

材料力学

[苏联]B. И. 费奥多谢夫著

蒋维城 赵九江 俞茂铨 等译

赵九江 张泽华 关士义 顾震隆 修订

高等教育出版社

材 料 力 学

B. И. 费奥多谢夫著

蒋维城 赵九江 俞茂铤 等译

赵九江 张泽华 关士义 顾震隆 修订

高等教育出版社

本书系按苏联 1979 年出版的费奥多谢夫 (В. И. ФЕОДОСЬЕВ) 著《材料力学》(СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ) 第八版, 对原书第三版中译本修订和补译而成。

本书内容较为全面, 可供我国高等工业学校有关专业师生参考。全书共分十六章。前六章讲述拉、压、扭、弯等几种基本变形及用力法解静不定杆系; 第七、八两章为应力应变状态理论和塑性准则与破坏准则; 后八章分别为厚壁筒及高速旋转圆盘、板和壳、薄壁杆件、超过弹性极限时构件的计算原理、交变应力、稳定、振动、应变和应力状态的实验方法。

原书第八版系第七版的重版, 与第三版相比, 在一定程度上反映了电子计算机技术、固体力学近代发展对材料力学内容所产生的影响。其中塑性与破坏准则、交变应力时的强度、变形系统平衡的稳定性等三章, 进行了较大的修改和补充; 其余各章也均有局部修改。

原中译本由北京工业学院材料力学教研组蒋维城、王知民、陈棣华、赵旭生, 哈尔滨工业大学材料力学教研室赵九江、顾震隆、关士义、张泽华, 西安交通大学材料力学教研组俞茂镛、楼志文、乐美峰等同志按原著第一版译成, 又经武汉水利电力学院粟一凡同志按原书第三版补译校订加工后, 于 1965 年出版。

本书按第八版的补译和修订工作, 由哈尔滨工业大学材料力学教研室赵九江(七版序、第二、三、四、五、十一、十三各章)、关士义(绪论、第一、六、七、八、十六各章)、张泽华(第十二、十四、十五各章)、顾震隆(第九、十章)等同志完成, 并由张泽华同志校订了全书内容。

材料力学

В. И. 费奥多谢夫 著

蒋维城 赵九江 俞茂镛 等译

赵九江 张泽华 关士义 顾震隆 修订

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

通县觅子店印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 19.375 字数 467,000

1965 年 1 月第 1 版 1985 年 6 月第 2 版 1985 年 12 月第 1 次印刷

印数 00,001—8,000

书号 15010·0599 定价 4.40 元

第七版序

本书是根据著者在莫斯科包曼高等工业学校授课讲义写成的。书中直接反映了莫斯科包曼高等工业学校材料力学教研室的教学经验。

在本书内容的叙述方面，著者首先力求保持在机械制造院校三学期用的审定大纲范围之内，同时也编入少量对培养学生广阔工程思想所需的重要补充问题。

从本书第一版问世已历经十五年。这期间足以使著者对一些章节的不满不断增长，认为必须着手进行修改。但是进行这项工作时，著者应顾及到传统性的课程范围、现行教学大纲及教师与学生在长期教学工作经验的基础上所建立起来的教学方法。因而，第七版无论在书的篇幅上和章目的设置上，皆没有更动。内容修改最大的章节有塑性和破坏准则、疲劳强度和稳定等问题。其余各章仅作了少量修改。

在第七版的准备过程中，В. П. 考卡耶夫(Кораев)给予了大力帮助。为此，著者向他表示衷心的感谢。

В. И. 费奥多谢夫

目 录

第七版序

绪论	1
§ 1. 材料力学的任务与方法	1
§ 2. 真实对象和计算简图	3
§ 3. 外力与内力	7
§ 4. 应力	12
§ 5. 位移与应变	14
§ 6. 虎克定律和力作用的独立性原理	17
§ 7. 结构元件的一般计算原理	20
第一章 拉伸和压缩	23
§ 8. 杆受拉伸和压缩时在横截面上发生的内力和应力	23
§ 9. 杆的伸长与虎克定律	26
§ 10. 变形位能	33
§ 11. 静定系统与静不定系统	34
§ 12. 拉伸和压缩时的应力状态与应变状态	39
§ 13. 材料的拉伸和压缩试验	44
§ 14. 拉伸图	49
§ 15. 构成变形的机理	52
§ 16. 材料的主要机械性质	58
§ 17. 塑性和脆性·硬度	62
§ 18. 温度和时间因素对材料机械性质的影响	66
§ 19. 安全系数	72
第二章 扭转	76
§ 20. 纯剪切及其特性	76
§ 21. 圆形横截面杆的扭转	81
§ 22. 非圆截面杆的扭转	92
§ 23. 薄膜比拟简介	96
§ 24. 薄壁杆件的扭转	99

第三章 杆横截面的几何性质	109
§ 25. 截面的静矩.....	109
§ 26. 截面的惯性矩.....	113
§ 27. 主轴与主惯性矩.....	116
第四章 弯曲	122
§ 28. 弯曲时杆件横截面内发生的内力素.....	122
§ 29. 纯弯曲时杆内的应力.....	128
§ 30. 横弯曲时的应力.....	137
§ 31. 梁的弹性线微分方程·弯曲位移.....	146
§ 32. 弹性基础梁.....	151
§ 33. 斜弯曲.....	156
§ 34. 偏心拉伸与压缩.....	160
§ 35. 大曲率杆的弯曲.....	164
第五章 在任意载荷作用下杆件的位移	173
§ 36. 一般加载情况时杆件的位能.....	173
§ 37. 卡氏定理.....	178
§ 38. 莫尔积分.....	182
§ 39. 维力沙金法.....	188
§ 40. 螺旋弹簧的应力和变形计算.....	194
§ 41. 功的互等定理和位移互等定理.....	199
第六章 用力法解静不定杆件系统	204
§ 42. 加于系统上的各种约束·静不定次数.....	204
§ 43. 基本系统的选择·力法.....	210
§ 44. 力法的正则方程.....	212
§ 45. 对称性质在解静不定问题中的应用.....	221
§ 46. 平面空间系统和空间系统.....	231
§ 47. 静不定系统位移的确定.....	237
第七章 应力状态与应变状态理论基础	240
§ 48. 一点上的应力状态.....	240
§ 49. 任意截面上应力的确定.....	243
§ 50. 主轴和主应力.....	246

§ 51. 应力圆·····	254
§ 52. 各种不同类型的应力状态简介·····	259
§ 53. 应变状态·····	263
§ 54. 在普遍应力状态下的广义虎克定律和变形位能·····	267
第八章 塑性准则与破坏准则·····	275
§ 55. 问题的提出·····	275
§ 56. 塑性假说·····	279
§ 57. 莫尔理论及其应用·····	283
§ 58. 关于破坏准则·····	293
第九章 厚壁筒和高速旋转圆盘·····	299
§ 59. 轴对称物体的基本方程·····	299
§ 60. 厚壁筒的位移和应力的确定·····	302
§ 61. 组合筒应力的确定·····	308
§ 62. 等厚度高速旋转圆盘·····	312
第十章 板和壳·····	317
§ 63. 板和壳的基本特点·····	317
§ 64. 按无弯矩理论确定对称壳的应力·····	319
§ 65. 对称载荷下的圆板弯曲·····	327
§ 66. 圆板应力和位移的确定·····	334
§ 67. 矩形板的弯曲·····	341
§ 68. 对称载荷下的圆柱壳弯曲·····	342
第十一章 薄壁杆件的弯曲和扭转·····	353
§ 69. 薄壁杆件的基本特点·····	353
§ 70. 扇性面积·····	356
§ 71. 扇性性质及其确定·····	360
§ 72. 薄壁杆件受横弯曲时的剪应力·····	362
§ 73. 弯曲中心·····	365
§ 74. 扭转时薄壁杆件横截面的翘曲·····	371
§ 75. 开口截面薄壁杆件的约束扭转·····	375
§ 76. 薄壁杆件的一般受力情况·双力矩·····	381
第十二章 超过弹性极限时结构构件的计算原理·····	385

§ 77. 计算特点和拉伸图的简化	385
§ 78. 最简单杆系在有塑性变形时的应力和位移	389
§ 79. 杆的弹-塑性弯曲	395
§ 80. 有塑性变形的圆截面杆扭转	403
§ 81. 极限载荷计算原理	407
§ 82. 塑性理论基础	413
第十三章 交变应力时的强度	422
§ 83. 疲劳强度的概念	422
§ 84. 循环的基本特性和疲劳极限	426
§ 85. 应力集中对疲劳强度的影响	434
§ 86. 尺寸效应	440
§ 87. 表面加工质量的影响	445
§ 88. 疲劳强度的安全系数及其确定	447
§ 89. 非定常状态的疲劳强度	455
第十四章 变形系统平衡的稳定性	461
§ 90. 稳定性概念	461
§ 91. 临界载荷的确定	463
§ 92. 欧拉问题	468
§ 93. 柔性杆的大位移	471
§ 94. 杆件固定条件对临界力的影响	476
§ 95. 当压杆具有塑性变形时的稳定性	483
§ 96. 平面弯曲形式的稳定性	491
§ 97. 圆环和圆筒在外压作用下的稳定性	494
§ 98. 计算临界载荷的能量法	497
§ 99. 初参数法	502
§ 100. 没有列入经典简图的某些失稳情形	509
§ 101. 柔性杆的偏心压缩	512
§ 102. 纵横弯曲	514
第十五章 弹性系统的振动	519
§ 103. 振动理论的基本定义	519
§ 104. 一个自由度系统的无阻尼自然振动	522

§ 105. 线性阻尼系统的自然振动·····	526
§ 106. 一个自由度系统的强迫振动·共振·····	529
§ 107. 多自由度系统的振动·····	537
§ 108. 均匀杆件的纵向振动·····	543
§ 109. 梁的横振动·····	545
§ 110. 确定弹性系统自然振动频率的近似方法·····	549
§ 111. 轴的临界转速·····	556
§ 112. 参数共振和自激振动·····	557
§ 113. 冲击载荷·····	560
第十六章 应变状态和应力状态的实验研究方法·····	567
§ 114. 材料试验和结构试验·····	567
§ 115. 用机械式引伸仪测量变形·····	569
§ 116. 电阻应变片的应用·····	575
§ 117. 应用透明模型测量应力的光学方法·····	579
§ 118. 云纹法·····	585
§ 119. 确定应力的 X 射线法·····	592
§ 120. 涂漆法·····	597
附录·····	598
型钢表·····	598

绪 论

§ 1. 材料力学的任务与方法

一切固体都或多或少地具有强度和刚度的性质,也就是,在一定的限度内能够承受外力的作用而不破坏,和不使其几何尺寸发生重大的改变。

材料力学从一方面来说是研究工程结构元件的强度和刚度的科学。我们可以运用材料力学的方法进行实际计算,并确定机器零件和各种建筑结构所必需的尺寸,即通常所说的安全尺寸;从另一方面来说,材料力学又是奠定强度计算基础的一门入门课程。

材料力学的基本原理建立在一般力学的定律和定理的基础上,首先是建立在静力学的定律的基础上,没有这些方面的知识,就不可能学习材料力学。

与理论力学不同,在材料力学所研究的问题中,变形固体的性质才是最重要的。将物体看为是整个刚体时的运动规律,在这里不仅退居次要地位,而且在许多情况下简直就不重要。由于基本原理相同,材料力学可以看成是力学的一个分支,并称为变形固体力学。

属于变形固体力学的,还有其他的学科,例如,数学弹性理论。从实质上讲,这门学科研究的问题是和材料力学相同的。材料力学与数学弹性理论之间的区别首先在于求解问题的方法有所不同。

数学弹性理论用更精确的提法来研究变形固体性状的问题。

因此,在求解问题时,往往必须利用复杂的数学工具,并且常常要进行大量的运算。因此,实际应用弹性理论方法的可能性是有限的,可是它能使我们更加全面地分析所研究的现象。

材料力学的目的是对最常见的典型的结构元件建立简单实用的计算方法,并且,广泛地采用各种近似方法。为了必须对每一个实际问题都得出数字结果,在材料力学中的很多情况下,就不得不采用简化的假设,这些假设可以通过计算数据与实验结果的对比来加以证实。在材料力学中建立近似的计算方法时,还常常要利用由数学弹性理论方法得到的精确分析结果。

由于材料力学的实用性质,它追求的目标比数学弹性理论更为广泛。

材料力学的任务不仅在于揭示所研究对象的内部特性,而且在评定所讨论结构的工作能力和实际适用性时,还要求能进一步对得到的规律性给予正确的解释。在数学弹性理论中却根本不讨论这个问题。

在研究变形固体问题的科学中,最近几十年来又产生和发展了一些新的、介于材料力学和弹性理论之间的力学分支,例如应用弹性理论,也产生了一些和它们相近的学科,例如塑性理论、蠕变理论等等。依据材料力学的一般原理,还建立了许多有具体实用目标的强度科学的新分支。属于这类学科的有建筑结构力学,飞机结构力学,焊接结构强度理论等等。

材料力学的方法不是保持不变的,随着新问题和新实践需要的出现,它也要改变。在进行工程计算时,应当创造性地运用材料力学的方法,还应当记住:实际计算的成效,与其说在于能应用复杂的数学工具,毋宁说在于能深入被研究对象的本质,找到最恰当的简化假设,并算出最终数值结果。

§ 2. 真实对象和计算简图

与所有其他自然科学一样,在材料力学中研究真实对象的强度问题是从选择计算简图开始的。在动手做结构计算时,首先要确定在给定情况下什么是本质的和什么是非本质的;必须对被研究对象进行概括,并抛弃对于整个系统的工作不起任何显著影响的一切因素。这种将问题进行简化或为它选择简图的措施在一切情况下都是完全必要的,因为真实对象的性质是无穷尽的,所以要想全部地考虑到真实对象的所有性质来求解问题,在原则上是不可能的。

例如,要对升降机的钢缆进行强度计算,那末,首先就应当考虑提升物的重量,它的运动加速度,而在上升高度较大时,还可能要考虑钢缆的自重。同时,显然应当去掉某些不重要的影响因素,例如,吊笼上升时产生的空气动力阻力,在不同高度上的空气压力,随高度不同的温度变化以及诸如此类不胜枚举的种种因素。

去掉了非本质特点后的真实对象,就称为计算简图。对于同一对象,可能提出几个计算简图,这首先决定于要求的准确度,其次决定于计算者在给定的具体情况下所考虑的是现象的那一方面。比如说,在上面所举的升降机一例中,如果只需要判断钢缆的强度,则可以把吊笼和它的载重看作是刚体,并且可以把它们对钢缆的作用化为施加在钢缆端头上的力(图1)。如果要求解的是吊笼本身的强度问题,那末就不能把吊笼仍旧看做是绝对刚体,而应另外考虑吊笼的结构特性,并且相应地选择另一种计算简图。

假如对于同一个对象可以提出几个计算简图,则反过来,对于许多不同的真实对象也可以只提出一个同样的计算简图。后面的这种情况十分重要,因为,这样一来,只要去研究某一种简图,就可以解出属于这种简图的一整类实际问题。例如,图1中所示端头

受力的钢缆的简图，就是在许多强度计算的实际情况中经常会遇到的一种很普遍的计算简图。

在材料力学中选择计算简图是从对材料的性质进行概括开始的。一般是把所有的材料都看成为与它们的微观组织特点无关的均匀连续介质。

所谓材料的均质性，就是指材料的性质与由物体中切取的体积大小无关。显然，由于实际上存在着分子结构，材料不可能像这个定义所表示的那样是均质的。金属具有多晶体的组织，即是由许许多多错综排列的晶体所构成的，所以严格说来，它也不是均质的。但是，由于

我们所研究的对象是结构，而结构的尺寸，不仅比原子间距离的尺寸，甚至比晶粒的尺寸都大到不可估量的程度，因此，我们可以把上述的材料的微观特征看做是非本质的。

由均质的概念可以引伸出连续介质的概念，即介质连续地充满着它所占有的体积。由于这种连续性，我们就可以对连续介质采用无穷小量的分析方法。

在选择计算简图时，对连续介质应赋予和真实介质的主要性质相符合的各种性质。比方说，在外力的作用下，真实物体的几何尺寸会发生改变。外力卸掉后，物体的几何尺寸又会全部地或部分地复原。物体恢复原有尺寸的性质，称为弹性。在求解大部分的材料力学问题时，我们总认为介质是完全弹性的。实际上，真实物体总是在某种微小程度上与完全弹性性质有所差别。当载荷很大时，这种差别更会变得十分显著，以至必须在计算简图中，给连

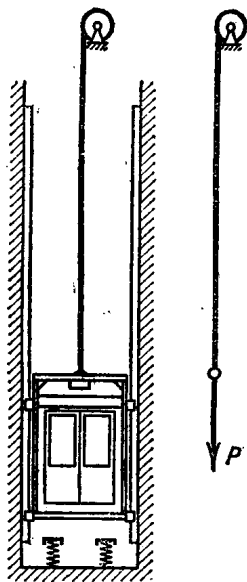


图 1

续介质加上与真实物体变形的新特征相适应的其他性质。

通常,我们认为连续介质是各向同性的,也就是从连续介质中取出的任一物体,它的性质与它在介质中的原始方位角无关。

金属的单晶是各向异性体。但是,当在一体积中包含着数目非常多的错综排列的晶体时,就可以把这块材料整体看作是各向同性的。因此,一般认为在材料力学中遇到的那种大小的金属可视为各向同性的。此外,也会遇到各向异性体,例如木材就是各向异性的,它随着木质纤维的方向具有不同的性质。纸也是各向异性的,从一张纸上沿两个互相正交的方向裁下的纸条具有不同的强度。有些物体的各向异性是和它的构造特点有关的。例如胶合板、纺织品都是各向异性的。可是,在材料力学中我们只着重研究各向同性的材料。

选择计算简图时,对真实物体的几何形象也要加以简化。材料力学中的主要简化方式是将物体按几何形状简化成杆的简图或壳的简图。

一般地讲,当物体的一个尺寸(长度),远比其他两个尺寸要大时,就称为杆。如图 2 所示,从几何上看,杆是一个平面图形沿着

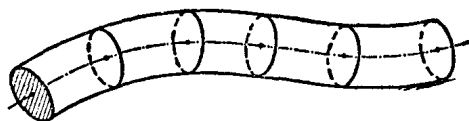


图 2

某一曲线移动而形成的。这根线称为杆的轴线;重心在轴线上并与轴线正交的平面图形称为杆的横截面。杆沿轴线的横截面可以是等截面的或变截面的。截面也可以绕着轴线旋转,这种杆称为自然扭曲杆。麻花钻头就是自然扭曲杆的例子。根据轴线形状的

不同,杆可以是直杆、曲杆或空间曲杆。例如,在计算螺旋弹簧时,它的计算简图就是空间曲杆。

许多复杂的结构可以看做是由杆形元件组成的。

材料力学中采用的第二种典型几何简图是壳的简图。一个尺寸(厚度)远比其他两个尺寸要小的物体,就称为壳。像容器的壁,房屋的圆顶等一类的结构元件都可化为壳的简图。壳的简图将在第十章里详细讨论。

在简化材料力学的真实对象时,对于作用在结构元件上的力系,也要进行简化,其中要引用集中力的概念。例如,对图 3, *a* 中的杆进行计算时,可以认为重物 *P* 是作用在一点上的力(图 3, *c*)。这种简化非常自然,因为在杆上传递力的作用面的尺寸(图 3, *b*)比杆的总尺寸要小。显然,在真实结构上,要通过一点来传递力是不能实现的,集中力仅仅是在计算简图中特有的概念。

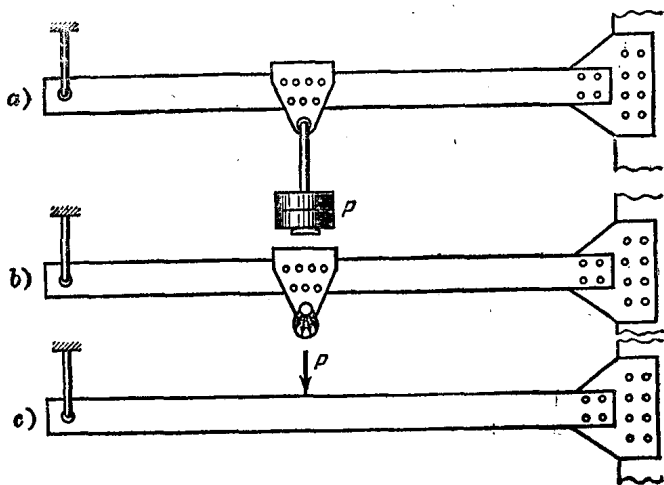


图 3

仅仅在分析整个杆的工作时,也就是当分析范围大大超过力接触面的范围时,才可以用等效集中力去代替分布力。在所举的

例中,如果需要对悬挂重物的耳板本身进行计算,那就不允许简化成集中力了。

在上述的各例中,并没有完全包括选择计算简图所用到的一切方法,在以后的讲述中,还将引入和简化真实对象有关的其他概念。重要的是,在学习材料力学时,读者不要忘记选取计算简图是进行计算的第一步。应当牢牢记住,计算并不仅仅是会运用计算公式,而在把实际问题提到数学运算程序上来以前,必须反复深刻思考,如何从研究的对象中正确地分辨出本质的与非本质的东西。

§ 3. 外力与内力

力是各物体间相互机械作用的量度。如果将结构看成是与外围各个物体分离的,那末,就可以用力来代替周围各个物体对结构的作用,这样的力称为外力。

外力分为体积力与表面力。体积力分布在物体的整个体积内,而且作用在物体的每一个质点上。重力和磁力都是体积力。表面力作用在表面部分上,它表示所研究的对象与周围物体的直接接触作用。

外力不仅仅包括给定力,而且还包括约束反力;我们通常认为,给定力是使物体可能产生破坏的起因,而约束力则使力系达成平衡。例如,在图 4, *a* 所示的起重机中,可以认为提升物的重量 P 和结构的自重都是给定的外力。求出支反力 R_1 和 R_2 后,就得到图 4, *b* 所示的平衡力系,一般都称为载荷。

外力、外力的大小与分布特征,首先取决于所研究的对象与它周围物体间的分界线在何处。在上面所讨论的起重机例中,如果计算简图除了包括钢缆及负载吊笼以外,还包括了道轨及枕木,那末,外力系就将是另一种样子(图 4, *c*)。在这里,我们对于第一种情况下的支反力可以用静力学的关系求出来,而对于第二种情况

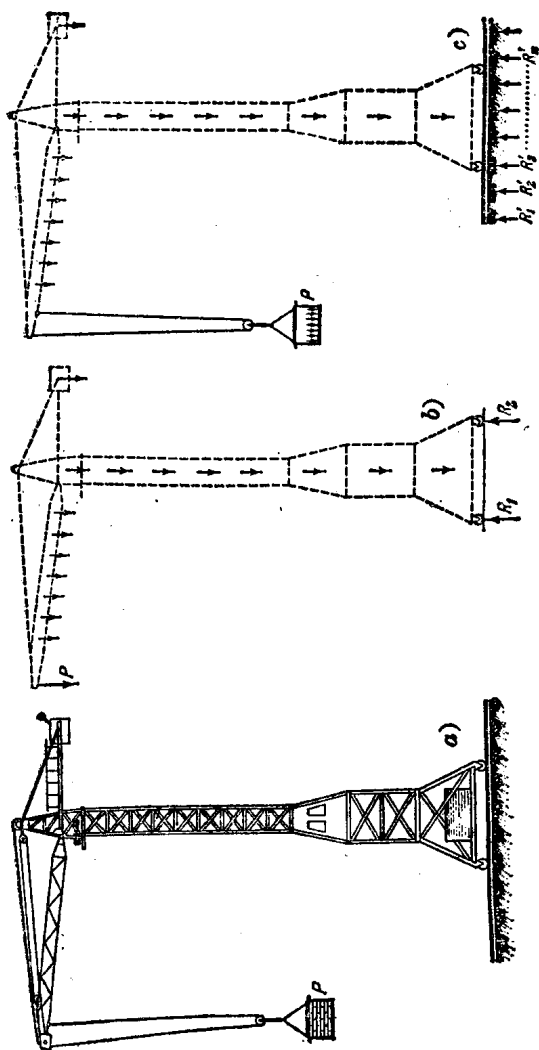


图 4