



应用型本科机电类专业“十二五”规划精品教材

# 机械原理

张荣 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

应用型本科机电类专业“十二五”规划精品教材

# 机械原理

主 编	张 荣		
副主编	罗陆锋	章小红	张 融
参 编	王仕仙	刘 春	齐 真
	张秀梅	李如钢	严小黑
	张旭忠		

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书共分12章,内容包括绪论,平面机构的结构分析,平面机构的运动分析,平面机构的力分析、摩擦及机械的效率,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,齿轮系及其设计,其他常见机构,机械的运转及其速度波动的调节,机械的平衡,机械的创新设计。每章均配有学习要点和思考复习题,以便学生更好地掌握知识。

本书的内容深入浅出,教师可根据具体教学要求进行相应调整,适合作为高等院校机械类专业本科教材或教学参考书,也可供其他有关专业技术人员和读者使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械原理/张荣主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.10  
应用型本科机电类专业“十二五”规划精品教材  
ISBN 978-7-5680-0474-9

I. ①机… II. ①张… 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(2014)第 244076 号

机械原理

张 荣 主 编

策划编辑:袁 冲

责任编辑:胡凤娇

封面设计:原色设计

责任校对:李 琴

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16

字 数:394千字

版 次:2015年9月第1版第1次印刷

定 价:39.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

“机械原理”是机械工程专业必修的专业技术基础课程。它在教学计划中起着承上启下的作用,并在机械设计系列课程体系中占有非常重要的地位。本书结合现代科学技术的发展,综合各基础课程中的相关知识,要求学生掌握有关机械原理的基本概念、基本理论和基本方法,掌握常用机构的工作原理、结构特点、性能和设计的一般规律和法则,掌握一般机器的运动学和动力学分析与设计方法;要求学生了解机械传动系统方案设计的基本常识,具有初步拟定机械系统运动方案的能力。

本书共分 12 章,内容包括绪论,平面机构的结构分析,平面机构的运动分析,平面机构的力分析、摩擦及机械的效率,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,齿轮系及其设计,其他常见机构,机械的运转及其速度波动的调节,机械的平衡,机械的创新设计。

本书具有如下几个特点:

(1) 本书坚持以“夯实基础、注重应用”为原则,其内容选择和结构体系安排符合应用型本科人才培养目标的要求;

(2) 每章均有学习要点,章后配有思考复习题,由浅入深,以供读者掌握相关知识;

(3) 学习内容明确,条理清楚、层次分明、循序渐进、言简意赅,易于读者学习;

(4) 本书带有 \* 标章节为选学内容,供不同院校、不同专业根据教学要求酌情取舍。

本书由武汉东湖学院张荣担任主编,天津职业技术师范大学罗陆锋、武汉东湖学院章小红、武昌工学院张融担任副主编,武汉工程大学邮电与信息工程学院王仕仙、武汉理工大学华夏学院刘春、武汉职业技术学院齐真、武昌工学院张秀梅、武昌工学院李如钢、武汉生物工程学院严小黑、山西运城学院张旭忠担任参编。全书由张荣负责组织和统稿。

由于编者编写水平有限,书中难免有遗漏及不妥之处,恳请广大读者批评指正!

编 者

2014 年 7 月

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 机械原理课程研究的对象和内容 .....	(1)
1.2 机械原理课程的地位、任务与作用.....	(3)
1.3 机械原理课程的学习方法 .....	(3)
1.4 机械原理学科发展趋势 .....	(4)
思考复习题 1 .....	(5)
<b>第 2 章 平面机构的结构分析</b> .....	(6)
2.1 机构的组成要素 .....	(6)
2.2 机构运动简图的绘制.....	(10)
2.3 机构具有确定相对运动的条件.....	(13)
2.4 机构自由度的计算.....	(14)
2.5 基本杆组的分类、平面机构的组成原理和结构分析 .....	(20)
2.6 平面机构中的高副低代.....	(22)
思考复习题 2 .....	(23)
<b>第 3 章 平面机构的运动分析</b> .....	(27)
3.1 机构运动分析的目的和方法.....	(27)
3.2 用速度瞬心法作机构的速度分析.....	(27)
3.3 平面机构的运动分析——相对运动图解法.....	(30)
3.4 平面机构的运动分析——解析法.....	(34)
思考复习题 3 .....	(36)
<b>第 4 章 平面机构的力分析、摩擦及机械的效率</b> .....	(40)
4.1 机构力分析的目的和方法.....	(40)
4.2 构件惯性力的确定.....	(41)
4.3 运动副中的摩擦分析.....	(44)
4.4 平面机构的动态静力分析——图解法.....	(49)
4.5 平面机构的动态静力分析——解析法.....	(52)
4.6 机械的效率.....	(55)
4.7 机械的自锁.....	(58)



思考复习题 4 .....	(60)
<b>第 5 章 平面连杆机构及其设计 .....</b>	<b>(63)</b>
5.1 平面连杆机构及其传动特点 .....	(63)
5.2 平面四杆机构的类型和应用 .....	(64)
5.3 平面四杆机构的基本知识 .....	(73)
5.4 平面连杆机构的设计 .....	(78)
5.5 多杆机构简介 .....	(88)
思考复习题 5 .....	(90)
<b>第 6 章 凸轮机构及其设计 .....</b>	<b>(94)</b>
6.1 凸轮机构的组成特点及类型 .....	(94)
6.2 推杆的运动规律 .....	(98)
6.3 凸轮轮廓曲线的设计 .....	(103)
6.4 凸轮机构的压力角及基本尺寸的确定 .....	(108)
思考复习题 6 .....	(111)
<b>第 7 章 齿轮机构及其设计 .....</b>	<b>(115)</b>
7.1 齿轮机构 .....	(115)
7.2 其他常用齿轮机构 .....	(129)
思考复习题 7 .....	(140)
<b>第 8 章 齿轮系及其设计 .....</b>	<b>(143)</b>
8.1 齿轮系的类型 .....	(143)
8.2 定轴轮系的传动比 .....	(144)
8.3 周转轮系的传动比 .....	(148)
8.4 复合轮系的传动比 .....	(151)
8.5 轮系的应用 .....	(152)
*8.6 行星轮系各轮齿数和行星轮数的选择 .....	(155)
思考复习题 8 .....	(156)
<b>第 9 章 其他常见机构 .....</b>	<b>(158)</b>
9.1 棘轮机构 .....	(158)
9.2 槽轮机构 .....	(162)
9.3 不完全齿轮机构 .....	(167)
9.4 凸轮式间歇运动机构 .....	(170)
9.5 螺旋机构 .....	(172)
9.6 万向联轴器 .....	(174)
思考复习题 9 .....	(176)
<b>第 10 章 机械的运转及其速度波动的调节 .....</b>	<b>(178)</b>
10.1 概述 .....	(178)
10.2 机械的运动方程 .....	(180)



10.3	周期性速度波动及其调节	(189)
10.4	非周期性速度波动及其调节	(194)
	思考复习题 10	(195)
<b>第 11 章</b>	<b>机械的平衡</b>	(197)
11.1	概述	(197)
11.2	刚性转子的平衡计算	(198)
11.3	刚性转子的平衡试验	(201)
11.4	转子的许用不平衡量	(203)
11.5	平面机构的平衡	(204)
	思考复习题 11	(206)
<b>* 第 12 章</b>	<b>机械的创新设计</b>	(209)
12.1	功能分析与设计	(209)
12.2	工作原理的构思与设计	(212)
12.3	工艺动作的构思与设计	(217)
12.4	方案的评价	(218)
12.5	机械结构的创新设计	(218)
	思考复习题 12	(245)
	参考文献	(247)

# 第 1 章 绪论

## 本章学习要点

- (1) 机械原理课程的研究对象和内容。
- (2) 机械原理课程的地位、作用和任务。
- (3) 机械原理课程的学习方法。
- (4) 机械原理课程的学科发展趋势。

## 1.1 机械原理课程研究的对象和内容

### 1.1.1 机械原理课程研究的对象

机械原理是从力学原理出发,研究机械的运动学和动力学分析与设计基本理论问题的一门学科。

机械原理研究的对象是机械。机械是机器和机构的总称。机器是人类通过长期生活及实践创造出来的技术装置,它用来完成能量转换、处理信息以及产生有用功,用以代替或减轻人的劳动,完成某种特定的功能,实现某工艺(工作)过程的机械化、自动化与智能化,有效地提高了工作效率、工作精确性与可靠性,是人类改造自然强有力的工具,是社会生产力的重要组成部分。

机器的种类很多,根据不同用途可分为动力机器(如电动机、内燃机、发电机、蒸汽机等)、加工机器(如金属切削机床、纺织机、包装机、缝纫机等)、运输机器(如汽车、拖拉机、起重机械、输送机等)和信息机器(如计算机、热机械分析仪、记账机等)。虽然机器的种类很多,并具有不同的结构和用途,但它们都具有以下三个共同的特征:

- (1) 机器都是由一系列构件(也称运动单元体)组成;
- (2) 组成机器的各构件之间都具有确定的相对运动;
- (3) 机器均能转换机械能或完成有用的机械功。

通常,一台完整的机器应具有四个组成部分:原动机、传动机构、执行机构和控制系统。原动机是用于提供动力,如电动机、内燃机等;传动机构将运动和动力传递给执行机构,如齿轮、丝杠等;执行机构用于实现机器的功能,如机床的刀架、机器人的手爪等;控制系统则用



于处理机器启动、停止和各组成部分之间的工作协调,以及与外部其他机器或原动机之间的关系协调,如用各种传感器收集机器内、外部的信息,输入计算机进行处理,并向机器各部分发出指令,使之工作协调。

一个复杂的机械系统,往往是由许多部分组成的,其中有些部分在结构上具有一定的相对独立性,并且能实现某些特定的运动。在机械原理中,将把这些部分从机械系统中分离出来,分别进行研究,这些部分通常称为机构。机构是组成各类机械的基础。最常见的机构有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、间歇运动机构等。虽然机构有多种类型,用途各有不同,但它们都与机器前两个特征相同:

- (1)机构由若干个构件所组成;
- (2)组成机构的各构件之间都有确定的相对运动。

从上述分析可知,机构是机器的重要组成部分,用以实现机器的动作要求。一部机器可能只有一个机构,也可能包含若干个机构。机构与机器的根本区别在于:机构的主要职能是传递运动和动力,而机器的主要职能是除传递运动和动力外,还能转换机械能或完成有用的机械功。

### 1.1.2 机械原理课程研究的内容

机械原理课程是研究机构及机械系统运动简图的设计,是面向机械系统运动反感设计的学科,是设计性的课程。因此,本课程的内容是以设计为主线,分析与设计有机结合,分析是设计的基本内容和必不可少的手段,但它是服务于设计,是为了了解机构的运动和传力特性等,以便正确地选用机构和校核所设计的机构,为了评价与优选机械系统运动方案。而在分析与设计的数学模型建立上,两者是一致的,仅是已知与待求的参数不同而已。

本课程属于机械类专业的技术基础课,在内容上突出加强与拓宽基础为基本点。特别强调注意掌握各部分的概念、基本理论和基本方法。机械原理主要研究的内容如下。

(1)各种机构的分析问题。它包括机构的结构分析,即研究机构的组成原理、机构运动的可能性及确定性条件;机构的运动分析,即研究在给定原动件运动的条件下,机构各点的轨迹、位移、速度和加速度等运动特性;机构的受力分析,即研究机构各运动副中的计算方法、摩擦及机械效率等问题。

(2)常用机构的设计问题。机器的种类虽然繁多,但构成各种机器的机构类型却有限,常用的有齿轮机构、凸轮机构、连杆机构及各种间歇机构等。本书将用很大篇幅讨论这些机构的设计理论和设计方法。

(3)机械的动力学分析。机械的动力学分析包括两个方面的内容。一方面将研究机构在给定运动及已知外力条件下,求解各运动副的反力,以便了解机构上的动压力及其变化情况;研究机械在运转过程中各运动副的摩擦、构件受力及其所做的功、机械效率来确定构件的尺寸和形状,了解机械的动力性能等。另一方面将研究机构在惯性力和其他外力作用下的真实运动规律。

此外,本课程还将研究因机械运动速度波动带来的机械运转稳定性问题及其调节方法。由于机械各构件产生的惯性力将影响到机械的正常工作效率和使用寿命,因此本课程还要研究机械的平衡问题。



(4)机械的传动系统设计。机械的传动系统设计将讨论机械传动系统设计是如何选用机构、机构间如何组合和协调、机构的变异与演化方法以及拟定传动系统方案时必须考虑的问题。

## 1.2 机械原理课程的地位、任务与作用

机械原理课程是一门重要的技术基础课,其研究对象是在生产实际中广泛应用的机械,所要解决的问题大多数是工程中的实际问题。机械原理课程研究的是各种机械所具有的共性问题,而各专业课则是研究某一类机械所具有的特殊问题。因此,它比专业课具有更宽的研究面和更广的适应性。它在教学中起着承上启下的作用,是高等院校机械类各专业的一门十分重要的主干技术基础课,在机械设计系列课程体系中占有非常重要的位置。

机械原理在发展国民经济方面 also 具有重要的意义。实现生产的机械化、自动化和高效益是不同专业领域的所有生产部门的目标,这需要创造出大量结构新颖、性能优良的新型机械设备充实和装备各行各业;需要更新改造现有机械设备,以期合理有效地使用,发挥其潜力;需要提高操作者的业务水平、技术人员的创造能力、管理者的素质和指挥能力,而有关机械原理的知识是必不可少的。

机械原理对提高我国机械学理论及技术在国际上的学术地位也起着非常重要的作用。我国学者在著名的国际学术会议如“机构与机械理论”“机械传动与机构学”等上发表的论文越来越多,学术水平不断提高,而机械原理方面的知识则是基础知识。

机械原理课程的任务主要是使学生掌握机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生初步拟定机械运动方案、分析和设计基本机构的能力。它是以前高等数学、大学物理、机械制图及理论力学等课程为基础,同时又为以后学习机械设计和机械类有关专业课以及掌握新的科学技术打好工程技术的理论基础,并能使学生受到一些必要的、严格的基本技能和创造思维的训练,为机械的合理使用和革新改造打好良好基础。机械原理在培养高级工程技术人才的全局中,具有增强学生对机械技术工作的适应能力和产品创新能力的作用。即使是对于应用机械的工程技术人员,也应熟悉各种机构的工作原理及其在机器中的作用,掌握机械原理课程,有利于发挥机器的工作性能,维护保养好机器。

设计和制造是一种工作性能优良的新机器,需要掌握其工作原理、设计和制造原理,需要综合应用多门学科的知识,而机械原理是其中一门重要的学科。

## 1.3 机械原理课程的学习方法

机械原理是专业基础课,不同于理论基础课,所以为了学好机械原理:一方面要着重搞清楚其基本概念,理解其基本原理,掌握机构分析和设计的基本方法;另一方面也要注意这些原理和方法在机械工程上实际应用的范围和条件。

(1)熟悉和掌握各种典型机构的结构和运动特点,深入理解满足实际生产需要的机构分析和设计方法。

(2)熟悉和掌握机构运动简图和机械运动简图的绘制方法,要习惯于采用运动简图来认

识机构和机器,想象机构和机器的运动情况。

(3)深刻理解基本概念和基本原理,掌握机构分析与设计的基本方法。这些基本方法有杆组法、转换机架法、机构演化法、等效法等。

(4)注意培养运用所学基本理论与方法去分析和解决工程实际问题的能力。机械原理是一门与工程实际密切相关的课程,因此学习本课程要更加注意理论联系实际。与本课程密切相关的实验、课程设计、机械设计大赛,以及课外科技活动,将为学生提供理论联系实际和学以致用机会。另外,现实生活中有各种各样构思巧妙和设计新颖的机构,在学习本课程的过程中,要注意观察、分析和比较,并把所学知识用于实际。

## 1.4 机械原理学科发展趋势

20世纪后期随着科学技术的发展,机械原理的领域、内容及研究方法都有了飞速的发展,总的来说就是学科领域的相互交叉和渗透。机械学科与电磁学、光学、计算机科学、信息学、生物学乃至管理科学等学科领域相互渗透融合,出现了许多新的研究领域,并促使其向自动化、智能化、微型精巧化方向发展,如机械电子学、机器人机构学、仿生机构学、微型机构学等。因此,作为机构本身,由平面机构、闭链机构、单自由度机构向空间机构、开链机构、多自由度机构发展。为了提高机械的稳定性、可靠性,提高机械效率及经济效益,减少和消除机械机构中的过约束,自调、自适应机构及平面——空间机构也成为一个新的新的发展趋势。

现代机械工业日益向高速、重载、高精度、高效率、低噪声等方向发展,对机械提出的要求也越来越苛刻。有的用于宇宙空间,有的用于深海作业,有的小到能沿人体血管爬行,有的又是庞然大物,有的速度数倍于声速,有的又要做亚微米级甚至纳米级的微位移,等等。处于机械工业发展前沿的机械原理学科,为了适应这种情况,新的研究课题与日俱增,新的研究方法日新月异。

(1)在新机构研发方面,由于机器人、步行机、人工假肢和新型机器的发展需要,以及机器的动力源日益广泛采用液压和气压。因此,近年来对多自由度、多闭环的多杆平面连杆机构以及开式运动链的结构理论有了较多的研究。在机构的结构理论研究中,近年来采用了图论、网络分析、线性几何学、螺旋坐标等各种工程数学方法。利用计算机系统研究机构的结构类型及运动自由度问题也日益普遍。为了广泛应用机电一体化技术,开展包括液压、气压、电磁、电子、光电等非机械传动元件的广义机构设计方法的研究已日益迫切。

(2)在连杆机构方面,重视了对空间连杆机构、多杆多自由度机构、连杆机构的弹性动力学和连杆机构的动力平衡的研究。

(3)在齿轮机构方面,发展了齿轮啮合原理,提出了许多性能优异的新型齿廓曲线和新型传动,加速了对高速齿轮、精密齿轮、微型齿轮的研制。

(4)在凸轮机构方面,十分重视对高速凸轮机构的研究。为了获得动力性能好的凸轮机构,在凸轮机构推杆运动规律的开发、选择和组合上做了很多工作。

(5)在组合机构方面,为了适应现代机械高速度、快节奏、优性能的需要,还发展了高速、高定位精度的分度机构,具有优良综合性能的组合机构,以及各种机构的变异和组合等。

(6)在机械的分析与综合中也由只考虑其运动性能过渡到同时考虑其动力性能;考虑到



机械在运转时,构件的振动和弹性变形,运动副中的间隙和构件的误差对机械运动及动力性能的影响,以及如何对构件和机械进一步做好动力平衡的问题等。

此外,计算机技术的广泛应用,极大地推动了机构分析和设计向纵深方向发展。为了提高分析和设计的精确性和速度,现代解析法、数值计算方法以及各种优化设计方法,已得到十分广泛的应用。特别是优化设计方法(如遗传算法、模糊优化法、神经网络等)使大量的非线性规划问题、随机问题、不确定条件下的设计等都能得到解决,使分析与设计更能符合工程实际,使所设计的机械能更好地满足科学技术发展的需要。各种现代的机构设计方法层出不穷,并正向智能化设计和专家系统的方法发展。

总之,机械原理的研究领域十分广阔,内涵非常丰富。在机械原理的各个研究领域,每年都有大量的内容新颖的文献资料涌现。但是,机械原理作为一门技术基础课程,根据教学要求,我们将只研究有关机械的一些最基本的原理及最常用的机构分析和综合的方法,这些内容也都是进一步研究机械原理课程所必需的知识基础。

### 思考复习题 1

- 1-1 机械原理课程的研究对象是什么?
- 1-2 机械、机器、机构、构件、零件有何不同? 各有何特点?
- 1-3 试举例说明生活中常见的机构有哪些?
- 1-4 请指出家用轿车的原动部分、传动部分、执行部分、控制部分、辅助部分分别是什么?
- 1-5 传统机械与现代机械有何不同?

# 第 2 章 平面机构的结构分析

## 本章学习要点

- (1) 机构的基本组成要素: 构件和运动副。运动副的分类及标准代号。
- (2) 机构运动简图的概念及绘制机构运动简图的方法。
- (3) 机构具有确定相对运动的条件。
- (4) 机构自由度的计算及在计算自由度时需要注意识别是否存在复合铰链、局部自由度和虚约束, 客观认识其作用并能正确对其进行处理。
- (5) 杆组的概念和分类, 平面机构的组成原理及结构分析。
- (6) 高副低代法, 以便于对含有高副的平面机构进行结构分析、运动分析和力分析研究。

## 2.1 机构的组成要素

机构是指能够正确传递运动和动力的构件系统, 即运动链。组成运动链的两个基本组成要素是构件和运动副。要知道机构是怎样组成的, 首先要了解构件、运动副和运动链的概念及分类。

### 2.1.1 构件

任何机器从加工制造的角度来讲都可看作是由成千上万个细小的零件装配而成的, 所以零件是机器中独立加工制造的最小单元体, 如齿轮、带轮、链轮、螺栓、螺母、垫片、滚动轴承、轴、键等。构件是机器中参与独立运动的最小单元体。构件可以是一个零件或者由若干个零件刚性连接在一起。如图 2-1 所示, 内燃机主运动机构中的曲轴就是由一个零件(曲轴)所组成的构件。图 2-2 所示为内燃机连杆, 从装配、拆装、加工工艺等角度出发需做成剖分式, 所以它由连杆体、连杆头、轴瓦、螺栓、螺母、垫片等多个零件刚性连接在一起, 零件之间并无相对运动, 使其在内燃机工作时, 作为一个不可分割的整体参与运动。因此, 从运动的观点来看, 任何机器都是由若干个构件组合而成的。

构件的作用是进行运动和动力的传递, 故在机构运动时, 多少总要产生弹性变形, 变形不大时可认为是刚性构件, 柔性构件在其受力方向变形不大时, 也可作“刚化”处理, 如带受拉或液体受压等情况。在此必须指出, 本书所研究的都是狭义范围内的刚性构件, 而带、链、



图 2-1 内燃机的主运动机构

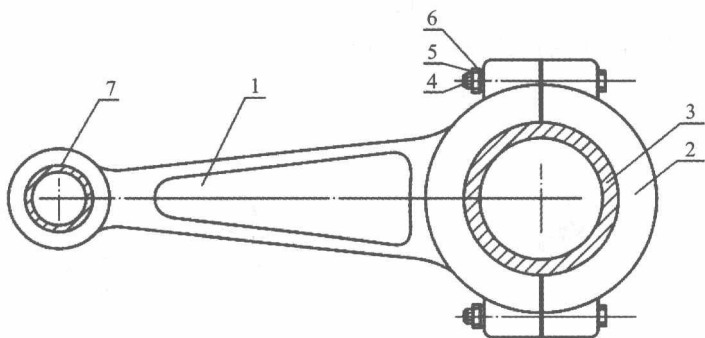


图 2-2 内燃机的连杆组成

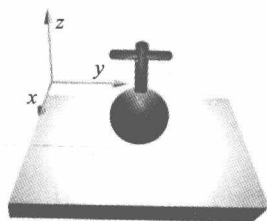
1—连杆体;2—连杆头;3—轴瓦;4—螺栓;5—螺母;6—垫片;7—小端轴承

绳、弹簧等柔性构件和光、电、液、声、光等广义构件均不在本书的研究范围之内。

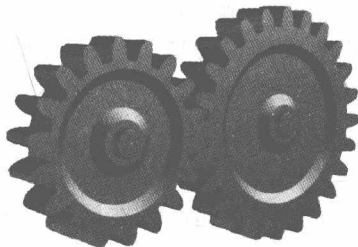
## 2.1.2 运动副

机构是能够传递运动和动力的构件系统,构件系统里的每个构件均以一定的方式与其他构件连接在一起传递运动。这种可动连接既限制了两个构件之间的某些相对运动,又保留了一个或几个相对运动。因此,我们把由两构件直接接触而组成的可动连接称为运动副,如轴与轴承之间的连接、凸轮与推杆之间的连接、相互啮合传递运动中的齿轮之间的连接、活塞与气缸之间的连接等。

通常把两构件直接参与接触而构成运动副的表面称为运动副元素,两个构件之间的接触无非就是点、线、面,所以运动副元素分为:点接触运动副元素、线接触运动副元素和面接触运动副元素,如图 2-3 所示。



(a) 点接触运动副元素



(b) 线接触运动副元素



(c) 面接触运动副元素

图 2-3 运动副元素

构件的自由度是指构件相对于参考系所具有的独立运动的数目(或确定构件位置的独立变量的数目)。因此,一个自由构件在三维空间中运动,共有 6 个自由度,即沿三个坐标轴( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )的移动和绕三个坐标轴( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )的转动的自由度。一个自由构件在二维空间中运动,共有 3 个自由度,即沿二个坐标轴( $x$ 、 $y$ )的移动和绕一个坐标轴( $z$ )的转动的自由度。当两个构件通过接触组成运动副时,一个构件必然会对另外一个构件的运动产生限制作用,这种限制作用就称为约束(用字母  $S$  表示)。运动副是一种可动连接,所以两构件之间的自由度  $F$  必然大于 0,且  $F$  与  $S$  的关系为: $S+F=6$ (三维空间中), $S+F=3$ (二维空间中)。

如三维空间中,一个运动副引入 2 个约束,保留的自由度  $F=6-2=4$  个。不同的运动副类型所引入的约束数目是不同的,最多为 5 个,最少为 1 个。

运动副的种类繁多,常见的运动副如图 2-4 所示。

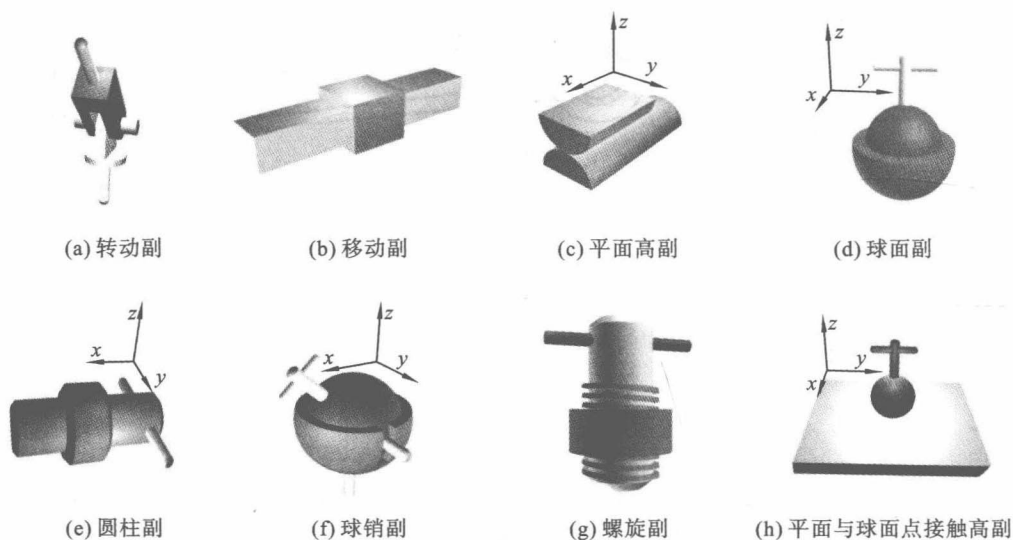


图 2-4 常见的运动副

运动副分类方法很多,具体介绍如下。

(1)按构成运动副的两构件的相对运动形式进行分类。

按构成运动副的两构件的相对运动形式可分为转动副(回转副或铰链)(见图 2-4(a))、移动副(见图 2-4(b))、球面副(见图 2-4(d))、螺旋副(见图 2-4(g))等。

两构件间的相对运动为转动的运动副称为转动副,如轴与轴承之间的运动副;两构件间的相对运动为移动的运动副称为移动副,如活塞与气缸体、滑块与导轨之间的运动副;两构件间的相对运动为球面运动的运动副称为球面副,如球面与球碗之间的运动副;两构件间的相对运动为螺旋运动的运动副称为螺旋副,如丝杠和螺母、螺杆和螺母之间的运动副。

(2)按运动副的运动性质进行分类。

按运动副的运动性质可分为平面运动副和空间运动副。

当组成运动副的两构件之间的相对运动是在同一平面或相互平行的平面内时,该运动副称为平面运动副,如图 2-4 中的转动副、移动副、平面高副,除此之外还有平行轴圆柱齿轮副、盘形凸轮副等。两构件之间的相对运动是空间运动的运动副称为空间运动副,如图 2-4 中的球面副、圆柱副、球销副、螺旋副、平面与球面点接触高副等。本书的主要研究对象是平面运动副。

(3)按组成运动副的两构件的接触形式或运动副元素的特征进行分类。

按组成运动副的两构件的接触形式或运动副元素的特征可分为高副和低副。

组成运动副两构件的接触形式或运动副元素无非是点、线、面。以点、线接触的运动副称为高副;以面接触的运动副称为低副。常见的高副有齿轮副、凸轮副、滚动轴承中的滚动体与内外圈之间的运动副;常见的低副有移动副、转动副(铰链)、圆柱副、螺旋副、球面副、球销副等。



综上所述,如图 2-4 所示,(c)、(h)为高副,(a)、(b)、(d)、(e)、(f)、(g)为低副。因低副是两构件面接触,高副是点、线接触,低副的接触面积比高副大,所以低副的承载能力比高副大。

(4)按运动副所引入的约束数目进行分类。

按运动副所引入的约束数目可分为 I 级副、II 级副、III 级副、IV 级副和 V 级副。

运动副所引入约束的数目的取值范围是 1~5,所以引入一个约束的运动副称为 I 级副,引入 2 个约束的运动副称为 II 级副,以此类推,共有 I~V 级副。例如:移动副是 V 级副,因为一个独立构件在三维空间的自由度共有 6 个,当它与另一构件组成移动副时,就引入了 5 个约束,只保留了 1 个沿着导路方向移动的自由度。表 2-1 列出了常用运动副的级别,表中运动副图形中的箭头表示运动副保留的自由度。

本书的研究对象主要是平面机构,常见的平面低副有移动副和转动副,均为 V 级副,所以在二维空间中引入一个低副就引入 2 个约束。常见的平面高副有齿轮副和凸轮副,均为 IV 级副,所以在二维空间中引入一个高副就引入 1 个约束。由此可知,高副比低副具有更大的自由度及运动灵活性。

工程中,为方便分析和研究,通常将运动副用简单的符号来表示。表 2-1 详细列出了常用运动副的所属分类及其标准代表符号(根据国家标准 GB 4460—2013 制定)。

表 2-1 常用运动副所属分类及其标准代表符号

名称	图 形	简图符号	副级	自由度	名称	图 形	简图符号	副级	自由度
球面高副			I	5	圆柱套筒副			IV	2
柱面高副			II	4	转动副			V	1
球面低副			III	3	移动副			V	1
球销副			IV	2	螺旋副			V	1

### 2.1.3 运动链

把多个构件用运动副连接成具有相对运动的构件系统,称为运动链。如果运动链中的

各个构件构成首尾封闭的系统,称为闭式运动链,简称为闭式链或闭链,如图 2-5 所示;如果运动链中的各个构件未构成首尾封闭的系统,称为开式运动链,简称为开式链或开链,如图 2-6 所示。一般机器中的运动链,多采用闭链。绝大多数机器人、人体运动链(骨骼为构件,关节为运动副)当中的运动链,多采用开链,以获得更多的自由度及活动空间。

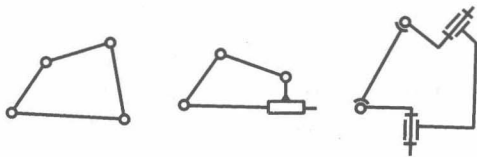


图 2-5 闭式运动链



图 2-6 开式运动链

另外,根据组成运动链中的各个构件是否在同一平面或相互平行的平面内,可将运动链分为平面运动链和空间运动链。运动链当中所有运动副都是平面运动副,该运动链就是平面运动链。运动链当中至少有一个空间运动副,该运动链就是空间运动链。

### 2.1.4 机构

在运动链中,如果将运动链中的某一构件加以固定或相对固定作为机架,而让一个或几个构件(称为原动件)按给定运动规律相对于机架做给定运动,若运动链中的其余构件(从动件)均具有确定的相对运动,则该运动链称为机构。这里需要注意一点,机架可以相对地面固定不动,也可以是运动的,如车、船、飞机等运动装备当中的机构的机架。

机构中各构件的相对运动在同一平面或相互平行的平面内,称为平面机构;机构中各构件的相对运动不在同一平面或相互平行的平面内,称为空间机构。也可以说,当机构中的所有运动副都是平面运动副时,该机构就称为平面机构;当机构中至少有一个空间运动副时,该机构就称为空间机构。

当机构中所有的运动副均为低副时,该机构称为低副机构。当机构中至少有一个高副时,该机构称为高副机构。高副机构比低副机构具有更大的运动灵活性,而低副机构比高副机构具有更大的承载能力。

## 2.2 机构运动简图的绘制

在对现有机械进行分析或设计新机械时,都需要绘制机构运动简图。

### 2.2.1 机构运动简图的概念

根据机构的运动尺寸,按一定的长度比例尺 $[\mu_l = \frac{\text{运动尺寸的实际长度/mm}}{\text{图纸上所绘的长度/mm}}]$ 定出各运动副的位置,并用规定的简单线条和符号代表构件和运动副将机构的运动传递情况表示出来。这种准确表达机构运动特性的简化图形称为机构运动简图。机构运动简图可以清楚地表达该机构中构件的数目及连接情况、运动副的类型和数目、机构的运动尺寸(各构件的长度、各运动副的相对位置关系)、原动件的位置、机架的位置。通过严格按照比例所绘出的机