

第3章 平面连杆机构

3.1 概 述

由若干构件用低副(转动副、移动副、螺旋副、圆柱副、球面副及球销副等)连接而构成的机构称为连杆机构,又称为低副机构。按构件间的相对运动关系,连杆机构分为平面连杆机构和空间连杆机构两大类,组成平面连杆机构的各构件均在同一平面内或在相互平行的平面内运动。组成空间连杆机构的各构件不在同一平面内或不在相互平行的平面内运动。连杆机构常根据其所含的构件数而命名,四个构件以低副组成的机构则称为四杆机构,五个构件以低副组成的机构则称为五杆机构,以此类推。五个以上的构件以低副组成的连杆机构又称多杆机构。本章主要讨论平面四连杆机构的相关知识。

平面连杆机构广泛应用于各种机械和仪表中,如内燃机中的曲柄滑块机构(见图 3.1)、颚式破碎机(见图 3.2)和搅拌机(见图 3.3)中的曲柄摇杆机构、流量指示计中的双摇杆机构(见图 3.4)等。平面连杆机构应用广泛,它的主要传动特点如下。

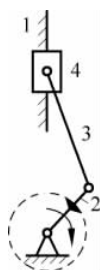


图 3.1 内燃机

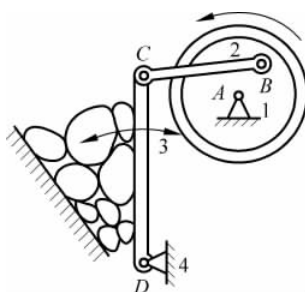


图 3.2 颚式破碎机

1—轮; 2—连杆; 3—颚板

1. 连杆机构的主要优点

(1) 运动副一般均为低副。低副中两运动副元素为面接触,压强较小,故可承受较大的载荷;有利于润滑,磨损较小;运动副元素的几何形状较简单,便于加工制造,易获得较高的制造精度;两构件之间的接触是靠本身的几何封闭来维系的,不像凸轮机构有时需利用弹簧等力封闭来保持接触。

(2) 可实现多种形式的运动变换和运动规律。在连杆机构中,当原动件的运动规律不变时,改变各构件的相对长度可使从动件得到不同的运动规律。

(3) 具有丰富的连杆曲线。在连杆机构中,连杆上各点的轨迹是各种不同形状的曲线(称为连杆曲线),其形状随着各构件相对长度的改变而改变,可满足不同轨迹的设计要求。

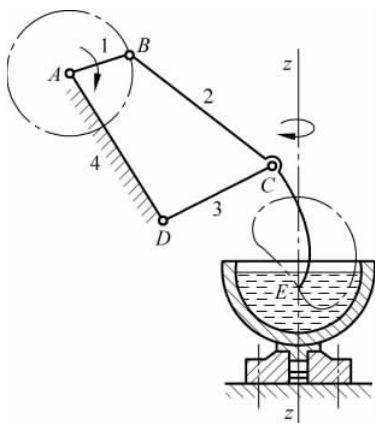


图 3.3 搅拌机

1—曲柄；2—连杆(搅拌杆)；3—连架杆；4—机架

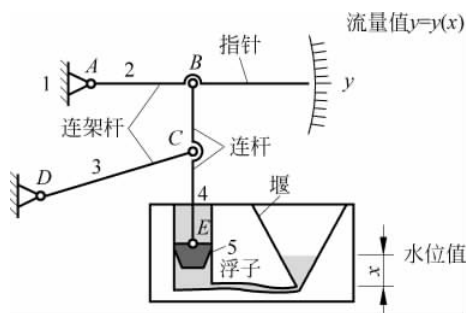


图 3.4 流量计

1—机架；2—连架杆(指针)；3—连架杆；4—连杆；5—浮子

2. 连杆机构的主要缺点

(1) 传递运动的累积误差比较大,机械效率低。由于连杆机构的运动必须经过中间构件进行传递,因而传递路线较长,易产生较大的误差积累,同时,降低了机械效率。

(2) 不适用于高速运动的场合。在连杆机构运动过程中,连杆及滑块的质心都在作变速运动,所产生的惯性力难以用一般平衡方法加以消除,因而会增加机构的动载荷,容易使机构在运动中产生振动和冲击,严重时还会影响机械产品的工作精度与寿命,所以连杆机构不适于高速运动的场合。

(3) 机构设计复杂,难以实现精确的轨迹。虽然可以利用连杆机构来满足一些运动规律和运动轨迹的设计要求,但其设计十分繁难,且一般只能近似地得以满足。

3.2 平面四杆机构的基本类型及其演化

在平面连杆机构中,结构最简单且应用最广泛的是平面四杆机构,其他机构可看成是由平面四杆机构演化而来。

3.2.1 铰链四杆机构的基本类型

全部用转动副相连的平面四杆机构称为铰链四杆机构,它是平面四杆机构最基本的形式。在图 3.5(a)所示的铰链四杆机构中,AD 为机架。AB、CD 两杆与机架相连称为连架杆,如果连架杆相对于机架能作整周转动,则称为曲柄;如连架杆相对于机架只能在一定角度范围内摆动,则称为摇杆。连接两连架杆的构件 BC 称为连杆。若组成转动副的两构件能作整周相对转动,则称该转动副为整转副,如图 3.5(a)中的 A、B 副。而不能作相对整周转动的运动副,则称为摆转副,如图 3.5(a)中的 C、D 副。铰链四杆机构可分为三种基本形式:曲柄摇杆机构,如图 3.5(a)、(c)所示;双曲柄机构,如图 3.5(b)所示;双摇杆机构,如图 3.5(d)所示。

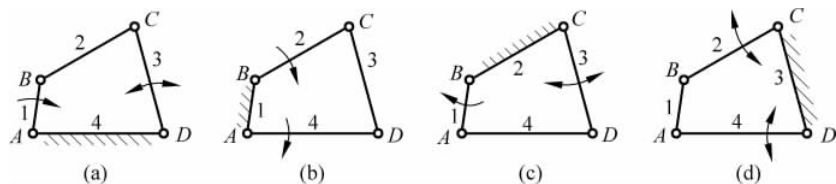


图 3.5 铰链四杆机构

(a) 曲柄摇杆机构；(b) 双曲柄机构；(c) 曲柄摇杆机构；(d) 双摇杆机构

1. 曲柄摇杆机构

铰链四杆机构的两连架杆中一个能作整周转动,另一个只能作往复摆动的机构,称为曲柄摇杆机构,如图 3.5(a)、(c)所示。它在工业中得到广泛的应用,如颚式破碎机中的机构(见图 3.2)、雷达天线俯仰机构(见图 3.6)、缝纫机中的脚踏板机构(见图 3.7)和脚踏砂轮机机构(见图 3.8)等。这类机构中,当曲柄为原动件,摇杆为从动件时,可将曲柄的连续转动转变为摇杆的往复摆动。如图 3.2 所示颚式破碎机机构,把曲柄 1(轮 1)的整周回转运动转变成摇杆 3(颚板 3)的往复摆动,以轧碎矿石。图 3.6 所示为雷达天线俯仰机构,它把曲柄 1 的整周回转运动转变成摇杆 3(雷达天线 3)的往复摆动,以调整雷达天线的仰角。在曲柄摇杆机构中,摇杆也可作为原动件,如图 3.7 所示的缝纫机脚踏板机构,踏板 3 是摇杆,轮轴 1 是曲柄,脚踏动摇杆 3 作往复摆动,通过连杆 2,使曲柄 1 作整周回转运动,从而完成缝纫工作。图 3.8 所示的脚踏砂轮机机构,踏板 3 是摇杆,砂轮 1 是曲柄,脚踏动摇杆 3 作往复摆动时,通过连杆 2,使砂轮 1 作整周回转运动,从而完成磨削工作。

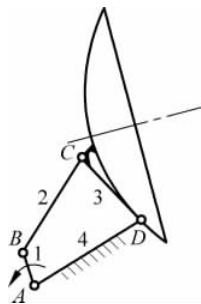


图 3.6 雷达天线俯仰机构

1—曲柄；2—连杆；3—雷达天线；4—机架

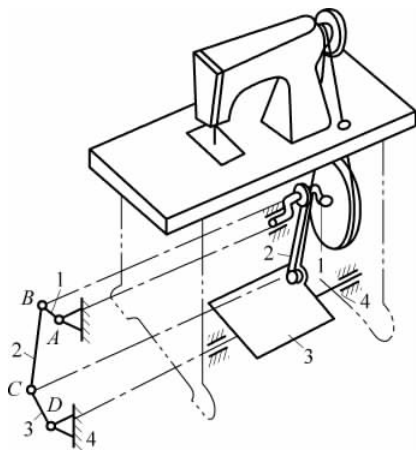


图 3.7 缝纫机脚踏板机构

1—轮轴；2—连杆；3—踏板；4—机架

2. 双曲柄机构

铰链四杆机构的两连架杆均能作整周转动的机构称为双曲柄机构,如图 3.5(b)所示。当主动曲柄连续等速转动时,从动曲柄一般不作等速转动,而作变速转动。图 3.9 所示的惯性筛中,主动曲柄 AB 作等速回转运动,从动曲柄 CD 作变速转动,从而使筛网具有较大变化的加速度,利用加速度所产生的惯性力,将材料筛分。

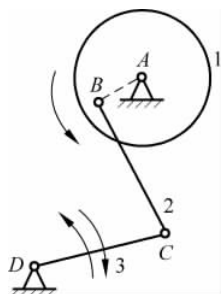


图 3.8 脚踏砂轮机机构

1—砂轮；2—连杆；3—踏板

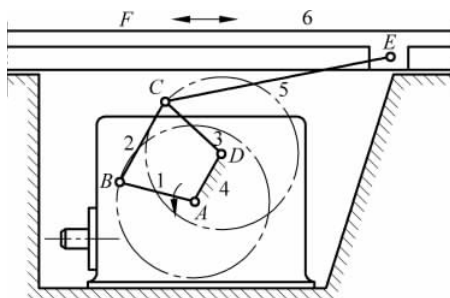


图 3.9 惯性筛

在双曲柄机构中,若相对的两杆长度分别相等,则称为平行双曲柄机构或平行四边形机构。若相对的两杆长度相等且平行,两曲柄转向相同且角速度相等,则称为正平行四边形机构,如图 3.10 所示,该机构的特点是主动曲柄 1 和从动曲柄 3 转向相同且角速度相等,即 $\omega_1 = \omega_3$,连杆 2 作平动。图 3.11 所示的机车车轮联动机构就是正平行四边形机构的实际应用,由于两曲柄作等速同向转动,从而保证了机构的平稳运行。若相对的两杆长度相等,但连杆与机架不平行,两曲柄转向相反且角速度不同,则为反平行四边形机构,如图 3.12 所示,该机构的特点是主动曲柄 1 和从动曲柄 3 转向相反且角速度不同,即 $\omega_1 \neq \omega_3$,连杆 2 作平面运动。图 3.13 所示的车门开闭机构是反平行四边形机构的一个应用,AD 与 BC 不平行,因此,两曲柄作不同速反向转动,从而保证两扇门能同时开启或关闭。

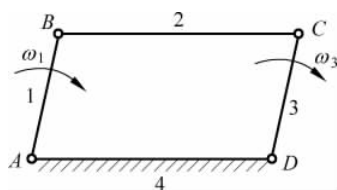


图 3.10 正平行四边形机构

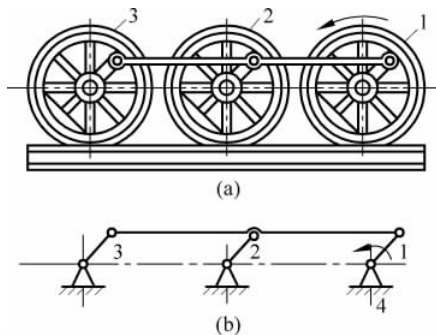


图 3.11 机车车轮联动机构

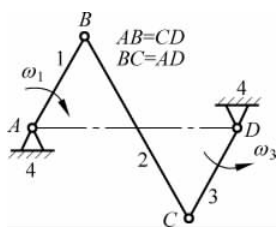


图 3.12 反平行四边形机构

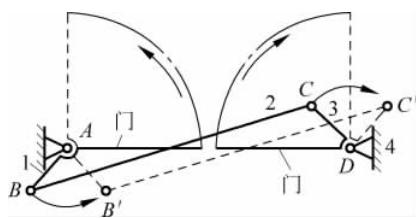


图 3.13 车门开闭机构

另外,对平行双曲柄机构,无论以哪个构件为机架都是双曲柄机构。但若取较短构件作机架,则两曲柄的转动方向始终相同。

3. 双摇杆机构

两连架杆均不能作整周转动的,即两连架杆都是摇杆的铰链四杆机构,则称为双摇杆机构,如图 3.5(d)所示。图 3.14 所示的鹤式起重机中的四杆机构即为双摇杆机构,当原动摇杆 AB 摆动时,从动摇杆 CD 也随之摆动,位于连杆 BC 延长线上的重物悬挂点 M 将沿近似水平直线移动。在双摇杆机构中,若两摇杆长度相等并且最短,则构成等腰梯形机构,汽车前轮转向机构就是其应用之一,如图 3.15 所示。

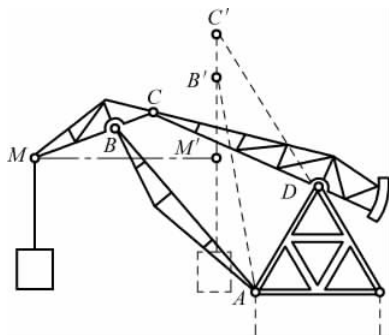


图 3.14 鹤式起重机机构

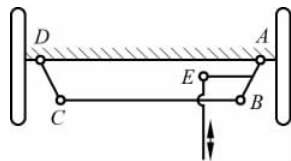


图 3.15 汽车前轮转向机构

3.2.2 铰链四杆机构的演化

通过改变机构中运动副的形状及尺寸、改变构件的形状及尺寸、选不同构件为机架等方法,可以得到铰链四杆机构的其他演化机构。

1. 曲柄滑块机构

图 3.16 所示为曲柄滑块机构的演化过程。图 3.16(a)为曲柄摇杆机构,摇杆上转动副 C 点的运动轨迹是以 D 为圆心,以 CD 为半径的圆弧;将曲柄摇杆机构中 C 点处的转动副转换成沿弧形导槽运动的圆弧移动副,摇杆 CD 演变成滑块,如图 3.16(b)所示;若使图 3.16(b)中的圆弧移动副半径 CD 趋于无穷大,则图 3.16(b)所示曲柄滑块机构的圆弧移动副演变成图 3.16(c)中的直线移动副,此时机构演化为曲柄滑块机构。

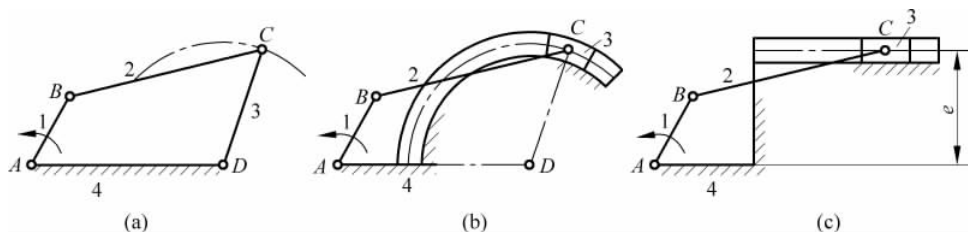


图 3.16 曲柄滑块机构的演化过程

曲柄滑块机构中滑块 C 点的运动轨迹称为导路, C 点在两个极限位置之间的距离称为行程,用 H 表示。滑块移动的导路到曲柄回转中心之间的距离 e 称为偏距。如果 e 等于零,则为对心曲柄滑块机构,如图 3.17(a)所示;如果 e 不为零,称为偏置曲柄滑块机构,如

图 3.17(b)所示。曲柄滑块机构在活塞式内燃机、冲床、空气压缩机等中得到了广泛的应用。内燃机应用曲柄滑块机构将活塞 4(相当于滑块)的往复直线运动转换为曲轴 2(相当于曲柄)的旋转运动,如图 3.18 所示。滚轮送料机构中的送料机构应用曲柄滑块机构将曲轴 1(相当于曲柄)的旋转运动转换为推头 3(相当于滑块)的往复直线运动,如图 3.19 所示。

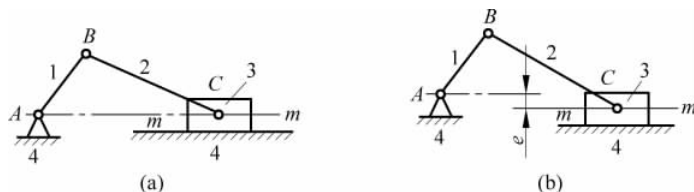


图 3.17 曲柄滑块机构

(a) 对心曲柄滑块机构; (b) 偏置曲柄滑块机构

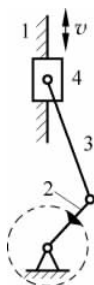


图 3.18 内燃机曲柄滑块机构

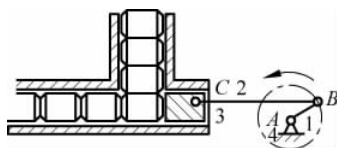


图 3.19 滚轮送料机构

在图 3.17(a)所示的曲柄滑块机构中,由于铰链 B 相对于铰链 C 运动的轨迹为 $\beta-\beta$ 圆弧,如图 3.20(a)所示,所以将连杆 2 做成滑块形式,并使之沿滑块 3 上的圆弧导轨 $\beta-\beta$ 运动,如图 3.20(b)所示,显然其运动性质并未发生改变,但是此时已演化成为一种具有两个滑块的四杆机构,即双滑块机构。将图 3.17(a)所示曲柄滑块机构中的连杆 2 的长度增至无穷长,则圆弧导轨 $\beta-\beta$ 将成为直线,于是该机构将演化成为图 3.20(c)所示的正弦机构。对正弦机构取不同的构件做机架,可得正切机构、双转块机构以及双滑块机构等,如图 3.21 所示。

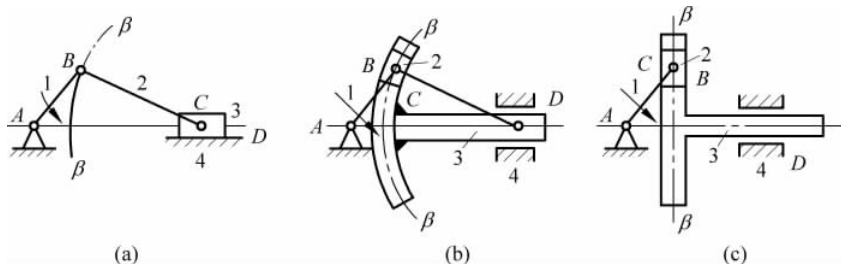


图 3.20 曲柄滑块机构演化

2. 导杆机构

导杆机构可看成是改变曲柄滑块机构中的固定构件而演化来的。图 3.22(a)为曲柄滑块机构,若选构件 1 为机架,如图 3.22(b)所示,各构件的形状和相对运动关系都未改变,当

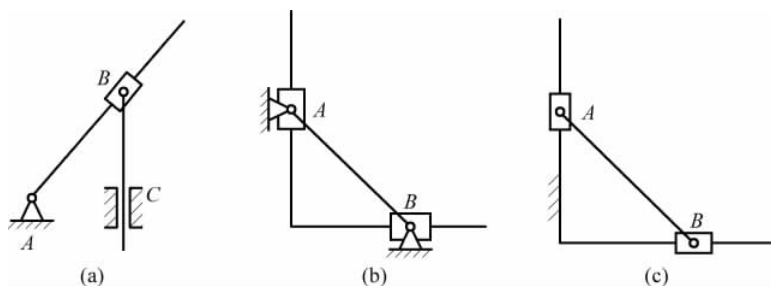


图 3.21 滑块机构

(a) 正切机构; (b) 双转块机构; (c) 双滑块机构

构件 2 为原动件时, 滑块 3 将在可转动(或摆动)的构件 4 上作相对移动, 构件 4 称为导杆, 此机构称为导杆机构。

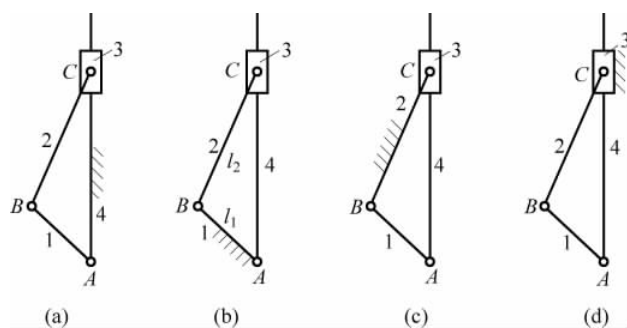


图 3.22 变换机架的曲柄滑块机构演化

(a) 曲柄滑块机构; (b) 转动导杆机构; (c) 摇块机构; (d) 定块机构

当 $l_1 < l_2$ 时, 如图 3.22(b) 所示, 两连架杆 2 和 4 均可整周回转, 称为曲柄转动导杆机构, 或转动导杆机构。图 3.23 所示的插床插刀机构, 就是转动导杆机构的应用实例, 曲柄 2 作整周连续转动, 通过转动导杆 4 和构件 5, 驱动切削头 6 上固定的插刀, 完成往复切削运动。

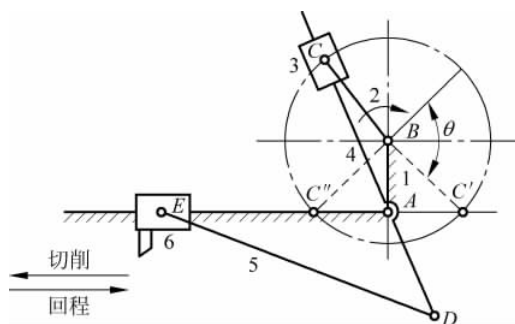


图 3.23 插床插刀转动导杆机构

当 $l_1 > l_2$ 时, 如图 3.24 所示, 连架杆 2 可整周回转, 连架杆 4 只能往复摆动, 称为曲柄摆动导杆机构, 或摆动导杆机构。图 3.25 所示的刨床驱动刨刀往复移动的机构, 就是摆动导杆机构的应用实例, 曲柄 2 作整周连续转动, 通过摆动导杆 4 和构件 5, 驱动滑枕 6 上固定的刨刀, 完成往复切削运动。

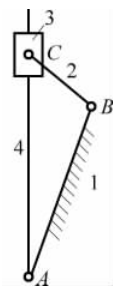


图 3.24 摆动导杆机构

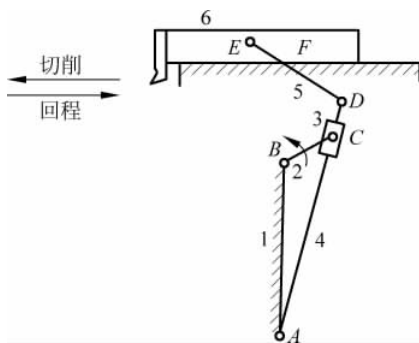


图 3.25 刨床刨刀摆动导杆机构

3. 摇块机构和定块机构

在图 3.22(a)所示曲柄滑块机构中,若选构件 2 为机架,滑块 3 仅能绕机架上的铰链 C 作摆动,即可得摆动滑块机构,或称摇块机构,如图 3.22(c)所示。这种机构广泛应用于摆动缸式液压驱动装置中,如图 3.26 所示的卡车车厢自动翻转卸料机构,当油缸 3(摇块)中的压力油推动活塞杆 4 运动时,车厢 1 将绕回转中心 B 翻转,达到某一角度时物料倾倒。

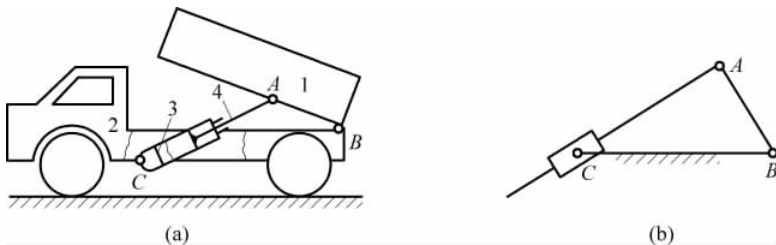


图 3.26 自卸卡车厢的翻斗机构

在图 3.22(a)所示曲柄滑块机构中,若取滑块 3 为机架,即可得图 3.22(d)所示的固定滑块机构,或称定块机构。这种机构常用于抽水唧筒和抽油泵中,图 3.27 所示为抽水唧筒的定块机构。

4. 偏心轮机构

图 3.28(a)所示为曲柄滑块机构,当曲柄 AB 的实际尺寸很短、曲柄销需要传递较大动力而承受较大冲击载荷时,由于结构需要,通常将运动副 B 的半径扩大,直至超过曲柄 AB 的长度,得到如图 3.28(b)所示的机构。此时,曲柄 1 变成了一个几何中心为 B、回转中心为 A 的偏心圆盘,回转中心至几何中心的偏心距即为原曲柄的长度,这种机构称为偏心轮机构。该机构与原曲柄滑块机构的运动特性相同,其机构运动简图也完全一样。偏心轮机构广泛应用于传力较大的冲床、剪床、锻压设备和柱塞泵中。

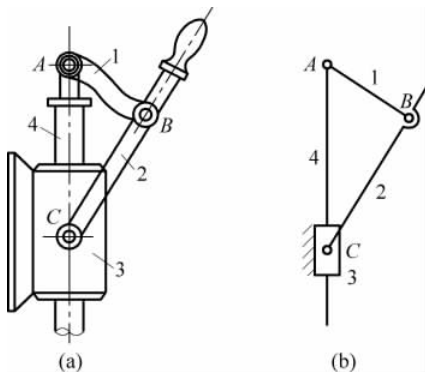


图 3.27 抽水唧筒定块机构

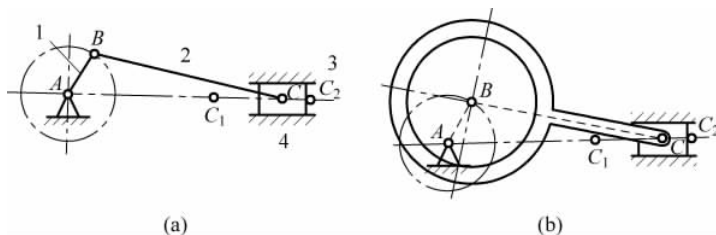


图 3.28 偏心轮机构

3.3 平面四杆机构的基本特性

由于铰链四杆机构是平面四杆机构的最基本形式,其他的四杆机构可认为是由它演化而来。所以本节着重研究铰链四杆机构的基本特性,其结论可应用到其他形式的四杆机构中。

3.3.1 铰链四杆机构存在曲柄的条件

1. 铰链四杆机构存在曲柄的条件

铰链四杆机构中有曲柄的前提是其运动副中必有整转副存在,下面以图 3.29 所示的曲柄摇杆机构为例进行研究。

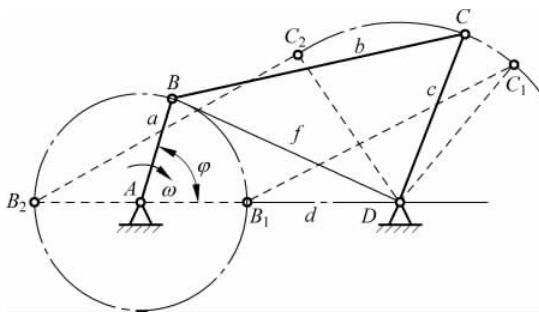


图 3.29 铰链四杆机构有曲柄的条件

在图 3.29 所示的机构中,设曲柄摇杆机构各杆的杆长分别为 a 、 b 、 c 、 d , 设 $d > a$, 在杆 AB 绕转动副 A 转动过程中,要使 A 成为整转副,则曲柄 AB 应能占据与机架 AD 重叠和拉直共线的两个特殊位置 AB_1 和 AB_2 ,即可构成 $\triangle B_1C_1D$ 和 $\triangle B_2C_2D$ 。根据三角形构成原理可推出以下各式。

由 $\triangle B_2C_2D$, 可得

$$a + d \leqslant b + c \quad (3-1)$$

由 $\triangle B_1C_1D$, 可得

$$b - c \leqslant d - a$$

$$c - b \leqslant d - a$$

整理得

$$a + b \leqslant c + d \quad (3-2)$$

$$a + c \leq b + d \quad (3-3)$$

把式(3-1)、式(3-2)、式(3-3)三式两两相加,得

$$\begin{cases} a \leq c \\ a \leq b \\ a \leq d \end{cases} \quad (3-4)$$

若 $d < a$, 用同样的方法可以得到构件 1 能绕铰链 A 作整周转动的条件为

$$d + a \leq b + c \quad (3-5)$$

$$d + b \leq a + c \quad (3-6)$$

$$d + c \leq a + b \quad (3-7)$$

有

$$\begin{cases} d \leq c \\ d \leq b \\ d \leq a \end{cases} \quad (3-8)$$

综合分析上述各式即可得到, 铰链四杆机构存在曲柄的几何条件为:

- (1) 最短杆与最长杆的长度之和小于或等于其他两杆长度之和(此条件称为杆长条件);
- (2) 最短杆是连架杆或机架。

2. 铰链四杆机构的类型判断

根据铰链四杆机构存在曲柄的几何条件, 可得出以下推论:

(1) 当最短杆与最长杆的长度之和大于其他两杆长度之和时, 所有运动副均为摆动副, 此时的四杆机构取任何一杆为机架, 均为双摇杆机构;

(2) 当最短杆与最长杆的长度之和小于等于其他两杆长度之和时, 最短杆上两个转动副均为整转副, 有三种情况:

- ① 取最短杆为机架, 得到双曲柄机构;
- ② 取最短杆任一相邻杆为机架, 得到曲柄摇杆机构;
- ③ 取最短杆对杆为机架, 得到双摇杆机构。

3. 曲柄滑块机构和摆动导杆机构的曲柄存在条件

对于如图 3.30 所示的偏置曲柄滑块机构, 连架杆 AB 绕铰链 A 转动, 若铰链 B 能够到达两个固定铰链(铰链 A 和垂直于导路无穷远处的铰链)连线的 B_1 点和 B_2 点位置, 如图 3.31 所示, 则连架杆 AB 就可以整周转动, 即为曲柄。

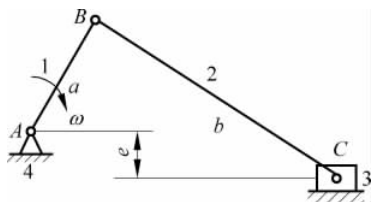


图 3.30 偏置曲柄滑块机构

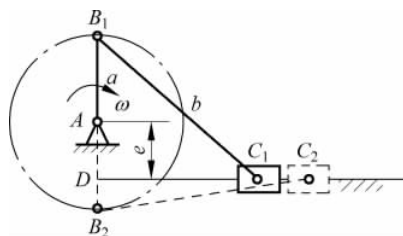


图 3.31 曲柄滑块机构曲柄存在条件

当铰链 B 处于 B_1 点位置时, 机构中存在一个 $\triangle DB_1C_1$ 。由三角形的构成原理得

$$b \geq a + e \quad (3-9)$$