



21世纪高等教育应用型精品课程规划教材

工程力学

(上册)

邱小林 冯新红 包忠有 郭纪林 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等教育应用型精品课程规划教材

工 程 力 学

(上册)

邱小林 冯新红
包忠有 郭纪林

编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本教材是按 90~96 课时编写的,适用于高等教育应用型院校对《工程力学》课程安排为中等学时的各专业,亦适用于自学使用。内容包含静力学基本理论,构件的强度、刚度和稳定性计算,以及运动学和动力学基本概念。

本教材中除例题和习题以外,还有一定数量的思考题及题后分析,以帮助使用本教材的读者进一步提高分析问题和解决问题的能力,实现我们抛砖引玉的目标。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/邱小林等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2009. 8
ISBN 978 - 7 - 5640 - 2522 - 9

I. 工… II. 邱… III. 工程力学 - 高等学校 - 教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 131159 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 36.5

字 数 / 745 千字

版 次 / 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1~4000 册

总 定 价 / 66.00 元 (共 2 册)

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

江西省高等教育应用型机电类专业 专家委员会主席团

顾 问 罗玉峰 张岐生 郭纪林

主 任 陈智刚 京玉海

主任委员 杨良根 周 青 何世松 陈根琴 冯新红

魏春雷 熊 科 杨 文 朱江峰 余 萍

肖文福 方晓勤 李 奇 林知秋 邱小林

包忠有

秘 书 长 熊 坚

副秘书长 纪伟鹏

前 言

本教材系按 90 ~ 96 课时编写的, 适用于高等教育应用型院校对《工程力学》课程安排为中等学时的各专业, 亦可供自学之用。

在内容的安排上, 先讲授静力学基本理论, 然后讲述构件的强度、刚度和稳定性计算, 最后讲授运动学和动力学基本理论。

本教材吸收了众多学者的教学经验, 在例题和习题的选择上, 紧紧围绕相应的基本理论, 并配以合适的题后分析及相应的思考题, 以启发读者能深入思考, 从中找出规律性的东西, 提高读书质量。这其中包括了读者易于误解之处以及需要灵活掌握的方法, 力求在分析问题和解决问题时避免呆板, 防止死记硬背。建议读者在做完每一道习题之后, 亦应进行题后分析, 把书读活读好, 扎扎实实地掌握其基本理论、基本概念及解题技巧, 并在生产实践中加以灵活应用。

本教材由南昌理工学院邱小林教授、江西渝州科技职业学院冯新红老师、华东交通大学包忠有教授、南昌理工学院郭纪林教授编著, 华东交通大学余学文副教授也参加了编写。

欢迎使用本教材的教师和读者对本教材提出宝贵意见, 以帮助我们不断提高学术水平。

编 者

于江西南昌

目 录

第一篇 理论力学

第1章 静力学公理和物体的受力分析	2
§ 1.1 静力学引言	2
§ 1.2 静力学的基本概念	3
§ 1.3 静力学公理	4
§ 1.4 约束和约束反力	7
§ 1.5 物体的受力分析	10
小结	18
思考题	18
习题	19
第2章 平面汇交力系	23
§ 2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	23
§ 2.2 三力平衡定理	26
§ 2.3 力的分解·力的投影	27
§ 2.4 平面汇交力系合成与平衡的解析法	29
小结	35
思考题	35
习题	36
第3章 力对点的矩·平面力偶理论	39
§ 3.1 力对点的矩	39
§ 3.2 力偶与力偶矩	41
§ 3.3 平面力偶系的合成和平衡条件	43
小结	48
思考题	49
习题	49

第4章 平面任意力系	51
§ 4.1 工程中的平面任意力系问题	51
§ 4.2 平面任意力系向一点的简化	52
§ 4.3 平面任意力系简化结果的讨论·合力矩定理	57
§ 4.4 平面任意力系的平衡条件·平衡方程	59
§ 4.5 平面平行力系的平衡方程	63
§ 4.6 物体系的平衡问题	65
§ 4.7 静定与超静定问题的概念	71
小结	73
思考题	74
习题	74
第5章 考虑摩擦的平衡问题	80
§ 5.1 引言	80
§ 5.2 滑动摩擦力的性质·滑动摩擦定律	81
§ 5.3 自锁现象和摩擦角	84
§ 5.4 考虑摩擦的平衡问题	86
§ 5.5 滚动摩阻的概念	90
小结	91
思考题	92
习题	92
第6章 空间力系	95
§ 6.1 空间力在直角坐标轴上的投影和沿直角坐标轴的分解	95
§ 6.2 空间汇交力系的合成与平衡	97
§ 6.3 空间力偶理论	101
§ 6.4 力对点的矩矢和力对轴的矩	103
§ 6.5 空间任意力系向一点的简化·主矢和主矩	107
§ 6.6 空间任意力系的平衡方程	109
§ 6.7 空间力系的平衡问题	110
§ 6.8 物体的重心·形心	115
小结	124
思考题	125
习题	125

第7章 点的运动学	129
§ 7.1 运动学引言	129
§ 7.2 点的运动的矢量法	130
§ 7.3 点的运动的直角坐标法	131
§ 7.4 点的运动的弧坐标法	136
小结.....	140
思考题.....	140
习题.....	141
第8章 刚体的基本运动	143
§ 8.1 刚体的平行移动	143
§ 8.2 刚体绕固定轴的转动	144
§ 8.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	145
小结.....	149
思考题.....	149
习题.....	150
第9章 点的合成运动	152
§ 9.1 点的合成运动的概念	152
§ 9.2 点的速度合成定理	154
§ 9.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	158
小结.....	162
思考题.....	163
习题.....	164
第10章 刚体的平面运动	167
§ 10.1 刚体平面运动的概念	167
§ 10.2 平面图形的运动方程·平面图形运动的分解	168
§ 10.3 求平面图形上点的速度的基点法	170
§ 10.4 求平面图形上点的速度的瞬心法	172
§ 10.5 求平面图形上点的加速度的基点法	178
小结.....	181
思考题.....	182
习题.....	182

第 11 章 质点运动微分方程	186
§ 11.1 动力学引言	186
§ 11.2 动力学的基本定律	187
§ 11.3 质点运动微分方程	188
§ 11.4 质点动力学的两类问题	189
小结	193
思考题	194
习题	194
第 12 章 动量定理	196
§ 12.1 动量	196
§ 12.2 力的冲量	199
§ 12.3 动量定理	200
§ 12.4 质心运动定理	206
小结	209
思考题	210
习题	211
第 13 章 动量矩定理	214
§ 13.1 动量矩	214
§ 13.2 动量矩定理	217
§ 13.3 转动惯量·平行轴定理	224
§ 13.4 刚体的定轴转动微分方程	229
小结	232
思考题	232
习题	233
第 14 章 动能定理	237
§ 14.1 力的功·元功·功率	237
§ 14.2 几种常见力的功	239
§ 14.3 动能	243
§ 14.4 动能定理	246
§ 14.5 基本定理的综合应用	251
小结	256

思考题·····	257
习题·····	258
第 15 章 达朗伯原理 ·····	263
§ 15.1 惯性力·达朗伯原理·····	263
§ 15.2 刚体惯性力系的简化·····	268
§ 15.3 动静法·····	271
小结·····	275
思考题·····	276
习题·····	276
第 16 章 虚位移原理 ·····	279
§ 16.1 约束的分类·广义坐标与自由度·····	279
§ 16.2 虚位移·虚功·理想约束·····	282
§ 16.3 虚位移原理·····	285
§ 16.4 虚位移原理应用举例·····	287
小结·····	292
思考题·····	292
习题·····	293

第一篇

理论力学

本篇研究物体机械运动的一般规律。

运动是物质的存在方式,所有物质都处在永恒不停的运动中。没有运动的物质是不存在的。但物质运动的形式却多种多样,任何物理过程(如发光、生电)、化学过程(如合成、分解)、生物过程(如细胞的分裂)甚至人的思维过程等,都属于物质运动的不同形式。机械运动是物质运动形式中最简单的一种。所谓机械运动,就是物体在空间的位置随时间而发生改变的**运动**。平衡是机械运动的一种特殊情况。机械运动现象是如此之普遍,可以说宇宙万物无一不处于机械运动之中,甚至比较复杂的物质运动形式也与机械运动有着或多或少的联系。所以对机械运动的研究有着十分重要的意义。

研究机械运动的一般规律,是以**刚体、质点和质点系**为研究对象,以牛顿定律为理论基础,通过一系列的公理、定理、原理来揭示研究对象的机械运动的普遍规律。这些内容属于经典力学的范畴,它适用于宏观、低速(与光速相比)物体的运动。近代物理学的重大发展表明,对于微观粒子和速度接近于光速的宏观物体,它们的机械运动有其特殊的规律性,不属于经典力学的研究范畴。在科学技术高度发达的当代,生产实践中的大量力学问题,仍用经典力学的理论来解决,不仅使用方便,而且具有足够的精确度。

本篇的内容可以划分为三部分:

第一部分(第1~6章),属于静力学内容。静力学研究物体受力分析的方法、力系简化的方法,以及物体在力系作用下的平衡规律及其应用。

第二部分(第7~10章),属于运动学内容。运动学研究物体机械运动的几何性质,如点的运动轨迹、速度、加速度等。

第三部分(第11~16章),属于动力学内容。动力学研究物体的机械运动与所受的力之间的关系。

学习第一篇的内容,不但为学习第二篇提供基础知识,而且在了解机械运动的客观规律的基础上,为认识和解决较广泛的工程实际问题,以及学习其他技术知识和从事科学研究工作创造条件。

第1章

静力学公理和物体的受力分析

导言

- 本章讲述静力学的基本概念和公理、常见的约束与其约束反力,以及物体的受力分析。
- 静力学的基本概念和公理是静力学的理论基础;物体受力分析是力学课程中第一个重要的基本训练。
- 将约束视为一知识单元,它由四个相关的知识点组成,且其相依关系为:约束概念→约束构造→约束性质→约束反力。
- 力的概念、公理及约束等知识是正确进行物体受力分析的依据。

§ 1.1 静力学引言

静力学研究物体在力系作用下的平衡规律及其在工程中的应用。

力系是指作用在物体上的一组力。

平衡是指物体相对于惯性参考系保持静止或作匀速直线平动。虽然,平衡是物体机械运动的一种特殊状态。一般工程问题中,平衡通常是指相对于地球保持静止或作匀速直线平动。

静力学主要包含三个内容:

一是**物体的受力分析**,即了解物体的受力情况。

二是**力系的简化**。如果两个力系对某物体的作用效果相同,则说这两个力系是**等效力系**。这时,可用其中的一个力系代替另一个力系,而不改变对该物体的作用效果,这种代换称为**力系的等效代换**。用简单的力系等效代换复杂的力系,称作力系的简化。

三是**力系的平衡条件**,并应用平衡条件求解工程实际问题。需要注意,物体处于平衡状态与物体上所受力系满足力系的平衡条件,这二者的含义不是相互等同的。物体平衡时,其上所受力系必满足力系的平衡条件;物体上所受力系满足力系的平衡条件时,物体不

一定平衡。

静力学部分所建立的基本概念、理论和方法,在动力学部分中也将得到应用,这些概念是重要的力学基础知识。

§ 1.2 静力学的基本概念

力和刚体是静力学中两个重要的基本概念。这里将介绍这两个概念的涵义,说明它们反映了客观事物的何种本质特征,是概括了客观事物的哪些共性而抽象化形成的。

1.2.1 力的概念

在生活和生产实践中,到处可以看到相互作用的物体。物体相互作用所产生的效果是多种多样的。铁板与空气接触,这种作用的效果是使铁板表面生锈;玻璃棒与丝绸摩擦,这种作用的效果是使玻璃棒带电,如此等等。两个物体相互作用,使物体的机械运动状态发生改变,这种作用效果更是经常、大量观察得到的。例如用手将石子抛出,手与石子相互作用的结果是使石子由静止而进入运动。被抛出的石子与地球相互吸引,又使石子沿抛物线降落。手抛石子的作用,地球吸引石子的作用,它们的效果都是使石子的机械运动状态发生改变,产生这种效果的机械作用称之为力。

不论是何种物体相互作用,也不论物体之间相互作用的方式如何,只要物体间相互作用的效果是使物体的机械运动状态发生改变,就将具有这种本质特征的机械作用称之为力。总之,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改变。物体的变形是物体机械运动状态改变的一种形式。所以,力的作用效果包括使物体发生变形。

实践证明,力对物体的作用效果决定于力的大小、方向和作用点,称为力的三要素。作用在物体上的力 F (图 1-1) 需要用矢量表示。矢量的起点 A 表示力的作用点;矢量的长度 AB 按选定的比例尺表示力的大小;矢量的方向表示力作用的方向。

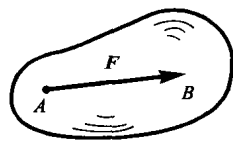


图 1-1

在国际单位制中,力的单位是牛[顿](N)或千牛[顿](kN),且 $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$ 。

理解和应用力的概念时应明确:

(1) 力是两个物体的相互作用,每一力必有承受此力作用的物体,称为受力物体,还有施加这一作用力的物体,称为施力物体。

(2) 两个物体相互作用,同时产生两个力。力总是成对出现的,每一对力中,一个力的受力物体正是另一个力的施力物体。

1.2.2 刚体的概念

任何物体受力作用时都要发生变形,即便变形极其微小,也能用各种测试手段证明变形的存在。但是,在研究物体机械运动规律时,如果物体受力作用所引起的变形很小,对所研究的问题影响甚微;或者物体的变形已经结束,不再继续发生,且已发生的变形与所研究的问题无关。在上述情况下,为使问题得到简化,可以略去物体变形这一次要因素,把所研究的物体看作不变形的物体——刚体。**刚体是受力作用而不变形的物体。**刚体上任意两点的距离恒定不变。

绝对刚硬的物体在客观世界中并不存在,刚体是一种理想化的力学模型。在所研究的机械运动问题中,物体的变形可以不予考虑,这是刚体概念所反映和概括的本质特征。

需强调指出,一个物体是否视为刚体,应取决于所研究问题的性质。在图 1-2 中的钢杆

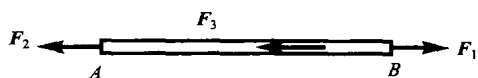


图 1-2

AB 受三个力作用处于静止平衡状态。若研究钢杆平衡时三个力所需满足的条件,可不考虑钢杆的变形,将其视为刚体;若研究钢杆是否可能被拉断,钢杆的变形则是决定性因素,需将其视为变形体。

上例中当需考虑杆 AB 的变形时,刚体的概念仍是解决变形体力学问题时所需要考虑的一个方面。由刚体概念所建立的一些平衡规律,在第二篇中研究弹性杆件时,都将有条件地得到应用。

§ 1.3 静力学公理

静力学公理是人们在实践中总结出的关于力的一些基本规律,这些规律又在实践中得到验证,而被人们所公认。静力学公理所反映的规律是极其简单的,但是,它是建立静力学理论的基础。

公理一 二力平衡条件

物体受两个力作用且处于平衡状态,此二力必须满足的条件是:作用在同一条直线上,且大小相等,方向相反。

由两个力所组成的力系是最简单的力系。公理一给出了这种最简单力系的平衡条件。按图 1-3 这二力矢量的关系为:

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2$$

公理二 力的平行四边形法则

一力与某一力系等效,则此力称为该力系的合力。

作用在物体同一点的两个力,可以合成为作用在该点的一个合力,合力矢量的大小和方向,用以这两个分力为边所组成的平行四边形的对角线来确定。

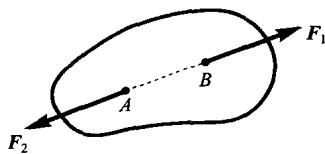


图 1-3

图 1-4(a) 中的平行四边形 $ABCD$ 表示了作用在 A 点的分力 F_1 和 F_2 与其合力 R 的关系。

由矢量代数可知,合力矢量等于二分力矢量的矢量和:

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

合力矢量也可由图 1-4(b) 中的力三角形确定。由余弦定理求合力的大小:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$$

用正弦定理确定合力 R 与分力 F_1 的夹角:

$$\sin\varphi = \frac{F_2}{R} \sin\alpha$$

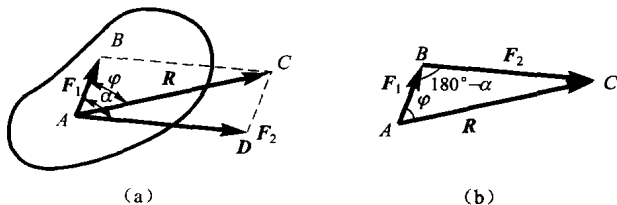


图 1-4

公理三 加减平衡力系原理

满足力系平衡条件的力系称为平衡力系。平衡力系不能改变刚体的运动状态,或说平衡力系对刚体不产生作用效果。

从作用在刚体上的力系中,减去或加上任意的平衡力系,对刚体的作用效果不会改变。

由这一公理还可引出力的可传性:

作用在刚体上的力,可沿其作用线在该刚体上移动,而不改变此力对该刚体的作用效果,如图 1-5 所示。

应用力的可传性时需注意:

此原理只能用于刚体,如图 1-6(a) 所示刚体受二等值、反向、共线的拉力 $F_A = -F_B$ 作用平衡,依力的可传性,将二力分别沿作用线移动成图 1-6(b) 所示受二压力作用平衡是允许的。但对变形体(假如图 1-6 中杆 AB 是变形体,变形体将在本书第二篇中研究)则力的可传性原理不成立。因图 1-6(a) 中杆 AB 受拉产生伸长变形,而图 1-6(b) 中杆 AB 受压产生缩短变形,二者截然不同。如不考虑条件,乱用力的可传性,必将导致错误结果。

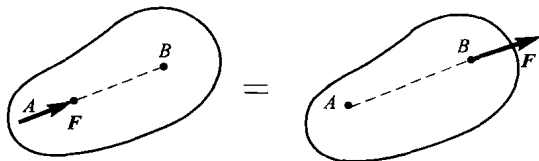


图 1-5

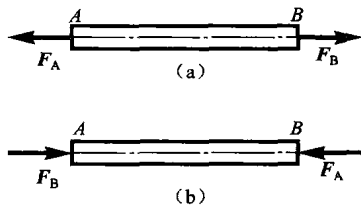


图 1-6

又如图 1-7(a)、(b)所示刚架,根据力的可传性,将力 F 由作用点 O 移到了作用点 O' ,对吗?

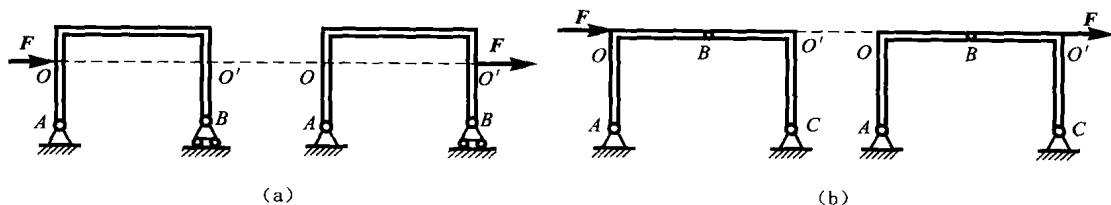


图 1-7

要注意力的可传性是针对一个刚体而言的,即作用在同一刚体上的力可沿其作用线移动到该刚体上的任一点,而不改变此力对刚体的外效应。故图 1-7(a)中力的移动是可以的,但图 1-7(b)中力 F 的移动是错误的。因为,这时力 F 已由刚体 AB 移到了刚体 BC 上,这是不允许的。因为移动前 BC 是二力构件,刚体 AB 是受三力作用而平衡的。其受力图如图 1-8(a)所示。而移动后刚体 BC 和 AB 的受力图都发生了变化,如图 1-8(b)所示。刚体 AB 由原受三力平衡变为受二力平衡(二力构件)。而刚体 BC 由原受二力平衡变为受三力平衡。同时在铰链 B 处,两个刚体相互作用力的方向在力移动之后也发生了变化。因此,力只能在同一刚体上沿其作用线移动,而绝不允许由一个刚体移动到另一个刚体上。

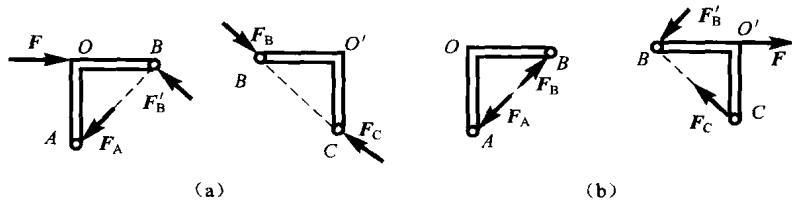


图 1-8

公理四 作用和反作用定律

两个物体相互作用,同时产生一对力。称其中一个为作用力,另一个则为反作用力。

两个物体相互作用所产生的作用力与反作用力,总是共线、等值、反向地分别作用在相互作用的两个物体上。

分别用力 F 和 F' 表示作用力和反作用力,二力矢量的关系为:

$$F = -F'$$

公理四中作用力与反作用力的关系,以及公理一中两个平衡力之间的关系,都表达为:两个力共线、等值、反向。但是,公理一中指的是作用在同一个物体上的两个力,公理四中指的是分别作用在两个物体上的两个力。这是两个公理在本质上的差异。

作用与反作用定律,适用于刚体,也适用于变形体;适用于平衡的物体,也适用于一般运动的物体。

§ 1.4 约束和约束反力

物体可以这样分为两类:一类是**自由体**,它可以自由地移动,不受其他物体的任何限制。如空中飞行的飞机,它可以在任意方向移动和旋转,属于自由体。另一类是**非自由体**,它不能自由地移动,某些方向的移动因受其他物体的限制不能实现。如用绳索悬挂的重物,受绳索的限制不能发生向下的移动,属于非自由体。

限制非自由体自由移动的其他物体,称为非自由体的约束。如上述绳索就是重物的约束。**约束对非自由体的机械作用称为约束反力。**由于约束对非自由体的作用是阻碍非自由体的移动,所以,约束反力的方向,总是与约束所阻碍的移动的方向相反。这是确定约束反力方向的一般原则,约束反力的大小都是未知的。

在生活和生产实践中,约束的形式繁多,这里仅就几种典型的、常见的约束作一介绍。着重说明由约束的构造确定约束的性质,由约束的性质分析约束反力的一般方法,从而培养把工程问题简化为力学问题的能力。

1.4.1 柔索

柔索约束由软绳、链条等构成。柔索只能承受拉力,即只能限制物体在柔索受拉方向的移动,这就是柔索约束的约束性质。被约束的物体所受的约束反力与约束所限制的移动方向相反,所以,柔索的约束反力通过接触点,沿着柔索而背离物体。

图1-9给出一受软绳约束的物体,约束反力 T 如图中所示,约束反力 T 的反作用力 T' 作用在软绳上,使软绳受拉。

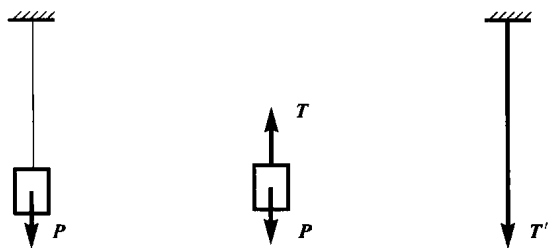


图1-9

1.4.2 光滑面

光滑面约束由两个物体表面光滑接触所构成。物体沿接触面的公法线且指向接触面的移动受到限制。这是光滑面约束的约束性质。所以,光滑面对物体的约束反力作用于接触点,沿接触面的公法线且指向物体。

图1-10(a)中力 N 为光滑接触面对轮 O 的约束反力。图1-10(b)中的圆盘 O 在 A 、 B 两点各有一光滑接触面。反力 N_A 沿两个接触面的公法线,反力 N_B 沿圆盘表面的法线,两个反力都指向圆盘的中心 O 。