

普通高等院校  
基础力学系列教材

刘燕

# 理论力学

学习指导

清华大学出版社



普通高等院校基础力学系列教材

刘燕

# 理论力学

学习指导

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍“理论力学”课程的理论与方法概要以及解题方法。目的是一方面帮助读者应用理论力学的基本概念、基本理论以及基本方法分析和解决问题；另一方面通过解题过程加深对相关概念、理论以及方法的认识和理解。全书章节的安排与现行高等学校的理论力学教材基本一致。

本书内容包括教学要求与学习目标、理论要点、学习建议以及例题示范四部分。在例题示范部分,对于初学者容易出现的某些错误进行了分析。

本书可以与范钦珊等编著的《理论力学》主教材配套使用,作为普通高等院校学生学习“理论力学”课程的参考书。书中一些具有一定深度和难度的内容以及相关的例题解析,为从事理论力学教学工作的老师、准备参加研究生考试的学生提供了相应的参考。

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

理论力学学习指导/刘燕. —北京:清华大学出版社,2006.3

(普通高等院校基础力学系列教材)

ISBN 7-302-12321-7

I. 理… II. 刘… III. 理论力学—高等学校—教学参考资料 IV. O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 160101 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:杨 倩

文稿编辑:赵从棉

印装者:北京牛山世兴印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:170×230 印张:10.75 字数:199千字

版 次:2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12321-7/O·511

印 数:1~3000

定 价:15.00元

普通高等院校基础力学系列教材

## 编委会名单

主任：范钦珊

编委：王焕定 王琪

刘燕 殷雅俊

普通高等院校基础力学系列教材包括《理论力学》、《材料力学》、《结构力学》、《工程力学》(静力学+材料力学)。这套教材是根据我国高等教育改革的形势和教学第一线的实际需求,由清华大学出版社组织编写的。

从2002年秋季学期开始,全国普通高等学校新一轮培养计划进入实施阶段。新一轮培养计划的特点是:加强素质教育、培养创新精神。根据新一轮培养计划,学生自主学习空间应进一步增大,课程的教学总学时数将大幅度减少,基础力学课程自不例外。

怎样在有限的教学时数内,使学生既能掌握力学的基本知识,又能了解一些力学的最新进展;既能培养和提高学生学习力学的能力,又能加强学生的工程概念?这是很多力学教育工作者所共同关心的问题。

现有的基础力学教材大部分都是根据在比较多的学时内进行教学而编写的,因而篇幅都比较大。教学第一线迫切需要适用于学时压缩后教学要求的小篇幅的教材。

根据“有所为、有所不为”的原则,这套教材更注重基本概念,尽量避免冗长的理论推导与繁琐的数学运算。这样做不仅可以满足一些专业对于力学基础知识的要求,而且可以切实保证教育部颁布的基础力学课程教学基本要求的教学质量。

为了让学生更快地掌握最基本的知识,本套教材一方面从叙述概念、原理时提出问题,分析问题和解决问题的角度作了比较详尽的论述与讨论;另一方面通过较多的例题分析,特别是新增加的关于一些重要概念的例题分析帮助读者加深对基本内容的了解和掌握。

此外,为了帮助学生学习和加深理解以及方便教师备课和授课,与每门课程主教材配套出版了学习指导、教师用书(习题详细解答)和供课堂教学使用的电子教案。

本套教材内容的选取以教育部颁布的相关课程的“教学基本要求”为依据,同时根据各院校的具体情况,作了灵活的安排,绝大部分为必修内容,少部分为选修内容。

范钦珊

2005年7月于清华大学

理论力学研究物体在力作用下的机械运动规律。通过学习理论力学,不仅能使人们懂得日常生产和生活中所发生的各种现象,而且对于分析和解决建筑工程、机械制造、水利工程、电力工程、石油与化学工程、核反应堆工程以及航空航天等工程问题都有着非常重要的实际意义,因为理论力学是这些工程科学的基础。

怎样学好理论力学中的基本概念和基本理论,掌握它们的基本分析方法,并运用它们去分析和处理工程实际问题,不仅是高等工科院校大部分专业的学生,而且也是有关专业的工程技术人员共同关心的问题。编写理论力学学习指导与解题指南的目的,除了介绍解题方法外,还可为初学者学好理论力学提供一些学习方法。

分析和解题过程,既是应用基本概念、基本理论和基本方法的过程,又是加深理解的过程。解题前应当对有关的基本概念、基本理论和基本方法有比较全面和正确的认识。解题时,首先要弄清已知条件是什么,要求的是什么,分析的问题属于什么性质;其次,根据问题的性质,分析解决这类问题需要应用哪些基本概念和基本理论;第三,在上述分析的基础上归纳出解题过程与步骤,算出所需的结果;最后,还需要应用有关的概念和理论去判断和检查所得结果是否正确。作者从事力学教育的实践经验表明,只有这样才能达到解题的目的,做到举一反三,通过解题而精通理论,是读者逐步掌握应用这些理论进行分析问题和解决问题的方法。

根据以上要求,每章中都首先对基本的理论和方法作简要叙述;然后,通过若干例题示范,介绍分析和处理问题的方法;同时对初学者容易犯的某些常见错误加以分析。

本书的章节安排顺序基本上与我国现行理论力学教科书的系统相一致。



但是,考虑到本书的侧重点是解题方法介绍,因此个别章节的安排与现行教科书又略有差异。

由于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2005年11月

## 第 1 篇 工程静力学基础

第 1 章 受力分析概述	3
第 2 章 力系的等效与简化	13
第 3 章 静力学平衡问题	23

## 第 2 篇 工程运动学基础

第 4 章 运动分析基础	45
第 5 章 点的复合运动分析	55
第 6 章 刚体的平面运动分析	65

## 第 3 篇 工程动力学基础

第 7 章 质点动力学	81
第 8 章 动量定理及其应用	91
第 9 章 动量矩定理及其应用	101
第 10 章 动能定理及其应用	115
第 11 章 达朗贝尔原理及其应用	129
第 12 章 虚位移原理及其应用	141
第 13 章 动力学普遍方程和第二类拉格朗日方程	153

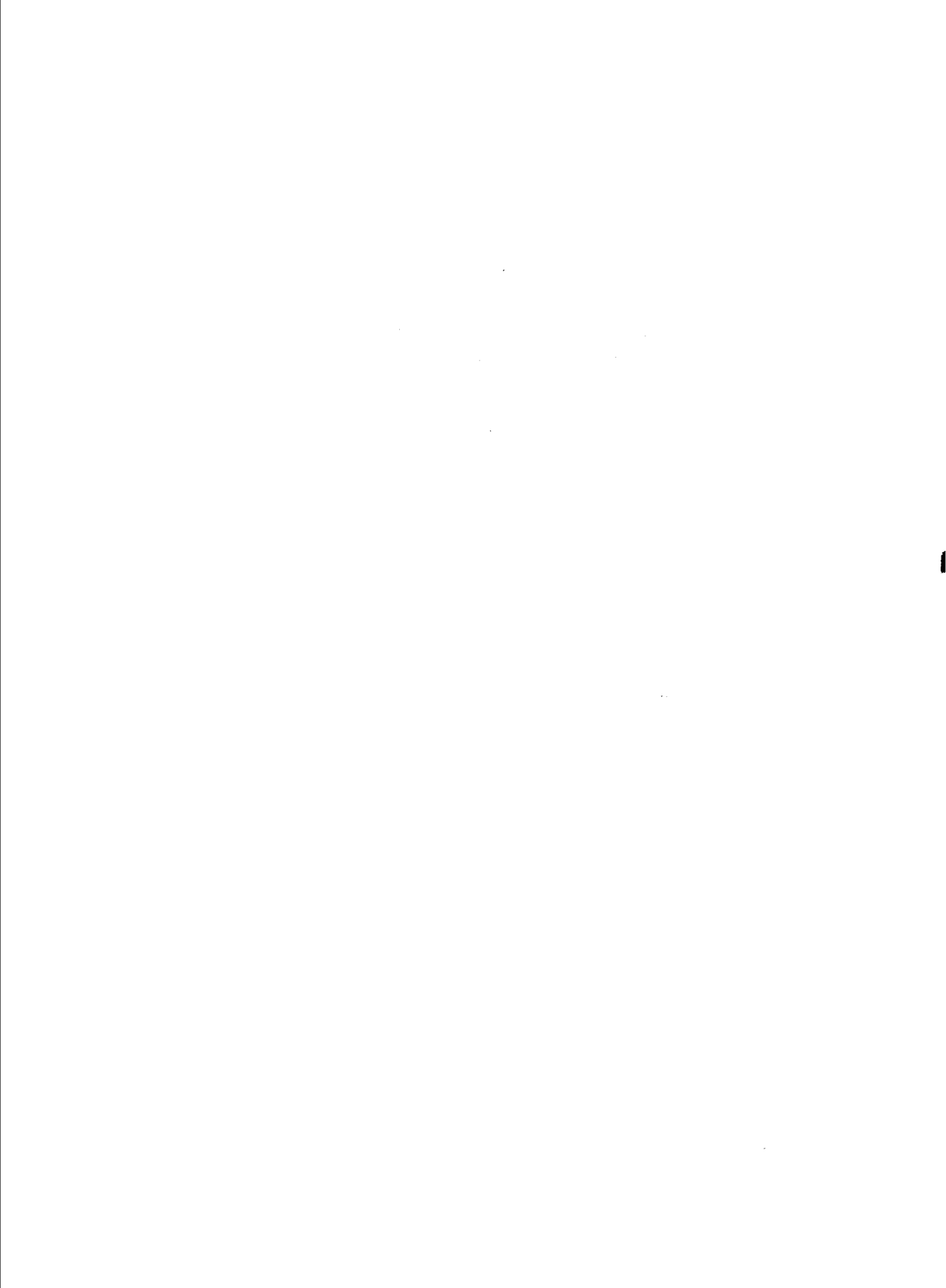
# 第 1 篇 工程静力学基础

本篇研究物体机械运动的特殊情形——物体的平衡规律,主要内容如下。

1. 物体的受力分析:分析结构或构件所受到的各个力的方向和作用线的位置。

2. 力系的等效与简化:研究如何将作用在物体上的一个复杂力系用简单力系来等效替换,并探求该力系的合成规律。力系简化是建立力系平衡条件的理论基础。

3. 力系的平衡条件与平衡方程:研究物体处于平衡状态时作用在其上的各种力系应满足的条件。利用平衡条件建立的数学方程,称为平衡方程。



## 受力分析概述

本章主要介绍静力学模型——物体的模型、连接与接触方式的模型、载荷与力的模型,同时介绍力的基本概念及物体受力分析的基本方法。

### 教学要求与学习目标

1. 正确理解并掌握力的基本概念以及关于力性质的基本原理。
2. 正确掌握力平衡的基本概念,掌握二力平衡与三力平衡的条件,能够正确判断二力杆或二力构件。
3. 正确分析各种常见的约束,并能根据约束的性质确定约束力。
4. 熟练掌握受力分析的基本方法,学会取隔离体、画受力图。

### 理论要点

#### 1. 力的基本概念

##### (1) 力的定义

一个物体对另一个物体的作用,若其结果是使物体的运动状态或形状发生变化,则这种作用在力学上称为力。两个物体的相互作用可以是直接接触的,也可以是非直接接触的。前者所见甚多;后者如重力、电磁力等的相互作用是通过某种场进行的:重力是通过地球与物体之间的引力场进行的,电磁力是通过电磁场进行的。

##### (2) 力的作用效果

一般情况下,力作用在物体上将同时产生两种效果:一是使物体的机械运动状态发生改变,即运动效果(平衡是其特殊情形);二是使物体发生变形,即变形效果(刚体不发生变形是在特定条件下的一种简化)。

## (3) 力的三要素

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点。力对刚体的作用效果则取决于力的大小、方向和作用线的位置。因为力对刚体只产生运动效果,这种作用效果除与力的大小和方向有关外,还与力的作用线位置有关,与力作用在这一作用线上的哪一点无关。

力是矢量,矢量的模为力的大小,矢量的始端或末端为力的作用点,矢量所在的直线为力的作用线,矢量的指向为力的方向。力一般用字母  $F$ 、 $F_P$ 、 $F_R$  等表示。

在国际单位制中,力的单位为牛顿,简称牛(N)。

## (4) 关于力基本性质的原理

**原理 1** 两个物体相互作用的力,大小相等、方向相反、作用线相同。这是牛顿第三定律——作用与反作用定律。在这里容易将其与作用在一个物体上的一对平衡力相混淆。因为二者都是大小相等、方向相反、作用线相同的力;但作用与反作用力分别作用在两个不同的(相互作用的)物体上,而一对平衡力则作用在同一个物体上。

**原理 2** 作用于刚体上相交的两个力,其合力通过两个分力作用线的交点,合力的大小和方向由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线确定。这个原理又称为力的平行四边形法则,它表明合力是分力的几何和或矢量和。

作用线可汇交于同一点的多个力所组成的汇交力系,可应用原理 2 求其合力:将力系中所有的力逐次应用平行四边形法则,最后合成一个合力  $F$ 。其矢量表达式为

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i$$

## (5) 力在坐标轴上的投影及汇交力系合力的解析表达式

**力在坐标轴上的投影** 若力  $F$  与坐标轴  $x$  的正向夹角为  $\varphi$ ,则力  $F$  在  $x$  轴上的投影  $F_x$  为

$$F_x = F \cos \varphi$$

力  $F$  的解析表达式为

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$$

式中,  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  表示力  $F$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴上的投影;  $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴上的单位矢量。

**汇交力系合力的解析表达式** 除用几何法求汇交力系的合力外,在实际应用中更多的是采用力解析法,即投影方法。先求得各分力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上投影的代数和,即合力  $F$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的投影:

$$F_x = \sum_{i=1}^n F_{ix}$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n F_{iy}$$

$$F_z = \sum_{i=1}^n F_{iz}$$

则合力  $F$  的大小为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

合力  $F$  的方向由  $F$  与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴正向夹角  $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\gamma$  的余弦确定:

$$\cos\varphi = \frac{F_x}{F}, \quad \cos\theta = \frac{F_y}{F}, \quad \cos\gamma = \frac{F_z}{F}$$

上述结果表明汇交力系合成结果是一个力,也即这个力对物体的作用与原汇交力系等效。

## 2. 平衡的基本概念和关于平衡的基本原理

作用于物体的所有力的集合称为力系。一刚体在某个力系作用下相对于惯性参考系处于静止或等速直线运动状态,则称刚体处于平衡状态。使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系。

平衡必须相对于其周围某一参考物体而言才有意义。在静力学中,如不特别指明,所谓平衡是相对于地球而言的。

**原理 3** 作用于刚体上的两个力使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,其作用线在一条直线上。这一原理又称为二力平衡原理或二力平衡条件。

在建筑结构或各种机械中常常会遇到承受两个力的作用而处于平衡的各种形状的构件和零件,它们都必须满足二力平衡条件,这类构件或零件统称为二力构件。

**三力平衡汇交定理** 根据原理 2 和原理 3,可以得到三力平衡汇交定理,即三个不平行的力作用于刚体上,其平衡的必要和充分条件是,这三个力的作用线必汇交于一点。

## 3. 关于约束与约束力

物体间相互作用产生了力。要分析作用在一个物体上的力,必须明确与之发生作用的周围物体是以何种方式相互作用的。

物体间相互联系的方式总称为约束。当物体与周围物体有联系时,其运

动就会受到周围物体的限制,因此,约束又可以称为构成运动限制的物体。

约束力就是指约束作用于被约束物体上的作用力。

除约束力外物体所受的已知力均称为主动力,亦即引起物体运动的力,如重力、水压力、油压力、弹簧力和电磁力等。

通常情况下,约束力是由主动力引起的,所以约束力是一种未知的被动力。可见,作用在物体上的力可分为两大类:已知的主动力和未知的约束力。静力分析的首要任务便是由已知的主动力确定未知的约束力。

约束力与约束的物理性质以及接触方式有关。

根据约束的物理性质,约束可分为柔性和刚性两种。

#### (1) 柔性约束

柔性约束是指由绳、缆、皮带、链条等构成的约束,这类约束本身的物理性质决定它们只能承受拉伸。因此,它们对被约束的物体只能提供拉力。这样,约束力的方向(拉力)和作用线(沿着柔体)即可确定,未知的只是约束力的大小。

#### (2) 刚性约束

若约束本身为刚体,这种约束称为刚性约束。这时,约束力的方向和作用线与接触表面的光滑程度有关。接触表面光滑时,摩擦力的影响可以忽略不计,约束力将沿着接触面的法线方向。显然,当被约束物体与光滑表面接触位置为已知(如光滑面约束、活动铰支座约束等)时,约束力的方向和作用线是确定的;当被约束物体与光滑表面接触位置为未知(如光滑圆柱铰链、固定铰支座、轴承等约束)时,约束力一般用沿坐标轴方向的分力来表示。对于二力和三力构件,约束力的方向和作用线可通过二力平衡或三力平衡的条件来确定。

### 4. 物体受力分析

受力分析就是分析作用在物体上的所有力。分析物体受力时,除了应用上述有关约束力的概念外,还必须解决以下两个问题。

#### (1) 选择合适的研究对象

只有研究对象选择得合适,才能通过对研究对象所受力系平衡的分析,建立已知力与未知力之间的关系。

#### (2) 取隔离体

将研究对象从所研究的系统中隔离出来,以便突出所隔离出来的研究对象为受力体,而其周围物体为施力体。所隔离出来的研究对象称为隔离体。将主动力以及约束力(周围物体对隔离体的作用)以相应的力矢量表示,便得到隔离体的受力图。这样做,物体所受的力系一目了然,为进一步研究平衡问



题做好准备。

## 学习建议

1. 本章不仅是工程静力学的基础,而且是整个理论力学课程的基础,因而要给予特别的重视。

2. 要通过具体的练习,掌握受力分析的基本方法。取隔离体、画受力图时要特别注意以下几点。

- (1) 根据约束的性质确定约束力;
- (2) 注意分清施力体与受力体;
- (3) 在物体接触处要正确应用作用与反作用定律;
- (4) 要善于应用二力平衡与三力平衡原理。

3. 在以后的分析中,为了比较容易确定所要求的未知力,还要选择合适的研究对象,这一问题在第2章中还要详细讨论。

## 例题示范

**例 1-1** 杆  $AB$  在  $C$  点受重力  $W$  作用如图 1-1(a) 所示,试画出其受力图。

**解** (1) 分析约束类型

杆  $AB$  在  $A$ 、 $D$  处为光滑面约束,在  $E$  处为柔性约束。

(2) 画杆  $AB$  的受力图

由于杆在  $A$ 、 $D$  光滑面接触处约束力沿其公法线方向,因此在  $D$  处约束力垂直于杆的表面;在  $A$  处约束力垂直于与杆接触的约束表面;在  $E$  处柔性约束的约束力应沿柔体的方向,为拉力,于是杆的受力图如图 1-1(b) 所示。

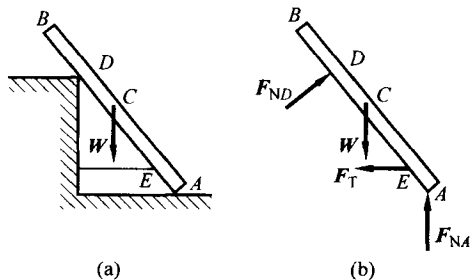


图 1-1 例 1-1 图