



ME311 | 机械设计

2023年秋季

第01章 机械设计总论 上

宋超阳

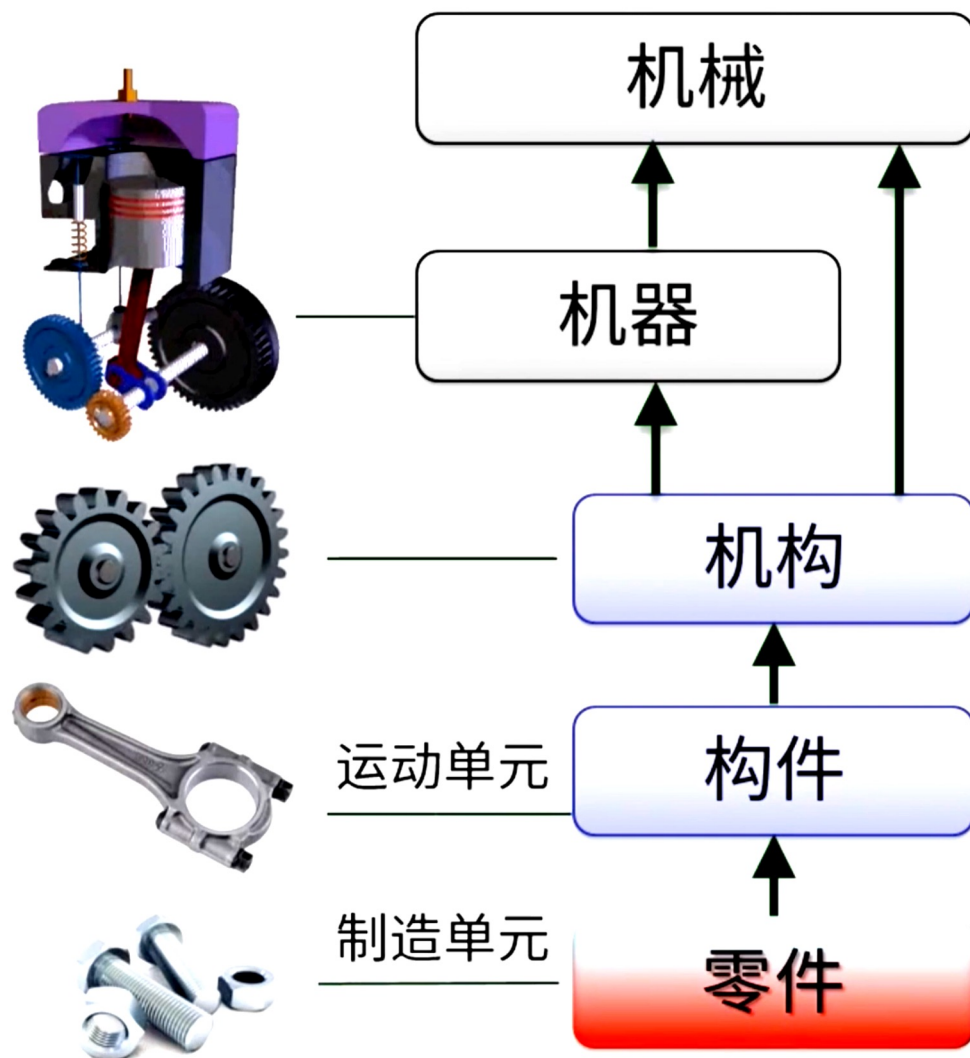
南方科技大学

本章要点概述

- 机器的构成及其功能结构
- 机械设计的概念及其特点
- 机械设计中的创新和优化
- 机械的组成及运动副
- 平面机构运动简图的绘制
- 平面机构具有确定运动的条件
- 机械设计中的两个问题
- 机械设计中的约束
- 机械设计中的强度问题
- 机械设计中的摩擦、磨损和润滑问题

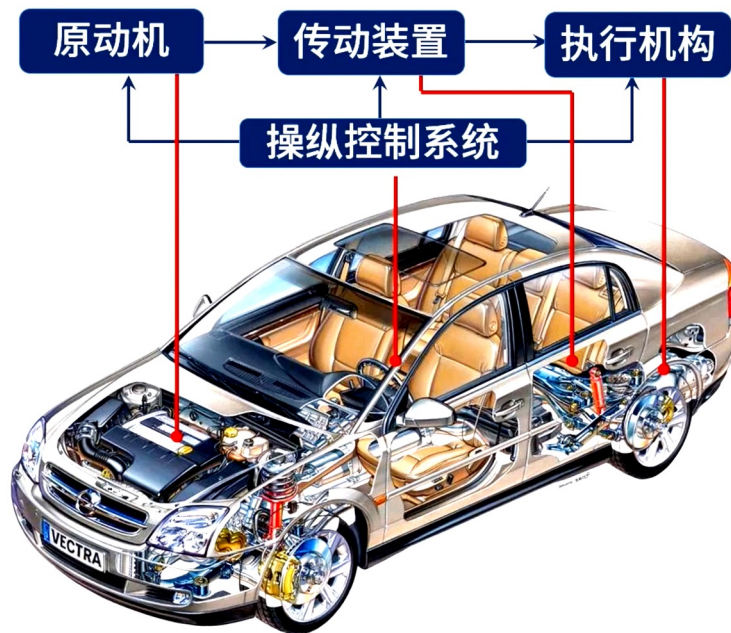
机器的构成 及其功能结构

机械



• 机器与机构的总称

- (零件) 一种人造的实物构件的组合
- (机构) 各部分之间有确定的相对运动
- (功能) 替代人类劳动完成有用的机械功或转化机械能



功能结构图

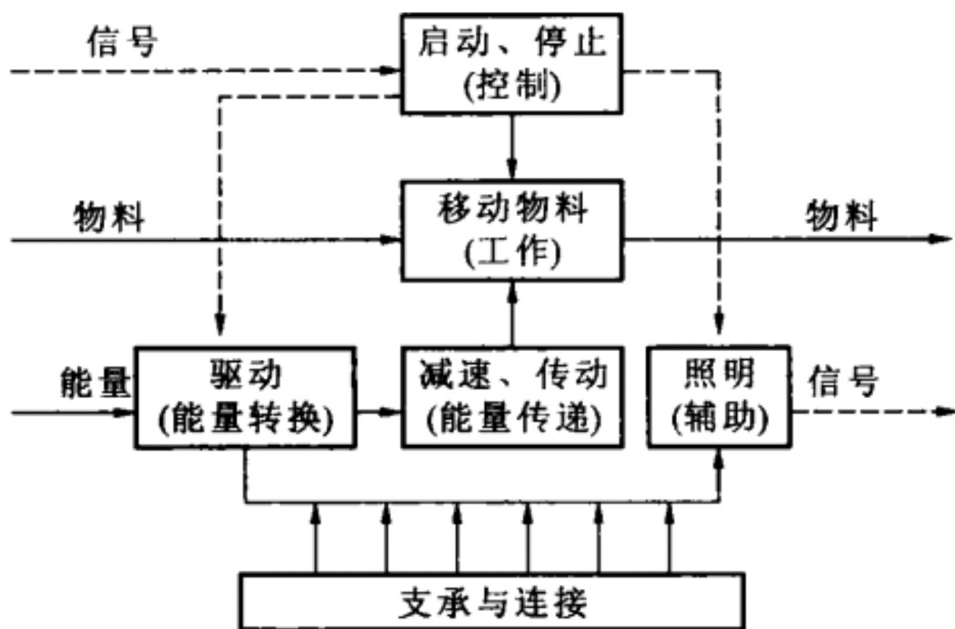


图 1-2 带式输送机功能结构图

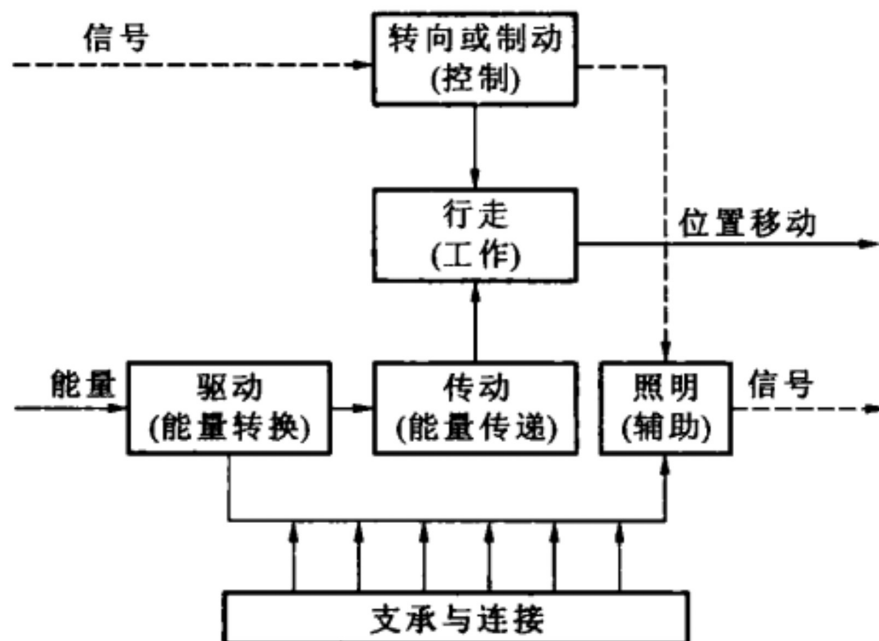


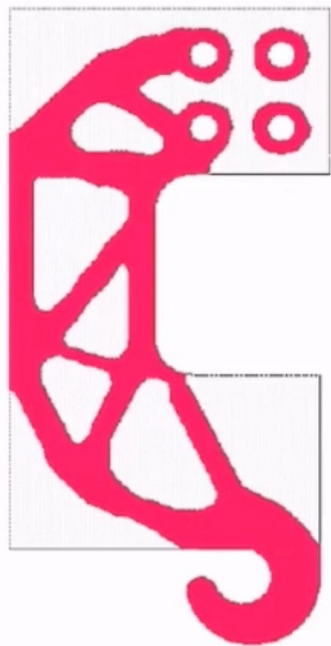
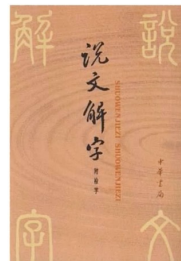
图 1-3 自行车功能结构图



机械设计的概念 及其特点

机械设计的概念

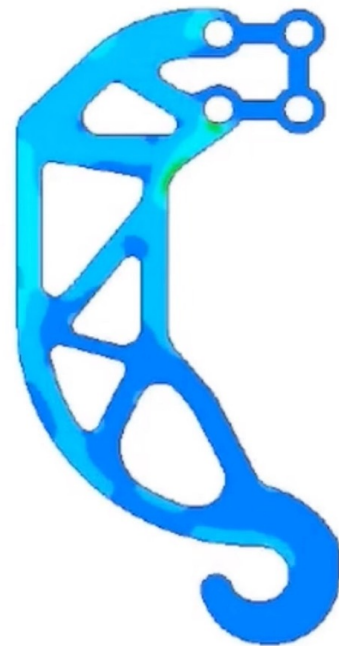
“设计”是“设”和“计”的合成词，据《说文解字》，“设”为“施陈”，“计”为“会算”，其含义是设想、运筹、规划和计算。



零件的概念设计



零件的尺寸设计



零件的性能分析

机械设计的种类与过程

开发性设计

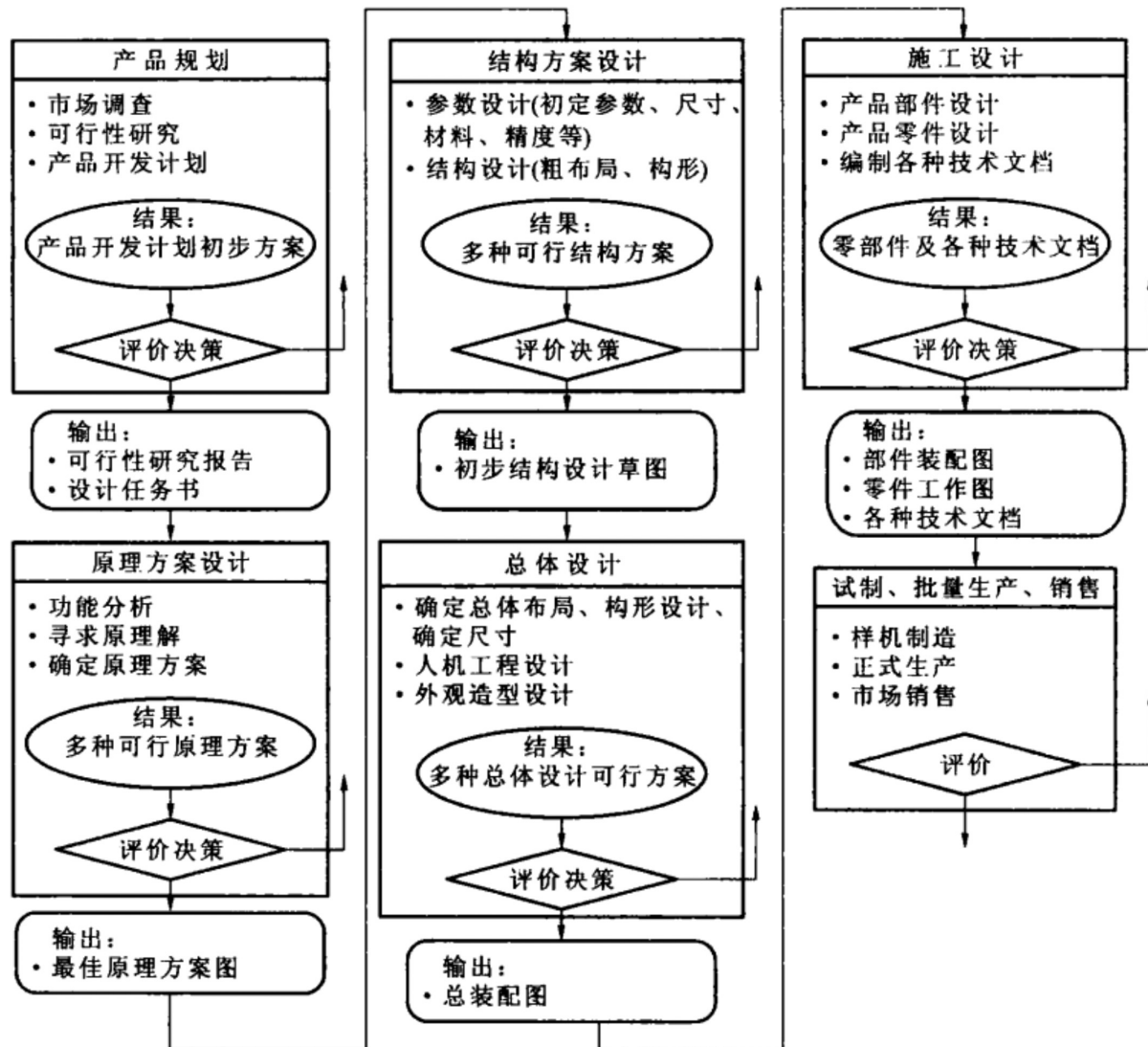
- 根据机械产品的总功能要求和约束条件进行全新的设计

适应性设计

- 根据生产技术的发展和使用部门的要求，对产品的结构和性能进行更新和改造，使之适应某种附加的要求

变参数性设计

- 只对结构设置和尺寸加以改变，使之满足功率和速比等的不同要求



机械设计的特点

- 机械设计中认知过程的渐变性

- 产品设计是一个

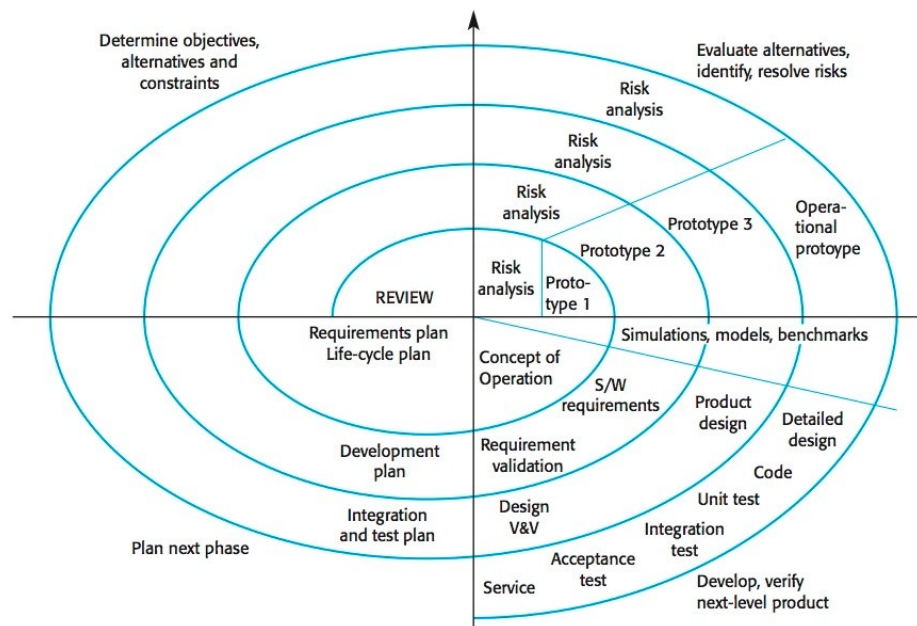
- 从抽象概念到具体产品的演化过程
 - 逐步求精和细化的过程
 - 反复修改和迭代的过程

- 设计方案具有多解性

- 产品设计工作是一项创造性的工作，设计过程也是一个不断创新的过程

- 设计过程中

- 设计管理的复杂性
 - 以市场需求为导向的必要性
 - 增强社会环境保护意识、建立可持续发展观念的必要性



机械设计中的 创新和优化

机械设计的核心是创新

- 机械设计的核心是创新在机械设计中，总有新的事物被创造出来
 - 所谓“新”事物，可以是过去从未出现过的东西，也可以是已有事物的不同组合，但这种组合不是简单地对已知事物的重复，而是有某种新的成分出现
- 在机械设计中必须突出创新的原则，通过直觉、推理、组合等途径，探求创新的原理方案和结构，做到有所发明、有所创造、有所前进
 - 测绘仿制一台机器，虽然结构复杂，零件成千上万，但不能算是创新
 - 有人根据集装箱连接的需求，开发了一种防松木螺钉，它集中了木螺钉和螺钉的优点，既能方便地旋入，又能自锁防松，成功地用于集装箱等厚木结构的连接，此钉虽小，但可称之为创新

产品设计创新的方向

- 根据我国当前的具体情况，产品设计创新的方向有两个
- 一是能满足当前大范围需求的产品创新
 - 例如农用车的设计和生 产，虽然这种设计不一定含有很多高新的技术，但只要产品在技术上有进步，能给企业带来效益，它就具有创新的意义
- 二是研究开发具有重要技术进步且为我所独有，技术含量高，在国内、外具有竞争力的新产品
 - 我国自行研究开发的程控交换机和磁悬浮支承等，就是这类创新设计的很好的例子

产品技术创新的主要类型

- 根据前面的创新方向，可认为制造业产品的技术创新有以下几类
- 一种是虽无重要新技术，但在形式上有创新，因而能获得相应竞争能力
 - 例如按用户定单生产不同颜色的自行车，只在生产管理上有所创新，自行车的性能并无重要变化，其中也没有融入多少新的技术，但同样形成了新的竞争能力。
- 第二种是含有重要的高新技术，使产品的竞争力提高
 - 例如程控交换机，原来用的是 $5\mu\text{m}$ 线宽的芯片，现在做出了 $3\mu\text{m}$ 线宽的芯片，结果功能增加，体积减小，这种设计和制造更小线宽芯片的技术，就能形成新的竞争力。再如电动汽车，如果谁能设计和制造出寿命长的电池，那么这种创新将不仅具有世界意义，而且具有历史意义。
- 第三种是具有完全创新的功能
 - 例如电子宠物，原来没有这种产品，企业发明并把它变成了产品，从而获得了很大的利润。从历史上看，第一盏电灯、第一部电话、第一架航天飞机等，都是具有完全创新功能的产品。

创造性思维

- 创造性思维使人们突破各种束缚，在一切领域内开创新的局面
 - 创造性思维具有独创性、连动性、多向性、综合性等特点
- 1. **独创性**：指具备与前人、众人不同的独特见解，突破一般思维的常规惯例，提出新原理，创造新模式，贡献新方法
 - 独创性思维具有求异性，敢于质疑司空见惯的事物，敢于向传统的陈规旧习挑战，敢于打破自己思想上的框框、从新的角度分析问题，即是具备独创性思维能力的表现
- 2. **连动性**：指由此及彼思维，这种思维引导人们由已知探索未知
 - **纵向连动**是针对现象或问题进行纵深思考，探寻其原因和本质，从而得到新的启示
 - **横向连动**是根据某一现象联想到特点与其相似或相关的事物，进行“特征转移”而进入新的领域
 - **逆向连动**思维是针对现象、问题和解法，分析其相反的方面，从另一角度去探寻新的途径

创造性思维

- 创造性思维使人们突破各种束缚，在一切领域内开创新的局面
 - 创造性思维具有独创性、连动性、多向性、综合性等特点
- 3. 多向性：指从多种不同角度去思考问题，对同一问题从不同的角度探索尽可能多的解法和思路
 - 多向性体现了思维方法的多样化和想象力的丰富
 - 爱因斯坦曾说过，“想象力比知识还重要，现实世界只有一个，而想象力却可以创造千百个世界”，多向性思维是与创造力关系最密切的一种思维方式
- 4. 综合性：指对已掌握的材料进行综合概括，找出其规律，或将已有的信息、现象、概念等组合起来，形成新的技术思想或设计出新产品
 - 在机械设计工作中，要想不断地取得创新的成果，就必须根据创造性思维的特点，自觉地培养自己的创造性思维能力
 - 只要解除自身思想上的束缚，突破自我，并掌握正确的方法，就能调动创造性而获得出乎意料的创造性成果

优化

- 机械设计是根据所提出的功能要求，在一定的约束条件下（即所谓设计空间）所作出的决策，其结果不是唯一的，亦即存在多种可行的方案
 - 这就是设计问题的多解性：对于任何一个设计问题，都可能有多种可行的设计方案并存，因此就存在一个如何在诸多可行方案中选择最优方案的问题，即优化设计
- 只要进行设计，就存在择优问题，进行机械设计时，必须对此给予高度的重视：
 1. 基于经验的优化设计（人工判断寻优）
 2. 基于计算机的枚举寻优
 3. 基于数学规划的优化方法
 4. 工程优化和人工智能优化

优化

• 1. 基于经验的优化设计（人工判断寻优）

- 基于经验的优化设计是原始的优化，或被动的自然优化
 - 人们在改造自然的过程中，通过对自然界认识的不断深化，逐步积累了经验，人们可以根据自己的经验，通过直观的判断对事物进行优化
- 传统的机械设计大多采用这种优化设计方法
 - 基于经验的优化设计，其质量取决于专家经验的多少和经验的可靠程度，一般能得到较好的方案。

• 2. 基于计算机的枚举寻优用

- 计算机计算（枚举）出各种可行方案，结合人工判断寻优
- 用这种方法虽能找到若干较优的方案，但很费事

优化

• 3. 基于数学规划的优化方法

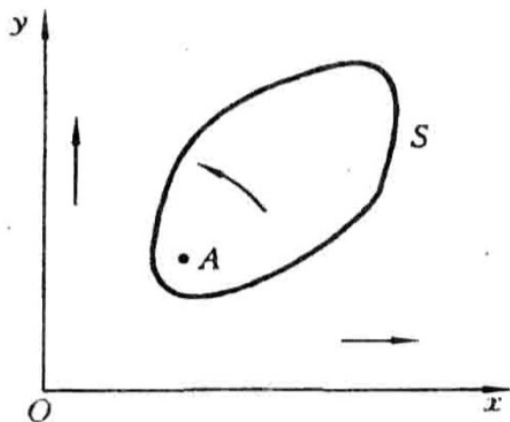
- 基于数学规划的优化方法是定量的优化方法，适用于解决机械设计中的参数优化问题
 - 三百多年前，牛顿发明的微积分就为数学规划方法奠定了基础，但在电子计算机出现以后数学规划方法才得到迅速发展
- 基于数学规划的优化方法，有关书籍中有详细的介绍

• 4. 工程优化和人工智能优化

- 近二十余年来，计算机技术的发展给解决复杂工程优化问题提供了新的可能
- 工程优化方法和人工智能优化方法，能解决不少数学规划方法所不能解决的工程优化问题
 - 其中，基于经验和直觉的方法，以及采用专家系统技术实现寻优策略的自动选择和优化过程的自动控制的方法等，在工程设计中也得到了更多的应用

机械的组成及运动副

运动副及其分类



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

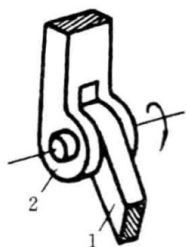
在坐标系中，构件可随其上任一点A沿x轴、y轴方向移动和绕点A转动

一个作平面运动的自由构件具有三个独立运动

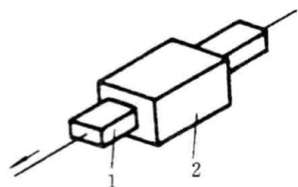
一个作平面运动的自由构件有三个自由度

- 机构是由许多构件组成的
 - 每个构件都以一定的方式与某些构件相互连接
 - 能产生相对运动
- 这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的连接称为运动副
 - 例如，轴与轴承的连接、活塞与汽缸的连接、传动齿轮中两个轮齿之间的连接等都构成运动副
- 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

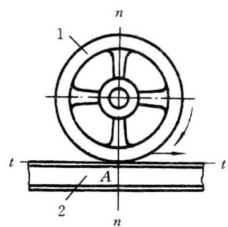
低副与高副



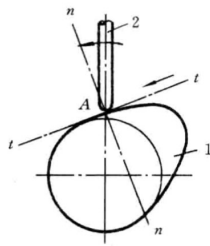
(a) 转动副



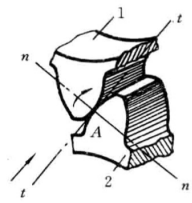
(b) 移动副



(a) 火车轮



(b) 凸轮



(c) 齿轮

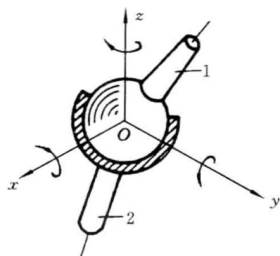
- **低副**：两构件通过面接触组成的运动副

- **转动副**：两构件只能在一个平面内相对转动
- **移动副**：两构件只能沿某一轴线相对移动

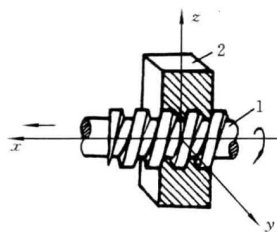
- **高副**：两构件通过点或线接触组成的运动副

- **空间运动副**：两构件间的相对运动是空间运动

- 球面副和螺旋副



(a) 球面副



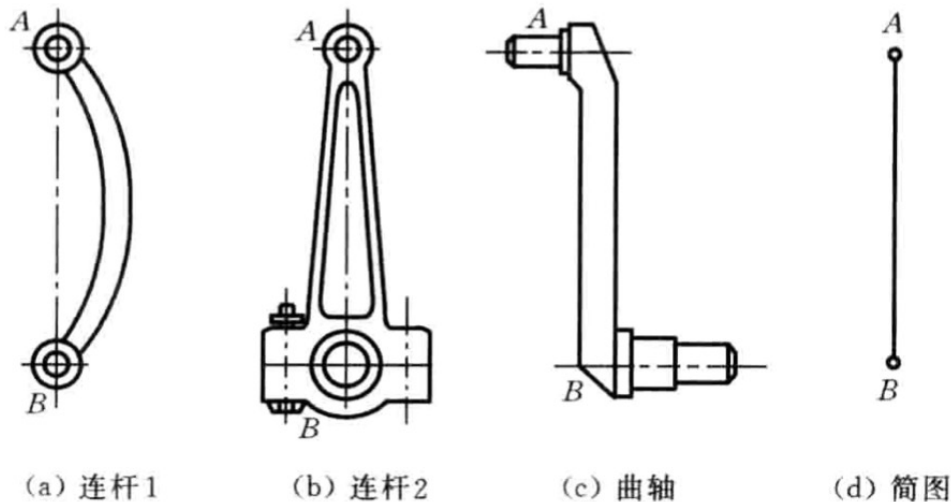
(b) 螺旋副

平面机构运动简图的 绘制

机构运动简图

- 用规定的运动副符号和代表构件的线条来表示机构，并根据运动学尺寸按比例绘制而成的简单图形，用于简明而准确地描述机构中各构件相对运动关系
- 它是机构分析和设计的几何模型

机构中各构件的运动是由机构原动件的运动规律及各运动副的类型和机构的运动学尺寸来决定的



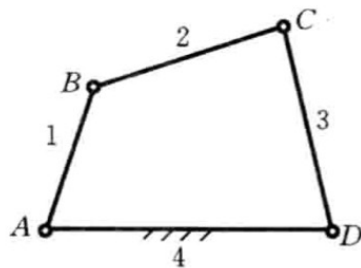
与构件的外形、截面形状和尺寸以及运动副的具体构造（如用滚动轴承还是用滑动轴承构成转动副）等因素无关

- 在研究机构运动时，为简明起见，可撇开与运动无关的因素，采用各种简单的符号和线条分别表示不同类型的运动副和相应构件

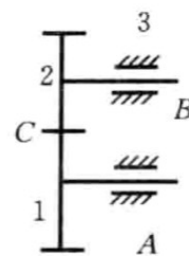
机构示意图或机构简图

名称	符 号	名称	符 号	名称	符 号	名称	符 号	名称	符 号	名称	符 号
线型规定	粗实线表示一般构件轮廓、轴、杆类等 细实线表示运动方向、剖面线等 点画线表示轴线、齿轮、链条等	平面高副 曲面高副 凸轮高副		锥齿轮啮合		与移动副成 与机架组成		的摆动滑块 与机架相连	对心式 偏心式	棘轮传动	
两组成运动构件		两构件组成球面副		蜗轮蜗杆啮合		与机架组成转动副	运动平面平行于图纸 运动平面垂直于图纸	外啮合圆柱齿轮		带传动	
两组成运动构件	运动平面平行于图纸 运动平面垂直于图纸	两构件组成螺旋副		的摩擦传动 带圆柱滚子		一个与其他构件连接 与机架上有三个运动副		齿轮齿条啮合		装在轴上的飞轮	

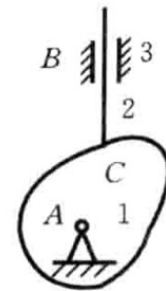
仅仅以构件和运动副组成的线条与符号表示机构，其图形不按精确的比例绘制，目的是为了进行初步的结构组成分析，看懂动作原理等



(a) 铰链四杆机构

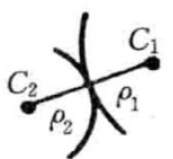

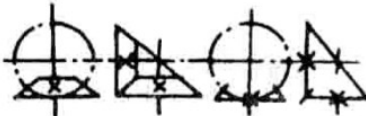
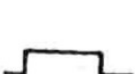




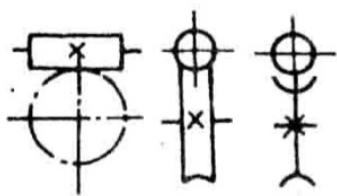
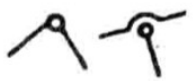


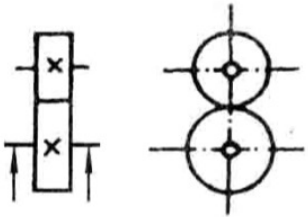


(b) 圆柱齿轮机构



(c) 盘形凸轮机构

机构示意图或机构简图

名称	符 号	名称	符 号	名称	符 号
线型规定	<p>粗实线表示一般构件轮廓、轴、杆类等</p> <p>细实线表示运动方向、剖面线等</p> <p>点画线表示轴线、齿轮、链条等</p>	平面高副	<p>曲面高副</p>  <p>凸轮高副</p> 	锥齿轮啮合	
两组成运动构件	  	两构件组成球面副	 	蜗轮蜗杆啮合	
两组成运动构件	<p>运动平面平行于图纸</p>  <p>运动平面垂直于图纸</p> 	两构件组成螺旋副		带的摩擦滚动的圆柱传动	

机构示意图或机构简图

名称	符 号		名称	符 号		名称	符 号	
与移动副组成			与的摆动滑块相连	对心式 	偏心式 	棘轮传动		
与机架组成转动副	运动平面平行于图纸 	运动平面垂直于图纸 	外啮合圆柱齿轮			带传动		
一个构件与其他构件连接			齿轮齿条啮合			装在轴上的飞轮		

平面机构 具有确定运动的条件

运动学

- Degree of Freedom

- *The number of coordinates needed to define its position in space*

- One-DOF Mechanism: $\text{DOF} = 1$
 - Multi-DOF Mechanism: $\text{DOF} > 1$
 - Structure: $\text{DOF} = 0$
 - Preloaded Structure: $\text{DOF} < 1$

- Mechanisms: variants of a linkage

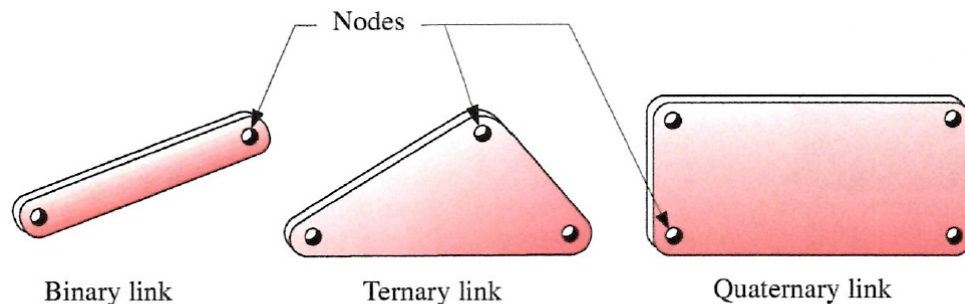
- *A collection of **links** and **joints**, one of which is grounded, and all are interconnected in a way to provide a controlled output in response to one or more inputs.*

连杆、铰链与可动性

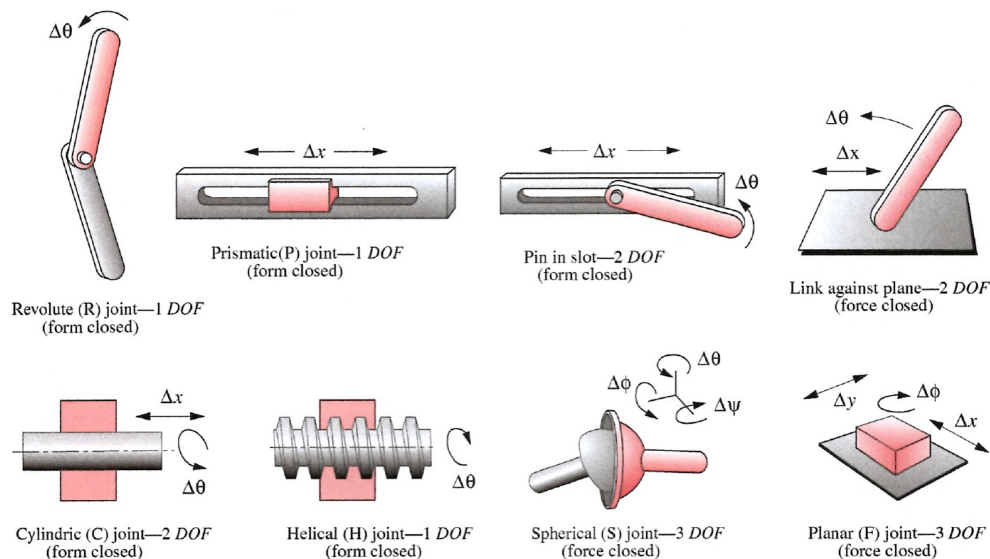
- Link
 - A rigid body of any shape that has some number of attachment points called nodes, that allow multiple links to be connected by joints
- Joints
 - Characterized by their geometry, by the number of DOF they allow between the links they join, and by whether they are held together (closed) by a **force** or by their **form** (geometry)
- Kutzbach Equation

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

- M: Mobility (DOF)
- L: the number of links
- J_1 : the number of one-DOF joints
- J_2 : the number of two-DOF joints
- **[Doesn't really work]**



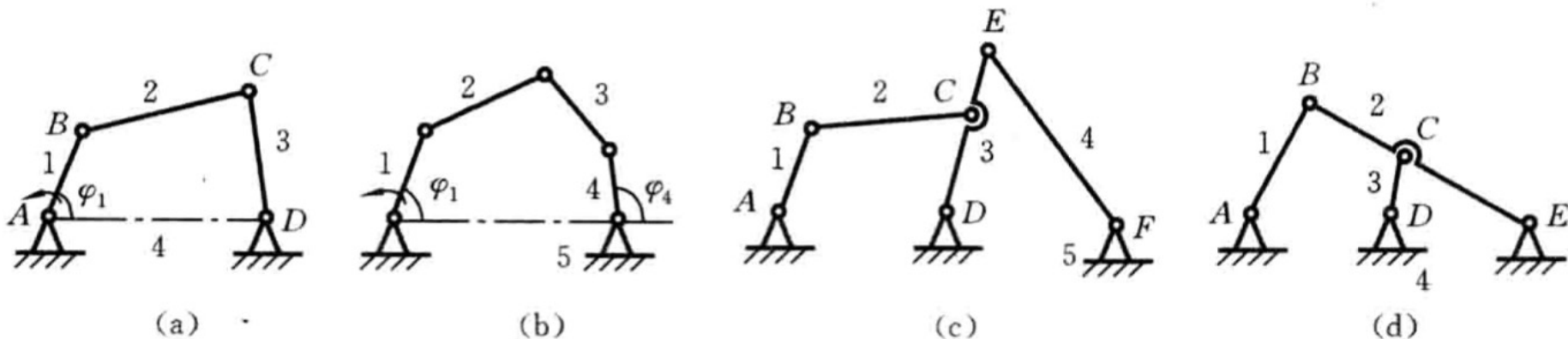
(a) Some links—their names reflect the number of nodes



(b) Some joint types—note their DOF and type of closure

机构具有确定运动的条件

- 机构是用来传递运动和力的构件系统，因而一般应使机构中各构件具有确定运动
 - 首先，机构应具有可动性，其可动性用自由度来度量
- 机构的自由度是指机构中各活动构件相对于机架所具有的独立运动的数目，标记为 F

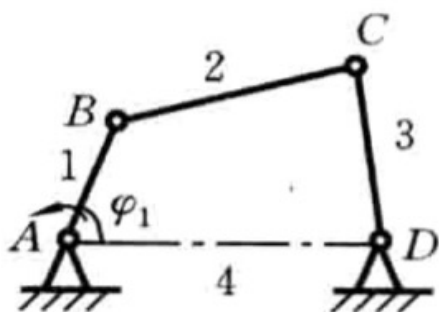


(a) 有4个构件，对构件1角位移 φ_1 的每一个给定值，构件2、3便随之有一个确定的对应位置，故角位移可取为系统的独立运动参数，且独立的运动参数仅有一个，即 $F=1$ 。(b) 进行类似的分析，易知其 $F=2$ 。

(c)、(d) 若忽略构件的弹性，其构件显然没有相对运动的可能，(c)、(d) 分别为静定和超静定结构，其 $F \leq 0$ ，因此机构自由度必须大于零。

机构具有确定运动的条件

- 机构原动件的数目必须等于机构自由度数目，只有原动件才具有独立的输入运动，通常每个原动件只有一个独立运动



- 若取构件 1 为原动件，输入的运动规律 $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ ，即原动件的数目与 F 相等，均为 1，此时构件 2 和 3 便随之获得确定的运动，说明该机构的运动可以从原动件正确地传递到构件 2 和 3 上
- 当原动件的数目小于机构自由度数目时，机构运动具有不确定性

- 机构具有确定运动的条件是：

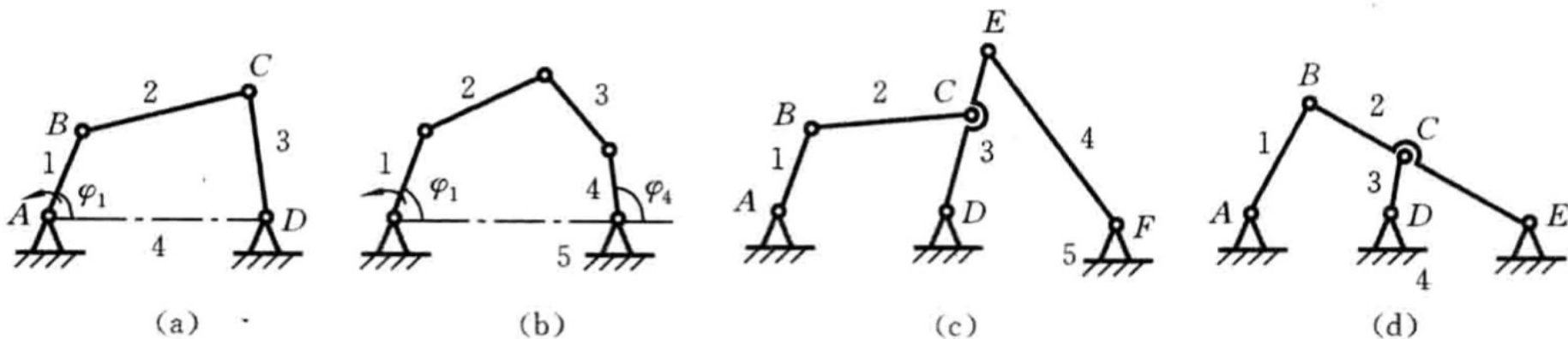
- ① 机构自由度必须大于零
- ② 机构原动件的数目必须等于机构自由度数目

平面机构自由度的计算

- 活动构件的自由度总数 - 运动副引入的约束总数 = 该机构自由度

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

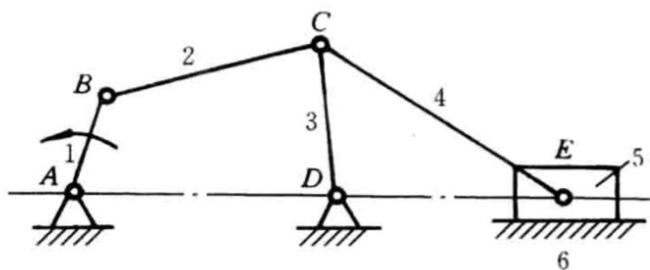
- 在一个平面机构中，若有 N 个构件，**除去机架后**，其余应为活动构件总数，即 $n = N - 1$
 - 这些活动构件在未组成运动副之前，其自由度总数为 3，当它们用运动副连接起来组成机构之后，机构中各构件具有的自由度数就减少了
- 若在平面机构中低副的数目为 P_L 个，高副的数目为 P_H 个，则机构中全部运动副所引入的约束总数为 $2P_L + P_H$



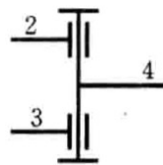
计算机构自由度时应注意的问题

• 复合铰链:

- 由 3 个或 3 个以上构件组成轴线重合的转动副称为复合铰链
- 一般由 m 个构件组成的复合铰链应含有 $m - 1$ 个转动副



(a) 六杆机构



(b) 三个构件连接关系

图 1-5 复合铰链

上图机构的自由度为 $F = 3 \times 5 - 2 \times 7 - 0 = 1$

右图机构的自由度为 $F = 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1$

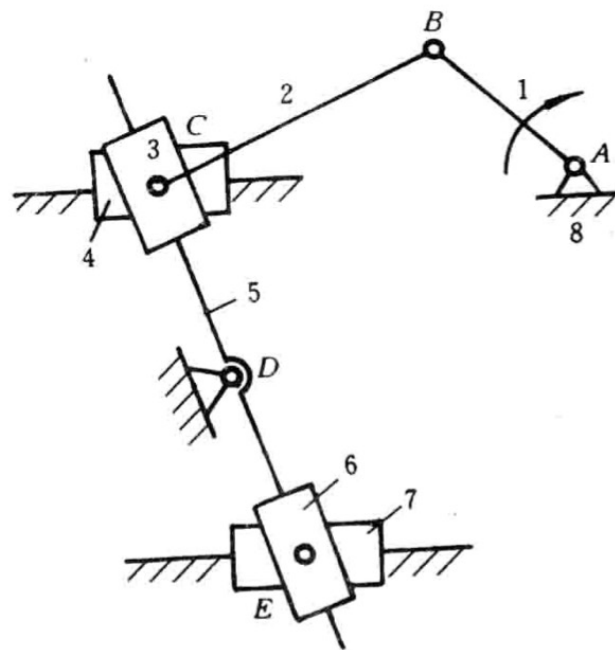


图 1-6 压缩机机构

计算机构自由度时应注意的问题

- 局部自由度（多余自由度）
 - 不影响整个机构运动关系的个别构件所具有的独立自由度
 - 在计算机构自由度时，应将它除去不计

- 圆滚子绕其自身轴线转动的快慢并不影响整个机构的运动
- 设想将滚子4与推杆3焊接在一起，机构的运动输入输出关系并不改变

- 局部自由度虽然不影响整个机构的运动，但滚子可使高副接触处的滑动摩擦变成滚动摩擦，可减少磨损
 - 所以实际机构中常有局部自由度出现

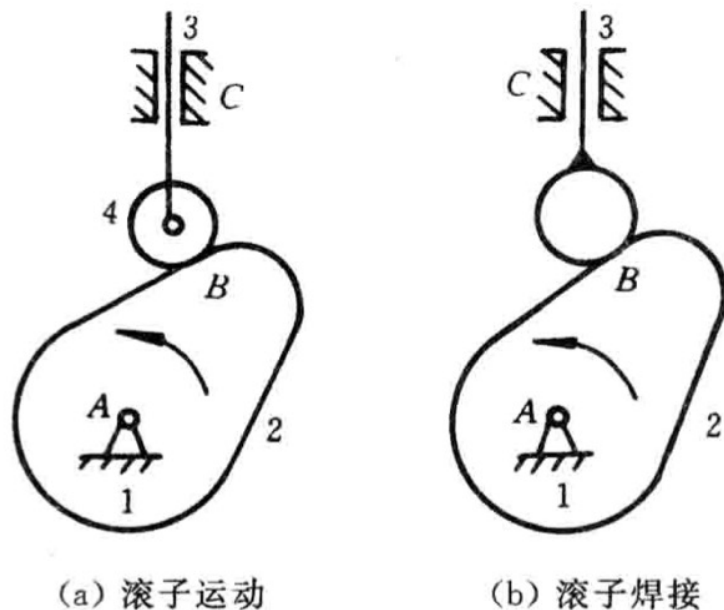


图 1-7 机构中的局部自由度

虚约束

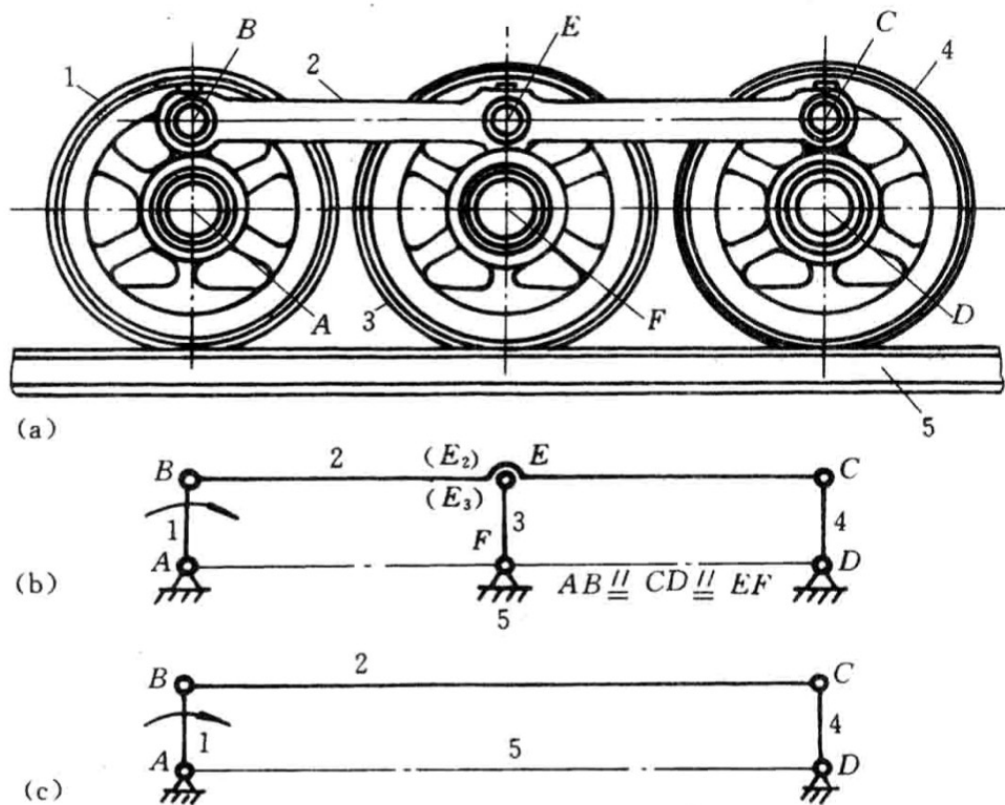
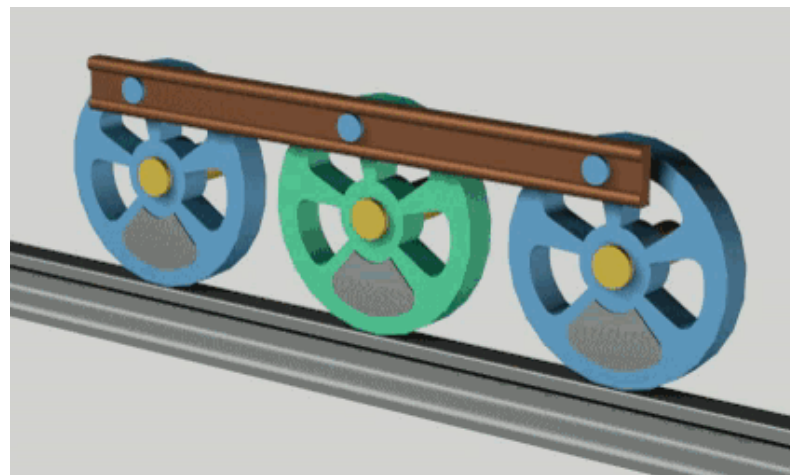


图 1-8 轨迹重合



- 在机构中，两构件构成运动副所引入的约束是用来限制某些相对运动的
- 但在机构中，某些运动链所引入的约束可能与机构所受的其他约束相重复，即对相对运动的限制产生了重复，因而对机构运动实际上起不到约束作用，这种约束就是虚约束

如果用转动副连接的是两构件上运动轨迹相重合的点，则该连接将引入一个虚约束

虚约束

- 机构在运动过程中，若两构件上某两点之间的距离始终保持不变，如用双转动副杆将此两点相连，则将引入一个虚约束

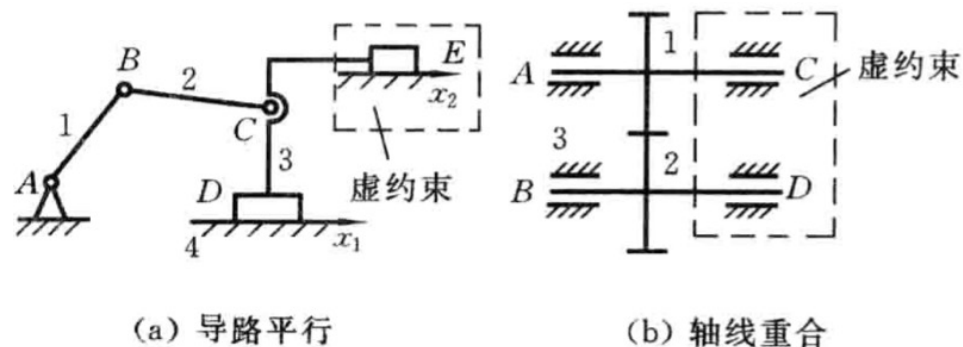


图 1-9 重复运动副

- 机构中某些不影响机构运动传递的重复部分或对称部分所引入的约束为虚约束

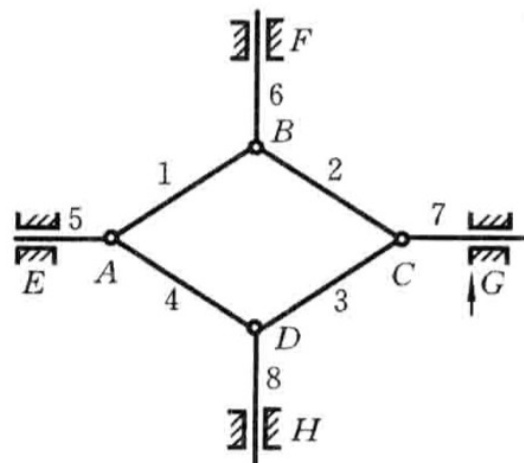
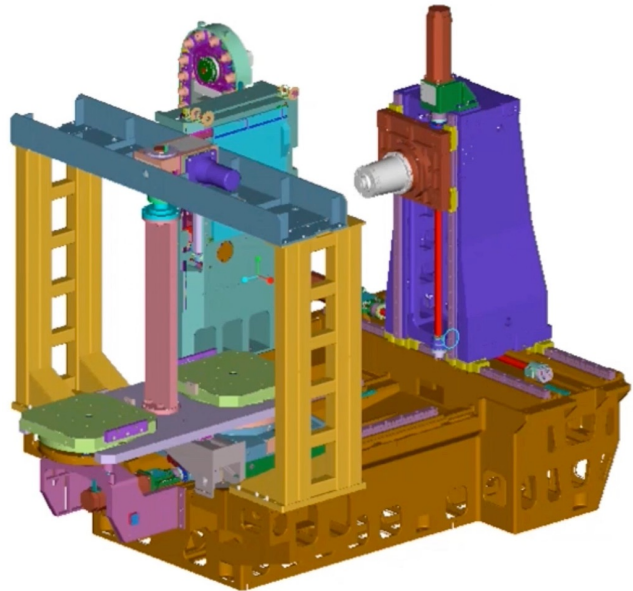


图 1-10 存在虚约束的对称结构

机械设计中的两个问题

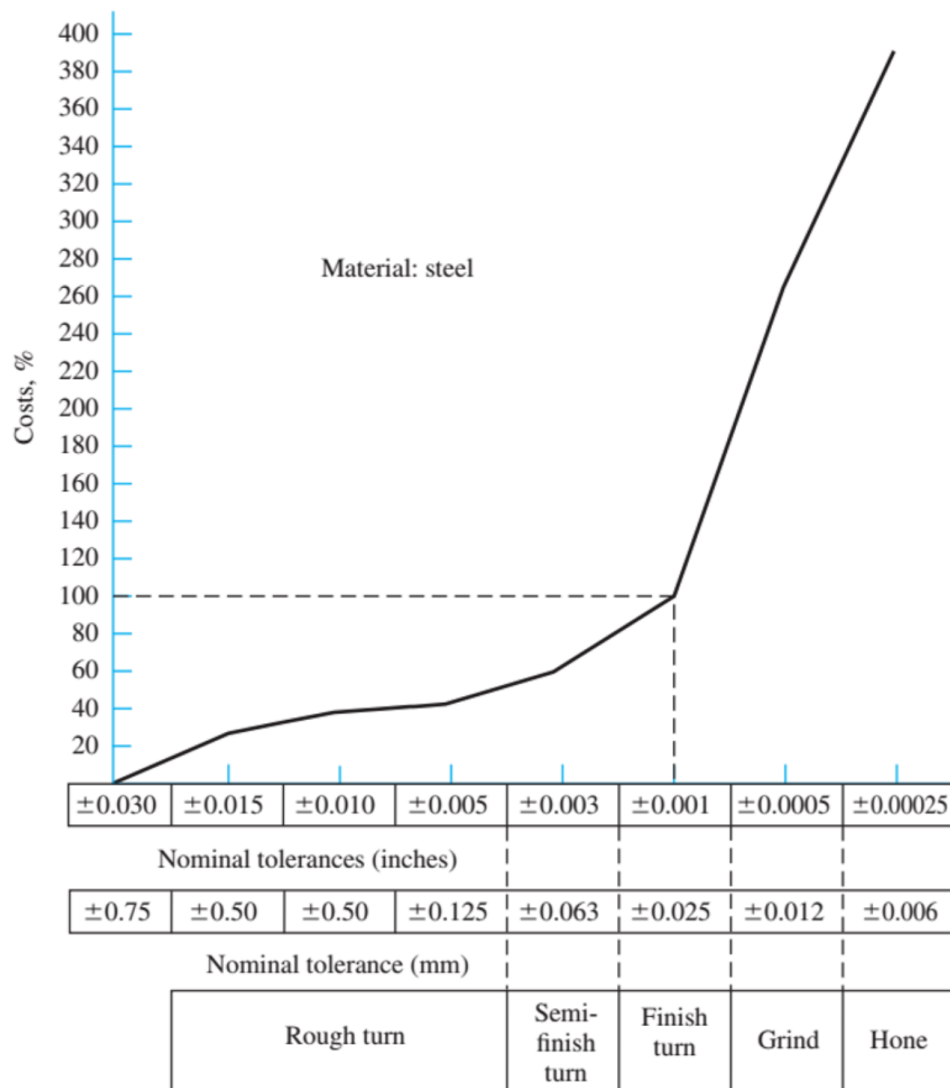
机械设计中的产品成本问题

- 产品设计好坏的根本标准，是能否用最经济的方案来实现产品的功能目标
 - 产品功能和质量的提高、节约能源和材料、提高劳动生产率和降低产品成本等方面，
 - 而所有这些方面又集中体现在产品成本上，应尽可能地降低产品成本，将它控制在规定的成本目标的范围之内。



机械设计中的产品成本问题

- 降低产品成本，要遵循以最少费用，来最大限度地满足功能要求这一基本原则
 - 正确区分所设计产品的必要功能和不必要功能，去掉不必要功能所占的费用
 - 提高设计效率、缩短设计周期，尽可能减少产品的设计费用
 - 尽可能减少材料的费用
 - 尽量减少加工费用



机械设计中的可持续发展问题

- 可持续发展的核心问题是保护环境和合理利用资源
 - “既满足当代人的需要，又不对子孙后代满足其需求的能力构成危害的发展”
 - 世界环境与发展委员会（WCED）向联合国第42届大会提交的研究报告《我们共同的未来》中对可持续发展的定义



机械设计中的可持续发展问题

- 所设计的产品应符合国家科技政策和国家科技发展规划的目标
 - 作为设计者，不但要通过产品设计为企业获得效益，而且要通过设计出具有竞争力的先进产品，为国民经济的发展作出贡献
- 所设计的产品应符合减少三废对环境污染的要求
 - 工作过程中排出的废物，产生的振动、噪声等
- 所设计的产品应符合人机系统安全、可靠的要求
 - 现代工业生产中所有的机器设备都需要由人操纵、控制，人是生产的核心和主导，人、机器与工作环境形成一个不可分割的整体
- 所设计的产品应有利于提高生产力
 - 所设计的产品应有利于扩大生产规模，提高劳动生产率，能促进加工和制造过程的高效化，节约人力、物力等
- 资源的合理利用
 - 所设计的产品应有利于各种矿产资源、水资源和能源等各种资源的合理利用，有利于扩大资源利用范围及新能源的开发，有利于节约能源

机械设计中的约束

机械设计的基本特征之一是约束性

- 机械设计的主要任务，就是要在由各种约束组成的边界条件（或称设计空间）内，寻找能满足预定功能和性能要求的最优设计方案

经济性约束

- 主要是指要尽可能地降低产品成本，将它控制在规定的成本目标的范围之内

社会性约束

- 是指所设计的产品必须能对社会带来效益，而不对社会造成不良影响

技术性约束

- 是指设计以满足技术性能要求为目标。主要的技术性约束有：技术性能约束、标准化约束、可靠性约束、安全性约束、维修性约束等

技术性约束

- 技术性能约束
 - 相关的技术性能必须达到规定的要求
 - 例如，产品所能传递的功率、效率、使用寿命、强度、刚度、抗摩擦、抗磨损、振动稳定性、热特性等性能
 - 例如，刚度是指零件受载时抵抗弹性变形的能力，而刚度约束则是指零件受载时产生的弹性变形不允许超过规定的许可值
- 标准化约束
 - 在设计的全过程中的所有行为，都要满足一个国家生产技术水平和管理水平标准化的要求
- 可靠性约束
 - 指产品、部件或零件在规定的使用条件下，在预期的使用寿命内能完成规定功能的概率
- 安全性约束
 - 应能满足零件、整机、工作、环境安全性方面的限制。
- 维修性约束



ME311: 机械设计

2023年秋季

谢谢~

宋超阳
南方科技大学