

新世纪高职高专课程与实训系列教材

# 工程力学

石怀荣 陈文平 主 编  
张玉杰 周梦瑜 关玉琴 副主编  
王沛禹 贾祥云 顾红军



- 面向实用型技能人才培养
- 案例导向型的内容设置
- 立体化的教材体系

赠送  
电子课件

清华大学出版社



新世纪高职高专课程与实训系列教材

# 工 程 力 学

	石怀荣	陈文平	主 编
张玉杰	周梦瑜	关玉琴	副主编
王沛禹	贾祥云	顾红军	

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书分为三篇：静力分析部分介绍静力学基础、平面力系、空间力系。第二篇强度、刚度和稳定性分析介绍拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲的强度和刚度的计算，应力状态与强度理论，组合变形的强度计算，压杆稳定。第三篇运动与动力分析介绍点的运动和刚体的运动、动力学基础、动力学基本定理。根据高职高专学校的教学特点，本书注重结合工程实际提出问题，分析问题。力求精炼、实用。每章安排有实训内容，练习内容，重在培养学生的工程意识与解决实际问题的能力。

本书可作为高职高专院校相关专业的教材，也可供有关工程技术人员参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/石怀荣, 陈文平主编. 张玉杰, 周梦瑜, 关玉琴, 王沛禹, 贾祥云, 顾红军副主编. —北京: 清华大学出版社, 2007.3

(新世纪高职高专课程与实训系列教材)

ISBN 978-7-302-14622-3

I. 工… II. ①石…②陈…③张…④周…⑤关…⑥王…⑦贾…⑧顾… III. 工程力学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 014615 号

责任编辑: 王景先 张彦青

封面设计: 山鹰工作室

责任校对: 李玉萍

责任印制: 何 芊

出版发行: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社 总 机: 010-62770175 邮购热线: 010-62786544

投稿咨询: 010-62772015 客户服务: 010-62776969

印 刷 者: 北京国马印刷厂

装 订 者: 三河市溧源装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 24 字 数: 579 千字

版 次: 2007 年 3 月第 1 版 印 次: 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 32.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 020762-01

# 前 言

本书是为适应当前高等职业技术教育的教学需要，由多位教学经验丰富的教师根据多年的高等职业技术教育实践编写而成。《工程力学》课程在高等职业技术教育的人才培养中占有重要地位。本书在编写过程中以“明晰概念，强化应用”为原则，以面向高等职业技术教育改革的要求为目标，充分吸取了各校多年来工程力学课程教学改革的经验，突出体现了高等职业技术教育中力学教育的特色。

(1) 理顺了将工程力学作为一门技术基础课所应涵盖的主要内容，突出其在培养学生能力方面的应有地位和作用。全书共分为三部分，上篇静力学着重分析刚体平衡的力学性能。中篇材料力学着重分析变形体的强度、刚度和稳定性。下篇运动学与动力学着重分析刚体的运动形态及刚体运动时的力学特性。突出了高等职业技术教育重在培养学生“应用知识和技能”这条主线。

(2) 着重培养学生面对工程实践应用力学知识的能力，本书增加了实训的内容和大量从工程实践中简化而来的习题。同时为增加学生对力学知识在工程实践中具体应用的感性认识，发挥实验在课程教学中不可替代的作用，在教材的相关内容中加入了实验的内容，用以培养学生的工程意识和工程应用方法。

(3) 在内容的安排上既广泛联系工程实际又适应当前高等职业技术教育的特点，是教学活动、学科知识与学习内容的综合。在课程内容的构造上具有针对性、应用性和综合性。本书还尽力做到文字简明、内容精练、知识面宽、方便教学。

本书由蚌埠学院石怀荣老师和陈文平老师任主编。日照职业技术学院王沛禹老师、烟台职业技术学院周梦瑜老师、烟台职业技术学院张玉杰老师、日照职业技术学院贾祥云老师、内蒙古机电学院关玉琴老师和徐州空军学院顾红军老师任副主编。全书由石怀荣老师和陈文平老师统稿。

本书在编写过程中得到蚌埠学院机电系程荣龙主任、日照职业技术学院机电系张永花主任、烟台职业技术学院机电系李一龙主任、内蒙古机电学院胡笛川主任和清华大学出版社第三事业部王景先老师的大力支持，在此致以诚挚的感谢。

限于水平，书中难免会有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

绪论 .....	1
----------	---

## 上篇 静力平衡分析

<b>第 1 章 静力学的基本概念与受力分析</b> .....	4
1.1 静力学的基本概念 .....	4
1.1.1 刚体的概念 .....	4
1.1.2 平衡的概念 .....	5
1.1.3 力的概念 .....	5
1.1.4 力系的概念 .....	6
1.2 静力学的基本公理 .....	6
1.3 约束与约束反力 .....	9
1.3.1 约束的概念 .....	9
1.3.2 约束的基本类型 .....	10
1.4 物体的受力分析 .....	13
1.5 实训 .....	17
1.6 习题 .....	17
<b>第 2 章 平面汇交力系</b> .....	21
2.1 平面汇交力系的合成 .....	21
2.1.1 平面汇交力系合成的几何法 .....	21
2.1.2 力在直角坐标轴上的投影 .....	22
2.1.3 合力投影定理 .....	23
2.1.4 平面汇交力系合成的解析法 .....	24
2.2 平面汇交力系的平衡 .....	25
2.2.1 平面汇交力系平衡的几何法 .....	25
2.2.2 平面汇交力系平衡的解析法 .....	26
2.3 实训 .....	29
2.4 习题 .....	30
<b>第 3 章 力矩和力偶</b> .....	34
3.1 力对点的矩 .....	34
3.1.1 力对点的矩的概念 .....	34
3.1.2 力矩的计算 .....	35
3.1.3 合力矩定理 .....	36
3.2 平面力偶与力偶矩 .....	36
3.2.1 力偶与力偶矩 .....	37
3.2.2 平面力偶等效的条件 .....	38
3.2.3 力偶的性质 .....	38
3.2.4 平面力偶系的合成与平衡 .....	38
3.3 力线的平移定理 .....	40
3.3.1 力线平移定理 .....	40
3.3.2 固定端约束 .....	41
3.4 实训 .....	42
3.5 习题 .....	42
<b>第 4 章 平面任意力系</b> .....	47
4.1 平面任意力系的简化 .....	47
4.1.1 平面任意力系的简化及结果 .....	47
4.1.2 平面任意力系简化结果的分析 .....	48
4.2 平面任意力系的平衡及平衡方程的应用 .....	49
4.2.1 平面任意力系平衡方程的应用式 .....	49
4.2.2 平面任意力系平衡方程的应用 .....	50
4.2.3 平面平行力系 .....	53
4.3 简单多刚体系统的平衡问题 .....	55
4.3.1 静定与静不定问题的概念 .....	55
4.3.2 简单多刚体系统的平衡 .....	55
4.4 摩擦问题简介 .....	58
4.4.1 滑动摩擦 .....	58
4.4.2 有滑动摩擦时的平衡问题 .....	61

4.5 实训 .....	63	5.3 空间力系的平衡 .....	76
4.6 习题 .....	64	5.3.1 空间力系的平衡方程 .....	77
<b>第5章 空间力系与重心</b> .....	<b>71</b>	5.3.2 空间力系平衡方程式的 应用 .....	77
5.1 力在空间直角坐标系中的投影 .....	71	5.3.3 空间力系平衡应用举例 .....	77
5.1.1 力在空间直角坐标轴上的 投影 .....	71	5.4 物体的重心 .....	80
5.1.2 合力投影定理 .....	73	5.4.1 空间平行力系中心 .....	80
5.2 力对轴的矩 .....	74	5.4.2 物体的重心 .....	81
5.2.1 力对轴的矩的概念 .....	74	5.5 实训 .....	85
5.2.2 合力矩定理 .....	75	5.6 习题 .....	86

## 中篇 材料力学

<b>第6章 材料力学基本概念</b> .....	<b>90</b>	7.6 杆件系统静不定问题简介 .....	109
6.1 材料力学的任务 .....	90	7.6.1 求解静不定问题的基本 方法 .....	109
6.1.1 构件的承载能力 .....	90	7.6.2 装配应力 .....	111
6.1.2 材料力学的任务 .....	91	7.6.3 温度应力 .....	113
6.2 变形体的性质及基本假设 .....	91	7.7 实训 .....	114
6.3 构件变形的基本形式 .....	92	7.8 习题 .....	115
6.4 习题 .....	93	<b>第8章 剪切与挤压</b> .....	<b>120</b>
<b>第7章 拉伸与压缩</b> .....	<b>94</b>	8.1 剪切与挤压的概念 .....	120
7.1 轴向拉伸与压缩的概念 .....	94	8.1.1 剪切的的概念 .....	120
7.2 轴向拉伸与压缩时杆件横截面上的 内力与应力 .....	95	8.1.2 挤压的概念 .....	121
7.2.1 轴向拉伸与压缩杆件的 内力 .....	95	8.2 剪切和挤压的实用计算 .....	122
7.2.2 轴向拉伸与压缩杆件横 截面的应力 .....	97	8.2.1 剪切的实用计算 .....	122
7.3 杆件拉伸与压缩时的变形、虎克 定律 .....	99	8.2.2 挤压的实用计算 .....	123
7.3.1 变形、应变的概念 .....	99	8.3 剪切虎克定律与切应变 .....	126
7.3.2 横向变形系数 .....	100	8.3.1 剪切虎克定律与切应变 .....	126
7.3.3 虎克定律 .....	100	8.3.2 切应力的互等 .....	127
7.4 材料拉伸与压缩时的机械性能 .....	101	8.4 实训 .....	127
7.4.1 拉伸实验与应力-应变 曲线 .....	101	8.5 习题 .....	127
7.4.2 材料拉伸时的力学性能 .....	102	<b>第9章 圆轴扭转</b> .....	<b>131</b>
7.4.3 材料压缩时的力学性能 .....	104	9.1 圆轴扭转的概念——扭转内力 .....	131
7.5 杆件拉伸与压缩时的强度计算 .....	105	9.1.1 圆轴扭转的概念 .....	131
7.5.1 极限应力、许用应力、 安全系数 .....	105	9.1.2 圆轴扭转时的内力 计算 .....	132
7.5.2 拉(压)杆的强度条件 .....	106	9.2 圆轴扭转时的应力和变形 .....	134
		9.2.1 圆轴扭转时横截面上的 应力 .....	134
		9.2.2 圆轴扭转时横截面上的 最大切应力 .....	136

9.2.3 圆截面极惯性矩与抗扭截面系数 .....	136	10.8.2 积分法计算梁的变形 .....	169
9.2.4 圆轴扭转时的变形 .....	138	10.8.3 叠加法计算梁的变形 .....	170
9.3 圆轴扭转时的强度和刚度计算 .....	139	10.8.4 梁的刚度计算 .....	174
9.3.1 圆轴扭转时的强度计算 .....	139	10.8.5 提高梁的强度的措施 .....	175
9.3.2 圆轴扭转时的刚度计算 .....	141	10.9 实训 .....	178
9.4 实训 .....	142	10.10 习题 .....	179
9.5 习题 .....	143	<b>第 11 章 应力状态及强度理论</b> .....	188
<b>第 10 章 平面弯曲</b> .....	147	11.1 应力状态的概念 .....	188
10.1 平面弯曲的概念 .....	147	11.1.1 点应力状态 .....	188
10.2 梁的计算简图及分类 .....	148	11.1.2 主应力与主平面 .....	190
10.2.1 梁受力模型的简化 .....	148	11.1.3 应力状态的分类 .....	190
10.2.2 梁上作用力的荷载的简化 .....	148	11.2 平面应力状态分析 .....	191
10.2.3 梁的约束支座的简化 .....	149	11.2.1 解析法计算任意斜截面上的应力 .....	191
10.2.4 梁简化后的基本形式 .....	149	11.2.2 图解法计算任意斜截面上的应力 .....	192
10.3 梁的内力计算 .....	149	11.2.3 最大正应力与最大切应力 .....	193
10.3.1 剪力和弯矩 .....	149	11.3 广义虎克定律 .....	196
10.3.2 剪力图和弯矩图 .....	152	11.4 强度理论简介 .....	197
10.4 弯矩、剪力和梁上分布荷载集度之间的关系 .....	156	11.4.1 工程中常用的四种强度理论 .....	198
10.4.1 弯矩、剪力和荷载集度间的关系 .....	156	11.4.2 强度理论的应用举例 .....	199
10.4.2 利用弯矩、剪力和荷载集度之间的关系画剪力图和弯矩图 .....	157	11.5 实训 .....	200
10.5 梁纯弯曲时横截面上的正应力 .....	159	11.6 习题 .....	201
10.5.1 纯弯曲的概念 .....	160	<b>第 12 章 构件组合变形时的强度计算</b> .....	205
10.5.2 纯弯曲时梁横截面上的正应力计算 .....	160	12.1 组合变形概述 .....	205
10.5.3 常用截面的轴惯性矩的计算 .....	162	12.2 弯曲与拉伸(压缩)的组合变形 .....	206
10.6 弯曲切应力简介 .....	163	12.2.1 构件受横向力与轴向力的组合作用 .....	206
10.6.1 矩形截面梁 .....	163	12.2.2 构件受到偏心轴向力的作用 .....	209
10.6.2 工字形截面梁 .....	164	12.3 扭转与弯曲的组合 .....	212
10.6.3 圆形截面梁和圆环形截面梁 .....	164	12.4 实训 .....	216
10.7 梁的强度计算 .....	165	12.5 习题 .....	217
10.7.1 梁弯曲时的强度条件 .....	165	<b>第 13 章 压杆稳定</b> .....	220
10.7.2 梁弯曲时的强度计算 .....	165	13.1 压杆稳定的概念 .....	220
10.8 梁的弯曲变形 .....	168	13.2 压杆的临界力计算 .....	221
10.8.1 梁的挠度和转角的概念 .....	169	13.2.1 欧拉公式 .....	221
		13.2.2 临界应力 .....	223

13.2.3 欧拉公式的使用范围 .....	223	13.4.3 合理选择压杆的有效 长度 .....	230
13.3 压杆的稳定性计算 .....	227	13.5 实训 .....	231
13.4 提高压杆稳定性的措施 .....	229	13.6 习题 .....	231
13.4.1 合理选择截面形状 .....	229		
13.4.2 合理选择压杆两端的 约束 .....	230		

## 下篇 运动分析与动力分析

<b>第 14 章 质点和刚体的运动学</b> .....	235	15.3 动静法 .....	292
14.1 点的运动 .....	235	15.3.1 质点的动静法 .....	292
14.1.1 确定动点位置的方法 .....	235	15.3.2 刚体惯性力系的简化 .....	294
14.1.2 动点速度和加速度的自然 坐标表示法 .....	239	15.4 实训 .....	298
14.1.3 动点速度和加速度的直角 坐标表示法 .....	241	15.5 习题 .....	299
14.2 刚体的基本运动 .....	246	<b>第 16 章 动力学基本定理</b> .....	302
14.2.1 刚体的平行移动 .....	246	16.1 动量定理 .....	302
14.2.2 刚体的绕定轴转动 .....	247	16.1.1 动量和冲量 .....	302
14.3 点的合成运动 .....	252	16.1.2 动量定理 .....	303
14.3.1 点的合成运动的概念 .....	252	16.1.3 质点系动量守恒定理 .....	307
14.3.2 点的速度合成定理 .....	253	16.2 动量矩定理 .....	309
14.4 刚体的平面运动 .....	257	16.2.1 动量矩 .....	309
14.4.1 刚体平面运动概述 .....	257	16.2.2 动量矩定理 .....	311
14.4.2 求平面图形上各点运动速度 的基点法、速度投影法与 瞬心法 .....	259	16.3 动能定理 .....	317
14.4.3 用基点法求平面图形上 各点运动的加速度 .....	267	16.3.1 功 .....	317
14.5 实训 .....	272	16.3.2 功率和机械效率 .....	323
14.6 习题 .....	273	16.3.3 动能定理 .....	325
<b>第 15 章 动力学基础</b> .....	280	16.4 动力学问题的综合 .....	332
15.1 质点动力学基本方程 .....	280	16.5 实训 .....	335
15.1.1 动力学基本定律 .....	281	16.6 习题 .....	336
15.1.2 力学单位制 .....	282	<b>第 17 章 动荷载简介</b> .....	341
15.1.3 质点动力学的基本方程 .....	282	17.1 动荷载与交变应力 .....	341
15.2 定轴转动刚体动力学的基本 方程 .....	287	17.1.1 动荷载 .....	341
15.2.1 刚体绕定轴转动的动力学 基本方程 .....	287	17.1.2 交变应力 .....	343
15.2.2 转动惯量 .....	288	17.2 材料的持久极限与其影响因素 .....	345
15.2.3 刚体绕定轴转动动力学的 两类问题 .....	290	17.2.1 材料的持久极限 .....	345
		17.2.2 影响持久极限的因素及 疲劳强度计算简介 .....	346
		17.3 实训 .....	349
		17.4 习题 .....	349
		<b>附录 A 型钢表</b> .....	351
		<b>附录 B 参考答案</b> .....	364
		<b>参考文献</b> .....	374



# 绪 论

工程力学是一门与工程技术联系非常紧密的技术基础学科。它是工程实践的重要理论基础之一。在工程技术的各个领域中有极为广泛的应用。在工程技术的各个学科中，学生们只有在学习了工程力学后方能进行后续学科的学习。

## 一、工程实践中的力学问题

生产实践中的工程结构、机械设备在传递运动和动力的过程中其组成构件都要受到力的作用。这包括结构外部的作用力及工程结构、机械设备内部的构件与构件间的相互作用力。这些力在工程上被称为荷载。在荷载的作用下，构件的机械运动状态可能发生变化，也可能不发生变化，也可能处于平衡状态。工程力学所要完成的任务之一是要使工程结构、机械设备完成预定的运动或改变以前的运动或保持原有的平衡状态。工程构件在完成预定运动的过程即是承受荷载的过程。每个构件都是由一定的材料组成的，每一种不同的材料承受荷载的能力是不一样的。如果构件所承受的荷载超过了自身的承受能力，就会导致构件发生变形破坏。如果构件发生了过大的变形，会导致其不能正常工作而失效。例如：用来加工机械零件的机床的主轴，如果它的变形过大的话，就会造成齿轮间的磨损加剧，引起轴承的间隙增加，从而影响零件的加工精度并增加噪声。汽车的荷载过大时，其大梁会发生断裂，汽车就不能工作。油压千斤顶在承受一定的轴向荷载时，当荷载超过一定的数值时，即使在外界微小的干扰下，顶杆也会突然从直线的平衡状态，转为弯曲的平衡形式，从而使其丧失功能。这些问题的解决都需要利用工程力学的理论知识。为保证构件安全可靠地工作，即要求构件具有足够的承受荷载的能力，在其工作过程中发生的变形不能影响到构件的工作，这些都是工程力学所要完成的任务。

## 二、工程力学的主要内容

工程力学是研究构件在荷载作用下的运动规律与保证构件安全可靠工作的一门科学。本书的主要内容包含以下几个方面。

### 1. 在平衡的条件下分析构件的受力——静力平衡分析

平衡是构件机械运动的一种特殊运动形式，它是指物体处于静止或匀速直线运动状态。在工程力学中利用构件的平衡作为分析构件上作用的力的一种条件。

### 2. 确定构件承受荷载的能力——强度分析

所谓强度是指构件在确定荷载的作用下，保持不发生破坏或塑性变形的能力。构件因强度不足而丧失正常功能，称为强度失效。通过工程力学中的强度分析研究从而为合理设计构件，保证构件不发生强度失效提供基本理论和方法。

### 3. 确定构件抵抗变形的能力——刚度分析

所谓刚度是指构件在确定荷载的作用下，保持其弹性变形或其弹性变形不超过极限值

的能力。构件因刚度不足而丧失正常功能；称为刚度失效。工程力学中的刚度分析研究正是研究如何保证构件不发生刚度失效的破坏形式，从而保证构件安全可靠地工作。

#### 4. 确定构件稳定工作的能力——稳定性分析

工程构件中的某些承受轴向压力的杆件，例如活塞连杆机构中的连杆，凸轮机构中的顶杆，支承重物的千斤顶等，当压力超过一定的数值时，在外界力的干扰下，其直线平衡状态将转变为弯曲，从而使构件及由其组成的机械或结构丧失功能。这是区别于强度失效和刚度失效的一种失效形式。称为稳定性失效。压杆的平衡在什么条件下是稳定的，什么情况下是不稳定的，怎样才能保证压杆正常可靠地工作，称为稳定问题。它和强度分析、刚度分析一样，在工程构件的设计中占有重要的地位。

#### 5. 确定构件的运动状态——运动分析

对受力构件进行静力分析以及强度、刚度和稳定性的分析都是以构件的平衡为前提的。在荷载的作用下，构件的机械运动状态可能发生变化，也可能不发生变化，也可能处于平衡状态。因此工程力学同时将分析研究构件在力的作用下发生运动的情况，分析研究运动的构件的位置、速度和加速度。

#### 6. 确定构件运动与受力间的关系——动力分析

构件产生运动及运动的变化是由于构件受到力的作用或者其作用力发生变化。动力分析将不仅研究构件的运动而且研究产生运动的原因，即研究构件的运动与作用在构件上的力之间的关系。

### 三、工程力学的学习目的

工程力学是一门理论性较强的技术基础课。学习理论力学的目的是：

(1) 工程专业一般都要接触机械运动的问题。有些工程问题可以直接应用工程力学的基本理论去解决，有些比较复杂的工程问题，则需要用工程力学和其他专门知识共同来解决，所以学习工程力学是为解决工程问题打下一定的基础。

(2) 工程力学是研究力学中最普遍、最基本的规律。很多工程专业的课程，例如机械原理、机械设计、以及许多专业课程，都要以工程力学为基础，所以工程力学是学习一系列后续课程的重要基础。随着现代科学技术的发展，工程力学的研究内容已渗入到其他科学领域，许多新兴科学的建立都必须以坚实的工程力学知识为基础。

(3) 工程力学的研究方法与其他科学的研究方法有不少相同之处，因此充分理解工程力学的研究方法，不仅可以深入地掌握这门学科，而且有助于学习其他科学技术理论，有助于培养辩证唯物主义世界观，培养正确地分析问题和解决问题的能力；为今后解决生产实际问题，从事科学工作打下坚实的基础。

## 上篇 静力平衡分析

静力学是研究处于平衡状态的物体在力系作用下的规律的科学。静力学的基础理论是机械零件、构件及整机承受荷载计算的基础。因此静力学的理论是从工程实践中发展起来的、在工程实践中有着广泛应用的力学基础理论。

本篇里主要研究以下方面的问题。

- 物体的受力分析

研究物体及与其周围有联系的物体，并将其从周围物体中分离出来，分析其上所作用的力，这些力包括已知力和未知力，其中主要为约束力。约束力取决于所研究的物体与周围物体相联系的性质，即约束的类型与性质。

- 力系的简化

作用于同一物体上的多个力所组成的系统，称为力系。如果作用于同一物体上的多个力用一简单的力来取代，而不改变原来力系对物体的作用效应，则这两个力系为等效力系。分析简单等效力系的过程称为力系的简化。

- 物体的平衡

利用所分析的物体处于平衡状态时作用在物体上的力系所必须满足的条件来分析计算出作用在物体上的未知力是这一篇的主要内容。

这一篇的内容是学习工程力学的基础，以后的课程内容是以静力学(静力平衡分析)为基础的。静力学的内容也是正确进行工程设计的基础。

# 第 1 章 静力学的基本概念与受力分析

## 教学目标：

静力学是研究刚体在力系作用下的平衡规律。静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍刚体与力的概念及静力学公理，并阐述工程中几种常见的典型约束和约束力的分析。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。

通过本章的学习，可以深入地理解力、刚体、平衡和约束等重要基本概念。深入理解静力学的理论基础——静力学公理(或力的基本性质)。明确和掌握工程上常见约束的基本特征及约束反力的画法。能正确、熟练地对物体系统及分离体进行受力分析，画出受力分析图。

## 教学重点和难点：

- 力、刚体、平衡和约束等概念。
- 静力学公理及其推论。
- 柔索约束、光滑接触面约束、光滑圆柱铰链约束、支座、链杆约束的特征。
- 约束反力的画法。
- 物体系统及分离体的受力分析及受力分析图。
- 光滑铰链的约束特征(尤其是销钉连接两个以上的构件)。
- 物体系统的受力分析。

## 1.1 静力学的基本概念

静力学主要研究物体在力的作用下的平衡与利用平衡条件解决未知力的问题。而要进行问题的研究，首先要掌握静力学的基本概念。

### 1.1.1 刚体的概念

所谓的刚体是指这样的物体：在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。刚体是静力学的研究对象，是人们将各种各样的实际物体抽象化以便于计算的理想力学模型。

实际物体在力的作用下不可避免地要产生程度不同的变形。但是，当微小变形对研究物体的平衡问题不产生影响或影响很小时，可以忽略不计。这样，忽略了物体微小变形后便可以吧物体看成刚体。例如：当汽车通过大桥时，虽然大桥因承受汽车的压力而产生微小的变形，但是当大桥微小变形对研究其平衡问题不产生影响或影响很小时，便可以忽略不计，此时可将大桥看成刚体。

在静力学中，研究的物体仅限刚体，故静力学又称为刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

## 1.1.2 平衡的概念

平衡是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或匀速直线运动状态。如桥梁、机床的床身、作匀速直线飞行的飞机等,都处于平衡状态。工程实际中,有时对低速转动或直线运动加速度很小的机械零件,也可以近似地认为其处于平衡状态并应用平衡条件进行计算。平衡是物体运动的一种特殊形式。静力学主要研究的就是刚体在力作用下的平衡问题。

## 1.1.3 力的概念

人们对力的认识,最初是从推车、提水、拉锯、压木板等劳动中得出来的。用力的时候,肌肉就感到紧张。力最初就是从肌肉的紧张中抽象出来的。但是仅仅用肌肉紧张的感觉来定义力是不全面的。随着生产的发展,人们又逐渐认识到:物体的机械运动状态的改变(包括变形),都是由于其他物体对该物体施加力的结果。这样,由感性到理性,逐步建立了抽象的力的概念。

力是物体间相互的机械作用,这种作用可以使物体的机械运动状态发生变化。

物体间相互的机械作用大致可以分为两类:一类是接触作用,例如物体间的挤压力、拉力等;另一类是“场”对物体的作用,例如电场对电荷的引力或斥力作用。尽管各种物体间的相互作用力的来源和性质不同,但是力对物体产生的效应一般可以分为两种,即引起物体机械运动状态的改变和使物体产生变形。前一种称为力的外效应或运动效应,是静力学与运动学和动力学研究的内容;后一种称为力的内效应或变形效应,是材料力学研究的内容。

实践表明,力对物体的作用效应取决于三个要素:即力的大小、方向和作用点。这三个要素称为力的三要素。当这三个要素中任何一个发生改变时,力将改变,力的作用效应也将改变。

力是矢量,通常我们可用带箭头的线段来表示力的三要素,如图 1.1 所示,点 A(或 B)表示力的作用点,沿力矢顺着箭头指向表示力的方向,线段的长度(按一定的比例)表示力的大小(15N)。

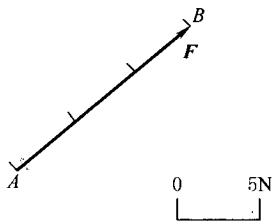


图 1.1 力的图示

线段长度  $AB$  按一定的比例表示力的大小;线段的方位和箭头的指向表示力的方向;线段的起点(或终点)表示力的作用点;与线段重合的直线称为力的作用线。我们通常用黑体字母  $\mathbf{F}$  表示力矢量,而一般字母  $F$  表示力的大小,是标量。

在国际单位制(SI)中,力的单位是牛顿,简称牛,用符号“N”表示。有时也以“kN”作为力的单位符号,称作千牛[顿]。

### 1.1.4 力系的概念

力是物体间的相互作用，作用在同一物体上的一组力构成力的集合，称为力系。

力系按作用线分布情况的不同可分为下列几种：当所有力的作用线在同一平面内时，称为平面力系；否则称为空间力系。当所有力的作用线汇交于同一点时，称为汇交力系；而所有力的作用线都相互平行时，称为平行力系；否则称为一般力系。

若力系中各力对于物体的作用效应彼此抵消而使物体保持平衡或运动状态不变时，则这种力系称为平衡力系。平衡力系中的任一力对于其余的力来说都称为平衡力，即与其余的力相平衡的力。

若两力系分别作用于同一物体而且效应相同时，则这两力系称为等效力系。若力系与一力等效，则此力就称为该力系的合力，而力系中的各力，则称为此合力的分力。

为了便于寻求各种力系对物体作用的总效应和力系的平衡条件，需要将力系进行简化，使其变换为另一个与其作用效应相同的简单力系。这种等效简化力系的方法称为力系的简化。

## 1.2 静力学的基本公理

公理是人类经过长期的观察和经验积累而得出的结论，它可以在实践中得到验证，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结，它们是静力学全部理论的基础。

**公理 1 二力平衡条件：**

作用于同一刚体上的两个力，使刚体保持平衡的充要条件是：两个力的大小相等、方向相反，且在同一直线上。

公理 1 说明了作用于物体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对于刚体来说，这个条件是充分与必要的。这个公理是今后推证平衡条件的基础。图 1.2 所示为满足公理 1(二力平衡)的两种情况，其中  $F_1$ 、 $F_2$  两个力大小相等。

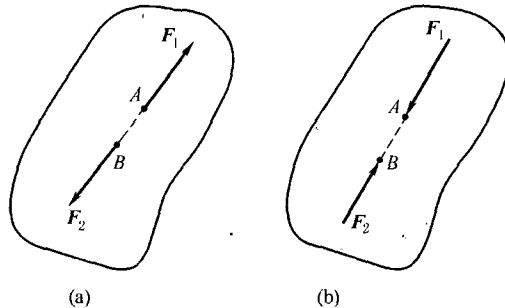


图 1.2 二力平衡

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件，称为二力构件或二力杆。根据公理 1，二力杆受到的两个力的方向必沿作用点的连线。

**公理 2 力的平行四边形规则：**

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定。

设在物体的A点作用有力 $F_1$ 和 $F_2$ ，如图1.3(a)所示，若以 $F_R$ 表示它们的合力，则可以写成矢量表达式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

即合力 $F_R$ 等于两分力 $F_1$ 与 $F_2$ 的矢量和。

公理2反映了力的方向性的特征。矢量相加与数量相加不同，必须用平行四边形的关系确定，它是力系简化的重要基础。

因为合力 $F_R$ 的作用点亦为A点，求合力的大小及方向实际上无需做出整个平行四边形，可用下述简单的方法来代替：从任选点a作ab表示力矢 $F_1$ ，在其末端b作bc表示力矢 $F_2$ ，则ac即表示合力矢 $F_R$ ，如图1.3(b)所示。由只表示力的大小及方向的分力矢和合力矢所构成的三角形abc称为力三角形，这种求合力矢的作图规则称为力的三角形法则。力三角形图只表示各力的矢，并不表示其作用位置。若先作ad表示 $F_2$ 再作dc表示 $F_1$ ，同样可得表示 $F_R$ 的ac，如图1.3(c)所示，这说明合力矢与分力矢的作图与先后次序无关。

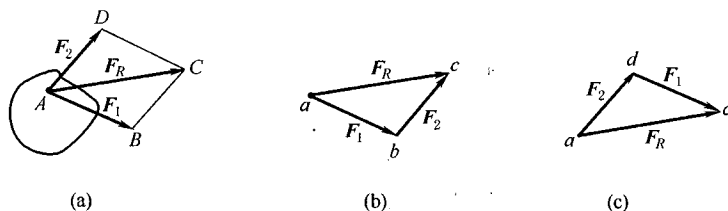


图 1.3 力的平行四边形与力三角形

**公理3 加减平衡力系原理：**

在作用于刚体的力系上加上或减去任意的平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效果。

公理3是研究力系等效变换的重要依据。注意此公理只适用于刚体，而不适用于变形体。

根据上述公理可以导出下列推论。

**推论1 力的可传性：**

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线移到刚体内的任一点，而不改变该力对刚体的作用效果。

证明：设有力 $F$ 作用在刚体上的A点，如图1.4(a)所示。根据加减平衡力系原理，可在力的作用线上任取一点B，并加上两个相互平衡的力 $F_1$ 和 $F_2$ ，且使 $F = F_1 = -F_2$ ，如图1.4(b)所示。于是，力系 $(F, F_1, F_2)$ 与力 $F$ 等效。由于力 $F$ 和 $F_2$ 也是一个平衡力系，故可减去，这样只剩下一个力 $F_1$ ，如图1.4(c)所示。故力 $F_1$ 与力 $F$ 等效，即原来的力 $F$ 沿其作用线移到了点B。

由此可见，对于刚体来说，力的作用点已不是决定力的作用效应的要素，它已被作用线代替。因此，作用在刚体上的力的三要素是：力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动，这种可沿作用线移动的矢量称为滑动矢量。

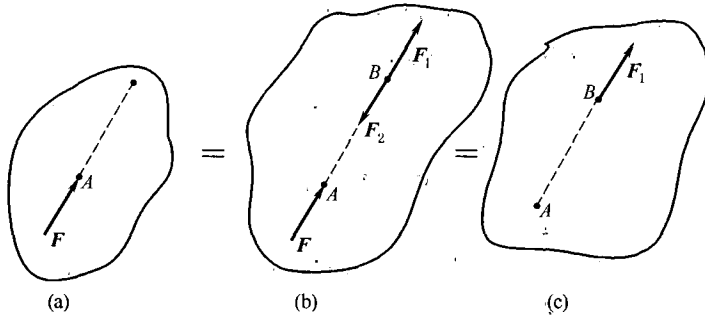


图 1.4 力的可传性

**推论 2** 不平行三力汇交定理:

作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线也通过汇交点。

证明:如图 1.5 所示,在刚体的 A、B、C 三点上,分别作用三个相互平衡的力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。根据力的可传性,将力  $F_1$  和  $F_2$  移到汇交点 D,然后根据力的平行四边形法则,得合力  $F_{12}$ 。则力  $F_3$  应与  $F_{12}$  平衡。由于两个力的平衡必须共线,所以力  $F_3$  必定与力  $F_1$  和  $F_2$  共面,且力  $F_3$  的作用线必通过力  $F_1$  与  $F_2$  的交点 D。

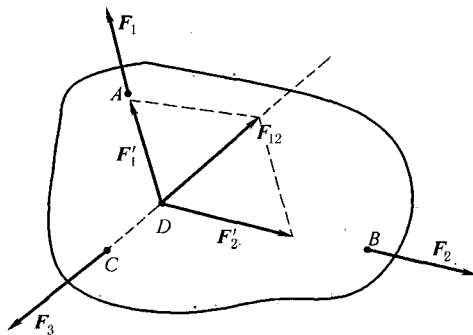


图 1.5 三力平衡

**公理 4** 作用力与反作用力定律:

作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。

如将两个相互作用力之一视为作用力,而另一力视为反作用力,则公理 4 还可叙述为:对应于每个作用力,必有一个与其大小相等、方向相反且在同一直线上的反作用力。一般用  $F'$  表示力  $F$  的反作用力。

公理 4 概括了物体间相互作用的关系,表明作用力与反作用力总是成对出现的。根据这个公理,已知作用力则可知反作用力,它是分析物体受力时必须遵循的原则,为研究由一个物体过渡到多个物体组成的物体系统提供了基础。

必须注意,作用力与反作用力是分别作用在两个物体上的,不能错误地与二力平衡公理混同起来。

**公理 5** 刚化原理:

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为刚体模型的条件。如图 1.6 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。

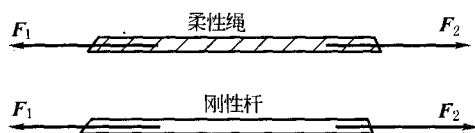


图 1.6 绳索的平衡

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。

## 1.3 约束与约束反力

如果一个物体不受任何限制，可以在空间自由运动（例如可在空中自由飞行的飞机、炮弹），则此物体称为自由体；反之，如一个物体受到一定的限制，使其在空间沿某些方向的运动成为不可能（例如绳子上悬挂的物体不能沿绳子伸长的方向运动、铁轨上行驶的火车不能沿垂直于轨道的方向运动），则此物体称为非自由体。

### 1.3.1 约束的概念

在力学中，把这种事先对于物体的运动（位置和速度）所施加的限制条件称为约束。机械的各个构件如不按照适当的方式相互联系从而受到限制，就不能恰当地传递运动并实现所需要的动作；工程结构如不受到某种限制，便不能承受荷载以满足各种需要。约束是以物体间相互接触的方式构成的，构成约束的周围物体称为约束体，有时也称为约束。例如，沿轨道行驶的车辆，轨道事先限制车辆的运动，它就是约束体；摆动的单摆，绳子就是约束体，它事先限制摆锤只能在不大于绳长的范围内运动，摆锤通常以绳长为半径作圆弧运动。

约束体阻碍限制物体的自由运动，改变了物体的运动状态，因此约束体必须承受物体的作用力，同时给予物体以等值、反向的反作用力，这种力称为约束反力或约束力，简称为反力，属于被动力。除约束反力外，物体上受到的各种力如重力、风力、切削力、电磁力等，它们是促使物体运动或有运动趋势的力，属于主动力，工程上常称为荷载。在设计工作中，荷载可根据设计指标决定，进行分析研究确定或用实验测定。

约束反力取决于约束本身的性质、主动力和物体的运动状态。约束反力阻碍物体运动的作用是通过约束体与物体间相互接触来实现的，因此它的作用点应在相互接触处，约束反力的方向总是与约束体所能阻碍的运动方向相反，这是我们确定约束反力方向的准则。至于它的大小，在静力学中将由平衡条件求出。