

高等学校教材

机械原理教程

孙 桓 主编

JIXIEYUANLI JIAOCHENG

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书共十二章，包括：绪论，机构的组成及机构运动简图，各种传动机构的基本类型、特点及应用，平面机构的运动分析，平面机构的力分析，机械的运转及其速度波动的调节，机械的效率及自锁，齿轮机构及其设计，凸轮机构及其设计，平面连杆机构及其设计，其它常用传动机构，机构的选型及组合。各主要章次均附有一定数量的习题。

本书是西北工业大学机械学教研室组织编写的《机械原理教程》（孙桓主编）和《机械设计教程》（濮良贵主编）两本教材之一。这两本教材（其适用学时范围均为40~50学时）以合并使用作为“机械设计基础”（原“机械原理及机械零件”）课程（其参考学时范围：80~100学时）的教材为主；也可作为某些近机类专业分别开设的“机械原理”课程及“机械设计”课程的教材。此外，还可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

高等学校教材
机械原理教程
主 编 孙 桓
责任编辑 胡梦仙

*
西北工业大学出版社出版
（西安市友谊西路127号）
陕西新华书店发行
西北工业大学出版社印刷厂印装

*
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11.75 277 千字
1987 年 11 月 第一版 1987 年 11 月 第一次印刷
印数 1—30000 册
ISBN 7-5612-0019-6/TH·1 定价：2.00 元
统一书号：15433·064

前 言

根据教学需要,我室组织编写了《机械原理教程》和《机械设计教程》两本教材。这两本教材(其适用学时范围均为40~50学时)以合并使用作为“机械设计基础”(原“机械原理及机械零件”)课程(其参考学时范围:80~100学时)的教材为主;也可作为某些近机类专业分别开设的“机械原理”课程及“机械设计”课程的教材。

根据上述本书适用专业的教学要求,本书的编写着重讲清有关机械原理的基本概念、基本理论和机构分析与设计的基本方法。而且在内容选材和体系安排方面也作了一些推敲,显示出一定的特色。例如,为了在开始学习本课程时先使学生对各种传动机构有一个大体的了解,以增加他们的感性认识,并激发他们学习本课程的兴趣,本书在介绍了机构的组成及机构运动简图的画法之后,安排了“各种传动机构的基本类型、特点及应用”一章;为了在机构的选择和组合应用方面为学生提供一些思路,在介绍了各种基本机构的分析与设计之后,则安排了“机构的选型及组合”一章,并列举了机构运动简图设计的实例等。又鉴于计算机应用的普及,在机构运动分析、力分析和各种机构的设计方面,则加强了有关解析法的内容。此外,如关于机构的定义、运动副中的摩擦和回转体的平衡等内容,也都作了一些新的安排。本书还选编了数量较多的习题(包括一部分适于运用电算的题目)供教学使用。

参加本书编写的有:孙桓(第一、二、三、十一、十二章)、李继庆(第四、五章)、张榛(第六、九章)、管叙源(第七、十章)和付则绍(第八章)等同志,并由孙桓同志负责主编。

由于我们的水平所限,遗误及不当之处在所难免,敬希广大读者不吝指正。

西北工业大学机械学教研室

1987年5月

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 本课程研究的对象及内容	1
§ 1-2 学习本课程的目的及注意事项	2
第二章 机构的组成及机构运动简图	4
§ 2-1 机构的组成	4
§ 2-2 机构运动简图	5
§ 2-3 机构具有确定运动的条件	8
§ 2-4 平面机构自由度的计算	9
§ 2-5 计算平面机构自由度时应注意的事项	10
习 题	12
第三章 各种传动机构的基本类型、特点及应用	15
§ 3-1 通过低副接触直接传动的机构	15
§ 3-2 通过高副接触直接传动的机构	16
§ 3-3 通过中间连杆的间接传动机构	19
§ 3-4 具有挠性中间构件的间接传动机构	20
§ 3-5 以流体为中间传动介质的流体传动机构	20
§ 3-6 组合机构	21
第四章 平面机构的运动分析	23
§ 4-1 概述	23
§ 4-2 平面机构的位移、速度及加速度方程	23
§ 4-3 平面机构速度及加速度分析的图解法	26
§ 4-4 利用速度瞬心对平面机构进行速度分析	30
习 题	33
第五章 平面机构的力分析	37
§ 5-1 机构力分析的目的和方法	37
§ 5-2 运动副中的摩擦力	38
§ 5-3 构件的惯性力	43
§ 5-4 构件惯性力的平衡	46
习 题	51

第六章 机械的运转及其速度波动的调节	54
§ 6-1 概述	54
§ 6-2 机械的运动方程式	55
§ 6-3 机械运动方程式的求解	57
§ 6-4 在稳定运转状态下机械的周期性速度波动及其调节	58
§ 6-5 机械的非周期性速度波动及其调节	61
习 题	62
第七章 机械的效率和自锁	64
§ 7-1 机械的效率	64
§ 7-2 机械的自锁	67
习 题	73
第八章 齿轮机构及其设计	75
§ 8-1 齿轮机构的应用及分类	75
§ 8-2 齿轮啮合的基本原理	76
§ 8-3 渐开线齿廓的啮合传动	80
§ 8-4 渐开线标准齿轮各部分的名称和尺寸	81
§ 8-5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	85
§ 8-6 渐开线齿廓的切制原理	88
§ 8-7 轮齿的根切现象和渐开线标准齿轮不发生根切时的最小齿数	90
§ 8-8 变位齿轮概述	91
§ 8-9 斜齿圆柱齿轮传动	92
§ 8-10 螺旋齿轮传动	96
§ 8-11 蜗轮蜗杆传动	98
§ 8-12 圆锥齿轮传动	100
§ 8-13 轮系及其应用	103
§ 8-14 少齿差行星齿轮传动	110
§ 8-15 摆线针轮传动	112
§ 8-16 谐波齿轮传动	114
习 题	115
第九章 凸轮机构及其设计	118
§ 9-1 凸轮机构及其分类	118
§ 9-2 推杆常用的运动规律	120
§ 9-3 凸轮轮廓曲线的设计	123
§ 9-4 凸轮机构的压力角与凸轮的基圆半径	130
§ 9-5 圆柱凸轮机构概述	133

习 题	137
第十章 平面连杆机构及其设计	140
§ 10-1 概述	140
§ 10-2 平面四杆机构的类型及其应用	140
§ 10-3 有关四杆机构的一些基本知识	146
§ 10-4 平面四杆机构的设计	149
习 题	158
第十一章 其它常用传动机构	162
§ 11-1 万向铰链机构	162
§ 11-2 螺旋机构	163
§ 11-3 棘轮机构	165
§ 11-4 槽轮机构	168
§ 11-5 不完全齿轮机构	171
习 题	173
第十二章 机构的选型及组合	174
§ 12-1 概述	174
§ 12-2 机构的选择与组合	174
§ 12-3 机器的工作循环图	176
习 题	178
参考书目	179

第一章 绪 论

§ 1-1 本课程研究的对象及内容

“机械原理”是介绍机械组成的基本知识，以及有关机械运动学和动力学的基本问题的一门课程。因而本课程研究的对象自然是“机械”。至于什么是“机械”，以及本课程研究的具体内容是什么，下面再进一步加以说明：

“机械”这个名词，我们是很熟悉的。而且一般认为它是“机构”和“机器”的总称。而所谓“机构”，我们也并不陌生。在理论力学等课程中，我们并且已对一些机构（如连杆机构、齿轮机构等）的运动学及动力学问题进行过研究。在工程实际中，常见的机构还有皮带传动机构、链传动机构、凸轮机构、螺旋机构等等。各种机构都是一种用来传递运动和力或改变运动形式（如将回转运动改变为往复移动，将连续运动改变为间歇运动等）的机械传动系统。至于所谓“机器”，则都是根据某种使用要求而设计的机械装置。各种机器均能完成有益的机械功（如改变工作物的外形及空间位置等）或转化机械能。例如发电机能将机械能转化为电能，内燃机能将热能转化为机械能，而各种工作机械则能利用机械能来完成有益的机械功。

在日常生活及生产中，我们都接触过许多机器。各种机器具有不同的构造、型式和用途。但是，所有比较完善的机器，都包括原动部分（或原动机）、执行部分（或执行机构）及传动系统（传动部分）三个主要部分。此外，为了保证机器的正常工作，有时还需要有一些操纵及控制部分。

原动部分（或原动机）是机器完成工作任务的动力输入部分。常用的原动机有蒸汽机、内燃机、电动机等。某些比较简单的机器，其原动部分也可以是由电磁力、人力、畜力或其他动力直接驱动的。

执行部分（或执行机构）是机器完成工作任务的直接执行部分或执行装置。如车床的主轴、牛头刨床的刨头、六角车床刀架的转位机构、自动插秧机的插爪机构等。

传动系统（即传动部分）的作用是将机器原动部分的运动和动力传递并分配给机器的各执行部分，使各执行部分获得所需的运动形式和工作能力。传动部分在传动和传力的过程中，往往还负有改变运动形式、减速（或增速）、变速、换向等任务。传动部分是机器的核心部分。正确、合理地设计机器的传动部分，对于提高机器的性能指标（如效率、寿命和可靠性等）及降低其成本都是至关重要的。

在机器的传动系统中，主要是机械传动，也可能还有流体动力传动（如液压传动及气压传动）、电力磁力传动等。机械传动是本课程研究的主要对象。机械传动主要包括摩擦传动机构、齿轮机构、凸轮机构、连杆机构及链传动机构等。

操纵及控制部分是操纵及控制机器各部分协调动作并准确可靠地完成工作任务的装置。如操纵机器的起动或停车，改变传动系统的运动状态及工作参数，调节执行部分的行程或速度，以及控制各执行部分间的协调动作等。操纵及控制装置也可以是机械式的、液压气动式

的或电磁式的，甚至可以由电脑承担的。机械式的操纵及控制装置，通常是由各种形式的连杆机构、齿轮机构、凸轮机构或组合机构所组成的。

如上所述可见，机器的主要组成部分是机构。所以可以说，机器乃是能够完成机械功或转化机械能的机构或机构组合。而这些机构则都是本课程研究的主要对象。

本课程研究的内容主要包括以下几个方面：

1. 机构的组成及机构运动简图的绘制

如上所述，各种传动机构是本课程研究的主要对象。首先，我们将研究机构是如何组成的，同时还将研究如何用简单的图形把机构的运动情况表示出来，此即所谓机构运动简图的绘制问题。

2. 机构的运动分析和受力分析

通过分析，了解机构的运动及受力情况，是设计新机械的必需步骤；也是合理有效地使用现有机械的必要依据。本课程将介绍对机构进行运动分析和受力分析的方法。

3. 机械动力学的某些主要问题

在运动分析和力分析的基础上，本课程还将对机械动力学的某些主要问题进行研究。如机械的效率及自锁问题，机械的运转及其速度波动的调节问题，机械的平衡问题等。

4. 常用传动机构的分析及设计

本课程将主要介绍各种常用传动机构的工作特点、用途以及分析和设计方法。

§ 1-2 学习本课程的目的及注意事项

上面我们把本课程研究的主要内容概括地作了介绍。在了解了本课程研究的内容后，对于为什么要学习这门课程就不难理解了。因为各工科专业的学生，在以后的学习和工作中，总要遇到许多关于机械设计和使用方面的问题，而本课程所学习的内容，乃是研究现有机械的运动及工作性能和设计新机械的知识基础。所以在各专业的教学计划中，本课程都被列为必修课程。这一方面是因为通过本课程的学习，将为学习继修课程（如机械设计及其它有关机械方面的专业课程）打下基础；另一方面则是因为在国家的“四化”建设中，为了发展生产和改善人民生活，应力求在一切能够用机械操作的地方尽快使用机械操作，这就需要创造许多新的机械，或对现有机械进行革新改造，显然，要完成这些工作，本课程所介绍的知识，也是必不可少的。

总之，学好本课程所介绍的内容，对于一般工科专业的学生将来学好专业和搞好技术工作都是十分必要的。

明确了学习本课程的目的后，为了学好本课程，还需注意以下几个问题：

首先，如上所述，本课程研究的内容：一部分是研究各种机械的一些共性问题，如机构的组成理论，机构的运动分析及力分析，和有关机械动力学的问题等。而另一部分则是研究各种常用机构（如连杆机构、齿轮机构、凸轮机构等）的运动和工作性能，以及它们的分析和设计方法。这两部分内容虽是分别介绍的，但却是密切相关的。在学习的过程中，应注意把一般的原理和方法与对各种具体机构的研究结合起来，并随时注意在日常生活和生产中所遇到的各种机械和机械设计问题，根据所学到的知识进行观察和分析，做到理论与实际的紧密联系。

其次，应当注意，本课程是一门技术基础课程，它不像物理、数学、力学等理论基础知识那样具有很强的理论系统性，而是更结合于实际。其所介绍的各部分内容之间，既有共同性也有一定的独立性。例如在齿轮机构与连杆机构之间，虽有一些共性问题，而更重要的则是它们各自的特殊性。在学习本课程时必须注意到技术基础课程的这一特点。

另外，工程技术问题往往是比较复杂的，牵涉到许多方面的因素。解决工程实际问题，有些需要有严格的理论分析，有些则需要采用实验、试凑、近似等方法。对待这些方法，也应象对待理论分析方法一样加以重视。这就是说，在学习本课程时要有一定的工程观点。总之，本课程的性质与理论基础知识有许多不同的地方，根据本课程的性质，在学习方法上也必须适当地加以改变，以求把这门课程学好。

第二章 机构的组成及机构运动简图

§ 2-1 机构的组成

一、构件

如前所述，机构是一个用于传递运动和力或改变运动形式的机械装置。它是由一些彼此之间具有一定的相对运动的物体组成的。每一个这样的物体，都是一个独立的运动单元体，在机构的运动过程中，相对于其它部分而运动。我们把每一个这样的运动单元体称为一个构件。一个构件可能就是一个零件，也可能是由彼此刚结在一起的几个零件组成的。组成同一构件的各零件之间被视为没有相对运动，在机构的运动过程中，它们是作为一个整体而运动的，即共同形成一个运动单元体。

二、运动副

当由构件组成机构时，显然需要以一定的方式把构件彼此联接起来，而且每一个构件至少必须与另一构件相联接。两构件联接后，应使其彼此之间仍能产生某些相对运动。我们把由两个构件组成的这种仍能产生某些相对运动的联接称为运动副。而把两构件上能够参加接触而构成运动副的部分称为运动副的元素。例如图 2-1 中轴 1 与轴承 2 的配合，图 2-2 中两齿轮的轮齿 1 与轮齿 2 的啮合，以及图 2-3 中滑块 1 与导轨 2 的接触等就都构成了运动副。而它们的运动元素分别为圆柱面和圆孔面，两齿廓曲面，和两个平面。

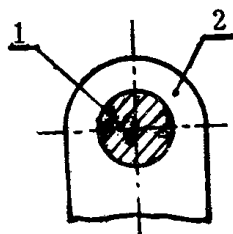


图 2-1



图 2-2

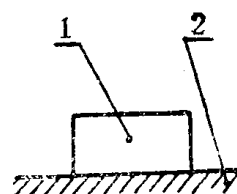


图 2-3

两构件构成运动副不外是通过点、线或面的接触。凡通过点或线的接触而构成的运动副统称为高副(如图 2-2 所示由两齿轮轮齿所构成的运动副)，而通过面接触构成的运动副统称为低副(如图 2-1 和图 2-3 所示的两种运动副)。运动副还常根据构成运动副的两构件之间的相对运动的不同来分类，如把两构件之间的相对运动为转动的运动副称为转动副或回转副(图如 2-1 所示者)，相对运动为移动的运动副称为移动副(如图 2-3 所示者)，相对运动为螺旋运动的运动副称为螺旋副(如图 2-4 所示由螺旋 1 与

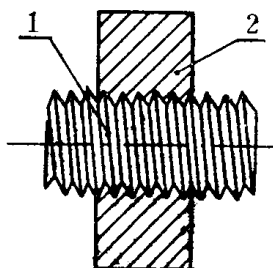


图 2-4

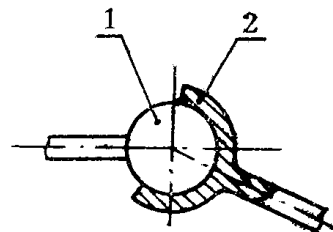


图 2-5

螺母 2 所构成的运动副)，相对运动为球面运动的运动副称为球面副（如图 2-5 所示圆球 1 与球碗 2 所构成的运动副）等等。由于构成运动副的两构件的相对运动仅与两运动副元素的几何形状和它们的接触情况有关，而与运动副元素的具体结构及尺寸无关，所以在绘制机构运动简图时常将运动副用规定的符号来表示。图 2-6 所示即为常用运动副的代表符号。其中图 a 为转动副，b 为移动副，c 为螺旋副，d 为球面副及带销的球面副（简称球销副），以上均为低副，而 e 为高副。

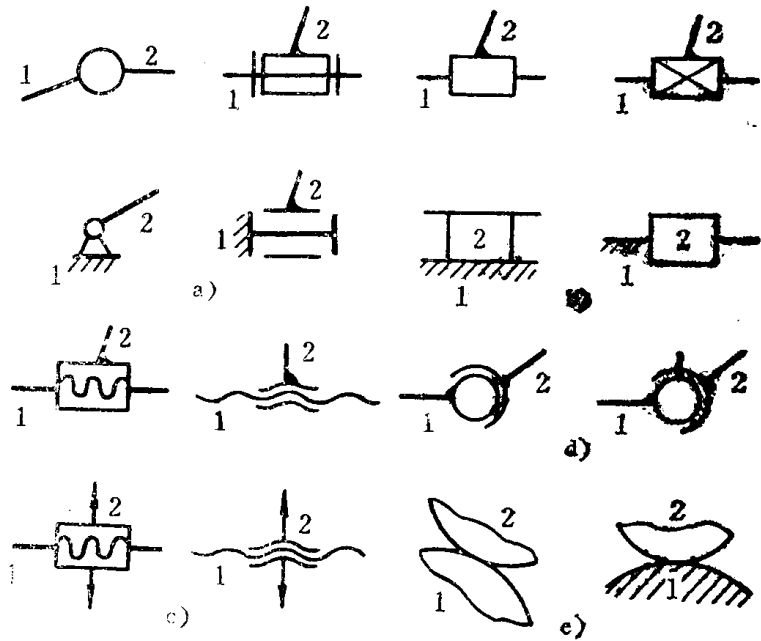


图 2-6

三、运动链

如上所述，组成机构的各构件是通过运动副而彼此相联的。我们把两个以上的构件通过运动副联接而构成的系统称为运动链。又如运动链的构件构成了首末封闭的系统（如图 2-7 a、b 所示），则称其为闭式运动链，或简称闭链；而其构件未构成首末封闭系统的（如图 2-7 c、d 所示），则称其为开式运动链，或简称开链。在各种机械中一般都采用闭链。

四、机构

运动链成为机构时需将其一个构件加以固定，即机构是有一个固定构件的运动链。机构中的这个固定构件称为机架。机构中按给定的已知运动规律运动的构件称为原动件，而其余构件称为从动件。从动件的运动规律决定于原动件的运动规律和机构的结构。

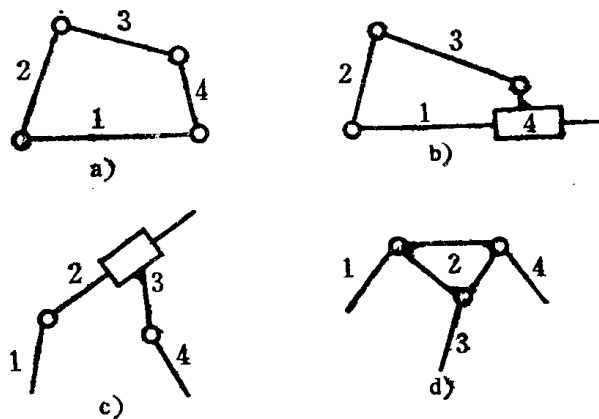


图 2-7

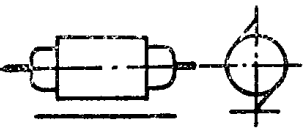
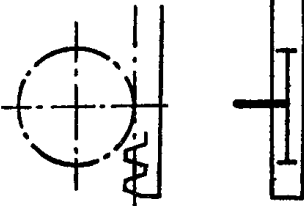
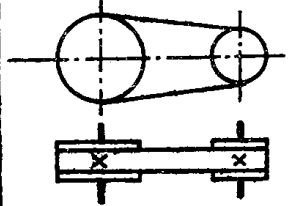
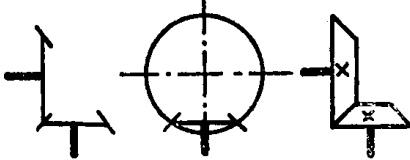
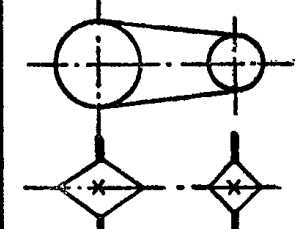
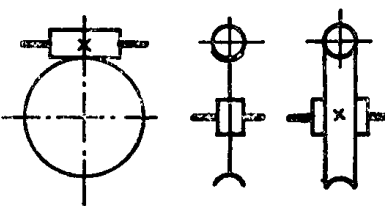
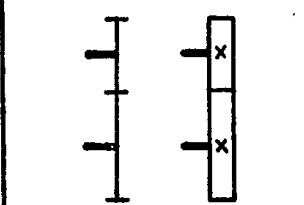

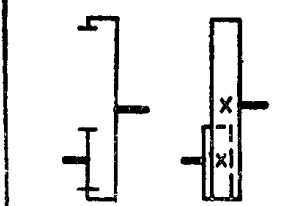
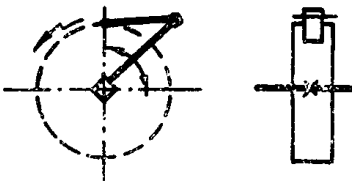
根据组成机构的各构件之间的相对运动为平面运动还是空间运动，可以把机构分为平面机构和空间机构两类。在各种机器中平面机构的应用特别广泛。

§ 2-2 机构运动简图

前曾提及，机构运动简图是用来表明机械运动情况的简单图形。在设计新机械或对现有机械进行分析研究时，都需要首先绘出机构运动简图。由于机构各部分的运动情况是由其原动件的运动规律，各构件间的联接情况，即各构件间构成的运动副类型（例如是高副还是低

副，是转动副还是移动副等）和各构件的运动尺寸（即确定各运动副相对位置的尺寸）来决定的，而与各构件的外形、断面尺寸、组成构件的零件数目及固联方式、运动副的具体结构等无关，所以可以排除所有与运动无关的因素，而按机构的运动尺寸以一定的比例尺定出各运动副的位置，并用运动副的代表符号（有时尚需采用 GB4460—84 所规定的运动简图的其它代表符号，表 2-1 中摘录了常用的一部分供参考）和简单的线条把机构的运动情况表示出来。这就构成了机构的运动简图。

表 2-1 常用机构示意图代表符号（摘自 GB4460-84）

名称	代表符号	名称	代表符号
装在支架上的电动机		齿条传动	
皮带传动		圆锥齿轮传动	
链传动		蜗轮与圆柱蜗杆传动	
外啮合圆柱齿轮传动		凸轮从动杆	
内啮合圆柱齿轮传动		棘轮机构	

机构运动简图应就原机械按确定的比例尺绘出。它不仅表明机械的结构及运动情况，而且还可以根据该图对机构进行运动分析及动力分析。

在绘制机构运动简图时，首先要把该机械的实际构造和运动情况搞清楚。即搞清楚该机

械是由多少构件构成的，各构件之间构成了何种运动副，从而搞清该机械原动部分的运动是怎样传递到其执行部分的，然后才能正确地绘出其机构运动简图。

又为了把机械的运动情况表示清楚，在绘制机构运动简图时需要对该机械恰当地选择投影面。为此，一般可以选择其多数构件的运动平面为投影面。必要时也可以就机械的不同部分选择两个或两个以上的投影面，然后转到同一平面上，或者把在主运动简图上难于表示清楚的部分另绘一局部简图。总之，以能够简明地把机械的结构及运动情况表示清楚为原则。

在选定投影面后，再选择适当的比例尺定出各运动副之间的相对位置，便以简单的线条和各种运动副的代表符号将机构运动简图画出来。下面举两个例子加以说明：

【例题 2-1】 试绘制图 2-8a 所示内燃机的机构运动简图。

解 由图可见，此内燃机的主体是由气缸 1（即机架）、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4 所组成的曲柄滑块机构。此外，为了控制进气和排气，又由曲轴 4 开始，由固联于该轴上的小齿轮 5 与固联于凸轮轴 7 上的大齿轮 6 相啮合而带动凸轮轴 7 转动。于是凸轮轴 7 上的两个凸轮分别推动进气阀和排气阀的推杆（图中一个推杆标号为 8），以达到进气和排气的目的。

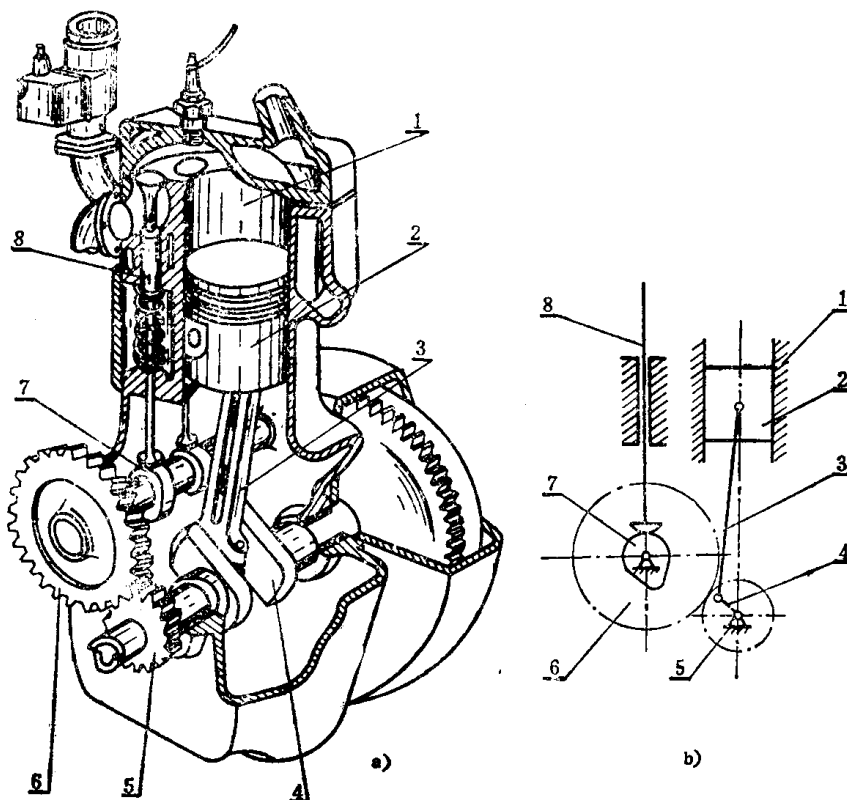


图 2-8

把该内燃机的构造情况搞清楚以后，再选定投影面和比例尺，即不难绘出其机构运动简图如图 2-8 b 所示。

【例题 2-2】 图 2-9a 所示为一颚式碎矿机。当曲轴 2 绕其轴心 O 连续转动时，动颚板 3 作往复摆动，从而将矿石轧碎。试绘制此碎矿机的机构运动简图。

解 由图可知，此碎矿机系由曲轴 2（1 为固装于曲轴 2 上的飞轮）、动颚板 3、摇杆 4、机架 5（固定颚板 6 与机架为同一构件）等四个构件所组成。其中曲轴 2 与机架 5 在 O 点构成转动副，曲轴 2 与动颚板 3 也构成转动副，其轴心在 A 点。另外，摇杆 4 与动颚板 3、机架 5 分别在 B 点及 C 点构成转动副。

将此碎矿机的构造情况搞清楚后，再选定投影面和比例尺，并定出转动副 O 、 A 、 B 、 C 的位置，即可进而绘出其机构运动简图如图 2-9b 所示。

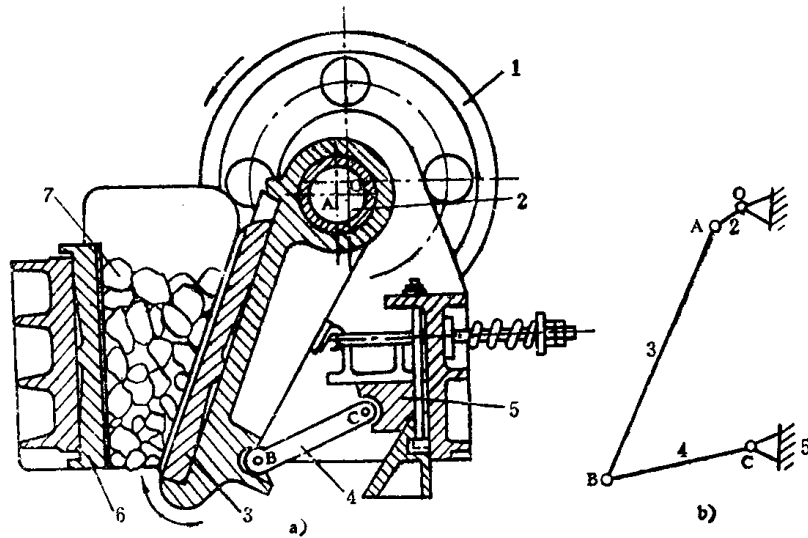


图 2-9

§ 2-3 机构具有确定运动的条件

为了按照一定的要求进行运动的传递及变换，当机构的原动件按给定的运动规律运动时，其余构件也均应具有确定的运动。那末在什么条件下机构才能具有确定的运动呢？下面我们先来分析两个例子。

如图 2-10 所示，为由四个构件组成的一种平面四杆机构。在此机构中，如果给定某构件一个独立的运动参数，例如构件 3 的位移规律 $S_3 = S_3(t)$ ，则其余所有构件的运动也就完全确定了。即当构件 3 按给定的运动规律 $S_3 = S_3(t)$ 运动时，构件 1 及构件 2 的运动也完全确定。

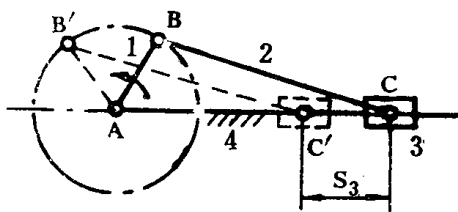


图 2-10

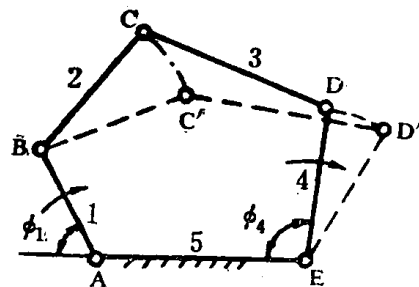


图 2-11

又如图 2-11 所示，为由五个构件组成的一种平面五杆机构。在此机构中，如果也只给定某构件一个独立的运动参数，例如构件 1 的角位移规律 $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ ，显然此时构件 2、3、4 的运动并不确定。例如当构件 1 占有位置 AB 时，构件 2、3、4 可占有位置 BC 、 CD 、 DE ，也可占有位置 BC' 、 $C'D'$ 、 $D'E$ ，或者其它位置。但是，如果再给定一个独立的运动参数，例如构件 4 的角位移规律 $\varphi_4 = \varphi_4(t)$ ，即同时给定两个独立的运动参数，显然这时此五杆机构的运动便完全确定了。

机构具有确定运动时所必须给定的独立运动参数的数目，称为该机构的自由度。因知上述平面四杆机构的自由度为 1，而平面五杆机构的自由度为 2。

又如前所述，机构中按照给定运动规律（即给定的独立运动参数）运动的构件称为原动件。复因机构的原动件通常是与机架相联的，对于这样的原动件，一般只能给定一个独立的运动参数（例如绕固定轴转动的原动件只能按照一个独立的运动规律而回转）。所以，在此情况下，为了使机构具有确定的运动，则其原动件的数目应等于其自由度的数目。这就是机构具有确定运动的条件。根据这个条件，对于自由度为 1 的机构，只要有一个原动件其运动便完全确定了。而对于自由度为 2 或 2 以上的机构，则必须有两个或两个以上的原动件其运动才是确定的。

§ 2-4 平面机构自由度的计算

在平面机构中，各构件都只作平面运动。而如图 2-12 所示，当作平面相对运动的两构件尚未构成运动副之前，构件 1 相对于构件 2（设构件 2 与坐标系固联）共有 3 个自由度，即分别沿 x 轴及 y 轴的两个移动和在 xy 平面内的转动。因此，如设一平面机构共有 n 个活动构件，则当设想此机构的各构件均尚未通过运动副而进行联接时，显然它们相对于机架（取机架与参考坐标系固联）共有 $3n$ 个自由度。但是在机构中，每个构件至少必须与另一构件相联接而构成运动副，而当两构件构成运动副后，它们之间的相对运动就将受到约束，因而其自由度将减少，而且自由度减少的数目就等于运动副引入的约束的数目。又在平面机构中，每个低副（转动副和移动副）将引入两个约束（如构成转动副的两构件之间只剩下一个相对转动的自由度；而构成移动副的两构件之间只剩下一个相对移动的自由度）；每个高副将引入一个约束（构成平面高副的两构件之间尚可产生沿高副两元素在接触点的公切线方向的移动，和两元素间的纯滚动，两种独立的相对运动）。因此，如果在该机构中，各构件之间共构成了 p_1 个低副和 p_h 个高副，那末它们将共引入 $(2p_1 + p_h)$ 个约束，于是该机构剩下的自由度应为

$$F = 3n - 2p_1 - p_h \quad (2-1)$$

这就是平面机构自由度的计算公式。下面举几个例子说明此公式的应用。

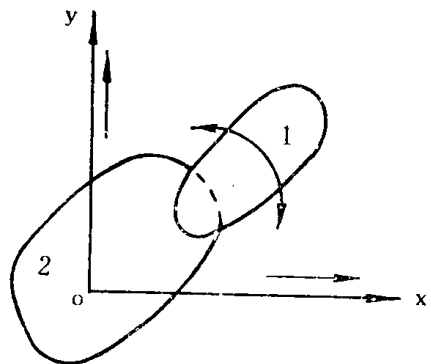


图 2-12

【例题 2-3】 试计算图 2-8 所示内燃机的自由度。

解 由该内燃机的机构运动简图可见，此机构共有 5 个活动构件（即活塞 2、连杆 3、曲轴 4、凸轮轴 7 及阀门推杆 8。齿轮 5 与曲轴 4 是一个构件。齿轮 6 与凸轮轴 7 是一个构件。图中未画出的另一阀门推杆未计算在内），6 个低副（即活塞 2 与气缸体 1 构成的移动副；连杆 3 与活塞 2 和曲轴 4 分别构成的两个转动副；曲轴 4 和凸轮轴 7 分别与气缸 1 构成的两个转动副；以及阀门推杆 8 与气缸体 1 构成的移动副），2 个高副（即齿轮 5 与齿轮 6 构成的高副，和凸轮轴 7 与阀门推杆 8 构成的高副）。故根据式 (2-1) 可求得此机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_1 - p_h = 3 \times 5 - 2 \times 6 - 1 \times 2 = 1$$

【例题 2-4】 试计算图 2-9 所示碎矿机的自由度。

解 由其机构运动简图可见, 此机构共有 3 个活动构件 (即构件 2、3 及 4), 4 个低副 (即转动副 O、A、B、C), 而没有高副。故根据式 (2-1) 可求得此机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

§ 2-5 计算平面机构自由度时应注意的事项

在计算机构的自由度时, 有些特殊情况必须加以注意并正确处理。否则, 按公式求得的自由度与机构实际的自由度可能不相符合。现将这些必须注意的事项简述如下:

一、复合铰链

三个或三个以上构件在一处构成两个或两个以上共轴线的转动副, 即构成所谓复合铰链。如图 2-13a 所示就是 3 个构件在一处相联而构成的复合铰链。而由图 2-13b 可见, 这 3 个构件实际上共构成了两个共轴线的转动副。同理, 若有 m 个构件构成复合铰链, 则它们将共构成 $(m-1)$ 个共轴线的转动副。在计算机构的自由度时必须注意是否存在复合铰链, 以免把运动副的数目搞错, 因而使机构自由度的计算得出错误的结果。

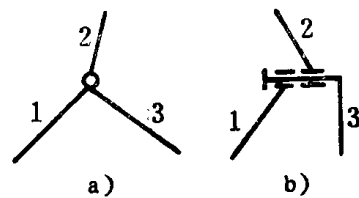


图 2-13

二、局部自由度

在有些机构中, 其某些构件所能产生的局部运动并不影响其它构件的运动, 我们把这些构件所能产生的这种局部运动的自由度特称为局部自由度。例如在图 2-14a 所示的凸轮机构中, 在推杆 4 上装有一滚子 3, 与凸轮 2 保持高副接触。此时该机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 \times 1 = 2$$

但是滚子 3 绕其轴 A 的转动显然并不影响其它构件的运动, 所以它只是一种局部自由度。因为如果我们设想将滚子 3 与推杆 4 焊在一起 (如图 2-14b 所示), 显然机构的运动与前并无不同, 但此时该机构的自由度则为

$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 \times 1 = 1$$

由此可见, 可以认为此机构实际的自由度为 1。这就是说, 在计算机构的自由度时, 应将机构中的局部自由度除去不计。

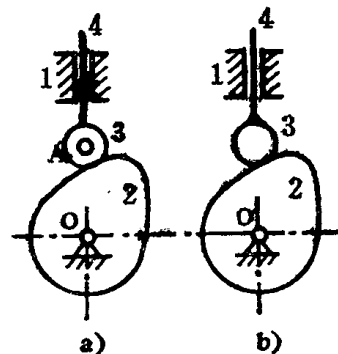


图 2-14

三、虚约束

在机构中, 有些运动副所引入的某些约束, 对机构的运动实际上起不到约束作用, 我们把这种对机构的运动实际上不产生约束效果的约束称为虚约束。例如在图 2-15a 所示的平行四边形机构中, 连杆 3 作平移运动, BC 线上各点的轨迹均为圆心在 AD 线上半径等于 \overline{AB} 的圆周。该机构的自由度为

$$F = 3n - 2p_l - p_h = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

现如图 2-15b 所示, 设在连杆 3 的 BC 线上的任一点 E 处再铰接一构件 5, 其另一端铰接于 E 点轨迹的圆心——AD 线上的 F 点处, ($\overline{EF} \perp \overline{AB}$), 显然, 这对该机构的运动并不会产生

任何影响。但是由于加入了一个构件 5（具有 3 个自由度）和两个转动副 E 、 F （共引入 4 个约束），相当于对该机构增加了一个约束。只是如上所述，此约束未能对该机构的运动产生约束效果而已，所以这一约束实为虚约束。

在计算机构的自由度时应将虚约束除去不计。如果误将虚约束当做一般约束计算在内，则会得出错误的结果。例如图 2-15b 所示的机构，如果不考虑虚约束，则其自由度为

$$F = 3n - 2p_1 - p_h = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$$

显然这与该机构实际的自由度是不相符合的。而当将上述的一个虚约束除去后（可将引入此虚约束的构件 5 和两个转动副 E 、 F 全部除去不计），该机构实际的自由度仍为 1。

机构中的虚约束常发生于下列情况：

(1) 在机构运动的过程中，如果某两构件上的两点之间的距离始终保持不变，那么若将此两点以构件相联，则因此而带入的约束必为虚约束。图 2-15b 所示机构就是这种情况。又如图 2-16 所示，在平行四边形机构 $ABCD$ 的运动过程中，构件 2 上的 E 点与构件 4 上的 F 点之间距离始终保持不变，($\overline{AE} \perp \overline{DF}$)，故当将 E 、 F 两点以构件 5 相联时带入的约束也必为虚约束。

(2) 如果两构件在某点相联接而构成运动副，且当设想把该运动副拆开，在机构的运动过程中，该联接点对于两个构件来说其轨迹是重合的，则此联接带入的约束必为虚约束。图 2-15b 所示的机构也可以说是属这种情况。又如图 2-17 所示为一椭圆仪机构，图中 $\angle CAD = 90^\circ$ ， $\overline{AB} = \overline{BC} = \overline{BD}$ 。在此机构运动的过程中，连杆 2 上的 C 点和滑块 3 上的 C 点的轨迹都是 AC 直线，所以连杆 2 与滑块 3 在 C 点构成铰链后带入的约束也必为虚约束。

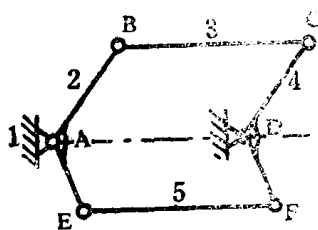


图 2-16

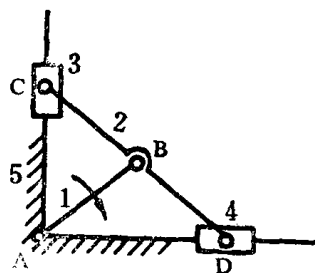


图 2-17

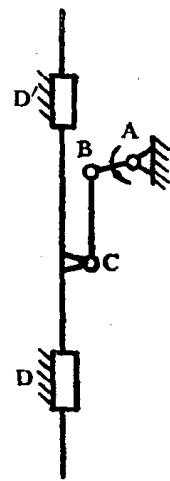


图 2-18

(3) 如两构件在几处接触而构成移动副，且各接触处两构件的相对运动方向一致（如图 2-18 所示机构中的移动副 D 、 D' ），或者两构件在几处配合而构成转动副，且各配合处的轴线重合（如图 2-19 所示机构中的转动副 A 、 A' 及 B 、 B' ），则应只考虑一处所带入的约束，而将其余各处所带入的约束视为虚约束。

由上所述可见，机构中的虚约束都是在一些特定的几何条件下出现的，如果这些条件不能满足，则这些原认为是虚约束的约束，

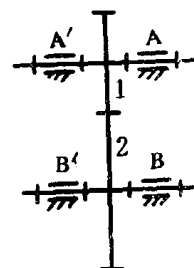


图 2-19