

高等学校教材



机 械 原 理

(1965 年删订本)

南京工学院机械原理及机械零件教研组编

黄锡恺主编

本书系南京工学院机械原理及机械零件教研組編“机械原理”1963年版的刪訂本。刪訂时主要根据“少而精”的原则將原书中很多次要的或偏深的非基本內容作了刪減或压縮，并对某些問題的讲法予以簡化；但其編排系統并未改变。

本书除緒論外，共分两大篇。第一篇为机构的結構和运动学，內容包括平面机构的結構、平面机构的运动分析、平面連杆机构及其設計、凸輪机构及其設計、齿輪机构及其設計、輪系、其他常用机构，共七章；第二篇为机构和机器动力学，內容包括平面机构的动态靜力分析、运动副和机构中的摩擦、机器的效率、机器速度波动的調节、机械的平衡，共五章。

本书可作为高等工业学校机械类各专业的試用教科书，也可供非机械类各专业师生及工程技術人員参考。

机 械 原 理

(1965 年刪訂本)

南京工学院机械原理及机械零件教研組編

黄 锡 恺 主 编

北京市书刊出版业营业許可証出字第 119 号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

上 海 洪 兴 印 刷 厂 印 装

新华书店上海发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

統一书号K15010·1206 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $9 \frac{10}{16}$

字数 223,000 印数 0,001—8,000 定价(7) 1.10

1965 年 12 月第 1 版 1965 年 12 月上海第 1 次印刷

目 录

序言	vii
----	-----

绪论	1
----	---

第一篇 机构的结构和运动学

第一章 平面机构的结构	5
-------------	---

§ 1-1 研究机构结构的目的	5
§ 1-2 平面运动副及其分类	5
§ 1-3 运动链、机构、平面机构的结构公式	10
§ 1-4 确定平面机构活动度数的实例及其注意事项	11
§ 1-5 平面机构的低副代替高副法	16

第二章 平面机构的运动分析	19
---------------	----

§ 2-1 研究机构运动分析的目的和方法	19
§ 2-2 速度瞬心及其在机构速度分析上的应用	20
§ 2-3 用相对运动图解法求机构的速度和加速度	22
§ 2-4 运动线图、图解微分法和图解积分法	39

第三章 平面连杆机构及其设计	46
----------------	----

§ 3-1 连杆机构的应用及其设计的基本问题	46
§ 3-2 铰链四杆机构的基本型式与曲柄存在条件	48
§ 3-3 铰链四杆机构的演化	53
§ 3-4 四杆机构的设计	57

第四章 凸轮机构及其设计	66
--------------	----

§ 4-1 凸轮机构的应用和分类	66
§ 4-2 从动杆的常用运动规律	69
§ 4-3 按已知运动规律设计平面凸轮的轮廓	76
§ 4-4 从动杆滚子半径的选择	81
§ 4-5 盘形凸轮的基圆半径	82
§ 4-6 圆柱凸轮机构设计	89

第五章 齿轮机构及其设计	91
--------------	----

§ 5-1 齿轮机构的应用和分类	91
§ 5-2 齿廓啮合的基本定律	95

§ 5-3	渐开线及其性质	97
§ 5-4	渐开线齿廓满足齿廓啮合的基本定律	99
§ 5-5	齿轮的各部名称、符号及标准齿轮的各部尺寸	100
§ 5-6	任意圆上的齿厚	103
§ 5-7	渐开线齿轮正确啮合的条件和可分性	104
§ 5-8	渐开线齿轮传动的重合系数	107
§ 5-9	渐开线齿轮传动的齿廓滑动系数	112
§ 5-10	范成法切制轮齿的原理	114
§ 5-11	渐开线齿廓的干涉现象和根切现象, 渐开线标准齿轮的最少齿数	117
§ 5-12	修正齿轮的计算基础	121
§ 5-13	齿轮传动的設計	127
§ 5-14	斜齿圆柱齿轮传动	132
§ 5-15	螺旋齿轮传动	143
§ 5-16	蜗轮蜗杆传动	147
§ 5-17	圆锥齿轮传动	150
第六章	轮系	157
§ 6-1	轮系的功用和分类	157
§ 6-2	定轴轮系的传动比	159
§ 6-3	周转轮系及其传动比	161
§ 6-4	混合轮系	164
第七章	其他常用机构	169
§ 7-1	万向联轴节	169
§ 7-2	螺旋机构	174
§ 7-3	间歇运动机构	176
第二篇 机构和机器动力学		
第八章	平面机构的动态静力分析	182
§ 8-1	作用在机械上的力	182
§ 8-2	机构力分析的目的和方法	183
§ 8-3	构件惯性力的确定	185
§ 8-4	机构的动态静力计算	188
§ 8-5	速度多边形杠杆法	194
第九章	运动副和机构中的摩擦	198
§ 9-1	研究机械中摩擦的目的	198
§ 9-2	移动副中的摩擦	198
§ 9-3	转动副中的摩擦	202

§ 9-4 高副中的摩擦·····	208
第十章 机器的效率·····	210
§ 10-1 机器的运动和功的传递·····	210
§ 10-2 机器的效率·····	212
§ 10-3 机器的自锁现象·····	215
§ 10-4 斜面的效率·····	217
§ 10-5 螺旋和蜗轮蜗杆的效率·····	220
第十一章 机器速度波动的调节·····	223
§ 11-1 调节机器速度波动的目的和方法·····	223
§ 11-2 等功力和等功力矩·····	224
§ 11-3 等能质量和等能转动惯量·····	228
§ 11-4 机器运转的平均速度和不均匀系数·····	232
§ 11-5 力是机构位置函数时飞轮转动惯量的确定·····	233
§ 11-6 调速器的基本知识·····	238
第十二章 机械的平衡·····	240
§ 12-1 机械平衡的目的、分类及方法·····	240
§ 12-2 运转质量的平衡算法·····	241
§ 12-3 运转质量的平衡试验法·····	246
习题·····	251
附表 1 标准模数表·····	297
附表 2 渐开线函数表·····	298
参考书目·····	300

绪 论

在学习本门课程之前,必须首先知道它的研究对象和大体内容,现分述于下:

1. 机械原理研究的对象

“机械原理”是“机构和机器原理”的简称。顾名思义,它是一门以研究机构和机器为对象的科学。

机器的种类极多,其构造、用途和性能等各不相同。例如图1所示的内燃机是由曲柄1,连杆2,活塞3,气缸4,阀门5和6,阀门移动杆7、8、9,凸轮10和11以及五个齿轮所组成。当燃气推动活塞3往复移动时,连杆2使曲柄1作连续转动,从而将燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。至于燃气的定时进入气缸和排出气缸,则由齿轮、凸轮推动阀门来完成。又如图2所示的牛头刨床是由曲柄1、滑块2、导杆3、连杆4、刨头5、床身6以及其他一些辅助部分(图中未注出)所组成。当原动力经皮带拖动曲柄1迴转时,导杆3左右摆动,使刨头5带着刨刀作往复直线移动,从而完成刨削工序。至于工件的横向送进则由一些辅助装置来完成。再如发电机是由一个转子(电枢)和一个定子(即机身)所组成。当发电机被拖动时,它便将转子转动的机械能转

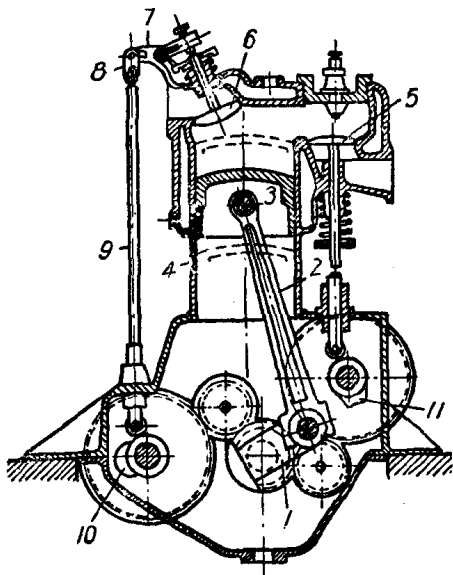


图 1

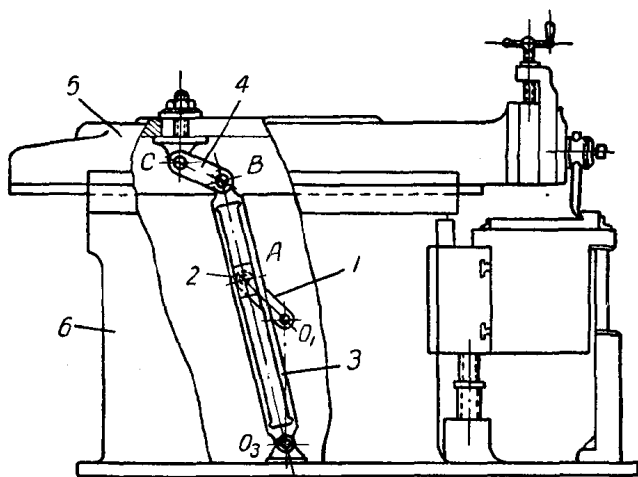


图 2

换为电能。从以上三例可以看出,这些机器的构造、用途等确是不同的,但是从它们的组成部分和运动确定性以及与功、能的关系来看,它们却有三个共同的特征,即: (1) 它们都是一种人为的实物^①的组合; (2) 它们各部分之间具有确定的相对运动; (3) 在生产过程中它们能代替人类的劳动来完成有用的机械功或转换机械能。

凡同时具备上列三个特征的便称为机器。又根据上列最后一个特征可将机器分为三类:

(1)产生机械能的机器 凡将其他形式的能转换为机械能的机器均属于此类。这类机器通称为原动机。例如内燃机和蒸汽机可以将热能转换为机械能;电动机可以将电能转换为机械能;以及水轮机可以将液体的位能转换为机械能等。

(2)转换机械能的机器 与前一类的机器相反,凡将机械能转换为其他形式的能的机器均属于此类。这类机器亦称为转换机。如发电机可以将机械能转换为电能和空气压缩机可以将机械能转换为气体的位

^① 如果不考虑某些机器中的电磁作用,我們也可以說机器是一种人为的刚强物体的組合,因为液体和气体对于挤压以及柔韧体对于拉伸都仍是剛强的。

能等。

(3)利用机械能的机器 凡利用机械能来完成有用的功的机器均属于此类。这类机器通称为工作机，如各种机床、纺织机、印刷机、起重机、碎石机、轧钢机、搬运机及食品加工机器等。

机构也是一种人为的实物的组合，其各件之间具有确定的相对运动。所以机构只具备机器的前两个特征。由此可知，机器与机构的区别在于：机器同时产生运动和能的变化，它的目的是利用或转换机械能；而机构只产生运动的变化，它的目的是传递或变换运动。所以，钟表、仪表、计算装置和绘图装置等都是机构。通常的机器必包含一个或几个机构，例如发电机和电动机便只包含了一个双杆机构，而前述内燃机便包含了连杆机构、凸轮机构及齿轮机构。

从结构和运动的观点来看，机构和机器之间是没有区别的。因此，为了简化叙述，有时我们用“机械”一词作为“机构”和“机器”的总称。

组成机构的各个相对运动部分称为构件。构件可以是单一的整体，也可以是几个零件组成的刚性结构。例如内燃机的曲轴便是一个整体，而连杆便是由几个可以拆卸的零件所组成的刚性结构。构件与零件的区别在于：构件是运动的单元而零件是制造的单元。在机械原理中，我们只研究构件。

机械中支持运动构件的构件称为机架。机架或为单一的整体，或为数件组成的刚性结构。它的本身或者固定不动，或者亦相对于地球而运动。前者如各种固定在地基上的机器的机架，后者如飞机、轮船上的原动机的机架。但是在研究机器各部分的运动时，通常皆以机架为基准，即假定它是静止的。

在一个工作着的机构中，驱动机构的外力所作用的构件称为原动件或主动件，而所有其余被推动的构件称为从动件。应用于不同机器中的同一机构，其原动件可以不同。例如内燃机的原动件为活塞而往复式空气压缩机的原动件为曲柄。

互相配合着工作的原动机、传动机构和工作机称为机组。由于技术的不断发展,传动机构常常变成了工作机的一部分,因此,某些现代的机组也可以说是由原动机和工作机所组成。

2. 机械原理课程的内容

如前所述,机械原理是一门以研究机构和机器为对象的科学。为了科学系统性和便于教学起见,在机械原理课程中,我们将各种机器的共同问题归纳成机构的结构和运动学以及机构和机器的动力学两部分来讨论,其具体内容如下:

机构的结构和运动学研究机构的运动确定性和不考虑引起机构运动的力的作用,而仅从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度和加速度的求法,以及按已知条件来设计新机构的方法。

机构和机器动力学研究在机械运动过程中作用在各构件上的力的求法和确定机械效率的方法,并研究作用力、运动构件的质量和这些构件的运动之间的关系,即机械的调速问题和惯性力的平衡问题。

就上述内容的性质而论,机械原理所研究的问题可以归纳为两类:第一类问题是关于已有机械的研究,即机构的分析问题(结构分析、运动分析和动力分析);第二类问题是关于得到已知运动的新机械的设计,即机构的综合问题(结构选择、运动设计和动力学设计)。

第一篇 机构的结构和运动学

第一章 平面机构的结构

§ 1-1 研究机构结构的目的

研究机构结构的目的如下：

(1)由绪论所述可知，机构是具有确定相对运动的构件组合，显然，不能运动或不规则乱动的构件组合都不能成为机构。当设计师着手设计新机构时，首先应当判断所设计的机构能否运动；如果能够运动，还须判断在什么条件下才具有确定的相对运动。探讨机构运动的可能性和确定性，这便是研究机构结构的目的之一。

(2)实际应用的机构往往是由很多形状和构造都很复杂的构件装配成的。在进行机构的运动和动力分析时，如果我们同时还考虑那些与分析无关的构件外形和构造，那么这种分析过程将变得异常复杂。又当设计新机构时，通常我们总是首先拟订设计方案和根据运动要求确定机构构件的主要几何尺寸；而后再进一步考虑它们的形状和细微构造。为了使分析和运动设计过程不致因那些与它无关的因素而变得复杂不堪，我们有必要仅仅根据构件的联接特征和那些与运动有关的尺寸，用简单的线条和符号来绘制机构的运动简图，而后进行分析研究。掌握机构运动简图的绘制方法是我们研究机构结构的另一目的。

除此以外，研究机构的结构还可以指示出合理设计机构和创造新机构的途径等。

§ 1-2 平面运动副及其分类

机构的每个构件都与其他构件相互联接，而这种联接并不形成刚

性系统,在相互联接的两构件间仍存在着一定的相对运动。凡两个构件直接接触而又能产生一定型式相对运动的联接称为运动副。例如轴与轴承的联接,轮齿与轮齿的联接及滑块与导槽的联接等都是运动副。构件之间的接触不外乎点、线或面三种。例如滚珠轴承的滚珠和内外座圈为点接触;互相啮合的轮齿为线接触;而轴与轴承或滑块和导槽则为面接触。这些构成运动副的点、线或面称为运动副元素。

构成运动副的两构件之间的相对运动型式是由它们的联接方式确定的,也就是说,是由运动副的性质确定的。

如图 1-1 所示,决定平面运动构件 T 的位置的参变数有三,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 α 不固定时,构件 T 可以绕 A 点转动;当 A 点的横坐标 x 未给定时,构件 T 能沿 X 轴移动;同理当 A 点的纵坐标 y 未给定时,构件 T 能沿 Y 轴移动。构件的这种独立的运动称为自由度,换句话说,自由度也就是决定构件

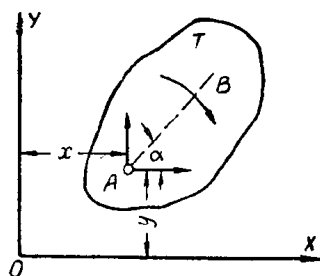


图 1-1

位置的独立参变数。由上所述可知,作平面运动的自由构件有三个自由度,即沿 X 轴和 Y 轴的两个移动及绕垂直于 X 、 Y 平面的轴的转动。但是,当两构件组成运动副后,它们便因直接接触而使相对独立运动受到某些限制,其自由度数也随之减少,并且不同的限制方式所减少的自由度数也各

不相同。对于构件一个独立运动的限制称为一个约束条件。因而每加上一个约束条件,构件便失去一个自由度;加上两个约束条件便失去两个自由度。

在图 1-2 所示的运动副中,构件 2 相对于构件 1 只能绕 $O-O$ 轴转动,这种运动副称为转动副。显然,转动副具有一个自由度,其约束条件为 2。

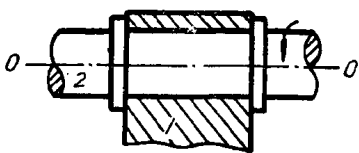


图 1-2

在图 1-3 所示的运动副中, 构件 2 相对于构件 1 只能沿箭头所示的轴向直移, 这种运动副称为移动副。显然, 移动副也具有一个自由度, 其约束条件为 2。

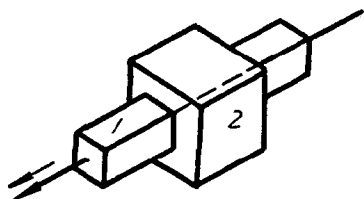


图 1-3

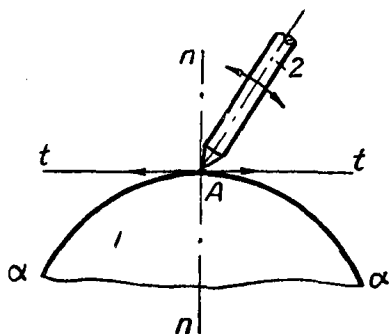


图 1-4

又在图 1-4 所示的运动副中, 构件 2 可以绕 A 点转动, 其尖端并可

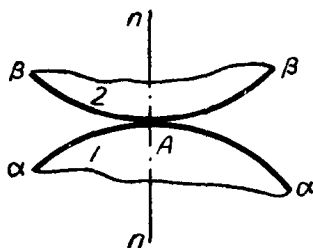


图 1-5

沿切线 $t-t$ 移动, 但却不能沿法线 $n-n$ 移动, 所以这种运动副具有两个自由度, 其约束条件为 1。凸轮与尖底从动杆之间便构成这种运动副。同理, 图 1-5 所示的运动副也具有两个自由度, 只不过构件 2 上不是固定一点与构件 1 接触而已。轮齿与轮齿之间的接触便是这种运动副的实例。

上述四种运动副, 其成副两构件间的相对运动都是平面运动, 所以都属于平面运动副。

依照接触的特性, 运动副又可分为低副和高副两种。凡为面接触的运动副称为低副, 转动副和移动副都是平面低副。凡为点或线接触的运动副称为高副, 图 1-4 和图 1-5 所示的运动副都是平面高副。由上所述可知, 平面低副具有一个自由度, 其约束条件为二; 平面高副一般具有两个自由度, 其约束条件为一。因低副两构件间为面接触, 能承受较大的压力, 且易于润滑, 所以经久耐用; 但高副具有较多自由度, 所以在实现复杂运动规律时比低副易于综合。

在机械原理课程中,我们只研究机构的运动和动力特性,而不涉及强度问题,因此,可以撇开构件的复杂外形和运动副的具体构造,而用简略的符号来表示构件和运动副。

当两构件组成转动副时,我们可以用图 1-6, *a* 的简图来表示。如果成副两构件之一为机架,则应把代表机架的构件画上斜线以区别于活动的构件,如图 1-6, *b* 所示。应当注意,实际机构中的转动副有时并不做成完整的圆柱面和圆孔,当其迴转半径较大且作相对摆动时,往往做成弧形滑块和圆弧槽,如图 1-6, *c* 所示。

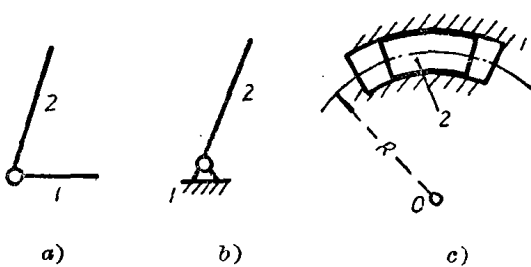


图 1-6

由于图 *c* 中构件 2 相对于机架 1 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的以 *O* 点为轴心的转动副,也就是说,它与图 1-6, *b* 具有完全相同的性质。

当两构件组成移动副时,我们可用图 1-7, *a*、*b* 和 *c* 的简图来表示。与上述相同,其中画有斜线的构件代表机架。不难看出,在图 1-6, *c* 中,当半径 *R* 趋于无穷大时,它便变成图 1-7, *b* 所示的形式。换句话说,当迴转中心趋于无穷远时,转动副便转化成移动副了。

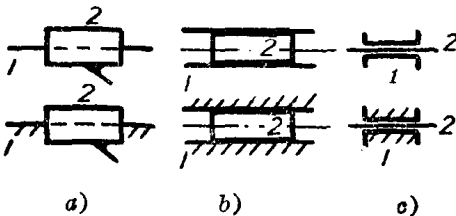


图 1-7



图 1-8

对于两构件所组成的平面高副,应当绘出其接触面的形状。例如图 1-4 所示为凸轮高副的表示法,而图 1-8 所示为齿轮高副的表示法。

当用简图表示包含运动副元素的构件时,只需要表示出决定其运动特征的因素(运动副的种类及其位置)就行了。对于仅具有两个平面低副元素的构件,不论其外形如何,均可用图 1-9 所示的简图来表示,只须保证转动副简图的圆心与相对回转中心重合,以及移动副简图的导路与相对移动方向一致便行了。对于图 1-9, *c* 所示

具有一个转动副和一个移动副元素的构件,通常习惯于把导路画在通过转动副中心的位置,如图 1-9, *d* 所示。

具有三个运动副元素的构件可以用三角形来表示,其转动副圆心位置和移动副导路方向也须与实物一致或成比例。例如如图 1-10, *b* 所示的 V 形发动机的主连杆可用图 *a* 的三角形来表示,三角形的各顶点分别与孔的中心相重合。为了表明这三个运动副的元素是在同一构件之上,必须将此三角形的诸角涂以焊缝的记号,或将整

图 1-9

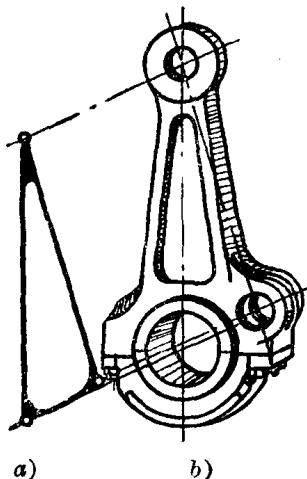


图 1-10

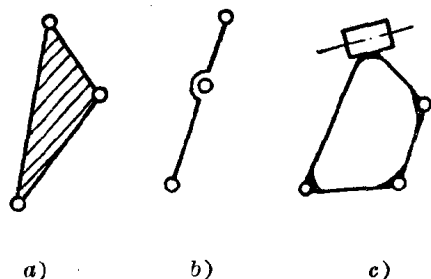


图 1-11

个构件画上剖面线(图 1-11, *a*)。如果三个转动副元素处在一直线上,则可用图 1-11, *b* 所示的符号来表示。同理,具有 n 个运动副元素的构件可用 n 边形来表示,例如如图 1-11, *c* 所示即为具有三个

转动副元素和一个移动副元素的构件的表示方法。

§ 1-3 运动链、机构、平面机构的结构公式

若干构件以运动副联接而成的系统称为运动链。实际机械中应用的运动链大多数为平面运动链。

将运动链的一个构件固定为机架，当它的另一个或几个构件相对于此固定构件作独立运动时，其余构件即随之作确定的预期运动，这种运动链便是绪论中所讨论的机构。

如前节所述，不加任何约束条件的平面运动构件具有三个自由度。设某一平面运动链由 K 个构件所组成，当把机架视为固定不动时，那么其活动构件的总数为 $K-1$ 。在未用运动副联接起来以前，这些活动构件共具有 $3(K-1)$ 个自由度；今若将这些构件用运动副联接起来，那么在它们的相对运动上便加上了若干约束条件，自由度数也随着减少。此自由度减少的数量随运动副的性质和数目而定。设该运动链中共有 P_H 个平面低副和 P_B 个平面高副，那么这些运动副所加的约束条件总数为 $2P_H + P_B$ 。因而该运动链相对于机架的自由度数应为

$$W = 3(K-1) - 2P_H - P_B = 3n - 2P_H - P_B, \quad (1-1)$$

式中 $n = K-1$ 为活动构件数。

运动链相对于机架的自由度称为机构活动度，而计算平面机构活动度数的公式称为平面机构结构公式。

机构中具有独立运动或具有确定机构位置的独立参变数的且与机架相联的构件称为起始构件。每个起始构件相对机架具有一个独立运动。又上面已经讲过，机构的活动度数即为机构相对机架的独立运动数，因此，机构的起始构件数应与它的活动度数相等，这就是机构具有确定相对运动的必要的条件。

例如对于图 1-12 所示的平面铰链五杆机构，因 $n=4$, $P_H=5$, $P_B=0$ ，故由公式(1-1)得其活动度：

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

即该机构应具有两个起始构件。

如果 1 和 4 作独立运动, 则角 φ_1 和 φ_2 为独立参变数。当 φ_1 和 φ_2 为已知值时, 该机构各构件的位置都是确定的。如果只有构件 1 作独立运动 (亦即只有 φ_1 为已知值), 则构件 2、3、4 的位置将不能

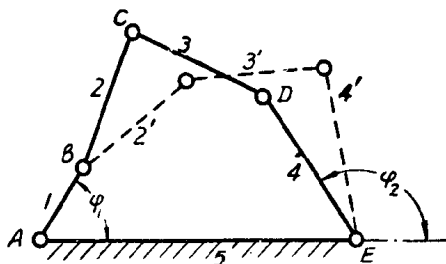


图 1-12

确定, 它们可以处在实线位置, 也可以处在虚线位置或者其他任意位置。

又对于图 1-13 所示的运动链, 因 $n=4$, $P_H=6$, $P_B=0$, 故由公式 (1-1) 得

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

它表明该运动链不能活动, 是一个刚性桁架。由此推论, 如果某运动链的活动度数 $W < 0$, 那便意味着该运动链所受的约束条件过多, 已经成为静不定的桁架了。

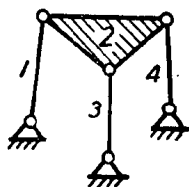


图 1-13

由上所述可知, 任何平面运动链都可用平面机构结构公式来判断它能否运动。如果能够运动, 还可由计算所得的活动度数来确定该机构所需的起始构件数。对于给定起始构件的平面机构, 则可以用公式 (1-1) 来检验活动度数与起始构件数是否相等, 从而判明该机构是否具有运动的确定性。如果起始构件数小于机构活动度数, 那么机构的位置随偶然的因素而定, 即运动不能确定, 这种机构很少有实用价值。反之, 如果起始构件数大于机构的活动度数, 那么因独立运动过多, 机构在运动中将不能满足所有起始构件的给定运动, 如强迫所有起始构件按给定运动而运动, 则机构中最弱的构件必将折断。

§ 1-4 确定平面机构活动度数的实例及其注意事项

在确定实际机构的活动度数时, 应当首先用构件及运动副的代表

符号绘出实际机构的运动简图, 然后计算其活动构件数、平面高副数和平面低副数, 最后将它们代入公式(1-1)进行计算。

例 1-1 试确定图 1-14 所示的内燃机机构的活动度数。

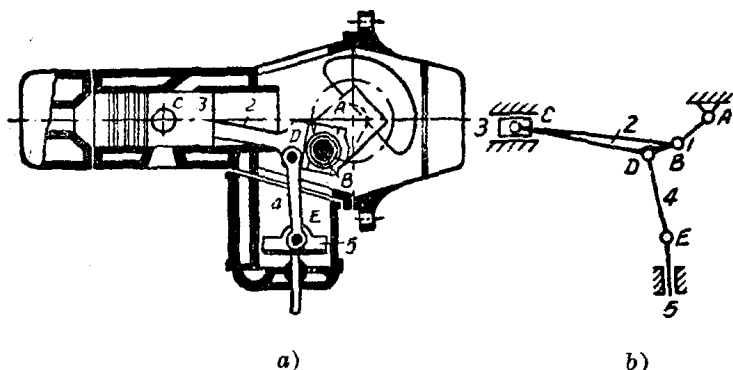


图 1-14

解 图 1-14, *a* 为内燃机的实际构造图。图中 1 为绕轴 *A* 迴转的曲柄, 2 为主连杆, 3 为活塞, 4 为副连杆, 5 为扫气活塞。主连杆 2 用三个铰链 *B*、*C*、*D* 和构件 1、3 及 4 相联接, 所以该构件用三角形来表示。副连杆 4 和曲柄 1 都只具有两个运动副元素, 故用直线来表示。图 1-14, *b* 即为该机构的运动简图。

该机构活动构件数 $n=5$, 平面高副数 $P_h=0$, 平面低副数 $P_l=7$ (构件 3、5 各与机架组成移动副, *A*、*B*、*C*、*D*、*E* 为转动副), 所以它的活动度数为

$$W = 3n - 2P_h - P_l = 3 \times 5 - 2 \times 7 = 1,$$

即该机构只需要一个起始构件便具有确定的相对运动。

例 1-2 试确定图 1-15, *a* 所示的牛头刨床机构的活动度数。

解 该机构由活动构件 2、3、4、5、6、7 及固定的机架 1 所组成。其中构件 2、3 为齿轮机构, 以轮齿高副 *B* 相联接, 同时齿轮 3 又以转动副 *C* 和 *D* 与机架 1 和滑块 4 相联接, 所以构件 3 具有三个运动副元素。运用构件及运动副的代表符号可绘出图 1-15, *b* 所示的机构运动简图。