



机电工程类专业“互联网+”创新型精品教材

机械基础
(第三版)

主 编
苏慧祎

机械基础

(第三版)

主 编 苏慧祎



北京出版集团
北京出版社



北京出版集团
北京出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械基础 / 苏慧祯主编. --3 版. -- 北京: 北京出版社, 2025.2. -- ISBN 978-7-200-19310-7

I . TH11

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20250PN425 号

机械基础 (第三版)

JIXIE JICHU (DI-SAN BAN)

主 编: 苏慧祯
出 版: 北京出版集团
北 京 出 版 社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总 发 行: 北京出版集团
经 销: 新华书店
印 刷: 定州启航印刷有限公司
版 印 次: 2025 年 2 月第 3 版 2025 年 2 月第 1 次印刷
成品尺寸: 185 毫米 × 260 毫米
印 张: 16
字 数: 360 千字
书 号: ISBN 978-7-200-19310-7
定 价: 49.50 元

教材意见建议接收方式: 010-58572341 邮箱: jiaocai@bphg.com.cn

如有印装质量问题, 由本社负责调换

质量监督电话: 010-82685218 010-58572341 010-58572393



目 录

项目一 常用机构的选型与设计	1
任务一 机械设计初步认知	1
任务二 平面机构运动简图绘制及自由度计算	18
任务三 平面连杆机构的选型与设计	27
任务四 凸轮机构的选型与设计	38
任务五 间歇运动机构的选型与设计	52
项目二 常用传动的选型与设计	64
任务一 螺纹连接与螺旋传动设计	64
任务二 带传动设计	84
任务三 链传动设计	103
任务四 齿轮传动设计	116
任务五 蜗杆传动设计	153
任务六 齿轮系传动比计算	161
项目三 轴系与机械装置设计	173
任务一 轴的设计	173
任务二 轴承的选用	184
任务三 连接与制动的选用	202
任务四 机械的润滑与密封	215
任务五 机械传动装置设计	225
参考文献	247

项目一 常用机构的选型与设计

本项目基于机械产品设计岗位对常用机构的选型与设计能力要求而开发，以机械设计初步认知、平面机构运动简图绘制及自由度计算、平面连杆机构的选型与设计、凸轮机构的选型与设计、间歇运动机构的选型与设计等五项任务为载体开展学习和训练，旨在使学生获得常用机构基础知识，学会绘制机构运动简图并计算其自由度，能选用和设计连杆机构、凸轮机构、棘轮机构、槽轮机构等常用机构，同时养成从社会需求出发、运用哲学原理和方法分析解决机构设计问题的职业习惯，以满足机械设计岗位和其他相近专业技术岗位对常用机构选型与设计能力的要求。作为系统学习机械设计的第一个项目，还需要尽快建立起有关机构的概念链，为本课程的后续项目乃至后续的设计类、工艺类和操作类课程打下基础。

任务一 机械设计初步认知

任务描述

刚入职机械设计岗位的人员要开展一项设计工作，往往先向主管领导汇报自己的初步想法，经同意后再做后续工作。这就要求设计者掌握机器、机构的特征及其组成，掌握机械零部件设计计算准则、标准化及材料选用原则和机械设计的基本要求 and 一般过程，了解现代机器的特征及其设计思想和方法，能运用准确的专业术语描述设计方案和预期工作成果。

任务目标

- (1) 能正确运用机械设计有关概念、术语，描述机器、机构的特征及其组成。
- (2) 能说明机械零部件设计的基本要求 and 一般过程。
- (3) 激发学生创新思维、创业意识和学习应用机械设计知识的兴趣，树立运用所学服务社会、改造世界的神圣使命感。



任务分析

以内燃机为例切入,掌握机器的共同特征、机器与机构的区别、通用零件和专用零件的概念等,进而了解机械设计的基本要求及其一般过程,边学边做,逐步融会贯通,举一反三。

任务实施

机械设计初步认知

到机械制造工厂或机电五金超市进行实地调查,选择下列标题之一整理出一份调查报告。

- (1) × × 机器的组成和功能。
- (2) × × 机器的设计过程。
- (3) 浅析 × × 企业生产的 × × (机电产品)功能及其性价比。

设备、工具准备:单缸四冲程内燃机模型、动画或挂图。

知识链接

一、机器及其组成认知

(一) 机器、机构与机械

什么是机器,其定义如何?下面分析一个实例。

图 1.1.1 所示为单缸四冲程内燃机工作原理,燃气推动活塞 7 在汽缸体 6 内运动,通过连杆 8 使曲轴 9 作连续转动。曲轴上的齿轮 1 带动凸轮轴上的齿轮 2,再由齿轮 2 带动两个凸轮 3,控制排气阀 4 和进气阀 5 启闭,可燃混合气体通过进气阀 5 定时进入汽缸体 6,废气通过排气阀 4 定时排出汽缸体 6,从而燃料燃烧产生的热能不断转化为机械能。

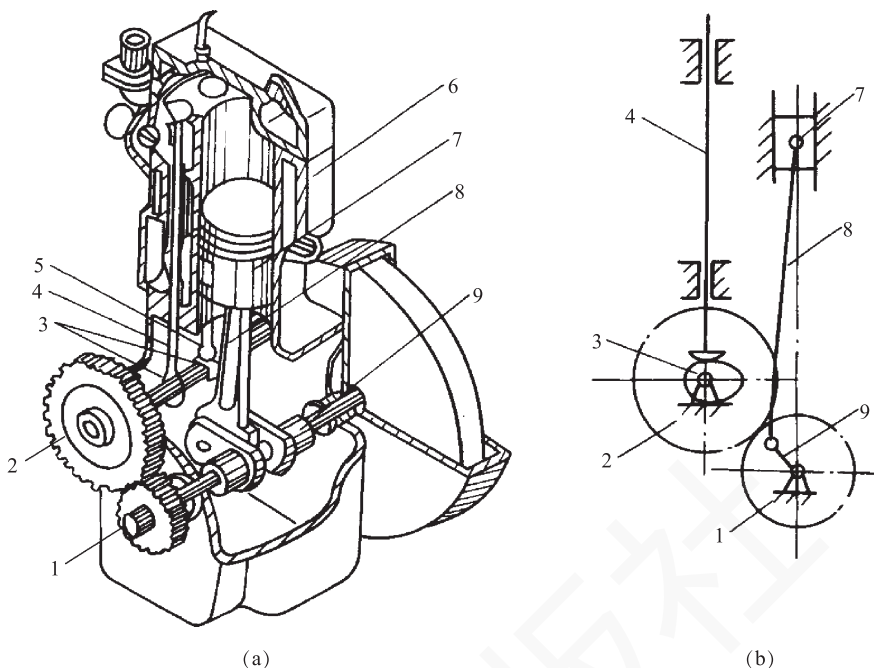


机器及其组成

机器的种类繁多,功用不同,工作原理和结构特点也不相同,但都有着共同的特征。

- (1) 都是人为的实物组合。
- (2) 组成机器的各实物之间具有确定的相对运动。
- (3) 能实现能量转换或完成有用的机械功。

凡具备上述三个特征的实物组合称为机器。具有特定结构形状和运动特征的构件组合称为机构。机构只有机器的前两个特征,若仅从结构和运动观点来看机器与机构,二者之间并无区别。因此,习惯上常用机械一词作为机器和机构的总称。



(a) 结构简图；(b) 机构运动简图

1、2—齿轮；3—凸轮；4—排气阀；5—进气阀；6—汽缸体；7—活塞；8—连杆；9—曲轴

图 1.1.1 单缸四冲程内燃机

(二) 零件、部件和构件

从制造和装配的观点看，机器由许多独立加工、独立装配的单元体组成，这些单元体称为零件。若干个零件组成机构，若干个机构组成机器。零件可分为两大类：一类是在各种机器中都能用到，叫作通用零件，如齿轮、螺栓、轴承、带、带轮等；另一类则是在特定类型的机器中才能用到，叫作专用零件，如曲轴、吊钩、叶片、叶轮等。

此外，常把由一组协同工作的零件组成的独立制造装配的组合件叫作部件，如减速器、变速器、联轴器、离合器、制动器等。

从机械实现预期运动和功能角度看，机构中形成相对运动的各个运动单元称为构件。一个构件可以是一个零件，如图 1.1.1 中的曲轴 9。但一般的构件由几个零件组成，如图 1.1.1 中的连杆 8 就是由连杆体、连杆头、轴瓦和轴套、螺栓、螺母、开口销等零件组成的一个刚性构件。但现代机器中，组成机构的构件不全是刚体，某些构件可以是挠性的或弹性的；有时候液体、气体及电磁也参与实现机械运动的传递和变换。

(三) 机器的组成

1. 按功能分析机器的组成

就其功能而言，机器由动力部分（原动机）、控制部分、传动部分、支撑及辅助部分和工作部分五个部分组成，如图 1.1.2 所示。

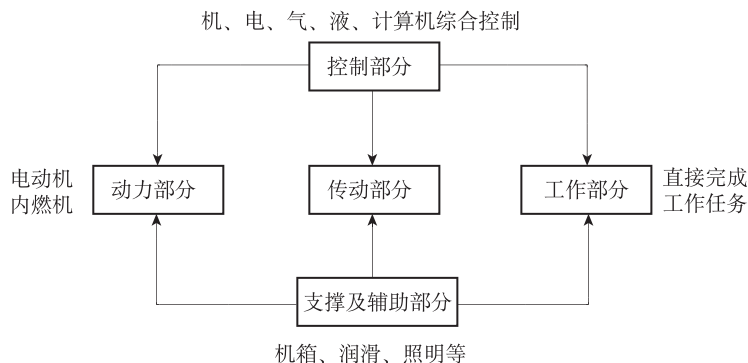


图 1.1.2 机器的组成

动力部分是指原动机及其相应的配套装置,其作用是将非机械能转换为机械能并给机器提供动力。常用的动力机有电动机、液压马达、气动马达和内燃机。

传动部分是在动力部分和工作部分之间的中间装置。它的任务就是将原动机提供的机械能以动力和运动的形式传递给工作部分。

工作部分(执行部分)是直接完成机器预定功能的部分,是机器直接进行生产的部分,是机器用途、性能综合体现的部分,是机器设备区分和分类的依据。

动力部分、传动部分及控制部分都应该根据工作部分的功能要求、运动参数和动力参数的合理范围进行设计和选择。它们是为实现工作部分的技术能力而服务的。

控制部分是指为了提高产品产量、质量,减轻人们的劳动强度,节省人力、物力等而设置的控制器。对于结构比较复杂、控制精度和响应速度要求较高的机器,就需要使用控制装置代替人工操作。

框架支撑系统包括基础件(如床身、底座、立柱等)和支撑构件(如支架、箱体等)。它用于安装和支承动力系统、传动系统和操作系统等。机器各部分的位置精度、运动精度及机器的承载能力等主要依靠框架支撑系统来保证。

此外,根据机械系统的功能要求,还有一些辅助系统,如润滑、冷却、显示、照明等。

2. 现代机器及其主要特征

(1) 现代机器及其组成。现代机器是以机械技术为基础,以电子技术为核心的高新技术综合系统。

①现代机器的定义。由计算机信息网络协调与控制的,用于完成包括机械力、运动和能量转换动力学任务的机械和(或)机电部件相互联系的系统。

这个定义突出计算机在现代机器中的协调控制的核心作用,同时也强调了现代机器的主要功能仍然是执行机械运动、完成有用功和能量的转换。

②现代机器的组成。以焊接机器人为例,它的执行系统是操作机,由驱动系统提供动力来完成焊接操作。控制系统由计算机硬件、软件和一个专用电路组成。框架支撑系统是机座。另外还有焊接电源装置等。焊接机器人由计算机协调控制操作机的机械运动,用于完成各种焊接工作。

(2) 现代机器的主要特征。与传统机器比较,现代机器具有以下主要特征:

①功能增加, 柔性提高。如机械加工中心就可以将多台普通机床上的多道工序在一次装夹中完成。只要改变控制器的控制程序就能改变加工工序等, 完成不同的工作, 并且还有自动检测、自动诊断、自动保护及自动显示等功能。

②结构简化, 性能改善。由于控制技术、驱动技术、检测传感技术及精密机械技术等的发展, 现代机器的传动系统和执行系统在结构上得以简化, 并且体积小、质量轻、精度高, 改善了工作的可靠性和稳定性, 延长了机器的使用寿命。

③效率提高, 成本降低。如给上述的焊接机器人再配置变位机(工作台)等就组成了焊接工作站。该工作站可以 24 小时连续自动焊接, 提高生产效率, 降低制造成本。

(四) 机器的种类

根据用途不同, 机械可分为以下四种。

- (1) 动力机械——实现机械能与其他形式能量间的转换。
- (2) 加工机械——改变物料的结构形状、性质及状态。
- (3) 运输机械——改变人或物料的空间位置。
- (4) 信息机械——获取或处理各种信息。

二、了解课程的内容、地位、学习目的和学习方法

(一) 本课程的内容

本课程内容在简要介绍有关整部机器设计基本知识基础上, 重点讨论常用机构的组成原理、传动特点、功能特性、设计方法等基本知识; 重点讨论通用机械零件在一般工作条件下的工作原理、结构特点、选用及设计计算问题。

本课程的主要内容如下。

- (1) 总论部分: 机械设计的基本原则, 一般过程、传动方案及材料选择、平面机构运动简图及自由度等。
- (2) 常用机构部分: 平面连杆机构、凸轮机构、间歇运动机构等。
- (3) 传动部分: 螺纹传动、带传动、链传动、蜗杆传动、齿轮传动、无级变速传动等。
- (4) 连接部分: 螺纹连接、键连接(轴毂连接)等。
- (5) 轴系部分: 滑动轴承、滚动轴承、轴及联轴器、离合器、制动器等。
- (6) 其他部分: 齿轮系、减速器等。

(二) 本课程的地位

本课程是机械类及近机类专业的一门技术基础课, 它综合运用了工程力学、金属工艺学、机械制图、公差配合等先修课程知识, 解决常用机构及通用零部件的分析设计问题, 较之以前的先修课程更接近工程实际, 但也有别于专业课程, 它主要研究各类机械所具有的共性问题。

(三) 学习本课程的目的

(1) 熟悉常用机构的工作原理、运动特性及机械设计的基本理论和方法, 基本掌握通用零件的工作原理、选用和维护等方面的知识。



- (2) 具备机械设计实验技能和设计简单机械及传动装置的基本技能。
- (3) 培养学生初步具有运用标准手册, 查阅相关技术资料进行一般参数的通用零件和简单机械传动装置的设计计算能力, 为学习后续专业课程打好基础。

(四) 学习本课程的方法

本课程是从理论性、系统性很强的基础课和专业基础课向实践性较强的专业课过渡的一个重要转折课程。因此, 在学习方法上应有所转变。

(1) 本课程将多门先修课程的基本理论应用到实际中去, 解决有关实际问题, 因此, 对先修课程的掌握程度直接影响到本课程的学习。

(2) 学生一接触本课程就会产生“没有系统性”“逻辑性差”等错觉, 这是由于学生习惯了基础课的系统性所造成的。本课程中, 虽然不同研究对象所涉及的基础理论不同, 且相互之间无多大关系, 但是各部分内容都是按照工作原理、结构、强度计算、使用维护的顺序介绍的, 有其自身的系统性。

(3) 由于实践中所发生的问题很复杂, 很难用纯理论的方法来解决, 因此常常采用很多经验公式、参数以及简化计算(条件性计算)等, 这样往往会给学生造成“不讲道理”“没有理论”等错觉, 学生必须在学习过程中逐步适应。

(4) 计算步骤和计算结果不像基础课那样具有唯一性。

(5) 计算对解决设计问题虽然很重要, 但并不是唯一所要求的能力。学生必须逐步培养把理论计算与结构设计、工艺设计等结合起来解决设计问题的能力。

三、机械设计的基本要求及一般过程认知

(一) 机械设计的基本要求

据统计, 约有 50% 的产品质量事故是由于设计不当造成的; 产品的成本高低在很大程度上取决于设计。因此, 在机械产品设计中, 特别强调和重视从系统的观点出发, 合理地确定系统的功能; 重视机电技术的有机结合, 注意新技术、新工艺及新材料等的采用; 努力提高产品的可靠性、经济性及安全性。以下简述机械设计应满足的基本要求。



机械设计的基本要求

1. 满足社会需求要求

机械产品的设计总是以社会需求为前提。没有需求就没有市场, 也就失去了产品存在的价值和依据。社会的需求是变化的, 不同时期、不同地点、不同的社会环境就会有不同的市场行情和需求。产品应不断地更新改进, 适应市场的变化; 否则就会滞销、积压, 造成浪费, 影响企业的经济效益, 严重时甚至导致企业的倒闭。所以, 设计师必须确立市场观念, 以社会需求和为用户服务作为最基本的出发点, 进行市场调查和用户访问, 查清市场当前的需求和预测今后的需求, 然后对产品进行功能分析, 遵循保证基本功能、满足使用功能, 剔除多余的功能、增加新颖功能、恰到好处地利用功能的原则, 提高功能价值, 降低实现成本, 力求提高产品的竞争力。

2. 可靠性要求

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。这里所指的“产品”可以是零件、部件，也可以是整机。“规定条件”是指对产品进行可靠性考核时所规定的使用条件和环境条件，包括载荷状况、工作制度、应力、强度、湿度、粉尘及腐蚀等，也包括操作规程、维修方法等。“规定时间”是指对产品可靠性考核时所规定的时间，如运行时间、应力循环次数、行驶的里程等。“规定功能”是指对产品考核的具体功能，产品规定功能的丧失称为失效，对可修复产品的失效也称为故障。

3. 经济性要求

提高产品的经济性以寿命周期成本最低为目标。产品寿命周期成本的组成见图 1.1.3。

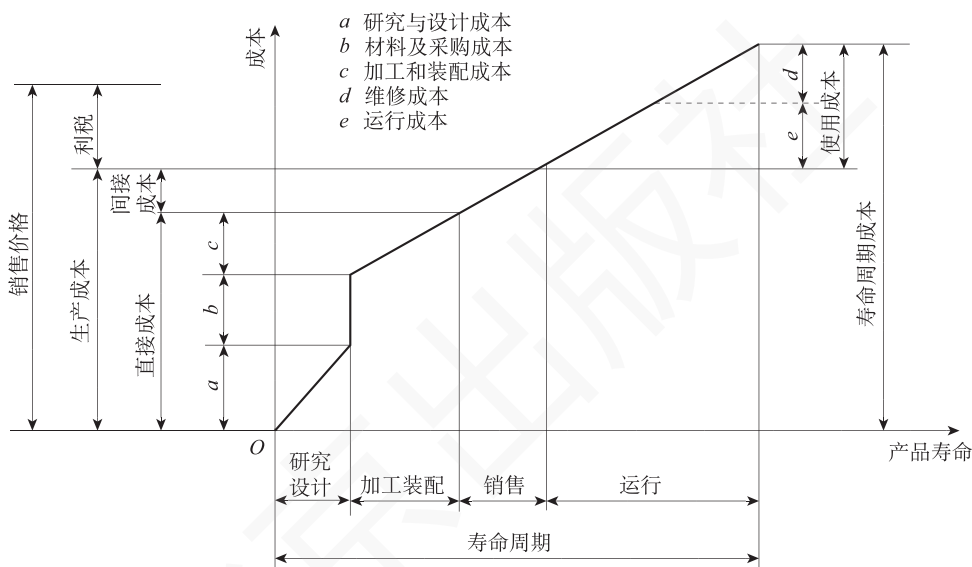


图 1.1.3 产品寿命周期成本的组成

寿命周期成本是指产品从规划、设计、制造、使用直至报废所支出费用的总和。

$$\text{寿命周期成本} = \text{生产成本} + \text{使用成本}$$

$$\text{生产成本} = \text{直接成本} + \text{间接成本}$$

直接成本主要包括研究与设计、材料及采购、加工和装配等与生产直接有关的各项成本；间接成本主要包括管理、销售、广告、公用事业、保险福利、研究开发及利息等各项非直接生产环节的支出分摊到该产品的成本。使用成本包括运行成本和维修成本。

4. 安全性要求

机器的安全性要求包括两方面：

(1) 机器执行预期功能的安全性。即机器运行时系统本身的安全性，如满足必要的强度、刚度、稳定性、耐磨性等要求。

(2) 人一机—环境系统的安全性。机器工作时不仅机器本身应具有良好的安全性，而且对使用机器的人员及周围的环境也应有良好的安全性。例如采用防护罩、安全挡板



等,把危险部位同人体隔离开;对人体易误入的危险区域,必须设置安保装置、报警装置等。所设计的机器应符合环境保护法规及标准,综合考虑“三废”治理、除尘、防爆、防火、防毒及噪声控制等方面的要求。

5. 推行标准化要求

在机械设计中应尽可能遵循标准化的原则。机械产品标准化的内容包括标准化、系列化和通用化三个方面,简称机械产品的“三化”。

标准化是对机械零件的种类、尺寸、结构要素、材料性能、检验方法、设计方法、公差配合及制图规范等制定出相应的标准,供设计、制造及修配中共同遵照使用。如螺栓、螺母、垫圈等的标准化。

系列化是指产品按主要参数分档,形成一定系列的产品,这样可用较少规格的产品满足不同的需要,如圆柱齿轮减速器系列,系列化是标准化的重要组成部分。

通用化是对不同规格的同类产品或不同类产品,在设计中尽量采用相同的零件或部件,如几种类型不同的轿车可以采用相同的轮胎。通用化是广义的标准化。

6. 体现工艺造型美观要求

重视产品的工艺造型设计,不仅要功能强、价格低,而且外形美观、实用,使产品在市场上富有竞争力。

(二) 机械设计的类型

机械设计是一项创造性劳动,同时也是对已有成功经验的继承过程。根据实际情况的不同可以分为三种类型。

(1) 开发性设计。在机械产品的工作原理和具体结构等完全未知的情况下,应用成熟的科学技术或经过实验证明是可行的新技术,开发设计新产品,是完全创新的过程。

(2) 适应性设计。在现有机械产品的工作原理、设计方案不变的前提下,仅作局部变更或增加附加功能,在结构上作相应调整,使产品更能满足使用要求。

(3) 变形设计。机械产品的工作原理和功能结构不变,为了适应工艺条件或使用要求,改变产品的具体参数和结构。

(三) 机械设计的一般过程

不同类型的机械产品、不同类型的设计,其产品的设计过程不尽相同。产品的开发性设计过程大致包括规划设计、方案设计、技术设计、施工设计及改进设计五个阶段。

1. 规划设计

(1) 市场调查。在明确任务的基础上,开展市场调查。其内容主要包括用户对产品的功能、技术性能、价位、可维修性及外观等具体要求,国内外同类产品的技术经济情报,现有产品的销售情况及该产品的预测,原材料及配件供应情况,有关政策、法规等。

(2) 可行性分析。针对上述技术、经济、社会等各方面的情报进行详细分析并对开发的可能性进行综合研究,提出产品开发的可行性报告。

(3) 下达技术任务书。技术任务书规定对开发产品的具体设计要求,它是产品设计、制造、试制等评价决策的依据。

2. 方案设计

市场需求的满足是以产品功能来体现的。实现产品功能是产品设计的核心,体现同一功能的原理方案可以是多种多样的。因此,这一阶段就是在功能分析的基础上,通过创新构思、优化筛选,取得较理想的功能原理方案。

3. 技术设计

技术设计的任务是将功能原理方案得以具体化,成为机器及其零部件的合理结构。在此阶段要完成产品的参数设计(初定参数、尺寸、材料、精度等)、总体设计(包括总体布置图、传动系统图、液压系统图、电气系统图等)、结构设计、人机工程设计、环境系统设计及造型设计等,最后得到总装配草图。

4. 施工设计

施工设计的内容包括由总装配草图分拆零件图,进行零部件设计,绘制零件工作图、部件装配图;最后绘制总装图;编制技术文件,如设计说明书、标准件及外购件明细表、备件和专用工具明细表等。

5. 改进设计

改进设计包括样机试制、测试、综合评价及改进,以及工艺设计、小批量生产、市场销售及定型生产等环节。

根据设计任务书的各项要求,对样机测试,发现产品在设计、制造、装配及运行中的问题,细化分析问题。在此基础上,对方案、整机、零部件做出综合评价,对存在的问题和不足加以改进。

通过小批量生产及市场销售反馈对产品设计、工艺设计及生产规模实践考核,在进一步完善的基础上,进入定型生产。

必须强调指出,整个机械设计的过程是复杂的、反复进行的。在某一阶段发现问题,必须回到前面的有关阶段进行改进设计。因此,整个机械设计的过程是一个不断反复、不断修改、不断完善的过程,以期逐渐接近最佳结果。

四、机械零件设计的基本要求及一般方法认知

(一) 机械零件设计的基本要求

机械零部件设计是机械设计的重要组成部分,机械运动方案中的机构和构件只有通过零部件设计才能得到用于加工的零件工作图和部件装配图,是机械总体设计的基础。

1. 机械零件设计的一般步骤

(1) 根据机器的总体设计方案,针对零件的工作情况进行载荷分析,建立力学模型,考虑影响载荷的各项因素,确定零件的计算载荷。

(2) 分析零件在工作时可能出现的失效形式,确定零件工作能力的计算准则。



- (3) 选择合适的材料,并确定必要的热处理或其他处理要求。
- (4) 分析零件的应力或变形,根据工作能力计算准则建立或选定相应的计算公式,计算出零件的主要尺寸,并加以标准化或圆整。
- (5) 根据计算得出的主要尺寸并结合结构上和工艺上的要求,绘制零件工作图。并写出零件的计算说明书。

2. 机械零件设计的基本要求

- (1) 工作能力要求。具体有强度、刚度、寿命、耐磨性、耐热性、振动稳定性及精度等,设计的零件应在预定的使用寿命周期内按规定的工作条件可靠地工作。
 - (2) 工艺性要求。加工、装配具有良好的工艺性及维修方便。
 - (3) 经济性要求。经济性要求贯穿于零件设计的全过程,零件成本要低廉。
- 此外,还要满足噪声控制、防腐性能、不污染环境和安全要求等。以上要求往往互相牵制,需全面综合考虑。

(二) 机械零件设计的一般方法

常规设计方法是目前广泛和长期采用的设计方法,也是本课程中机械零件设计时所采用的设计方法。常规设计方法有以下三种。

(1) 理论设计。理论设计是根据现有的设计理论和实验数据所进行的设计。按照设计顺序的不同,零件的理论设计计算可分为设计计算和校核计算。

①设计计算。该计算方法是根据零件的工作情况和功能要求,进行失效分析,确定零件的工作能力准则,并按其理论设计公式确定零件的形状和尺寸。

②校核计算。该计算方法是先参照已有实物、图纸和经验数据,初步拟定出零件的结构和尺寸,然后根据工作能力准则所确定的理论校核公式进行校核计算。

(2) 经验设计。经验设计是根据同类机器及零件已有的设计和长期使用累积的经验而归纳出的经验公式,或者是根据设计者的经验用类比法所进行的设计。经验设计简单方便,对于那些使用要求变动不大而结构形状已典型化的零件,是比较实用可行的设计方法。例如普通减速器箱体、齿轮、带轮等传动零件的结构设计。

(3) 模型实验设计。对于尺寸特大、结构复杂、难以进行理论计算的重要零件可采用模型实验设计。即把初步设计的零部件或机器做成小模型或小样机,通过模型或样机实验对其性能进行检验,根据实验结果修改初步设计,从而使设计结果满足工作要求。

五、机械零件的失效分析及设计计算准则认知

机械零件丧失预定功能或预定功能指标降低至许用值以下的现象,称为机械零件的失效。针对不同的失效形式,应提出不同的计算准则。

(一) 机械零件的失效分析

零件失效与破坏是两个概念,失效并不意味着破坏,如塑性材料制造的零件,工作时虽未断裂,但由于其过度变形而影响其他零件的正常工作也是失效;齿轮由于齿面发生点蚀丧失了工作精度;带传动由于摩擦力不足而发生打滑等都是失效。

机械零件的常见失效形式如下。

- (1) 磨损：相对运动的零件表面因摩擦的存在，而导致零件表面材料的逐渐丧失。
- (2) 表面压溃：零件表面质量不高或硬度不够时，在外载荷作用下出现的碎裂现象。
- (3) 过量变形：过量的变形会使零件或机器不能正常工作，有时还会造成较大振动，致使零件损坏。

当零件过载时，塑性材料还会发生塑性变形。这会造成零件的尺寸和形状改变，破坏零件与零件间的相互位置和配合关系，使零件或机器不能正常工作。

- (4) 打滑：靠表面摩擦力保持工作能力的带传动等，当传递的有效切向力超过临界摩擦力时，就将发生打滑失效。

- (5) 疲劳点蚀：作用在零件上的脉动交变应力超过其接触疲劳极限时，出现疲劳裂纹，裂纹逐渐扩大使表面金属小片剥落形成疲劳点蚀。

- (6) 咬合：两相对运动的零件在高速重载的作用下，常因接触区温升过高而使润滑油失效，使两零件直接接触，以至局部相互黏结，又被撕裂的现象。

- (7) 断裂：零件在外载荷作用下，某一危险截面上的应力超过零件的强度极限时，便会发生断裂。断裂可分为韧性断裂、脆性断裂和疲劳断裂等形式。当零件在外载荷作用下，由于某一危险截面上的应力超过零件的强度极限时，将发生韧性断裂和脆性断裂；当零件在交变应力作用下工作时间较长，最易发生疲劳断裂，这是大多数机械零件的失效形式。

断裂是一种严重的失效形式，它不但使零件失效，有时还会导致人身及设备安全事故。

- (8) 振动失效：高速运转的零件，当其转速等于或接近零件的自振频率时，会发生共振，使振幅急剧增大，导致零件及系统在短时期破坏。

同一种零件可能有多种失效形式，究竟什么是主要的失效形式，取决于零件的材料、受载情况、结构特点和工作条件。

(二) 机械零件的设计计算准则

零件抵抗失效的安全工作限度称为零件的工作能力。在实际工作中，同一种零件可能有几种不同的失效形式，对应于不同的失效形式，就会有不同的工作能力。根据不同失效原因建立起来的工作能力判定条件，称为零件的设计计算准则。主要有以下几种：

- (1) 强度准则。强度是衡量机械零件工作能力最基本的计算准则，它是指零件受载后抵抗断裂、塑性变形及表面失效的能力。强度可分为整体强度和表面（接触与挤压）强度。强度的判定准则如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 强度的判定准则

强度	判定准则	应力与安全系数	许用应力与许用安全系数
整体强度	$\sigma \leq [\sigma]$ $\tau \leq [\tau]$	σ 、 τ ——零件危险截面的计算应力	$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ——零件材料的许用应力
	$s \geq [s]$	s ——危险截面处的实际安全系数	$[s]$ ——许用安全系数
表面接触强度	$\sigma_H \leq [\sigma_H]$	σ_H ——零件接触处的接触应力	$[\sigma_H]$ ——许用接触应力
挤压强度	$\sigma_P \leq [\sigma_P]$	σ_P ——零件表面的挤压应力	$[\sigma_P]$ ——许用挤压应力



(2) 刚度准则。刚度是指零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。刚度准则要求零件在载荷作用下产生的弹性变形量应小于或等于机器工作性能允许的极限值 $[y]$, 即

$$y \leq [y] \quad (1-1-1)$$

按弹性力学或材料力学方法计算, 变形量 y 可以是挠度、偏转角或扭转角, $[y]$ 即许用变形量。

(3) 耐磨性准则。耐磨性是指做相对运动的零件其工作表面抵抗磨损的能力。磨损的后果有表面形状破坏, 强度削弱、精度下降、振动、噪声, 导致失效。80% 的零件失效的基本原因是磨损。设计时应使零件在预定使用期内的磨损量不超过允许值量。采用限制零件相对运动表面间的压强 p 不超过许用压强 $[p]$, 即

$$p \leq [p], p \cdot v \leq [p \cdot v] \quad (1-1-2)$$

(4) 振动稳定性准则。为避免共振, 在设计高速机械中, 应进行振动分析和计算, 使机械振动频率 f_p 远离机械的固有频率, 特别是一阶固有频率 f , 以确保零件及机械系统的振动稳定性, 即

$$f_p < 0.85f, f_p > 1.15f$$

不满足振动稳定性准则时可采取的措施有改变机械及零件的刚度和采取减振措施。

(5) 散热性准则。零件工作时如果温度过高, 将导致润滑剂失去作用, 材料强度极限下降, 引起热变形及附加热应力等, 从而使零件不能正常工作。散热性准则为: 根据热平衡条件, 工作温度 t 不应超过许用工作温度 $[t]$, 即

$$t \leq [t] \quad (1-1-3)$$

不满足热平衡准则时可采取的措施有改进润滑和冷却两种。

(6) 可靠性准则。可靠性表示系统、机器或零件在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。可靠度用 R_t 表示, 是指零件在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率。 N 个相同零件在同样条件下工作(同时), 在规定的时间内有 N_f 个失效, 剩下 N_t 个仍继续工作, 即

$$R_t = \frac{N_t}{N} = \frac{N - N_f}{N} = 1 - \frac{N_f}{N} \quad (1-1-4)$$

六、机械零件材料的选用原则认知

机械零件所用的材料是各种各样的, 即使同一种零件也可以选择不同的材料。因此, 如何选择零件的材料是零件设计的重要一环。选用材料时主要考虑使用要求、工艺性要求和经济性要求。

1. 满足零件的使用要求

机械零件的使用要求主要有以下几点。

(1) 零件承受工作载荷的能力, 主要从载荷的特点、强度及刚度等方面考虑。如

45 钢调质处理可用于轴、齿轮；承受冲击载荷，要求耐磨或结构要求紧凑时，可采用 20Cr、18CrMnTi、20CrMo 等低碳合金钢渗碳淬火；载荷比较稳定时可选铸铁，如 HT250 可用于箱体、机床床身、结构形状复杂的低速大齿轮、大带轮、蜗轮芯、凸轮轴、曲轴等。

(2) 零件的工作条件（运动速度等）及工作环境（温度、潮湿、腐蚀等）。在高温下工作的零件选耐磨、耐热材料；在腐蚀介质中工作的零件选耐腐蚀材料，可选择不锈钢、铜合金、铝合金等。

(3) 耐磨性、使用寿命、可靠性等要求。

(4) 零件尺寸和质量的要求。受尺寸质量限制时，一般情况下采用碳素钢锻造毛坯；要求尺寸及质量极小时，可采用高强度合金钢；零件尺寸、质量较大且结构复杂时，采用铸造毛坯，可选铸铁（批量）、铸钢（单件）或板材冲压后焊接。

设计零件应以零件承受工作载荷的能力为主，综合考虑其他因素，合理地选择材料。如零件受力较大且有较大的冲击载荷，工作速度较大、可靠性要求高，而且要求零件的尺寸较小、质量较轻，应采用高强度合金钢制造，并要热处理及精加工。

2. 满足零件的工艺性要求

在熟悉材料的工艺性的前提下，根据零件的结构复杂程度、尺寸大小、生产批量的大小、毛坯制造及机械加工的特点，合理选择机械零件的材料。对于结构复杂、尺寸大的零件，因难以锻造，宜采用铸造或焊接，所选的材料必须具有良好的铸造工艺性（液态流动性、收缩率、偏析及缩孔倾向性等）或焊接工艺性（可焊性、焊缝裂纹的倾向性等），同时零件的结构要适应铸造或焊接的工艺性要求。需要锻造的零件必须考虑材料的延展性、热脆性等。铸造、模锻、冲压等适用于零件的大批量生产，焊接、自由锻适用于单件或小批量生产。对于需切削加工的零件，要考虑材料的切削性能及已切削表面的粗糙度等。

热处理可改善材料的机械性能。应根据零件的使用要求、尺寸大小、结构复杂程度及工艺要求，合理选择材料的淬硬性、淬火变形、淬透性并选择合适的热处理工艺。

3. 满足零件的经济性要求

材料的经济性主要从以下几个方面考虑。

- (1) 材料的价格。在满足使用要求的前提下，应采用价格相对低的材料。
- (2) 考虑不同材料的加工（毛坯制造、机械加工及热处理等）成本。
- (3) 采用局部品质的原则，如蜗轮的齿圈用铜合金，轮芯采用铸铁或碳钢。
- (4) 材料的利用率，如采用无切削或少切削的材料及工艺。
- (5) 考虑材料的供应状况及储运成本。



特别提示

机械设计决定了产品的性能、质量和生产效率。随着科技的不断进步,计算机辅助设计、仿真分析等技术的广泛应用,我国在高端装备制造领域(如航空航天、高铁等)已具备完全自主设计和制造能力,部分关键核心技术取得突破,我国自主设计的高铁列车、新能源汽车等,通过先进的设计理念和技术,在速度、舒适性、安全性和续航里程等方面处于世界领先或先进水平。同时,机械设计还推动了传统制造业的转型升级,实现节能减排和智能化生产。广大机械设计工作者不畏艰辛,长期专注于设计工作,对每一个零件、每一个细节都精心雕琢,追求极致的精度和可靠性,在工作中勇于创新、争创一流,带动整个行业的发展和进步,通过不断实践和积累,推动我国制造业正向高端化、智能化、绿色化发展大踏步前进。

七、实训导引:参观机构陈列室

(一) 实训目的

- (1) 初步认识机构的组成以及组成机构的构件和运动副。增强感性认识,为下一项目的学习打下良好的基础。
- (2) 初步了解常用机构的类型、组成及运动特点。
- (3) 熟悉常用机构的应用实例。

(二) 实训过程

1. 内容

机构示范陈列室由 15 个示教板组成。陈列有平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构和间歇运动机构等四大类共 100 余个常用机构模型,并配有文字说明和运动简图。可实现点动或顺序控制运动演示,具有形象、直观的特点。

2. 实训步骤

按图 1.1.4 所示的机构示范陈列室平面图中的序号从 1~15 逐板观察。

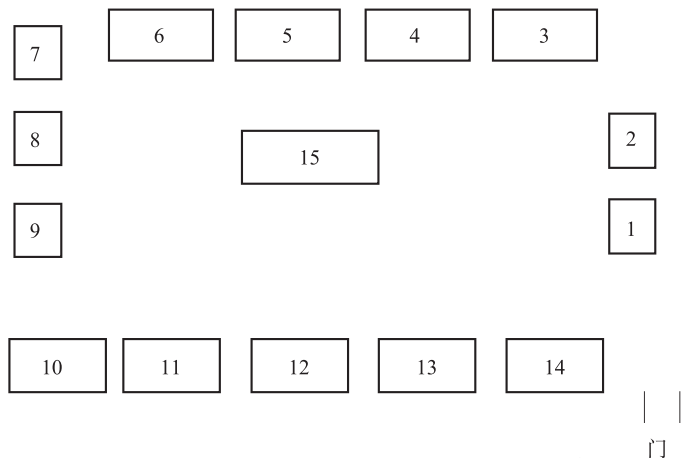
(三) 实训总结

1. 机器与机构

什么是机器?什么是机构?什么是运动副?

2. 平面连杆机构的基本型式

- (1) 四杆机构相对其他机构在运动转换上有什么特点?从中体会其被广泛地应用于自动化操作及工程运输机械中的原因。



- 1—机器与机构；2—平面连杆机构的基本型式；3—平面连杆机构的应用；
4—凸轮机构的基本型式；5—齿轮机构的基本类型；6—齿廓曲线与齿轮参数；
7—轮系；8—间歇运动机构；9~15—机构应用实例

图 1.1.4 机构示范陈列室平面图

(2) 铰链四杆机构变更机架之后，有时会改变连架杆的运动形式（摆动变转动或相反）。试问在变更机架前后，两根相邻杆之间的相对运动关系改变了没有？如果连架杆相对于机架能转动 360° 时，各杆长度间有什么关系？

(3) 已知一曲柄摇杆机构，如何确定其摇杆的两极限位置？

(4) 铰链四杆机构有哪几种基本型式？

3. 平面连杆机构的应用

(1) 机器用运动简图表达后，运动简图表示的运动与实际机器的运动是否相当？欲使两者运动相当的关键条件是什么？

(2) 总结一下铰链四杆机构有哪些特征被工程上所采用？

4. 凸轮机构的基本型式

(1) 凸轮机构由哪些构件组成？凸轮机构的类型有几种？有哪些运动形式？

(2) 凸轮机构能否变更机架？其运动形式有何变化？

(3) 凸轮机构在运动、动力传递上有何特点？为什么凸轮机构被广泛应用于各种自动化机械上？

(4) 凸轮的廓线是根据从动件运动要求确定的，当廓线倾斜到何种程度时将推不动从动件（自锁）？这时应采取什么措施？

(5) 从动件的型式有哪几种？各适用于什么场合？

5. 齿轮机构的基本类型

齿轮机构有哪几种形式？其传动轴线的特点是什么？



6. 齿廓曲线与齿轮参数

- (1) 从实际齿轮的形状出发, 指出各部分的名称、尺寸及其与基本参数之间的关系。
- (2) 齿轮的模数相同, 齿数不同时, 分度圆齿厚是否相同?
- (3) 齿轮的模数相同, 齿数相同时, 分度圆齿厚是否相同?
- (4) 齿轮的模数与齿数之积相同时, 分度圆齿厚是否相同? 为什么? 渐开线形状是否相同? 为什么?

7. 轮系

- (1) 什么叫周转轮系? 如何在混合轮系中划分出周转轮系?
- (2) 周转轮系有哪些特性被用在机器之中?
- (3) 何为行星轮系? 何为差动轮系? 何为周转轮系的转化轮系?
- (4) 惰轮的作用是什么?

8. 间歇运动机构

- (1) 运动副形状或运动副位置作怎样的配置, 才能形成间歇运动机构?
- (2) 间歇运动机构在机器中有哪些应用?
- (3) 常见的间歇运动机构有哪几种? 它们的名称是什么?

任务拓展

现代设计方法认知

机械设计在近 30 年来发生了相当大的变化, 设计方法更趋于科学、完善, 计算精度更高、计算速度更快。现代设计的主要方法有以下几种。

(1) 计算机辅助设计 (Computer Aided Design, 简称 CAD)。是借助计算机运算快速准确、存储量大、逻辑判断功能强等特点, 通过人与计算机的交互方式来完成设计工作。计算机辅助设计相对于传统的设计方法具有以下优越性:

- ①显著提高设计效率, 缩短设计周期, 加快产品更新换代, 增强市场竞争能力;
- ②可以储存大量的设计信息和设计经验, 使一些缺乏设计经验及新从事设计工作的人员也能顺利完成设计任务;
- ③能在较短时间内给出很多设计方案, 并进行分析比较, 以获得最佳设计方案;
- ④把设计人员从烦琐的重复性工作中解脱出来, 做更多的创造性工作;
- ⑤可与计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, 简称 CAM)、计算机管理自动化结合起来形成计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing Systems, 简称 CIMS), 从企业总效益最大化出发, 综合进行市场预测、产品设计、生产计划、制造和销售等一系列工作, 以实现人力、物力和时间等各种资源的有效利用。

(2) 优化设计。将设计问题的物理模型转化为数学模型, 运用最优化数学理论, 选用适当的优化方法, 并借助计算机求解该数学模型, 从而得出最佳设计方案。

近年来, 优化设计和其他一些设计方法结合起来, 形成了新的优化设计方法。例如,

和可靠性设计结合形成可靠性优化设计, 和模糊设计结合形成模糊优化设计, 等等。

(3) 可靠性设计。它是将概率论、数理统计、失效物理和机械学相结合而形成的一种综合性设计技术。它的主要特点是将常规设计方法中所涉及的设计变量, 如载荷、应力、强度、使用寿命等, 所具有的多值现象看成是服从某种分布规律的随机变量, 用概率统计方法设计出符合机械产品可靠性指标要求的零部件和整机的主要参数和结构尺寸。

(4) 模块化设计。在对一定范围内的不同功能或相同功能不同性能、不同规格的产品进行功能分析的基础上, 划分并设计出一系列功能模块, 通过模块的选择和组合来构成不同的产品, 以满足市场的不同需求。产品模块化的主要目标之一是以尽可能少的模块种类和数量组成尽可能多的种类和规格的产品。

(5) 机械系统设计。即应用系统的观点进行机械产品设计, 一般包括计划、外部系统设计(简称外部设计)、内部系统设计(简称内部设计)和制造销售四个阶段。

传统设计注重内部系统设计, 重点在于改善零件或子系统的特性, 而对各零部件之间、内部与外部系统之间的相互作用和影响考虑较少。与传统设计相比, 机械系统设计遵循系统的观点, 研究内、外系统和各子系统之间的相互关系, 通过各子系统的协调工作, 取长补短来实现整个系统最佳的总功能。

(6) 价值分析(Value Analysis, 简称VA)。又叫价值工程, 它是使产品达到物美价廉的一种有效的现代管理技术, 由于它应用于产品设计卓有成效, 已发展成为现代设计方法中的一个重要内容。此法首先要确定价值分析的对象, 然后对它们进行成本分析和功能价值计算, 对实现产品功能的原理和方法进行革新和创造, 提出新的方案, 并对新方案进行评价和决策, 选出最佳设计方案, 以提高产品的价值。

(7) 专家系统。专家系统是一种能够在专家水平上工作的计算机程序系统。由于它具有领域专家的丰富知识, 又能进行逻辑演绎推理, 因此, 它能够在特定的领域和范围内, 运用领域专家的专门知识和推理能力, 解决各种问题。

在机械设计中应用专家系统, 可以明显提高设计效率和设计质量。

(8) 机械动态设计。机械动态设计是现代机械设计区别于传统机械设计的重要特征之一。它是根据机械产品的动载工况, 以及对该产品提出的动态性能要求与设计准则, 按动力学方法进行分析计算、优化与试验, 并反复进行的设计。这种设计方法可使机械产品的动态性能在设计时就得到预测和优化。

(9) 并行设计。对机械产品的设计, 长期以来一直采用串行工程(又叫顺序工程)的方法。这种方法的缺点在于: 在产品的设计、制造等过程中, 后一个环节必须等待前一个环节结束后才能开始。这样, 设计改动量大, 产品开发周期长, 成本高。并行工程, 又叫同步工程或集成工程。它是集成、并行地设计产品及其各种过程(包括制造过程和支持过程)的系统化方法。其核心在于打破组织内部各机构单元的界限, 建立以人际关系为基础的协同工作模式, 追求提高产品质量、降低产品的全生命周期成本和缩短产品上市的时间。

除了上面介绍的现代设计方法外, 还有人机学设计、疲劳设计、摩擦学设计、反求工程、创造性设计等。随着科学技术的进步, 现代设计方法将会得到更大的发展。



任务二

平面机构运动简图绘制及自由度计算

任务描述

某设计小组接到一项颚式碎矿机改进设计的任务,其中某组员的任务分工是分析绘制其运动简图,计算其自由度,确保机构有确定运动的原动件数量。

任务目标

- (1) 能绘制机构运动简图。
- (2) 能正确计算机构自由度。
- (3) 能判断机构是否具有确定运动。
- (4) 会运用运动的观点和事物相互联系、相互制约的普遍规律,从分析动与静、实体与虚影的辩证关系入手,探求解决机构运动学问题的途径。

任务分析

以颚式碎矿机运动简图的测绘为切入点,学习机构自由度的计算、机构有无确定运动的判定及其计算机构自由度时应注意的复合铰链、局部自由度和虚约束事项,以及机构运动简图测绘的基本步骤。

任务实施

平面机构运动简图绘制及自由度计算

如图 1.2.1(a) 所示为一颚式碎矿机。当曲轴 1 绕轴心 O 连续回转时,动颚板 5 绕轴心 F 往复摆动,从而将矿石轧碎。试绘制此碎矿机的机构运动简图,计算其自由度,判断其是否具有确定运动。

解:(1) 绘制机构运动简图。先找出碎矿机的原动部分为曲轴 1,工作部分为动颚板 5,然后按运动传递的路线可看出,此碎矿机是由曲轴 1、构件 2、3、4 及动颚板 5 和机架 6 等 6 个构件组成的。其中曲轴 1 和机架 6 在 O 点构成转动副,曲轴 1 和构件 2 也构成转动副,轴心在 A 点。而构件 2 还与构件 3、4 在 D 、 B 两点分别构成转动副,构件 3 还与机架 6 在 E 点构成转动副,动颚板 5 与构件 4 和机架 6 分别在 C 点和 F 点构成转动副。

将碎矿机的组成情况及运动情况搞清楚后,再选定投影面和比例尺,并定出转动副 O 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 的位置,即可绘出其机构运动简图,如图 1.2.1 (b) 所示。

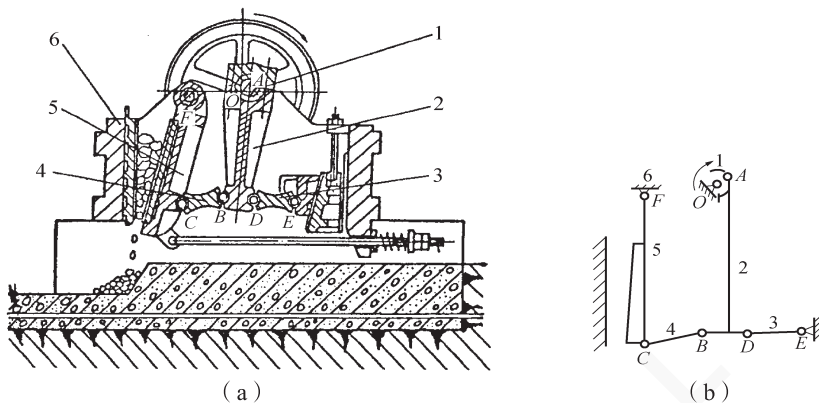


图 1.2.1 颚式碎矿机及其运动简图

(2) 计算自由度。由图 1.2.1 (b) 可见,此机构共有 5 个活动构件(即构件 1、2、3、4、5), 7 个低副(即转动副 O 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F), 没有高副。故根据自由度计算公式可求得其自由度为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$$

注意: 计算其他机构的自由度时,可能还会包含高副、复合铰链、局部自由度、虚约束等,应参照有关知识链接加以适当处理。

(3) 本机构自由度大于零且等于原动件数,故可判定该机构有确定运动。

设备、工具准备: 颚式碎矿机、各种运动副和常见平面四杆机构的动画或挂图。

知识链接

一、机构组成及运动副认知

若组成机构的所有构件都在同一平面或相互平行的平面内运动,则称该机构为平面机构,否则称为空间机构。大多数机构为平面机构,故本项目只讨论平面机构。

(一) 构件及其自由度

机械中每一个独立的运动单元体称为一个构件。它可以是若干个零件(机械中不可拆卸的基本单元体)的刚性组合体,也可以是一个单独的刚性零件。例如齿轮、轴与键组成的齿轮轴。构件的独立运动称为自由度。一个作平面运动的自由构件具有三个独立的运动,如图 1.2.2 所示。即沿 x 轴、 y 轴移动及绕垂直于 xOy 面的轴线的转动。

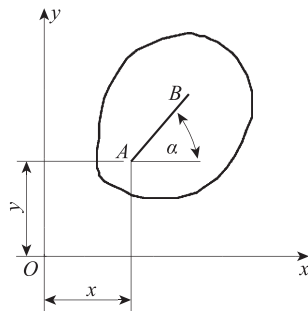


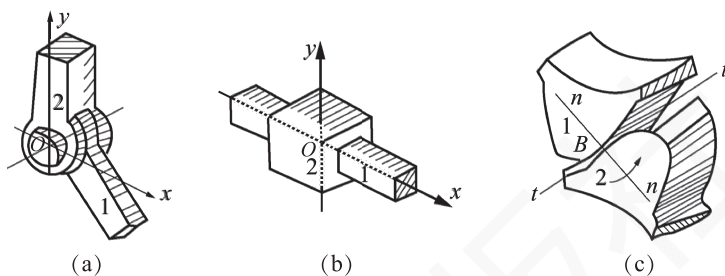
图 1.2.2 构件的自由度



(二) 运动副与约束

在机构中使两构件直接接触的可动连接称为运动副。如图 1.2.3 所示, 图中轴与轴承、滑块与导轨、轮齿与轮齿等都构成运动副。

构成运动副时, 两构件上参与接触的部分(点、线或面), 称为运动副的元素。当构件 1 与构件 2 组成运动副后, 由于运动副元素的接触, 使某些原有的独立运动受到限制, 对构件一个独立运动的限制称为一个约束; 每加上一个约束, 便失去了一个自由度。每一个构件的自由度与约束数之总和应等于 6, 其约束数最多为 5, 最少应引入一个约束。



(a) 轴与轴承; (b) 滑块与导轨; (c) 轮齿与轮齿

图 1.2.3 运动副

(三) 运动副的分类

(1) 按照运动副的接触形式分类: 面和面接触的运动副在接触部分的压强较低, 称为低副, 而点或线接触的运动副称为高副, 高副比低副容易磨损。低副一般有转动副、移动副、螺旋副, 高副有车轮与钢轨、凸轮与从动件、齿轮传动等。

(2) 按照相对运动的形式分类: 构成运动副的两个构件之间的相对运动若是平面运动则称为平面运动副, 若为空间运动则称为空间运动副; 两个构件之间只做相对转动的运动副称为转动副, 两个构件之间只做相对移动的运动副称为移动副。

(3) 按照运动副引入的约束分类: 引入一个约束的运动副称为一级副、引入两个约束的运动副称为二级副, 还有三级、四级、五级副……

(4) 按照接触部分的几何形状分类: 有圆柱副、平面与平面副、球面副、螺旋副等。

二、平面机构运动简图绘制

(一) 平面机构运动简图

机构各构件间的相对运动, 由原动件的运动规律、机构中所有运动副的类型、数目及其相对位置决定, 而与构件和运动副的具体结构无关。因此, 可以撇开构件的复杂外形和运动副的具体构造, 用简单的线条和规定的符号代表构件和运动副, 并按比例定出各运动副的相对位置。这种能准确表达机构运动情况的简化图形称为机构运动简图。

机构运动简图与原机械的运动特性完全相同, 因而可以用机构运动简图对机械进行结构、运动及动力分析。若图形不按精确的比例绘制, 仅仅为了表达机械的结构特征,

这种简图称为机构示意图。

(二) 平面机构运动简图的绘制

- (1) 分析机构的组成, 判断机构的原动件、从动件及原动件运动方向。
 - (2) 分析机构运动, 判断机构中各构件的运动尺寸及运动副的类型。
 - (3) 恰当地选择投影面, 以能够简明地把机械的结构及运动情况表示清楚为原则。
 - (4) 选择适当的比例尺, 用简单的线条和各种运动副的代号将机构运动简图画出来。
- (可参照 GB/T 4460—2013《机械制图机构运动简图用图形符号》)

三、平面机构具有确定运动的条件认知

(一) 平面机构的自由度

设平面机构共有 n 个活动构件 (不包括机架), 当此机构的各构件尚未通过运动副连接时, 共有 $3n$ 个自由度。用 P_L 个低副和 P_H 个高副把活动构件之间、活动构件与机架之间连接起来。一个低副有两个约束条件, 一个高副有一个约束条件, 自由度减少的数目等于运动副引入的约束 ($2P_L + P_H$), 因此, 机构的自由度计算公式为

$$F = 3n - (2P_L + P_H) = 3n - 2P_L - P_H \quad (1-2-1)$$

(二) 平面机构具有确定运动的条件

图 1.2.4 所示为一曲柄滑块机构, $n=3$, $P_L=4$, $P_H=0$, 由式 (1-2-1) 得自由度为 1。通常机构的原动件都是用转动副或移动副与机架相连接, 因此, 每个原动件只能输入一个独立运动。设构件 1 为原动件, 参变量 ϕ_1 表示构件 1 的独立运动, 则每给定一个 ϕ_1 值, 从动件 2、3 便有一个确定的相应位置。由此可见, 自由度等于 1 的机构在具有一个原动件时运动是确定的。



平面机构的自由度

图 1.2.5 所示的铰链五杆机构, $n=4$, $P_L=5$, $P_H=0$, 由式 (1-2-1) 得自由度为 2。若自由构件 1 为原动件, 则当构件 1 处在 ϕ_1 位置时, 因为构件 4 的位置不确定, 所以构件 2 和 3 可以处在图示的实线位置或虚线位置, 也可以处在其他位置, 即从动件的运动是不确定的。若取构件 1 和 4 为原动件, ϕ_1 和 ϕ_4 分别表示构件 1 和构件 4 的独立运动。如图 1.2.5 所示, 自由度等于 2 的机构在具有两个原动件时才有确定的相对运动。

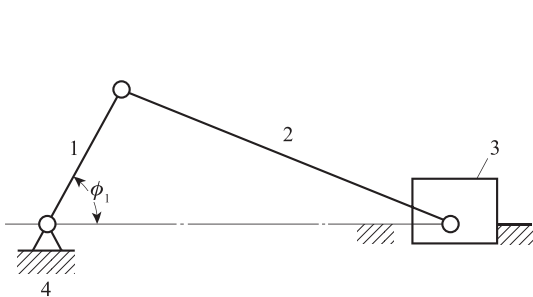


图 1.2.4 曲柄滑块机构

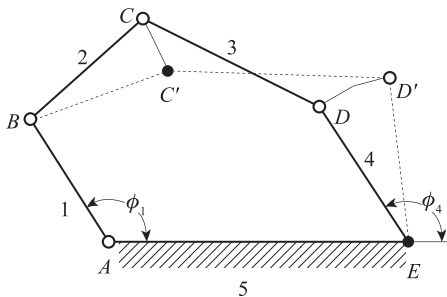


图 1.2.5 铰链五杆机构



图 1.2.6 所示构件, $n=4$, $P_L=6$, $P_H=0$, 由式 (1-2-1) 得自由度为 0, 是一个刚性桁架。

图 1.2.7 所示构件, $n=3$, $P_L=5$, $P_H=0$, 由式 (1-2-1) 得自由度为 -1。该构件组合的自由度小于零, 说明它所受的约束过多, 已成为超静定的桁架。

综上所述:

(1) $F \leq 0$ 时, 机构蜕变为刚性桁架, 构件之间没有相对运动。

(2) $F > 0$ 时, 原动件数小于机构的自由度数, 各构件没有确定的相对运动; 原动件数大于机构的自由度数, 则在机构的薄弱处遭到破坏。

机构具有确定运动的条件: 机构的自由度大于零且原动件的数目等于机构的自由度的数目。

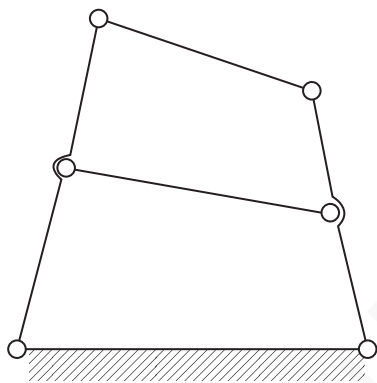


图 1.2.6 刚性桁架

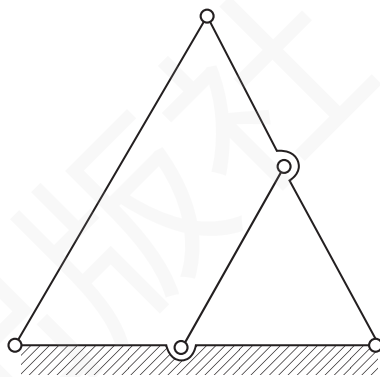


图 1.2.7 超静定桁架

(三) 计算平面机构自由度的注意问题

为了改善机构的使用机能, 机构中有时采用一些特殊结构。在计算平面机构的自由度时, 这些特殊结构, 必须加以适当处理。

1. 复合铰链

两个以上的构件在同一处以转动副相连接, 就构成了复合铰链。当有 m 个构件 (包括固定构件) 以复合铰链相连接时, 其转动副的数目应为 $(m-1)$ 个。图 1.2.8 所示的复合铰链中, 构件 2、3 分别与构件 4 组成转动副, 计算该机构的自由度时, 往往容易把 B 处的转动副当作一个转动副来计算, 误认为 $P_L=6$, 得出 $F=3$ 、需要三个原动件才能使该机构具有确定的运动的错误结论。错误的原因是没有把铰链 B 处的转动副按实际情况计算为 $m-1=3-1=2$ (个)。若按 $n=5$, $P_L=7$, $P_H=0$ 来计算, 则 $F=1$, 这就与实际情况相符了。

图 1.2.9 所示的机构中, 在 E 、 B 、 C 、 D 四处都是由三个构件组成的复合铰链, 各具有两个转动副, 因 $n=7$, $P_L=10$, $P_H=0$, 由式 (1-2-1) 得 $F=3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1$ 。计算结果与实际情况相符。

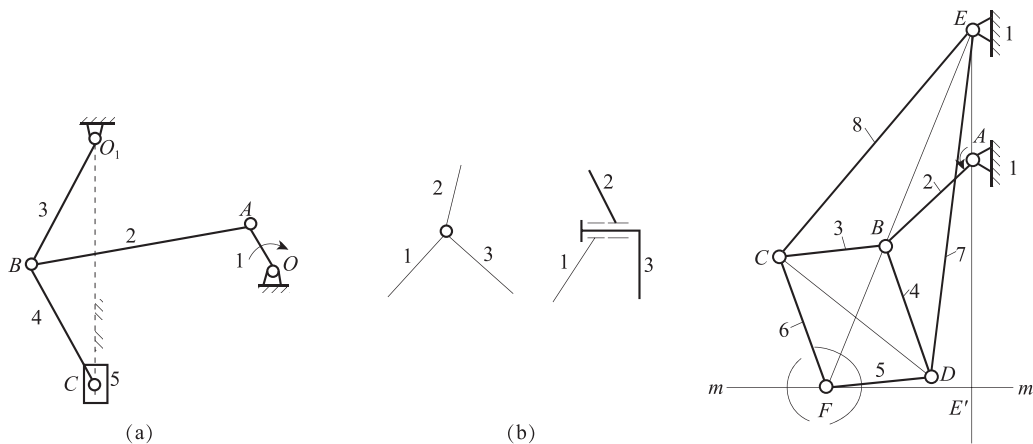


图 1.2.8 复合铰链

图 1.2.9 复合铰链计算自由度

2. 局部自由度

在有些机构中,某些构件所能产生的局部运动的自由度称为局部自由度。如果存在局部自由度,在计算机构的自由度时,应将其除去不计。

例如,在图 1.2.10 (a) 所示的凸轮机构中,在推杆 2 上装有一滚子 3,与凸轮 1 保持高副接触。注意,滚子 3 绕其轴 C 的转动显然并不影响其他构件的运动,它只是一种局部自由度,如果误把它计为一个独立构件,便会错误地把该机构的自由度计算为

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 3-2 \times 3-1 \times 1=2$$

但该机构以凸轮为原动件,便具有确定运动,即自由度数为 1。应该看作是将滚子 3 与推杆 2 焊在一起,如图 1.2.10 (b) 所示,该机构的自由度则为

$$F=3n-2P_L-P_H=3 \times 2-2 \times 2-1 \times 1=1$$

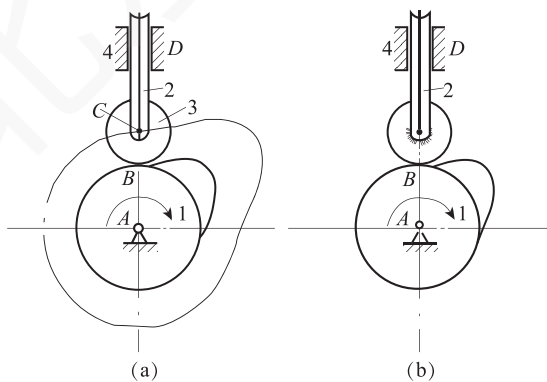


图 1.2.10 局部自由度

3. 虚约束

对机构的运动不起限制作用的约束称为虚约束。在计算机构自由度时,虚约束应当除去不计。



在图 1.2.11 (a) 所示的平行四边形机构的自由度为 1, 这很容易计算。如果在构件 AB 与 CD 的轨迹中心 E 、 F 上, 以运动副连接与 AC 、 BD 构件平行且长度相等的构件 EF , 如图 1.2.11 (b) 所示, 显然构件 EF 不影响机构的运动, 是虚约束, 不可将自由度误计算为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 4 - 2 \times 6 - 0 = 0$$

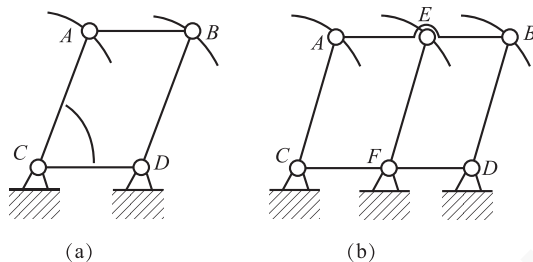


图 1.2.11 虚约束

而应将引入此虚约束的构件 EF 和两个转动副 E 、 F 全都除去不计。

又如图 1.2.12 所示为一椭圆仪机构, 图中 $\angle CAD = 90^\circ$, $\overline{AB} = \overline{BC} = \overline{BD}$ 。在此机构的运动过程中, 连杆 2 上的 C 点和滑块 3 上的 C 点的轨迹都是直线 AC , 所以连杆 2 与滑块 3 在 C 点构成铰链后带入的约束也必为虚约束。

平面机构的虚约束常出现于下列情况中。

(1) 轨迹重合。若机构上有两构件用转动副相连接, 而两构件上连接点的轨迹相重合, 则该连接将带入 1 个虚约束。图 1.2.11 所示的情况即属于此种情况。

在机构运动过程中, 当不同构件上两点间的距离保持恒定时, 用一个构件和两个转动副将此两点连接, 也将带入一个虚约束。如图 1.2.13 所示, 在平行四边形机构 $ABCD$ 的运动过程中, 构件 4 上的 F 点与构件 2 上的 E 点之间的距离始终保持恒定, 故用构件 5 及转动副 E 、 F 将此两点相连接时也将带入一个虚约束。

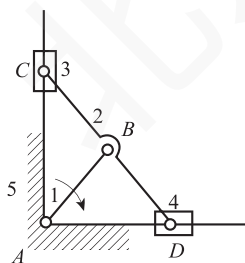


图 1.2.12 椭圆仪

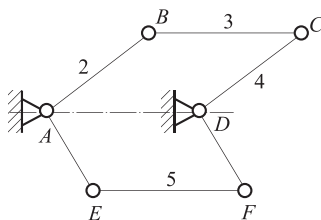


图 1.2.13 平行四边形机构

(2) 转动副轴线重合。当两构件构成多个转动副且其轴线相互重合时, 只有一个转动副起约束作用, 其余转动副都是虚约束。图 1.2.14 所示即属此例。

(3) 移动副导路平行。两构件构成多个移动副且其导路互相平行, 这时只有一个移动副起约束作用, 其余移动副都是虚约束。图 1.2.15 所示的缝纫机刺布机构即属此例。

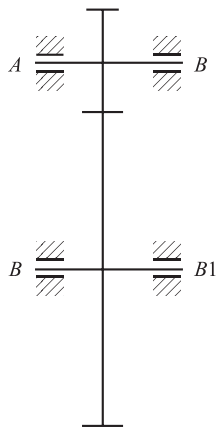


图 1.2.14 转动副虚约束

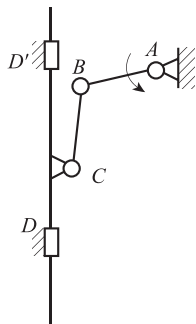


图 1.2.15 移动副虚约束

(4) 机构存在对运动起重复约束作用的对称部分。在机构中,某些不影响机构运动传递的重复部分所带入的约束亦为虚约束。在图 1.2.16 所示的周转轮系中,主动齿轮 1 和内齿轮 3 之间对称布置了三个齿轮,从运动传递的角度来说仅有一个齿轮起独立传递运动的作用,其余两个齿轮带入的约束为虚约束。该机构的自由度 $n=3$, $P_L=3$, $P_H=2$, 所以 $F=1$ 。

虚约束的存在对机构的运动没有影响,但引入虚约束后可以改善机构的受力情况,可以增加机构的刚性,因此使用得较多。但要注意满足虚约束存在的特定几何条件,否则,虚约束将会变为实际的约束,使机构的自由度减少,甚至不能运动。

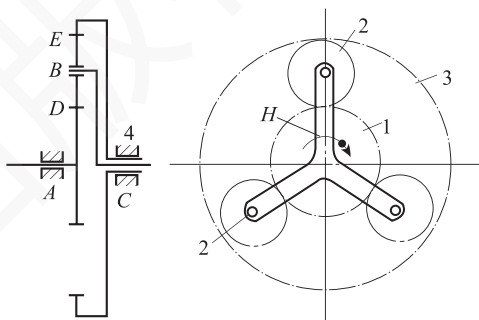


图 1.2.16 轮系中的虚约束

特别提示

平面机构自由度在机械设计中起着至关重要的作用,它决定了机构能否实现预期的运动以及运动的灵活性和确定性。在工业设备中,如四自由度工业搬运机器人,其四个自由度使其可以在上下、左右、前后、旋转等维度自由活动,实现了高速精确的搬运作业,提高了生产效率,减轻了工人劳动强度。而我国用于航天领域的 21 自由度机械臂更是令人瞩目,它具备与普通人手不相上下的功能,可在太空中进行维修作业,还能为各国航天器对接我国空间站提供帮助,展现了我国在航天机械设计领域的领先水平。在设计和研发过程中,为了实现高自由度机构的稳定运行和可靠控制,专家、学者、技术人员们不畏艰难、反复试验,付出了大量的心血和汗水。为了追求更高的精度和更优的性能,他们勇于创新、敢于突破。劳动精神、劳模精神、大国工匠精神的代代相传,激励着更多的人投身于机械设计事业,为我国制造业的高质量发展贡献力量。



四、实训导引：绘制机构运动简图和自由度计算

(一) 实训目的

- (1) 培养根据实际机构模型绘制机构运动简图的能力。
- (2) 熟悉并掌握机构自由度的计算方法。
- (3) 正确处理机构自由度计算时应注意的三个问题。

(二) 实训设备

油泵、牛头刨、冲床等机构模型。

(三) 实训内容

- (1) 机构运动简图绘制。
- (2) 计算机构的自由度。

(四) 实训报告要求

- (1) 实训结果。
每人在实训报告纸上绘出 10 个测得的机构运动简图。
- (2) 实训结果分析与讨论。
- (3) 实训结论。

任务拓展

空间机构自由度计算方法认知

第一种方法：用所有刚体的自由度数之和减去每一个运动副所约束的自由度数。这种方法的优点是，便于设计分析与计算。尤其在平面机构的自由度分析上，通过计算者识别虚约束与局部自由度，几乎可以完成大部分机构的自由度计算。然而对于空间机构来说，由于虚约束与局部自由度难以识别，而且机构本身的尺寸和约束的位置不同，机构的实际运动自由度会有很大的差异。该公式已经难以胜任复杂空间机构的自由度计算任务。不过不可否认的是该公式在机械设计史上的突出贡献，很多经典的机构和机械装置都是基于该公式设计而成的。

第二种方法：通过构建机构的运动学分析方程并分析其秩来计算其自由度，或者拆分出机构的每一个闭链，通过虚位移矩阵法来分析机构自由度。此种方法的好处是在理论上可以完美地计算出机构的自由度，计算方法在理解上较为简单。但计算过程本身较烦琐，而且该方法适用于已设计出来的机构的分析，利用该公式进行机构设计并不太方便。

第三种方法：对机构的雅克比矩阵 (Jacobian Matrix) 计算其零空间，来分析机构的自由度。这种方法虽然理论上也可以解决自由度计算，但是应用较为少见。其一是零空间的计算十分困难，甚至利用软件也难以解决。其二是该方法也适用于对已有机构的分析计算，难以利用该方法实现创新。

第四种方法：基于群论、李代数、微分几何的知识来解决自由度计算的问题。群论、李代数、微分几何是解决复杂机构学问题的法宝。如果掌握，对于机构的设计与分析，并联机构的设计及计算，甚至机构的概念设计都有着十分积极的意义。现代的机构学与机器人学很多理论都是基于此而形成的。但此种方法对设计人员的知识水平要求较高。

第五种方法：基于螺旋理论的自由度计算方法。旋量也是解决机构学问题的利器。该方法虽然并不能完美地解决所有的自由度问题。但在理解上更接近于第一种。在理解难度上大于第二种，计算难度上小于第二种。此种方法对设计人员的知识水平要求也较高。

任务三 平面连杆机构的选型与设计

任务描述

铰链四杆机构的选型与参数设计是机械设计人员经常遇到的工作任务。如某设计师接到指令，设计一曲柄滑块机构，需要满足条件：滑块行程速比系数 $K=1.5$ ，滑块的行程 $H=50\text{ mm}$ ，滑轨与曲轴回转轴心的偏距 $e=20\text{ mm}$ 。（保留作图线）

任务目标

- (1) 会分析选择铰链四杆机构的基本形式和演变形式。
- (2) 能分析计算铰链四杆机构的运动特性和传力特性。
- (3) 能按给定行程速比系数及连杆的位置进行平面四杆机构的运动设计。
- (4) 能运用量变到质变规律，提出新型铰链四杆机构创意。

任务分析

以缝纫机踏板机构、搅拌机机构等平面连杆机构为切入点，学习平面连杆机构的概念、平面四杆机构有几种类型、平面连杆机构的基本特性是什么、铰链四杆机构是如何演化的及怎样设计平面连杆机构。