

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程

理论力学

主编	河海大学	许庆春
	华北水利水电学院	杨开云
	扬州大学	楚海建
主审	清华大学	贾书惠



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程

理论力学

主编	河 海 大 学	许庆春
	华北水利水电学院	杨开云
	扬 州 大 学	楚海建
主审	清 华 大 学	贾书惠



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材为高等学校水利学科专业规范核心课程系列教材之一。全书共 3 篇 18 章,第 1~4 章为静力学篇,包括基本概念和静力学公理、力系的简化、力系的平衡、静力学应用专题(摩擦与静定平面桁架)等内容;第 5~9 章为运动学篇,包括点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动、刚体的定点运动等内容;第 10~18 章为动力学篇,包括质点运动微分方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理、拉格朗日方程、碰撞、微振动理论基础等内容。

本书紧密联系工程实际,重视力学概念的阐述,注重力学建模能力的培养,坚持理论与应用并重,突出水利、土木类专业特色。本书可作为高等学校水利、土木类专业的教材,也可作为高等学校工科其他专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 许庆春, 杨开云, 楚海建主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2010.4

高等学校水利学科专业规范核心课程教材. 水利水电工程

ISBN 978-7-5084-7363-5

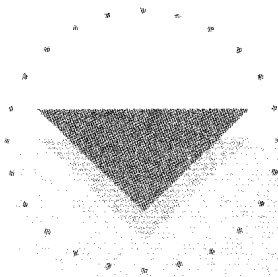
I. ①理… II. ①许… ②杨… ③楚… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①031

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第047241号

书 名	高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水利水电工程 理论力学
作 者	主编 河海大学 许庆春 华北水利水电学院 杨开云 扬州大学 楚海建 主审 清华大学 贾书惠
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	175mm×245mm 16 开本 26.25 印张 606 千字
版 次	2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	46.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



总 前 言

随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入,水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比,水利学科专业的办学点增加了将近一倍,每年的招生人数增加了近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革,在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时,水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下,从2003年到2005年,各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下,水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年底完成了相关的研究工作,制定了水文与水资源工程、水利水电工程、港口航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果,并能较好地适用不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学,经水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划,决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点,是本专业的每个学生都必须学习、掌握的,或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的,因而,核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此,我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则,还通过专业教学组讨论、提出,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对核心课程教材的选题、主编、主审和教材编写大纲进行了严格把

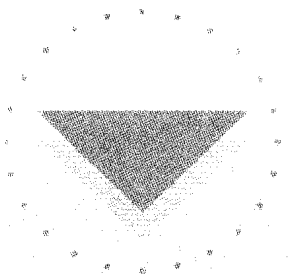
关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好，我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会，对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督，充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种，其中水文与水资源工程专业 17 种，水利水电工程专业 17 种，农业水利工程专业 18 种，计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力，付出了许多心血，但是，由于专业规范还在修订完善之中，参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高，加之，在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验，因此，这套教材一定会有各种不足与缺点，恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材，以利于教、便于学，更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月



前 言

本教材为高等学校水利学科专业规范核心课程教材之一。受高等学校水利学科教学指导委员会和中国水利水电出版社委托,参照教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会编制的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》(试行,2008年版)(以下简称《基本要求》)编写此教材。本书的主要特色如下:

(1) 提高起点,删减与大学物理重复的内容,增加反映现代科学技术的有关内容。

(2) 注重力学概念的阐述,重视分析问题、解决问题的方法。

(3) 紧密联系水利、土木等工程实际,注重力学建模能力的培养和力学在工程中的应用。

(4) 在继承本课程理论严密、逻辑性强的基础上,设置了一定量的思考题,以促进思考、启发思维、培养创新精神。

书中标有*的内容对应《基本要求》中的专题部分,可根据专业要求选用。

本书由许庆春、杨开云、楚海建主编。其中第1~4章由楚海建编写;第5~9章由杨开云、韩立新编写;绪论、第10~18章、附录A、附录B等由许庆春编写,张慧参加了部分内容的编写及校对工作。

书稿承蒙清华大学贾书惠教授认真仔细地审阅,并提出许多宝贵的意见,在此深表感谢。

本书编写过程中,主要参考了华东水利学院(现河海大学)工程力学教研室理论力学编写组编写的《理论力学》(上、下册)和哈尔滨工业大学

理论力学教研室编写的《理论力学》，同时还参考了国内外一些优秀教材，在此谨向这些教材的编著者深表感谢。

限于水平，书中错误与不妥之处，诚恳希望读者批评指正。

编者

2009 年 12 月

主要符号表

a	加速度	k	弹簧刚度系数
a_n	法向加速度	k	轴 z 的单位矢量
a_t	切向加速度	l	长度
a_a	绝对加速度	L	拉格朗日函数
a_r	相对加速度	L_O	刚体对点 O 的动量矩
a_e	牵连加速度	L_C	刚体对质心的动量矩
a_C	科氏加速度	L_z	刚体对 z 轴的动量矩
A	面积, 自由振动振幅	m	质量
C	质心, 重心	M	平面力偶矩
e	恢复因数, 偏心距	M_z	对轴 z 的矩
e_t	切向单位矢量	M	力偶矩矢, 主矩
e_n	主法向单位矢量	$M_O(F)$	力 F 对点 O 的矩
e_b	副法向单位矢量	M_I	惯性力的主矩
f	频率, 动摩擦因数	n	质点数目
f_s	静摩擦因数	O	参考坐标系的原点
F	力	p	动量
F_I	惯性力	P	功率
F_R	合力	P	重力
F'_R	主矢	q	荷载集度, 广义坐标
F_s	静滑动摩擦力	qv	体积流量
F_N	法向约束力	r	半径
F_{le}	牵连惯性力	r	矢径
F_{IC}	科氏惯性力	r_O	点 O 的矢径
$F^{(e)}$	外力	r_C	质心的矢径
$F^{(i)}$	内力	R	半径
F_Q	广义力	s	弧坐标
g	重力加速度	t	时间
h	高度	T	动能, 周期
i	轴 x 的单位矢量	v	速度
I	冲量	v_a	绝对速度
j	轴 y 的单位矢量	v_r	相对速度
J_z	刚体对轴 z 的转动惯量	v_e	牵连速度
J_{xy}	刚体对轴 x 、 y 的惯性积	v_C	质心速度
J_C	刚体对质心的转动惯量	V	体积, 势能

W	力的功	η	减缩因数，效率
$\mathbf{W}$	重力	λ	频率比
x, y, z	直角坐标	Δ	对数减缩
α	角加速度	ρ	密度，曲率半径
$\boldsymbol{\alpha}$	角加速度矢量	φ	角度坐标
β	角度	φ_f	摩擦角
γ	角度	ω_0	固有频率
δ	滚阻系数，阻尼系数	ω	角速度
δ	变分符号	$\boldsymbol{\omega}$	角速度矢量
ζ	阻尼比	θ	角度，初相角

目 录

总前言

前言

主要符号表

绪论	1
0.1 理论力学的研究对象和内容	1
0.2 理论力学的研究方法	1
0.3 学习理论力学的目的	2

第 1 篇 静 力 学

第 1 章 基本概念和静力学公理	5
1.1 力的概念	5
1.2 静力学公理	5
1.3 力的投影与力的分解	9
1.4 力矩	11
1.5 力偶	13
1.6 约束与约束力	15
1.7 计算简图和示力图	19
思考题	23
习题	24
第 2 章 力系的简化	28
2.1 力系的分类	28
2.2 汇交力系的简化	29
2.3 力偶系的简化	30
2.4 任意力系的简化	32

2.5 重心和形心	38
2.6 平行分布力的简化	42
思考题	44
习题	45
第3章 力系的平衡	49
3.1 汇交力系的平衡	49
3.2 力偶系的平衡	51
3.3 任意力系的平衡	53
3.4 静定与超静定问题 物体系统的平衡问题	60
思考题	66
习题	66
第4章 静力学应用专题	73
4.1 摩擦	73
4.2 静定平面桁架	82
思考题	87
习题	88

第2篇 运 动 学

第5章 点的运动	95
5.1 点的运动的矢量法	95
5.2 点的运动的直角坐标法	97
5.3 点的运动的自然法	102
5.4 点的运动的极坐标法	110
思考题	113
习题	114
第6章 刚体的基本运动	117
6.1 刚体的平行移动	117
6.2 刚体的定轴转动	119
6.3 转动刚体内各点的速度和加速度	121
6.4 定轴轮系的传动比	123
6.5 泊桑公式	124
思考题	127
习题	128
第7章 点的合成运动	132
7.1 基本概念	132
7.2 点的速度合成	135

7.3 牵连运动为平移时点的加速度合成	140
7.4 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成	143
思考题	150
习题	151
第8章 刚体的平面运动	157
8.1 运动方程 平面运动作为平移和转动的合成	157
8.2 平面图形内各点的速度 速度瞬心	160
8.3 平面图形内各点的加速度	168
8.4 运动学综合应用举例	173
思考题	178
习题	180
*第9章 刚体的定点运动	186
9.1 刚体定点运动的运动方程	186
9.2 欧拉定理	187
9.3 瞬时转动轴 刚体的角速度和角加速度	188
9.4 刚体内各点的速度和加速度	190
思考题	192
习题	193

第3篇 动 力 学

第10章 动力学基本定律 质点运动微分方程	197
10.1 牛顿运动定律 惯性参考系	197
10.2 单位制和量纲	198
10.3 质点运动微分方程	199
10.4 质点在非惯性参考系中的运动	204
思考题	208
习题	209
第11章 质心运动定理 动量定理	213
11.1 质心运动定理	213
11.2 动量和冲量	217
11.3 动量定理	219
思考题	222
习题	223
第12章 动量矩定理	228
12.1 动量矩	228
12.2 动量矩定理	230

12.3	刚体定轴转动微分方程	234
12.4	相对于质心的动量矩定理 刚体平面运动微分方程	235
* 12.5	刚体定点运动的欧拉动力学方程	240
* 12.6	陀螺近似理论	241
	思考题	243
	习题	244
第 13 章	动能定理	250
13.1	功与功率	250
13.2	动能	254
13.3	动能定理	255
13.4	势力场 势能 机械能守恒定理	260
13.5	普遍定理的综合应用	263
	思考题	266
	习题	267
第 14 章	达朗贝尔原理	274
14.1	达朗贝尔原理	274
14.2	达朗贝尔原理在刚体动力学中的应用	276
14.3	非对称转动刚体的轴承约束力	280
	思考题	283
	习题	284
第 15 章	分析力学基础 (一)	289
15.1	约束与约束方程	289
15.2	自由度和广义坐标	291
15.3	虚位移 理想约束	292
15.4	虚位移原理	294
15.5	动力学普遍方程	299
	思考题	301
	习题	302
* 第 16 章	分析力学基础 (二)	307
16.1	广义力 以广义力表示的质点系平衡条件	307
16.2	保守系统平衡的稳定性	309
16.3	拉格朗日方程	311
16.4	拉格朗日方程的首次积分	316
	思考题	320
	习题	320
* 第 17 章	碰撞	324
17.1	碰撞的特征	324

17.2	基本假设与基本理论	325
17.3	两物体的对心碰撞	326
17.4	碰撞对定轴转动刚体及平面运动刚体的作用	330
	思考题	335
	习题	336
第 18 章	微振动理论基础	340
18.1	单自由度系统的自由振动	340
18.2	单自由度系统的衰减振动	345
18.3	单自由度系统的强迫振动	350
18.4	减振与隔振	356
18.5	两个自由度系统的自由振动	358
18.6	两个自由度系统的强迫振动	365
	思考题	367
	习题	368
附录 A	矢量导数	375
附录 B	转动惯量	379
	习题参考答案	387
	参考文献	402



绪 论

0.1 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一门学科。按照辩证唯物主义的观点,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,它包括宇宙中发生的一切现象和过程——从简单的位置变化直到人的思维活动。机械运动则是所有运动形式中最简单的一种,指的是物体在空间的位置随时间的变化。如车辆的行驶、机器的运转、水的流动、宇宙飞船的运行、建筑物的振动等,都是机械运动。平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学是研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以牛顿定律为基础,属于古典力学的范畴。而速度接近于光速的物体和微观粒子的运动,则要用相对论和量子力学进行研究。虽然古典力学有局限性,但是,在日常生活和一般工程技术(水利、土木、机械、航空、航天等)中,所考察的物体都是宏观物体,且运动速度远小于光速,所以有关力学问题,仍然用古典力学的原理来解决。

本书内容分为以下三部分。

静力学:主要研究物体在力系作用下的平衡规律,包括物体的受力分析、力系的等效简化、力系的平衡条件及其应用。

运动学:仅从几何方面研究物体的运动规律(轨迹、速度、加速度等),而不考虑引起物体运动状态变化的物理因素。

动力学:研究物体的运动与作用在物体上的力之间的关系。

0.2 理论力学的研究方法

力学的发展完全符合辩证唯物主义认识论。人们通过长期的生活实践、生产实践和科学试验,积累了关于机械运动的丰富材料,经过分析、综合和归纳,总结出力学基本规律,形成力学概念,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。

在形成理论力学概念和系统理论的过程中,抽象化和数学演绎这两种方法起着重要的作用。

客观事物总是复杂多样的。对大量来自实践的材料,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,这就是抽象化方法。例如,在某些问题中忽略实际物体的大小和形状,得到质点的力学模型;在另一些问题中忽略实际物体受力后的变形,得到刚体的力学模型。抽象化方法既简化了所研究的问题,又更深刻地反映了事物的本质。但是,抽象必须是科学的,不能不顾条件,随意取舍。

通过抽象化,将长期实践和实验所积累的感性材料加以分析、综合、归纳,得到一些基本的概念、定律或原理,再以这些基本概念、定律或原理为基础,经过严密的数学推演,得到一些定理和公式,构成系统的理论,这就是数学演绎方法。应当注意,数学推演是在经过实践证明其为正确的理论基础上进行的,且由此导出的定理或公式,必须回到实践中去,经过实践检验,证明其为正确时才能成立。理论力学的许多定理都是以牛顿定律为基础,经过严密的数学推导得到的。这些定理揭示了力学中一些物理量之间的内在联系,并经实践证明是正确的,但这些定理也只是在一定范围内才成立。

0.3 学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,在诸多工程技术领域有着广泛的应用。学习理论力学的目的是:

(1) 掌握机械运动的规律,为解决工程问题打下一定的基础。从水利、土木工程中结构物的设计和施工、机械的制造与运转,到宇宙飞船的发射和运行,都有着大量的力学问题,理论力学在解决这些问题时有着广泛的应用。

(2) 为学习后续课程作准备。理论力学是材料力学、结构力学、水力学、流体力学、弹性力学、振动理论、机械原理、机械设计等课程的基础。随着现代科学技术的飞速发展,理论力学的研究内容已渗透到其他科学领域,如生物力学、电磁流体力学、爆炸力学等。

(3) 训练逻辑思维,培养分析问题和解决问题的能力,为今后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下基础。理论力学的理论来源于实践又服务于实践,既抽象又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,且系统性、逻辑性强。这有助于培养辩证唯物主义世界观,培养正确的分析问题和解决问题的能力。

一个力等效，则此力称为该力系的合力 (resultant force)，而该力系的各力称为此力的分力 (component force)。将复杂的力系等效为简单的力系是静力学的重要内容之一。

第三，力系的平衡。在力系中，有些力是已知的，有些力是未知的。为保证物体的平衡，物体所受力系中各力需满足一定的条件，该条件称为力系的平衡条件。物体的平衡条件是解决静力学问题的主要手段。

静力学在工程中具有十分重要的意义，它是工程结构设计和机械设计中静力计算的基础。静力学还是进一步学习动力学和其他后续力学课程的基础。