

21

世纪高等职业技术教育规划教材

——机械工程类

四川省省级精品课程配套教材

GONG
CHENG

工程力学

主 编 赵春玲 尹析明
主 审 穆能伶



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等职业技术教育规划教材——机械工程类
四川省省级精品课程配套教材

工 程 力 学

主 编	赵春玲	尹析明
副主编	孙作风	付学敏
	邹 云	庄 严
主 审	穆能伶	

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书分为刚体静力学、变形体静力学、运动学和动力学三篇共十六章。第一篇刚体静力学的第一章至第五章内容为：静力学基础知识与物体的受力分析、平面汇交力系与平面力偶系、平面任意力系、摩擦、空间任意力系。第二篇变形体静力学的第六章至第十二章内容为：杆件的轴向拉伸与压缩、联接件的实用计算、圆轴的扭转、梁的弯曲、应力状态理论和强度理论、组合变形、压杆的稳定。第三篇运动学和动力学的第十三章至第十六章内容为：点的运动与刚体的基本运动、点的合成运动与刚体的平面运动、质点和刚体动力学基础、动静法。每章后有思考题、习题（附答案）、阅读材料。

本书适用于高等职业技术教育院校机械类、机电类以及近机类各专业工程力学课程的教学，也可供有关工程技术人员参考或自学。

图书在版编目（CIP）数据

工程力学 / 赵春玲, 尹析明主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2009.1

四川省省级精品课程配套教材 21 世纪高等职业技术教育规划教材. 机械工程类

ISBN 978-7-5643-0125-5

I. 工… II. ①赵…②尹… III. 工程力学—高等学校: 技术学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 186230 号

21 世纪高等职业技术教育规划教材——机械工程类

四川省省级精品课程配套教材

工程力学

主编 赵春玲 尹析明

*

责任编辑 李 涛

特邀编辑 唐 飞

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 18.5

字数: 450 千字 印数: 1—3 000 册

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0125-5

定价: 29.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

长时间以来,工程力学一直都是中外高校众多专业中不可缺少的一门重要课程,它在人才培养的教学任务中担负着基础知识与专业知识的链接作用。在当今的信息社会里,日益要求人们能以先进的手段去使力学与工程达到更完美的结合。工程力学作为传统的经典,将其打造为精品课程,自然顺应了工科机类教育现代化的新要求。成都纺织高等专科学校立足于专业课程“针对性、实用性、先进性”的原则,在课程建设中以多样化手段制作了多媒体网络教学课件,从而使工程力学知识向学生的深入传播得到提升。另一方面,为了适应工科机类专业人才培养的全面优化,成都纺织高等专科学校力学老师以一种坚持经典的学术风范,认真编写了工程力学精品课程的配套教材。本人曾在《力学与实践》(2007年第6期)上撰文讲到“教本教本,教学之本”。可见,教材在教与学的双边活动中不可缺少。同时还指出“对于工科高职高专技能型人才的培养,需要的是一本具有应用真实性和时效性的力学教本。因此更要求教本在知识的编撰上做到图文知识的严谨与规范”。为此纵观全书,作者确实做到或努力做到了“图文知识的严谨与规范”。姑且不论教材体系结构是否完善,以及教材内容应用的可行性,但仅从眼下所提倡的高职高专教育应“贴近实践性教学环节”这一方针看,作者在教材知识的重组上真正突出了学生学习行为的取向,并使之向实践的有效性倾斜。配合精品课程教材应有自身的特色,该书凸显在字里行间的特色就是:

1. 对教材章节结构的设定,做到了符合学生学习的认知规律。如对某一节内容的编写,尽可能更多地依托于工程或身边的实例,对每一新知识点以及围绕这些新知识的原理和方法的给出,基本上都是顺理成章、循序渐进地展开,等等。

2. 对教材词语的表述,做到了符合学生学习的连接理论。如“力 F 作用线”、“约束力”、“杆 AB ”等词语一经定义,就不再出现“力 F 的作用线”、“约束反力”、“ AB 杆”等类似的说法。

3. 对教材概念的建立,做到了有利学生实现学习的迁移。如很多力学概念的引入,或源于工程或身边的实例,或给出很直观的图文等,如此不一而足。而这些浅显易懂的写法,有利学生实现学习的迁移,也有利学生触类旁通地学习新知识。除此之外,对于力学中的许多专用名词的使用,也都遵守中华人民共和国国家标准和《力学名词》词典所定义的,绝无作者单方自造或教学经验中所约定俗成的口头语。即便对一些频繁使用的介词、连词如“和、与、若、则、因为、所以、不但、而且……”在行文中,一旦用到或需要重复时,都很有讲究。

总之,作者笔下的教材确实真正做到了有利于学生学习工程力学知识,这也就无愧于精品课程在人才培养中的巨大作用。说到底,该教材用于教学,更多的会是学生多种能力,如记忆、理解、分析、对比、辨别、推理、评价、归纳等的强化与放大。

穆能伶

2008年10月

前言

本书是 21 世纪高等职业技术教育规划教材和 2007 年度四川省省级精品课程配套教材。全书按照机械类、机电类以及近机类专业工程力学课程教学基本要求,立足加强学生智力、能力的培养,保证了学生对知识学习的深化与提高。在编写本书时,编者注重对传统工程知识的精选和重组,故本书可作为高职高专院校机械类(100~120 学时)、机电类和近机类(60~90 学时)专业工程力学课程的教学用书。

本书在力学知识的阐述上很讲究对工程概念的建立,突出力学知识与工程实例的贴近和结合,有利于学生获得从工程力学理论到工程实际问题解决的思维和方法的训练。此外,本书在每知识板块后编撰许多灵活多样的思考题、习题及与工程力学知识相关的阅读材料,从而为学生熟练所学力学知识、增加知识趣味性以及拓展力学文化素养开辟了一个很好的学习园地。

参加本书编写的人员有:重庆工商大学教文刚(第一、二、三章)、成都纺织高等专科学校邹云(第四章)、成都纺织高等专科学校李文新(第五章)、成都纺织高等专科学校孙作风(第六、七章)、云南能源职业技术学院庄严(第八、九章)、成都纺织高等专科学校尹析明(第十、十一章)、成都纺织高等专科学校付学敏(第十二章)、成都纺织高等专科学校赵春玲(第十三、十四章)、甘肃畜牧工程职业技术学院雷文斌(第十五、十六章)。付学敏和邹云负责本书的习题和绘图工作,赵春玲和孙作风负责本书的统稿工作。

本书由成都航空职业技术学院穆能伶教授担任主审,他根据多年来从事工程力学教学的丰富经验,以很严谨的学术态度为全书的编撰提纲挈领,提出了许多具体的建设性意见,并为全书的审定付出了辛勤劳动。在此特向他表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不足之处,敬请同行和读者予以批评指正。

编 者

2008 年 10 月

主要符号表

符 号	意 义
F_P	荷载, 作用力
F_R	合力
W	重力
$M_O(F)$	力矩
M	力偶矩, 弯矩
f_S	静摩擦因数
f'_S	动摩擦因数
φ_m	摩擦角
$M_z(F)$	力对轴之矩
x_C, y_C, z_C	重心坐标
σ	正应力
$[\sigma]$	许用正应力
n	安全系数
ε	轴向线应变
ε'	横向线应变
E	材料弹性模量
δ	延伸率
ρ	密度, 曲率半径
σ_b	强度极限
σ_c	挤压应力
σ_{cr}	临界应力
F_{per}	临界荷载
P	功率
η	机械效率
σ_{bs}	挤压应力
F_{cr}	临界荷载, 临界力
F_N	轴力
F_Q	剪力

符 号	意 义
M_e	外力偶矩
T	扭矩, 动能
γ	切应变
G	切变模量
τ	切应力
$[\tau]$	许用切应力
φ	扭转角
φ'	单位长度转角
$[\varphi']$	单位长度许用转角
I_P	截面积惯性矩
W_P	抗扭截面系数
I_y, I_z	截面惯性矩
W_y, W_z	抗弯截面系数
λ	柔度, 长度比
μ	泊松比, 长度因数
y	挠度
θ	转角
ω	角速度
α	角加速度
v_a	绝对速度
v_r	相对速度
v_e	牵连速度
J_z	转动惯量
n	转速
n_{st}	稳定安全系数
F_g	惯性力
v_C	质心速度

目录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 刚体静力学

第一章 静力学基础知识与物体的受力分析	7
---------------------------	---

第一节 静力学基本概念	7
第二节 静力学公理	8
第三节 约束和约束力	10
第四节 物体的受力分析和受力图	13
思考题	15
习 题	16
阅读材料	18

第二章 平面汇交力系与平面力偶系	20
------------------------	----

第一节 平面汇交力系的合成与平衡	20
第二节 平面力对点之矩	24
第三节 平面力偶系的合成与平衡	25
思考题	28
习 题	29
阅读材料	32

第三章 平面任意力系	33
------------------	----

第一节 平面任意力系向作用面内一点简化	33
第二节 平面任意力系平衡方程及应用	37
第三节 物体系统的平衡 静定与超静定问题概念	40
思考题	44
习 题	45
阅读材料	48

第四章 摩 擦	49
第一节 滑动摩擦	49
第二节 摩擦角与自锁现象	51
第三节 考虑有摩擦时物体的平衡问题	53
第四节 滚动摩擦概念	55
思考题	56
习 题	56
阅读材料	58
第五章 空间任意力系	59
第一节 力在空间直角坐标轴上的投影	59
第二节 力对轴之矩	61
第三节 空间任意力系的简化	63
第四节 空间任意力系的平衡方程	64
第五节 重心及形心	66
思考题	69
习 题	70
阅读材料	72

第二篇 变形体静力学

第六章 杆件的轴向拉伸与压缩	77
第一节 轴向拉(压)杆件的轴力及轴力图	77
第二节 轴向拉(压)杆件横截面上的应力	80
第三节 轴向拉(压)杆件的变形	82
第四节 材料在拉(压)时的力学性能	84
第五节 轴向拉(压)杆件的强度计算	89
第六节 轴向拉(压)杆件斜截面上的应力	91
第七节 应力集中的概念	92
思考题	93
习 题	94
阅读材料	97
第七章 联接件的实用计算	98
第一节 剪切和挤压的基本概念	98
第二节 铆接实用计算	99
第三节 其他联接件的实用计算	103
思考题	105
习 题	106
阅读材料	107
第八章 圆轴的扭转	108
第一节 扭转圆轴的扭矩及扭矩图	108
第二节 扭转圆轴横截面上的应力与强度计算	111

第三节 扭转圆轴的变形与刚度计算	117
思考题	119
习 题	120
阅读材料	122
第九章 梁的弯曲	123
第一节 平面弯曲的概念及梁的简化	123
第二节 弯曲梁的剪力与弯矩 剪力图与弯矩图	125
第三节 剪力、弯矩与荷载集度之间的关系	131
第四节 弯曲梁横截面上的正应力	134
第五节 弯曲梁横截面上的切应力	138
第六节 弯曲梁的强度计算	140
第七节 弯曲梁的变形与刚度计算	144
第八节 提高梁弯曲强度与刚度的主要措施	149
思考题	152
习 题	153
阅读材料	158
第十章 应力状态理论和强度理论	159
第一节 一点应力状态的概念	159
第二节 平面应力状态分析	162
第三节 广义胡克定律	166
第四节 强度理论	167
思考题	169
习 题	170
阅读材料	173
第十一章 组合变形	174
第一节 概 述	174
第二节 杆件拉(压)与弯曲的组合变形	175
第三节 圆轴扭转与弯曲的组合变形	180
思考题	184
习 题	186
阅读材料	189
第十二章 压杆的稳定	190
第一节 压杆的稳定性概念与临界荷载	190
第二节 临界应力与临界应力总图	193
第三节 压杆的稳定条件及其应用	195
第四节 提高压杆稳定性的措施	197
思考题	199
习 题	199
阅读材料	201

第三篇 运动学和动力学

第十三章 点的运动和刚体的基本运动	205
第一节 自然法	205
第二节 直角坐标法	210
第三节 刚体的基本运动	214
第四节 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	216
思考题	219
习 题	220
阅读材料	222
第十四章 点的合成运动与刚体的平面运动	223
第一节 点的合成运动的概念	223
第二节 点的合成运动的速度合成定理	225
第三节 刚体平面运动的概念及其运动分解	227
第四节 平面运动刚体上各点速度的求法	229
思考题	233
习 题	235
阅读材料	238
第十五章 质点和刚体动力学基础	239
第一节 质点运动微分方程	239
第二节 刚体绕定轴转动微分方程与转动惯量	243
第三节 功和功率	248
第四节 动能定理	251
思考题	256
习 题	257
阅读材料	260
第十六章 动静法	261
第一节 惯性力与质点的达朗贝尔原理	261
第二节 质点系的达朗贝尔原理	262
第三节 刚体惯性力系的简化	263
第四节 定轴转动刚体轴承的动反力	267
思考题	268
习 题	269
阅读材料	271
附录 A 常见截面几何性质	272
附录 B 型钢表	274
参考文献	283

绪 论

一、工程力学的研究对象和主要内容

工程力学是一门研究物体机械运动规律和构件承载能力的科学。所谓机械运动规律,是指物体在空间的位置随时间而变化的规律;而构件承载能力,是指构件在外荷载作用下具有能正常工作而不失效或破坏的能力。对于工程类专业,与其相关的是投入工业生产的大量的机器、设备等结构物在机械运动中的安全工作,因此工程力学必然以结构物及其组成构件为研究对象,研究它们在受到外荷载作用时所具有的平衡、运动、变形、失效等各个方面的基本规律,从而掌握相关的计算方法、合理的设计,再按一定的技术规则进行制造,然后实现有目的的工程应用。也就是说,工程力学实际面对的是工程,最终服务的也是工程。

工程力学的内容主要分为三篇,它包括刚体静力学、变形体静力学、运动学和动力学。

第一篇刚体静力学,主要是研究物体在力系作用下平衡的规律,而平衡是物体机械运动的一种特殊情形。物体要平衡,作用在物体上的力需满足一定的条件。刚体静力学所研究的,实际上就是建立平衡所需满足的条件。这时我们所取的力学模型就是把物体视为刚体。因此,研究刚体所作用的力的平衡,即称为刚体静力学。

第二篇变形体静力学,变形体静力学中的力学模型是变形体。变形体泛指工程结构的组成构件,如车床主轴、齿轮、传动轴等。构件工作时,由于外力作用而发生几何形状和大小的改变称为变形。由于构件在所作用的外力取消后能恢复原来的形状,通常称这种变形为弹性变形,而且变形很小,因此构件在变形体静力学中仍用到刚体静力学的理论。这时我们将工程力学知识应用实际会带来很多方便,而且予以实践也是可能的。当构件所作用的外力取消后不能恢复的形状而残留一部分变形,这种变形称为塑性变形。构件有了塑性变形就要丧失承载能力而不能正常工作。为保证工程结构物正常工作,工程结构的每一组成构件应具备的承载能力,也就是应当满足如下三方面的要求:强度要求——构件有足够的抵抗破坏的能力;刚度要求——构件有足够的抵抗变形的能力;稳定性要求——构件有足够的保持原有平衡形态的能力。变形体静力学,主要是研究构件的强度、刚度和稳定性,为构件选取合理的截面形状和尺寸,以及适当的材料而提供理论基础。

第三篇运动学和动力学,如果作用在物体上的力系不平衡,物体的运动状态将发生改变。物体的运动规律不仅与物体的受力情况有关,而且与物体本身的惯性和原来的运动状态有关。对于这一篇所研究的,第一是运动学,即从几何的观点来研究描述物体空间位置随时间的变化规律。工程上有大量的结构物要作机械运动,如电机转子的回转运动、压缩机活塞的往复直线运动、更复杂的机械运动等。对于每种机械运动的设计,如机床的运行,必须设计一套适当的传动机构,才能使电动机带动主轴和刀架共同运转而实现对工件的加工。可见,研究机械运动规律时,运动学理论不可少。第二是动力学,即要对物体的机械运动进行全面的分析,研究物体的运动与作用于物体的力之间的关系,从而建立物体机械运动的普遍规律。动力学的形成与工业生产的发展密切相关,特别是现代科学技术与制造业迅速发展的今天,动力学更侧重于工程技术的应用,如高度自动化机械的动力计算、航空航天飞行器上新型材料

高速高温气流下的应用力学问题,以及制造业中机械手的动态的性质,这些都要用到动力学理论。

二、力学的发展史

力学的发展史,就是人类在改造自然中认识和掌握物体机械运动规律的历史。可以说,人类历史有多久,力学的历史就有多久。在力学发展史上,牛顿 1687 年的《自然哲学的数学原理》给出了运动三定律,是具有划时代意义的重要里程碑。在人类自然科学发展史上,力学曾一度占据着中心地位。而工程力学的发展始终与机械、航空、建筑、水利、交通等工程相随而行,而工程的发展又促成了力学各个分支的建立,力学与工程的不可分割,而且不断显示着它在工程中的先导和促进作用。在 19 世纪 30 年代,由于要在桥梁上通过火车,不仅需要考察桥梁承受静荷载的问题,还必须考虑承受动荷载的问题。又由于桥梁跨度的增长,出现了金属桁架结构。19 世纪末到 20 世纪初,学者们对船舶结构进行了大量的力学研究,并研究了可动荷载下的梁的动力学理论以及自由振动和受迫振动方面的问题。20 世纪初,航空工业的发展促进了对薄壁结构和加劲板壳的应力和变形分析,以及对稳定性问题的研究。与此同时,桥梁和建筑开始大量使用钢筋混凝土材料,这就要求科学家们对钢架结构进行系统的研究。1914 年,在德国的本迪克森创立了转角位移法,用以解决刚架结构和连续梁等问题。后来在 19 世纪二三十年代,对复杂的超静定杆系结构提出了一些简易计算方法,使一般的设计人员都可以掌握和使用了。现代工程中大量使用细长型和薄型结构,如细杆、薄板和薄壳。它们受压时,会在内部应力小于屈服极限的情况下发生失稳(皱损或弯曲),即结构产生过大的变形,从而降低以致完全丧失承载能力。另外,大变形还会影响结构的其他设计要求,如影响飞行器的空气动力学性能、结构稳定理论中的失稳临界荷载等。

到了 20 世纪,由于工程技术发展的需要,因此又促成了工程力学的空前推进。它的研究对象已不再限于理想模型,而更多地以自然界和工程技术中遇到的复杂介质或系统为对象,建立各种力学模型,并在解决问题过程中形成了许多力学分支。在传统的理论力学、材料力学、流体力学等学科外形成了空气动力学、水动力学、渗流力学、弹塑性力学、断裂力学、结构力学、岩土力学、振动学、爆炸力学、实验力学、生物力学等分支。在力学分支理论的指导和支持下,工程技术在很广泛的范围内取得了巨大的成就,如人类的登月、空间站的建立、航天飞机的飞行、单机功率达百万千瓦的汽轮机的问世、深潜达几百米的潜艇的下水、时速达 500 km 的列车的商业运行等。科学的发展是无止境的。力学在宏观方向的发展没有停息过,而且在微观方向的发展也在日益深化。像新出现的前缘学科纳米力学就正处于方兴未艾之势。现在已揭示的纳米材料的力学性能就十分奇异:例如纳米陶瓷除有意想不到的抗拉性能外,并且还有可以随意弯曲的良好韧性;又如纳米晶粒尺寸为 30 nm 的铜材料,在室温下冷轧后将具有可以从 1 cm 延伸到 1 m 的超常塑性,等等。科学家预测,再有十多年,由于大量纳米材料的应用,会使未来的航天器可小到如一辆小汽车一样的大小。力学发展的历史,充分说明力学随着人类认识自然现象和解决工程技术问题的需要而发展,力学对认识自然和解决工程技术问题有着其他学科所无法替代的极为重要的作用。力学是一门基础科学,它所阐明的自然规律带有普遍性;力学是一门技术科学,使许多工程技术的理论基础在广泛的工程应用过程中不断得到发展。

三、工程力学的研究方法

工程力学来源于实践又服务于实践。在研究工程力学时,现场观察和实验是认识力学规律的重要环节。在学习本课程时,观察实际生活中的力学现象,学会用力学的基本知识去解释这些现象;通过实验验证理论的正确性,提供测试数据资料作为理论分析、简化计算的依据。工程实际问题往往比较复杂,为了使研究的问题简单化,通常抓住问题的本质,忽略次要因素,将实际所研究的对象抽象为便于理论分析和数学描述的力学模型。在力学中应用抽象这种方法的实质,实际上就是在量级上将研究对象的不影响本质的次要部分的删除。如果能研究的只是物体所受力之间的相互关系时,其相应的抽象过程,即在宏观上假设物体在力作用下是形状不会改变也就是不变形的物体,通常称为**刚体**。反过来说,刚体就是物体在力作用时其内部各点相对位置不改变的物体。绝对不变形的物体是不存在的,只不过在这时将变形量忽略不计。但是,当要研究物体的变形以及破坏时,其相应的抽象过程,即在宏观上假设物体是变形固体简称**变形体**。实际变形体的变形,要显现在微观结构上是很复杂的。因此这时的抽象过程,就须进一步在微观上作出假设来实现,即假设物体材料组织是连续均匀,且合向同性的。所谓连续均匀,就是认为变形固体的组成物质在粒子量级上毫无空隙地充满了固体体积所占有的空间,而且微体粒子在变形固体受力后所表现出的力学性能在各处,同时各个方向上都一样。由于组成变形体的晶粒为无穷多,并是随机排列的,因此从统计的平均值上看,大多数工程材料如金属以及砖石、混凝土等非金属材料都可以接受这一假设,这样的材料又称为**各向同性材料**。而有一些材料的不同方向则具有不可忽视的不同的力学性能,如木材及个别有机合成材料等,这样的材料即称为**各向异性材料**。

另一方面,在研究变形体的问题中,如分析变形体所受力的平衡问题,这时变形体的尺寸改变相对于变形体原来的尺寸很小,并不至于给所研究问题引来较大的误差,故将尺寸改变带来的影响忽略不计,即认为变形体受力后变形很小,这算是给出抽象力学模型的基础假设之一。

对于一个方向尺寸远大于其他两个方向尺寸的变形体,称为**杆件**。杆件是工程结构中普遍采用的构件,是变形体静力学研究的主要对象,为此而要研究的变形的基本形式,即杆件的拉伸或压缩、扭转、弯曲,而其他任何较复杂的变形,都是这几种变形的叠加。

总之,工程力学有较强的系统性,各部分内容之间联系较紧密,学习中要循序渐进,认真理解基本概念、基本理论和基本方法。学习时要注意所学概念的来源、含义、力学意义及其应用,注意有关公式的根据、适用条件,注意分析问题的思路、解决问题的方法。

第一篇

刚体静力学

静力学基础知识与物体的受力分析

平面汇交力系与平面力偶系

平面任意力系

摩 擦

空间任意力系

