

机械原理

J I X I E Y U A N L I

清华大学机械设计教研组
中央广播电视大学机械组 合编

张世民 主编

中央广播电视大学出版社

机 械 原 理

清华大学机械设计教研组
中央广播电视大学机械组 合编

张世民 主编

中央广播电视大学出版社

机械原理

张世民 主编



中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民邮电出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 22.75 535千字
1983年2月第1版 1985年10月第2次印刷
印数 135,001—186,000
书号 15300·1 定价 4.10元

内 容 提 要

本书是参照 1980 年 5 月审订的《机械原理教学大纲》(草案)编写的。

本书以机构为核心。先讲述各种机构的一些共性问题: 机构的组成原理, 机构简图, 机械的摩擦和效率; 再以常用的典型机构——连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等为对象, 讨论它们所特有的问题; 最后讨论机械系统运转过程中出现的问题: 回转构件的平衡, 机械系统运转的稳定性和速度调节。

本书大字部分为基本内容, 可供近机类 80 学时左右的专业讲授, 小字部分为较深入的选授内容, 可供 100 学时左右的机械类专业讲授。

本书从“教”与“学”两方面着眼, 对一些传统的讲法作了一些革新的尝试, 以期宜于教而利于学, 因此既宜于作为一般高校本课程的教材, 也宜于作为远距离教学——电视教学、函授教学的教材。本书也可供有关教师和工程技术人员参考之用。

序 言

本书是参照 1980 年 5 月审订的机械类《机械原理教学大纲》(草案)编写的。

为了适应电视教学和函授教学的特点,并便于读者自学,本教材在编写形式上力求阐述清晰、结论明确、重点醒目,并对重要的概念和解题方法给出小结。

为了使读者能更好地理解 and 掌握本课程的基本原理,本教材从教学方法的角度考虑,对一些传统的讲法作了一些革新的尝试,并对某些概念重新给以定义,还对一些传统的名词重新加以命名,此外,为了能更好地理解问题实质,提出了一些新的名词。

在内容体系方面,本教材以机构为核心,把常用机构的共性问题安排在前面来讨论;然后分别讨论常用的几种典型机构所特有的问题;最后讨论机构运转过程中的一些问题。

本教材的大字部分为教学大纲规定的基本内容,可以适用于 80 学时左右的各专业讲授;其余小字部分为选授内容,可供多学时的专业选用。

参加本书编写的同志有:张世民(绪论、第一章、第三章、第五章和第六章),张济川(第二章和第九章),郭庚田(第四章),高松海(第五章和第八章),冼健生(第七章),习题部分由周翠珍和肖贻江编写。全书由张世民同志主编。

参加本书审阅工作的同志有:唐锡宽、方嘉秋和黄靖远。

全书文稿和插图由高松海同志整理和编目。

由于编者水平所限和编写时间匆促,尤其是对某些内容作了一些革新的尝试,误漏欠妥之处在所难免,衷心欢迎广大读者和教师给以批评指正。

编 者

1983 年 2 月

目 录

绪论	1	§ 3-13 平面四杆机构的几个工作特性	100
§ 0-1 机械原理的研究对象	1	§ 3-14 平面连杆机构的运动设计	111
§ 0-2 机械原理课程的内容	3	第四章 凸轮机构的分析和设计	125
§ 0-3 机械原理课程在教学计划中的地位	4	§ 4-1 概述	125
第一章 机构的结构分析	5	§ 4-2 从动件的常用运动规律	128
§ 1-1 研究机构结构的目的	5	§ 4-3 图解法设计盘形凸轮轮廓	137
§ 1-2 构件与运动副	5	§ 4-4 解析法设计盘形凸轮轮廓	144
§ 1-3 平面机构的运动简图	8	§ 4-5 凸轮设计中的几个问题	146
§ 1-4 平面机构的自由度	14	§ 4-6 柱体凸轮轮廓设计方法介绍	154
§ 1-5 平面机构的组成原理	23	第五章 齿轮的啮合原理和几何设计	157
§ 1-6 平面机构的高副低化	26	§ 5-1 概述	157
第二章 机械中的摩擦和效率	29	§ 5-2 齿轮机构的类型	158
§ 2-1 概述	29	§ 5-3 齿廓啮合的基本定律	160
§ 2-2 机械的效率	30	§ 5-4 渐开线的产生、性质及其方程	161
§ 2-3 移动副的摩擦	31	§ 5-5 渐开线齿廓满足定角速比啮合的基本定律	163
§ 2-4 螺旋副的摩擦	42	§ 5-6 渐开线齿廓啮合的几个重要性质	166
§ 2-5 转动副的摩擦	45	§ 5-7 渐开线直齿圆柱标准齿轮的基本参数和尺寸计算	168
第三章 平面连杆机构的分析和设计	51	§ 5-8 渐开线直齿圆柱齿轮传动的正确啮合条件	178
§ 3-1 平面连杆机构运动分析的目的和方法	52	§ 5-9 齿轮无齿侧间隙啮合的几何条件	185
§ 3-2 平面连杆机构的位置图和动点轨迹的求法	53	§ 5-10 齿轮齿条啮合的特点	188
§ 3-3 同速点法及其在机构速度分析中的应用	55	§ 5-11 渐开线齿轮的加工方法	190
§ 3-4 向量多边形法及其在机构运动分析中的应用	61	§ 5-12 渐开线齿廓的根切	195
§ 3-5 平面连杆机构运动的解析法分析	74	§ 5-13 渐开线直齿圆柱标准齿轮不发生根切时的最少齿数	197
§ 3-6 机构的运动线图	77	§ 5-14 标准齿轮的局限性和变位齿轮	198
§ 3-7 机构中所受的力和受力分析的方法	78	§ 5-15 变位齿轮传动的几何尺寸计算	201
§ 3-8 平面连杆机构的静力分析	79	§ 5-16 齿轮的传动类型	208
§ 3-9 构件惯性力的确定和连杆质量的代换	83	§ 5-17 变位系数的选择	211
§ 3-10 平面连杆机构的动态静力分析	86	§ 5-18 斜齿圆柱齿轮机构	214
§ 3-11 平面连杆机构设计的基本问题	88	§ 5-19 螺旋齿轮机构	229
§ 3-12 四杆机构的基本型式及其变换和演化	89	§ 5-20 蜗杆蜗轮机构	233
		§ 5-21 圆锥齿轮机构	241
		第六章 轮系及其设计	251

§ 6-1 轮系的分类	251	第八章 回转构件的平衡	292
§ 6-2 定轴轮系传动比的计算	251	§ 8-1 机械平衡的目的和分类	292
§ 6-3 定轴轮系的功用	253	§ 8-2 刚性回转构件的平衡计算	294
§ 6-4 周转轮系的分类	254	§ 8-3 刚性回转构件的平衡试验	299
§ 6-5 周转轮系传动比的计算	256	§ 8-4 回转构件的平衡精度	302
§ 6-6 行星轮系各轮齿数和行星轮数 的选择	268	第九章 机械系统的运动和速度调节	306
§ 6-7 行星轮系的效率	271	§ 9-1 概述	306
第七章 其它常用机构	277	§ 9-2 机械系统的驱动力和工作阻力	307
§ 7-1 万向联轴节	277	§ 9-3 机械系统的等效动力学模型	309
§ 7-2 棘轮机构	280	§ 9-4 机械系统的运动方程	314
§ 7-3 槽轮机构	283	§ 9-5 机械系统速度波动的调节	318
§ 7-4 不完全齿轮机构	287	习题	324
§ 7-5 非圆齿轮机构	290	主要参考文献	356

绪 论

§0-1 机械原理的研究对象

人们在日常生活和生产过程中,广泛使用着各种各样的机器,以便减轻体力劳动和提高工作效率,在有些人类难以生存的场所,更是非借助机器来代替人进行工作不可。

机器的种类极其繁多,它们的构造、用途和性能也各不相同。例如图 0-1 所示的是单缸内燃机。燃气由进气管通过进气阀 3 被吸入气缸后,进气阀关闭,点火,使燃气在气缸中燃烧产生压力,推动活塞 2 下行,通过连杆 5 使曲轴 6 转动,向外输出机械能。当活塞上行时,排气阀 4 打开,废气通过排气阀由排气管排出。曲轴上的齿轮 10 分别带动两个齿轮 9,从而带动轴上的凸轮 7,凸轮 7 再推动顶杆 8,使它按一定的规律定时地打开或关闭进气阀和排气阀。以上各个机件的协同配合动作,便能把燃气燃烧时的热能转变为曲轴转动的机械能。图 0-2 所示的是牛头刨床。电动机 1 通过带传动(图中未画出)使齿轮 2 带动大齿轮 3 转动。大齿轮 3 的侧面利用销轴装有滑块 4。滑块 4 和绕定轴转动的滑块 6 镶在导杆 5 的滑槽中。滑块 4 随齿轮 3 转动时,导

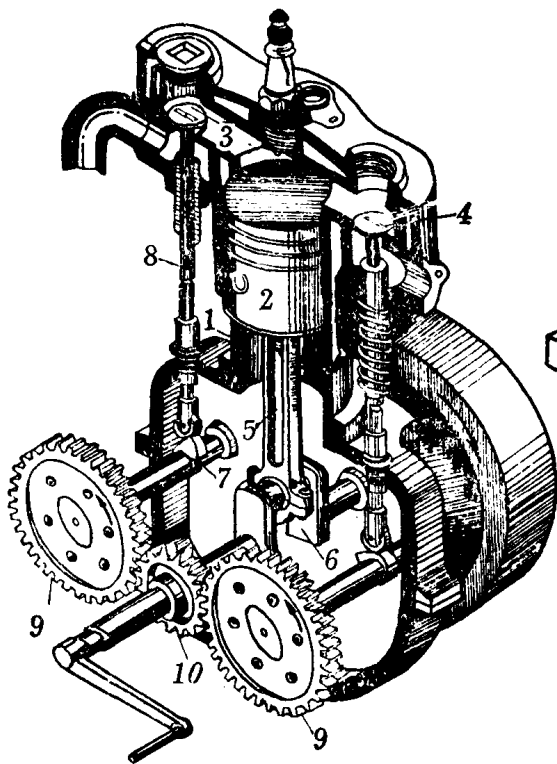


图 0-1

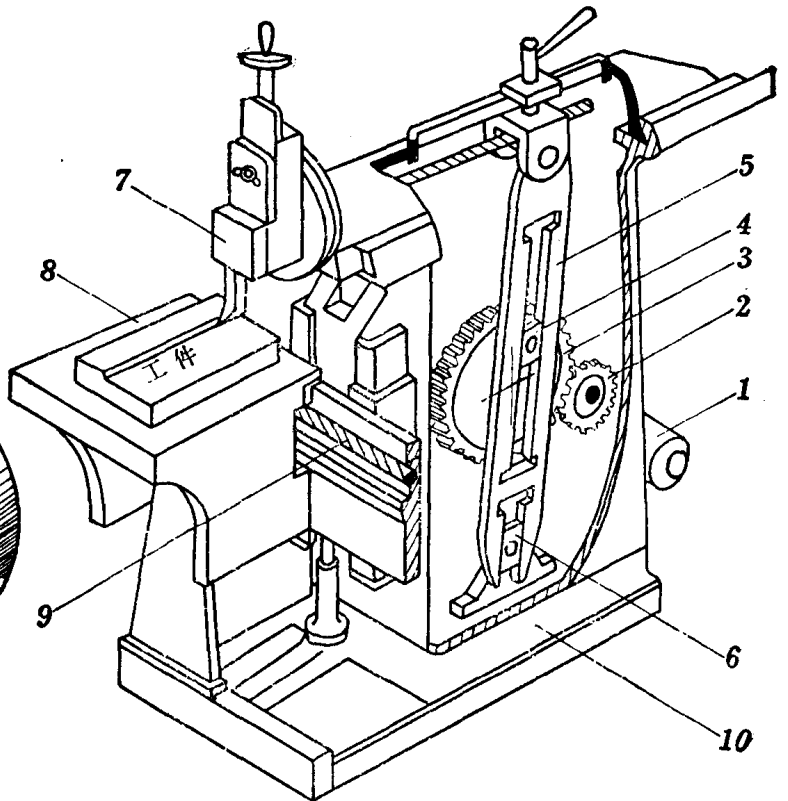


图 0-2

杆 5 往复摆动，由导杆 5 上端的销钉使刨头 7 作往复的直线移动，从而产生刨切动作。与此同时，工作台 8 连同工件还需要有横向的进给运动，以便使往复移动的刨刀能将工件刨切出平面。工作台 8 的这个横向进给运动，是通过其他辅助部分（图中未画出）带动丝杠 9 作间歇转动来实现的。通过牛头刨床的这些机件的协同动作，把电机的电能最后转换为刨刀往复切削的机械能，完成有用的功。

从以上两个例子可以看出，尽管这些机器的结构、性能、用途等截然不同，但是作为机器，它之间仍有下列三个共同特征，即：

- 1) 它们都是人为的实体(机件)的组合；
- 2) 各个运动实体之间具有确定的相对运动。

3) 能实现能量的转换(如内燃机的热能转换为机械能)、代替或减轻人类的劳动，来完成有用的机械功(如牛头刨床的切削功)。

我们进一步分析以上两种机器，可以看出各个机件具有确定运动是其成为机器的基本要求。在机器的各种运动中，有些是传递回转运动，如带传动、齿轮传动等；有些是把转动变为往复移动，如牛头刨床中的滑块和导杆将齿轮 3 的转动变为刨头 7 的往复移动；有些是利用机件的轮廓曲线实现预定规律的移动或摆动，如内燃机中的凸轮。因此人们常根据实现这些运动形式的机件的外形特点，把相应的一些机件的组合称为机构。例如图 0-3 所示的是齿轮机构，它的构件形状的特点是具有轮齿，其运动特点是把高速转动变为低速转动或反之；图 0-4 所示的是凸轮机

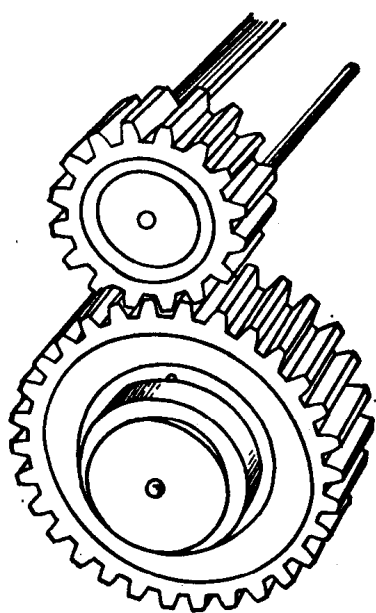


图 0-3

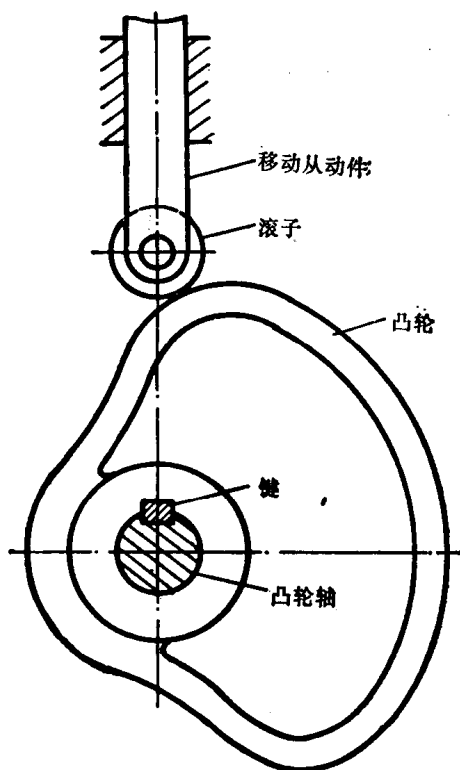


图 0-4

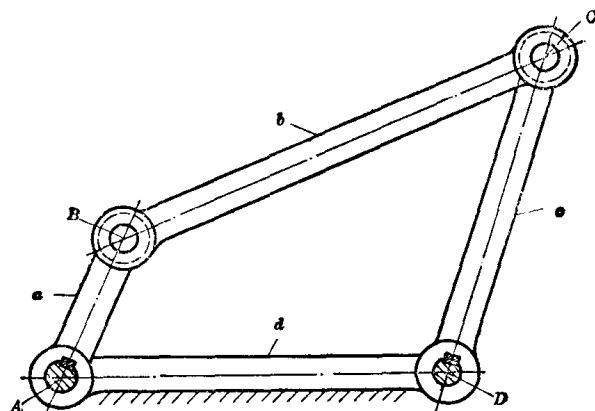


图 0-5

构,它的主要构件是具有特定轮廓曲线的凸轮,利用它的轮廓曲线使从动件作周期性的有规律的运动或摆动;图 0-5 所示的是连杆机构,其构件的基本形状是杆状或块状(如内燃机中的活塞或牛头刨床中的刨刀滑枕),能实现转动、摆动、移动等运动形式的相互转换。

由以上例子可以看出,机器是由各种机构所组成,可以完成能量的转换或做有用功;而机构则仅仅是起着运动的传递和运动形式的转换的作用。因此,机构的特征是:

- 1) 它们都是人为实体(机件)的组合;
- 2) 各个运动实体之间具有确定的相对运动。

从结构和运动的角度来看,机器和机构二者之间没有区别,因此我们用机械一词作为它们的总称。

作为一门学科来说,机械原理是研究机器和机构的一些共性的问题;此外,机器的种类虽有千千万万,但是组成机器的机构,其种类却是有限的(在一定意义上来说,二者类似于化学中的化合物和化学元素的关系),因此,机械原理是以机构作为具体的研究对象,探讨它们各自所具有的一些基本问题。至于各种具体的机器,有许多涉及专业方面的要求和特点,这些问题则是属于专业课程所讨论的范围。

§0-2 机械原理课程的内容

机械原理课程的内容,大体分为三部分:

(1) 各种机构共同的基本问题:

- 1) 机构的组成原理和自由度计算;
- 2) 机构运动简图的表示方法;
- 3) 机构中的摩擦、效率和自锁。

(2) 分别讨论几种主要机构所特有的问题(其中有些分析方法也可应用于其他机构的分析中):

- 1) 连杆机构的运动分析、受力分析和连杆机构的运动设计;
- 2) 凸轮机构从动件运动规律的选择,凸轮轮廓设计和凸轮机构的尺寸参数的选择;

- 3) 齿轮传动的几何原理以及齿轮的参数和尺寸计算;
- 4) 齿轮系的传动比计算和齿轮齿数的确定;
- 5) 其他几种常用的特殊机构运动特性的分析和基本尺寸的确定。

(3) 机器运转的稳定性问题:

- 1) 回转构件的平衡;
- 2) 机器运转过程中速度波动的调节。

本课程所用的方法,以几何图解法作为基本方法,因为这种方法具有明晰、具体和便捷等优点;必要时,则辅以解析方法,以适应精度要求较高的场合。

§0-3 机械原理课程在教学计划中的地位

由于机器的种类极其繁多,因此在教学计划中,按各种专业设置了相应的专业课程,针对有关的专业机器的专门问题进行讲述;至于各种专业机器所共有的一些问题,则由机械原理、机械零件等几门技术基础课程来讨论。

机械原理课程以高等数学、普通物理、理论力学和机械制图等课程为基础;而它本身则又为以后学习机械零件和有关的专业课程打下理论基础。因此,机械原理是一门对机械类各个专业都很重要的技术基础课程,它起着承先启后的桥梁作用。此外,本课程中有些内容也可以直接应用于生产实践。因此,机械原理课程在教学计划中占有十分重要的地位。

第一章 机构的结构分析

§1-1 研究机构结构的目

不论是机器还是机构，它们的共同特征是各个运动部分都必须有确定的相对运动。在设计新机器时，首先应判断所设计的各个机构能否运动；如果能够运动，则还必须判断在什么条件下才会具有确定的运动。研究机构结构的目之一，就是探讨机构运动的可能性及其具有确定运动的条件。在分析已有的机器时，也要求对其中的机构，尤其是对一些复杂的机构进行结构分析，以便比较透彻地了解机构的结构特点，从而为机构的运动分析、受力分析等指明方向。

实际机构的机件外形往往比较复杂，其中有些尺寸仅与强度、加工工艺、机器的布局等有关，而与运动性质无关；但其中有些尺寸则直接影响到机构的运动。机械原理课程既然以机构的运动为主要的研究内容，则为了便于研究机构的运动，就有必要撇开那些与运动无关的尺寸（如厚度、宽度等），仅仅根据那些与运动有关的尺寸，用简单的线条和符号，绘制出机构的简图，以便在设计新机器时，作为机构方案讨论的一种工程语言。同时，这种机构简图也是进一步作机构分析的基础。这种机构简图只标注与运动有关的那些尺寸，因此称为运动简图。

§1-2 构件与运动副

一、零件与构件

前面提到的“运动实体”、“机件”，是指机构运动时作为一个整体参与运动的刚体，我们称之为构件。一个构件，可以是不能拆开的单一整体，但更常遇见的构件，则是由若干个分别加工制造的部分装配起来的刚性体，这些分别加工制造的部分，称为零件。因此，构件与零件的区别在于：构件是运动的单元，零件是加工制造的单元。本课程以构件作为研究的基本对象。在图 0-4 所示的凸轮机构中，凸轮用键来与凸轮轴装配成一个运动整体，成为一个构件，而凸轮、键和轴，则都是零件。

二、运动副

机构的重要特征是各个构件都要有确定的运动，为此必须对各个构件的运动加以限制。在机构中，每个构件都以一定的方式来与其他构件相互接触，二者之间形成一种可动的联接，从而使两个互相接触的构件之间的相对运动受到限制。两构件之间的这种可动联接，称为运动副。

按照机构各构件的运动范围，可以将机构分为平面机构和空间机构两大类。平面机构的各个构件，在同一个平面或互相平行的平面中运动。由于常用的机构大多数为平面机构，因此我们只讨论平面机构的一些有关问题。

图 1-1 表示与平面坐标系 xOy 固结在一起的构件 1。设在该平面中有另一构件 2，它在该平

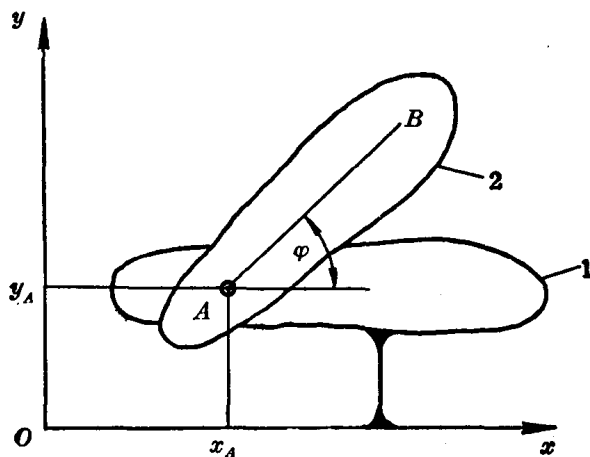


图 1-1

面中的位置,可以用其上任一点 A 的坐标 x_A 和 y_A 以及过点 A 的任一直线 AB 的倾角 φ 来描述。当构件 2 与构件 1 之间毫无联系时,构件 2 上点 A 的坐标 x_A 和 y_A 以及角 φ 可任意变化。这三个可变参数称为两构件之间相对位置的自由度。如果两个构件以某种形式相互接触而形成运动副之后,例如图 1-1 所示的两构件 1 和 2 借助于铰链而在点 A 形成一种转动的运动副,则构件 2 上的点 A 相对于构件 1 的移动参数 x_A 和 y_A 就不能再任意变化,也就是说,这两个相对的自由度被限制、被约束了,只剩下一个角 φ 可以自由变化,亦即只剩下一个绕垂直于平面 xOy 的轴 z 的转动自由度。由此可见,两构件之间的运动副所起的作用,是限制或约束该两构件之间的相对运动,使相对运动自由度的数目减少。

运动副对自由度所产生的约束数目和内容取决于运动副的型式。

平面机构中的运动副有三种型式。图 1-2 和图 1-3 所示,是约束掉两个自由度的运动副。

图 1-2 所示的是构件 1 和构件 2 以铰链联接起来的运动副(轴与轴承的配合也构成这种运动副),两构件只能绕轴 z 自由转动,沿轴 x 和轴 y 的自由移动则被约束掉了。这种运动副称为转动副。

图 1-3 表示矩形构件 2 可在构件 1 的矩形孔中沿轴 x 作相对移动,而沿轴 y 的移动自由度和绕轴 z 的转动自由度则被约束掉了。这种运动副称为移动副。

转动副和移动副所具有的共同点是:

- 1) 都约束掉两个自由度(虽然约束的内容有所不同);
- 2) 可动联接的部分都是面与面的接触(转动副中是圆柱面的接触,移动副中是矩形表面的接触)。

面接触的运动副,在承受载荷之后,其压强要比点或线相接触时低得多,因此我们把这种面与面相接触的运动副称为低副。显然,由于低副的压强较低,因此比较耐磨损。上述两种低副对自由度的约束数均为 2。

图 1-4 所示的是平面机构的第三种型式的运动副,两构件以点或线的形式相接触而形成运动副。这种运动副,允许两构件在接触点 A 绕垂直于平面的轴 z 作相对转动和沿切线 tt 方向作

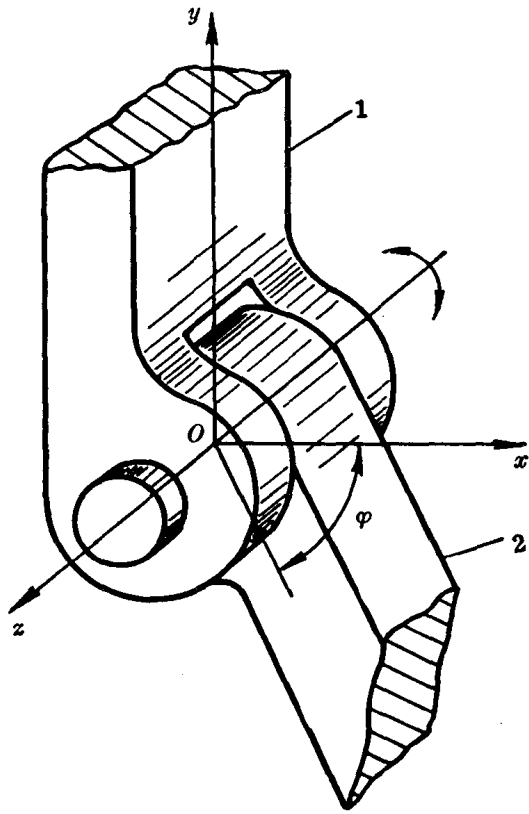


图 1-2

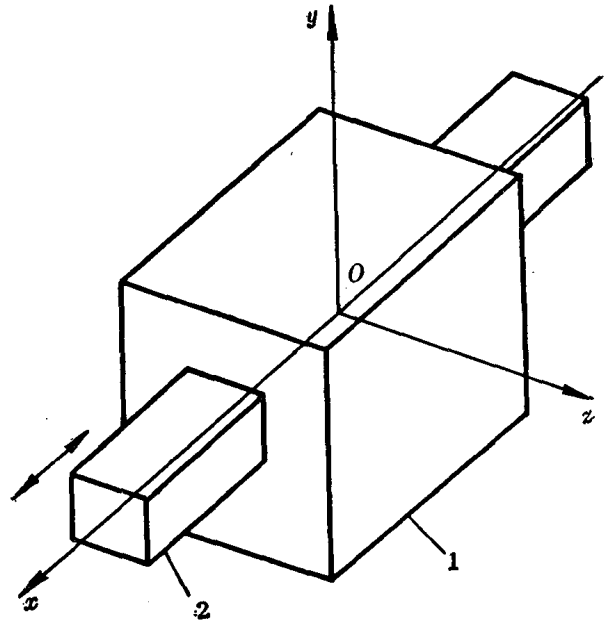
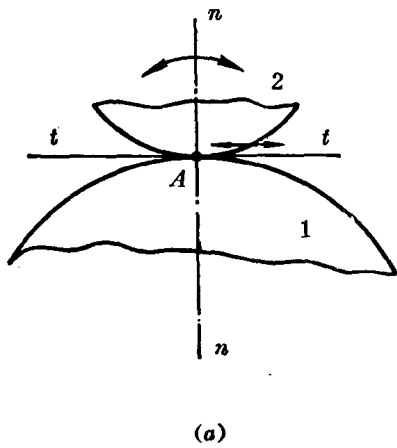
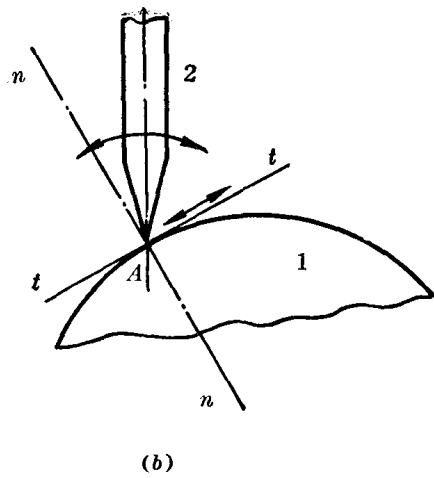


图 1-3

相对移动,而只约束掉沿着过接触点 A 的廓线法线 nn 方向的移动自由度。这种以点或线相接触的运动副,接触部分的压强较高,因此称为高副。显然,高副的接触表面不如低副那样耐磨损;但由于高副的约束数较少(只约束掉一个移动自由度),因此含有高副的机构(例如凸轮机构)在运动设计时,要比低副机构容易得多。



(a)



(b)

图 1-4

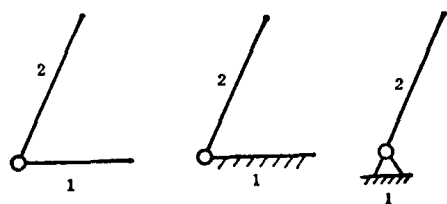
§1-3 平面机构的运动简图

机器是由许多机构组成的。因此,在新机器的方案设计时,或是对已有机器和新机器进行运动分析和受力分析时,都需要有一种简明的图形,以表明机构和运动副的类型以及各机构在传动过程中的先后顺序,以供方案讨论之用;有时并需标出那些与机构运动有关的尺寸,以便作为机构的运动分析和受力分析时的基本数据。这种简明的机构图形就是**机构运动简图**。

机构运动简图所要表示的主要内容为:运动副的类型和数目、构件的数目、运动尺寸、机构的类型。

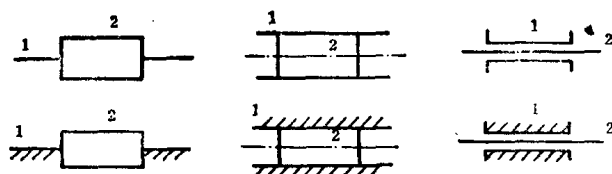
一、运动副的表示方法

图 1-5 所示的是两个构件形成转动副的几种情况的表示方法。转动副都用小圆圈表示。图 1-5(a) 表示两个活动构件形成转动副;如果两构件之一是固定件(机架),则把固定件画上斜线,如图 1-5(b)或(c)所示。



(a) (b) (c)

图 1-5



(a) (b) (c)

图 1-6

图 1-6 是两构件组成移动副的几种表示方法,其中画有斜线的构件表示是固定件。

当两构件组成高副时,在传动示意图或方案讨论用的运动简图中,可在两构件的接触处示意性地画出曲线轮廓,如图 1-4 的(a)和(b)所示。如果已经明确是凸轮机构或齿轮机构的高副,则可直接按凸轮机构或齿轮机构的简图形式,示意性地画出来(表明它是哪种凸轮机构或齿轮机构即可)。

二、几种主要机构的简图表示方法

1. 连杆机构

连杆机构是由转动副和移动副这两种低副组成的机构,因此有时也称为**低副机构**,其构件形状则为杆状和块状。具有两个转动副的杆状构件,用直线连接两转动副的几何中心来表示。图 1-7 是图 0-5 所示四铰链(转动副)机构的运动简图,其中构件上两铰链中心连线的长度,是直接于机构运动有关的尺寸,在进行运动分析和受力分析时,应标注出这些运动副之间相对位置的尺寸。有时为了避免该运动构件与其他构件相碰而把构件做成某种形状。图 1-8(a)所示的弯曲构件,在运动简图中,仍用两转动副几何中心所连直线来表示,如图 1-8(b)所示。

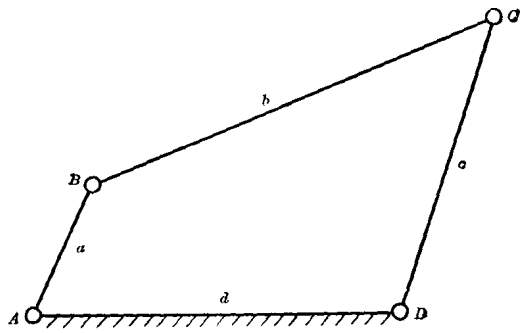


图 1-7

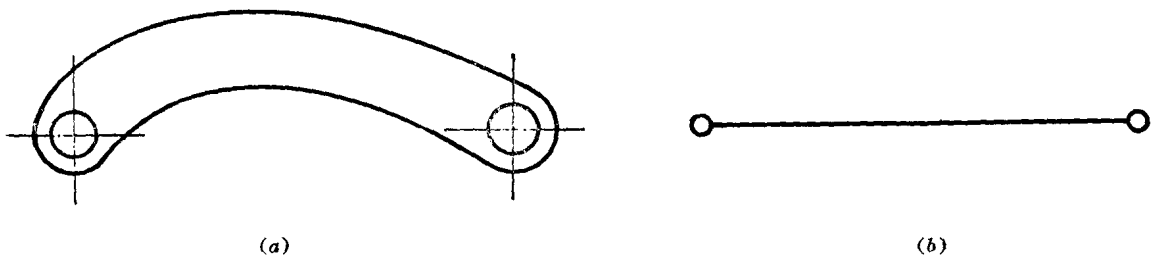


图 1-8

如果构件上具有多个转动副, 则用直线把它们连接成多边形, 并在相邻两条直线相交部位涂以焊接记号, 如图 1-9(a)和(b)所示, 或者把多边形画上阴影线, 如图(c)所示。如果同一构件上的三个转动副正好位于一直线上, 则为了表明它们是同一构件上的三个转动副, 可用跨越半圆符号来连接两段直线, 如图(d)所示, 而绝不可用两段简单的连线来表示, 因为这将使人误认为是两个构件正好位于一直线上。

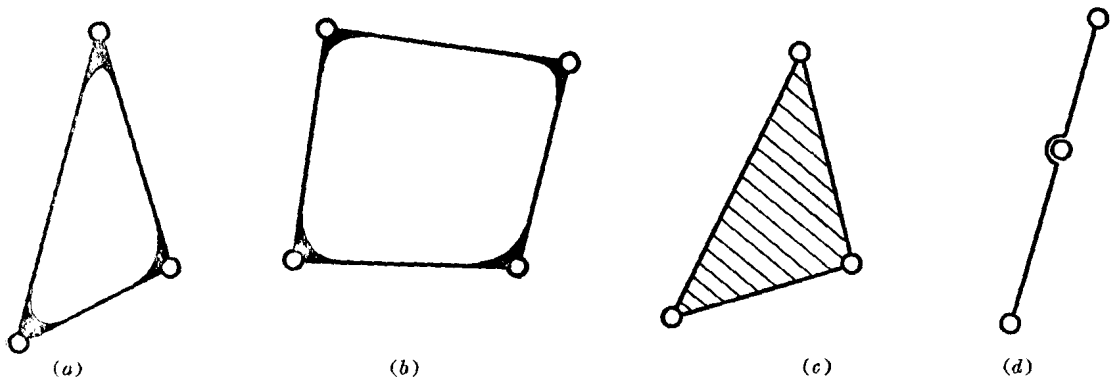


图 1-9

当两构件形成移动副时, 它们的相对移动方向关系到运动量的变化性质, 应该在运动简图

中正确表示出来。图 1-6 是两构件形成移动副的几种表示方法；图 1-10(a) 和 (b) 表示构件 1 分别与构件 2 和构件 3 形成移动副的表示方法，其中点划线表示两构件的相对移动方向，在画机构的运动简图时，点划线则画为实线，以表示滑块所沿之滑动的构件。图中 α 是与运动有关的量，应该标注出来。图 1-10(c) 表示构件 1 分别与虚线所示的构件 2 和 3 组成移动副和转动副的情况，其中转动副 A 相对于构件 2 的移动方向线与构件 2 上的另一转动副 B 之间的距离 e ，是运动尺寸，应该标注出来。

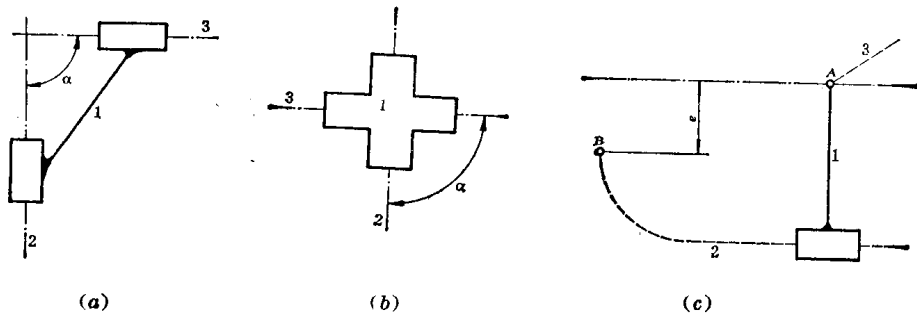


图 1-10

2. 凸轮机构

凸轮机构中的主要构件是凸轮，它的形状基本上有三种。一种是盘形凸轮，如图 0-4 所示，它的示意性简图如图 1-11(a)、(b) 所示。第二种是移动凸轮，它的示意性简图如图 1-11(c)、(d) 所示。第三种是圆柱凸轮，它的示意性简图如图 1-11(e)、(f) 所示(图中“×”号表示固结在凸轮轴上)。

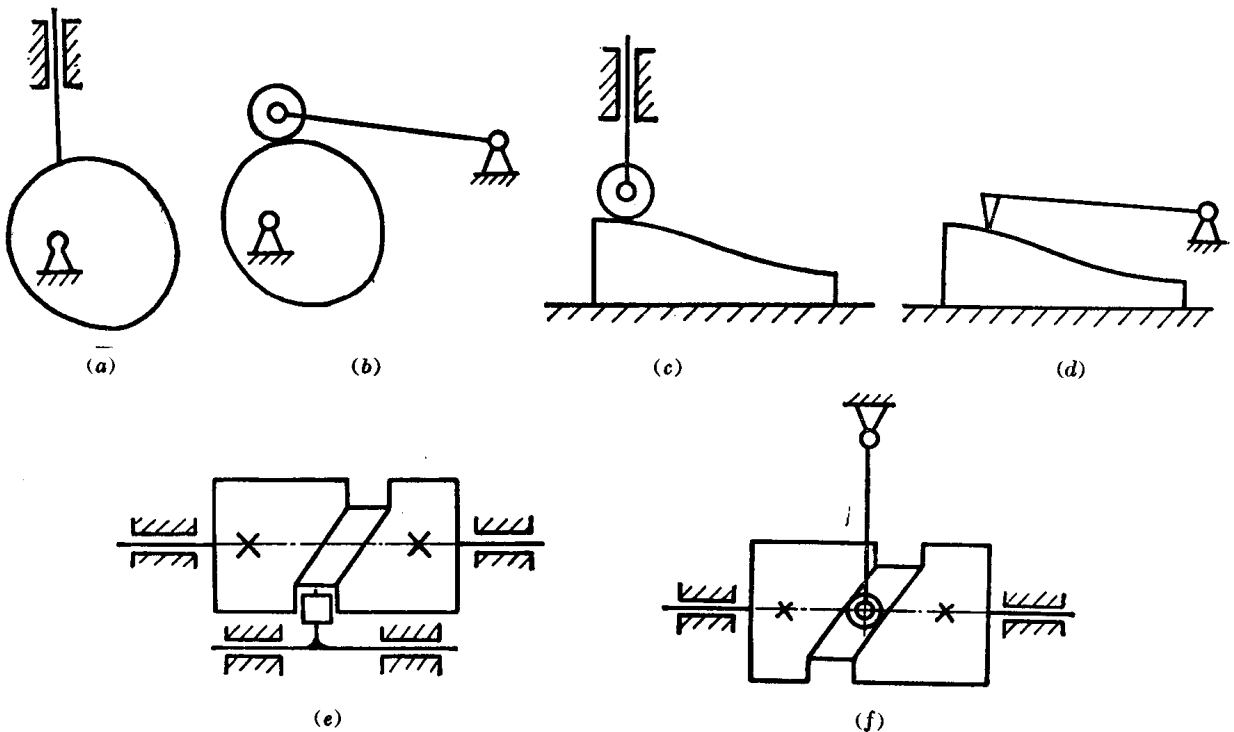


图 1-11