

高等学校教材

材 料 力 学

俞茂铨 汪惠雄 编

高等教育出版社

本书是根据原教育部高等学校工科力学教材编审委员会审定的 90 学时材料力学教学大纲编写的,经原教育部材料力学教材编委扩大会议(苏州)评选作为中学时类型材料力学通用教材,适用于电机、动力、采矿等工科专业。

教材共分十二章和附录,其中能量法(第九章)、电测应力分析(附录)及带有 * 号部分系 90 学时大纲外内容,可根据专业需要选用或删除。

高等学校教材

材料力学

俞茂镛 汪惠雄 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.25 字数 410,000

1986 年 5 月第 1 版 1986 年 5 月第 1 次印刷

印数 00,001—17,800

书号 15010·0729 定价 3.10 元

序 言

本书是根据原教育部高等学校工科力学教材编审委员会审定的 90 学时材料力学大纲编写的,经原教育部材料力学教材编委扩大会议(苏州)评选作为中学时类型材料力学通用教材,适用于电机、动力、采矿等专业。

教材共分十二章和附录,其中能量法(第九章)、电测应力分析(附录)及带有 * 号的部分系 90 学时大纲外内容,可根据专业需要选用或删除。

本书由西安交通大学建筑与结构工程系俞茂铨和工程力学系汪惠雄编写。编写中参考了作者 1972 年和 1978 年的材料力学教材和近年来国内外出版的材料力学教材。俞茂铨编写第一、二、七、八、十一和第十二章,汪惠雄编写第三、四、五、六、九和第十章,陆才善校阅各章初稿;最后由俞茂铨进行全书统稿,何丽南协助整理。凌伟、赵武山、侯得门协助部分工作。

教材中收集和选用了国内外一些工程结构和机器的构件(零件)的设计、使用和破坏的实例,反映了西安交通大学材料力学教学和科学研究的部分成果以及兄弟院校的一些教学经验。全书共有例题 104 题,大小习题 300 余题,插图 500 余幅,照片 38 帧。

本书在编写中得了原教育部材料力学教材编审小组、高等教育出版社和校内外很多同志的关怀和帮助,并提供各种资料、图片和建议;武汉水利电力学院粟一凡教授审阅了全书,提出了很多宝贵的修改意见,均此表示深切的感谢。

限于编者的水平,教材有疏漏和不妥之处,深望使用本书的广大师生和读者提出批评和指正。

本书主要字符表^{①②}

分类	字符	字符意义	国际单位	备 注
外 力	P	集中外力	N, kN	1kgf=9.81N
	q	线分布力集度	N/m, kN/m	1kgf/m=9.81N/m
	p	压力, 压强	Pa, MPa	1kgf/cm ² =98100Pa
	T	转矩, 力偶矩	N·m, kN·m	1kgf·m=9.81N·m
	R	支座约束反力	N, kN	
内 力	F	轴向力	N, kN	
	Q	剪力	N, kN	
	M_n	扭矩	N·m, kN·m	
	M	弯矩	N·m, kN·m	
应力、应变、位移	σ	正应力	Pa, kPa, MPa	1Pa=1N/m ²
	τ	剪应力	同 上	1kPa=10 ³ N/m ²
	ϵ	线应变		1MPa=10 ⁶ N/m ²
	ν	剪应变		1MPa=10.2kgf/cm ²
	f, δ	挠度, 位移	mm, m	1MPa=1N/mm ²
	φ	扭转角	rad(弧度)	
	θ	梁的转角 单位长度扭转角	rad(弧度) rad/m	
截面特性	A	截面面积	mm ² , m ²	1m ² =10 ⁶ mm ²
	S_y, S_z	截面静矩	mm ³ , m ³	1m ³ =10 ⁹ mm ³
	I_y, I_z	截面惯性矩	mm ⁴ , m ⁴	1m ⁴ =10 ¹² mm ⁴
	I_p	极惯性矩	mm ⁴ , m ⁴	米(m)的最新定义
	W_n	抗扭截面系数	mm ³ , m ³	见注③
	W_y, W_z	抗弯截面系数	mm ³ , m ³	
材料特性等	σ_0	极限应力	与应力和压力的 单位相同	
	σ_p	比例极限		
	σ_e	弹性极限		
	σ_b	强度极限		
	$[\sigma]$	许用应力		
	$[\tau]$	许用剪应力		

续前

分类	字符	字符意义	国际单位	备 注
材料特性等	E	拉压弹性模量	GPa GN/m ²	1GPa = 10 ⁹ N/m ²
	G	剪变模量	GPa GN/m ²	
	ρ	质量密度	kg/m ³	
	γ	重量密度	N/m ³	
	μ	泊松比		
	δ	延伸率		
其它	ψ	断面收缩率		1J = 1N·m 1W = 1J/s 1kgf·m/s = 9.81W 1[米制]马力 = 735.5W 1s ⁻¹ = 60r/min(转每分)
	α_k	冲击韧度		
	W	功	J(N·m)	
	N	功率	W, kW	
	U	变形能	J(N·m)	
	n	安全系数		
		转速	s ⁻¹	
	λ	压杆的柔度 (细长比)		

- ① 中华人民共和国国家标准 GB 3100—82: 国际单位制及其应用, 中国标准出版社, 1983。
- ② 中华人民共和国国家标准 GB 3102、3—82: 力学的量和单位, 中国标准出版社, 1983。
- ③ 1983 年 10 月在巴黎举行的第 17 届国际计量大会上, 正式通过米的最新定义为: 米是光在真空中, 在 1/299 792 458 秒的时间间隔内运行距离的长度。

目 录

序言	1
本书主要字符表	1
第一章 绪论 基本概念	1
§ 1-1 材料力学的任务	1
§ 1-2 材料力学与生产实践的关系	5
§ 1-3 变形固体的概念及其基本假设	10
§ 1-4 内力 截面法	12
§ 1-5 应力与应变	17
§ 1-6 材料力学研究的对象 杆的基本变形形式	20
习题	22
第二章 轴向拉伸和压缩	28
§ 2-1 概述	28
§ 2-2 轴力 横截面上的应力	29
§ 2-3 拉(压)杆的变形 横向变形系数	33
§ 2-4 材料在拉伸时的力学性质	40
§ 2-5 材料在压缩时的力学性质	50
* § 2-6 温度和时间因素对材料的力学性质的影响	55
§ 2-7 拉(压)杆斜截面上的应力	57
§ 2-8 拉(压)杆的强度计算	60
§ 2-9 应力集中的概念	67
§ 2-10 简单超静定问题	68
习题	77
第三章 剪切	90
§ 3-1 概述	90
§ 3-2 剪切和挤压的实用计算	92
§ 3-3 计算实例	96
习题	101

第四章 扭转	106
§ 4-1 概述	106
§ 4-2 外力偶矩 扭矩和扭矩图	108
§ 4-3 薄壁圆管的扭转	111
§ 4-4 圆轴扭转时的应力和强度计算	115
§ 4-5 圆轴扭转时的变形和刚度计算	124
§ 4-6 圆轴扭转时的应力分析	128
§ 4-7 矩形截面杆扭转理论的主要结果	131
习题	135
第五章 平面图形的几何性质	142
§ 5-1 概述	142
§ 5-2 静矩和形心	142
§ 5-3 惯性矩	147
§ 5-4 平行移轴公式	152
习题	156
第六章 弯曲	161
§ 6-1 概述	161
§ 6-2 梁的简化 梁的典型形式	163
一、梁的内力	163
§ 6-3 梁弯曲时的内力——剪力、弯矩及其符号规则	168
§ 6-4 剪力方程式和弯矩方程式 剪力图和弯矩图	172
* § 6-5 载荷集度、剪力和弯矩之间的关系	181
习题	187
二、梁的应力	195
§ 6-6 弯曲时的正应力和强度计算	195
* § 6-7 弯曲时的剪应力和强度计算	209
§ 6-8 提高梁弯曲强度和合理使用材料的一些途径	217
习题	225
三、梁的变形	235
§ 6-9 弯曲变形的量度及其基本公式	235
§ 6-10 用直接积分法求梁的变形	239

§ 6-11	用叠加法求梁的变形	247
§ 6-12	弯曲刚度计算 提高梁弯曲刚度的措施	252
§ 6-13	用变形比较法解简单的超静定梁	256
习题		261
第七章	应力状态理论和强度理论	268
一、	应力状态理论	268
§ 7-1	一点的应力状态及其分类	268
§ 7-2	二向应力状态分析	273
§ 7-3	三向应力状态时的最大剪应力	284
§ 7-4	广义虎克定律	288
二、	强度理论	293
§ 7-5	材料破坏形式和强度理论的概念	293
§ 7-6	几个基本的强度理论	295
§ 7-7	强度理论的应用	302
习题		310
第八章	组合变形	316
§ 8-1	概述	316
§ 8-2	拉伸(压缩)与弯曲的组合	319
§ 8-3	弯曲(或拉压)与扭转的组合	326
习题		334
*第九章	能量法	346
§ 9-1	概述	346
§ 9-2	杆件的变形能计算	347
§ 9-3	卡氏定理	356
§ 9-4	应用卡氏定理求解超静定问题	368
习题		382
第十章	动载荷	392
§ 10-1	概述	392
§ 10-2	惯性力问题	393
§ 10-3	冲击载荷	400
§ 10-4	提高构件承受冲击载荷能力的措施	410

§ 10-5 冲击韧度	413
习题	415
第十一章 交变应力下的构件疲劳强度	423
§ 11-1 概述	423
§ 11-2 交变应力的循环特征	428
§ 11-3 材料在对称循环下的持久极限	431
§ 11-4 影响构件持久极限的因素	435
§ 11-5 对称循环下构件的强度条件	441
§ 11-6 提高构件持久极限的措施	444
习题	447
第十二章 压杆的稳定性	449
§ 12-1 平衡稳定性的概念	449
§ 12-2 细长压杆的临界力	453
§ 12-3 其它约束情况下压杆的临界力 临界应力	458
§ 12-4 欧拉公式的应用范围 中长杆和粗短杆的计算	461
§ 12-5 压杆的稳定计算	464
§ 12-6 提高压杆稳定性的措施	471
习题	475
附录 I 圆柱形密圈螺旋弹簧	483
§ I-1 概述	483
§ I-2 弹簧的应力	484
§ I-3 弹簧的变形	486
习题	488
附录 II 电测应力分析	489
§ II-1 概述	489
§ II-2 电阻应变片	490
§ II-3 电阻应变仪	492
§ II-4 半桥与全桥 温度补偿	496
§ II-5 应力测量实例	498
附录 III 型钢表	502
习题答案	520

第一章 绪论 基本概念

§ 1-1 材料力学的任务

工程中经常遇到的各种结构物和机器，如桥梁、房屋、电机和机床等，都是由若干构件组成。构件在外力作用下都将发生形状和尺寸的改变，即变形。如果构件的设计不合理，或选用的材料不恰当，则构件在一定的载荷作用下将会发生过度的变形或破坏。图 1-1 至 1-4 即是几个破坏的实例。这种过度变形和破坏，小至一个构件，大至整个结构，重则造成严重事故，轻则使构件失效而不能正常工作。这些都会使构件或结构失去**承受载荷的能力**。

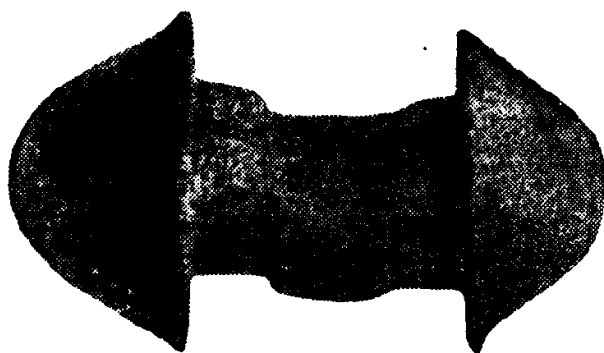


图 1-1 铆钉的过度变形和破坏

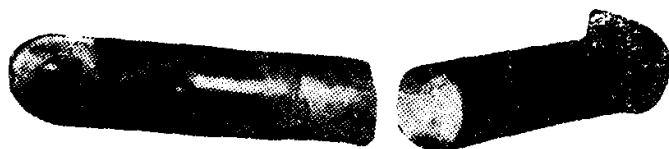


图 1-2 销钉的断裂

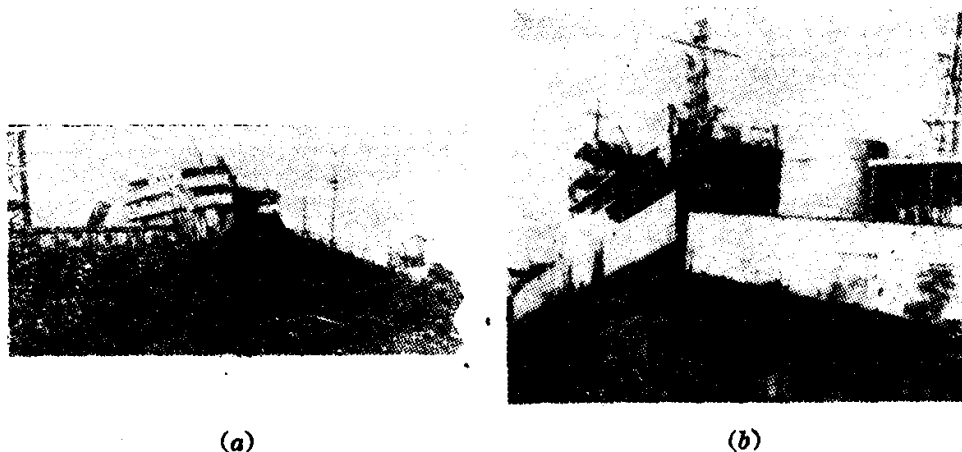


图 1-3 船舶的整体断裂

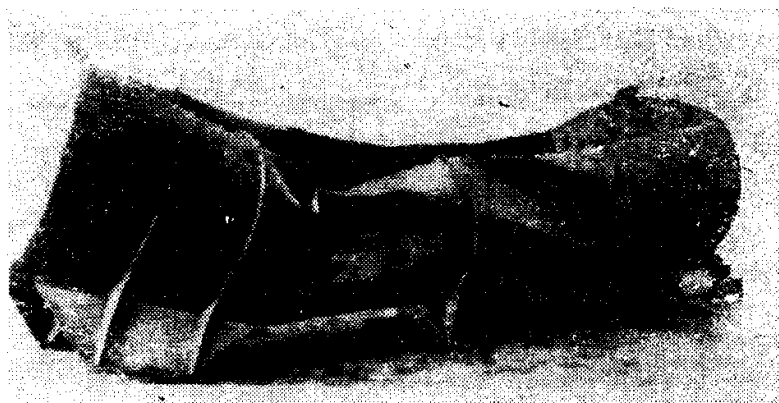


图 1-4 车辆容器的破坏

另一方面，如果对构件的截面尺寸设计过大或选用了较好的材料，则在一定的载荷作用下，构件虽然不会发生过度的变形或破坏，但构件承受载荷的能力却没有充分发挥，既浪费了材料，又增加了构件的重量和成本。因此，必须为构件选择适当的材料、合适的截面形状和尺寸，以保证构件既安全适用又经济合理。材料力学就是一门研究构件承受载荷的能力(简称承载能力)的科学。它的主要任务是研究构件在外力作用下产生变形和破坏的规律，为构件的合理设计提供必要的理论基础和计算方法。

构件的承载能力一般包括以下三个方面。

1. 强度

构件承受载荷时,要求它不发生破坏。例如,起重机的各个构件(图1-5)不应该断裂;压力容器在规定的压力作用下,不应该开裂或爆破;传动齿轮不应该破损;有时,即使构件没有发生断裂,但是由于受力过大,产生了一种不能恢复的变形(即载荷卸除后,构件不能恢复到原来的形状和尺寸),使构件受到了损伤,也将影响它们的正常工作。因此,对各类构件必须要求它具有足够的抵抗破坏的能力,即具有足够的强度。

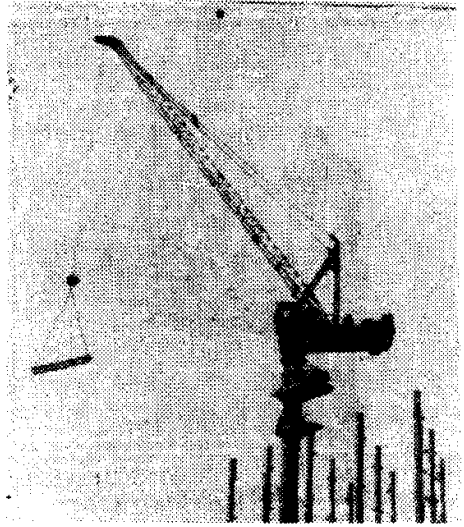


图 1-5 工作中的起重机

2. 刚度

在某些情况下,构件虽然不发生破坏,但是,由于构件的弹性变形(即载荷卸除后,构件能够完全恢复的变形)超过了允许的限度,也会使机器设备等不能正常工作。例如桥式起重机、桥梁或楼板的变形过大,就会影响它们的正常工作。又如电机的转子和定子之间的空隙(图 1-6)一般都很小,因此其转轴除应满足强度要求外,还要限制其变形,以防运转时转子与定子相碰;

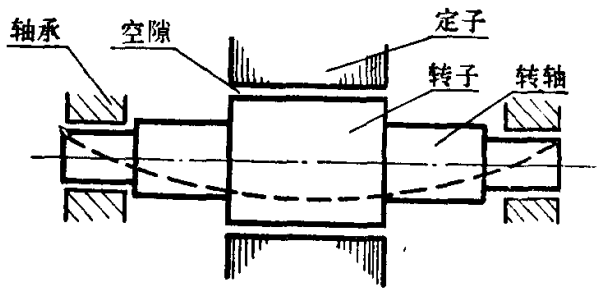


图 1-6 转子的变形

若转轴变形过大, 还会导致轴承的不均匀磨损。再如, 摇臂钻床(图 1-7, a) 工作时, 若摇臂与立柱变形过大(图 1-7, b) 将引起钻孔不正而影响加工精度, 并会使钻床振动加剧, 影响孔表面的光洁度。因此, 对于这一类构件, 必须保证它们具有足够的抵抗弹性变形的能力, 即具有足够的刚度。

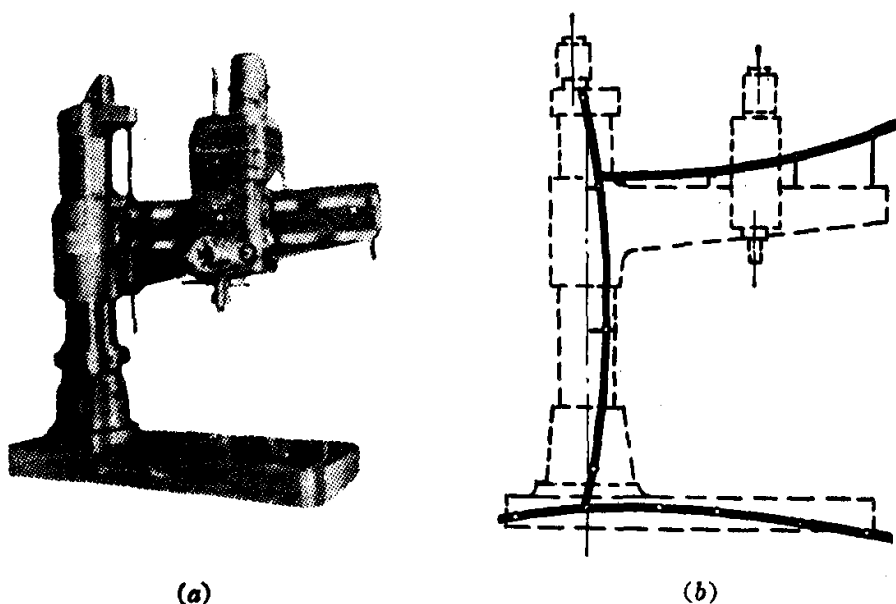


图 1-7 摇臂钻床各部件的变形

3. 稳定性

细长直杆, 例如内燃机中的挺杆(图1-8), 千斤顶中的螺杆(图 1-9)等, 工作时承受轴向压力, 通常称为压杆。当压力较小时, 压杆能保持原有的直线的平衡形式。若压力增至某一数值时, 压杆可能在干扰力的作用下从直线的平衡形式突然变弯。这种突然改变原有平衡形式的现象称为丧失稳定(或简称为失稳)。因此, 对这类细长压杆, 要求它们在工作中始终能保持原有的直线平衡形式。即构件应具有足够的稳定性。(详细内容见第十二章, 图12-4即为挺杆失稳破坏的实物照片)

综上所述, 一般要保证构件安全适用, 构件必须具有足够的强

度、刚度和稳定性。

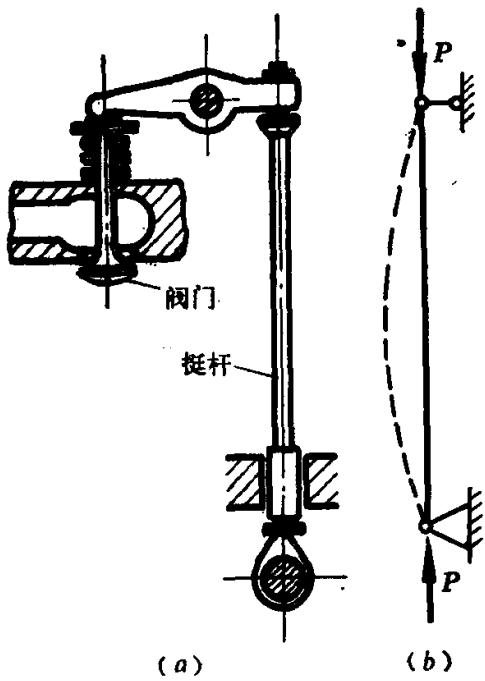


图 1-8 内燃机挺杆受压

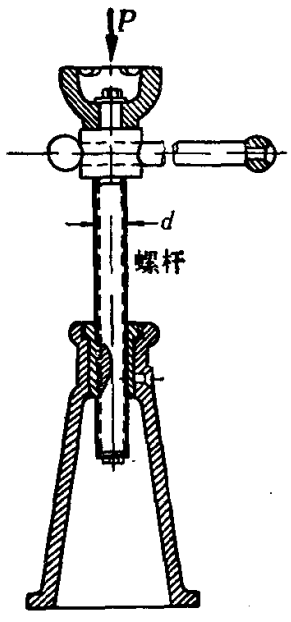


图 1-9 千斤顶螺杆受压

构件的强度、刚度和稳定性均与其所用材料的力学性质有关。而这些力学性质必须通过实验来测定。此外，也有一些单靠现有理论还解决不了的问题，须借助于实验来解决。因此，实验研究和理论分析，同样都是材料力学用来解决实际问题必不可少的手段。

§ 1-2 材料力学与生产实践的关系

材料力学的产生和发展与生产实践有着密切的关系。在古代，人类就从房屋、桥梁的建筑以及车辆、船舶和其它简单机械的制造中逐渐积累起关于构件和结构的受力分析和材料强度的知识。例如利用石料耐压的特性建造石拱桥；用黄土建造不受拉的拱门和

窑洞;用竹索作悬桥,以发挥竹材的抗拉强度;采用圆形截面的立柱和矩形截面的木梁等。据考古发现,中国在六、七千年前,浙江河姆渡遗址中就有木结构建筑的遗迹,其中的木构件已加工成桩、柱、梁、板等,形式复杂。^①六千年前的西安半坡人已经使用了草、泥混合的复合材料。春秋时的著作《考工记》已有关于圆轴的记载。在西安秦陵出土的铜车马,零件多达三千余个,并已有变截面的幅条、车轴和加强筋等结构。图 1-10 是它的车轮和幅条的照片^②。

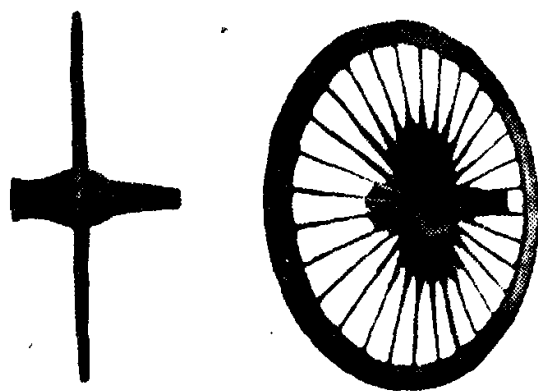


图 1-10 秦陵铜车马的车轮

又如已有将近一千年历史的应县木塔(图1-11),高达 66.49米,位于强震地带,具有优良的抗震性能。在 1305 年曾经受到一次六点五级的大地震,附近民房坍塌净尽,而木塔仍完整存在至今。它是我国古代建筑中杰出代表之一。

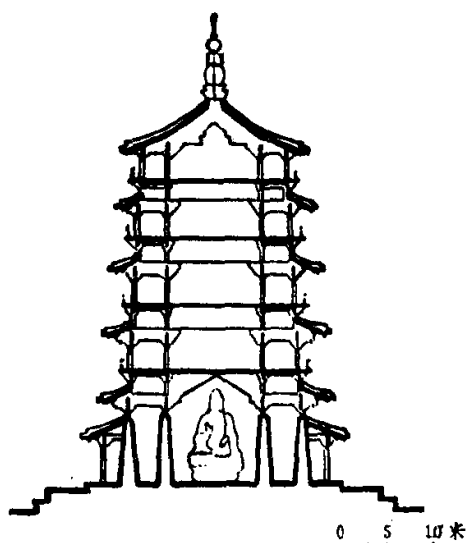
总的说来,在 14 世纪以前,我国的力学的水平一直是在当时欧洲之上的,我国的生产力发达的程度也处于世界领先的地位。但是由于封建制度的长期沿续,限制了生产力和科学技术的进一步发展。

① 张治强:“中国古代力学史初探”。第一届陕西省力学科普学术交流会,1983年,西安。

② 由西安交通大学机械系华自主副教授提供。



(a) 应县木塔外景



(b) 木塔剖面

图 1-11 应县木塔

在欧洲文艺复兴时期,由于建造大吨位船舶以及水利、建筑结构发展的需要,单凭经验和模仿的方法或用简单的按比例放大的方法,已不能适应生产发展的要求。人们开始了用科学实验方法和解析法来研究结构和材料强度的尝试。达·芬奇(1452—1519)和伽利略(1564—1642)是两个杰出的代表。芬奇用铁丝受拉试验来研究材料的强度(图1-12),并研究过梁和柱(压杆)的强度问题。伽利略做过很多有名的力学实验,图1-13和1-14为他进行拉伸和弯曲试验的示意图。对于结构强度问题,他指出了物体愈大,它的相对强度愈低,因而不可能用几何相似的方法来建造大的船只和房屋。他并且首先提出了计算梁的强度的公式(1638年),虽然关于梁弯曲问题的正确结论是在135年后由法国科学家库仑得出的,但伽利略开辟了用实验研究和理论分析相结合的科学研究方法,标志了材料力学这一门科学的开始。1678年英国科学家虎克

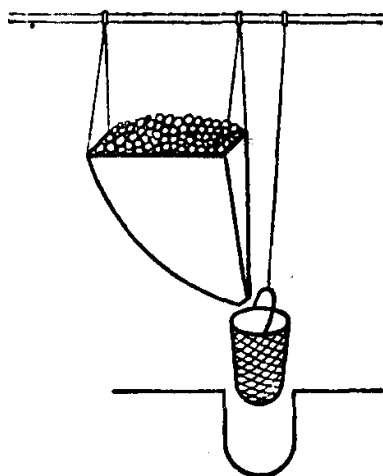


图 1-12 达·芬奇设计的
铁丝受拉试验^①



图 1-13 伽利略的拉伸
试验示意图^②

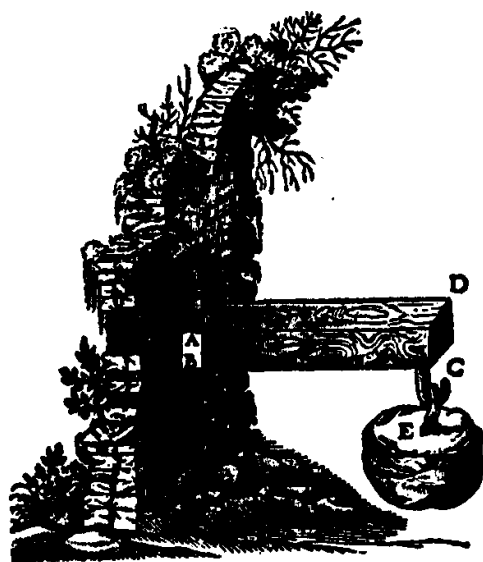


图 1-14 伽利略的弯曲试验示意图^③

(1635—1703)根据由长期的科学实验所观察到的现象，得出了变形与外力成正比的结论，成为材料力学和物理学的一个重要基本

①②③ 取自 S. P. Timoshenko, "History of Strength of Materials", McGraw-Hill Book Company, INC, 1953. 第 6, 11, 12 页。