

普通高等教育规划教材

# 理论力学

(I)

蔡泰信 和兴锁 编著

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

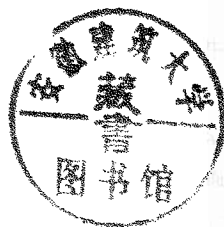


普通高等教育规划教材

# 理论力学

(I)

蔡泰信 和兴锁 编著



机械工业出版社

全书分为两册。第Ⅰ册包括静力学，运动学，动力学的基本内容；第Ⅱ册为动力学的专题部分，可供不同专业选用。

本书的体系完整，推理严谨，叙述恰当，详简适度，理论联系实际，具有通用性。书中相应知识点处附有思考题，便于学生深入理解并拓展所学知识。章末附有知识结构框图，便于学生系统总结所学知识。章后附有习题和答案，便于教学和自学。

本书可作为高等学校工科各专业的理论力学教材，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 (I) / 蔡泰信, 和兴锁编著. —北京: 机械工业出版社, 2004.6

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14409-0

I. 理… II. ①蔡…②和… III. 理论力学 - 高等学校 - 教材  
IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 040365 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 季顺利 版式设计: 冉晓华 责任校对: 陈延翔

封面设计: 姚毅 责任印制: 施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·13 印张·503 千字

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

## 前 言

本书是根据教育部理论力学课程教学基本要求，应机械工业出版社的约请，在西北工业大学理论力学课程教学实践和历年来编写出版的理论力学教材的基础上进行编写的。

为了适应 21 世纪本课程的教学需要，我们认真分析和研究了国内外教材的特点，充分利用学生已有的数学和物理学知识，适当提高了教材的起点，部分地改变了本课程原有的体系。力求保持本课程体系的完整性，定理证明和逻辑推理的严谨性；力求思路清晰，叙述恰当，详简适度，富有启发性；注重培养读者分析问题和解决问题的能力，坚持理论联系实际和加强了各专业的通用性。既适用于课堂教学，又便于自学。

本书分为两册。第 I 册包括静力学、运动学和动力学的基本内容，一般中、少学时专业只用第 I 册即可。第 II 册为动力学的专题部分，它包括碰撞、虚位移原理、动力学普遍方程、拉格朗日方程、二自由度系统的振动和刚体动力学等专题，各专业可根据需要选用。全书每章穿插有思考题，每章末附有知识结构框图和习题，书末附有习题答案和中英文名词对照表。引伸和加选内容用“\*”号标出。

本书可作为高等学校工科各专业的理论力学教材，也可供有关工程技术人员参考。

全书由蔡泰信、和兴锁教授编著，贾振波教授审阅。在编写过程中，曾参阅了兄弟院校的有关教材、专著和文献，并得到许多教师和机械工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢。

由于作者的水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

## 主要符号表

$a$ 加速度	$I_{xy}$ 刚体对轴 $x$ 和 $y$ 的惯性积
$a_a$ 绝对加速度	$I_{yz}$ 刚体对轴 $y$ 和 $z$ 的惯性积
$a_r$ 相对加速度	$I_{zx}$ 刚体对轴 $z$ 和 $x$ 的惯性积
$a_e$ 牵连加速度	$i_{12}$ 主动轮 1 对从动轮 2 的传动比
$a_k$ 科氏加速度	$k$ 弹簧的刚度系数, 曲率
$a_C$ 质心加速度	$K$ 质点系的动量
$a_n$ 法向加速度	$l$ 力偶矩, 长度
$a_t$ 切向加速度	$l$ 力偶矩矢
$a_{At}$ 质点 $A$ 的切向加速度	$L$ 拉格朗日函数, 力偶矩
$a_{An}$ 质点 $A$ 的法向加速度	$L$ 合力偶矩矢
$a_{MO}^t$ 动点 $M$ 绕基点 $O$ 相对转动的切向加速度	$L_O$ 力系对简化中心 $O$ 的主矩
$a_{MO}^n$ 动点 $M$ 绕基点 $O$ 相对转动的法向加速度	$L_{OQ}$ 惯性力系对点 $O$ 的主矩
$A$ 自由振动的振幅, 面积	$m$ 质点的质量
$C$ 重心, 速度瞬心	$m_O(\mathbf{F})$ 力 $\mathbf{F}$ 对点 $O$ 的矩
$dr$ 实位移	$m_O(\mathbf{F})$ 力 $\mathbf{F}$ 对点 $O$ 的矩矢
$d'W$ 元功	$m_x(\mathbf{F}), m_y(\mathbf{F}), m_z(\mathbf{F})$ 力 $\mathbf{F}$ 对轴 $x, y, z$ 的矩
$e$ 碰撞恢复因数	$m_O(m\mathbf{v})$ 质点的动量 $m\mathbf{v}$ 对点 $O$ 的动量矩
$F$ 外力, 作用力, 摩擦力	$m_x(m\mathbf{v}), m_y(m\mathbf{v}), m_z(m\mathbf{v})$ 质点对点 $O$ 的动量矩 $m_O(m\mathbf{v})$ 在轴 $x, y, z$ 上的投影
$F_x, F_y, F_z$ 作用力 $F$ 在轴 $x, y, z$ 上的投影	$M$ 质点系的质量
$f$ 静滑动摩擦因数, 振动频率	$n$ ( $=\frac{\mu}{2m}$ ) 阻尼系数
$f'$ 动滑动摩擦因数	$N$ 约束反力或约束力
$F_{\max}$ 最大静滑动摩擦力	$N_x, N_y, N_z$ 约束反力 $N$ 在轴 $x, y, z$ 上的投影
$G$ 重力	$O$ 坐标系原点
$g$ 重力加速度	$p$ 固有 (圆) 频率
$H_O$ 质点系对点 $O$ 的动量矩	$P$ 功率
$H_x, H_y, H_z$ 质点系对点 $O$ 的动量矩 $H_O$ 在轴 $x, y, z$ 上的投影	$Q$ 惯性力
$i, j, k$ 沿正交轴 $x, y, z$ 的单位矢量	$Q_j$ 对应于第 $j$ 个广义坐标的广义力
$I_x, I_y, I_z$ 刚体对轴 $x, y, z$ 的转动惯量	

- $Q_e$  牵连惯性力  
 $Q_k$  科氏惯性力  
 $q$  载荷集度, 广义坐标  
 $\mathbf{R}$  合力, 阻力  
 $R_x, R_y, R_z$  合力  $\mathbf{R}$  在轴  $x, y, z$  上的投影  
 $\mathbf{R}_Q$  惯性力系的主矢  
 $r$  半径  
 $\mathbf{r}$  矢径  
 $s$  弧坐标  
 $S$  冲量, 碰撞冲量, 杆的内力  
 $T$  质点系的动能  
 $T$  拉力  
 $t$  时间  
 $\mathbf{u}$  质点的速度  
 $V$  质点系的势能  
 $\mathbf{v}$  质点的速度  
 $\mathbf{v}_a$  绝对速度  
 $\mathbf{v}_e$  牵连速度  
 $\mathbf{v}_r$  相对速度  
 $\mathbf{v}_C$  质心速度  
 $\mathbf{v}_{MO}$  动点  $M$  绕基点  $O$  相对转动的速度  
 $W$  力的功  
 $x, y, z$  直角坐标  
 $x_C, y_C, z_C$  质心的直角坐标  
 $z$  频率比  
 $\omega$  ( $\boldsymbol{\omega}$ ) 角速度 (角速度矢), 激振力频率  
 $\omega_a$  绝对角速度  
 $\omega_e$  牵连角速度  
 $\omega_r$  相对角速度  
 $\varepsilon$  ( $\boldsymbol{\varepsilon}$ ) 角加速度 (角加速度矢)  
 $\varepsilon_a$  绝对角加速度  
 $\varepsilon_e$  牵连角加速度  
 $\varepsilon_r$  相对角加速度  
 $\tau$  振动周期, 时间间隔  
 $\rho$  曲率半径, 密度  
 $\varphi$  初相角  
 $\varphi_m$  摩擦角  
 $\eta$  机械效率  
 $\delta \mathbf{r}$  虚位移  
 $\delta W$  虚功  
 $\beta$  放大率 (放大因数)  
 $\mu$  粘滞阻力系数  
 $\zeta$  阻尼比  
 $\delta$  弹簧变形, 变分符号, 滚阻系数, 对数减缩率  
 $\delta_s$  弹簧静变形, 静伸长  
 $\Phi$  附加推力

# 目 录

前言

主要符号表

绪论 ..... 1

## 第一篇 静 力 学

引言

### 第 1 章 静力学的基本概念和物体的受力分析

1.1 刚体·力 .....	4
1.2 静力学公理 .....	4
1.3 约束和约束力 .....	6
1.4 受力分析和受力图 .....	11
知识结构框图 .....	15
习题 .....	15

### 第 2 章 共点力系和力偶系

2.1 共点力系合成与平衡的几何法 .....	19
2.2 力的投影·力沿坐标轴的分解 .....	20
2.3 共点力系合成与平衡的解析法 .....	22
2.4 力偶及其性质 .....	27
2.5 力偶系的合成与平衡 .....	29
知识结构框图 .....	33
习题 .....	34

### 第 3 章 任意力系

3.1 力对点的矩和力对轴的矩 .....	38
3.2 空间任意力系的简化·主矢和主矩 .....	42
3.3 空间任意力系的合成·合力矩定理 .....	45
3.4 空间任意力系的平衡 .....	48
3.5 平面任意力系的平衡 .....	49
知识结构框图 .....	59
习题 .....	61

## 第4章 物体系的平衡

4.1 静定问题与静不定问题的概念 .....	68
4.2 物体系的平衡 .....	69
4.3 物体系平衡问题的解题步骤和要点 .....	76
4.4 简单平面桁架的内力计算 .....	76
4.5 重心 .....	80
知识结构框图 .....	86
习题 .....	87

## 第5章 摩擦

5.1 滑动摩擦 .....	92
5.2 考虑滑动摩擦时的平衡问题 .....	94
5.3 滚动摩阻的概念 .....	102
知识结构框图 .....	104
习题 .....	105

# 第二篇 运 动 学

## 引言

## 第6章 点的运动学和刚体的基本运动

6.1 点的运动的矢量法 .....	111
6.2 点的运动的直角坐标法 .....	112
6.3 点的运动的自然法 .....	114
6.4 刚体的平动 .....	124
6.5 刚体的定轴转动 .....	126
6.6 角速度和角加速度的矢量表示法·刚体内各点的速度和加速度的矢积表示法 .....	131
知识结构框图 .....	134
习题 .....	137

## 第7章 点的复合运动

7.1 基本概念 .....	140
7.2 点的速度合成定理 .....	143
7.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理 .....	147
7.4 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成定理 .....	152
知识结构框图 .....	161
习题 .....	161



## 第 8 章 刚体的平面运动

8.1 刚体的平面运动方程 .....	168
8.2 平面运动的分解 .....	169
8.3 用基点法求平面图形内各点的速度 .....	170
8.4 用瞬心法求平面图形内各点的速度 .....	174
8.5 平面图形内各点的加速度 .....	179
* 8.6 刚体绕平行轴转动的合成 .....	184
8.7 运动学综合应用举例 .....	189
知识结构框图 .....	200
习题 .....	201

## 第三篇 动力学

### 引言

## 第 9 章 质点动力学

9.1 动力学基本定律 .....	209
9.2 质点运动微分方程 .....	210
9.3 质点动力学的基本问题 .....	211
9.4 质点相对运动微分方程 .....	219
知识结构框图 .....	223
习题 .....	224

## 第 10 章 质点的振动

10.1 概述 .....	227
10.2 质点的无阻尼自由振动 .....	228
10.3 质点的衰减振动 .....	232
10.4 质点的强迫振动 .....	238
知识结构框图 .....	247
习题 .....	249

## 第 11 章 动能定理

11.1 动力学普遍定理概述 .....	253
11.2 力的功 .....	253
11.3 动能 .....	260
11.4 动能定理 .....	262
11.5 功率·功率方程 .....	270
11.6 势力场·势能·机械能守恒定理 .....	272

知识结构框图 .....	277
习题 .....	278
<b>第 12 章 动量定理</b>	
12.1 动量 .....	285
12.2 动量定理 .....	287
12.3 冲量定理 .....	292
12.4 质心运动定理 .....	294
* 12.5 变质量质点的运动微分方程 .....	299
知识结构框图 .....	304
习题 .....	305
<b>第 13 章 动量矩定理</b>	
13.1 动量矩 .....	310
13.2 动量矩定理 .....	312
13.3 刚体定轴转动微分方程 .....	317
13.4 相对于动矩心的动量矩定理·相对于质心的动量矩定理 .....	320
13.5 刚体平面运动微分方程 .....	322
* 13.6 陀螺力矩和陀螺效应 .....	326
13.7 动力学普遍定理综合应用举例 .....	328
知识结构框图 .....	334
习题 .....	335
<b>第 14 章 达朗伯原理和动静法</b>	
14.1 达朗伯原理 .....	341
14.2 惯性力系的简化 .....	342
14.3 动静法的应用举例 .....	345
14.4 定轴转动刚体对轴承的动压力 .....	352
知识结构框图 .....	356
习题 .....	358
<b>附录</b>	
附录 A 转动惯量 .....	363
附录 B 相对于速度瞬轴的动量矩定理 .....	374
附录 C 习题答案 .....	376
附录 D 中英文名词对照表 .....	389
Synopsis .....	398
<b>参考文献</b> .....	399

# Contents

## Preface

## List of Symbols

## Introduction ..... 1

## Part 1 STATICS

### Introduction

### Chapter 1 Fundamental Concepts of Statics and Free-body Diagram

1.1 Rigid Body·Force .....	4
1.2 Axioms of Statics .....	4
1.3 Constraints and Reactions of Constraint .....	6
1.4 Analysis of Forces and Free-body Diagram .....	11
Frame of Knowledge .....	15
Exercises .....	15

### Chapter 2 Concurrent Force Systems and Couple Systems

2.1 Geometrical Method of Resultant and Equilibrium of Concurrent Force Systems .....	19
2.2 Projection of Forces·Resolution of Forces in Coordinate Axes .....	20
2.3 Analytical Method of Resultant and Equilibrium of Concurrent Force Systems .....	22
2.4 Couple and its characteristics .....	27
2.5 Resultant and Equilibrium of Couple Systems .....	29
Frame of Knowledge .....	33
Exercises .....	34

### Chapter 3 General Force Systems

3.1 Moment of Force about a Point and about an Axis .....	38
3.2 Reduction of General Spatial Force System·Principal Vector and Principal Moment ...	42
3.3 Resultant of General Spatial Force System·Theorem of the Moment of a Resultant ...	45
3.4 Equilibrium of General Spatial Force System .....	48
3.5 Equilibrium of General Plane Force System .....	49
Frame of Knowledge .....	59
Exercises .....	61

**Chapter 4 Equilibrium of Body System**

4.1 Concepts of Statics Determinable and Indeterminable Problems ..... 68  
 4.2 Equilibrium of Body Systems ..... 69  
 4.3 Solution Steps and Keys of Equilibrium Problems of Body System ..... 76  
 4.4 Calculation of Internal Forces of Simple Plane Truss ..... 76  
 4.5 Center of Gravity ..... 80  
 Frame of Knowledge ..... 86  
 Exercises ..... 87

**Chapter 5 Friction**

5.1 Sliding Friction ..... 92  
 5.2 Equilibrium Problem of the Body with Friction ..... 94  
 5.3 Concept of Rolling Resistance ..... 102  
 Frame of Knowledge ..... 104  
 Exercises ..... 105

**Part 2 KINEMATICS**

Introduction

**Chapter 6 Kinematics of a Particle and Fundamental Motion of Rigid Bodies**

6.1 The Vector Method of Kinematics of a Particle ..... 111  
 6.2 The Rectangular Coordinating Method of Kinematics of a Particle ..... 112  
 6.3 The Natural Method of Kinematics of a Particle ..... 114  
 6.4 Translation of a Rigid Body ..... 124  
 6.5 Rotation of a Rigid Body about a Fixed-axis ..... 126  
 6.6 Vector Form of Angular Velocity and Angular Acceleration·Vector Product  
 Expressions of the Velocity and Acceleration of the Points of a Rigid Body ..... 131  
 Frame of Knowledge ..... 134  
 Exercises ..... 137

**Chapter 7 Resultant Motion of a Particle**

7.1 Fundamental Concepts ..... 140  
 7.2 Theorem of Composition of the Velocities of a Particle ..... 143  
 7.3 Theorem of Composition of the Acceleration of a Particle in Translational  
 Motion of Transport ..... 147  
 7.4 Theorem of Composition of the Acceleration of a Particle in Rotation about a Fixed-axis  
 of Transport ..... 152

Frame of Knowledge .....	161
Exercises .....	161

**Chapter 8 Plane Motion of a Rigid Body**

8.1 Equations of plane Motion of a Rigid Body .....	168
8.2 Resolution of Plane Motion .....	169
8.3 Determination of the Velocity of the Points of a Body by the Pole Method .....	170
8.4 Determination of the Velocity of the Points of a Body by the Instantaneous Center of Zero Velocity .....	174
8.5 Determination of the Acceleration of the Points of a Body by the Pole Method .....	179
* 8.6 Resultant Motion of a Rigid Body about Parallel axes .....	184
8.7 Illustrations of the Synthetic Application of Kinematics .....	189
Frame of Knowledge .....	200
Exercises .....	201

**Part 3 DYNAMICS**

Introduction

**Chapter 9 Particle Dynamics**

9.1 Fundamental Laws of Dynamics .....	209
9.2 Differential Equations of Motion for a Particle .....	210
9.3 Fundamental Problems of Particle Dynamics .....	211
9.4 Differential Equations of Relative Motion for a Particle .....	219
Frame of Knowledge .....	223
Exercises .....	224

**Chapter 10 Linear Vibration of a Particle**

10.1 Introduction .....	227
10.2 Free Vibration Neglecting Resisting Forces of a Particle .....	228
10.3 Damped Vibration of a Particle .....	232
10.4 Forced Vibration of a Particle .....	238
Frame of Knowledge .....	247
Exercises .....	249

**Chapter 11 Theorem of Kinetic Energy**

11.1 Summary of Generalized Theorems of Dynamics .....	253
11.2 Work Done by Forces .....	253
11.3 Kinetic Energy .....	260

11.4	Theorem of Kinetic Energy .....	262
11.5	Power•Power Equation .....	270
11.6	Potential Force Field•Potential Energy•the Law of Conservation of Mechanical Energy .....	272
	Frame of Knowledge .....	277
	Exercises .....	278

## Chapter 12 Theorem of Linear Momentum

12.1	Linear Momentum .....	285
12.2	Theorem of Linear Momentum .....	287
12.3	Theorem of Impulse .....	292
12.4	Theorem of the Motion of the Mass Center of a Particle System .....	294
* 12.5	Differential Equations of Motion of a Particle with Variable Mass .....	299
	Frame of Knowledge .....	304
	Exercises .....	305

## Chapter 13 Theorem of Angular Momentum

13.1	Angular Momentum .....	310
13.2	Theorem of Angular Momentum .....	312
13.3	Differential Equation of Rotation of Rigid Body about a Fixed-axis .....	317
13.4	Theorem of Angular Momentum about a Moving Point Theorem of Angular Momentum about the Mass Center of a Particle System .....	320
13.5	Differential equations of Plane Motion of a Rigid Body .....	322
* 13.6	Gyroscopic Moment and Gyroscopic Effect .....	326
13.7	Illustrations of the Synthetic Application of Generalized Theorems of Dynamics .....	328
	Frame of Knowledge .....	334
	Exercises .....	335

## Chapter 14 D'Alembert's Principle and Method of Dynamic Statics

14.1	D'Alembert's Principle .....	341
14.2	Reduction of Inertia Force System .....	342
14.3	Illustration of the Application of Method of Dynamic Statics .....	345
14.4	Dynamic Reactions on the Bearing of a Rotating Rigid Body about a Fixed-axis .....	352
	Frame of Knowledge .....	356
	Exercises .....	358

## Appendix

Appendix A	Moment of Inertia .....	363
------------	-------------------------	-----

Appendix B	Theorem of Angular Momentum about Instantaneous Axis of Velocity .....	374
Appendix C	Key to Exercises .....	376
Appendix D	Contrastive Table of Chinese-English Terms .....	389
<b>Synopsis</b>	.....	<b>398</b>
<b>References</b>	.....	<b>399</b>

# 绪 论

## 1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

所谓机械运动，是指物体在空间的位置随时间而发生的改变。它是人们在日常生活和生产实践中最常见的一种运动。但是，机械运动只是物质运动的最简单的一种形式。除机械运动外，物质还有表现为发热、发光、电磁现象、化学过程，甚至人们头脑的思维活动等多种不同的运动形式。

在高等工科院校，理论力学是一门理论性较强的技术基础课。本课程所研究的内容，属于经典力学范围，它是一门成熟的科学。这门力学课程的基本定律早已由伽利略提出，并由牛顿精确地归纳为完备的形式。实践证明，理论力学在当今一般工程技术（例如机械、土建、航空与航天技术等）中得到极其广泛应用。但是，经典力学的应用范围也有局限性。它不适用于速度接近于光速的宏观物体的运动，也不适用于微观粒子的运动。由于一般工程技术中宏观物体的速度远小于光速（ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ），因此一般所遇到的力学问题仍广泛应用经典力学来研究。

本书按照教育部理论力学教学的基本要求和教学大纲，系统叙述本课程的全部内容，包括理论力学的基本概念、基本理论、基本计算方法及其在工程中的典型应用。本课程的内容包括以下三部分。

**静力学：**研究物体机械运动的特殊情形，主要研究物体受力作用时处于平衡的条件，同时也研究物体的受力分析方法，力系的简化和合成等。

**运动学：**撇开引起物体运动的原因，只从几何观点描述物体运动的方式及其特征（如运动规律、速度和加速度等）。

**动力学：**研究物体运动状态的变化与其作用力之间的关系。

本书在物理学知识的基础上，全面深入地研究物体机械运动的一般规律及其在一般工程中的应用。

## 2. 学习理论力学的目的

(1) 理论力学是现代工程技术的理论基础，是工程技术人员必备的知识。实际工程中一般都会遇到与机械运动有关的问题，其中有些问题可以直接应用理论力学的理论和方法去解决，有些比较复杂的问题，则需要结合其他专门知识共同来解决。

(2) 理论力学的知识是后继课程的必备基础。例如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、流体力学、飞行力学、振动理论、弹塑性力学、断裂力学以



及许多专业课程，都要以理论力学为基础。

随着现代科学技术的迅速发展，力学正在越来越多地渗入到其他学科领域，从而形成一系列新的现代学科，例如生物力学、电磁流体力学、物理力学、系统力学和工程控制等。

(3) 理论力学的研究方法，与其他学科的研究方法有很多相似之处，并具有一定的典型性。因此，掌握理论力学的研究方法，不仅有助于学好本门课程，而且有助于学习其他课程或学科；有助于培养学生的辩证唯物主义世界观；本课程通过对物体进行受力分析和运动分析，特别有助于培养和提高学生分析问题和解决问题的能力，这是学过本课程的学生的普遍体会。