

# 工程力学



牛玉林 主编  
华中理工大学出版社

高等工程专科学校教材

## 内 容 简 介

本书内容包括：静力学基础、物体与物体体系的受力分析、平面力系、空间力系、材料力学的基本概念、轴向拉伸和压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲强度、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形时构件的强度计算、压杆的稳定性、交变应力和动载荷，最后附有习题答案。

本书可作高等工程专科学校冶金、地质、采矿、电力、轻工、化工、纺织等专业的教材，也可作工科中专、职大、函大的教材或参考书，并可供自学者和工程技术人员参考。总课时为80~100学时。

## 工 程 力 学

牛玉林 主编

责任编辑 湛柏璩

责任校对 蔡晓湖

\*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

\*

开本：787×1092 1/32 印张：12.375 插页：2 字数：275 000

1989年12月第1版

1990年8月第2次印刷

一印数：4 501-7 000

ISBN 7-5609-0437-8/O·70

定价：2.50元

## 序

十年来,我国的高等教育事业蓬勃发展,尤其是高等专科教育的发展更为迅速。为了进一步提高教学质量,急需编写、出版适合专科教学要求的教材。教材是师生进行教学活动的重要依据,决定着课程甚至专业的教学水平和教学效果。因此切实搞好教材建设,使专科学校的教材能充分体现专科的培养目标,符合教学大纲与教学计划的要求,是当前专科学校深化教学改革中的一项十分重要而又紧迫的工作。

各高等专科学校为了适应教学需要,根据专科的特点和教学要求,自编了部分教材或讲义,在一定程度上克服了长期使用本科教材因而难以体现专科特点的弊病。为了进一步提高教材编写和出版的质量,在国家教委的支持下,在华中理工大学出版社的积极倡导下,沈阳冶金机械专科学校、郑州机械专科学校、哈尔滨机电专科学校和湖南省轻工业专科学校等14所专科学校,于1987年5月成立了“东北、华中地区高等工程专科学校教材协调委员会”,组织和协调有关工程专科学校的教材编写工作。

经参加“协调委员会”的各校负责同志的协商,决定首先编写一套适用面较广的教材,并由各校组织学术水平较高、教学经验丰富的教师分工合作,进行编写。由于参加编写教材的教师的共同努力,以及华中理工大学出版社的大力支持,现已编写好了一套适用于高等工程专科学校的教材,它们是高等数学、线性代数、概率与数理统计、大专物理、理论力学、材料力学、工程力学、电工电子技术基础、金属热加工、工程材料、机械原理、机械设计和机制工艺学。这些教材将由华中理工大学出版社陆续分批出版。

这套教材是在认真分析了十年来使用的国内外高校教材、自编讲义和较系统地总结了多年的教学经验的基础上编写出来的,因此较好地体

现了专科特点，符合一般专科教学计划和教学大纲的要求，适合全日制高等工程专科学校以及夜大、职大、函大的工程专科班使用。

这套教材的特点是，符合专科培养目标，内容的深度、广度适当，突出理论联系实际，注意知识的应用和学生能力的培养，适当介绍与反映了现代科学技术的新成就。这套教材不仅具有专科的特色和富于启发性，而且文字简练，结构严谨，插图清晰，是目前比较理想的专科教材，希望推广使用。

由于编写高等工程专科教材是一项新的工作，很多问题尚在探索之中，加之水平有限，编写时间较短，书中难免存在缺点和错误。殷切希望使用本教材的教师和广大读者批评指正。

东北、华中地区高等工程专科学校  
教材协调委员会主任于勤兹  
于1988年5月

## 前 言

1937年7月1日在长沙召开了东北和华中地区部分高等工程专科学校《工程力学》教材编写协作会。会上根据专科的特点和需要，制订了编写大纲，据此编写了本书。

本教材包括《理论力学》中的静力学部分和《材料力学》中的基本部分。静力学主要研究物体（或构件）的**受力分析、力系（一系列的力）的简化和平衡条件**。其内容列入本书的第一至第四章。材料力学主要研究构件本身的**承载能力**。为了保证构件在工作过程中安全可靠地工作，构件必须具有足够的**强度、刚度和稳定性**。为此，在设计时应合理地确定构件的尺寸、几何形状和材料种类，本书的材料力学部分将提供科学的计算方法，这就是材料力学的任务。其内容列入本书的第五至第十五章。本书内容较多，各专业可根据实际需要进行选择。

本教材根据专科的特点，改变了静力学的传统体系，加强了对刚体的受力分析，删去了一些冗长、繁琐、重复的理论推证。例如在平面力系一章中，采用了从一般到特殊的处理方法，适当地提高了理论起点。材料力学部分在删繁就简的基础上，进行了扼要的理论叙述和推证，加强了例题和习题。

读者在学习《工程力学》时，应将理论与工程实际紧密结合，并作一定数量的习题，以加深对基本概念和基本理论的理解，提高分析问题和解决问题的能力，为解决工程实际问题打好基础。

参加本书编写工作的同志有：牛玉林（前言、第一、第四、第九章）、刘巨威（第二章）、王立杰（第三章）、吴裕尧（第五、第十、第十四章）、黄宝林（第六章）、赵士勇

(第七、第十一章)、邢庆山(第八章)、付景华(第十二、第十五章)、郭惠芬(第十三章)。牛玉林任主编,吴裕尧任副主编。

本书承蒙长春冶金地质专科学校杨树高副教授审阅,提出了许多宝贵意见。在编写过程中,受到湖南省轻工业专科学校和沈阳黄金学院有关领导的关怀和支持,在此一并表示感谢。

我们虽然在教材内容和体系改革、贯彻理论联系实际等方面作了一些努力,但受编者水平所限,缺点和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

1988年8月

# 目 录

<b>第一章 静力学基础</b> .....	( 1 )
§ 1-1 静力学的基本概念 .....	( 1 )
§ 1-2 静力学公理 .....	( 3 )
§ 1-3 力在直角坐标轴上的投影 合力投影定理 .....	( 8 )
§ 1-4 力矩 .....	( 13 )
§ 1-5 力对点之矩与力对通过该点的轴之矩的关系 .....	( 18 )
§ 1-6 力偶 .....	( 19 )
已考题和习题 .....	( 25 )
<b>第二章 物体与物体系的受力分析</b> .....	( 28 )
§ 2-1 约束与约束反力 .....	( 28 )
§ 2-2 物体的受力分析和受力图 .....	( 34 )
§ 2-3 物体系统的受力分析 .....	( 36 )
已考题和习题 .....	( 40 )
<b>第三章 平面力系</b> .....	( 45 )
§ 3-1 力的平移定理 .....	( 46 )
§ 3-2 平面任意力系向一点简化 主矢和主矩 .....	( 48 )
§ 3-3 平面任意力系简化结果的分析 合力矩定理 .....	( 51 )
§ 3-4 平面任意力系的平衡方程 .....	( 53 )
§ 3-5 平面力系的几种特殊情况 .....	( 57 )
§ 3-6 物体系统的平衡问题 .....	( 62 )
§ 3-7 考虑摩擦力时平衡问题的解法 .....	( 68 )
§ 3-8 摩擦角与自锁条件 .....	( 75 )
§ 3-9 滚动摩擦 .....	( 79 )
已考题和习题 .....	( 81 )
<b>第四章 空间力系</b> .....	( 90 )
§ 4-1 空间力系的简化 主矢和主矩 .....	( 90 )

§ 4-2	空间力系的平衡方程 .....	( 92 )
§ 4-3	重心和形心 .....	( 98 )
	思考题和习题 .....	( 106 )
<b>第五章</b>	<b>材料力学的基本概念</b> .....	( 113 )
§ 5-1	材料力学的基本任务 .....	( 113 )
§ 5-2	变形固体的基本假设 .....	( 111 )
§ 5-3	构件变形的基本形式 .....	( 116 )
§ 5-4	内力和应力的概念 截面法 .....	( 117 )
<b>第六章</b>	<b>轴向拉伸和压缩</b> .....	( 121 )
§ 6-1	轴向拉伸(压缩)时横截面上的内力与应力 .....	( 121 )
§ 6-2	直杆轴向拉伸(压缩)时斜截面上的应力 .....	( 127 )
§ 6-3	材料拉伸时的力学性质 .....	( 130 )
§ 6-4	材料压缩时的力学性质 .....	( 135 )
§ 6-5	许用应力和安全系数的确定 .....	( 137 )
§ 6-6	直杆轴向拉伸(压缩)时的强度条件 .....	( 138 )
§ 6-7	直杆轴向拉伸(压缩)时的变形 .....	( 142 )
§ 6-8	拉伸或压缩时静不定问题简介 .....	( 145 )
	思考题和习题 .....	( 149 )
<b>第七章</b>	<b>剪切与挤压的实用计算</b> .....	( 155 )
§ 7-1	剪切的观念和实用计算 .....	( 155 )
§ 7-2	挤压和挤压的实用计算 .....	( 158 )
	思考题和习题 .....	( 163 )
<b>第八章</b>	<b>扭转</b> .....	( 165 )
§ 8-1	扭矩和扭矩图 .....	( 165 )
§ 8-2	纯剪切 剪应力互等定理 剪切虎克定律 .....	( 168 )
§ 8-3	圆轴扭转时的剪应力和强度条件 .....	( 171 )
§ 8-4	圆轴扭转时的变形和刚度条件 .....	( 179 )
	思考题和习题 .....	( 183 )
<b>第九章</b>	<b>弯曲强度</b> .....	( 187 )



§ 9-1	平面弯曲的概念与实例 .....	( 187 )
§ 9-2	梁的类型与计算简图 .....	( 188 )
§ 9-3	梁的内力——剪力和弯矩 .....	( 189 )
§ 9-4	剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图 .....	( 191 )
§ 9-5	弯矩、剪力和分布载荷之间的关系 .....	( 196 )
§ 9-6	梁的弯曲正应力 .....	( 200 )
§ 9-7	截面的惯性矩 平行移轴公式 .....	( 206 )
§ 9-8	正应力的强度条件 .....	( 214 )
§ 9-9	梁弯曲时的剪应力及强度条件 .....	( 219 )
§ 9-10	提高弯曲强度的措施 .....	( 224 )
	思考题和习题 .....	( 229 )
<b>第十章</b>	<b>弯曲变形</b> .....	<b>( 238 )</b>
§ 10-1	弯曲变形的基本方程 .....	( 238 )
§ 10-2	用积分法求梁的变形 .....	( 239 )
§ 10-3	用叠加法求梁的变形 .....	( 245 )
§ 10-4	梁的刚度校核 提高梁刚度的措施 .....	( 251 )
§ 10-5	简单静不定梁的解法 .....	( 254 )
	思考题和习题 .....	( 255 )
<b>第十一章</b>	<b>应力状态和强度理论</b> .....	<b>( 259 )</b>
§ 11-1	应力状态的概念 .....	( 259 )
§ 11-2	二向应力状态的分析 .....	( 262 )
§ 11-3	三向应力状态简介 广义虎克定律 .....	( 274 )
§ 11-4	强度理论简介 .....	( 278 )
	思考题和习题 .....	( 284 )
<b>第十二章</b>	<b>组合变形时构件的强度计算</b> .....	<b>( 288 )</b>
§ 12-1	构件组合变形的概念与实例 .....	( 288 )
§ 12-2	拉伸(压缩)与弯曲组合时的强度计算 .....	( 289 )
§ 12-3	弯曲与扭转组合时的强度计算 .....	( 297 )
	思考题和习题 .....	( 303 )

<b>第十三章 压杆的稳定性</b> .....	( 308 )
§ 13-1 压杆稳定性的概念 .....	( 308 )
§ 13-2 细长压杆的临界力 欧拉公式 .....	( 309 )
§ 13-3 欧拉公式的适用范围 .....	( 312 )
§ 13-4 压杆的稳定性校核 .....	( 317 )
§ 13-5 提高压杆稳定性的措施 .....	( 318 )
思考题和习题 .....	( 319 )
<b>第十四章 交变应力</b> .....	( 322 )
§ 14-1 交变应力的概念与实例 .....	( 322 )
§ 14-2 对称循环下构件的持久极限 强度条件 .....	( 327 )
§ 14-3 提高构件持久极限的措施 .....	( 337 )
思考题和习题 .....	( 339 )
<b>*第十五章 动载荷</b> .....	( 342 )
§ 15-1 构件作匀加速直线平动时的应力计算 .....	( 342 )
§ 15-2 圆环形构件作匀速转动时的应力计算 .....	( 344 )
§ 15-3 冲击载荷 .....	( 346 )
思考题和习题 .....	( 351 )
<b>附录 I 型钢表</b> .....	( 354 )
<b>附录 II 主要材料的力学性质</b> .....	( 374 )
<b>习题答案</b> .....	( 376 )
<b>参考文献</b> .....	( 386 )

# 第一章 静力学基础

静力学主要研究物体在力系作用下处于平衡状态时的平衡条件。力系指作用于物体上的一群力；平衡状态指物体相对地面保持静止或作匀速直线运动的状态。如厂房、机床的床身和匀速直线运动的汽车等均处于平衡状态；平衡条件指物体处于平衡状态时作用在物体上的力系所应满足的条件。

静力学的任务是：对单个物体和物体系进行受力分析；将作用在物体上的复杂力系简化；讨论和建立各种力系处于平衡状态下的平衡条件。此外，还将介绍物体重心和形心的计算方法。

本章主要内容是介绍静力学的基本概念、公理、定理和方法。

## § 1-1 静力学的基本概念

### （一）力的概念

力的概念是人们在长期的生活和生产实践中逐渐形成的。例如当人推车时，人的手感到受压；车在手的作用下，其运动状态将发生改变。可见，在人的手与车之间存在着一种相互的机械作用，抽象地称为力。再如，在机车牵引车箱、落水推动水轮机叶片转动等实例中，机车与车箱之间，水流与叶片之间都存在着相互的机械作用。由此得出：**力是物体之间相互的机械作用。**

上面的例子说明相互接触的物体之间存在着力的作用。也有的力是来源于“场”对物体的作用，如：地球引力场对物体的引力，电场对电荷的引力和斥力等。

由实践可知，力对物体的作用效应取决于力的**大小、方向**和**作用点**。通常称为力的**三要素**。力是**矢量**，通常以一个带有方向的直线段表示力，如图1-1所示。线段 $AB$ 的长度按一定的比例尺画出，代表力的

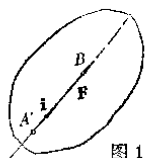


图 1-1

大小。设线段的起点 $A$ 为力的作用点，在终点 $B$ 加箭头，代表力的指向，于是就构成了表示力的**矢量**。用黑体字母例如 $\mathbf{F}$ 表示力的**矢量**，而用普通字母 $F$ 表示力的大小（力的模）。力的矢量 $AB$ 的延长线（图1-1中的虚线）称为力的**作用线**。若以 $i$ 表示沿矢量 $F$ 方向的**单位矢量**，则力矢 $F$ 可写成

$$\mathbf{F} = Fi \quad (1-1)$$

即力的矢量可以用它的模和单位矢量的乘积表示。

本书采用国际单位制(SI)，以“牛〔顿〕”作为力的单位，记为(N)。有时也以“千牛〔顿〕”作单位，记为(kN)。在工程单位制中，力的单位为公斤(kg)或吨(t)。两者的换算关系为 $1\text{ kg} \approx 9.8\text{ N}$ ， $1\text{ t} = 9.8\text{ kN}$ 。

还应当指出，力作用在物体上同时产生两种效应：一种是使物体的运动状态发生改变（或限制运动状态的改变），如物体运动方向和速度的改变；另一种是物体本身变形，如弯曲变形和扭转变形。前者是力对物体的外效应，后者是力对物体的内效应。

## (二) 刚体的概念

在理论上将不变形的物体称为**刚体**。刚体是理想化的力学模型。因为实际物体在力的作用下，都会产生一定程度的变形。

由于工程中使用的构件都具有很好的承载能力，实际上变

形都是很小的。例如：吊车大梁工作时最大竖直位移不超过  $(1/700 \sim 1/400)l$  ( $l$ 为梁的跨度)；架空管道的最大竖直位移不超过  $(1/500)l$ 。在研究物体的平衡问题时，这样小的变形可以略去不计，将构件视为不变形的物体(即刚体)，这样就使计算大为简化。所以在静力学中所涉及到的物体均为刚体。

## § 1-2 静力学公理

静力学公理是对力的基本性质的概括和总结，是静力学的理论基础。

### 公理一 二力平衡公理

作用在同一个刚体上的两个力，使刚体处于平衡的必要和充分的条件是：这两个力的大小相等，方向相反，且作用在同一条直线上。

对于刚体，这个条件既是必要的，又是充分的；但对于非刚体，这个条件是不充分的。例如：对于软绳受两个等值反向的拉力作用时可以平衡，但是不能承受两个等值反向的压力作用。

### 公理二 力的平行四边形法则

作用于同一个刚体上的两个汇交力，可以合成为一个合力，合力作用于汇交点上，合力的大小和方向可以由两个力矢为边所作的平行四边形的对角线来确定。如图 1-2 a 所示，作用于刚体上点  $A$  的两个力  $F_1$  与  $F_2$  的合力  $R$  可按这个法则确定。其矢量表达式为

$$R = F_1 + F_2$$

求两个力的合力，还可以用力的三角形来确定。由平行四边形  $ABCD$  可见： $\overline{BC} = \overline{AD} = F_2$ ，所以只要画出相邻边  $AB$  与

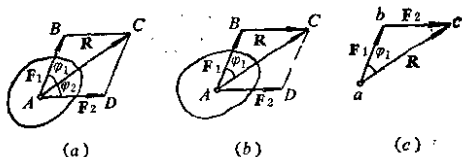


图 1-2

$BC$ , 连接  $AC$ , 即得合力  $R$  (图 1-2  $b$ )。或者说, 只要作出  $\triangle ABC$  (或  $\triangle ADC$ ) 就可以确定合力  $R$ 。

为便于求得两个汇交力的合力 (合力的大小和方向), 可以从平面上任取一点  $a$  作矢量  $ab$  等于力  $F_1$  (图 1-2  $c$ ), 再从点  $b$  作矢量  $bc$  等于力  $F_2$ , 连接  $a$  和  $c$  两点, 得矢量  $ac$ , 即为合力  $R$  的大小和方向。三角形  $abc$  称为力三角形, 上述作图法则称为力三角形法则。

力的作用线在同一平面内且汇交于一点的许多力, 称平面汇交力系。求平面汇交力系的合力, 可以用力三角形法则或力的平行四边形法则, 将力系中各力逐次相加而求得其合力。

设在刚体的同一平面内作用有 4 个力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ , 它们汇交于点  $A$ , 构成平面汇交力系 (图 1-3  $a$ ), 现求其合

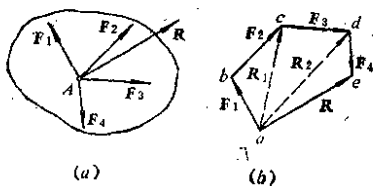


图 1-3

力。

作法：在平面上任取一点 $a$ 为起点（图1-3b），按一定比例尺（如以1mm代表5N的力），作矢量 $\vec{ab} = F_1$ ，自点 $b$ 开始作矢量 $\vec{bc} = F_2$ ，连接 $a$ 、 $c$ 两点得矢量 $\vec{ac} = R_1$ ，即为 $F_1$ 与 $F_2$ 的合力，如图1-3b所示。仿此，再从点 $c$ 开始作矢量 $\vec{cd} = F_3$ ，则矢量 $\vec{ad} = R_2$ ，即为 $R_1$ 与 $F_3$ 的合力（亦为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 的合力）。最后自点 $d$ 开始作矢量 $\vec{de} = F_4$ ，连接 $d$ 、 $e$ 两点，则得矢量 $\vec{ae} = R$ ，即为 $R_2$ 与 $F_4$ 的合力（亦为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  4个力的合力），其作用线通过点 $A$ （图1-3a）。

由图1-3b可见：为了求合力 $R$ 的大小与方向，中间矢量 $\vec{ac}$ 与 $\vec{ad}$ 可不作出，只要自点 $a$ 起顺次将力 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 首尾相接画出（须保持各力大小、方向不变），然后自第一个力的起点 $a$ ，向最后一个力的终点 $e$ 作出力矢，即得合力 $R$ ，这样可使图形更为简单。多边形 $abcde$ 称为力多边形。上述求合力的作图法称为力多边形法则。

对于由许多个力组成的平面汇交力系，按此法则作出力多边形，可以简单地求出其合力的大小与方向。这个合力就是平面汇交力系简化的最后结果。其合力的矢量表达式为

$$R = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (1-2)$$

### 力的分解

根据力的合成法则的逆过程推知：若不加任何条件限制时，一个力可分解为两个或多个力，即可得到无穷多组相互等效的力系。在实际应用时，常将一个力分解为两个力，但必须附加限制条件。如已知力 $R$ （图1-2a）时，要求将它沿着 $AB$ 和 $AD$ 方向分解。应用力的平行四边形法则，即可得到两

个分力 $F_1$ 和 $F_2$ 。

在工程上常将一个力分解为两个相互垂直的分力。如图1-4所示的一对相啮合齿轮，齿轮1受到与它相啮合的齿轮2的作用力（齿面压力） $F$ 的作用，其作用线为两个齿廓曲线在接触点 $A$ 的公法线。为便于计算，将力 $F$ 分解为两个相互垂直的分力：沿节圆（图中未示出）切线方向的圆周力 $F_1$

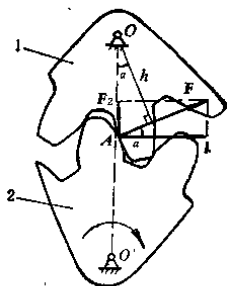


图1-4

和沿半径方向的径向力 $F_2$ 。设啮合角（力 $F$ 与节圆切线的夹角）为 $\alpha$ ，则得力 $F_1$ 和 $F_2$ 的大小分别为

$$F_1 = F \cos \alpha; \quad F_2 = F \sin \alpha$$

### 公理三 加减平衡力系公理

在作用于刚体的任意一个力系上，当加上或减去任意一个平衡力系时，不改变原来力系对刚体的作用。

当刚体在某一个力系作用下处于平衡状态时，这个力系称为平衡力系。由此定义可知，平衡力系不会引起刚体运动状态的改变。

### 推论一 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可以沿其作用线在刚体内任意移动而不改变刚体原来的运动状态。

证明 设作用于刚体 $A$ 点上的力为 $F$ ，在其作用线上任取一点 $B$ （图1-5a），根据加减平衡力系公理，在该点加一个平衡力系 $F_1$ 与 $F_2$ ，且使 $F = F_2 = -F_1$ （图1-5b），因为力 $F$ 与 $F_1$ 大小相等、方向相反，组成平衡力系，故可减掉。这样



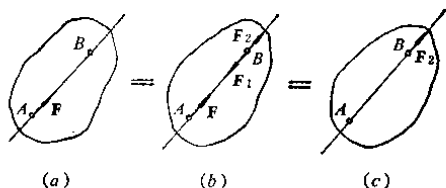


图 1-5

只剩下一个作用于B点的力 $F_2$  (图1-5c), 该力相当于将力 $F$ 沿其作用线自A点移到了B点, 可见推论一正确。

### 推论二 三力平衡汇交定理

理

作用于刚体上三个相互平衡的力, 若其中两力的作用线汇交于一点, 则此三力必在同一平面内, 且第三力的作用线必通过前两力的汇交点 (简称三力平衡必汇交于一点)。

证明 如图1-6所示, 在刚体的A、B、C三点上, 分别作用三个相互平衡的力 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。根据力的可传性原理, 将力 $F_1$ 、 $F_2$ 分别沿其作用线移到汇交点O, 然后根据力的平行四边形法则, 求得合力 $R$ 。因为原力系是平衡的, 故力 $F_3$ 应与合力 $R$ 共线, 且等值、反向, 满足二力平衡条件。所以力 $F_3$ 必定与力 $F_1$ 和 $F_2$ 共面, 且通过 $F_1$ 与 $F_2$ 的汇交点O。

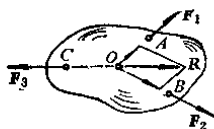


图 1-6

### 公理四 作用与反作用定律

两个物体相互作用时, 作用力与反作用力的大小相等、方向相反、沿着同一条直线, 并且分别作用在两个不同的物体上。