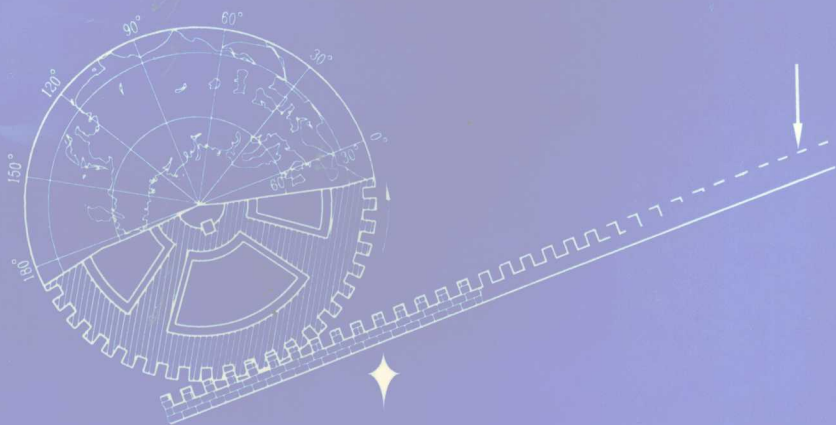


工程力学实用教程

吴法苟 高 斌 主编



中国纺织出版社

工程力学实用教程

主 编 吴世雄 高 强

中国纺织出版社

内 容 提 要

本书由理论力学、材料力学及附录三部分组成。

上篇理论力学主要介绍力系的简化方法与平衡关系、点与刚体的运动特征、力与运动的物理关系等知识；下篇材料力学分别讨论构件发生拉、压、弯、扭等基本变形时的强度与刚度问题。附录介绍了材料机械性能的一般测试方法等内容。每章后附有与各节内容及顺序相应的习题。

本书的内容、结构、习题等均与同类教材有所不同，为中少学时的工程力学探索性教材。适用于高等工科院校本专科、电大及中专的非机类各专业，也可供机类学生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学实用教程/吴法苟，高斌主编. —北京：中国纺织出版社，1997
ISBN 7-5064-1324-8/TB·0003

I. 工… I. ①吴… ②高… III. 工程力学-教材 N. T
B12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 05566 号

中国纺织出版社出版发行

北京东直门南大街 4 号

邮政编码：100027 电话：010—64168226

郑州粮食学院印刷厂印刷 各地新华书店经销

1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月第一次印刷

开本：850×1168 1/32 印张 12.125

字数：315 千字 印数：1—3000

定价：15.80 元

前 言

面向 21 世纪的工程力学教学改革已探索有年,在教学内容与教学方式上我们都进行了一系列大胆尝试,为加强教与学的联接,解决配套教材已是刻不容缓的问题。众所周知,目前各高校课时日趋紧张,许多高校近机类各专业的工程力学课时,已由教学大纲规定的 120~150 学时压缩至 70~90 学时,原使用的适用于 120 学时以上的各种教材限制了教改进程,并影响了学生的学习效率。有鉴于此,我们结合自身教改经验,编写了这本适用于 70~90 学时的《工程力学实用教程》。书中带“*”号的章节可在学时较多时选讲。

本书是依据国家教委委托专业指导委员会 1987 年制订的《力学课程教学基本要求》编写的,但在结构、体系上作了适当调整,教学要求也有所不同。与同类教材相比,区别主要有两点:一是主体结构有较大变化。例如:将力、力矩、力偶的概念及静力学理论等学生在中学或大学物理中学过的内容与受力分析归入静力学基础知识一章;将传统教材中的点的基本运动、刚体的基本运动、刚体的平面运动并入点与刚体的基本运动一章,等等。二是习题形式与内容的变化。以往力学教师的大部分精力被迫消耗在批改学生作业上,通常每讲两课时就要批改 6~8 学时的力学作业,为了既减轻师生负担又不降低对学生的训练要求,同时向教委推荐的力学标准题库的题型靠拢,作者经几年尝试,形成了本书的习题风格,即:标准题型加引导性质的作业,按课时划分每次作业占独立两个页码,学生可直接作于书上,也可将该页纸撕下交作业,教师不必于每次课后选题布置作业,且批改作业十分方便。实践表明,用选择、判断等标准题训练学生的基本概念,将

综合题拆细为引导型填空题,以启发学生的思维,培养分析能力。这种方法是行之有效的,特别是可明显提高学生的学习效率,改善以往少数学生面对作业无从下手的窘况。

工程力学不仅仅是一门重要的理论基础课和技术基础课,在文明社会发展的几千年历程中,力学与哲学结下了不解之缘。如古人云“虚则欹,满则覆,中则正”,或以为这是在论述做人的道理,其实是在描述欹器这种盛水容器的力学性质。又如学习点的合成运动知识时,学生通过掌握同一个物体在两种不同的坐标系中会表现出完全不同的却又一样真实可信的运动规律,就可以学会理解为什么不同的人会对同一件事得出不同的结论,等等。学生在力学课中学习建立力学模型、分析问题解决问题时,主要的收获不是简单的专业知识,而是科学的思维方法。在专家们还在为 21 世纪的大学生首先应注重能力培养还是素质培养而争论不休时,力学教学正在为这两方面的培养默默地奠定基础。而如何奠定好这一基础,正是广大力学教师不断探求的目的。

本书由吴法苟、高斌任主编,李冬霞、蔡崇田任副主编,各位编委撰写的内容请见后记。本书在编写过程中,得到了郑州纺织工学院、河南纺织高等专科学校和郑州大学的各位力学教师的积极配合,并得到有关领导的大力支持,在此一并致以谢意。同时,在本书的编写过程中,参考了许多同类教材和习题集,调用了以往由标准试题库所出试卷的部分习题,此处不再一一列出各参考书目及作者,谨致谢意。

限于我们的水平,特别是作为探索性教材,一定会有许多待改进之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1997 年 1 月

目 录

上篇 理论力学

第一章 静力学基础知识	(3)
第一节 静力学基本概念	(3)
第二节 静力学基本原理	(11)
第三节 物体的受力分析	(19)
第二章 力系的简化与平衡	(33)
第一节 力系的简化方法及结果	(33)
第二节 平面力系的平衡问题	(44)
第三节 空间力系的平衡问题	(55)
第三章 点与刚体的基本运动	(73)
第一节 点的基本运动规律	(73)
第二节 刚体的基本运动规律	(80)
第三节 刚体的平面运动规律	(84)
第四章 点与刚体的复合运动	(99)
第一节 合成运动的基本概念	(99)
第二节 点的速度合成定理	(101)
第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(105)
第五章 动量定理和动量矩定理	(115)
第一节 动力学基本方程	(115)
第二节 动量定理	(119)
第三节 动量矩定理	(125)
第四节 刚体平面运动微分方程	(137)
第六章 动能定理	(145)

第一节	功与功率	(145)
第二节	动能定理	(149)
第三节	动力学普遍定理的综合运用	(156)
第四节	动静法	(158)

下篇 材料力学

第七章	受轴向载荷构件的设计	(178)
第一节	拉(压)杆的强度计算	(178)
第二节	拉(压)杆的变形、简单超静定问题	(188)
第三节	联接件的强度计算	(196)
第四节	应力集中的概念	(202)
第八章	受扭构件的设计	(213)
第一节	外力偶矩、扭矩和扭矩图	(213)
第二节	受扭构件的应力及强度计算	(217)
第三节	圆轴扭转时的变形和刚度计算	(223)
第九章	弯曲构件的设计	(233)
第一节	梁的内力	(233)
第二节	弯矩、剪力和载荷集度间的关系	(242)
第三节	梁弯曲时的正应力和强度计算	(247)
第四节	弯曲变形及刚度计算	(258)
第十章	组合变形构件的强度计算	(291)
第一节	组合变形及应力状态	(291)
第二节	强度理论	(300)
第三节	拉(压)弯组合变形强度计算	(304)
第四节	弯扭组合变形强度计算	(308)
附录 I	材料的机械性能及测试方法	(325)
附录 I	梁弯曲计算程序	(349)
附录 III	型钢表(节录)	(364)
后 记		(382)

上篇 理论力学

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动就是指物体在空间的位置随时间而发生的改变。当物体相对于地球保持静止或匀速直线运动时，我们称该物体处于平衡状态。机械运动是人们在日常生活和生产实践中最常见的一种运动。平衡则是机械运动的特殊形式。

理论力学以牛顿定律为基础，属于经典力学的范畴，适用于速度远低于光速的宏观物体的运动。近代物理学的发展虽然揭示出经典力学研究范围的局限性，但工程技术中所处理的对象一般都属于宏观、低速范畴，即使人造卫星的运行速度也不足光速的万分之一。因此，工程技术中的各类力学问题仍以经典力学的定律为依据。

理论力学是一门重要的理论基础课和技术基础课，通过本课程的学习，我们要掌握物体机械运动的基本规律，初步学会运用这些基本规律去分析生产实际中的力学问题，并为学习材料力学、机械原理、机械零件等有关的后继课程准备条件。学习理论力学，也有助于培养学生分析问题和解决问题的能力，为以后参加生产实践和从事科学研究打下基础。理论力学分为静力学、运动学、动力学三部分。

静力学是研究物体在力作用下平衡规律的科学。

静力学的研究对象一般为刚体。所谓刚体，是指在任何情况下其大小和形状都不变的物体。显然这是一种理想化模型，现实中任何物体受力后其大小形状都会有所改变。当物体的变形量很

小或变形因素对所研究问题的影响很小时，则可忽略其变形而视为刚体。静力学主要研究力系的简化与力系的平衡两大问题，其关键是对物体进行准确的受力分析。

运动学是研究物体运动的几何性质的科学。

运动学的研究对象是点和刚体。点是对物体忽略大小形状及质量的又一种抽象。运动学主要研究物体在不同参照系中的运动规律及相互关系，涉及时间、位移、速度、加速度等概念。

动力学是研究物体的机械运动与作用力之间关系的科学。

动力学的研究对象是质点和质点系。质点是將物体质量浓缩于一点而忽略其大小形状的抽象。刚体可视为任意两质点间距离永不改变的特殊质点系。这一部分的动力学普遍定理具有较强的实用价值。

第一章 静力学基础知识

第一节 静力学基本概念

静力学中最主要的基本概念，除已在引言中叙及的平衡、刚体外，还有力、力矩、力偶、等效力系、约束反力，等等。

一、力的概念

1. 力的定义

力是物体间的相互(机械)作用。

力的概念是劳动人民在长期生活和生产实践中逐步形成的。最初对力的认识，是由人们在推、拉、提、掷物体等活动中感到肌肉紧张而产生的，人的作用使物体产生变形或位移。进一步观察发现，物体与物体之间也有这样的相互作用，这种作用就是力。世界上关于力的概念的最早文字记载，见于我国两千多年前的《墨经》一书：“力，刑之所以奋也。”“刑”通“形”，即人之形体。“奋”者，鸟张大翅膀从田野里起飞之意。该句通过用力上举重物的人体形象揭示出力的含义。

2. 力的效应

力的作用使物体运动状态发生变化的现象称为力的外效应；使物体发生变形的现象称为力的内效应。

小车由于受人的推力作用由静止而运动即为力的外效应；果树枝由于果实牵累而弯曲下垂则为力的内效应。力作用时内、外效应通常同时发生。若将物体看作刚体，则意味着不考虑力的内效应。力的效应取决于力的三要素。

3. 力的三要素

力的大小、方向、作用点称为力的三要素。

力的三要素可用有向线段表示,如图 1-1 所示。线段的始端 A 表示力的作用点,线段的末端 B 用箭头表示力的指向,线段的长度按一定比例表示力的大小。通过 A 、 B 两点的直线称为力的作用线。力是一个既有大小又有方向的量,因此力是矢量。本书中,力的矢量用黑体字母(例如 $\boldsymbol{F}$)表示,而力的大小(即矢量的模)则用普通字母(例如 F)表示。

4. 力的单位

在国际单位制(SI)中,力的单位是牛顿(简称牛),记作 N ;在工程单位制中,力的常用单位曾用公斤力,记作 kgf 。两种单位制间力的换算关系为:

$$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$$

5. 力在平面上的投影

力矢在某平面轴上的投影,等于力的模乘以力与投影轴正向夹角的余弦。设力 $\boldsymbol{F}$ 与 x 轴正向夹角为 α , 则 $\boldsymbol{F}$ 在 x 轴上的投影 X 为:

$$X = F \cos \alpha \quad (1-1a)$$

显然,当 $\alpha < 90^\circ$ 时, $X > 0$; 当 $\alpha > 90^\circ$ 时, $X < 0$ 。见图 1-2。

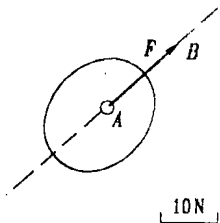


图 1-1

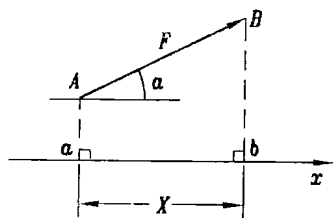


图 1-2

6. 力在空间的投影

一次投影(已知: F, α, β, γ , 求投影): 如图 1-3 所示。

$$\left. \begin{aligned} X &= F \cos \alpha \\ Y &= F \cos \beta \\ Z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-1b)$$

二次投影（已知： F, φ, γ ，求投影）：如图 1-3 所示。

$$\left. \begin{aligned} X &= F \sin \gamma \cos \varphi \\ Y &= F \sin \gamma \sin \varphi \\ Z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-1c)$$

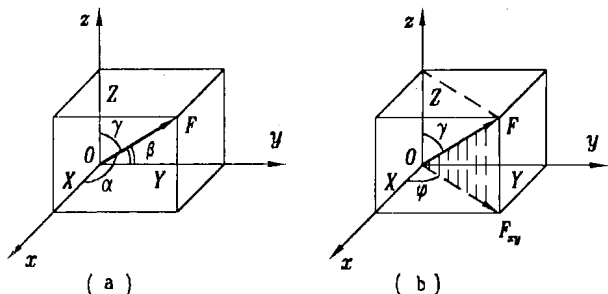


图 1-3

7. 等效力系

若用一力系代替另一力系对某刚体的作用而其效应不变，则此二力系互为等效力系。

静力学中的等效仅指力的外效应相同。例如，在一个木箱下垫三块砖或垫四块砖都可使之平稳，此时木箱所受力系不同，但其外效应相同。用尽可能简单的力系等效替换复杂力系对刚体的作用为力系简化的本质。

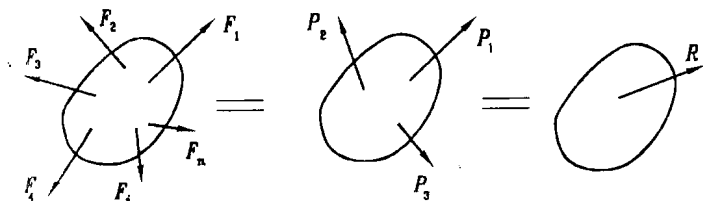


图 1-4

8. 合力与分力

若能用一个力等效替换一复杂力系，则此力称为该力系的合力。力系中的各个力称为该合力的分力。如图 1-4 所示。用合力等

效替代一群力称为力的合成；用若干个分力等效替代一个力称为力的分解。

9. 静力学中力的分类

力的分类	作用	分布力：力的作用面积相对较大，且难以忽略其作用面积时。如河水对河床的压力。
		集中力：力的作用面积相对较小，可视为作用在一点上。如针尖刺入皮肤的力。
	性质	外力：外部加于物体的力，包括主动力和约束反力。如桌椅所受的重力和地面对它的支持力。
		内力：物体内部各部分之间的相互作用力。如火车各车厢之间的联接力。

10. 静力学中力系的分类

力系的分类	作用线位置	平面力系：作用线分布在同一平面内的力系。
		共点力系：各力都作用在同一点的力系。 汇交力系：作用线相交于同一点的力系。 平行力系：作用线相互平行的力系。
		空间力系：作用线不在同一个平面内的力系。
	作用效果	任意力系：泛指各种各样的力系。 等效力系：作用效果相同的力系。 平衡力系：使物体处于平衡状态的力系。

二、力矩的概念

1. 平面力对点之矩

经验告诉我们：用扳手拧螺母时（见图 1-5a），作用于扳手一端的力 F 使扳手绕螺母中心 O 点转动的效应，不仅与力 F 的大小有关，还与力的作用线到 O 点的垂直距离 d 有关。因此，在力学上以乘积 Fd 作为度量力 F 使物体绕 O 点转动效应的物理量，称为力 F 对 O 点的力矩。即

$$m_o(F) = \pm Fd \quad (1-2a)$$

或用三角形面积表示为：

$$m_o(F) = \pm 2 \triangle AOB \quad (1-2b)$$

图中, O 点称为力矩中心 (简称矩心), d 称为力臂。通常规定: 力使物体绕矩心逆时针转动的力矩为正; 反之为负。由式 (1-2a) 可知, 当力 F 等于零或力线通过矩心时 ($d=0$), 力矩为零, 不能使物体转动。

力矩的单位是牛顿米, 记作 Nm 或 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

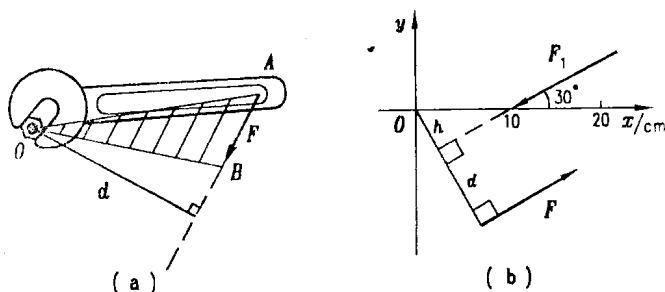


图 1-5

例 1-1 平面上有两个等值、反向的平行力, 如图 1-5(b) 所示。已知: $F = F_1 = 100 \text{ N}$, 二力作用线之间的距离 $d = 10 \text{ cm}$ 。试分别计算二力对 O 点之矩, 并求此二力矩的代数和。

解: 由图示可知, F 对 O 点的力臂为 $(d+h)$, F 的力矩为逆时针转向, 其符号应为正; F_1 的力臂为 h , 顺时针转动力矩为负。则

$$h = 10 \sin 30^\circ = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m}$$

$$m_o(F) = F(d+h) = 100(0.1 + 0.05) = 15 \text{ Nm}$$

$$m_o(F_1) = -F_1 h = -100 \times 0.05 = -5 \text{ Nm}$$

设二力矩之和为 M , 则

$$M = m_o(F) + m_o(F_1) = F(d+h) - F_1 h = Fd = 10 \text{ Nm}$$

由于 F 与 F_1 平行、反向、等值, 不难看出, 此二力对其作用面内任意一点的力矩之和都为常量, 其值恒为 $M = Fd$ 。同时可以看出, 此二力对任意轴的投影之和都为零。由于有以上特点和一些重要性质, 此二力组成的特殊力系称为力偶。

2°. 空间力对点之矩矢

如图 1-6(a) 所示, 空间力的作用线与矩心形成一平面, 从此

力矩作用面上看, 该力对矩心之矩与平面上力对点之矩计算结果应相同。但空间力对点之矩除了要说明力矩的大小和转向外, 还必须交代力矩作用面在空间的方位, 故空间力对点之矩须用矢量表示。

空间力对点的矩矢等于力作用点对矩心的矢径与该力的矢积。矢的指向用右手定则确定。力矩矢是固定矢量。

$$M_o(F) = r \times F \quad (1-3a)$$

空间力矩的模可表示为:

$$|M_o(F)| = 2 \triangle OAB \quad (1-3b)$$

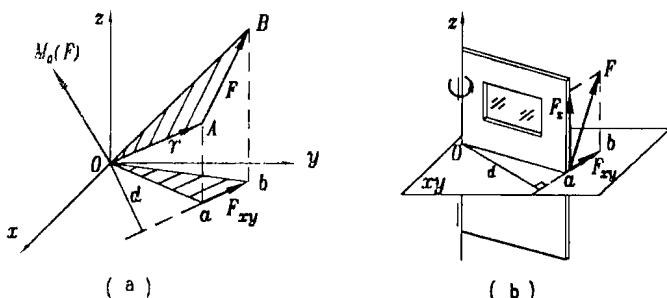


图 1-6

3. 空间力对轴之矩

如图 1-6(b)所示, 空间的刚体通常是绕轴转动, 作用在刚体上的力 F 可用两个有适当大小及方向的分力等效替代, 设二分力分别为与转轴 z 平行的力 F_z 及与转轴 z 垂直的力 F_{xy} 。显然, F_z 与刚体绕 z 轴转动的效应无关。这一点可从开门中得到启示。因此, 研究空间问题必须掌握力对轴之矩。力 F 在垂直于 z 轴的 xy 平面上的分力值等于该力在同一平面上的投影。

空间力对轴之矩等于此力在垂直于矩轴的平面上的投影对于矩轴与这平面的交点的矩。

$$M_z(F) = \pm F_{xy}d \quad (1-4a)$$

或

$$M_z(F) = \pm 2 \triangle Oab \quad (1-4b)$$

力对轴之矩是代数量，其符号按右手螺旋定则：四指沿力矩转向握拳，大拇指与矩轴指向一致时为正；反之为负。

4. 空间力对点之矩与力对轴之矩的关系

力对一点的矩矢在通过该点的任一轴上的投影，等于此力对该轴的矩。即

$$\left. \begin{aligned} |M_o(F)|_x &= M_x(F) \\ |M_o(F)|_y &= M_y(F) \\ |M_o(F)|_z &= M_z(F) \end{aligned} \right\} \quad (1-5a)$$

$$\left. \begin{aligned} |M_o(F)| &= \sqrt{|M_x(F)|^2 + |M_y(F)|^2 + |M_z(F)|^2} \\ \cos\alpha &= M_x(F) / |M_o(F)| \\ \cos\beta &= M_y(F) / |M_o(F)| \\ \cos\gamma &= M_z(F) / |M_o(F)| \end{aligned} \right\} \quad (1-5b)$$

上式中 α 、 β 、 γ 分别为 $M_o(F)$ 与三个直角坐标轴 x 、 y 、 z 的夹角。

三、力偶的概念

1. 力偶的定义

由两个大小相等、方向相反、作用线不重合的平行力组成的力系称为力偶。力偶中二力所在的平面称为力偶作用面，二力之间的垂直距离 d 称为力偶臂，见图 1-7。在生产实践中，常会遇到物体上同时受到两个等值、反向平行力的作用。例如汽车驾驶员

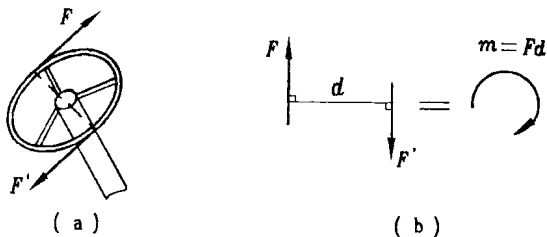


图 1-7

双手加在方向盘上的力；工人在攻螺纹时作用在丝锥手柄上的两个力；人们用两个手指旋转钥匙开门等等，都是力偶的表现，如图1-7(a)所示。

2. 力偶矩

如何衡量力偶的转动效应问题，可以从例1-1中求二力对同一点的力矩之和中得到启发。一方面，二力的力矩之和与矩心无关，为一定值；另一方面，此定值由力 F 与力偶臂 d 共同决定。因此，与力矩类似，我们以乘积 Fd 并加以适当的正负号，作为力偶对物体的转动效应的度量，称之为力偶矩。即

$$m = \pm Fd \quad (1-6)$$

上式中，正负号表示力偶的旋转方向。通常规定：力偶使物体作逆时针方向转动时，力偶矩为正；反之为负。不难看出，力偶矩的大小及其正负号，均与任一力对另一力作用线上任意点之力矩相同。

力偶矩的实质就是力偶之力矩和，由此决定了二者的关系。相同点为：二者的作用效果都是使物体发生转动，其矩值都用 Fd 表示，其符号都取逆时针为正，顺时针为负。不同点为：力矩与矩心有关，力偶矩与矩心无关。因此，计算力偶矩时不需要确定矩心位置。

力偶矩的单位与力矩相同，为牛顿米，记作Nm或 $N \cdot m$ 。

3. 力偶的性质

在力学中，力偶也是一个基本力学量，有着和力的概念同等重要的地位。力偶虽是由力构成的一种特殊力系，但力与力偶的作用效应不同，力可以使物体产生移动，或同时产生移动和转动，而力偶只能使物体产生转动，绝无移动现象。

力偶的性质主要有以下几点：

(1) 力偶无法等效简化为一个合力，因而力偶也就不可能与任何单个力等效。力偶只能与力偶等效。

(2) 力偶可在其作用面内任意移动，且不影响其对刚体的作