

普通高等教育‘十五’国家级规划教材

下 册

主 编 梅凤翔

副主编 周际平 水小平

高等教育出版社

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 82028899 转 6897 (010)82086060

传真：(010) 82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮编：100011

购书请拨打读者服务部电话：(010)64054588

策 划	黄 毅
责任编辑	李 澈
封面设计	刘晓翔
责任绘图	朱 静
版式设计	王艳红
责任校对	康晓燕
责任印制	

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,全书是在北京理工大学重点教学改革项目“工程力学课群教学体系和内容改革”的研究成果基础上,借鉴了国内外一些优秀教材并经过两年教学实践的基础上编写的,作为北京市重点资助项目,被列为北京市精品教材。本书以力学的基本概念和原理为主线,优化课程体系,重组教学内容,对工科力学课程进行了整合,内容包括理论力学、材料力学和流体力学初步等基础知识,以便于学生建立起对力学学科的整体认识。

全书分上、下两册。本书为下册,共分 13 章,分别为组合变形、能量法、静不定结构、压杆稳定、实验应力分析、动能定理、动量原理(包括动量定理与动量矩定理)、达朗贝尔原理、变形固体的动力失效问题、动力学普遍方程和拉格朗日方程、流体静力学、流体运动学、流体动力学等。

本书可作为高等学校机械类、土建类、航天航空类、水利类、工程力学类专业本科生的教材,也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷

开 本	787 × 960 1/16	版 次	年 月 第 版
印 张	29	印 次	年 月 第 次印刷
字 数	540 000	定 价	33.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

本书是根据 21 世纪对人才培养的要求和教育部关于面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的指示精神,吸取我校基础力学系列课程多年的教学经验和丰富的改革成果,借鉴国内外一些优秀教材并经过两年教学实践的基础上编写的。本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,同时也被列为北京市精品教材(重点资助)。该教材有以下特色:(1) 优化课程体系,重组教学内容,减少不必要的重复,突出主要内容,加强前后呼应,实现教学内容的相互贯通,相互融合和相互综合;(2) 更多地采用从一般到特殊的内容体系,以便于全面、准确地阐述基本概念和基本定理;(3) 提高数学起点,使推导严谨,表述简明;(4) 增大例题难度,这主要体现在例题的深度、广度和综合性上,以利于学生对基本理论的透彻理解和正确应用;(5) 注重启发性,结合相关内容安排一定数量的思考题,以培养学生独立思考问题的能力和创新能力;(6) 增加面对计算机的有关知识介绍,初步培养学生的力学建模能力和利用计算机解决工程实际中力学问题的能力;(7) 加强理论联系实际和实验环节,激发学生的学习兴趣和促使学生养成爱思考的习惯和动手能力;(8) 开设一定数量的反映后续相关课程的有关内容以及近现代力学发展成果的接口和窗口,以拓宽学生的知识面和视野,引导学生进入新的知识领域,培养学生自己去获取知识的能力等。

本书采用贯通式编写思路,涵盖了原有工科理论力学、材料力学和流体力学初步等教学内容,计划学时为 192,可作为高等院校机械类、土建类、航天航空类、水利类、工程力学等专业本科生的教材,也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

本书的内部讲义于 1999 年 9 月开始在北京理工大学机械工程与自动化学院的 98 级学生中试用,2000 年 9 月在全校 99 级机械类学生中全面使用。本教材是在这两轮教学实践的基础上改写的。

参加本教材编写工作的有:梅凤翔、周际平、水小平、韩斌、刘海燕、秦晓桐、李海龙。具体分工如下:第 1 章至第 4 章,第 8 章由刘海燕编写;第 5 章至第 7 章,第 19 章至第 21 章,第 23 章,下册附录 由水小平编写;第 9 章至第 14 章由韩斌编写;第 15 章至第 17 章,第 22 章,上册附录 、 、 由周际平编写;第 18 章由秦晓桐编写;第 24 章至第 26 章由李海龙编写。统稿由梅凤翔、周际平、水

小平完成。

本书在编写过程中得到北京理工大学各级领导的关心、鼓励和大力支持,戴泽墩教授、刘耀乙教授、程兆雄教授、张永发教授、赵树信教授、胡更开教授等提出了很好的建议,同时还得到了北京理工大学理学院力学系许多教师的支持与帮助。北京航空航天大学谢传锋先生、大连理工大学郑芳怀先生、北京理工大学张世影先生在百忙中认真审阅了书稿并提出了许多宝贵意见。在此一并表示感谢。

限于编者水平,教材中难免有疏漏,敬请读者批评指正。

梅凤翔 周际平 水小平

2002年12月

主要符号表

a	加速度	g	重力加速度
a_n	法向加速度	G	
a_t	切向加速度	h, H	
a_a	绝对加速度的矢量	i	
a_r	相对加速度	i	
a_e	牵连加速度	l	
a_c	科氏加速度	l	
a_R	转动加速度	l_p	
a_N	平面图形对 y, z 轴的惯性积 向轴加速度	l_{yz}	
A	y 轴的单位矢量 面积, 振幅	j	
C	刚体对过质心轴的转动惯量	J_C	
C	刚体对 l 轴的转动惯量	J_l	
e	刚体对 x, y 轴的惯性积	J_{xy}	
E	弹簧刚度系数	k	
f	动摩擦因数, 材料条纹值	k	
f	理论应力集中因数,	K	
f_s	静摩擦因数	应变片的灵敏度	
F	刚度矩阵	K	
F_{cr}	临界载荷	K_d	
F_f	静滑动摩擦角	K	
F_l	惯性矩	K_c	
F_{lc}	科氏加速度灵敏度	K_s	
F_{le}	牵连加速度灵敏度	K_r	
F_N	洛伦兹约束集中因数	K, K	
F_N	勒让德函数	L	
F_R	刚体的质心 C 的动量矩	L_C	
F_S	刚体对点 O 的动量矩	L_O	

主要符号表

m	质量, 分布力偶矩集度	v_v	体积改变能密度
M	弯矩, 马赫数	v	应变能密度
M	力偶矩, 主矩	v	速度
M_e	绝对速度力偶矩	v_a	
M_c	牵连速度惯性力系对其质 牵连速度矩	v_r	
$M_o(F)$	势能, 相对 O 的矩	v_e	
M_t	转动力偶矩	V	
n	挠度数目, 转速, 变函数幂级数阶数, 复势函数	W	
n_f	扭转截面函数	W_p	
n_{st}	稳定变函数多余未知力	X_i	
ρ	密度	x, y, z	
ρ	角速度, 角度坐标, 收缩因数		
ρ_0	线膨胀系数	l	
P	重量, 质量, 力, 强度坐标		
q	切应力, 重量, 绝对热指数		
q_m	质量流量		
q_v	漆釉靡墜系数, 位移, 厚度, 光程差, 相对密度		
Q	变分符号		
r	率形, 循环特征		
r	半径		
R	半径, 速率半径, 气体常 数, 尺寸因数	t	
Re	雷诺数		
s	弧度, 梁横截面的转角, 体应变, 等倾线角度		
S	截面, 长细比		
S	截面惯性系数	μ	
t	时间, 温度, 动粘性系数		
T	扭矩, 温度		
u	密度, 速率, 轴向位移		
v_d	畸变能密度		
	正应力	σ	强度极限
σ	平均应力	m	

bs			单位长度相对扭转角
[]	许用应力	或	斜射角
cr	临界应力		势函数
e	弹性极限	f	摩擦角
p	比例极限		角度坐标, 流函数
0.2	条件屈服应力	0	固有频率
s	屈服应力		角速度, 面积
	切应力, 粘性切应力	a	绝对角速度
[]	许用切应力	r	相对角速度
	角度坐标, 相对扭转角,	e	牵连角速度
	速度势函数		

目 录

(下 册)

第 14 章 组合变形	(1)
§ 14.1 组合变形的概念与分析方法	(1)
§ 14.2 强度理论概论	(2)
§ 14.3 常用的强度理论	(3)
§ 14.4 斜弯曲.....	(11)
§ 14.5 拉(压)弯组合及偏心拉伸(压缩).....	(14)
§ 14.6 弯扭组合.....	(22)
§ 14.7 组合变形的普遍情形.....	(25)
习题.....	(26)
第 15 章 能量法	(34)
§ 15.1 弹性变形势能的计算.....	(34)
§ 15.2 虚位移原理用于变形固体.....	(41)
§ 15.3 单位载荷法.....	(43)
§ 15.4 计算莫尔积分的图乘法.....	(48)
§ 15.5 互等定理.....	(55)
§ 15.6 势能驻值原理和最小势能原理.....	(57)
习题.....	(62)
第 16 章 静不定结构	(68)
§ 16.1 概述.....	(68)
§ 16.2 力法求解静不定结构.....	(71)
§ 16.3 利用对称性简化静不定结构的计算.....	(82)
§ 16.4 装配应力和温度应力.....	(88)
§ 16.5 静不定结构的特点.....	(93)
§ 16.6 矩阵位移法简介.....	(93)
习题	(107)
第 17 章 压杆稳定	(112)
§ 17.1 概述	(112)
§ 17.2 静力法	(114)
§ 17.3 能量法	(118)

目 录

§ 17.4	不同支承条件下细长压杆的临界载荷	(124)
§ 17.5	柔度 临界应力总图	(125)
§ 17.6	压杆的稳定计算	(130)
§ 17.7	提高压杆稳定性的措施	(137)
§ 17.8	其他形式构件的失稳问题	(139)
	习题	(140)
第 18 章	实验应力分析	(146)
§ 18.1	应变电测法	(147)
§ 18.2	测量电桥电路与应变仪	(149)
§ 18.3	应变测量电桥的组接	(152)
§ 18.4	光弹性实验方法	(157)
	习题	(171)
第 19 章	动能定理	(173)
§ 19.1	质点系质量分布的特征量	(174)
§ 19.2	动能	(180)
§ 19.3	动能定理	(186)
	习题	(192)
第 20 章	动量原理	(198)
§ 20.1	动量	(198)
§ 20.2	冲量	(200)
§ 20.3	动量定理	(200)
§ 20.4	质心运动定理	(203)
§ 20.5	动量矩	(206)
§ 20.6	动量矩定理	(210)
§ 20.7	刚体定点运动的欧拉动力学方程	(218)
§ 20.8	刚体一般运动的动力学方程	(221)
§ 20.9	陀螺运动的近似理论	(221)
§ 20.10	关于动力学的三个基本定理	(225)
	习题	(225)
第 21 章	达朗贝尔原理	(230)
§ 21.1	惯性力的概念	(230)
§ 21.2	达朗贝尔原理	(232)
§ 21.3	质点系达朗贝尔惯性力系的简化	(232)
§ 21.4	动静法的应用举例	(237)
§ 21.5	定轴转动刚体的轴承附加动约束力	(243)
	习题	(248)
第 22 章	变形固体的动力失效问题	(253)
§ 22.1	概述	(253)

§ 22.2	惯性力问题	(253)
§ 22.3	冲击问题	(257)
§ 22.4	交变应力问题	(271)
§ 22.5	断裂力学与损伤力学简介	(294)
	习题	(297)
第 23 章	动力学普遍方程和拉格朗日方程	(303)
§ 23.1	动力学普遍方程	(303)
§ 23.2	第二类拉格朗日方程	(305)
§ 23.3	第二类拉格朗日方程的首次积分	(312)
§ 23.4	第二类拉格朗日方程在微振动中的应用	(317)
§ 23.5	第一类拉格朗日方程和多刚体系统动力学简介	(326)
§ 23.6	力学从牛顿定律到混沌	(332)
§ 23.7	分析力学简介	(333)
	习题	(334)
第 24 章	流体静力学	(339)
§ 24.1	流体的密度	(339)
§ 24.2	流体的特性	(340)
§ 24.3	静水压强	(340)
§ 24.4	浮力	(344)
§ 24.5	一般体积力的平衡	(349)
§ 24.6	空气静力学	(351)
§ 24.7	表面张力	(352)
	习题	(354)
第 25 章	流体运动学	(358)
§ 25.1	描述流体运动的两种方法	(358)
§ 25.2	迹线和流线	(360)
§ 25.3	流管	(362)
§ 25.4	速度分解定理	(363)
§ 25.5	连续性方程	(368)
	习题	(370)
第 26 章	流体动力学	(373)
§ 26.1	流体的粘性	(373)
§ 26.2	理想流体动力学	(374)
§ 26.3	粘性流体动力学	(392)
§ 26.4	理想气体的一元可压缩流动	(399)
	习题	(406)
附录	简单均质几何体的质心、转动惯量和惯性积	(412)
	主要参考文献	(417)

目 录

习题参考答案	(419)
下册名词索引	(434)
Synopsis	(443)
Contents	(445)
梅凤翔简介	封三

第 14 章

组合变形

构件中同时存在两种或两种以上基本变形且其影响皆不可忽略的情况称为组合变形。此时,构件中某些危险点处于二向或三向应力状态。本章介绍常见的几种强度理论;并讨论工程上常见的斜弯曲、拉(压)弯、偏心拉(压)、弯扭等组合变形形式的强度计算。

§ 14.1 组合变形的概念与分析方法

杆件的拉伸(压缩)、剪切、扭转、弯曲是四种基本变形形式。但工程结构中的某些构件往往同时存在几种基本变形。例如,小型压力机框架受力如图 14.1 所示,外力 F 不通过框架立柱的轴线,将其向立柱轴线简化后,可看出立柱承受了由 F 引起的拉伸和力偶矩 $M = Fa$ 引起的弯曲。又如图 14.2 所示的传动轴,皮带拉力 F_{T1} 与 F_{T2} 的作用使得轴产生扭转和弯曲。构件在外力作用下同时产生两种或两种以上基本变形的情况就称为组合变形。

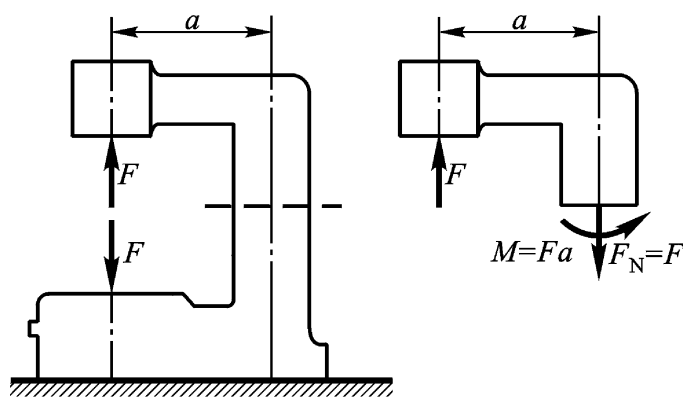


图 14.1

在组合变形时,构件的受力和变形虽然比较复杂,但只要构件处于线弹性范围之内,且变形很小,就可将全部载荷分解为静力等效的几组载荷,使每组载荷

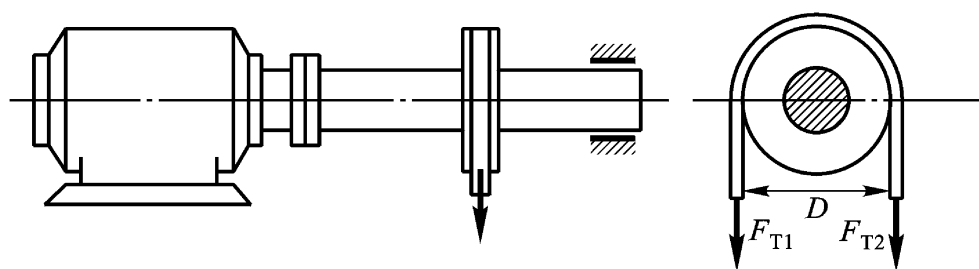


图 14.2

对应于一种基本变形。不同的基本变形各自独立计算,互不耦合。最后将各种基本变形引起的内力、应力、应变和位移分别叠加起来,就是构件在组合变形下的内力、应力、应变和位移。

但是,对组合变形下的构件进行强度计算时,如何判断构件是否安全呢?在单向应力状态情况下,材料出现失效现象(如屈服或断裂)时的极限应力可由实验测定,再考虑到一定的安全因数,就得到强度条件 []。因此,对于危险点为单向应力状态的情况,都可应用以上形式的以实验为基础的强度条件。但是,构件如果属于组合变形,构件内危险点多为二向或三向应力状态。这种情况下靠实验来测定各种各样的应力状态下的失效力并建立强度条件往往是难以实现的。因此,二向或三向应力状态下的强度条件的建立,常常是依据部分实验结果提出假说,推测材料失效的原因,从而建立起强度理论。下面介绍常用的几种强度理论。

§ 14.2 强度理论概论

各种材料因强度不足引起的失效现象是不同的,但主要还是表现为屈服和断裂两类。同时衡量构件受力变形程度的量又有应力、应变、能量等。根据对材料破坏现象的分析和大量的实验资料,人们对强度的失效提出了各种假说,就称为强度理论。不同的强度理论认为,材料之所以按某种方式(屈服或断裂)失效,是由于应力、应变、能量等因素中的某一个达到了其极限状态,且失效的原因与应力状态无关。

强度理论既是假说,它是否正确及适用于什么情况,就必须由实践来检验。通常适用于某一种材料的强度理论并不适用于另一种材料;而在某种条件下适用的理论却不适用于另一种条件。下面介绍 4 种常用的强度理论和莫尔强度理论,它们都是在常温静载条件下,适用于均匀、连续的各向同性材料的。当然,强度理论还有很多,但仍不能完满解决所有的强度问题,这方面还有待于进一步发展和完善。

§ 14.3 常用的强度理论

由于强度不足引起的失效有断裂和屈服两种不同的形式,因而不同的强度理论基于不同的失效现象提出假说。如最大拉应力理论和最大伸长线应变理论是解释断裂失效的,而最大切应力理论和畸变能理论是解释屈服失效的。另外,莫尔理论则是综合了各种实验资料并加以符合逻辑的推理而得到的,可适用于任何形式的失效。下面分别加以介绍。

1. 最大拉应力理论(第一强度理论)

认为最大拉应力是引起材料断裂的主要因素。无论材料处于何种应力状态,只要其最大拉应力达到单向拉伸时材料的极限应力 σ_b ,就导致断裂发生。任意应力状态下,最大拉应力即该应力状态的第一主应力 σ_1 ,故断裂准则为

$$\sigma_1 = \sigma_b \quad (14.1)$$

考虑到一定的安全因数,第一强度理论的强度条件为

$$\sigma_1 = [\sigma] \quad (14.2)$$

这里 $[\sigma]$ 为拉伸许用应力。铸铁等脆性材料拉伸时断裂发生于拉应力最大的横截面;而扭转时断裂也是沿着拉应力最大的斜面发生。进一步的试验表明,脆性材料在二向受拉、三向受拉或有压应力但最大压应力绝对值不超过最大拉应力的复杂应力状态下断裂,其试验结果与这一理论基本相符。

但是,最大拉应力理论没有考虑其他两个主应力数值的影响,且对于没有拉应力的状态(如单向压缩、二向压缩等)也无法使用。

2. 最大拉应变理论(第二强度理论)

认为最大拉应变是引起断裂的主要因素。无论材料处于何种应力状态,只要其最大拉应变 ϵ_1 达到单向拉伸断裂时的极限应变 ϵ_b ,就导致断裂发生。根据广义胡克定律,任意应力状态下的最大伸长线应变为

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

脆性材料单向拉伸时直到断裂仍基本符合胡克定律,故极限应变 $\epsilon_b = \frac{\sigma_b}{E}$,因此,断裂准则为

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] = \epsilon_b = \frac{\sigma_b}{E}$$

即
$$\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_b \quad (14.3)$$

所以,第二强度理论的强度条件为

$$\sigma_1 - (\sigma_2 + \sigma_3) \quad [] \quad (14.4)$$

脆性材料在拉 - 压二向应力时,如果压应力绝对值大于拉应力,试验结果与这一理论比较接近。但按照这一理论,单向受压与二向受压的强度不同,可是混凝土、花岗岩等材料的试验资料表明,两种情况下强度并无明显差别。类似地,按照这一理论,二向拉伸应比单向拉伸安全,但铸铁材料的试验结果并不能证实这一点。这时还是第一强度理论更接近试验结果。

3. 最大切应力理论(第三强度理论)

认为最大切应力是引起材料屈服的主要因素。无论材料处于何种应力状态,只要其最大切应力 τ_{\max} 达到单向拉伸屈服时的最大切应力极限值 τ_s , 材料就出现屈服失效。任意应力状态下最大切应力 τ_{\max} 为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

而单向拉伸时的塑性材料达到屈服时的最大切应力极限值 $\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$, 故屈服准则为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$$

即
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (14.5)$$

因此,第三强度理论的强度条件为

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (14.6)$$

最大切应力理论较好地解释了塑性材料的屈服失效。例如,低碳钢拉伸时,沿与轴线成 45° 的方向上出现滑移线,表明屈服发生于切应力最大的 45° 斜面上。二向应力状态下的试验结果也比较接近这一理论。但是这一理论没有考虑到中间主应力 σ_2 对材料破坏的影响。

4. 畸变能理论(第四强度理论)

弹性体在静载作用下产生弹性变形,载荷作用点随之产生位移,因此,在变形过程中载荷在相应位移上作功。根据能量守恒定律,静载所作之功全部转化为弹性体内的势能,即应变能。对弹性体内任一微元体来说,外力作用使其形状和体积一般都发生改变,故应变能又可分为形状改变能即畸变能和体积改变能。单位体积内的能量称为应变能密度。在任意应力状态下,畸变能密度的表达式(推导见 § 15.1)为

$$u_d = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (14.7)$$

畸变能理论认为引起材料屈服的主要因素为畸变能,不论材料处于何种应