

高 等 学 校 教 材

工程力学

张功学 主 编

张光伟 副主编

张功学

张光伟

陈继生

李建军

雷 静 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

张功学 主编 张光伟 副主编

张功学 张光伟 陈继生 李建军 雷 静 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书根据《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》，将理论力学、材料力学、工程材料三门课程的相关内容融合在一起，力求形成完整协调的体系。基本概念、基本理论和基本方法的阐述文字简练、论述严谨，注重工程应用与能力的培养。

本书内容分为三部分：静力学部分包括静力学公理与物体受力分析，平面基本力系，平面任意力系，空间力系；材料力学部分包括轴向拉伸与压缩，扭转，弯曲内力，弯曲应力，弯曲变形，应力状态分析与强度理论简介，组合变形，压杆稳定，构件的疲劳强度概述，能量法简介；运动学部分包括运动学基础，点的合成运动，刚体的平面运动。

本书可作为高等学校本科轻工、材料、纺织、环保、地矿等非机类专业的教材，也可作为高职高专非机类专业的教材，同时可供成人教育、职大、电大师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 张功学主编；张功学等编. -- 北京：
高等教育出版社，2013. 12
ISBN 978-7-04-039117-6

I. ①工… II. ①张… 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(2013)第 300261 号

策划编辑 黄 强
插图绘制 宗小梅

责任编辑 黄 强
责任校对 孟 玲

封面设计 李小璐
责任印制 毛斯璐

版式设计 王 莹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 三河市杨庄长鸣印刷装订厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 25.5
字 数 470 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 12 月第 1 版
印 次 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 37.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 39117-00

前 言

本书按照教育部《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》,结合当前非机类专业工程力学课程的教学实际,以满足课堂教学和知识扩展的要求编写而成。

本书分为三篇,第一篇静力学(第一~四章),第二篇材料力学(第五~十四章),第三篇运动学(第十五~十七章)。在教学过程中,可根据各专业特点和教学安排进行相应取舍。

工程力学是高等学校工科类专业的一门技术基础课。考虑到本课程在非机类专业人才培养和教学计划中的地位与作用,本书在内容结合、知识阐述、素质教育、理论知识应用于工程实际的能力训练等方面进行了有益的尝试。既保证基础理论的系统性与严密性,又密切联系工程实际,同时重视创新意识及能力的培养。在文字论述上力求准确、简练与严谨,专业覆盖面宽,保证一定的信息量,帮助读者了解相关专业知识,学以致用。

本书各章末均附有思考题和习题,书末附有习题参考答案。

本书由张功学教授任主编,张光伟教授任副主编,具体分工如下:张功学负责绪论,材料力学引言,第五、十五、十六、十七章及附录的编写;张光伟负责第十四章的编写;陈继生负责第七、八、九、十章的编写;李建军负责第十二、十三章的编写;雷静负责第一、二、三、四、六章及第十一章的编写。全书由张功学教授统稿。张艳华、赵志明两位老师在图形绘制及习题校核等方面做了大量工作。

西安交通大学韩省亮教授仔细审阅了本书的全部内容,提出了许多中肯而宝贵的意见,对本书质量的提高起到了建设性作用。在本书的编写过程中还得到了其他许多同志的支持与帮助。在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,错误、疏漏及不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2013年9月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人将承担相应的民事责任和行政责任;构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序,保护读者的合法权益,避免读者误用盗版书造成不良后果,我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 静 力 学

第一章 静力学公理与物体受力分析	3
------------------	---

§ 1.1 力的概念与分类	3
§ 1.2 静力学公理	4
§ 1.3 约束与约束反力	7
§ 1.4 物体的受力分析与受力图	11
思考题	16
习题	18

第二章 平面基本力系	20
------------	----

§ 2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	20
§ 2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	23
§ 2.3 平面力对点之矩	28
§ 2.4 平面力偶理论	31
思考题	35
习题	36

第三章 平面任意力系	41
------------	----

§ 3.1 力的平移定理	41
§ 3.2 平面任意力系的简化	42
§ 3.3 平面任意力系的平衡条件与平衡方程	45
§ 3.4 静定与静不定·物体系统的平衡	52
§ 3.5 滑动摩擦及其平衡问题	58
思考题	64
习题	65

第四章 空间力系	72
----------	----

§ 4.1 力沿空间直角坐标轴的分解与投影	72
-----------------------	----

II 目录

§ 4.2 力对轴之矩及合力矩定理	74
§ 4.3 空间力系的平衡	75
§ 4.4 空间平行力系的中心与重心	81
思考题	85
习题	85

第二篇 材料力学

第五章 轴向拉伸与压缩	95
§ 5.1 引言	95
§ 5.2 拉压杆的内力与应力	96
§ 5.3 材料拉伸·压缩时的力学性能	103
§ 5.4 拉压杆的强度计算	114
§ 5.5 拉压杆的变形计算	118
§ 5.6 拉压静不定问题简介	121
§ 5.7 连接件的实用强度计算	125
思考题	130
习题	131
第六章 扭转	137
§ 6.1 引言	137
§ 6.2 外力偶矩·扭矩与扭矩图	138
§ 6.3 圆轴扭转的应力与变形	140
§ 6.4 圆轴扭转强度条件与刚度条件	146
§ 6.5 非圆截面轴扭转简介	150
思考题	152
习题	153
第七章 弯曲内力	157
§ 7.1 引言	157
§ 7.2 弯曲内力	159
§ 7.3 剪力·弯矩方程与剪力·弯矩图	162
§ 7.4 剪力·弯矩与载荷集度间的微分关系	169
§ 7.5 刚架的内力图	172
思考题	174

习题	174
第八章 弯曲应力	179
§ 8.1 弯曲正应力	179
§ 8.2 弯曲切应力简介	186
§ 8.3 弯曲强度条件及其应用	190
§ 8.4 提高梁强度的主要措施	197
思考题	200
习题	201
第九章 弯曲变形	209
§ 9.1 引言	209
§ 9.2 梁变形基本方程	210
§ 9.3 确定梁位移的叠加法	215
§ 9.4 梁的刚度校核	219
§ 9.5 简单静不定梁	220
思考题	222
习题	222
第十章 应力状态分析与强度理论简介	226
§ 10.1 引言	226
§ 10.2 平面应力状态分析·主应力	227
§ 10.3 复杂应力状态下的应力与应变关系	231
§ 10.4 强度理论简介	234
思考题	239
习题	240
第十一章 组合变形	243
§ 11.1 引言	243
§ 11.2 拉(压)弯组合变形	243
§ 11.3 弯曲与扭转的组合	249
思考题	256
习题	257

第十二章 压杆稳定	262
§ 12.1 引言	262
§ 12.2 两端铰支细长压杆的临界载荷	263
§ 12.3 不同支承下细长压杆的临界载荷	265
§ 12.4 中小柔度杆的临界应力	267
§ 12.5 压杆稳定条件与合理设计	271
思考题	274
习题	275
第十三章 构件的疲劳强度概述	278
§ 13.1 引言	278
§ 13.2 交变应力的描述及几个物理量	279
§ 13.3 $S-N$ 曲线及材料的疲劳极限	280
§ 13.4 影响构件疲劳极限的主要因素及构件的疲劳强度计算	282
§ 13.5 提高构件疲劳强度的途径	289
思考题	290
习题	291
第十四章 能量法简介	292
§ 14.1 外力的功与变形能的计算	292
§ 14.2 单位力法	295
§ 14.3 冲击问题	299
思考题	303
习题	303

第三篇 运 动 学

第十五章 运动学基础	307
§ 15.1 点的运动学	307
§ 15.2 刚体的平行移动	316
§ 15.3 刚体的定轴转动	316
思考题	322
习题	323

第十六章 点的合成运动	327
§ 16.1 相对运动 · 牵连运动 · 绝对运动	327
§ 16.2 点的速度合成定理	328
§ 16.3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	332
思考题	334
习题	335
第十七章 刚体的平面运动	339
§ 17.1 刚体平面运动概述与运动分解	339
§ 17.2 平面图形上各点的速度分析	341
§ 17.3 用基点法求平面图形内各点的加速度	348
思考题	351
习题	352
附录 A 平面图形的常用几何性质	357
§ A.1 静矩与形心	357
§ A.2 惯性矩与极惯性矩	360
§ A.3 组合图形的惯性矩	364
思考题	365
习题	366
附录 B 型钢表	368
附录 C 习题参考答案	385
参考文献	397

绪 论

1. 工程力学的主要内容

工程力学是研究物体机械运动及其承载能力的一门学科。工程力学所涵盖的内容十分广泛,本书内容仅包含该学科中最基础的理论和方法,这些内容是工程设计中的基本知识。

在企业生产与工程实践中,存在着大量称之为**构件**的物体,如结构的元件、设备与机器的零件。它们有的处于静止状态,有的在作机械运动。**机械运动**是指物体在空间的位置随时间而改变,**静止**是机械运动的特例。

构件在外力作用下丧失正常工作能力的现象称为**失效或破坏**。为了保证构件的正常工作,即保证其具有必要的承载能力,首先需要对构件所受的外力进行分析。物体受力分析是分析某个物体共受几个力作用,每个力作用的位置与方向,同时还要研究物体保持“**平衡**”(静止是平衡的一种)时,所受各力之间应满足的关系。这些知识是研究物体机械运动及其承载能力的基础。

为了保证构件的正常工作,仅仅研究其外部受力及其关系是不够的,还要进一步研究构件的内部受力、变形及其失效规律,从而建立保证构件正常工作的准则或条件。

综上所述,工程力学是工程设计的基础,其内容包括三篇。

第一篇:**静力学** 主要分析物体的受力及其平衡问题;

第二篇:**材料力学** 主要研究承载构件的内力、变形与失效的规律;

第三篇:**运动学** 抛开引起运动的原因不计,单纯从几何角度研究点和刚体的运动。

2. 工程力学的研究方法

科学研究的过程就是认识客观世界的过程,任何正确的科学研究方法一定要符合辩证唯物主义的认识论。工程力学也必须遵循这个正确的认识规律。

首先,通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行多次科学实验,经过分析、综合与归纳,总结出力学最基本的规律。纵观力学发展的历史,如“二力平衡”、“杠杆原理”以及“万有引力定律”等力学基本定律的发现,无不证明了这一认识规律。

其次,在对客观现象进行观察与实验的基础上,找出哪些是影响事物的主要因素,哪些是次要因素。抓住主要因素,将研究对象抽象为力学模型。例如,在

研究静平衡问题时,物体的变形是次要因素,忽略这一次要因素就可用刚体这一模型来代替真实物体。在研究物体内力、变形及失效规律时,物体变形是主要因素,故刚体这一力学模型已不能反映问题的本质,于是用变形固体来代替真实物体。

对不同的问题,采用不同的力学模型,是工程力学研究问题的重要方法。

将实践中所得的结果,经过抽象化建立力学模型,形成概念,在基本定律的基础上,经过逻辑推理和数学运算,就可以得到工程上所需要的定理与公式。当然,这些定理和公式的正确与否,还需要在实践中验证、发展。

3. 工程力学在工艺类专业中的地位与作用

工程力学是高等工科学校工艺类专业的**技术基础课**。对于工艺类专业,工程力学在基础课与专业课之间起着桥梁与纽带作用。一方面,工程力学可以解决工艺过程中的一些实际问题;另一方面,通过工程力学的学习,为机械设计等后续课程提供重要的理论与工程分析基础。

第一篇 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的一门科学。

静力学中所指的物体都是**刚体**。所谓刚体是指物体在力的作用下,其内部任意两点之间的距离始终保持不变,这是一种理想化的力学模型。

“**平衡**”是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或作匀速直线运动的状态,是物体运动的一种特殊形式。

静力学主要研究以下三个问题:

1. 物体的受力分析

分析物体共受几个力作用,每个力的作用位置及其方向。

2. 力系的简化

所谓**力系**是指作用在物体上的一群力。如果作用在物体上两个力系的作用效果是相同的,则这两个力系互称为**等效力系**。用一个简单力系等效地替换一个复杂力系的过程称为**力系的简化**。力系简化的目的是简化物体受力,以便于进一步分析和研究。

3. 建立各种力系的平衡条件

刚体处于平衡状态时,作用于刚体上的力系应该满足的条件,称为**力系的平衡条件**。满足平衡条件的力系称为**平衡力系**。力系平衡条件在工程中有着特别重要的意义,是设计结构、构件和零件的静力学基础。

第一章 静力学公理与物体受力分析

§ 1.1 力的概念与分类

力是人们从长期生产实践中经抽象而得到的一个科学概念。例如,当人们用手推、举、抓、掷物体时,由于肌肉伸缩逐渐产生了对力的感性认识。随着生产

的发展,人们逐渐认识到,物体运动状态及形状的改变,都是由于其他物体对其施加作用的结果。这样,由感性到理性建立了力的概念:力是物体间相互的机械作用,其作用结果是使物体运动状态或形状发生改变。

实践表明力的效应有两种,一种是使物体的运动状态发生改变,称为力对物体的外效应;另一种是使物体的形状发生改变,称为力对物体的内效应。在静力学部分将物体视为刚体,只考虑力的外效应;而在材料力学部分则将物体视为变形体,必须考虑力的内效应。

力是物体之间的相互作用,力不能脱离物体而独立存在。在分析物体受力时,必须注意物体间的相互作用关系,分清施力体与受力体。否则,就不能正确地分析物体的受力情况。

由经验可知,力对物体的作用效果取决于三个要素:大小、方向、作用点,此即称为力的三要素。在国际单位制(SI)中以 N 作为力的计量单位,有时也用 kN 作为力的计量单位,1 kN = 1 000 N。

力的三要素可用一个矢量来表示,如图 1.1 所示。矢量长度按照一定比例表示力的大小;矢量方向为力的作用方向;矢量起始端或末端为力的作用点,如图 1.1 中的 A、B 两点。本书用 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用 F 表示力的大小。

依据力系中各力作用线的相互位置,力系可分为空间力系和平面力系。依据力系中各力作用线间的相互关系,又可将力系分为汇交力系、平行力系与任意力系。汇交力系、平行力系是任意力系的两种特殊情形。

依据力的作用范围可将力分为集中力和分布力:

集中力(集中载荷):当力的作用面面积相对于结构或构件尺寸很小时,可视为作用于结构或构件上的某一点,称其为集中力。

分布力(分布载荷):分布于物体上某一范围内的力称为分布力。分布力用载荷集度 q 来表示。体分布力单位为 N/m^3 ,面分布力单位为 N/m^2 。工程设计中,常将体、面分布力简化为连续分布在某一段长度上的力,称为线分布力,单位为 N/m 。

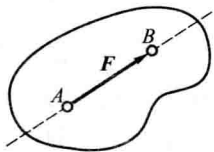


图 1.1

§ 1.2 静力学公理

在生产实践中,人们对物体的受力进行了长期观察和试验,对力的性质进行了概括和总结,得出了一些经过实践检验是正确的、大家都承认的、无需证明的力学理论,这就是静力学公理。

公理一(二力平衡原理) 作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的充分必要条件是:两力大小相等,方向相反,作用在同一直线上;或者说二力等值、反

向、共线。

此公理阐明了由两个力组成的最简单力系的平衡条件,是一切力系平衡的基础。此公理只适用于刚体,对于变形体来说,它只给出了必要条件,而非充分条件。

工程中经常遇到不计自重,且只在两点各受一个集中力作用而处于平衡状态的刚体。这种只在两个力作用下处于平衡状态的刚体,称为二力构件(二力杆)。二力构件的形状可以是直线形的,也可以是其他任何形状的。作用于二力构件上的两个力必然等值、反向、共线。在结构中找到二力构件,对整个结构系统的受力分析是至关重要的。

公理二(加减平衡力系原理) 在已知力系上,加上或减去任意平衡力系,不改变原力系对刚体的作用效果。

也就是说,如果两个力系只相差一个或几个平衡力系,它们对刚体的作用效果相同。此公理是力系简化的基础。

推论 1(力的可传性定理) 作用于刚体某点上的力,其作用点可以沿其作用线移动到刚体内任意一点,不改变原力对刚体的作用效果。

证明: 设一力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1.2a 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 , 加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 , 使 $F = F_1 = F_2$, 如图 1.2b。由于 F 和 F_1 构成一个新的平衡力系,故可减去,这样只剩下一个力 F_2 , 如图 1.2c。于是原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 互为等效力系。这样, F_2 可看成是原力 F 的作用点沿其作用线由 A 点移到了 B 点。

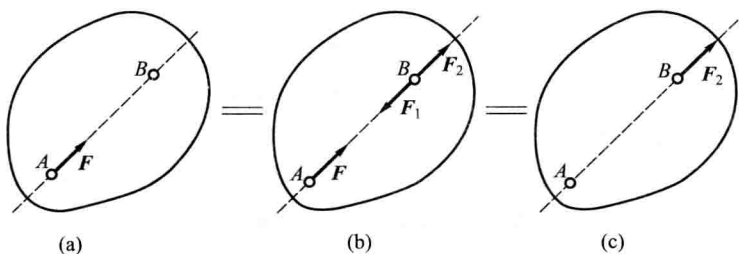


图 1.2

如图 1.3 所示用小车运送物品时,不论在车后 A 点用力 F 推车,或在车前同一直线的 B 点用力 F 拉车,其作用的效果都是一样。

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力作用效果的要素,它已被作用线所替代。因此,作用于刚体上力的三要素是:大小、方向、作用线。

公理二及其推论只适用于刚体,而不适用于变形体。对于变形体来说,作用力将产生内效应,当力沿其作用线移动时,内效应将发生改变。

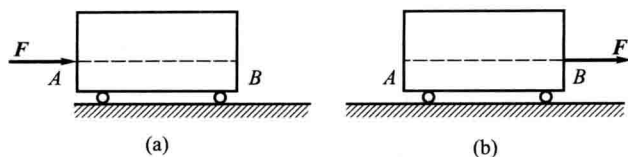


图 1.3

公理三(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。合力作用点也在该点,合力的大小和方向由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线所决定。如图 1.4a 所示。或者说,合力矢等于两个分力矢的矢量和,即

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

应用此公理求两个汇交力的合力时,可由任意一点 O 起,另作一力三角形,如图 1.4b,c 所示。三角形的两个边分别表示两个分力,第三边表示合力,合力的作用点仍在汇交点 A 。此即两个汇交力合成的力三角形法则。

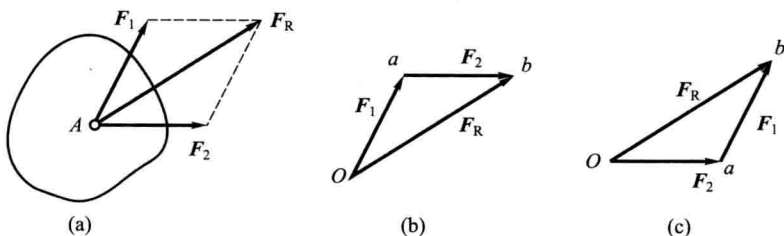


图 1.4

如果一个力与一个力系等效,则该力称为力系的合力,力系中的各个力称为该合力的分力。将分力替换成合力的过程称为力系的合成;将合力分解成分力的过程称为力系的分解。

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。

该推论的证明请读者参考图 1.5 自行给出。

注意:三力平衡汇交定理的逆定理不成立。也就是说,即使三力共面且汇交于一点,此三力也未必平衡,请读者自行举例说明。

公理四(作用与反作用原理) 两物体之间的相互作用力总是等值、反向、共线,分别作用在两个相互作用的物体上。

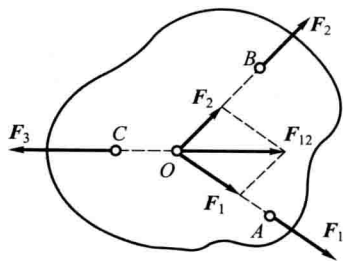


图 1.5

这个原理揭示了物体之间相互作用的定量关系,它是对物体系统进行受力分析的基础。

注意:作用与反作用原理中的两个力分别作用于两个相互作用的物体上,而二力平衡原理中的两个力作用于同一个物体。

在图 1.6 中,重物给绳索一个向下的拉力 F_B ,同时绳索给重物一个向上的拉力 F'_B , F_B 与 F'_B 互为作用与反作用力,而 F_B 与 F_A , F'_B 与 W 为两对平衡力。

公理五(刚化原理) 变形体在某一力系作用下处于平衡状态,如果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视为刚体模型的条件。例如,绳索在等值、反向、共线两个力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚体,其平衡状态保持不变。反之,就不一定成立。如刚体在等值、反向、共线的两个力作用下平衡,若将其换为绳索就不一定能平衡了。

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。

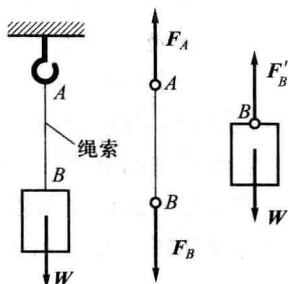


图 1.6

§ 1.3 约束与约束反力

在机械和工程结构中,每一构件都根据工作需要,以一定的方式与周围其他构件联系着,其运动也受到一定限制。例如,梁由于墙的支撑而不致下落,列车只能沿轨道行驶,门、窗由于合页的限制而只能绕轴线转动等。这种联系限制了构件间的相对位置和相对运动。

1. 约束与约束反力

工程中所遇到的物体通常可分为两种。有些物体在空间的位移不受任何限制,如飞行的飞机、气球、炮弹和火箭等,这种位移不受任何限制的物体称为**自由体**。而有些物体在空间的位移却受到一定的限制,如机车受到铁轨的限制,只能沿轨道运动;电机转子受轴承的限制,只能绕轴线转动;重物被钢索吊住而不能下落等。这种位移受到限制的物体称为**非自由体**。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为**约束**。如铁轨对于机车、轴承对于电机转子、钢索对于重物等,都是约束。

约束限制非自由体的运动,能够起到改变物体运动状态的作用。从力学角度来看约束对非自由体有作用力。约束作用在非自由体上的力称为**约束反力**,