

## 第 1 部分

# 理 论 篇



绪 论

内容提要

主要阐述机械原理课程的研究对象、主要内容和学习方法；介绍机械、机器、机构等的基本概念，并介绍本课程的扩展研究方向。

1.1 机械原理课程的研究对象及内容

1. 研究对象

机械原理研究的对象是机械(Mechanism)，而机械是机构(Machine)与机器(Enginery)的总称，因此机械原理研究有关机构和机器的基本理论问题，如其结构、运动特性、动力分析以及机械运动方案设计等，可以认为机械原理是机器和机构理论的简称，也可称为机器理论与机构学，属于机械产品性能分析和设计的基础理论课程之一，它广泛地使用了现代数学工具，并研究求解机构分析与综合问题的各种实际方法，这些方法有采用计算机的解析法，也有图解法。图 1-1 表示了机械原理的研究对象、研究内容及其相互关系。

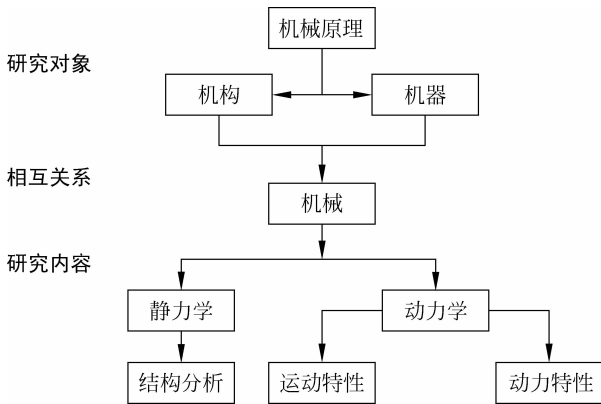


图 1-1 机械原理的研究对象、研究内容及相互关系

1) 机器

机器是由各种机构所构成的系统，机构是用来传递与变换运动和力的可动装置，常见的有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、螺旋机构等。机器则是实现能量、物料和信息变换，代替或减轻人的体力劳动和脑力劳动的一种执行机械运动的装置，如发动机或发电机用来转换

能量；工作机(金属加工机床及机组、锻压设备、轧机、铸造设备等)用以改变原材料和毛坯的形状、尺寸、性质和状态；运输机械和传送装置使重物、工具、人及其他物体按要求在空间移动。动力机械使能量发生转换；信息机将输入的信息进行变换，以监控、调节和控制机械运动。机器完成有规律的机械运动以实现自己的工作过程。这些运动的载体就是机构。所以，机构是由许多刚体组成的系统，这些刚体通过接触可动地联接起来，并相对于其中之一的机构以所要求的确定形式运动。多数机构的功用是完成刚体机械运动的变换。

如图 1-2 所示为一台内燃机。它可以把燃气燃烧时产生的热能转化为机械能。其工作原理如下：燃气由进气管通过进气阀 3 被下行的活塞 2 吸入气缸，然后进气阀 3 关闭，活塞 2 上行压缩燃气，点火使燃气在气缸中燃烧、膨胀产生压力，推动活塞上行，通过连杆 5 带动曲轴 6 转动，向外输出机械能。当活塞 2 再次上行时，排气阀 4 打开，废气通过排气管排出。图中，凸轮 7 和顶杆 8 用来启、闭进气阀和排气阀；齿轮 9, 10 则用来保证进气阀、排气阀和活塞之间形成一定规律的动作。以上各部分协调配合动作、便能将燃气燃烧时的热能转变为曲轴转动的机械能。

图 1-3 所示为一台六自由度的机器人操作机本体。它可以实现空间的运动，具有 6 个关节，分别有 6 个电机分别驱动，通过这 6 个关节的耦合运动，其末端执行器按照一定的要求完成预定运动轨迹和运动，从而代替人完成有用的机械功。

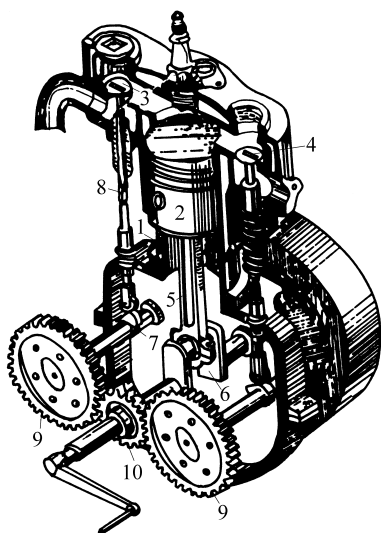


图 1-2 内燃机

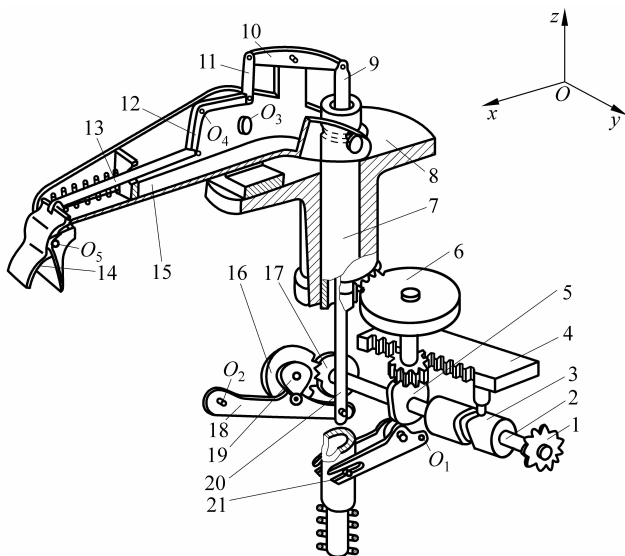


图 1-3 六自由度机器人操作机

在日常生活和工作中，我们见到过或接触过许多机器，从家庭用的洗衣机、摩托车、电冰箱，到工业生产中使用的车床、磨床等各种专门机床；从汽车、火车、轮船、飞机，到机器人、

宇宙飞船等。

## 2) 机构

什么是机构？我们来进一步分析图 1-2 所示的内燃机，从中可以看出，在该机器里有各种运动，有些构件组合是传递回转运动的；有些构件组合是把转动变为往复运动的；有些则是利用机件本身的轮廓曲线来实现预期规律的移动或摆动的。这些用来传递运动的构件组合体就是机构，图 1-2 内燃机中的构件 9 和 10 组成了齿轮机构；构件 7 和 8 组成了凸轮机构，活塞 2、连杆 5 和曲柄 6，组成了连杆机构。在内燃机中，连杆机构中活塞的往复移动被转换为曲柄的连续转动，从而带动齿轮机构、凸轮机构实现内燃机的进气门、排气门的开、闭，完成了内燃机的工作原理，实现了将化学能转换为机械能的功能，其中的连杆机构、齿轮机构、凸轮机构等只是起到转换运动的功能。

由以上的分析可以看出，**机构**是一种可以用来传递运动和力的组合体，**机器**则是实现能量、物料和信息变换的一种执行机械运动的装置，由此可以说，机器是由各种机构组成的。所以从结构和运动的观点来看，两者之间并无区别，因此，人们常将**机构**和**机器**统称为**机械**。

## 2. 研究内容

机械原理课程的研究内容，大体分为以下几个方面。

(1) 机构的结构分析：主要介绍机构的组成原理、机构具有确定运动的条件、机构运动简图的概念及如何绘制机构运动简图，最后了解机构的结构分类方法。

(2) 机构的运动分析：分析常用机构的运动特性，介绍常用的运动分析方法与原理。对机构进行运动分析是设计新机构的重要部分，它将为机械系统的方案设计打下必要的运动学基础。

(3) 机构的动力学：分析一下常用机构在运动过程中各构件的受力情况，研究影响机械效率的主要因素和机械效率的计算方法，判断其自锁条件；研究机械运转时惯性力和惯性力矩的平衡问题，以及如何通过合理设计和试验来消除或减小不平衡惯性力引起的有害振动；研究机械在外力作用下的真实运动规律和速度波动问题，以及如何合理地设计调速装置来降低速度波动的不良影响。

(4) 常用机构的设计与分析：对常用的机构，如平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等的工作特性与原理进行分析，介绍其常用的设计方法与要求。

(5) 机械系统方案设计：介绍具体机械设计时机构的选型、组合、变异以及机械系统总体方案的拟定、机械执行系统的设计、机械传动系统的设计等。主要包括：根据机械预期实现的功能，确定机械的工作原理；根据工艺动作的分解，确定机械的运动方案；合理地选择机构的形式并将其恰当地组合起来，实现机械的预期动作；根据工艺动作的要求，使各机构协调配合工作等。

## 1.2 学习本课程的目的与方法

### 1. 学习本课程的目的

机械原理课程属于机械类各专业必修的一门重要的技术基础课。它需要具有前期的基

础理论知识的支撑,如物理、工程力学等基础理论课;同时作为机械类各专业的学生,在今后的学习和工作中要遇到关于机械设计和产品设计等方面的问题,机械原理研究的是各种机械所具有的共性问题。因此,在机械设计系列课程体系中占有非常重要的位置。

## 2. 学习本课程的方法

### 1) 注重方法的学习

研究各种机构与机器所具有的一般共性问题,如机构的组成原理、机构的运动学、机器动力学等;着重理解其解决问题的方法,如倒置、反转、替代、当量等工程上的方法。

### 2) 注重能力的培养

要注意培养运用所学知识与基本理论、基本方法,去发现、分析和解决工程实际问题的能力,在学习本课程时,也应把重点放在掌握研究问题的基本思路和方法上,着重于培养自己的能力。

### 3) 培养综合分析、全面考虑问题的习惯

解决实际工程问题一般有多种方法可以采用,所得到的结果往往也不是唯一的,如何选择合适的方法以及判断所得的结果是否合适等,涉及分析、对比、判断和决策等问题,对事物的分析、对比、判断和决策的能力是工程技术人员应该具有的基础能力。而且,工程实际问题还涉及很多方面的因素,往往是一个综合的问题,因此要在学习的过程中不断地培养自身的综合分析和全面考虑问题的习惯。

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。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,如果能注意观察、分析和比较,并把所学知识用于实际,就能达到举一反三的目的。另外工程实际问题都要经过实践的严格考验,不能有半点马虎大意,因此在学习过程中要坚持科学严谨、一丝不苟的工作作风,要具有负责的工作态度和讲求实效的工程观点。

## 1.3 机械原理学科的发展方向

近年来,机械原理学科的发展非常迅速,不论是基本原理还是研究方法都有较大的发展,在机构的类型等方面也有一些新的创造,有些已经突破了传统机构学的范畴,包括了气、液、光、电等新的范畴,进入了“广义机构”的领域。随着生产对技术现代化的要求不断提高,促使新概念、新理论、新方法、新工艺等不断出现,促使现代机械工业向高速、高精密、高载荷、高效率、低噪声等方向发展。目前,机械学科与信息科学、生命学科、材料学科、管理学科纳米科学技术等相互渗透、相互交叉,机械原理总的发展趋势是多学科交叉、融合,微型精密化、数字智能化、高效节能化、柔性集成化已成为主流发展趋势。

机械原理学科作为机械学学科的重要组成部分,是机械工业和现代科学技术发展的重要基础,它的研究领域已扩展到宇宙探索、海洋开发、核技术、微技术等,创立了不少新的理论和研究方法,开拓了一些新的研究领域,在传统的机构上也有所突破。

(1) 连杆机构方面:重视了空间连杆机构、多杆多自由度空间机构、特殊串联及多环并联机构、连杆的弹性动力学和动力学平衡等的研究。

(2) 凸轮机构方面: 开展了高速凸轮机构的研究, 为了获得动力性能好的凸轮机构, 在凸轮机构的推杆运动规律的开发、选择和组合等方面作了大量工作。

(3) 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) 组合机构方面: 随着对机械高速、高精密、高载荷、高效率、低噪声等方面的需求, 发展了具有优良综合性能的组合机构, 各种机构的变异和组合等得到应用。

(5) 新机构的研发: 在自动控制机构、机器人机构、仿生机构、微型机构、柔性及单性机构等的研制方面进展很大, 融合了气、液、光、电等新的范畴, 进入了“广义机构”的领域。

(6) 机械的分析与综合: 为了对新的机械进行分析与设计, 机械原理学科近年来也发展了许多新的理论与方法, 如由只考虑其运动性能过渡到同时考虑其动力学性能, 考虑机械在运转过程中构件的振动和弹性变形, 运动副中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的动平衡等问题的分析。引入了一些新的数学及力学工具, 尤其是计算机技术的发展, 推广了计算机辅助设计、优化设计及考虑误差的概率设计等。

机械原理学科研究领域非常广泛, 内涵丰富, 随着科学技术的不断发展, 其研究理论和方法也会不断更新, 但是机械原理课程作为一门技术基础课程, 主要介绍一些有关机械的基本原理和常用机构的基本分析与综合方法, 这些内容是有关机械的最基本的原理与方法, 也是今后进一步研究和开发新的机械所必需的知识基础。

## 思考题与习题

- 1-1 试说明机构与机器的异同。
- 1-2 什么是执行动作和执行构件?
- 1-3 试列举 3 个机构实例, 并说明其功用、结构。
- 1-4 试列举 3 个机器实例, 说明其组成、功能。
- 1-5 什么是机械运动简图?
- 1-6 机械运动方案设计包括的主要内容是什么?
- 1-7 机电一体化技术对机械运动方案设计有什么影响?
- 1-8 机械原理课程在培养机械类专业人才中有什么作用?
- 1-9 学习机械原理课程时应注意哪些问题?
- 1-10 试从日常生活中接触到的两种机构功能, 构思它们新的机构类型。

## 第 2 章

# 平面机构的结构分析

### 内容提要

主要阐述平面机构的组成原理及结构分析：讨论机构及其具有确定运动的条件，机构运动简图的绘制方法，机构的组成及其结构分类。

## 2.1 机构的组成基本概念

### 1. 构件

任何机械都是由许多零件组成的，从制造、加工的角度看，每一个单独加工制造的单元体都称为零件，如图 2-1 所示的内燃机中的连杆，就是由单独加工的连杆体 1、连杆头 2、轴瓦 3、螺杆 4、螺母 5、轴套 6 等零件装配而成的。但是从机械实现预期运动和功能的角度来看，并不是每个零件都是独立运动的，图 2-1 中的所有零件由于结构和加工的需要，把它们刚性地联接在一起，作为一个整体的运动单元而参加机器的运动，完成机器的功能。机器中，每一个独立影响机械功能并能独立运动的单元体称为一个构件。构件可以是一个独立运动的零件，也可以是多个零件刚性地联接在一起组合而成。可见构件作为独立的运动单元体是组成机构的基本要素之一。

### 2. 运动副

机构是由两个以上具有确定的相对运动的构件所组成的。因此，当构件组成机构时，需要以一定的方式把各个构件彼此联接起来，而这种联接只能是非刚性的，使得彼此联接的两构件之间仍能产生某种相对运动，我们把这种由两个构件直接接触，又能产生一定形式的相对运动的联接称为运动副。运动副是组成机构的又一基本要素。如图 2-2(a) 所示轴 1 与轴承 2 间的联接，图 2-2(b) 所示滑块 2 和导轨 1 间的联接，图 2-2(c) 所示两齿轮轮齿之间的相互啮合，图 2-2(d) 所示从动件与凸轮间的接触都构成运动副。即凡是两构件直接接触而又能产生一定形式的相对运动的联接，都称为运动副。

构件所具有独立运动的数目(或是确定构件位置所需要的独立参变量的数)称为构件的自由度，也称为自由度数目。一个不受任何约束作空间运动的构件，可实现 6 个独立运动，

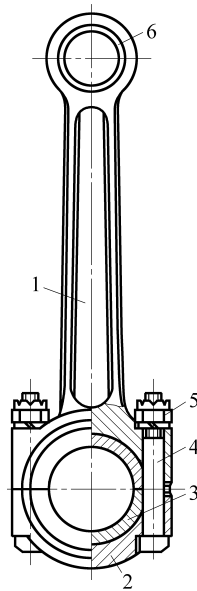


图 2-1 构件

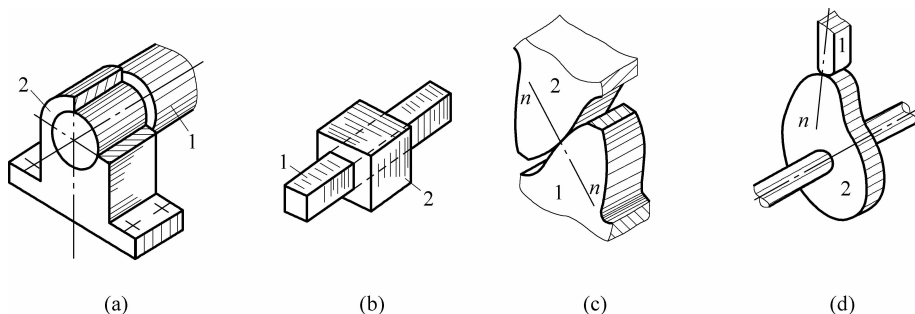


图 2-2 运动副

也就是说具有 6 个自由度；一个不受任何约束作平面运动的构件，可实现 3 个独立运动，即具有 3 个自由度。

当两构件以某种方式相联接而构成运动副后，构件的独立运动将受到限制，自由度的数目便随之减少。运动副对构件独立运动所加的限制称为约束，把限制构件独立运动的数目称为约束条件数，每增加一个约束条件，构件就减少一个自由度，两构件间约束条件数的多少和约束的特性如何，完全取决于运动副的类型。

构成运动副的两构件间的接触不外乎是点、线、面三种形式。凡两构件通过点或线接触而构成的运动副统称为高副(如图 2-2(c)所示的两齿轮所构成的运动副和图 2-2(d)所示的凸轮与从动杆所构成的运动副)，而两构件通过面接触而构成的运动副则称为低副(如图 2-2(a)、(b)所示的两种运动副)。面接触的运动副其接触面积大、压强小，而高副则压强大、易磨损。另外也可根据构成运动副的两构件之间的相对运动形式来分类：两构件之间只作相对转动的运动副称为转动副或回转副，也称为铰链(图 2-2(a))；两构件之间只作相对移动的运动副称为移动副(图 2-2(b))。

两构件之间的相对运动为平面运动的称为平面运动副；若为空间运动则称为空间运动副；此外还有相对运动为螺旋运动的螺旋副(图 2-3(a))和相对运动为球面运动的球面副(图 2-3(b))。

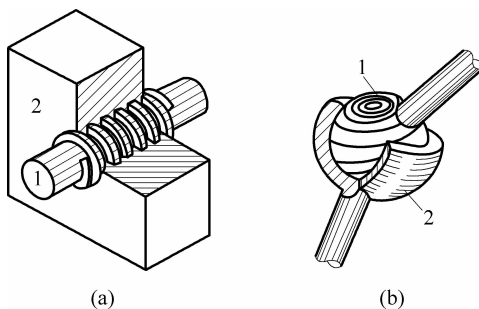


图 2-3 螺旋副和球面副

运动副的类型也决定了运动副的约束条件数和自由度数的多少，如图 2-2(a)所示的转动副，只允许相对转动，不允许有任何方向的转动；如图 2-2(b)所示的移动副，只允许一个方向的移动，而不允许转动和另一个方向的移动，因此这两种平面运动副，都只有一个自由

度而具有两个约束条件。图 2-2(c)、(b)所示的平面高副,不但可沿切线方向相对移动,还可绕接触点相对转动,只是不允许沿法线方向相对移动,因此它有两个自由度,一个约束条件。

### 3. 运动链

两个以上构件通过运动副的联接而构成的相对运动的系统称为运动链。如果运动链构成首末封闭系统,称其为闭式运动链或简称为闭链,如图 2-4(a)、(b)所示;如果运动链的构件未构成首末封闭的系统,则称其为开式运动链简称开链,如图 2-4(c)、(d)所示。在各种机械中,一般采用闭链,开链多用于机器人和机械手中。

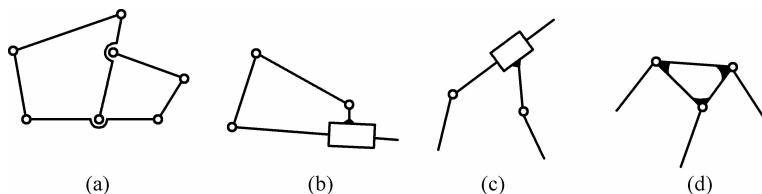


图 2-4 运动链

### 4. 机构

在运动链中,如果将某一构件加以固定,而另一个(或几个)构件按给定的运动规律相对于固定构件运动,若运动链中其余各构件都能得到确定的相对运动,则此运动链称为机构。

机构中的固定构件称为机架,按照给定运动规律独立运动的构件称为原动件(或主动件),而其余的活动构件称为从动件。机架相对于地面是固定不动的,如果机械安装在运动物体(如车、船、机器人身体等)上,则机架相对于该运动物体也是固定不动的,而相对于地面则可能是运动的。

组成机构的各构件的相对运动均在同一平面内或在相互平行的平面内,则该机构称为平面机构;组成机构的各构件的相对运动不在同一平面或相互平行平面内,则该机构称为空间机构。

## 2.2 平面机构的运动简图

### 1. 机构运动简图

对已有机械的研究和设计新的机械时,都要首先做出表明其运动情况的机构运动简图,因为机构各构件间的相对运动是由其原动件的运动规律,该机构中各运动副的类型、数目及相对位置(即回转副的中心位置、移动副的中心线位置和高副接触点的位置)来决定的,而与机构的外形(高副机构的轮廓除外)、断面尺寸,组成构件的零件数目及运动副的具体结构无关。因此,往往撇开与研究机构运动分析和受力分析无关的外形尺寸与结构,只根据机构的运动尺寸,按一定的比例尺定出各运动副的位置,就可以用国家标准规定的常用机构运动简图的符号(见表 2-1)和简单的线条及运动副代表符号(见表 2-2)绘制出表示机构的简明图形,这种图形称为机构运动简图,它可以表达机械具有的运动特性和组成情况(见图 2-5(b))。