

# 机械原理辅导与习题

申永胜摇主编

清华大学出版社



# 前摇摇言

学分制的实施和课内学时的减少,为学生自主学习提供了条件。为帮助学生更好地自主学习,我们编写了本书,作为《机械原理教程》一书的配套用书。

书中简要阐明了本课程教学的基本要求,具体指出了各章的重点和难点,以及学习时容易出现的问题和错误,通过若干典型例题和复习思考题,帮助学生巩固所学知识,掌握正确的解题思路和方法,并提供解题规范,通过一定数量的精选习题,帮助学生学以致用;通过若干自测题,使学生能够自己检查对基本内容的掌握程度,发现自身学习中存在的问题,以利于自学。

本书可作为教师贯彻本课程教学基本要求和组织讨论课的依据,同时作为学生学习本课程的主要参考书。

参加本书编写工作的有申永胜(前言、第猿章、第缘章、第愿章、第怨章及第员源章部分内容),翁海珊(第员章、第员猿章、第员源章部分、第员缘章),郝智秀(第圆章)、方嘉秋(第源章)、汤晓瑛(第远章、第员源章、第员愿章)和于晓红(第苑章、第员园章)。全书由申永胜教授担任主编。

由于我们水平所限,疏漏欠妥之处在所难免,恳请机械原理课程教师和广大读者批评指正。

主编摇申永胜

员999年猿月于清华园

# 目 录

## 上篇摇机构的运动设计

第 1 章 摇机构的组成和结构 .....	( 1 )
第 2 章 摇连杆机构 .....	( 10 )
第 3 章 摇凸轮机构 .....	( 20 )
第 4 章 摇齿轮机构 .....	( 30 )
第 5 章 摇轮系 .....	( 40 )
第 6 章 摇间歇运动机构 .....	( 50 )
第 7 章 摇其它常用机构 .....	( 60 )
第 8 章 摇组合机构 .....	( 70 )
第 9 章 摇开式链机构 .....	( 80 )

## 中篇摇机械的动力设计

第 10 章 摇机械系统动力学 .....	( 90 )
第 11 章 摇机械的平衡 .....	( 100 )
第 12 章 摇机械的效率 .....	( 110 )

## 下篇摇机械系统方案设计

第 13 章 摇机械的总体方案设计 .....	( 120 )
第 14 章 摇机械执行系统的方案设计 .....	( 130 )
第 15 章 摇机械传动系统的方案设计和原动机的选择 .....	( 140 )
附录 I 摇习题提示与参考答案 .....	( 150 )
附录 II 摇自测题提示与参考答案 .....	( 160 )
主要参考文献 .....	( 170 )

# 上篇摇机构的运动设计

# 第 1 章 机构的组成和结构

## 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。

(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机构自由度,尤其是平面机构的自由度。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。

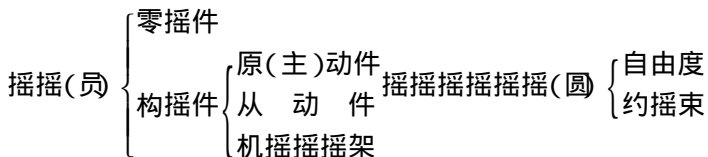
## 1.2 重点、难点的提示与辅导

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、机构自由度的计算、判断运动链能否成为机构和机构的组成原理是本章学习的重点。在目前的学习阶段,前面两个重点又是学习中的难点和必须正确熟练掌握的内容。

### 1.2.1 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。



(猗)	{ 杆摇组 运动链 { 闭(式)链 { 开(式)链 机摇构	(源)	{ 运 动 副 { 空间运动副 { 平面运动副 运动副元素
(缘)	{ 机构运动简图 机构示意图 机械系统示意图	(远)	{ 复合铰链 局部自由度 虚约束
(苑)	{ 运动副的级别 杆组的级别 机构的级别	(愿)	{ 机构组成 机构结构分析

## 圆正确绘制机构的运动简图

运动简图是设计者交流设计思想所需要的一种共同的语言。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;在作运动分析和力分析时,能保证计算无误;在计算自由度时,不至于数错构件数和运动副数。故运动简图应能正确表达出机构以什么构件组成和构件间以什么运动副相联接,即表达出机构的组成型式,显示出设计方案。

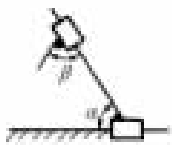
机构运动简图还是设计者研究分析机构运动学和动力学问题的一个重要工具。因此,要求准确表达出机构的运动特性和标注出相关的运动尺寸。由于简图不是用于结构设计和加工制造的,所以不可用机械的零部件图和总装图来代替。

### (员) 绘制运动副时应注意的事项

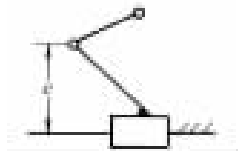
员 绘制转动副时,转动副的位置是关键:代表转动副小圆的圆心必须与回转中心重合;两个转动副中心连线的长度一定要精确。

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,具体可见典型例题分析中的例员。

圆 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(如图员缘);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(如图员圆)。



图摇员猿



图摇员圆

## 摇摇(圆) 绘制构件时应注意的事项

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

圆) 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。

猿) 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,并在编号右上角加不同的撇号以示区别,如猿猿乙猿猿。

### (猿) 绘制机构运动简图时应注意的事项

#### 员) 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 员月员圆园—愿。

圆) 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、运动副的数目和种类。

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,然后展至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 员圆猿... 将各运动副上标上字母 粤月悦...。

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结形式,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。

### 机构自由度的计算

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:

(员) 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。平面机构一般采用公式

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

来计算自由度,而空间机构一般采用公式

$$F = 6n - 5P_L - P_H - P_S$$

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 择个公共约束,则自由度计算应使用下式

$$F = (3n - 2P_L - P_H) - \sum_{i=1}^m (C_i - 1)$$

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。

(圆) 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 员圆中 粤月悦粤月悦粤月悦粤月悦五杆,其实是桁架结构,应视为一个构件。图 员圆所示的杆件 猿凸轮 猿和齿轮 猿固结为一体同轴同速转动,应视为一个构件。



图 员圆

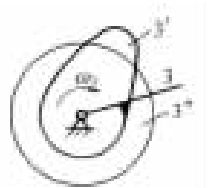


图 员圆

· 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 1-15);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。

(猿) 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,并作正确处理,是自由度计算中的难点,也是初学者容易出现错误的地方。

### 员) 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清哪几个构件在同一处形成了转动副。图 1-15 中列举了一些较难辨别的情况。图 (a) 中杆 1 与机架 3 组成两个转动副;图 (b) 中杆 1 与滑块 2 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 与机架 3 形成两个转动副;图 (e) 中杆 1、滑块 2 与机架 3 形成两个转动副;图 (f) 中,杆 1、滑块 2 与机架 3 组成两个转动副。

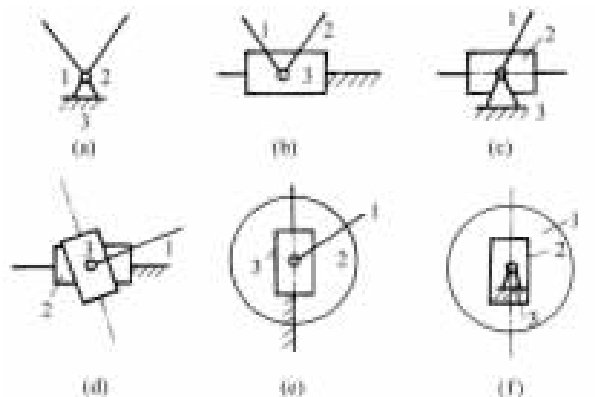


图 1-15 复合铰链

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。

### 圆) 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,而并不影响其它构件的运动。局部自由度常发生在为减小高副磨损而将滑动摩擦变成滚动摩擦所增加的滚子处。图 1-16 中滚子 2 绕其中心 3 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

云 越猿伊缘原圆伊远原员 越圆

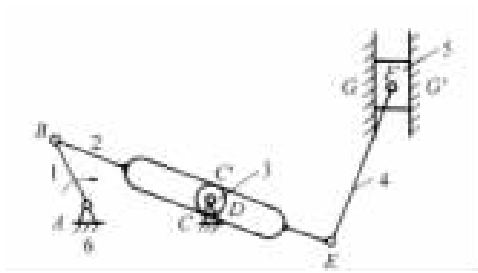


图 8-10 滚子

计算结果比机构的实际自由度数大,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

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

也可以将滚子视为与机架远固结为一体,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

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

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,如图 8-11 所示机构中给出的等速传动等。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。

教材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,读者应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 8-11 所示的机构中,滑块 2 和机架 1 虽组成两个移动副,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 4 虽组成两个平面高副,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 2 和 1 只算一个,高副 3 和 4 也只算一个。

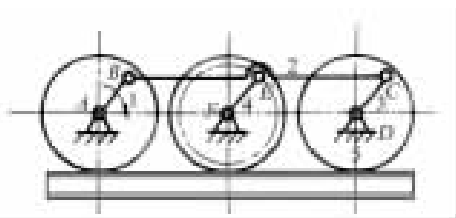


图 8-11 虚约束

图 8-11 虚约束

图 8-12 所示为机车车轮联动机构,若不考虑给定的几何条件(等速传动等),



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。

### (员) 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位置有不同的瞬时替代机构,即替代具有瞬时性。替代前后机构的自由度、瞬时速度和瞬时加速度保持不变。

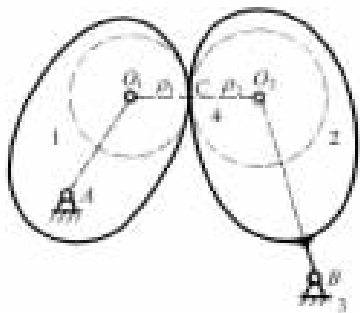
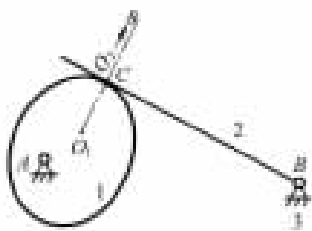


图 10-10 高副低代

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。

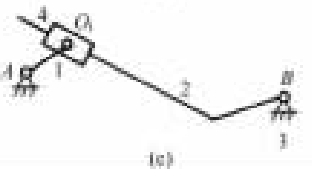
组成高副的两个运动副元素的几何形状不同,所选择的虚拟构件的形状和运动副的类型也有所不同。教材中介绍了两运动副元素均为圆形曲线的情况。当高副两元素均为任意曲线时(见图 10-10),可先过接触点作两曲线的公法线,并在其上定出两曲线在接触点处的曲率中心  $O_1$  及  $O_2$ ,然后用一个虚拟构件  $O_1O_2$  分别在  $O_1$  点和  $O_2$  点与两构件  $1$  和  $2$  以转动副相联,铰链四杆机构  $A_1O_1O_2A_2$  即为其替代机构;当高副两元素之一为直线时(见图 10-11),由于直线的曲率中心在无穷远处,故低代时虚拟构件这一端的转动副将转化为移动副,其替代机构如图 10-11 所示,也可以将滑块中心移至  $O_1$ ,用图 10-11 表示;当高副两元素之一为一点时(见图 10-12),由于



(a)

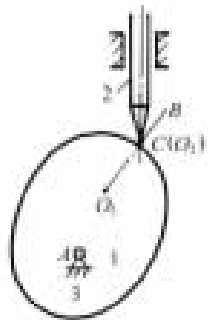


(b)



(c)

图 8-10-10



(a)



(b)

图 8-10-11

点的曲率为零,曲率中心与两构件的接触点重合,故低代时虚拟构件这一端的转动副即在 悦点处,其替代机构如图 8-10-11 所示。

### 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动件和机架上,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、原动件及机架,以便对机构进行结构分类。

#### (一) 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,教材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。至于其它更高级别的杆组,因工程中使用较少,不必去刻意研究。

#### (二) 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。

### (猢) 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组原则：

员) 由离原动件最远的部分开始试拆；

圆) 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；

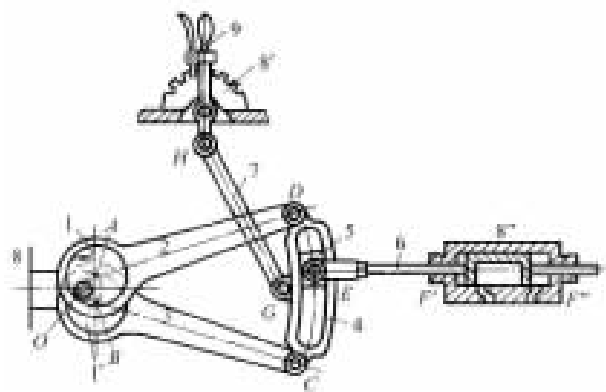
獭) 试拆杆组时 最好先按 II 级组来试拆 如果无法拆除(指拆除之后剩余部分不能构成一个完整机构) 意味着拆除有误 再试拆高级杆组；

源) 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。

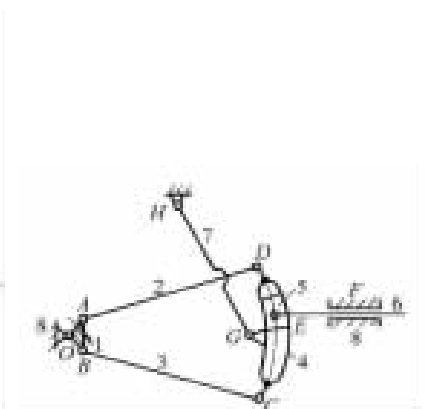
这里要特别注意两点：其一 所谓离原动件“最远”，主要不是指在空间距离上离原动件最远 更重要的是指在传动关系和传动路线上离原动件最远；其二 每拆除一个杆组 剩余的部分应该仍为一个完整的机构 这是判别拆除过程是否正确的准则 必须遵守。初学者往往是在这两点上出错。

## 猢猣 典型例题分析

例 猢猣 试绘制图 猢猣 猣 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。



(猢)



(猣)

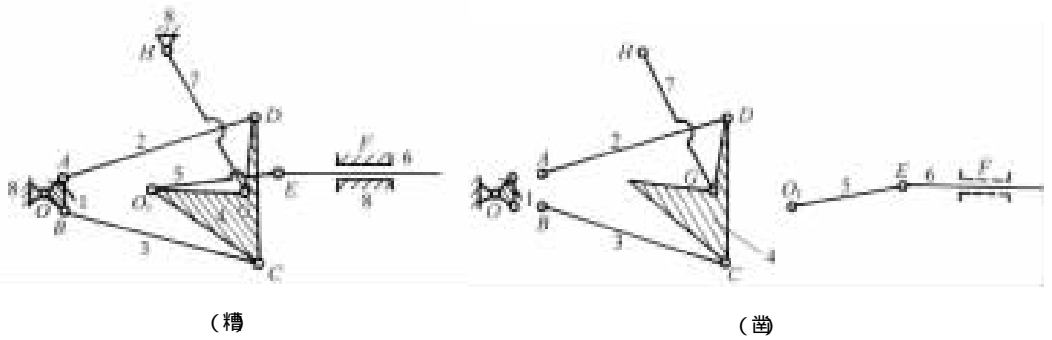


图 10-10 气阀机构

摇解摇先对机构作以下分析：

(员) 调整手柄 怨与轮 愿固定于机架 愿的相对位置,可改变气阀 远 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 怨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。

(圆) 整个配气机构的运动,是由原动件偏心轮 员和 员绕 韵轴转动,通过连杆 圆猿及弧形导槽 源摇杆 苑及滑块 缘,带动气阀 远作往复移动来达到配气目的的。

(猿) 由于两个偏心轮 员和 员是装在同一固定轴 韵上,并绕其同速转动,故可看作一体,以轮 员和 员的几何中心 粤,月到旋转中心 韵的曲柄 粤月来表示。

(源) 由于气阀 远与阀体 愿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 10-10 (b) 所示的机构运动简图。机构的自由度为：

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 1 = 0$$

摇摇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 韵,则可绘出如图 10-10 (a) 所示的机构运动简图。

摇摇对机构进行结构分析。从传动关系上离原动件最远的构件开始试拆杆组,若先拆下构件 缘远及转动副 韵,耘移动副 云所组成的 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 圆猿源苑及六个转动副所组成的 III 级杆组。所以,此机构是由如图 10-10 (b) 所示的机架 愿主动件 员一个 II 级组和一个 III 级组所组成。该机构属 III 级机构。

摇摇例 10-1 图 10-11 所示为一飞机水平尾翼操纵机构的简图。其中,构件 员为机架,操纵杆 圆为原动件,有时还可从襟翼输入(即构件 员圆摆动)或从稳定增效器输入(即构件 苑相对构件 员圆移动),构件 愿为输出杆。试求各种输入方式下机构的自由度。

摇解摇该机构有四种输入方式：

(员) 仅从操纵杆输入

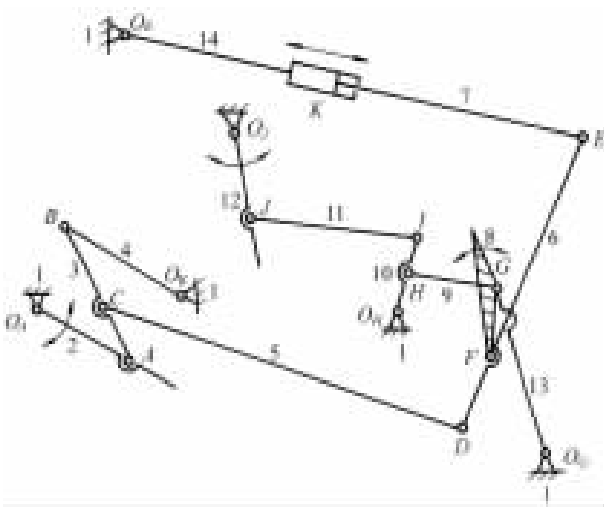


图 10-10 六轴机械手

当襟翼不输入运动时,杆 2、杆 3、杆 4 和杆 5 均不运动,铰链 郎为固定铰链;当稳定增效器不输入运动时,杆 6 与杆 7 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:

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

摇摇(圆) 由操纵杆和襟翼同时输入

此时有 7 个活动构件,组成 10 个转动副,其中 郎为复合铰链。机构自由度为:

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

摇摇(猿) 由操纵杆和稳定增效器输入

此时,杆 6 和杆 7 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。机构自由度为:

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 8 - 2 \times 10 - 1 = 1$$

摇摇(源) 由操纵杆、襟翼、稳定增效器同时输入

此时,机构有 7 个活动构件,以 10 个低副相联接。机构自由度为:

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

摇摇例 猿 图 10-11 所示为一个六轴机械手,试绘制其机构运动简图,并计算其自由度。

解 这是一个空间机构,由机架 员和构件 圆、猿、源、缘组成开式运动链。其中构件 员和 圆圆和 猿猿和 源源之间组成转动副,构件 源和 缘之间组成球面副,其机构运动简图如图 10-11(遭)所示。用计算机构自由度的一般公式进行计算,可得

$$F = 6n - 5P_L - P_H = 6 \times 5 - 5 \times 4 - 1 = 1$$

$$F = 6n - 5P_L - P_H = 6 \times 5 - 5 \times 4 - 1 = 1$$

摇摇计算结果表明,此空间运动链必须有 5 个原动件同时驱动,才能产生确定运动,成为机