

52

工程力学基础教程

(上 册)

徐博侯 吴淇泰 编著
应祖光 沈新荣



A0966444

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学基础教程. 上 / 徐博侯等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2001. 8

ISBN 7-308-02758-9

I. 工... II. 徐... III. 工程力学—高等学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 041249 号

责任编辑 樊晓燕

封面设计 宋纪浔

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江良渚印刷厂

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 12.25

字 数 307 千

版、印次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数 0001—2000

书 号 ISBN 7-308-02758-9/TB·016

定 价 18.00 元

序

1997年浙江大学建立了国家工科力学教学基地,而教学基地的核心工作是课程体系的改革,因而学校领导按教育部工科力学课程指导委员会的意见,明确要求我们搞出一部能贯穿传统的理论力学和材料力学的贯通式教材来。这一任务对我们来说是太艰巨了:多年形成的理论力学和材料力学的风格相差甚大,加之学科的划分,多数有经验的教师大都只熟悉其中一门课程,所以做到真正的贯通谈何容易!但我们又有很好的条件:全国著名的刘鸿文教授和费学博教授就在我们这里,他们不仅学识渊博、经验丰富,而且对这项工作极为支持,不断给我们以鼓励和帮助。他们这种不断追求新的进步,衷心希望年轻人能攀上新的学术、教学高峰的无私精神,值得我们永远学习。

在讨论贯通式教材的大纲时,我们认为,仅仅用牛顿力学(即平衡)来贯通这两门课程,似乎太单薄了,容易搞成模块式,从而需要另找一条贯通的主线来,最后决定同时采用平衡法和能量法(拉格朗日力学)作为贯通的两条主线。平衡法实质上就是物理课中已熟知的牛顿力学,对学生来说是容易接受的;而能量法尽管在传统的理论力学和材料力学中均有所介绍,但总的来说不够系统,远远没有显示出其所具有的威力。本课程之所以强调能量法,主要是出于以下两个考虑:首先,比起力来能量是一个更基本的概念,它一方面容易扩充到其他领域(如电磁、热等),另一方面也能处理一些仅用力平衡无法解决的问题,譬如极值型稳定性问题;其次,能量法便于进行数值计算,这对力学在工程中的应用是特别重要的。当然用能量法也有其困难之处,因为相对力来说能量的概念是比较抽象的,学生需要有个熟悉过程,另外所需用到的数学知识也比较

多一些。为了绕过数学上的一些困难,我们采用了在保证力学正确性的前提下放弃数学上的严格性的办法,或者将有关数学问题放到附录中讲述。

这本教材先以讲义的形式在浙江大学化机专业 98 级和 99 级进行了试用,北京大学的陈滨教授、陈璞教授,清华大学的范钦珊教授,北京理工大学的梅凤翔教授,河海大学的卓家寿教授,同济大学的张若京教授以及我校的刘鸿文教授提出了宝贵意见,对此我们深表谢意。根据试用情况及专家们的意见,我们在讲义的基础上进行了重写。讲义是由徐博侯、吴淇泰、应祖光、许金泉分头编著的;而现在这本教程正文由徐博侯负责编著,习题由应祖光负责,上册的图由沈新荣负责,最后由吴淇泰进行协调。

由于编著者水平有限,加上这又是一项全新的工作,错误和不足之处在所难免,深望广大教师和读者批评指正。

编著者

2001 年 1 月于浙江大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 力学和工程力学基础课程	1
1 力学简介	1
2 设置工程力学基础课程的目的	2
3 课程的主要内容	4
§ 1.2 力学模型	5
1 物理性质的简化	6
2 几何形状的简化	7
3 分布力与集中力	8
4 约束	9
§ 1.3 小结	15
习 题	16
第 2 章 物体的受力分析与平衡	27
§ 2.1 受力分析	28
§ 2.2 力系的等效	33
1 力矩	34
2 主矢和主矩	38
3 等效力系定理	40
§ 2.3 力系的平衡	45
1 几种特殊情况	46
2 例	47

* § 2.4	超静定结构	57
1	几何可变体系和几何不变体系	57
2	约束	58
3	静定结构的组成规律	60
4	求静定结构的约束力	63
§ 2.5	刚化原理	64
§ 2.6	几个专门问题	66
1	重心	66
2	摩擦	71
§ 2.7	小结	80
习 题		81
第 3 章	杆件的内力分析	109
§ 3.1	杆的几何特征与基本变形	109
§ 3.2	杆横截面上的内力	111
§ 3.3	平衡方程	113
1	平面载荷作用的情形	113
2	扭转力偶作用的情形	116
3	一般情形	117
§ 3.4	平衡方程的应用	117
1	拉压与桁架	118
2	梁的横力弯曲	124
3	轴的扭转	130
4	其他情形	133
§ 3.5	小结	137
习 题		137

第 4 章 弹性杆件的应力分析和位移分析	151
§ 4.1 杆内的应力和应变	151
§ 4.2 杆件横截面上的正应力分析	154
1 杆件的拉(压)和弯曲的假定	154
2 正应力公式的应用	160
§ 4.3 杆件横截面上的剪应力分析	168
1 圆轴的扭转	168
2 横力弯曲引起的剪应力	173
*3 非圆截面杆的扭转	175
*4 薄壁杆件的扭转	178
§ 4.4 位移函数满足的平衡方程	183
1 轴向拉伸(压缩)	185
2 弯曲变形	190
3 扭转变形	196
§ 4.5 叠加法	199
1 变形的可加性	199
2 多个载荷存在的情形	200
3 组合变形的情形	206
4 超静定结构	207
§ 4.6 小结	210
习 题	211
第 5 章 应力状态	232
§ 5.1 一点应力状态	232
1 应力状态	233
2 剪应力互等定理	235
3 应力状态实例	236

§ 5.2	主应力	238
1	应力矩阵的坐标变换	238
2	平面应力状态	240
3	一般三维应力状态	245
§ 5.3	广义胡克定律	247
1	应变	248
2	广义胡克定律	251
§ 5.4	应变比能	253
1	应变比能	253
2	体积改变比能和形状改变比能	253
3	杆的应变能	258
§ 5.5	小结	260
习 题		261
第 6 章	强度理论	271
§ 6.1	构件及其材料的失效形式	271
1	断裂	271
2	塑性变形	272
3	疲劳	272
4	过大的变形	272
5	失稳	273
§ 6.2	强度与强度准则	273
1	几个简单的强度实验	274
2	材料的理想强度	275
3	评价参数及强度准则的一般形式	278
§ 6.3	无应力奇异时的强度准则	280
1	最大拉应力准则(第一强度理论)	280
2	最大伸长线应变准则(第二强度理论)	280

3	最大剪应力准则(第三强度理论)	281
4	最大形状改变比能准则(第四强度理论)	282
5	强度理论的讨论	283
* 6	莫尔强度理论	284
* § 6.4	应力奇异时的强度准则	287
1	应力强度因子法	288
2	能量法(格里菲思理论)	290
* § 6.5	疲劳强度准则	291
1	交变应力	292
2	S-N 曲线和持久极限	293
3	持久极限曲线	295
4	疲劳强度的校核	297
5	弯扭组合交变应力下的疲劳强度的校核	299
§ 6.6	杆件的静力学强度设计	301
1	一般设计原则	301
2	拉压杆的强度设计	302
3	连接件的工程假定设计	304
4	梁的强度设计	309
5	圆轴的强度设计	315
§ 6.7	小结	319
习 题		320
附录 I	平面图形的几何性质	337
§ 1.1	静矩和形心	337
§ 1.2	惯性矩、惯性积和惯性半径	339
§ 1.3	坐标变换	340
1	坐标系平移	341
2	坐标系转动	343

习 题	345
附录 II 实对称矩阵.....	348
§ II.1 实对称矩阵.....	348
§ II.2 正交矩阵.....	352
§ II.3 对称矩阵的特征值性质.....	354
§ II.4 广义特征值.....	356
§ II.5 对称矩阵特征值的极值原理.....	358
习 题.....	362
习题答案.....	363

第1章 绪 论

§ 1.1 力学和工程力学基础课程

1. 力学简介

力学是以机械运动作为研究对象,而平衡是机械运动的一种特殊形式。机械运动是自然界诸多运动中最常见、最普遍的一种运动,也是最容易被人们的感官所感知的运动。理解了机械运动就会对了解其他的运动形式带来很大的好处,这就是为什么力学是在物理学中最早得到充分发展的,而且早期物理学中的很多分支,像热力学、电动力学、统计力学、量子力学等都被冠以“力学”的名称的原因;这也是近几年来几乎覆盖所有自然科学的非线性科学首先在力学中获得发展的原因。

力学本是物理学的一个分支,而物理学科的发展则是从力学开始的。在物理学中,人们曾用纯力学理论解释机械运动以外的各种形式的运动,如热、电磁、光和原子内的运动等。当物理学摆脱了这种纯机械(力学)的自然观而获得健康发展时,力学则在工程技术的推动下按自身的规律进一步发展,逐渐从物理学中独立出来。现代力学中的一个重要分支是工程力学,这是一门技术科学,是许多工程技术的理论基础,又在广泛的应用过程中不断得到发展。当工程学还只有民用工程学(即土木工程学)和军事工程学两大分支时,力学在这两个分支中已起着举足轻重的作用。工程学越分越细,各个分支中许多关键性的进展都有赖于力学中有关运动规律、

强度、刚度等问题的解决。力学和工程学的结合促使工程力学各分支的形成和发展。现在,无论历史较久的土木工程、水利工程、机械工程、船舶工程等,还是后起的航空工程、航天工程、核技术工程、生物医学工程、海洋工程、信息技术工程等,都还在不断给工程力学提出新的问题、新的要求。工程力学作为一门技术科学,并不能代替工程学,工程力学的任务是指出工程技术中解决力学问题的途径(这一点往往是很关键的),而工程学则是从更综合的角度考虑具体任务的完成。

2. 设置工程力学基础课程的目的

所谓工程力学基础指的是工程力学的基础部分。为了保证工程结构或机械的正常工作,构件应当按规定的要求运动,应当有足够能力负担起应当承受的载荷,即满足运动、强度、刚度和稳定性的要求,这一些就是工程力学基础的主要内容,它是工科专业的基础课,是按照教育部“21 世纪工科力学教学体系改革”的精神设立的。课程的目标包括以下三个层次:

(1)为工程专业的学生提供必要的力学知识

正如前面提到过的,力学在工程科学中是必不可少的,而这门课程中提供的像运动(振动)、刚度、强度、稳定性等概念可以说是遍及工程学科的所有领域。目前有种说法:由于现在有各种专用的、用于力学计算的计算机软件,力学知识的掌握显得不像以前那么必要。但实际上,要正确使用这些软件,特别是在对新的设计对象提出符合实际要求的力学模型方面,力学知识仍是必不可少的。可以这么说,计算机的出现节省了大量的力学计算时间,但无法节省力学知识的运用。

(2)培养各种能力

这门课程的最主要目的应当在这个层次上。具体说,它将着重培养以下几方面的能力:

●把握物体运动规律的能力

因为机械运动是自然界最基本的运动形式之一,也是最能被人们所感知的运动之一,所以透彻了解机械运动,不但对理解与机械运动有关的自然现象和技术有好处,而且通过类推,能理解很大一部分其他运动所反映的规律。

●建模能力

模型的建立和简化,也就是把一个具体的工程问题,根据其特点,建立可以进行分析的模型,这对从事科技的人来说是基本的。工程力学基础的一个特点,就是针对具体工程对象,抓住主要的本质的内容,忽略次要的,建立适用于具体工程问题的模型,并进一步讨论模型的适用范围。工程力学基础中提到的刚体、质点、弹性体、杆等,都是这种模型。

●分析能力

在建立模型的基础上,进一步利用理论、数值、实验等方法,对具体问题进行分析,在科学技术中是极为重要的。工程力学基础可以作为灵活应用各种分析方法的一个典范。

●把握整体和局部的能力

描述复杂的自然现象至少可以分为两大类:一类是刻画局部的性质,另一类是刻画整体的性质。用微分形式表达的力学规律是系统的局部形式,而用能量原理表达的却是系统的整体形式。由于传统的工程数学以微积分为主,所以人们往往习惯于局部分析,这也是牛顿力学的特点。这次新改革后的工程力学基础教程,增加了拉格朗日力学(能量法),即增加了整体分析的内容。通过这两类方法的学习和比较,可以培养学生把握整体与局部关系的能力。

●直觉能力

力学中有一些抽象的概念,如应力等,是解决工程问题不可或缺的内容。这些概念的建立需要有一个过程,而一经建立,则变成一种可以感受的物理行为(即直觉)。一个经验丰富的结构工程师,

不用详细计算,就能感受到何处应力大,何处应力小。在实际设计中,这种能力是不可缺少的,而这种能力可以在本课程中得到培养。

以上这些能力的培养,在工程力学基础中有其独特的优势。

(3)培养创新素质

在知识经济时代,素质教育的核心是培养创新精神和创新能力,这可以统称为创新素质。前面提到的所培养的各种能力,应视为培养创新素质的一部分。当然创新素质在工程力学基础中的培养不仅仅体现在内容安排上,还应体现在整个课程的全过程,包括教学形式、方法、手段、要求等各方面。由于科学发展的迅速和职业更改的频繁(知识经济的特点之一),对大多数人来说,大学阶段所学的知识不会永远都有用,但通过这些知识的学习所培养的能力和形成的素质将会一辈子起作用。如果一个学生通过各方面的努力,养成善于从不同方面考虑问题的习惯,能按科学的方法分析和解决问题,善于从大处着眼、小处着手,善于联想等等,则今后不论从事何种工作都将得益非浅。

3. 课程的主要内容

如前面所述,这门课主要解决工程对象的运动、强度、刚度(变形)和稳定性的问题。由于课程的基础性,我们仅限于研究可以简化成质点、刚体和弹性杆件的工程构件及系统。尽管如此,这门课程中所学到的概念、方法不难推广到工程力学的其他领域中去,如水力学、板壳理论等方面。

整个课程分为两部分:牛顿力学(2~8章)和拉格朗日力学(9~12章),后者本质上就是能量法。在第2章内,先讲质点和刚体系统的力的分析与平衡,随后利用刚化原理推广到变形体上去。第3、4章讲述一种特殊的工程构件——杆的内力、应力和位移的分析,这是传统材料力学的主要内容。第5章讲一般的应力状态(即

多向应力状态)。第 6 章给出了常用的强度理论(包括屈服、疲劳)及其在结构设计中的应用。以上各章均是研究静力平衡问题的。第 7、8 两章是传统的运动学和动力学内容,考虑到与大学物理中重复较多,所以写得比较简略。第 9 章是讲离散系统的拉格朗日力学,而在第 10 章中将有关结果推广到连续系统,特别是杆系上去。第 11、12 章则是把第 10 章的结果应用到杆系稳定性和振动上去。这样最后四章构成了能量法的一个比较完整的叙述。

§ 1.2 力学模型

现代科学分析问题的一个基本方法是,先根据研究对象和问题的性质建立模型,然后再分析这些模型以得到所求的结论。由此可见,能否正确建立模型实在是关键的一环。

工程力学研究的对象是物体(工程构件),研究的目的有时是对象的运动,有时是对象的约束力或内力(应力),有时是变形(位移),有时是稳定性。所谓建立模型,主要分下列两步:

- 根据对象的特点和研究目的,对问题进行简化;
- 在简化基础上,根据力学的基本规律(牛顿力学、拉格朗日力学)建立数学模型。

这里的第一步,即简化,是十分重要的,能否正确地简化一个力学模型往往决定研究工作的成败。自然界的物体是多种多样的,可以说没有两个绝对一样的研究对象。所谓简化就是抓住关键的、本质的东西,大胆忽略次要的东西。简化还与研究的目的有关,譬如工程中的大部分对象,当仅仅研究其内力和变形时,则可以采用小变形假定,把问题简化;但需要研究其稳定性时,则绝对不能采用这一假定。那么怎么简化模型是合理的呢?这里提出两条标准:

- 保证结果的定性是准确的;
- 保证有足够的工程精度。

怎么来验证模型的合理性呢？实践中无非是：

- 通过实验(或工程实践验证),证实其合理性;
- 通过与更精确的理论比较,证实其合理性。

下面我们就常见的几种简化进行介绍。

1. 物理性质的简化

任何物体内的材料都不可能是完全均匀的,譬如难免有气孔、夹杂的情形,但如果这些缺陷的尺寸足够小,则我们往往把这物体看成是**均匀的**。即使像混凝土这类材料,我们在实际中仍按均匀材料处理。除非缺陷很大,足以影响整个应力场的分布,或造成强度的薄弱环节(譬如焊缝的气隙),需要单独处理外,本课程中都按均匀材料处理。

像木材、钢筋混凝土、单晶这些材料,显然沿纤维方向的性质与横向的性质是不一样的,这称为各向异性。除此以外,工程中遇到的材料各向异性的现象不明显,所以我们都按**各向同性**材料来处理。

任何物体受力以后或多或少会有变形,如果变形很小,可以忽略不计,则可当作**刚体**处理,否则作为**变形体**处理。所谓刚体,其任意两点之间的距离保持不变,这样一来,描述一个刚体运动只有六个独立的参数:三个平动、三个转动(见第7章)。但要描述一个变形物体的运动,则需要无限多个参数:

$$\mathbf{u}=\mathbf{u}(\mathbf{x},t) \quad (1.1)$$

这里 $\mathbf{u}=(u \ v \ w)^T$ 为位移矢量, $\mathbf{x}=(x \ y \ z)^T$ 为该点的坐标。由于物体中有无限多个点,而这些点的位移除了彼此需要连续外,没有其他限制,所以其参数为无限多个。

一般来说,如果研究整个物体的运动,则往往将其视为刚体;如果需要研究物体的内力分布(即应力)或内部的相对运动(如振动),则必须把其视为变形体。有时,物体的一部分刚度很大(不易

变形),而另一部分刚度很小,则此时需要采用混合模型——刚体和变形体混合,否则问题可能因严重病态而无法处理。譬如图 1.1 所示带两块太阳能电池板的卫星,当研究其轨道运动时,则将整个卫星作为刚体处理;但当需要研究其内部振动时,则需将两块电池板作为变形体,而中心体则按刚体处理,因为后者刚度比前者要大 $10^6 \sim 10^8$ 倍以上。



图 1.1 带太阳能电池板的卫星

2. 几何形状的简化

由于测量和加工的原因,实际几何尺寸与标称尺寸之间多少有差别,一般来说这种差别是很小的,在本课程的大部分内容中不考虑这种差别所引起的误差。只有两类问题需要考虑这种偏差,即超静定结构的装配应力和壳体的稳定性问题,因为在那里这种偏差对问题的结果起着十分重要、甚至是关键性的影响。

根据具体问题的性质,物体可简化为点(刚体)、杆或板(壳)。前面已提到,如果研究的是整个物体的运动,则可以简化为刚体运动——质心的平动和转动(转动有时称为姿态运动);进一步若可以忽略物体的转动,则就相当于将物体化为质点。

如果物体一个方向的尺度远远大于另外两个方向的尺度,则这物体可以视为杆。杆相当于一维的几何体,也就是它的所有未知量——位移、应力都可以用一个变量(一般用 x)的未知函数来表示。当然用这些未知函数来表示整个杆内位移和应力分布还要引入另外的(简化)假定,这一点将在第 4 章中进一步讨论。

如果物体的两个方向尺度远远大于另一个方向,则可以简化