

精密机械设计基础

(修订版)

北京工业学院盛鸿亮 等编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是1981年出版的《精密机械设计基础》的修订版。主要内容为仪器仪表中机械运动系统的常用机构、零部件的选择、设计的基本原理和一般方法。全书共十四章，包括机构的组成和结构、机构中的力和效率、平面连杆机构、凸轮与间歇机构、螺旋传动、齿轮传动、挠性传动、弹簧、轴与联轴器、支承与轴系、直线运动导轨、限动器、以及机构精度概论、精密机械结构设计概论。

本书突出了设计中的精度观点和结构观点，反映了仪器仪表中精密机械的设计特点，并尽可能反映精密机械设计中的新部件、新结构、新标准和新方法。

本书可作为工科高等院校和中等专业学校仪器仪表类有关专业的教学用书或教学参考书，也可作为有关专业设计人员的技术参考书。

精密机械设计基础

(修订版)

北京工业学院 盛鸿亮 等编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张24³/₄ 575千字

1986年12月第二版 1986年12月第二次印刷 印数：11,201—13,200册

统一书号：15034·2151 定价：4.05元

前 言

本书是根据工科高等院校仪器仪表类工程光学、光电技术、激光技术、自动控制等专业的教学需要，在长期教学和技术实践的基础上，对1981年出版的《精密机械设计基础》一书进行修订的。

精密机械的内容和涵义十分广泛，可能有各种不同的理解，但作为工科高等院校有关专业的教学用书或教学参考书，根据专业教学计划和培养目标以及精密机械学科服务对象的需要，其涵义应该限定在某一确定的范围之内。其内容应该尽量符合仪器仪表结构设计的特点和需要。

修订后的《精密机械设计基础》其内容以仪器仪表中机械运动系统的常用机构、零部件的选择、设计的基本原理和一般方法为主体，加强了常用机构功能原理和结构的分析、机构及零部件精度的分析以及结构设计理论和方法的分析；着重从运动关系、几何关系和精度观点、结构观点对精密机械设计中的有关问题进行讨论；而对设计中的强度、寿命等问题则仅从校核观点进行说明；并尽可能对近年来发展较快、应用日趋广泛的一些零部件、机构的原理、结构和设计方法给予适当介绍。但由于精密机械设计涉及的问题很广，仪器仪表中所用的机构、零部件的种类也很多，而受有关专业教学计划中的前修基础、课程学时数以及教材篇幅所限，本书不可能对精密机械设计中的所有问题都深入、广泛地进行讨论。

本书修订中对有关名词、术语、定义和技术规范主要以现行国家标准为依据，并参照必要的部颁标准，同时贯彻了国家新的法定计量单位制。为了配合有关章节的理论分析和设计、计算方法，本书选编了一小部分例题。教学过程中所需要的思考题、习题及其例解，北京工业学院四系拟对原《精密机械习题和例解》修订、充实后另行出版。对本书修订中删去的部分章节以及其它未编入的内容可在实践性教学环节和工程技术实践中，参阅国防工业出版社将于1986年出版的《仪器仪表结构设计手册》，以引导和培养学员自学和运用设计手册及技术资料解决实际问题的能力。

本书由北京工业学院四系精密机械教研室盛鸿亮主编。参加本书修订和编写工作的有温业光(第六章)、王惠敏(第七、九、十、十二章)、裴先惠(第三、十一章)、曹友桂(第四章和附录)、盛鸿亮(第一、二、五、八、十三、十四章)。

本书承北京工业学院樊大钧教授审阅，并对本书修订后的主要特点给予了肯定。在此，谨向审阅人和曾参加原书编写的郭在德、丁伯瑜两同志以及编写和修订过程中在各方面给予支持和协助的同志，致以深切谢意。

由于编者水平和时间所限，本书修订后，错误和不妥之处仍在所难免，诚恳希望专家、院校的同行教师和读者批评指正。

编 者

1985年5月于北京

目 录

第一章 机构的组成和结构	1
§ 1 机构及其组成	1
§ 2 运动副及其性质	2
§ 3 机构运动简图	4
§ 4 机构的活动度	6
§ 5 确定机构活动度中的几个问题	9
§ 6 平面机构中高副与低副的转化	11
第二章 机构中的力和效率	13
§ 1 概述	13
§ 2 构件上的重力与重心	14
§ 3 约束反力与常见约束	18
§ 4 机构中的摩擦	20
§ 5 机械的效率与自锁	24
第三章 平面连杆机构	27
§ 1 概述	27
§ 2 四杆机构的基本形式及其演化	28
§ 3 四杆机构的基本特性	32
§ 4 图解法设计四杆机构	36
§ 5 常用四杆机构的传动特性	43
第四章 凸轮与间歇机构	49
§ 1 凸轮机构的功用和类型	49
§ 2 从动件的常用运动规律	52
§ 3 图解法设计盘形凸轮轮廓	58
§ 4 凸轮机构设计中的几个问题	61
§ 5 间歇运动机构	64
第五章 螺旋传动	72
§ 1 概述	72
§ 2 滑动螺旋的机构分析	76
§ 3 滑动螺旋设计参数的选择	81
§ 4 滑动螺旋的误差分析与精度	84
§ 5 滑动螺旋减少误差的方法与结构	92
§ 6 滚珠丝杠副的结构和性能	98
§ 7 滚珠丝杠副的结构参数和精度及其标记	105
§ 8 螺旋副零件的材料	109

第六章 齿轮传动	110
§ 1 概述	110
§ 2 齿轮啮合原理	112
§ 3 直齿圆柱齿轮传动	116
§ 4 其它形式的齿轮传动	130
§ 5 齿轮传动系统设计	139
§ 6 谐波齿轮传动简介	156
第七章 挠性传动	159
§ 1 基本知识	159
§ 2 绳传动	163
§ 3 弹簧带传动	164
§ 4 齿孔带传动	167
§ 5 齿形带传动	169
§ 6 链传动	177
第八章 弹簧	185
§ 1 概述	185
§ 2 拉伸与压缩螺旋弹簧	190
§ 3 扭转螺旋弹簧	202
§ 4 片簧与游丝	208
§ 5 温度双金属片	212
§ 6 弹簧特性误差与螺旋弹簧的允许偏差	215
第九章 轴与联轴器	219
§ 1 轴	219
§ 2 联轴器	224
第十章 支承与轴系	238
§ 1 概述	238
§ 2 滑动摩擦支承	238
§ 3 流体静压支承	246
§ 4 滚动摩擦支承	251
§ 5 精密轴系	266
第十一章 直线运动导轨	275
§ 1 概述	275
§ 2 滑动摩擦导轨	276
§ 3 液体静压导轨简介	283
§ 4 滚动摩擦导轨	285
第十二章 限动器	291
§ 1 概述	291
§ 2 螺旋限动器	291
§ 3 垫圈限动器	293

§ 4	齿轮挡销限动器	295
§ 5	齿轮凸块限动器	298
第十三章	机构精度概论	306
§ 1	基本概念	306
§ 2	误差分类和机构精度的含义	307
§ 3	随机误差的特性	310
§ 4	系统误差的特性	313
§ 5	误差的合成	315
§ 6	机构精度计算的基本方法	319
§ 7	尺寸链分析	323
§ 8	消除和减少误差的一般措施	330
第十四章	精密机械结构设计概论	334
§ 1	基本概念	334
§ 2	精密机械结构设计的一般方法	336
§ 3	运动学原理在结构设计中的应用	339
§ 4	构件的强度与刚度校核	344
§ 5	材料及其热处理方法的选择	346
§ 6	精密机械的结构工艺性	349
附录	公差与配合	357
§ 1	基本概念	357
§ 2	标准公差与基本偏差	358
§ 3	公差与配合国家标准的应用	376
附表	本书常用计量单位的名称符号	387
	主要参考文献	388

第一章 机构的组成和结构

§ 1 机构及其组成

一、机构的概念

机构是一种人为的各部分之间具有确定相对运动关系的实物组合，其作用是传递或变换运动。例如机械测微仪的工作原理就是利用杠杆-齿轮机构，在测量时将测量杆感受的微量线位移变换为角位移，并按一定的传动比，将微量角位移传递放大为指针的角位移，然后，通过指针与标尺分划的相对位置，指示测量结果。其结构简图如图 1-1 所示。

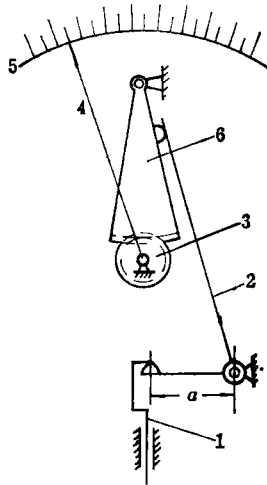


图1-1 机械测微仪简图

1—测量杆；2—杠杆；3—小齿轮；4—指针；5—标尺；6—扇形齿轮。

同机器一样，在仪器仪表和精密机械中，机构也是最重要的组成部分，没有机构便不成机械。

二、机构的组成

组成机构的各相对运动部分称为构件。构件可以是单一的零件，也可以是由若干彼此不能产生相对运动、刚性连接的零件所组成。构件与零件的区别在于：构件是运动的单元，而零件则是制造的单元。

机构中固定不动或相对固定不动、支持运动部分的构件称为机架，或称固定构件。当整个机构或随其它部分相对于地球运动时，通常仍将机架视为相对静止的，即仍以机架为基准来研究机构各部分的相对运动关系。

机构中所有相对于机架运动的构件均称为运动构件。受驱动外力直接作用的运动构件称为原动件，或称为起始构件。起始构件总是直接与机架相连。在起始构件的推动下，其余所有被推动的构件均称为从动件。

§ 2 运动副及其性质

一、运 动 副

机构上的每一构件至少必须与另一构件相连接，而这些构件之间的连接并不形成刚性系统，亦即这些互相连接着的构件之间仍保留有一定的相对运动。凡使两构件直接接触而又能产生一定相对运动的连接称为运动副。构件与构件之间的这种活动连接，不外是通过点、线、面的接触来实现的。两构件上参与接触的点、线、面称为运动副元素。

运动副按接触情况的不同分为低副和高副。凡为面接触的运动副称为低副。例如轴颈与轴承套接触构成的低副又称转动副，滑块与导路接触构成的低副又称移动副。凡为点或线接触的运动副称为高副。例如球轴承的钢球与内、外圈接触构成的高副是属于点接触，互相啮合的一对轮齿的接触构成的高副属于线接触。

若干个构件用运动副连接起来以后，称之为运动链。首末两构件直接相连的运动链称之为封闭运动链。若把封闭运动链中的一个构件加以固定，而且其中的一个或几个构件按已知规律相对于固定构件进行运动时，其余构件均作完全确定的运动，这样的封闭运动链就成为机构。

二、构件的自由度

决定平面运动构件位置的参变数有三，如图 1-2 所示，即其上任一点 A 的两个坐标 x 和 y 及其上任一直线 AB 的倾斜角 α 。当三个参数变化时，构件相应地有三个独立运动，即沿 X 、 Y 两轴的移动和绕 A 点转动。构件的这种独立的运动称为它的自由度，换言之，自由度即为决定构件位置的独立参变数，亦即平面运动的自由构件具有三个自由度。而决定空间运动构件的位置，需要六个独立参变数，分别为 x 、 y 、 z 和 α 、 β 、 γ ，如图 1-3 所示。亦即空间运动构件对任一选定的坐标系都具有六个自由度，分别为沿 X 、 Y 、 Z 三轴的移动和绕 X 、 Y 、 Z 三轴的转动。由于空间运动构件所具有的六个自由度不随坐标系的有关假定和选择而改变，由此可以导致空间任一构件相对于另一构件都具有六个自由度，原因是可以认为所选择的坐标系对于两个构件中之一是固定的。

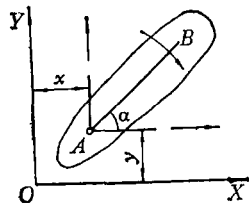


图1-2 平面运动构件的自由度

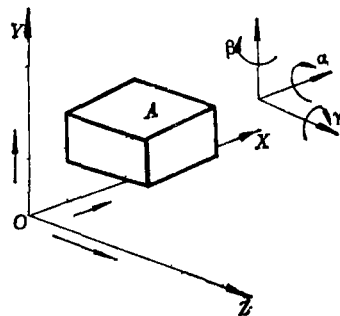


图1-3 空间运动构件的自由度

三、运动副的性质

构成运动副的两构件之间的相对运动形式是由它们的连接方式确定的，即是由运动副的性质确定的。当两构件组成运动副以后，由于两构件直接互相接触，使其相对独立运动受到某些限制，从而使其自由度随之减少。若使机构各构件按照所要求的运动规律具有确定的运动，每一构件都必须限制其不需要的自由度，保留所要求的自由度。这种加于构件独立运动的限制称为约束。

要限制构件的一个自由度，就应该相应地有一个约束，即每加上一个约束，构件便失去一个自由度。可见，构件自由度减少的数目等于组成运动副时所形成的约束数目。在运动副中，一构件对于另一构件所形成的约束数目只能是整数并应小于6，因为当约束数等于自由度数的情况下，两构件之间就失去了相对运动，亦即运动副变成了两构件的刚性连接。同样，约束数也不能小于1，因为当约束数等于零时，两构件就不能接触，运动副就不存在了，于是，空间只剩下两个互不相关的运动物体。因此加于运动副每个构件相对运动上的约束数，在1至5的范围内变化。所以，运动副中构件的自由度数 W ，在相对运动中，可用下式表示：

$$W = 6 - S$$

式中 S ——加于运动副上的约束数。

由此可知，在相对运动中运动副的自由度数 W ，同样也在1~5的范围内变化。

由于运动副中构件的接触情况不同，所形成的约束数及所限制的自由度数也就不同。根据加于构件相对运动上的约束数，所有运动副可分为五级。运动副的级数可由下式求得：

$$S = 6 - W$$

不同级数的运动副如图 1-4 所示。

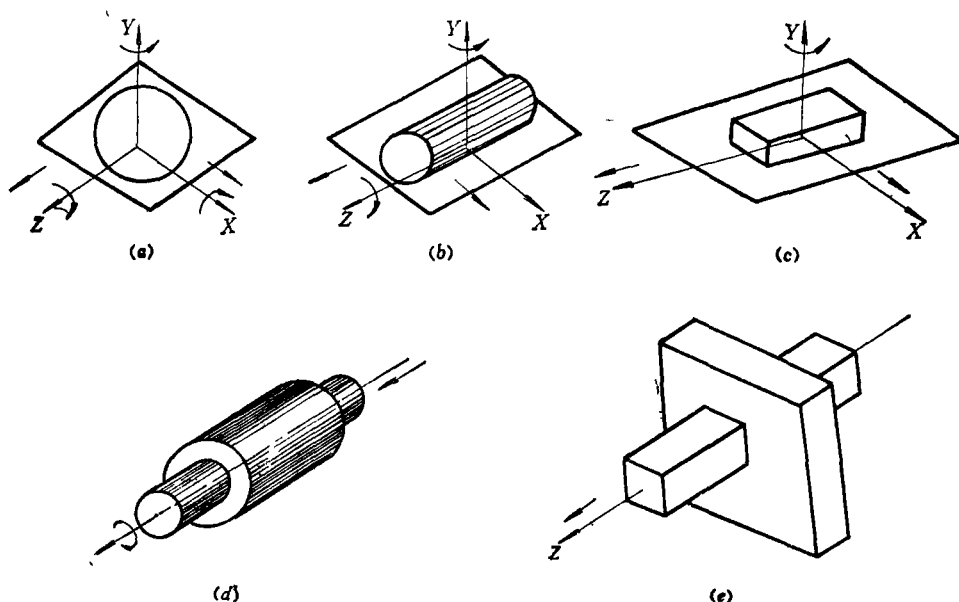


图1-4 不同级数的运动副

球与平面接触所组成的运动副 (见图1-4(a)), 球的运动为绕 X 、 Y 、 Z 三轴的转动及沿 X 、 Z 两轴的移动, 即球具有五个自由度, 运动副的约束数为

$$S = 6 - W = 6 - 5 = 1$$

故应属于 I 级运动副。

圆柱体表面与平面接触所组成的运动副 (见图1-4(b)), 圆柱体的运动为绕 Y 、 Z 两轴的转动及沿 X 、 Z 两轴的移动, 即圆柱体具有四个自由度, 运动副的约束数为

$$S = 6 - W = 6 - 4 = 2$$

故应属于 II 级运动副。

平行六面体表面与平面接触所组成的运动副 (见图1-4(c)), 平行六面体的运动为绕 Y 轴的转动及沿 X 、 Z 两轴的移动, 即平行六面体具有三个自由度, 运动副的约束数为

$$S = 6 - W = 6 - 3 = 3$$

故应属于 III 级运动副。

圆柱外表面与圆筒内表面接触所组成的运动副 (见图1-4(d)), 圆柱的运动为绕轴线的转动及沿轴线的移动, 即圆柱具有两个自由度, 运动副的约束数为

$$S = 6 - W = 6 - 2 = 4$$

故应属于 IV 级运动副。

棱柱外表面与棱柱内表面接触所组成的运动副 (见图1-4(e)), 棱柱体的运动为沿 Z 轴的移动, 即棱柱体具有一个自由度, 运动副的约束数为

$$S = 6 - W = 6 - 1 = 5$$

故应属于 V 级运动副。

属于 I 至 V 级的其它运动副不一一介绍。

§ 3 机构运动简图

实际机构的构件其形状和结构往往是很复杂的, 在分析机构运动时, 如果将那些与运动无关的构件外形和构造同时考虑在内, 其分析过程将会异常复杂和困难。在设计新机构时, 通常也是首先根据运动要求确定构件的主要尺寸, 然后再进一步考虑它们的形状和具体构造。因此, 为了使问题简化, 便于研究机构运动, 可以先不考虑那些与运动无关的因素, 例如构件的外形、截面尺寸和形状, 以及组成构件的零件数目、运动副的具体构造等, 仅根据构件之间的连接特征和与运动直接有关的尺寸, 用简单的线条和符号来代表构件和运动副, 并按一定比例表示各运动副的相对位置。这种说明机构各构件之间相对运动关系的简单图形称为机构运动简图。

此外, 仪器仪表中应用的机构类型也很繁多。同一类型的机构及其相互组合, 在不同的仪器仪表中, 尽管它们的外形、构造和功用可能各不相同, 但从运动学来考察, 许多仪器仪表中的机构都有共同之点, 它们的主要传动机构的运动简图是相同的。因此, 由实际机构画出运动简图是一个反映运动本质的、由具体到抽象的过程。正确绘制机构运动简图, 不仅是对机构进行运动分析必不可少的手段, 也是对机构进行结构分析必不可少的手段。亦即进行机构设计的首要步骤。

在平面机构运动简图中, 运动副的表示方法如下:

两构件组成转动副时，如两构件均为活动构件，其表示方法如图1-5(a)所示。如两构件之一为机架，则应将代表机架的构件1画上斜线，如图1-5(b)或(c)所示。当两构件作相对摆动，且转动副的回转半径较大时，即形成扩大的转动副。它往往由弧形滑块和圆弧槽组成，其表示方法如图1-5(d)所示。由于构件2(弧形滑块)相对于机架1(圆弧槽)的运动为绕O点的转动，所以这种运动副相当于两构件组成以O点为轴心的转动副。亦即与图1-5(c)具有完全相同的性质。

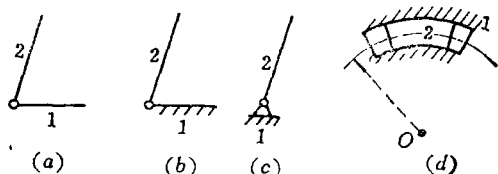


图1-5 平面机构转动副表示法

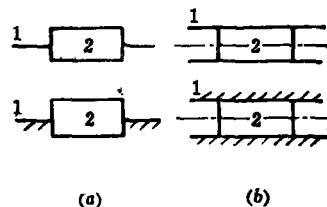


图1-6 平面机构移动副表示法

两构件组成移动副时，其表示方法与上述转动副类同，也用画有斜线的构件代表机架。如图1-6所示。

两构件组成高副时，在简图中应画出两构件接触处的轮廓形状。平面凸轮高副的表示法如图1-7(a)所示，平面齿轮高副的表示法如图1-7(b)所示。

在平面机构运动简图中，构件的表示方法如下：

由于构件的相对运动是由运动副决定的，因此，在用简图表示构件时，只需将构件上的所有运动副元素按照它们在构件上的位置用符号表示出来，再用简单线条将它们联成一体。对于具有两个运动副元素的构件，不论其外形如何，均可用一条直线连接两个运动副元素，如图1-8所示。其中图1-8(a)所示为具有两个转动副元素的构件；图1-8(b)所示为具有两个移动副元素的构件；图1-8(c)所示为具有一个转动副元素和一个移动副元素的构件；它的另一种习惯表示形式，即把导路画在通过转动副中心的位置，

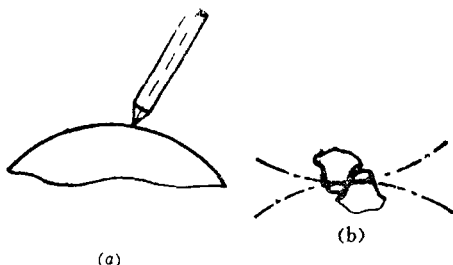


图1-7 平面机构高副的表示法

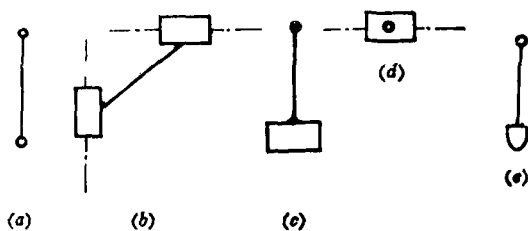


图1-8 具有两个运动副元素的构件表示方法

如图1-8(d)所示。图1-8(e)所示为具有一个转动副元素和一个高副元素的构件。为了准确反映构件原有相对运动，转动副简图中的圆心必须与相对回转轴线重合；移动副简图中的导路必须与相对移动的方向一致；高副简图中轮廓曲率中心的位置必须与构件的实际轮廓相符。

对于具有三个运动副元素的构件，可用三条直线连接三个运动副元素组成的三角形来表示。其转动副圆心的位置和移动副导路的方向都必须与实际构件一致或成比例。为了表明三个运动副元素是在同一构件之上，应将两条直线相交的各部位涂以焊缝记号，或

在三角形中间画上剖面线。如图1-9(a)和(b)所示。如果三个转动副元素位于一条直线上,此构件的表示方法如图1-9(c)所示。

对于具有 N 个运动副元素的构件,同理,可用 N 边形表示。例如图1-10所示即为具有三个转动副元素和一个移动副元素的构件表示法。

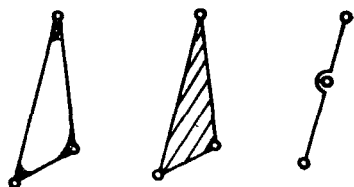


图1-9 具有三个运动副元素的构件表示方法

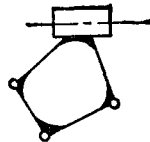


图1-10 具有 N 个运动副元素的构件表示方法

此外,在机构运动简图中,有些构件常用习惯表示方法。例如凸轮和滚子,通常习惯画出它的全部轮廓,如图1-11所示。

对于圆柱齿轮啮合,除可用图1-12(a)所示的表示方法外,还习惯于用它的一对节圆来表示,如图1-12(b)所示。或在节圆上再画出一对共轭齿廓,如图1-12(c)所示。

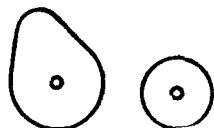


图1-11 凸轮和滚子习惯表示法

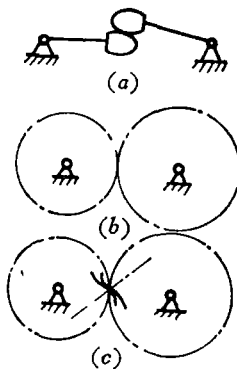


图1-12 圆柱齿轮啮合的表示法

§ 4 机构的活动度

若干构件以运动副联接而成的系统称为运动链。将运动链的一个构件固定为机架,当它的原动件作独立运动时,其余从动件即随之作确定的运动,这种运动链便成为机构。为了使机构各构件获得确定的相对运动,构件的总数,运动副的类型和数量以及原动件的数目必须符合一定的关系。

一、空间机构的活动度

如前所述,不加任何约束的空间运动构件具有六个自由度。若运动链由 K 个构件组成,当固定其中之一为机架后,所剩活动构件数为 $n = K - 1$ 。这些活动构件在未组成运动链之前共具有 $6n$ 个自由度。如果组成运动链时共加入 P_1 个I级副, P_2 个II级副, P_3 个III级副, P_4 个IV级副, P_5 个V级副,则加于运动链的约束总数应为 $5P_5 + 4P_4 + 3P_3 +$

$2P_2 + P_1$ 。因此, 该运动链相对于机架的自由度数量为

$$W = 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (1-1)$$

或

$$W = 6n - \sum_{j=1}^5 jP_j \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5)$$

运动链相对于机架的自由度称为机构活动度。计算机构活动度数量的公式称为机构的结构公式。上式为一般空间机构的结构公式。

机构的活动度也就是机构所具有的独立运动的数目。通常机构中的每个原动件相对于机架具有一个独立运动。因此, 机构的活动度数也就等于机构应当具有的起始构件数, 即原动件的数目。这就是机构具有确定相对运动的必要条件。

例如图1-13所示为自动驾驶仪操舵装置的空间四杆机构。机构中的活塞2相对于固定气缸1运动, 通过连杆3使摇杆4在机架1的支承内摆动。其中构件1和2组成圆柱



图1-13 自动驾驶仪操舵装置的空间四杆机构

副, 构件2和3及构件4和1各组成转动副, 构件3和4组成球面副。机构的示意图如图1-13(b)所示。因 $n = 3$, $P_5 = 2$, $P_4 = 1$ 及 $P_3 = 1$, 故由式(1-1)得

$$W = 6 \times 3 - 5 \times 2 - 4 \times 1 - 3 \times 1 = 1$$

该机构的活动度为1, 即需要一个起始构件。

式(1-1)仅适用机构的构件相对机架具有六个可能运动, 即没有任何一般的附加条件的情况下。对于某些机构, 若在所有构件的运动上, 附加上若干公共约束, 则每附加一个公共约束, 就要从机构每个活动构件的自由度数 and 每个运动副的约束数中相应地减去1。若机构具有 m 个公共约束, 其任一活动构件在组成运动链之前只具有 $(6 - m)$ 个自由度; 而在组成运动链时, 每个V级副的约束为 $(5 - m)$; 每个IV级副的约束为 $(4 - m)$; 其余类推。因此, 对于这种机构, 其活动度的计算式应修正为

$$W = (6 - m)n - (5 - m)P_5 - (4 - m)P_4 - \dots$$

或

$$W = (6 - m)n - \sum_{j=m+1}^5 (j - m)P_j \quad (1-2)$$

式中 m ——加于机构的公共约束数;

j ——运动副的级数。

公共约束数 m 之值可以是0、1、2、3、4, 当 $m = 5$ 时, 两构件之间已不可能组成任何运动副。 $m = 0$ 时的机构即一般空间机构。将 $m = 0$ 代入式(1-2)即可得到式(1-1)所示一般空间机构的结构公式。

二、平面机构的自由度

如前所述，平面运动构件具有三个自由度，故平面机构应具有三个公共约束。若将 $m = 3$ 代入式 (1-2)，即可得到一般平面机构的结构公式

$$W = 3n - 2P_5 - P_4 \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 知，平面机构仅由 IV 级副和 V 级副连接的构件组成。平面 V 级副一般为低副，即构件之间成表面接触，在平面机构中，或为转动副，或为移动副。而平面 IV 级副构件只具有在平面内转动和沿切线方向移动的两个自由度，构件间的接触或为线接触，或为点接触。如图 1-14 所示。故应属于平面高副。于是可用 P_L 代替 P_5 ，用 P_H 代替 P_4 ，则式 (1-3) 可写为

$$W = 3n - 2P_L - P_H \quad (1-4)$$

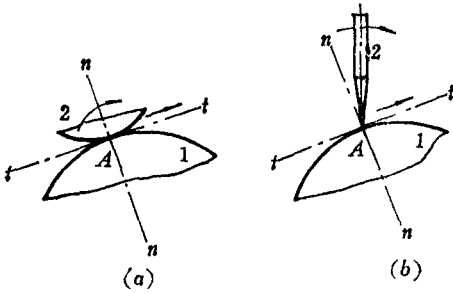


图1-14 平面高副形式

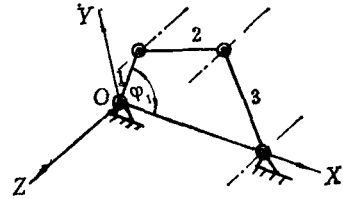


图1-15 铰链四杆机构的自由度

例如由平面 V 级转动副所组成的铰链四杆机构，所有的铰链轴线完全平行。如图 1-15 所示。现取坐标系 XYZ ，使 Z 轴的方向与运动副的轴线方向相重合。以运动副所有轴线完全平行的条件，加于机构各构件运动上的公共约束，使机构的构件不能绕 X 和 Y 轴转动及沿 Z 轴移动，只剩下三种可能的运动，即绕 Z 轴转动或绕平行于 Z 轴的轴转动，及沿 X 和 Y 轴的移动。实际上构件 1 和 3 的运动是绕平行于 Z 轴的轴转动，而构件 2 的运动为在 XY 平面内一方面绕垂直于 XY 平面的轴转动，同时沿 X 和 Y 轴的移动。此机构中 $n = 3$ ， $P_L = 4$ ， $P_H = 0$ ，由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

机构的自由度等于 1，它应当有一个原动件。设构件 1 为原动件， φ_1 表示确定机构位置的独立参变数，则每给出一个 φ_1 的数值，从动件 2、3 便有一个确定的相应位置。表明自由度等于 1 的机构在具有一个原动件时，即可获得确定的运动。

下面进一步讨论如果设计时给定的原动件数不等于机构的自由度时，可能出现的情况。

如果在图 1-15 所示的铰链四杆机构中，给定两个原动件（构件 1 和 3），即原动件数大于 W 时，则要求构件 3 一方面必须处于由原动件 1 所确定的位置，另一方面又能进行独立运动。这两方面的要求是相互矛盾的，因而不可能同时满足。必将导致整个机构卡住而不能运动。如果强迫两个原动件按照各自的规律运动，则机构中最薄弱的构件必将损坏。

图 1-16 所示为铰链五杆机构。 $n = 4$, $P_L = 5$, $P_H = 0$, 由式 (1-4) 可得

$$W = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 = 2$$

此机构的活动度为 2, 应当有两个原动件。若假设构件 1 和 4 为原动件, 参数 φ_1 和 φ_4 分别表示构件 1 和 4 的独立运动。由图可见, 每给定一组 φ_1 和 φ_4 的数值, 从动件 2、3 便有一个确定的相应位置。表明活动度等于 2 的机构在具有两个原动件时, 即可获得确定的运动。如果只给定一个原动件 (构件 1), 即原动件数小于 W 时, 则当 φ_1 给定后, 由于 φ_4 不确定, 构件 2、3 即可处于实线所示位置, 也可处于虚线所示位置或其它位置。因而机构的运动是不确定的。这种无确定运动的运动链则不能称为机构。

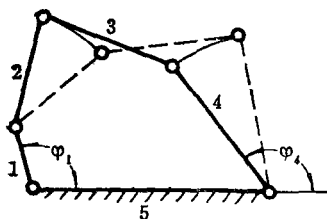


图 1-16 铰链五杆机构的活动度

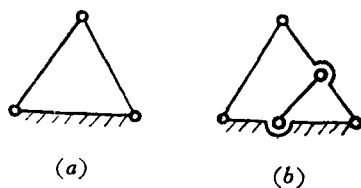


图 1-17 活动度 $W \leq 0$ 的运动链

图 1-17(a) 所示运动链中, $n = 2$, $P_L = 3$, $P_H = 0$, 由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 2 - 2 \times 3 - 0 = 0$$

表明该运动链为不能产生相对运动的刚性桁架。

图 1-17(b) 所示运动链中, $n = 3$, $P_L = 5$, $P_H = 0$, 由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 5 - 0 = -1$$

表明该运动链由于约束过多, 成为静不定桁架。

§ 5 确定机构活动度中的几个问题

确定实际机构的活动度时, 除首先画出机构运动简图外, 还应当注意以下几个问题。

一、复合铰链

图 1-18(a) 所示为构件 1 与构件 2、3 分别组成两个转动副。当两转动副轴线间的距离缩小到零时, 两轴线重合为一, 便得到如图 (b) 所示的复合铰链。图 (c) 所示为该复合铰链的侧视图。这种由三个构件组成的复合铰链包含两个转动副, 但在计算运动副的数目时往往容易错误地被当作一个转动副, 因此, 必须加以注意。不难推想, 由 m 个构件组成的复合铰链应当包含 $m - 1$ 个转动副。

例题: 确定图 1-19 所示直动仪机构的活动度

解: 此机构 B 、 C 、 D 、 E 四处都是由三个构件组成的复合铰链, 各具有两个转动副。所以此机构中 $n = 7$, $P_L = 10$, $P_H = 0$, 由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1$$

即此机构具有一个活动度。

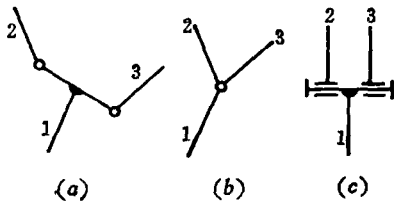


图1-18 复合铰链简图

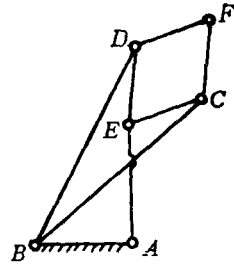


图1-19 直动仪机构的复合铰链

二、局部自由度

图1-20 (a) 所示为滚子从动杆凸轮机构。在凸轮与从动件之间安装圆柱形滚子的作用是减少高副接触处的磨损，但滚子绕其本身轴线的自由转动并不影响机构其它构件的运动。这种对整个机构运动无关的自由度称为局部自由度。假如将滚子与从动杆焊成

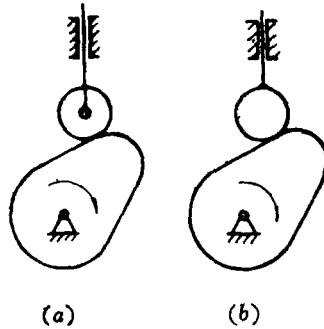


图1-20 凸轮机构中滚子从动杆的局部自由度

一体，如图1-20 (b) 所示。该机构的运动毫无改变，因此，在计算整个机构的活动度时，局部自由度应当除去不计。则此机构中， $n = 2$ ， $P_L = 2$ ， $P_H = 1$ ，由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$$

即只需给定一个构件 (凸轮) 的独立运动，该机构便具有确定的相对运动。

三、虚约束

在运动副所加的约束中，有些约束所起的限制作用是重复的。这种不起独立限制作用的约束称为虚约束。在计算机构的活动度时，虚约束应当除去不计。

图1-21 (a) 所示的铰链四杆机构中， $n = 3$ ， $P_L = 4$ ， $P_H = 0$ ，由式 (1-4) 得

$$W = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

因 O_1ABO_3 为一平行四边形， AB 始终平行于 O_1O_3 ，所以连杆 2 作平动，其上任一点的运动轨迹形状相同，连杆 2 上 M 点的轨迹应为以 N 为圆心、和以 MN 为半径的圆弧，且 $MN \parallel O_1A$ 。显然，如果在 M 、 N 之间加上一个构件和两个转动副，如图1-21 (b) 所示，则对机构的运动毫无影响，机构的活动度仍保持不变。但如运用式 (1-4) 对图 (b) 所示机构进行计算，则因 $n = 4$ ， $P_L = 6$ ， $P_H = 0$ ，由此得

$$W = 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$$

表明机构的自由度为零，这一结论显然是错误的。上述计算结果是由于增加一个构件 MN 引入 3 个自由度，增加两个转动副引入 4 个约束，因而，产生了一个虚约束所造成的。因此，在运用式 (1-4) 对这类机构进行计算时，应首先将产生虚约束的构件和运动副去掉，化成图 (a) 所示的形式，然后进行计算。

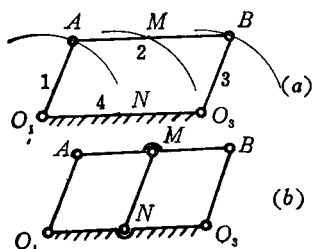


图1-21 铰链杆机构中的虚约束

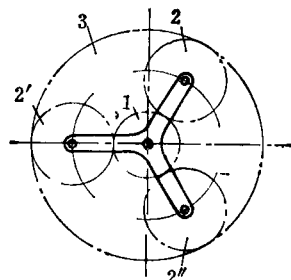


图1-22 机构对称部分的虚约束

平面机构的虚约束常出现于下列情况中：

(1) 被连接构件上的点的轨迹和机构上连接点的轨迹重合为一时，这种连接将会出现虚约束。图1-21 (b) 所示机构即属此例。

(2) 两构件构成多个移动副其导路互相平行时，只有一个移动副起约束作用，其余都是虚约束。例如图1-20 (a) 所示凸轮机构的运动简图，其直动从动杆与机架之间组成两个移动副，但其中只有一个起约束作用，故可用图1-20 (b) 所示的一个移动副来代替。

(3) 两构件构成多个转动副其轴线互相重合时，只有一个转动副起约束作用，其余都是虚约束。例如用两个以上同心安装的轴承，共同支持一根轴时，它们只能起到一个转动副的约束作用。

(4) 机构中对运动规律不起作用的对称部分。例如图1-22所示行星轮系，为了受力均衡，采用了三个行星轮对称分布的结构，实际上只需一个行星轮即可满足运动要求。此机构中，每增加一个行星轮，便增加两个高副和一个低副，从而引入一个虚约束。

虚约束虽不影响机构的运动，但却可以增加构件的刚性，改善其受力状况，因而在结构设计中被广泛采用。但只有在特定的几何条件下才能构成虚约束，如果满足不了这些特定的几何条件（如两构件组成的两个移动副不平行、两构件组成的两个转动副轴线不重合，或在图1-21 (b) 中 $MN \cong AO_1$ 等），虚约束就会成为实际约束，从而使机构卡住不能运动。

§ 6 平面机构中高副与低副的转化

为表明平面高副与平面低副间的内在联系，使平面低副机构的分析方法能适用于一切平面机构，就需要研究在平面机构中用低副（转动副或移动副）代替高副的方法，简称高副低代。为了使机构的运动保持不变，代替机构与原机构的自由度、瞬时速度和瞬时加速度必须完全相同。

图1-23 (a) 所示机构中，构件 1 和 2 为绕 A 和 B 回转的两个摩擦圆盘。这两个圆