



高等学校教材

# 机械设计基础

JIXIE SHEJI JICHU

鄢利群 高路 主编



化学工业出版社

高等学校教材

# 机械设计基础

鄢利群 高路 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括平面机构的自由度和速度分析、平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、间歇运动机构、机构的动力分析、机械零件设计概论、螺纹连接、齿轮传动、挠性传动、滑动轴承、滚动轴承、轴及其连接。本书结合化工类专业特点,主要体现在工程举例上,尽可能从化工应用设备上选取与所学内容相关的工程实例,选择一些典型的工程零件图,包含必要的公差标注。在内容编排上,插入一些学习内容中涉及的标准简表,便于学生学习和做作业。

可适用于各机械类和近机类专业学生选作教材,且可供相关人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/鄢利群,高路主编. —北京:化学工业出版社,2011.2  
高等学校教材  
ISBN 978-7-122-10094-8

I. 机… II. ①鄢…②高… III. 机械设计-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第240280号

---

责任编辑:金玉连 程树珍  
责任校对:宋 玮

装帧设计:刘丽华

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印 刷:北京永鑫印刷有限公司  
装 订:三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$  字数473千字 2011年2月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:30.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

为了更好地体现化工类院校的机类、近机类专业本科教学，充分调动广大任课教师参与教学改革积极性，沈阳化工大学、北京化工大学、武汉工程大学、吉林化工学院、北京石油化工学院五所院校于 2010 年 1 月决定组织编写有针对性、有特点的机械设计基础教材。

在编写过程中，我们本着侧重机械设计能力的培养，兼顾理论分析计算的原则，对机械设计部分进行了强化，而对机械原理方面的内容则侧重讲述常用机构的特点、应用。考虑到各院校理论教学学时都在减少这一现实，本书对一些纯理论推导方面的内容进行了适当的精简，而对培养应用与设计能力方面的内容则适当加强。

参加本书编写的人员有：鄢利群（绪论、第 1.1~1.4 节、第 4 章、第 13 章）、高路（第 2 章、第 5 章、第 6 章、第 12 章）、秦襄培（第 3 章）、徐林林（第 7 章）、王丽艳（第 8 章）、杜永英（第 9 章）、张有忱（第 10 章）、赵芸芸（第 11 章）、李铁军（第 14 章）、宁建荣（第 1.5 节）。本书由鄢利群、高路担任主编。

本书由沈阳化工大学杨德武教授精心审阅，提出了许多宝贵意见，作者在此表示衷心感谢。

限于编者水平，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者  
2010-9

# 目 录

|                         |    |                             |    |
|-------------------------|----|-----------------------------|----|
| 0 绪论                    | 1  | 3.1.1 凸轮机构概述                | 33 |
| 1 平面机构的结构分析与速度分析        | 3  | 3.1.2 凸轮机构的应用               | 33 |
| 1.1 平面机构的组成             | 3  | 3.1.3 凸轮机构的分类               | 34 |
| 1.1.1 运动副               | 3  | 3.2 从动件运动规律                 | 35 |
| 1.1.2 运动副的分类            | 3  | 3.2.1 凸轮轮廓曲线与从动件运动规律之间的相互关系 | 36 |
| 1.1.3 运动链               | 3  | 3.2.2 从动件的常用运动规律            | 36 |
| 1.1.4 机构                | 4  | 3.2.3 组合运动规律                | 40 |
| 1.2 平面机构运动简图            | 4  | 3.2.4 从动件运动规律的选取原则          | 40 |
| 1.2.1 平面机构运动简图          | 4  | 3.3 按给定运动规律设计盘形凸轮轮廓         | 40 |
| 1.2.2 平面机构运动简图的绘制       | 6  | 3.3.1 用图解法设计凸轮轮廓            | 40 |
| 1.3 平面机构自由度的计算          | 6  | 3.3.2 用解析法设计凸轮轮廓            | 43 |
| 1.3.1 平面机构自由度的计算公式      | 6  | 3.4 盘形凸轮机构基本尺寸的确定           | 45 |
| 1.3.2 平面机构自由度的计算        | 6  | 3.4.1 凸轮机构的压力角和自锁           | 45 |
| 1.3.3 机构具有确定运动的条件       | 9  | 3.4.2 凸轮基圆半径的选择             | 46 |
| 1.4 平面机构的组成原理、结构分类及结构分析 | 9  | 3.4.3 从动件滚子半径的选择            | 46 |
| 1.4.1 平面机构的组成原理         | 9  | 习题                          | 47 |
| 1.4.2 平面机构的结构分类         | 10 | 4 齿轮机构                      | 49 |
| 1.4.3 平面机构的结构分析         | 11 | 4.1 齿轮机构的特点和类型              | 49 |
| 1.5 速度瞬心及其在机构速度分析上的应用   | 11 | 4.2 齿廓曲线                    | 50 |
| 1.5.1 速度瞬心              | 11 | 4.2.1 齿廓啮合基本定律              | 50 |
| 1.5.2 速度瞬心位置的确定         | 12 | 4.2.2 齿廓曲线的选择               | 51 |
| 1.5.3 速度瞬心在速度分析上的应用     | 13 | 4.3 渐开线及渐开线齿轮传动的特点          | 51 |
| 习题                      | 14 | 4.3.1 渐开线的形成、特性及其方程         | 51 |
| 2 平面连杆机构及其设计            | 16 | 4.3.2 渐开线齿廓满足定传动比传动         | 52 |
| 2.1 平面连杆机构的特点           | 16 | 4.3.3 渐开线齿廓传动的特点            | 52 |
| 2.2 平面四杆机构的类型及应用        | 17 | 4.4 渐开线标准齿轮的各部分名称、参数及尺寸计算   | 53 |
| 2.2.1 平面四杆机构的基本型式       | 17 | 4.4.1 各部分名称及符号              | 53 |
| 2.2.2 平面四杆机构的演化         | 19 | 4.4.2 标准直齿圆柱齿轮的基本参数         | 53 |
| 2.3 平面四杆机构的基本知识         | 22 | 4.4.3 标准直齿轮的几何尺寸计算          | 54 |
| 2.3.1 四杆机构存在曲柄的条件       | 22 | 4.4.4 标准齿条的特点               | 55 |
| 2.3.2 急回运动和行程速比系数       | 23 | 4.4.5 任意圆上的齿厚               | 55 |
| 2.3.3 平面连杆机构的传动角与死点     | 24 | 4.5 渐开线齿轮的加工方法及变位齿轮         | 56 |
| 2.4 平面四杆机构的设计           | 27 | 4.5.1 齿轮轮齿的加工方法             | 56 |
| 2.4.1 图解法设计四杆机构         | 27 | 4.5.2 根切                    | 57 |
| 2.4.2 解析法设计四杆机构         | 30 | 4.5.3 变位齿轮                  | 58 |
| 习题                      | 31 | 4.6 渐开线齿轮的啮合传动              | 58 |
| 3 凸轮机构                  | 33 | 4.6.1 直齿圆柱齿轮正确啮合的条件         | 58 |
| 3.1 凸轮机构的应用及分类          | 33 | 4.6.2 一对齿轮的啮合过程             | 59 |
|                         |    | 4.6.3 齿轮传动的中心距及啮合角          | 59 |

|                           |    |                          |     |
|---------------------------|----|--------------------------|-----|
| 4.6.4 直齿圆柱齿轮连续传动的条件       | 60 | 7.1 机械运转的速度波动及其调节        | 88  |
| 4.7 平行轴斜齿圆柱齿轮机构           | 61 | 7.1.1 引起机械速度波动的原因        | 88  |
| 4.7.1 斜齿圆柱齿轮齿廓曲面的形成及其啮合特性 | 61 | 7.1.2 机械运转的平均角速度和速度不均匀系数 | 88  |
| 4.7.2 斜齿轮的基本参数            | 62 | 7.1.3 周期性速度波动的调节         | 89  |
| 4.7.3 斜齿圆柱齿轮传动的正确啮合条件及重合度 | 63 | 7.1.4 非周期性速度波动的调节        | 92  |
| 4.7.4 斜齿轮的当量齿数            | 63 | 7.2 刚性转子的平衡              | 93  |
| 4.7.5 斜齿轮的几何尺寸计算          | 64 | 7.2.1 问题的提出              | 93  |
| 4.7.6 斜齿轮的优缺点             | 65 | 7.2.2 盘类转子的平衡            | 93  |
| 4.8 直齿圆锥齿轮                | 65 | 7.2.3 轴类转子的平衡            | 95  |
| 4.8.1 圆锥齿轮概述              | 65 | 习题                       | 98  |
| 4.8.2 背锥和当量齿数             | 65 | <b>8 机械零件设计概论</b>        | 99  |
| 4.8.3 直齿圆锥齿轮几何尺寸计算        | 66 | 8.1 机械零件的失效形式            | 99  |
| 习题                        | 67 | 8.1.1 整体断裂               | 99  |
| <b>5 轮系</b>               | 68 | 8.1.2 过大的残余变形            | 99  |
| 5.1 轮系的分类                 | 68 | 8.1.3 表面破坏               | 99  |
| 5.2 定轴轮系传动比               | 69 | 8.1.4 破坏正常工作条件引起的失效      | 99  |
| 5.2.1 平行轴定轴轮系传动比          | 69 | 8.2 机械零件设计应满足的基本要求       | 100 |
| 5.2.2 空间定轴轮系传动比           | 70 | 8.2.1 避免在预定寿命期内失效的要求     | 100 |
| 5.3 周转轮系传动比               | 70 | 8.2.2 结构工艺性要求            | 100 |
| 5.4 复合轮系                  | 72 | 8.2.3 经济性要求              | 100 |
| 5.5 轮系的应用                 | 74 | 8.2.4 质量小的要求             | 100 |
| 5.5.1 轮系的齿数条件             | 74 | 8.2.5 可靠性要求              | 101 |
| 5.5.2 轮系的功用               | 74 | 8.3 机械零件的设计准则            | 101 |
| 5.6 其它几种常用行星传动简介          | 76 | 8.3.1 强度准则               | 101 |
| 5.6.1 渐开线少齿差行星传动          | 76 | 8.3.2 刚度准则               | 101 |
| 5.6.2 摆线针轮行星传动            | 76 | 8.3.3 寿命准则               | 101 |
| 5.6.3 谐波齿轮传动              | 77 | 8.3.4 振动稳定性准则            | 101 |
| 习题                        | 77 | 8.3.5 可靠性准则              | 102 |
| <b>6 其它常用机构</b>           | 79 | 8.4 机械零件常用材料及其选择         | 102 |
| 6.1 棘轮机构                  | 79 | 8.4.1 机械零件常用的材料          | 102 |
| 6.1.1 棘轮机构的组成、工作原理        | 79 | 8.4.2 机械零件材料的选择原则        | 103 |
| 6.1.2 棘轮机构的类型和应用          | 79 | 8.5 机械设计中的标准化            | 103 |
| 6.1.3 棘轮机构的设计要点           | 81 | 8.6 机械零件的许用应力            | 104 |
| 6.2 槽轮机构                  | 82 | 8.6.1 材料的疲劳特性            | 104 |
| 6.2.1 槽轮机构的工作原理和类型        | 82 | 8.6.2 零件的极限应力线图          | 107 |
| 6.2.2 槽轮机构的运动系数及运动特性      | 83 | 8.6.3 提高机械零件疲劳强度的措施      | 108 |
| 6.3 不完全齿轮机构               | 84 | 8.7 机械零件的接触强度            | 108 |
| 6.4 凸轮式间歇运动机构             | 85 | 8.8 摩擦、磨损及润滑             | 109 |
| 6.4.1 圆柱凸轮间歇运动机构          | 85 | 8.8.1 摩擦                 | 109 |
| 6.4.2 蜗杆凸轮间歇运动机构          | 85 | 8.8.2 磨损                 | 110 |
| 6.5 万向铰链机构                | 85 | 8.8.3 润滑                 | 112 |
| 6.6 组合机构                  | 86 | 习题                       | 113 |
| 习题                        | 87 | <b>9 螺纹连接</b>            | 114 |
| <b>7 机械的调速与平衡</b>         | 88 | 9.1 螺纹                   | 114 |
|                           |    | 9.1.1 螺纹及螺纹的主要参数         | 114 |

|                           |     |                           |     |
|---------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 9.1.2 螺纹分类、特点和应用 .....    | 115 | 10.9 齿轮传动的润滑 .....        | 170 |
| 9.2 螺纹连接的基本类型和标准螺纹        |     | 10.9.1 齿轮传动的润滑方式 .....    | 170 |
| 连接件 .....                 | 117 | 10.9.2 润滑剂的选择 .....       | 171 |
| 9.2.1 螺纹连接的基本类型 .....     | 117 | 10.10 蜗杆传动的组成、特点及类型 ..... | 171 |
| 9.2.2 标准螺纹连接件 .....       | 118 | 10.11 蜗杆传动的主要参数和几何尺寸      |     |
| 9.3 螺纹连接的预紧和防松 .....      | 121 | 计算 .....                  | 172 |
| 9.3.1 螺纹连接的预紧 .....       | 121 | 10.12 蜗杆传动的主要失效形式、常用      |     |
| 9.3.2 螺纹连接的防松 .....       | 123 | 材料和结构 .....               | 175 |
| 9.4 螺栓组连接设计 .....         | 125 | 10.13 蜗杆传动的强度计算简介 .....   | 176 |
| 9.4.1 螺栓组连接的结构设计 .....    | 125 | 习题 .....                  | 177 |
| 9.4.2 螺栓组连接受力分析 .....     | 127 | <b>11 挠性传动</b> .....      | 179 |
| 9.5 单个螺栓连接的强度计算 .....     | 131 | 11.1 概述 .....             | 179 |
| 9.5.1 松螺栓连接强度计算 .....     | 131 | 11.1.1 带传动简介 .....        | 179 |
| 9.5.2 紧螺栓连接强度计算 .....     | 131 | 11.1.2 链传动的特点、类型和应用 ..... | 181 |
| 9.5.3 螺栓连接件的许用应力 .....    | 135 | 11.1.3 链传动简介 .....        | 181 |
| 9.6 螺纹连接零件的常用材料和力学        |     | 11.2 V带与V带轮 .....         | 182 |
| 性能等级 .....                | 136 | 11.2.1 V带的结构与标准 .....     | 182 |
| 9.7 提高螺栓连接强度的措施 .....     | 137 | 11.2.2 开口传动的几何参数及计算 ..... | 183 |
| 习题 .....                  | 142 | 11.2.3 V带轮结构 .....        | 184 |
| <b>10 啮合传动</b> .....      | 145 | 11.3 滚子链和链轮 .....         | 185 |
| 10.1 齿轮传动的主要失效形式 .....    | 145 | 11.3.1 滚子链 .....          | 185 |
| 10.2 齿轮材料及热处理选择 .....     | 147 | 11.3.2 滚子链链轮 .....        | 187 |
| 10.2.1 齿轮材料 .....         | 147 | 11.4 带传动工作情况分析 .....      | 188 |
| 10.2.2 齿轮热处理 .....        | 147 | 11.4.1 带传动的力分析 .....      | 188 |
| 10.3 齿轮传动的计算载荷 .....      | 149 | 11.4.2 带传动的弹性滑动和打滑 .....  | 190 |
| 10.3.1 轮齿的受力分析 .....      | 149 | 11.4.3 带传动的应力分析 .....     | 191 |
| 10.3.2 计算载荷 .....         | 150 | 11.5 链传动的运动特性和受力分析 .....  | 192 |
| 10.4 标准直齿圆柱齿轮传动的强度        |     | 11.5.1 链传动的多边形效应 .....    | 192 |
| 计算 .....                  | 151 | 11.5.2 链传动的动载荷 .....      | 194 |
| 10.4.1 齿根弯曲疲劳强度计算 .....   | 151 | 11.5.3 链传动的受力分析 .....     | 194 |
| 10.4.2 齿面接触疲劳强度计算 .....   | 153 | 11.6 普通V带传动的设计 .....      | 195 |
| 10.4.3 齿轮传动设计参数的选择 .....  | 154 | 11.6.1 失效形式和设计准则 .....    | 195 |
| 10.5 齿轮材料的许用应力与精度选择 ..... | 156 | 11.6.2 额定功率的修正 .....      | 195 |
| 10.5.1 齿轮传动的许用应力 .....    | 156 | 11.6.3 普通V带传动的设计计算 .....  | 195 |
| 10.5.2 齿轮精度的选择 .....      | 157 | 11.6.4 V带传动的张紧装置 .....    | 201 |
| 10.6 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度        |     | 11.7 滚子链传动设计 .....        | 202 |
| 计算 .....                  | 161 | 11.7.1 滚子链传动的主要失效形式 ..... | 202 |
| 10.6.1 标准斜齿圆柱齿轮传动         |     | 11.7.2 链传动的额定功率 .....     | 202 |
| 重合度 .....                 | 161 | 11.7.3 滚子链传动的设计计算 .....   | 203 |
| 10.6.2 齿根弯曲疲劳强度计算 .....   | 161 | 11.8 滚子链的布置、张紧和润滑 .....   | 207 |
| 10.6.3 齿面接触疲劳强度计算 .....   | 163 | 11.8.1 链传动的布置 .....       | 207 |
| 10.7 标准锥齿轮传动的强度计算 .....   | 166 | 11.8.2 链传动的张紧 .....       | 207 |
| 10.7.1 设计参数 .....         | 167 | 11.8.3 链传动的润滑 .....       | 208 |
| 10.7.2 轮齿的受力分析 .....      | 167 | 11.9 挠性传动设计的实例分析 .....    | 210 |
| 10.7.3 齿根弯曲疲劳强度计算 .....   | 167 | 习题 .....                  | 211 |
| 10.7.4 齿面接触疲劳强度计算 .....   | 168 | <b>12 滑动轴承</b> .....      | 212 |
| 10.8 齿轮的结构设计 .....        | 169 | 12.1 液体动压润滑滑动轴承工作原理 ..... | 212 |

|                                     |     |                                      |     |
|-------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 12.2 滑动轴承的类型、特点及应用 .....            | 214 | 13.3.8 角接触轴承轴向载荷 $F_a$ 的<br>计算 ..... | 236 |
| 12.3 滑动轴承的结构、失效形式及<br>常用材料 .....    | 214 | 13.3.9 滚动轴承的静载荷计算 .....              | 237 |
| 12.3.1 滑动轴承的结构 .....                | 214 | 13.4 滚动轴承的组合设计 .....                 | 241 |
| 12.3.2 滑动轴承的失效形式 .....              | 218 | 13.4.1 轴承的轴向固定 .....                 | 241 |
| 12.3.3 滑动轴承的材料 .....                | 219 | 13.4.2 滚动轴承的配合与装拆 .....              | 243 |
| 12.4 滑动轴承的润滑 .....                  | 222 | 13.4.3 轴向位置及轴承游隙的调整 .....            | 243 |
| 12.4.1 润滑剂及其选择 .....                | 222 | 13.4.4 支承部分的刚度和同轴度 .....             | 243 |
| 12.4.2 润滑方法和润滑装置 .....              | 223 | 13.4.5 滚动轴承的润滑 .....                 | 244 |
| 12.4.3 不完全液体润滑轴承的设计<br>计算 .....     | 224 | 13.4.6 滚动轴承的密封 .....                 | 245 |
| 习题 .....                            | 227 | 习题 .....                             | 247 |
| <b>13 滚动轴承</b> .....                | 228 | <b>14 轴及其连接</b> .....                | 249 |
| 13.1 概述 .....                       | 228 | 14.1 概述 .....                        | 249 |
| 13.1.1 滚动轴承的组成 .....                | 228 | 14.1.1 轴的用途与分类 .....                 | 249 |
| 13.1.2 滚动轴承的分类 .....                | 229 | 14.1.2 轴的材料 .....                    | 249 |
| 13.2 常用滚动轴承的类型、代号及<br>选择 .....      | 229 | 14.2 轴的结构设计 .....                    | 252 |
| 13.2.1 常用滚动轴承的类型 .....              | 229 | 14.2.1 零件在轴上的定位 .....                | 252 |
| 13.2.2 滚动轴承的代号 .....                | 229 | 14.2.2 轴段的直径和长度的确定 .....             | 262 |
| 13.2.3 滚动轴承的选择 .....                | 232 | 14.2.3 轴的定位 .....                    | 262 |
| 13.3 滚动轴承的选择计算 .....                | 233 | 14.2.4 提高轴的强度和刚度的措施 .....            | 263 |
| 13.3.1 滚动轴承内部的载荷分布及应力变化<br>情况 ..... | 233 | 14.2.5 轴的结构工艺性 .....                 | 264 |
| 13.3.2 滚动轴承的失效形式 .....              | 233 | 14.3 轴的强度计算 .....                    | 264 |
| 13.3.3 滚动轴承的计算准则 .....              | 234 | 14.3.1 轴的强度校核计算 .....                | 264 |
| 13.3.4 轴承的寿命 .....                  | 234 | 14.3.2 轴的刚度校核 .....                  | 267 |
| 13.3.5 基本额定动载荷 .....                | 234 | 14.3.3 轴的振动及振动稳定性的<br>概念 .....       | 268 |
| 13.3.6 滚动轴承的寿命计算公式 .....            | 235 | 习题 .....                             | 273 |
| 13.3.7 滚动轴承的当量动载荷 .....             | 235 | <b>参考文献</b> .....                    | 275 |

### (1) 机械、机器、机构、构件、零件

**机械**是机器和机构的统称。

**机器**是为了某种使用目的而设计的,用来改变物料、变换能量、传递信息的装置。机器种类繁多,其构造、性能、用途千差万别,因此机械设计基础只研究组成机器的机构及机器的制造单元零件。

**机构**是用来传递和变换运动及动力的可动装置。如图 0-1 所示的内燃机汽缸,它由汽缸体(机架)11、曲轴 4、连杆 3、活塞 10、进气阀 17、排气阀 12、推杆 8 和 9、凸轮 7 及齿轮 1 和 18 等组成。当燃烧的膨胀气体活塞 10 作往复运动时,通过连杆 3 使曲轴 4 作连续转动,从而将燃气的化学能转变为机械能。为了保证曲轴的连续运转,通过齿轮 1 及 18、凸轮 7、推杆 8 及 9 的作用,使阀门按一定运动规律启闭以输入燃气和排出废气。细加分析可知,该内燃机由 3 种机构组成:由缸体(机架)11、曲轴 4、连杆 3、活塞 10 构成曲柄滑块机构,此机构将活塞的往复直线运动转变为曲轴的回转运动;由缸体(机架)11、齿轮 1 及 18 组成齿轮机构,其作用是改变转速的大小和方向;由缸体(机架)11、凸轮 7、推杆 8 及弹簧 9 组成凸轮机构,此机构将凸轮的连续转动转变为推杆的往复移动。可见从运动的角度讲,机器是由机构组成的。

**构件**是机构中的独立运动单元,在机器(机构)中作为一个整体运动。如汽缸体(机架)11、曲轴 4、连杆 3、活塞 10、进气阀 17、排气阀 12、推杆 8 和 9、凸轮 7 及齿轮 1 和 18 等都是构件。

**零件**是机器加工制造的最小单元。任何机器都是由若干零件组成的。如图 0-2 所示连杆,它由连杆体 1、连杆头 2、轴套 3、轴瓦 4、螺栓 5 和螺母 6 等零件组成。

### (2) 本课程的内容和任务

① 本课程的研究内容 机械设计基础的主要研究内容是:机械设计的基本原则、基本理论和方法;常用机构和通用零件的结构特点、工作原理和设计计算方法。简要介绍标准零件的相关国家标准及规范的运用。

② 本课程的任务 机械设计基础是一门旨在培养学生机械设计能力的技术基础课。虽然现代机械日益向高速重载、高精度、高效率等方向发展,但是对于普通工程技术人员来说,常遇到的是机械设备的使用、维护、管理以及一般机械传动的设计问题。因此要求各专业的工程技术人员都应具备一定的机械设计方面的知识。

通过本课程的学习,应使学生:

i. 掌握机构的结构和组成原理、机构的运动特性及机械动力学的基本知识,初步具备分析和设计常用机构的能力,并对确定机械运动方案有所了解;

ii. 掌握通用零件应用、特点、选用和设计的基本知识,并具有设计机械传动装置和一般简单机器的能力;

iii. 掌握运用标准、规范、手册等有关技术资料的能力。

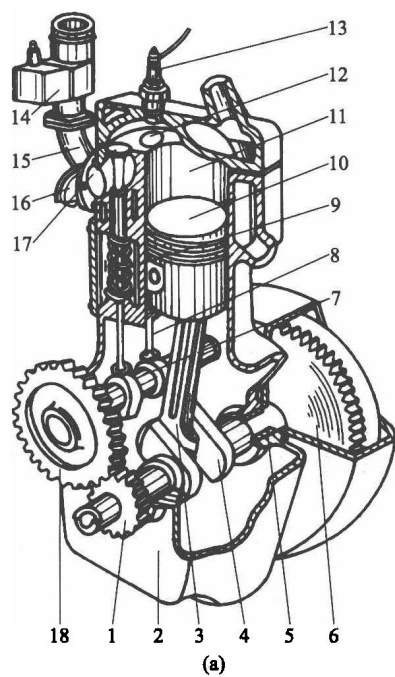


图 0-1 汽缸示意图

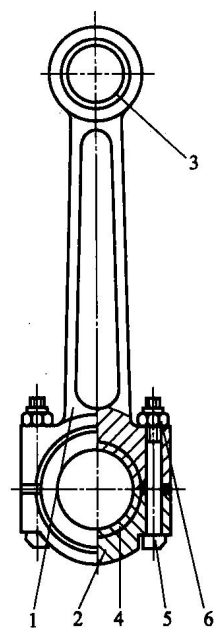
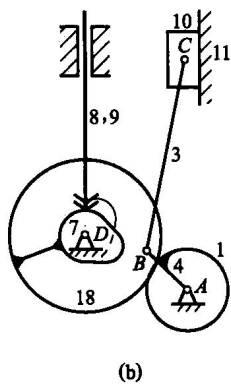


图 0-2 连杆

# 1

## 平面机构的结构分析与速度分析

### 1.1 平面机构的组成

所有构件都在同一平面内或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。

#### 1.1.1 运动副

当构件组成机构时，需要以一定的方式把各个构件连接起来，每个构件必须至少和另一个构件相连接，这种连接不能是刚性的，必须能产生相对运动。把使两个构件直接接触并能产生相对运动的连接，称为运动副。例如图 0-1 中活塞和汽缸、齿轮与齿轮的啮合等都组成运动副。

#### 1.1.2 运动副的分类

两构件组成运动副，不外乎通过点、线或面的接触来实现，按照接触情况，把运动副分为低副和高副两类。

##### 1.1.2.1 低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。平面机构中的低副又分为回转副和移动副两类。

① 回转副 组成运动副的两构件只能在一个平面内相对转动的运动副，也称为转动副、铰链，如图 1-1 所示。当其中一个构件是固定不动的称为固定铰链，两个构件都没有固定则称为活动铰链。

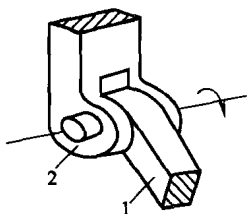


图 1-1 回转副

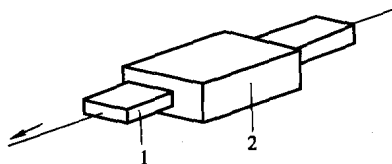


图 1-2 移动副

② 移动副 组成运动副的两构件之间只能沿某一轴线相对移动的运动副，如图 1-2 所示。

##### 1.1.2.2 高副

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副，如图 1-3 所示。

除上述平面运动副之外，机械中还常见到如图 1-4 所示的螺旋副和球面副（球铰）等。两构件之间的相对运动为空间运动的空间运动副，本章对空间运动副及空间机构不作讨论。

#### 1.1.3 运动链

构件通过运动副的连接而构成相对可动的系统称为运动链，如果组成运动链的各构件构成首末封闭的系统，则称为闭式运动链，如图 1-5 (a)、(b) 所示。如果组成运动链的各

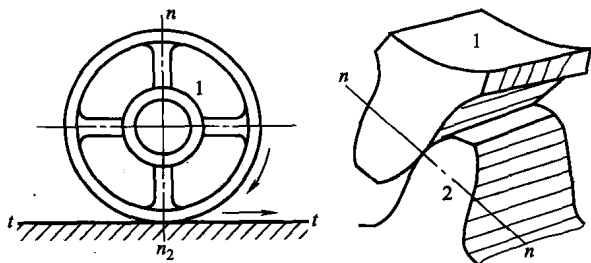


图 1-3 高副

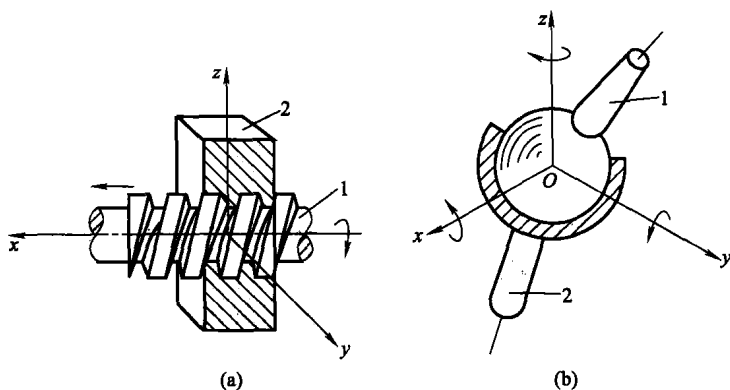


图 1-4 空间运动副

件未构成首末封闭的系统，则称为开链，如图 1-5 (c)、(d) 所示。一般机械多采用闭链，而机械手中多采用开链。

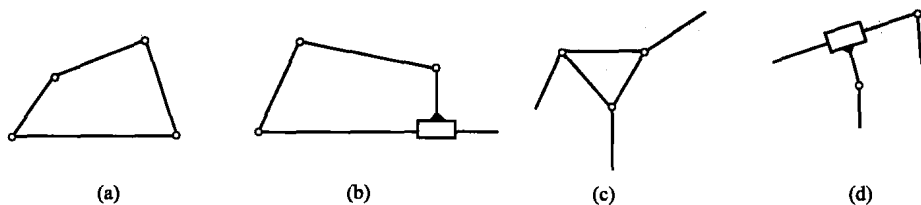


图 1-5 运动链

#### 1.1.4 机构

在运动链中，选定某一构件作为其余构件运动的参照物，则该构件称为机架，机构中的其余构件均相对于机架而运动。运动链中按给定的已知运动规律独立运动的构件称为原动件，而其余的活动构件称为从动件。从动件的运动规律决定于原动件的运动规律、机构的结构及构件的尺寸。在确定机架、原动件和从动件后，运动链就成为机构。

## 1.2 平面机构运动简图

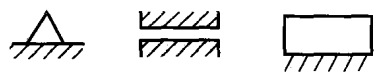
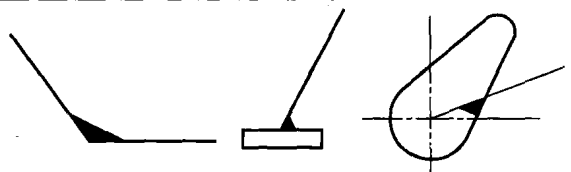
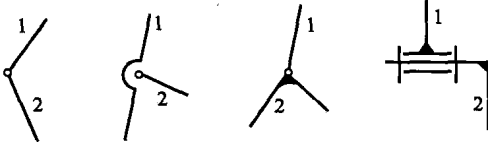
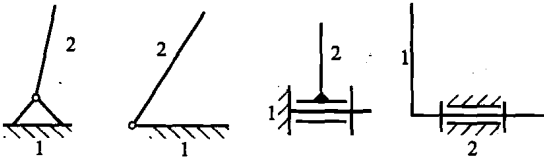
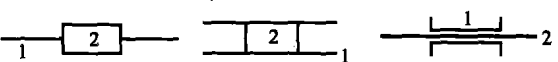
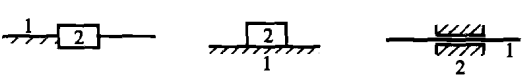
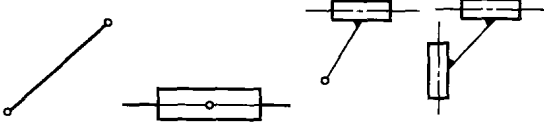
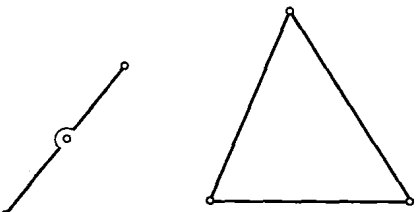
### 1.2.1 平面机构运动简图

实际机构中构件和运动副的形状和结构往往很复杂，在研究机构的运动时，为了使问题简化，有必要撇开那些与运动无关的外形和具体构造，仅用一些简单的线条和符号来表示构

件和运动副，并按比例定出构件的长度和各运动副的位置，这种说明机构运动传递关系的简化图形称为机构运动简图。如果只是为了表明机构的组成情况，可不按严格比例绘制简图，这种简图称为机构示意图。

一般构件和运动副的表示方法见表 1-1。

表 1-1 一般构件和运动副的表示方法

|          |              |                                                                                     |                              |
|----------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 杆或轴类构件   |              |    | 直线表示杆件                       |
| 固定构件(机架) |              |    | 机构简图中被加短斜线的构件就是固定构件，又称机架     |
| 同一构件     |              |    |                              |
| 回转副      | 两运动构件构成的回转副  |    | 用圆圈表示回转副，其圆心代表相对转动轴线         |
|          | 两构件之一固定时的回转副 |   |                              |
| 移动副      | 两运动构件构成的移动副  |  | 移动副的导路必须与相对移动方向一致            |
|          | 两构件之一固定时的移动副 |  |                              |
| 高副       |              |  | 两构件组成高副时，在简图中应当画出两构件接触处的曲线轮廓 |
| 两副构件     |              |  |                              |
| 三副构件     |              |  | 三条直线用三个铰链连成三角形时，只能是一个构件      |

对于机械中常用的构件和零件,有一些惯用画法,例如:用细实线或点画线画出一对节圆表示相互啮合的齿轮;用完整的轮廓曲线来表示凸轮。其它常用零部件的表示方法可参照 GB 460—1984。

### 1.2.2 平面机构运动简图的绘制

在绘制机构运动简图时,首先确定机构的原动件,然后按运动传递的路线搞清原动件的运动是怎样经过从动件传递到执行构件的,从而了解机构是由多少构件组成的,各构件之间组成了何种运动副及运动副间的相对位置,最后应用代表构件与运动副的线条及符号画出机构运动简图。下面举例说明机构运动简图的画法。

**【例 1-1】** 试绘制图 0-1 所示的内燃机的机构运动简图。

**解** 内燃机的主体机构是由汽缸 11、活塞 10、连杆 3 和曲轴 4 组成,在燃气膨胀的压力作用下,活塞 10 首先在汽缸内作直线运动,然后通过连杆 3 将运动传递给曲轴 4,使曲轴输出回转运动。为了控制进气和排气,由固联于曲轴上的小齿轮 1 带动固联在一根轴上的大齿轮 18 和凸轮 7 同时回转,最后由凸轮推动推杆 8、9 控制进气阀 12 和排气阀 17。

活塞 10 和汽缸 11 组成移动副,连杆 3 和活塞 10 组成回转副,连杆 3 和曲轴 4 组成回转副,曲轴 4 (及固联的小齿轮 1) 和汽缸组成回转副,小齿轮 1 和大齿轮 18 组成高副,大齿轮 18 (及同轴固联的凸轮) 和汽缸组成回转副,凸轮 7 和推杆 9 组成高副,推杆 9 和汽缸组成移动副。

分析后不难绘制出内燃机的运动简图,如图 0-1 (b) 所示。

## 1.3 平面机构自由度的计算

### 1.3.1 平面机构自由度的计算公式

在平面机构中的构件只作平面运动,因此每个自由构件具有 3 个自由度 (2 个移动,1 个转动)。当构件间以运动副相联时,每个低副将引入 2 个约束,使构件失去 2 个自由度,每个高副引入 1 个约束,使构件失去 1 个自由度。若机构含有  $n$  个活动构件 (不含机架),那么机构共有  $3n$  个自由度,当这些构件组成  $P_L$  个低副、 $P_h$  个高副后,则它们共引入  $2P_L + P_h$  个约束,因此机构的自由度数  $F$  为:

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

### 1.3.2 平面机构自由度的计算

由公式 (1-1) 可知,平面机构的自由度数  $F$  取决于活动构件的数目、运动副的性质 (高副或低副) 和运动副的数目。在计算实际机构自由度时,还需要注意以下几个方面的问题。

#### 1.3.2.1 复合铰链

当两个以上的构件同在一处用回转副相连接时,就构成复合铰链。如图 1-6 所示,就是三个构件组成的复合铰链,同理,由  $K$  个构件组成的复合铰链,则共有  $(K-1)$  个铰链。

**【例 1-2】** 计算图 1-7 所示连杆机构的自由度。

**解** 此机构在 A、B、C、F 四处都是由三个构件组成的复合铰链,各具有两个转动副,故机构中:

$$\begin{aligned} n &= 7, P_L = 10, P_h = 0 \\ F &= 3n - (2P_L + P_h) = 3 \times 7 - 2 \times 10 - 0 = 1 \end{aligned}$$

#### 1.3.2.2 局部自由度

机构中出现的某些构件的运动,当其对运动的传递不起作用时,称这种与其它构件运动无关的局部运动为局部自由度,用  $F'$  表示。在计算机构自由度时应予排除,即实际机构的

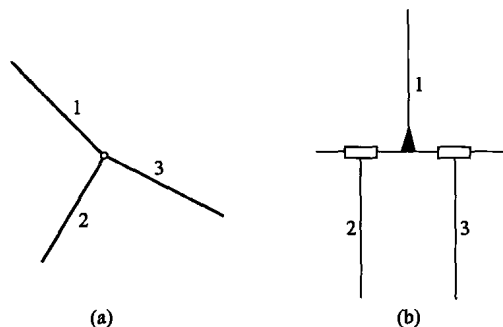


图 1-6 复合铰链

自由度计算公式为：

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

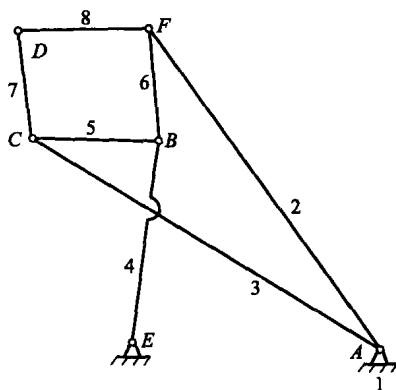


图 1-7 连杆机构

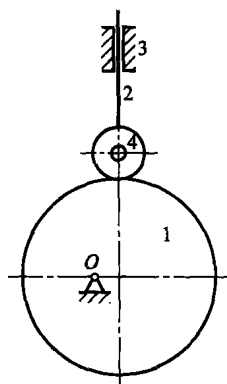


图 1-8 凸轮机构

如图 1-8 所示偏置直动滚子从动件盘形凸轮机构，为了减少高副的磨损，在推杆 2 和凸轮 1 之间加了一个滚子 4，但不论滚子 4 绕其自身轴线转与不转，都不会影响凸轮 1 推动推杆 2 的移动。因此，计算机构自由度时，滚子 4 的转动为机构中的局部自由度，应除去。

机构中：

$$n = 3, P_L = 3, P_h = 1, F' = 1$$

$$F = 3n - (2P_L + P_h) - F' = 3 \times 3 - (2 \times 3 + 1) - 1 = 1$$

### 1.3.2.3 虚约束

在一些特定情况下，机构中有些运动副引入的约束对机构自由度的限制是重复的，这些对机构运动不起限制作用的重复约束称为虚约束或称消极约束，在计算自由度时应除去不计。虚约束是构件间几何尺寸满足某些特殊条件的产物，平面机构虚约束常出现在下列场合。

i. 两个构件之间组成多个导路平行的移动副时，对构件的自由度而言只有一个移动副在起作用，其余视作为虚约束。如图 1-9 (a)、(b) 所示。

ii. 两个构件之间组成多个轴线重合的回转副，应视为一个回转副在起作用，其余是虚约束。如图 1-9 (c) 所示。

iii. 在机构中当两点的距离始终不变，而以 1 个构件 2 个低副将其相连时则引入虚约束如图 1-10 (a) 所示的平行四边形机构中，构件 BC 作平动，BC 线上各点的轨迹均为圆心在 AD 线上而半径等于  $l_{AB}$  的圆周，该机构的自由度为：

$$F = 3n - (2P_L + P_h) - F' = 3 \times 3 - (2 \times 4 + 0) - 0 = 1$$

现在如图 1-10 (b) 所示，在机构中增加 1 个构件 5 和 2 个回转副 E、F，这对机构的运

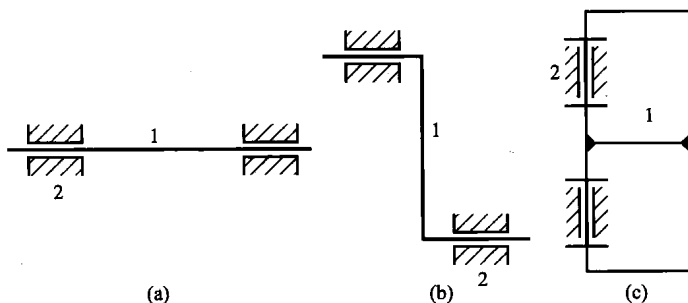


图 1-9 虚约束

动不产生任何影响，但此时按公式 (1-2) 计算此机构的自由度为：

$$F = 3n - (2P_L + P_h) - F' = 3 \times 4 - (2 \times 6 + 0) - 0 = 0$$

这是因为，机构中增加 1 个活动构件就增加了 3 个自由度，而同时增加了 2 个低副却引入了 4 个约束，因此机构中就存在 1 个虚约束。此时计算机构自由度时，应从约束数目中减去虚约束的个数。若虚约束的数目为  $P'$ ，则机构的自由度为：

$$F = 3n - (2P_L + P_h - P') - F' \quad (1-3)$$

则图 1-10 (b) 所示机构的自由度为：

$$F = 3n - (2P_L + P_h - P') - F' = 3 \times 4 - (2 \times 6 + 0 - 1) - 0 = 1$$

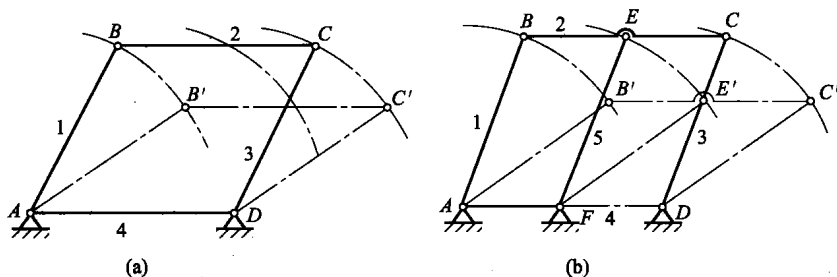


图 1-10 平行四边形机构

IV. 机构中对传递运动不起独立作用的对称部分将引入虚约束。图 1-11 所示定轴轮系中，为改善受力情况，在主动齿轮 1 和内齿轮 3 之间采用 4 个完全一样的齿轮 2、5、6、7，从运动的角度来看，齿轮 1、3 间仅需 1 个齿轮传递运动就行，其余 3 个齿轮是否存在并不影响机构的运动传递，但它们的存在却带入了虚约束。对传递运动不起独立作用的对称部分的构件数用  $n'$  表示，因为它们的存在而引入的低副数用  $P'_L$  表示，高副数用  $P'_h$  表示，则总共引入的虚约束的数目  $P'$  为：

$$P' = (2P'_L + P'_h) - 3n' \quad (1-4)$$

图 1-11 所示定轴轮系的虚约束数目为

$$P' = (2P'_L + P'_h) - 3n' = 2 \times 3 + 6 - 3 \times 3 = 3$$

机构自由度的数目为

$$F = 3n - (2P_L + P_h - P') - F' = 3 \times 6 - (2 \times 6 + 8 - 3) - 0 = 1$$

虚约束的产生多数都是在满足某特定几何形状的条件下，如果不满足特定几何条件则就变成了真约束。

#### 1.3.2.4 公共约束

在某些机构中，由于构件和运动副的特殊组合或特殊布置，产生的使机构中所有活动构件同时失去某种独立运动的共同约束称为公共约束。如图 1-12 所示的楔块机构，所有活动

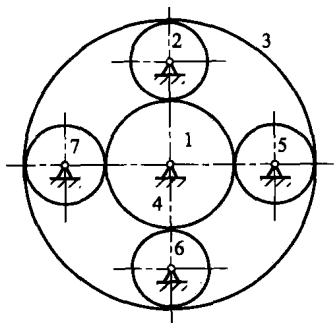


图 1-11 定轴轮系

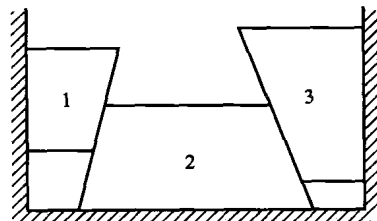


图 1-12 楔块机构

构件 1、2、3 受到使其同时失去转动自由度的公共约束，因此机构自由度为：

$$n=3, P_L=5$$

$$F=(3-1) \times n-(2-1) \times P_L=2 \times n-P_L-P_h=2 \times 3-1 \times 5=1$$

### 1.3.3 机构具有确定运动的条件

当机构自由度小于等于零时，机构不能动。当机构自由度大于零时，机构能动，但机构的运动如何才能是确定的呢？

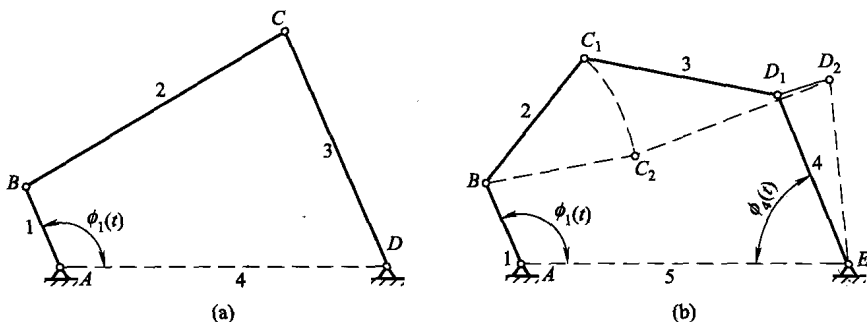


图 1-13 连杆机构简图

如图 1-13 (a) 所示的连杆机构，此机构的自由度  $F=3 \times 3-2 \times 4=1$ ，显然当给定构件 1 的角位移运动规律  $\phi_1(t)$ ，即给定一个原动件，其余从动构件 2、3 的运动就完全确定。

如图 1-13 (b) 所示的连杆机构，此机构的自由度  $F=3 \times 4-2 \times 5=2$ ，显然当给定构件 1 的角位移运动规律  $\phi_1(t)$ ，即给定一个原动件，其余从动构件 2、3、4 的运动并不确定。但是如果再给定另一个构件 4 的角位移运动规律  $\phi_4(t)$ ，即给定两个原动件，不难看出此时机构中的从动件 2、3 的运动便完全确定。

通过以上分析可知机构具有确定运动的条件是：自由度大于零且原动件数目等于机构自由度的数目。

## 1.4 平面机构的组成原理、结构分类及结构分析

### 1.4.1 平面机构的组成原理

机构原动件数目等于其所具有的自由度数。因此如果将机构的机架及与机架相连的原动件从机构中拆除，则剩余构件构成的构件组的自由度必为零。而这个自由度为零的构件组，有时还可以再拆分成更简单的自由度为零的构件组。把不能再拆的自由度为零的构件组