

机构的组成和结构分析

1.1 基本要求

(1) 熟练掌握机构运动简图的绘制方法。能够将实际机构或机构的结构图绘制成机构运动简图;能看懂各种复杂机构的机构运动简图;能用机构运动简图表达自己的设计构思。

(2) 掌握运动链成为机构的条件,能对构思的简单设计方案进行分析,判断其能否实现预期功能。

(3) 熟练掌握机构自由度的计算方法。能自如地运用自由度计算公式计算平面机构的自由度。能准确识别出机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束,并作出正确处理。

(4) 掌握机构的组成原理和结构分析的方法。了解高副低代的方法;会判断杆组、杆组的级别和机构的级别;学会根据机构组成原理,用基本杆组、原动件和机架创新构思新机构的方法;学会将Ⅱ级、Ⅲ级机构分解为机架、原动件和若干基本杆组的方法。

1.2 重点、难点提示与辅导

本章是进入整个机械系统设计的开篇。它不仅为学习各类机构的运动设计和动力设计打下必要的基础,也为机械系统方案设计和新机构的创新设计提供一条途径。

机构运动简图的绘制、运动链成为机构的条件和机构的组成原理是本章学习的重点。

1. 基本概念

根据本章的知识要点提出以下基本概念,为了便于掌握,将相关概念成组列出。读者应通过比较,掌握各概念的定义、特点以及与相关概念间的不同点和相互间的联系。

(1) $\left\{ \begin{array}{l} \text{零 件} \\ \text{构 件} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{原(主)动件} \\ \text{从 动 件} \\ \text{机 架} \end{array} \right.$

(2) $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由度} \\ \text{约 束} \end{array} \right.$

(3) $\left\{ \begin{array}{l} \text{运 动 副} \\ \text{运动副元素} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{空间运动副} \\ \text{平面运动副} \end{array} \right.$

(4) $\left\{ \begin{array}{l} \text{杆 组} \\ \text{运动链} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{闭(式)链} \\ \text{开(式)链} \end{array} \right.$

- | | | | |
|-------|----------------------------|-------|----------------------|
| (5) { | 机构运动简图
机构示意图
机械系统示意图 | (6) { | 复合铰链
局部自由度
虚约束 |
| (7) { | 运动副的级别
杆组的级别
机构的级别 | (8) { | 机构组成原理
机构结构分析 |
| (9) { | 机构
机器
机械 | | |

这里需要特别强调构件与零件的区别。零件是加工制造的单元,而构件是作为一个整体参与运动的单元。一个构件可能是一个零件,也可以是若干个零件的刚性组合。机械原理以构件作为研究对象,将构件视为刚体,且往往不考虑构件本身的材料、形状和截面尺寸,这一点与理论力学课程相似。初学者往往由于区分不清构件与零件的区别,而在绘制机构运动简图和计算自由度时出错,因此要特别注意。

初学者容易出错的另一个问题是对运动副概念的理解。两个构件直接接触而形成的一种可动联接称为运动副。这一定义包含有三层含义:其一,两个构件——所谓“副”是“成对”的意思,只有两个构件才能构成一个运动副,一个构件不存在运动副,两个以上的构件则构成多个运动副(例如复合铰链);其二,直接接触——两个构件只有通过直接接触才能成“副”,由于直接接触,使构件的某些独立运动受到约束,两构件间相对的运动自由度便随之减少,一旦脱离接触,约束即不复存在,则它们所构成的运动副亦随之消失;其三,可动联接——直接接触的两个构件之间要能产生一定形式的相对运动,形成可动联接,才能叫做运动副,若两个构件之间形成的是不能产生相对运动的“死”联接,则二者将合成为一个构件,它们之间也就不存在运动副。初学者在计算运动链自由度时可能出现的错误中,大多与对运动副的上述三层含义理解得不透彻有关。建议读者通过具体实例,逐步加深对运动副概念的理解。

2. 机构运动简图的绘制

机构运动简图是一种用简单的线条和符号来表示的工程图形语言,也是设计者交流设计思想所需要的一种工具。它既要简洁,又要在讨论和评价设计方案时能正确表达设计思想;在计算自由度时,不至于数错构件数和运动副数;在作运动分析和力分析时,能保证计算无误。故运动简图应能正确表达出机构以哪些构件组成和构件间以什么运动副相联接以及各运动副之间的尺寸等,即表达出机构的组成形式,显示出设计方案。

由于机构运动简图是用来进行原理方案设计和分析的而不是用于结构设计和加工制造的,所以不可用机械的零部件图和总装图来代替。

1) 绘制运动副时应注意的事项

(1) 绘制转动副时,转动副的位置是关键:代表转动副小圆的圆心必须与回转中心重合;两个转动副中心连线的长度一定要精确。偏心轮和圆弧形滑块是转动副的特殊形式。它们的绘制是易错点。绘制时关键是要找出相对转动中心,具体可见 1.3 节的典型例题分析中的例 1.1。

(2) 绘制移动副时,导路的方向和位置是关键。必须注意:代表移动副的滑块,其导路的方向必须与相对移动的方向一致;导路间的夹角要精确,并要标注(如图 1.1);转动副到移动副导路间的距离要精确,若某一构件分别以转动副和移动副与另两个构件相联接,且转动副的回转中心不在移动副的导路上,则应标出转动副到导路的距离,即偏心距 e (如图 1.2)。

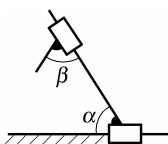


图 1.1 导路间夹角的表示方法

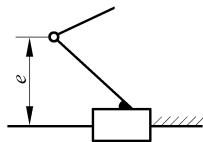


图 1.2 偏心距的表示方法

2) 绘制构件时应注意的事项

(1) 任意形状的构件,当它只以两个转动副与其他构件相联接,且外形轮廓也不以高副与其他构件相接触时,简图中只需以两个转动副几何中心的连线代表此构件。

(2) 尽量减少构件前后重叠时虚线可能引起的误会。例如,有时可变通地把小齿轮或外形小的凸轮、棘轮等移至大齿轮的前面,即画成实线,这在机械制图中是绝对不允许的,但在绘制运动简图时,只要不影响表达机构的组成和运动特性,这种变通是允许的。

(3) 当同一轴上安装若干零件时,必须明确表明哪些零件为同一构件。当不便以焊接符号表示时,还可用构件编号来表达,即不同构件标不同编号,同一构件中的不同零件(例如固结于同一轴上的大、小齿轮或齿轮与凸轮)则标以同样的构件编号,并在编号右上角加上不同的撇号以示区别,如 $3, 3', 3''$ 。

3) 绘制机构运动简图时应注意的事项

(1) 机构运动简图、机构示意图和机械系统示意图的区别

当设计者只是为了表达机构的组成,讨论初步的设计构思,表达机构的动作原理而不需精确进行运动学、动力学计算时,可不必严格地按比例绘制运动副的精确位置和构件的准确尺寸,只需绘制机构示意图。在正式提交设计方案或要作定量的运动分析和动力分析时,则必须严格按照比例绘制机构运动简图。这两种图形一般只绘制某一个或几个执行机构、传动机构或驱动机构。当需要包含从原动机开始的整个传动系统、执行系统时,则需要绘制机械系统示意图,其绘制方法与机构示意图相同。一些非常用机构的简图符号,可查阅国标 GB 4460—1984。

(2) 机构运动简图绘制的步骤

机构运动简图的绘制是本章的一个重点,也是一个难点。初学者一般可按下列步骤进行。

① 分析机械的实际工作情况,确定原动件(驱动力作用的构件)、机架、从动件系统(包括执行系统和传动系统)及其最后的执行构件。

② 分析机械的运动情况,从原动件开始,循着运动传递路线,分析各构件间的相对运动性质,确定构件的总数、运动副的种类和数目。

③ 合理选择投影面。选择多数构件的运动平面或平行于运动平面的平面作投影面。必要时可选择辅助投影面或局部简图:将主投影面上无法表达的部分在辅助投影面上表达,

然后展开到主投影面的同一平面上;而将主投影面简图上难以表达清楚的部分,另绘局部简图。

④ 测量构件尺寸,选择适当比例尺,定出各运动副之间的相对位置,用表达构件和运动副的简单符号绘出机构运动简图。在机架上加上阴影线,在原动件上标上箭头,按传动路线给各构件依次标上构件号 1,2,3,... 将各运动副标上字母 A,B,C,...

⑤ 为保证机构运动简图与实际机械有完全相同的结构和运动特性,对绘制好的简图需进一步检查与核对:简图上的构件数目与原机构的构件数是否相等;简图上的构件间的联接形式,即运动副及其数目和相对位置与原机构是否一致,简图上原动件和固定件与原机构是否一致;根据简图计算自由度,看其与实际机构的原动件数目是否相等。

(3) 绘制和使用机构运动简图时需要注意的问题

① 熟记常用运动副的符号和表示方法。机构运动简图与工程图纸(装配图)不同,切记不要把机械制图的一些画法照搬到机构运动简图中来。

② 在机构运动简图中,主要标出各运动副的位置及与运动有关的尺寸,运动副之间的连线即表示构件,一般不考虑构件本身的形状和截面尺寸。

③ 掌握比例尺的应用。在机构运动简图中,以及在后面有关章节中,当用图解法对机构进行运动分析和力分析时,正确地选择和应用比例尺非常重要。本课程中所用的比例尺,与机械制图中的“比例”不尽相同,初学者往往容易搞混,需要特别注意。在图纸上用一定长度的线段来表示一个实际的物理量时(如长度、速度、加速度和力),该线段的长度(图示长度)与实际物理量之间存在着下述关系

$$\mu = \frac{\text{实际物理量}}{\text{图示长度}}$$

我们用符号 μ_L 、 μ_v 、 μ_a 和 μ_F 来分别表示长度、速度、加速度和力的比例尺,其单位分别是:

$$\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \left(\text{或} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right), \frac{\text{mm/s}}{\text{mm}} \left(\text{或} \frac{\text{m/s}}{\text{mm}} \right), \frac{\text{mm/s}^2}{\text{mm}} \left(\text{或} \frac{\text{m/s}^2}{\text{mm}} \right) \text{ 和 } \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

图上一定长度的线段只是实际物理量的代表线段,二者之间并不相等。因此,当将一个实际物理量用代表它的线段画到图上去时,必须除以相应的比例尺,即

$$\text{图示长度} = \frac{\text{实际物理量}}{\mu}$$

而根据图示长度求出它所代表的实际物理量时,则必须乘以相应的比例尺,即

$$\text{实际物理量} = \text{图示长度} \times \mu$$

提醒初学者务必熟练掌握上述比例尺的概念及其应用,以免在以后章节的学习中出现不应有的错误。

3. 机构自由度的计算

判断所设计的运动链能否成为机构,是本章的重点。运动链成为机构的条件是:运动链相对于机架的自由度大于零,且原动件数目等于运动链的自由度数。

机构自由度的计算错误会导致对机构运动的可能性和确定性的错误判断,从而影响机械设计工作的正常进行,因此机构自由度计算是本章学习的重点之一。在计算机构自由度时,应注意以下几点。

1) 正确使用机构自由度计算公式

首先要正确判断机构是属于平面机构还是空间机构。

空间机构一般采用公式

$$F = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

来计算自由度,但在计算前一定要判断是否存在公共约束,若存在 q 个公共约束,则自由度计算应使用下式:

$$F = (6 - q)n - \sum_{k=q+1}^5 (k - q)p_k$$

而平面机构一般采用公式

$$F = 3n - 2p_5 - p_4$$

来计算自由度

自由度计算公式选用是否恰当,是自由度计算正确与否的关键。

本章的重点是要求读者熟练掌握平面机构的自由度计算。

2) 搞清构件、运动副、约束的概念

概念清楚才能正确判断活动构件数、运动副的类型和各类运动副的数目。

构件是独立的运动单元体。对于貌似能独立运动,实际上不能作相对运动的所谓“构件”的组合应看作一个构件。例如图 1.3 中 AB, BC, AC, AD, CD 5 杆,其实是桁架结构,应视为一个构件。图 1.4 所示的杆件 3、凸轮 $3'$ 和齿轮 $3''$,固结为一体同轴同速转动,应视为一个构件。

运动副是指两个构件直接接触形成的可动联接。要构成运动副必须满足以下条件:要有两个构件相接触,一个构件构不成运动副,两个以上的构件在一处接触可能构成多个运动副(见图 1.5);两构件要直接接触,否则不可能对构件的某些独立运动产生约束或限制,不能形成运动副;两构件要形成可动联接,若形成不可相对运动的联接,则这种联接称为固结,这两个“构件”实际上为一个构件。

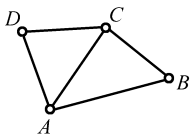


图 1.3 5 个零件组成一个构件

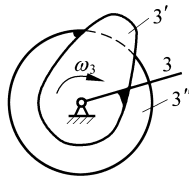


图 1.4 3 个零件组成一个构件

3) 正确识别和处理机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束

准确识别复合铰链、局部自由度和虚约束,并做出正确处理,是自由度计算中的难点,也是初学者容易出现错误的地方。

(1) 复合铰链

复合铰链是指两个以上的构件在同一处以转动副相联接时组成的运动副。准确识别复合铰链的关键是要分辨哪几个构件在同一处形成了转动副。图 1.5 中列举了一些较难辨别的情况。图(a)中杆 1,2 与机架 3 组成两个转动副;图(b)中杆 1,2 与滑块 3 形成两个转动副;图(c)中,杆 1,滑块 2 与机架 3 形成两个转动副;图(d)中,杆 1、滑块 2、滑块 3 形成两个

转动副;图(e)中,杆1、滑块3、齿轮2组成两个转动副;图(f)中,齿轮1、滑块2和机架3组成两个转动副。

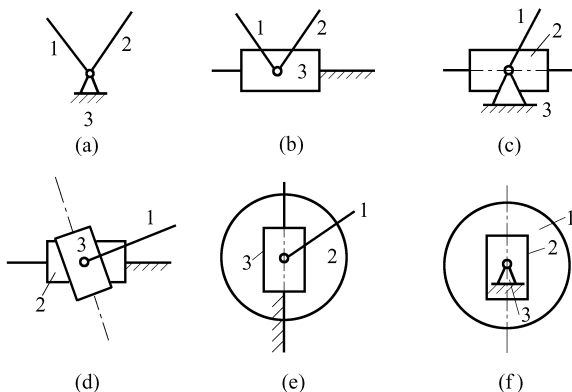


图 1.5 复合铰链示例

复合铰链的正确处理方法是:若有 k 个构件在同一处形成复合铰链,则其转动副的数目应为 $(k-1)$ 个。

(2) 局部自由度

局部自由度是机构中某些构件所具有的自由度,它仅仅局限于该构件本身,而并不影响其他构件的运动。局部自由度常发生在为减小高副元素间摩擦磨损而将滑动摩擦变成滚动摩擦所增加的滚子处。图 1.6 中滚子 3 绕其中心 D 转动的自由度就是局部自由度。若不作任何处理就简单地套用自由度计算公式,则得

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 = 2$$

计算结果比机构的实际自由度大,产生了与事实不符的现象。正确的处理方法是:在计算自由度时,从机构自由度计算公式中将局部自由度减去,即

$$\begin{aligned} F &= 3n - 2p_5 - p_4 - \text{局部自由度数} \\ &= 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 - 1 = 1 \end{aligned}$$

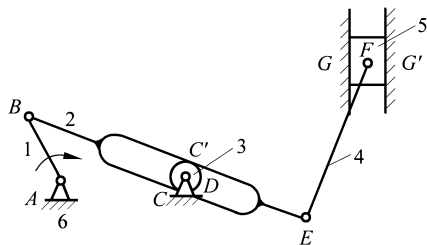


图 1.6 局部自由度的识别

也可以将滚子 3 视为与机架 6 固结为一体,预先将滚子这个构件除去不计,然后再利用公式计算自由度,即

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

(3) 虚约束

虚约束是机构中所存在的不产生实际约束效果的重复约束。在计算自由度时,若对虚约束不加识别和处理,直接套用公式计算,则计算结果将比机构的实际自由度数目少,导致与事实不符的现象。正确的处理方法是:在计算自由度时,首先将引入虚约束的构件及其运动副除去不计,然后用自由度公式进行计算。

虚约束都是在一定的几何条件下出现的。这些几何条件有些是暗含的,如两构件组成若干移动副,但移动副导路互相平行;两构件组成若干转动副,但转动副的轴线互相重合;两构件组成若干平面高副,但各接触点的公法线彼此重合;以及某些不影响机构运动传递的重

复部分等。有些则是明确给定的。对于暗含的几何条件,需通过直观判断来识别虚约束;对于明确给定的几何条件,则需通过严格的几何证明才可识别。

教程中给出了通常发生虚约束的一些场合,并给出了相应的实例,读者可以通过复习和作业熟练掌握。这里再通过几个例子加以说明。

在图 1.6 所示的机构中,滑块 5 和机架 6 虽组成两个移动副 G 和 G' ,但它们的导路互相平行,故其中一个为虚约束,应除去不计;滚子 3 与构件 2 虽组成两个平面高副 C 和 C' ,但它们接触点的公法线彼此重合,故其中一个为虚约束,也应除去不计。即在计算该机构自由度时,移动副 G 和 G' 只算一个,高副 C 和 C' 也只算一个。

图 1.7 所示为精压机的机构运动简图。如果仅从运动的传递来看,只需要右边一套机构(即 $ABCDEF$)就足够了,这时 $n=7$, $p_5=10$, $p_4=0$, $F=3n-2p_5-p_4=1$ 。但是考虑到只有右边一套机构将因滑块悬臂而引起偏载使受力情况恶化,故在实际工作中,在左边加了一套机构 $DHJI$,且使 $DH=DE$, $JH=FE$, $HI=EG$ 。因左边增加的这套机构与右边原有机构完全对称而并不影响滑块的运动,故增加部分引入的约束为虚约束。在计算机构自由度时,应将其除去不计。

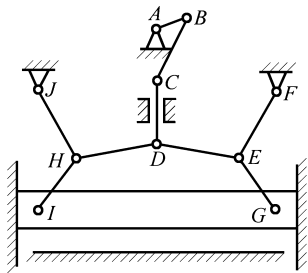


图 1.7 精压机的机构运动简图

需要指出的是,机构中的虚约束并不是在计算自由度时人为设置的障碍,而是“有的放矢”的积极措施。虚约束的引入,或者是为了改善构件的受力状况;或者是为了传递较大的功率;或者是为了某些特殊的需要。对于初学本课程的读者来说,基本的要求是能够判断出是否存在虚约束,并找出引入虚约束的运动链,以便正确计算机构的自由度;在此基础上,逐渐积累正确运用虚约束的知识和经验,以期在今后的设计工作中能够主动地去运用虚约束。如前所述,虚约束都是在一定的几何条件下出现的,如果这些几何条件不满足,则虚约束将会变成有效约束,从而使得机构不能运动。因此,在使用虚约束时,不仅要在设计阶段切实保证出现虚约束的几何条件的成立,而且在加工、装配和调试过程中,也要切实保证精度。

4. 高副低代

进行高副低代的目的有两个:其一,将含有高副的平面机构进行低代后,即可将其视为只含低副的平面机构,就可以根据机构组成原理和结构分析的方法对其进行结构分类,并运用低副平面机构的分析方法对其进行分析和研究;其二,高副低代及其逆过程——低副高代,是机构变异的重要方法之一,而机构变异是进行创新机构设计的重要途径,通过它可以构筑新的机构型式,产生多种设计方案。正因为如此,虽然高副低代不是本章的重点,读者仍应掌握其基本原理。

1) 替代的瞬时性和替代前后的不变性

由于在大多数情况下,不同瞬时高副接触点处的曲率中心不同,其曲率中心到构件固定回转轴心的距离也不同,所以在不同位置有不同的瞬时替代机构,即替代具有瞬时性。

所谓替代前后的不变性,是指替代前后机构的自由度、瞬时速度和瞬时加速度保持不变。这是由替代条件所决定的。

2) 替代方法

由于一个高副仅引入一个约束,而一个低副却引入两个约束,故不可能以一个低副来代

替一个高副。通常可以用一个虚拟构件和两个低副来代替一个高副,因为一个构件和两个低副也引入一个约束,从而可保证替代前后机构自由度保持不变。

组成高副的两个运动副元素的几何形状不同,所选择的虚拟构件的形状和运动副的类型也有所不同。教程中介绍了两运动副元素均为圆形曲线的情况。当高副两元素均为任意曲线时(见图 1.8),可先过接触点 C 作两曲线的公法线,并在其上定出两曲线在接触点 C 处的曲率中心 O_1 及 O_2 ,然后用一个虚拟构件 O_1O_2 分别在 O_1 点和 O_2 点与两构件 1,2 以转动副相联,铰链四杆机构 AO_1O_2B 即为其替代机构;当高副两元素之一为直线时(见图 1.9(a)),由于直线的曲率中心在无穷远处,故低代时虚拟构件这一端的转动副将转化为移动副,其替代机构如图 1.9(b)所示;当高副两元素之一为一点时(见图 1.10(a)),由于点的曲率为零,曲率中心与两构件的接触点 C 重合,故低代时虚拟构件这一端的转动副 O_2 即在 C 点处,其替代机构如图 1.10(b)所示。

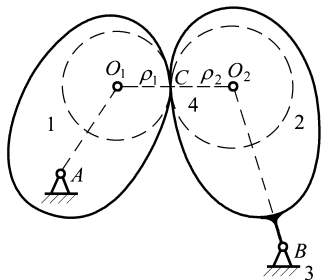


图 1.8 高副两元素为任意曲线时的高副低代

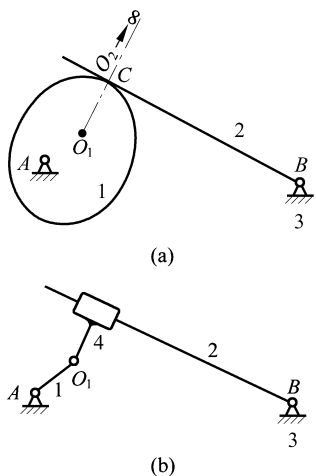


图 1.9 高副两元素之一为直线时的高副低代

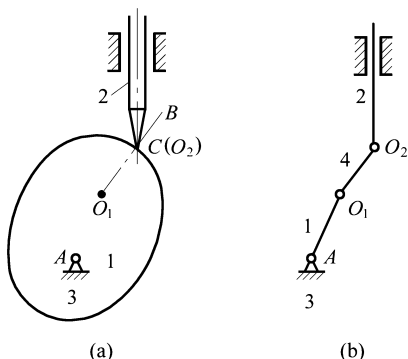


图 1.10 高副两元素之一为一点时的高副低代

5. 机构组成原理与结构分析

机构的组成过程和机构的结构分析过程正好相反,前者是研究如何将若干个自由度为零的基本杆组依次联接到原构件和机架上,以组成新的机构,它为设计者进行机构创新设计提供了一条途径;后者是研究如何将现有机构依次拆成基本杆组、原构件及机架,以便对机构进行结构分类。

1) 基本杆组

无论是组成新机构还是对现有机构进行结构分析,都离不开杆组的概念。这里要特别注意:杆组是指自由度为零且不能够再分的构件组。工程实际中最常见的基本杆组是Ⅱ级组(又称双杆组)和Ⅲ级组,教程中给出了常见的型式,希望读者能够在理解的基础上熟记,以便灵活运用。至于其他更高级别的杆组,因工程中使用较少,不必去刻意研究。

2) 机构的级别

不同级别的机构,其运动分析和力分析的方法有各自的特点。鉴别机构的级别,是为了寻求求解机构的运动分析和力分析的途径。需要特别注意的是,机构的级别与杆组的级别既有联系又含义不同。其一,机构的级别是以机构中所含杆组的最高级别来定义的;其二,同一机构,当取不同构件为原动件时,机构的级别有可能会发生变化。

3) 结构分析的方法

机构结构分析的过程又称为拆杆组,它是本章的难点之一,初学者往往会出现错误。对于一个已有的机构,由于事先并不知道哪个杆组是最后添加上去的,也不知道它是属于哪一级杆组,因此杆组的拆除带有一定的试拆性质。为了有助于正确拆除杆组,初学者应遵循下述拆杆组原则:

- (1) 由离原动件最远的部分开始试拆;
- (2) 每试拆一个杆组后,机构的剩余部分仍应是一个完整的机构;
- (3) 试拆杆组时,最好先按Ⅱ级组来试拆;如果无法拆除(指拆除之后剩余部分不能构成一个完整机构),意味着拆除有误,再试拆高一级杆组;
- (4) 拆杆组结束的标志是只剩下原动件和机架所组成的Ⅰ级机构。

这里需要特别注意两点:其一,所谓离原动件“最远”,主要不是指在空间距离上离原动件最远,而是指在传动关系和传动路线上离原动件最远;其二,每拆除一个杆组,剩余的部分应该仍为一个完整的机构,这是判别拆除过程是否正确的准则,必须遵守。初学者往往在这两点上出错。

教程中用流程图的形式给出了拆杆组的具体步骤和过程,读者可根据该流程框图结合具体实例进行复习和掌握。

1.3 典型例题分析

例 1.1 试绘制图 1.11(a)所示的蒸汽机配气机构的运动简图,并计算其自由度。同时确定机构所含杆组数目、级别及该机构的级别。

解 先对机构作以下分析:

(1) 调整手柄 9 与轮 8'(固定于机架 8)的相对位置,可改变气阀 6 的移动位置以调节进气管的大小。调整结束后,当机构开始正常运转时,由于手柄 9 的位置是固定不动的,故其不再作为活动构件,运动简图中可不出现。

(2) 整个配气机构的运动,是由原动件偏心轮 1 和 1'绕 O 轴转动,通过连杆 2,3 及弧形导槽 4、摇杆 7 及滑块 5,带动气阀 6 作往复移动来达到配气目的的。

(3) 由于两个偏心轮 1 和 1'是装在同一固定轴 O 上,并绕其作同速转动,故可看作一体,以轮 1 和 1'的几何中心 A,B 到旋转中心 O 的曲柄 AOB 来表示。

(4) 由于气阀 6 与阀体 8''之间在多处构成导路平行的移动副,故产生虚约束。在计算自由度时,应按两构件间只构成一个移动副处理。

根据以上分析,按机构运动简图的绘制步骤可绘出如图 1.11(b)所示的机构运动简图。机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$

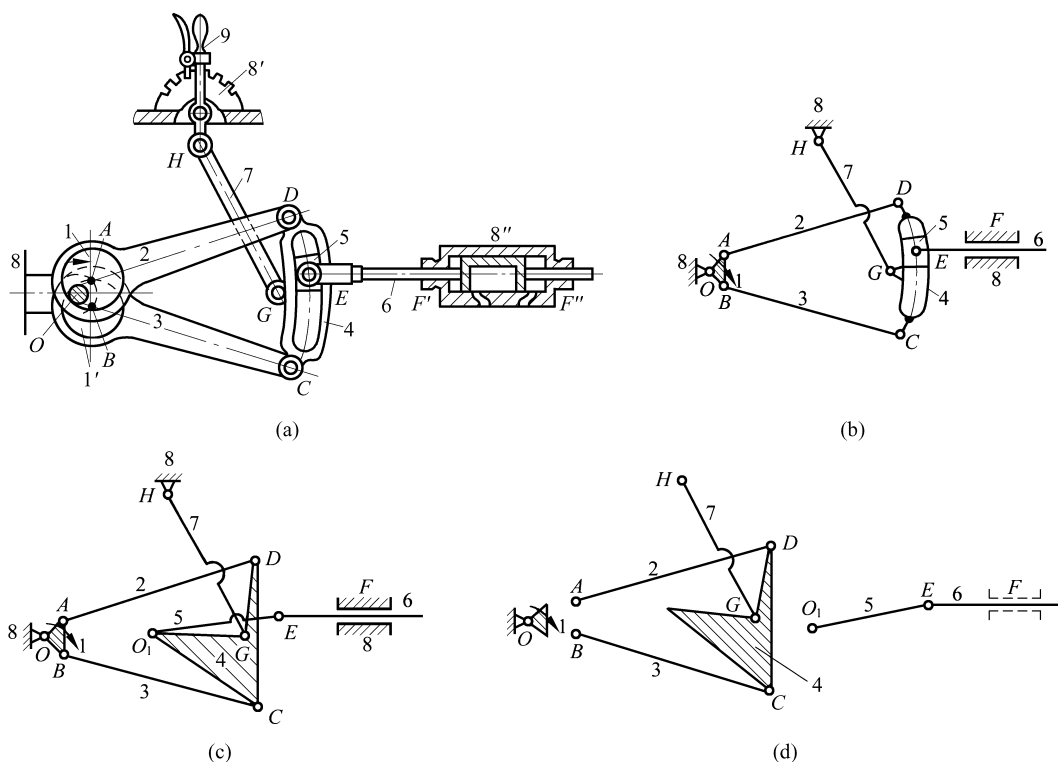


图 1.11 例 1.1 图

若考虑到圆弧形导槽与滑块间形成的运动副是转动副的特殊形式,可以它们的相对转动中心为转动副 O_1 ,则又可绘出如图 1.11(c)所示的机构运动简图。

对机构进行结构分析。从传动关系上离原动件最近的构件开始试拆杆组,先拆下构件 5、6 及转动副 O_1 、 E 、移动副 F 所组成的 II 级杆组,剩下的部分中无法再拆出 II 级杆组,只可拆下由构件 2、3、4、7 及 6 个转动副所组成的 III 级杆组。所以,此机构是由如图 1.11(d)所示的机架 8、主动件 1、一个 II 级组和一个 III 级组所组成。该机构属 III 级机构。

例 1.2 图 1.12 所示为一飞机水平尾翼操纵机构的运动简图。其中,构件 1 为机架,操纵杆 2 为原动件,有时还可从襟翼输入(即构件 12 摆动)或从稳定增效器输入(即构件 7 相对构件 14 移动),构件 8 为输出杆。试求各种输入方式下机构的自由度。

解 该机构有 4 种输入方式。

(1) 仅从操纵杆输入

当襟翼不输入运动时,杆 9、10、11、12 和 13 均不运动,铰链 G 为固定铰链;当稳定增效器不输入运动时,杆 7 与杆 14 为一定长杆,可视为 1 个构件。此时机构只有 7 个活动构件,以 10 个转动副相联接。机构自由度为

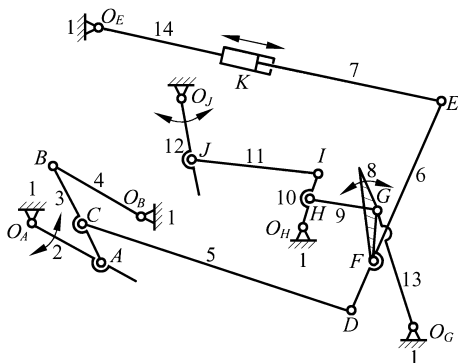


图 1.12 例 1.2 图

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$

(2) 由操纵杆和襟翼同时输入

此时有 12 个活动构件, 组成 17 个转动副, 其中 G 为复合铰链。机构自由度为

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 12 - 2 \times 17 = 2$$

(3) 由操纵杆和稳定增效器同时输入

此时, 杆 7 和杆 14 为两个活动构件, 共有 8 个活动构件, 组成 10 个转动副、1 个移动副 K 。机构自由度为

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 8 - 2 \times 11 = 2$$

(4) 由操纵杆、襟翼、稳定增效器同时输入

此时, 机构有 13 个活动构件, 以 18 个低副相联接。机构自由度为

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 13 - 2 \times 18 = 3$$

例 1.3 试计算如图 1.13(a) 所示机构的自由度, 并分析此机构的组成情况。已知 $DE=FG$, $DF=EG$, $DH=EI$ 。

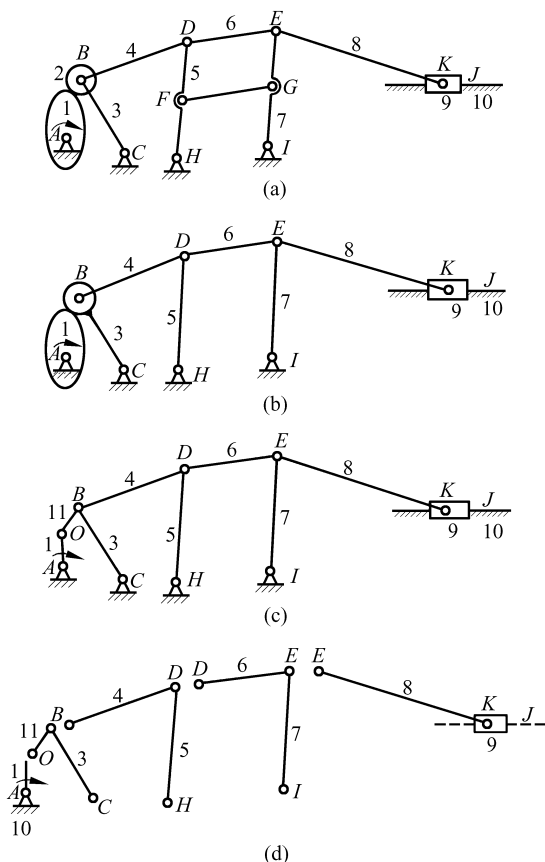


图 1.13 例 1.3 图

解 (1) 自由度计算

这是同时具有复合铰链、局部自由度和虚约束的典型例题。计算自由度时要注意 D 和 E 为复合铰链; 滚子 2 绕其自身几何中心 B 转动的自由度为局部自由度; 由于 $DFHIGE$ 的

特殊几何尺寸关系,构件 FG 的存在只是为了改善平行四杆机构 $DHIE$ 的受力状况等目的,对整个机构的运动不起约束作用,故 FG 杆及其两端的转动副所引入的约束为虚约束。在计算机构自由度时,除去 FG 杆及其带入的约束、除去滚子 2 引入的局部自由度并将其与杆 3 固结,得图 1.13(b)。若将凸轮与滚子组成的高副以一个虚拟构件 11 和两个转动副作高副低代,可得图 1.13(c)。

按图 1.13(b)计算机构自由度:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 = 1$$

按图 1.13(c)计算机构自由度:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 9 - 2 \times 13 = 1$$

用以上两种方法计算机构自由度所得结果相同,说明高副低代不会影响机构的自由度。

(2) 分析机构的组成情况

对图 1.13(c)作结构分析。从传动关系上离原动件最远的构件 9 开始拆杆组,先拆一个由构件 8 和 9、转动副 E 和 K 、移动副 J 组成的 II 级杆组,剩余部分仍为完整的机构;再依次拆下 3 个 II 级杆组:构件 6,7 及转动副 I, E, D ;构件 4,5 及转动副 H, D, B ;构件 11,3 及转动副 C, B, O ;最后剩下由原动件 1 和机架 10 组成的 I 级机构,如图 1.13(d)所示。此机构由 4 个 II 级杆组和一个 I 级机构组成,因此是一个 II 级机构。

例 1.4 试计算图 1.14(a)所示冲压机构的自由度,并分析在下列情况下组成机构的基本杆组及机构的级别:(1)当以构件 1 为原动件时;(2)当以构件 6 为原动件时。

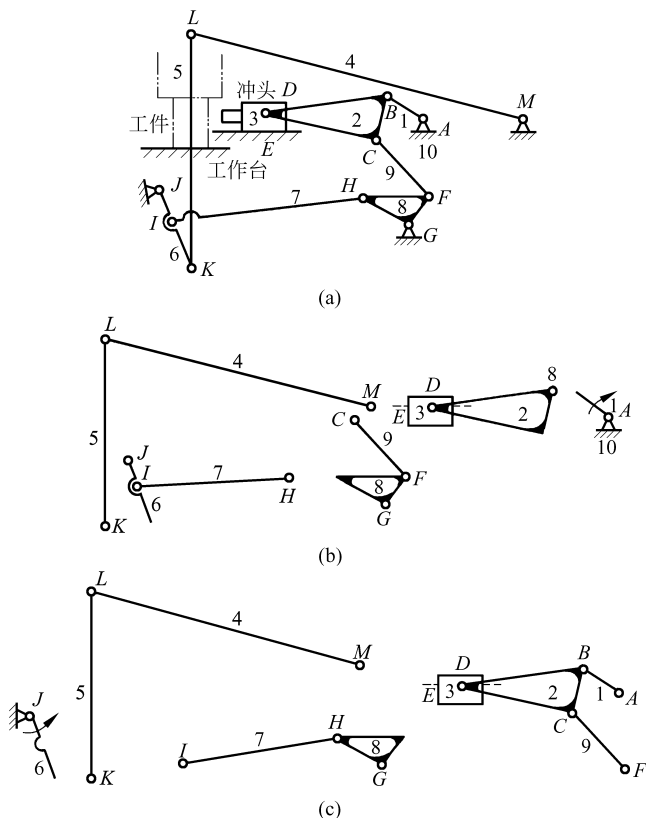


图 1.14 例 1.4 图

解 (1) 机构的自由度计算:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 9 - 2 \times 13 - 0 = 1$$

(2) 分析当构件 1 作为原动件时机机构的组成情况。首先从传动路线上离原动件最远的构件 4 开始试拆杆组, 先拆下由构件 4, 5 和转动副 K, L, M 组成的 II 级杆组; 接着依次拆下 3 个 II 级杆组: 构件 6, 7 和转动副 J, I, H ; 构件 8, 9 和转动副 C, F, G ; 构件 2, 3 和转动副 B, D 及移动副 E ; 最后剩下由原动件 1 和机架 10 组成的 I 级机构, 如图 1.14(b) 所示。由于组成该机构的基本杆组的最高级别是 II 级组, 故该机构为 II 级机构。

(3) 分析当构件 6 为原动件时机机构的组成情况。首先从传动路线上离原动件最远的构件 3(冲头)开始试拆杆组。先试拆 II 级组。从图 1.14(a) 中可以看出, 如果拆除构件 3 和 2、移动副 E 、转动副 D 和 B , 则构件 1 和转动副 C 均会失去联接对象, 导致剩余部分不再是一个完整机构; 如果拆除构件 3 和 2、移动副 E 、转动副 D 和 C , 则构件 9 和转动副 B 也均会失去联接对象, 导致剩余部分也不再是一个完整的机构。因此试拆 II 级杆组失败。再试拆 III 级杆组, 即拆除构件 3, 2, 1, 9, 移动副 E 和 5 个转动副, 由于剩余部分仍是一个完整机构, 故拆除成功。然后再依次拆除两个 II 级组: 构件 7, 8 和转动副 G, H, I ; 构件 4, 5 和转动副 K, L, M 。最后剩下由原动件 6 和机架组成的 I 级机构, 如图 1.14(c) 所示。由于组成该机构的基本杆组的最高级别为 III 级组, 故该机构为 III 级机构。

该例说明, 同一机构, 当更换原动件时, 机构的级别也可能改变。

例 1.5 试计算图 1.15(a) 所示电锯机构的自由度, 并分析该机构的组成情况。

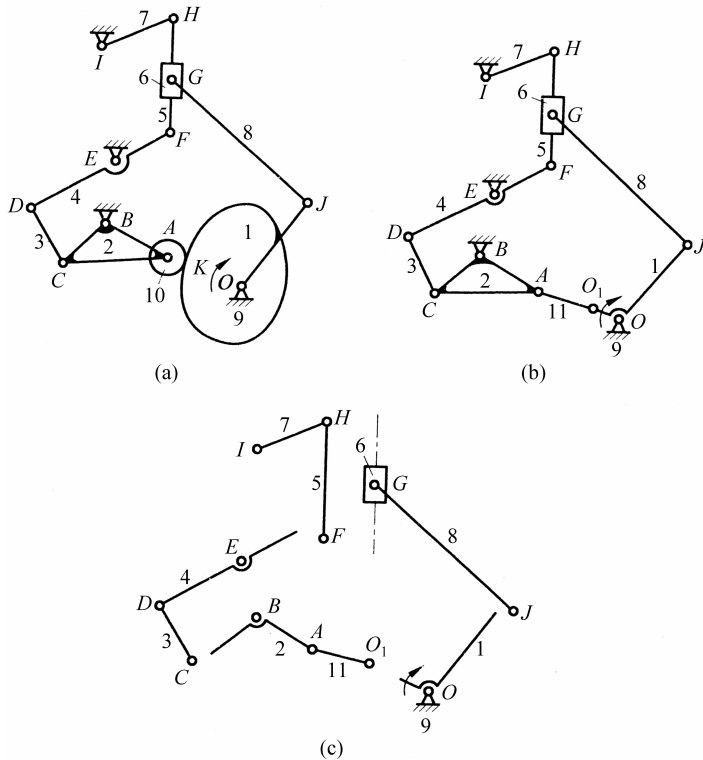


图 1.15 例 1.5 图

解 (1) 自由度计算

从图 1.15(a)中可以判断出滚子处具有局部自由度,先将滚子 10 与构件 2 视为一体,然后用平面机构自由度计算方式计算该机构的自由度:

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \times 8 - 2 \times 11 - 1 \times 1 = 1$$

(2) 分析机构的组成情况

这是一个含有高副的平面机构,首先对原机构作如下处理:将滚子 10 的局部自由度去除,将 K 处的高副进行低代,得到如图 1.15(b)所示的机构运动简图。然后进行机构结构分析:从传动关系上离原动件 1 最远的部分开始试拆杆组,依次拆除由构件 6 和 8、7 和 5、4 和 3、2 和 11 组成的 4 个 II 级杆组,最后剩下原动件 1 和机架 9,如图 1.15(c)所示。由于组成该机构的杆组的最高级别为 II 级组,故该机构为 II 级机构。

1.4 复习思考题

1. “构件是由多个零件组成的”,“一个零件不能成为构件”的说法是否正确? 构件和零件的本质区别是什么?
2. 运动链成为机构的条件是什么?
3. 机构运动简图有什么用途? 它着重表达机构的哪些特征?
4. 绘制机构运动简图的步骤是什么? 应注意哪些事项?
5. 当一个运动链中的原动件数目与其自由度数目不一致时,会出现什么情况?
6. 计算机构自由度时应注意哪些事项?
7. 组成机构的基本单元是什么? 符合什么条件才能成为机构?
8. 对机构进行组成和结构分析的目的是什么? 它们分别用于什么场合?
9. 如何确定机构的级别? 影响机构级别变化的因素是什么? 为什么?
10. 杆组有何特点? 如何确定杆组的级别? 试举例说明。
11. 高副低代的目的、原则和方法是什么?
12. 试叙述对机构进行结构分析时拆杆组的原则和步骤。
13. 机构运动简图、机构示意图和机械系统示意图的区别是什么? 各有什么用途?
- * 14. 为什么说机构组成原理为创造新机构提供了一条途径? 如何运用此理论进行机构创新设计?

1.5 自 测 题

1-1 试回答下列问题:

- (1) 何谓“机器”和“机构”? 试分别举例说明。
- (2) 何谓“零件”和“构件”? 试举例说明其区别。
- (3) 何谓“运动副”? 满足什么条件两个构件间才能构成运动副?
- (4) 何谓“运动链”? 具备什么条件,运动链才能成为机构?

(5) 何谓“杆组”? 满足什么条件, 若干构件才能组成杆组。

(6) 何谓“机构的级别”? 何谓“Ⅰ级机构”?

1-2 试作以下构思:

(1) 构思一个执行构件作移动、自由度为 1 的Ⅱ级机构。

(2) 构思一个双自由度机构, 并标明原动件。

1-3 图 1.16 所示为水平吊运货物起重机的两个工位。试绘制其中一个工位的机构运动简图, 并计算其自由度。

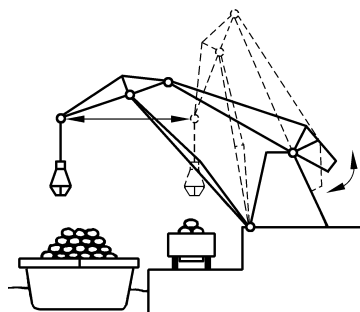


图 1.16 自测题 1-3 图

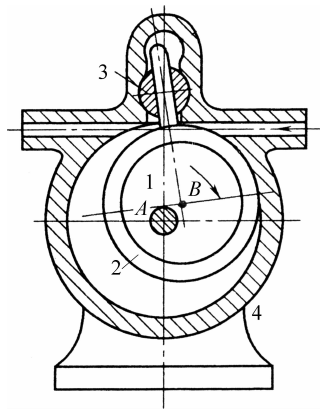


图 1.17 自测题 1-4 图

1-5 试判别图 1.18 所示运动链能否成为机构, 并说明理由。若不能成为机构, 请提出修改办法。

1-6 图 1.19 所示为一设计人员初拟的简易冲床的设计方案。设计者的思路是: 动力由齿轮 1 输入, 带动齿轮 2 连续转动; 与齿轮 2 固接在一起的凸轮 2' 与杠杆 3 组成的凸轮机构将带动冲头 4 作上下往复运动, 从而达到冲压工件的目的。试按比例绘制出该设计方案的运动简图, 分析该方案能否实现设计意图, 并说明理由。若不能, 请在该方案的基础上提出两种以上修改方案, 并画出修改后方案的运动简图。

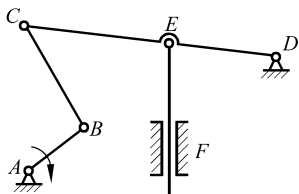


图 1.18 自测题 1-5 图

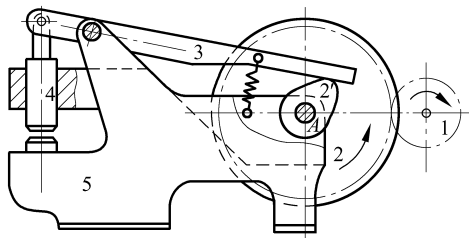


图 1.19 自测题 1-6 图

1-7 图 1.20 所示为自动送料剪床机构, 已知 $CD \parallel FG$, $CE \parallel GH$ 。试计算该机构自由度。若有复合铰链、局部自由度和虚约束, 请明确指出。

1-8 试分析如图 1.21 所示刨床机构的组成, 并判别机构的级别。若以构件 4 为原动件, 则此机构为几级机构?

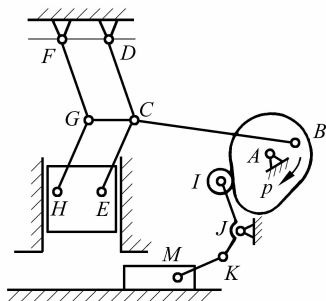


图 1.20 自测题 1-7 图

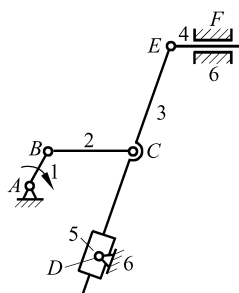
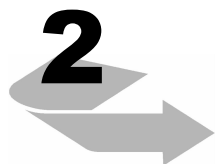


图 1.21 自测题 1-8 图



连 杆 机 构

2.1 基 本 要 求

- (1) 了解平面四杆机构的基本型式,掌握其演化方法。
- (2) 掌握平面四杆机构的工作特性。
- (3) 了解平面连杆机构的特点及其功能。
- (4) 掌握平面连杆机构运动分析的方法,学会将复杂的平面连杆机构的运动分析问题转化为可用计算机解决的问题。
- (5) 了解平面连杆机构设计的基本问题,熟练掌握根据具体设计条件及实际需要,选择合适的机构型式和合理的设计方法,解决具体设计问题。
- (6) 了解空间连杆机构的类型及其功能。

2.2 重 点、难 点 提 示 与 辅 导

本章内容包括平面连杆机构和空间连杆机构两部分,其中平面连杆机构是本章的重点。通过本章的学习,最终要求达到:根据实际需求,确定连杆机构的类型,选择合适的设计方法设计连杆机构。设计完成后需对所设计的连杆机构进行运动特性和传力特性分析,校验此机构是否实用,是否满足实际要求。

1. 平面四杆机构的基本型式及其演化方法

平面四杆机构的基本型式为铰链四杆机构,在学习中需要掌握以下基本概念:整转副、摆转副、连杆、连架杆、曲柄、摇杆以及低副运动的可逆性。

铰链四杆机构可以通过 4 种方式演化出其他形式的四杆机构。即①取不同构件为机架;②变转动副为移动副;③杆状构件与块状构件互换;④扩大转动副的尺寸。在曲柄摇杆机构或曲柄滑块机构中,当载荷很大而摇杆(或滑块)的摆角(或行程)不大时,可将曲柄与连杆构成的转动副中的销钉加以扩大,演化成偏心盘结构,这种结构在工程上应用很广。

四杆机构通过选择不同构件为机架可以演化出其他型式。这种演化方式也称为“运动倒置”。这种方法将会在以后的学习中遇到,如本章中将要介绍的“刚化反转法”,凸轮廓线设计中将要介绍的“反转法”及周转轮系传动比计算中将要介绍的“转化机构法”,其原理与此处的“运动倒置”原理完全一样。

以上所述的各种演化方法是通过基本机构变异产生新机构型式的重要方法,故掌握这些演化方法很重要。

2. 平面连杆机构的工作特性

平面连杆机构的工作特性包括运动特性和传动特性两方面。运动特性包括构件具有整转副的条件、从动件的急回运动特性及运动连续性。传力特性包括压力角 α 和传动角 γ 及机构的死点位置。

1) 急回特性

从动件的急回运动程度用行程速比系数 K 来表示, K 的定义为从动件回程平均角速度和工作行程平均角速度之比。

机构具有急回特性必有 $K > 1$, 则极位夹角 $\theta > 0$ 。极位夹角的定义是指当机构的从动件分别位于两个极限位置时,主动件曲柄的两个相应位置之间所夹的锐角。 θ 和 K 之间的关系为

$$\theta = (K - 1)/(K + 1) \times 180^\circ$$

$$K = (180^\circ + \theta)/(180^\circ - \theta)$$

它们之间的关系应记住。

这里需要提醒读者注意的是:有时某一机构本身并无急回特性,但当它与另一机构组合后,此组合后的机构并不一定亦无急回特性。机构有无急回特性,应从急回特性的定义入手进行分析。

2) 压力角和传动角

压力角和传动角是很重要的两个概念,在今后的学习中常常会遇到。压力角是指在不计摩擦时,机构从动件上某点所受驱动力的作用线与此点速度方向线之间所夹的锐角,用 α 表示。传动角为压力角之余角,用 γ 表示。

压力角是衡量机构传力性能好坏的重要指标。因此,对于传动机构,应使其 α 角尽可能小(γ 尽可能大)。

连杆机构的压力角(或传动角)在机构运动过程中是不断变化的。从动件处于不同位置时有不同的 α 值,在从动件的一个运动循环中, α 角存在一个最大值 $\alpha_{\max}$ 。在设计连杆机构时,应注意使 $\alpha_{\max} \leq [\alpha]$ 。

3) 死点位置

机构在运动过程中,当从动件的传动角 $\gamma = 0^\circ$ ($\alpha = 90^\circ$) 时,驱动力与从动件受力点的运动方向垂直,其有效分力等于零,这时机构不能运动,称此位置为死点位置。

在曲柄摇杆机构或曲柄滑块机构中,若以曲柄为主动件,这两种机构均不存在死点位置。但当以摇杆或滑块为主动件、曲柄为从动件时机构存在死点位置,即当连杆与曲柄共线时为死点位置,此时压力角为 90° ,传动角为 0° ,曲柄所受的转动动力矩为零,再大的力也不能使曲柄转动。此处应注意:“死点”、“自锁”与机构的自由度 $F \leq 0$ 的区别。自由度小于或等于零,表明该运动链不是机构而是一个各构件间根本无相对运动的桁架;死点是在不计摩擦的情况下机构所处的特殊位置,利用惯性或其他办法,机构可以通过死点位置,正常运动;而自锁是指机构在考虑摩擦的情况下,当驱动力的作用方向满足一定的几何条件时,虽然机构自由度大于零,但机构却无法运动的现象。死点、自锁是从力的角度分析机构的运动情况,而自由度是从机构组成的角度分析机构的运动情况。

3. 平面连杆机构的运动分析

平面连杆机构运动分析的方法很多。可根据实际情况选用。教程中介绍了3种方法即瞬心法、整体运动分析法和杆组法,这3种方法各有特色,应用也很广。

1) 瞬心法

瞬心法是利用机构的瞬时速度中心求解机构的运动问题。瞬心分绝对瞬心和相对瞬心,前者是指等速重合点的绝对速度为零;后者是指等速重合点的绝对速度不为零。

任意两个构件无论它们是否直接形成运动副都存在一个瞬心。故若机构全部构件数为 n ,则共有 $N=n(n-1)/2$ 个瞬心。求瞬心的方法有两种:一种是通过直接观察;一种是利用三心定理。利用瞬心法可以进行某一瞬时构件的角速度之比、构件的角速度和构件上某点的速度分析。进行运动分析时不受机构级别的限制,当所求构件与已知构件相隔若干构件时,也可直接求得。在用瞬心法进行速度分析时,需要用哪个瞬心找哪个瞬心,不必找出所有瞬心后求解。在机构构件数较少的情况下,利用瞬心法对机构进行速度分析不失为一种简洁的方法。

2) 整体运动分析法

平面机构整体运动分析法的原理就是把所研究的机构置于一个直角坐标系中,自始至终都把整个机构作为研究对象,建立机构的运动参数与机构尺寸参数之间的解析表达式,由已知参数求解出待求参数。在机构整体运动分析过程中,首先要建立机构运动的位置表达式,然后对位置表达式分别求一次和二次导数即可得到机构的速度和加速度表达式,通过对相应表达式的求解得到所分析构件的位置、速度和加速度。

3) 杆组法

杆组法的理论依据为机构组成原理。其基本思路是将一个复杂的机构按照机构组成原理分解为一个个比较简单的单杆构件和基本杆组。在用计算机对机构进行运动分析时,可以根据机构组成情况的不同,直接调用已编好的单杆构件和常见杆组运动分析的子程序,从而使主程序的编写大为简化。至于单杆构件和常见杆组运动分析的子程序已有比较完善、成熟的软件,无需使用者自己编写,读者可根据具体情况调用即可。

在用杆组法对机构进行分析时,位置分析是关键,在位置分析的基础上分别对时间求一阶、二阶导数就可得到速度和加速度分析的结果。在调用各杆组运动分析的子程序时,需特别注意:首先要根据机构的初始位置判断该杆组的装配形式,然后分析位置模式系数,给位置模式系数 M 赋值(+1或-1)。

需要提醒读者注意的是,要学会如何把一个复杂的问题转化为可以用计算机解决的问题,这涉及基本能力的培养,希望引起读者重视。

机构整体运动分析法和杆组法均为机构运动分析的解析法,针对分析问题的不同特点,前者是把整个机构作为分析对象,而后者则是把基本杆组作为分析对象。解析法的关键是建立所分析对象的位置表达式。

4. 平面连杆机构的设计

平面连杆机构运动设计常分为三大类设计命题:刚体导引机构的设计、函数生成机构的设计和轨迹生成机构的设计。由于平面四杆机构可以选择的机构参数是有限的,而实际设计问题中各种设计要求往往是多方面的,故一般设计只能是近似实现,在具体设计中可选用

表 2.1

设计命题	设计求解	分析
1. 已知两个连架杆的两组对应角位置, 设计四杆机构	AB₁C₁D 为所求, 解为无穷多个	已知 AB 杆长, 设计时选 CD 杆 I 位置为参考位置, 以 D 为轴, 将 DB₂ 按逆时针方向旋转($\varphi_{I1} - \varphi_{II1}$)角, 得转位点 B'₂, 铰链点 C₁ 应位于 B₁B'₂ 的中垂线上
	AB₂C₂D 为所求, 无穷多解	已知 AB 杆长, 设计时选 CD 杆 II 位置为参考位置, 以 D 为轴, 将 DB₁ 按顺时针方向旋转($\varphi_{I1} - \varphi_{II1}$)角, 得转位点 B'₁, 铰链点 C₂ 应位于 B₂B'₁ 的中垂线上
	AB₁C₁D 为所求, 解为无穷多个	已知 CD 杆长, 设计时选 AB 杆 I 位置为参考位置, 将 AC₂ 按逆时针方向旋转($\varphi_{I1} - \varphi_{II1}$)角, 得转位点 C'₂, 铰链点 B₁ 应位于 C₁C'₂ 的中垂线上