

第 1 篇 机构的组成和机械设计概论

本篇叙述平面机构的结构和运动简图,分析机械设计的功能原理、约束条件和结构准则,介绍计算机辅助设计、优化设计和创新设计等现代设计法的基础知识,为深入学习机械的工作原理、结构和设计计算方法奠定基础。



第 1 章 机构的组成和运动简图

1.1 课程概论

1.1.1 机械设计的发展概述

机械设计是人类在长期的生产实践中一项重要的创造活动,机械化是社会生产力发展水平的重要标志。在古代人类使用杠杆、楔、滚子、绳轮和凸轮等简单工具,后来逐渐发明了指南针、候风地动仪、纺织机和蒸汽机等许多机械。经过 18 世纪的工业革命,以及当今世界以知识经济为特征的产业革命的推动,人类又发明了电子计算机、数控机床、人造卫星和火星探测器等高新技术产品。与传统的机械相比,现代机械产品在工作原理、结构、性能和设计方法上,都发生了深刻的变化,其显著特征是以计算机技术为支撑的信息处理、控制手段和设计方法在机械设计中获得了广泛的应用。

机械产品从需求到满足,要经过设计、制造、销售、售后服务和改进设计等许多环节,其中设计是最基本的环节。机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、系统组成、运动和力的特性、零部件的材料和结构尺寸、装配和润滑等众多相关因素,在理论、技术、工艺和计算手段等各种限定的条件之下,进行分析、计算、构思、评价和决策,获得满足技术经济指标的设计方案,从而为机械制造提供依据。企业就是依据产品设计过程中所确定的结构参数、材料、制造工艺、精度和技术条件,并且根据企业的现有资源来组织生产的。

机械产品设计的经济意义在于:一方面,它的质量、性能和成本在很大程度上取决于设计阶段的工作。据统计,产品制造成本的三分之一以上是由设计阶段决定的。另一方面,在产品设计阶段的某些错误,会造成产品的制造成本和运行成本的显著增加。

根据机械的功用不同,可以将它们分为作能量变换的动力机械(如内燃机、电动机、发电机、压气机和涡轮机等)、完成机械功的工作机械(如金属切削机床、飞机、汽车、包装机、起重机、运输机和机械手等)、作信息传递和变换的信息机械(如打印机、绘图机、复印机、照相机和放映机等)三类。

从机械系统的整体来看,根据产业技术的不同,形成了不同的产业机械设计分支学科,如汽车设计、飞机设计、船舶设计、机车设计、内燃机设计、农业机械设计、纺织机械设计和信息机械设计等。但是,这些专业机械设计中有许多是共性技术,如机械整体方案的拟定,机构的运动分析和综合,零部件的动力性能和承载能力计算,以及它们的材料、结构、润滑、密封、工艺性和标准化的确定等,都是机械设计的基础内容。

由于现代产品对自身的功能、可靠性、效益等提出了更为严格的要求,因此,随着新兴技术对机械产品的渗透和应用,现代机械产品正在朝着机械—电子—信息一体化技术的方向发展。

随着现代科学技术和应用数学的飞跃发展,许多新的设计思想、方法和手段,如设计方法学、计算机辅助设计、优化设计、有限元、可靠性设计、反求工程等,促进了机械设计的革新和发展。

机械设计的水平与整个工业的发展水平是相互制约和相互影响的,没有高水平的机械设计和机械制造技术,就没有高水平的机械工业和相关工业。同样,没有先进的电子工业、微电子工业和材料工业等,新的材料技术、能源技术、信息技术和体现这些技术群体的现代设计法,就不可能在机械设计中得到应用。

1.1.2 本课程的内容、基本要求和学习特点

机械设计基础是机械设计制造类专业的主干课程,是学生必备的专业技术基础知识。机械设计基础是以一般机械中的常用机构和通用零件为研究对象,分析它们的工作原理、运动特性、结构形式,以及设计和计算方法。本课程的基本任务是:使学生掌握常用机构和通用机械零件的工作原理、结构特点、应用场合、技术规范、选用和设计等基本知识 with 基本理论;掌握相应的计算、使用技术资料、计算机辅助设计和绘图等基本技能;初步具有设计通用机械零件和简单机械传动装置,分析生产实际中常用机构的工作特性、通用机械零件的失效以及结构方面问题的能力,为学习后续专业课程、进行技能实训和学习新的科学技术中有关机械的内容打下基础。通过该课程的教学,学生可以掌握常用机构和通用零件的工作原理、结构特点和基本设计计算方法,具有正确运用技术资料设计机械传动装置的能力。同时,能够适当了解现代设计法在有关方面的应用,以体现高等职业技术教育注重使学生有比较强的计算机应用能力,适应以计算机技术的广泛应用为突出特点的现代技术集成化,从而带来知识集成化的趋势。

机械设计基础课程要强调适当综合化和适当实施化。本书按照课程内容本身的内在联系和模块教学要求,分成“机构的组成和机械设计概论”、“常用机构”、“机械传动”、“轴系零部件”以及“机械联接”5个部分。在教学内容上,将课程中以理论教学为主的内容,转变为以实践教学为主的内容;在教学安排上,将课程中以理论体系传授为主的教学,转变为以专业运作能力训练为主的教学。学生应当具有“必需、够用”和相对宽而浅的知识结构,能够依托专业基本理论和实践技能,具备向相关专业渗透和连接的实践能力,表现在掌握丰富的与相关专业的“接口”能力上。

1.2 平面机构的组成和运动简图

机器一般包括原动、执行、传动和控制等几部分。机器是由各种各样的机构所组成的机械系统,机构在机械系统中起着运动传递和运动形式转换的作用。无论是分析一个现有的机构,还是设计一个新的机构,都需要判断一个机构的运动与哪些因素有关,以及它是否具有确定的相对运动,这就是对机构进行结构分析的基本任务。

1.2.1 机构的组成

1. 构件和零件

机构是由构件组成的,构件在机构中具有独立运动的特性,它是机构的运动单元。若干构件通过彼此之间既具有一定约束又具有一定相对运动的联接,组成了机构。

为了结构和工艺的需要,构件可以由若干个零件刚性联接成一个整体,也可以是独立运动的零件。零件是机器中基本的制造单元。

例如,图 1-1(a)所示的内燃机曲柄滑块机构中包含有活塞(滑块)、连杆、曲轴(曲柄)和汽缸等构件,原动件活塞 3 的直线往复移动,通过连杆 2 带动曲轴 1 作连续转动。其中,连杆构件是由连杆体 5、连杆盖 7、螺栓 6 和螺母 8 等零件刚性联接所组成的,如图 1-1(b)所示。

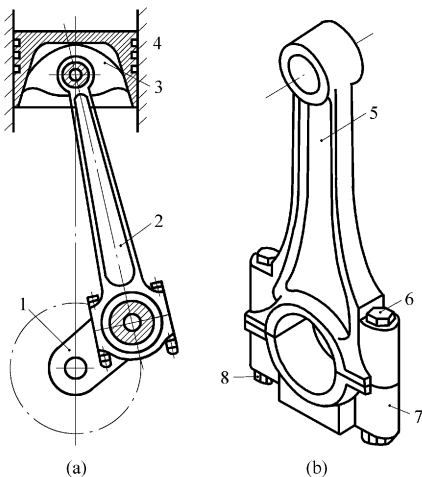


图 1-1 内燃机中的曲柄滑块机构和连杆

(a) 曲柄滑块机构; (b) 连杆 2 的组成

1—曲轴; 2—连杆; 3—活塞; 4—机架; 5—连杆体; 6—螺栓; 7—连杆盖; 8—螺母

在组成机构的所有构件之中,必须以一个相对固定的构件作为支持和安装其他活动构件的机架(如图 1-1 中的汽缸 4)。一般取机架作为研究机构运动的静参考系。在活动构件中,输入已知运动规律的构件称为原动件,其他的活动构件组成从动件系统。

需要指出,随着现代科技发展,构件的概念不再局限于刚体,在某些情况下气体和液体也参与实现预期的机械运动。

2. 运动副

在机构中,两个构件之间既具有一定约束又具有一定相对运动的联接称为运动副。机构各个构件之间的运动和力的传递,都是通过运动副来进行的。

两个构件构成运动副的接触元素——点、线和面,称为运动副元素。凡是通过面接触而构成的运动副称为低副,根据组成平面低副的两个构件之间相对运动的性质,低副又可分为转动副(图 1-2(a))和移动副(图 1-2(b))。凡是通过点或线接触而构成的运动副称为高副(图 1-2(c)与(d))。

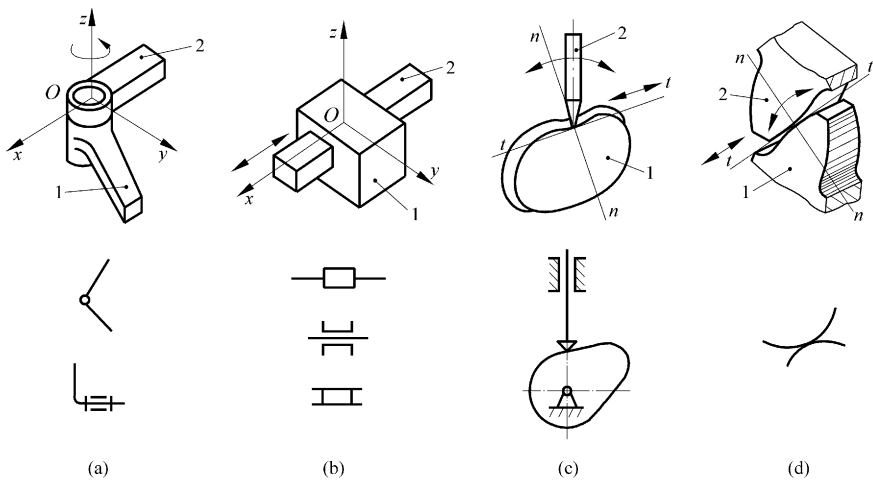


图 1-2 平面运动副示例

转动副的常见结构如图 1-3(b)和(c),移动副的常见结构如图 1-4(b),(c)和(d)所示。

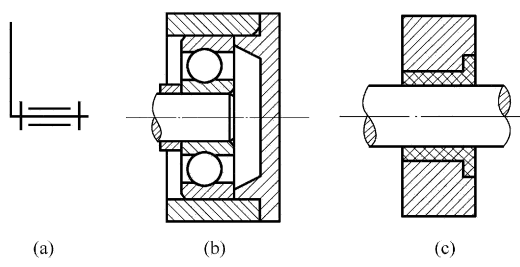


图 1-3 转动副的符号和常见结构

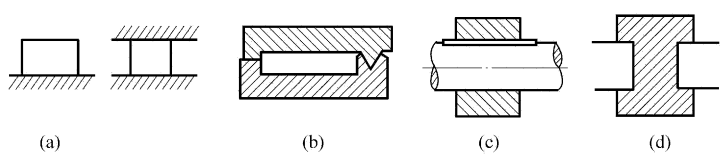


图 1-4 移动副的符号和常见结构

根据组成运动副的两个构件之间作相对平面运动或空间运动,可以将运动副分为平

面运动副和空间运动副两类。图 1-5(a)所示的由圆球和球窝组成的球面副,图 1-5(b)所示的由带销圆球和带槽球窝组成的球销副,图 1-5(c)所示的由螺杆和螺母组成的螺旋副等,都是空间运动副。

机构运动简图中部分常用机构运动简图的符号见表 1-1。

表 1-1 部分常用机构运动简图符号(摘自 GB 4460—1984)

名称		代表符号	名称	代表符号
杆的联接 固定			链传动	
零件与轴的固定			外啮合圆柱齿轮机构	
向心轴承		 滑动轴承		
轴 承	推力轴承	 单向推力 双向推力	内啮合圆柱齿轮机构	
	向心推力轴承	 单向向心推力 双向向心推力		
联轴器		 可移式联轴器 弹性联轴器	齿 条 传 动	
	离合器	 啮合式 摩擦式	圆 轮 机 构	
制动器			蜗 轮 传 动	
在 的电动机				
带 传 动			棘 轮 机 构	 (外啮合)
			槽 轮 机 构	 (外啮合)

3. 自由度与约束

一个构件的空间运动可以分解为沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的移动以及绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的转动,共计 6 个独立运动。

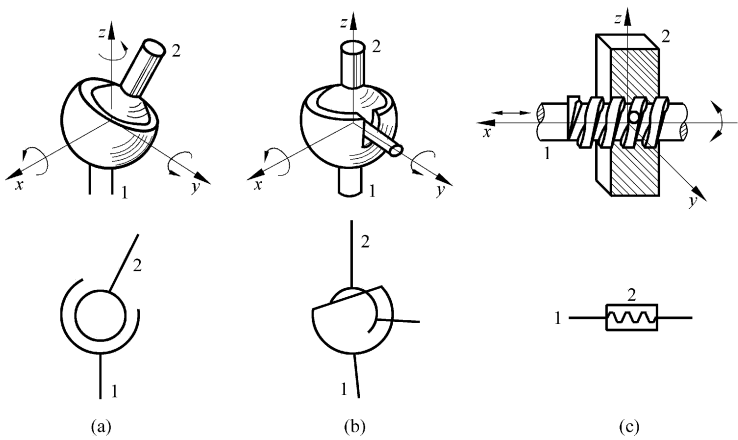


图 1-5 空间运动副及其符号

一个构件的平面运动可以分解为沿 x 轴、 y 轴的移动和绕一根垂直于平面的轴的转动,共计 3 个独立运动。构件在任一时刻的位置,可以由构件上任意一点的坐标 (x, y) 以及过该点的直线与 x 轴的夹角 φ 等 3 个独立参数来描述。例如图 1-6(b) 中构件 2 的图示位置可用其上 A 点坐标 $A(x, y)$ 和它与 x 轴夹角 φ_2 来确定。构件的这种独立运动称为自由度。因此一个不受约束的构件的平面运动有 3 个自由度。

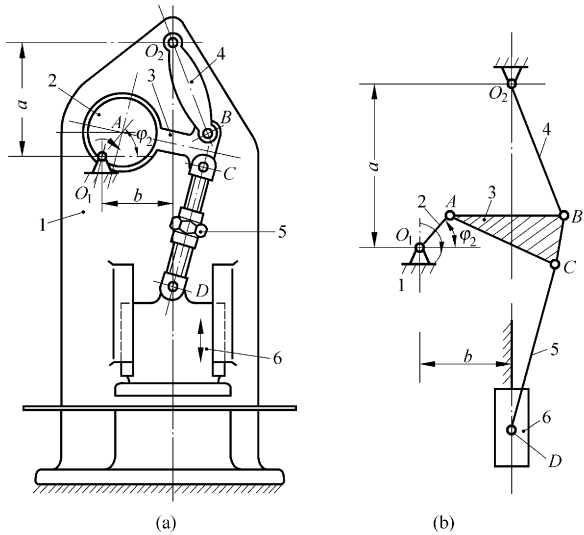


图 1-6 冲床机构及其运动简图

当一个构件与其他构件组成运动副后,构件的某些独立运动就要受到限制,自由度减少,这种对构件独立运动的限制称为约束。两个构件之间相对约束的数目和性质取决于运动副的型式。

两构件组成转动副时(图 1-2(a)),构件 2 沿着 x 轴和 y 轴两个方向的移动受到限制,但是可以绕与 xOy 平面垂直的 z 轴转动。因此,转动副的约束数是 2,相对自由度为 1。

两构件组成移动副时(图 1-2(b)),构件 2 沿着 y 轴方向的移动和绕与 xOy 平面垂直的 z 轴的转动受到限制,但是可以沿着 x 轴方向移动。因此,移动副的约束数是 2,相对自由度为 1。

两构件组成平面高副时(图 1-2(c),(d)),构件 2 沿着接触点公法线 $n-n$ 方向的移动受到限制,但是可以沿着接触点公切线 $t-t$ 方向移动和绕接触点转动。因此,平面高副的约束数是 1,相对自由度为 2。

顺便指出,对于空间运动副中的球面副(图 1-5(a)),构件 2 沿着 x 轴、 y 轴和 z 轴 3 个方向的移动受到限制,但是可以绕 x 轴、 y 轴和 z 轴转动。因此,它的约束数是 3,相对自由度为 3。球销副与球面副相比,增加了构件 2 绕某轴转动的限制(如图 1-5(b)中的 z 轴),它的约束数是 4,相对自由度为 2。螺旋副中的构件 2 虽然可以沿轴线方向(如图 1-5(c)中的 x 轴)移动和绕该轴转动,但是这两种运动不是相互独立的,它的约束数是 5,相对自由度为 1。

1.2.2 平面机构运动简图

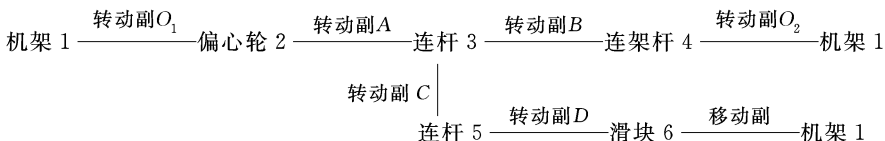
机构中各从动件的运动是由原动件的运动规律及其各运动副的类型、数目和机构的运动学尺寸(如转动副的中心位置、转动副的中心到移动副导路的中心线的距离、移动副导路中心线之间的夹角、高副接触点的位置等)决定的,与构件的外形、截面形状和尺寸、组成构件的零件数目、运动副的具体结构等因素无关。在对机构进行运动和受力分析,或者对机构进行结构分析时,不考虑与机构运动无关的因素,采用规定的运动副符号和代表构件的线条,按照运动学尺寸的比例,画出表示机构运动特性的简单图形,我们称这种图形为机构运动简图,它是对机构进行分析和设计的几何模型。

例 1-1 画出冲床(图 1-6(a))的机构运动简图。

解: (1) 冲床机构的运动分析

当冲床的偏心轮 2 在驱动电机的带动下按顺时针方向等速转动时,通过构件 3、4 和 5 带动冲头 6 作上下往复移动,完成冲压工艺动作。其中,运动规律已知的偏心轮 2 是原动件,机床床身 1 是相对地面静止不动的机架,其余构件 3、4、5 和冲头 6 组成从动件系统。因此,冲床机构有 5 个活动构件(原动件 2 和从动件 3,4,5,6)。

(2) 根据各个构件之间的相对运动性质,确定机构的运动副类型和数目



可见,连杆 3 分别与偏心轮 2、连架杆 4 和连杆 5 构成转动副(中心分别是 A、B 和 C);滑块 6 与连杆 5 构成转动副(中心是 D),与机架 1 构成移动副(导路在过 O_2 点的垂直线上)。冲床机构共含有 6 个转动副和 1 个移动副。

(3) 选择与机构运动平面相平行的平面,作为绘制机构运动简图的视图平面。

(4) 选择适当的长度比例尺,确定机构的有关运动学尺寸,按照规定的运动副和构件符号,绘制出机构的运动简图(图 1-6(b))。

本例中连杆 3 与偏心轮 2 是用转动副联接的,其转动中心就是偏心轮的几何中心 A。因此,两个构件组成转动副时,在画机构的运动简图时不用考虑转动副圆柱实际直径的大小,只需在它的转动中心处用小圆圈表示即可。

1.2.3 平面机构具有确定运动的条件

1. 平面机构的自由度

机构的自由度是指机构中各个构件相对于机架所具有的独立运动参数的数量,它取决于组成机构的活动构件的数目、运动副的类型和数目。

假设某平面机构由 n 个活动构件、 P_L 个低副和 P_H 个高副所组成,由于 1 个不受约束构件的平面运动有 3 个自由度,1 个低副有 2 个约束,1 个高副有 1 个约束,因此,平面机构自由度的计算公式是

$$F = 3n - 2P_L - P_H$$

(1-1)

该式称为平面机构的结构公式。它表明了一个机构的自由度 F 与该机构所包含的活动构件数 n 以及运动副的类型和数目之间的关系。

例 1-2 试计算图 1-6(b)所示的冲床机构的自由度。

解: 由于 $n=5$ 、 $P_L=7$ 和 $P_H=0$,代入式(1-1)有

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

2. 机构自由度计算中的特殊情况处理

在计算平面机构自由度的时候,有些特殊情况需要进行处理。

(1) 复合铰链

复合铰链是指有 $m(m \geq 2)$ 个构件在同一处构成共轴线的转动副。复合铰链处的转动副数目应为 $m-1$ 。如图 1-7 所示,3 个构件在 C 处构成复合铰链,其转动副的数目为 2。

(2) 局部自由度

局部自由度是指机构中某些构件的局部独立运动,它并不影响其他构件的运动。因此计算机构自由度时不考虑其局部自由度。

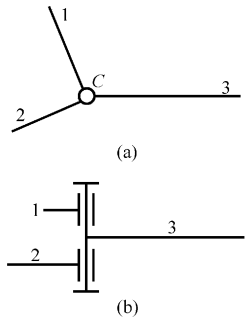


图 1-7 复合铰链

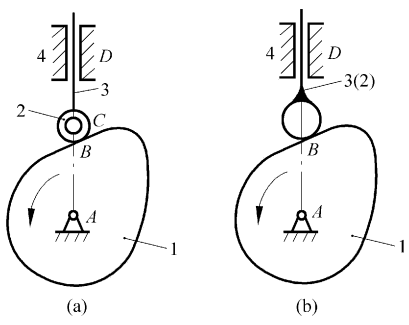


图 1-8 局部自由度

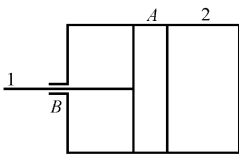
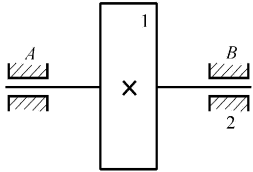
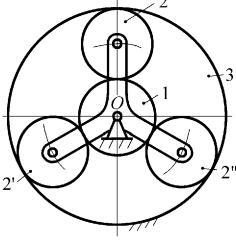
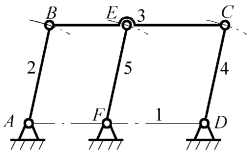
在图 1-8 所示的滚子从动件凸轮机构中,滚子相对于从动件的转动,从机构运动学的角度来看是局部自由度,它并不影响其他构件的运动,因此,计算机构自由度时不予考虑,

处理方法是将滚子 2 与构件 3 固联。但是从实用的角度来看,它却能将从动件与凸轮轮廓之间的滑动摩擦变成滚动摩擦,起到减少凸轮轮廓与从动件之间高副元素摩擦的作用。

(3) 虚约束

虚约束是指在机构运动分析中不产生实际约束效果的重复约束。常见虚约束的识别和处理如表 1-2 所示。

表 1-2 对虚约束的识别和处理

序号	识 别	处 理	图 例
(a)	重复移动副 (两个构件构成 导路平行的多个移动副)	只有 1 个移动副起约束作用,其余的移动副是虚约束	
(b)	重复转动副 (两个构件构成 轴线重合的多个转动副)	只有 1 个转动副起约束作用,其余的转动副是虚约束	
(c)	重复结构 (机构中不起独立传递运动的 结构相同的对称部分)	只有 1 个构件参与运动的传递,其余的对称结构不计(如图(c)中行星轮 2' 与 2'')	
(d)	重复轨迹 (机构中某构件 联接点的轨迹 与另一构件被 联接点的轨迹 重合)	除去重复的构件及其引入的运动副(如图(d)中构件 5 及转动副 E 与 F)	

应当指出,虚约束是在特定的几何条件下形成的,它的存在虽然对机构的运动没有影响,但是它可以改善机构的受力状况,增强机构工作的稳定性。如果这些特定的几何条件不能满足,则虚约束将会变成实际约束,使机构不能运动。因此,在采用虚约束的机构中,对它的制造和装配精度都有严格的要求。

3. 机构具有确定运动的条件

根据平面机构的结构公式,机构自由度大于零是机构能够相对于机架运动的首要条件。

图 1-9 所示铰链四杆机构的自由度 $F=3n-2P_L-P_H=3\times3-2\times4-0=1$,因此,机构相对于机架的独立运动数目为 1。构件 1 与机架用转动副联接,相对于机架的独立运动数目为 1,可以用运动参数 φ_1 表示。假设给它输入一个独立运动参数 φ_1 的值,则从动件 2 和 3 都有确定的对应位置 φ_2 和 φ_3 。

图 1-10 所示铰链五杆机构的自由度 $F=3n-2P_L-P_H=3\times4-2\times5-0=2$, 因此, 机构相对于机架的独立运动数目为 2。假设给构件 1 输入一个独立运动参数 φ_1 的值, 从动件 2、3 和 4 没有确定的对应位置(可能是图 1-10 中的实线位置、双点划线位置或其他位置); 假设分别给构件 1 和 4 输入一组独立运动参数 φ_1 和 φ_4 的值, 这时从动件 2 和 3 就有确定的对应位置 φ_2 和 φ_3 。

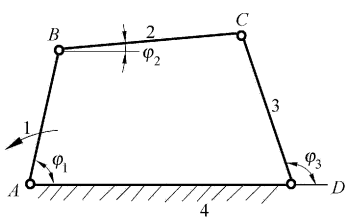


图 1-9 铰链四杆机构

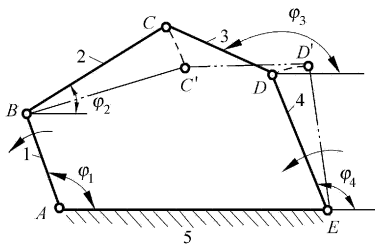


图 1-10 铰链五杆机构

由于平面机构的原动件通常都是用低副与机架联接, 它们相对于机架的独立运动数目为 1, 每个原动件只能有一个独立运动(例如, 电动机的转子有一个独立转动, 内燃机的活塞有一个独立移动等, 将它们作为原动机给机构的原动件输入运动)。因此, 机构自由度的数目标志着所需要的原动件的数目, 即输入独立运动的数目。当输入机构的独立运动数目小于机构自由度时, 机构的运动状态是不确定的; 当输入机构的独立运动数目等于机构自由度时, 机构有确定的运动状态; 当输入机构的独立运动的数目大于机构的自由度时, 机构将会卡死或损坏。平面机构具有确定运动的条件可以表述为: 机构自由度大于零, 且原动件数目等于机构自由度。

根据平面机构的结构公式, 可以通过计算机构自由度与实际机构的原动件数是否相符, 判断其运动的确定性和所绘制机构运动简图的正确性; 也可以判定机构运动设计方案是否合理, 并对运动不确定的运动设计方案进行改进, 使其具有确定的相对运动。

例 1-3 试计算图 1-11 所示的筛料机构的自由度, 并判断从动件是否具有确定的运动。构件 1 和 6 为原动件。

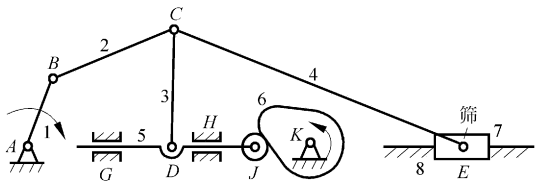


图 1-11 筛料机构运动简图

解: 机构在 C 处有 3 根杆件组成复合铰链, 该处有 2 个转动副。
构件 5 与机架 8 构成导路平行的两个移动副 G 和 H, 其中一个为虚约束。
构件 5 的右端 J 处安装了滚子, 滚子与构件 5 之间的独立运动是局部自由度。因此, 计算机构自由度时不计滚子及其转动副 J, 即将滚子与构件 5 视为固定联接。
因此, 该机构有 7 个活动构件、7 个转动副、2 个移动副、1 个高副, 则 $n=7, P_L=7+2$