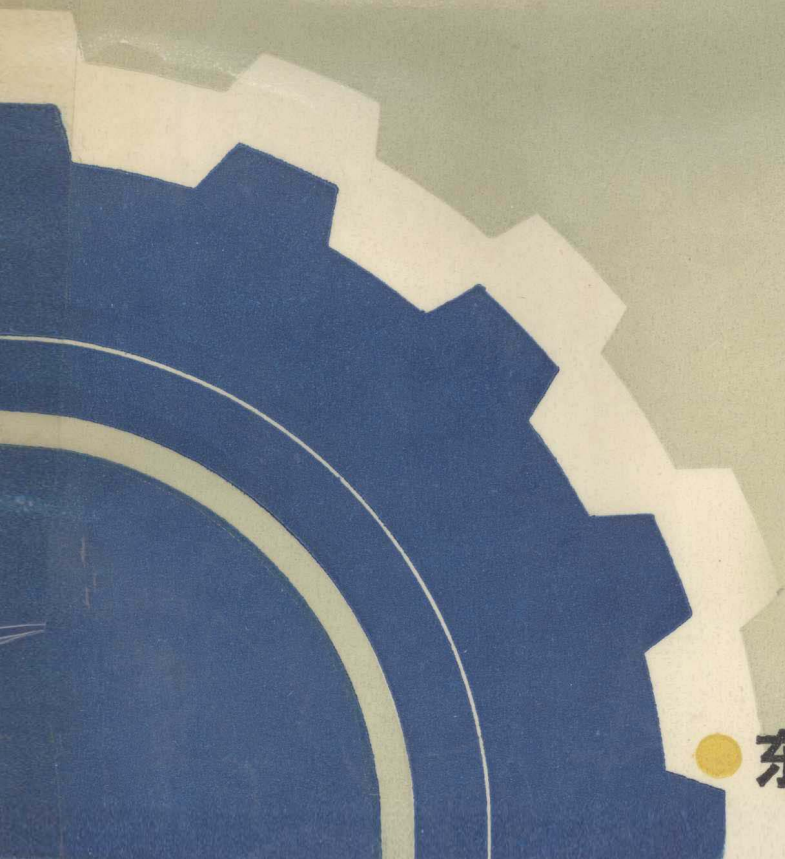


高等专科学校试用教材

机械力学与机构设计

● 主编 李向明 刘德仿

● 东南大学出版社



内 容 简 介

本书是高等工程专科教育改革的产物,是根据江苏省教育委员会1989年11月组织的专家论证会通过的《高等工程专科机械类专业培养目标和培养规格》中课程体系改革方案的要求编写的。

本书共十二章,包括平面机构的结构分析、相对运动原理和平面机构的运动分析、静力学与刚体系统的静力分析、达朗贝尔原理和平面机构的动态静力分析、刚性回转件的平衡、平面连杆机构及其设计、凸轮机构及其设计、齿轮机构及其设计、轮系及其传动比计算、其它常用机构、机构的组合与设计。此外,各章还附有思考题和习题,以便选用。

本书可作为高等工程专科学校机械类各专业的教材,也可供有关教师及工程技术人员参考。

责任编辑 田 湘

机械力学与机构设计

李向明 刘德仿 主编

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210018)

盐城市印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 20.625 字数 530 千

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

印数:1—2000册

ISBN 7—81050—105—4/TH·10

定价:23.80元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

《机械力学与机构设计》是根据江苏省教育委员会于 1989 年组织的专家论证会讨论通过的“高等工程专科机械类专业培养目标和培养规格”中课程体系改革方案的要求编写的教材。

高等工程专科教育专业教学改革包括课程设置体系和课程教学内容及其体系等的改革。“机械力学与机构设计”是改革课程设置而新设置的课程。本教材从机械专业教学的实际情况出发,系统地分析了原在物理学、理论力学、机械原理等课程中分别讲授的力学和机构学的教学内容、教学要求及课程之间的联系,依据高等工程专科教育基础理论教学“以应用为目的,以必需、够用为度,以掌握概念、强化应用为教学重点”的教学原则,确定教学内容和教学要求,重新组织知识单元,不求原课程学科体系的完整,力求构建便于教与学的新的教学内容体系。因此,本教材是高等工程专科教育改革的产物。本教材在保证教学基本要求的前提下,尽量避免课程间不必要的重复,注意教学内容间的衔接,教学学时比原来的课程减少了 20% 左右。

本教材的编写,突出“以应用为目的”的教学原则,着重介绍基本原理及其在工程中的应用。书中只安排必要的数学推导,注重概念的阐述,对某些基本原理,仅从物理现象出发得出结论。内容安排上,力求遵循学生的认知规律。每章均附有一定数量的思考题和习题。

本教材经江苏省教委批准,于 1990 年 11 月组织编写,1992 年 3 月起在盐城工业专科学校机械专业中使用。编者结合近几年的教学实践,对该教材结构、教学内容及文字、图表等方面进行了较大的调整和修改,现作为工程专科专业教学改革试用教材,由东南大学出版社出版。

本教材由李向明、刘德仿主持编写并统稿。引言、第一章由刘德仿编写,第二、十、十一章由朱龙英编写,第三、五、八章及第九章 § 1~§ 8 由李向明编写,第四、六章由曹兆健编写,第七章、第九章 § 9~§ 11 及第十二章由葛友华编写。

东南大学出版社委托东南大学郑文纬教授对本教材进行了审阅,他提出了很多宝贵意见和建议。在编写和审稿的过程中得到了江苏省教委教学处、学校领导的支持和关怀,得到了诸多同仁的帮助,万杰、李超凡、吴亚新老师在教材编写大纲的拟定过程中给予了具体的指导,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,恳请专家和使用本教材的老师、同学批评指正。

编 者

1995 年 6 月

引 言

随着现代科学技术,特别是信息科学和机电一体化技术的发展,现代机械不仅可以代替人的体力劳动,而且也能够减轻人的脑力劳动。但就机械而言,其首要问题仍然是机械的运动和力的传递或变换,以及作功问题。因而,本课程首先介绍与机械设计相关的力学知识,在物理学知识的基础上,更深入地研究静力学、运动学、动力学等力学的基本原理及其在机械中的实际应用。由于机械是宏观的,且其中发生的运动速度均远小于光速,因而,我们所研究的内容属于经典力学的范畴。在本课程中,我们把组成机械的物体(零部件),视为是刚体。刚体是在受力情况下保持形状和大小不变的物体,即在力的作用下,刚体中任意两点之间的距离始终不变。实际的机械零件在力的作用下,总是要或多或少地发生变形,但在设计中选用材料类型和截面尺寸时,总要使零件的变形小于一定值,以致零件在正常工作中产生的微小变形可以忽略不计。因此,刚体是一种理想化的力学模型,它简化了所研究的问题,而且简化后的研究结果也为实践所证实。当变形成为问题中的重要因素时(如材料力学中),就不能再把物体当作刚体。不过,这已不属于本课程研究的范围了。

本课程还研究机构的组成原理与结构分析、常用机构的分析与综合、机构的选型等基本知识及其具体应用。按照对问题研究的方法,可以把上述内容概括为两个方面,一是机构分析:研究对已有机构的结构、运动和动力分析的方法;二是机构综合:探索根据给定的运动和动力要求设计机构,确定机构各部分尺度关系的方法。由于在机构设计中不涉及零件的强度计算、材料选择、具体构造等问题,因而,我们用“综合”一词来代替“设计”一词。在设计过程中分析作为必不可少的工具,成为综合的一个步骤。

本课程是在修完高等数学、物理学、机械制图等基础课程后学习的。通过本课程的学习,将为机械零件、机械制造工艺、机械设备设计以及其它机械类的专业课程打下基础。本课程比物理等理论基础课程更加结合工程实际,又与专业课程有所不同,仅对机械所共有的一些问题和组成各种机械的常用机构进行较为深入的研究,而涉及各类专业的专门问题,则由专业课程分别研究。因此,它是机械类专业一门承上启下的重要技术基础课。在学习方法上应与学习理论基础课程的方法有一定的区别。在学习中要学会考虑多因素问题,学会掌握那些不是用简单数学关系式表达出来的问题,学会从实际问题中抽象出研究模型的思路和方法,要逐步形成工程观点,例如选择与比较的观点,实验与理论分析相结合的观点,经济效益的观点等等。

目 录

引言

第一章 平面机构的结构分析	(1)
§ 1 机器与机构	(1)
§ 2 机构的基本要素	(3)
§ 3 机构运动简图及其绘制	(5)
§ 4 平面机构的自由度	(7)
§ 5 平面机构的组成原理和结构分析	(11)
思考题	(15)
习 题	(15)
第二章 相对运动原理和平面机构的运动分析	(18)
§ 1 相对运动原理	(18)
§ 2 平面机构的运动分析	(28)
§ 3 速度瞬心及其在平面机构速度分析中的应用	(35)
§ 4 平面机构的运动线图	(39)
§ 5 平面机构运动分析的解析法	(40)
思考题	(44)
习 题	(45)
第三章 静力学和刚体系统的静力分析	(50)
§ 1 力的概念和静力学公理	(50)
§ 2 力矩和平面力偶理论	(56)
§ 3 刚体系统的受力分析	(59)
§ 4 力系的简化与平面力系的平衡方程	(65)
§ 5 刚体系统的平衡 静定与静不定概念	(74)
§ 6 空间力系的平衡与静力分析	(81)
§ 7 摩擦与考虑摩擦时的静力分析	(91)
思考题	(108)
习 题	(112)
第四章 达朗贝尔原理和平面机构的动态静力分析	(125)
§ 1 惯性力(矩)及其计算	(125)
§ 2 质心与转动惯量	(131)
§ 3 达朗贝尔原理	(133)
§ 4 平面机构的动态静力分析	(134)
思考题	(138)
习 题	(139)
第五章 刚性回转件的平衡	(141)
§ 1 刚性回转件的平衡原理及其平衡计算	(141)
§ 2 刚性回转件的平衡试验	(145)
§ 3 回转件的许用不平衡量及平衡精度	(146)

思考题	(149)
习 题	(149)
第六章 动能定理和机械运转	(151)
§ 1 刚体的动能定理和机械运动方程式	(151)
§ 2 等效力(力矩)和等效质量(转动惯量)	(154)
§ 3 机械运转的波动与调节	(157)
§ 4 飞轮的近似设计	(160)
§ 5 功率、功率方程和机械效率	(163)
思考题	(166)
习 题	(166)
第七章 平面连杆机构及其设计	(169)
§ 1 平面连杆机构及其应用	(169)
§ 2 平面四杆机构的基本类型及其判别	(170)
§ 3 平面四杆机构的演化	(173)
§ 4 平面四杆机构的几个基本概念	(176)
§ 5 平面四杆机构的运动设计	(180)
思考题	(187)
习 题	(187)
第八章 凸轮机构及其设计	(192)
§ 1 凸轮机构的应用和分类	(192)
§ 2 从动件的常用运动规律	(195)
§ 3 凸轮机构的压力角与基圆半径	(201)
§ 4 图解法设计凸轮轮廓	(203)
§ 5 解析法设计凸轮轮廓	(210)
思考题	(214)
习 题	(215)
第九章 齿轮机构及其设计	(218)
§ 1 齿轮机构的应用和分类	(218)
§ 2 齿轮啮合基本原理	(220)
§ 3 渐开线及渐开线齿廓的传动特性	(221)
§ 4 渐开线标准齿轮各部分名称和几何尺寸	(226)
§ 5 渐开线齿轮任意圆上齿厚和公法线长度	(229)
§ 6 渐开线齿轮的传动过程和传动条件	(231)
§ 7 渐开线齿轮的切制原理和根切现象	(238)
§ 8 变位齿轮传动	(242)
§ 9 斜齿圆柱齿轮传动	(250)
§ 10 蜗杆蜗轮传动	(258)
§ 11 直齿圆锥齿轮机构	(261)
思考题	(264)
习 题	(266)
第十章 轮系及其传动比计算	(270)
§ 1 轮系及其分类	(270)
§ 2 定轴轮系的传动比计算及其应用	(271)

§ 3 动轴轮系的传动比计算及其应用	(275)
§ 4 行星轮系中各轮齿数的确定	(282)
§ 5 几种新型行星轮系简介	(285)
思考题	(287)
习 题	(287)
第十一章 其他常用机构	(291)
§ 1 万向联轴节	(291)
§ 2 间歇运动机构	(292)
§ 3 螺旋机构	(298)
§ 4 非圆齿轮机构	(300)
思考题	(302)
习 题	(302)
第十二章 机构的组合与设计	(303)
§ 1 机构的选型	(303)
§ 2 机构的组合方式	(304)
§ 3 典型组合机构的设计	(309)
§ 4 机器的运动循环图	(313)
思考题	(317)
习 题	(317)
参考书目	(320)

第一章 平面机构的结构分析

本章在介绍有关机构的基本概念和术语的基础上,主要研究三个方面的内容:

(一) 机构具有确定运动的条件。在工程实际中,一台不能实现预期运动或没有确定运动的机械设备,是没有意义的。因此,判定所设计的机构能否具有确定的运动,是机械设计的首要任务之一,也是本章研究的重点。同时,根据机构确定运动的条件,研究构件组合为机构的基本原理。

(二) 机构的结构分类。现代机构的种类和形式繁多,要对其逐一建立运动分析和动力分析的方法十分繁琐,甚至是不可能的。为此,需要按照机构的结构特点将机构分类,以便按类建立运动分析和动力分析的一般方法。

(三) 机构运动简图的绘制。从复杂的实际问题中,找出与研究问题相关的主要因素,略去次要因素,建立起便于研究,又和实际情况相符的研究模型,是进行研究和分析的基本方法。因此,根据实际机械绘制机构运动简图,建立研究模型是机构分析的基本方法和基本技能,而且机构运动简图的设计也是机械设计的关键性一步。

§ 1 机器与机构

图 1.1 所示为单缸四冲程内燃机。它是由气缸 1、活塞 2、进气阀 3、排气阀 4、连杆 5、曲轴 6、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 9 和 10 等组成。活塞的往复运动通过连杆转变为曲轴的连续转动;凸轮和顶杆用来启闭进气阀和排气阀;3 个齿轮保证进、排气阀和活塞之间形成一定节奏的动作。以上各构件的协同工作便能使燃气的热能转化为曲轴的机械能。

在机械加工中使用的机械手如图 1.2 所示,它能代替人完成特定的操作动作。其动作顺序:手指夹料、手臂上摆、手臂回转一角度、手臂下摆、手指张开放料、手臂再上摆、反转、下摆、复位。电动机通过减速后(此部分图中未画出)带动分配轴 2 上的齿轮 1 转动。分配轴 2 上的齿轮 17 与齿轮 16 相啮合,把转动传给盘形凸轮 19,使杆 18 绕固定轴 O_2 摆动。杆 18 带动连杆 20,并通过杆 9、10、11、12 和连杆 13,使夹紧工件的手指张开。连杆 20 与杆 9 之间可以相对转动。手指 14 的复位夹紧由弹簧实现。同时,分配轴 2 上的盘形

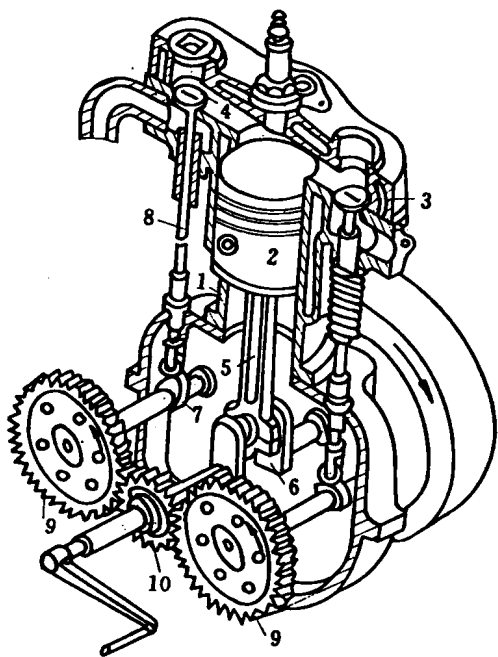


图 1.1

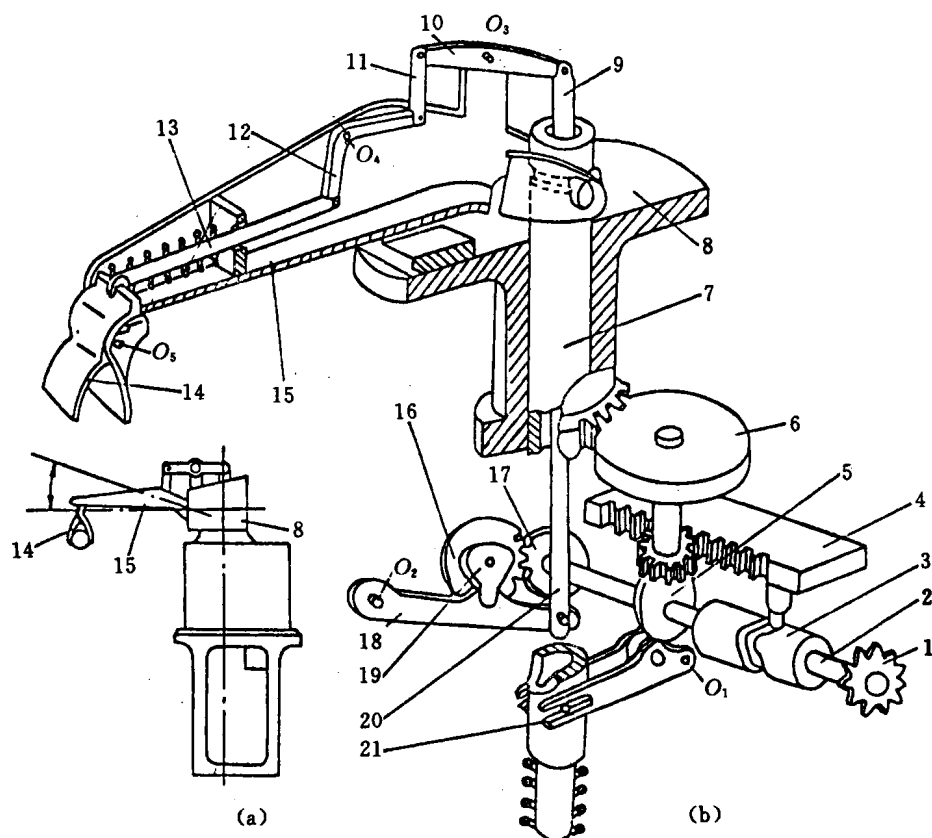


图 1.2

凸轮 5 的转动,通过杆 21 和圆筒 7 可使大臂 15 绕 O_3 轴上、下摆动(O_3 支承在座 8 上)。此外,圆柱凸轮通过齿条 4 和双联齿轮 6 传动,使座 8 作往复回转。

上述机械虽然结构、性能、用途各不相同,但从其组成、运动和功能来看,它们都具有现代机械所共有的下列特征:

- (1) 机械是各种材料制成的制造单元——零件,经装配而成的组合体。
- (2) 零件经刚性组合形成各个运动单元——构件。各构件之间具有确定的相对运动,使机构能够实现给定的预期运动。
- (3) 机械能够代替或减轻人的劳动,完成有用的机械功(如机械手的送料工作)或转换机械能(如内燃机将热能转换成机械能,发电机将机械能转换为电能)。

我们把具有上述三个特征的机械称为机器,即机器是能实现预期机械运动,并能完成有用的机械功或转换机械能的机械系统。把只有前两个特征的机械称为机构,即机构是用于运动和力的传递或转换的基本机械装置。机械则是机器和机构的总称。

由于机器含有机构的两个特征,机构又是实现运动变换的基本装置,从运动和力的传递或变换的角度来说,机器可以看成是由机构组成的,能完成机械功或转化机械能的系统。一台机器可由一个或若干个机构所组成。如电动机、鼓风机是只含有一个双杆机构的简单机器。图 1.1 所示的内燃机就包含了凸轮机构、曲柄滑块机构和齿轮机构等三种不同的机构。现代机器已广泛地应用于生产、国防、生活等各个领域,其性能、形状、用途千差万别,但从运

动的角度对其进行分析比较,可以发现这些众多的机器是由为数不多的常用机构通过不同的组合方式得到的。如果我们熟练地掌握了这些常用机构的结构特点、运动和动力特性,将利于我们对各种机械的分析。常用机构除图 1.1 中所示的机构外,还有螺旋机构、间歇运动机构、挠性件传动机构以及组合机构等,这些将分别在以后的章节中介绍。

§ 2 机构的基本要素

机构中构件间的运动传递和相对运动的性质取决于构件间直接接触的几何表面——运动副元素的性质,即构件通过运动副元素组成的可动联接——运动副组合为机构。因而,从运动的角度上讲,构件和运动副是组成机构的两个基本要素,它们也是本课程的研究单元和主要研究对象。

一、构件

构件是机构中的刚性运动单元。它可以是单一的零件,如图 1.1 中的曲轴,也可以是几个零件的刚性组合,如图 1.3 所示的内燃机的连杆,就是由连杆体 1、连杆头 2、轴套 3、轴瓦 4、螺栓 5、螺母 6 等零件组合成的一个构件。

作为是刚体的构件,其上任意两点之间的相对位置始终不变,故从运动的角度讲,构件的功用就是保持同一构件上各运动副元素之间恒定的空间相对位置。那些非刚性的机件(如弹簧),对机构的运动通常没有影响,只在供力时起作用,因而在研究机构运动时,这些机件通常忽略,不予考虑。

根据构件在机构中的功能,可以分为三类:

(1) 机架 机构中相对静止的,用于支持各个作相对运动构件的构件。机架通常是研究构件运动的基准(参照系)。所以,任一机构中必须有且只有一个机架。

(2) 原动件 机构中驱动力(力矩)所作用的构件,亦称主动件。它的个数应和机构自由度相等。

(3) 从动件 除原动件以外的运动构件,它们随原动件的运动而运动。从动件中输入运动或动力的构件,称为输出构件。

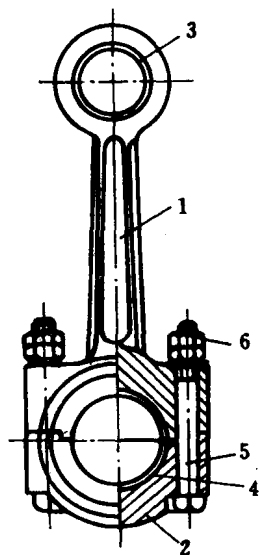


图 1.3

二、运动副

运动副是直接接触构件间的可动联接,是处于不同构件上的两个运动副元素的组合。因而构件间的成副条件,一是成副构件间应具有确定的相对运动,故两构件间可以有且只能有一个运动副;二是机构运动中成副构件必须始终保持接触,否则称之为运动副破坏,机构就不能实现预期运动。这就要求在设计运动副的具体构造时,必须采用适当的方式保证成副构件间的运动副元素始终接触。由于运动副的具体构造由相应专业课程研究,在本课程中,总是认为运动副是不被破坏的。

用来确定构件位置的独立参变量,称为构件自由度。如图 1.4 所示,确定作平面运动的自由构件 2 的位置需三个独立参变量,即构件上任一点 A 的坐标 x_A 和 y_A 以及任一直线的

倾角 θ 。当三个独立参变量分别变化时,可以得到构件在平面上的三个独立运动,即沿 x 轴的移动,沿 y 轴的移动以及绕着 A 点的转动。因而作平面运动的自由构件可以有三个自由度。我们把对构件独立运动的限制,称为约束。对构件每加上一个约束,构件将失去相应数量的自由度。当失去全部自由度时,构件变成静止构件。

如图 1.5 所示,当构件 2 与构件 1(为简便起见,构件 1 与参照系 Oxy 固联)借助于铰链在 A 点处形成一种相对转动的运动副,由于构件 2 上点 A 的坐标 x_A 和 y_A 相对于坐标系 Oxy (即构件 1)被限定而不能再发生变化,即这两个相对移动的自由度被约束,只剩下一个绕 A 点相对转动的自由度。由此可见,两构件间运动副的功用,就是约束构件间的相对运动,减少相对运动的自由度,实现构件间确定的相对运动。

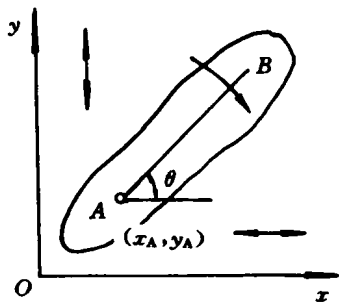


图 1.4

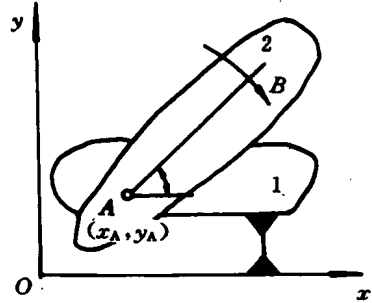


图 1.5

根据成副构件间相对运动的性质,运动副可分为:平面运动副——成副构件在相互平行的平面内相对运动;空间运动副——成副构件在三维空间内相对运动。运动副全部为平面运动副的机构为平面机构,含有空间运动副的机构为空间机构。本课程主要研究平面运动副和平面机构。平面运动副有三种形式:

(1) 转动副 如图 1.6 所示,其运动副元素的截面形状为内、外圆,并有两个轴肩阻止构件 1 和 2 之间的轴向移动。因而,构件 2 沿 x 轴和 y 轴的两个相对移动被约束,只有绕垂直于 Oxy 平面的轴相对转动的一个自由度。

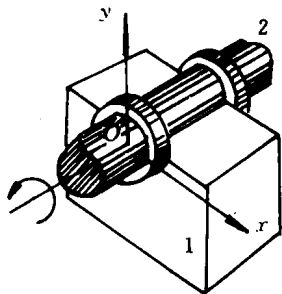


图 1.6

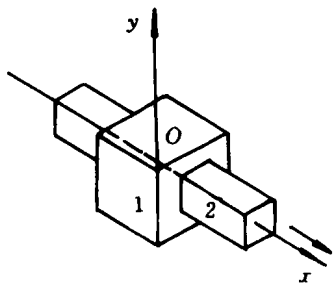


图 1.7

(2) 移动副 如图 1.7 所示,其运动副元素截面形状为内、外矩形。故构件 2 沿 y 轴的相对移动和绕垂直于 Oxy 平面轴的相对转动被约束,只有沿 x 轴相对移动的一个自由度。

上述两种运动副均为面接触,接触部分的压强较低,故称为低副。平面低副具有两个约束,只有一个自由度。

(3) 平面高副 图 1.8a 所示的运动副,其两个运动副元素的截面形状至少有一个为曲

线。构件2沿公法线 $n-n$ 方向的相对移动被约束,而具有沿公切线 $t-t$ 方向的相对移动和绕接触点 A 的相对转动,因而,它有一个约束,且具有两个自由度。齿轮啮合时轮齿之间的联接、滚子与凸轮轮廓之间的联接都属于这一类情况。当构件2接触轮廓的曲率半径趋于零时,则演化为图1.8b所示的型式,尖底从动件与凸轮轮廓之间的联接就属于这一类型。

这类运动副的接触均为点或线接触,接触部分压强较高,故称为高副。平面高副具有一个约束,且有两个自由度。高副接触表面不如低副那样耐磨损,但因具有较多的自由度,故含有高副的机构(如凸轮机构)实现复杂运动规律比低副机构容易。

综上所述,我们可以根据运动副元素的形状,判定平面运动副的类型,从而确定运动副对构件的约束数和约束形式。这对于后面的机构自由度计算和静力分析中约束反力的确定是十分有益的。

§ 3 机构运动简图及其绘制

机构运动简图是一种用简单符号与线条表示的高度抽象化的研究模型。它仅含有与运动和力的传递有关的必需信息,即构件的数目,运动副的数目、性质及其排列顺序,及与运动和力的传递有关的尺寸相对位置尺寸,排除了那些与运动无关的因素对运动分析和运动综合的干扰。因而,虽然机构运动简图与实际机械的形状几乎毫不相似,但在机械的研究中有着广泛的应用。

一、平面运动副符号

图1.9所示为转动副符号。回转轴线垂直于图面时,用图1.9a表示;回转轴线平行于图面时,用图1.9b表示。

画有斜线的构件表示机架。

图1.10所示为移动副的符号。

若两构件组成平面高副,则应当画出两构件接触处的曲线轮廓,如图1.8所示。

二、构件的表示方法

本章第2节中指出,从运动的角度,机构中构件的功用就是保持同一

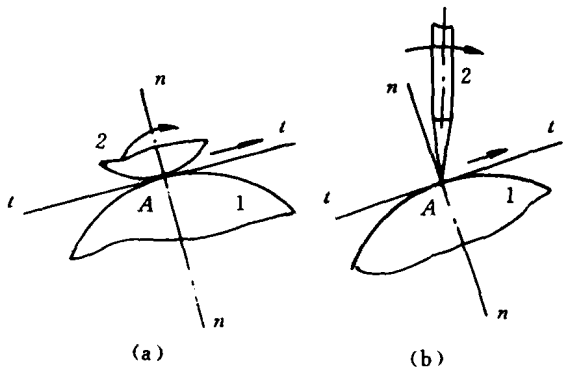


图 1.8

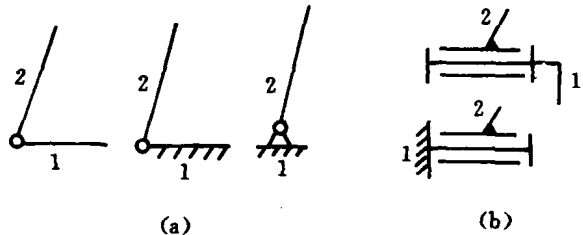


图 1.9

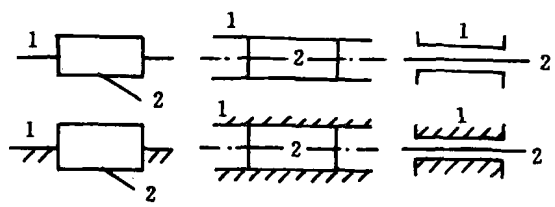


图 1.10

构件上各运动副元素之间恒定的相对位置。因而在简图中表示一个构件时，只需正确地反应出该构件上运动副元素的性质(用相应的运动副符号表示)、数目及其相对位置和尺寸，并用简单的线条将其连成一体。

图 1.11 表示具有两个运动副元素的构件。对有 n 个运动副元素的构件，可以用 n 边形来表示。 n 边形的顶点为运动副元素的位置，边长为各运动副元素间的相对尺寸，如图 1.12 所示。为了表示这 n 个运动副元素在同一构件上，应将多边形的各内角标注焊缝符号或将 n 边形的中间画上斜线。图 1.12c 是三个转动副元素的中心处于同一直线时的表示方法。

对于某些特殊的构件，应从 GB4460—84 中选用相应的机构运动简图符号。

由于运动副元素间的相对位置和尺寸是决定机构运动特性的主要因素之一，因此，简图中构件上运动副元素的位置必须与实际位置相符，其间的相对尺寸必须和实际尺寸相同或成一定比例。如图 1.11 中转动副中心之间的距离 l ，移动副导路之间的夹角 θ ，转动副中心到移动副导路之间的距离 h 等。

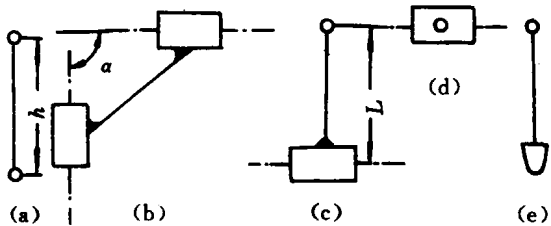


图 1.11

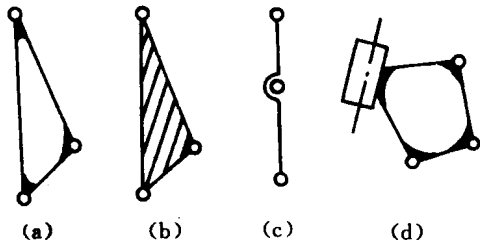


图 1.12

三、机构运动简图的绘制

下面通过例 1.1，说明机构运动简图绘制的一般方法。

例 1.1 图 1.13a 所示为一颚式破碎机。当曲轴 1 绕轴心 O 连续转动时，动颚板 5 绕轴心 F 往复摆动，从而将矿石轧碎。试绘制此破碎机的运动简图。

解：(1) 从原动件开始，沿着传动路线依次判定构件及运动副的数目，并根据各构件间运动副元素的几何形状判定运动副的类型。

从图中可见，该机由曲轴 1、连杆 2、3、4 及动颚板 5 和机架 6 组成，各构件间分别构成 7 个运动副且全部为转动副。

(2) 测量各运动尺寸，即各构件上运动副元素间的相对尺寸。

(3) 选定投影平面和作图比例尺 μ_l 。

$$\mu_l = \frac{\text{实际尺寸 mm}}{\text{图上尺寸 mm}}$$

(4) 从原动件开始依次用相应的运动副符号和构件的表示方法，按比例作出机构运动简图。如图 1.13b 所示。

如果只要求定性地表达各构件间的相互关系，那么在绘制简图时可以不按比例，这种图形称为机构示意图。

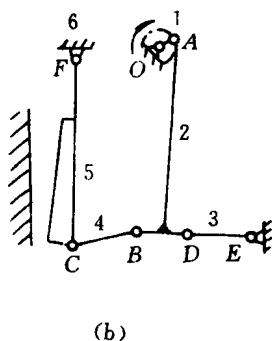
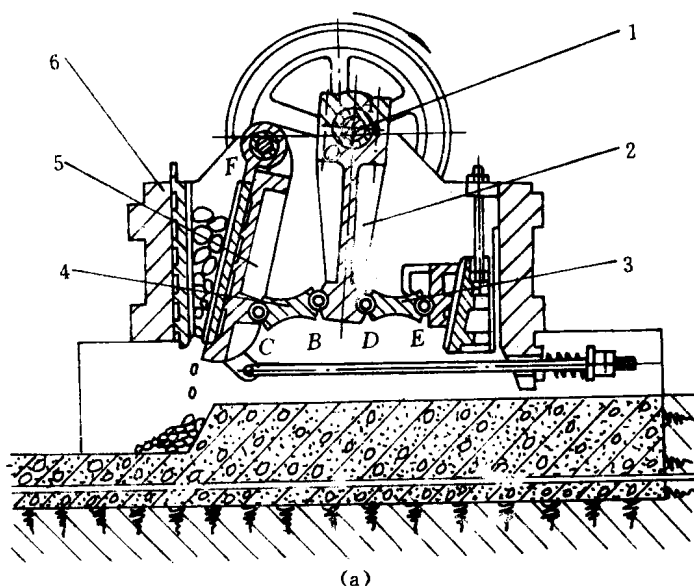


图 1.13

§ 4 平面机构的自由度

一、平面机构自由度计算公式

和构件自由度的定义相似,机构自由度是确定机构位置的独立参变量。如果一平面机构由 q 个构件组成,且具有 P_L 个低副和 P_H 个高副。这 q 个构件中有一个构件为静止构件(机架),那么该机构的活动构件数 $n=q-1$ 。这 n 个活动构件未以运动副相联时,共具有 $3n$ 个自由度,当用 P_L 个低副和 P_H 个高副组合成机构之后,就受到 $2P_L+P_H$ 个约束。那么,该机构相对于机架的相对自由度 F 为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (1.1)$$

通常将相对自由度 F 称为机构自由度。式(1.1)称为平面机构自由度的计算公式。

二、平面机构具有确定运动的条件

现在我们利用平面机构自由度来证明平面机构具有确定运动的条件。

例 1.2 计算图 1.14 中所示构件组合的自由度。

解:(1)

$$n = 2, \quad P_L = 3$$

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

可直观地看出图 a 为一三角形的静定结构,显然是不能运动的。

(2)

$$n = 2, \quad P_L = 2, \quad P_H = 1$$

$$F = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \times 1 = 1 > 0$$

与图 a 相比,图 b 中转动副 B 改为高副,因而其自由度 $F=1>0$,是可以运动的。由此我们也可以看出高副和低副在运动设计时的差异。

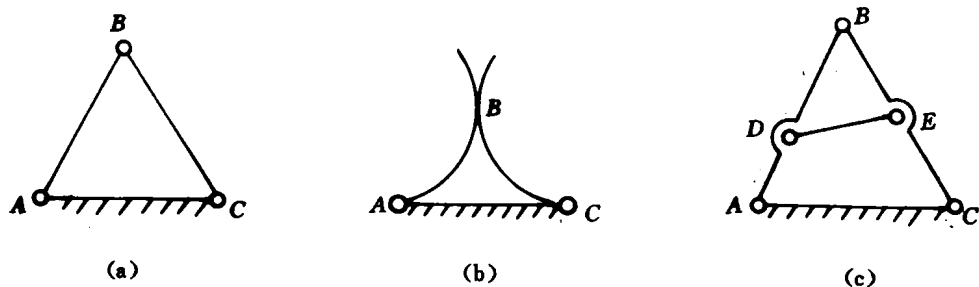


图 1.14

$$(3) \quad n = 3, \quad P_L = 5$$

$$F = 3 \times 3 - 2 \times 5 = -1 < 0$$

可直观地看出,图 c 亦为不能运动的结构。

由上述各例可见,机构可以运动的条件是:机构的自由度大于零,即 $F > 0$ 。

机构自由度是确定机构位置的独立参变量,即机构所具有的独立运动。由构件的分类可知,构件中只有原动件的运动与机构本身无关,故机构的独立运动是由原动件确定的。通常原动件是用低副与机架相连,因而,每个原动件具有一个独立运动,其运动形式由低副的类型确定。

图 1.15 所示的四杆机构,其 $F=1$ 。当它具有两个原动件 1 和 3 时,构件 1 和 3 一方面各自独立运动,一方面又要按对方的运动规律运动,这显然是矛盾的。如果强迫两原动件按各自的运动规律运动,则机构中最弱的构件必将损坏。因而机构的原动件数大于机构自由度的情况是不允许的。

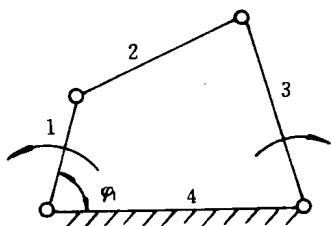


图 1.15

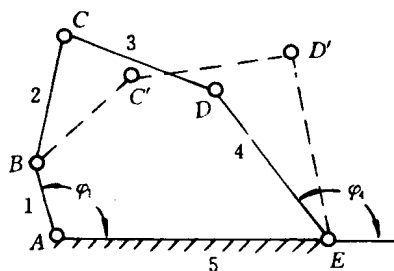


图 1.16

图 1.16 所示的铰链五杆机构,其 $F=2$ 。当其只有一个原动件(如构件 1)时,构件 1 的位置确定后(即 φ_1 确定),从动件 2、3、4 的位置不能确定,它们可处于实线位置,也可处于虚线位置或者其他位置。因而,原动件数小于机构自由度时,机构运动也不能确定。

当图 1.15 中的四杆机构只具有一个原动件(如构件 1)时,构件 1 的位置确定后(即 φ_1 确定),从动件 2 和 3 的位置也就唯一确定。这表明当原动件数等于机构自由度时,机构的运动才是确定的。

综上所述,平面机构具有确定运动的条件是:机构自由度大于零,且原动件数与机构相对自由度数目相等。

三、计算平面机构自由度应注意的问题

1. 复合铰链

图 1.17a 所示机构中,若认为仅有 6 个转动副,是错误的。如铰链 D 处,实际上有两个转动副,即分别由构件 4 和 5,构件 4 和 6 组成的两个转动副,其具体构造如图 1.17b 所示。这种由两个以上的构件分别组成同轴线的多个转动副的铰链,称为复合铰链。显然,由 m 个构件组成的复合铰链,应含有 $m-1$ 个转动副,但当其轴线与图面垂直时,在简图中只用一个转动副符号表示,容易造成计算错误,需十分注意。图 1.17a 中所示机构中, 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,故该机构 $n=7$, $P_L=10$, $P_H=0$, 由式(1.1)得其自由度为

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

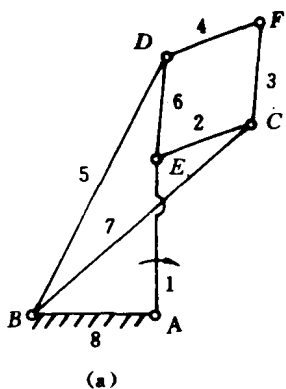


图 1.17

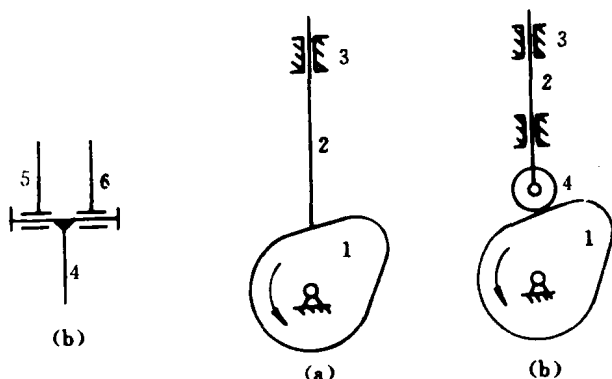


图 1.18

2. 局部自由度

图 1.18a 所示的凸轮机构中, $n=2$, $P_L=2$, $P_H=1$, 由式(1.1)得

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

由于从动件 2 和凸轮 1 之间的摩擦是滑动摩擦,为了减少摩擦,常在从动件的端部加上一圆形滚子,如图 1.18b 所示,使从动件和凸轮之间的摩擦变为滚动摩擦。由于滚子的加入,使机构自由度增加为 2,但可以看出,圆形滚子绕其自身轴心的运动与其它构件无关。这种与机构运动无关的自由度称为局部自由度。平面机构中变滑动摩擦为滚动摩擦的滚子是局部自由度最常见的型式。

在计算自由度时,局部自由度应除去。为防止计算错误,可以设想滚子与安装滚子的构件焊为一体,即在确定构件和运动副的数目时,不计滚子及由它带入的那个转动副。

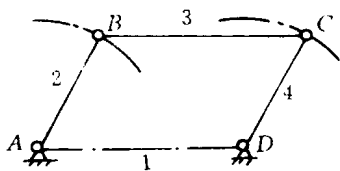
3. 虚约束

机构中,某些运动副带入的约束,在特定的几何条件下,对机构运动不起实际约束作用,这类约束称为虚约束。平面机构的虚约束常发生在下列情况中:

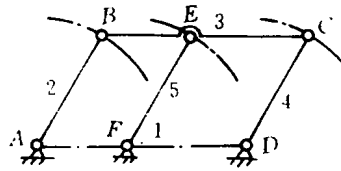
1) 机构中两构件联接点的运动轨迹重合时,该联接带入一个虚约束。

如图 1.19a 所示的铰链四杆机构为平行四边形机构,其对边构件的尺寸相等,故连杆 3 的运动为平动。平动构件上各点的运动轨迹相同,则 BC 线上各点的轨迹均为圆心在 AD 线上,半径等于 l_{AB} 的圆周。该机构的自由度为 $F = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$ 。

现如图 1.19b,在连杆 3 的 BC 线上的任一点 E 处再铰接一构件 5,该构件的另一端铰



(a)



(b)

图 1.19

接于 E 点轨迹的圆心—— AD 线上的 F 点处,此时机构自由度按式(1.1)计算

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

这是因为构件 5 的加入引入 3 个自由度,但却因增加了两个转动副而引入 4 个约束,使机构多了一个约束。但构件 5 与构件 2、4 长度相等且相互平行,故构件 5 上的 E_5 点轨迹亦为圆心在 F 点、半径为 l_{AB} 的圆周,与构件 3 上的 E_3 点轨迹重合。因而,增加的这个约束是对机构运动不起实际约束的一个虚约束。

在计算机构自由度时,虚约束应当除去,即在计算活动构件和运动副的数目时,不计引入虚约束的构件及由它所产生的运动副,如图 1.19b 中构件 5 和转动副 E 、 F 。换句话说,就是在计算机构自由度时,应从机构中拆除引入虚约束的构件。

与此相仿,机构运动时若不同构件上的两点间距离始终保持不变,在这两点之间用两个转动副联接一个构件时,也将引入一个虚约束。如图 1.20 所示机构中,当 $AE = DF$ 时, $ADFE$ 始终为平行四边形,故 $EF = AD = \text{常数}$ 。在 E 、 F 点分别以转动副联接构件 5 时,也将引入一个虚约束。

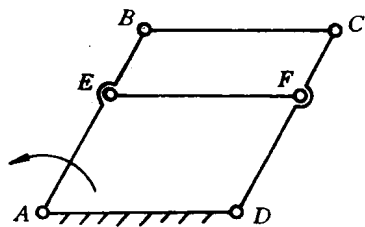


图 1.20

2) 两构件间形成多个运动副,且满足特定几何条件时,这些运动副中只有一个为实际约束,其余为虚约束。这类情况有:

(1) 两构件构成多个移动副且其导路相互平行,如图 1.18b 中从动件与机架间的移动副。

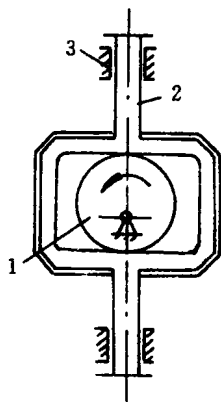


图 1.21

(2) 两构件间构成多个转动副且轴线相互重合,如回转轴两端的同心轴承。

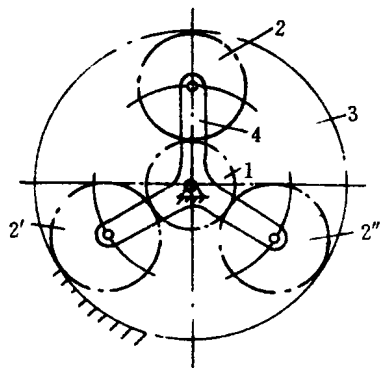


图 1.22

(3) 图 1.21 中的定宽凸轮,由于凸轮轮廓在任何方向的宽度均为常数,故凸轮与从动件平底间的两个高副中有一个为虚约束。

3) 在输入与输出构件之间采用多组相同的构件组来传递运动时,只有一组构件组起独立传递运动的作用,其余各组将引入虚约束。如图 1.22 所示的行星轮系,为了受力均衡而采