



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

# 机械基础及机械实训

■ 邓铭瑶 主 编  
■ 陈 蓓 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

# 机械基础及机械实训

主 编 邓铭瑶  
副主 编 陈 蓓 李迎春 李石德  
编 审 黄小霞 章 章  
主 审 毛汝生



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。本书根据热能动力设备与应用专业各岗位的培养目标以及高职学生的特点，按照各岗位的知识 and 能力需求，在总结了 30 多年来机械基础教学经验的基础上，结合当前高职教改中提出的高职课程的能力本位项目化改造的要求和课程的一体化教学发展趋势进行编写的，旨在培养学生机械基础方面的基本能力和工程素质。

全书内容分 6 个模块，共 22 个课题和 4 个实训项目，主要内容包括：理论力学基础知识（静力分析基础、平面力系、摩擦、运动学和动力学基础知识），材料力学基础知识（材料力学的基本概念、轴向拉伸与压缩、剪切和挤压、圆轴的扭转、弯曲、组合变形、压杆稳定），常用机构（平面连杆机构、凸轮机构、棘轮机构和槽轮机构），机械传动（带传动和链传动、齿轮传动、蜗杆传动、轮系、螺纹连接与螺旋传动），轴系零、部件（轴和轴毂连接、轴承、联轴器和离合器），机械实训（V 带传动的拆装、减速器的拆装及轴系结构分析、多级水泵的拆装及轴系结构分析、滑动轴承的拆装和调整分析）。书中每个课题均设有小结、思考与练习。

本书可作为高职高专院校热能动力设备与应用专业、机电类和近机类等工科各专业机械基础课程的教材（60~80 学时），也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

机械基础及机械实训/邓铭瑶主编. —北京：中国电力出版社，2011

普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育

ISBN 978-7-5123-1875-5

I. ①机… II. ①邓… III. ①机械学—高等职业教育—教材 IV. ①TH11

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 125798 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 497 千字

定价 36.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前言

本书根据高等职业院校热能动力类职业岗位对工程力学、组成机器的常用机构和通用零件等基础知识的基本要求,结合目前职业教育改革的方向,以及作者多年的教学经验及教改实践编写而成,旨在培养学生机械基础方面的基本能力和工程素质,以利于本课程一体化教学的组织实施。

本书在编写中充分考虑培养对象的职业性、实践性和岗位能力的要求,理论部分以够用以及能满足岗位和职业能力的需要为原则,以提高学习者的职业实践能力和职业素质为宗旨,强化职业技术实践活动,突出职业教育的特色。在教学安排上,可以通过实训的方式使学生通过机械设备或装置的拆装来训练岗位工作技能。与此同时,通过实训报告的各项结果分析学习相关的理论知识,以满足课程一体化教学的要求。书中所选用的例题和习题,大多数与生产实践和工程实际紧密联系,其难易程度以满足教学要求为主。书中带“\*”的部分为选学内容,可供教师组织教学和学生自学。

本书是一本将工程力学、机构与零件等内容有机结合的综合性教材,在总体结构和内容上突出重点,讲清难点,力求取材恰当,符合学生的认识规律。同时,注意理论联系实际,学以致用。为便于学生自学,文字叙述深入浅出,简练严谨。本书在编写的体例上,加设了模块引言、课题概述、学习目标、学习重点、教学建议、单元小结、思考与练习等,供教师组织教学和指导学生使用。

本书可作为高职高专院校热能动力设备与应用专业、机电类和近机类等工科各专业机械基础课程的教材,也可作为成人教育以及相关职业岗位的培训教材,还可供有关工程技术人员参考或自学。

本书模块1由李迎春编写,模块2由陈蓓编写,模块3由黄小霞编写,模块4、6由邓铭瑶编写,模块5由李石德编写,全书由邓铭瑶任主编、陈蓓任副主编。本书由郑州电力专科学校毛汝生教授担任主审。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏,衷心希望读者对本书提出批评指正。

编者

2011年8月

# 目 录

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 模块1 理论力学基础知识 .....        | 1  |
| 引言 .....                  | 1  |
| 课题1.1 静力分析基础 .....        | 2  |
| 1.1.1 静力学基本概念 .....       | 2  |
| 1.1.2 力对点之矩 .....         | 7  |
| 1.1.3 力偶的概念和性质 .....      | 7  |
| 1.1.4 力在坐标轴上的投影 .....     | 9  |
| 1.1.5 约束与约束反力 .....       | 10 |
| 1.1.6 物体的受力分析和受力图 .....   | 14 |
| 小结 .....                  | 16 |
| 思考与练习 .....               | 17 |
| 课题1.2 平面力系 .....          | 20 |
| 1.2.1 平面力系的概念 .....       | 20 |
| 1.2.2 力的平移定理及其应用 .....    | 22 |
| 1.2.3 平面力系的简化结果 .....     | 23 |
| 1.2.4 平面力系的平衡方程及其应用 ..... | 24 |
| 小结 .....                  | 29 |
| 思考与练习 .....               | 30 |
| 课题1.3 摩擦 .....            | 32 |
| 1.3.1 滑动摩擦 .....          | 32 |
| 1.3.2 摩擦角和自锁 .....        | 34 |
| 1.3.3 考虑滑动摩擦时的平衡问题 .....  | 35 |
| 1.3.4 槽面摩擦简介 .....        | 37 |
| 小结 .....                  | 38 |
| 思考与练习 .....               | 38 |
| 课题1.4 运动学和动力学基础知识 .....   | 40 |
| 1.4.1 运动学知识及其应用 .....     | 40 |
| 1.4.2 动力学基本知识及其应用 .....   | 42 |
| 小结 .....                  | 44 |
| 思考与练习 .....               | 45 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 模块 2 材料力学基础知识 .....         | 46  |
| 引言 .....                    | 46  |
| 课题 2.1 材料力学的基本概念 .....      | 47  |
| 2.1.1 材料力学的基本概念 .....       | 47  |
| 2.1.2 构件的基本变形种类 .....       | 48  |
| 小结 .....                    | 50  |
| 思考与练习 .....                 | 50  |
| 课题 2.2 轴向拉伸与压缩 .....        | 50  |
| 2.2.1 轴向拉伸与压缩的内力和应力 .....   | 51  |
| 2.2.2 拉伸与压缩时的变形 .....       | 55  |
| 2.2.3 材料的力学性能 .....         | 57  |
| 2.2.4 杆件拉伸与压缩时的强度计算 .....   | 61  |
| 小结 .....                    | 65  |
| 思考与练习 .....                 | 66  |
| 课题 2.3 剪切和挤压 .....          | 68  |
| 2.3.1 剪切的观念和实用计算 .....      | 69  |
| 2.3.2 挤压的观念和实用计算 .....      | 70  |
| 小结 .....                    | 73  |
| 思考与练习 .....                 | 73  |
| 课题 2.4 圆轴的扭转 .....          | 74  |
| 2.4.1 圆轴扭转的外力和内力 .....      | 75  |
| 2.4.2 圆轴扭转的强度计算 .....       | 77  |
| 2.4.3 圆轴扭转的变形和刚度计算 .....    | 82  |
| 小结 .....                    | 84  |
| 思考与练习 .....                 | 84  |
| 课题 2.5 弯曲 .....             | 86  |
| 2.5.1 平面弯曲的概念 .....         | 87  |
| 2.5.2 梁横截面上的内力——剪力和弯矩 ..... | 89  |
| 2.5.3 梁纯弯曲时横截面上的正应力 .....   | 95  |
| 2.5.4 弯曲正应力强度计算 .....       | 98  |
| 2.5.5 提高梁抗弯能力的措施 .....      | 102 |
| 2.5.6 梁的弯曲变形及刚度校核 .....     | 104 |
| 小结 .....                    | 106 |
| 思考与练习 .....                 | 107 |
| 课题 2.6 组合变形 .....           | 110 |
| 2.6.1 组合变形的概念 .....         | 111 |
| 2.6.2 弯曲与拉伸（压缩）组合变形 .....   | 112 |
| 2.6.3 弯曲与扭转组合变形 .....       | 116 |
| 小结 .....                    | 120 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 思考与练习 .....                 | 120 |
| 课题 2.7 压杆稳定 .....           | 122 |
| 2.7.1 压杆稳定概述 .....          | 123 |
| 2.7.2 临界力和临界应力 .....        | 124 |
| 2.7.3 压杆的稳定性计算 .....        | 126 |
| 2.7.4 提高压杆稳定性的措施 .....      | 127 |
| 小结 .....                    | 128 |
| 思考与练习 .....                 | 128 |
| <b>模块 3 常用机构</b> .....      | 131 |
| 引言 .....                    | 131 |
| 课题 3.1 平面连杆机构 .....         | 132 |
| 3.1.1 概述 .....              | 132 |
| 3.1.2 机构及机构运动简图 .....       | 133 |
| 3.1.3 平面连杆机构 .....          | 141 |
| 小结 .....                    | 149 |
| 思考与练习 .....                 | 150 |
| 课题 3.2 凸轮机构 .....           | 152 |
| 3.2.1 凸轮机构的组成、应用和特点 .....   | 152 |
| 3.2.2 凸轮机构的类型 .....         | 153 |
| 3.2.3 从动件常用的运动规律 .....      | 154 |
| * 3.2.4 图解法设计凸轮轮廓 .....     | 156 |
| 小结 .....                    | 161 |
| 思考与练习 .....                 | 161 |
| 课题 3.3 棘轮机构和槽轮机构 .....      | 163 |
| 3.3.1 棘轮机构的组成和工作原理 .....    | 163 |
| 3.3.2 棘轮机构的类型和应用 .....      | 164 |
| 3.3.3 槽轮机构的组成和工作原理 .....    | 165 |
| 3.3.4 槽轮机构的特点和应用 .....      | 166 |
| 小结 .....                    | 167 |
| 思考与练习 .....                 | 167 |
| <b>模块 4 机械传动</b> .....      | 168 |
| 引言 .....                    | 168 |
| 课题 4.1 带传动和链传动 .....        | 169 |
| 4.1.1 带传动的工作原理、类型和特点 .....  | 169 |
| 4.1.2 V 带和 V 带轮 .....       | 171 |
| 4.1.3 带传动的受力分析和弹性滑动 .....   | 173 |
| * 4.1.4 带传动的应力分析和设计准则 ..... | 176 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| * 4.1.5 V带传动的设计计算 .....           | 179 |
| 4.1.6 带传动的张紧、安装和维护 .....          | 184 |
| 4.1.7 链传动的类型和应用 .....             | 185 |
| 小结 .....                          | 189 |
| 思考与练习 .....                       | 190 |
| 课题 4.2 齿轮传动 .....                 | 191 |
| 4.2.1 齿轮传动的类型、特点及应用 .....         | 192 |
| 4.2.2 渐开线齿轮的齿廓与啮合特性 .....         | 193 |
| 4.2.3 渐开线标准直齿圆柱齿轮的主要参数和几何尺寸 ..... | 195 |
| 4.2.4 渐开线标准直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....      | 199 |
| 4.2.5 渐开线齿轮的加工 .....              | 200 |
| 4.2.6 斜齿圆柱齿轮和圆锥齿轮传动 .....         | 204 |
| * 4.2.7 圆柱齿轮传动的设计 .....           | 207 |
| 小结 .....                          | 222 |
| 思考与练习 .....                       | 223 |
| 课题 4.3 蜗杆传动 .....                 | 224 |
| 4.3.1 蜗杆传动的特点和类型 .....            | 225 |
| 4.3.2 蜗杆传动的主要参数和几何尺寸 .....        | 226 |
| 4.3.3 蜗杆传动的失效形式、材料和结构 .....       | 229 |
| * 4.3.4 蜗杆传动的受力分析与强度计算 .....      | 232 |
| 4.3.5 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算 .....      | 234 |
| 小结 .....                          | 237 |
| 思考与练习 .....                       | 237 |
| 课题 4.4 轮系 .....                   | 238 |
| 4.4.1 轮系的类型、特点和功用 .....           | 238 |
| 4.4.2 轮系的传动比计算 .....              | 241 |
| 小结 .....                          | 246 |
| 思考与练习 .....                       | 246 |
| 课题 4.5 螺纹连接与螺旋传动 .....            | 247 |
| 4.5.1 螺纹的基本知识 .....               | 248 |
| 4.5.2 螺纹连接的基本类型和元件 .....          | 252 |
| 4.5.3 螺纹连接的预紧、防松和强度计算 .....       | 255 |
| 4.5.4 螺旋传动 .....                  | 258 |
| 小结 .....                          | 260 |
| 思考与练习 .....                       | 261 |
| 模块 5 轴系零、部件 .....                 | 262 |
| 引言 .....                          | 262 |
| 课题 5.1 轴和轴毂连接 .....               | 263 |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.1.1 轴的功用和分类 .....           | 263 |
| 5.1.2 轴的材料 .....              | 265 |
| * 5.1.3 轴的设计 .....            | 266 |
| 5.1.4 轴毂连接 .....              | 271 |
| 小结 .....                      | 275 |
| 思考与练习 .....                   | 275 |
| 课题 5.2 轴承 .....               | 276 |
| 5.2.1 滑动轴承的类型、特点及其结构 .....    | 277 |
| 5.2.2 轴瓦的结构和材料 .....          | 279 |
| 5.2.3 滑动轴承的润滑与维护 .....        | 280 |
| 5.2.4 滚动轴承的结构、类型及其特性 .....    | 282 |
| * 5.2.5 滚动轴承的设计 .....         | 286 |
| 5.2.6 滚动轴承的固定、预紧与装拆及其润滑 ..... | 288 |
| 小结 .....                      | 293 |
| 思考与练习 .....                   | 294 |
| 课题 5.3 联轴器和离合器 .....          | 295 |
| 5.3.1 联轴器 .....               | 296 |
| 5.3.2 离合器 .....               | 299 |
| 小结 .....                      | 301 |
| 思考与练习 .....                   | 302 |
| <b>模块 6 机械实训</b> .....        | 303 |
| 引言 .....                      | 303 |
| 实训 6.1 V 带传动的拆装 .....         | 304 |
| 6.1.1 实训目的 .....              | 304 |
| 6.1.2 实训要求 .....              | 304 |
| 6.1.3 实验设备及工具 .....           | 304 |
| 6.1.4 实训步骤 .....              | 304 |
| 6.1.5 实训报告 .....              | 304 |
| 实训 6.2 减速器的拆装及轴系结构分析 .....    | 305 |
| 6.2.1 实训目的 .....              | 305 |
| 6.2.2 实训要求 .....              | 305 |
| 6.2.3 实验设备及工具 .....           | 305 |
| 6.2.4 实验步骤 .....              | 305 |
| 6.2.5 实训报告 .....              | 305 |
| 实训 6.3 多级水泵的拆装及轴系结构分析 .....   | 307 |
| 6.3.1 实训目的 .....              | 307 |
| 6.3.2 实训要求 .....              | 307 |
| 6.3.3 实验设备及工具 .....           | 307 |

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| 6.3.4  | 实验步骤 .....         | 307 |
| 6.3.5  | 实训报告 .....         | 307 |
| 实训 6.4 | 滑动轴承的拆装和调整分析 ..... | 309 |
| 6.4.1  | 实训目的 .....         | 309 |
| 6.4.2  | 实训要求 .....         | 309 |
| 6.4.3  | 实验设备及工具 .....      | 309 |
| 6.4.4  | 实验步骤 .....         | 309 |
| 6.4.5  | 实训报告 .....         | 309 |
| 附录 A   | 梁在简单载荷作用下的变形 ..... | 310 |
| 附录 B   | 型钢表 .....          | 312 |
| 参考文献   | .....              | 318 |

## 模块1 理论力学基础知识

### 引言

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

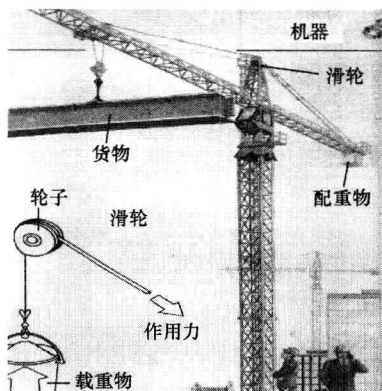
理论力学包括以下三个主要部分：

(1) 静力学。研究物体平衡时所应满足的条件；物体受力的分析方法及力系的简化等。

(2) 运动学。主要研究物体运动的几何性质，即从几何学的角度研究物体的机械运动，而不考虑物体运动变化与其本身的质量以及所受的力之间的关系。

(3) 动力学。研究物体运动与作用力之间的关系。

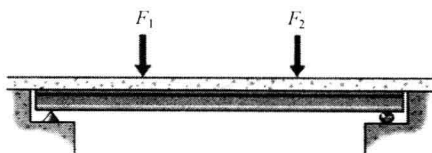
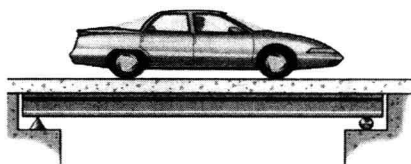
图1-0-1所示为工程结构实例。本模块主要介绍静力学概念、静力学公理、物体的受力分析、力系的简化、力的平衡条件及其应用的基本知识，以及物体的运动、物体的速度、物体的加速度等理论力学的基础知识，探讨物体的运动变化规律及物体运动与作用力之间的关系，为学习有关的后续课程打好必要的理论基础。



建筑塔吊



吊装汽轮机转子



桥梁结构及受力示意图

图1-0-1 工程结构实例

通过本模块知识的学习，学生应熟练掌握物体的受力情况，并能进行受力分析。掌握物体机械运动的基本规律和分析方法，掌握应用理论力学的理论和方法分析、计算物体的受力和运动速度等，解决有关的工程实际问题。学生要认真学习本课题相关知识，勤于思考，并坚持理论联系实际的原则，注重理解和运用，不断提高分析问题、解决问题的能力。

## 课题 1.1 静 力 分 析 基 础



### 课 题 概 述

本课题主要介绍静力学的基本概念、公理、物体的受力分析、力矩和力偶等基本概念和性质,力在坐标轴上的投影及合力投影定理;阐述了工程中几种常见的典型约束类型和约束力的分析;最后,介绍物体受力分析的基本方法及受力图,它是解决力学问题的重要环节,必须予以充分重视。



### 学 习 目 标

- (1) 深入理解力、刚体、平衡、约束等重要概念。
- (2) 深入理解静力学公理或力的基本性质。
- (3) 掌握力矩、力偶、力偶矩等基本概念和性质、合力矩定理。
- (4) 熟练掌握力的合成、力的投影、力对轴之矩等静力学基本运算。
- (5) 掌握约束的基本特征及约束反力的画法。
- (6) 熟练而正确地对单个物体与物体系统进行受力分析,画出受力图。



### 学 习 重 点

- (1) 力、刚体、平衡、力矩、力偶和约束等概念。
- (2) 静力学公理。
- (3) 力的合成及力的投影,力矩及力偶矩。
- (4) 柔性约束、光滑支承面约束、光滑铰链约束的特征及其反力的画法。
- (5) 单个物体及物体系统的受力分析及受力图的画法。



### 教 学 建 议

本课题介绍概念较多,要讲清这些概念的定义,并理解其意义。例如:属于力的概念,如力系、等效力系、合力、分力、平衡力系、主动力、约束反力、作用力、反作用力、内力、外力等。静力学公理是最普遍、最基本的客观规律,是静力学的基础,要讲透,并使学生深入理解和熟记 4 条公理与 2 个推论。多举例题讲清楚约束反力的确定方法和受力图的正确画法。

#### 1.1.1 静力学基本概念

##### 1.1.1.1 力的概念

(1) 力的定义。力是物体之间相互的机械作用,这种作用将使物体的机械运动状态发生变化,或者使物体产生变形。前者称为力的外效应,后者称为力的内效应。

因为力是物体间的相互机械作用,所以力不能离开物体而单独存在。

(2) 力的三要素。实践证明,力对物体的作用效应,取决于力的大小、方向(包括方位和指向)和作用点的位置,称为力的三要素。在这三个要素中,改变其中任何一个,也就改变了力对物体的作用效应。

(3) 力是矢量。在力学中有两类量：标量和矢量。只考虑大小的量，称为标量，如长度、时间、质量等；既考虑大小又考虑方向的量，称为矢量，如力和速度等。

矢量可用一带箭头的有向线段来表示，如图 1-1-1 所示。线段的起点  $A$  或终点  $B$  表示力的作用点，箭头的指向表示力的方向，线段的长度（按一定的比例尺）表示力的大小。通过力的作用点沿



图 1-1-1 力的表示方法

力的方向的直线，称为力的作用线。本模块中矢量用黑体大写英文字母表示，如  $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{G}$  等，而以普通大写英文字母表示该矢量的大小，如  $F$ 、 $P$ 、 $G$  等，手写时可在字母上加一带箭头的横线表示矢量，如  $\vec{F}$ 、 $\vec{P}$ 、 $\vec{G}$  等。

(4) 力的单位。力的国际制单位是牛顿或千牛顿，其符号为  $\text{N}$  或  $\text{kN}$ 。

#### 1.1.1.2 平衡的概念和平衡力系

静力学研究物体机械运动的特殊情况，即物体的平衡问题。所谓平衡，是指物体相对于地球保持静止或做匀速直线运动状态。若作用在物体上的力系使该物体处于平衡状态，称此力系为平衡力系；平衡力系所需满足的条件，称为力系的平衡条件。应当指出，任何物质均处于绝对的运动中，平衡只是相对的。

#### 1.1.1.3 等效力系的概念及载荷的分类

(1) 等效力系。若两个力系分别作用在同一物体上，产生的效应相同时，称此二力系互为等效力系。若一个力与一个力系等效，则称此力为该力系的合力，力系中的各力为该合力的分力。

(2) 载荷的分类。工程上常把作用于物体上的力称为载荷，根据力的作用方式不同，可分为集中载荷和分布载荷。

1) 集中载荷：工程中，构件之间的相互机械作用，其接触处往往占据了一定的面积，相互作用的力也分布在一定的面积上，当力的作用范围与构件的尺寸相比是一个很小量时，可以简化为作用在一个点上，此力称为集中载荷。

2) 分布载荷：当载荷的作用范围与构件的尺寸相比是一个相当的量时，若简化为集中载荷，则会改变原载荷对物体作用的内效应。因此，不能简化为集中载荷，而应直接按分布载荷处理。均匀分布的载荷，称为分布载荷。在研究力对物体作用的外效应时，分布载荷与其合成结果的作用效应相同，两者可以互换；在分析构件的内效应时，分布载荷与其合成结果的作用效应则有很大的区别，两者不能互换。工程力学中，常见的有线均布力 [见图 1-1-2 (a)]，其线分布密度用  $q$  表示，单位为  $\text{N/m}$  或  $\text{kN/m}$ 。合力的大小  $F=ql$ ，方向与  $q$  的方向一致，作用点在均布力跨度的中点，如图 1-1-2 (b) 所示。

#### 1.1.1.4 刚体的概念

在静力学和运动学中，为使问题的研究得到简化，常把研究的物体假想为刚体。所谓刚体，是指在外力作用下，大小和形状始终保持不变的物体。由经验可知，在日常生活和工程实际中，许多物体在外力作用下所产生的变形一般都是很小的，物体的微小变形对于平衡或运动的研究结果的影响也是很小的，甚至可以忽略不计，因此，刚体是一种抽象化的概念。

但是，必须指出，实际中任何物体受到力的作用后，其大小和形状都要发生改变，真正的刚体是不存在的，它只是对实际物体抽象化得到的理想力学模型。如在材料力学中，在研

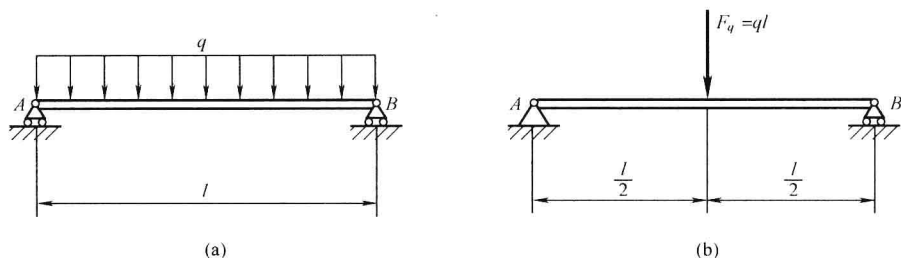


图 1-1-2 线均布力及其合力的作用点

究力物体所产生的内效应时,变形这一因素转化为主要因素,这时就不能再把物体视为刚体了。

### 1.1.1.5 静力学公理

所谓公理,就是符合客观现实的真理。静力学公理就是人们对客观现实的长期观察、分析、抽象、归纳得出的结论,它的正确性只能用实验的方法证实,而不能用更基本的原理来证明。静力学公理概括了力的一些基本性质,是建立静力学全部理论的基础。

公理一:二力平衡公理。

当一个刚体受两个力作用而处于平衡状态时,其充分与必要的条件是:这两个力大小相等,作用于同一直线上,且方向相反,简称等值、反向、共线,如图 1-1-3 所示。

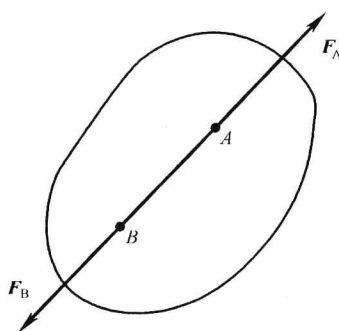


图 1-1-3 刚体在二力作用下的平衡

这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系在平衡时所必须满足的条件,它是静力学中最基本的平衡条件。

在实际应用中,若只在两个力作用下平衡的构件,称为二力构件。当构件呈杆状时,若略去杆的自重和伸缩,则此构件称为二力杆。

二力构件的受力特点是:所受二力方向必沿其两作用点的连线。

应用二力构件的概念,可以很方便地判定结构中某些构件的受力方向。如图 1-1-4 (a)、(b) 所示 CD 杆,再如图 1-1-4 (c) 中所示的三铰拱中的 AB 部分,当车辆不在该部分上且不计自重时,它只能通过 A、B 两点受力,是一个二力构件,故 A、B 两点的作用力必沿 AB 连线的方向。

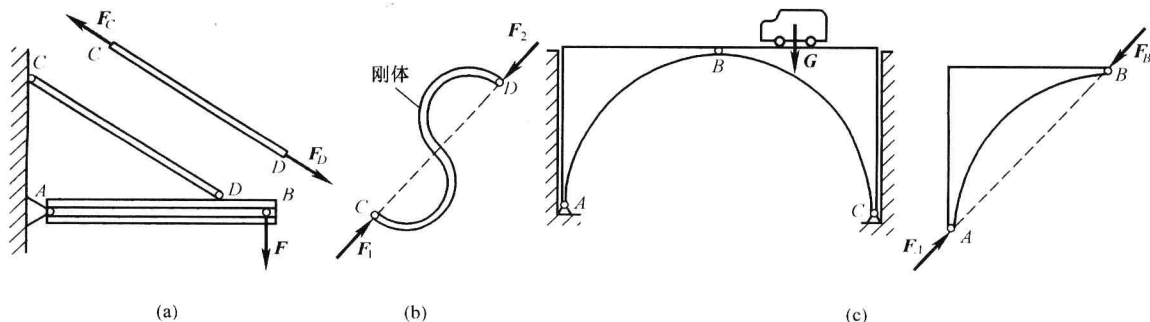


图 1-1-4 托架、刚体和三角拱中的二力构件

公理二：加减平衡力系公理。

在刚体的原有力系中，加上或减去任一平衡力系，不改变原力系对刚体的作用效应。这一公理的正确性是显而易见的，因为一个平衡力系是不会改变物体的原有状态的。这个公理常被用来简化某一已知力系。依据这一公理，可以得出一个重要推论：力的可传性原理，作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任一点，而不会改变原力对刚体的作用效应。

例如，图 1-1-5 中在车后 A 点加一水平力推车，与在车前 B 点加一水平力拉车，其效果是一样的。应当指出，力的可传性原理只适用于刚体，对变形体不适用。

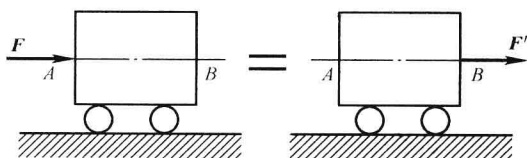


图 1-1-5 力的可传性原理示意

公理三：力的平行四边形法则。

作用于物体同一点的两个力可以合成为一个

合力，合力也作用于该点，其大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线所确定，即合力矢等于这两个分力矢的矢量和。如图 1-1-6 所示，其矢量表达式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1-1)$$

从图 1-1-7 可以看出，在求合力时，实际上只需作出力的平行四边形的一半，即一个三角形就行了。为了使图形清晰起见，通常把这个三角形画在力所作用的物体之外。如图 1-1-7 (a) 所示，其方法是自任意点 O 先画出一力矢  $F_1$ ，然后再由  $F_1$  的终点画一力矢  $F_2$ ，最后由 O 点至力矢  $F_2$  的终点作矢量  $F_R$ ，它就代表  $F_1$ 、 $F_2$  的合力。合力的作用点仍为汇交点 O。这种作图方法称为力的三角形法则。在作力三角形时，必须遵循的原则为：分力力矢平行移动且首尾相接，但次序可变，合力力矢与最后分力箭头相接，如图 1-1-7 (b) 所示。此外还应注意，力三角形只表示力的大小和方向，而不表示力的作用点或作用线。

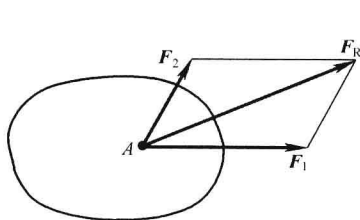


图 1-1-6 力的平行四边形法则示意

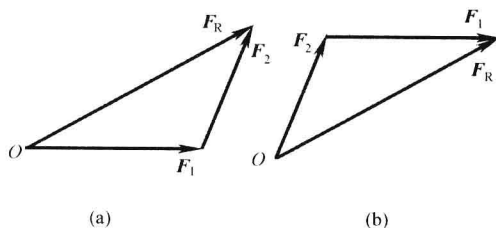


图 1-1-7 力的三角形法则示意

力的平行四边形法则总结了最简单的力系简化规律，它是较复杂力系合成的主要依据，如图 1-1-8 (a) 所示。

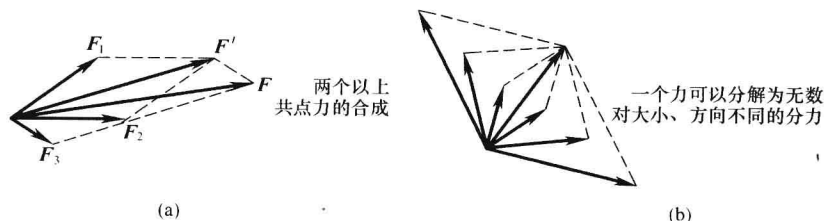


图 1-1-8 力的合成与分解示意

力的分解是力的合成的逆运算,因此也是按平行四边形法则来进行的,但为不定解,如图 1-1-8 (b) 所示。

在工程实际中,通常分解为方向互相垂直的两个分力。例如,在进行直齿圆柱齿轮的受力分析时,常将齿面的法向正压力  $F$  分解为圆周力  $F_t$  (推动齿轮旋转的即沿齿轮分度圆圆周切线方向的分力) 和径向力  $F_r$  (指向轴心的压力),如图 1-1-9 所示。若已知  $F$  与分度圆圆周切向所夹的压力角为  $\theta$ , 则有

$$F_t = F \cos \theta \quad F_r = F \sin \theta$$

运用公理三可以得到下面的推论:

物体受三个力作用而平衡时,此三个力的作用线必汇交于一点,此推论称为三力平衡汇交定理,读者可自行证明。

公理四:作用与反作用定律。

如图 1-1-10 (a) 所示,用绳子悬挂一个重物,绳子给重物一个向上的力  $F$ ,同时重物也给绳子一个向下的力  $F'$ , $F$  与  $F'$  等值、反向、共线,如图 1-1-10 (b) 所示。若绳子被剪断,则  $F$  与  $F'$  同时消失。

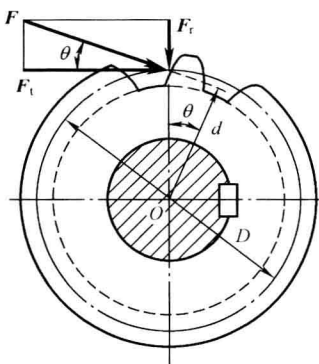


图 1-1-9 力分解的工程应用

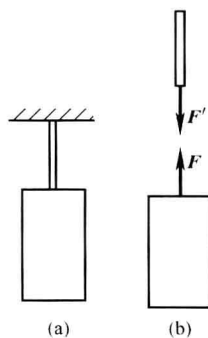


图 1-1-10 作用力与反作用力

由此得作用与反作用定律:两个物体间的作用力与反作用力,总是同时存在、同时消失,且大小相等、方向相反,其作用线沿同一直线,分别作用在这两个物体上。

作用与反作用公理概括了自然界中物体间相互作用力的关系,表明作用力与反作用力永远是成对出现的。已知作用力就可以知道反作用力,两者总是同时存在,又同时消失的。

必须强调指出,作用力和反作用力是分别作用于两个不同的物体上的,因此,绝不能认为这两个力相互平衡,这与二力平衡公理中的两个力有着本质上的区别。

公理五:刚化公理。

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看作刚体模型的条件。如图 1-1-11 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚体,其平衡状态保持不变。若绳索

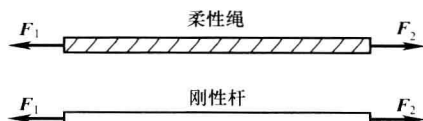


图 1-1-11 作用于变形体上的二力

在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。由此可见,刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力



学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

### 1.1.2 力对点之矩

#### 1.1.2.1 力矩的概念

用扳手拧紧螺母时,作用于扳手上的力  $F$  使扳手绕  $O$  点转动,如图 1-1-12 所示,其转动效应不仅与力的大小和方向有关,而且与  $O$  点到力作用线的距离  $h$  有关。把乘积  $Fh$  冠以适当的正负号,称为力  $F$  对  $O$  点之矩,简称力矩,它是力  $F$  使物体绕  $O$  点转动效应的度量,用  $M_O(F)$  表示,即

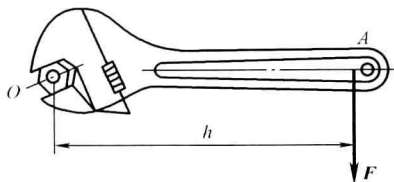


图 1-1-12 扳手拧母

$$M_O(F) = \pm Fh \quad (1-1-2)$$

$O$  点称为矩心,  $h$  称为力臂。式中的正负号用来区别力  $F$  使物体绕  $O$  点转动的方向,并规定:力  $F$  使物体绕  $O$  点逆时针转动时为正,反之为负。

力矩在下列两种情况下等于零:力等于零;力的作用线通过矩心。

力矩的单位为  $\text{N} \cdot \text{m}$  或  $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

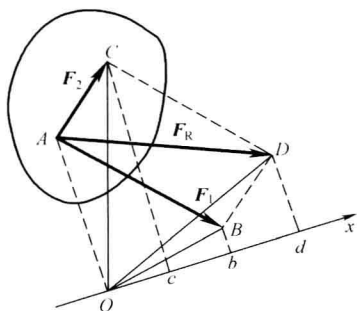


图 1-1-13 合力矩定理示意

#### 1.1.2.2 合力矩定理

如图 1-1-13 所示,设力  $F_1$ 、 $F_2$  作用于物体上  $A$  点,其合力为  $F_R$ 。任取一点  $O$  为矩心,可以证明

$$M_O(F_R) = M_O(F_1) + M_O(F_2)$$

一般,若在  $A$  点作用有  $n$  个力,则有

$$\begin{aligned} M_O(F_R) &= M_O(F_1) + M_O(F_2) + \cdots + M_O(F_n) \\ &= \sum M_O(F_i) \end{aligned} \quad (1-1-3)$$

即合力对平面上任一点之矩等于各分力对同一点之矩的代数和。这就是合力矩定理。

对于有合力的其他力系,合力矩定理同样成立。

**【例 1-1-1】** 如图 1-1-9 所示,一齿轮受到与它啮合的另一齿轮的作用力  $F=1\text{kN}$  的作用,已知压力角  $\theta=20^\circ$ ,节圆直径  $D=0.16\text{m}$ ,求力  $F$  对齿轮轴心  $O$  之矩。

**解** 用两种方法计算力  $F$  对  $O$  点之矩。

方法一 由力矩的定义,得

$$M_O(F) = -Fd = -F\left(\frac{D}{2}\right)\cos\theta = -75.2(\text{N} \cdot \text{m})$$

方法二 将力  $F$  分解为圆周力  $F_t = F\cos\theta$ 、径向力  $F_r = F\sin\theta$ 。由合力矩定理,得

$$M_O(F) = M_O(F_t) + M_O(F_r)$$

因力  $F_r$  通过矩心  $O$ ,故  $M_O(F_r) = 0$ ,于是

$$M_O(F) = M_O(F_t) = -F_t \frac{D}{2} = -(F\cos\theta) \frac{D}{2} = -75.2(\text{N} \cdot \text{m})$$

### 1.1.3 力偶的概念和性质

#### 1.1.3.1 力偶的概念

在日常生活和工程实际中,经常会遇到物体受大小相等、方向相反、作用线互相平行的两个力作用的情形。例如,汽车司机用双手转动方向盘,如图 1-1-14 (a) 所示;钳工用