

ENGINEERING

MECHANICS

工程力学

(静力学与材料力学)

主 编 祝 瑛 蒋永莉
副 主 编 梁晓燕 税国双 邹翠荣
主 审 汪越胜



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

工 程 力 学

(静力学与材料力学)

主 编 祝 瑛 蒋永莉
副主编 梁晓燕 税国双 邹翠荣
主 审 汪越胜

清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据“教育部高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求”编写。

全书分静力学和材料力学两篇，共14章。静力学篇有：第1章静力学基本概念及物体的受力分析，第2章力系的简化，第3章力系的平衡方程及其应用。材料力学篇：自第4章至第14章，内容包括材料力学基础，轴向拉伸、压缩与剪切，扭转，弯曲内力，平面图形的几何性质，弯曲应力，弯曲变形，应力状态、强度理论，组合变形，压杆的稳定性问题，交变应力、动荷应力。本书语言叙述及公式推导简明、易懂，注重概念和实际应用。

本书适合各高等院校、高职、成人教育等非土、非机专业少学时工程力学课程教学用书，也可供有关工程技术人员参考。

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/祝瑛, 蒋永莉主编. —北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-5121-0219-4

I. ①工… II. ①祝… ②蒋… III. ①工程力学-高等学校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 151487 号

责任编辑: 赵彩云

出版发行: 清华大学出版社 邮编: 100084 电话: 010-62776969

北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414

印刷者: 北京东光印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 23.75 字数: 593 千字

版 次: 2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-0219-4/TB·22

印 数: 1~4 000 册 定价: 36.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

“工程力学”是一门理论与实践紧密相关的课程，本课程研究了物体受力的平衡问题，包括物体的受力分析、力系的等效替换及各种力系的平衡条件，揭示了构件在外力作用下变形的基本规律，为构件提供了强度、刚度、稳定性分析的理论 and 计算方法，是工程设计的理论基础。通过本课程的学习，可以使具备基本的力学概念，初步学会应用本课程所介绍的理论分析方法解决一些简单的工程实际问题；同时结合本课程的特点，可培养学生科学的思维方式和正确的世界观，使学生在分析问题、解决问题、自学及理论联系实际等方面的能力得到训练和提高。

本教材是根据教育部高等学校力学教学指导委员会、力学基础课程教学指导分委会编制的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求（试行）》（2008年版）编写的。

本书内容共有两篇14章：第1篇为静力学，自第1章至第3章；第2篇为材料力学，自第4章至第14章。静力学内容根据“理论力学课程教学基本要求（B类）”（静力学）部分编写；材料力学内容根据“材料力学课程教学基本要求（B类）”编写，包括材料力学的基础部分和专题部分的相关内容，如各基本变形的简单超静定问题、非圆截面杆扭转切应力的概念、弯曲中心的概念、应变能的概念、动载荷和疲劳等。书中标注“*”号的章节为“基本要求中”的专题内容。

静力学篇划分章节时，不拘于传统，重新将内容整合，精简为3章，这更有利于读者对概念的深刻理解和实际应用。

本书语言精练、信息量大，在论述中，力求公式推导过程严谨且简明；在例题的选择方面，注重结合工程实际，并具有一定的代表性；在每一章最后配有与本章内容相关的思考题和习题，便于学生自学。

本教材适合少学时工程力学课程教学用书，也可供工程技术人员参考。

本教材由北京交通大学力学课程组组织编写，第1章至第3章由税国双负责执笔，第5章和第10章由蒋永莉负责执笔，第6章至第9章由邹翠荣负责执笔，第11章和第12章由梁晓燕负责执笔，第4章、第13章和第14章由祝瑛负责执笔，全书由祝瑛负责统稿，由汪越胜教授负责审稿。本教材在编写过程中，采纳了课程组多位老师的意见和建议，集多年教学经验之成果，但由于编写经验不足、水平有限，书中难免会出现一些错误，希望广大读者给予批评指正，在此表示衷心的感谢。

编者

2010年8月

目 录

工程力学概述	1
--------	---

第 1 篇 静 力 学

第 1 章 静力学基本概念及物体的受力分析	5
1.1 刚体和力的概念	5
1.2 静力学公理	7
1.3 力的解析表示	10
1.4 刚体及刚体系的受力分析	12
◇ 思考题	23
◇ 习题	23
第 2 章 力系的简化	27
2.1 力矩的计算	27
2.2 力偶理论	34
2.3 力系的简化	43
2.4 重心——空间平行力系的简化	51
◇ 思考题	57
◇ 习题	58
第 3 章 力系的平衡方程及其应用	62
3.1 平面任意力系的平衡方程及其应用	62
3.2 空间力系的平衡方程	68
3.3 刚体系的平衡问题	75
3.4 平面简单桁架的内力计算	81
3.5 考虑摩擦的平衡问题	85
◇ 思考题	95
◇ 习题	95

第 2 篇 材 料 力 学

第 4 章 材料力学基础	103
4.1 材料力学的研究对象与任务	103
4.2 材料力学的基本假设	105
4.3 内力、截面法	106
4.4 应力的概念	107

4.5	应变的概念	108
4.6	应力与应变之间的关系	109
4.7	杆件变形的基本形式	109
◇	思考题	110
◇	习题	110
第5章	轴向拉伸、压缩与剪切	112
5.1	概述	112
5.2	轴力与轴力图	113
5.3	轴向拉(压)构件的应力分析	114
5.4	材料拉伸与压缩时的力学性能	118
5.5	拉伸与压缩的强度计算	121
5.6	拉伸与压缩的变形	124
*5.7	简单拉、压静不定问题	128
5.8	连接构件的强度计算	132
*5.9	拉(压)应变能	136
◇	思考题	138
◇	习题	138
第6章	扭转	143
6.1	概述	143
6.2	外力偶矩、扭矩、扭矩图	143
6.3	纯剪切	146
6.4	等直圆轴扭转时横截面上的切应力分析和强度计算	148
6.5	等直圆轴扭转时的变形和刚度条件	154
*6.6	等直非圆杆自由扭转时的问题	157
◇	思考题	159
◇	习题	160
第7章	弯曲内力	163
7.1	概述	163
7.2	梁横截面上的内力——剪力、弯矩	165
7.3	剪力方程和弯矩方程, 剪力图和弯矩图	169
7.4	载荷集度、剪力和弯矩间的关系	174
7.5	利用叠加原理作弯矩图	179
7.6	平面刚架和平面曲杆内力图	180
◇	思考题	184
◇	习题	184
第8章	平面图形的几何性质	188
8.1	静矩和形心	188
8.2	极惯性矩、惯性矩、惯性积	189
8.3	平行移轴公式、组合截面的惯性矩和惯性积	191

8.4 惯性矩和惯性积的转轴公式、主轴和主惯性矩	194
◇ 思考题	196
◇ 习题	197
第9章 弯曲应力	199
9.1 概述	199
9.2 纯弯曲梁横截面上的正应力	199
9.3 剪切弯曲时的正应力、梁的正应力强度条件	202
9.4 梁弯曲时的切应力、梁的切应力强度条件	207
9.5 提高梁强度的措施	212
*9.6 开口薄壁杆件的弯曲切应力 弯曲中心	216
◇ 思考题	218
◇ 习题	219
第10章 弯曲变形	223
10.1 概述	223
10.2 梁的变形计算方法之一——积分法	225
10.3 梁的变形计算方法之二——叠加法	229
*10.4 简单静不定梁的计算	234
10.5 梁的刚度条件	236
10.6 提高梁弯曲刚度的基本措施	237
◇ 思考题	238
◇ 习题	239
第11章 应力状态 强度理论	243
11.1 概述	243
11.2 平面应力状态分析方法之一——解析法	244
11.3 平面应力状态分析方法之二——图解法	252
11.4 三向应力状态下的最大切应力	256
11.5 广义胡克定律	258
11.6 复杂应力状态下的应变能密度	261
11.7 工程设计中常用的强度理论	262
11.8 薄壁容器的强度计算	268
◇ 思考题	270
◇ 习题	272
第12章 组合变形	277
12.1 概述	277
12.2 拉(压)与弯曲的组合	278
12.3 斜弯曲	286
12.4 扭转和弯曲的组合	291
*12.5 组合变形的普遍情况	297
◇ 思考题	298

◇ 习题	299
第 13 章 压杆的稳定性问题	305
13.1 概述	305
13.2 确定临界载荷的欧拉公式	306
13.3 临界应力、临界应力总图	309
13.4 压杆的稳定性计算	314
13.5 提高压杆稳定性的基本措施	316
◇ 思考题	318
◇ 习题	319
*第 14 章 交变应力 动荷应力	323
14.1 交变应力	323
14.2 材料的疲劳极限	326
14.3 动荷应力	328
◇ 思考题	334
◇ 习题	334
附录 A 关于矢量的基本知识	338
附录 B 简单截面图形的几何性质	340
附录 C 型钢表	341
附录 D 主要专业名词的中英文对照表	352
附录 E 习题答案	362
参考文献	371

工程力学概述

1. 工程力学的研究内容

工程力学从宏观的角度研究物体的平衡规律和物体的承载能力。它涵盖了静力学和材料力学两部分，是工程结构设计中不可或缺的理论依据。从物理学中已经知道，力是物体之间的相互机械作用，力可以改变物体的运动状态，也可以改变物体的形状和尺寸，力的第一个作用效应称为力的运动效应，第二个作用效应称为力的变形效应。根据牛顿运动定律，当物体所受合外力为零时，物体处于平衡状态。静力学正是基于这一理论研究物体的平衡规律的。从变形效应方面来看，当力使物体发生了足够大的变形，超过了材料的承受极限，那么，物体将发生断裂等破坏现象，无法继续受力。因此，材料力学理论将从力与物体的变形关系方面研究物体的承载能力。物体的承载能力主要指物体受力后能够维持正常的、稳定的平衡状态，不发生破坏或过大变形的能力，须从强度、刚度和稳定性三方面进行分析计算。

2. 工程力学的研究模型

工程力学主要研究工程结构或机械设备、装置中所有受力物体，工程力学中通常将这些物体称为构件。静力学旨在分析各构件的平衡规律，利用构件受力的平衡条件分析计算未知力的大小和方向；材料力学主要分析构件的强度、刚度和稳定性。

静力学中研究的物体都是静止状态的，而且构件受力后发生的变形一般很小，忽略以后也不会对构件的平衡产生影响，因此，在静力学计算中，将物体作为刚体，即认为所有物体在受力后不会发生变形。材料力学则不同。例如，如果图 0-1 所示石材细长梁 AB 在力 F 作用下发生断裂，众所周知，梁在断裂时并不会会有太大的变形。所以，在研究构件的承载能力时，即使非常微小的变形也不能忽略，因此，材料力学将所研究的物体均视作变形体，即认为构件受力后，都会发生变形。

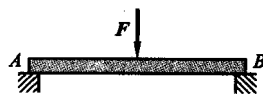


图 0-1 细长梁 AB
受到 F 的作用

3. 工程力学的研究方法

工程力学着重于工程和日常生活中的实际问题。因此，研究方法既来源于实践，又服务于实践、应用于实践。经过人们长期的实践活动，总结出工程力学的研究方法是：实践—理论—实践的循环往复。具体地说，就是先从实践中发现问题，提出问题，将其综合、归纳、抽象为力学分析的理论模型；然后根据抽象后的模型，选择相应的理论，建立数学模型（即方程）；经过一番数学的演绎和逻辑推理后，得到理论性的结论，最后将此结论应用于实践中并经过实践来验证它的正确性。力学的研究方法是符合辩证唯物主义的科学的、有效的方法。从实践到实践不是简单地重复，而是实践的升华。

工程力学首先以伽利略、牛顿所创立的古典力学为理论基础，对物体的受力情况加以正确的分析和计算；其次，对于某些无法用理论来分析的内容，如材料的力学性质等，需要通

过实验的方法来确定，因此，实验也是工程力学的研究方法之一；再次，随着社会的发展、科技的进步，为数值模拟计算方法提供了必要的条件，从而诞生了计算机分析方法。我们可以利用计算机强大快速的计算功能，对复杂受力构件的受力、变形进行数值计算，并模拟出构件的实际工作状态，从而设计出更加安全、实用、经济、完美的产品，为人们服务。

总之，工程力学将理论分析与实验方法和计算机处理很好地结合，来解决工程技术中的实际问题。

第 1 篇

静 力 学

- 第 1 章 静力学基本概念及物体的受力分析
- 第 2 章 力系的简化
- 第 3 章 力系的平衡方程及其应用

第 1 章

静力学基本概念及物体的受力分析

1.1 刚体和力的概念

1.1.1 刚体的概念

实际物体受力时，其内部各点间的相对距离会发生改变，这种改变称为位移。各点位移累加的结果，使物体的形状和尺寸改变，这种改变称为变形。所谓刚体，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。这是一个理想化的力学模型。实际物体在力的作用下，都会产生程度不同的变形。但是，这些微小的变形，对研究物体的平衡问题不起主要作用，可以略去不计，这样可使问题的研究大为简化。例如，在图 1-1 中，吊车梁的弯曲变形幅度 δ 一般不超过跨度（A、B 间距离）的 $1/500$ ，水平方向变形更小。因此，研究吊车梁的平衡规律时，变形是次要因素，可略去不计。

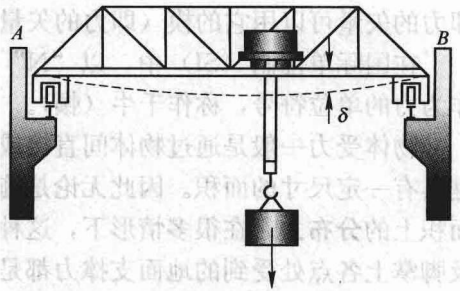


图 1-1 吊车梁的弯曲变形

但是不应该把刚体的概念绝对化。例如，在研究飞机的平衡问题或飞行规律时，可以把飞机看作刚体；可是在研究飞机的颤振问题时，机翼等的变形虽然非常微小，但必须把飞机看作弹性体。还有，在计算某些工程结构时，如果不考虑它们的变形，而仍使用刚体的概念，则问题将成为不可解的。

静力学中研究的物体只限于刚体，故又称刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

1.1.2 力的概念

力的概念是从劳动中产生的。人们在生活和生产中，由于肌肉紧张收缩的感觉，逐渐产生了对力的感性认识。随着生产的发展，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，逐步由感性到理性，建立了抽象的力的概念。

力是物体间相互的机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化。物体之间的机械作用，大致可分为两类：一类是接触作用，例如，机车牵引车厢的拉力，物体之间的挤压力等；另一类是“场”对物体的作用，例如，地球引力场对物体的引力，电场对电荷的引力或斥

力等。尽管各种物体间相互作用力的来源和性质不同，但在力学中将撇开力的物理本质，只研究各种力的共同表现，即力对物体产生的效应。力对物体产生的效应一般可分为两个方面：一是物体运动状态的改变；另一个是物体形状的改变。通常把前者称为力的运动效应，后者称为力的变形效应。静力学中把物体都视为刚体，因而只研究力的运动效应，即研究力使刚体的移动或转动状态发生改变这两方面的效应。材料力学则研究的是力的变形效应。

实践表明，力对物体的作用效果应决定于三个要素：①力的大小；②力的方向；③力的

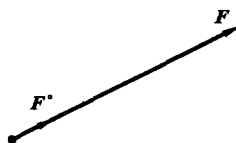
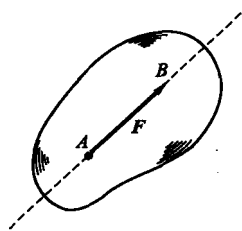


图 1-2 用矢量表示力的三要素

的作用点。我们可用一个矢量来表示力的三个要素，如图 1-2 所示。矢量的长度 (AB) 按一定的比例尺表示力的大小；矢量的方向表示力的方向；矢量的始端 (点 A) 表示力的作用点；矢量 \vec{AB} 沿着的直线 (虚线) 表示力的作用线。我们常用黑体字母 F 或矢量符号 \vec{F} 表示力的矢量，而用普通字母 F 表示力的大小。

若以 F^0 表示沿矢量 F 方向的单位矢，则力矢 F 可写成

$$F = FF^0$$

即力的矢量可以用它的模 (即力的矢量大小) 和单位矢量的乘积表示。

在国际单位制 (SI) 中，以“N”作为力的单位符号，称作牛 (顿)。有时也以“kN”作为力的单位符号，称作千牛 (顿)。

物体受力一般是通过物体间直接或间接接触进行的。接触处多数情况下不是一个点，而是具有一定尺寸的面积。因此无论是施力体还是受力体，其接触处所受的力都是作用在接触面积上的分布力。在很多情形下，这种分布力比较复杂。例如，人之脚掌对地面的作用力以及脚掌上各点处受到的地面支撑力都是不均匀的。当分布力作用面积很小时，为了分析计算方便起见，可以将分布力简化为作用于一点的合力，称为集中力。例如，静止的汽车通过轮胎作用在桥面上的力，当轮胎与桥面接触面积较小时，即可视为集中力；而桥面施加在桥梁上的力则为分布力 (见图 1-3)。

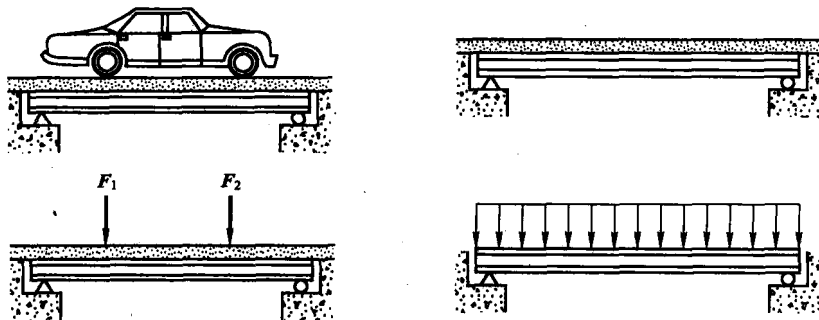


图 1-3 集中力与分布力示意图

1.1.3 力系

力系是指作用在物体上的一群力。按力系作用线的空间位置，可将力系分为：平面力系

和空间力系。

1. 平面力系

力的作用线分布在同一平面内的力系称为平面力系。平面力系还可分为平面汇交力系、平面平行力系和平面一般（任意）力系。力的作用线相交于平面内一点的力系称为平面汇交力系；力的作用线相互平行的力系称为平面平行力系（见图 1-4 (a)）；力的作用线既不相交于平面内一点，也不相互平行的力系称为平面一般（任意）力系（见图 1-4 (b)）。

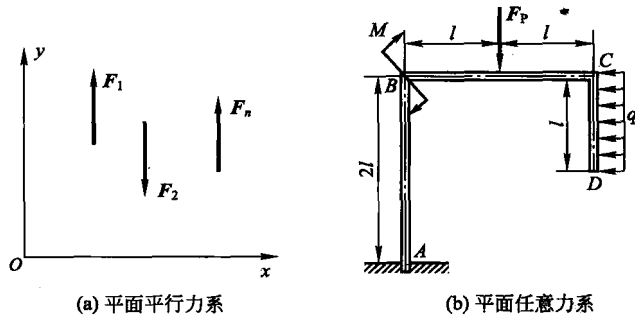


图 1-4 平面力系

2. 空间力系

力的作用线不在同一平面内的力系称为空间力系。空间力系是物体受力最普遍和最一般的情形。空间力系还可进一步分为空间汇交力系、空间平行力系和空间一般（任意）力系（见图 1-5）。

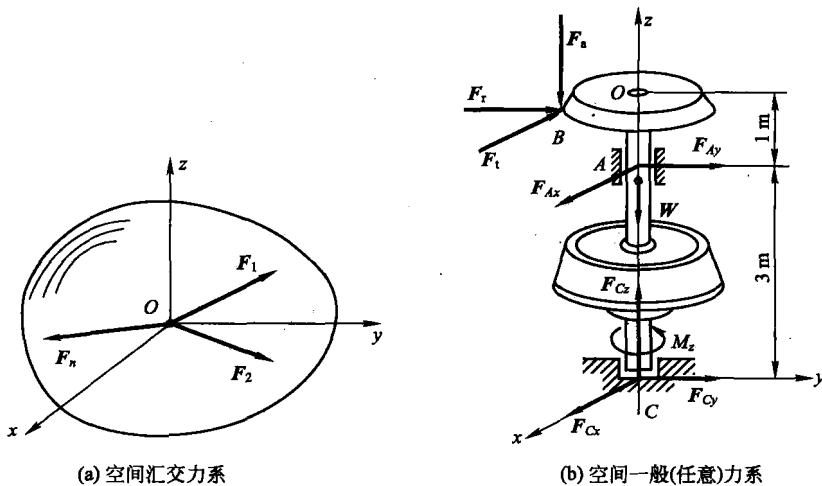


图 1-5 空间力系

1.2 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践反复检验，被确认是

符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 力的平行四边形法则

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，如图 1-6 (a) 所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

应用此公理求两汇交力合力的大小和方向（即合力矢）时，可由任一点 O 起，另作一力三角形，如图 1-6 (b)、(c) 所示。力三角形的两个边分别为力矢 F_1 和 F_2 ，第三边 F_R 即代表合力矢，而合力的作用点仍在汇交点 A 。

这个公理表明了最简单力系的简化规律，它是复杂力系简化的基础。

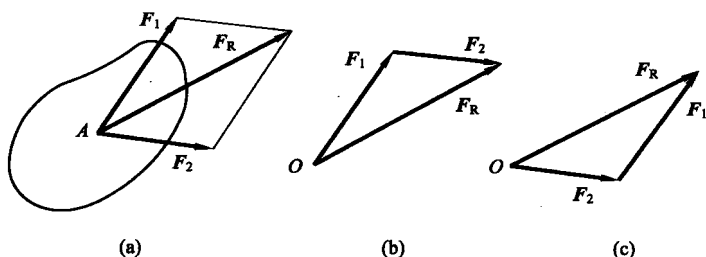


图 1-6 力的平行四边形法则

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力，使刚体保持平衡的必要和充分条件是这两个力的大小相等、方向相反，且在同一直线上。如图 1-7 所示，即

$$F_1 = -F_2 \quad (1-2)$$

这个公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。作用有二力的刚体又称为二力构件或二力杆。如图 1-8 所示的平衡结构，若不计 CD 杆的自重，则受力情况如图 1-9 所示。 CD 杆仅有两个端点受力，因此， CD 杆为二力平衡杆件，其受力沿着 CD 的连线方向。

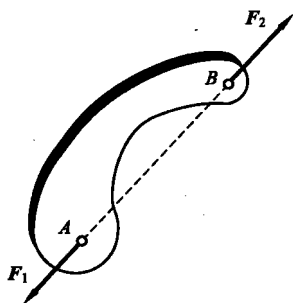


图 1-7 二力平衡条件

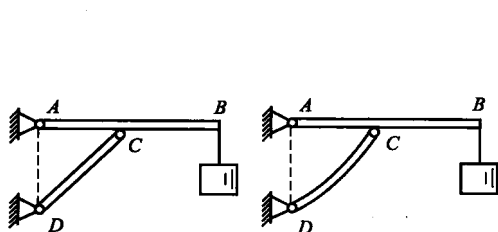


图 1-8 平衡结构

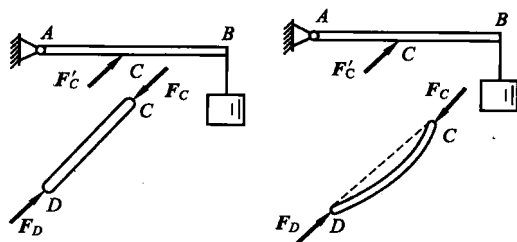


图 1-9 二力构件 CD 的受力情况

公理3 加减平衡力系原理

在已知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应。就是说，如果两个力系只相差一个或几个平衡力系，则它们对刚体的作用是相同的，因此可以等效替换。这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

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任意一点，并不改变该力对刚体的作用。

证明：设有力 F 作用在刚体上的点 A ，如图 1-10 (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 ，使 $F = F_2 = -F_1$ ，如图 1-10 (b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系，故可除去；这样只剩下一个力 F_2 ，如图 1-10 (c) 所示。于是，原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 均等效，即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

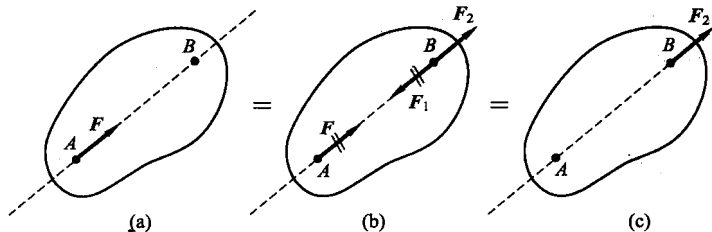


图 1-10 力的可传性

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，它已被作用线所代替。因此，作用于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，这种矢量称为滑动矢量。

推论2 三力平衡汇交定理

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通过汇交点。

证明：如图 1-11 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 O ，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。由于两个力平衡必须共线，所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。于是定理得证。

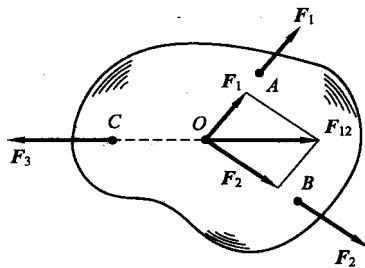


图 1-11 三力平衡汇交

公理4 作用力和反作用力定律

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。这个公理概括了物体间相互作用的关系，表明作用力和反作用力总是成对出现的。必须强调指出，由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上，因此，不能认为作用力与反作用力相互平衡。