

21世纪应用型本科系列教材

理论力学

张克猛 韩省亮 主编



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

21世纪应用型本科系列教材

理论力学

张克猛 韩省亮 主编

徐永强 史艳莉



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西安 ·

内容提要

本书以课程任务为主线来组织内容,适当简化了理论推导过程,侧重于对学生力学问题的分析、判断、建模能力培养。全书共分为静力学、运动学、动力学三个部分,包括:静力学基础、作用于刚体上的一般力系简化、平面力系的平衡问题、空间力系的平衡问题、静力学专题——平面桁架·摩擦、运动学基础、刚体平面运动、点的合成运动、运动学专题——刚体绕平行轴转动合成、质点运动微分方程、质点系动量定理与动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理和动力学专题——机械振动基础等14章内容。其中少量带*章节,为非大纲要求内容,可供学有余力的读者课外选修或走出校门后结合工程实际进一步深造。

本书适用于应用型本科的机械、能动、材料、工业工程等专业60学时左右的理论力学教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/张克猛,韩省亮主编. —西安:西安交通大学出版社,2010.7

ISBN 978-7-5605-3543-2

I. ①理… II. ①张… III. ①理论力学-高等学校-教材 IV. ①O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第083321号

书 名 理论力学
主 编 张克猛 韩省亮
责任编辑 任振国 雷萧屹

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 15 字数 275千字
版次印次 2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3543-2/O·335
定 价 25.00元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdly@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

前 言

本书以课程任务为主线来组织内容、阐述理论与处理问题的方法和思路,适当简化理论推导过程,侧重于学生对力学问题的分析、判断、建模能力培养以及灵活选用力学理论解决工程实际的方法掌握。适用于应用型本科的机械、能源动力类的本科生,也可作为一般理工科院校相关专业中学时的理论力学教材。

作为一种尝试,本书将静力学的基本理论分放在力系合成、等效和平衡等章节中穿插阐述或直接引用,以突出理论的针对性和实用性;将刚体平面运动提前到点的合成运动之前讲述,一方面可保持对刚体运动分析的连贯性,同时还可由平动到转动,循序渐进地引出动参考系。在质点系的动量定理与动量矩定理一章,有意强调了该定理在研究流体动力学中不可替代的独特作用,同时也加强了这方面的举例与习题分量。

理论力学是为高等理工科开设的第一门力学课程,为了给学生以整体印象,本书适当穿插介绍了与其他力学课程间的过渡和联系。结合例题的求解过程,尽量以“思考”、“讨论”等形式,向读者引发提问,强调重点,拓宽内容,开阔思维。例题、习题的选取过程中,充分注意了分量、难度的适当性。少量标有*的内容,为非大纲要求,可供学有余力的读者课外选修或走出校门后结合工程实际进一步深造。

本书是在西安交通大学城市学院及机械系的大力支持下完成的,由张克猛、韩省亮、徐永强、史艳莉编写,张克猛、韩省亮任主编,张克猛统一定稿。编写过程中,还得到了西安交通大学城市学院机械系及西安交通大学力学中心同事们的无私帮助,西安交通大学出版社的任振国老师为本书的出版付出了辛勤的劳动,作者在此深表谢意!

由于急需一本适用于应用型本科教学的理论力学教科书,故作者在多年讲授不同类型理论力学课程的教案基础上,参考了以往主编的相关教科书,仓促编写了本教材。书中难免有不妥和疏忽之处,衷心希望广大读者提出批评和指正。

作 者

2010年2月

目 录

前言

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 静力学

第 1 章 静力学基础	(3)
1.1 力及其表示法	(3)
1.2 共点力系	(5)
1.3 刚体与变形体	(8)
1.4 作用于刚体上的简单力系等效及平衡	(9)
1.5 刚化原理	(16)
1.6 常见约束 约束反力	(16)
1.7 分析受力 受力图	(21)
习题	(27)
第 2 章 作用于刚体的力系等效简化	(32)
2.1 力矩	(32)
2.2 力的平移定理	(37)
2.3 空间任意力系向一点简化结果	(37)
* 2.4 空间任意力系合成结果的讨论	(39)
2.5 固定端约束	(41)
习题	(41)
第 3 章 平面力系的平衡问题	(44)
3.1 平面力系合成结果及平衡方程	(44)
3.2 刚体系统的平衡 静定与静不定问题	(48)
习题	(53)
第 4 章 空间力系的平衡问题	(58)
4.1 空间力系的平衡方程	(58)

4.2 空间平行力系的平衡方程	(58)
习题	(61)
* 第 5 章 静力学专题——平面桁架、摩擦	(64)
5.1 平面简单桁架的内力计算	(64)
5.2 考虑摩擦时的平衡问题	(67)
习题	(74)

第二篇 运动学

第 6 章 运动学基础	(77)
6.1 机构运动简图	(77)
6.2 点的运动	(80)
6.3 刚体的基本运动	(88)
习题	(92)
第 7 章 刚体的平面运动	(96)
7.1 刚体平面运动基本概念及运动方程	(96)
7.2 刚体平面运动分解为平动和转动	(98)
7.3 刚体平面运动的速度分析	(99)
* 7.4 刚体平面运动的加速度分析	(107)
习题	(109)
第 8 章 点的合成运动	(114)
8.1 合成运动中的基本概念	(114)
8.2 速度合成定理	(116)
8.3 牵连运动为平动时的加速度合成定理	(122)
8.4 科氏加速度概念	(124)
习题	(126)
* 第 9 章 运动学专题——刚体绕平行轴转动合成	(130)
习题	(133)

第三篇 动力学

第 10 章 质点运动微分方程	(135)
10.1 研究质点动力学的意义和方法	(135)
10.2 质点运动微分方程	(136)

习题	(139)
第 11 章 质点系动量定理与动量矩定理	(141)
11.1 质点系动量定理	(141)
11.2 质点系动量矩定理	(150)
* 11.3 刚体平面运动微分方程	(158)
习题	(161)
第 12 章 动能定理	(166)
12.1 动能	(166)
12.2 力的功	(168)
12.3 动能定理	(173)
12.4 动能定理的应用举例	(174)
12.5 功率方程 机械效率	(177)
12.6 动力学综合问题举例	(179)
习题	(183)
第 13 章 达朗贝尔原理	(187)
13.1 惯性力	(187)
13.2 达朗贝尔原理	(188)
13.3 刚体达朗贝尔原理	(192)
13.4 转子的静平衡与动平衡	(200)
习题	(202)
第 14 章 动力学专题——机械振动基础	(206)
14.1 引言	(206)
14.2 自由振动	(207)
14.3 阻尼对自由振动的影响	(213)
14.4 单自由度系统的受迫振动 共振	(217)
14.5 阻尼对受迫振动的影响	(220)
14.6 振动的消减和隔离	(221)
习题	(222)
习题答案	(224)
参考文献	(231)

绪 论

1. 理论力学的研究对象

理论力学研究物体机械运动的一般规律。

机械运动是指物体的位置随时间的变化,这种变化依据所选的参考物体的不同而不同。就一般的工程问题而言,通常取地球作为参考体。

平衡是机械运动的特殊情况,因此,理论力学也研究物体的平衡问题。

本书所研究的物体运动速度远小于光速,物体尺寸远大于基本粒子,即在低速、宏观的范畴内来研究物体的机械运动,因而属于经典力学的研究内容。实践表明,即使在现代,工程技术中遇到的大量力学问题都可应用经典力学的理论加以解决,因此学习经典力学有着极其重要的实际意义。关于物体速度接近光速的机械运动研究属于相对论力学,关于基本粒子运动的研究学科是量子力学,这些都要根据需要在专门的课程中进行讨论。

2. 理论力学的内容

理论力学的内容包括以下三部分:

静力学研究物体平衡的一般规律。

运动学研究物体运动的几何性质,而不涉及产生运动的原因。

动力学研究作用于物体上的力和物体运动之间的关系。

3. 学习理论力学的目的

对工科许多专业而言,理论力学既是系列后续课程的基础,又是学生接触工程实际的首门技术课程,因此是一门理论性较强的技术基础课。学习这门课程主要目的如下:

(1) 为学习诸如材料力学、结构力学、机械原理、机械设计等一系列后继课程打基础;为探索新的科学技术领域储备必要的力学知识。

(2) 初步学习处理工程实际问题的方法。

(3) 培养分析和解决问题的能力,特别是逻辑思维能力、抽象能力、自学能力、表达能力以及数学计算能力等。

4. 处理力学问题的一般方法

解决好一个力学问题,通常包含以下四个方面的工作:

(1) 围绕所要解决的问题,考察各相关因素的影响。在充分考虑各主要影响因素的前提下,忽略一些次要因素,建立合理的力学模型(又称物理模型)。

(2) 针对力学模型,运用相关的力学理论和数学工具,建立或推导所研究问题的基本方程,最后形成定解方程。又称为建立数学模型。

(3) 方程求解以及研究解的性质。简单情况下可以人工求解析解;对于复杂的问题则需借助计算机求数值解。

(4) 通过实验验证力学、数学模型的合理性,检测所得结果的可信度。必要时对模型进行修正。

对于具有创新意义的研究,上述各项工作可能要反复进行才能得出满意的成果。

第一篇 静力学

静力学的任务是研究力系的简化与平衡条件。力系指作用在研究物体上的一群力；力系的简化是指在保持对研究物体的作用不变的条件下，用最简单的力系代替给定的力系；当物体处于平衡时，作用其上的力系所应满足的条件称为力系的平衡条件。显然，力系的简化是寻找力系平衡条件的简捷途径，但力系简化的应用绝不仅限于此，在动力学中，当研究在给定力系作用下的物体如何运动时，力系的简化同样也有重要的应用。力系平衡条件可用于计算处于平衡状态下的零件、机构或结构在载荷作用下的内力或所受的支承力，以便校核强度或为设计提供依据，因而在工程上应用得十分广泛。

第 1 章 静力学基础

本章讨论力学模型中所涉及到的刚体的概念、常见约束的性质以及物体的受力分析。静力学公理是人们在生活与生产中经过长期观察、实践和实验所总结出的几条结论，并经过严格的科学抽象和表述，其正确性已被公认。其中有些在物理课中已经提供，而另一些则在本章阐述。这些公理为建立静力学理论提供了物理依据，在建立力学模型中具有重要的指导意义。

1.1 力及其表示法

1.1.1 力的概念和作用反作用公理

力的概念简述如下：力是物体之间相互的机械作用，它的效果是改变物体的运动状态（外效应）并使物体变形（内效应）。改变物体的运动状态，在静力学中可理解为使静止的物体开始运动。在动力学中则依据牛顿定律对不同的力学模型和不

同的运动形式给出更明确的表述。力使物体产生变形,将在材料力学等课程中进行研究。力的作用效果取决于力的三要素:大小,方向,作用点。这意味着任何一个要素的改变或误判,都将导致该力的效果的变化。在国际单位制(SI)中力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。

力的三要素说明,在几何上力可以用一段矢线(带有箭头的有向线段)来表示(图 1-1);线段长度依比例表示力的大小,矢线方向即表示力的方向,矢线的起点(或终点)则表示力作用点的位置。此外,还需标上代表该力的矢量名称^①: F 表示力的大小和方向,下标 A 表示力的作用点。多数情况下 F_A 代表作用于 A 点的一个力,在运算表达式中也可视为一般的数学矢量。力的几何表示法主要用于物体的受力分析(绘制受力图)。

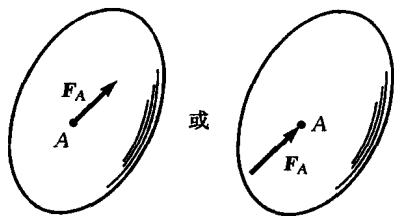


图 1-1

力是物体之间相互的机械作用,并服从于牛顿第三定律。本课程中称之为作用反作用公理。

作用反作用公理 当甲物体对乙物体有作用力的同时,甲物体也受到来自乙物体的反作用力;作用力与反作用力等值、反向、共线。

在对物体进行受力分析时必须遵循这一公理。否则会给解决问题造成致命性的错误。

1.1.2 力的投影和分析表示法

数学中已给出了矢量在给定轴或平面上的投影的定义。据此,在建立直角坐标系后,即可计算力在坐标轴上的投影。

如图 1-2(a)所示,设力 F 与 x 、 y 、 z 轴正向的夹角分别为 α 、 β 、 γ ,则力在坐标轴上的投影为:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \cos \beta \\ F_z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

称为一次(直接)投影法。

如图 1-2(b)所示,设包含力 F 和 z 轴的平面与 x 轴所夹的锐角为 φ ,力 F 与 z 轴所夹的锐角为 γ ,则先将力 F 投影到 Oxy 平面上,得投影力 F_{xy} ,然后再将 F_{xy} 投影到 x 、 y 轴上。故力在 x 、 y 、 z 轴上的投影为:

^① 矢量名称在印刷出版物中的形式为黑体字符,例如 F_A 。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \sin \gamma \cos \varphi \\ F_y &= F \sin \gamma \sin \varphi \\ F_z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

称为二次(间接)投影法。

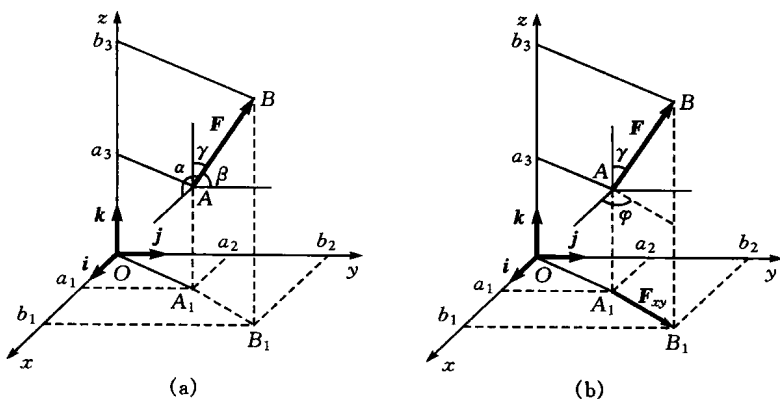


图 1-2

力在坐标轴上的投影为代数量。在具体计算力的投影时可以先依据力与坐标轴正向所成的夹角确定投影的正负(锐角为正、钝角为负);再利用给定的几何数据计算投影的大小。

如图 1-2 所示,设 x 、 y 、 z 轴的单位矢量分别为 i 、 j 、 k ,已知力的投影后,就可以用代数方法(又称为分析方法)表达力

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k} \quad (1-3)$$

称为力的分析表达式。

力的分析表示法只描述了力的方向及大小,力的作用点仍需通过受力图得以反映。

1.2 共点力系

各力作用于物体的同一点的力系称为共点力系。

若两个力系分别作用于同一物体的效果相同,则称此两力系为等效力系。如果一个力和一个力系等效,则称此力为该力系的合力。

1.2.1 共点二力的合成

作用于物体上一点的二力合成理论即物理中通过实验归纳出的力的平行四边

形法则,本课程中称之为力的平行四边形公理。

力的平行四边形公理 作用在物体上一点 A 的两个力 F_1 和 F_2 可以合成一个合力;该合力仍作用于 A 点,大小、方向由以 F_1 和 F_2 为邻边所作平行四边形的对角线表示(图 1-3)。

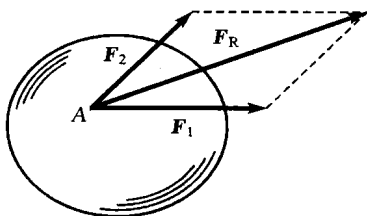


图 1-3

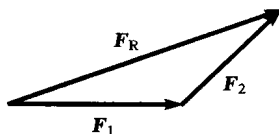


图 1-4

此公理是讨论力系合成简化的物理基础。对它的全面理解包括:适用条件,合成结果,合力的大小、方向及作用点。从数学角度看,合力的大小和方向即 F_1 、 F_2 的矢量和

$$F_R = F_1 + F_2$$

若先画出第一个矢量,再把第二个矢量的起点置于第一个矢量的终点,则从第一矢量的起点指向第二个矢量终点的矢量即表示合力的大小和方向(图 1-4),此方法称为力的三角形方法。

反之,也可以把一个力按平行四边形法则进行分解,并用来表示待求的未知约束力或计算力的投影、力矩、功等。但不提倡直接用力的分解去求解平衡问题。

1.2.2 共点力系的合成

给定作用于物体上的共点力系($F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$)(图 1-5)。可以运用力的平行四边形公理求得 F_1 、 F_2 的合力,再求此合力与 F_3 的合力,依此类推。可得出以下结论:一般情况下一个共点力系可合成一个合力;此合力的作用点即力系中各力的共同作用点,合力的大小、方向等于力系中各力的矢量和,即

$$F_R = \sum F_i \quad (1-4)$$

力矢量求和可用几何方法完成,如图 1-6 所示,先作出代表 F_1 的矢量 $\overrightarrow{AA_1}$,再以 A_1 为起点作代表 F_2 的矢量 $\overrightarrow{A_1A_2}$,以此类推得到一组折线 $A_1A_2 \dots A_n$,称为力多边形,该方法称为力多边形方法。矢量 $\overrightarrow{AA_n}$ 称为力多边形的封闭边,即代表了力系合力的大小及方向。

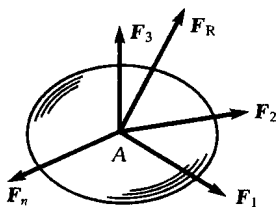


图 1-5

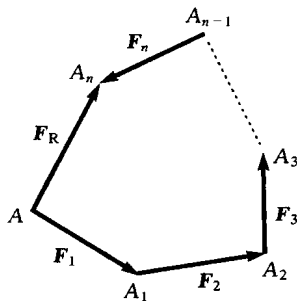


图 1-6

矢量多边形是数学中矢量的一种运算。当力多边形为特殊的三角形、矩形、正方形、正多边形时,用几何法可方便地求得力系的合力大小和方向。若变动求和次序,力多边形的形状也随之改变,但不影响最终的合成结果。

建立直角坐标系 $Oxyz$,将式(1-4)投影到 x 、 y 、 z 轴则得到

$$\left. \begin{aligned} F_{Rx} &= \sum F_x \\ F_{Ry} &= \sum F_y \\ F_{Rz} &= \sum F_z \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

即共点力系合力在某一轴上的投影等于力系中各力在同一轴上投影的代数和。式中为了简化,略去了下标 i 。

1.2.3 共点力系的平衡条件

若一个力系施加在物体上不改变物体原有的运动状态,则称此力系为平衡力系。共点力系平衡的充分必要条件是合力为零,即

$$\sum F_i = 0 \quad (1-6)$$

以 4 个力为例,在几何方法中表现为力多边形的终点 A_4 与起点 A 重合,即共点力系平衡的几何条件是力多边形自行封闭(图 1-7)。

把式(1-6)投影到 x 、 y 、 z 轴,即可得到共点力系平衡的分析条件

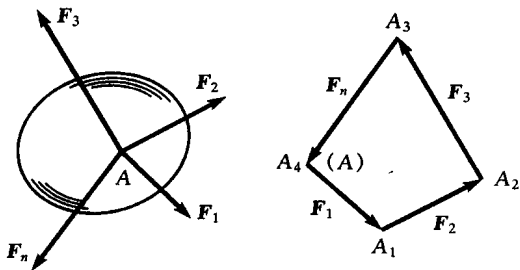


图 1-7

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum F_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

即共点力系平衡的分析条件是各力在 x, y, z 轴上投影的代数和分别等于零。

1.3 刚体与变形体

物体受力后总会发生变形,有些元件的变形还相当显著,例如图 1-8 所示的弹簧受力后的平衡位置(图 b)与初始位置(图 a)相比,长度及方位都有了不可忽视的改变。在撑杆跳高运动员起跳后的过程中,撑杆也会呈现明显的弯曲变形,其变形的形式及描述方法都比弹簧要复杂得多。力学中把上述情况归结为大变形(或有限变形)问题。对大变形问题的研究涉及的力学知识面和数学工具面较宽,数值计算工作量也较大。

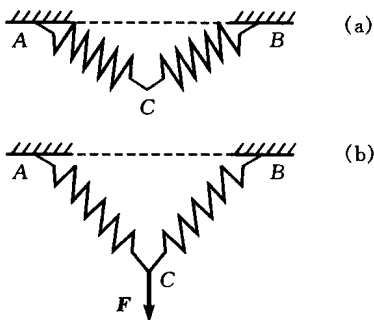


图 1-8

然而,在大多数工程问题中,物体受力后的变形都相当小。例如一根受拉的钢杆,当载荷控制在允许范围内时,杆长的变化不超过原长的千分之几;一般的公路桥梁,在自重及外载荷作用下铅垂方向的位移不超过桥梁跨度的 $\frac{1}{700} \sim \frac{1}{500}$ 。力学中把这类情况归入小变形(或无限小变形)问题。针对此类问题,可以将研究工作分为两个阶段:第一阶段,忽略变形对物体形状和尺寸的影响,研究物体整体的平衡和运动,求得作用于物体的未知外力,这样就引出了刚体这一力学模型;第二阶段,研究物体的变形和内力分布规律,分别在后续的材料力学等课程中进行研究。

所谓刚体,是指受力作用后不会发生变形的物体。或者换个提法,是指受力作用后,物体内部任意两点间距离不会改变的物体。忽略变形这一次要因素是一种简化,正是这种简化使我们找到了力系等效的方法,并进一步得到描述平衡问题的基本方程。这些基本方程在本课程中用来求解刚体的平衡问题,在研究变形体平衡的后续课程中仍将得到引用。

变形体平衡与刚体平衡两者之间既存在共性,也存在着不容忽视的差别。随后对此将有详述。

1.4 作用于刚体上的简单力系等效及平衡

1.4.1 作用于刚体上的力的基本性质

作用于刚体上的力,除遵循上面所述的作用反作用公理及平行四边形公理两条性质外,还具有以下性质。

二力平衡公理 刚体在两个力作用下平衡的充分必要条件是此两力等值、反向、共线(图1-9)。该公理又称为二力平衡条件。

结论对于刚体的正确性不难理解,且容易由实验证实。

由此可知,等值、反向、共线的一对力组成了最基本的平衡力系,在分析受力及力系等效简化中会经常用到。

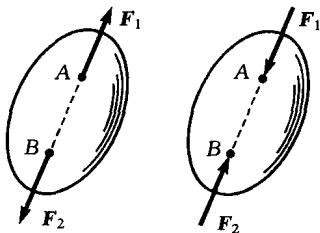


图 1-9

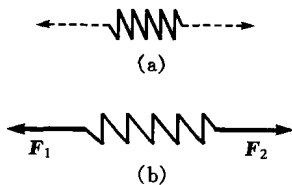


图 1-10

现在一根处于自然状态的静止弹簧上施加一对等值、反向、共线的力(图1-10(a))。经验告诉我们,弹簧将不再保持平衡,并开始变形,直到变形达到一定程度才有可能在新的位置上实现平衡(图b)。此时如果同时再缓慢改变两个力的大小,虽仍保持两力相等,但弹簧在此位置将不再保持平衡。由此可知,如果弹簧在两力作用下已处于平衡,则此两力一定等值、反向、共线。反之,如果只知道两力等值、反向、共线,则弹簧未必能处于平衡。因此,二力平衡条件对刚体平衡是充分必要条件;对变形体平衡只是必要条件,未必充分。

加减平衡力系公理 在刚体上添加或取去平衡力系不改变原力系对刚体的作用效果。或者说所形成的新力系与原力系等效。

该公理给出了判断刚体上力系等效的具体方法。但在静止的变形体上添加平衡力系后,变形体会出现新的变形,在当前位置上也不再保持静止。因此,不能按此思路去研究变形体上力系的等效。

力的可传性原理

作用在刚体上的力,可沿其作用线在刚体内(或在刚体延拓部分)任意移动,而不改变此力对刚体的作用。

读者不难通过添加平衡力系(F' , F''),再去掉平衡力系(F'' , F)的途径自行证明(图 1-11)。由此可知,决定力对刚体作用的要素是力的大小、方向及作用线位置。

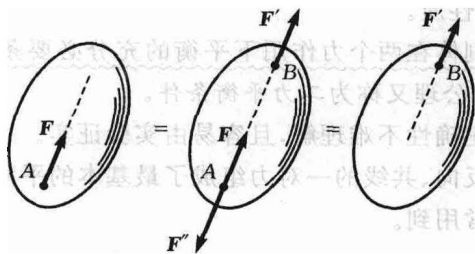


图 1-11

三力平衡汇交定理

若刚体在三个力作用下处于平衡,且其中两个力的作用线已知相交于一点,则此三力共面,且作用线汇交于一点(图 1-12)。

读者不难依据力的可传性原理、平行四边形公理及二力平衡公理自行证明。此定理主要用于分析物体受力,特别需要注意定理的完整表述。如果单独抽出“刚体在三力作用下处于平衡”与“此三力汇交于一点”两个事件,则两者之间并不存在确定的因果关系;既非充分条件,也非必要条件。

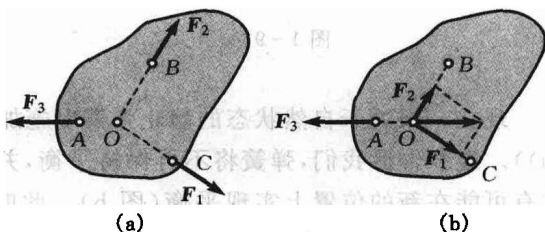


图 1-12

1.4.2 刚体上基本力系的等效

本书中将作用于刚体的汇交力系和力偶系列为基本力系。本节所得的结论在讨论复杂力系等效简化中将被直接应用。

1. 刚体上汇交力系的合成和平衡

各力作用线交于同一点的力系,称为汇交力系。

利用刚体上力的可传性,可以把作用于刚体上的汇交力系($F_1, F_2, \dots, F_n$)等