

高等学校教学用书

机械原理

冶金工业出版社

高等学校教学用书
机械原理
北京钢铁学院 沈蕴方 主编

*

冶金工业出版社出版
(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 22 字数 525 千字
1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷
印数00,001~12,000册
统一书号: 15962·4123 定价**2.30**元

前 言

本书是根据教育部制订的《机械原理》函授教学大纲和全日制机械类专业《机械原理》教学大纲编写的，主要作为高等院校机械类专业的函授教材，也可以作为机械类本科生机械原理课程的教材或参考书和一般工程技术人员的参考用书。

本书在内容上既考虑了基础理论的加强和课程内容的发展，同时也照顾到目前我国生产实际的需要。由于《机械原理》是一门技术基础课，所以仍以一般机械专业的要求为主，并适当地增加一些有关冶金、矿山机械方面的实例。为了使本教材具有较大的灵活性和适用性，也写进了一些可供选择的内容，以便各校根据专业要求和学时数加以取舍。

为适应函授教学的特点，在编写时力求语言通俗、讲解详细。每章都附有内容提要、学习要点、思考题和习题。此外，在每节后，一般还有小结，以便于自学。

参加本书编写的有：沈蕴方（绪论、第十章）、卢得霖（第一章、第二章和第三章）、龙树德（第四章和第十一章）、谭敏（第五章、第六章和第九章）、吴清一（第七章和第八章）、于晓红（第七章部分内容）。全书由沈蕴方任主编，解乃如描绘插图。

本书承天津大学祝毓琰同志审阅，提出了很多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中，虽然经过反复讨论和修改，但由于编者水平所限，难免有缺点和错误，诚恳地希望各兄弟院校教师及读者批评指正。

编 者

1983年8月

目 录

绪论	1
一、机械原理研究的对象	1
二、机械原理课程的内容	4
三、学习机械原理的目的和机械原理在教学计划中的地位	5
四、机械原理课程的学习方法	5
第一章 机构的结构分析	7
第一节 研究机构结构的目的	7
第二节 机构的组成	7
第三节 运动副的分类	9
第四节 机构运动简图	12
第五节 平面机构的结构分析	16
*第六节 空间机构结构分析简述	21
第二章 平面机构的运动分析	25
第一节 机构运动分析的目的和方法	25
第二节 机构位置图与机构构件上某点轨迹的求法	27
第三节 速度瞬心及其在机构速度分析中的应用	29
第四节 用相对运动图解法作机构的速度和加速度分析	32
第五节 用解析法求机构的位移、速度和加速度	45
第六节 机构的运动线图	49
第三章 平面机构的力分析	56
第一节 机构力分析的目的和方法	56
第二节 不考虑惯性力的机构静力分析	57
第三节 机构的动态静力分析	62
第四节 约束反力及平衡力曲线	74
*第五节 用速度杠杆法直接求平衡力	75
第四章 运动副中的摩擦和机械效率	81
第一节 研究机械中摩擦的目的	81
第二节 移动副中的摩擦	81
第三节 回转副中的摩擦	84
第四节 螺旋副中的摩擦	90
第五节 机械的效率与自锁	92
第五章 平面连杆机构	98
第一节 连杆机构的应用及其设计的基本问题	98
第二节 四杆机构的基本型式	99
第三节 四杆机构的演化	104
第四节 连杆机构的基本性质	106
第五节 四杆机构的设计	112
第六章 凸轮机构	124
第一节 凸轮机构的应用和分类	124

第二节	从动件的常用运动规律	127
第三节	用图解法设计平面凸轮的轮廓曲线	136
第四节	用解析法设计平面凸轮的轮廓曲线	140
第五节	凸轮机构基本尺寸的确定	144
第六节	圆弧凸轮轮廓的设计	152
第七节	圆柱凸轮机构简述	153
第七章	齿轮机构	158
第一节	概述	158
第二节	齿轮啮合的基本定律和共轭齿廓	160
第三节	渐开线及渐开线齿轮	163
第四节	齿轮各部分名称、符号及标准齿轮尺寸计算	169
第五节	一对渐开线齿轮的啮合传动	175
第六节	渐开线齿轮传动质量指标	179
第七节	渐开线齿轮加工原理	187
第八节	渐开线齿廓的根切现象与避免根切的最少齿数	191
第九节	变位齿轮和避免根切的最小变位系数	194
第十节	变位齿轮的几何尺寸	196
第十一节	变位齿轮传动	197
第十二节	变位齿轮传动类型及其设计	201
第十三节	变位系数选择	205
第十四节	斜齿圆柱齿轮机构	212
第十五节	蜗轮蜗杆机构	222
第十六节	圆锥齿轮机构	227
*第十七节	圆弧齿轮机构	237
第八章	轮系	243
第一节	轮系的功用和分类	243
第二节	轮系传动比计算	246
第三节	轮系的效率	255
第四节	行星轮系各轮齿数的确定	261
*第五节	几种特殊的行星传动	265
第九章	其它常用机构	272
第一节	万向联轴节	272
第二节	间歇运动机构	275
第三节	螺旋机构	286
第四节	非圆齿轮机构及导向机构	289
*第五节	组合机构	290
*第六节	其它功用机构概述	293
第十章	机组的运转和调速	297
第一节	概述	297
第二节	等效构件上的等效量	299
第三节	机械系统运动方程式	307
*第四节	运动方程的求解	308

第五节	机器速度波动的调节	309
第六节	周期性速度波动的调节——飞轮设计	312
第七节	飞轮主要尺寸的确定	320
第十一章	机械的平衡	326
第一节	概述	326
第二节	转子的静平衡	327
第三节	转子的动平衡	328
第四节	转子的许用不平衡量	333
*第五节	挠性转子动平衡概述	334
第六节	平面连杆机构的平衡	335
主要参考文献		344

绪 论

一、机械原理研究的对象

“机械原理”是一门以机构和机器为研究对象的科学。

机器的种类极多，其构造、用途和性能都各不相同。例如图 0-1 所示的单缸内燃机是由曲轴 1、连杆 2、活塞 3、缸体 4、凸轮 5、摆杆 6 和气门阀 7 组成。当燃气由气门进入缸体后，经过压缩、点火、膨胀而推动活塞 3 移动。活塞的移动通过连杆 2 变为曲轴 1 的转动，这样就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缸体和废气的排出缸体，则由凸轮 5 和摆杆 6 来控制。

图 0-2 所示为机械手送料机，它是模拟人工操作的动作而设计的一种专用机械手，用以代替人工完成一定的动作。它的动作顺序是：手指 14 夹料；手臂 15 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。其外形如图 0-2，a 所示，图 0-2，b 为机械传动图。电动机通过减速装置减速后（图中未画出），带动运动分配轴 2 上的链轮 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 13 使夹紧工件的手指 14 张开。连杆 20 与杆 9 之间可以相对转动。手指的复位夹紧由弹簧实现。同时，分配轴 2 上的盘形凸轮 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 轴支承在座 8 上）。此外，圆柱凸轮 3 通过齿条 4 和齿轮传动使座 8 作往复回转。

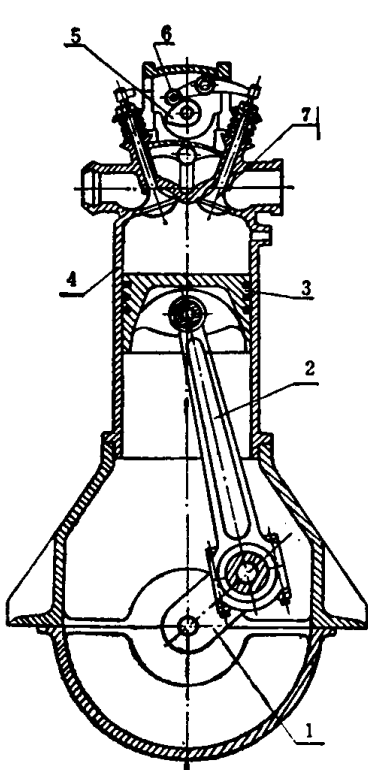


图 0-1

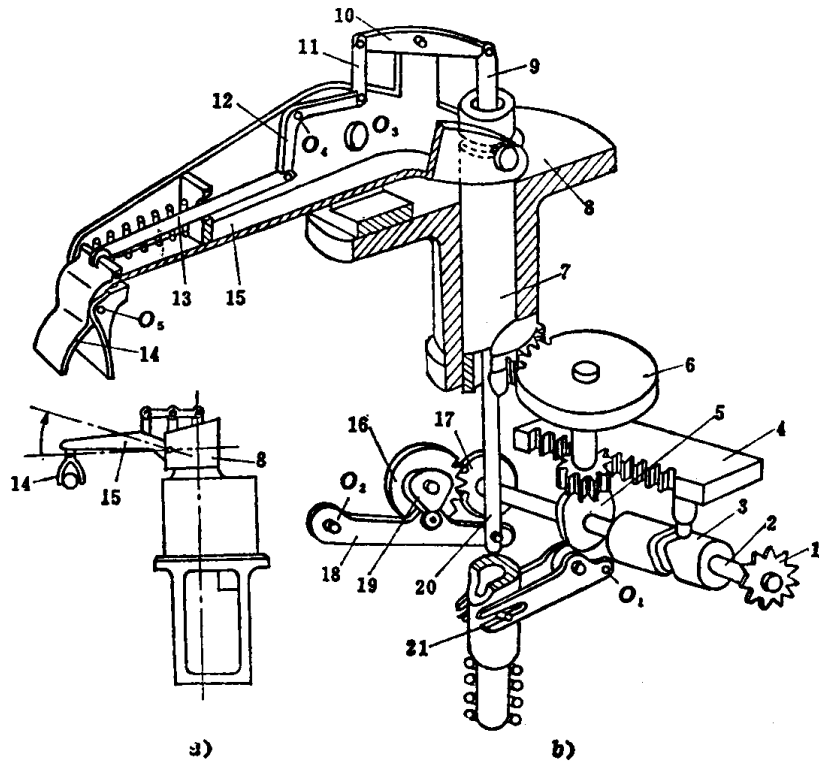


图 0-2

图 0-3 所示为牛头刨床，它由电动机 1、小齿轮 2 以及和大齿轮固结在一起的曲轴 3

和滑块4和6、导杆5、刨头7、工作台8、丝杠9和床身10等构件组成。当电动机1的转动经皮带传动并通过齿轮2使曲轴3回转时，带动导杆5运动，最后由导杆5带动刨头7作往复直线移动，从而进行刨削。

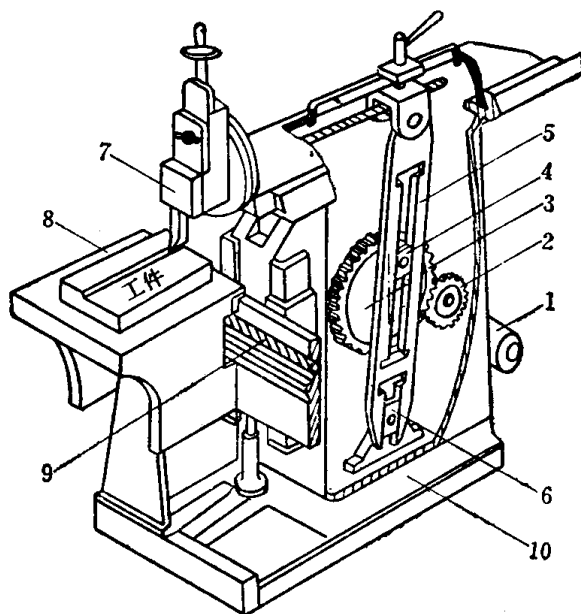


图 0-3

图0-4所示为液压凿岩台车，可用于矿山中打炮眼。它由车架1、操作台2、大拐变幅机构3、托架4、推进机构5、凿岩机6以及液压系统等部分组成。这台凿岩机除了在钻眼时钻头能回转和前进外，还能调整钻任何位置的炮眼。

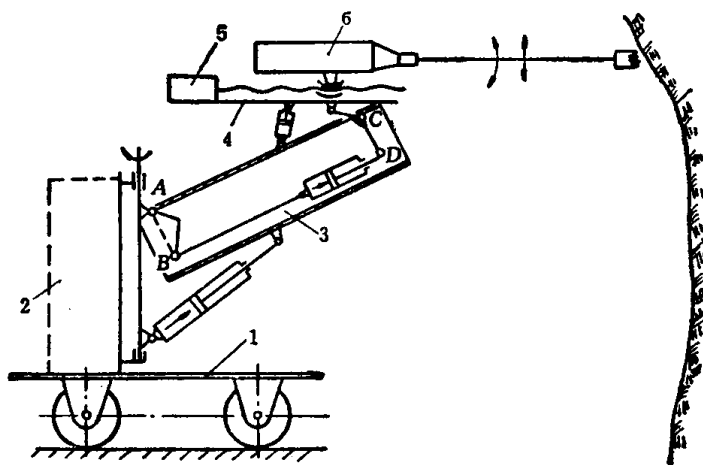


图 0-4

从以上所举的例子可以看到，虽然机器的结构形式和用途各不相同，但是它们都有以下三个共同特征：

- 1) 它们都是人为的实物的组合；
- 2) 它们的各部分之间具有确定的相对运动；
- 3) 能代替人类劳动以完成有用的机械功或转换机械能。

机器的上述特征可以概括为“机器是各部分具有确定的相对运动，并能做有用的机械

功或转换机械能的人为组合体”。

由机器的特征可进一步说明以下几点：

- 1) 单一物体不能称为机器；
- 2) 机器各部分之间必须具有确定的相对运动，但机器的整体则可为固定的（如轧钢机、机床等）；亦可为活动的（如起重机、汽车、火车等）；
- 3) 机器本身不能创造能量，只能利用或转换能量，并且必须涉及到机械能。

按能的转换特性，机器可有下面三种：

原动机 是将其它能量转换为机械能的机器，如蒸汽机、汽轮机及内燃机等将热能转换成机械能；电动机是将电能转换成机械能；风车是将风能转换成机械能等。

变能机 是将机械能转换为其它类型能量的机器，如发电机将机械能转换成电能；空气压缩机将机械能转换成空气的位能等。

工作机 是利用机械能完成有用功的机器，如各种机床、轧钢机、破碎机、起重机等。

各种机器只有在运动中才能完成能量的变换和作有用功。如果撇开机器能量变换这个特点，而只研究机器中各个部分的运动这个特点，发现机器还不是实现预期运动的最基本的组合体。在图0-5，a、b、c所示的一些机器中，都有如d所示的一个由曲轴1、连杆2、构件3和机架4构成的一个组合体。它们的运动特点都是一样的，都是在移动和转动之间来回转换。人们把这些具有各自特点的、能转换运动的基本组合体统称为“机构”。如图0-5中由杆状物体组成的机构称为连杆机构。此外，还有凸轮机构、齿轮机构等。因此，机器是由机构组成的。而机构的特征是：

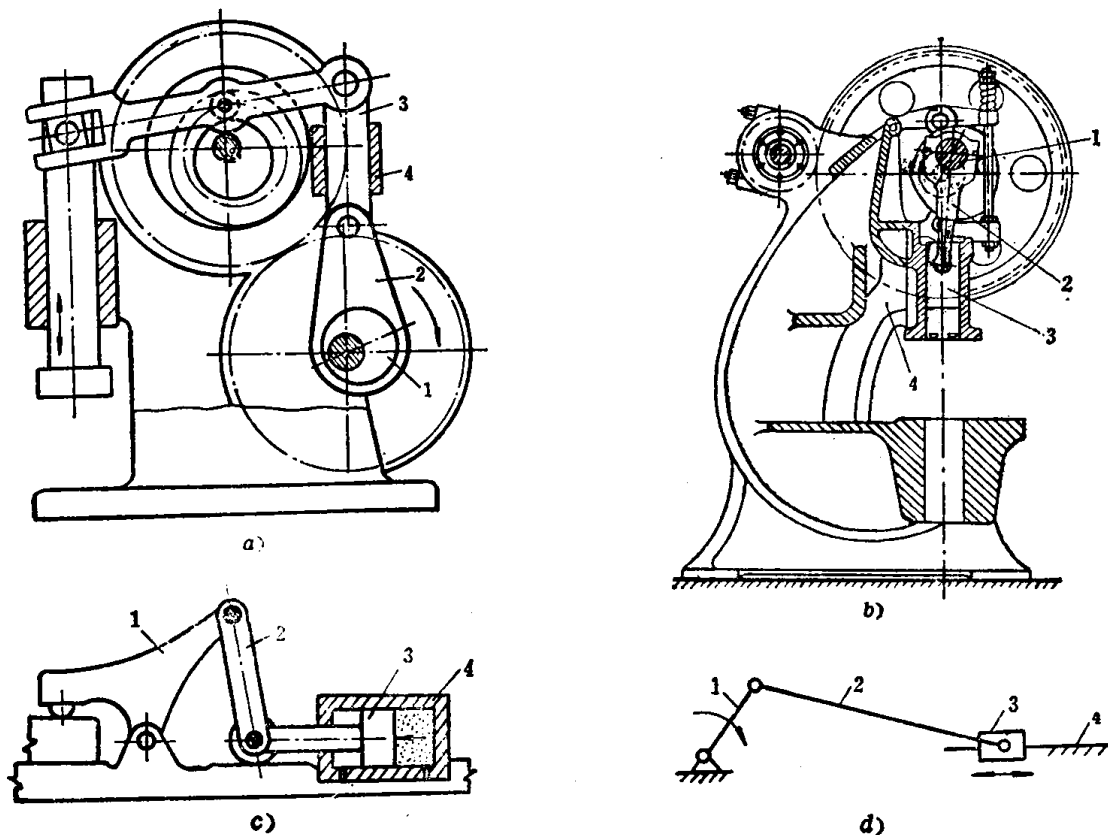


图 0-5

- 1) 它们是为人为的实物组合体;
- 2) 在各部分之间具有确定的相对运动。

上述特征可概括为“机构是各部分之间具有确定相对运动的人为组合体”。所以，机器与机构的主要区别在于是否作有用机械功或转换机械能。它们的关系是机器是由机构组成的，多数机器都包含有若干机构。例如图0-1的内燃机就包含了连杆机构、凸轮机构和齿轮机构（图上未画出）等。而最简单的机器只包含一个机构，如图0-6所示的螺旋输送机就只有一个螺旋机构。

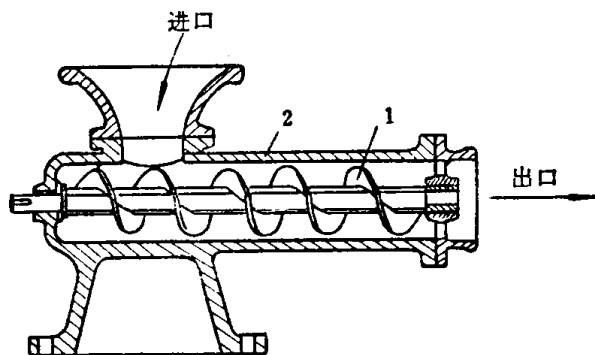


图 0-6

机器和机构从结构和运动的观点来看，两者之间并无区别。因此，为了简化叙述，常用“机械”一词作为“机器”和“机构”的总称。

二、机械原理课程的内容

如前所述，机械原理是一门研究机构和机器的科学。为了科学的系统性和便于教学，在机械原理课程中，一般将其归纳为三部分内容来讨论。

1. 机构的结构学 研究机构的运动可能性和确定性；并进一步研究机构的组成规律。

2. 机械的运动学 不考虑引起机构运动的力的作用，而从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度、加速度的求法和机构的运动规律；以及按运动要求来设计机构的方法。

3. 机械动力学 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；并研究在已知力作用下机械真实运动规律；以及作用力、运动构件的质量和这些构件的运动之间的关系，即机械系统过渡过程和稳定运动状态下的动力学问题、机械的调速问题和惯性力的平衡问题。

综上所述，机械原理所研究的问题又可归纳为两类：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）；第二类问题是按要求设计新的机械，即机构的综合问题。

解决上述问题的方法有图解法、解析法等。图解法直观易懂，但精度较低；解析法精度较高，但计算较繁。

近年来，由于电子计算机的出现和发展，给机械原理的研究提供了先进的工具和方法，使解决机构分析和综合中的一些复杂问题成为实际可能。另一方面，测试技术的发展也为机构运动学和动力学创造了有利的条件。目前条件虽然还不太成熟，但是，可以断言，电子计算机的应用及测量技术的发展必将促进机械原理这门学科的进一步发展，并将

使机械原理的理论在工程实践中获得更加广泛的应用。

三、学习机械原理的目的和机械原理在教学计划中的地位

我国实现四个现代化的重要措施之一，就是要以现代化的生产手段来武装国民经济的各个部门。为此，必须逐步发展生产的机械化和自动化。但是，要实现生产的机械化，就必须创造出各式各样新的优质机械，同时也要改进现有的机械设备以充分发挥其潜力。在完成这一任务中，机械原理的有关知识将起到重要的作用。

机械的种类是十分繁多的，其结构和功用也各不相同。因此，在高等工业学校中，就相应地设置了各种专业的专门课程来研究各种特殊的机械。但是，当研究某一具体的机械时，不仅需要研究它所具有的特殊问题，而且还要研究所有机械所具有的共同问题。机械原理课程就是为了研究机械的某些共同问题而开设的。它是以高等数学、普通物理、机械制图、理论力学等课程为基础，并为以后学习机械零件、起重运输机械、各种专业机械课程以及掌握新的科学技术成就打基础的。因此，机械原理课程是机械类各专业的一门很重要的基础技术课程。它有承上启下的作用，在教学计划中占有十分重要的地位。

四、机械原理课程的学习方法

机械原理是介乎基础理论和工程实际间的一门基础技术课程。它与理论力学课程的关系更为密切，它应用了理论力学中的观点和方法，去解决一些机器中的实际问题。但也不是简单的应用和引伸，也有自己的基本理论和系统。例如用理论力学有关运动自由度的理论，去计算机构的自由度，而计算机构自由度的目的是为了找出机构的组成规律。因此，学习机械原理时要有意识地与理论力学的有关部分联系对照，以找到理论基础。另一方面要掌握本课程的基本理论、基本知识和基本技能。

学习本课程要有工程观点，了解一些工程问题上的处理方法。学习时不能死记硬背，要了解其物理意义以及在工程实际中应用的条件和范围。有的章节看来公式很多，但只要抓住几个主要的，在透彻掌握其基本观点后，不难了解和推导出其它一些看来较为繁杂的公式。

由于这门课的研究对象是机械。所以，要有较多的有关机械方面的一般常识，在各自的工作岗位和日常生活中，多看和多接触一些实物，这对学习本课程是有好处的。在学习过程中，如果由于工作需要，更应用已学到的基本知识，去解决一些实际问题，这样也可加深对已学得知识的理解。

和学习其它课程一样，首先要仔细阅读教材，并认真做阅读笔记；概括基本概念；弄清问题的性质和分析的方法；记住一些常用的基本公式。

做习题是联系实际，解决实际问题 and 加深基本理论理解的一个重要环节。习题的本身是有抽象概括的，要注意它的条件，要判断自己的解题方法是否正确和简捷。如遇作图法则要求尽量精确，图面整洁。实验课是加深理论理解和培养基本技能的重要环节，必须认真对待，一丝不苟。

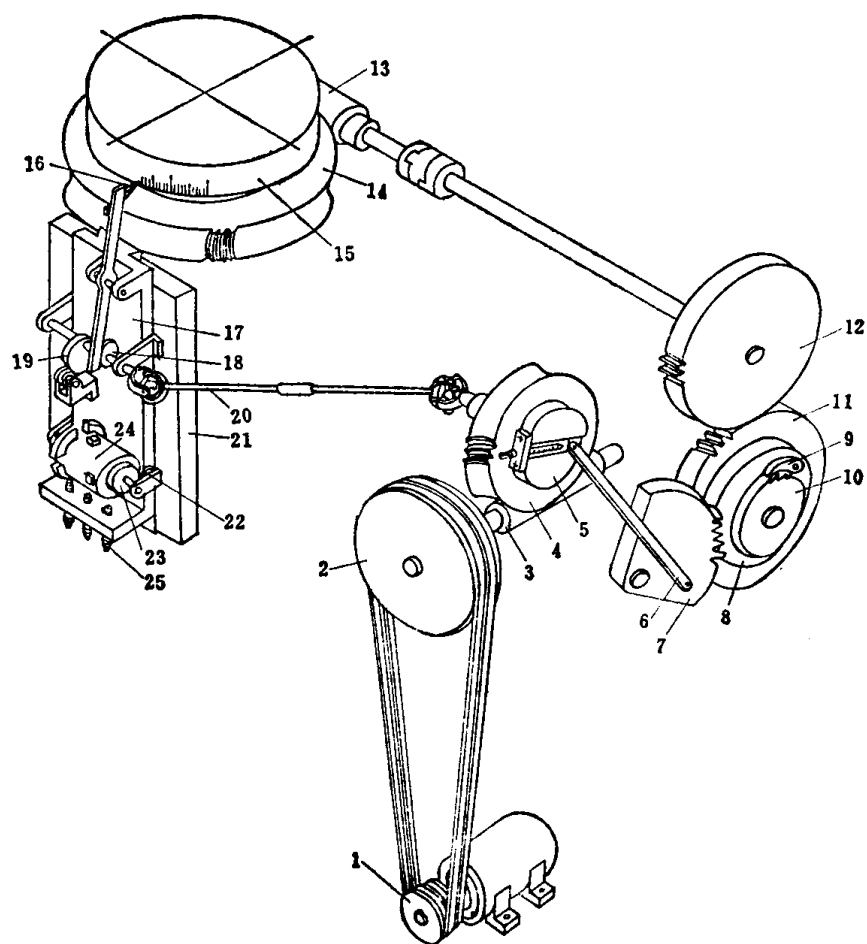
小结和思考题是用来帮助总结、巩固、提高的，不要看成只是简单的问答。

思 考 题

- 0-1 什么是机器？什么是机构？它们之间有什么区别？又有什么联系？
- 0-2 下列各物是机器还是机构？或者两者都不是。

钟表、自行车、磅称、机床、打字机、轧钢机、锅炉、变压器、发电机。

0-3 是否能看懂如图所示的圆盘刻线机的动作原理？



思 0-3

提示：为了能在圆盘（工件）15上均匀刻线，必须有如下几个动作：

- 1) 工件15间歇转动，以实现分度；
- 2) 刻刀16的切削运动（即刻刀的上下运动）；
- 3) 刻刀退刀时的抬起运动。

第一章 机构的结构分析

内 容 提 要

在绪论中已经知道了机构的主要特征是各构件间具有确定的相对运动。但是，应该按照什么样的规律才能组合成具有确定相对运动的机构呢？这是在设计机械时首先要遇到的一个问题，讨论和了解机构的组成规律就是本章的主要目的。

为此，本章将首先介绍组成机构的一个重要环节——运动副的定义、形式和分类。

第四节中所讨论的机构运动简图及其画法，是分析已有机械和设计新机械时必不可少的一步。这可以作为基本功来训练，平时应该多看多画。第五节中介绍了机构活动度的计算和提出了机构具有确定运动的条件，从而为选用和设计机构提供了理论基础。

第一节 研究机构结构的目的

在知道了什么是机械、什么是机构以及它们之间的相互关系以后，必然会提出：机构是怎么组成的？机构的结构形式对其运动有何影响？在什么条件下才能得到具有确定运动的机构？

因此，我们研究机构的目的之一就是要探讨机构的组成规律以及机构运动的可能性和确定性。

此外，由于实际应用的机构其结构形状都是比较复杂的，在进行机构的运动和动力分析或设计新机构时，没有必要把它们复杂的外形全部画出来，只需将机构构件的联接特征和那些与运动有关的尺寸，用一些简单的线条和符号来表示，画出机构的运动简图，而后进行分析研究。因此，如何画机构运动简图也是研究机构结构的目的之一。

第二节 机构的组成

虽然各种机械的形式、构造和用途各不相同，但是，它们都是由一些常用机构所组成。所以，只需研究机构的组成规律就可以了。

一、构件

图 0-1 所示为一内燃机。其中曲轴 1、连杆 2、滑块 3 和汽缸 4 组成一曲柄滑块机构。它在内燃机中的作用是将滑块的移动转变为曲轴的转动。该机构是由四个物体通过一定形式的连接而组成，这些物体实质上就是运动着的刚体。我们把机构中这种运动单元体称为构件。

构件可以是一个零件，也可以由一个以上的零件所组成。如图 0-1 中的曲轴既是一个零件，也是一个构件。而连杆 2 则是由图 1-1 中所示的连杆体 1、连杆盖 2、轴套 3、轴瓦 4、螺栓 5 和螺母 6 等许多零件固连在一起而成为一个刚体的。所以它是一个运动单元体，也就是一个构件。至于组成构件的每个零件则是制造的单元体。

二、运动副

机构中每一个构件都是通过一定的形式与其它构件相联接的。因此，各构件间相互约

束而使构件的独立运动受到一定的限制。但是，构件间仍保有某些相对运动。如图 0-1 所示的曲柄滑块机构，构件 1 与构件 2 组成了只有相对转动的运动副（图1-2，a）；构件 2 与构件 3 也组成了只有相对转动的运动副（图1-2，b）；构件 3 与构件 4 组成了只有相对移动的运动副（图1-2，c）。由此运动副可定义为：具有相对运动的两构件的接触组合。每个构件直接参与接触的部分称为运动副元素。

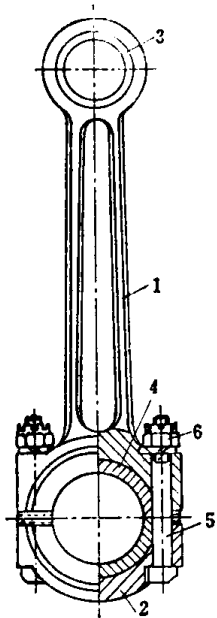


图 1-1

三、运动链

若干构件通过运动副联接而成的构件系统称为运动链。如果运动链中各构件构成首末封闭的系统（图1-3，a），则称为闭式链；否则称为开式链（图1-3，b）。在机构中，大多都采用闭式链。

四、机构

将运动链中的一个构件作为参考坐标系，当其另一个或几个构件按给定的运动规律相对于参考坐标系运动，而其余构件都得到确定的运动时，那末，这个运动链就是一个机构。

机构中作为参考坐标系的构件称为机架。机架可以是固定的，也可以是运动的（如车、船、飞机等）。机构中按给定运动规律运动的构件称为主动件，一般情况下主动件是驱使机构运动的外力所作用的构件，也叫原动件。而其余随主动件运动的构件称为从动件。

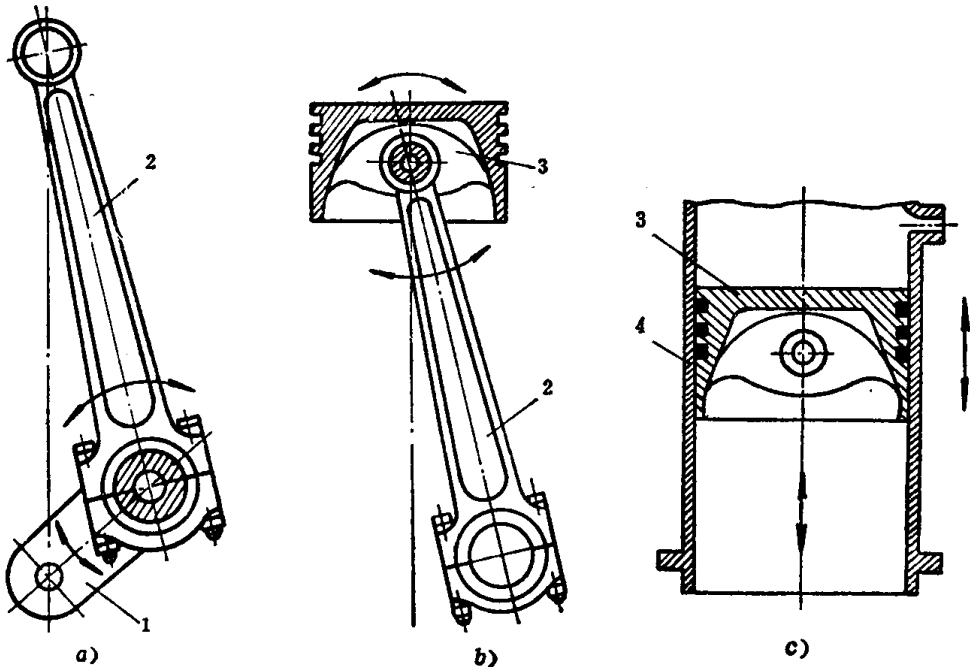


图 1-2

由以上分析可知，机构是由若干构件通过运动副的联接而组成，而且各构件之间具有完全确定的相对运动。因此，机构就是具有确定运动的运动链。

根据组成机构各构件之间的相对运动为平面运动或空间运动，可以把机构分为平面机构和空间机构两大类。我们将重点讨论机械中广泛应用的平面机构。

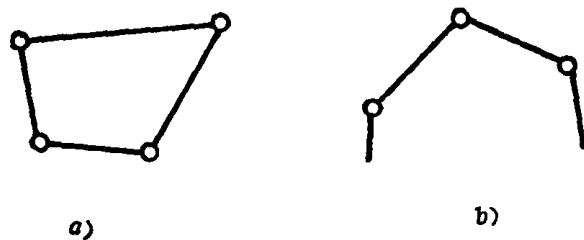


图 1-3

小 结

1. 零件是制造单元，即在加工中是不可再分割的单元体。
2. 构件是运动单元，即在运动中是不可再分割的单元体。例如一个齿轮通过键与轴相联而成的组合体，就成为一个构件。至于齿轮、键和轴，则是三个制造单元。
3. 具有相对运动的两个构件的接触组合称为运动副。因此，运动副的特征是：1) 每两个构件组成一个运动副；2) 组成运动副的两构件间必然能作相对运动。
4. 机构是各构件间具有确定相对运动的运动链。
5. 机构中包括有：主动件——给定运动规律的构件；从动件——由主动件带动作确定运动的构件；机架——相对固定的构件。

第三节 运动副的分类

一、自由度与约束

如前所述，两个构件组成运动副后，它们之间的相对运动将受到某些限制，这种限制称为约束。而仍具有的相对运动叫做自由度。至于具有哪些相对运动，则与所组成运动副的性质有关，即与运动副所引入的约束条件有关。

如图 1-4 所示，在未组成运动副之前，一个作平面运动的构件 S 具有三个独立的运动：绕垂直于 xoy 平面的 A 轴的转动；沿 x 轴线和沿 y 轴线的移动。这种可能具有的独立的运动称为构件的自由度。显然，一个作平面运动的构件有三个自由度。或者说，要想确

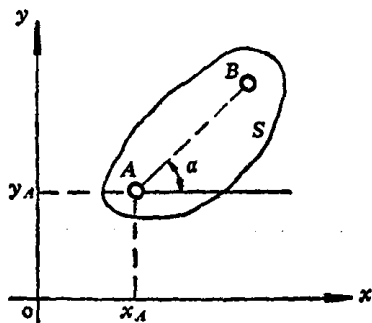


图 1-4

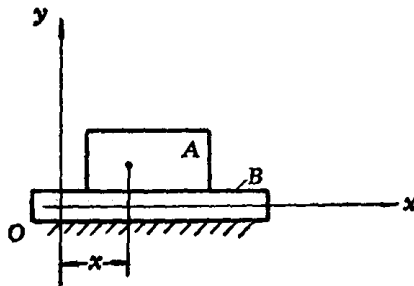


图 1-5

定构件 S 在平面 xoy 中的位置，需要给定三个独立运动参数 x_A 、 y_A 和 α 。同理，一个作空间运动的构件将有六个自由度，即沿 x 、 y 、 z 轴线的移动和绕三轴线的转动。

如图 1-5 所示, 滑块 A 与滑槽 B 组成一运动副。显然, 滑块 A 相对于滑槽 B 只能沿 x 轴线方向移动, 而不能沿 y 轴方向移动和绕垂直于 xoy 平面的轴转动。也就是说, 构件 A 和 B 组成图示的运动副后, 其相对运动受到了两个限制, 亦即失去了两个自由度。因此, 我们说该运动副具有两个约束条件和一个自由度。

由以上分析可知, 自由度和约束是互相联系的, 对于平面运动副来说, 它们的关系为

$$H = 3 - S \quad (1-1)$$

式中 S ——约束数;

H ——自由度数。

从实际可知, 约束条件数必须是 1 或 2。如果 $S = 3$, 则两构件间将不可能有任何相对运动而变成一个构件。又如果 $S = 0$, 则两构件组成运动副的条件已不存在而变成两个自由运动的构件了。此外, S 和 H 也不可能是非整数。

同理, 对于空间运动副来说, 自由度数与约束条件数的关系为: $H = 6 - S$ 。同样, 约束条件数应该是 $6 > S > 0$, 且为整数。

二、运动副分类及运动副简图

按照运动副接触形式的不同, 常见的平面运动副可分为低副和高副两大类。

1. 低副 凡是以面相接触的运动副称为低副。根据组成低副的两构件之间的相对运动形式, 又可以分为回转副和移动副。

(1) 回转副 组成运动副两构件间的相对运动为转动者称为回转副或转动副。如图 1-6, a 所示, 构件 1 相对于构件 2 或构件 2 相对于 1 只能在 xoy 平面内转动, 而不能沿 x 轴或 y 轴移动。

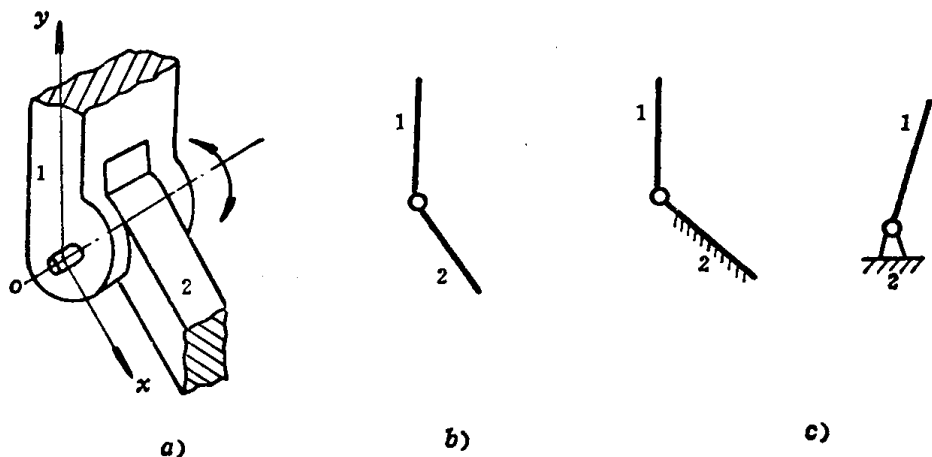


图 1-6

(2) 移动副 组成运动副两构件间的相对运动为移动者称为移动副。如图 1-7, a 所示, 两构件间的相对运动只有沿 x 轴移动而不能沿 y 轴移动或绕任何轴转动。

2. 高副 凡是以点或线相接触的运动副称为高副。组成高副的两构件间的相对运动为转动兼移动, 如图 1-8 所示的凸轮副和图 1-9, a 所示的齿轮副, 构件 1 和 2 在 A 点接触而构成高副, 它们之间的相对运动只能沿接触点 A 的切线方向移动 (x 轴方向) 和绕 A 点在 xAy 平面内的转动。

由以上分析可知，对于平面低副，其相对运动只能是转动或移动，故它是具有一个自由度和两个约束条件的运动副。对于平面高副，其相对运动则为转动兼移动，所以它是具有两个自由度和一个约束条件的运动副。

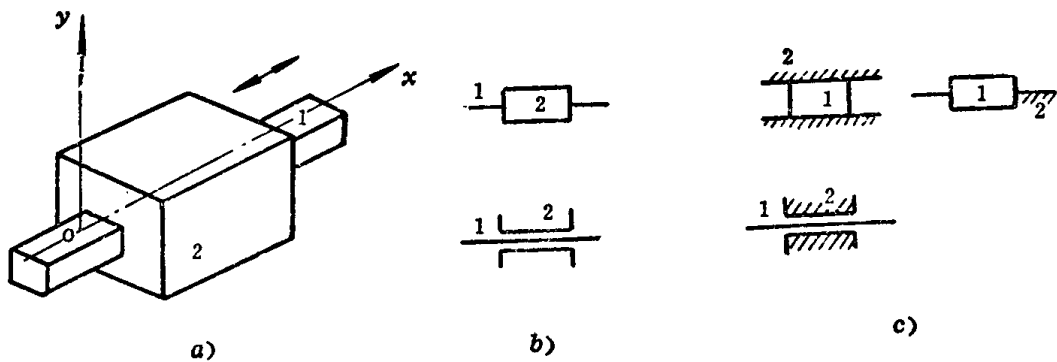


图 1-7

由于组成低副的两构件为面接触，所以承载能力较大。又由于易于润滑，以致磨损小而寿命长。高副具有较多的自由度，故比低副更容易实现较复杂的运动规律。其缺点是单位压力较大，易于磨损，且制造比较困难。

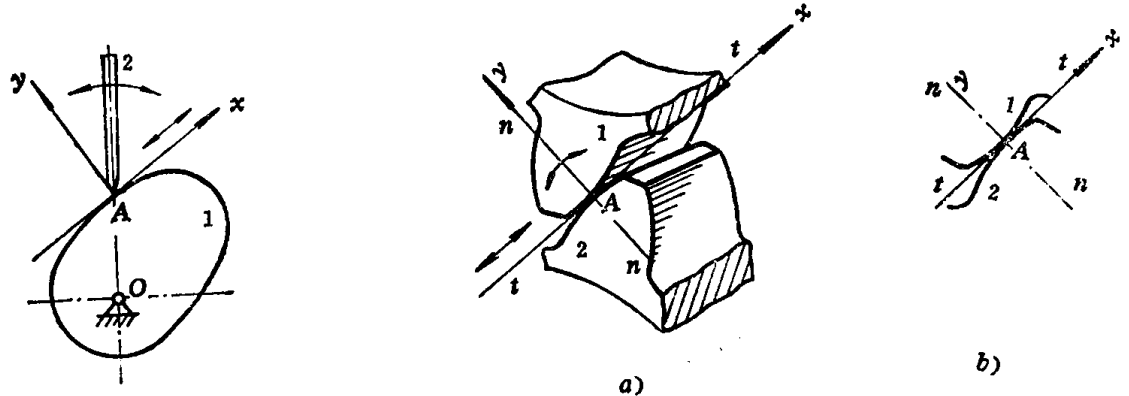


图 1-8

图 1-9

除平面低副和平面高副外，常用的还有球面副（图1-10，a）和螺旋副（图1-11，a），它们都属于空间运动副。

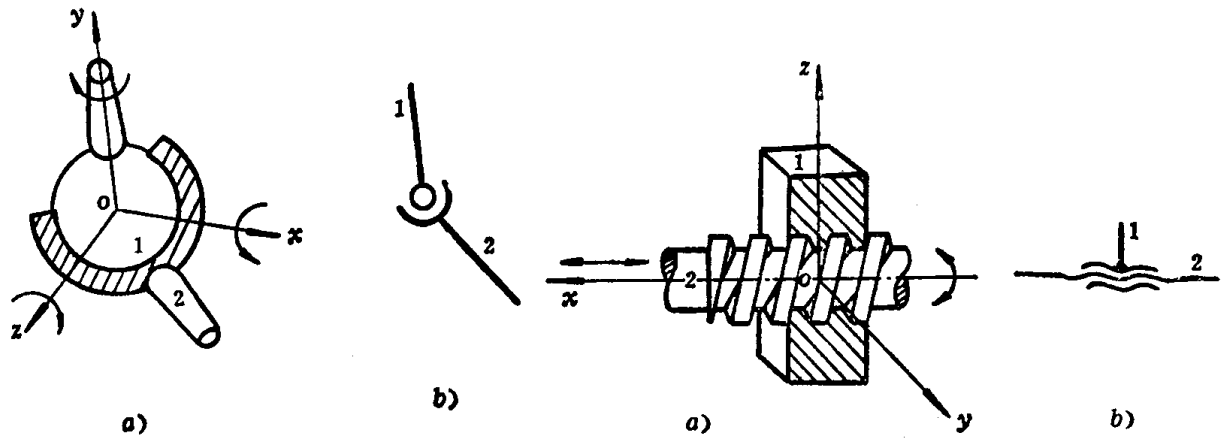


图 1-10

图 1-11