

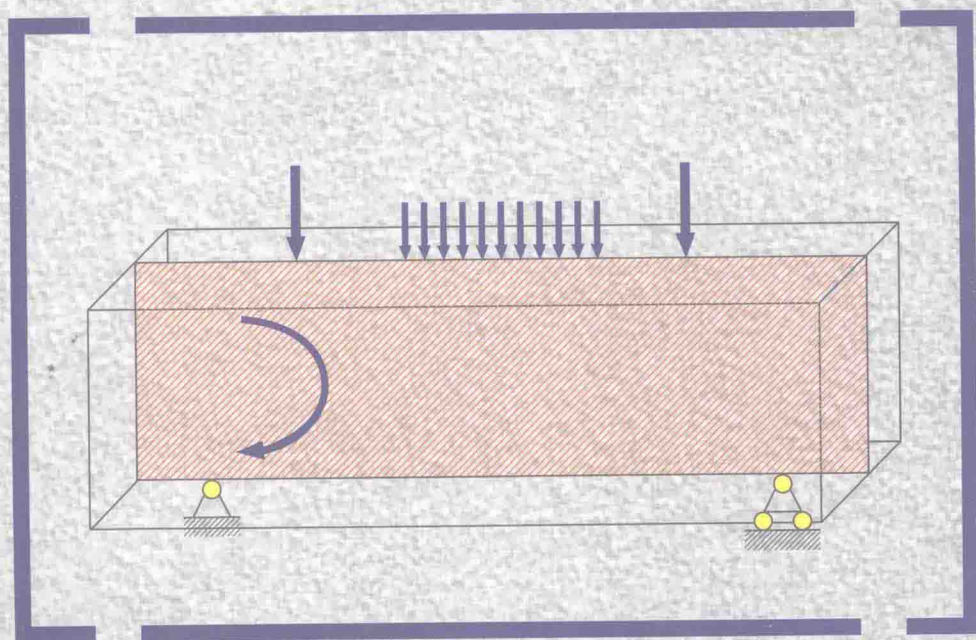
普通高等学校规划教材

Mechanics of Materials

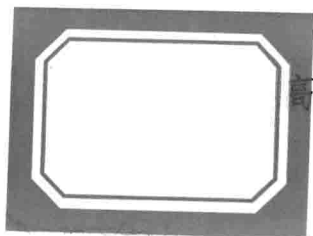
材料力学

(上册)

李银山◎编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



高等学校规划教材

Mechanics of Materials

材料力学

(上册)

李银山 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本教材是根据教育部高等院校工科本科“材料力学”课程教学基本(多学时)要求编写的,是作者继《Maple 材料力学》出版后,将材料力学和计算机技术结合起来的又一部新型教材,首次讲解了李银山提出的一种解决材料力学和结构力学问题的快速解析法——连续分段独立一体化积分法。

本书由《材料力学》上、下册组成,共计 28 章。基本上涵盖了经典材料力学所涉及的所有问题,即强度、刚度、稳定性、动载荷、能量法和优化设计,内容完整、结构紧凑、叙述严谨、逻辑性强,并配备手算和电算(Maple 软件)两类例题,思考题和 A、B、C 三类习题。

上册内容主要包括:截面几何性质;拉伸、压缩、剪切、扭转和弯曲等杆件基本变形的强度、刚度计算;杆件自由振动偏微分方程的建立;应力与应变分析;强度理论;组合变形;绳索的强度、刚度计算和利用计算机求解梁弯曲变形的快速解析法等共计 15 章。

本书适用于工科本科生材料力学教学使用,以及研究生和工程技术人员材料力学专题的学习研究。

为便于教师讲授本教材,本书配备多媒体电子教案,可于人民交通出版社网站(<http://www.ccpres.com.cn/Service/index.aspx>)下载。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学. 上册/李银山编著. --北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.9

普通高等学校规划教材

ISBN 978-7-114- 11608-7

I. ①材… II. ①李… III. ①材料力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 186925 号

普通高等学校规划教材

书 名:材料力学(上册)

著 作 者:李银山

责任编辑:王文华 牛家鸣

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:27.75

字 数:650 千

版 次:2014 年 9 月 第 1 版

印 次:2014 年 9 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11608-7

定 价:49.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

序

由李银山教授编写的《材料力学》是将材料力学和计算机技术结合起来的新型教材,本书分上、下册,共计 28 章,包括了材料力学教学大纲要求的全部内容。由于材料力学中许多问题的计算都比较繁琐,本书引入了由李银山提出的快速求解结构弯曲变形问题的连续分段独立一体化积分法,因而有利于系统地培养学生建模编程和计算分析、解决工程实际问题的能力。

连续分段独立一体化积分法首先将梁进行连续分段,建立具有四阶导数的挠曲线近似微分方程,然后分段独立积分四次,得到挠度的通解。根据边界条件和连续性条件,确定积分常数,得到剪力、弯矩、转角和挠度的解析函数,利用计算机绘出剪力图、弯矩图、转角图和挠度图。工程实例表明,连续分段独立一体化积分法建立方程简单,计算编程程式化,求解速度快,与有限元法相比,其优点是可以得到精确的解析解。

在工程结构中,索是除杆件之外的另一种典型的构件,例如海洋工程中的缆绳、支撑电缆车与索道的钢绳、输电线及光缆等,特别是近年来大型索支撑结构,例如悬索桥、斜拉桥等的迅速发展,索已成为其重要构件,因此本书增加了无弹性索和有弹性索力学计算的基本理论。

李银山教授在撰写本书的过程中,查阅了大量的有关资料,编写了许多富有特色的例题和分类习题,其理论体系系统完整,循序渐进,学生易于掌握。本书的初稿曾在太原理工大学和河北工业大学有关专业使用,效果良好。

本书的出版,为材料力学教学的改进提供了一条可供选择的途径。我们衷心地期望本书的出版能在材料力学教学改革和培养高水平工程技术人才方面发挥一定的作用。

中国工程院院士

陈 宁

2014 年 5 月

前 言

本教材是根据教育部高等院校工科本科“材料力学”课程教学基本要求(多学时)、教育部工科“力学”课程教学指导委员会面向 21 世纪工科“力学”课程教学改革要求编写的。本书是将材料力学和计算机技术结合起来的新型教材,由《材料力学》(上册)和《材料力学》(下册)两部分组成。

随着科学技术日新月异的发展,作为基础学科的材料力学,其体系和内容也必须相应地进行调整。从这个愿望出发,在编写本教材时力图在已有《材料力学》的基础上,从以下几个方面作进一步的改进:

(1)提出了一种解决材料力学和结构力学的快速解析新算法——连续分段独立一体化积分法。该法首先将梁进行连续分段,独立建立具有四阶导数的挠曲线近似微分方程,然后分段独立积分四次,得到挠度的通解。根据边界条件,确定积分常数,得到挠度的解析函数。

连续分段独立一体化积分法与通常求解弯曲变形问题的积分法不同,不用列平衡方程求解支座约束力,不用建立弯矩方程,就可得到剪力函数、弯矩函数、转角方程和挠度函数,反过来,也可以求出支座约束力。

本教材中的讲解传统算法与现代算法并重,学习传统算法便于理解材料力学基本原理,采用现代算法可以快速、准确解决工程问题,提高效率。

(2)吸收了《力学与实践》“教学研究”栏目的最新成果,以及第 1~7 届全国高等学校力学课程报告论坛的最新成果,使全书内容完整、结构紧凑、叙述严谨、逻辑性强。

(3)注意使用矢量、张量、矩阵等数学工具,以适应计算机的使用要求。增加了有限差分法和有限单元法等数值方法的内容,以利于理解有限单元法原理,达到尽快正确使用有限单元法大型软件求解的目的,并提高数值计算编程能力。

(4)引入了结构优化设计思想。本教材注意从被动分析设计到主动优化设计教学思想的转变。

社会生产的需求和设计经验的积累反映了发展结构优化的客观要求;结构分析理论与方法的日益成熟(特别是有限单元法的发展)、数学理论的发展(特别是现代数学规划论的发展)、电子计算机的发展(特别是 MATLAB 优化库的出现),是发展结构优化的基础和后盾。本书期望学生尽快掌握结构优化设计的思想和方法,以真正解决工程设计问题。

(5)过去由于手工无法求解而只限于等截面杆问题的分析,本教材引入了直接对变截面杆分析求解。

21 世纪人类步入信息时代,计算机技术无论从硬件还是软件上都在日新月异地发展,信息化、数字化、网络化渗透在很多学科当中,也为很多学科提供了新的发展机遇。个人计算机的空前普及、计算机语言的更新换代、计算技术的不断发展,使面向计算机的材料力学不再满足于等截面杆的分析,而是开始尝试系统地建立面向计算机的变截面杆的问题,并建立计算机分析求解的精确模型,作精确的符号运算和数值分析计算,而不受求解问题规模的限制。

(6)引入了结构可靠性设计思想。本教材注意从容许应力设计法到可靠性设计法的教学思想的转变与衔接。

(7)增加了杆、轴、梁、索连续振动方程的建立,通过本书的学习,学生不仅可以掌握静态的材料力学设计,而且可以尽早接触动态的材料力学设计。

(8)增加了索的材料力学计算基本理论。在工程结构中,索是除杆件之外的另一种典型的构件,例如海洋工程中的缆绳、支撑电缆车与索道的钢绳、输电线及光缆等,特别是近年来大型索支撑结构,例如悬索桥、斜拉桥等的迅速发展,索已成为其重要构件。因此,有必要在材料力学课程中引入索的基本理论,其内容也是进一步学习薄膜理论的基础。

(9)子曰:“学而不思则罔,思而不学则殆。”。现有一些材料力学教科书所给出的思考题,似乎可以分为两大类:一类主要是复习性的,例如“材料力学的任务是什么?”“材料力学的研究对象是什么?”等。另一类则不单纯是复习,而是带有一定的思考性。收入本书的思考题,基本上属于后一类。思考题中带“*”表示属于较难的问题。有的思考题虽然归入某一章,但由于材料力学知识的连贯性,可能需要全面思考。

(10)子曰:“学而时习之,不亦说乎?”。本书希望构建“教、学、习、用”四维一体的现代化、立体化教材。本书例题分为常规的手算例题和计算机电算例题,供教师“教”和学生“学”选用。收入本书的习题分为三类:A类习题比较简单、容易,供同学们写课后作业,期中或期末考试练习选用;B类习题有一定难度,供考研和参加力学竞赛的同学练习选用;C类习题与工程实际结合比较紧密,供同学们写大作业和工程技术人员学习时参考应用。

作为面向21世纪的新教材,本书尝试为材料力学建立一种具有现代计算方法的强大功能,但又不失去传统解析方法之精确性的新体系。

华东理工大学李彤编写了第2~5章,并制作了本书的多媒体课件;河北工业大学李银山编写了其他所有章节,并统稿。

在编写本书过程中,我的研究生罗利军、董青田、曹俊灵、潘文波、吴艳艳、官云龙和其他许多博士生、硕士生及本科生提出了宝贵的修改建议,给予了很多帮助,在此一并致谢。

感谢我的博士生导师杨桂通教授针对本书进行的有益讨论和指导。

我深深地感谢我的夫人杨秀兰女士,她帮助我录入了全部书稿。

陈予恕院士热情为本书作序,并担任主审;河北工业大学李欣业教授、焦永树教授对书稿作了极为认真细致的审阅,提出了许多宝贵的改进意见,在此致以衷心的感谢!

限于作者水平,难免有错误与不妥之处,望读者不吝指正。

李银山

2014年5月于天津

主要符号表

A	面积	k_n	扭簧刚度系数
a, b, c	尺寸, 距离, 常数	k_T	扭转轴弹簧刚度系数
c	波的传播速度	l	长度
c_l	无限介质中纵波传播速度	L	杆件的长度, 跨度
c_t	无限介质中横波传播速度	M	弯矩
C	积分常数, 形心	M_e	外力偶
D	直径(外径)	m	分布力偶, 质量
d	直径(内径)	max	极大
E	材料弹性模量	min	极小
e	偏心距	n	安全因数, 每分钟的转数
F	集中力	n_{st}	稳定安全因数
F_{bs}	挤压力	O	坐标原点
F_{cr}	柱的临界荷载	P	功率
F_N	轴力	p	压力
F_S	剪力	q	分布载荷(单位距离上的荷载)
F_{Sy}, F_{Sz}	剪力分量	r	半径, 距离
F_T	绳索张力	S	静矩
F_u	极限载荷	s	弧长
G	切变模量	T	扭矩, 温度, 周期, 动能
g	重力加速度	T_u	极限扭矩
h	高度、尺寸	t	厚度, 时间
I_y, I_z	面积惯性矩	U_e	应变能
I_p	圆截面的极惯性矩	U_e^*	余应变能
I_l	任意截面的极惯性矩	$U_{e,d}$	动应变能
I_{yz}	面积惯性积	$U_{e,st}$	静应变能
I_1, I_2	主惯性矩	u	轴向位移, x 方向的位移
i	惯性半径	u_e	单位体积的应变能
i_y, i_z	对 y, z 轴的惯性半径	u_e^*	单位体积的余应变能
J	质量惯性矩	u_d	形状改变比能
K	体积弹性模量	u_v	体积改变比能
K_d	动荷因数	v, w	梁的挠度分量, y, z 方向的位移
k	弹簧刚度系数	V	体积, 势能
k_M	弯曲梁弹簧刚度系数	W	抗弯截面模量, 功
k_N	拉压杆弹簧刚度系数	W^*	余功

W_e	外力功	Π	变形势能
W_i	内力功	Π^*	余变形势能
W_p	圆截面抗扭截面模量	θ	弯曲转角, 体积应变
W_t	非圆截面抗扭截面模量	ϑ	单位长度扭转角
x, y, z	直角坐标, 距离	μ	泊松比, 长度因数
x_C, y_C, z_C	形心坐标	ρ	物质密度, 曲率半径
α	热膨胀系数, 角, 圆内外直径之比	σ	法向应力
α_K	冲击韧度	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
β	表面加工系数	σ_{cr}	柱的临界应力
γ	切应变	σ_d	动应力
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	xy, yz 和 zx 平面内的剪切应变	σ_m	平均应力
δ	伸长率, 广义位移, 过盈量, 厚度	σ_{st}	静应力
δU_e	虚变形能	$[\sigma]$	容许应力
δU_e^*	余虚变形能	τ	剪应力
δW	虚功	$[\tau]$	容许剪应力
δW^*	余虚功	ω	角速度
δW_e	外力虚功	ω_0	固有角频率
δW_i	内力虚功	ω_d	阻尼自由振动角频率
$\delta \Pi$	虚变形势能	Ω	激励角频率
$\delta \Pi^*$	余虚变形势能	φ	扭转角
Δ	位移, 伸长量	ζ	阻尼比
Δ_d	动位移	EA	抗拉(压)刚度
Δ_{st}	静位移	EI	抗弯刚度
ΔT	温差	GI_p	圆截面扭转刚度
		GI_t	非圆截面扭转刚度

目 录

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学教学内容的改革与发展	1
1.2 面向能力培养的材料力学	2
1.3 Maple 软件介绍	3
1.4 线性弹性定律由发现到完善	5
1.5 连续分段独立一体化积分法	6
1.6 变形固体的基本假设	7
1.7 杆件变形的形式	8
1.8 用平衡方程求支座约束力	8
1.9 Maple 编程示例	11
思考题	12
习题	13
第 2 章 截面几何性质	15
2.1 静矩与形心	15
2.2 极惯性矩、惯性矩和惯性积	17
2.3 平行移轴公式	20
2.4 转轴公式与主惯性矩	22
2.5 惯性矩莫尔圆	25
2.6 Maple 编程示例	26
思考题	28
习题	31
第 3 章 基本概念和材料的力学性能	35
3.1 外力和内力	35
3.2 变形与位移	37
3.3 应力和应变	38
3.4 材料拉伸时的力学性能	40
3.5 材料拉压力学性能的进一步研究	44
3.6 许用应力与强度条件	45
3.7 拉压应变能密度	47
3.8 圣维南原理	47
3.9 Maple 编程示例	48
思考题	49

习题	50
第4章 轴向拉压	53
4.1 拉压杆的内力	53
4.2 拉压杆的应力	55
4.3 拉压杆的变形	59
4.4 拉压超静定问题	63
4.5 应力集中的概念	66
4.6 杆的纵向振动	67
4.7 Maple 编程示例	69
思考题	70
习题	76
第5章 剪切	83
5.1 剪切实用计算	83
5.2 剪切郑玄—胡克定律	90
5.3 切应力双生互等定理	93
5.4 剪切应变能密度	93
5.5 Maple 编程示例	94
思考题	95
习题	96
第6章 扭转	99
6.1 扭矩	99
6.2 圆轴扭转横截面上的切应力	101
6.3 圆轴扭转强度条件	104
6.4 圆轴扭转变形与刚度条件	106
6.5 非圆截面轴的扭转	109
6.6 薄壁杆的扭转	111
6.7 密圈螺旋弹簧	113
6.8 轴的扭转振动	114
6.9 Maple 编程示例	116
思考题	117
习题	120
第7章 弯曲内力	125
7.1 梁的约束与类型	125
7.2 剪力与弯矩	126
7.3 剪力、弯矩与载荷集度间的微分关系	129
7.4 刚架与曲梁的内力	133
7.5 剪力与弯矩的简易作图法	136
7.6 Maple 编程示例	137
思考题	139

习题	143
第8章 弯曲应力	149
8.1 弯曲正应力	149
8.2 弯曲切应力	153
8.3 Maple 编程示例	159
思考题	164
习题	167
第9章 弯曲变形	175
9.1 直接积分法	175
9.2 叠加法	179
9.3 力矩—面积法	183
9.4 梁的刚度条件与弯曲应变能	185
9.5 梁的振动	187
9.6 Maple 编程示例	189
思考题	191
习题	196
第10章 弯曲问题的进一步研究	203
10.1 初参数法	203
10.2 待定系数法	205
10.3 共轭梁法	206
10.4 奇异函数法	210
10.5 有限差分法	213
10.6 非对称弯曲	216
10.7 开口薄壁梁的弯曲切应力	220
10.8 弯曲中心	221
10.9 复合梁和夹层梁	223
10.10 Maple 编程示例	224
思考题	228
习题	230
第11章 利用计算机求解梁弯曲变形的快速解析法	235
11.1 连续分段独立一体化积分法	235
11.2 静定梁的快速解析法	236
11.3 超静定梁的快速解析法	244
11.4 Maple 编程示例	246
思考题	248
习题	253
第12章 应力与应变分析	257
12.1 一点的应力状态及其分类	257
12.2 平面应力状态分析	260

12.3	空间应力状态	269
12.4	应变分析	270
12.5	广义郑玄—胡克定律	275
12.6	Maple 编程示例	278
	思考题	279
	习题	282
第 13 章	强度理论	286
13.1	材料破坏形式和强度理论的概念	286
13.2	空间应力状态下的应变能密度	287
13.3	典型的强度理论	288
13.4	强度理论的应用	294
13.5	Maple 编程示例	298
	思考题	299
	习题	300
第 14 章	组合变形	303
14.1	组合变形与叠加原理	303
14.2	拉伸或压缩与弯曲的组合	303
14.3	偏心压缩与截面核心	307
14.4	弯扭组合	310
14.5	Maple 编程示例	314
	思考题	316
	习题	318
第 15 章	索	324
15.1	索的静止	324
15.2	绕在杆上的索	324
15.3	悬桥	327
15.4	悬链线	327
15.5	有弹性索在重力场中的静止	329
15.6	索的应力与应变能	332
15.7	弦的振动	333
15.8	Maple 编程示例	335
	思考题	339
	习题	339
附录 A	热轧型钢(GB/T 706—2008)	344
附录 B	部分思考题和习题参考答案	361
参考文献		427

孔丘(字仲尼,前 551 - 9 - 28 ~ 前 479 - 4 - 11)

子曰:“学而时习之,不亦说乎?”

有朋自远方来,不亦乐乎?

人不知而不愠,不亦君子乎?”

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学教学内容的改革与发展

“材料力学”是一门具有悠久历史和丰富内容的传统学科,是机械工程、土木工程、水利工程、交通工程等专业领域的一门主要技术基础课。

“材料力学”的主要研究对象是杆件,以及由若干杆件组成的简单杆系,还有一些形状与受力均比较简单的板与壳。至于一般较复杂的杆系与板壳问题,则属于结构力学与弹性力学等研究范畴。工程实际中的构件,大部分属于杆件,而且,杆件问题的分析原理与方法也是分析其他形式构件的基础。

随着科学技术日新月异的发展,作为基础学科的材料力学,其体系和内容也必须相应地进行调整。从这个愿望出发,在编写本教材时力图在以下几个方面作一些改进:

(1) 注意使用矢量、张量、矩阵等数学工具,以适应计算机的使用要求,增加有限差分法和有限单元法等数值方法的内容。

(2) 引入结构优化设计思想,注意从被动分析设计到主动优化设计教学思想的转变。

社会生产的需求和设计经验的积累反映了发展结构优化的客观要求;结构分析理论与方法的日益成熟(特别是有限单元法的发展)、数学理论的发展(特别是现代数学规划论的发展)、电子计算机的发展(特别是 MATLAB 优化库的出现),是发展结构优化的基础和后盾。

材料力学的任务就是在保证构件(主要是杆件)正常安全工作,即满足强度、刚度和稳定性等基本要求的前提下,使构件重量最轻、材料最省、制造成本最低。

所谓强度就是构件抵抗破坏的能力,即保证在规定的使用条件下不发生意外的断裂或显著塑性变形;所谓刚度就是构件抵抗变形的能力,即保证在规定的使用条件下不产生过大变形;所谓稳定性就是构件保持原有平衡形式的能力,即保证在规定的使用条件下不失稳。

(3) 过去由于手工无法求解而只限于等截面杆问题的分析,本教材引入了直接对变截面杆分析求解。

(4) 引入结构可靠性设计思想,注意从容许应力设计法到可靠性设计法的教学思想的转变与衔接。

结构的可靠性包括结构的安全性、适用性和耐久性。其中结构的安全性包括强度、刚度和稳定性;结构的适用性指结构在正常使用时具有良好的工作性能;结构的耐久性指在正常

维护条件下结构能够使用到预期的耐久年限。结构可靠性就是结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。度量结构可靠性的数量指标称为结构可靠度,其定义为:在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

21 世纪,人类步入信息时代,计算机技术无论从硬件还是软件上都在日新月异地发展,信息化、数字化、网络化渗透在很多学科当中,也为很多学科提供了新的发展机遇。个人计算机的空前普及、计算机语言的更新换代、计算技术的不断发展,使面向计算机的材料力学不再满足于等截面杆的分析,而是开始尝试系统地建立面向计算机的变截面杆的问题,并建立计算机分析求解的精确模型,作精确的符号运算和数值分析计算,而不受求解问题规模的限制。

作为面向 21 世纪的新教材,本书尝试为材料力学建立这样一种具有现代计算方法的强大功能,但又不失去传统解析方法之精确性的新体系。

1.2 面向能力培养的材料力学

约翰·冯·纽曼指出:“科学不只是为了解释一些现象,更不只是为了说明一些事情。科学的主要任务是建立数学模型。它是数学的结构,加上了确定的语言说明,用以描述观察到的现象,这样的数学模型将是唯一精确的,这才是科学的任务。”

讲授材料力学要始终以数学建模思想为核心。什么是数学建模呢?如果一定要下一个定义的话,可以说它是一种科学的思考方法,是“对现实的现象通过心智活动构造出能抓住其重要且有用的特征的表示,常常是形象化的或符号的表示”。从科学、工程、经济、管理等角度看数学建模,就是用力学的模型和数学的语言和方法,通过抽象、简化,建立能近似刻画并“解决”实际问题的一种强有力的数学、力学工具。

数学、力学、物理、化学、天文、地理、生物各门学科尽管研究的内容不同,但一言以蔽之,其研究方法都是数学建模。其步骤为“象、数、理”三个要点。

“象”即自然现象之象也。自然现象是复杂的,实际问题是千姿百态的。在对事物观察和实验的基础上,经过抽象简化从而建立力学模型,材料力学的力学模型是变形杆件(杆、轴、梁、柱),在基本规律的基础上,经过逻辑推理和数学演绎,建立数学模型。材料力学的数学模型是常(偏)微分方程组。“象”其实就是把实际问题简化成力学模型(杆、梁、轴、柱),再转化为数学模型(偏微分方程组)的过程。”

“数”是力学的数理表达,是对“象”的定量研究。在现代主要是利用电子计算机对数学模型(偏微分方程组)求解,当然也离不开各种数学新方法和专业知识。现代自然科学和技术的发展,正在改变着传统的学科划分和科学研究的方法。数学、力学、物理、化学、天文、地理、生物这些曾经以纵向发展为主的基础学科,与日新月异的新技术相结合,使用数值、解析和图形并举的计算机方法,开拓出了横跨多种学科门类的新兴领域。计算科学特别是图形技术的长足进步,使人们得以理解和模拟出许多过去无从下手研究的复杂现象。从随机与结构共存的湍流现象,到自然界中图样花纹的选择与生长,以及生物形态的发生过程,都开始展现其内在规律。

“理”指力学的原理、道理。“理”狭义地讲指牛顿定律、变分原理等;广义地讲包括数学定理、物理原理、自然规律,甚至包括某一实际问题的规律总结。对求得的解进行分析判断、总结规律和稳定性分析,这是运用数学模型描述事物特征或运动规律的重要环节。“理”就是对数学模型(偏微分方程组)的求解结果进行分析判断、总结规律的过程。

辩证唯物主义认为世界是物质的,物质是在时间(t)和空间(x, y 和 z)中有规律地运动的。恩格斯根据客观物质和运动形式把现代科学分成:机械运动——力学、天文学(天体力学);物理运动——物理学(分子的力学);化学运动——化学(原子的力学);生物运动——生物学(生物力学);社会运动——社会学(生产力学)。研究自然现象的数量关系及运动规律的数学方法,必须以最简单的运动为基础,取某一系统为研究对象,建立它的非线性动力学模型。广义的动力学研究的是系统如何随时间变化。所谓系统,就是指由一些相互联系或相互作用的客体组成的集合。这些客体,既可以是自然科学中的一些物质,如气体、液体、固体、化合物、生物的各部分或其整体,也可以是各种社会事物组织,如各种群体或财政经济结构,以及生产力和知识等抽象的事物。系统的性质或特征由一些所谓状态变量所表征,如粒子的坐标和动量、化合物的浓度和人口密度等。动力学就是要研究这些状态变量随时间变化的规律。这种规律既可表达为关于状态变量的微分方程,也可用关于状态变量的离散方程表示,这些方程既可以是线性的,也可以是非线性的,但实际上多数都是非线性的,线性方程大多只是非线性方程的近似。

“材料力学”是力学系列课程中的重要组成部分,是固体力学最基础的力学课程。固体力学中最基本和最基础性的概念和理论大都是在基础力学部分建立的。学习材料力学,主要是学习如何将基础力学中的概念、理论和知识充分调动起来,灵活、合理、巧妙、综合地应用于由杆件(杆、轴、梁、柱)组成的复杂结构和机构的分析中去。

作为面向 21 世纪的课程内容体系,不仅要各从各门单一课程的内容上考虑如何改革和更新,更应该统观材料力学的整个内容体系和知识结构,研究如何更加有效地培养学生学习材料力学中所最需要的能力。为了建立面向能力培养的内容体系,必须认真研究材料力学中各种能力的体现与要求。

从整体上讲,材料力学中有三方面的能力需要重点训练培养,它们分别是:“象”(经典方法分析能力)、“数”(计算机分析能力)和“理”(定性分析能力)。

1.3 Maple 软件介绍

Maple 是 Waterloo 公司开发的一种数学运算软件,是目前世界上最为通用的符号计算软件之一。它提供了强大的数学计算功能和强大的程序包。在用户交互界面命令行,用户可以输入一条命令,Maple 执行后将结果显示给用户,然后等待用户进一步的输入。

为了满足不同领域用户的实际需要,Maple 将不同功能封装在不同的程序包中,并提供给不同的用户。在使用时,用户可以根据自己的需要,加载相应功能的程序包来完成相应的计算任务。Maple 提供十几种完成特定功能的程序包,如线性代数程序包、微积分程序包、统计程序包、微分方程程序包,以及画图程序包等,这些程序包可以满足各种应用计算的需求。除了 Maple 提供的各种程序包,还允许用户构建自己的自定义程序包,以完成更为复杂的特定需要。

1.3.1 工作表界面

Maple 工作表包含一组丰富的文档结:运算组、表格、段落、节以及超链接。运算组和表格帮助与 Maple 的运算引擎交互。这两种基本结构提供了直接途径来让 Maple 执行命令、显示结果。Maple 命令的输出结果可以是数字型的、符号型的,也可以是图像型的。

命令序列(运算组)是解决具体数学问题过程的规则描述,是工作表中最基本的可计算

结构。它的首要目的是将一条或多条命令结合在一个可再次执行的组中,命令结束符为分号或冒号,通过左侧的尖括号迅速辨认运算组,将光标置于运算组的任意命令行后按回车,全组命令将依次执行,并将结果显示于运算组的末尾,同时光标将自动跳至下一运算组的首条命令行。

1.3.2 基本数学运算

Maple 可视为功能强大的计算器。Maple 内置大量各类特殊运算,如阶乘、最大公约数、最小公倍数、模、同余运算等。Maple 的强大首先表现在它的精确运算能力,无论是分数还是无理数,都不会在运算过程中自动取近似的十进制小数,这样避免了误差的叠加,同时 Maple 可给出任意精度的近似小数。Maple 还具有强大的代数运算能力,它可以用符号运算来解析地解决和处理许多问题,定义变量与使用变量,可解决“如果……那么”等类问题。Maple 可使用不同的方法让数学表达式更便于处理、使用。这种变通的特性允许进行诸如多项式展开、因式分解、三角式化简、用运算结果给变量赋值、恒等变换等操作,可以用变量代替运算结果,当处理大量的表达式和函数时,变量的使用将不可缺少(特别是中间结果需要重复使用时)。

Maple 提供多种方法定义函数。其一是使用箭头定义符(如同数学中映射的定义符)。其二是使用 `unapply` 命令,将表达式转化为函数。Maple 可求解多种代数方程(组)。Maple 对每类数学对象都提供了大量适当的函数,右击任一种数学对象都将显示相关的右键菜单。

Maple 中最常用的工具包就是线性代数(`linalg`)工具包,`linalg` 工具包提供了一组用于处理向量、矩阵的强力工具。Maple 可求矩阵标准型、特征值、特征向量,可定义曲线坐标,进行各种矩阵分解。使用 `with(linalg)` 命令载入该工具包,会出现使用工具包的各种命令。

1.3.3 作图

Maple 支持 2D、3D 图像,它可以对显式、隐式、参数型函数及数据集作图。缺省情况图形将在行内(文档中)显示。首先用 `with(plots)` 和 `with(plottools)` 命令载入两个作图工具包,系统列出可用的函数。Maple 还能对线性不等式组作图,使许多线性规划问题的解可视化。

Maple 的 2D 作图工具允许同时对多函数作图,生成复函数映射、对数、双对数、参数型、分段、极坐标、等值线等图像,还可以对不等式组、隐函数、微分方程的解、根的分布等作图。另外,题目、标签、文字的字体属性等亦可按需设定。

`plots` 工具包中的命令:`implicitplot` 生成由二元方程决定的隐函数图象。`plottools` 工具包含有许多生成和处理图形对象的命令。

Maple 可以生成由显函数、参数型、微分方程的解给出的 3D 曲线和曲面。图像的外观,如字体、光照、着色等也可随便更改。`plots` 工具包不仅包含 2D、3D 作图,还支持 2D、3D 动画,用它可以描述现实世界中随时间变化的过程。

1.3.4 微分方程

Maple 能解多种常微分方程组(ODEs)与偏微分方程组(PDEs),包括方程组的初值问题(IVPs)、边值问题(BVPs)。`DEtools` 工具包提供多种解微分方程组的工具。首先用 `with(DEtools)` 命令载入此工具包。

`dsolve` 命令是解微分方程的重要命令。操作符 `D` 与命令 `diff` 也是常用的。Maple 还能

识别许多特殊函数,如 Dirac、delta 函数等。

1.4 线性弹性定律由发现到完善

1.4.1 郑玄—胡克定律

线性弹性定律是材料力学等固体力学一个非常重要的基础。一般认为它是由科学家胡克(Hooke, 1635 ~ 1703, 英国)首先提出来的。

在胡克之前 1 500 年,我国早就有了关于力和变形成正比关系的记载。

东汉郑玄(Zheng Xuan, 127 ~ 200, 中国)就《周礼·考工记·弓人》中“量其力,有三均”注云:“假令弓力胜三石,引之中三尺,弛其弦,以绳缓擗之,每加物一石,则张一尺。”

唐初,贾公彦对此又有疏云:“郑又云,假令弓力胜三石,引之中三尺者,此即三石力之弓也。必知弓力三石者,当弛其弦,以绳缓擗之者,谓不张之,别以一绳两箫,乃加物一石张一尺、二石张二尺、三石张三尺。”

本书本着实事求是的科学态度,采纳王仁等多名院士的建议,将线性弹性定律,称为郑玄—胡克定律。这个定律的原始含义可以表示为:

$$F = k \cdot \Delta x \quad (1-1)$$

式中, F 表示外力; Δx 表示变形; k 表示刚度系数。

胡克在 1676 年的一篇文章的末尾,以谜面为“ceinossttuv”的字谜,暗示了力和变形的线性关系。其后,在 1678 年的另一篇文章中,公布了字谜的谜底:“Ut tension sic vis”。这是拉丁文,译成中文就是:“有多大的伸长,就有多大的力”。意思是说,任何弹簧的力与其伸长成正比。

在简要介绍圆柱螺旋弹簧的试验装置和方法之后,据胡克自己说,如果某一质量(1 盎司,或者 1 磅)使弹簧伸长某一段距离(1/12 英寸,或者 1 英寸),则两倍的质量将使它伸长两倍的距离,三倍的质量将使它伸长三倍的距离,以此类推。

郑玄把弓作为弹性体研究,引入了弹性限度的概念,即“假令弓力胜三石,引之中三尺”;郑玄给出了力与位移的定量关系,即“每加物一石则张一尺”;郑玄研究了弓的刚度特征,引入了刚度单位,即“石/尺”。

胡克的试验包括四种情况:圆柱螺旋弹簧试验,钟表的盘簧试验,金属丝拉伸试验,悬臂木梁试验。胡克的表述与郑玄是等价的。胡克也给出了力与位移的定量关系,即弹簧的力与其变形成正比;胡克研究了弹簧的刚度特征,引入了刚度单位,即“磅/英寸”。胡克的实验比郑玄讲的多,为材料力学的基本变形即拉、压、剪、扭和弯分类提供了原始模型。郑玄和胡克的局限性是:①他们都不曾注意到弹性大变形(大应变)的非线性问题,应该指出郑玄—胡克定律是线性弹性定律,过去称为“弹性定律”是不确切的;②表达式(1-1)中刚度系数 k 包括材料常数和几何常数的耦合,没有把材料常数和几何常数分离开研究。

1.4.2 推广的郑玄—胡克定律

数学家和力学家柯西(Augustin Louis Cauchy, 1789 ~ 1857, 法国),奠定了材料力学、弹性力学应力和应变的理论基础,他对材料力学的主要贡献有:①引进了应变的概念,并建立了应变和位移的关系,还讨论了主应变与应变二次曲面;②引进了应力张量和主应力的概念,对各向同性弹性体,他从主应变与主应力应当重合,推论在这一情形下弹性常数应当有两个;③讨论了应变张量与应力张量的关系,称为广义郑玄—胡克定律,论证了在最一般条件