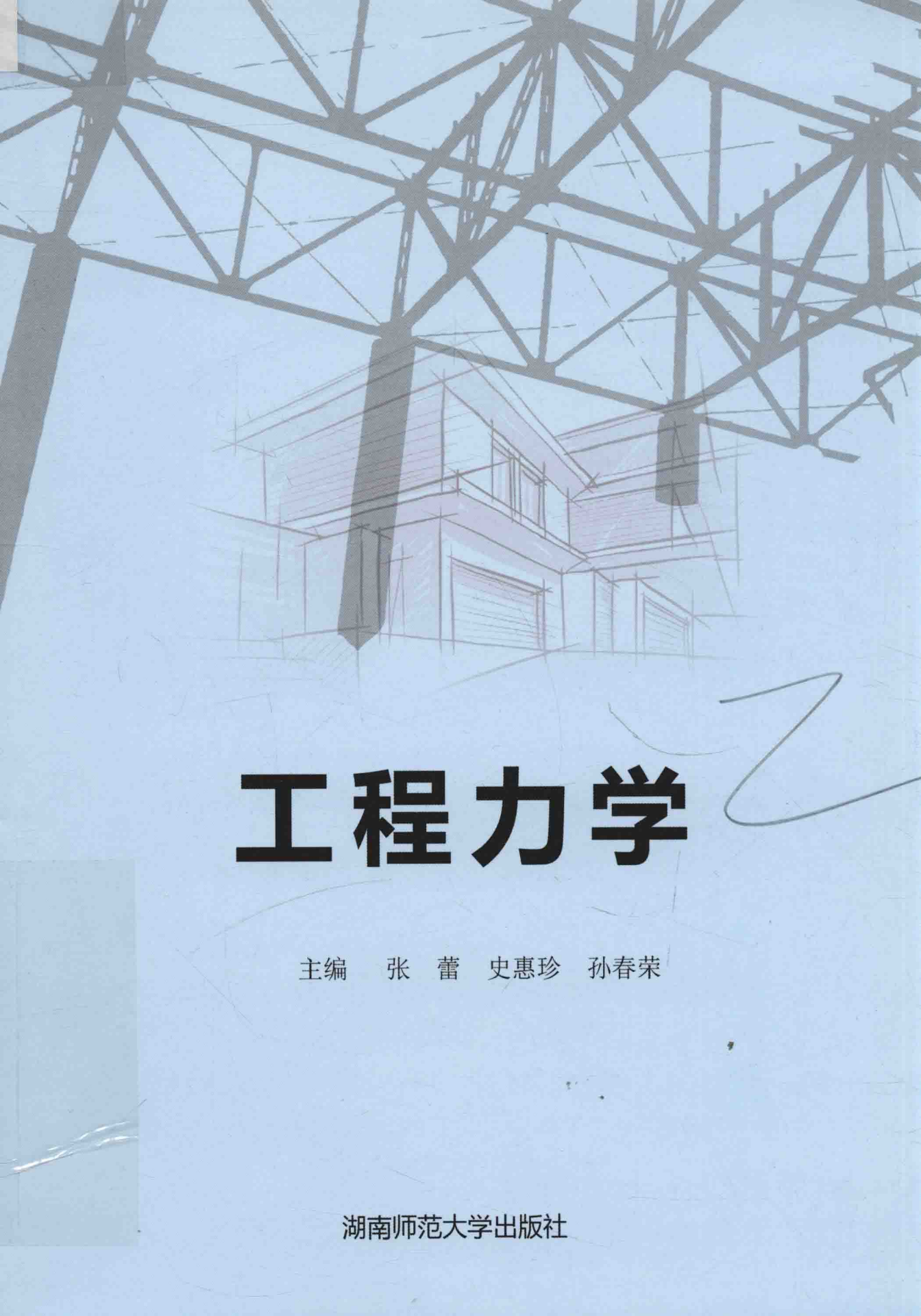




工程力学

主编 张 蕾 史惠珍 孙春荣

湖南师范大学出版社

工程力学

主 编 张 蕾 史惠珍 孙春荣

湖南师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学 / 张蕾, 史惠珍, 孙春荣主编. -- 长沙: 湖南师范大学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-5648-3113-4

I . ①工… II . ①张… ②史… ③孙… III . ①工程力学

IV . ① TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 016732 号

工大野工

张蕾 史惠珍 孙春荣 主

工程力学

◇主编 张蕾 史惠珍 孙春荣

◇责任编辑: 郝纪晓 廖小刚

◇责任校对: 史利娟

◇出版发行: 湖南师范大学出版社

地址 / 长沙市岳麓山 邮编 / 410081

电话 / 0731-88873071 88873070 传真 / 0731-88872636

网址 / <http://press.hunnu.edu.cn>

◇印刷: 廊坊市广阳区九洲印刷厂

◇开本: 787mm × 1092mm 1/16

◇印张: 16

◇字数: 306 千字

◇版次: 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

◇书号: ISBN 978-7-5648-3113-4

◇定价: 77.00 元

湖南师范大学出版社

日常生活和工程技术中,处处都会碰到机械运动,工程力学的定律、定理与结论广泛地运用于各种工程技术之中,如冶金、煤炭、石油、化工、轻工、纺织以及地震科学等,因此它是解决工程实际问题的重要基础。工程技术人员必须具备一定的工程力学知识,才能适应现代化建设的需要。

“工程力学”是工程非机械类专业的一本理论性较强的技术基础课。其任务是使学生较系统地了解机械运动的基本规律及其研究方法,初步学会运用这些规律和方法分析,解决工程实际中简单的力学问题,并为学习后续课程和其他相关的科学技术打下必要的基础。此外,工程力学的研究方法在科学研究中有一定的典型性,有助于培养学生的辩证唯物主义思想以及分析问题和解决问题的能力。

全书共分 15 章,内容包括:静力学基础,平面基本力系,平面任意力系,空间力系,轴向拉伸和压缩,剪切和挤压,圆轴扭转,平面弯曲梁的强度与刚度计算,组合变形,压杆稳定,疲劳强度,质点、刚体运动力学和转动惯量,点的合成运动,刚体的平面运动和动能定理。

由于编者的水平和能力有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正,以便进一步修改和完善。

编 者

目 录

绪 论

第1章 静力学基础

1.1 静力学基本概念	3
1.2 静力学公理	4
1.3 约束与约束反力	7
1.4 受力图	10
知识汇总	14
本章习题	15

第2章 平面基本力系

2.1 平面汇交力系合成	19
2.2 平面汇交力系平衡方程及应用	21
2.3 力对点之矩和合力矩定理	25
2.4 平面力偶系	27
2.5 平面力偶系的合成与平衡	30
知识汇总	33
本章习题	34

第3章 平面任意力系

3.1 力的平移定理	39
3.2 平面任意力系的简化	40
3.3 分布载荷	43
3.4 平面任意力系的平衡方程及应用	45
3.5 平面平行力系的平衡方程	50
3.6 摩擦	50
知识汇总	58
本章习题	60



第4章 空间力系

4.1 力在空间直角坐标轴上的投影	65
4.2 力沿空间直角坐标轴的分解	66
4.3 力对轴之矩	68
4.4 空间任意力系的平衡方程	70
4.5 空间汇交力系及空间平行力系的平衡方程	73
4.6 重心	74
知识汇总	81
本章习题	82



第5章 轴向拉伸和压缩

5.1 轴向拉伸和压缩的概念	85
5.2 轴向拉伸和压缩时横截面上的内力和轴力图	86
5.3 杆件轴向拉伸和压缩时横截面的应力	88
5.4 杆件轴向拉伸和压缩时的变形和虎克定律	90
5.5 材料的机械性能	93
5.6 杆件在拉伸和压缩时的强度计算	98
5.7 应力集中	101
知识汇总	102
本章习题	103



第6章 剪切和挤压

6.1 剪切和挤压的概念	106
6.2 剪切和挤压的实用计算	108
知识汇总	112
本章习题	112



第7章 圆轴扭转

7.1 圆轴扭转的概念与实例	115
7.2 圆轴扭转时横截面的内力分析	116
7.3 圆轴扭转时横截面的应力分析	119
7.4 圆轴扭转时的变形	122
7.5 剪切虎克定律	122
7.6 圆轴扭转时的强度计算	124
7.7 圆轴扭转时的刚度设计	126
知识汇总	128
本章习题	128



第8章 平面弯曲梁的强度与刚度计算

8.1 平面弯曲的概念与实例	131
8.2 平面弯曲时横截面上的内力分析	133
8.3 剪力图和弯矩图	136
8.4 梁弯曲时横截面上的应力分析	142
8.5 梁平面弯曲时的强度设计	146
8.6 提高梁的抗弯能力的措施	149
8.7 梁的弯曲变形	151
8.8 梁平面弯曲时的刚度设计	154
知识汇总	155
本章习题	156



第9章 组合变形

9.1 组合变形的概念	158
9.2 弯曲与拉伸(或压缩)的组合作用	159
9.3 弯曲与扭转的组合作用	163
知识汇总	166
本章习题	167

目 录



第10章 压杆稳定

10.1 压杆稳定的概念	169
10.2 临界力和临界应力	170
10.3 临界应力的计算方法	172
10.4 压杆的稳定性计算	174
10.5 提高压杆稳定性的措施	175
知识汇总	178
本章习题	178



第11章 疲劳强度

11.1 交变应力的概念	181
11.2 交变应力的循环特性和构件疲劳破坏	182
11.3 材料的持久极限	184
11.4 提高疲劳强度的措施	186
知识汇总	187
本章习题	188



第12章 质点、刚体运动力学和转动惯量

12.1 动力学基本定律	189
12.2 质点运动微分方程及应用	191
12.3 动静法	194
12.4 刚体定轴转动微分方程及转动惯量	197
知识汇总	201
本章习题	202



第13章 点的合成运动

13.1 绝对运动、相对运动、牵连运动	206
---------------------------	-----

13.2 点的速度合成与加速度合成	209
知识汇总	214
本章习题	215



第14章 刚体的平面运动

14.1 刚体的平面运动方程	218
14.2 基点法求平面图形内各点的速度	220
14.3 瞬心法求平面图形内各点的速度	223
14.4 基点法求平面图形内各点的加速度	226
知识汇总	228
本章习题	228



第15章 动能定理

15.1 力的功	231
15.2 质点的动能定理	235
15.3 功率	239
知识汇总	241
本章习题	242

参考文献	246
------------	-----



系统地了解机械运动的基本规律及其研究方法，初步学会运用这些规律和方法分析、解决工程实际中简单的力学问题，并为学习后续课程和其他相关的科学技术打下必要的基础。此外，工程力学的研究方法在科学研究中有一定的典型性，有助于培养学生的辩证唯物主义思想以及分析问题和解决问题的能力。

3. 工程力学的研究方法

工程力学和其他任何一门学科一样，就其研究方法而言，都不可能离开客观规律的认识过程。工程力学的研究方法是从实践出发，经过抽象化、综合、归纳、建立公理，再用数学演绎和逻辑推理得到定理和结论，然后通过实践来证实理论的正确性。

观察和实验是认识力学规律的重要实践环节。在观察和实践中，抓住主要因素，忽略次要因素，有助于理解问题的本质。同时，在抽象化的过程中，将研究对象转化为力学模型，通过数学演绎，得出工程上需要的力学公式。例如，在研究物体的运动和平衡规律时，将物体抽象为刚体；在运动学和动力学中，有时将物体抽象为点、质点；在材料力学中，用变形固体来代表真实的物体等。

“工程力学”是一门技术基础课程，它在基础课程和专业课程之间起桥梁作用，为专业设备的机械运动分析和强度分析提供必要的理论基础。学习工程力学，应在理解工程力学的基本概念和基本理论的基础上，学会应用所学的定理和公式去解决具体问题。因此，演算一定数量的习题是巩固和加深理解所学知识的重要途径。

工程力学的研究方法具有典型性，它为我们提供了科学研究的基本方法。在学习本课程的过程中，我们不仅要掌握教材内容，还要逐步领会其研究方法。

第1章 静力学基础

教学目的: 介绍静力学公理和物体的受力分析,为理论力学后面的章节乃至材料力学等后续力学课程的学习打下基础。

教学要求: 掌握力、平衡的概念;熟练掌握各种约束及约束反力的特点及其表示方法;学会正确判定二力杆;能够迅速正确地画出各种受力图。

教学重点: 物体的受力分析。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力

人用手去拉悬挂着的静止弹簧,人手和弹簧之间就有了相互作用,这种作用引起弹簧运动和变形。人们在生活和生产实践中,经过长期的观察和分析,逐步形成和建立了力的科学概念:力是物体之间相互的机械作用,这种作用使物体的运动状态和形状发生改变。物体运动状态的改变是力的外效应,物体形状的改变是力的内效应。静力学、运动学和动力学研究力的外效应,材料力学研究力的内效应。

应当指出,上述机械作用是指物体在机械运动中的相互作用,而不是物体在其他物质运动形式中的相互作用(如热的、电磁的、化学的作用)。力是物体间相互的机械作用,因此力不能脱离物体而存在。

力对物体的效应取决于三个因素:力的大小、方向和作用点。这三个因素称为力的三要素。当这三个要素中任何一个有所改变时,力的作用效果就会改变。

为了度量力的大小必须选择单位,本书采用国际单位制(SI),力的单位为牛顿(N)或千牛(kN)。在工程单位制中,力的单位为千克力(kgf)。二者的换算关系为 $1\text{kgf}=9.8\text{N}$ 。



在力学中有两类量：标量和矢量。只考虑大小的量称为标量，长度、时间和质量都是标量；既考虑大小又考虑方向的量称为矢量，力和速度都是矢量。

10N

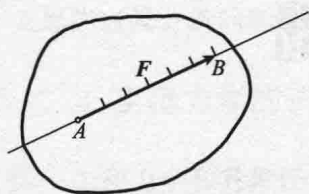


图 1-1 力的表示

矢量可用一条具有方向的线段来表示，如图 1-1 所示。线段的起点 A (或终点 B) 表示力的作用点；箭头的指向表示力的方向；线段的长度 (按一定的比例尺) 表示力的大小。通过力的作用点沿力的方向的直线，称为力的作用线。本书中用粗体字母表示矢量，而以普通字母表示该向量的模 (即大小)。图 1-1 中 $\mathbf{F}$ 表示力的矢量， F (普通体) 表示该力的大小 ($F=60\text{N}$)。手写时可在

字母上加一横线 $\overrightarrow{F}$ 或用 $\overrightarrow{AB}$ 来表示矢量。

如果一个力系对物体的作用，能用另一个力系来代替而不改变它对物体作用的效果，则这两个力系互为等效力系。若一个力和另一个力系等效，则称这个力是该力系的合力，而力系中的各个力都是其合力的分力。把各分力代换成合力的过程，称为力的合成；把合力代换成几个分力的过程，称为力的分解。

1.1.2 刚体

所谓刚体，就是在任何情况下，物体内任意两点间的距离都保持不变。或者说，在任何外力作用下，大小和形体始终保持不变的物体称为刚体。事实上，绝对刚体是不存在的。任何物体受力后，都将或多或少地改变形状，即发生变形。但在多数情况下，变形都很微小，在研究物体的平衡问题时将它略去不计不会影响计算结果的准确性。因此，在静力学中把真实的物体当作理想的刚体。可见，刚体是力学中对物体进行抽象简化后的一种理想模型，这样的抽象化，将使静力学问题的研究大为简化。

1.2 静力学公理

公理 1 (二力平衡公理) 作用于刚体的两个力，使刚体保持平衡的充分必要条件是：这两个力大小相等、方向相反，并且作用在同一直线上。

对于变形体来说，公理 1 给出的条件是必要的，但不充分。例如，软绳受两个等值、反向的拉力可以平衡，当受两个等值、反向的压力时，就不能平衡 (图 1-2)。

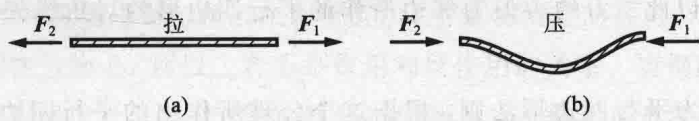


图 1-2 变形体受力示意

在两个力作用下处于平衡的物体称为二力构件，也称为二力杆件。图 1-3(a)为一棘轮机构，棘爪 AB 的 A 端用圆柱形销钉连接，B 端被卡在棘轮的槽中，棘爪若不计自重则为二力构件。根据二力平衡公理可以确定销钉给爪的力 F_A 和棘轮给爪的力 F_B 一定是等值、反向且共线的，如图 1-3(b)所示。由此可见，二力杆件所受二力的作用线一定是沿此二力作用点的连线。

公理 2(加减平衡力系公理) 在已知力系上加上或者减去任意一个平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用效果。

推论(力的可传性原理) 作用在刚体上的力，可以沿其作用线任意移动而不改变对刚体的作用。

在实践中，以等量的力在车后 A 点推和在车前 B 点拉，效果是一样的(图 1-4)。由力的可传性原理可以看出，对刚体来说，力的作用点已不再是决定其效应的要素之一，而是由作用线取代。因此，作用于刚体上的力的三要素是力的大小、方向和作用线位置。

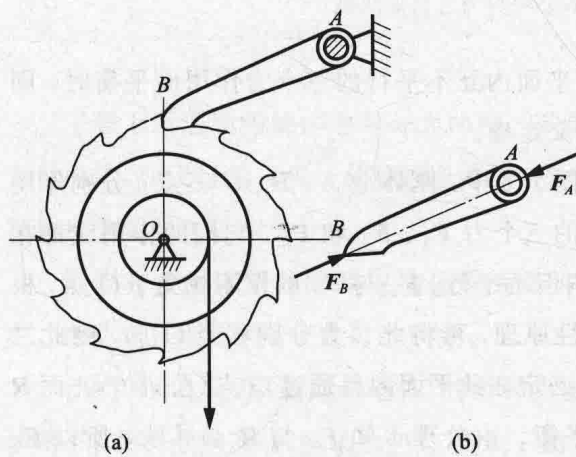


图 1-3 棘爪受力分析

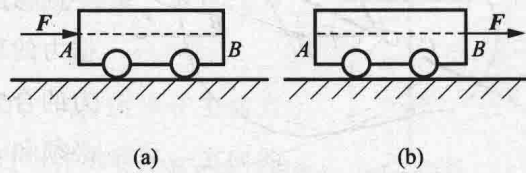


图 1-4 等效效果的作用力

应当指出，加上或减去任意一个平衡力系，或使力沿着作用线移动，不会改变力对物体的外效应，但会改变力对物体的内效应。所以，公理 2 及其推论都只适用于刚体而不适用于变形体。

公理 3(力的平行四边形公理) 作用于某一点的两个力的合力，其作用线必通过该点，



其大小和方向可由以此二力的力矢为邻边所作的平行四边形的对角线矢量表示,如图 1-5(a)所示。

这个公理也称为平行四边形法则,根据这个公理所作出的平行四边形称为力的平行四边形。

这种求合力的方法称为矢量加法,合力等于原来两力的矢量和(几何和),可用公式表示为

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

为了方便,在用矢量加法求合力时,可不必画出整个平行四边形,而是从 A 点作一个力与力 $\mathbf{F}_1$ 大小相等、方向相同的向量 $\overrightarrow{AB}$,过 B 点作一个与力 $\mathbf{F}_2$ 大小相等、方向相同的向量 $\overrightarrow{BC}$,则 $\overrightarrow{AC}$ 就是力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的合力 $\mathbf{R}$ 。这种求合力的方法称为力三角形法则,如图 1-5(b)所示。

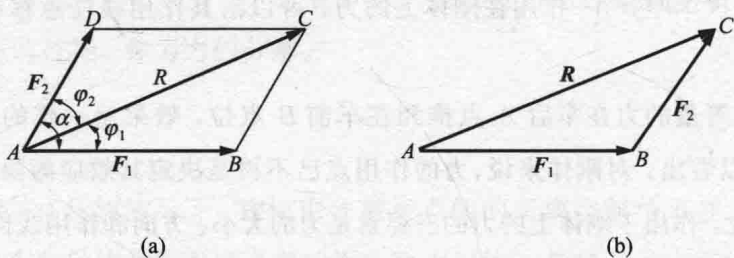


图 1-5 力的平行四边形公理与力三角形法则

推论(三力平衡汇交定理) 当刚体受到同平面内互不平行的三个力作用而平衡时,则此三力作用线必汇交于一点这就是三力平衡汇交定理。

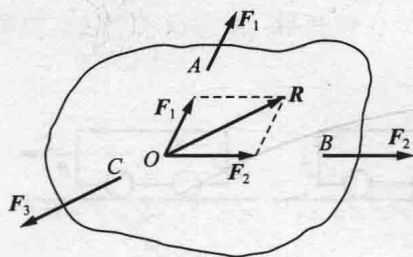


图 1-6 三力平衡汇交力系

证明 图 1-6 中,刚体上 A、B、C 三点,分别作用于互成平衡的三个力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}_3$,它们的作用线都在平面 ABC 内但不平行。 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 的作用线交于 O 点,根据力的可传性原理,可将此二力分别移至 O 点,则此二力的合力 $\mathbf{R}$ 必定在此平面内且通过 O 点(公理 3)。而 $\mathbf{R}$ 必须和 $\mathbf{F}_3$ 平衡。由公理 1 知 $\mathbf{F}_3$ 与 $\mathbf{R}$ 必共线,所以 $\mathbf{F}_3$ 的作用线亦必通过力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的交点,即三个力的作用线汇交于一点。

公理 4(作用与反作用公理) 一物体对另一物体有一作用力时,另一物体对此物体必有一反作用力。这两个力大小相等、方向相反,且分别作用在两个物体上。

这个公理说明力永远是成对出现的,物体间的作用总是相互的,有作用力就有反作用力,两者总是同时存在,又同时消失。

图 1-7(a)表示一重物用钢丝绳吊在天车上， G 为重物所受的重力， T 为钢绳对重物的拉力，它们都作用在重物上，所以二者不是作用与反作用的关系。当钢绳给重物以拉力 T 的同时，重物必给钢绳以反作用力 T' ，如图 1-7(b)所示。 T 作用在重物上， T' 作用在钢绳上， T 和 T' 是作用力与反作用力的关系。

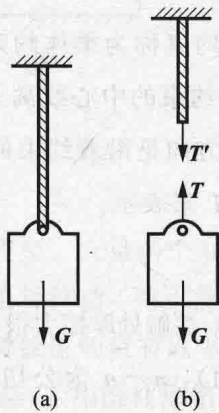


图 1-7 作用力与反作用力

1.3 约束与约束反力

工程上所遇到的物体通常分为两种：不受任何限制，可向一切方向自由运动的物体称为自由体，如飞行的飞机、发射的炮弹等；受到其他物体的限制，沿着某些方向不能运动的物体称为非自由体。

限制非自由体运动的其他物体称为该非自由体的约束。在图 1-8 中，灯是非自由体，绳子是灯的约束。

使物体产生运动(或运动趋势)的力称为主动力。非自由体在主动力作用下，将产生运动(或运动趋势)。此时，如果非自由体沿着某一方向的运动受到约束的限制，则该非自由体将给约束一定的作用力，同时约束也必将给非自由体一定的反作用力，这个反作用力称为约束反力。显然，主动力企图使物体运动，而约束反力则是限制物体(非自由体)的运动。在图 1-8 中，重力 G 是灯的主动力，而绳子给灯的力 T 则是灯的约束反力。

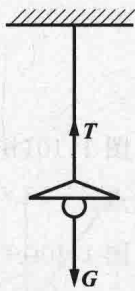


图 1-8 约束实例

因为约束反力是限制物体运动的力，所以它的作用点应在约束与被约束物体相互连接



或接触之处,它的方向应与约束所能限制的运动方向相反。这是确定约束反力方向和作用点位置的基本依据。

在工程实际中,约束的形式很多,现将常见的几种约束类型分述如下。

1. 柔体约束

由绳索、链条或胶带等所形成的约束称为柔体约束。它们都是非刚性体,只能受拉不能受压。它只能限制非自由体沿柔体约束的中心线离开约束的运动,而不能限制其他方向的运动。因此,柔体约束的约束反力方向是沿着约束的中心线而背离物体的,如图 1-9(a)、(c)所示。这种约束的约束反力常用 T 来表示。

2. 光滑面约束

当约束和非自由体成点、线、面接触,接触处摩擦力很小可以略去不计时称为光滑面约束。

图 1-10(a)为点接触(曲面和曲面); $n-n$ 为公切面,非自由圆球在主动力(图中未画出)作用下,约束只能限制它沿接触点公法线向约束体内运动,不能限制非自由体向其他任何方向运动,所以光滑面约束的约束反力通过接触点沿着公法线(或垂直于公切面)且指向物体。约束反力常用 N 来表示。

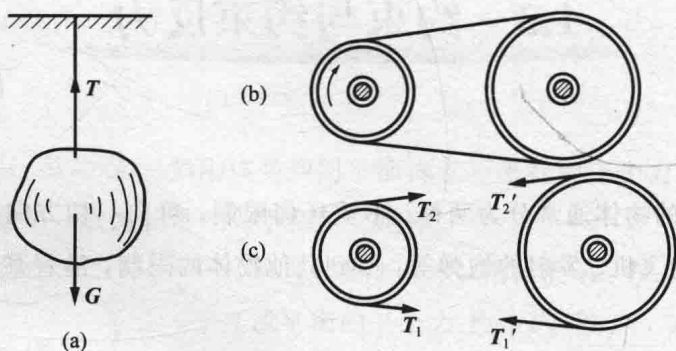


图 1-9 柔体约束

图 1-10(b)为线接触(柱面和平面),平面即为公切面。可将接触线段的形心 A 视为接触点。

图 1-10(c)为面接触(平面和平面),接触面即为公切面。可将接触面的形心 A 视为接触点。

图 1-11 中,除了杆自重垂直向下外,无论有多少个主动力(方向任意),根据光滑面约束的性质, A 、 B 、 C 处的约束反力只能是图中的 N_A 、 N_B 和 N_C 。不可根据感性判断画出错误的方向。

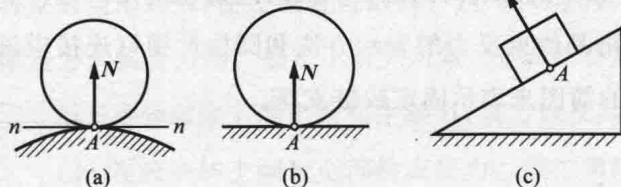


图 1-10 光滑面约束

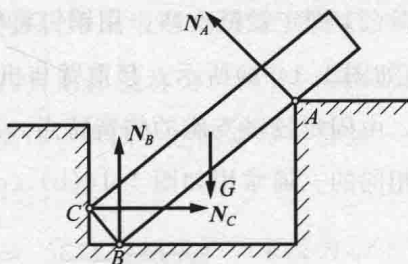


图 1-11 光滑面约束

3. 光滑铰链约束

光滑铰链是力学中一个抽象化的模型。凡是两个非自由体相互连接后，接触处的摩擦忽略不计，只能限制两个非自由体的相对移动，而不能限制它们相对转动的约束，都可以称为光滑铰链约束。工程中常用的光滑铰链约束有以下三种形式。

(1) 圆柱形销钉连接(或称中间铰链)。用圆柱形销钉 C 将两个物体 A 、 B 连接在一起，即圆柱形销钉连接，如图 1-12(a)、(b)所示。由其结构可知，只要销钉和钉孔是光滑的，它就具有光滑铰链约束的性质。由于圆柱形销钉常常用作连接两个构件而处在结构物的内部，因此也把它称为中间铰链。这种约束常用如图 1-12(c)所示简图来表示。

在图 1-13 中，如果略去微小摩擦，销钉与物体(非自由体)实际上是以两个光滑圆柱面相接触的。当物体受主动力作用后，形成线接触，若把 K 视为接触点，按照光滑面约束反力的特点，可知销钉给非自由体的约束反力应沿接触点 K 处的公法线，则必通过销钉中心(铰链中心)，但因主动力的方向不能预先确定，所以约束反力方向也不能预先确定。综上所述，可得出如下结论：圆柱形销钉连接的约束反力必通过铰链中心，方向不定。常以两正交分力 N_x 和 N_y 来表示。

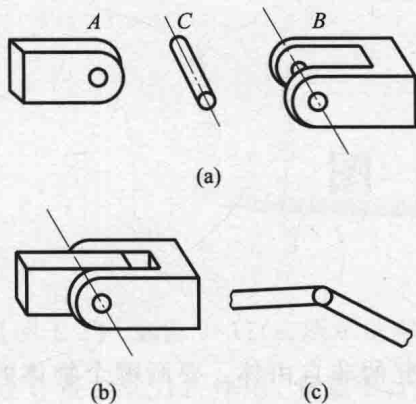


图 1-12 圆柱形销钉连接约束

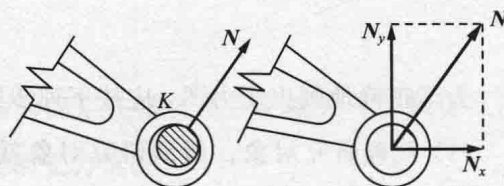


图 1-13 圆柱形销钉连接受力分析