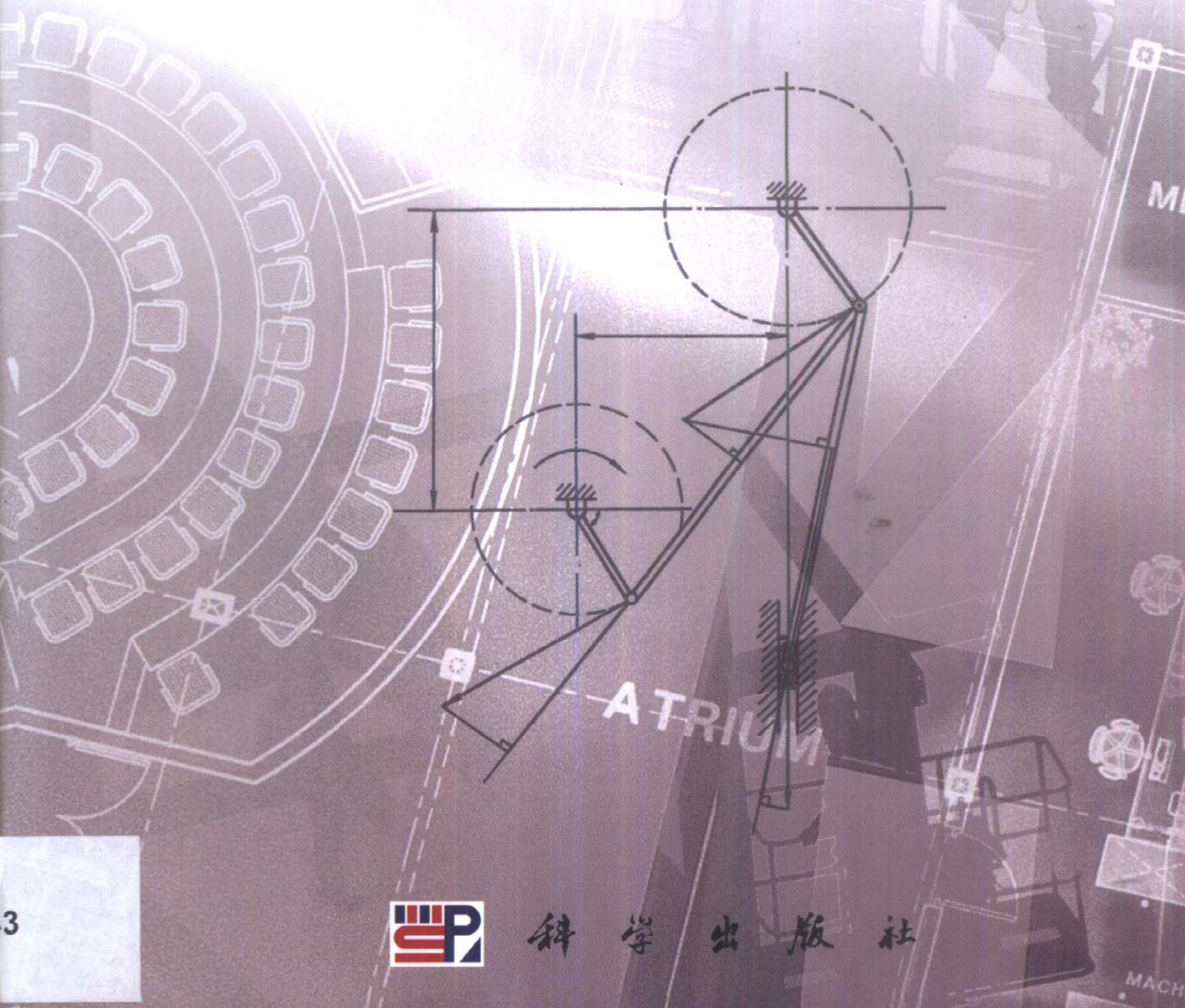


高等院校土木工程系列教材

工程力学

(下册)

陈长征 刘贵立 编
罗跃纲 韩旭 宋红英



134

高等院校土木工程系列教材

工程力学

(下册)

陈长征 刘贵立 宋红英 编
罗跃纲 韩旭

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书包括上、下两册。上册为理论力学,包括静力分析、运动分析与动力分析,主要研究物体的运动规律,分析物体产生运动的原因,建立物体的运动与作用在物体上的力的相互关系。下册为材料力学,包括强度、刚度和稳定分析,主要研究物体在外力作用下的变形规律。

本书可供高等院校工科类本科生及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学(上、下册)/陈长征等编. —北京:科学出版社,2002

(高等院校土木工程系列教材)

ISBN 7-03-010204-5

I. 工… II. 陈… III. 工程力学-高等院校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 011992 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年7月第 一 版 开本:720×1000 B5

2002年7月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—4 000 字数:378 000

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

前 言

众所周知,合适的教材是课程建设和提高教学质量的根本保证,但以前的力学教材侧重于理论体系的完整,缺乏与工程实际的联系,对如何从力学教学角度加强对实际能力的培养的重视程度远远不够,这就对工程力学课程提出了新的要求,即需要编写一本有一定针对性和内涵、学时足够的适用于机械工程类、材料工程类、土木工程类、电气类和化工类等专业的水平工程力学教材。基于上述目的,我们编写了本书。

在各种机械设备和工程结构的设计与制造中,不但有保证其安全正常工作、尽可能延长其使用寿命、避免各种失效的基本要求,而且随着新材料、新机械设备的不断问世和力学理论与应用技术的发展,对这部分的教学内容提出了更高的要求。因此,本书重点介绍机械设备、工程材料的基本机械运动规律,强度、刚度、稳定性分析,为机械和工程设计提供必要的工程力学理论、计算方法和实验分析方法,力求使学生能够了解和解决实际工程中的复杂力学问题。

本书主要包括以下两部分:(1)理论力学,包括静力分析、运动分析与动力分析;(2)材料力学,包括强度、刚度和稳定分析。

其中第一部分研究物体的受力与平衡规律,即根据所研究的物体及其周围物体之间的联系,确定作用在所研究的物体上有哪些力,以及这些力之间的数量关系;研究物体的运动规律,分析物体产生运动的原因,建立物体的运动与作用在物体上的力的相互关系。第二部分研究物体在外力作用下的变形规律,即研究物体由于变形内部将产生哪些力,当这些内部相互作用力超过一定限度时,物体将会丧失哪些正常功能。

参加本书编写的有陈长征(绪论Ⅰ,第3、9、10、11、12章),刘贵立(绪论Ⅱ,第13、14、15、16、17章),罗跃纲(第18、19、20、21、22、23、24章,附录),韩旭(第4、5、6、7、8章),宋红英(第1、2章)。

在本书编写过程中,作者参考了部分有关理论力学、材料力学和工程力学方面的教材,在此对这些教材的作者表示衷心的感谢。由于水平有限,书中可能存在一些错误或不妥之处,请读者批评指正。

目 录

前言

第 I 篇 理论力学

(上册)

绪论 I	1
I.1 力学的发展情况简介	1
I.2 理论力学的研究对象与内容	2
I.3 理论力学的任务	3
I.4 理论力学的研究方法	3
第 1 章 静力学的基本概念和受力分析	5
1.1 力的概念	5
1.2 静力学公理	7
1.3 约束与约束反力	10
1.4 物体的受力分析与受力图	15
习题	20
第 2 章 简单力系	25
2.1 汇交力系合成的几何法	25
2.2 汇交力系合成的解析法	28
2.3 平面汇交力系的平衡方程	31
2.4 平面力对点之矩的概念及计算	34
2.5 平面力偶理论	37
习题	39
第 3 章 平面一般力系	46
3.1 平面一般力系实例	46
3.2 力线平移定理	47
3.3 平面一般力系向一点简化 主矢与主矩	49
3.4 平面一般力系简化结果的讨论 合力矩定理	51
3.5 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	54
3.6 平面平行力系的平衡方程	59
3.7 静定和静不定问题	60

3.8	物体系的平衡	62
3.9	平面桁架中杆件内力计算	69
	习题	73
第4章	空间力系和重心	84
4.1	空间汇交力系的合成与平衡	84
4.2	空间力偶系的合成与平衡	88
4.3	力对轴的矩与力对点的矩	89
4.4	空间力系向一点的简化,主矢与主矩	92
4.5	空间任意力系的平衡方程	95
4.6	平行力系中心和重心	100
4.7	摩擦	106
	习题	111
运动学		
第5章	点的运动	117
5.1	点运动的矢量表示法	117
5.2	点运动的直角坐标表示法	118
5.3	点运动的自然坐标表示法	123
	习题	127
第6章	刚体的简单运动	129
6.1	刚体的平行移动	129
6.2	刚体绕固定轴转动	130
6.3	转动刚体内各点的速度和加速度	134
6.4	角速度和角加速度矢量,用矢积表示点的速度和加速度	138
	习题	141
第7章	点的合成运动	145
7.1	点的绝对运动、相对运动与牵连运动	145
7.2	点的速度合成定理	148
7.3	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	152
7.4	牵连运动为转动时点的加速度合成定理	156
	习题	164
第8章	刚体的平面运动	172
8.1	刚体平面运动概述	172
8.2	平面运动分解为平动和转动	174
8.3	平面图形上各点的速度	175
8.4	平面图形的瞬时速度中心	183

8.5 平面图形上各点的加速度	190
习题	193

动力学

第 9 章 动力学普遍定理	205
9.1 质点动力学基本方程	205
9.2 动量定理	220
9.3 动量矩定理	238
9.4 动能定理	262
9.5 动力学普遍定理的综合应用	282
习题	289
第 10 章 达朗伯原理	306
10.1 惯性力的概念	306
10.2 质点和质点系的达朗伯原理	308
10.3 刚体惯性力系的简化	312
10.4 定轴转动刚体的动反力, 静平衡与动平衡的概念	321
习题	326
第 11 章 分析力学基础	333
11.1 约束、自由度与广义坐标	333
11.2 虚位移、虚功与理想约束	335
11.3 虚位移原理	336
11.4 动力学普遍方程	342
11.5 拉格朗日方程	343
11.6 拉格朗日方程应用举例	346
习题	351
第 12 章 振动基础	358
12.1 工程中的振动问题	358
12.2 单自由度系统的振动	360
12.3 隔振原理	381
12.4 转子的临界转速	383
12.5 两个自由度系统的振动	384
习题	398
习题部分答案	406

第Ⅱ篇 材料力学

(下册)

绪论 I	421
II.1 材料力学的任务和研究方法	421
II.2 变形固体及其基本假设	423
II.3 杆件变形的基本形式	425
第 13 章 轴向拉伸、压缩与剪切	428
13.1 拉、压杆的内力与应力	428
13.2 拉、压杆的强度计算	433
13.3 拉、压杆的变形计算	437
13.4 材料在拉伸、压缩时的机械性能	439
13.5 剪切与挤压	446
13.6 剪切实用计算	447
13.7 挤压实用计算	448
习题	452
第 14 章 扭转	456
14.1 概述	456
14.2 外力偶矩 扭矩和扭矩图	457
14.3 薄壁圆管的扭转	460
14.4 圆轴扭转时的应力和强度计算	463
14.5 圆轴扭转时的变形和刚度计算	469
习题	472
第 15 章 弯曲内力	475
15.1 弯曲的概念	475
15.2 梁的计算简图 静定梁的形式	476
15.3 梁的内力——剪力和弯矩	479
15.4 剪力图和弯矩图	483
15.5 分布载荷集度、剪力及弯矩之间的关系	487
习题	493
第 16 章 弯曲应力	497
16.1 弯曲正应力	497
16.2 梁的正应力强度计算	504
16.3 弯曲剪应力	508
16.4 梁的剪应力强度校核	514
16.5 提高弯曲强度的措施	516

习题	522
第 17 章 弯曲变形	526
17.1 弯曲变形的量度及其基本公式	526
17.2 用直接积分法求梁的变形	529
17.3 用叠加法求梁的变形	535
17.4 弯曲刚度计算 提高梁弯曲刚度的措施	536
习题	540
第 18 章 应力状态与强度理论	542
18.1 应力状态的概念	542
18.2 平面应力状态下的应力分析	543
18.3 主应力、主平面与最大剪应力	545
18.4 应力状态分析的图解解析法——应力圆及其应用	548
18.5 复杂应力状态下的应力-应变关系	550
18.6 建立复杂应力状态下的强度条件的基本思想与方法	556
18.7 以应力为判据的强度理论	556
18.8 以应变为判据的强度理论	558
18.9 以能量为判据的强度理论	558
18.10 强度理论的应用	559
18.11 含裂纹体的脆性断裂概述	562
习题	564
第 19 章 组合变形	566
19.1 概述	566
19.2 斜弯曲	566
19.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合	569
19.4 弯曲与扭转的组合	572
习题	577
第 20 章 压杆稳定	580
20.1 压杆稳定的概念	580
20.2 两端铰支细长压杆的临界压力	582
20.3 其他支座条件下细长压杆的临界压力	585
20.4 欧拉公式的适用范围 经验公式	589
20.5 压杆的稳定校核	592
20.6 提高压杆稳定性的措施	594
20.7 纵横弯曲的概念	596
习题	598
第 21 章 能量法	600
21.1 概述	600

21.2	杆件弹性变形能的计算	600
21.3	卡氏定理	605
21.4	马克斯威尔-莫尔定理	612
21.5	图形相乘法	614
21.6	功的互等定理	618
	习题	619
第 22 章	超静定问题	622
22.1	概述	622
22.2	拉压超静定	623
22.3	扭转超静定	629
22.4	弯曲超静定	630
22.5	力法及正则方程	635
	习题	644
第 23 章	动载荷	647
23.1	概述	647
23.2	动静法的应用	647
23.3	强迫振动的应力计算	651
23.4	杆件受冲击时的应力和变形	656
23.5	冲击韧性	662
	习题	663
第 24 章	交变应力	666
24.1	交变应力与疲劳失效	666
24.2	交变应力的循环特征、应力幅和平均应力	668
24.3	持久极限	669
24.4	影响持久极限的因素	670
24.5	对称循环下构件的疲劳强度计算	676
24.6	持久极限曲线	677
24.7	不对称循环下构件的疲劳强度计算	679
24.8	弯扭组合交变应力的强度计算	682
24.9	变幅交变应力	684
24.10	提高构件疲劳强度的措施	686
	习题	687
附录		689
I	重心及截面的几何性质	689
II	型钢表	698
	习题部分答案	715

第Ⅱ篇 材料力学

绪 论 Ⅱ

Ⅱ.1 材料力学的任务和研究方法

在工农业生产、交通运输和勘探建筑等工程中,广泛地运用各种机械设备和工程结构。机械的零件和结构的部件,统称为构件。一切构件都是用固体形态的工程材料制成的。在使用过程中,每一机械或结构的各个构件都要受到相邻构件或其他物体对它的作用;换言之,都要受到外力。

根据长期经验和大量实验,人们知道:在外力作用下,一切固体的几何形状和尺寸大小都要发生一定程度的改变,这种改变,在材料力学中,称为变形。每一固体,当所受外力的大小达到某一数值时,就会发生断裂(例如吊索被接断、垫块被压碎以及螺栓被剪开等等),也有时它的几何外形不能保持原状(如细长直杆两端受压而突然变弯)。在材料力学中,前者称为破坏,后者称为原有的平衡形态丧失稳定,简称为失稳。固体抵抗变形的能力称为刚度,抵抗破坏的能力称为强度,抵抗失稳的能力称为稳定性。

由研究获知:构件的强度、刚度和稳定性,与其本身的几何形状、尺寸大小、所用材料,受力情况以及工作环境等等都有密切的关系。

在工程上,为了保证每一机械或结构始终能够正常地工作而不致失效,在使用过程中,不容许有任何一个构件发生破坏或失稳而不安全^①,也不容许有任何构件由于变形过大(或过小)而不合用。也就是说,各个构件都必须具有足够的强度和稳定性,还要具有恰当的刚度。

工程中所用的任何一个机械或结构,应该是既安全又适用,而且设计时还要使它是最经济的。安全、适用和经济是任何一个机械或工程结构所必须满足的三个基本要求。

① 在某些安全装置中,有时为了防止整个机械或结构发生严重损毁,设计时有意识地使少数构件在一定大小的外力作用下发生破坏,从而保证整体的安全。

此外,在某些情况下,机械或工程结构还须满足一些特殊要求。例如,紧急的工程结构要求施工或制造简便、电讯和输电设备要求绝缘,化工机械和设备要求耐腐蚀,炼油机械和设备要求耐高温、耐高压等等。当然,在工程设计中,还有好些因素应该考虑,例如化工容器要有可靠的密封,一般机械应该尽量减小噪音等等。

上述这些要求之间,通常是存在着矛盾的。例如,为了提高工程结构安全的程度,常须耗用较好较多的材料,提高加工的精密度;但是为了使所设计的结构是最经济的,却须选用较廉的材料(往往质量较差),并应尽量减少材料的消耗,降低加工的要求。必须注意的是,在工程设计中,片面地追求经济效果来降低造价而忽视安全性,会带来严重的危险事故;但过分地强调安全而忽视经济性,就会引起浪费而违背节约原则。正确地处理这种矛盾,在工程实际中,是非常重要的课题。

在工程上,除了设计之外,有时须要对现有的构件,校核其尺寸大小是否足够,也有时要对已经制成的构件,估算其承载能力(即所能承受的最大外力)。

既然构件的强度、刚度和稳定性都与所用材料有密切关系,显然,对于设计、校核以及计算承载能力的工作,首先必须了解材料的力学性能。各种材料的力学性能,是可以通过实验研究来测定的,而且是必须通过实验研究才能获得的。

材料力学这门科学的主要任务是,研究各种工程材料和构件在外力作用下所表现的力学性能,为工程设计提供必要的理论基础和计算方法;从而为构件选择适当的材料,确定合理的形状和足够的尺寸,以保证工程结构和机械设备在满足安全、适用的前提下,符合最经济的要求。

材料力学和其他某些科学一样,在某一问题的探索研究中,有实验、假设、理论分析以及验证等过程。

材料力学所研究的是实际问题。实际事物往往是很复杂的。在研究工作中,首先是通过实验来观察具体的现象,以求探索出问题的本质;然后略去那些与本题无关或影响不大的次要性质,保留与本题有密切关系的主要性质,从而做出假设,把问题抽象化,即用理想的情况来代替真实的情况,用理想的力学模型来代替实际物体,作为研究的依据。

实际问题经过抽象化并做出假设之后,就便于进行理论分析了。在材料力学的理论分析中,常以数学和理论力学为工具。

理论分析所得的结论以及由这些结论所导出的计算方法是否正确、是否合用,需要再通过实验来验证,还必须经过生产实践的考验。

在材料力学这门科学的发展过程中,实验、理论分析和生产实践三者是紧密联系而不可分割的。

II. 2 变形固体及其基本假设

上面已指出,在科学研究中,常须先由实验来观察现象,以探索事物的本质,然后略去次要性质,保留主要性质,经过抽象化并作出假设,把真实物体简化为理想模型,从而进行理论分析。

每一门科学只是从某一角度来研究具体事物某一方面的问题。真实物体具有多种多样的复杂性质,其中哪些是主要的而必须保留,哪些是次要的而可以略去,必须根据这门科学的研究范围来确定。

前已指明,一切固体在外力作用下都要发生变形。换言之,它们都是变形固体。

在理论力学中,人们所研究的是物体运动和平衡问题的一般规律。对于这种问题,固体的微小变形,影响很小,是一个可以忽略的次要因素。因此,可以认为,在外力作用下,固体的几何形状和尺寸大小都绝对不变。这就是用绝对刚体这个抽象的力学模型代替真实的固体,作为研究对象,来进行理论分析。

在材料力学中,人们所研究的是构件的强度、刚度和稳定性问题。对于这类问题,固体的变形虽然很小,但却是主要因素之一,必须予以考虑而不能忽略。所以在研究构件的强度、刚度或稳定性问题时,必须考虑到:一切构件在外力作用下都是变形固体。

既然在材料力学的研究中,要考虑到一切构件在外力作用下都是变形固体,那么就要进一步明确固体在变形方面有何重要性质。

在外力作用下固体各个质点间的相对位置有所改变,由经验和实验研究获知,一般固体都或多或少地具有抵抗这种改变的能力;在除去外力时,固体本身能消除由外力所引起的变形而趋于恢复原状。这是变形固体的一个基本性质,称为弹性。但是,若固体所受的外力超过了某一限值,则除去外力后,它就不能完全恢复原状。随着除去外力而消失的那一部分变形称为弹性变形,不能消失而遗留下来的那一部分变形称为塑性变形,也称为残余变形或永久变形。

某些固体在外力作用下能产生较大的塑性变形。这种性质称为延性^①。

实验研究指出:由常用的工程材料制成的构件,在常温下,当所受外力未超过某一限值时,可以认为是完全弹性的。这个范围称为弹性范围。若外力超过了这个限值,就要发生显著的塑性变形。

在材料力学中,把固体的弹性范围作为研究的主要范围。

为了简化性质复杂的变形固体,在材料力学中,常用下列几个基本假设,作为

① 有些力学文献中称它为“塑性”。

对于强度、刚度和稳定性问题进行理论分析的共同基础。

1. 材料连续性假设

假设构成变形固体的物质完全填满了固体所占的整个几何空间而毫无空隙存在。

实际上,构件的材料是由很多很多微粒或晶体组成的,各微粒或晶体之间是有空隙的。但是,由于这种空隙和材料力学中所研究的构件的尺寸比起来都极为微小,因而,以这个假设为根据来进行理论分析,所得的结论,不致产生显著的误差。

2. 材料均匀性假设

假设在固体的体积之内,各处的物理性质完全相同。

实际上,组成构件材料的各个微粒或晶体,彼此的性质并不完全相同。但是,由于构件所包含的极为微小的颗粒或晶体的数目极多,而且排列得很不规则,因而,它们的性能的统计平均值就足以反映构件材料的性质。也就是可以认为,材料的物理性质是均匀的。

上面这两个假设,对钢、铜等金属材料相当吻合,对砖、石、木材以及混凝土等材料较差,不过仍可采用。

3. 材料各向同性假设

假设固体的每一部分沿各个不同方向的物理性质完全相同。

实际上,组成构件材料的各个晶体是各向异性的。不过,这些晶体都远小于构件尺寸而又杂乱地排列着,因而构件材料的统观性质接近于各向同性。铸钢、铸铜和做得很好的混凝土,常被认为是各向同性材料。

钢丝、各种轧制的钢材和纤维整齐的木材等等,只在一定的方向上才具有相同的性质,称为单向同性材料。在材料力学中,对于各向同性材料的研究结果,可以近似地用于一些单向同性材料。

根据上述几个假设,我们可以认为,在固体内各处、沿各方向的变形和位移等物理量是连续的,可以用位置坐标的连续函数来表示。因此,我们可以从固体内任何部分、沿任何方位,假想地取出无限小的单元体(即无限小的微块)来进行分析研究^①,而且可以把那些由大尺寸试样通过实验研究所获得的材料性质移用到无限小的单元体上去。这就使我们在材料力学的研究中,可以应用无限小的分析方法。

^① 根据上述几个假设,这种单元体虽然取得远远大于组成固体的微粒,但在数学上却可以认为是无限小的。因此,可以应用无限小的分析方法。

4. 小变形假设

由于各个固体的形状、尺寸及材料性质各有不同,因而,在外力作用下,有些固体的变形很不明显,也有些固体的变形很为显著,不过,在工程中,一般构件的变形与构件本身的原始尺寸比较起来通常是很微小的,因而在构件各点处与变形相对应的位移也是很微小的。

由于变形微小,所以,研究构件整体或其某一部分的平衡或运动时,可以略去变形和与变形相对应的位移而采用构件的原始尺寸和外力作用点的原始位置。这样做所引起的误差很为微小,可以不考虑,而实际计算却大为简化。

除上述几个基本假设之外,在材料力学中,还常常采用一些简化变形或内力的假设。在本书后面的某些章节中,将分别予以指出。

II.3 杆件变形的基本形式

实际构件的几何形状是多式多样的。在强度、刚度等问题中,对于任意形状的构件,难以进行理论分析;但是对于形状简单的构件,则研究较易。材料力学以杆状构件为主要研究对象。

杆状构件常简称为杆件或杆,形状细长。沿杆长的方向称为纵向,与纵向垂直的方向称为横向。杆的纵向尺寸远远大于其横向尺寸^①。

沿着杆的横向所取的截面称为横截面。各横截面形心的连线称为杆的形心轴,有时称为中心线,或简称为轴线^②。横截面和轴线是杆的重要几何特征。

各处横截面的形状完全相同而且大小完全相等的杆称为等截面杆[图 II.1(b)和(c)];否则就称为变截面杆[图 II.1(a)]。轴线为曲线的杆称为曲杆[图 II.1(a)和(b)];轴线为直线的杆称为直杆[图 II.1(c)和(d)]。等截面直杆有时简称为等直杆[图 II.1(c)];几段的截面彼此不等而各段内为等截面的直杆常称为阶梯杆[图 II.1(d)]。

有关等直杆的研究结果和计算方法,有时可近似地推广用于小曲率的曲杆和横截面沿杆轴变化缓和的变截面直杆。

实际构件的形状相当复杂,不过常常有很多构件可以近似地简化为杆件来进

① 工程实际中的杆状构件,大多数是很细长的。本书为明显计,各章插图中的杆件画得较为粗短。

② 关于杆的轴线和横截面,可进一步解释如下:

设有一个平面图形 $C-C'$ (参阅图 II.1),沿某一直线或曲线 AB 运动。在运动中,图形的形心沿 AB 移动,图形平面保持与 AB 垂直。于是图形所经过的空间就形成一个杆状体。线 AB 称为该杆状体的形心轴,简称为轴线;处于任一位置的平面图形 $C'-C'$ 就是该杆状体的横截面。

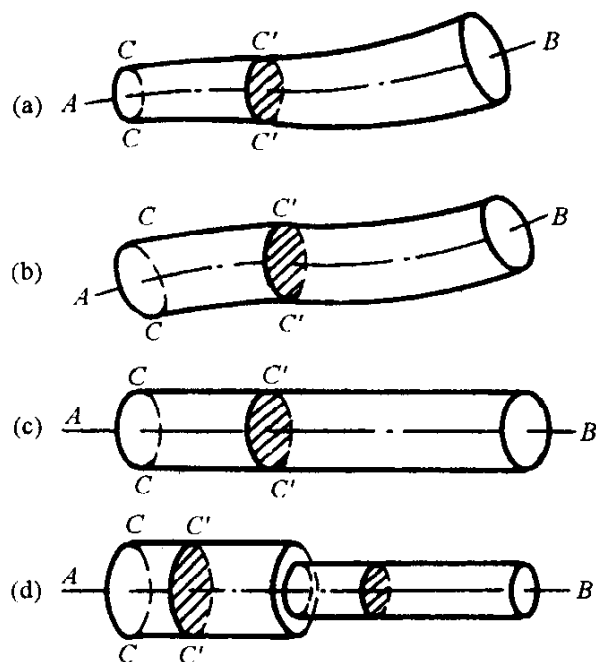


图 1.1

行分析研究。例如建筑结构中的梁、柱、烟囱,机械设备中的传动轴、螺栓等等,在材料力学中都可作为直杆来处理;起重吊钩就可作为曲杆来处理。

由于外力作用的方位和指向不同,直杆所产生的变形也将随之而异。直杆变形的基本形式有下列几种,现将其最简单的受力情况和主要变形现象分述如下:

1. 轴向拉伸和轴心压缩

若直杆在两处各受一个集中外力作用,二者大小都等于 P 而指向相反,作用线都与杆的轴线重合,则杆的主要变形就是杆长的改变。两力向外时,杆受拉而伸长,如图 1.2(a)所示。这种变形形式称为轴向拉伸或简单拉伸。两力向内时,杆受压而缩短,如图 1.2(b)所示。这种变形形式称为轴向压缩或简单压缩。

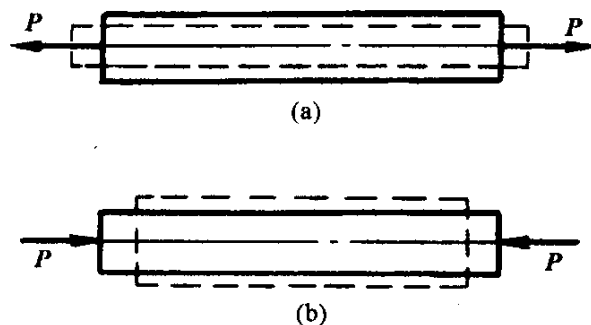


图 1.2

在工程实际中,例如桁架在外力作用下,有些构件的主要变形就是轴向拉伸,而另一些构件的主要变形就是轴向压缩。

2. 扭转

若直杆在两处各受一个外力偶作用,二者矩的大小都等于 M_0 而转向相反,作用面都垂直于杆的轴线,则在杆的侧面上原来平行于杆轴的诸直线就都变成螺旋线(在小变形下近似于斜直线),如图 I.3 所示。这种变形形式称为扭转。

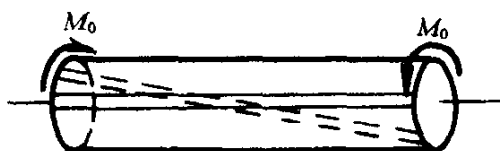


图 I.3

在工程实际中,例如汽车方向盘的轴和某些设备手轮的轴,其主要变形就是扭转。

3. 弯曲

若直杆在两处各受一个外力偶作用,二者矩的大小都等于 M_0 而转向相反,作用面都与包含杆轴的某一纵平面重合,则直杆就要变弯,如图 I.4 所示。这种变形形式称为弯曲。

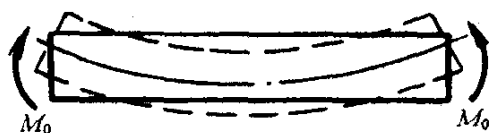


图 I.4

在工程实际中,例如吊车梁的主要变形就是弯曲。

在工程中,常常遇到一些构件,它们的变形较为复杂。不过杆件的复杂变形可以看成是由上述几种基本形式的变形组合起来的,杆件的这种变形称为组合变形。

本书在以下几章中,将先分别讨论杆件变形的各种基本形式,然后讨论组合变形。