



“十三五”土木工程专业系列规划教材

工程力学



李现敏 主编 栗东平 李彦苍 副主编



科学出版社

“十三五”土木工程专业系列规划教材

工程力学

李现敏 主编

栗东平 李彦苍 副主编

科学出版社

科学出版社

北京

“十三五”普通高等教育规划教材

内 容 简 介

本书根据教育部颁发的《高等学校工程力学课程教学基本要求》编写,由静力学、材料力学两部分共十二章组成,分别为静力学公理和物体的受力分析,平面力系,空间力系,材料力学绪论,轴向拉伸、压缩与剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,应力状态和强度理论,组合变形的强度计算,压杆的稳定。

本书适用于高等学校工科本科非机、非土类各专业少学时工程力学课程,也可作为独立学院、高职高专、继续教育学院等工科相关专业工程力学课程的教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/李现敏主编. —北京:科学出版社, 2017. 8

(“十三五”土木工程专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-054195-6

I. ①工… II. ①李… 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 201717 号

责任编辑:万瑞达/责任校对:王万红

责任印制:吕春珉/封面设计:曹 来

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017 年 8 月第 一 版 * 开本:787×1092 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:427 000

定价:39.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(骏杰))

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62132124(VA03)

版权所有, 侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

本书根据“教育部高等学校工程力学课程教学基本要求”，同时结合编者多年来为工科相关专业讲授工程力学、理论力学、材料力学等力学课程的教学经验和教学改革实践编写而成。

本书在力学课程教学学时压缩和满足教学基本要求的基础上，突出针对性和实用性，着重培养学生分析问题和解决问题的能力，满足高校工程应用型人才培养的要求。本书基本概念力求准确且通俗易懂，内容选取力求精简且重点突出，例题、习题注重与工程实际相结合。本书由静力学、材料力学两部分共十二章组成，各章均配有一定数量的思考题及习题，以便学生更好地掌握课程内容，培养学生自主学习和独立思考能力。

本书由李现敏担任主编，栗东平、李彦苍担任副主编，参加编写的人员还有周小利、马士进、王二成、范小弄、赵亚军、何丽丽、郭士军。具体编写分工为：第1章、第4章由李现敏编写；第2章、第5章由范小弄编写；第3章由王二成编写；第6章由周小利编写；第7章、附录A由郭士军编写；第8章、附录B由栗东平编写；第9章由何丽丽编写；第10章、第11章由马士进编写；第12章由赵亚军编写。李彦苍教授审阅了全部书稿。

在本书的编写过程中，编者参阅了国内外出版的同类教材及教辅资料，得到了河北工程大学土木工程学院领导及工程力学系其他同事的大力支持和帮助，编者在此对他们及本书所引用文献的著作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2017年5月

目 录

绪论	1
第一部分 静 力 学	
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	5
§ 1.1 静力学基本概念	5
§ 1.2 静力学基本公理	5
§ 1.3 约束与约束力	7
§ 1.4 物体的受力分析和受力图	13
本章小结	16
思考与习题	16
第 2 章 平面力系	19
§ 2.1 平面汇交力系	19
§ 2.2 平面力对点之矩及平面力偶	22
§ 2.3 平面一般力系的简化	26
§ 2.4 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	30
§ 2.5 物体系的平衡——静定与静不定问题	34
§ 2.6 平面简单桁架的内力计算	37
本章小结	39
思考与习题	41
第 3 章 空间力系	45
§ 3.1 引言	45
§ 3.2 空间汇交力系	45
§ 3.3 空间力对点之矩和力对轴之矩	48
§ 3.4 空间力偶	51
§ 3.5 空间任意力系向一点简化	53
§ 3.6 空间任意力系的平衡	56
§ 3.7 重心	59
本章小结	63
思考与习题	65

第二部分 材料力学

第4章 材料力学绪论	71
§ 4.1 材料力学的任务和研究对象	71
§ 4.2 变形固体的基本假设	73
§ 4.3 外力及内力	74
§ 4.4 应力、正应力与切应力	75
§ 4.5 应变	76
§ 4.6 杆件变形的基本形式	78
本章小结	79
思考与习题	79
第5章 轴向拉伸、压缩与剪切	82
§ 5.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	82
§ 5.2 轴力、轴力图	83
§ 5.3 拉压杆的应力	85
§ 5.4 材料拉伸压缩时的力学性能	88
§ 5.5 应力集中的概念	93
§ 5.6 失效许用应力与拉压杆的强度条件	94
§ 5.7 拉压杆的变形	96
§ 5.8 拉伸和压缩的超静定问题	99
§ 5.9 连接部分的强度计算	101
本章小结	105
思考与习题	106
第6章 扭转	110
§ 6.1 概述	110
§ 6.2 外力偶矩与扭矩的计算及扭矩图	111
§ 6.3 切应力互等定理与剪切胡克定律	113
§ 6.4 圆轴扭转时的应力	114
§ 6.5 圆轴扭转时的强度计算	119
§ 6.6 圆轴扭转时的变形和刚度计算	121
§ 6.7 简单静不定轴	125
§ 6.8 非圆截面等直杆的扭转	126
本章小结	128
思考与习题	129
第7章 弯曲内力	132
§ 7.1 引言	132

§ 7.2 静定梁的基本形式	133
§ 7.3 剪力和弯矩	133
§ 7.4 剪力、弯矩方程与剪力、弯矩图	135
§ 7.5 剪力、弯矩与载荷集度间的微分关系	139
本章小结	144
思考与习题	145
第 8 章 弯曲应力	148
§ 8.1 引言	148
§ 8.2 纯弯曲时的正应力	148
§ 8.3 弯曲正应力的强度条件及其应用	152
§ 8.4 弯曲切应力	157
§ 8.5 弯曲切应力的强度条件	161
§ 8.6 提高弯曲强度的措施	164
本章小结	170
思考与习题	170
第 9 章 弯曲变形	176
§ 9.1 引言	176
§ 9.2 挠曲线近似微分方程	177
§ 9.3 计算弯曲变形的积分法	178
§ 9.4 计算弯曲变形的叠加法	184
§ 9.5 梁的刚度计算	188
§ 9.6 简单超静定梁	190
本章小结	193
思考与习题	193
第 10 章 应力状态和强度理论	197
§ 10.1 应力状态的概念	197
§ 10.2 二向应力状态分析——解析法	199
§ 10.3 二向应力状态分析——图解法	203
§ 10.4 三向应力概述	207
§ 10.5 广义胡克定律	208
§ 10.6 强度理论的概念	211
§ 10.7 工程中常用的四种强度理论	211
§ 10.8 强度理论的讨论	214
本章小结	215
思考与习题	216

第 11 章 组合变形的强度计算	220
§ 11.1 组合变形的概念	220
§ 11.2 弯曲与拉伸(或压缩)的组合变形	221
§ 11.3 斜弯曲	223
§ 11.4 扭转与弯曲的组合变形	226
本章小结	229
思考与习题	229
第 12 章 压杆的稳定	233
§ 12.1 压杆稳定的概念	233
§ 12.2 细长压杆的临界压力	234
§ 12.3 中、小柔度杆的临界应力	238
§ 12.4 压杆的稳定计算	242
§ 12.5 提高压杆稳定性的措施	246
本章小结	247
思考与习题	247
附录 A 截面几何性质	252
附录 B 型钢表	260
习题答案	274
主要参考文献	282

绪 论

力学是研究物质机械运动规律的科学,力学原是物理学的一个分支,物理科学的建立则是从力学开始的。

力学同物理学、数学等学科一样,是一门基础科学,它所阐明的规律带有普遍性,是许多工程学的理论基础。力学又是一门技术科学,它在广泛的工程应用过程中不断得到发展。随着工程学的不断分化,各个工程学分支中许多关键性的进展都有赖于力学中有关运动规律、强度、刚度等问题的解决。力学和工程学的结合促使工程力学各个分支的形成和发展。现在,无论是历史较久的土木工程、水利工程、机械工程、船舶工程等领域,还是后起的航空工程、航天工程、核技术工程、生物医学工程等领域,都或多或少涉及工程力学的知识。

工程力学是力学与工程学的结合,研究工程中的力学问题,基本内容包括理论力学和材料力学两部分,这两部分知识都是学习其他工程科学知识的基础。

理论力学研究物体机械运动的一般规律。物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。机械运动是人们在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状态。材料力学研究构件在外力作用下的变形规律和材料的力学性能,建立构件满足强度、刚度和稳定性要求所需的条件,为安全、经济地设计构件提供必要的理论基础和科学的计算方法。因此工程力学既是自然科学的理论基础,又是现代工程技术的理论基础。在日常生活和生产实际中具有非常广泛的应用。

理论力学内容分为静力学、运动学和动力学三部分:静力学研究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及力系简化的方法等。运动学只从几何观点研究物体的运动规律,而不研究引起物体运动的原因。动力学是研究作用于物体上的力与运动变化之间的关系。根据各专业的不同要求,也考虑到工程力学课程学时的大量缩减,本书只包括其中的静力学部分。

材料力学的内容主要包括:分析并确定构件所受各种外力的大小和方向;研究在外力作用下构件的内部受力、变形和失效的规律;提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。强度是指构件在载荷作用下抵抗破坏的能力;刚度是指构件在载荷作用下抵抗变形的能力;稳定性是指构件在载荷作用下保持其原有平衡形态的能力。

工程力学是学习流体力学与固体力学两大力学分支的入门基础,是工科各专业重要的专业基础课,只有学好工程力学才能学好与本专业有关的后续专业课程,例如:结构力学、混凝土结构设计原理、钢结构设计原理、土力学;机械原理、机械振动、流体力学与液压传动、泵与风机等。

工程力学的分析和研究方法在科学研究中具有一定的典型性,通过工程力学的学习,

有助于培养学生的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,使学生在整个学习过程中,逐步形成正确的逻辑思维,在获取知识的同时,学到科学的思想方法,培养创新能力。

工程力学的发展与生产、科学研究紧密地联系着,我国历代劳动人民有很多发明创造,为人类社会的进步做出了杰出的贡献。在我国古代工程力学就有过辉煌的发展,如都江堰、长城、赵州桥的修建,表明我国很早以前,工程力学的水平就居于世界前列。中华人民共和国成立以来,社会主义建设事业取得了突飞猛进的发展,人造地球卫星的发射和回收、载人航天事业的蓬勃发展,磁悬浮、高速铁路列车、工业机器人、大跨度桥梁、高层超高层建筑、水利枢纽工程、海底隧道、海洋钻井平台等工程中的力学课题的解决,表明我国工程力学的水平已进入世界先进行列。现代机械向着高速、高效、精密的方向发展,许多高新技术工程如各种机械、设备和结构的设计,机器的自动控制和调节、新材料的研制和利用等,都对工程力学提出了许多迫切需要解决的问题,所以生产的发展推动了工程力学的发展,工程力学的发展同时促进了生产的发展。

同任何一门科学一样,工程力学的研究方法也遵循认识过程的客观规律。即从观察、实践和科学实验出发,经过分析、综合和归纳,总结出最为基本的概念和规律;在对事物观察和实验的基础上,经过抽象建立起力学模型,作出表征问题实质的科学假设,然后进行推理和数学分析,得出正确的具有实用意义的结论和定理,构成工程力学理论。然后再回到实际中去验证理论的正确性,并在更高的水平上指导实践,同时从这个过程中获得新的材料,这些材料的积累又为工程力学理论的完善和发展奠定了基础。

工程力学的学习方法较高等数学、物理有所不同,一定要建立起理论研究与实验分析相结合的工程观点。掌握把复杂的研究对象抽象为简单力学模型的方法,掌握数学推理的方法,在学习中不仅要理解数学推导过程,更要理解推导的结果,这样才能使所学的知识融会贯通,扩充与延伸,做到理论联系实际。

第1章 静力学公理和物体的受力分析

第一部分 静力学

§1.1 静力学基本概念

静力学研究物体的平衡规律及其应用，包括以下三个主要内容：

1. 物体的受力分析。即分析物体在哪些位置受到来自其他物体的作用——力，这些力的大小、方向、作用点，哪些要素已知？哪些要素未知？用有向线段表示这些力，最终画出物体的受力图。

2. 力系的简化。作用在物体上的力通常会有很多。作用在物体上的一群力称为力系。若一个力系可以用另一个力系代替而不改变物体的原有状态，则称这两个力系等效。力系的简化就是将作用在物体上的力系等效替换为另一个尽量简单的力系。

3. 力系的平衡条件。研究物体处于平衡状态时物体所受力和力的关系即平衡方程，平衡方程是计算未知力的基本工具。

静力学是建立在力的矢量特性的数学基础上的，因此也称为矢量静力学。力系中的每一个力都称为该力系的一个分力。

二、刚体

在力的作用下，其内部任意两点间的距离始终保持不变，这样的物体称为刚体。它是一个抽象化的力学模型。实际上物体在力的作用下，总会产生微小的变形，因此绝对的刚体是不存在的，另一个物体在力的作用下变形很小，以至可以忽略不计，就可将其看成刚体。静力学研究的物体仅限于刚体，故称为刚体静力学，它是研究物体力学的基础。

§1.2 静力学基本公理

静力学公理揭示了力的一些基本性质，这些性质已被实践所证实，是符合客观实际的普遍规律。静力学公理是静力学理论的基础。

三、力系的等效替换

作用在物体上的一个力的作用效果与一个力系的作用效果相同，则称该力系为该力的等效力系。

第1章 静力学公理和物体的受力分析

§ 1.1 静力学基本概念

一、力

力是物体之间的相互机械作用。这种作用能使物体的运动状态发生改变，称为力的外效应或运动效应；也可使物体形状发生改变，称为力的内效应或变形效应。

力对物体的作用效果决定于力的三要素，即力的大小、力的方向和力的作用点。因此力是一个矢量，用 F 表示。

在国际单位制中，力的单位是牛顿(N)，或千牛(kN)。

作用在物体上的一群力称为力系；若一个力系对物体的作用效果可以用另外一个力系代替，那么这两个力系互为等效力系。

不受外力作用的物体，可以称其为受到零力系作用。若一个力系与零力系等效，则这个力系称为平衡力系。若一个力系与一个单独的力等效，则这个单独的力称为力系的合力，力系中的每一个力都称为合力的一个分力。

二、刚体

在力的作用下，其内部任意两点间的距离始终保持不变，这样的物体称之为刚体。它是一个抽象化的力学模型。实际上物体在力的作用下，都会产生程度不同的变形，因此绝对的刚体是不存在的。若一个物体在力的作用下变形很小，不影响研究物体的实质，就可将其看成刚体。静力学研究的物体只限于刚体，故称为刚体静力学，它是研究变形体力学的基础。

§ 1.2 静力学基本公理

静力学公理概括了力的一些基本性质，这些性质已经被实践反复检验，是符合客观实际的最一般的规律，静力学公理是静力学理论的基础。

一、力的平行四边形法则

作用在物体上的同一个点的两个力可以合成为一个合力。合力也作用在该点；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确定,如图 1-1(a)所示。合力等于两分力的矢量和,即

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

式中的“+”号为矢量相加,即按平行四边形法则相加。它是所有矢量的基本运算规则,具体应用时可以用平行四边形的一半,即三角形规则。如图 1-1(b)、(c)所示。

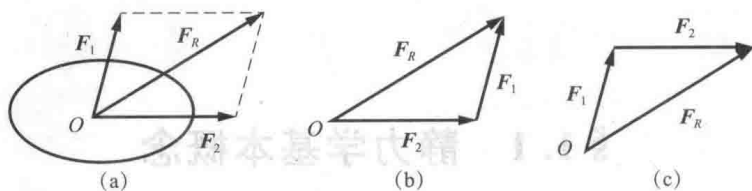


图 1-1

二、二力平衡公理

作用在一个刚体上的两个力,使刚体保持平衡的必要与充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,作用在同一条直线上,如图 1-2(a)所示。

必须指出,对于刚体,这个条件既是必要的又是充分的。但对于非刚体,这个条件是不充分的。例如:软绳受两个等值反向的拉力作用可以平衡,而受两个等值反向的压力作用就不能平衡。在两点只受两个力作用而处于平衡状态的构件称为二力构件[图 1-2(b)],如果二力构件是直杆则称为二力杆[图 1-2(c)],二力构件上的两个力必须满足二力平衡条件。

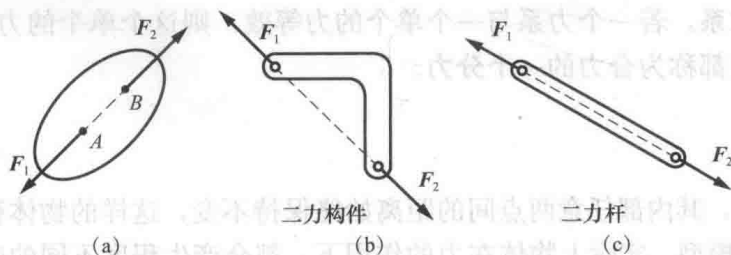


图 1-2

三、加减平衡力系公理

在一个刚体上加上或减去一个平衡力系,并不改变刚体的状态。这个公理只适用于刚体,这是力系简化的重要依据。说明平衡力系对刚体没有作用效果。

根据上述公理可以导出下列推论:

推论 1 力的可传性原理

作用于一个刚体上的力,可以沿着它的作用线移到该刚体上的任意一点,而不改变该力对刚体的作用。此推论可由二力平衡公理和加减平衡力系公理导出。

证明: 设在刚体上的 A 点作用有力 $\mathbf{F}$,如图 1-3(a)所示,在该刚体上力的作用线上任选一点 B,在 B 点加上一对平衡力 $\mathbf{F}'$ 和 $\mathbf{F}''$,如图 1-3(b)所示,利用加减平衡力系公理可知

刚体状态不变, 若令 $F=F'=-F''$, 则 F 和 F'' 也构成一对平衡力, 可以减除, 这样只剩下了 F' , 即相当于把原来作用在 A 点的力 F 沿着其作用线滑移到了 B 点, 如图 1-3(c) 所示。

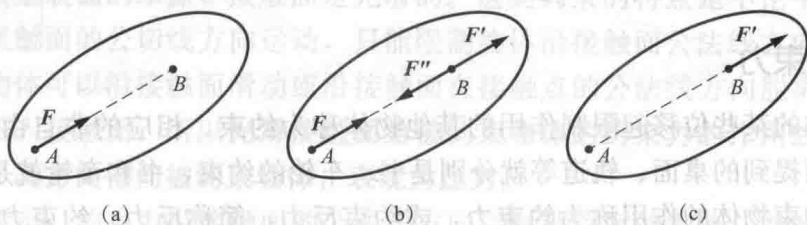


图 1-3

可见, 对于刚体来说, 力的作用点不再是力的三要素之一, 它已为作用线代替。作用在刚体上的力可沿作用线在该刚体上任意移动, 这种矢量称为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

若一刚体受三个力作用且处于平衡状态, 则此三力必在同一平面内, 且三个力的作用线必通过同一个汇交点; 若汇交点在无穷远, 则表示三个力的作用线互相平行。

证明: 如图 1-4 所示, 在刚体上 A 、 B 、 C 三点作用三个力 F_1 、 F_2 和 F_3 , 刚体处于平衡状态。假设 F_1 和 F_2 不平行, 其作用线汇交点为 O , 根据力的可传性原理, 可将力 F_1 和 F_2 滑移到汇交点 O 。根据力的平行四边形法则, 得合力 F_{12} 。则力 F_3 应与力 F_{12} 满足二力平衡公理。由于两力平衡必共线, 所以力 F_3 与 F_1 和 F_2 必共面, 且作用线通过其汇交点 O 。若 F_1 和 F_2 平行, 则认为汇交点 O 在无穷远。

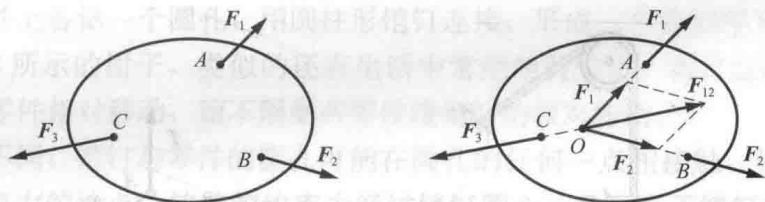


图 1-4

四、作用力与反作用力定律

两个物体之间的作用力与反作用力总是大小相等, 方向相反, 作用在同一条直线上。在应用这个公理时, 要确保作用力与反作用力同时存在, 同时消失; 分别作用在两个相互作用的物体上。

§ 1.3 约束与约束力

工程中的物体一般分两类: 一类是自由体, 它们的位移在空间中不受任何限制, 例如鸟儿在天空中自由飞翔; 另一类是非自由体, 它们的位移在某一个方向上或某几个方向上

受到限制，例如放在桌子上的书的位移受到桌面的限制，车轮受到轨道的位移限制等。工程中的结构构件、机械零件一般都是非自由体。

一、约束和约束力

对非自由体的某些位移起限制作用的其他物体称为约束，相应的非自由体称为被约束物体。例如前面提到的桌面、轨道等就分别是书、车轮的约束，书和车轮就是被约束物体。

约束对被约束物体的作用称为约束力，或约束反力，简称反力。约束力是由于阻碍物体运动而引起的，所以属于被动力。约束力的大小通常是未知的，方向通常与被限制的物体运动方向相反。约束力以外的其他力，能主动改变物体的运动状态，这种力称为主动力。如重力、车辆牵引力、气体压力等。静力学的重要任务之一就是确定未知的约束力。

二、常见的约束类型

工程中物体之间的相互作用方式多种多样，常见的约束类型有以下几种。

1. 柔索约束

柔索是指绳索、胶带、皮带或链条等柔性物体，它们只能承受沿着柔索方向的拉力而不能承受压力和横向力(忽略其自重和伸长)，这种类型的约束称为柔索约束，柔索约束的约束力只能是拉力，其方向一定沿着柔索的轴线背离物体。如图 1-5 所示，卷扬机起吊货物时吊索属于柔索约束；再如图 1-6 所示皮带轮传动，皮带或链条也只能承受拉力，属于柔索约束。

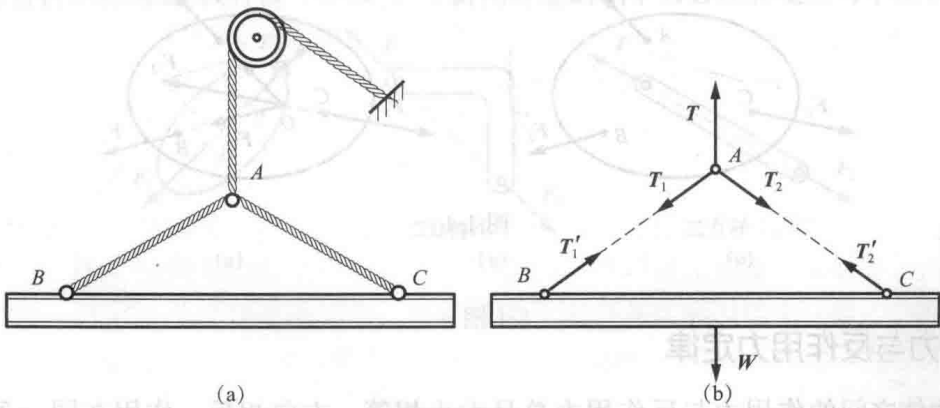


图 1-5

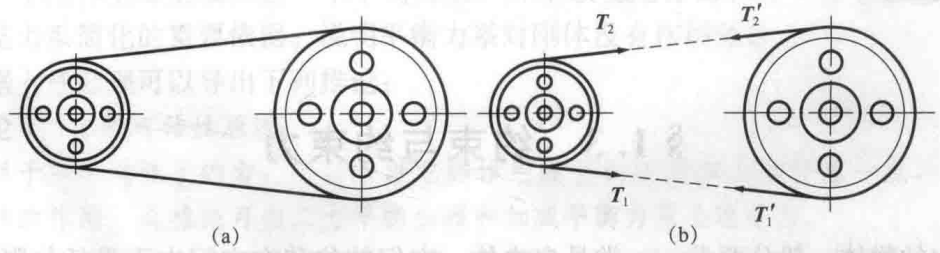


图 1-6

2. 光滑接触面约束

忽略两物体接触表面的摩擦，接触面是光滑的。这类约束的特点是不论平面或曲面都不能阻碍物体沿接触面的公切线方向运动，只能限制物体沿接触面公法线方向相互靠近的运动，也就是说物体可以沿接触面滑动或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面，所以光滑接触面给被约束物体的约束力的作用线沿接触面在接触点的公法线，其方向指向被约束物体，表现为压力。

如图 1-7(a) 所示，约束力沿接触面的公法线方向指向被约束的物体，接触点就是约束力的作用点。在齿轮传动时相啮合的一对轮齿以它们的齿廓相接触，如不计摩擦，约束力沿两轮齿廓接触点的公法线方向，指向对方。如图 1-7(b) 所示。

若物体接触点有尖角，如图 1-7(c) 所示，约束力同样要沿着接触点的公法线方向作用。

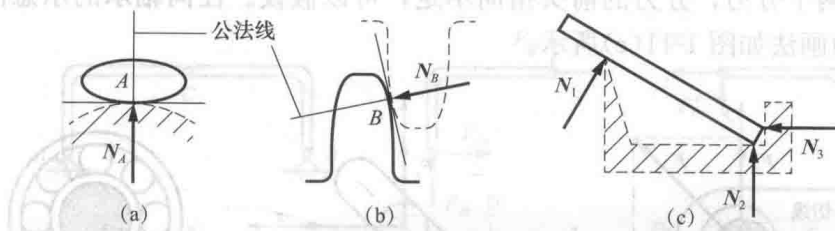


图 1-7

3. 光滑圆柱型铰链约束

铰链。两个零件上各钻一个圆孔，用圆柱形销钉连接，形成一个关节称为圆柱型铰链，简称铰链。如图 1-8 所示的钳子，类似的还有生活中常用的剪刀等。销钉就是两个零件的约束，它只限制两零件相对移动，而不限两零件绕销钉的相对转动。

由于主动力的不同，销钉与零件的圆孔可能在圆孔的任何一点相接触，如图 1-9 所示，根据光滑接触面约束力的特点，铰链的约束力经过销钉圆心，且垂直于销钉轴线，但指向不定。为此，通常把铰链约束力正交分解为两个特定方向的分力，指向可以假设，如图 1-9 所示。

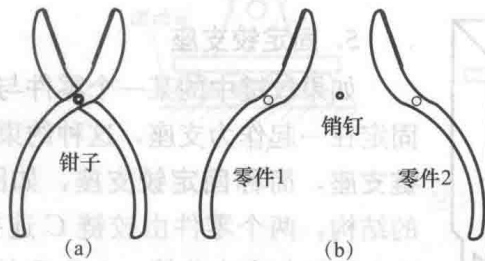


图 1-8

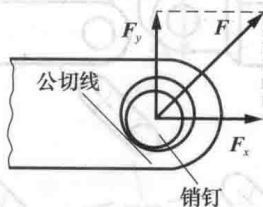


图 1-9

真实的铰链形式多样，为方便，常用示意图见图 1-10(a)，表示物体 AB 与物体 BC 在 B 点用铰链相互连接。其相互约束力通常需要正交分解为两个分力，分力指向可以假设，如图 1-10(b) 所示。