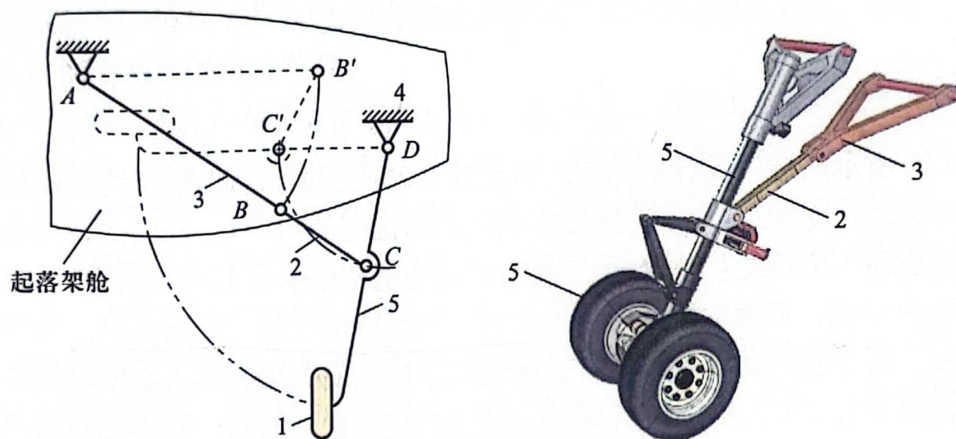


图 3.32 飞机起落架机构

AR

飞机起落架机构



3.4 多杆机构简介

前面讨论的基本机构远不能满足实际使用要求,但是有了这些基本机构,就可以根据基本机构的功能,按照某种方式来进行组合,并依据机构的演化创新设计出形式多样的多杆机构,以实现生产实际中的特殊要求。

1. 扩大从动件的行程

如图3.33所示,冷床运输机就是一个六杆机构。它用于把热轧钢料在运输过程中冷却,因此要求增大行程,该机构由曲柄摇杆机构 AB_1C_1D 和连杆5、滑块6组成。显然滑块6的行程 s 比曲柄摇杆机构 AB_1C_1D 中 C_1D 上 C_1 点的行程 C_1C_2 要大得多,而该机构的横向尺寸则要比采用对心曲柄滑块机构获得同样行程时小得多。

2. 用于增大输出件的作用力

图3.34所示为手动冲床机构。该机构是一个六杆机构,可看作由四杆机构 $ABCD$ 与滑块机构 $DEFG$ 组合而成。显然根据杠杆原理经过摇杆2和4使扳动摇杆的力两次放大后传到冲杆6,从而增大了冲杆6的作用力,以满足冲压要求。

3. 用于改善从动件的运动特性

图3.35所示的组合压力机机构由双曲柄机构与六杆机构组合而成,原压力机机构仅为双曲柄机构带动滑块(冲头)。比较组合压力机机构与原压力机机构的位移曲线可看出,组



合压力机机构比原压力机机构在其滑块下降行程的低速工作段的速度要低得多，从而满足了某些压力机在工作过程（滑块下降行程）中需要较低速度的要求。

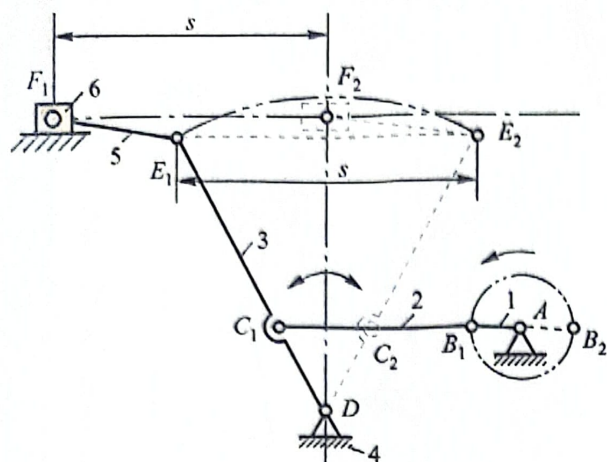


图 3.33 冷床运输机机构

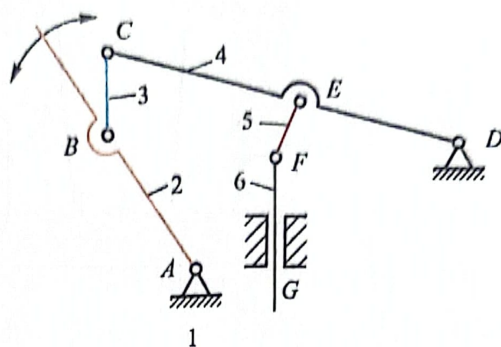


图 3.34 手动冲床机构

动画

冷床运输机
机构

动画

手动冲床
机构

动画

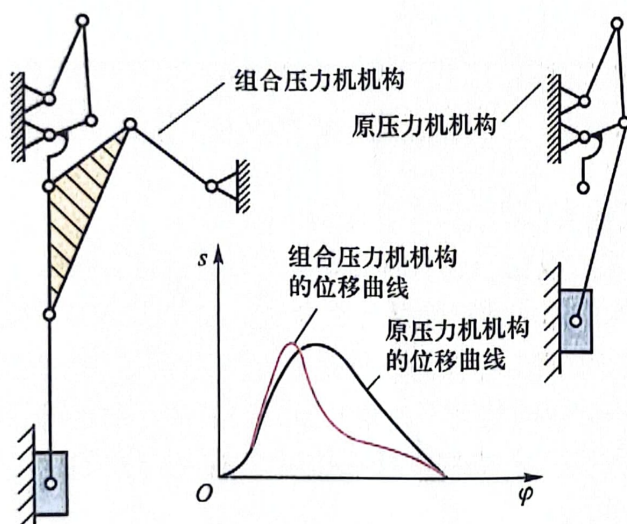
组合压力机
机构

图 3.35 组合压力机机构

4. 改善工作性能

图 3.36 所示为大型双点压床机构，该机构由两组尺寸相同且左右对称布置的曲柄滑块机构组成，其作用在滑块上的水平分力大小相等、方向相反，可消除滑块对导路的侧压力，从而减少了摩擦损失。

5. 机构并联组合完成预定功能

图 3.37 所示为丝织机的开口机构，该机构利用了一个曲柄摇杆机构和两个曲柄滑块机构组合。当主动曲柄 1 转动时，通过摇杆 3 将运动传给两个曲柄滑块机构，使从动滑块 5 和 7 实现上下往复运动，完成丝织机丝织物经线的开口工作。



第3章 平面连杆机构

动画

大型双点压床机构



动画

丝织机的开口机构

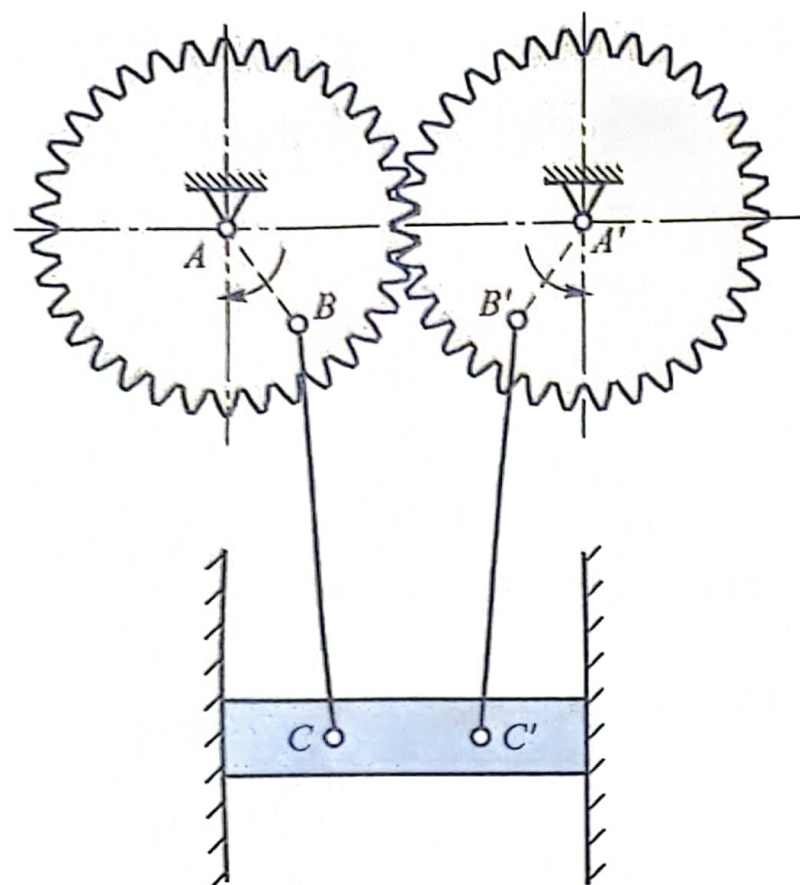


图 3.36 大型双点压床机构

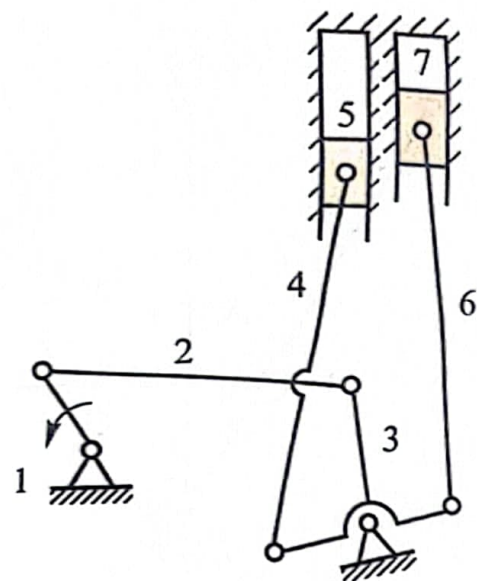


图 3.37 丝织机的开口机构