

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

简明理论力学

哈尔滨工业大学理论力学教研室 编
程 靳 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是在哈尔滨工业大学理论力学教研室编,《理论力学》(第六版)(高等教育出版社2002年出版)的基础上经过精简而重新编写成的。精简的目的是适当降低难度、删除了一些内容,使该书更加简明、易学。

全书内容涵盖了理论力学课程的基本要求,共十五章:静力学公理和物体的受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、空间力系、摩擦、点的运动学、刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动、质点动力学的基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理。

本书保留了《理论力学》(第六版)教材的特点和优点,但更加简明,特别适用于中等学时类的理论力学课程使用。

本书可作为高等院校工科各类专业理论力学课程的教材,可作为夜大、函授大学、职工大学相应专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

简明理论力学 /程靳主编. —北京:高等教育出版社,

2004.1

ISBN 7-04-013071-8

I. 简... II. 程... III. 理论力学—高等学校—教材 IV. O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097195 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本	787×960 1/16	版 次	年 月第 1 版
印 张	13.25	印 次	年 月第 次印刷
字 数	240 000	定 价	15.70 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

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型本科人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才培养体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。目前,教材建设工作存在的问题不容忽视,适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对一般院校,尤其是新办本科院校来说,起点较高,难度较大,内容较多,难以适应一般院校的教学需要。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才培养的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部即将启动的“高等学校教学质量和教学改革工程”的实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

序 言

理论力学是高等工科院校许多专业必修的技术基础课。近些年来由于外语、计算机等课时的增加,理论力学的授课时数普遍减少。哈尔滨工业大学理论力学教研室编写的《理论力学》(高等教育出版社出版)一直是国内使用量最大、最受欢迎的理论力学教材。该书理论严谨、逻辑清晰、由浅入深,且经过多次修订,吐故纳新,受到广大师生的好评,并两次获国家级优秀教材奖。该书主要是针对多学时理论力学课程内容编写的,虽然第六版进行了修订,分为(I)、(II)两册,第(I)册适用于中等学时类的专业,第(I)、(II)两册都适用多学时类的专业,但个别内容仍偏难、偏多。因此,编写一本字数较少,内容深浅适宜,适合中等学时的简明理论力学教材是必要的。

本书就是在这一原则下,在哈尔滨工业大学理论力学教研室编《理论力学》(第六版)(高等教育出版社2002年出版)的基础上经过精减而重新编写成的。精简的目的是适当降低难度、删除了一些不必要的内容,使全书更加简明、易学,更适用于一般高等院校使用。全书内容涵盖了理论力学课程的基本要求。全书共十五章:静力学公理和物体的受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、空间力系、摩擦、点的运动学、刚体的简单运动、点的合成运动、刚体的平面运动、质点动力学的基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理。

本书虽然是简明教材,但编写时仍注意保留哈尔滨工业大学编的《理论力学》教材的特色。由于该教材的体系和风格已得到广大教师和学生的认同,因此本书也尽量保持这一体系和风格,并力争使本书成为简明易学的教材。

书中带*号的内容,教师可根据本校、本专业的实际情况决定取舍。正文中的小号字(不含例题)可留给有时间和有精力的同学自己阅读,不必全部讲授。

本书可作为高等工科院校各类专业理论力学课程的教材,也可作为夜大、函授大学、职工大学相应专业的教材。

本书由博士生导师程靳教授任主编,参加编写的有:程燕平教授(第一、二、三、四、五章)、李前程副教授(第六、七章)、赵彤教授(第八、九章)、程靳教授(第十、十一、十二、十三、十四、十五章)。全书由程靳与程燕平统稿。

本书由北京航空航天大学谢传锋教授主审,并提出了许多宝贵的意见和建议。

议,特此致谢。

由于我们是第一次编写简明理论力学教材,缺点在所难免,衷心希望大家批评指正。

编者

2003年6月

目 录

绪论	1
----------	---

静 力 学

引言	3
----------	---

第一章 静力学公理和物体的受力分析	4
-------------------------	---

§ 1-1 静力学公理	4
-------------------	---

§ 1-2 约束和约束力	6
--------------------	---

§ 1-3 物体的受力分析和受力图	10
-------------------------	----

习题	14
----------	----

第二章 平面汇交力系与平面力偶系	17
------------------------	----

§ 2-1 平面汇交力系的合成与平衡	17
--------------------------	----

§ 2-2 平面力对点之矩的概念及计算	21
---------------------------	----

§ 2-3 平面力偶	23
------------------	----

习题	25
----------	----

第三章 平面任意力系	29
------------------	----

§ 3-1 平面任意力系的简化	29
-----------------------	----

§ 3-2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	32
------------------------------	----

§ 3-3 物体系的平衡·静定和超静定问题	35
-----------------------------	----

习题	39
----------	----

第四章 空间力系	44
----------------	----

§ 4-1 空间汇交力系	44
--------------------	----

§ 4-2 力对点的矩和力对轴的矩	46
-------------------------	----

§ 4-3 空间力偶	48
------------------	----

§ 4-4 空间任意力系向一点的简化·主矢和主矩	51
--------------------------------	----

§ 4-5 空间任意力系的平衡方程	53
-------------------------	----

§ 4-6 重心	55
----------------	----

习题	57
----------	----

第五章 摩擦	59
--------------	----

§ 5-1 滑动摩擦	59
------------------	----

*§ 5-2 摩擦角和自锁现象	60
-----------------------	----

§ 5-3 考虑摩擦时物体的平衡问题	62
--------------------------	----

*§ 5-4 滚动摩擦的概念.....	65
习题.....	66

运 动 学

引言	69
第六章 点的运动学	70
§ 6-1 矢量法和直角坐标法.....	70
§ 6-2 自然法.....	74
习题.....	80
第七章 刚体的简单运动	83
§ 7-1 刚体的平行移动.....	83
§ 7-2 刚体绕定轴的转动.....	84
§ 7-3 转动刚体内各点的速度和加速度.....	85
习题.....	88
第八章 点的合成运动	90
§ 8-1 相对运动·牵连运动·绝对运动.....	90
§ 8-2 点的速度合成定理.....	91
§ 8-3 牵连运动为平移时点的加速度合成定理.....	94
*§ 8-4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理.....	96
习题.....	99
第九章 刚体的平面运动	103
§ 9-1 刚体平面运动的概述和运动分解	103
§ 9-2 求平面图形内各点速度的基点法	104
§ 9-3 求平面图形内各点速度的瞬心法	106
§ 9-4 用基点法求平面图形内各点的加速度	110
习题	116

动 力 学

引言	121
第十章 质点动力学的基本方程	122
§ 10-1 动力学的基本定律.....	122
§ 10-2 质点的运动微分方程.....	123
习题	127
第十一章 动量定理.....	129
§ 11-1 动量与冲量.....	129
§ 11-2 动量定理.....	130
§ 11-3 质心运动定理.....	132

习题	134
第十二章 动量矩定理	137
§ 12-1 质点和质点系的动量矩	137
§ 12-2 动量矩定理	138
§ 12-3 刚体绕定轴的转动微分方程	140
§ 12-4 刚体对轴的转动惯量	143
*§ 12-5 刚体的平面运动微分方程	146
习题	149
第十三章 动能定理	153
§ 13-1 力的功	153
§ 13-2 质点和质点系的动能	155
§ 13-3 动能定理	157
§ 13-4 功率·功率方程·机械效率	161
§ 13-5 势力场·势能·机械能守恒定律	163
§ 13-6 普遍定理的综合应用举例	164
习题	168
综合问题习题	171
第十四章 达朗贝尔原理(动静法)	174
§ 14-1 惯性力·达朗贝尔原理	174
§ 14-2 刚体惯性力系的简化	176
§ 14-3 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	179
习题	181
第十五章 虚位移原理	184
§ 15-1 约束·虚位移·虚功	184
§ 15-2 虚位移原理	185
习题	190
习题答案	192

策划编辑	黄 毅
责任编辑	陈大力
封面设计	王 睢
责任绘图	尹文军
版式设计	马静如
责任校对	王 雨
责任印制	

绪 论

一、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。机械运动是人们生活和生产实践中最常见的一种运动。平衡是机械运动的特殊情况。

本课程研究的内容是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。至于速度接近于光速的物体和基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的观点才能完善地予以解释。宏观物体远小于光速的运动是日常生活及一般工程中最常遇到的,古典力学有着最广泛的应用。理论力学所研究的则是这种运动中最一般、最普遍的规律,是各门力学分支的基础。

本课程的内容包括以下三个部分:

静力学——主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件,同时也研究物体受力的分析方法,以及力系简化的方法等。

运动学——只从几何的角度来研究物体的运动(如轨迹、速度和加速度等),而不研究引起物体运动的物理原因。

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。

二、理论力学的研究方法

(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。

人类通过生活和生产实践,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,总结于科学著作中。我国的墨翟(公元前468—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(公元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:在研究物体受外力作用而平衡时,可以忽略物体形状的改变,采用刚体模型;但要分析物体内部的受力状态或解决一些复杂物体体系的平衡问题时,必须考虑到物体的变形,建立弹性体的模型。

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。

(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。

实践是检验真理的惟一标准,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。

三、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。有些工程问题可以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。所以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。很多工程专业的课程,例如材料力学、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,所以理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。

(3) 充分理解理论力学的研究方法,不仅可以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。

静力学

引言

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。

在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,这种作用使物体的机械运动状态发生变化。

力系,是指作用于物体上的一群力。

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。

实践表明,力对物体的作用效果决定于三个要素:(1)力的大小;(2)力的方向;(3)力的作用点。因此,力应以矢量表示,本书中用黑体字母 F 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。在国际单位制中,力的单位是 N 或 kN。

在静力学中,我们将研究以下三个问题:

1. 物体的受力分析

分析某个物体共受几个力,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另一个与它等效的力系来代替,这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系,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。

工程中常见的力系,按其作用线所在的位置,可以分为平面力系和空间力系两大类;又可以按其作用线的相互关系,分为共线力系、平行力系、汇交力系和任意力系。满足平衡条件的力系称为平衡力系。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义,是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此,静力学在工程中有着广泛的应用。

第一章 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。

§ 1-1 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 1-1a 所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和,即

$$\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 \quad (1-1)$$

亦可另作一力三角形,求两汇交力合力的大小和方向(即合力矢),如图 1-1b、c 所示。

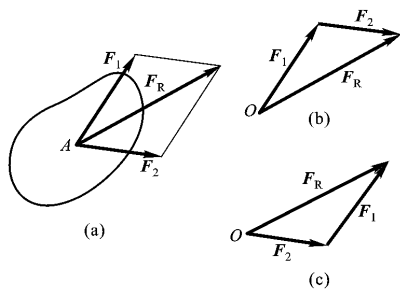


图 1-1

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力(如 F_1 与 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。

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。

推理 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:在刚体上的点 A 作用力 F ,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 ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-2b 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 1-2c,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

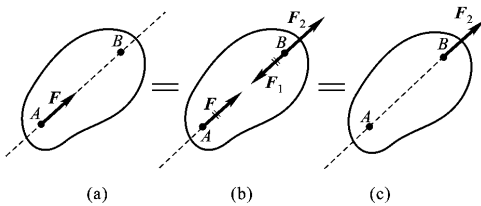


图 1-2

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,它已为作用线所代替。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。

推理 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 1-3 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。

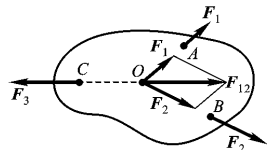


图 1-3

公理 4 作用和反作用定律

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。

公理 5 刚化原理

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。例如,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚体,其平衡状态保持不变。反之,就不一定成立。如刚体在两个等值反向的压力作用下平衡,若将它换成绳索就不能平衡了。

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。

§ 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。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。

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,可以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。

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. 具有光滑接触表面的约束

例如,支持物体的固定面(图 1-4a, b)、啮合齿轮的齿面(图 1-5)、机床中的导轨等,当摩擦忽略不计时,都属于这类约束。

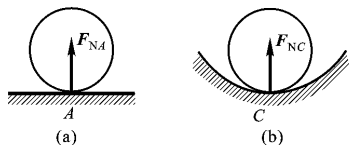


图 1-4

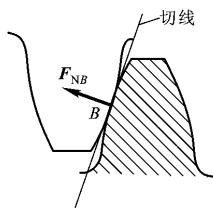


图 1-5

这类约束不能限制物体沿约束表面切线的位移,只能阻碍物体沿接触表面法线指向约束内部的位移。因此,光滑支承面对物体的约束力,作用在接触点处,作用线沿接触表面的公法线,并指向被约束的物体。这种约束力称为法向约束力,通常用 F_N 表示,如图 1-4 中的 F_{NA} 、 F_{NC} 和图 1-5 中的 F_{NB} 等。

2. 柔索类约束

细绳吊住重物,如图 1-6a 所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力,所以它给物体的约束力也只能是拉力(图 1-6b)。因此,绳索对物体的约束力,作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束力。

链条或胶带也都只能承受拉力。当它们绕在轮子上,对轮子的约束力沿轮缘的切线方向(图 1-7)。

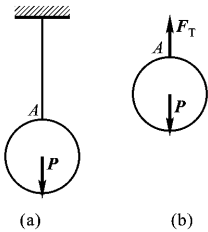


图 1-6

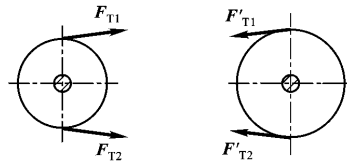


图 1-7

3. 光滑铰链约束

这类约束有向心轴承、圆柱形铰链和固定铰链支座等。

(1) 向心轴承(径向轴承)

图 1-8a、b 所示为轴承装置,可画成如图 1-8c 所示的简图。轴可在孔内任意转动,也可沿孔的中心线移动;但是,轴承阻碍着轴沿径向向外的位移。当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴的约束力 F_A 作用在接触点 A,且沿公法线指向轴心(图 1-8a)。但是,随着轴所受的主动力不同,轴和孔的接触点的

