

机械设计制造及其自动化专业本科系列规划教材

LILUN
LIXUE

理论力学



主 编 邓国红

副主编 郭长文 丁 军 张智慧

刘 好 张烈霞 张应迁



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

· 014003352

031-43

91

内容简介

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目“中国工程教育认证教材”之一，也是“十二五”国家重点图书出版规划项目“中国工程教育认证教材”之一。本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目“中国工程教育认证教材”之一，也是“十二五”国家重点图书出版规划项目“中国工程教育认证教材”之一。

理论力学

主 编 邓国红

副主编 郭长文 丁 军 张智慧
刘 好 张烈霞 张应迁



重庆大学出版社

031-43
91



北航

C1690467

内容提要

本书是根据“高等学校工科理论力学课程教学基本要求”编写的理论力学教材。全书分为静力学、运动学、动力学3篇,共15章,理论体系简要清晰、层次分明、重点突出,在内容的选取上较好地兼顾了一般工科院校理论力学课程的教学需要,并注重加强与工程实际的联系。

本书可作为高等学校机械类、近机械类专业理论力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/邓国红主编. —重庆:重庆大学出版社,2013.8

机械设计制造及其自动化专业本科系列规划教材

ISBN 978-7-5624-7459-3

I. ①理… II. ①邓… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 174696 号

理论力学

主 编 邓国红

副主编 郭长文 丁 军 张智慧

刘 妤 张烈霞 张应迁

策划编辑:曾显跃

责任编辑:李定群 高鸿宽 版式设计:曾显跃

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:587 千

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 978-7-5624-7459-3 定价:45.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

为更好地适应一般工科院校理论力学课程的教学需要,依据“高等学校工科理论力学课程教学基本要求”,结合笔者多年的理论力学课程教学实践,编写了本教材。该书可作为高等学校机械类、近机类专业理论力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

在编写中,本书对传统体系和内容做了一些调整,精简了理论篇幅,删减了一些理论推导,同时注重加强与工程实际的联系。附录中,专题汇集了静力学、运动学、动力学基本要求部分学生常犯的典型错误,并详细给出了错因分析及正确解答,以期更好地加深学生对本课程一些重要基本概念、基本定理的理解。

本书由邓国红任主编,郭长文、丁军、张智慧(辽宁工程技术大学)、刘好、张烈霞(陕西理工学院)、张应迁(四川理工学院)任副主编。其他参与编写工作的还有:徐睿、郑拯宇、杨鄂川。全书由邓国红、刘好统稿。如无特别说明,作者单位均是重庆理工大学。

由于编者水平有限,书中难免错误和不妥之处,恳请读者批评指正,以使本书能够不断地提高和完善。

编者
2013年5月

主要符号表

a	加速度	l	长度
a_n	法向加速度	L	拉格朗日函数
a_t	切向加速度	L_O	刚体对点 O 的动量矩
a_a	绝对加速度	L_C	刚体对质心的动量矩
a_r	相对加速度	m	质量
a_e	牵连加速度	M_z	对 z 轴的矩
a_C	科氏加速度	M	力偶矩, 主矩
A	面积, 自由振动振幅	$M_O(F)$	力 F 对点 O 的矩
e	恢复因数	M_I	惯性力的主矩
f	动摩擦因数	n	质点数目
f_s	静摩擦因数	O	参考坐标系的原点
F	力	p	动量
F'_R	主矢	P	质量, 功率
F_s	静滑动摩擦力	q	载荷集度, 广义坐标
F_N	法向约束力	Q	广义力
F_{le}	牵连惯性力	r	半径, 矢径的模
F_{IC}	科氏惯性力	r	矢径
F_I	惯性力	r_O	点 O 的矢径
g	重力加速度	r_C	质心的矢径
R	半径	h	高度
s	弧坐标	i	x 轴的基矢量
t	时间	I	冲量
T	动能, 周期	j	y 轴的基矢量
v	速度	J_z	刚体对 z 轴的转动惯量
v_a	绝对速度	J_{xy}	刚体对 x, y 轴的惯性积
v_r	相对速度	J_C	刚体对质心的转动惯量
v_e	牵连速度	k	弹簧刚度系数
v_C	质心速度	k	z 轴的基矢量
ρ	密度, 曲率半径	x, y, z	直角坐标
φ	角度坐标	α	角加速度
φ_f	摩擦角	β	角度坐标
ψ	角度坐标	δ	滚阻系数, 阻尼系数
ω_0	固有角频率	δ	变分符号
ω	角速度矢量	ζ	阻尼比
ω_a	绝对角速度矢量	η	减缩因数
ω_r	相对角速度矢量	W	力的功
ω_e	牵连角速度矢量	V	势能, 体积

目 录

绪论	1
0.1 理论力学的研究对象	1
0.2 理论力学的研究方法	2
0.3 学习理论力学的目的	3

第 1 篇 静力学

引言	4
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	6
1.1 静力学公理	6
1.2 约束和约束力	8
1.3 受力分析与受力图·力学模型和力学简图	11
小结	17
思考题	18
习题	19
第 2 章 力系的简化	22
2.1 平面汇交力系与平面力偶系的简化	22
2.2 平面任意力系的简化·主矢和主矩	28
2.3 空间力系的简化	32
2.4 重心与形心	41
小结	48
思考题	51
习题	53
第 3 章 力系的平衡	56
3.1 力系的平衡条件与平衡方程	56
3.2 平面力系的平衡	57
3.3 空间力系的平衡	71
小结	78
思考题	79
习题	81

第4章 摩擦	87
4.1 滑动摩擦	87
4.2 摩擦角和自锁现象	89
4.3 考虑滑动摩擦时物体的平衡问题	91
4.4 滚动摩阻的概念	96
小结	99
思考题	100
习题	101

第2篇 运动学

引言	103
第5章 运动学基础	105
5.1 点的运动学描述	105
5.2 刚体的基本运动	116
小结	122
思考题	124
习题	124
第6章 点的合成运动	128
6.1 几个基本概念	128
6.2 点的速度合成定理	130
6.3 点的加速度合成定理	134
小结	142
思考题	142
习题	144
第7章 刚体的平面运动	149
7.1 刚体平面运动的概述和运动分解	149
7.2 平面图形上各点的速度分析	152
7.3 平面图形上各点的加速度分析	158
小结	160
思考题	161
习题	162

第3篇 动力学

引言	166
第8章 质点动力学基础	168
8.1 质点的运动微分方程	168
8.2 质点动力学基本问题	169
小结	172
思考题	172

习题	173
第 9 章 动量定理	175
9.1 动力学普遍定理概述	175
9.2 动量与冲量	176
9.3 动量定理	177
9.4 质心运动定理	181
小结	186
思考题	187
习题	188
第 10 章 动量矩定理	191
10.1 动量矩与转动惯量	191
10.2 对定点(定轴)的动量矩定理	192
10.3 刚体绕定轴的转动微分方程	196
10.4 刚体对轴的转动惯量	197
10.5 质点系相对于质心的动量矩定理	201
10.6 刚体的平面运动微分方程	204
小结	206
思考题	207
习题	208
第 11 章 动能定理	213
11.1 力的功	213
11.2 动能	218
11.3 动能定理	220
11.4 功率·功率方程·机械效率	225
11.5 势力场·势能·机械能守恒定律	228
11.6 动力学普遍定理的综合应用	231
小结	234
思考题	236
习题	237
综合问题习题	240
第 12 章 达朗贝尔原理(动静法)	244
12.1 惯性力·质点的达朗贝尔原理	244
12.2 质点系的达朗贝尔原理	246
12.3 刚体惯性力系的简化	247
12.4 动静法的应用举例	251
12.5 绕定轴转动刚体的轴承动反力	255
小结	258
思考题	259
习题	259

第 13 章 虚位移原理	264
13.1 约束·虚位移·虚功	264
13.2 虚位移原理	268
小结	274
思考题	275
习题	276
第 14 章 分析力学基础	280
14.1 自由度与广义坐标	281
14.2 以广义坐标表示的质点系平衡条件	281
14.3 动力学普遍方程	287
14.4 拉格朗日方程	289
小结	295
思考题	296
习题	296
第 15 章 碰撞	300
15.1 碰撞现象·碰撞力	300
15.2 用于碰撞过程的基本定理	301
15.3 恢复因数	303
15.4 碰撞问题举例	305
15.5 撞击中心·刚体碰撞中的突加约束问题	307
小结	313
思考题	313
习题	314
附录	318
附录 I 理论力学典型错误	318
附录 II 部分习题答案	353
参考文献	365

绪 论

0.1 理论力学的研究对象

力学是研究客观物质机械运动规律的科学。机械运动是指物质在空间和时间中的位置变化。固体的移动和变形、气体和液体的流动都属于机械运动。机械运动是自然界最普遍的运动。大至宇宙,小至基本粒子,无处不存在机械运动。即使是物质更高级的运动形态,如物理、化学乃至生命活动,也包含有机械运动。

对各种不同形态的机械运动的研究产生了不同的力学分支学科。理论力学研究机械运动的最普遍和最基本的规律。它是各门力学学科的基础。近代工程技术,如机械工程、土木工程、航空航天工程等都是在力学理论指导下发展起来的,因此,理论力学也是这些与机械运动密切相关的工程技术学科的基础。

理论力学起源于物理学的一个独立分支,但它的内容已经远远超过了物理学的内容。理论力学不仅要求建立与力学有关的各种基本概念和理论,而且要求能运用理论知识对从实际问题中抽象出来的力学模型进行分析和计算。所谓力学模型,就是对自然界和工程技术中复杂的实际研究对象的合理简化。当所研究物体的运动范围远远超过它本身的几何尺度时,它的形状对运动的影响极其微小,此时可将物体简化为只有质量而没有体积的几何点,称为质点。一般情况下任何物体都可以看作是由许多质点组成的系统,称为质点系。对于那些在运动中变形极小,或虽有变形但不影响其整体运动的物体,可完全不考虑其变形而认为组成物体的各个质点之间的距离保持不变。这种不变形的特殊质点系,称为刚体。由许多刚体组成的系统,称为刚体系。理论力学的研究对象仅限于离散的质点、质点系、刚体和刚体系,统称为离散系统。在分析固体的变形或流体的流动规律时,必须建立另一种力学模型,即物质在空间连续分布的连续介质。虽然对连续介质的研究属于其他力学学科的任务,但理论力学所研究的普遍性规律也适用于连续介质。

理论力学所研究的力学规律仅限于经典力学范畴。其研究对象被限制为速度远小于光速的宏观物体。绝大多数工程实际问题都属于这个范畴。一般认为,经典力学是以牛顿定律为基础建立起来的力学理论。

理论力学的内容包括以下3个部分:

①**静力学**。研究力系的简化,以及物体在力系作用下的平衡规律。

②**运动学**。只从几何的角度研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等),不涉及运动的物理原因。

③**动力学**。研究物体的运动与作用于物体的力之间的关系。

0.2 理论力学的研究方法

研究科学的过程,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。理论力学也必须遵循这个正确的认识规律进行研究和发展。

①通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行多次的科学实验,经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本的规律。

远在古代,人们为了提水,制造了轱辘;为了搬运重物,使用了杠杆、斜面和滑轮;为了利用风力和水力,制造了风车和水车,等等。制造和使用这些生活和生产工具,使人类对于机械运动有了初步的认识,并积累了大量的经验,经过分析、综合和归纳,逐渐形成了如“力”和“力矩”等基本概念,以及如“二力平衡”、“杠杆原理”、“力的平行四边形法则”和“万有引力定律”等力学的基本规律,并总结于科学著作中。我国的墨翟(公元前468—公元前382年)所著的《墨经》,是一部最早记述有关力学理论的著作。

人们为了认识客观规律,不仅在生活和生产实践中进行观察和分析,还要主动地进行实验,定量地测定机械运动中各因素之间的关系,找出其内在规律性。例如伽利略(1564—1642年)对自由落体和物体在斜面上的运动作了多次实验,从而推翻了统治多年的错误观点,并引出“加速度”的概念。此外,如摩擦定律、动力学三定律等都是建立在大量实验基础之上的。实验是形成理论的重要基础。

②在对事物观察和实验的基础上,经过抽象化建立力学模型,形成概念,在基本规律的基础上,经过逻辑推理和数学演绎,建立理论体系。

客观事物都是具体的、复杂的,为找出其共同规律性,必须抓住主要因素,舍弃次要因素,建立抽象化的力学模型。例如,忽略一般物体的微小变形,建立在力作用下物体形状、大小均不改变的刚体模型;抓住不同物体间机械运动的相互限制的主要方面,建立一些典型的理想约束模型;为分析复杂的振动现象,建立了弹簧质点的力学模型等。这种抽象化、理想化的方法,一方面简化了所研究的问题,另一方面也更深刻地反映出事物的本质。当然,任何抽象化的模型都是相对的。当条件改变时,必须再考虑到影响事物的新的因素,建立新的模型。例如,计算人造卫星绕地球运行的轨道运动时,由于卫星的尺度远远小于轨道半径,可将卫星简化为质点。但在讨论卫星绕质心转动的姿态运动时,必须将卫星抽象为刚体。而对于带有挠性太阳帆板的卫星,还必须抽象为刚体和弹性体组成的更复杂的模型。

生产实践中的问题是复杂的,不是一些零散的感性知识所能解决的。理论力学成功地运用逻辑推理和数学演绎的方法,由少量最基本的规律出发,得到了从多方面揭示机械运动规律的定理、定律和公式,建立了严密而完整的理论体系。这对于理解、掌握以及应用理论力学都是极为有利的。数学方法在理论力学的发展中起了重大的作用。近代计算机的发展和普及,

不仅能完成力学问题中大量的复杂的数值计算,而且在逻辑推理、公式推导等方面也是极有效的工具。

③将理论力学的理论用于实践,在解释世界、改造世界中不断得到验证和发展。

实践是检验真理的唯一标准,实践中所遇到的新问题又是促进理论发展的源泉。古典力学理论在现实生活和工程中,被大量实践验证为正确,并在不同领域的实践中得到发展,形成了许多分支,如刚体力学、弹塑性力学、流体力学、生物力学等。大到天体运动,小到基本粒子运动,古典力学理论在实践中又都出现了矛盾,表现出真理的相对性。在新条件下,必须修正原有的理论,建立新的概念,才能正确指导实践,改造世界,并进一步地发展力学理论,形成新的力学分支。

0.3 学习理论力学的目的

理论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。有些工程问题可直接应用理论力学的基本理论去解决,有些比较复杂的问题,则需要用理论力学和其他专门知识共同来解决。因此,学习理论力学是为解决工程问题打下一定的基础。

②理论力学是研究力学中最普遍、最基本的规律。很多工程类专业的课程,如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、飞行力学、振动理论、断裂力学以及许多专业课程等,都要以理论力学为基础,因此,理论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,力学的研究内容已渗入其他科学领域,如固体力学和流体力学的理论被用来研究人体内骨骼的强度,血液流动的规律,以及植物中营养的输送问题等,形成了生物力学;流体力学的理论被用来研究等离子体在磁场中的运动,形成电磁流体力学;还有爆炸力学、物理力学等都是力学和其他学科结合而形成的边缘科学。这些新兴学科的建立都必须以坚实的理论力学知识为基础。

③理论力学的研究方法,与其他学科的研究方法有不少相同之处。因此,充分理解理论力学的研究方法,不仅可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,培养正确的分析问题和解决问题的能力,为今后解决生产实际问题,从事科学研究工作打下基础。

第 1 篇

静力学

引 言

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学。

在静力学中所指的物体都是**刚体**。这是一个理想化的力学模型。

力,是物体间相互的机械作用,这种作用使物体的形状和运动状态发生改变。

在自然界中可以看到由各种不同的物理原因产生的力,但在理论力学里只研究力所产生的效应,而不研究它的物理来源。把引起物体变形的效应称为力的变形效应(内效应),而使受力物体运动状态改变的效应,称为力的运动效应(外效应)。力的内、外效应总是同时产生的,但对于刚体,不考虑力的变形效应。

实践表明,力的效应唯一地决定于力的三要素:

- ①力的大小。
- ②力的方向。
- ③力的作用位置或作用点。

因此,力是矢量,用 F 表示,而 F 仅仅表示力的大小。在国际单位制中,力的单位是牛(N)或千牛(kN)。

力系,是指作用于物体上的一群力。

如果一个力系作用于物体的效果与另一个力系作用于该物体的效果相同,这两个力系互为等效力系。不受外力作用的物体可称其为受零力系作用。一个力系如果与零力系等效,则该力系称为平衡力系。

静力学主要研究以下 3 个方面的问题:

(1) 物体的受力分析

分析某个物体共受几个力作用,以及每个力的作用位置和方向。

(2) 力系的等效替换(或简化)

将作用在物体上的一个力系用与它等效的另一个力系来替换,称为力系的等效替换。如果用一个简单力系等效替换一个复杂力系,则称为力系的简化。如果某力系与一个力等效,则此力称为该力系的合力,而该力系的各力称为此力的分力。

研究力系等效替换并不限于分析静力学问题,也是为动力学提供基础。

(3) 建立各种力系的平衡条件

研究作用在物体上的各种力系所需满足的平衡条件。

第 1 章

静力学公理和物体的受力分析

本章将阐述静力学公理,并介绍工程中常见的约束和约束力的分析及物体的受力图,同时介绍力学模型及力学建模的概念。

1.1 静力学公理

在力的概念形成的同时,人们对力的基本性质的认识逐步深入。静力学公理就是对力的基本性质的概括与总结,它们以大量的客观事实为依据,其正确性已为实践所证实。

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 1.1(a) 所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和,即

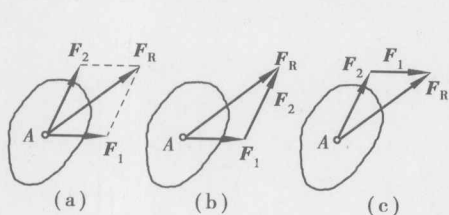


图 1.1

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

也可另作一力三角形,求两汇交力合力的大小和方向(即合力矢),如图 1.1(b)、(c) 所示。

这个公理是复杂力系简化的基础。

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力(如 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$),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,且作用在同一直线上。

这个公理阐述了静力学中最简单的二力平衡条件,这是刚体平衡最基本的规律,是推证力系平衡条件的理论基础。必须指出,这个公理只适用于刚体。对于变形体来说,公理 2 给出的平衡条件是不充分的。

工程实际中常遇到只受两个力作用而保持平衡的构件,称为二力构件或二力杆。根据公理 2,无论二力构件形状如何,其所受的两个力必定沿两力作用点的连线,且大小相等,方向相反,如图 1.2 所示。

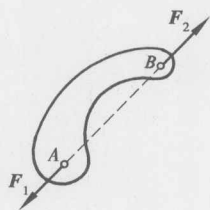


图 1.2

公理3 加减平衡力系原理

在作用于刚体的已知力系中加上或减去任意的平衡力系,与原力系对刚体的作用等效。这个公理也只适用于刚体,它是力系等效替换的理论依据。

根据上述公理可以导出下列推理:

推理1 力在刚体上的可传性

作用于刚体上某点的力,可沿着它的作用线移到刚体内任意一点,而不改变该力对刚体的作用。

证明 在刚体上的点 A 作用力 F ,如图 1.3(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 1.3(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 1.3(c) 所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

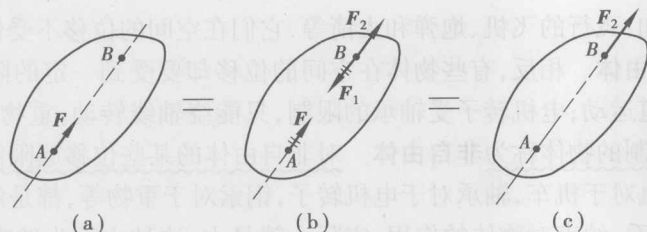


图 1.3

由此可知,对于刚体来说,作用点并不重要,对力的作用效果有影响的是力的作用线。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其作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

应该指出,力的可传性仅适用于研究力的运动效应,而不适用于研究力的变形效应。

推理2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上 3 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 3 个力的作用线通过汇交点。

利用力平行四边形公理和二力平衡公理,读者可自行证明该定理。

公理4 作用和反作用公理

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。若用 F 表示作用力, F' 表示反作用力,则

$$F = -F'$$

这个公理概括了物体间相互作用的关系,无论物体是处于静止状态还是运动状态,它都普遍适用。由作用与反作用定律可知,力总是成对出现的,有作用力必有反作用力。应该注意,作用力和反作用力不是作用在同一物体上,而是分别作用于两个相互作用的不同的物体上。因此,尽管二者大小相等、方向相反、沿同一作用线,但不能相互平衡。一定注意区分作用和反作用公理与二力平衡公理。

公理5 刚化公理

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 1.4 所示,把处于平衡状态的绳索刚化成刚性杆,其平衡状态保持不变。反之不一定成立。

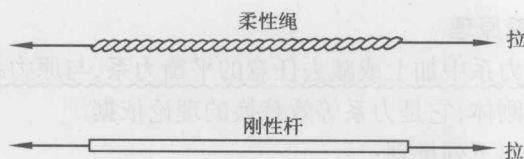


图 1.4

由此可知,刚体平衡的充要条件,对变形体的平衡来说只是必要的而不是充分的。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。

1.2 约束和约束力

有些物体,例如:飞行的飞机、炮弹和火箭等,它们在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。相反,有些物体在空间的位移却要受到一定的限制。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动;电机转子受轴承的限制,只能绕轴线转动;重物由钢索吊住,不能下落等。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。例如,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。

从力学角度来看,约束对物体的作用,实际上就是力,这种力称为约束力,因此,约束力的方向必与该约束所能够阻碍的位移方向相反。应用这个准则,可确定约束力的方向或作用线的位置。至于约束力的大小则是未知的。在静力学问题中,约束力和物体受的其他已知力(称主动力)组成平衡力系,因此,可用平衡条件求出未知的约束力。当主动力改变时,约束力一般也发生改变,因此,约束力是被动的,这也是将约束力之外的力称为主动力的原因。

下面介绍几种在工程中常见的约束类型和确定约束力方向的方法。

1.2.1 具有光滑接触表面的约束

两物体直接接触,不计接触处摩擦而构成的约束称为光滑接触面约束。

这类约束限制了物体沿过接触点的公法线而趋向接触面方向的运动,即约束力方向为沿过接触点的公法线而指向被约束物体,通常用 F_N 表示,如图 1.5 中的 F_{NA} 、 F_{NC} 和图 1.6 中的 F_N 等。

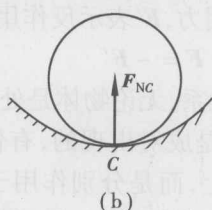
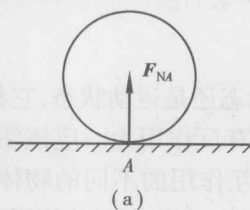


图 1.5

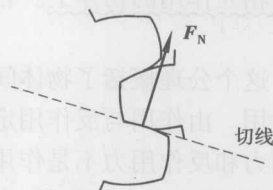


图 1.6

1.2.2 由柔软的绳索、链条或胶带等构成的约束

细绳吊住重物,如图 1.7 所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力,因此它给物体的约束力也只可能是拉力(见图 1.7)。绳索对物体的约束力,作用在接触点,方向沿着绳索背离物