



1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学(theoretical mechanics)是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动(mechanical motion)是指物体在空间的位置随时间而改变。机械运动是人们日常生活和生产实践中最常见、最简单的一种运动。

本课程的研究对象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,属于经典力学的范畴。至于速度接近于光速的物体的运动和基本粒子的运动,则需要利用相对论和量子力学的知识予以完善解释。

本课程的内容分为以下三篇:第1篇 静力学,主要研究受力物体的平衡规律,着重讨论物体的受力分析、力系简化和力系平衡条件;第2篇 运动学,从几何角度研究物体的运动规律(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;第3篇 动力学,从牛顿第二定律出发,应用动力学普遍定理和达朗贝尔原理研究物体的运动与其受力之间的关系。

2. 理论力学的研究方法

科学研究的过程就是认识客观世界的过程,理论力学的研究方法同样遵循辩证唯物主义认识论的“实践→理论→再实践”的循环发展过程。

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

人类在生活和生产实践中进行了长期的观察,积累了大量的经验,经过分析、综合和归纳,逐渐形成了如“力”、“力矩”和“运动”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(生卒年不详,墨翟简介见二维码)所著的《墨经》是一部最早记述有关力学理论的著作。

人们为了认识力学客观规律,除了对事物进行观察分析外,还主动地进行了很多实验,定量测定机械运动中各因素之间的关系,找出其内在规律。例如,伽利略(1564—1642年,伽利略简介见二维码)对自由落体和物体在斜面上的运动做了多次实验,从而推翻了亚里士多德(公元前384—前322年,亚里士多德简介见二维码)“物体下落速度和重量成正比”的错误学说,并首次提出了“加速度”的概念。此外,如动力学基本定律(牛顿三大定律)、静摩擦定律等,实际上都是建立在大量实验和观测基础之上的。观察和实验是形成理论的重要



墨翟简介



伽利略简介



亚里士多德简介



基础,同时也是力学研究的重要方法。

(2) 在实际力学分析中,需要专注主要因素,忽略次要因素,将研究物体抽象化为力学模型,并运用逻辑推理和数学演绎,建立严密而完整的理论体系。

客观事物往往比较具体和复杂,为找出其共同规律,必须抓住实质性的主要因素,舍弃次要因素,将研究物体抽象化为理想的力学模型。质点、质点系、理想约束、刚体等都是各种不同的力学模型。这种抽象化、理想化的方法,一方面简化了所研究的问题,另一方面又更深刻地反映出事物的本质。

在建立力学模型的基础上,从力学基本定律出发,利用数学演绎和逻辑推理的方法,得到力学普遍定理和公式。理论力学正是沿着这条途径建立起来的。

(3) 将上述理论体系用于实践,使之在认识世界和改造世界中不断得到验证和发展。

经典力学理论在现实生活和工程中被大量实践验证为正确,并且在不同领域实践中得到了发展,形成了许多分支,例如刚体力学、弹塑性力学、流体力学、生物力学等。

将工程实际中的研究对象抽象化为力学模型,基于力学普遍定理,建立其数学模型,一般包括控制方程(组)(微分方程(组))和定解条件,并进行解析求解和分析验证。这种研究思路和方法在本教材尤其是第3篇动力学中非常普遍,体现在大量的例题和习题中。这种利用理论力学分析和解决问题的方法是一种很好的学术训练,掌握理论力学研究问题的方法有利于培养学生的高级数学力学思维能力。

3. 理论力学的地位和作用

理论力学是现代工程技术的重要理论基础之一,它已被广泛应用于各种工程领域,如机械、航空航天、土木、水利水电、船舶、矿业、石油、交通、材料、电子电气、自动控制、生物医学等领域,解决了很多工程实际问题。同时理论力学也是学习相关后续课程(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、气体动力学、振动力学等)的基础,是沟通数理基础课和专业课的桥梁,在整个课程体系中具有“承上启下”的作用和“举足轻重”的重要地位。因此,理论力学是理工科各专业所需完整知识体系的一个重要组成部分,学好理论力学对于学生后续学习专业知识及以后从事科学研究工作具有深远的影响。

4. 理论力学的学习目的和方法

理论力学是一门理论性较强、与工程实际联系极为密切的技术基础课。通过该课程的学习,要理解和掌握理论力学的基本概念、基本原理和分析方法,培养学生正确分析问题和解决问题的能力,激发学生科技报国的家国情怀(我国部分近代力学家简介视频见二维码,以及钱学森简介见二维码)和使命担当,培养学生积极向上的人生观、价值观和世界观,为今后解决生产实践问题,从事相关工程技术工作打下坚实的基础。

考虑到理论力学课程学习难度较大,建议学生务必上课认真听讲和记笔记、课前做好预习、课后做好练习和复习;深入钻研基本理论、消化例题;独立完成足够数量的习题,通过反复练习巩固强化所学基础知识,熟练掌握基本理论和分析方法。

值得指出的是,理论力学的许多内容表面上好像与大学物理学中的力学重复,然而实际上它在研究方法和研究对象上都和大学物理有较大的差异。因此,特别提醒读者留意和审视理论力学与大学物理中力学部分的联系与差别。



我国部分
近代力学
家简介

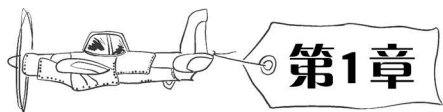


钱学森简介



第 1 篇 ●

静 力 学



静力学基础

静力学(statics)主要研究物体处于**平衡**(equilibrium)状态时,其上作用力所满足的条件。本章首先介绍刚体与力的概念及静力学公理,然后阐述工程中常见的约束和约束反力,最后介绍物体的受力分析和受力图。



刚体和力

1.1 刚体和力

1. 刚体

刚体(rigid body)是在外力作用下形状和尺寸都不改变的物体。物体在力的作用下,实际都会产生不同程度的变形。有时变形相对物体尺寸来说比较微小,且对研究的问题不起主要作用,可以略去不计,从而简化了问题。因此,刚体是抽象化的理想力学模型。例如,研究房屋结构受力问题时,柱和梁可视为刚体。本书主要研究力的运动效应(外效应)而非变形效应(内效应),通常可忽略其研究对象(质点、质点系等)的变形,因此可将其研究对象视为刚体处理。

2. 力

力是物体间相互的机械作用。按照其产生方式,大致可分为两类:一类是直接接触产生的,例如手抓球,手对球产生力的作用;另一类是“力场”对物体的作用,例如地球引力场对物体的引力。

力有三个要素:力的大小、方向和作用点。

可用矢量来表示力的三个要素,如图 1.1 所示。矢量 $\overrightarrow{AB}$ 的长度按一定的比例尺表示力的大小;矢量的方向表示力的方向;矢量的起点(或终点)表示力的作用点;矢量 $\overrightarrow{AB}$ 的指向(见图 1.1 中的虚线)表示力的作用线。力的矢量常用黑体字母 $\mathbf{F}$ 表示,而用普通字母 F 表示力的大小。力的单位为牛(N)或千牛(kN)。

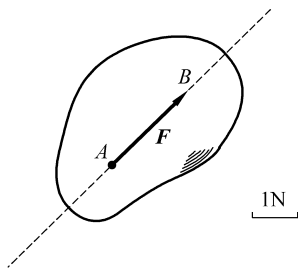


图 1.1



1.2 静力学公理

1. 力的平行四边形法则

作用在刚体上同一点的两个力可以合成为一个合力(resultant force)。合力的作用点不变,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(见图 1.2(a)),即

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

此公理亦可表述为三角形法则:平行移动其中一个力,使两个力首尾相接(见图 1.2(b)、(c))。合力 $\mathbf{F}_R$ 从起点 O 指向终点,与 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 形成三角形。

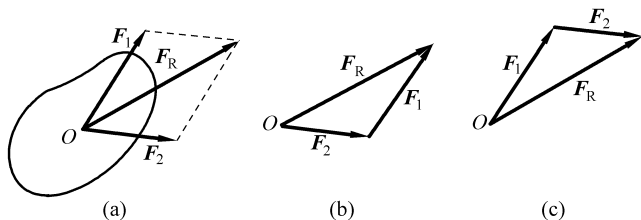


图 1.2

2. 二力平衡公理

作用在刚体上的两个力使刚体保持平衡的充要条件是这两个力的大小相等、方向相反,且在同一直线上(见图 1.3),即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1.2)$$

工程中经常遇到两个作用点上各作用一个力而平衡的构件,称为二力构件或二力杆(two-force member)。根据二力平衡公理,这两个力的作用线必然沿着两个作用点的连线,大小相等、方向相反,如图 1.4 中的 BC 杆。



二力构件

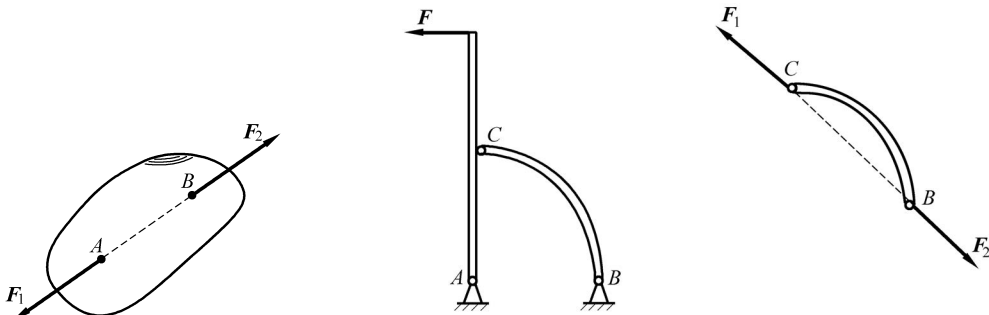


图 1.3

图 1.4

3. 加减平衡力系公理

在某一力系上加上或减去任意的平衡力系,得到的新力系并不改变对刚体的作用效应,因此可以等效替换原力系。



根据上述公理可以导出下列推理。

推理 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力,可以沿着其作用线移到刚体内任意一点,不改变力对刚体的作用效应。

证明: 设力 F 作用在刚体上的点 A (见图 1.5(a))。根据加减平衡力系公理,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 $F = F_1 = -F_2$ (见图 1.5(b))。由于力 F 和 F_2 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩下一个力 F_1 (见图 1.5(c))。于是,原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_1 均等效,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

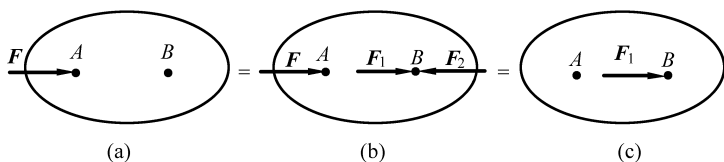


图 1.5

可见,对于刚体而言,力的作用线(而非力的作用点)是决定力的作用效应的要素。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。

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,则此三个力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明: 如图 1.6 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 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形规则得到合力 F_{12} ,则 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以 F_3 必定与 F_1 和 F_2 共面,且通过 F_1 与 F_2 的交点 O ,于是定理得证。相应地,作用三个力(不平行)处于平衡的构件称为三力构件(three-force member)。

4. 作用力与反作用力定律

作用力和反作用力总是同时存在,两个力的大小相等、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。如图 1.7 所示,用绳吊住的灯, F_T 和 F'_T 互为作用力和反作用力,用相同的字母表示,反作用力在字母上方加“'”。

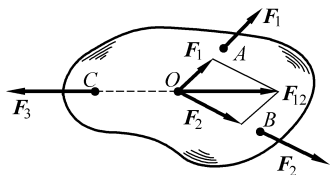


图 1.6

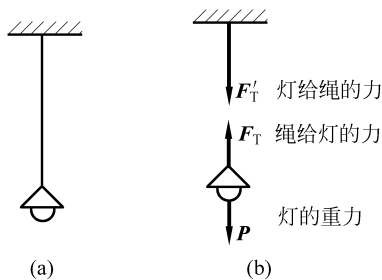


图 1.7



5. 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,如将此变形体视为刚体,则其平衡状态保持不变。

如图 1.8 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡状态,如将绳索刚化成刚体,其平衡状态保持不变。绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

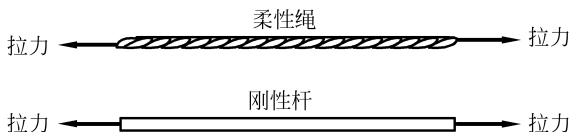


图 1.8

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。

1.3 约束和约束反力

位移不受限制的物体称为**自由体**(free body),例如空中自由飞行的飞机。物体在空间的位移受到一定限制,如机车只能在轨道上行驶,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**(constraint),例如轨道对于机车是约束。

约束阻碍着物体的位移,约束对物体的作用是通过力来实现的,这种力称为**约束反力**(constraint reaction),简称为反力。约束反力有三个特征:

- (1) 大小通常未知,由主动力决定;
- (2) 方向与物体被约束限制的位移方向相反;
- (3) 作用点在约束与物体的接触点。

下面介绍几种在工程中常遇到的约束类型及其约束反力的确定方法。

1. 光滑接触面约束

物体间相互触碰,接触面上的摩擦力忽略不计时,属于光滑接触面约束,例如物体放置在固定面上(见图 1.9(a)、(b)),两个齿轮相互啮合(见图 1.9(c))。

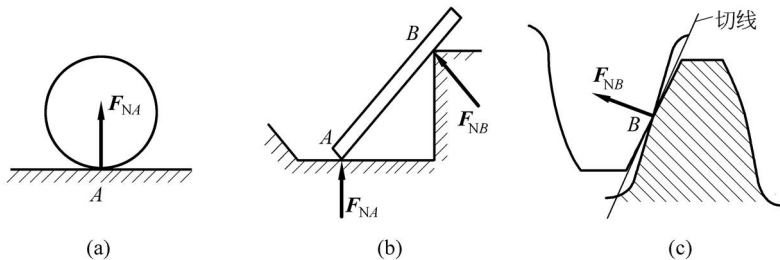


图 1.9

这类约束阻碍物体沿接触面公法线方向运动。因此,光滑接触面对物体的约束反力作



用在接触点,方向沿接触面公法线指向物体,通常用 F_N 表示。

2. 柔体约束

细绳吊住重物(见图 1.10(a)),由于柔软的绳索本身只能承受拉力(见图 1.10(b)),所以它给物体的约束反力只可能是拉力(见图 1.10(c))。因此,绳索对物体的约束反力作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 F_T 表示这类约束反力。

链条或运输皮带也都只能承受拉力。当它们绕在轮子上时,对轮子的约束反力沿轮缘的切线方向(见图 1.11)。

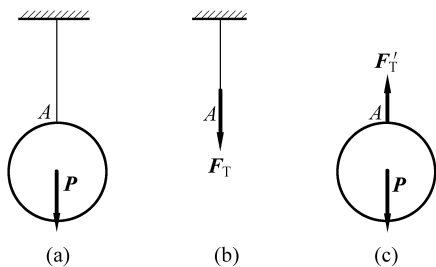


图 1.10

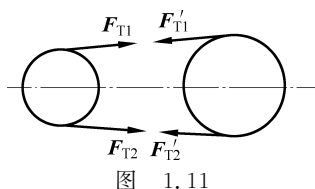


图 1.11

3. 光滑铰链约束

圆柱铰链(hinge)是由圆柱销钉(pin)将两个带相同孔洞的构件连接在一起而成,简称为铰链(见图 1.12(a))。圆柱铰链的简易画法如图 1.12(b)所示。销钉与孔洞之间可以认为是光滑接触面约束,销钉对构件的约束反力应沿接触点的公法线方向且通过孔洞中心。接触点的位置由主动力决定,通常不能预先确定,所以可以用一对正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示(见图 1.12(c)),指向通常假设沿坐标轴正向。

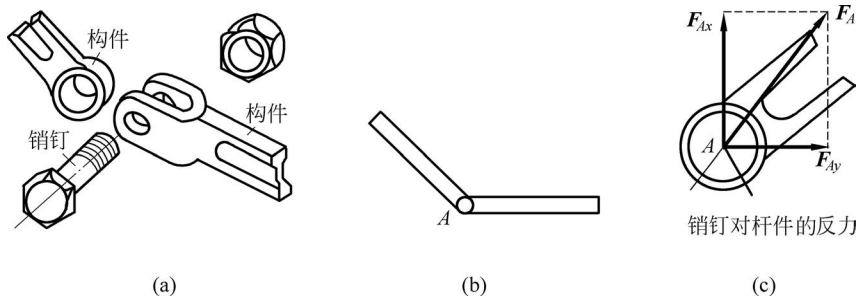


图 1.12

如果铰链连接中有一个构件固定在地面或机架上作为支座,则这种约束称为固定铰链支座(fixed hinge),简称为固定铰支(见图 1.13)。分析铰链处的约束反力时,通常把销钉固连在其中任意一个构件上。当销钉上有集中力作用时,可以把集中力放在其中任意一个构件上来分析。

图 1.14 所示为向心轴承,只允许转轴沿轴线方向微小移动,因此,对转轴的约束反力可以看作与固定铰链支座相同。

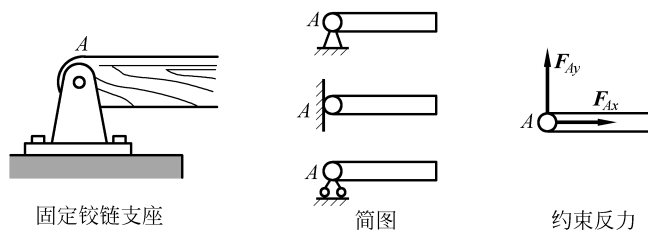


图 1.13

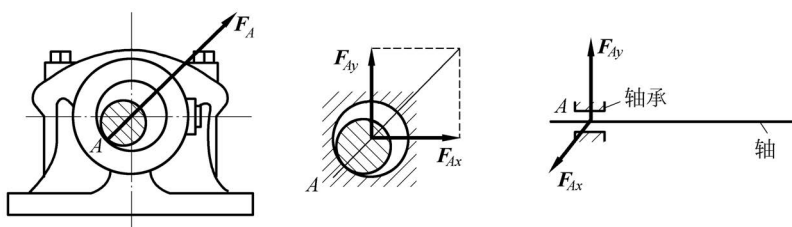


图 1.14

4. 滚动铰链支座

在铰链支座与光滑支承面之间用几个滚柱连接,就构成**滚动铰链支座**(roller)(见图 1.15),简称为滚动支座。滚动铰链支座可以沿支承面移动,允许结构跨度在温度等因素作用下自由伸缩。桥梁、屋架等结构中经常采用滚动支座。其约束性质类似于光滑接触面约束,其约束反力必沿支承面法线方向,但指向未定。

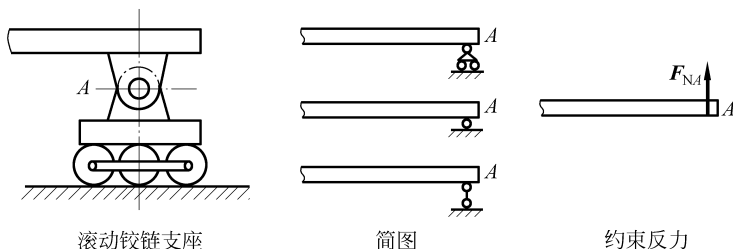


图 1.15

1.4 物体的受力和受力图

静力学研究刚体在力系作用下的平衡问题。首先要确定研究对象,分析物体受了几个力、每个力的作用点和作用线,即进行受力分析。为把研究对象的受力情况清晰地表示出来,要将研究对象和周围约束分开进行受力分析,并单独画出简图,这样的图称为**受力图**(free body diagram)。

例 1.1 图 1.16(a)所示简支梁 AB 的自重不计,试画出 AB 梁的受力图。



解 (1) 取 AB 梁为研究对象(即取分离体),并单独画出其简图。

(2) 分析主动力。 C 点作用有一主动力 F 。

(3) 分析约束反力。 AB 梁与周围物体接触点在 A 点和 B 点。 A 点为固定铰链,方向不能预先确定,反力用一对正交分力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 表示。 B 点为滚动铰链,约束反力 F_{NB} 垂直于支承面,如图 1.16(b)所示。受力图还可以如图 1.16(c)所示,由于 A 点作用一个力, AB 梁受到了三个力的作用,根据三力平衡汇交定理可以确定 A 点力的方向, F_A 的作用线必然通过 F 与 F_{NB} 的汇交点 D 。

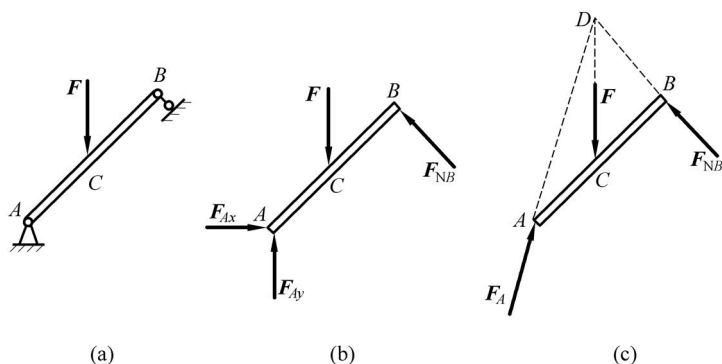


图 1.16

例 1.2 图 1.17(a)所示结构,不考虑构件自重,试画出整体及结构中各个构件的受力图。

解 (1) 取整体为研究对象,先分析主动力,在 H 点有一主动力 F ; 然后分析约束反力,整体与周围约束的接触点为 B 、 C 两点,均为光滑接触面约束,约束反力垂直于支承面(见图 1.17(b))指向受力物体。

(2) 构件的分析顺序通常从受力简单的构件开始。 DE 杆与周围物体接触点有 D 、 E

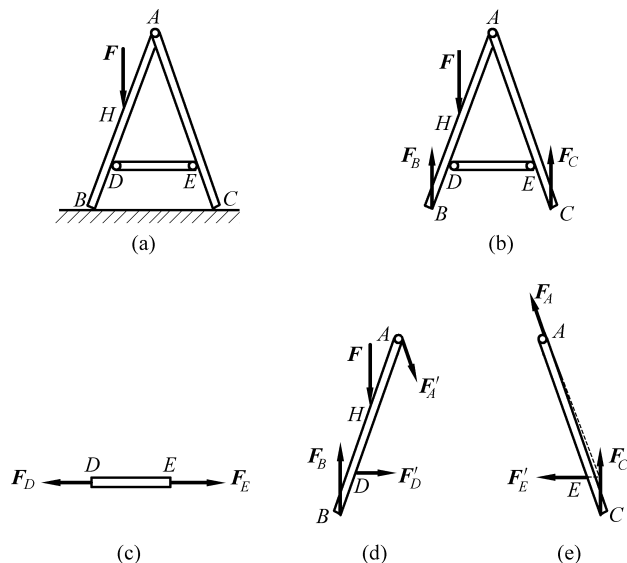


图 1.17