

高等专科教育

机械原理

胡秉辰 主编

北京理工大学出版社

机 械 原 理

胡秉辰 阮忠唐
潘茂暄 张永军 编

北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 简 介

全书内容除绪论外,共分十章:机构的结构组成、平面机构运动分析、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、轮系及其应用、其它常用机构、机械的运转及其速度波动的调节、转子的平衡。

本书各章均编有内容提要及学习指导,以及例题、小结、思考题和习题,帮助读者更好地掌握课本知识。

本书可作为工科机械类专科教材及工科近机类本科教材,还可作为各类成人机械类专科教材。

机 械 原 理

胡秉辰 阮忠唐 编
潘茂喧 张永军

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.5印张 426千字

1992年6月第一版 1992年6月第一次印刷

ISBN 7-81013-518-X/TH·49

印数: 1-11700册 定价: 8.30 元

出版说明

在机械电子工业部教育司的组织和指导下，由二十二所高等院校的百余名专家、教授编写和审定的高等专科机械制造专业系列教材即将由国防工业出版社、机械工业出版社和北京理工大学出版社陆续出版。这套教材是根据机电部教育司领导制定的《高等专科机械制造专业人才培养规格》的总要求，按照相应的《教学计划和课程大纲》编写的。参加教材编写的人员都具有丰富的教学经验，并且经过申报和严格审批。各门课程的教材编写大纲，课程之间的衔接和配合，都经过专家、教授集体讨论和审议。在编写过程中，各课程编写组在主编负责下对书稿进行了反复讨论和修改，最后经具有高水平的专家教授审查定稿。这就保证了这套教材具有相当的水平 and 较高的质量。这套系列教材适用于高等专科教育机械制造专业，亦适合成人高等专科教育，体现出为生产第一线培养德、智、体全面发展的应用型高级技术人才的总要求。各教材在保证基本内容的系统性和科学性的同时，注意理论联系实际和能力的培养，适当反映现代科学技术的新成就。这套教材中的基础课和技术基础课教材，也适用于其他有关专业。

这套教材的编写和出版，在机电部教育司的关心和领导下，在机械工业出版社、国防工业出版社和北京理工大学出版社的大力支持下，依靠全体编审人员的辛勤工作和有关院校的协助，得以顺利完成。在此，谨向他们表示衷心的感谢。

我们奉献的这套教材，希望能够得到读者的欢迎。但是，由于组织这样的系列教材编写工作尚属首次，这套教材难免有不足之处，欢迎广大师生和其他读者批评指正。

机电部高等专科机制专业教材编委会

1989年9月

前 言

编写本书是机电工业部教育司下达的任务,由吉林工业大学、陕西机械学院、哈尔滨科技大学合作完成。

本书根据机械类专科培养规格和教学基本要求,按 60 学时编写。

编写本书时,在保证教学基本要求的前提下,力求文字通顺、内容深入浅出、简明实用、理论联系实际、符合工程需要。

为便于读者掌握本书内容,各章均编有内容提要和学习指导,以及例题、小结、思考题和习题。

本书对机械原理的基本概念、基本原理、基本方法介绍得比较详细,对某些公式的推导过程及拓宽知识面开阔眼界的内容从简从略。

编写本书时,特别注意到目前缺少近机类本科适用的机械原理教材及成人教育的问题。因此,本书不仅作为机械类专科机械原理课教材,还可用于近机类本科及各种成人教育(函授、电视、职工大学)机械原理课教材。

参加本书编写的有吉林工业大学胡秉辰(编第二、五、九、十章)、陕西机械学院阮忠唐(编第三、四、七、八章)、哈尔滨科技大学潘茂暄、张永军(编绪论、第一章、第六章)。胡秉辰任主编。上海机械学院陈兆雄任主审。

由于我们的水平和编写时间所限,疏漏和错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

编 者

1990年4月

目 录

绪论	1
第一章 平面机构的结构分析	5
§ 1-1 机构的组成	5
§ 1-2 机构运动简图	8
§ 1-3 平面机构自由度的计算	13
§ 1-4 平面机构高副低代	18
第二章 平面机构的运动分析	23
§ 2-1 平面机构运动分析的目的和方法	23
§ 2-2 用速度瞬心法作机构速度分析	24
§ 2-3 用相对运动图解法作机构的速度及加速度分析	28
§ 2-4 用复数矢量法作机构的运动分析	39
§ 2-5 机构的运动线图	43
第三章 平面机构的力分析	50
§ 3-1 机构力分析的目的与方法	50
§ 3-2 不计摩擦时机机构的力分析	52
§ 3-3 计入摩擦时机机构的力分析	57
§ 3-4 机械的效率和自锁	64
第四章 平面连杆机构及其设计	74
§ 4-1 概述	74
§ 4-2 平面四杆机构有曲柄的条件	76
§ 4-3 平面四杆机构的类型及其应用	78
§ 4-4 平面四杆机构的几个基本概念	81
§ 4-5 平面四杆机构的设计	85
第五章 凸轮机构及其设计	98
§ 5-1 凸轮机构的应用及其分类	98
§ 5-2 从动件常用运动规律	101
§ 5-3 凸轮轮廓曲线的图解法设计	109
§ 5-4 凸轮轮廓曲线的解析法设计	117
§ 5-5 凸轮机构力分析和基本尺寸的确定	120
§ 5-6 圆柱凸轮机构	124
第六章 齿轮机构及其设计	128
§ 6-1 概述	128
§ 6-2 齿轮啮合基本原理	131
§ 6-3 渐开线齿廓的啮合传动	132
§ 6-4 直齿圆柱齿轮各部分名称、基本参数和标准齿轮尺寸计算	138
§ 6-5 渐开线直齿圆柱齿轮啮合传动	147
§ 6-6 渐开线齿廓的切制原理、根切和最少齿数	157

V

§ 6-7 变位齿轮传动	164
§ 6-8 渐开线斜齿圆柱齿轮传动	178
§ 6-9 蜗杆蜗轮传动	187
§ 6-10 直齿圆锥齿轮传动	191
第七章 轮系及其应用	201
§ 7-1 轮系的分类	201
§ 7-2 定轴轮系的运动学计算	204
§ 7-3 周转轮系的运动学计算	207
§ 7-4 混合轮系的运动学计算	210
§ 7-5 轮系的功用	214
§ 7-6 行星轮系各轮齿数的确定	215
§ 7-7 几种新型行星传动简介	216
第八章 其他常用机构	223
§ 8-1 棘轮机构	223
§ 8-2 槽轮机构	225
§ 8-3 不完全齿轮机构简介	228
§ 8-4 凸轮式间歇运动机构简介	230
§ 8-5 万向联轴器	231
§ 8-6 螺旋机构	233
第九章 机器的运转及其速度波动的调节	237
§ 9-1 概述	237
§ 9-2 机器的运动方程式	239
§ 9-3 机器运动方程式的求解	245
§ 9-4 机器周期性速度波动的调节和飞轮转动惯量的计算	247
§ 9-5 机器的非周期性速度波动及其调节	254
第十章 转子的平衡	260
§ 10-1 概述	260
§ 10-2 刚性转子的平衡计算	261
§ 10-3 转子平衡实验简介	266
§ 10-4 转子不平衡量表示方法、许用不平衡量及平衡精度	268
参考文献	273

绪 论

一、机械原理研究的对象和内容

机械原理是一门以机构和机器为研究对象的科学。

人类为了生存，在长期同大自然作斗争中，逐渐创造了机器。随着人类的进步和生产的发展，各种机器日趋完善。其质量和水平已经达到了相当高的程度。在现代生产和日常生活中，人们经常见到的汽车、拖拉机、机床、起重机、内燃机、缝纫机和洗衣机等都是机器的例子。对于机械、机器、构件、零件等名词，读者可能并不陌生，但对它们的确切意义却不一定都清楚。机器的种类很多，它们的用途也各不一样，但它们都有一些共同的特征。以下通过分析几个机器实例总结出各种机器的共同特征，进而弄清上述各概念。

图1所示为单缸四冲程内燃机，它由曲轴1、连杆3、活塞5、缸体13、凸轮10、推杆9、摆杆8、进气阀门7、齿轮2、4、11、12（曲轴1上还有一齿轮）、排气阀门6等组成。为了使燃气能在缸体内腔燃烧膨胀，推动活塞作往复移动，经连杆转变为曲轴的连续转动，把燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。为此必须有进气、压缩、膨胀、排气四冲程，凸轮是用来启闭进、排气阀门的。要保证曲轴转两周，进、排气阀门各启闭一次，在曲轴和凸轮轴之间安装了齿轮。

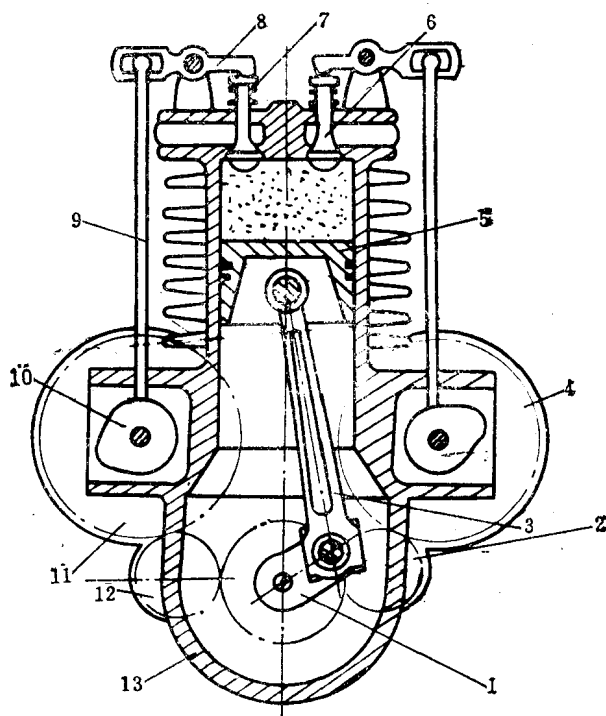


图 1

图2所示为牛头刨床，它是由床身9、齿轮2和3、导杆5、滑块4和10、刨头6等组成。当电动机驱动齿轮2转动时，齿轮2带动齿轮3回转，齿轮3通过滑块4（滑块4的中心销轴与齿轮3之间是固定联接，销轴与滑块之间可以转动）推动导杆5左右摆动，再带动刨头6作往复直线运动，使刨刀切削工件而作有用的机械功。工作台7由丝杆8控制前后移动。

在机械加工中使用的送料机如图3所示。它能完成特定的人工操作的动作，从而代替人完成一定的工作。它的动作顺序：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。其外形如图3(a)所示，它的

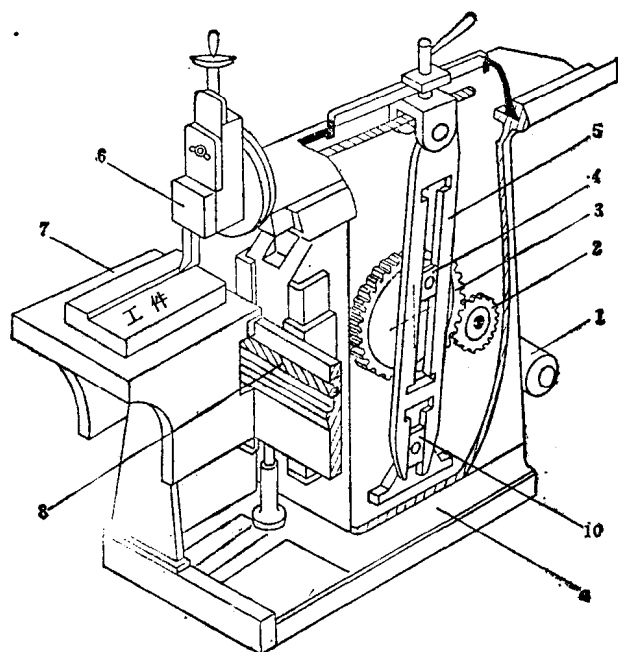


图 2

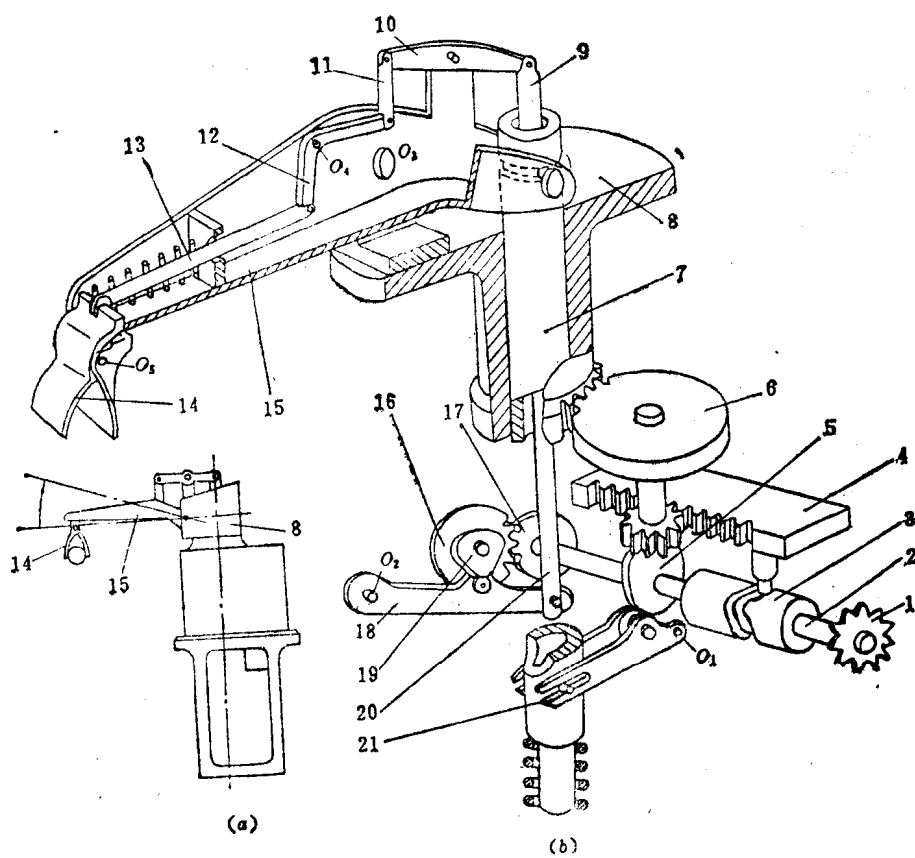


图 3

机械传动情况如图 3(b) 所示, 电动机通过减速器减速后 (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 3 通过齿条 4 和齿轮传动使座 8 作往复回转。

由上述可以看出, 虽然各种机器的结构、形式和用途不同, 但它们都具有以下三个共同的特征:

- (1) 它们都是人为的实物组合;
- (2) 它们各部分之间具有确定的相对运动, 即当其中一个运动部分位置确定时, 则其余各运动部分的位置也就跟着确定了;
- (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 (如刨床切削工件) 或转换机械能 (如内燃机将热能转换为机械能)。

由此可见, 具有上述三个特征的就是机器。

作为机器的一部分, 具有机器前两种特征, 用来传递或变换运动和力, 称其为机构。例如, 在内燃机中曲柄连杆机构、齿轮机构、凸轮机构等。因此, 从结构和运动的观点来看, 机器和机构两者之间并无区别, 所以常用机械一词做为机构和机器的总称。

机械原理课程的内容主要包括以下几个方面:

- (1) 机构的结构分析 研究机构的组成, 研究机构运动的可能性和确定性。
- (2) 机构的运动分析 在不考虑引起机构运动的力的作用情况下, 从几何的观点来求解机构中点的轨迹、位移、速度和加速度; 构件的角位移、角速度、角加速度。
- (3) 机械的动力分析 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, 解决机械速度波动的调节和构件离心惯性力平衡问题。
- (4) 常用基本机构的分析和设计 介绍几种常用机构的类型、功用和特点, 分析这些机构的传动特性, 讨论满足给定运动及动力要求的机构设计方法。

将上述四部分内容归纳起来, 就其解决问题的性质而言, 机械原理所研究的问题又可分为两大类: 第一类问题是对现有机器的研究, 即机构的分析问题, 其中包括结构分析、运动分析和动力分析; 第二类问题是按已知的运动和动力要求设计新的机构, 即机构的综合问题, 其中包括机构选型 (即结构设计)、运动设计和动力设计。

解决上述问题的方法有图解法、解析法、实验法等。由于图解法清晰直观, 容易领会, 虽然精度较低, 但在许多场合仍能满足要求, 故本书以介绍图解法为主。解析法精度较高, 但设计计算比较复杂。实验法通过实测取得结果, 是建立和验证理论研究方法的唯一途径, 但需要相应的实验设备, 且具有一定的误差。

近年来, 由于电子计算机的使用, 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条件。可以断言, 随着时间的推移, 由于电子计算机技术和测试技术以及优化方法、可靠性技术的应用, 会使机械原理这门学科得到新的发展, 使机械原理的理论在工程实践中获得更加广泛的应用。

二、学习本课程的目的及注意事项

众所周知,机械工业状况是一个国家国民经济水平的重要标志之一,因为以现代化的生产手段来武装国民经济的各个部门是离不开机械工业的。根据我国的现状,必须逐步发展生产的机械化和自动化,因此必须创造出各式各样优良的新机械,同时也要改造现有的机械设备以充分发挥其潜力。在这一任务中,机械原理的有关知识将起到重要作用。

在生产实际中,机械的种类很多,它们的结构和功用各不相同,但都有一些如上所述的共性问题,学习机械原理课程的目的就是研究这些共性问题,而各种机械的特殊问题将在一些其它的专业课程中研究。机械原理是机械类及近机类各专业的一门重要的基础技术课,通过这门课程的学习,使学生掌握常用机构分析与机构综合的基本理论和基本方法,并得到基本技能的训练,还将为学习机械零件和有关专业课程打下必要的基础。

本课程的先修课程是高等数学、物理、机械制图和理论力学等等,它与理论力学的关系最为密切,运用了理论力学中的有关方法和理论,同时,根据各种机构工作时出现的问题,确定相应的研究内容,建立了机械原理的研究方法和理论体系。因此,在学习机械原理时,一方面要联系和复习理论力学的有关内容,有意识地与之相对照,同时也要注意掌握机械原理本身的基本理论、方法和技能。

学习本课程与学习其它基础理论课程在方法上应有所区别,由于这门课程研究的主要对象是机械,读者如能多接触一些实物、模型,仔细观察机械的工作和运动情况,对各种机构有个直观印象,可以加深理解,对学好机械原理是很有帮助的。

多做习题也是学好本课程的重要环节。首先要熟悉如何从生产实际中提炼出理论问题,再用学到的理论、研究方法进行求解,最后得到符合实际需要的结果。通过做习题可以培养解决实际问题的能力,受到基本技能训练,还可以加深对基本理论和方法的理解。用图解法解题时要认真按比例画图,力求精确并保证图面整洁。实验课是加深基本概念理解和培养基本技能的重要环节,需要严肃认真地进行操作,审慎细致地取得数据,培养科学严谨的工作作风。

本书各章节之后附有小结和思考题,这是用来帮助读者总结、巩固、提高的,要认真阅读和完成。

思 考 题

什么是机器?什么是机构?什么称为机械?它们之间有什么区别?又有什么联系?举例说明。

第一章 平面机构的结构分析

内容提要及学习指导 本章中要介绍的内容主要有三个方面:

1. 平面机构的组成及其具有确定运动的条件

如绪论所述,机构是具有确定的相对运动的。但是,在任意拼凑的构件组合中,满足什么样的条件,机构各部分之间才能具有确定的相对运动呢?这正是机构结构分析中首先要研究的问题。在具体研究过程中将介绍构件、零件、运动副、运动链、机构自由度等概念。

2. 机构运动简图的画法

实际中的机构其结构是很复杂的,为便于研究和设计,有必要把机构用具有相同运动特性的简图(即机构运动简图)表达出来,为此需要研究构件、运动副、机构运动简图的画法。

3. 平面机构高副低代的方法

这种方法揭示了平面低副机构与平面高副机构之间的内在联系,可以将平面高副机构转化为瞬时平面低副机构,进而便可以用分析平面低副机构的方法对平面高副机构进行运动和动力分析。

本章特点是名词多、概念新,它的内容是本课程的基础,要下功夫弄懂基本概念,通过做一定数量不同类型的习题会正确运用平面机构自由度计算公式。

机构运动简图是表示机构运动特性的一种工程用图,不仅要看懂,而且针对具体机构能够正确绘制。只要仔细分析机构,按照正确步骤,结合实际多看、多画,就会熟能生巧,掌握规律。

§ 1-1 机构的组成

如前所述,在实际生产中用到的机器是由一些机构组成的,因此机构应该是重点研究的对象。

一、构件

人们已经知道,机构是相互之间具有确定运动的人为实物的组合体。这些实物组合中,有的是单一的整体,如图 1-1 所示的曲轴;有的则是几个实物刚性组合而成,如图 1-2 所示的连杆,它是由分开制造的连杆体、螺栓、上轴瓦、下轴瓦、连杆盖、螺母等组成。这些制造时不可再分的曲轴、连杆体等等,就是制造单元,称其为零件。刚性组合在一起的各个零件之间,没有相对运动,也就是它们成为一个运动单元,称为构件。由此可知,构件可能是一个零件,也可能是几个零件刚性组合在一起。

二、运动副及其分类

两构件之间通过接触组成能相对运动的联接,这样的联接称为运动副。如图 1-3 所

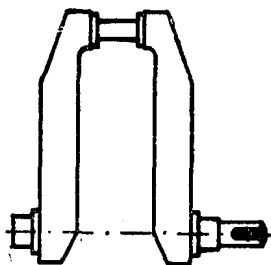


图 1-1

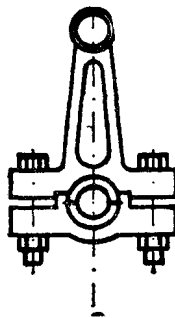


图 1-2

示的轴 1 与轴承 2 的配合和图 1-4 所示的轮齿 1 与轮齿 2 的啮合都构成了运动副。两构件之间构成的运动副，不外乎是通过点、线、面的接触来实现的。我们把两构件通过点或线接触而构成的运动副统称高副；两构件通过面接触而构成的运动副称为低副。把两构件上参与接触而构成运动副的部分称为运动副元素。把所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构。其中的运动副称为平面运动副；否则，相应地称为空间机构和空间运动副。平面机构中的运动副有转动副、移动副和平面高副。

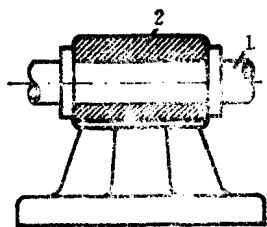


图 1-3

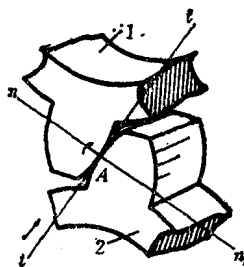


图 1-4

1. 转动副

两个构件上运动副元素是圆柱面，相互间只能作相对转动，这就是转动副（或铰链）。如图 1-3 所示，轴 1 与轴承 2 组成转动副，其中一个构件是固定的，故称为固定铰链。如图 1-5 所示，构件 1 与构件 2 也组成转动副，但两个构件都未固定，故称为活动铰链。

2. 移动副

运动副元素是平面，构件 1（或 2）固定，构件 2（或 1）移动，它们相互间只能作相对移动，这种运动副称为移动副，如图 1-6 所示。

转动副、移动副都属低副。

3. 高副

严格地说是平面高副，由于本书中主要研究平面机构，故以下简称为高副。平面机构中两构件组成高副之后，要始终保持接触，它们之间的相对运动（确切地说是瞬时相对运动）是转动和沿接触点切线方向的移动。图 1-7 (a) 所示的车轮 1 与钢轨 2，图

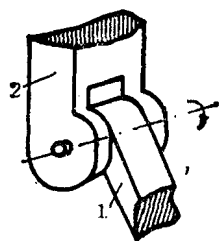


图 1-5

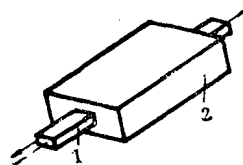


图 1-6

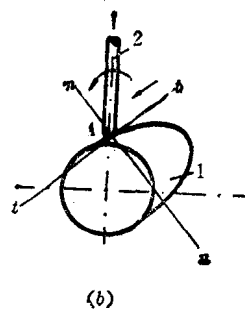
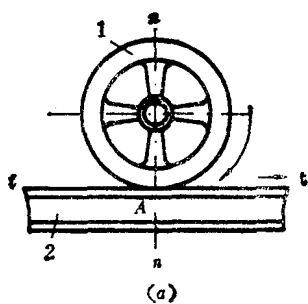


图 1-7

1-7 (b) 所示的凸轮 1 与从动件 2，图 1-4 所示的齿轮 1 与齿轮 2，分别在其接触点 A 处组成高副。

此外，常用的运动副还有如图 1-8 (a) 所示的球面副，图 1-8 (b) 所示的螺旋副，由于组成运动副的构件 1 和 2，并不在平行平面内运动，故属于空间运动副。

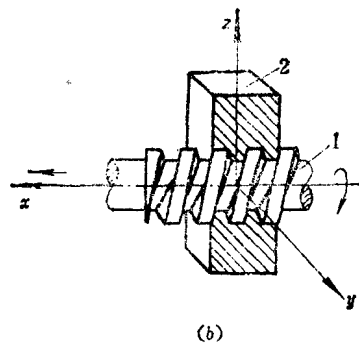
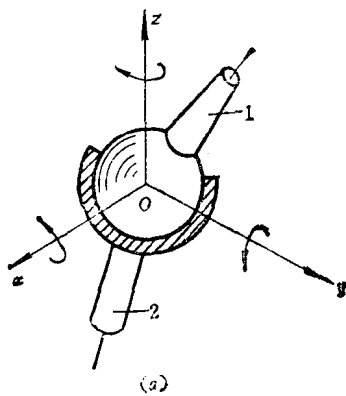


图 1-8

三、运动链

若干构件通过运动副联接起来所构成的系统称为运动链。如果运动链不是首尾相接的系统，如图 1-9 (a)、(b) 所示，则称为开链。否则，如图 1-9 (c)、(d) 所示，称为闭链。闭链中只有一个封闭形的，如图 1-9 (d) 所示，称为单环闭链；有两个封闭形的，如图 1-9 (c) 所示，称为双环闭链；依次类推。

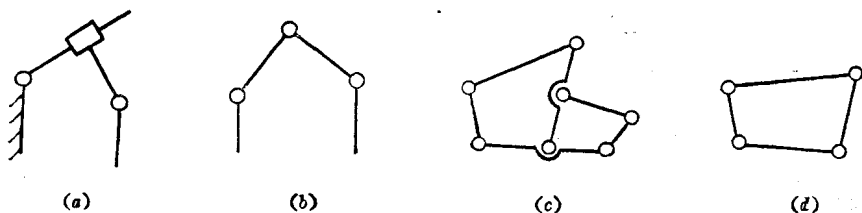


图 1-9

在各种机械中，绝大多数采用闭链，在少数机械中，也有采用开链的，如机械人机构。

四、机构

在运动链中，如果某一构件固定不动，而另一构件（或少数几个构件）按给定的运动规律运动时，其余各构件都有相应的确定运动，那么，这样的运动链便成为一个机构。从这个意义上说，机构就是具有确定运动的运动链。

研究机构运动需要有一个参考坐标系，参考坐标系所在的构件称为机架或固定构件。在机构中，按给定的运动规律运动的构件称为主动件。通常，主动件也是驱动机构运动的外力所作用的构件，而其余的构件则称为从动件。

§ 1-2 机构运动简图

一、机械运动简图的用途

通常，对于机械设计和研究人员来说主要有两大任务：一是对现有机械进行分析，二是设计新机械。不论从事哪项工作，分析清楚机构的运动情况是首要的任务，在此基础上才能进行其它分析和设计。因为除了主动件的运动以外，机构的运动情况只取决于机构中各构件上运动副的类型和相对位置，而与构件、运动副的具体结构无关，这就给我们一个启示：如果能用规定的符号和线条表示出构件和运动副，按一定比例作出机构简图，这对于研究机构将是很方便的。这样的简图能反映机构的运动特性，故称为机构运动简图。我们可以用运动简图对机构进行运动分析、结构分析和动力分析，以及对设计方案进行比较。故正确绘制机构运动简图，对设计与研究机械是十分重要的。

二、机构运动简图的绘制方法

从上述可知，要想正确绘出机构运动简图，首先要知道表示构件和运动副的规定符号。

1. 运动副和构件的规定符号

GB4460-84 中规定的常用的机构运动简图符号列于表 1-1 中。

表1-1 常用机构运动简图符号 (摘自GB4460-84)

名 称	代 表 符 号	名 称	代 表 符 号
轴、杆、连杆等		链传动	
轴、杆的固定支座		外啮合圆柱齿轮机构	
杆的固定联接		内啮合圆柱齿轮机构	
零件与轴的联接		单向啮合式联轴器	
弹性联轴器		单向摩擦式离合器	
可移式联轴器		压缩弹簧	
单向啮合式联轴器		拉伸弹簧	
单向摩擦式离合器		在支架上的电机	
压缩弹簧		平带传动	
拉伸弹簧		三角带传动	
在支架上的电机		圆锥齿轮机构	
平带传动		凸轮机构	
三角带传动		棘轮机构	

两构件组成转动副其表示法如图 1-10 所示。其中, 图 1-10 (a) 所示为两运动构件组成的转动副, 若两构件之一为机架, 应在机架上画出斜线, 如图 1-10 (b)、(c) 所示, 转动副轴心画在三构件相对转动中心处。两构件组成移动副时, 其表示方法如图 1-11 (a)、(b)、(c) 所示, 图中画出斜线的构件代表机架, 移动副中心线和二构件相对移动方向平行。两构件组成高副时, 在图中应画出两构件接触处的曲线轮廓, 如图 1-11 (d) 所示。

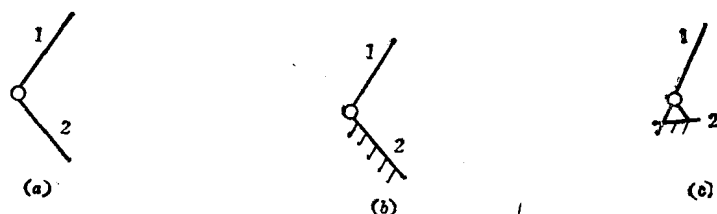


图 1-10

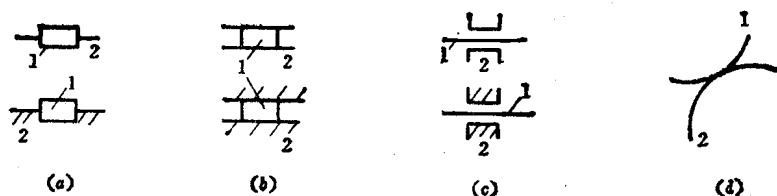


图 1-11

一个构件可能与几个构件组成运动副。图 1-12 所示为组成两个低副的构件。

组成三个转动副的构件, 如图 1-13 所示, 其中右图构件上三转动副中心位于一条直线上。表示其它一些构件和运动副的机构运动简图符号, 在 GB4460-84 中已作出规定, 见表 1-1。

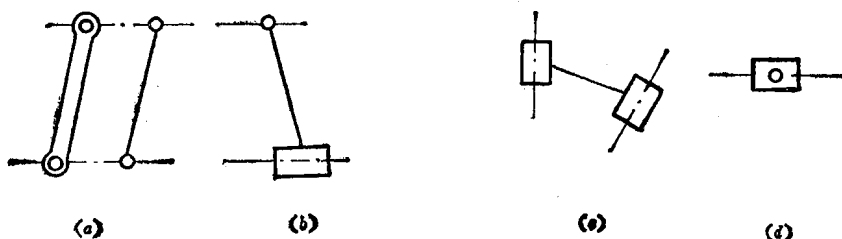


图 1-12

2. 画机构运动简图的步骤

(1) 仔细观察机构由几个构件组成, 相邻构件之间各在何处组成什么运动副。

(2) 通常选择机构中多数构件的运动平面作为投影面, 画出机构运动简图, 尽可能充分地反映出机构的运动情况。对于复杂的机构, 有时选择一个投影面是不够的, 还要配以其它投影面加以说明。