




高等教育力学“十三五”规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主编 王胜永 田淑侠

 郑州大学出版社



高等教育力学“十三五”规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主编 王胜永 田淑侠



郑州大学出版社

郑州

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/王胜永,田淑侠主编. —郑州:郑州大学出版社,2017.2

(高等教育力学“十三五”规划教材)

ISBN 978-7-5645-3794-4

I. ①工… II. ①王…②田… 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 (2017) 第 014693 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

郑州市诚丰印刷有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:17

字数:413 千字

版次:2017 年 2 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2017 年 2 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-3794-4

定价:29.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

本书作者

Authors

主 编 王胜永 田淑侠
副 主 编 王红卫 李育文 杨改云
编 委 (以姓氏笔画为序)
王胜永 王红卫 田淑侠
李育文 苏二伟 宋学谦
杨改云

内容简介

本书包括静力学和材料力学两部分。主要内容包括：静力学公理和物体的受力分析、平面力系的合成与平衡、考虑摩擦的平面力系问题、空间力系、拉伸和压缩、剪切、扭转、弯曲、应力状态和强度理论、组合变形、动荷载和交变应力、压杆稳定等内容。

本书适合于高等院校工科专业和高职院校工科专业 48 ~ 70 学时教授，在内容安排上力求做到深入浅出、循序渐进，理论联系实际，注重工程应用。培养学生应用工程力学基本原理解决工程实际问题的能力。本书也可作为相关工程技术人员的参考用书。

前言

Preface

工程力学是各高等学校工科类专业的一门重要专业基础课。近年来,随着高等教育改革的不断深入,多数高等学校对工程力学课程的教学内容和学时进行了调整,本书是为了适应这种新的教学形式,在总结近年来探索与实践经验的基础上进行编写的,其内容涵盖了“理论力学”和“材料力学”中的大部分内容,适用于各高等院校工程力学的教学要求。通过工程力学的教学,培养学生解决工程技术问题的初步技能。

教学改革是一个不断探索的过程,也是一个不断创新的过程。自从《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010-2020)》实施以来,许多高校都在积极进行这方面的探索。工程力学作为高等院校工科类专业的一门专业基础课,既要做到在课时设置和内容讲解上的科学合理,同时也必须从力学发展和工程需要的实际出发,进行改革创新。具体要做的就是要以适应社会发展和科技进步为目标,在内容上,使学生能掌握工程力学最基本的概念、原理,通过学习本课程,初步具有设计机械零部件的本领,培养提高解决工程问题的素质和能力。


我们在编写本书时,力求做到以下几点:

首先,在内容编写中,突出工程力学的课程的基本概念、基本原理的阐述,做到循序渐进、浅显易懂。

其次,突出工程应用,所选取的例题和习题突出工程背景,使学生看了教材后,能理论联系实际,懂得工程实例和工程力学模型之间的联系,着力培养学生分析解决工程实际问题的能力。

再次,在编写中做到由浅入深,注重教学体系的完整性,内容较为丰富。教师在具体讲授时,可根据需要适当取舍。

参加本书编写的有郑州轻工业学院王胜永(绪论、第一章、第二章、第三章、第四章、第十一章)、王红卫(附录)、田淑侠(第五章、第七章)、李育文(第六章)、杨改云(第八章)、苏二伟(第九章)、宋学谦(第十章)。本书由王胜永、田淑侠担任主编,王红卫、李育文、



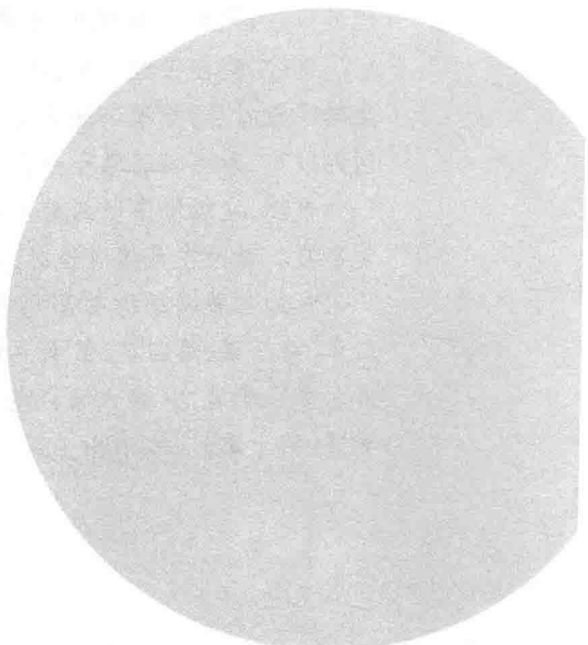
杨改云担任副主编。

本书在编写的过程中,得到不少专家和学者的关心与支持,在此谨表谢意!

由于编者水平有限,对书中的不足和疏漏之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2016年11月



目录

CONTENTS

绪论	1
第一章 静力学公理和物体的受力分析	3
第一节 力的概念	3
第二节 静力学公理	4
第三节 约束和约束反力	6
第四节 物体的受力分析和受力图	10
第二章 平面力系的合成与平衡	19
第一节 平面汇交力系的合成与平衡	19
第二节 力对点之矩	22
第三节 平面力偶系的合成与平衡	25
第四节 力的平移定理	29
第五节 平面任意力系向作用面内任一点的简化	30
第六节 平面任意力系的简化结果分析	32
第七节 平面任意力系的平衡方程及其应用	34
第八节 物体系统的平衡问题	39
第九节 平面静定桁架内力计算	43
第三章 考虑摩擦的平面力系问题	54
第一节 滑动摩擦的概念	54
第二节 考虑摩擦时物体的平衡问题	57
第三节 摩擦角与自锁	59
第四节 滚动摩阻的概念	60
第四章 空间力系与重心	66
第一节 力在空间直角坐标轴上的投影	67
第二节 空间汇交力系的合成与平衡	69
第三节 力对轴之矩	70
第四节 空间任意力系的平衡方程及其应用	72
第五节 重心	75
第五章 拉伸和压缩	81
第一节 轴向拉伸和压缩的概念和工程实例	81
第二节 轴向拉压时横截面上的内力、截面法和轴力图	82

第三节	拉伸和压缩时横截面上的应力	84
第四节	拉压杆的变形和胡克定律	88
第五节	材料在轴向拉压下的力学性能	91
第六节	拉杆和压杆的强度计算	96
第七节	拉压杆的超静定问题	99
第八节	应力集中的概念	101
第九节	剪切和挤压的基本概念	102
第十节	剪切和挤压的实用计算	103
第六章	扭转	115
第一节	圆轴扭转的概念及工程实例	115
第二节	扭矩及扭矩图	116
第三节	圆轴扭转时的应力和变形	118
第四节	圆轴扭转时的强度和刚度计算	124
第七章	平面弯曲	134
第一节	平面弯曲的概念与工程实例	134
第二节	梁的计算力学模型	135
第三节	梁的内力——剪力和弯矩	138
第四节	剪力方程、弯矩方程、剪力图和弯矩图	139
第五节	载荷集度、剪力和弯矩之间的关系	145
第六节	纯弯曲梁横截面上的正应力	149
第七节	梁的正应力强度计算	154
第八节	梁弯曲的切应力	158
第九节	梁的变形分析	162
第十节	提高梁的强度和刚度的措施	169
第八章	应力状态及强度理论	179
第一节	应力状态的概念	179
第二节	平面应力状态	181
第三节	空间应力状态及最大切应力、广义胡克定律	186
第四节	强度理论	188

第九章 组合变形	196
第一节 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	197
第二节 扭转与弯曲的组合变形	200
第十章 压杆的稳定	208
第一节 压杆稳定的概念	208
第二节 细长压杆的临界力	211
第三节 欧拉公式的适用范围及中小柔度杆的临界应力	216
第四节 压杆的稳定计算	220
第五节 提高压杆稳定性的措施	222
第十一章 动载荷与交变应力	226
第一节 动载荷与交变应力概念	226
第二节 构件作匀速直线运动和匀速转动时的动应力计算	226
第三节 交变应力和疲劳破坏	228
第四节 提高构件动强度和疲劳强度的措施	235
附录 I 平面图形的几何性质	238
I.1 静矩和形心	238
I.2 惯性矩和惯性半径	241
I.3 惯性积	245
I.4 平行移轴公式	246
附录 II 型钢规格表	249
II.1 热轧等边角钢(GB 9787—88)	249
II.2 热轧不等边角钢(GB 9788—1988)	253
II.3 热轧槽钢(GB 707—1988)	256
II.4 热轧工字钢(GB 706—1988)	258



绪 论

一、工程力学的研究对象及任务

就工程力学而言,包含的内容极其广泛,但本书所论“工程力学”,主要包含了“静力学”(第一章至第四章)和“材料力学”(第五章至第十一章)两部分内容。这两部分内容都是机械工程设计工作中所涉及的基础内容。其中的静力学主要研究物体的受力和平衡规律;材料力学主要研究杆类零件在外力作用下的承载能力问题。

静力学的任务是研究力系的简化与平衡条件。力系是指作用在物体上的一群力,所谓简化是指用一组最简单的力系代替给定的力系,同时保持对物体的作用效果不变。或者说,用最简单的等效力系代替给定的力系。平衡条件是指在物体平衡时作用于物体上的力系所应满足的条件。显然,力系简化是寻求力系平衡条件的有效途径,当然力系的简化不仅只局限于静力学。力系平衡条件可用于计算构件在给定力系作用下构件的内力或支撑力,以便为结构的设计提供依据,因而在工程中的应用十分广泛。

工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下正常工作而不失效,即保证机械零部件在工作过程中具有足够的强度、刚度和稳定性。所谓强度是指构件或材料抵抗破坏的能力,这里的破坏指的是断裂和塑性变形。所谓刚度是指构件或材料抵抗变形的能力。而稳定性的概念是指构件在原始位置维持平衡状态的能力。

若构件横截面积尺寸不足或形状不合理,或材料选用不当,将不能满足上述要求,从而不能保证构件或机械的安全工作。相反,也不应不恰当地加大横截面尺寸或不分场合地选用优质材料,这虽然能够满足上述要求,却多使用了材料和增加了成本,造成浪费,使设计的产品在目前市场经济条件下没有市场优势。因此材料力学的任务就是在满足强度、刚度和稳定性的前提条件下,为设计既经济又安全的构件提供必要的理论基础和计算方法。

二、工程力学的研究方法

人们为了认识客观规律,不仅要在生产和生活中进行观察和分析,还要主动地进行试验,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。在对事物观察和试验的基础上,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,要应用辩证唯物主义方法论,必须抓住主要因素,舍弃次要因素,建立抽象化的力学模型。在静力学的研究中,我们

主要研究的是物体在力系作用下的平衡问题,即已知作用在物体上的主动力,利用平衡条件求解各种约束下的支撑力。在这里,物体的变形是次要因素,因此在静力学研究中忽略物体的微小变形,建立起在力的作用下物体形状、大小均不变的刚体模型。

在材料力学中,研究构件的强度、刚度和稳定性时,构件的变形是引起构件失效的主要因素,因此材料力学杆类零构件的力学模型就是变形体。但对于受外力作用的变形固体,为掌握物体受力以后的变形规律,也必须忽略一些材料的次要属性,即对变性固体做一些基本的假设。在材料力学中,首先,认为组成物体的物质不留空隙地充满了固体的体积。实际上组成固体的粒子之间存在着空隙并不连续,但这种空隙与杆件的尺寸相比极其微小,可以不计,这就是连续性假设。其次,认为构件各处都有相同的密度,那些由于铸造、锻造所引起的各部分疏密程度不同是次要的,可以忽略不计,这就是均匀性假设。再次,认为固体内各处的力学性能一致,就使用最多的金属来说组成金属的各晶粒的力学性能并不完全相同,但因构件的任一部分中都包含为数极多的晶粒,而且无规则排列,固体的力学性能是各晶粒的力学性能的统计平均值,所以可以认为各部分的力学性能指标是相同的,这就是各向同性假设。

三、学习工程力学的基本要求

工程力学是将力学原理应用于有实际意义的工程系统的科学。作为一门课程,是理论性和实践性密切结合的专业技术基础课。工程力学解决问题的一般研究方法可归纳为:提出问题,选择相关的研究系统,对系统进行抽象简化,建立力学模型;利用力学原理进行分析、推理,得出结论;进行实验验证或者和已知的结论相比较;确认模型或者进一步改善模型,进行分析,深化认识。

工程力学来源于实践又服务于实践。在研究工程力学时,现场观察和实验是认识力学规律的重要环节。在学习本课程时,观察实际生活中的力学现象,学会用力学基本知识去解释这些现象;通过实验验证理论的正确性,并提供测试数据资料作为理论分析、简化计算的依据。

工程力学有较强的系统性,各部分之间内容联系较紧密,学习重在循序渐进,要真理解基本概念,基本原理和基本方法。要注意所学概念的来源、含义、力学意义及其应用;要注意有关公式的根据、适用条件;要注意分析问题的思路,解决问题的方法。在学习中一定要认真研究,独立完成一定量的习题,以巩固和加深对所学概念、理论、公式的理解、记忆和应用。



第一章 静力学公理和物体的受力分析

静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律的科学,重点解决刚体在满足平衡条件的基础上,根据已知主动力求解未知的约束力的为题。静力学理论是从生产实践中发展起来的,是机械零部件承载力设计计算的基础,在工程中有着广泛的应用。

第一节 力的概念

在我们生活的世界里,每时每刻都存在力的作用。例如:人本身受到地球的引力而产生重力;人拉车前进,人对车施加了向前的拉力,使车产生运动;球拍击打乒乓球,乒乓球受到了力的作用。由此人们对力的作用有了认识,这种作用使物体的机械运动状态发生变化。

物体间的机械作用,大致可以分为两类:一是接触作用,如人推物体前进的推力,球拍击打乒乓球的作用等;二是“场”对物体的作用,如地球引力场对物体的引力,磁场对带电导体的作用力等。

尽管各种物体间相互作用力的来源和性质不同,但是力学中将只研究各种力的共同表现,即力对物体产生的效应。这种效应一般也可分为两个方面:①力的运动效应:物体运动状态的改变。②力的变形效应:物体形态的改变。

所以力的概念可以总结为:力是物体间相互的机械作用,这种作用的效应使物体的运动状态和形状发生改变。前者称为力的外效应,后者称为力的内效应。

实践证明,力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点,我们称这三者为力的三要素。

在国际单位制中,力的基本单位是牛顿(N),常用单位还有千牛顿(kN)。

力是矢量,常用一带有箭头的线段表示,线段的长度表示力的大小(按一定的比例尺画),线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的起点或终点表示力的作用点。通常用黑体字母表示力矢量(手写时在字母上加箭头或短横线),而与之对应的普通体字母仅表示力的大小。

在力的作用下,任何物体都会产生变形。但在工程实际中,许多零部件受力后所产生的变形与其本身的尺寸相比显得非常小,对研究物体的外效应影响极小,可以忽略不计。为了便于研究,常略去物体受力后的变形。受力后不变形的物体称为刚体。刚体是一种科学抽象化的力学模型,在静力学中,一般将所研究的物体均视为刚体。

第二节 静力学公理

公理是人类在长期的实践中所积累的经验,经过抽象、归纳得到的客观规律。静力学公理是关于力的基本性质的概括和总结,是静力学以及整个力学的理论基础。

一、公理一:力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力,合力仍作用于该点,其大小和方向由由这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来确定。如图 1.1a 所示,以 F_R 表示 F_1 和 F_2 的合力, O 点为作用点,合力矢量即

$$F_R = F_1 + F_2$$

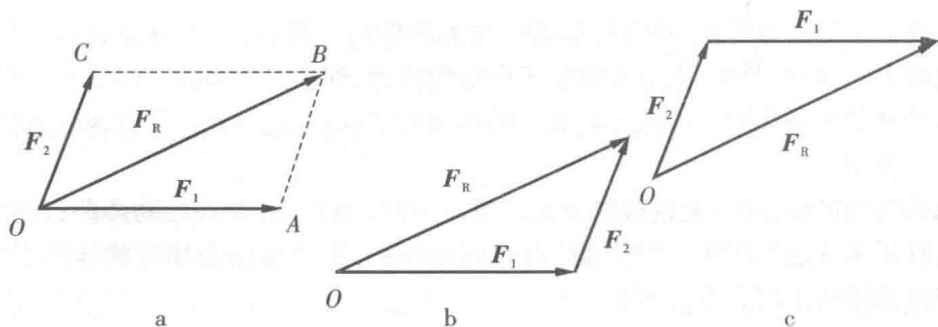


图 1.1

平行四边形法则又称为矢量加法,它不仅适用于力的合成,而且对所有矢量(如速度等)的合成均适用。应用此公理求两个汇交力合力的大小和方向时,可由任一点起,作一力三角形。如图 1.1b、c 所示,力三角形的两个边分别为力的矢量 F_1 和 F_2 ,第三边即代表合力矢量 F_R ,而合力的作用点仍在汇交点 O 。

二、公理二:二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两个力的大小相等、方向相反且作用于同一直线上。该公理是关于平衡的最简单、最基本的性质,是各种力系平衡的理论依据。

凡是只在两个点受力,且不计自重的平衡物体称为二力构件或二力杆。由二力平衡公理可知,无论二力杆是直的还是弯的,其所受的二力必沿两受力点的连线且等值反向,如图 1.2 所示。

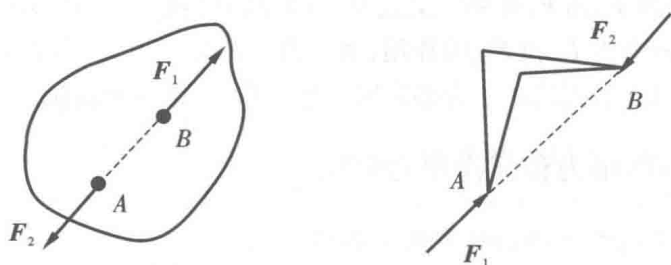


图 1.2

三、公理三:加减平衡力系公理

在作用于刚体上的已知力系中,加上或减去任意一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的运动效应。加减平衡力系公理只适用于刚体,不适用于变形体,因为加减平衡力系会影响其变形。

由以上三个公理可以推出如下两个推论:

推论一:力的可传性原理

作用于刚体上的力,可沿其作用线移至刚体上的任一点,而不改变它对刚体的作用效应。

证明:如图 1.3a 所示为作用于 A 点力 F ,根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B,并且加上一对平衡力系 F_1 和 F_2 ,使得 $F = F_1 = -F_2$,如图 1.3b 所示。由于力 F 和 F_2 也是一对平衡力系,故可减去。这样只剩下作用于 B 点的力 F_1 ,如图 1.3c 所示。于是,就相当于原来的力沿其作用线平移到了 B 点。这就证明了力的可能性。

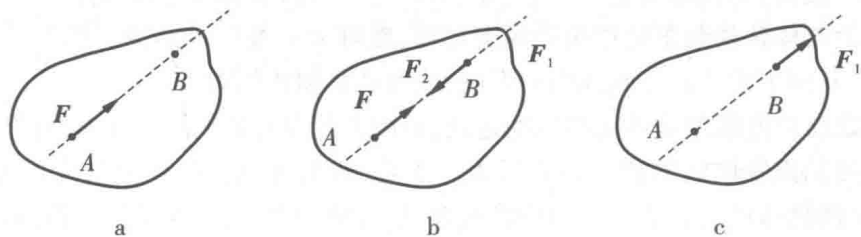


图 1.3

由力的可传性原理可知,对于刚体而言,力的三要素为力的大小、方向、作用线。

推论二:三力平衡汇交定理

刚体受三个力的作用而处于平衡时,若其中两力作用线汇交于一点,则第三个力作用线也必然汇交于该点,且此三个力的作用线位于同一平面内。

证明:如图 1.4 所示,刚体上三个力 F_1 、 F_2 和 F_3 ,分别作用于 A、B、C 三点,它们构成了平衡力系,根据力

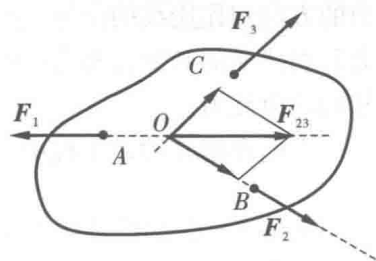


图 1.4

的可传性原理,现将 F_2 和 F_3 移到汇交点 O ,再根据力的平行四边形法则,得合力 F_{23} ,则刚体上就只有两个力 F_1 和 F_{23} 的作用,由二力平衡公理可知,力 F_1 的延长线必汇交于 O 点, F_1 和 F_{23} 共线,当然此三力必在同一平面内,于是定理得证。

四、公理四:作用力和反作用力公理

作用力和反作用力公理是研究两个物体之间的相互作用关系的,即两物体间的相互作用力总是大小相等、方向相反、在同一直线上,且分别作用在两个相互作用的物体上。如图 1.5 所示,灯对绳的作用力 F 和绳对灯的反作用力 F' ,大小相等、方向相反、并作用在同一直线上。

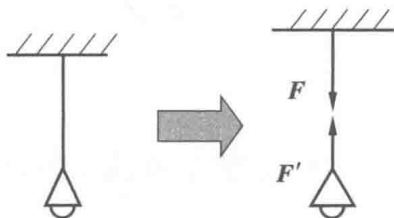


图 1.5

该公理说明,力总是成对出现的,有作用力就必有反作用力,二者同时存在同时消失。作用力和反作用力分别作用在两个物体上,与二力平衡有本质的区别。

第三节 约束和约束反力

一、约束与约束反力

有些物体,例如飞行的飞机、火箭和炮弹等,它们在空间的位移不受任何限制。这种位移不受限制的物体称为自由体。在工程实际中,每个构件都以一定的形式与周围物体相互连接,因而其运动受到一定的限制。位移受到限制的物体都称为非自由体。

凡是对物体运动起限制作用的周围物体,就称为对物体的约束。例如,放在地面上的物体,其向下的运动受到地面的限制,地面就是物体的约束。

约束之所以能限制被约束物体的运动,是因为约束对被约束物体有力的作用。约束作用于被约束物体的力称为约束反力。于是,我们可以把物体上所受的力分为两类:一类是使物体产生运动或运动趋势的力,称为主动力;另一类是限制物体运动或运动趋势的力,称为被动力,即约束反力。

显然,约束反力的作用点在被约束物体与约束的接触点处,其方向与其所限制的物体运动方向相反,这是分析约束反力的基本原则。运用这个原则,可以确定约束反力的方向和作用线的位置,至于约束反力的大小则是未知的,在静力学问题中,约束反力和物体受的其他已知力(主动力)可以组成平衡力系,因此运用平衡条件能求出未知的约束反力。

下面介绍几种在工程中经常遇到的简单的约束类型及确定约束反力方向的方法。





二、常见的约束类型

1. 具有光滑接触表面的约束

由光滑面接触所形成的约束称为光滑接触表面约束。比如：支持物体的固定面(图 1.6a、b 所示)、啮合齿轮的齿面(图 1.6c)等,当摩擦忽略不计时,都属于这类约束。

这类约束的特点是:不能限制物体沿约束表面切线方向的位移,只能限制物体沿接触面法线方向指向约束内部的位移。即只能受压而不能受拉,只限靠近而不限背离,只限法向而不限切向。因此,光滑面约束的约束反力通过接触点沿接触面的公法线指向被约束物体,即物体受压力,常用字母 F_N 表示,如图 1.6 所示。

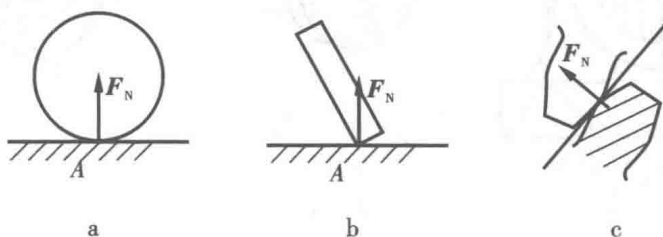


图 1.6

2. 柔性体约束

由绳索、皮带、链条等各种柔性物体所形成的约束,称为柔性体约束。

这种约束的特点是:只能受拉不能受压,只能限制物体沿柔性体中心线方向背离柔性体的运动,不能限制物体沿其它方向的运动。因此,柔性体约束的约束反力通过接触点沿柔性体的中心线方向背离被约束物体,即物体受拉力,常用字母 F_T 或 T 表示。如图 1.7 所示起吊重物时,绳子对重物的约束(图 1.7a),皮带传动装置中皮带对轮的约束(图 1.7b)均是柔性体约束。

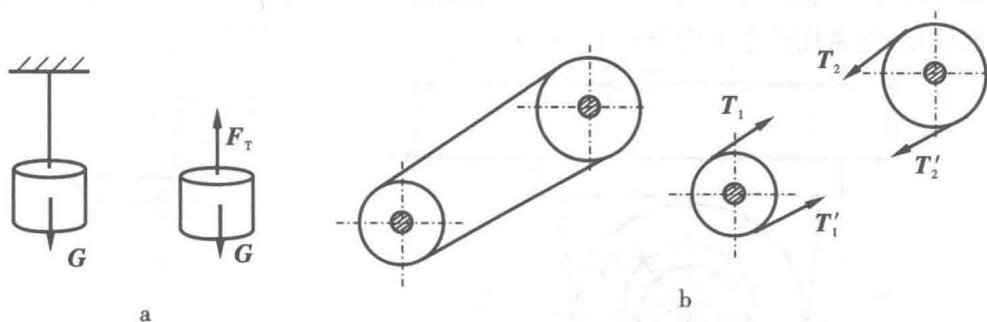


图 1.7

3. 光滑铰链约束

(1) 向心轴承(径向轴承)。

向心轴承装置,轴可以在孔内任意转动,也可以沿着孔的中心线移动,但是,轴承阻碍着轴沿径向向外的位移。忽略摩擦,当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴