

L I L U N L I X U E

# 理论力学

(下册)

胡龙根 编著

同济大学出版社

# 理 论 力 学

下 册

胡龙根 编著

同济大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

理论力学. 下册/胡龙根编著. —上海:同济大学出版社, 2001. 8

ISBN 7-5608-2289-4

I. 理… II. 胡… III. 理论力学 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039058 号

## 理论力学 下册

作 者 胡龙根 编著

责任编辑 解明芳 责任校对 郁 峰 装帧设计 潘向慕

---

出 版 同济大学出版社  
发 行

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂印刷

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 18.125

字 数 522000

版 次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2289-4/O · 191

定 价 24.00 元

---

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

## 前 言

本书是按照国家教委新颁布的“高等学校工科理论力学课程教学基本要求(多学时)”,适当提高起点,减少与物理课程重复的内容,并根据编者长期从事理论力学教学所积累的经验编写而成。

本书每章分以下几个内容:

1. 内容提要 介绍本章主要内容、地位和重要性,学习要求,起到了了解全章概况作用。

2. 教材内容 叙述内容的标题简单、醒目,概括全文;叙述时层次分明,力求做到详细、通顺,并注意讲透重点,突破难点,抓住关键,总结规律;例题具有典型性、指导性和讨论性;例题分析着重于思考方法和一般步骤的分析,在讨论中着重于常见错误的分析,目的是培养读者分析问题和解决问题的能力。

3. 本章学习指导 分以下三部分:

1) 基本内容 内容条理化,公式表格化,便于记忆,可作总复习用;

2) 基本要求 归纳几点,简单、易记;

3) 学习指导 分阅读指导和解题指导两部分;

4. 复习思考题 抓住主要内容和基本概念,帮助复习全文,也有少量运用基本概念进行思考的习题;

5. 习题 分易、中、难三档,引伸内容的习题打“\*”,根据要求取舍;

6. 阶段测验作业和大考模拟试卷 供读者自测用。

由以上内容可看出,本书是一本将教学内容、例题与习题、学习指导、阶段测验作业融合在一起并便于自学的教材。这是编者的尝试,想通过本教材,对需要多得几个学分而没有时间听课或者想免修理论力学课程的读者进行自学有所帮助。

本书适用于高等工业学校土建、水利、道桥、地下工程等多学

时土建类专业作教材,也可供电视大学、高等职业学校、函授大学、网上远程教育同类专业的师生及自学考试和一般工程技术人员使用、参考。

在本书的编写过程中,同济大学继续教育学院、同济大学理学院工程力学系和理论力学教研室给予了大力支持和帮助,也得到了唐寿高教授的鼎力帮助和支持。杨兆光教授和吴锦如副教授对书稿进行了认真细致的审阅,并提出了许多修改意见,在此表示衷心的感谢。本教材中部分习题、例题选自伍云青、周能礼老师编著的《理论力学》一书,他们对本书提出了很好的意见,在此一并致谢。

限于编者水平,且编写时间仓促,错误与不妥之处,望读者不吝指正。

编者

2001年3月

GB 3100~GB 3102—93(量和单位)中规定的符号

主要符号表

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| $a, a_\tau, a_n$     | 加速度,切向加速度,法向加程度             |
| $a_a, a_c, a_r, a_c$ | 绝对、牵连、相对、科氏加速度              |
| $f_s, f_d$           | 静摩擦系数,动摩擦系数                 |
| $F$                  | 力,绳索拉力,杆端力(原符号为 $T$ 或 $S$ ) |
| $F_R$ 或 $F$          | 合力(原符号为 $R$ )               |
| $F_N$ 或 $F$          | 法向反力(原符号为 $N$ )             |
| $F_{Ax}, F_{Ay}$     | A 处铰支座反力(原符号为 $X_A, Y_A$ )  |
| $F_g$                | 惯性力                         |
| $I$                  | 冲量(原符号为 $S$ )               |
| $J$                  | 转动惯量(原符号为 $I$ )             |
| $L$                  | 动量矩                         |
| $m$                  | 质量                          |
| $M$                  | 力偶矩,力矩                      |
| $M_O(F)$             | 力 $F$ 对点 $O$ 的力矩            |
| $M_{gO}$             | 惯性力对点 $O$ 之矩                |
| $p$                  | 动量(原符号为 $K$ )               |
| $P$                  | 重力                          |
| $P$                  | 功率(原符号为 $N$ )               |
| $S$                  | 面积                          |
| $T$                  | 动能                          |
| $v, v_a, v_c, v_r$   | 速度,绝对、牵连、相对速度               |
| $V$                  | 势能,体积                       |
| $W$                  | 功                           |
| $\omega$             | 角速度                         |

|          |                        |
|----------|------------------------|
| $\alpha$ | 角加速度(原符号为 $\epsilon$ ) |
| $\eta$   | 效率                     |

## 内 容 提 要

全书分上、下两册出版。上册分两部分:第一部分为静力学,第二部分为运动学。下册为动力学,内容包括质点动力学的基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗伯原理、虚位移原理、拉氏方程、碰撞和单自由度系统的振动。

本书叙述详细,通俗易懂,例题较多,便于自学。每章开始有内容提要,每章结束有学习指导、复习思考题和习题,还有阶段测验作业,并附有习题参考答案。

本书可作为高等学校土建、水利、道桥等专业的理论力学多学时教材,也可用作电视大学、高等职业学校、函授大学、网上远程教育同类专业的教材,并可用作同等专业高等教育自学考试教材。

## 下册目录

前言

### 第三部分 动力学

|                  |      |
|------------------|------|
| 引言               | (1)  |
| 第九章 质点动力学的基本方程   | (3)  |
| 提要               | (3)  |
| 第一节 动力学的基本定律     | (3)  |
| 第二节 质点的运动微分方程    | (6)  |
| 第三节 质点动力学的两类基本问题 | (8)  |
| 本章学习指导           | (31) |
| 复习思考题            | (34) |
| 习题               | (36) |
| 第十章 动量定理         | (42) |
| 提要               | (42) |
| 第一节 动力学普遍定理概述    | (42) |
| 第二节 动量和冲量        | (44) |
| 第三节 动量定理         | (49) |
| 第四节 质心运动定理       | (68) |
| 本章学习指导           | (78) |
| 复习思考题            | (82) |
| 习题               | (84) |
| 第十一章 动量矩定理       | (93) |
| 提要               | (93) |

|               |                      |              |
|---------------|----------------------|--------------|
| 第一节           | 刚体对轴的转动惯量 .....      | (93)         |
| 第二节           | 动量矩 .....            | (108)        |
| 第三节           | 矩心为定点的动量矩定理 .....    | (111)        |
| 第四节           | 刚体的定轴转动微分方程 .....    | (129)        |
| 第五节           | 矩心为质心的动量矩定理 .....    | (139)        |
| 第六节           | 刚体的平面运动微分方程 .....    | (143)        |
| 本章学习指导 .....  |                      | (162)        |
| 复习思考题 .....   |                      | (170)        |
| 习题 .....      |                      | (173)        |
| 第六次测验作业 ..... |                      | (183)        |
| <b>第十二章</b>   | <b>动能定理 .....</b>    | <b>(185)</b> |
| 提要 .....      |                      | (185)        |
| 第一节           | 力的功 .....            | (185)        |
| 第二节           | 动能 .....             | (196)        |
| 第三节           | 动能定理 .....           | (200)        |
| 第四节           | 势力场与势能 机械能守恒定律 ..... | (223)        |
| 第五节           | 普遍定理的综合应用 .....      | (233)        |
| 本章学习指导 .....  |                      | (253)        |
| 复习思考题 .....   |                      | (261)        |
| 习题 .....      |                      | (263)        |
| 第七次测验作业 ..... |                      | (279)        |
| <b>第十三章</b>   | <b>达朗伯原理 .....</b>   | <b>(281)</b> |
| 提要 .....      |                      | (281)        |
| 第一节           | 达朗伯原理与惯性力 .....      | (281)        |
| 第二节           | 刚体惯性力系的简化 .....      | (294)        |
| 第三节           | 刚体转动时的动压力 .....      | (311)        |
| 本章学习指导 .....  |                      | (323)        |
| 复习思考题 .....   |                      | (328)        |
| 习题 .....      |                      | (331)        |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第八次测验作业               | (340) |
| <b>第十四章 虚位移原理</b>     | (342) |
| 提要                    | (342) |
| 第一节 有关概念              | (342) |
| 第二节 虚位移原理             | (353) |
| 第三节 用虚位移原理求约束反力       | (372) |
| 第四节 动力学普遍方程           | (386) |
| 本章学习指导                | (394) |
| 复习思考题                 | (399) |
| 习题                    | (401) |
| 第九次测验作业               | (411) |
| <b>第十五章 拉格朗日方程</b>    | (413) |
| 提要                    | (413) |
| 第一节 以广义力表示的质点系平衡条件    | (413) |
| 第二节 以势能表示平衡条件         | (420) |
| 第三节 拉格朗日方程            | (425) |
| 本章学习指导                | (440) |
| 复习思考题                 | (443) |
| 习题                    | (444) |
| <b>第十六章 碰撞</b>        | (449) |
| 提要                    | (449) |
| 第一节 碰撞现象              | (449) |
| 第二节 用于碰撞过程的基本定理       | (450) |
| 第三节 两球的对心正碰撞          | (452) |
| 第四节 碰撞对定轴转动刚体的作用·撞击中心 | (472) |
| 本章学习指导                | (477) |
| 复习思考题                 | (481) |
| 习题                    | (482) |
| <b>第十七章 单自由度系统的振动</b> | (487) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 提要.....             | (587) |
| 第一节 概述.....         | (587) |
| 第二节 无阻尼的自由振动.....   | (489) |
| 第三节 计算固有频率的能量法..... | (506) |
| 第四节 有阻尼的自由振动.....   | (512) |
| 第五节 无阻尼的强迫振动.....   | (522) |
| 第六节 有阻尼的强迫振动.....   | (533) |
| 第七节 隔振.....         | (540) |
| 本章学习指导.....         | (544) |
| 复习思考题.....          | (550) |
| 习题.....             | (552) |
| 第十次测验作业.....        | (560) |
| 模拟试卷(三).....        | (562) |
| 模拟试卷(四).....        | (565) |

# 第三部分 动力学

## 引 言

动力学是研究物体的运动与作用在物体上的力之间的关系。

在静力学中,只研究了作用于物体上的力系的简化和平衡问题,而没有讨论物体在不平衡力系的作用下将如何运动。在运动学中,仅从几何方面来描述物体的运动,而未涉及产生物体运动的原因——力或惯性。在动力学中,要把运动和力二者结合起来,不仅要分析物体的运动,而且还要分析产生运动的物体所受的力,从而建立物体机械运动的普遍规律。因此,从这个意义上讲,静力学和运动学是动力学的基础。

动力学的形成和发展与生产的发展有着密切的联系。特别是在现代工业和科学技术迅速发展的今天,对动力学提出了更加复杂的课题。例如,高速旋转机械的均衡、振动和稳定,动力基础的隔振与减振,高层建筑、大型桥梁及水坝受风载和地震的影响,宇宙飞行及火箭的推进技术,机器人的动态特性以及现代交通运输工具的操纵性、稳定性和舒适性等等问题,都与动力学密切相关。因此,掌握动力学的基本理论、分析方法及其应用,对于解决工程实际问题具有十分重要的意义。

动力学中的力学模型有质点、刚体和质点系。

质点是指具有一定质量而几何形状和尺寸大小可以忽略不计的物体。例如,研究人造地球卫星的运行轨道时,卫星的形状和大小对所研究的问题没有影响,可以忽略不计,可将卫星抽象为一个质量集中在重心的质点。

刚体是指受力以后不变形的物体。当物体的大小不能忽略,

但可以略去变形的影响时,可将该物体抽象为刚体。例如,研究人造地球卫星绕其质心的运动时,就可将卫星抽象成刚体。

质点系是指有限或无限个相互间有联系的质点所组成的系统,简称质系。常见的质点系有固体、流体、由几个物体组成的机构以及太阳系等等。刚体是质点系的一种特殊例子,又称不变的质点系。

动力学可分为质点动力学和质点系动力学。我们重点研究质点系动力学,但研究质点动力学是研究质点系动力学的基础。

由动力学任务可知,它要研究以下两个基本问题:

- (1) 已知物体的运动规律,求作用在该物体上的力;
- (2) 已知作用于物体上的力,求该物体产生什么样的运动。

为解决这两个基本问题,本书将介绍求解动力学的五种方法。

即

- (1) 牛顿第二定律及其微分形式;
- (2) 动力学普遍定理,它包括动量定理、动量矩定理和动能定理;
- (3) 动静法即应用达朗伯原理求解动力学问题。从某种意义上讲,它是牛顿定律的另一种形式;
- (4) 动力学普遍方程;
- (5) 拉格朗日方程。

前三种方法是建立在牛顿定律基础上的,称为牛顿力学(或矢量力学),后两种方法是建立在虚位移原理和达朗伯原理的基础上,称为分析力学。牛顿力学和分析力学都有各自的特点。但是,它们的基本原理都是相互贯通的,二者都属于经典力学的范畴。

## 第九章 质点动力学的基本方程

### 提 要

1. 本章将介绍求解动力学问题的第一种方法——质点动力学的基本方程及其三种微分形式；
2. 牛顿三定律及其适用范围；
3. 动力学基本定律，又称牛顿三定律，是动力学也是整个理论力学的理论基础；
4. 动力学的两类基本问题，第一类问题是本章的重点。

### 第一节 动力学的基本定律

#### 一、牛顿三定律

质点动力学是牛顿力学中最简单、最基本的部分，它是进一步研究质点系、刚体和刚体系统等更复杂的研究对象的理论基础。质点动力学的基础是三个基本定律，它是牛顿在总结前人特别是伽利略的研究成果基础上提出来的，称为牛顿三定律，也称动力学基本定律。

#### 第一定律 惯性定律

不受力作用的质点，将保持静止或作匀速直线运动。不受力作用的质点（包括受平衡力系作用的质点），不是处于静止状态，就是保持其原有的速度（包括大小和方向）不变，这种性质称为惯性。所以第一定律又称惯性定律。这个定律首先说明了任何质点具有惯性，其次说明了任何质点的运动状态的改变，必定是受到其他物体的作用。这种机械作用就是力。

## 第二定律 力与加速度之间的关系的定律

质点的质量与加速度的乘积,等于作用于质点的力的大小,加速度的方向与力的方向相同,即

$$ma = F \quad (9-1)$$

式(9-1)是第二定律的数学表达式,它是质点动力学的基本方程,它建立了质点的加速度、质量与作用力之间的定量关系。当质点受到多个力作用时,式(9-1)中的  $F$  应为此汇交力系的合力。式(9-1)表明:

(1) 它是矢量式。质点的加速度矢  $a$  与力矢  $F$  的方向相同。

(2) 力与加速度的关系是瞬时关系。即只要某瞬时有力作用于质点,则在该瞬时质点必有确定的加速度。

(3) 要改变质点的运动状态,必须要有力作用于该质点上;若没有力作用于质点,质点就没有加速度。此时质点的速度是一个常矢量,即质点作惯性运动。

(4) 在相同的力的作用下,质量愈大的质点产生的加速度愈小,或者讲,质点的质量愈大,保持惯性运动的能力愈强。因此,质量  $m$  是质点惯性的度量。

在地球表面,任何物体都受到重力  $P$  的作用。在重力作用下得到的加速度称为重力加速度,用  $g$  表示。根据第二定律,有

$$P = mg \quad (9-2)$$

物体的质量是不变的,但在地面上各处的重力加速度的值  $g$  却略有不同,即物体的重量在地面上各处稍有差异。根据国际计量委员会规定的标准,重力加速度的数值为  $9.80665\text{m/s}^2$ ,一般取  $9.8\text{m/s}^2$ 。

在国际单位制中,质量、长度和时间的单位是基本单位,分别为:kg(千克),m(米)和s(秒);力的单位是导出单位。规定能使质量为1kg的质点获得  $1\text{m/s}^2$  的加速度的力,作为力的单位,用基本

单位表示为千克米每二次方秒( $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ),称为牛[顿](N),即

$$1\text{N} = 1\text{kg} \times 1\text{m}/\text{s}^2$$

在工程单位制中,长度、时间和力的单位是基本单位,质量的单位是导出单位。并把1千克(kg)质量的质点所受的重力作为力的单位,称为1公斤力(kgf)。上述两种单位的换算关系为

$$1\text{kgf} = 9.8\text{N}$$

### 第三定律 作用与反作用定律

两物体间的作用力与反作用力总是大小相等,方向相反,沿着同一条直线,且分别作用在这两个物体上。这一定律就是静力学的公理四,它不仅适用于平衡的物体,而且也适用于任何运动的物体。在动力学问题中,这一定律仍然是分析两个物体相互作用关系的依据。

### 二、牛顿定律适用范围

必须指出,质点动力学的三个基本定律是在观察天体运动和生产实践中的一般机械运动的基础上总结出来的,因此,它只在一定范围内适用。三个定律适用的参考系称为惯性参考系。实际上,绝对的惯性参考系是不存在的。在一般的工程问题中,把固结于地面的坐标系或相对于地面作匀速直线平动的坐标系作为惯性参考系(习惯上又称为固定参考系或静参考系)。只是对于某些必须考虑地球自转的影响的问题,如研究人造卫星的轨道、洲际导弹的弹道等问题时,取以地心为原点,三轴指向三个恒星的坐标系作为惯性参考系。又如在研究天体的运动而地心的运动影响也不可忽略时,可取太阳为中心,三轴指向三个恒星的坐标系作为惯性参考系。在本书中,无特别说明,均取固定在地球表面的坐标系为惯性参考系。

以牛顿三定律为基础的力学,称为古典力学。在古典力学范畴内,认为质量是不变的量,空间和时间是“绝对的”,与物体的运动无关。近代物理已经证明,质量、时间和空间都与物体运动的速度