



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

# 机械原理

主编 郭宏亮 孙志宏



4种习题类型，巩固知识，提高实践能力

大量三维图片示例，增强实感，加深机构认识

11个开篇引例，紧扣主题，引导探秘机械原理



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

## 机械原理

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 郭宏亮 | 孙志宏 |     |
| 副主编 | 赵栋杰 | 王卫东 |     |
| 参 编 | 朱 颜 | 骆祎岚 | 吕志军 |
|     | 张建梅 | 张兰江 | 吕桂志 |
|     | 李培珍 | 赵仙花 | 李和言 |



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书是根据教育部关于机械类及近机类本科专业教育目标和培养方案及课程大纲要求编写的,共11章:绪论,机构的组成和结构分析,平面机构的运动分析,平面机构的力分析,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,轮系及其设计,其他常用机构,机械系统动力学设计,机械系统的方案设计;在各章之后附有多种形式的习题方便教与学。

本书可作为高等院校工科机械类或近机类专业的教材,也可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械原理/郭宏亮,孙志宏主编. —北京:北京大学出版社,2011.7

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-19088-3

I. ①机… II. ①郭…②孙… III. ①机构学—高等学校—教材 IV. ①TH 111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 119217 号

书 名:机械原理

著作责任者:郭宏亮 孙志宏 主编

责任编辑:郭穗娟

标准书号:ISBN 978-7-301-19088-3/TH·0244

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 邮编:100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子信箱:[pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者:河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 417 千字

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

本书是根据教育部关于机械类及近机械类本科专业教育目标和培养方案及课程大纲要求编写的。

本书共分 11 章, 其中第 1 章概述了本课程研究的对象和内容, 以及学习本课程的目的和方法; 第 2 章至第 4 章介绍了机构的结构分析、运动分析和力分析等机构分析方面的内容; 第 5 章至第 9 章介绍了机构综合方面的内容, 包括平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系和其他常用机构等; 第 10 章和第 11 章介绍了机械系统的动力学设计和方案设计。

本书力求条理清晰, 图文并茂, 注重理论与实践的紧密结合, 在内容的取舍方面本书着重于讲清机械原理的基本概念、基本理论和基本方法, 同时, 又介绍了机械原理学科的一些最新发展动向。本书采用创新型的编写体例和多样化的习题类型, 方便学生自学, 是一本具有鲜明特点的实用规划教材。

本书是按照授课学时数为 48 学时编写的, 可供相关专业的本、专科学生, 以及高职高专学生选用, 也可供相关工程技术人员参考。

本书由聊城大学郭宏亮任第一主编, 东华大学孙志宏任第二主编, 聊城大学赵栋杰和德州学院王卫东任副主编。参编老师具体分工如下: 聊城大学郭宏亮编写第 1 章, 北京理工大学李和言和聊城大学朱颜编写第 2 章, 东华大学骆伟岚编写第 3 章, 东华大学吕志军编写第 4 章, 临沂师范学院张建梅编写第 5 章, 东华大学孙志宏编写第 6 章, 德州学院王卫东和赵仙花编写第 7 章, 聊城大学赵栋杰编写第 8 章, 聊城大学张兰江编写第 9 章, 聊城大学郭宏亮和菏泽学院吕桂志编写第 10 章, 临沂师范学院李培珍编写第 11 章。

聊城大学包春江教授和青岛理工大学李长河教授为本书主审。两位老师认真审阅了全书, 提出了许多宝贵意见和建议, 提高了本书的质量, 在此向他们表示衷心的感谢。

本书在编写过程中, 得到了许多专家和同行的热情支持, 并参考和借鉴了许多国内外公开出版和发表的文献, 在此深表感谢!

由于时间仓促, 水平有限, 书中难免有不足和疏漏之处, 恳请广大读者批评指正。

编 者  
2011 年 3 月

# 目 录

|                                  |    |                                       |    |
|----------------------------------|----|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                   | 1  | 3.2 用矢量方程图解法进行机构的<br>速度与加速度分析 .....   | 34 |
| 1.1 机械原理课程的研究对象和内容 .....         | 2  | 3.2.1 利用同一构件上两点间的<br>运动矢量方程图解分析 ..... | 34 |
| 1.1.1 机械原理课程的研究对象 .....          | 2  | 3.2.2 利用两构件重合点间的运动<br>矢量方程图解分析 .....  | 35 |
| 1.1.2 机械原理课程的主要研究<br>内容 .....    | 2  | 3.3 用解析法进行机构的运动分析 .....               | 38 |
| 1.2 学习本课程的目的 .....               | 3  | 3.3.1 机构的封闭矢量位置方程式 .....              | 38 |
| 1.3 如何进行本课程的学习 .....             | 4  | 3.3.2 复数矢量法 .....                     | 39 |
| 1.4 机械原理学科发展现状简介 .....           | 5  | 3.3.3 矩阵法 .....                       | 42 |
| 小结 .....                         | 5  | 小结 .....                              | 45 |
| 第 2 章 机构的组成和结构分析 .....           | 6  | 习题 .....                              | 45 |
| 2.1 机构的组成 .....                  | 7  | 第 4 章 平面机构的力分析 .....                  | 49 |
| 2.1.1 构件 .....                   | 7  | 4.1 机构力分析的基本知识 .....                  | 50 |
| 2.1.2 运动副 .....                  | 8  | 4.1.1 作用在机械上的力 .....                  | 50 |
| 2.1.3 运动链 .....                  | 10 | 4.1.2 机构力分析的方法 .....                  | 51 |
| 2.1.4 机构 .....                   | 11 | 4.1.3 构件惯性力的确定 .....                  | 51 |
| 2.2 机构运动简图 .....                 | 11 | 4.1.4 机械效率 .....                      | 52 |
| 2.2.1 机构运动简图的定义 .....            | 11 | 4.2 不考虑摩擦时机构的力分析 .....                | 53 |
| 2.2.2 机构运动简图的绘制 .....            | 13 | 4.2.1 构件组的静定条件 .....                  | 53 |
| 2.3 机构自由度的计算 .....               | 14 | 4.2.2 用图解法作机构的动态<br>静力分析 .....        | 54 |
| 2.3.1 机构具有确定运动的条件 .....          | 14 | 4.2.3 用解析法作机构的动态<br>静力分析 .....        | 55 |
| 2.3.2 平面机构自由度的计算 .....           | 15 | 4.3 考虑摩擦时机构的受力分析 .....                | 57 |
| 2.3.3 计算平面机构自由度时应<br>注意的事项 ..... | 15 | 4.3.1 移动副中摩擦力的确定 .....                | 57 |
| 2.4 平面机构的组成原理和结构分析 .....         | 20 | 4.3.2 转动副中摩擦力的确定 .....                | 60 |
| 2.4.1 平面机构的组成原理 .....            | 20 | 4.3.3 考虑摩擦时机构的力分析 .....               | 62 |
| 2.4.2 平面机构的结构分类 .....            | 20 | 4.3.4 机械的自锁 .....                     | 63 |
| 2.4.3 平面机构的结构分析 .....            | 22 | 小结 .....                              | 65 |
| 小结 .....                         | 25 | 习题 .....                              | 65 |
| 习题 .....                         | 25 | 第 5 章 平面连杆机构及其设计 .....                | 68 |
| 第 3 章 平面机构的运动分析 .....            | 29 | 5.1 平面四杆机构的基本类型及其<br>演化 .....         | 70 |
| 3.1 用速度瞬心法作机构的速度分析 .....         | 30 | 5.1.1 平面四杆机构的基本形式 .....               | 70 |
| 3.1.1 速度瞬心及其位置的确定 .....          | 30 | 5.1.2 平面四杆机构的演化形式 .....               | 72 |
| 3.1.2 利用速度瞬心法进行机构的<br>速度分析 ..... | 32 |                                       |    |

|                                      |     |                                  |     |
|--------------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 5.2 平面四杆机构的基本知识 .....                | 75  | 习题 .....                         | 121 |
| 5.2.1 铰链四杆机构有曲柄的<br>条件 .....         | 75  | 第7章 齿轮机构及其设计 .....               | 125 |
| 5.2.2 铰链四杆机构的急回运动和<br>行程速度变化系数 ..... | 76  | 7.1 齿轮机构的特点及类型 .....             | 126 |
| 5.2.3 铰链四杆机构的传动角和<br>死点 .....        | 78  | 7.1.1 齿轮机构的特点 .....              | 126 |
| 5.2.4 铰链四杆机构的连杆曲线 .....              | 81  | 7.1.2 齿轮机构的类型 .....              | 127 |
| 5.2.5 铰链四杆机构的运动连续性 .....             | 81  | 7.2 齿轮的齿廓曲线 .....                | 128 |
| 5.3 平面四杆机构的设计 .....                  | 82  | 7.2.1 齿廓啮合基本定律 .....             | 129 |
| 5.3.1 平面连杆机构设计的基本<br>问题 .....        | 82  | 7.2.2 齿廓曲线的选择 .....              | 130 |
| 5.3.2 作图法设计四杆机构 .....                | 82  | 7.3 渐开线齿廓及其啮合特点 .....            | 130 |
| 5.3.3 解析法设计四杆机构 .....                | 85  | 7.3.1 渐开线的形成及其特性 .....           | 130 |
| 5.3.4 实验法设计四杆机构 .....                | 91  | 7.3.2 渐开线方程与渐开线函数 .....          | 131 |
| 5.4 多杆机构 .....                       | 92  | 7.3.3 渐开线齿廓的啮合特点 .....           | 131 |
| 5.4.1 多杆机构的功用 .....                  | 93  | 7.4 渐开线标准齿轮的基本参数和<br>几何尺寸 .....  | 132 |
| 5.4.2 多杆机构的分类 .....                  | 94  | 7.4.1 齿轮各部分的名称和符号 .....          | 132 |
| 小结 .....                             | 95  | 7.4.2 渐开线齿轮的基本参数 .....           | 133 |
| 习题 .....                             | 95  | 7.4.3 渐开线齿轮各部分的几何<br>尺寸 .....    | 134 |
| 第6章 凸轮机构及其设计 .....                   | 98  | 7.4.4 齿条和内齿轮的几何尺寸 .....          | 135 |
| 6.1 凸轮机构的类型及其应用 .....                | 99  | 7.5 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合<br>传动 .....   | 136 |
| 6.1.1 凸轮机构的组成及应用 .....               | 99  | 7.5.1 一对渐开线齿轮正确啮合的<br>条件 .....   | 136 |
| 6.1.2 凸轮机构的分类 .....                  | 100 | 7.5.2 齿轮传动的中心距及<br>啮合角 .....     | 136 |
| 6.2 推杆运动规律设计 .....                   | 102 | 7.5.3 一对轮齿的啮合过程及<br>连续传动条件 ..... | 138 |
| 6.2.1 凸轮机构的运动循环和<br>基本概念 .....       | 102 | 7.6 渐开线齿廓的加工与变位 .....            | 141 |
| 6.2.2 推杆常用的运动规律 .....                | 103 | 7.6.1 渐开线齿廓的加工 .....             | 141 |
| 6.2.3 推杆运动规律的选择 .....                | 109 | 7.6.2 渐开线齿廓的根切现象 .....           | 143 |
| 6.3 凸轮轮廓曲线的设计 .....                  | 110 | 7.6.3 渐开线变位齿轮 .....              | 144 |
| 6.3.1 凸轮轮廓线设计方法的基本<br>原理 .....       | 110 | 7.6.4 变位齿轮传动的类型及其<br>特点 .....    | 147 |
| 6.3.2 用图解法设计凸轮的轮廓<br>曲线 .....        | 110 | 7.7 斜齿圆柱齿轮传动 .....               | 148 |
| 6.3.3 用解析法设计凸轮的轮廓<br>曲线 .....        | 113 | 7.7.1 斜齿轮齿廓曲面的形成 .....           | 148 |
| 6.4 凸轮机构基本尺寸的确定 .....                | 117 | 7.7.2 斜齿轮的基本参数与几何<br>尺寸 .....    | 149 |
| 6.4.1 凸轮机构中的作用力和<br>凸轮机构的压力角 .....   | 117 | 7.7.3 一对斜齿轮的啮合传动 .....           | 152 |
| 6.4.2 凸轮基圆半径的确定 .....                | 118 | 7.7.4 斜齿轮的当量齿轮与当量<br>齿数 .....    | 153 |
| 6.4.3 滚子推杆滚子半径的选择 .....              | 119 | 7.7.5 斜齿圆柱齿轮的传动特点 .....          | 154 |
| 6.4.4 平底推杆平底尺寸的确定 .....              | 120 | 7.8 直齿锥齿轮传动 .....                | 155 |
| 小结 .....                             | 121 | 7.8.1 锥齿轮传动的特点 .....             | 155 |

|                                   |     |                                   |     |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 7.8.2 直齿锥齿轮的背锥及当量<br>齿轮 .....     | 156 | 9.3 不完全齿轮机构 .....                 | 203 |
| 7.8.3 直齿锥齿轮传动的几何<br>参数和尺寸计算 ..... | 157 | 9.3.1 不完全齿轮机构的组成和<br>工作原理 .....   | 203 |
| 7.9 蜗杆传动 .....                    | 159 | 9.3.2 不完全齿轮机构的类型 .....            | 203 |
| 7.9.1 蜗杆传动及其特点 .....              | 159 | 9.3.3 不完全齿轮机构的啮合<br>过程 .....      | 204 |
| 7.9.2 蜗杆蜗轮正确啮合的条件 .....           | 160 | 9.3.4 不完全齿轮机构的特点及<br>应用 .....     | 204 |
| 7.9.3 蜗杆传动的主要参数及<br>几何尺寸 .....    | 161 | 9.3.5 不完全齿轮机构的设计<br>要点 .....      | 205 |
| 小结 .....                          | 163 | 9.4 凸轮间歇运动机构 .....                | 207 |
| 习题 .....                          | 163 | 9.4.1 凸轮式间歇运动机构的<br>组成和工作原理 ..... | 207 |
| <b>第8章 轮系及其设计</b> .....           | 167 | 9.4.2 凸轮式间歇运动机构的<br>类型 .....      | 207 |
| 8.1 轮系及其分类 .....                  | 168 | 9.4.3 凸轮式间歇运动机构的<br>特点和应用 .....   | 208 |
| 8.1.1 定轴轮系 .....                  | 168 | 9.4.4 凸轮式间歇运动机构的<br>设计要点 .....    | 209 |
| 8.1.2 周转轮系 .....                  | 168 | 9.5 螺旋机构 .....                    | 209 |
| 8.1.3 复合轮系 .....                  | 171 | 9.5.1 螺旋机构的组成及特点 .....            | 209 |
| 8.2 定轴轮系的传动比 .....                | 171 | 9.5.2 螺旋机构的运动分析 .....             | 210 |
| 8.2.1 平面定轴轮系的传动比 .....            | 171 | 9.5.3 螺旋机构的设计要点 .....             | 210 |
| 8.2.2 空间定轴轮系的传动比 .....            | 172 | 9.6 组合机构 .....                    | 210 |
| 8.3 周转轮系的传动比 .....                | 173 | 9.6.1 组合机构的概念、特点和<br>应用 .....     | 211 |
| 8.4 复合轮系的传动比 .....                | 176 | 9.6.2 机构的组合方式 .....               | 211 |
| 8.5 轮系的功用 .....                   | 177 | 9.6.3 组合机构的类型 .....               | 213 |
| 8.6 行星轮系的效率 .....                 | 180 | 小结 .....                          | 217 |
| 8.7 行星轮系的类型选择及其设计 .....           | 183 | 习题 .....                          | 217 |
| 8.7.1 行星轮系的类型选择 .....             | 183 | <b>第10章 机械系统动力学设计</b> .....       | 219 |
| 8.7.2 行星轮系中各轮齿数的<br>确定 .....      | 184 | 10.1 机械的运转过程 .....                | 220 |
| 8.7.3 行星轮系的均载装置 .....             | 186 | 10.1.1 启动阶段 .....                 | 220 |
| 小结 .....                          | 188 | 10.1.2 稳定运转阶段 .....               | 220 |
| 习题 .....                          | 188 | 10.1.3 停车阶段 .....                 | 221 |
| <b>第9章 其他常用机构</b> .....           | 191 | 10.2 机械的等效动力学模型 .....             | 221 |
| 9.1 棘轮机构 .....                    | 192 | 10.2.1 机械运动方程的一般<br>表达式 .....     | 221 |
| 9.1.1 棘轮机构的组成和工作<br>原理 .....      | 192 | 10.2.2 等效动力学模型的<br>建立 .....       | 222 |
| 9.1.2 棘轮机构的类型 .....               | 192 | 10.3 机械运动方程式的建立及<br>求解 .....      | 224 |
| 9.1.3 棘轮机构的特点和应用 .....            | 195 |                                   |     |
| 9.1.4 轮齿式棘轮机构的设计<br>要点 .....      | 196 |                                   |     |
| 9.2 槽轮机构 .....                    | 198 |                                   |     |
| 9.2.1 槽轮机构的工作原理 .....             | 198 |                                   |     |
| 9.2.2 槽轮机构的类型 .....               | 199 |                                   |     |
| 9.2.3 槽轮机构的特点和应用 .....            | 199 |                                   |     |
| 9.2.4 槽轮机构的设计 .....               | 200 |                                   |     |

|                             |     |                               |     |
|-----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 10.3.1 机械运动方程式的建立 .....     | 224 | 11.2.2 机械总体方案设计的思想与方法 .....   | 251 |
| 10.3.2 机械运动方程式的求解 .....     | 225 | 11.2.3 机械系统总体方案设计准则 .....     | 253 |
| 10.4 机械的平衡 .....            | 229 | 11.3 机械系统的执行构件设计和原动机选择 .....  | 255 |
| 10.4.1 转子的平衡 .....          | 229 | 11.3.1 执行构件的运动设计 .....        | 255 |
| 10.4.2 平面机构的平衡 .....        | 232 | 11.3.2 机构的选型 .....            | 259 |
| 10.5 机械运转速度波动及调节 .....      | 238 | 11.3.3 原动机的类型及其运动参数的选择 .....  | 262 |
| 10.5.1 周期性速度波动及其调节 .....    | 238 | 11.3.4 机械的工作循环图 .....         | 265 |
| 10.5.2 飞轮设计 .....           | 241 | 11.4 机械传动系统的方案设计 .....        | 269 |
| 10.5.3 非周期性速度波动及其调节 .....   | 243 | 11.4.1 机械传动系统方案设计的内容与步骤 ..... | 269 |
| 小结 .....                    | 244 | 11.4.2 机械传动类型的选择 .....        | 270 |
| 习题 .....                    | 245 | 11.4.3 传动链的方案设计 .....         | 273 |
| 第 11 章 机械系统的方案设计 .....      | 247 | 小结 .....                      | 276 |
| 11.1 机械系统的设计过程 .....        | 248 | 习题 .....                      | 276 |
| 11.2 机械系统的总体方案设计 .....      | 250 | 参考文献 .....                    | 278 |
| 11.2.1 机械总体方案设计的目的和内容 ..... | 250 |                               |     |

# 第1章 绪论

## 教学目标

本章主要讲述机械原理的研究对象和研究内容、学习本课程的目的以及如何进行本课程的学习。最后,本章对机械原理学科的发展现状做简要介绍,通过本章学习要达到以下目标。

- (1)了解机械原理课程的研究对象和内容。
- (2)了解学习本课程的目的,掌握学习本课程的方法。
- (3)了解机械原理学科的发展趋势。

## 教学要求

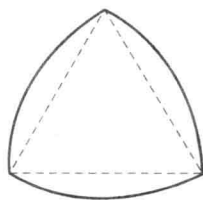
| 知识要点        | 能力要求             | 相关知识        |
|-------------|------------------|-------------|
| 研究对象、研究内容   | 了解机械原理课程的研究对象和内容 | 内燃机         |
| 机械原理的学习目的   | 了解学习本课程的目的       |             |
| 学习机械原理的方法   | 掌握学习本课程的方法       |             |
| 机械原理学科的发展现状 | 了解机械原理学科的发展趋势    | 计算机、动力学、机构学 |



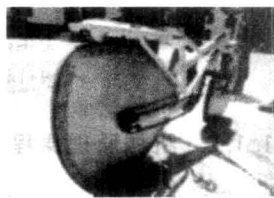
## 引例

不同的机器往往由有限的几种常用机构组成,如内燃机、压缩机和冲床等的主体机构都是曲柄滑块机构。这些机构的运动不同于一般力学上的运动,它只与其几何约束有关,而与其受力、构件质量和时间无关。1875年,德国的机械工程专家F. 勒洛把上述共性问题从一般力学中独立出来,建立构件、运动副、运动链和机构运动简图等概念,编著了《理论运动学》一书,创立了机构学的基础。书中提出的许多概念、观点和研究方法至今仍在沿用。1841年,英国的R. 威利斯发表了《机构学原理》。19世纪中叶以来,机械动力学也逐步形成。进入20世纪,出现了把机构学和机械动力学合在一起研究的机械原理。1934年,中国的刘仙洲所著的《机械原理》一书出版。1969年,在波兰成立了国际机构和机器原理协会,简称IFTOMM。

以等边三角形每个顶点为圆心,以边长为半径,在另两个顶点间作一段弧,三段弧围成的曲边三角形叫勒洛三角形。勒洛三角形就是由德国的F. 勒洛首先发现的,并以他的名字命名的。图1.1(a)所示就是一个勒洛三角形。勒洛三角形是一种十分典型的定宽曲线,和圆一样具有定宽性。勒洛三角形在工程学中应用十分广泛。我们常常见到的窨井盖都是圆形的,而在美国旧金山,有一些市政检修井井盖的形状却是勒洛三角形的,其最大优点是这种形状的井盖和圆形的窨井盖一样绝不会掉到井里去。利用勒洛三角形的定宽性,人们还可以把车轮做成勒洛三角形,而在骑行的过程中



(a)



(b)

图 1.1 勒洛三角形及其应用

又绝对不会颠簸，如图 1.1(b)所示。

## 1.1 机械原理课程的研究对象和内容

### 1.1.1 机械原理课程的研究对象

机械原理课程研究的对象是机械，机械是“机器”和“机构”的总称。

机器是根据某种使用要求而设计的一种执行机械运动的装置，是具有确定运动的构件组合体，可用来变换或传递能量、物料和信息。如电动机或发电机用来变换能量，加工机械用来变换物料的状态，起重运输机械用来传递物料，计算机用来变换信息等。

机构是用来传递与变换运动和力的可动的构件组合体，如常见的齿轮机构、连杆机构、凸轮机构、螺旋机构、带和链传动机构等。

在日常生活和生产中，人们都接触过许多机器，例如缝纫机、洗衣机、复印机、各种机床、汽车、拖拉机、起重机等。各种不同的机器，具有不同的形式、构造和用途，但通过分析可以看到，这些不同的机器，就其组成来说，却都是由各种机构组合而成的。图 1.2 所示的内燃机就包含着由壳体 1、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4 所组成的连杆机构，由小齿轮 6 和大齿轮 7 所组成的齿轮机构，以及由凸轮 5 和阀门推杆 8 所组成的凸轮机构等。

从上述分析可知，各种机器的主要组成部分都是各种机构，用以实现机器的动作要求。一部比较复杂的机器，可能包含多种类型的机构，而简单的机器，也可能只包含一种机构。可以说，机器是一种可用来变换或传递能量、物料与信息的机构或机构的组合。这些机构都是本课程研究的主要对象。

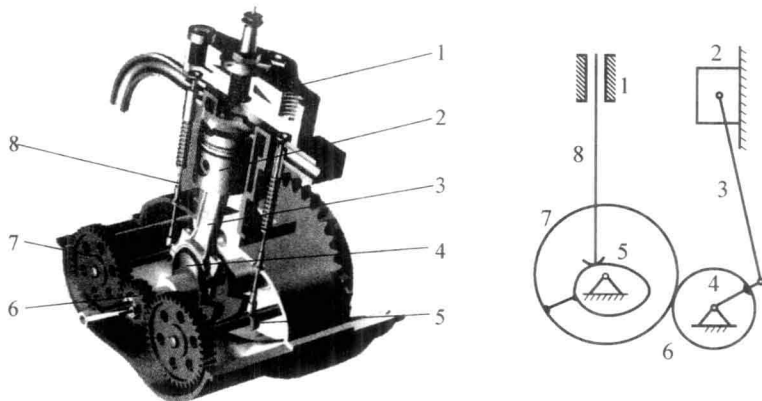


图 1.2 内燃机

1—壳体；2—活塞；3—连杆；4—曲轴；5—凸轮；6—小齿轮；7—大齿轮；  
8—阀门推杆

### 1.1.2 机械原理课程的主要研究内容

本课程研究的内容主要包括以下几个方面。

(1) 机构结构分析的基本知识。首先研究机构是怎样组成的，机构的组成情况对其运

动的影响,以及机构具有确定运动的条件等;其次研究机构的结构分类、机构的组成原理和方法;最后研究如何用简单的图形把机构的结构状况表示出来,以便据此对机构进行运动及动力分析,即所谓机构运动简图的绘制问题。

(2)机构的运动分析。研究并介绍机构在给定原动件运动的条件下,求解其他构件的位移、轨迹、速度、加速度的基本原理和方法,进而考察输出构件的运动变化规律。对机构进行运动分析,将为机构受力和动力学分析提供基础,也是设计新机械、合理使用现有机械的必需步骤和重要依据。

(3)机械动力学。机械动力学研究的内容主要包括两个方面:其一是分析机器在运转过程中其各构件的受力情况,以及这些力的做功情况,以便了解机构上的动压力及其变化情况、机械的效率和动力性能等;其二是研究机器在已知外力作用下的运动、机器速度波动的调节和不平衡惯性力的平衡问题。

(4)常用机构的分析与设计。尽管机器的种类不同,但它们的主要组成机构是有限的,也可以是相同的。所以,对连杆机构、凸轮机构、齿轮机构及间歇机构等常用机构的运动及工作特性进行分析,并探索为了满足一定的运动和工作要求来设计这些机构的方法,便是十分必要的。

(5)机械系统的方案设计。概略研究机械的设计过程、机构的选型、组合、变异及机械传动系统的设计等问题,通过学习初步具有拟订简单机械运动方案的能力。

综上所述可知,本课程研究的内容可以概括为两个方面,第一是介绍对已有机械进行结构、运动和动力分析的方法,第二是探索根据运动和动力性能方面的要求设计新机械的途径。不过,此处应当指出,在本课程中对机械设计的研究,只限于根据运动和动力要求,对机构各部分的尺度关系进行综合而不涉及各个零件的强度计算、材料选择,以及其具体的结构形状和工艺要求等问题。所以本课程中的机构设计又常称为机构综合。机械原理课程研究的内容可概括为机构分析与综合两部分。

## 1.2 学习本课程的目的

首先,机械原理是机械类及近机械类专业的学生进入专业课前必修的一门重要的技术基础课,起着承上启下的作用。它主要是在高等数学、普通物理、理论力学等理论基础课后,将这些理论与实际机械相结合,探讨机械内部基本规律的基础性理论课程。本课程的学习,将为学习机械设计、机床、机械制造工艺及其他机械性质的专业课程打下基础。课程所学内容是研究现有机件运动、工作性能和设计、发明新机械的知识基础。它对机械类及近机械类各专业的专业课学习、毕业设计乃至参加实际工作都有直接的和长远的意义,起着非常重要的作用。

由于机械原理研究内容的相对独立性,它在工程技术中也发展为许多独立实用的分支,如机器人机构学、仿生机构学、自动控制机构学等,它们与其他学科相结合,在工程技术中发挥着重要作用。

其次,机械原理在发展国民经济方面 also 具有重要意义。为了提高我国的综合国力,就要在一切生产部门实现生产的机械化和自动化,这就需要创造出大量的种类繁多的新颖优良的机械来装备各行各业,需要对现有设备进行革新改造和合理使用,以充分发挥其潜

力。为了完成这些任务,有关机械原理的知识是必不可少的。因为,虽然任何机械的改革和创造都是设计、工艺等各种机械知识的综合运用,但机械原理的知识却是最为基本的。当我们掌握了本课程所介绍的内容之后,我们就有可能为现有机械设备的合理改进和根据需要创造新的机械提出切实可行的建议。

最后,对于一个使用机器的工作人员来说,要想充分发挥机械设备的潜力,关键在于了解机器的性能。学习机械原理,掌握机构分析的方法,才能进而了解机器的性能和更合理地使用机器。

总之,本课程所学的内容,一方面是有关的专业课程的基础,而同时其本身也是一个工科学生所应具备的关于机械的一般基础知识。

### 1.3 如何进行本课程的学习

由于机械原理课程既不同于理论基础课程,又有别于专业课,因此在学习本课程的过程中,一方面要着重搞清基本概念,理解基本原理,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。具体强调以下几点。

(1)回顾先修课的相关内容。机械原理作为一门技术基础课,其先修课是高等数学、物理、理论力学和工程制图等,其中,理论力学与本课程的学习关系最为密切。要适时回顾先修课中的有关内容(如刚体的平面运动、点的复合运动、动能定理、运动瞬心等),避免由于基本概念和基础理论的生疏而影响学习的深入。但同时应注意,本课程在将先修课的基本理论应用于工程实践问题时,也形成了自己的体系和方法。因此,要注意掌握本课程不同于先修课的一些方法和惯例。

(2)加强形象思维能力。从基础课到技术基础课,学习的内容变化了,学习方法也应有所转变,重要的一点,是要在发展逻辑思维的同时,重视形象思维能力的培养。本课程中的机构大都是用简图来表示的,初学者缺乏对实际机械的感性认识,可能会觉得抽象。面对一幅机构简图,不能只看成是几段静止不动的平面线条,要想象出它们的立体形状,要把机构和运动紧密联系起来。要解决工程实际问题,进行创造性设计,单靠逻辑思维是远远不够的,必须发展形象思维能力。

(3)注重培养解决实际问题的能力。学习知识和培养能力,二者是相辅相成的,但后者比前者更为重要。学习本课程时,应把重点放在掌握研究问题的基本思路和方法上,着重于能力的培养。解决工程实际问题往往可以采用多种方法,所得结果一般也不是唯一的,这就涉及分析、对比、判断和决策的问题,而这也是一个工程技术人员所必须具备的基本素质。

(4)要善于将理论知识和工程实际相联系。本课程是一门理论性比较强的技术基础课,其研究对象和内容就是工程实际上常用的机械及其相关知识,因此学习过程中应把基本原理和方法与研究实际机构和机器密切联系起来。善于用所学知识观察和分析日常生产、生活中所遇到的各种机构和机器,要重视与本课程密切相关的实验、课程设计、机械设计大奖赛、科技创新活动等。而实践活动也可以丰富巩固自己的知识,培养动手和创新能力,为将来顺利就业打下坚实基础。

## 1.4 机械原理学科发展现状简介

当今世界正经历着一场新的技术革命。新概念、新理论、新方法、新工艺不断出现。作为向各工业部门提供装备的机械工业,也得到迅猛发展。

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。有的需用于宇宙空间,有的要在深海作业,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,有的又要作微米级的微位移,如此等等。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。

计算机在机构分析与综合中的应用越来越广泛。现代计算机技术迅猛发展,像UG、ADAMS、SolidWorks等各种机械建模与分析软件越来越成熟,在机械行业中得到了越来越广泛的应用,在优化设计、概率设计、可靠性设计等方面提出了多种便于对机械进行分析和综合的数学工具,编制了许多大型通用或专用的计算程序。

传统机构学研究取得了许多新进展。在理论上,建立了多刚体系统动力学建模、机械振动理论、键合图理论等机构动力分析和综合的通用方法;在连杆机构方面,展开了对多自由度机构、多杆机构、可控机构等复杂机构分析与综合的研究;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,推进了对高速齿轮、精密齿轮、微型齿轮的研制;设计、制造高质量的弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的成套技术是目前齿轮啮合理论中最高水平的成就。在凸轮机构方面,重视对高速凸轮机构的研究,在推杆运动规律的开发、选择和组合上做了很多工作,获得了动力性能优越的凸轮机构;等等。

机械学研究领域得到了极大拓展。基于纳米尺度的微机电系统及其尺度效应问题、机械传动的信息化与智能化、并联机构、仿生机构、变胞机构、机电液综合机构等都成了当今机械学研究的热门领域。

总之,作为机械原理学科,其研究领域十分广阔,内涵非常丰富。在机械原理的各个领域中,每年都有大量的内容新颖的文献资料涌现。但是,作为一门技术基础课程,根据教学要求,人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题所必需的知识基础。

## 小 结

机械原理的研究对象是机械,研究内容是机构的结构、运动、动力学、常用机构和机械系统的方案设计。本课程的学习目的是本课程对于后续专业课的学习、对国民经济的发展和了解机械性能具有重要意义。学习本课程要掌握必要的选修课程和具备较高的形象思维能力,并善于将理论和实践结合起来。机械原理学科的发展在概念、理论、方法、工艺等方面出现了新趋势。

# 第 2 章 机构的组成和结构分析

## 教学目标

机构是用来传递运动和力的构件系统。为了合理设计机构和创新机构，认识机构的组成及其了解其基本知识是十分必要的，通过本章学习要达到以下目标。

- (1)掌握机构的组成，掌握机构、运动副、运动链、机构、约束和自由度等基本概念。
- (2)理解常用机构的机构运动简图的画法。
- (3)掌握机构具有确定运动的条件及平面机构的自由度计算。
- (4)了解平面机构组成的基本原理及结构分类。

## 教学要求

| 知识要点                   | 能力要求                                                 | 相关知识               |
|------------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| 机构组成的基础知识              | 掌握构件、运动副、运动链、机构、约束和自由度等基本概念                          | 内燃机、运动副            |
| 机构运动简图                 | 掌握机构运动简图的画法                                          | 颚式破碎机、牛头刨床         |
| 机构具有确定运动的条件及平面机构的自由度计算 | (1)掌握机构具有确定运动的条件<br>(2)掌握平面机构的自由度计算、计算平面机构自由度时应注意的事项 | 自由度、复合铰链、局部自由度、虚约束 |
| 平面机构的组成原理、结构分类、结构分析    | (1)理解平面机构组成的基本原理及结构分类<br>(2)掌握平面机构的结构分析              | 基本杆组               |



## 引例

图 2.1(a)是惠更斯摆钟的基本结构。惠更斯摆钟是根据伽利略发现的单摆等时性原理设计的。钟的机械动力由重锤提供，擒纵器的摆动频率由单摆控制。一个与擒纵器心轴连在一起的 L 形杆伸向单摆，L 形杆的杆头分叉，刚好卡住刚性的摆棍，单摆摆动时带动 L 形杆转动，从而把摆动的频率传递给擒纵器。摆钟的优越性在于，单摆的频率与推动它的初始力量无关，而只与重力和摆长有关，这样守时机构就不会受到动力机构的干扰。之后，惠更斯又发明了一种游丝—摆轮装置。游丝是一个螺旋形的弹簧，连在摆轮上，当摆轮向一个方向转动，使游丝发生形变，产生一个力拉动摆轮回转，在转过平衡位置后，游丝再一次发生形变，又产生一个反向的力，重新把摆轮拉回来，这样就能维持一种能够周期性的振动，像横摆、单摆一样，用来控制擒纵器的频率。游丝—摆轮与单摆一样独立于动力机构，其频率不受其他机械部分影响，而利用游丝—摆轮制成的钟表相对于摆钟的优点主要在于不依靠重力，因此只要设计合理，那么其在移动中仍可准确走时，也就意味着相对更加便携。后来英国人哈里森发明的第一台能够精确运行的航海钟就采用这种机构，现代闹钟[图 2.1(b)]也采用这种机构。

机械钟包含多种机构，结构复杂，是人类智慧的结晶。

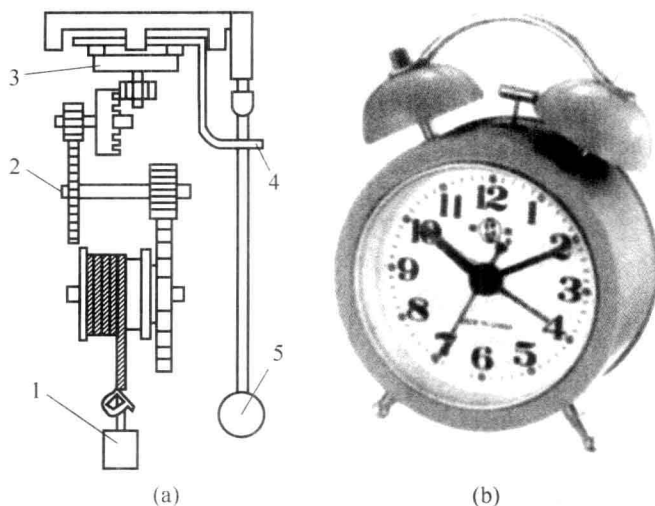


图 2.1 惠更斯摆钟与闹钟

1—重锤；2—主轴；3—擒纵器；4—L形杆；5—单摆

日新月异发展的科学技术，要求设计出更新更多的机械产品，并实现生产工艺的自动化。在着手设计新机构和新机器时，要了解机构的组成要素，判断所设计的机构能否运动，判断在什么条件下才具有确定的相对运动。研究机构结构分析的目的之一就在于探讨机构运动的可能性及其具有确定运动的条件。

在设计新机构或对现有机构进行分析时，为了便于研究，在了解机构组成的基础上，需要先绘制其机构运动简图。如何正确绘制机构运动简图是研究机构组成的目的之二。

现今已经在机器上应用的机构，其形式和具体结构是各种各样的，如果对它们逐个分析研究是十分烦琐的。因此研究机构结构的目的之三就在于了解机构的组成原理将繁多的机构加以分类，并按这种分类来建立运动分析和动力分析的一般方法。

## 2.1 机构的组成

### 2.1.1 构件

任何机器都是由许多零件组合而成的。如果将一部机器进行拆卸，拆到不可再拆的最小单元就是零件。所以从制造工艺角度来看，零件是加工的最小单元。图 2.2 所示的内燃机就是由汽缸、活塞、连杆体、连杆头、曲轴、齿轮等一系列零件组成的。在这些零件中，有的是作为一个独立的运动单元体而运动的，有的则常常由于结构和工艺上的需要，而与其他零件刚性地连接在一起作为一个整体而运动，例如图中的连杆就是由连杆体、连杆头、螺栓、螺母、垫圈等零件刚性地连接在一起组成的一个刚性系统(图 2.3)，机器运

动时是作为一个整体而运动的。这些刚性地连接在一起的零件共同组成一个独立的运动单元体。机器中每一个独立的运动单元体称为一个构件。所以,构件是组成机构的基本要素之一,是运动的最小单元。所以从运动的观点来看,也可以说任何机器都是由若干个(两个以上)构件组合而成的。

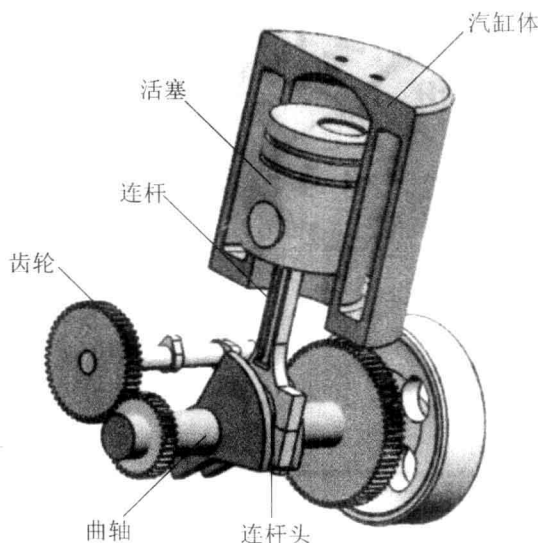


图 2.2 内燃机

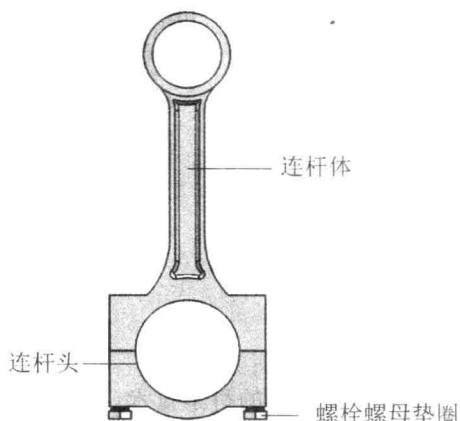


图 2.3 连杆

### 2.1.2 运动副

当由构件组成机构时,需要以一定的方式把各个构件彼此连接起来。被连接的两构件间仍能产生某些相对运动,这种连接显然不能是刚性的。机构中这种使两个构件相互直接接触而又允许产生某些相对运动的可动的连接称为运动副,而把两构件上能够直接参加接触而构成运动副的表面称为运动副元素。例如图 2.2 所示的内燃机中汽缸与活塞的连接,它们既相互接触,同时又允许活塞相对于汽缸往复移动,这种连接就是运动副。可见,运动副也是组成机构的又一基本要素,构件组成运动副后,构件的独立运动性能就受到了限制。

由理论力学可知,构件作任意复杂平面运动时,其运动可以分解为 3 个独立运动,构件作空间运动时,其运动可以分解为 6 个独立运动,人们把构件所具有的独立运动的数目称为自由度。两构件在未构成运动副之前,在空间中他们共有 6 个相对自由度,当两构件构成运动副之后,它们之间的相对运动将受到约束。运动副的自由度(以  $f$  表示)和约束数(以  $s$  表示)的关系为  $f+s=6$ 。两构件构成运动副后所受到的约束数最少为 1,最多为 5。运动副常根据引入约束的数目进行分类,把引入一个约束的运动副称为 I 级副,引入两个约束的运动副称为 II 级副,依次类推。

两个构件组成运动副,其接触部分不外乎是点、线或面,而构件之间允许产生的相对运动与它们的接触情况有关。运动副还常根据构成运动副的两构件的接触特性进行分类。凡两构件通过单一点或线接触而构成的运动副统称为高副(图 2.6 两齿轮轮齿的啮合所示

的运动副)。通过面接触而构成的运动副统称为低副(图 2.4 轴与轴承的配合、图 2.5 滑块与导轨的接触所示的运动副)。它们的运动副元素分别为圆柱面和圆孔面、棱槽面和棱柱面及两齿廓曲面。

运动副还可根据构成运动副的两构件之间的相对运动形式的不同来进行分类。把两构件之间的相对运动为转动的运动副称为转动副或回转副,也称铰链(图 2.4);相对运动为移动的运动副称为移动副(图 2.5);相对运动为球面运动的运动副称为球面副(图 2.7);相对运动为螺旋运动的运动副称为螺旋副(图 2.8)。

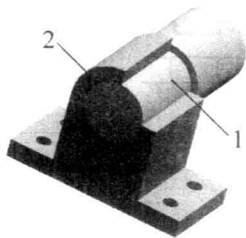


图 2.4 轴与轴承

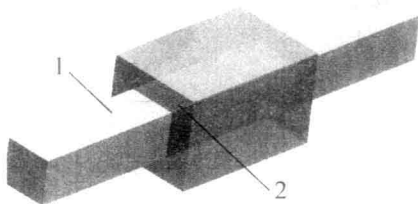


图 2.5 滑块与导轨

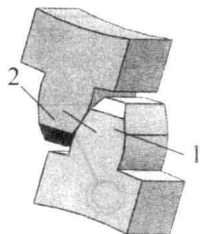


图 2.6 齿轮轮齿啮合

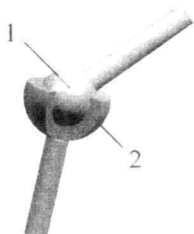


图 2.7 球面副

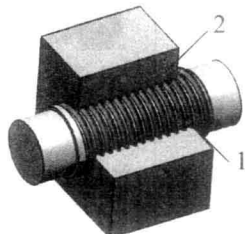


图 2.8 螺旋副

为了使运动副元素始终保持接触,运动副必须封闭。凡借助于构件的结构形状所产生的几何约束来封闭的运动副称为几何封闭或形封闭运动副(图 2.4、图 2.5),借助于重力、弹簧力、压力等来封闭的运动副称为力封闭运动副(图 2.6)。

此外,还可把构成运动副的两构件之间的相对运动为平面运动的运动副统称为平面运动副(图 2.4、图 2.5、图 2.6),两构件之间的相对运动为空间运动的运动副统称为空间运动副(图 2.7 为球面副,球 1 与球碗 2 之间的相对运动为绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴线旋转的球面运动;图 2.8 为螺旋副,螺杆 1 与螺母 2 的相对运动为螺杆轴线的移动和绕该轴线的转动)。

为了便于表示运动副和绘制机构运动简图,运动副常常用简单的图形符号来表示(已制定有国家标准,见 GB/T 4460—1984)。表 2-1 为常用运动副的类型及其代表符号(图中画有阴影线的构件代表固定构件)。