

■ 高等学校理工科力学类规划教材

理论力学

(第五版)

THEORETICAL MECHANICS

编著 李心宏 等

修订 易 平 黄丽华 姜 峰



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

■ 高等学校理工科力学类规划教材

理论力学

(第五版)

THEORETICAL MECHANICS

编著 李心宏 等

修订 易 平 黄丽华 姜 峰



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/李心宏等编著. —5版. —大连:大连理工大学出版社, 2008. 8

ISBN 978-7-5611-4388-9

I. 理… II. 李… III. 理论力学-高等学校-教材 IV. O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 126705 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116024

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail: dutp@dutp. cn URL: <http://www.dutp. cn>

大连华伟印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:29.25 字数:673 千字

1994 年 1 月第 1 版

2008 年 8 月第 5 版

2008 年 8 月第 5 次印刷

责任编辑:梁 锋 唐立敏

责任校对:知 轩

封面设计:宋 蕾

ISBN 978-7-5611-4388-9

定 价:43.80 元

本书由

大连理工大学教材出版基金
大连理工大学土木水利学院

资助出版

The published book is sponsored by

The Publishing Text books

Foundation of the Dalian University of
Technology

and

School of civil and Hydraulic Engineering
of Dalian University of Technology

第1版前言

本书是根据国家教委1987年颁布的“高等工业学校理论力学课程教学基本要求”编写,经大连理工大学土木系1987~1992级6届学生试用。在6年的试用过程中,使用教材的师生,对教材作了充分的肯定,对教材不足之处,也提出了意见,在教学的实践中,编者均一一作了修改。经不断加工、修改,使教材日臻完善。1988~1989学年,本教材获校优秀教材奖。

本书分为三篇。第一篇为静力学,第二篇为运动学,第三篇为动力学。教材注意解决了理论力学与物理力学部分重复的问题;注意解决“做题难”的问题。例题和习题题目类型较全,全书共有180个例题(其中静力学42,运动学40,动力学98);450个习题(其中静力学146,运动学112,动力学192)。每章后附有小结,小结中特别加上题目类型(静力学为做题思路)、解题步骤等内容,习题后附有答案。本教材方便学生自学;在考虑一般性的基础上,尽量体现土木、水利类专业的特色;还注意了与前面数学、物理课以及后续课材料力学、结构力学、水力学等课程的衔接;力求以辩证唯物主义的认识论与方法论作为指导;在保证“基本要求”的前提下,体系和章节作了部分调整(详见目录)。

本教材汲取了兄弟院校教材的宝贵经验,参考了哈尔滨工业大学、河海大学、同济大学等院校出版的理论力学教材;参考了李心宏编写的《理论力学解题指导》(1983年由甘肃人民出版社出版)、李心宏编《分析力学》讲义(校内印刷)。本教材尽量把编者几十年的教学经验与体会浸透在教材之中。本书由李心宏、王增新同志编著,参加工作的有姜峰、李彤等同志。第一篇由王增新主笔,第二篇与第三篇由李心宏主笔,全书由李心宏统稿。沈阳建工学院赵金元、孙哲审阅了教材,并提出许多宝贵的意见。因此,这本教材的出版乃是集体劳动与智慧的结晶。在本书出版过程中还得到发科同志的鼎力支持,得到全体师生和各位同行的关心和协助,在此表示衷心的感谢。

欢迎在教材的使用过程中,对本教材提出批评和指正。

编者

1993年7月

第1版序

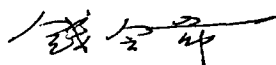
李心宏、王增新编著的《理论力学》，具有例题与习题类型比较全，有利于教学、方便自学、讲解和演习的步骤与思路清晰明确、理论联系实际比较好，具有土木、水利专业特色，符合人们认识的正常规律等特点。

本书曾在大连理工大学土木系1987至1992年六届学生中试用，1988～1989年度，曾获校优秀教材奖。通过六年的教学实践，不断加工、修改，使其日臻完善。

本书汲取了兄弟院校教材的先进经验，也凝聚了编者的丰富教学经验与成果。

《理论力学》这门课理论体系完整，逻辑思维严密。但是，学过《理论力学》的学生常常反映：“一听就懂，一做题就不会！”、“公式一大套，做起题来对不上号！”。这些反映，暴露出教与学的矛盾。学生们是学过了高中和大学物理课中的力学，再学理论力学课的。如果教后不能在理论与应用的联系上下功夫，难免会感到内容重复，听起来容易，做起习题来却难以下手了。理论力学是工程教育的重要基础课，做习题是为了锻炼理论联系实际的能力，也是学好理论力学的标志。

李心宏老师热爱教学工作，三十多年来孜孜不倦地从事理论力学的教学，认真负责，深受同学们欢迎和爱戴。经过探索和实践，积累了很多经验。这次和王增新同志合编了这本教材，深信此书一定能在教学改革中起到良好的作用。



1993年8月

第3版序

李心宏教授等编著与修订的《理论力学》教材,含理论力学的基础理论、分析力学基础及碰撞、振动等专题内容。体系完整、逻辑思维严密、叙述严谨又生动、深入浅出又通俗易懂,例题与习题类型全,解题思路与作题步骤明确,符合认知规律,便于学生学习与掌握。该书共出两版,出版前后,在大连理工大学土木水利学院、船舶学院、工程力学系共17届4000余师生使用,受到师生的青睐与好评。第二版得到了大连市人民政府和大连理工大学教材出版基金的资助。

1994年第一版出版前,我审阅了书稿,并为该书做序;2001年第二版出版前,我第二次审阅了全书;2004年8月拟出第三版,我进行了第三次审阅。

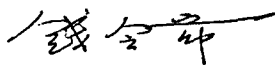
这部教材,在解决理论力学多年存在的“起点低,与物理力学篇重复”,“一听就懂,一做题就不会”,“公式一大套,做起题来对不上号!”等问题上下了工夫,并取得了一定的成效,是一本难得的集教材、解题指导和习题于一体的好教材。该书不仅注重知识的传授,而且重视教授的方法;不仅可供学生使用,对教师与工程技术人员也具有参考价值。该书文字流畅,图文并茂,装帧精美,独具特色。

教材建设是教学改革最重要的环节,是课程体系和课程内容改革成果的集中体现。教材建设的原则应当是:与学术前沿结合;坚持教材的可行性;选择教材内容的实践性。

李心宏教授注意在教学中进行研究,在研究中进行教学,努力做到与时俱进。40余年来,一直站在本科教学第一线,不急功近利,心情不浮躁,将40余年的教学体会与教改成果尽力渗透在教材之中。从写讲义开始,20余年来,对印刷的讲义和出版的教材,一直跟踪,边使用,边修改,使其日臻完善。

2004年8月,《理论力学(第三版)》即将出版,第三版在教材通用性方面下了工夫;按GB3100~3102-93《量和单位》统一规定,修改了所用的符号。为努力做到与学术前沿结合,增加了分析力学中的哈密顿原理与哈密顿正则方程的内容,为建立力学学科的新体系打下必备的基础。

综上所述,李心宏教授等编著与修订的《理论力学》是一部好教材,深信此书一定能在教学改革中起到良好的作用。



2004年5月

第4版前言

这本教材,1987年印成讲义,在土木水利学院1987~1992级6届本科生中试用;1994年1月由大连理工大学出版社正式出版,又经土木水利学院1993~1999级7届学生使用;2001年8月,获得大连市人民政府学术专著资助和大连理工大学教材出版基金的资助,出版了第二版,在土木水利学院、工程力学系与船舶系2000~2003级4届学生中使用。这样,共17届4000余师生用过这本教材。2004年8月,出版第三版。第三版在如下几个方面做出了努力:在教材的通用性上下了工夫,不仅适用土建、水利类,也适用于机械、动力、船舶等各多学时专业;按GB3100~3102-93《量和单位》的统一规定,修改了所用的符号,考虑到2003年8月,大连理工大学出版社出版了《理论力学学习指导》第二版,与本教材配套,为避免重复,第三版《理论力学》教材,删去了每章的“小结”,减少了篇幅。2004年3月29日至4月1日受教育部高等教育司的委托,大连理工大学、湖州师范学院和高等教育出版社,在湖州师范学院联合召开了“全国数学、物理、力学课程体系改革联合研讨会”,与会者一致认为,教材建设是教学改革最重要的环节,是课程体系和课程内容改革成果的集中体现。教材建设的原则应当是:与学术前沿结合;坚持教材的可行性;选择教材内容的实践性。为努力做到与学术前沿结合,第三版增加了分析力学中的哈密顿原理与哈密顿正则方程的内容,为建立力学学科新体系打下必备的基础;第三版将原第二版的上、下分册合并为一册。第三版在全校通用,在使用过程中,作了局部修改,2006年8月出版第四版。

中科院资深院士钱令希教授,一直关心这本教材,亲自审阅了一、二、三版书稿,并为一、三版亲笔作序。赵国藩、钟万勰、林皋院士也十分关心这本书的出版。本次出版,教材使用者姜峰、黄丽华、许洁、易平、王平参加了修订工作,李心宏最后定稿。

向支持这本教材再版的所有单位和师生表示衷心感谢!

欢迎广大读者对教材提出批评和指正。

编 者

2006年5月

第5版前言

由李心宏教授主编的这本教材最初于1987年印成讲义,在土木水利学院1987~1992级6届本科生中试用;1994年1月由大连理工大学出版社正式出版,又经土木水利学院1993~1999级7届学生使用;2001年8月,获得大连市人民政府学术专著资助和大连理工大学教材出版基金的资助,出版了第二版,在土木水利学院、工程力学系与船舶系2000~2003级4届学生中使用。至此共17届4000余师生使用过这本教材。

2004年8月,将原第二版的上、下分册合并为一册出版第三版。第三版在如下几个方面做出了努力:在教材的通用性上下了工夫,不仅适用土建、水利类,也适用于机械、动力、船舶等各多学时专业;按GB 3100~3102—93《量和单位》的统一规定,修改了所用的符号。考虑到2003年8月,大连理工大学出版社出版了与本教材配套的《理论力学学习指导》,为避免重复,第三版的《理论力学》教材中删去了每章的“小结”,减少了篇幅;同时增加了分析力学中的哈密顿原理与哈密顿正则方程的内容,为建立力学学科新体系打下了必备的基础。第三版于2004年获得大连市优秀专著二等奖。第三版在全校通用,在使用过程中,又作了局部修改,于2006年8月出版第四版。

第五版在第四版的基础上,广泛征求广大师生的意见和建议,主要做了如下工作:

1. 对教材中个别叙述不够准确的文字、例题解答的错误等进行修正,更换或修改了个别不合适的例题及课后习题;

2. 删去了不可能在现行教学计划所规定的学时内讲授的、内容也相对独立的原第14章碰撞和原第19章质点的相对运动动力学。

本次出版,教材使用者易平、黄丽华、姜峰参加了本版的修订工作,易平最后定稿。

中科院资深院士钱令希教授一直关心这本教材,亲自审阅了一、二、三版书稿,并为一、三版亲笔作序。赵国藩、钟万勰、林皋三位院士也十分关心这本书的出版。在此向支持这本教材再版的所有单位和师生表示衷心感谢!也向教材主编李心宏教授致以崇高的敬意和深切的怀念!

希望使用本教材的广大师生和读者能够继续提出宝贵的意见和建议,使之更臻完善。

编者

2008年7月

主要符号表

a, a_t, a_n	加速度, 切向加速度, 法向加速度
a_a, a_c, a_r, a_e	绝对, 牵连, 相对, 科氏加速度
f_s, f	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_{gO}	惯性力对 O 点的矩
$M_O(F)$	力 F 对 O 点的矩
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	速度
V	体积, 势能
W	功
ω	角速度
α	角加速度 (原符号为 ϵ)
η	效率

注: 以上符号均为 GB3100~3102—93《量和单位》中规定的符号。

目 录

绪论 / 1

第 1 篇 静力学

第 1 章 静力学的基本概念和物体的受力分析 / 5

1.1 静力学的基本概念 / 5

1.1.1 刚体的概念 / 5

1.1.2 力的概念 / 5

1.2 静力学公理 / 6

1.3 约束和约束反力 / 8

1.3.1 柔软绳索(包括皮带和链条) / 8

1.3.2 光滑接触面 / 9

1.3.3 活动铰支座 / 9

1.3.4 固定铰支座 / 9

1.3.5 铰链连接 / 10

1.3.6 二力构件 / 10

1.4 物体的受力分析和受力图 / 11

习 题 / 14

第 2 章 力的投影·力矩和力偶 / 16

2.1 力在轴上的投影·合力投影定理 / 16

2.1.1 力在平面上的投影 / 16

2.1.2 力在轴上的投影 / 16

2.1.3 合力投影定理 / 17

2.2 力在直角坐标轴上的投影和力沿直角坐标轴的分解 / 17

2.2.1 力的平面直角坐标轴上的投影和力沿平面直角坐标轴的分解 / 17

2.2.2 力在空间直角坐标轴上的投影和力沿空间直角坐标轴的分解 / 18

2.3 力矩·合力矩定理 / 20

2.3.1 力对点的矩 / 20

2.3.2 合力矩定理 / 21

2.3.3 力对点的矩的矢量表示法 / 22

2.3.4 力对轴的矩 / 23

2.3.5 力对点的矩与力对通过该点的轴的矩的关系 / 24

2.4 力偶理论 / 25

2.4.1 两个平行力的合成 / 25

2.4.2 平面力偶理论 / 27

2.4.3 空间力偶理论 / 30

习 题 / 32

第 3 章 力系的简化理论 / 36

3.1 力的平移定理 / 36

3.2 平面力系的简化 / 37

3.2.1 平面汇交力系的合成 / 37

3.2.2 平面任意力系向作用面内一点简化 / 39

3.2.3 平面任意力系的简化结果 / 42

3.3 空间力系的简化 / 45

3.3.1 空间汇交力系的合成 / 45

3.3.2 空间任意力系向一点的简化 / 46

3.3.3 空间任意力系的简化结果 / 48

3.4 平行力系中心和重心 / 50

3.4.1 平行力系中心 / 50

3.4.2 物体的重心 / 51

习 题 / 56

第 4 章 力系的平衡条件及平衡方程 / 59

4.1 力系的平衡条件及平衡方程 / 59

4.1.1 空间力系的平衡条件及平衡方程 / 59

4.1.2 平面力系的平衡条件及平衡方程 / 61

4.2 平面力系平衡问题举例 / 64

4.3 静定与静不定问题·物体系的平衡 / 69

4.3.1 静定与静不定问题 / 69

- 4.3.2 平面物体系统的平衡 / 70
- 4.4 平面静定桁架的内力计算 / 74
 - 4.4.1 节点法 / 75
 - 4.4.2 截面法 / 76
- 4.5 空间力系平衡问题举例 / 78
- 习 题 / 81

第5章 摩 擦 / 94

- 5.1 摩擦的分类、滑动摩擦的机理分析 / 94
 - 5.1.1 摩擦的分类 / 94
 - 5.1.2 滑动摩擦的产生原因 / 94
- 5.2 滑动摩擦 / 95
 - 5.2.1 静摩擦力 / 95
 - 5.2.2 最大静摩擦力 / 96
 - 5.2.3 动摩擦力 / 96
- 5.3 摩擦角与自锁现象 / 97
 - 5.3.1 摩擦角 / 97
 - 5.3.2 自锁现象 / 97
 - 5.3.3 摩擦角应用举例 / 98
- 5.4 考虑摩擦的平衡问题 / 99
- 5.5 滚动摩擦阻力的概念 / 103
- 习 题 / 105

第2篇 运动学

第6章 点的运动 / 114

- 6.1 点的直线运动 / 114
 - 6.1.1 运动方程 / 114
 - 6.1.2 速度方程 / 114
 - 6.1.3 加速度方程 / 115
 - 6.1.4 例题 / 116
- 6.2 点运动的矢量法 / 118
 - 6.2.1 运动方程 / 118
 - 6.2.2 速度方程 / 118
 - 6.2.3 加速度方程 / 118
- 6.3 点运动的直角坐标法 / 119
 - 6.3.1 运动方程 / 119
 - 6.3.2 速度方程 / 120
 - 6.3.3 加速度方程 / 120
 - 6.3.4 例题 / 121
- 6.4 点运动的自然法 / 124
 - 6.4.1 运动方程 / 124
 - 6.4.2 曲线的曲率和自然轴系 / 124
 - 6.4.3 速度 / 126
 - 6.4.4 加速度 / 126

- 6.4.5 例题 / 129

习 题 / 132

第7章 刚体的基本(简单)运动 / 135

- 7.1 刚体的平行移动 / 135
 - 7.1.1 平行移动的概念 / 135
 - 7.1.2 平行移动的特点 / 135
- 7.2 刚体的定轴转动 / 136
 - 7.2.1 定轴转动的基本概念与抽象简化 / 136
 - 7.2.2 刚体转动的运动方程 / 137
 - 7.2.3 角速度 / 137
 - 7.2.4 角加速度 / 138
- 7.3 转动刚体内各点的速度和加速度 / 138
 - 7.3.1 转动刚体内各点的速度 / 138
 - 7.3.2 转动刚体内各点的加速度 / 139
 - 7.3.3 例题 / 140
- 7.4 定轴轮系的传动比 / 142
 - 7.4.1 带(链)齿轮的同向传动 / 142
 - 7.4.2 带(链)齿轮的反向传动 / 143
 - 7.4.3 例题 / 144
- 7.5 以矢量表示角速度和角加速度·以矢积表示点的速度和加速度 / 145
 - 7.5.1 角速度的矢量表示法 / 145
 - 7.5.2 角加速度的矢量表示法 / 145
 - 7.5.3 用矢积表示刚体内任一点的
速度 / 146
 - 7.5.4 用矢积表示刚体内任一点的切向加
速度与法向加速度 / 146
- 习 题 / 147

第8章 点的合成运动 / 150

- 8.1 点的合成运动的概念 / 150
 - 8.1.1 实例 / 150
 - 8.1.2 绝对运动、相对运动和
牵连运动 / 150
- 8.2 点的速度合成定理 / 152
 - 8.2.1 定理 / 152
 - 8.2.2 例题 / 153
- 8.3 牵连运动是平动时点的加速度
合成定理 / 157
 - 8.3.1 定理 / 157
 - 8.3.2 例题 / 159
- 8.4 牵连运动是转动时点的加速度
合成定理 / 161

- 8.4.1 从一个特例谈起 / 161
- 8.4.2 验证牵连运动是转动时点的加速度合成定理 / 161
- 8.4.3 例题 / 164

习 题 / 168

第9章 刚体的平面运动 / 175

- 9.1 刚体平面运动 / 175
 - 9.1.1 刚体平面运动的基本概念 / 175
 - 9.1.2 刚体平面运动的抽象简化 / 175
 - 9.1.3 平面形 S 分解为随基点的平动与绕基点的转动 / 176
 - 9.2 求平面形上各点的速度 / 177
 - 9.2.1 基点法 / 177
 - 9.2.2 速度投影定理 / 178
 - 9.2.3 求平面形内各点速度的瞬心法 / 180
 - 9.3 用基点法求平面形内各点的加速度 / 186
- 习 题 / 195

第3篇 动力学

第10章 动力学的基本定律与质点运动

微分方程 / 202

- 10.1 动力学的基本定律 / 202
 - 10.1.1 第一定律(惯性定律) / 202
 - 10.1.2 第二定律(力与加速度之间的关系定律) / 202
 - 10.1.3 第三定律(作用与反作用定律) / 203
 - 10.2 质点的运动微分方程 / 204
 - 10.2.1 质点运动微分方程在直角坐标轴上的投影 / 204
 - 10.2.2 质点运动微分方程在自然轴上的投影 / 205
 - 10.3 质点动力学的两类基本问题 / 206
 - 10.3.1 已知运动求力 / 206
 - 10.3.2 已知力求运动 / 208
- 习 题 / 215

第11章 动量定理 / 219

- 11.1 质点的动量定理 / 219
 - 11.1.1 动 量 / 219
 - 11.1.2 冲 量 / 220
 - 11.1.3 质点的动量定理 / 221
 - 11.1.4 例题 / 222
- 11.2 质点系的动量定理 / 223
 - 11.2.1 质点系的动量 / 223

- 11.2.2 质点系的动量定理 / 224
- 11.2.3 质点系的动量守恒定律 / 225
- 11.2.4 例题 / 226

11.3 质心运动定理 / 229

- 11.3.1 质量中心 / 229
- 11.3.2 质心运动定理 / 230
- 11.3.3 质心运动守恒定律 / 231
- 11.3.4 例题 / 232

习 题 / 235

第12章 动量矩定理 / 240

- 12.1 质点的动量矩定理 / 240
 - 12.1.1 质点的动量矩 / 240
 - 12.1.2 质点的动量矩定理 / 241
 - 12.1.3 质点动量矩守恒定律 / 241
 - 12.1.4 例题 / 243
 - 12.2 质点系的动量矩定理 / 244
 - 12.2.1 质点系的动量矩 / 244
 - 12.2.2 质点系的动量矩定理 / 244
 - 12.2.3 质点系的动量矩守恒定律 / 245
 - 12.2.4 例题 / 246
 - 12.3 刚体绕定轴转动微分方程 / 247
 - 12.3.1 绕定轴转动的刚体对转轴的动量矩 / 247
 - 12.3.2 刚体绕定轴转动微分方程 / 247
 - 12.3.3 例题 / 248
 - 12.4 刚体对轴的转动惯量 / 251
 - 12.4.1 转动惯量的概念 / 251
 - 12.4.2 转动惯量的计算方法 / 252
 - 12.4.3 转动惯量的查表法 / 256
 - 12.4.4 转动惯量的实验测定法 / 258
 - 12.5 质点系相对于质心的动量矩定理 / 259
 - 12.6 刚体的平面运动微分方程 / 261
- 习 题 / 268

第13章 动能定理 / 273

- 13.1 功与功率 / 273
 - 13.1.1 功 / 273
 - 13.1.2 功率 / 280
- 13.2 质点与质点系的动能 / 282
 - 13.2.1 质点的动能 / 282
 - 13.2.2 质点系的动能 / 283
- 13.3 质点的动能定理 / 286
 - 13.3.1 定理 / 286
 - 13.3.2 例题 / 287

13.4 质点系的动能定理 / 288

13.4.1 定理 / 288

13.4.2 例题 / 289

13.5 势力场与势能的概念 / 292

13.5.1 势力场的概念 / 292

13.5.2 势能的概念 / 294

13.6 机械能守恒定律 / 295

13.6.1 定律 / 295

13.6.2 例题 / 296

13.7 动力学普遍定理的综合应用 / 297

13.7.1 动力学普遍定理小结 / 297

13.7.2 动力学普遍定理的综合应用 / 299

13.7.3 解综合题的例题 / 299

习 题 / 304

第14章 达朗伯原理与动静法 / 312

14.1 惯性力·质点的达朗伯原理 / 312

14.1.1 惯性力·质点的达朗伯原理 / 312

14.1.2 例题 / 313

14.2 质点系的达朗伯原理 / 314

14.3 刚体惯性力系的简化 / 316

14.3.1 刚体作平动 / 317

14.3.2 刚体绕定轴转动 / 317

14.3.3 刚体作平面运动 / 319

14.4 动静法和应用 / 320

14.5 定轴转动刚体的动反力 / 326

14.5.1 刚体绕定轴转动时惯性力系的简化 / 326

14.5.2 刚体绕定轴转动时轴承的动反力 / 328

14.5.3 惯性主轴的确定 / 329

14.5.4 惯性积的平行轴定理 / 330

14.5.5 静平衡与动平衡的概念 / 333

习 题 / 334

第15章 虚位移原理 / 341

15.1 约束与约束方程 / 342

15.1.1 几何约束与运动约束 / 342

15.1.2 定常(稳定)和非定常(不稳定)约束 / 343

15.1.3 固约束与非固约束 / 344

15.1.4 完整约束与非完整约束 / 345

15.2 质点系的广义坐标与自由度 / 345

15.2.1 广义坐标 / 345

15.2.2 自由度 / 346

15.3 虚位移与虚功 / 347

15.3.1 虚位移与实位移 / 347

15.3.2 如何求质点系各质点虚位移之间的关系 / 349

15.4 理想约束 / 352

15.4.1 理想约束的定义 / 352

15.4.2 常见的几种理想约束 / 352

15.5 虚位移原理 / 354

15.5.1 虚位移原理 / 354

15.5.2 虚位移原理的两点讨论 / 355

15.6 虚位移原理的应用 / 356

15.6.1 用虚位移原理导出几何静力学的平衡方程 / 356

15.6.2 用虚位移原理解单自由度机构的平衡问题 / 357

15.6.3 用虚位移原理求非理想约束系统的平衡问题 / 359

15.6.4 用虚位移原理求多自由度系统的平衡问题 / 360

15.6.5 用虚位移原理求静定结构的约束反力和内力 / 361

15.6.6 虚位移原理应用的小结 / 368

15.7 用广义坐标表示的虚位移原理 / 368

15.7.1 用广义坐标表示的虚位移原理 / 368

15.7.2 广义力 Q_k 的求法 / 370

15.7.3 例题 / 371

习 题 / 374

第16章 分析动力学基础 / 382

16.1 动力学普遍方程 / 382

16.1.1 动力学普遍方程 / 382

16.1.2 例题 / 383

16.2 第二类拉格朗日方程 / 387

16.2.1 用矢量法推导第二类拉格朗日方程 / 387

16.2.2 例题 / 390

16.3 哈密顿原理——积分形式的变分原理 / 394

16.3.1 关于变分原理和有关变分运算的一些最基本的法则 / 394

16.3.2 哈密顿原理——积分形式的变分原理 / 396

16.3.3 非保守系统哈密顿原理 / 397

16.3.4 部分有势力的非保守系统的哈密顿原理 / 398

- 16.3.5 例题 / 398
- 16.4 哈密顿正则方程 / 402
 - 16.4.1 哈密顿正则方程(简称:正则方程) / 402
 - 16.4.2 用正则方程解题 / 404
- 16.5 力学理论的简单评述 / 407
- 习 题 / 408
- 第 17 章 单自由度系统的振动 / 414**
 - 17.1 概 述 / 414
 - 17.1.1 什么是振动 / 414
 - 17.1.2 为什么研究振动 / 414
 - 17.1.3 为什么会产生振动 / 415
 - 17.1.4 振动系统的简化 / 416
 - 17.1.5 计算单自由度系统振动问题所采用的方法 / 417
 - 17.2 单自由度系统的自由振动 / 418
 - 17.2.1 自由振动微分方程 / 418
 - 17.2.2 自由振动的特性 / 419
 - 17.2.3 其他类型的单自由度振动系统 / 420
 - 17.2.4 常见弹性元件的刚性系数和常用构件固有频率的计算公式 / 422
 - 17.2.5 例题 / 424
 - 17.3 用能量法计算单自由度系统的固有频率 / 426
 - 17.3.1 能量法 / 426
 - 17.3.2 例题 / 427
 - 17.4 单自由度系统有阻尼的自由振动 / 429
 - 17.4.1 阻尼 / 429
 - 17.4.2 振动微分方程 / 429
 - 17.4.3 例题 / 433
 - 17.5 单自由度系统的无阻尼强迫振动 / 434
 - 17.5.1 干扰力 / 434
 - 17.5.2 简谐干扰力作用时的强迫振动种方程 / 434
 - 17.5.3 强迫振动的讨论 / 435
 - 17.5.4 例题 / 437
 - 17.6 单自由度系统的有阻尼强迫振动 / 439
 - 17.6.1 有阻尼强迫振动方程 / 439
 - 17.6.2 阻尼对强迫振动的影响 / 440
 - 17.6.3 例题 / 442
 - 17.7 隔振的概念 / 443
 - 17.7.1 积极隔振(主动隔振) / 443
 - 17.7.2 消极隔振(被动隔振) / 444
 - 17.7.3 例题 / 445
 - 习 题 / 446

绪 论

1. 理论力学的研究对象与内容

辩证唯物主义认为,运动是绝对的,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性。运动包括宇宙中发生的一切现象和过程。机械运动、物理运动、化学运动、生物运动以及思维运动等都是运动具有的形式。而机械运动则是所有运动形式中最简单、最基本的一种,指的是物体在空间的位置随时间的变化。天上飞的,地上跑的,水上行的都是机械运动。

平衡(例如相对于地球处于静止的状态),是相对的,暂时的,有条件的,是机械运动的特殊情况。对于土建、水利类专业而言,这一部分是很重要的内容。这是因为要设计的闸、坝、桥、涵、码头、采油平台、挡土墙、房屋等建筑物,都是处于平衡状态。

理论力学属于古典力学范畴,是以牛顿定律为基础的。所谓“古典”力学,是相对于在近几十年内出现和发展起来的相对论力学和量子力学而言的。相对论力学研究运动速度可与光速($30 \times 10^8 \text{m/s}$)相比的运动,量子力学研究微观粒子的运动,而古典力学则是研究运动速度远小于光速的宏观物体的运动。这固然说明古典力学有局限性,但是,在现代科学技术中,古典力学仍然起着重大作用。这是因为,不仅在土建、水利工程中,就是在一些尖端科学技术(如火箭、宇宙航行等)中,所考察的物体其运动速度均是远小于光速的宏观物体。当然,有关的力学问题,仍然用古典力学的原理来解决。随着生产与科学技术的发展,古典力学也仍在不断发展着。

遵照人们认识真理的正常秩序,本书将理论力学的内容分为静力学、运动学及动力学三篇阐述。每篇的研究对象及其在工程实践中的作用将在以后各篇中分别说明。

2. 学习理论力学的目的

(1)在日常生活和工程实践中,到处都可以看到机械运动。例如,公路和铁路的拐弯处,为什么外侧要比内侧高?直升机的尾部为什么要安装一个小螺旋桨?人造地球卫星发射时至少需要多大速度?卫星怎样围绕地球运动?等等,都可由理论力学的机械运动原理得到解答。学习理论力学,掌握了机械运动的规律,可使我们理解周围的许多机械运动现象。

(2)学习理论力学的主要目的,不仅在于使我们能够解释日常所见的机械运动现象,更主要的是在于掌握机械运动规律,以便在生产实践中应用这些规律,更好地为“四化”建设服务。

从土建、水利工程的建筑物的设计和施工,机械的制造和运转,到人造卫星、宇宙飞船的发射和运行,都存在着大量的力学问题。在解决这些问题中,理论力学的知识都是必不可少的。

(3)理论力学是研究最普遍的、最基本的规律。很多工程专业的课程,例如材料力学、结构力学、弹性力学、结构动力学、流体力学、飞行力学、断裂力学以及其他许多专业课程等,都要以理论力学为基础,所以理论力学是学习一系列后续课程必要的准备。

随着现代科学技术突飞猛进的发展,力学的研究内容已渗入到其他科学领域。例如,固体力学和流体力学的理论被用来研究动物、植物和人体,形成了生物力学;流体力学的理论被用来研究等离子体在磁场中的运动,形成电磁流体力学;还有爆炸力学、物理力学都是力

学和其他学科结合而形成的边缘科学。为了探索新的科学领域,必须打好坚实的力学基础。

(4)理论力学的研究方法,与其他科学的研究方法有不少相同之处,因此充分理解力学的研究方法,不仅可以深入地掌握这门学科,而且有助于学习其他科学技术理论,有助于培养辩证唯物主义的世界观与科学的方法论,培养正确的分析和解决问题的能力,为今后解决生产实际问题,从事科学研究工作打下良好的基础。

3. 理论力学的研究方法

辩证唯物主义是指导人们探索客观世界的规律、进行科学研究的锐利武器。毛泽东的《实践论》全面深刻地阐述了辩证唯物主义的认识论,“实践—理论—实践”这一著名公式概括了人们的认识过程。

(1)人们通过长期生活实践与生产实践,观察到各种现象,进行多次科学实验;经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本的规律。

远在古代,人们为了提水,制造了辘轳;为了搬运重物,使用了杠杆、斜面和滑轮;为了长距离地运输,制造了简单的运输机械;为了利用风力和水力,制造了风车和水车,等等。制造和使用这些生活和生产工具,使人类对于机械运动有了初步的认识,并积累了大量的经验,经过分析、综合和归纳,逐渐形成了如“力”和“力矩”等基本概念,以及如“二力平衡”、“杠杆原理”、“力的平行四边形规则”和“万有引力定律”等力学的基本规律,并总结在科学著作之中。我国的墨翟(公元前468~382年)所著的《墨经》,是一部最早记述有关力学理论的著作。

人们为了认识客观规律,不仅在生活和生产实践中进行了观察和分析,而且还进行了实验。实验可以从复杂的自然现象中,人为地创造一些条件来突出影响事物发展的主要因素,并且能够定量地测定各个因素间的关系,因此实验也是形成理论的重要基础。例如伽利略(公元1564~1642年)对自由落体和物体在斜面上的运动做了多次实验,从而彻底推翻了统治多年的错误观点,并引出了“加速度”的概念。此外,如摩擦定律、动力学三定律等都是建立在大量实验的基础之上。从近代力学的研究和发展来看,实验更是重要的研究方法之一。

总之,在大量分析、综合和归纳了各个具体的特殊规律的基础之上,逐步总结和形成了普遍的基本规律,又回到实践中去加以检验并指导实践;再从实践中获得新的材料,推动理论的进一步发展和完善。“实践、认识、再实践、再认识,这种形式,循环往复以至无穷,而实践和认识之每一循环的内容,都比较地进到了高一级的程度。”这是理论力学和其他科学共同的发展道路,而生活和生产实践中的观察和实验是理论力学和其他科学发展的基础。

(2)在对事物观察和实验的基础上,经过抽象化的方法建立力学模型。

客观事物总是复杂多样的。当我们拥有大量来自实践的材料之后,必须根据所研究问题的性质,抓住主要的、起决定作用的因素,撇开次要的、偶然的因素,深入事物的本质,了解其内部联系。这就是力学中普遍采用的抽象化的方法。例如,在研究物体的机械运动时,忽略了物体受力要变形的性质,得到刚体的模型;忽略物体的几何尺寸,得到质点的模型;等等。这种抽象化的方法,一方面简化了所研究的问题,另一方面也更加深刻地反映了事物的本质。正如列宁所指出的:“物质的抽象,自然规律的抽象,价值的抽象等等,一句话,那一切科学的(正确的、郑重的、不是荒唐的)抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”在这里,列宁既指出抽象的重大意义,又指出了抽象是有条件的、相对的,抽象必须是“科学的抽象”。如果不顾条件,随意取舍,结果就将是荒谬的。例如,在研究远程炮弹的运动时,要是像通常研究抛射体的运动条件那样,撇开炮弹的大小、形状与空气阻力等因素,结果必将偏离射击目标很远。又如,在研究物体受外力作用下平衡时,应用刚体模型,可以得到满意的结果;但要研究物体内部的受力情况和它的变形时,再用刚体的模型就会得出非常荒谬的结果,这时