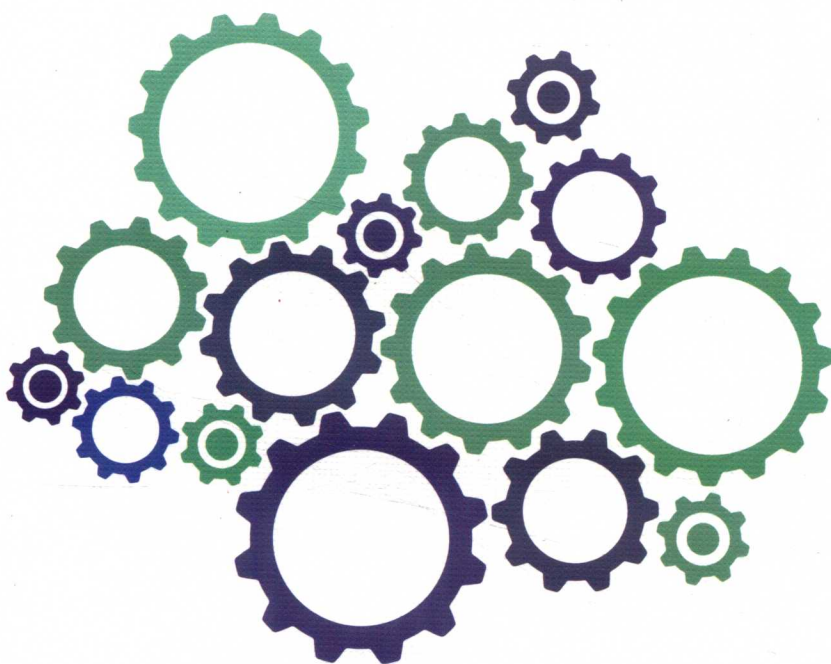


GAO DENG JI GOU YUAN LI
JI QI YING YONG

朱莉莉 王广欣 著

高等机构原理 及其应用

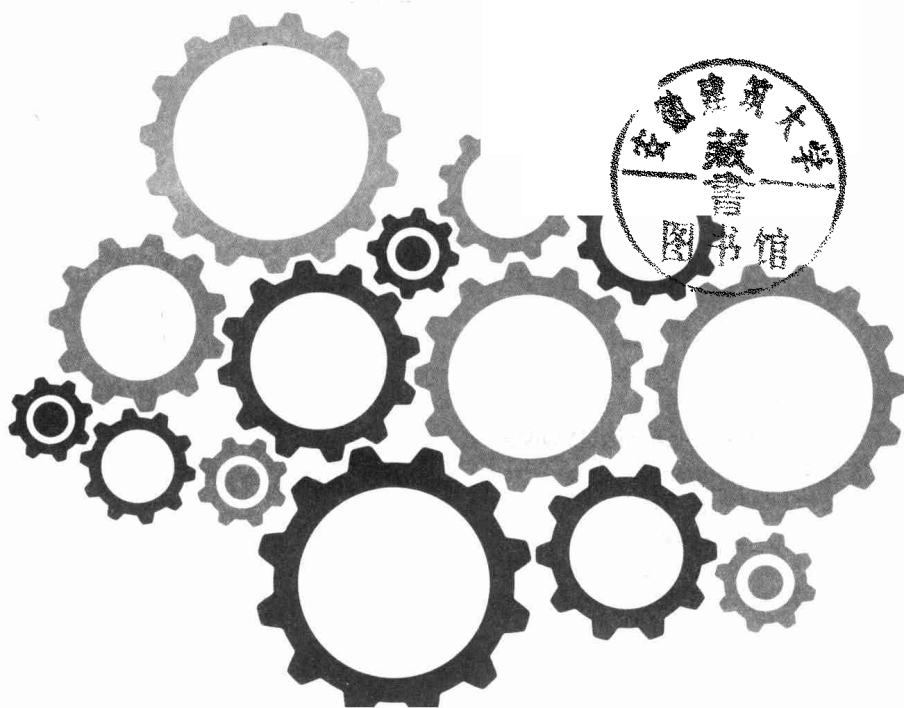


上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

GAO DENG JI GOU YUAN LI
JI QI YING YONG

朱莉莉 王广欣 著

高等机构原理 及其应用



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

图书在版编目 (CIP) 数据

高等机构原理及其应用 / 朱莉莉等著. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2018

ISBN 978-7-5439-7731-0

I. ① 高… II. ① 朱… III. ① 机构学—教材 IV. ① TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 171116 号

责任编辑: 应丽春

封面设计: 袁 力

高等机构原理及其应用

GAODENG JIGOU YUANLI JIQI YINGYONG

朱莉莉 王广欣 著

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

印 刷: 常熟市华顺印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.25

字 数: 315 000

版 次: 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5439-7731-0

定 价: 68.00 元

<http://www.sstlp.com>

内 容 简 介

《高等机构原理及其应用》共分 8 章,对机械学的经典理论及最新研究成果做了较全面的阐述。本书主要介绍了机械结构理论、机构运动分析的解析法、导引机构综合、函数机构综合、导向机构综合、平面高副机构理论基础及其设计、组合机构的分析与综合以及机械系统动力学。《高等机构原理及其应用》可作为“机械设计及理论”专业的研究生教材,也可供从事机械学理论研究与机械设计的科技人员参考。

前 言

机构学是在机械力学基础上逐步发展起来,研究各种机械中有关机构的结构、运动和受力等共性问题的一门学科。高等机构学则是在机构学的基础上继续深入地研究机械结构、机构运动分析和各种常用机构的综合及其应用。

本书在十年前就已经初建架构,这十年来在研究中不断丰富其内容,希望能将成熟的理论成果,例如完整的导引机构综合、函数机构综合、导向机构综合以及常用组合机构的分析与综合都集于本书,可以帮助读者更好地利用这些科研成果,使之转化为生产力,或者启迪自己的思维,在生产、教学和科研工作中得到进一步的发展和创新。为了能让读者快速地领会书中的内容,也将机构学的一些基本理论基础,例如机械结构和运动分析等基本理论、机械系统动力学等知识列于书中,方便读者查阅。

本书旨在为从事机械设计与制造的设计和研究人员提供进一步学习机构原理和进行专题研究时的理论基础,亦可作为机械学、机械设计与制造等相关专业的研究生教材。高等机构学是机械设计及理论学科研究生的主要学位课程之一,本书在内容上选择了宽口径的模式,由简入繁,可以为硕士生课程选用。各高等工科学校可以结合自己的专业特点,选用本书作为研究生教材,只需结合各自的特色适当增减教学内容即可。

在本书的编写过程中,汪萍教授和侯慕英教授提供了大量研究成果,王广欣副教授在本书内容、体系、方法等许多方面都做了大量工作,一些研究生也在公式推导与录入方面做了很多有意义的贡献,在这里向他们表示感谢。在本书的出版过程中,万朝燕教授也给予了作者大力支持和帮助,作者深表感谢。

限于作者的水平和时间,本书必然存在不少的缺点和错误,恳请读者和各方面专家批评指正。

作 者

目 录

第一章 机构结构理论	001
1 平面机构结构分类	001
2 空间机构自由度计算	006
3 平面机构的结构综合	020
4 空间运动链结构综合概述	029
第二章 机构运动分析的解析法	033
1 环矢量方程及机构运动的确定性	033
2 运动分析的代数法	035
3 运动分析的复数矢量法	038
4 利用标准子程序作运动分析	042
5 空间机构运动分析	046
第三章 导引机构综合	057
1 导引机构的概述	057
2 导引机构的转动极图解综合	059
3 导引机构的直角坐标解析综合	062
4 导引机构的复数解析综合	065
5 导引机构的位移矩阵解析综合	069
第四章 函数机构综合	078
1 概述	078
2 相对极半角转动图解法综合	079
3 代数方程解析法综合	084
4 位移矩阵解析法综合	089

5	函数机构综合	095
第五章	导向机构综合	109
1	概述	109
2	导向机构的位移矩阵综合法	114
3	导向机构的封闭矢量机构综合法	116
4	导向机构的函数逼近综合法	117
5	导向机构综合举例	121
6	导向机构的变换	125
第六章	平面高副机构理论基础及其设计	131
1	瞬心线	131
2	瞬心线机构设计	136
3	共轭曲线	147
4	共轭曲线机构设计	148
第七章	组合机构的分析与综合	161
1	概述	161
2	组合机构的结构分析	162
3	组合机构的运动分析	166
4	常用组合机构的综合	170
第八章	机械系统动力学	187
1	机械系统动力学的研究内容和研究方法	187
2	驱动装置与工作装置的机械特性	188
3	等效动力学模型	193
4	机械系统动力学方程式	201
5	动力学方程式的求解	203
6	几种常用传动装置的动力学分析	223
	参考文献	232

第一章

机构结构理论

1 平面机构结构分类

机构的分类常用如下两种方法：

- 1) 实用分类法。这是按机构外形特征进行分类的一种方法。例如,将机构划分成连杆机构、凸轮机构、槽轮机构等。此种分类法的目的主要是为了便于对这些同类机构的特性和设计方法进行分析研究。
- 2) 结构分类法。这是按机构组成原理将机构拆分成基本组后,根据基本组类型进行分类的方法。例如,将机构分成Ⅰ级机构、Ⅱ级机构等。此种分类法的目的是为了便于针对各种基本组所具有的共同特征,建立起系统、规范的运动分析和力分析的方法,以及建立结构综合的基本理论体系。

在机械原理课程中,主要采用前一种分类法,而本章着重于讨论结构分类法,以便建立系统的结构理论和分析方法。

1.1 平面机构组成原理

按照俄国机构学者阿苏尔(Ассу́р)提出,以后又被发展了的机构学派的观点认为:机构是由一个或若干个自由度为零的运动链依次联接到原动件和机架上去而组成的。这些自由度为零的不可再拆分的杆组称为基本组。此种组成原理以后逐步发展成为机构结构学的理论基础。

图 1.1 是按阿苏尔组成原理将机构分解成基本组的图形。

由机械原理课程知,机构自由度与原动件数目是相等的,因此若在图 1.1 的机构中将原动件和机架分离出来,则剩下的是一个自由度为零的从动件杆组。这个从动件杆组还可以拆分成更小的自由度为零的三个杆组,这三个不可再拆分的自由度为零的杆组称为基本组(也称阿苏尔组)。由此可以认为:图示机构是依次将基本组 3、2、1 联接到原动件和机架上而形成的。这就是阿苏尔机构学派所提出的机构组成原理。

根据这一结构理论,当设计新机构时,可以按照将一个个基本组依次联接到原动件和

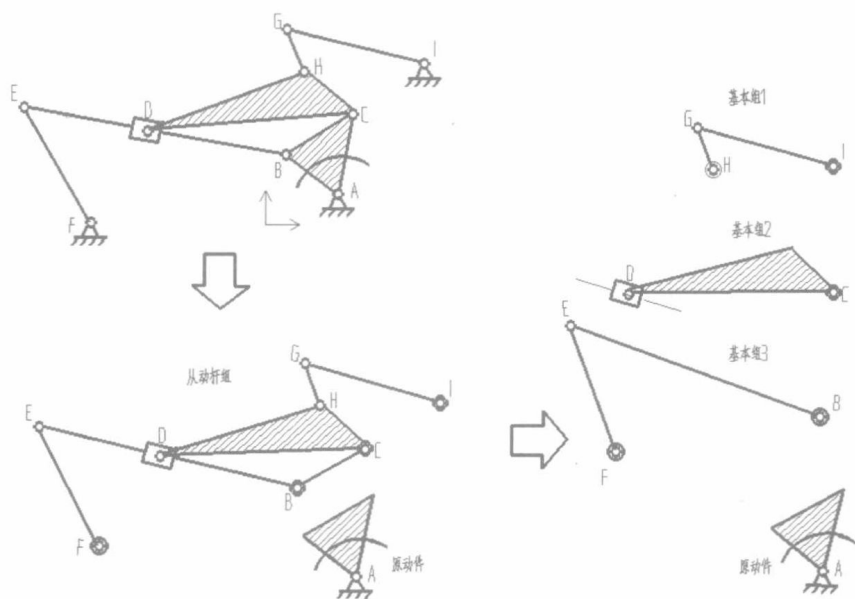


图 1.1

机架上去的过程进行;反之,对已有机构进行运动分析或力分析时,将基本组一个个拆下来,然后按基本组的级别采用相应的规范化方法进行分析。

拆分基本组应遵循如下原则进行:

- 1) 沿传动路线,由离原动件最远的构件处开始拆分;
- 2) 拆下来的杆组必须是不可再拆分的最简单的自由度为零的杆组;
- 3) 当拆下一部分杆组后,剩下部分仍应是一个自由度与原机构相同的完整机构;
- 4) 基本组内不含机架,拆分到最后剩下的是联接于机架的原动件。

1.2 基本组的属性与分类

1.2.1 基本组的属性

1) 由于基本组是不可再拆分的自由度为零的杆组,因此其构件数 n 和运动副(指低副)数目 p 之间必有如下关系

$$3n - 2p = 0 \tag{1.1}$$

按 n 、 p 必为整数的要求,则有以下各种搭配

$$\left. \begin{array}{l} n = 2 \quad p = 3 \\ n = 4 \quad p = 6 \\ n = 6 \quad p = 9 \\ \dots\dots \end{array} \right\} \tag{1.2}$$

2) 基本组具有运动的确定性。这一属性可由其自由度为零来说明。自由度为零意味着基本组没有独立运动的可能性,只要基本组中与外部相联接的运动副在某瞬时已有

确定的位置,则基本组中各构件的位置在该瞬时也必是确定的,因此该瞬时的速度、加速度也是确定的。

3) 基本组具有力学静定性。由机械原理课程知,转动副约束反力有大小方向两个未知数,移动副约束反力有大小、作用点两个未知数,所以 p 个低副共有 $2p$ 个未知数;而每个构件可列出三个独立的力平衡方程式, n 个构件可列出 $3n$ 个方程式。按式(1.1)有 $3n = 2p$, 这说明基本组中约束反力的未知数数目与力平衡方程数目相等,故必为静定的。

1.2.2 基本组的级和序

基本组的分类有几种不同的学说,目前广泛应用的是前苏联科学院院士阿尔托包列夫斯基(Артоболевский)学说。此学说是按基本组中存在的封闭廓形的最多边数来分级,按与外部相联接的运动副数目来分序进行分类。图 1.2 表示了三种基本组分级分序的例子。

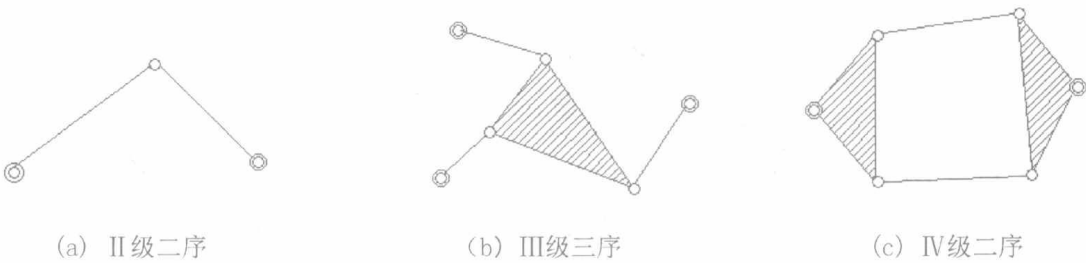


图 1.2

图 1.3 是一些较为常见的 II、III、IV 级基本组的结构型式。

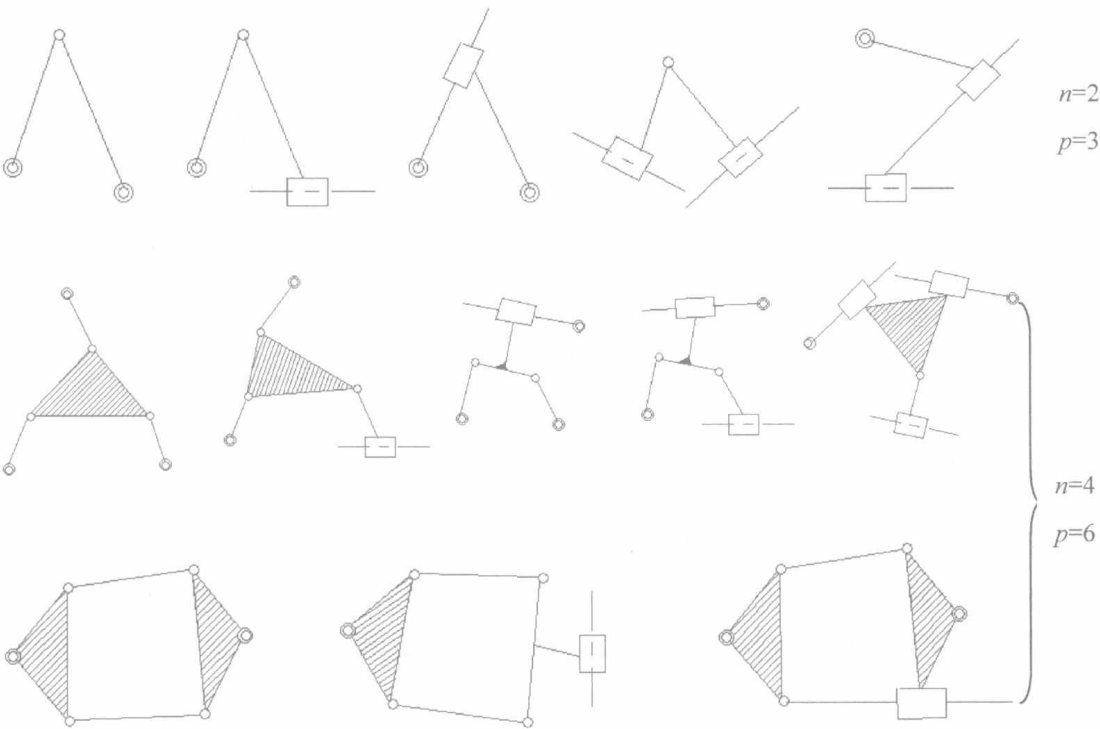


图 1.3

图 1.4 为几种较为复杂的基本组结构型式。

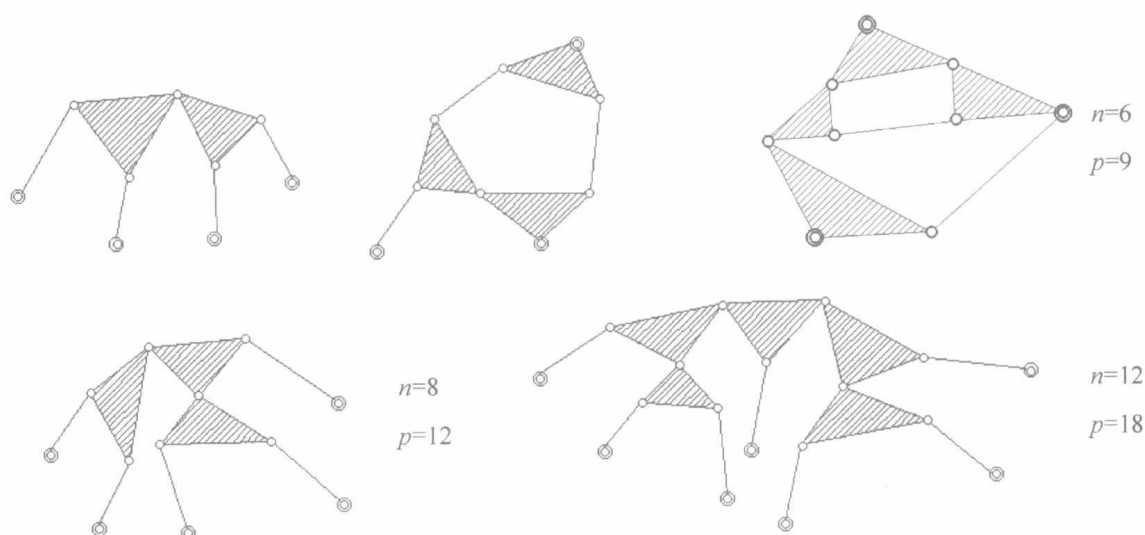


图 1.4

目前机械中还广泛应用着液压或气动的动力源。在这种情形下,往往是原动件不与机架相连,而动力源存在于基本组中的液压油缸或气缸之中,这种带有动力源的基本组称为有源基本组。有源基本组是普通基本组的推广和延伸,其自由度已不再为零,自由度与缸数相等。图 1.5 是几种不同级别的有源基本组。

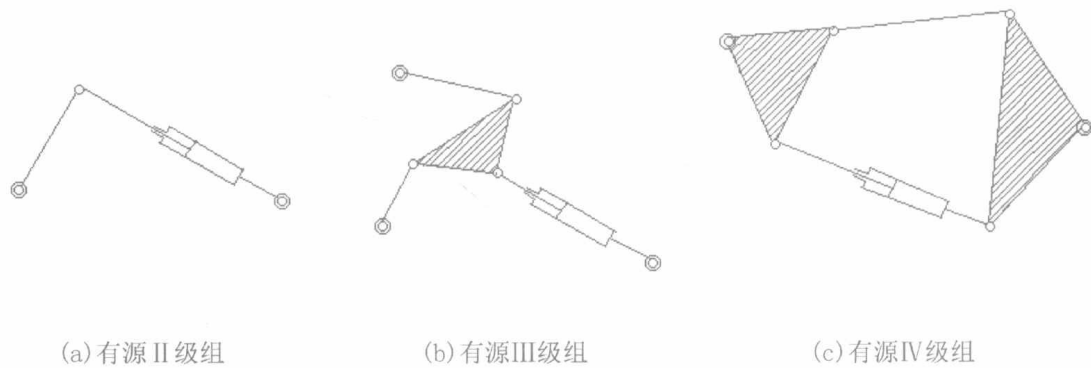


图 1.5

1.3 机构的级别

机构的级别按拆分出来的若干基本组中的最高级别的基本组来确定。例如,图 1.6 中的机构,可以拆分出一个 II 级基本组和一个 III 级基本组,则机构属于 III 级机构;而图 1.7 所示的液压式铲斗机构,可拆分出四个 II 级基本组,其中二个属于有源 II 级基本组,因此该机构尽管结构比较复杂,仍属于 II 级机构。

上面介绍的全是低副机构。如果机构中尚含有高副,则为了分析研究的方便,可根据

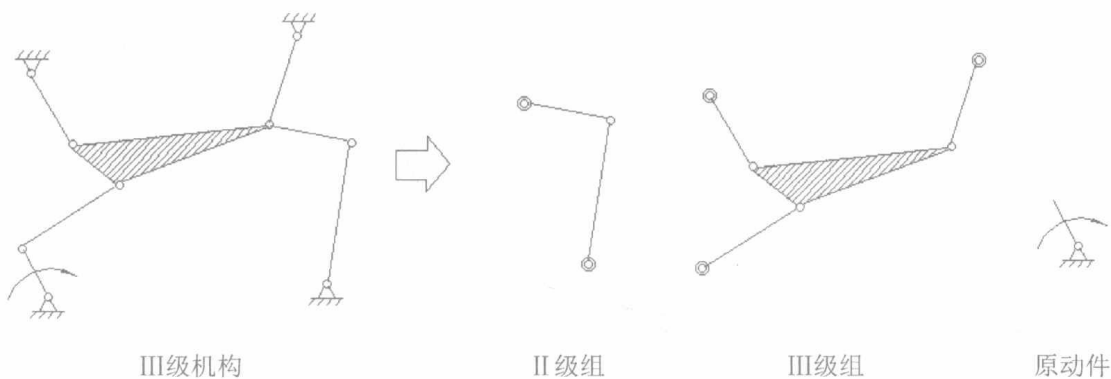


图 1.6

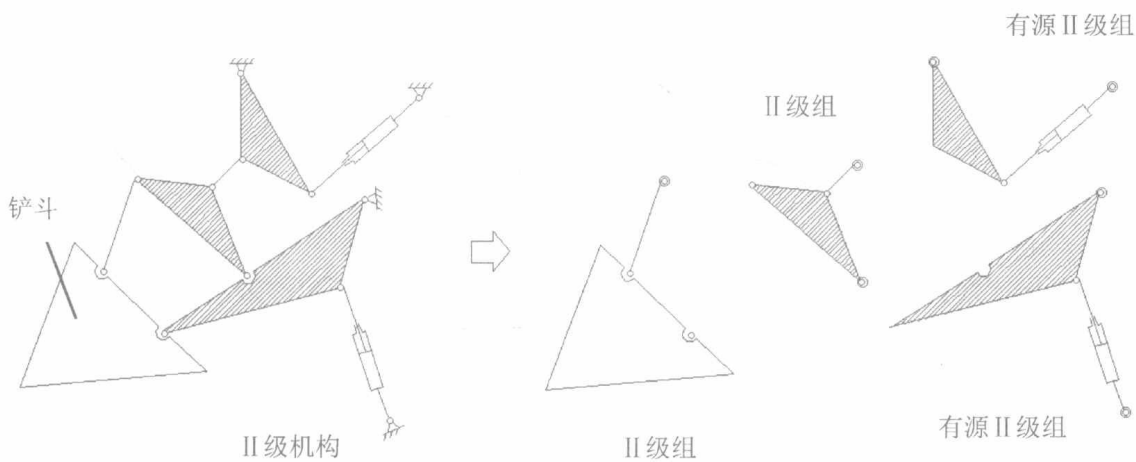


图 1.7

一定的条件将机构中的高副虚拟地以低副来代替,然后再用上述的基本组分解和结构的分类方法确定机构的级和序。下面介绍以低副代替高副的方法。

1.4 高副低代

用低副代换高副必须满足下列 2 个条件:

- 1) 代替前后的自由度不变;
- 2) 代替前后机构中各构件的瞬时速度和瞬时加速度与原机构相同。

根据前一个条件,一个高副显然只能用一个虚拟构件和二低副来替代,因为它们具有相等的约束数;根据第二个条件,若高副元素是曲线的,应在曲率中心处虚拟一个转动副;若高副元素为直线的,应虚拟一个移动副。

例如,图 1.8(a)所示的高副元素为圆,则在圆心 O_1 、 O_2 处虚拟加入两个转动副,并以虚拟构件 3 相连,得一铰链四杆机构。由于 O_1 、 O_2 两点间距离仍保持 $R_1 + R_2$ 的恒定数值,故低代机构中构件 1、2 的瞬时位置、速度、加速度均与原机构相同。图(b)的高副元素

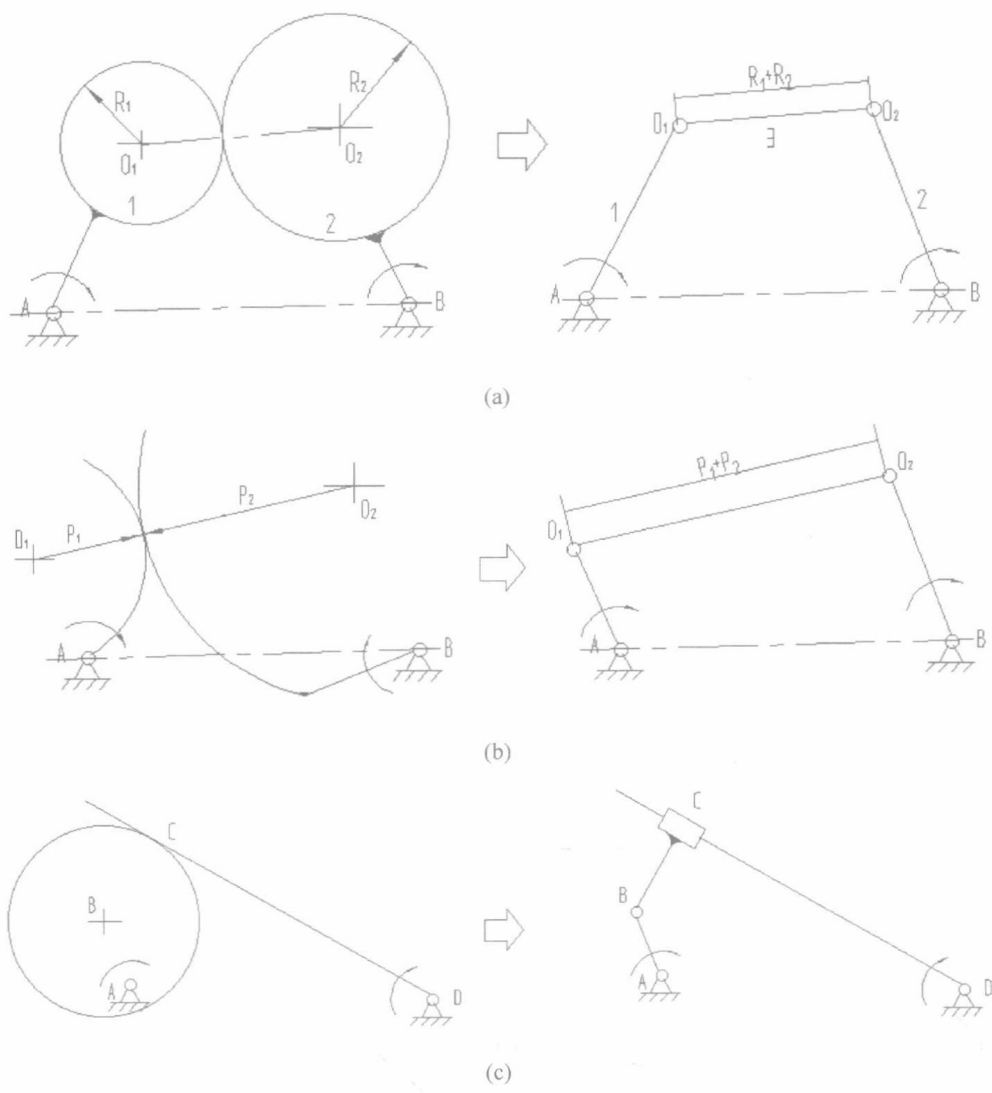


图 1.8

是变曲率的曲线,则右边的替换低副机构具有瞬时的性质,当机构位置不同时,其低副替代机构的尺寸将发生变化。图(c)所示的有直线高副元素的,则由于直线可以看成为曲率中心在垂直于直线元素的无穷远处,因此虚拟转动副应改成虚拟移动副。

按照上述的原则和方法,不难将各种不同情况的高副用虚拟的构件和低副来替换,从而高副机构等价地被替代成低副机构。

2 空间机构自由度计算

在机械原理课程中主要介绍了平面机构的自由度计算。本章重点讨论空间机构的自由度计算问题,而平面机构可以看成为空间机构的一种特例。对于空间机构,当两个构件通过接触组成运动副后,其相对运动受到的约束最多为五个,也即形成运动副的两构件的

剩余相对运动自由度为 1~5。因此,空间机构中的运动副,可以按剩余自由度的数目分成 I、II、III、IV、V 五类:自由度为 1 的称为 I 类运动副,自由度为 2 的运动副称为 II 类运动副,依次类推来定义其余各类运动副。图 1.9 为常见的几类运动副,图中表示出了它们的简图符号和字母符号。其中转动副 R 、移动副 P 、螺旋副 H 都是 I 类运动副;圆柱副 C 和球销副 S' 属于 II 类副;球面副 S 则是 III 类副。

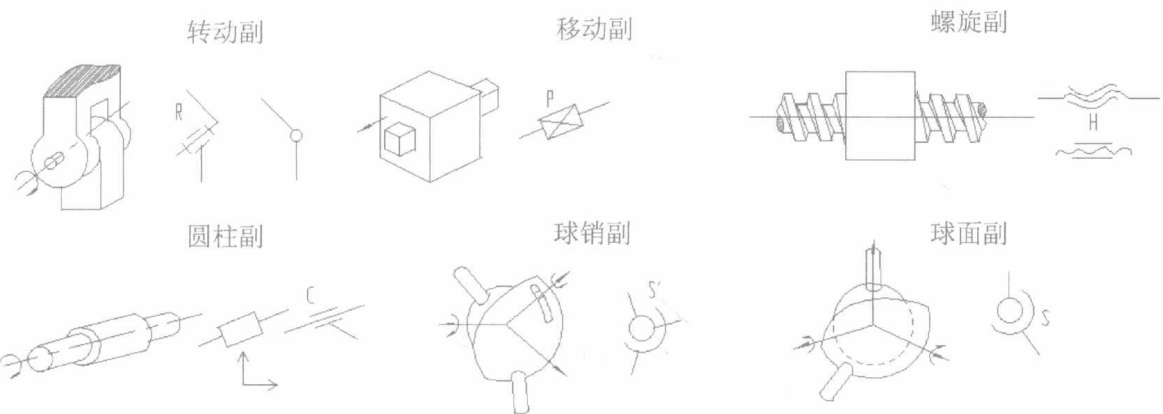


图 1.9

构件用运动副相联接以后,便组成了运动链。运动链构成封闭环路的称为闭链,不构成封闭环路的称为开链。在闭环运动链中,按封闭环路的数目,又可分成单环闭链、双环闭链或更多环的闭链。图 1.10 中,(a)图为单环闭链,(b)图为双环闭链,(c)图是由开链组成的一种机械手机构图,其外形图如(d)图所示。

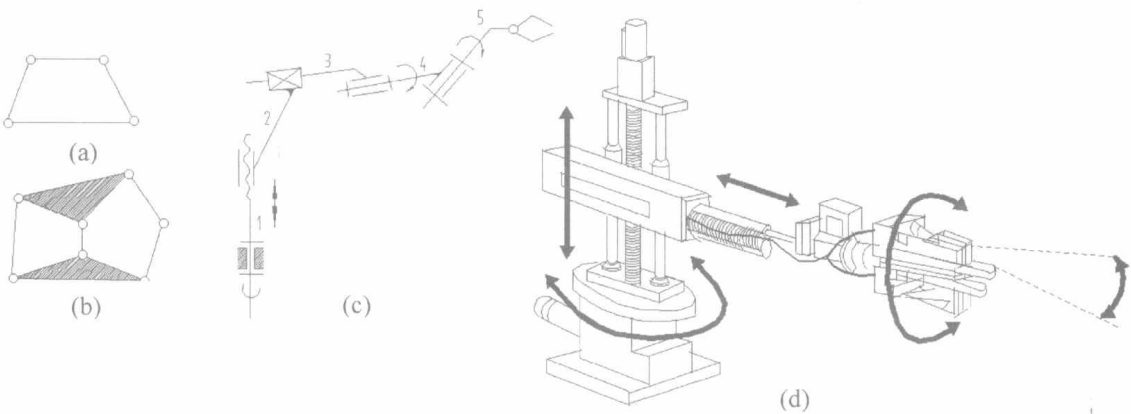


图 1.10

2.1 空间机构自由度的一般关系式

在空间运动链中,固定其中一构件为机架,并给出与机构自由度数相同数目的原动件,则就构成了一个具有确定运动的机构。为了正确确定机构中应给出的原动件数目,必须首先对拟定的机构计算其自由度。

设机构中的可动构件数目为 n , 第 i 类的运动副数目为 $p_i (i = 1、2、\cdots 5)$, 则因每个构件在空间有 6 个自由度, 第 i 类运动副受 $6 - i$ 个约束, 机构自由度应等于可动构件自由度总和减去各类运动副所受约束数的总和, 故有机构自由度关系式

$$F = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5 \tag{1.3a}$$

或

$$F = 6n - \sum_{i=1}^5 (6 - i)p_i \tag{1.3b}$$

上式也可写作

$$F = 6n - (6 \sum_{i=1}^5 p_i - \sum_{i=1}^5 ip_i)$$

由于 $\sum_{i=1}^5 p_i = p$, p 为机构中的运动副总数, 代入上式可得

$$F = 6(n - p) + \sum_{i=1}^5 ip_i \tag{1.4}$$

式(1.3)和(1.4)便是空间机构自由度的一般关系式。

但是, 由于空间机构有开式的、闭式的, 闭式机构中又有单环的或多环的, 而且还有许多特殊的问题需要加以考虑, 计算比较复杂, 因此下面再分别对不同情况进行深入的分析。

2.2 开链机构的自由度计算

在开链机构中, 每个可动构件都是以一个运动副与其他构件依次相联, 因此机构中可动构件数 n 必与运动副总数 p 相等, 即 $n = p$, 故由式(1.4)可写出开式机构的自由度计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^5 ip_i \tag{1.5}$$

上式中的 ip_i 实际上就是第 i 类运动副的总自由度, 因此上式也可改写成

$$F = \sum_{j=1}^p f_j \tag{1.6}$$

式中的 f_j 是第 j 个运动副的自由度。式(1.5)、(1.6)都表示同一含义, 即开链机构的自由度等于机构中全部运动副自由度的总和。

例一 试计算图 1.10(c)所示的机械手机机构的自由度。

解 由机构图可知, 它是由五个 I 类副联接各构件所组成的一个开式机构, 用运动副的规定字母符号, 称为 RHPRR 机构。显然, 因有 $p = p_1 = 5$, 故

$$F = \sum_{j=1}^5 f_j = 5 \times 1 = 5$$

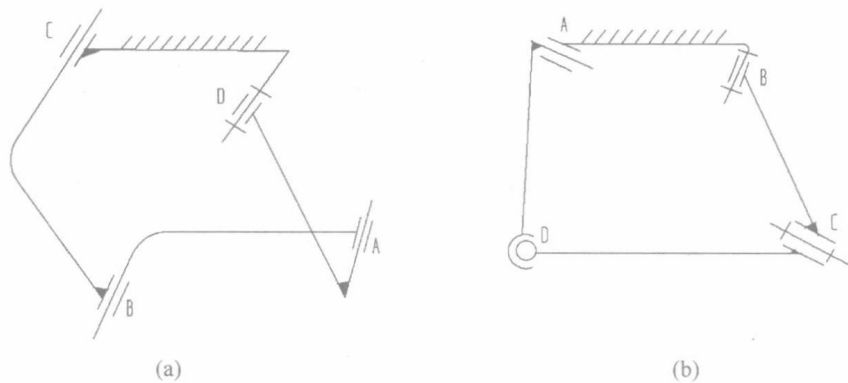


图 1.12

为Ⅲ类副,故机构自由度 $F = \sum_{j=1}^4 f_j - 6 = (1 \times 2) + (2 \times 1) + (1 \times 3) - 6 = 1$ 。

2.4 具有公共约束的单环闭链空间机构自由度计算

在某些机构中,由于运动副或构件几何位置的特殊配置,使机构中全部构件共同失去了某些运动的可能性,这就是所谓机构中的公共约束。举一个显见的例子来说,对于平面机构,由于运动副的特殊配置,各构件只能作平面运动,因此全部构件共同失去了三个自由度,即受到了三个公共约束。

对于有公共约束的空间机构,在计算自由度时需要式(1.7)和(1.8)进行修正。

设空间构件中的公共约束数为 m ,则该机构中任一可动构件只有 $(6 - m)$ 个自由度,而每个运动副的实际约束数应从原约束数中减去公共约束数 m ,运动副的类别号 i 也就不可能大于 $5 - m$,即 $i \leq 5 - m$,于是式(1.7)修正为

$$F = \sum_{i=1}^{5-m} i p_i - (6 - m) \tag{1.9}$$

式(1.8)修正为

$$F = \sum_{j=1}^p f_j - (6 - m) \tag{1.10}$$

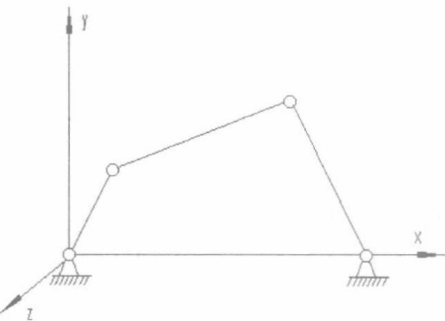


图 1.13

公共约束数 m 对于简单的机构可以用直接观察法来判定。

例一 计算图 1.13 所示铰链四杆机构的自由度。

解 此题按机械原理课程中讲的平面机构自由度计算公式计算是一个十分简单的问题,现将它作为空间机构的特例来处理当然也可以的。此机构的公共约束数 $m = 3$,全部构件没有沿 z 方向运动和绕