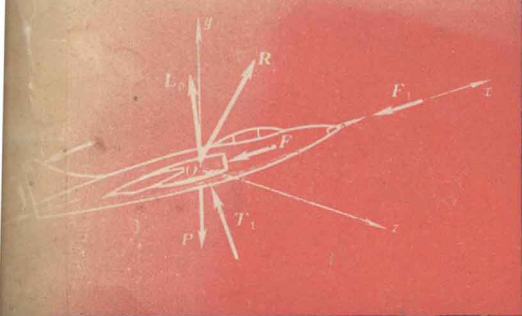


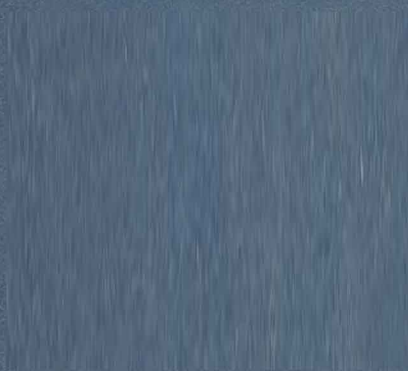
高等学校教材



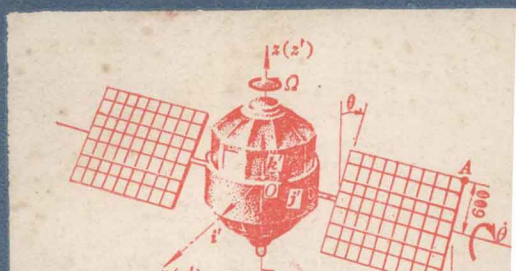
# 理论力学

## 上册

清华大学理论力学教研组 罗远祥 官飞 关冀华 李苹



高等教育出版社





## 内 容 提 要

本书是第三版，是在一九六二年第二版的基础上，参考一九八〇年五月在南京审订的《理论力学教学大纲》(草案)(120学时)修订而成的。本版保留了第二版的主要内容和教学体系，但基本内容的深广度有所增加，以便于在教学中贯彻“因材施教”的原则。修订时考虑了当前理论力学的教学情况和今后发展的需要。

本版分上、中、下三册出版。上、中册为基本部分，其中有“\*”号的节为加深内容，可根据需要选讲。下册为专题部分，可根据专业需要选学其中一部分，或完全不用。

本册内容为静力学和运动学。

本书适用于高等工业学校机械、土建、水利、航空等类专业，也可供其它专业和有关工程技术人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日，  
上级同意恢复“高等教育出版社”。本书今后改用高等  
教育出版社名义继续印行。

高等学校教材

## 理 论 力 学

上 册

(第三版)

清华大学理论力学教研组

罗远祥 官 飞 关翼华 李 苹 等编

\*

高 等 教 育 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

兰州部队八一印刷厂印装

\*

开本850×1168 1/32 印张13 字数310,000

1981年6月第3版 1984年4月第4次印刷

印数 39,801—53,400

书号 15010·0337 定价 1.30 元

## 序

本书是第三版，是在一九六二年第二版的基础上，参考一九八〇年五月在南京审订的《理论力学教学大纲》(草案)(120学时)修订而成的，适用于高等工业学校机械、土建、水利、航空等类专业。本版保留了第二版的主要内容和教学体系，但基本内容的深广度有所增加，以便于在教学中贯彻“因材施教”的原则。考虑到当前理论力学的教学情况和今后发展的需要，本版主要在下列几个方面作了修改：

(一) 根据当前学生入学的水平、大学普通物理和高等数学的教学情况，本版适当地提高了理论力学教学的起点，减少了不必要的重复，但仍然注意有一定的复习和衔接。例如在汇交力系、点的运动学和质点动力学等部分都作了较大的精简和改动。

(二) 在阐明力学的基本概念和基本理论的基础上，本版强调力学的分析方法，例如物体的受力和运动分析的方法，正确地画出受力图，建立力学问题的数学模型等。根据我们的教学经验，理论力学的理论不难懂，但如何应用理论去分析具体问题则比较难，关键在于是否深入理解力学的概念和熟练掌握力学的分析方法。为了帮助学生克服这种困难，在本书的例题中注意阐明解题的思路和分析方法，并在主要章节后写有阶段性小结。

(三) 为了适应力学在近代工程技术中应用的需要，我们删减了旧版中的一些内容，增写了新的章节，此外还加强了矢量分析的方法和能量法。例如删减了图解静力学和动、定瞬时中心轨迹等；桁架由原来的一章减为一节；加强了刚体动力学、拉格朗日第二类方程和哈密尔顿原理以及有关的应用问题等。此外，全部改用了国际单位制。

(四) 为了便于教师选用和学生自学, 本版由浅入深地编排了相当数量的例题和习题, 较难的题目附有“\*”号。习题均附有答案, 编印在书后以便自学校核之用。

(五) 为了适应不同学时教学和不同程度学生的需要, 本版分上、中、下三册出版。上、中册为基本部分, 其中有“\*”号的节为加深内容, 可根据需要选讲。下册为专题部分, 可根据专业需要选学其中一部分, 或完全不用。

本书第二版由清华大学基础部理论力学教研组集体编写。这次第三版的修订大纲也多次经过教研组集体审议, 重点章节的修订方案也经过集体讨论。教研组的许多同志参加了本版的修订工作并做习题解答。参加本版修订工作的主要有:

主编: 罗远祥。

执笔: 罗远祥、官 飞、关冀华、李 苹。

习题选编: 官 飞、刘毅朴、时学黄、刘荣暄、陈景宝等。

制图: 王 正、丁占鳌、关冀华。

本书由西北工业大学吕茂烈、白振林和哈尔滨工业大学王铎、洪敏谦、王宏钰等同志主审, 参加审稿的还有北京航空学院、天津大学、北京钢铁学院等校的同志。此外, 华东水利学院和南京工学院等校的同志参加了本书上册的审稿工作。许多兄弟院校理论力学教研组的同志还提出了不少宝贵的书面审稿意见。编者对他们一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限, 本书中一定还有不少缺点和错误, 我们诚恳希望广大读者, 特别是使用本书作为教材的师生多多提出批评和指正。

编 者

一九八〇年十二月于北京清华大学

# 目 录

## 第一篇 静力学

### 引 言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| <b>第一章 静力学的基本概念</b> .....      | 3  |
| § 1-1 力的基本性质.....              | 3  |
| § 1-2 作用在刚体上力系的平衡条件和硬化原理.....  | 8  |
| § 1-3 约束和约束力.....              | 11 |
| <b>第二章 汇交力系和静力分析方法初步</b> ..... | 19 |
| § 2-1 汇交力系的简化.....             | 19 |
| § 2-2 汇交力系的平衡.....             | 24 |
| § 2-3 静力分析方法初步.....            | 25 |
| § 2-4 分析桁架内力的节点法.....          | 36 |
| <b>第三章 力偶理论</b> .....          | 41 |
| § 3-1 力对点之矩.....               | 41 |
| § 3-2 力偶的性质.....               | 46 |
| § 3-3 力偶系的简化和平衡.....           | 52 |
| <b>第四章 平面力系</b> .....          | 57 |
| § 4-1 力向一点平移.....              | 58 |
| § 4-2 平面力系向一点的简化.....          | 60 |
| § 4-3 固定端约束的约束力和约束力偶.....      | 62 |
| § 4-4 平面力系简化的最后结果.....         | 64 |
| § 4-5 平面力系的平衡方程和应用.....        | 68 |
| § 4-6 静定和静不定问题.....            | 75 |
| § 4-7 刚体系统的平衡.....             | 78 |
| <b>第五章 考虑摩擦的平衡问题</b> .....     | 87 |
| § 5-1 滑动摩擦力和摩擦定律.....          | 87 |

|            |                     |     |
|------------|---------------------|-----|
| § 5-2      | 摩擦角和自锁现象            | 90  |
| § 5-3      | 考虑滑动摩擦的平衡问题         | 94  |
| § 5-4      | 滚动摩擦阻               | 102 |
| <b>第六章</b> | <b>空间力系</b>         | 107 |
| § 6-1      | 力对轴之矩               | 107 |
| § 6-2      | 力对点之矩与力对通过该点的轴之矩的关系 | 109 |
| § 6-3      | 空间力系向一点的简化          | 112 |
| § 6-4      | 空间力系简化的最后结果         | 115 |
| § 6-5      | 空间力系的平衡方程和应用        | 118 |
| <b>第七章</b> | <b>重 心</b>          | 126 |
| § 7-1      | 平行力系中心              | 126 |
| § 7-2      | 重心的坐标公式             | 131 |
| § 7-3      | 简单形体的重心             | 134 |
| § 7-4      | 复合形体的重心             | 138 |
|            | <b>静力学习题</b>        | 145 |

## 第二篇 运动学

### 引 言

|            |                  |     |
|------------|------------------|-----|
| <b>第八章</b> | <b>点的运动学</b>     | 208 |
| § 8-1      | 决定点的运动的方法        | 208 |
| § 8-2      | 点的速度和加速度         | 214 |
| § 8-3      | 求点的速度和加速度的直角坐标法  | 216 |
| § 8-4      | 求点的速度和加速度的自然法    | 222 |
| * § 8-5    | 求点的速度和加速度的极坐标法   | 230 |
| <b>第九章</b> | <b>刚体的基本运动</b>   | 237 |
| § 9-1      | 刚体的平动            | 237 |
| § 9-2      | 刚体绕固定轴的转动        | 239 |
| <b>第十章</b> | <b>点的复合运动</b>    | 250 |
| § 10-1     | 点的绝对运动和相对运动·牵连运动 | 250 |
| § 10-2     | 速度合成定理           | 255 |
| § 10-3     | 牵连运动为平动时的加速度合成定理 | 262 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| § 10-4 牵连运动为定轴转动时的加速度合成定理·····  | 265 |
| <b>第十一章 刚体的平面运动</b> ·····       | 279 |
| § 11-1 刚体的平面运动方程·····           | 280 |
| § 11-2 平面运动分解为平动和转动·····        | 282 |
| § 11-3 平面图形上各点速度的分析·····        | 286 |
| § 11-4 平面图形上各点加速度的分析·····       | 298 |
| § 11-5 刚体绕平行轴转动的合成·····         | 309 |
| <b>第十二章 刚体绕定点的运动</b> ·····      | 317 |
| § 12-1 刚体绕定点运动的运动方程·····        | 318 |
| § 12-2 刚体绕定点运动的位移定理·瞬时转动轴·····  | 320 |
| § 12-3 绕定点运动刚体的角速度与角加速度·····    | 323 |
| § 12-4 绕定点运动刚体上任一点的速度和加速度·····  | 326 |
| § 12-5 自由刚体的一般运动·····           | 335 |
| <b>运动学习题</b> ·····              | 340 |
| <b>附录 简单几何形体的面积、体积和形心</b> ····· | 385 |
| <b>习题答案</b> ·····               | 388 |
| <b>索 引</b> ·····                | 403 |

# 第一篇 静 力 学

## 引 言

静力学研究物体在力系的作用下处于平衡的规律。平衡是物体机械运动的一种特殊状态。若物体相对于惯性参考系<sup>①</sup>静止或作等速直线运动,则称此物体处于平衡。对工程技术中的多数问题来说,可以把固结在地球上的参考系当作惯性参考系来研究物体相对于地球的平衡问题,所得的结果能较好地与实际情形相符合。

静力学中所采用的力学模型是刚体,故静力学又称为刚体静力学。所谓刚体是指在力的作用下不变形的物体。实际上,任何物体受力后或多或少都会发生变形,但是许多物体(例如工程结构的构件或机器的零件等)的变形十分微小,对静力学所研究的问题来说,略去变形不会对研究的结果发生显著的影响,同时能大大减少问题的复杂程度。因此,这时我们把实际的物体抽象化为刚体,不仅是合理的,而且是必要的。

在静力学中我们将着重研究以下两个基本问题:

1. 作用在刚体上的力系的等效代替和力系的简化。

力系是指作用在刚体上的一组力或一群力。为了求解问题的需要,我们根据力的基本性质对力系中诸力加以分解或合成,在保持力系对刚体作用效应不变的条件下,用另一力系来代替原力系,

---

① 由普通物理学已知,凡是对牛顿运动定律成立的参考系称为惯性参考系。通常将坐标原点放在太阳系的质量中心,三个坐标轴分别指向恒星的坐标系作为惯性参考系,在这坐标系中进行力学实验与牛顿运动定律密切符合。

这称为力系的等效代替。如用最简单的力系等效地代替较复杂的力系，这就是力系的简化。通过力系简化可以知道力系对刚体作用的总效应。

## 2. 刚体在各种力系作用下的平衡条件及其应用。

根据力系中诸力作用线在空间分布的不同可以把力系分成不同的种类。在一般情形下，刚体在任意一种力系作用下不一定处于平衡状态。若作用在刚体上的力系不平衡，则刚体的运动或平衡状态就要发生变化，这是动力学中所要研究的问题。在特殊情形下，若力系满足某些特定的条件，则刚体将处于平衡，这种特定的条件称为平衡条件。已知静力学研究刚体的平衡问题，因此可以说，静力学是动力学的特例。以后我们将先讨论各种力系简化的一般结果，这时力系不一定平衡；然后再从一般结果推导各种力系的平衡条件，建立力系的平衡方程，并应用它来求解物体的平衡问题。

静力学在工程技术中有着广泛的应用。例如在各种工程结构的构件或机械零部件的设计计算中，常要先进行静力分析。所谓静力分析包括受力分析和应用平衡条件求出未知力。静力分析所得的结果是构件强度和刚度计算的依据，在材料力学、结构力学或机械零件等课程中将讨论这方面的问题。此外，静力学中力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学的基础。

# 第一章 静力学的基本概念

静力学的基本概念是从长期的生产实践和科学实验中总结概括而得来的，它们是研究力系简化和平衡问题的基础。在本篇引言中已经介绍了静力学所研究的基本问题和刚体的概念。本章中我们将要着重阐明三个基本概念：力、平衡和约束，以及与这三个概念有关的基本规律。

## § 1-1 力的基本性质

性质一 力对物体的效应取决于力的三要素。

力是物体之间相互的机械作用，力对物体的效应是使物体的机械运动发生变化，同时使物体发生变形；前者称为运动效应，后者称为变形效应。实践证明力对物体的效应取决于力的基本特征或要素，即力的大小、方向和作用点，简称为力的三要素。

力的大小表示物体之间机械作用的强度，它可通过力的运动效应或变形效应来度量，在静力学中常用测力器的弹性变形来测量。在国际单位制中，力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)， $1\text{kN} = 10^3\text{N}$ 。在工程单位制中，力的单位是公斤(kgf)， $1\text{kgf} = 9.80\text{N}$ 。本书采用国际单位制。

力的方向表示物体的机械作用具有方向性。力的方向包括力的作用线在空间的方位和力沿作用线的指向。

力的作用点是物体间机械作用位置的抽象化。物体相互接触时，力总是分布地作用在一定的面积上。如果力作用的面积很大，这种力称为分布力，例如作用在墙上的风压力或水坝上的水压力

(图 1-1)。如果力作用的面积很小，可以近似地看成作用在一个点上，这种力称为集中力，此点称为力的作用点。例如图 1-2a 中起重机的悬臂梁上挂一重物，重物的重力  $P$  可视为一集中力，它作用在梁的吊钩  $C$  点上。钢索的拉力  $T$  为一集中力，它作用在梁的  $B$  点上。

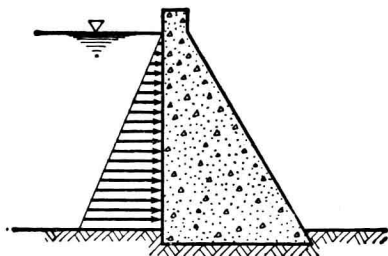


图 1-1

力的三要素表明力是一矢量，它可以用一有方向的线段表示。例如图 1-2b 中的重力  $P$  和拉力  $T$ 。在本书中矢量均用黑体字母表示。在一般情况下，力对物体的效应与其作用点的位置有关。因此，表示力的矢量必须与该力的确定的作用点联系起来。这样的矢量称为定位矢量。

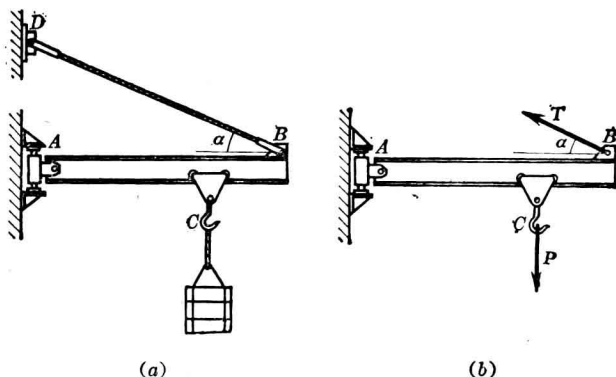


图 1-2

如果只研究力对刚体的效应,则力的作用点就不重要了。因为对刚体来说,只要保持力的大小和方向不变,把力的作用点沿作用线移到刚体的任一点上,并不改变力对刚体的效应。例如用绳拉车,或者沿同一直线、以同样大小的力用手推车,对车产生的运动效应相同。图 1-3a 和 b 分别表示作用在同一刚体上的两个力,若两力的大小、作用线的位置和指向都相同,尽管两力的作用点不同,两

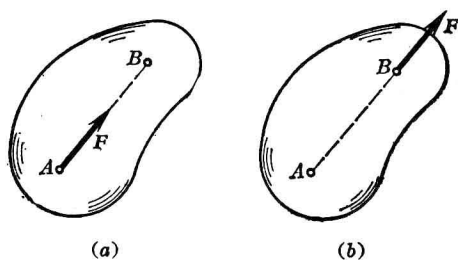


图 1-3

力对刚体的效应相等,或等效。因此,作用在刚体上的力的三要素是: 力的大小、作用线和指向。在这种情况下,力成为滑动矢量。作用在刚体上的力沿作用线可移动的性质,简称为力的可传性。

应该指出,上面所说的等效只是指力对刚体的运动效应相同。力的可传性不适用于变形体,当作用在变形体的力沿作用线移动时,力对物体的变形效应是不同的。例如图 1-4 a 所示直杆的两端 A、B 点施加大小相等、方向相反、作用线相同的两个力  $F_1$ 、 $F_2$ ,显然杆将产生拉伸变形。若把力  $F_1$  沿其作用线传至 B 点,同样把力  $F_2$  传至 A 点,如图 1-4 b 所示,此时杆将产生压缩变形。这两种变形效应显然是不同的。因此力的可传性只限于研究力的运动效应,或者说,只限于研究刚体力学的问题。

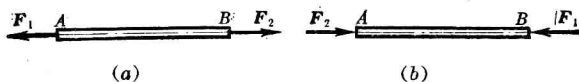


图 1-4

性质二 作用力与反作用力大小相等,作用线相同,指向相反,分别作用在两个不同的物体上。

这个性质指出,力总是成对出现的,有作用力必有一反作用力,这是分析物体之间相互作用力的一条重要规律。如图 1-5a 所示,绳子  $AB$  下端系一小球,其重力为  $P$ ,上端固定在顶板上,绳重略去不计。现分别考察小球、绳子和顶板所受的力: 小球受到地球的引力,即它的重力  $P$ ,设此力作用在球的重心上。球被绳系住不能下落,绳对球作用一向上的拉力  $T_B$ , 其作用点为  $B$ 。球的受力情况如图 1-5b 所示。绳子的  $B$  端受到球向下的拉力  $T'_B$ , 但其  $A$  端固定在顶板上,它受到顶板向上的拉力  $T'_A$ 。绳子的受力情况如图 1-5c 所示。顶板上的  $A$  点受到绳向下的拉力  $T_A$ , 它的受力情况如图 1-5d 所示。不言而喻,在地球的中心受到向上的力  $P'$ ,它是小球对地球的引力(图上未画出)。

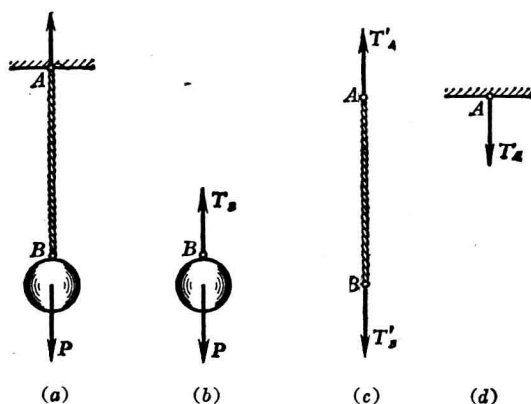


图 1-5

不难看出,  $T_B$  和  $T'_B$  是分别作用在小球和绳子上的作用力和反作用力,  $T_A$  和  $T'_A$  是分别作用在顶板和绳子上的作用力和反作用力,  $P$  和  $P'$  是分别作用在小球和地球上的作用力和反作用力。显然,这些力都是成对地出现的。这里,每一个力是“哪个”对“哪个”

物体的作用都很清楚。以后我们约定,把其中的一物体称为“施力体”,另一物体则称为“受力体”。例如对力 $T_B$ 来说,绳子是施力体,球是受力体。但对力 $T'_B$ 说,则球是施力体,绳子变为受力体了。

应该指出,力的上述性质无论对刚体或变形体都是适用的。

性质三 作用在物体上同一点的两个力,其合力的作用点与两力相同,合力的大小和方向由两力为边所构成的平行四边形的对角线确定,如图1-6a所示,这称为力的平行四边形法则。如将原来的两力叫做分力,则此性质可简述为:合力等于两分力的矢量和。写成矢量式为

$$R = F_1 + F_2$$

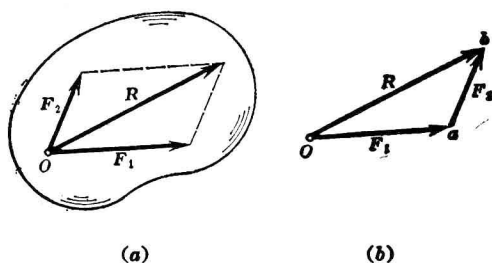


图 1-6

根据性质三用作图法求合力时,通常只须画出半个平行四边形就够了。如图1-6b所示,从O点开始先画矢量 $\overrightarrow{Oa} = F_1$ ,从a点再画矢量 $\overrightarrow{ab} = F_2$ 。连接起点O与终点b,合力R就由封闭边的矢量 $\overrightarrow{Ob}$ 决定。这称为力三角形法。

力的平行四边形法则是研究力系简化问题的重要根据。

应该指出,力的这一性质无论对刚体或变形体都是适用的。但对于刚体来说,并不要求两力的作用点相同,只要两力的作用线相交,总可根据力的可传性,分别把两力的作用点移到交点上,然后再应用力的平行四边形法则求合力,如图1-7所示。

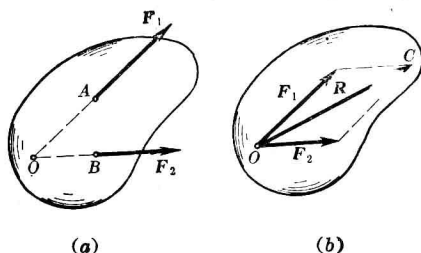


图 1-7

## § 1-2 作用在刚体上力系的平衡条件和硬化原理

在本篇引言中已提到平衡的概念。现在来讨论刚体受力而处于平衡的两种特殊情形：

(1) 刚体只受两个力作用而处于平衡，由此得到静力学中最简单的二力平衡条件，这是刚体平衡的最基本的规律。

(2) 刚体受到三个不平行的力作用而处于平衡，由此得到三不平行力的平衡条件。

分别说明如下：

1. 二力平衡条件 作用在刚体上的两个力平衡的必要与充分条件是：两力的大小相等，作用线相同，指向相反。

由实践可知，如图 1-8 所示，在直杆的两端沿杆的轴线加一对大小相等的拉力( $F_1$ 、 $F_2$ )或压力( $F_3$ 、 $F_4$ )都可使杆平衡。在建筑和机器结构中常见各种形状的构件，它们都只受两个力而处于平衡，这种构件称为二力构件。二力构件上的两个力必满足二力平衡条件。

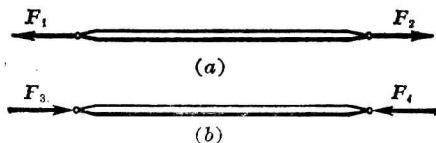


图 1-8

二力平衡条件可看成是用力的平行四边形法则求合力的特殊情况。若两力大小相等,作用线相同,指向相反,则求得的合力为零;换句话说,这两个力对刚体的运动效应为零,即刚体处于平衡状态。

注意不要把二力平衡条件与力的作用和反作用性质弄混淆了。对二力平衡条件来说,两个力作用在同一刚体上,而作用力和反作用力则是分别作用在两个不同的物体上。

2. 不平行三力平衡条件 作用在刚体上同平面内的三个不平行力平衡的必要与充分条件是:三力的作用线必须汇交于一点,三力矢量按首尾相连的顺序构成一封闭三角形,或简称力三角形封闭。

设作用在刚体上同平面内<sup>①</sup>的三个互不平行的力 $F_1$ 、 $F_2$ 和 $F_3$ (图 1-9a),合成时首先将其中的两个力 $F_1$ 和 $F_2$ 分别沿其作用线移到交点 $O$ 处,然后合成为一合力 $R$ , $R=F_1+F_2$ 。这样,刚体就可看成只受两个力 $R$ 和 $F_3$ 作用。根据二力平衡条件,此二力必须大小相等,作用线相同,指向相反;或者说,力 $F_3$ 必通过 $O$ 点,

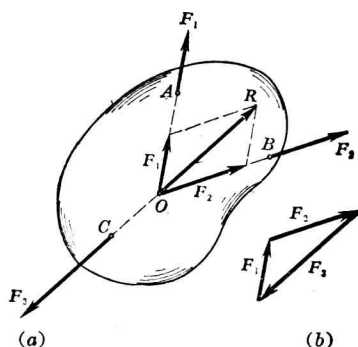


图 1-9

① 如刚体受三个力作用而处于平衡,若其中两个力共面,则第三个力的作用线必在同面内。