



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械原理

(第二版)

主编 朱 理



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械原理

Jixie Yuanli

(第二版)



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版的基础上,根据高等工科院校机械原理课程最新的教学基本要求和应用型本科机械设计制造及其自动化专业人才培养目标与规格的要求,并结合多年来教学实践经验以及广大高校师生对本书的使用意见修订而成的。

本书对机械原理课程传统教材的内容和体系进行了一定的改革,全书以培养工程应用能力和机械系统方案创新设计能力为目标,在内容编排上贯穿了以设计为主线的思想,除包括常用机构的结构设计和机构运动、动力分析,机械运动系统方案设计、工业机器人机构简介的内容外,还对连杆机构、凸轮机构及平面机构运动分析的解析法进行了较为详细的介绍。书后附有压床机构中六杆机构运动的解析法设计和凸轮机构的解析法设计的程序,供读者参考。除绪论外,各章均有本章内容简介、本章小结及一定数量的习题,更便于学生学习和总结。

本书可作为高等学校机械类专业的教材,适宜课程教学学时数为 45 ~ 65 学时,也可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/朱理主编. —2 版. —北京:高等教育出版社,2010.4

ISBN 978 - 7 - 04 - 029151 - 3

I. ①机… II. ①朱… III. ①机构学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TH111

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第028467号

策划编辑	卢 广	责任编辑	薛立华	封面设计	赵 阳
责任绘图	杜晓丹	版式设计	余 杨	责任校对	胡晓琪
责任印制	毛斯璐				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京机工印刷厂

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本	787 × 960 1/16	版 次	2003 年 5 月第 1 版 2010 年 4 月第 2 版
印 张	23	印 次	2010 年 4 月第 1 次印刷
字 数	430 000	定 价	27.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29151 - 00

第二版前言

21 世纪对专门人才的培养提出了新的要求,特别是 21 世纪机械产品的国际竞争愈来愈激烈,要求机械产品不断创新,努力提高产品质量,完善机械性能,这些必将需要更多的具有创新精神和创造能力的高素质人才。本书的编写正是为了培养学生的设计思维和设计创新能力,以满足 21 世纪对人才的需求。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版(原教育科学“十五”国家规划课题研究成果之一——“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”项目研究成果)的基础上,根据《教育部关于“十一五”期间普通高等教育教材建设与改革意见》的精神,参照全国高校教学指导委员会关于机械原理课程的教学指南及基本要求的精神和应用型本科机械设计制造及其自动化专业人才培养目标与规格的要求,并吸取第一版教学实践中所取得的经验以及广大高校师生对本书的使用意见修订而成的。

本书对机械原理课程传统教材的内容和体系进行了一定的改革,全书以培养工程应用能力和机械系统方案创新设计能力为目标,在内容编排上贯穿了以设计为主线的思想。在全书内容的取舍和安排上,作者根据多年来致力于教学改革的经验,在编写过程中力求做到:

1. 坚持基础理论以应用为目的、以必需够用为度的原则,教材内容选择及体系结构完全适应应用型本科人才培养体系的教学需要,力求体现应用型本科人才培养体系的教学特色。
2. 在内容的取舍及阐述方面,仍着重于讲清有关机械原理的基本概念、基本理论和基本方法,做到条理清晰、层次分明、循序前进、言简意明,并选用了适当的例题和习题,以利教学。
3. 在各章前面都有本章内容简介,在各章内容后面都有本章的小结,便于学生学习和总结。
4. 在讲述连杆机构、凸轮机构的设计方法和平面机构运动分析的方法时,对图解法的阐述尽可能简单扼要,而重点介绍解析法的内容,并附有解析法程序。

本书带“*”的章节为选学内容或延伸内容,使用时可酌情取舍。

本书主要作为普通高等学校本科机械类专业机械原理课程的教学用书,参考教学时数为 45~65 学时;也可作为其他类型高校、高职高专院校相关专业的教学用书,亦可供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有湖南工程学院朱理(第 2、7 章)、南京工程学院王贤民

(绪论,第1、5章)、上海应用技术学院吴斌(第9章、附录)、湖南工业大学刘扬(第3章)、徐州工程学院张元越(第4、8、10章)、湖南工学院厉春元(第11章)、湖南工程学院胡争先(第6章)。全书由湖南工程学院朱理担任主编。

本书由中国机械工程学会机械传动分会机构学专业委员会主任、上海交通大学邹慧君教授审阅,他对书稿进行了认真、仔细地审阅,并提出了极为宝贵的修改意见,对提高本书的编写质量给予了很大帮助。另外,在本书修订工作中得到了原编者黄忠东(徐州工程学院)和傅志红(中南大学)的关心和帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点、错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者
2009年1月

目 录

绪论	1
0.1 本课程研究的对象	1
0.2 本课程研究的主要内容	4
0.3 本课程研究的方法	5
0.4 本课程的学习方法	5
第 1 章 平面机构的结构分析	7
1.1 概述	7
1.2 机构的组成	7
1.3 机构运动简图	11
1.4 平面机构的自由度	15
1.5 机构的组成原理和机构分析	20
小结	24
习题	25
第 2 章 平面机构的运动分析	28
2.1 机构运动分析的目的和方法	28
2.2 用速度瞬心法作机构的速度分析	29
2.3 用矢量方程图解法作机构速度和加速度分析	32
2.4 机构的运动线图	42
2.5 用解析法作机构的运动分析	43
小结	54
习题	54
第 3 章 平面机构的动力分析	58
3.1 机构力分析的目的和方法	58
3.2 运动副中摩擦力的确定	60
3.3 平面机构的静力分析	64
3.4 构件惯性力的确定	69
3.5 不考虑摩擦时机构的动态静力分析	71
3.6 机械的效率和自锁	73
3.7 斜面传动的效率和自锁	77
3.8 螺旋传动的效率和自锁	78
小结	80

习题	81
第4章 机械的平衡	84
4.1 机械平衡的目的和内容	84
4.2 刚性转子的平衡计算	85
4.3 刚性转子的平衡试验	89
4.4 刚性转子的许用不平衡量及平衡精度	90
4.5 平面机构的平衡	92
小结	95
习题	96
第5章 平面连杆机构及其设计	99
5.1 平面连杆机构的应用及其设计的基本问题	99
5.2 平面四杆机构的基本形式和演化	100
5.3 平面四杆机构的基本知识	107
5.4 平面四杆机构的设计	112
小结	125
习题	126
第6章 凸轮机构及其设计	132
6.1 凸轮机构的应用和分类	132
6.2 从动件的运动规律	135
6.3 凸轮轮廓曲线的设计	144
6.4 凸轮机构基本尺寸的确定	156
*6.5 力封闭凸轮机构的动态静力分析	160
小结	163
习题	164
第7章 齿轮机构及其设计	170
7.1 齿轮机构的应用、特点和分类	170
7.2 齿廓啮合基本定律	171
7.3 渐开线齿廓	172
7.4 渐开线标准齿轮的基本参数和几何尺寸	175
7.5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	182
*7.6 渐开线齿轮的加工	190
*7.7 渐开线变位齿轮	196
7.8 斜齿圆柱齿轮机构	201
7.9 蜗轮蜗杆机构	211
7.10 锥齿轮机构	216

小结	222
习题	223
第 8 章 齿轮系及其设计	226
8.1 齿轮系及其分类	226
8.2 定轴轮系的传动比	228
8.3 周转轮系的传动比	230
8.4 复合轮系的传动比	232
8.5 轮系的功用	235
8.6 轮系的设计	236
8.7 其他类型的行星传动简介	240
小结	243
习题	243
第 9 章 其他常用机构和组合机构	247
9.1 棘轮机构	247
9.2 槽轮机构	250
9.3 凸轮式间歇运动机构	255
9.4 不完全齿轮机构	256
9.5 螺旋机构	258
9.6 万向铰链机构	261
9.7 机构的组合方式与组合机构	263
9.8 常用组合机构的类型及功能	266
小结	275
习题	276
第 10 章 机械的运转及其速度波动的调节	278
10.1 概述	278
10.2 机械的运动方程式	280
10.3 机械运动方程式的求解	284
10.4 在稳定状态下机械的周期性速度波动及其调节	285
小结	292
习题	292
第 11 章 机械运动系统的方案设计	295
11.1 机械运动系统方案设计的内容	295
11.2 机械运动系统功能结构的建立	296
11.3 确定机械运动系统的工作原理	298
11.4 机械运动系统工艺动作过程的构思与分解	300

11.5	机构选型及其系统组成	303
11.6	机械执行系统间运动的协调设计和运动循环图	307
11.7	机械运动系统方案的构思与拟订	314
11.8	机械运动系统方案的评价	316
11.9	设计冲压式蜂窝煤成形机的运动方案	318
	小结	323
	习题	323
	附录	326
	附录 1 压床机构中六杆机构运动的解析法设计	326
	附录 2 凸轮机构的解析法设计	341
	参考文献	356

绪 论

本章介绍本课程的研究对象和主要内容,机构、机器、机械的基本概念和本课程的学习与研究方法。

0.1 本课程研究的对象

机械原理是机器和机构理论的简称,它是一门以机器和机构为研究对象的学科。

1. 机器

人类通过长期生产实践创造了机器,并使其不断发展形成当今多种多样的

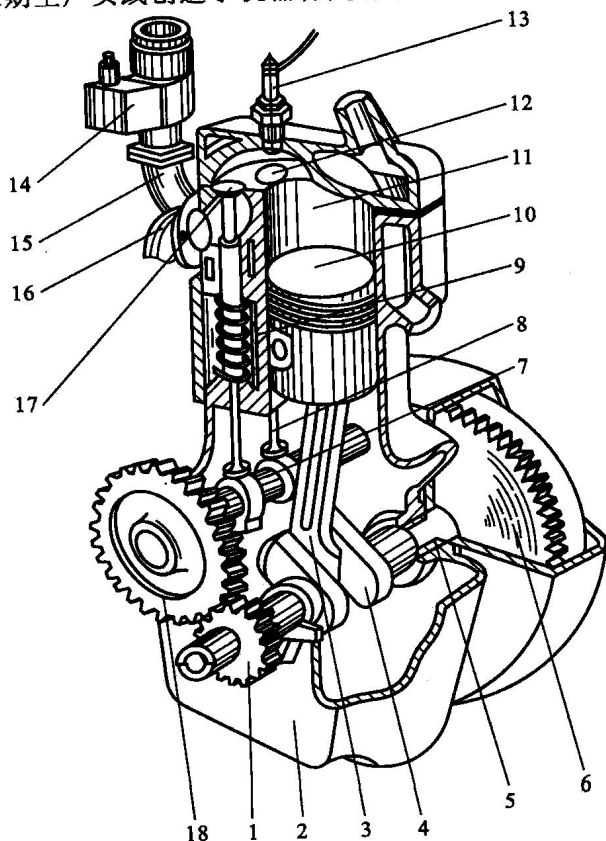


图 0.1 内燃机

类型。在现代生产和日常生活中,机器已成为代替或减轻人类劳动、提高劳动生产率的主要手段。使用机器的水平是衡量一个国家现代化程度的重要标志。

在日常生活和生产中,我们都接触过许多机器,例如缝纫机、洗衣机、复印机、各种机床、汽车、拖拉机、起重机等。各种不同的机器,具有不同的形式、构造和用途,它们具有什么共同的特点呢?

图 0.1 所示为单缸四冲程内燃机,它是由气缸体 11、活塞 10、进气阀 17、排气阀 12、连杆 3、曲轴 4、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 1 和 18 等组成。燃气推动活塞作往复移动,经连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。为了保证曲轴每转两周进、排气阀各启闭一次,曲轴和凸轮轴之间安装了齿数比为 1:2 的齿轮。这样,当燃气推动活塞运动时,各构件协调地动作,进、排气阀有规律地启闭,加上汽化点火等装置的配合,就把热能转化为曲轴回轮的机械能。

图 0.2 所示为一工业机器人,它由铰接臂机械手 1、计算机控制器 2、液压装置 3 和电力装置 4 组成。当机械手的大臂、小臂和手按指令有规律地运动时,手端夹持器(图中未示出)便将物料搬运到预定位置。在这部机器中,机械手是传递运动和执行任务的装置,是机器的主体部分,电力装置和液压装置提供动力,计算机实施控制。

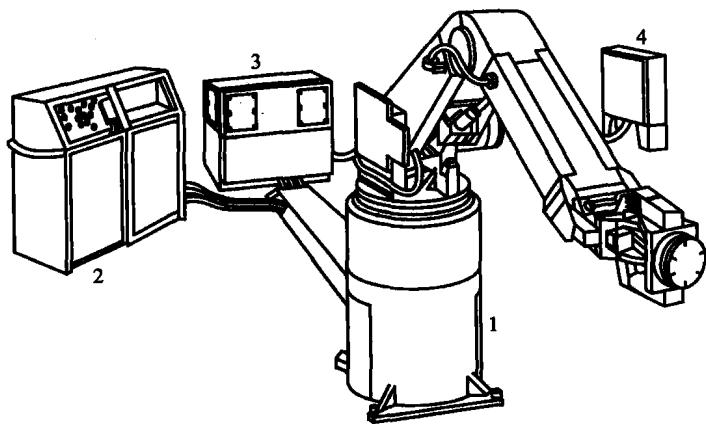


图 0.2 工业机器人

机器种类繁多,大致可分为以下两大类:

1) 原动机 能将化学能、电能、水力、风力等能量转换为机械能的机器,如内燃机、电动机、涡轮机等。

2) 工作机 利用机械能来完成有用功的机器,如各种机床、轧钢机、纺织机、印刷机、包装机等。

在实际应用中,常用的原动机有内燃机和电动机两种。但是,工作机则数不

胜数,各行各业都有符合自身特点的专业机器。虽然各种机器的构造、性能及用途均不相同,但从它们的组成、运动和功能来看,机器都有以下共同的特征:

- 1) 是一种通过加工制造而成的机件组合体。
- 2) 机器中各个机件之间都具有确定的相对运动。
- 3) 能实现能量的转换或作有用的机械功。

凡同时具备上述三个特征的实物组合体就称为机器。

2. 机构

用构件间能够相对运动的连接方式组成的构件系统称为机构。故经分解可知,上述内燃机是由齿轮机构、凸轮机构和连杆机构所组成的。

由此可见,机构是机器的重要组成部分,其主要功能是实现运动和动力的传递和变换。因此,机构也具有机器的前两个特性,即

- 1) 是一种通过加工制造而成的机件组合体。
- 2) 机器中各个机件之间都具有确定的相对运动。

由上可知,机器是由一个或多个各种不同机构所组成。它可以完成能量的转换或作有用的机械功,而机构则仅仅起着运动和动力的传递和变换的作用。或者说,机构是实现预期的机械运动的机件组合体,而机器则是由各种机构组成的,能实现预期机械运动并完成有用机械功或转换机械能的机构系统。

由于机构与机器都具有两个共同的特性,所以从结构和运动的角度去看,两者并无差别。因此,人们常用“机械”作为机器和机构的总称。

就功能而言,一般机器包含四个组成部分:动力部分、传动部分、控制部分、执行部分。动力部分可采用人力、畜力、液力、电力、热力、磁力、压缩空气等作动力源,其中利用电力和热力的原动机(电动机和内燃机)使用最广。传动部分和执行部分由各种机构组成,是机器的主体。控制部分包括各种控制机构(如内燃机中的凸轮机构)、电气装置、计算机和液压系统、气压系统等。

构件是运动的单元。它可以是单一的整体,也可以是由几个零件组成的刚性结构。如图 0.3 所示的连杆就是由连杆体 1、连杆盖 4、螺栓 2 及螺母 3 等几个零件组成。这些零件没有相对运动,构成一个运动单元,成为一个构件。零件是制造单元。在本课程中将构件作为研究的基本单元。

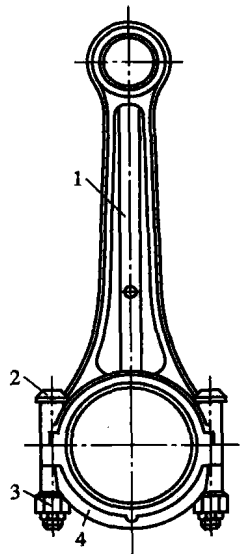


图 0.3 连杆

如上所述,机械原理的研究对象是机构和机器。机器的种类很多,但组成机

器的机构并不太多。机械原理课程讨论机构和机器的共性问题,它的主要内容包括以下几个方面:

1) 机构结构分析的基本知识 分析机构的结构是为了判断机构能否实现预定的运动,同时也是为了便于进行机构的运动分析和动力分析。

2) 机构的运动分析 在已知机构中某些构件运动规律的条件下,确定其他构件的运动规律和构件上各点的运动轨迹。

3) 机械动力学 主要研究机械在运转过程中各构件上所受的力和机械效率,同时研究在外力作用下各构件的运动规律以及机械的调速和平衡等问题。

4) 常用机构的分析与综合 本课程将对齿轮机构、连杆机构、凸轮机构等一些常用机构的运动及工作特性进行分析。所谓综合,就是不涉及与机械零件有关的强度、形状、材料等问题,而是根据机构的结构、运动学和动力学要求进行机构设计。

0.2 本课程研究的主要内容

机械原理作为一门学科,并不研究某种特定的机器或机构,而是研究机构与机器在运动与动力学方面的共性问题,并着重研究常用机构的运动设计问题。

机械原理研究的内容可归纳为“分析”和“综合”两大类。

1) 分析 对已有机器或机构在组成、运动和动力学等方面作分析,以了解和掌握机器或机构的运动和动力学特性。

2) 综合 就是按照给定的运动和传力等方面的要求和条件,选择机构的类型(包括创造新机构),并设计出与运动有关的机件的几何形状(如凸轮轮廓)和尺寸(如连杆长度)。由于不涉及各机件的强度、材料选择和具体的结构形状等问题,故机构的综合实质上是机构运动简图设计,简称机构设计。

机构的分析与设计虽然出发点和要达到的目的是不同的,但是在解决机器和结构问题时,两者往往是紧密相关的,并由此构成机械原理研究的主要内容,即:

1. 机构的组成分析

研究机构的组成要素和组成原理,判断机构运动的可能性和确定性,为合理组成各种机构和创造新机构探索基本规律。

2. 常用机构的分析与设计

以设计为主线,介绍各种常用机构的类型、功用和特点,分析各种机构的传动特性,研究机构在满足给定运动和传力等要求时的尺寸或几何形状的设计方法。

3. 机构组合系统的分析与设计

研究由若干基本机构组成机构系统的连接方式、典型组合机构的分析与设计以及机构系统运动方案设计准则。

4. 机械的若干动力学问题

着重研究机械中的摩擦与机械效率对机构运动的影响,探讨机械在已知质量和外力的作用下的真实运动规律,解决机械在运转中周期性速度波动和机械中惯性力不平衡等问题。

0.3 本课程研究的方法

研究机械原理问题的方法有图解法和解析法两大类。

1. 图解法

几何概念清晰,直观易懂,便于判断结果正确与否。在解决问题的过程中,侧重于形象思维。

2. 解析法

在建立了数学模型后,应用计算机会使计算变得快捷而精确。在解决问题的过程中,侧重于逻辑思维。

两类方法各有所“长”,也各有所“短”,在选择时应根据需求和可能,在满足分析与设计要求的前提下,充分利用两方法的“长”处,或者两方法兼并用之,以达到取“长”补“短”的目的。

随着科学技术的迅猛发展,在机械学科领域里,机械原理研究的范围也在不断地扩大,例如:机件不再看成为刚体、机件的变形和间隙对机械运动的影响及高速机械的动力学问题的研究;在机器中,机械、电子、液压、气动及控制的协调配合问题,即机电一体化问题的研究;集机械、电子、控制于一体的机器人与仿生机械等高技术机械产品的研究;机构满足多约束条件的机构优化设计方法的研究。

计算机的广泛应用和测试技术的提高,为机械原理的研究提供了先进的手段和方法,也促进了机械原理的发展。作为机械原理课程的教材,其内容应着重反映机构分析与设计最基本的原理和方法及机械动力学的最基本问题,为适应现代机械设计工作打下良好的理论基础。

0.4 本课程的学习方法

从上述机械原理研究的主要内容可看出,机械原理课程有两个显著的特点,即具有较强的实践性和可动性。

1) 实践性 课程研究的所有问题都来源于实际的具体机构和机器。

2) 可动性 课程研究的对象都是具有确定运动的机构,而非静止不动的结构。

因此,在学习方法上也要与之相适应。在学习过程中,尤其应注意以下几点“结合”:

1) 理论与实践相结合 随时联系生产和生活实践,主动应用所学理论与方法去解决有关机构与机器在运动学和动力学方面的实际问题。

2) 机构简图与实物相结合 为便于研究,课程中的机构均用简单的几何线条表示,与实际机件所组成的机构外形相差甚远。在进行机构运动设计时,应考虑由实际机件组成的机构可能会出现的问题。

3) 机构的静态与动态相结合 在研究机构运动时,往往要画出机构在某个位置的简图(封闭的几何图形),在屏幕或纸面上只是表示出该位置的静止状态,而要真正了解机构在一个运动周期的运动特性,就必须将机构位置的几何图形动起来,即将其看成是一个可变的几何图形。

4) 形象思维与逻辑思维相结合 在对机构的研究中,某些概念、结论或某些参数关系式并非完全由逻辑推理而得,常常直接由几何图形或物理概念获得。

第1章 平面机构的结构分析

本章主要介绍机构的组成,机构运动简图的绘制方法,如何将实际机构或机构的结构图绘制成机构运动简图。介绍运动链成为机构的条件,平面机构自由度的计算方法,如何准确识别机构中存在的复合铰链、局部自由度和虚约束,并作出正确处理。同时又介绍机构的组成原理,高副低代方法,如何判断杆组、杆组的级别和机构的级别,如何根据机构组成原理用基本杆组、原动件和机架去创新构思新机构的方法,又如何根据Ⅱ级、Ⅲ级机构分解为机架、原动件和若干种基本杆组的方法。

1.1 概 述

机构是一个构件系统,为了传递运动和动力,机构中各构件之间应具有确定的相对运动。但任意拼凑的构件系统不一定能发生相对运动,即使能够运动,也不一定具有确定的相对运动。讨论机构满足什么条件构件间才具有确定的相对运动,对于分析现有机构或设计新机构都是很重要的。

实际机构的外形和结构都很复杂,为了便于分析研究,在工程实际中,通常都用以简单的线条和符号绘制的机构运动简图来表示实际机械。工程技术人员应当熟悉机构运动简图的绘制方法。

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,否则称为空间机构。目前工程中常见的机构大多属于平面机构。

1.2 机构的组成

1.2.1 运动副及其分类

一个作平面运动的自由构件具有三个独立运动。如图 1.1 所示,在 Oxy 坐标系中,构件 S 可随其上任一点 A 沿 x 轴、 y 轴方向移动和绕 A 点转动。这种相对于参考系构件所具有的独立运动称为构件的自由度。所以,一个作平面运动的自由构件有三个自由度。

机构是由许多构件组成的。机构中的每个构件都以一定的方式与另一些构件相互连接。这种连接不是固定连接,而是能具有一定相对运动的连接。这种使两构件直接接触并能产生一定的相对运动的连接称为运动副,例如轴与轴承

的连接、活塞与气缸的连接、传动齿轮的两个轮齿间的连接等都是运动副。构件组成运动副后,其独立运动受到约束,自由度便随之减少。

两构件组成的运动副不外乎通过点、线或面的接触来实现。按照接触特性,通常把运动副分为低副和高副两类。

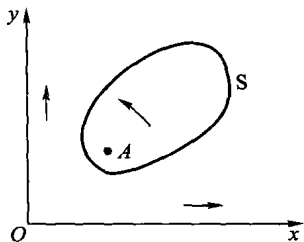


图 1.1 平面运动刚体的自由度

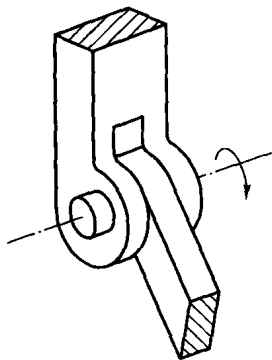


图 1.2 转动副

1. 低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。平面机构中的低副有转动副和移动副两种。

1) 转动副 两构件之间只作相对转动的运动副称为转动副,或称为铰链,如图 1.2 所示。

2) 移动副 两构件之间只作相对移动的运动副称为移动副,如图 1.3 所示。

2. 高副

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。图 1.4a 中的车轮与钢轨、图 1.4b 中的凸轮与从动件、图 1.4c 中的轮齿 1 与轮齿 2 分别在接触处 A 组成高副。组成平面高副两构件间的相对运动是沿着接触处切线 $t-t$ 方向的相对移动和绕接触处 A 相对转动。

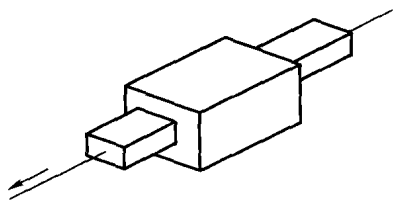


图 1.3 移动副

除上述平面运动副之外,机械中还经常见到如图 1.5a 所示的球面副和图 1.5b 所示的螺旋副。这些运动副两构件间的相对运动是空间运动,故属于空间运动副。

为了便于绘制机构运动简图,运动副常常用简单的符号来表示(已制定有国家标准,见 GB/T 4460—1984)。表 1.1 所列即为常用运动副的代表符号(图中