

卓越工程师教育培养计划配套教材

工程基础系列

理论力学

刘立厚 主编

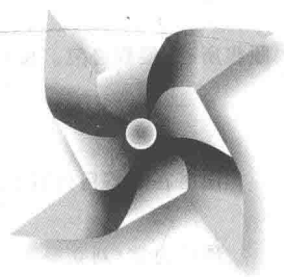
潘颖 曹丽杰 副主编



清华大学出版社

卓越工程师教育培养计划配套教材

工程基础系列



理论力学

刘立厚 主 编

潘颖 曹丽杰 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书根据力学基础课程教学指导分委员会制定的“理论力学课程教学基本要求”和“卓越工程师教育培养计划”编写而成。

本书共分为3篇：静力学、运动学、动力学。在编写过程中，编者借鉴国内外优秀教材并结合多年的教学经验，注重增强对理论的理解与应用，并引入了许多工程实例，将理论与实际紧密联系，帮助学生理解学习“理论力学”的意义及应用。每章配置了适量的习题，以助于学生通过练习掌握基本理论、基本方法和计算技能。

本书内容全面，适合高等工科院校学生使用，也可供相关技术人员学习参考。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/刘立厚主编. —北京：清华大学出版社，2016

(卓越工程师教育培养计划配套教材，工程基础系列)

ISBN 978-7-302-45147-1

I. ①理… II. ①刘… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 232954 号

责任编辑：赵 斌

封面设计：常雪影

责任校对：王淑云

责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：保定市中华美凯印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm

印 张：19.25

字 数：467 千字

版 次：2016 年 12 月第 1 版

印 次：2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数：1~1500

定 价：45.00 元

产品编号：050720-01

卓越工程师教育培养计划配套教材

总编委会名单

主 任：丁晓东 汪 泓

副主任：陈力华 鲁嘉华

委 员：（按姓氏笔画为序）

丁兴国	王岩松	王裕明	叶永青	刘晓民
匡江红	余 粟	吴训成	张子厚	张莉萍
李 毅	陆肖元	陈因达	徐宝钢	徐新成
徐滕岗	程武山	谢东来	魏 建	

卓越工程师教育培养计划配套教材

——工程基础系列编委会名单

主 任：徐新成 程武山

副主任：张子厚 刘晓民 余 粟

委 员：（按姓氏笔画为序）

王明衍 刘立厚 朱建军 汤 彬 吴建宝

张学山 张敏良 张朝民 李 路 陈建兵

林海鸥 范小兰 胡义刚 胡浩民 唐觉民

徐红霞 徐滕岗



《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》明确指出“提高人才培养质量,牢固确立人才培养在高校工作中的中心地位,着力培养信念执著、品德优良、知识丰富、本领过硬的高素质专门人才和拔尖创新人才。……支持学生参与科学研究,强化实践教学环节。……创立高校与科研院所、行业、企业联合培养人才的新机制。全面实施‘高等学校本科教学质量与教学改革工程’。”教育部“卓越工程师教育培养计划”(简称“卓越计划”)是为贯彻落实党的“十七大”提出的走中国特色新型工业化道路、建设创新型国家、建设人力资源强国等战略部署,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》实施的高等教育重大计划。“卓越计划”对高等教育面向社会需求培养人才,调整人才培养结构,提高人才培养质量,推动教育教学改革,增强毕业生就业能力具有十分重要的示范和引导作用。

上海工程技术大学是一所具有鲜明办学特色的地方工科大学。长期以来,学校始终坚持培养应用型创新人才的办学定位,以现代产业发展对人才需求为导向,努力打造培养优秀工程师的摇篮。学校构建了以产学研战略联盟为平台,学科链、专业链对接产业链的办学模式,实施产学合作教育人才培养模式,造就了“产学合作、工学交替”的真实育人环境,培养有较强分析问题和解决问题能力,具有国际视野、创新意识和奉献精神的高素质应用型人才。

上海工程技术大学与上海汽车集团公司、上海航空公司、东方航空公司、上海地铁运营有限公司等大型企业集团联合创建了“汽车工程学院”“航空运输学院”“城市轨道交通学院”“飞行学院”,校企联合成立了校务委员会和院务委员会,企业全过程参与学校相关专业的人才培养方案、课程体系和实践教学体系的建设,学校与企业实现了零距离的对接。产学合作教育使学生每年都能够到企业“顶岗工作”,学生对企业生产第一线有了深刻的了解,学生的实践能力和社会适应能力不断增强。这一系列举措都为“卓越工程师教育培养计划”的实施打下了坚实基础。

自2010年教育部“卓越工程师教育培养计划”实施以来,上海工程技术大学先后获批了第一批和第二批5个专业8个方向的试点专业。为此,学校组成了由企业领导、业务主管与学院主要领导组成的试点专业指导委员会,根据各专业工程实践能力形成的不同阶段的特点,围绕课内、课外培养和学校、企业培养两条互相交叉、互为支撑的培养主线,校企双方共同优化了试点专业的人才培养方案。试点专业指导委员会聘请了部分企业高级工程师、技术骨干和高层管理人员担任试点专业的教学工作,参与课程建设、教材建设、实验教学建设等教学改革工作。



“卓越工程师教育培养计划配套教材——工程基础系列”是根据培养卓越工程师“具备扎实的工程基础理论、比较系统的专业知识、较强的工程实践能力、良好的工程素质和团队合作能力”的目标进行编写的。本系列教材由公共基础类、计算机应用基础类、机械工程专业基础类和工程能力训练类组成,共 21 册,涵盖了“卓越计划”各试点专业公共基础及专业基础课程。

该系列教材以理论和实践相结合作为编写的理念和原则,具有基础性、系统性、应用性等特点。在借鉴国内外相关文献资料的基础上,加强基础理论,对基本概念、基础知识和基本技能进行清晰阐述,同时对实践训练和能力培养方面作了积极的探索,以满足卓越工程师各试点专业的教学目标和要求。如《高等数学》适当融入“卓越工程师教育培养计划”相关专业(车辆工程、飞行技术)的背景知识并进行应用案例的介绍。《大学物理学》注意处理物理理论的学习和技术应用介绍之间的关系,根据交通(车辆和飞行)专业特点,增加了流体力学简介等,设置了物理工程的实际应用案例。《C 语言程序设计》以编程应用为驱动,重点训练学生的编程思想,提高学生的编程能力,鼓励学生利用所学知识解决工程和专业问题。《现代工程图学》等 7 本机械工程专业基础类教材在介绍基础理论和知识的同时紧密结合各专业知识内容,开拓学生视野,提高学生实际应用能力。《现代制造技术实训习题集》是针对现代化制造加工技术——数控车床、数控铣床、数控雕刻、电火花线切割、现代测量等技术进行编写。该系列教材强调理论联系实际,体现“面向工业界、面向世界、面向未来”的工程教育理念,努力实践上海工程技术大学建设现代化特色大学的办学思想和特色。

这种把传统理论教学与行业实践相结合的教学理念和模式对培养学生的创新思维,增强学生的实践能力和就业能力会产生积极的影响。以实施卓越计划为突破口,一定能促进工程教育改革和创新,全面提高工程教育人才培养质量,对我国从工程教育大国走向工程教育强国起到积极的作用。

陈关龙

上海交通大学机械与动力工程学院教授、博士生导师、副院长
教育部高等学校机械设计制造及自动化教学指导委员会副主任
中国机械工业教育协会机械工程及自动化教学委员会副主任



本书是“卓越工程师教育培养计划配套教材”系列教材之一,是依据教育部力学基础课程教学指导分委员会制定的“理工科非力学专业基础力学课程教学基本要求”中“理论力学课程教学要求”和“卓越计划”要求而编写。卓越工程师培养是一种全新的工程人才培养模式,要求工科学校所培养的毕业生能适应社会不断变化的需求,在工程实际与应用中能很快上手,通过工程实践将理论与实践相结合,快速成为满足社会与工程实践所需要的优秀工程师。

上海工程技术大学是教育部提出的“卓越工程师教育培养计划”首批试点高校之一,卓越培养试点专业从汽车车辆工程、城市轨道交通车辆工程扩展到机械工程等。为了更好地配合“卓越计划”的开展与实施,编者对卓越班级的“理论力学”课程进行了改革探索,根据上海工程技术大学以培养应用型工程师为主的“理论力学”课程教学体系的教学改革与实践编写了本书。

本书立足于“中少学时”,理论阐述力求由浅入深,文字简洁,讲授基础知识与方法,适当加入一些专题内容,以便学生自学;同时加强学生工程概念,突出力学在工程实际中的应用,努力编入一些密切结合工程实际的例题与习题,以供教师选用和学生练习。为了加深学生对基本概念的理解,同时提高学生用理论力学基本原理分析问题、解决问题的能力,本书在例题讲述中着重阐述了分析问题的思路、解决问题的方法与解题书写过程的步骤。注重一题多解开拓学生思维,培养学生运用力学知识解决实际问题的能力。本书适合高等工科院校非力学专业中学时的理论力学课程使用。

本书由上海工程技术大学机械工程学院工程力学教学部编写,曹丽杰编写第1~3章,潘颖编写第4章、第5章、第13章、第14章,刘立厚编写第6~12章、第15章。全书由刘立厚任主编。

在编写过程中,编者参考了国内外众多同类优秀教材,吸取了它们的长处,选用了其中的部分例题和习题。需要指出的是,除了已列出参考文献的书目外,编者也参考了其他很多相关书目和资料,限于篇幅难以逐一列出,编者在此一并对其作者表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,教材中难免有不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2016年5月



绪论	1
----	---

第 I 篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理与物体的受力分析	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 约束与约束力	8
1.3.1 自由体与非自由体,约束与约束力	8
1.3.2 工程中常见约束的基本类型及其约束力	9
1.4 物体的受力分析与受力图	13
思考题	15
习题	16

第 2 章 平面特殊力系	18
--------------	----

2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	18
2.1.1 平面汇交力系合成的几何法,力的多边形法则	18
2.1.2 平面汇交力系平衡的几何条件	19
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	21
2.2.1 力在坐标轴上的投影	21
2.2.2 合力投影定理	22
2.2.3 平面汇交力系合成和平衡的解析法	22
2.3 平面力对点之矩·合力矩定理	24
2.3.1 力矩	24
2.3.2 合力矩定理与力矩的解析表达式	24



2.4 平面力偶	25
2.4.1 力偶与力偶矩	25
2.4.2 力偶的性质	26
2.4.3 平面力偶系的合成	26
2.4.4 平面力偶系的平衡条件	27
思考题	28
习题	29

第3章 平面一般力系 32

3.1 平面一般力系的简化	32
3.1.1 力的平移定理	32
3.1.2 平面一般力系向作用面内一点简化·主矢与主矩	33
3.1.3 平面一般力系的简化结果分析	35
3.2 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	38
3.2.1 平面一般力系平衡方程的基本形式	38
3.2.2 平面平行力系的平衡条件	39
3.3 物系的平衡·静定与超静定问题	40
3.4 平面简单桁架的内力计算	44
3.4.1 节点法计算桁架的内力	45
3.4.2 截面法计算桁架杆件的内力	46
思考题	48
习题	49

第4章 空间力系 54

4.1 空间汇交力系	54
4.1.1 力在直角坐标轴上的投影与分解	54
4.1.2 空间汇交力系的合成与平衡	56
4.2 力对点的矩和力对轴的矩	57
4.2.1 力对点的矩以矢量表示——力矩矢	57
4.2.2 力对轴的矩	58
4.2.3 力对点之矩与力对轴之矩的关系	59
4.3 空间力偶	60
4.3.1 力偶矩矢	60
4.3.2 空间力偶等效定理	61
4.3.3 空间力偶系的合成与平衡	61
4.4 空间任意力系向一点简化·主矢和主矩	63
4.4.1 力系向一点简化·主矢和主矩	63
4.4.2 空间任意力系的简化结果	64
4.5 空间任意力系的平衡方程及应用	66



4.5.1 空间任意力系的平衡方程	66
4.5.2 空间约束类型	67
4.5.3 空间任意力系平衡问题举例	68
4.6 重心	71
4.6.1 平行力系中心	71
4.6.2 重力中心	71
4.6.3 确定物体重心位置的方法	72
思考题	77
习题	78
第5章 摩擦	82
5.1 滑动摩擦	82
5.1.1 摩擦的概念	82
5.1.2 滑动摩擦力	82
5.2 摩擦角和自锁现象	84
5.2.1 摩擦角	84
5.2.2 自锁现象	85
5.3 考虑摩擦时的平衡问题	85
5.4 滚动摩擦阻力的概念	88
思考题	91
习题	91

第Ⅱ篇 运 动 学

第6章 点的运动学	97
6.1 矢量法	97
6.1.1 运动方程	97
6.1.2 点的位移和速度	97
6.1.3 点的加速度	98
6.2 直角坐标法	98
6.2.1 运动方程·轨迹	98
6.2.2 点的速度	99
6.2.3 点的加速度	99
6.3 自然法	102
6.3.1 弧坐标及运动方程	102
6.3.2 自然轴系	102
6.3.3 点的速度	103
6.3.4 点的切向加速度和法向加速度	103
思考题	106



习题	107
第7章 刚体的基本运动	109
7.1 刚体的平行移动	109
7.2 刚体的定轴转动	110
7.2.1 转动方程	111
7.2.2 角速度与角加速度	111
7.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	111
7.4 定轴转动刚体的传动比	113
7.5 角速度、角加速度的矢量表示以及点的速度与加速度的矢积表示	115
思考题	117
习题	118
第8章 点的合成运动	120
8.1 点的合成运动的概念	120
8.2 点的速度合成定理	122
8.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	125
8.4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	127
思考题	132
习题	133
第9章 刚体的平面运动	137
9.1 刚体平面运动的简化和分解	137
9.1.1 刚体的平面运动简化为平面图形的运动	137
9.1.2 刚体平面运动的描述	138
9.1.3 刚体的平面运动分解为平动和转动	138
9.2 求平面图形内各点的速度	140
9.2.1 基点法(合成法)	140
9.2.2 速度投影法	142
9.2.3 速度瞬心法	143
9.3 用基点法求平面图形内各点的加速度	146
思考题	151
习题	153

第Ⅲ篇 动 力 学

第10章 质点动力学	159
10.1 动力学的基本定律	159
10.2 质点运动微分方程	161



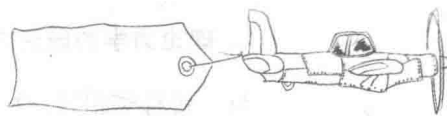
10.3 质点在非惯性参考系中的运动	165
思考题	167
习题	169
第 11 章 动量定理	172
11.1 动量与冲量	172
11.1.1 动量	172
11.1.2 冲量	174
11.2 动量定理	174
11.2.1 质点的动量定理	174
11.2.2 质点系的动量定理	175
11.2.3 质点系动量守恒定律	178
11.3 质心运动定理	179
11.3.1 质心运动定理	179
11.3.2 质心运动守恒定理	180
思考题	181
习题	182
第 12 章 动量矩定理	185
12.1 转动惯量	185
12.1.1 刚体对轴的转动惯量	185
12.1.2 回转半径	186
12.1.3 具有规则几何形状的统一刚体的转动惯量	186
12.1.4 转动惯量的平行轴定理	187
12.1.5 计算转动惯量的组合法	190
12.2 质点和质点系的动量矩	190
12.2.1 质点的动量矩	190
12.2.2 质点系的动量矩	191
12.3 动量矩定理	192
12.3.1 质点的动量矩定理	192
12.3.2 质点系的动量矩定理	193
12.3.3 质点系的动量矩守恒	194
12.4 刚体绕定轴转动的微分方程	195
12.5 质点系相对质心的动量矩定理	197
12.6 刚体平面运动微分方程	199
思考题	201
习题	202



第 13 章 动能定理	207
13.1 力的功	207
13.2 质点和质点系的动能	211
13.3 动能定理	214
13.3.1 质点的动能定理	214
13.3.2 质点系的动能定理	214
13.3.3 理想约束及内力做功	215
13.4 功率 功率方程	218
13.4.1 功率	218
13.4.2 功率方程	219
13.4.3 机械效率	220
13.5 势力场、势能和机械能守恒定律	220
13.5.1 势力场	220
13.5.2 势能	221
13.5.3 机械能守恒定律	222
13.6 普遍定理的综合应用举例	225
思考题	229
习题	230
第 14 章 达朗贝尔原理	235
14.1 惯性力的概念	235
14.2 质点及质点系的达朗贝尔原理	236
14.2.1 质点的达朗贝尔原理	236
14.2.2 质点系的达朗贝尔原理	237
14.3 刚体惯性力系简化	240
14.4 定轴转动刚体的轴承动约束力	245
14.4.1 一般情况下轴承的动约束力	245
14.4.2 定轴转动刚体的静平衡和动平衡的概念	246
思考题	248
习题	249
第 15 章 虚位移原理	252
15.1 约束 自由度 广义坐标	252
15.1.1 约束及其分类	252
15.1.2 自由度 广义坐标	254
15.2 虚位移 虚功	255
15.2.1 虚位移的概念	255
15.2.2 虚位移的计算	256



15.2.3 虚功	258
15.2.4 理想约束	258
15.3 虚位移原理	258
思考题	264
习题	265
第 16 章 动力学普遍方程和第二类拉格朗日方程	268
16.1 动力学普遍方程	268
16.2 拉格朗日方程	271
思考题	275
习题	276
部分习题答案	278
参考文献	289



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。

物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。机械运动是人们生活、生产与工程实际中最常见的一种运动。例如,机器的运转、车辆的行驶、人造卫星的飞行、建筑物的振动等等,都是机械运动。平衡是机械运动的特殊情况。

物体的机械运动存在着一般规律,这些一般规律就是理论力学的研究对象。

工科理论力学中的研究对象主要是从实际工程机械与结构中简化出来的简单机构与结构,这在本书中的大量习题中可以见到。

理论力学研究的内容是远小于光速的宏观物体的机械运动。它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。古典力学的规律不适用于接近光速的宏观物体的运动,也不适用于微观粒子的运动(前者用相对论力学、后者用量子力学研究),这说明古典力学有其局限性。但是,在一般工程技术问题中所研究的物体,都是运动速度远小于光速的宏观物体。因此,用古典力学来解决,不仅方便,而且能够保证足够的精确性。所以,古典力学至今仍有很大实用意义。

理论力学起源于物理学的一个分支,但它的内容已大大超过了物理学的内容。理论力学不仅要求建立与力学有关的各基本概念和理论,而且要求能运用理论知识对于从实际问题中抽象出来的力学模型进行分析和计算。

研究物体机械运动的普遍规律有两种基本方法,从而形成理论力学的两大体系:一是用矢量的方法研究物体机械运动的普遍规律,称为矢量力学;二是用数学分析的方法进行研究,称为分析力学。本书以矢量研究方法为主。

理论力学的内容包括 3 部分:

静力学——主要研究物体的受力分析、力系的简化与力系的合成以及力系平衡条件及应用。

运动学——研究物体机械运动的几何性质(即物体运动的描述,建立物体的运动方程,求其速度与加速度等),而不研究引起物体运动的原因。

动力学——研究受力物体的运动与作用力之间的关系。



2. 理论力学的研究方法

与一切科学相同,对于力学基本规律的研究起源于对实际现象的观察和归纳。人类在生产活动中很早就开始积累经验并逐渐形成初步的力学知识。随着生产活动的深入,为了提高效率,并使工具与建筑物能够长久地使用,人们开始进行研究并形成了相应的方法。力学就是从实践出发,通过观察与实验,经过科学的抽象、综合、归纳,建立力学模型,建立公理或定律,再用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论,然后再通过实践来检验定理或结论的正确性,从而指导人们在实践中正确运用力学知识。其中观察和实验是理论发展的基础,而“抽象化”和“数学演绎”则是研究的主要方法。

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,是工科各类专业的重要技术基础课之一。工程专业一般都要接触机械运动的问题,这些问题中有的可以直接应用理论力学的基础理论解决,有些比较复杂的问题则需要用理论力学和其他专门知识来解决,所以学习理论力学是解决、分析工程问题所必须掌握的基础知识。

理论力学讲述力学中最普遍、最基本的规律,是现代工程技术的重要基础之一。对于机械、汽车、航天、建筑等专业尤为重要。这些工程专业的课程以理论力学知识为基础,理论力学在基础课与专业课之间起着桥梁作用。

理论力学的理论既抽象而又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,系统性、逻辑性强。学生要充分理解、掌握理论力学这门课程的研究方法与解决问题的步骤,通过学习理论力学课程,在掌握这门课程知识的同时培养正确分析问题与解决问题的能力。