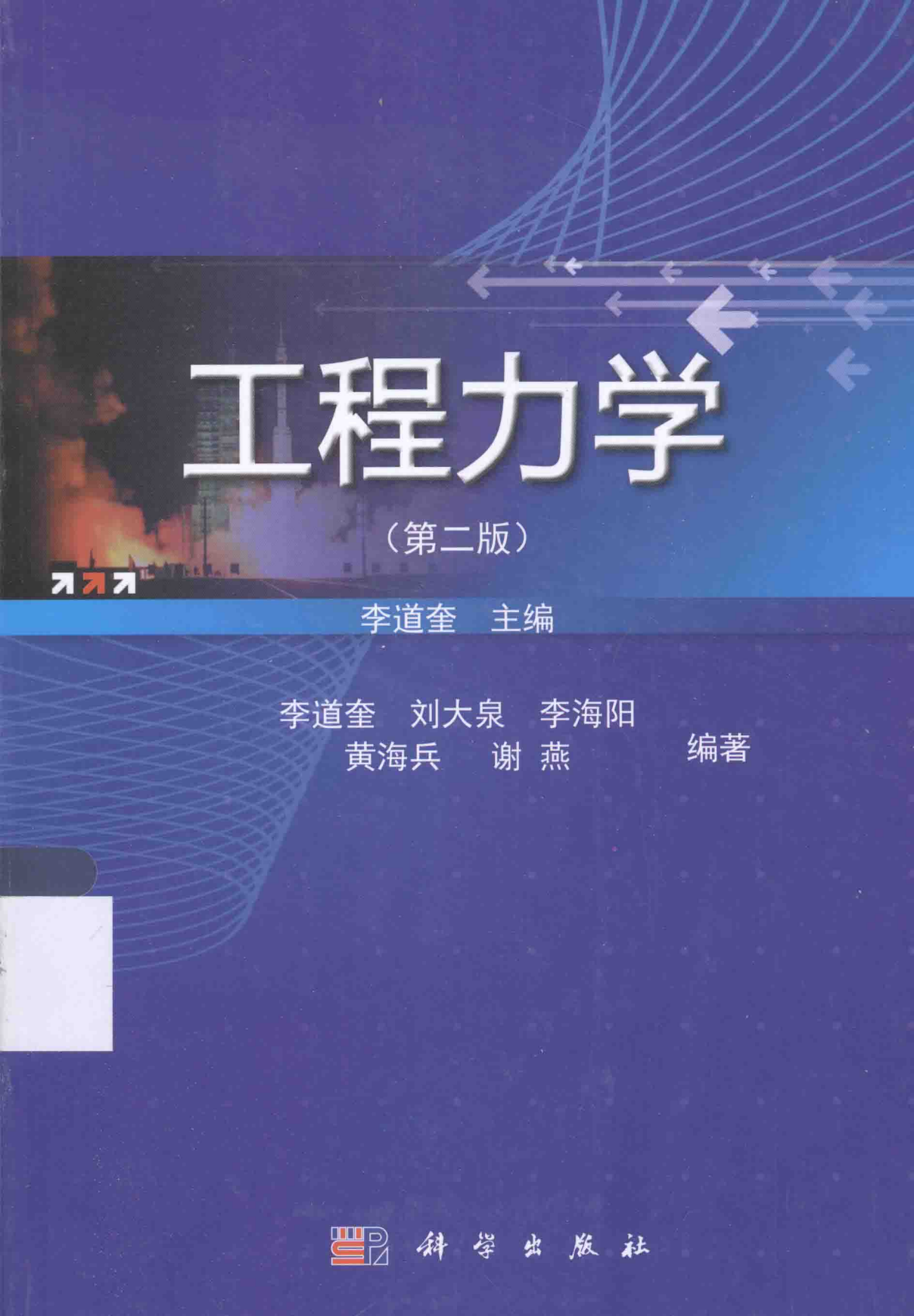




工程力学

(第二版)

李道奎 主编

李道奎 刘大泉 李海阳
黄海兵 谢 燕 编著



科学出版社

工 程 力 学

(第二版)

李道奎 主编

李道奎 刘大泉 李海阳
黄海兵 谢 燕 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本教材依据教育部工科力学指导小组制定的中、少学时“工程力学”课程的基本要求编写而成。本书旨在使学生掌握工程力学的基本理论与基本方法,着重让学生建立基本力学概念、初步具有运用工程力学知识对简单工程构件进行分析与设计的能力,同时也为后续课程打下坚实基础。

全书分静力学和材料力学两大部分,共 17 章和 2 个附录。静力学部分包括静力学基础、简单力系的简化与平衡和复杂力系的简化与平衡,材料力学部分包括材料力学基本假设与基本概念、轴向拉压应力与材料的力学性能、轴向拉压变形、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力与应变状态分析、强度理论及其应用、组合变形、能量法、静不定问题分析、压杆稳定问题和交变应力简介。为便于读者学习,每章都编有思考题和习题,书后附录中还介绍了截面的几何性质,摘录了型钢表,附有习题参考答案。

本教材可作为本科和高职高专院校机械、土木、测控、航天、航空、装备、制造、材料、渡河、地爆、空间、飞行器设计、地质、采矿、冶金等专业“工程力学”课程的教材,带“*”号的内容可根据专业特点选择讲授,也可作为自学阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/李道奎主编;李道奎等编著. —2 版. —北京:科学出版社,2015.1
ISBN 978-7-03-043229-2

I. ①工… II. ①李… III. ①工程力学 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 022453 号

责任编辑:胡 凯 曾佳佳/责任校对:郑金红

责任印制:李 利/封面设计:许 瑞

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>

三河市骏志印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2015 年 1 月第 二 版 印张:29

2015 年 1 月第三次印刷 字数:585 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

本书第一版出版已有四年多了，在这期间国防科技大学以及国内其他各高校教师和学生在使用过程中，发现了一些疏漏和欠妥之处，并提出了一些修改建议。在这里我代表教材全体参编人员对大家选用本教材表示感谢，并对大家提出的宝贵意见和建议虚心接受。为修正第一版中的一些疏漏和欠妥之处，同时考虑到第一版中静力学部分的内容编排顺序不利于基础相对薄弱的学生学习，特对本书进行修订。

这次改版，全书的主要内容和主体风格不变，只是第2章和第3章的内容编排方式做了较大的调整，由原来的“力系的简化”与“力系的平衡”改为“简单力系的简化与平衡”与“复杂力系的简化与平衡”，其他内容编排不变。

本次再版过程中，谢燕老师为本书的修订做了大量的工作，特在第二版作者中加入了她的名字。

本教材虽然经过此次修订，但由于编者水平有限，疏漏之处还是在所难免，恳请读者一如既往地批评指正。

编 者

2015年1月

第一版前言

工程力学是高等院校工程类专业的技术基础课,本教材依据教育部工科力学指导小组制定的中、少学时“工程力学”课程的基本要求编写而成。

全书分静力学和材料力学两大部分。静力学部分共3章,重点介绍构件(主要是杆件或杆系结构)的受力分析、简化及平衡规律,为材料力学部分内容——杆件的受力分析奠定基础;材料力学部分以杆件的基本变形为主线,在介绍杆件拉压、扭转和弯曲基本变形的基础上,介绍了应力与应变状态分析、强度理论、组合变形、能量法及其在求解静不定问题中的应用、压杆稳定和构件疲劳等内容。本书具有概念清晰、论述严谨、与工程实际结合紧密等特点,力求使学生既能建立力学概念,掌握构件的强度、刚度和稳定性的计算方法,又能初步具备利用力学原理进行工程结构分析与设计的能力。

书中习题插图内有些数据没给出单位,默认为:长度单位为 mm,应力单位为 MPa。

参加本教材编写的有李道奎、刘大泉、黄海兵和李海阳,李道奎任主编。其中李道奎编写绪论、第4、7、11~17章和附录,刘大泉编写第8~10章,黄海兵编写第1~3章,李海阳编写第5、6章,最后由李道奎统稿。本书在编写过程中,得到国防科技大学许多同志的支持与帮助,同时参考了一些优秀教材并选用其中某些插图与习题,在此一并表示感谢。本书由雷勇军教授主审,在编写过程中雷勇军教授提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

主编李道奎 E-mail: lidaokui@nudt.edu.cn。

编 者

2009年10月

目 录

第二版前言

第一版前言

绪论	1
第1章 静力学基础	5
1.1 基本概念	5
1.2 静力学公理	6
1.3 约束和约束反力	9
1.4 刚体的受力分析和受力图	13
第2章 简单力系的简化与平衡	18
2.1 汇交力系的简化	18
2.2 汇交力系的平衡	20
2.3 力矩与力偶	24
2.4 力偶系的简化与平衡	28
第3章 复杂力系的简化与平衡	33
3.1 力的平移定理	33
3.2 平面任意力系的简化	34
3.3 平面任意力系的平衡	38
3.4 刚体系统平衡问题	44
3.5 空间任意力系的简化	47
3.6 空间任意力系的平衡	49
第4章 材料力学基本假设与基本概念	56
4.1 材料力学的力学模型	56
4.2 材料力学的基本假设	56
4.3 外力与内力	58
4.4 应力	60
4.5 应变	62
4.6 胡克定律	64
第5章 轴向拉压应力与材料的力学性能	67
5.1 轴向拉压的概念和内力	67
5.2 拉压杆的应力与圣维南原理	69

5.3	材料在拉伸时的力学性能	75
5.4	材料在压缩时的力学性能	82
5.5	应力集中与材料疲劳	84
5.6	许用应力与强度条件	86
5.7	连接件的实用计算	91
第 6 章	轴向拉压变形	103
6.1	拉压杆的变形与叠加原理	103
6.2	桁架的节点位移	108
6.3	拉压与剪切应变能	111
6.4	拉压静不定问题	115
6.5	热应力与预应力	121
第 7 章	扭转	131
7.1	扭转的概念与实例	131
7.2	扭矩和扭矩图	131
7.3	圆轴扭转时的应力	134
7.4	圆轴扭转强度	138
7.5	圆轴扭转变形与刚度计算	142
*7.6	非圆截面轴扭转	146
*7.7	薄壁杆扭转	149
第 8 章	弯曲内力	160
8.1	弯曲的概念和实例	160
8.2	梁的计算简图	161
8.3	剪力和弯矩	163
8.4	剪力方程和弯矩方程与剪力图和弯矩图	168
8.5	平面刚架与曲杆的内力	177
第 9 章	弯曲应力	186
9.1	引言	186
9.2	弯曲正应力	186
9.3	弯曲切应力	194
9.4	提高弯曲强度的一些措施	203
第 10 章	弯曲变形	214
10.1	引言	214
10.2	挠曲线的近似微分方程	216
10.3	用积分法求弯曲变形	217

10.4	用叠加法求弯曲变形	223
10.5	简单静不定梁	229
10.6	提高弯曲刚度的一些措施	233
第 11 章	应力与应变状态分析	245
11.1	引言	245
11.2	应力状态的概念及其分类	245
11.3	平面应力状态分析的解析法	247
11.4	二向应力状态分析的图解法	251
11.5	三向应力状态	257
11.6	平面应变状态应变分析	259
11.7	复杂应力状态下的应力-应变关系	261
*11.8	复杂应力状态下的应变能与畸变能	266
第 12 章	强度理论及其应用	272
12.1	强度理论概述	272
12.2	四种常用强度理论	273
12.3	薄壁圆筒的强度计算	281
*12.4	莫尔强度理论	284
第 13 章	组合变形	292
13.1	概述	292
13.2	斜弯曲	293
13.3	弯拉(压)组合与截面核心	298
13.4	弯扭组合与弯拉(压)扭组合变形	306
第 14 章	能量法	314
14.1	引言	314
14.2	外力功与应变能	314
14.3	互等定理	323
14.4	单位载荷法	326
14.5	匀加速运动构件及冲击问题分析简介	335
第 15 章	静不定问题分析	353
15.1	静不定结构概述	353
15.2	用力法分析外力静不定问题	355
15.3	用力法分析内力静不定问题	359
*15.4	对称与反对称性质的应用	363
*15.5	位移法简介	369

第 16 章 压杆稳定问题	377
16.1 压杆稳定性的概念	377
16.2 两端铰支细长压杆的临界载荷	379
16.3 两端非铰支细长压杆的临界载荷	382
16.4 各类柔度杆的临界应力	387
16.5 压杆的稳定性校核	391
16.6 压杆的合理设计	393
第 17 章 交变应力简介	402
17.1 引言	402
17.2 交变应力及其类型	403
17.3 $S-N$ 曲线和材料的疲劳极限	404
17.4 影响构件疲劳极限的主要因素	406
附录 A 截面的几何性质	410
A.1 静矩与形心	410
A.2 惯性矩和惯性积	414
A.3 平行移轴公式	417
* A.4 转轴公式与主惯性轴	420
附录 B 型钢表	428
参考文献	435
习题参考答案	436

绪 论

1. 工程力学概述

从广义上讲,工程力学是研究构件外力作用下的运动、变形和破坏的一般规律的科学,它可以包括静力学、运动学、动力学、材料力学、弹性力学、结构力学、塑性力学等多门学科的内容。而本书作为工程类本科生或专科生的教材,内容只包含其中较简单而基础的两门学科:静力学和材料力学,其中静力学研究的是构件的受力和平衡规律,而材料力学研究的是构件在外力作用下的变形和失效规律,并为设计既经济又安全的构件提供必要的理论基础和简单实用的计算方法。

2. 工程力学研究对象

工程力学的研究对象是**构件**,它是组成工程结构或机械的零部件。根据几何形状和尺寸的不同,构件大致可分为杆件、板件和块体。

若构件在某一个方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸大得多,则称为杆(图 0.1)。杆件的几何形状可以用一根轴线和垂直于轴线的截面来表征,这个截面称为横截面,而轴线为各横截面中心的连线。轴线为直线的杆称为直杆(图 0.2(a)),反之则称为曲杆(图 0.2(b))。所有横截面形状与尺寸都相同的杆称为等截面杆(图 0.2(a)),否则称为变截面杆(图 0.2(b))。

平行于杆件轴线的面称为**纵截面**,既不平行也不垂直于杆件轴线的截面称为**斜截面**。

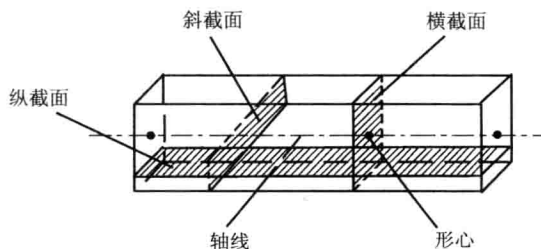


图 0.1

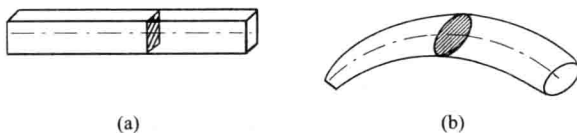


图 0.2

若构件在某一方向(厚度)上的尺寸比其余两个方向上的尺寸小得多,则称为板件。板件的几何形状可以用厚度以及平分厚度的一个面表征,这个面称为中面,中面为平面的称为板(图 0.3(a)),中面为曲面的称为壳(图 0.3(b))。

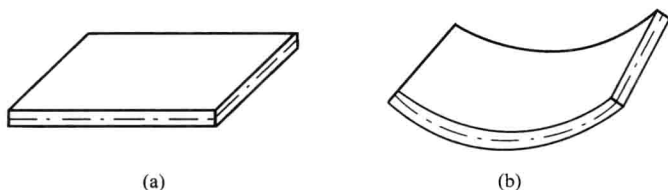


图 0.3

若构件在三个方向上具有同一量级的尺寸,则称为块体(图 0.4)。



图 0.4

三类构件在工程中都有大量应用,如活塞杆、曲柄、齿轮轴、房屋的大梁都可简化为杆件,而桌子的面板、容器的壁面、船的甲板等都可以简化为板件,机器的底座、房屋基础、堤坝则可以看做块体。本教材主要以等截面的直杆为研究对象。

3. 力及其作用效应

力是物体间的机械作用。力是矢量,满足平行四边形规则,它有三要素,即大小、方向和作用点,力对物体的作用效应包括两个方面:一方面是力的运动效应,也称为力的外效应,即力使物体产生运动状态(运动或静止)的变化;另一方面是力的变形效应,也称为力的内效应,即力使物体发生形状或尺寸的改变(变形)。

变形分为两类,即弹性变形和塑性变形(永久变形),力卸除后可以恢复的变形称为弹性变形,而不可恢复的变形称为塑性变形。

4. 构件的三种失效模式

构件是工程结构或机械的零部件,在结构的正常工作或机械的正常运转过程中,构件都具有一定的功能,它会承受一定的力作用,同时也会产生一定的变形。当构件在外力作用下丧失正常的功能时,我们称这种现象为失效或破坏,工程构

件的失效形式有很多种,本书中将其分为三类:强度失效、刚度失效和稳定性失效。

强度失效是指构件在外力作用下产生不可恢复的塑性变形(永久变形)或发生断裂,如起重机的吊索被挂断,齿轮的齿发生永久变形而失去原来的正常齿形,以至于齿轮传动机构不能正常运转,以及销钉被剪断(图 0.5(a))和铆钉发生永久变形(图 0.5(b)),这些都是不允许的。因此,工程设计中必须保证构件具有足够抵抗破坏的能力,即具有足够的强度。

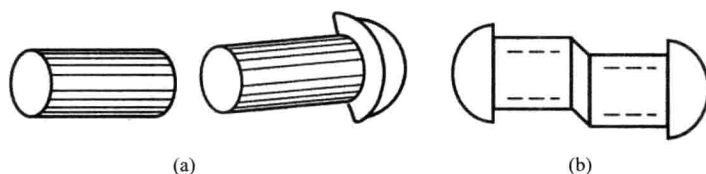


图 0.5

足够的强度并不是保证结构正常工作的唯一要求。某些情况下,由于弹性变形过大,也会影响结构或机械的正常工作,这种情况称为**刚度失效**。例如,齿轮轴在运转过程中若变形过大,则会影响齿轮的传动精度,加速齿轮件和轴与轴承间的磨损(图 0.6(a));又如,电机的转子与定子之间的间隙很小,如果转子的转轴变形过大,则影响电机的效率(图 0.6(b))。因此,工程设计中必须保证构件具有足够抵抗弹性变形的能力,即具有足够的刚度。

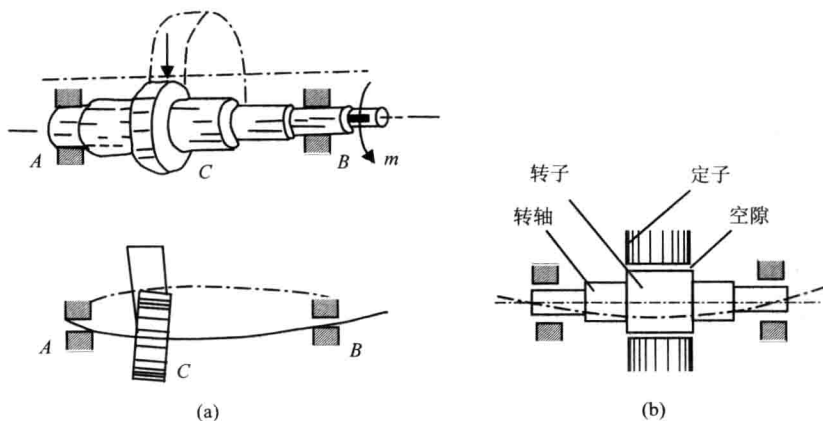


图 0.6

构件另外一种失效形式是**稳定性失效**,它是指构件在某种外力作用下(如轴向压力),其平衡形式发生突然转变,如千斤顶中的螺杆、厂房或矿井中的支柱、活塞杆(图 0.7(a))、内燃机的挺杆(图 0.7(b))等,在受到过大压力时,直杆就会从直线的受压平衡形式突然变为弯曲的平衡形式,又如图 0.7(c)的一薄壁圆环因受外压力过大,截面由圆形突然变成椭圆形,这些都是非常危险的状态,许多工程事

故就是这样发生的。因此，工程设计中必须保证构件具有足够的保持原有平衡形式或变形形式的能力，即具有足够的稳定性。

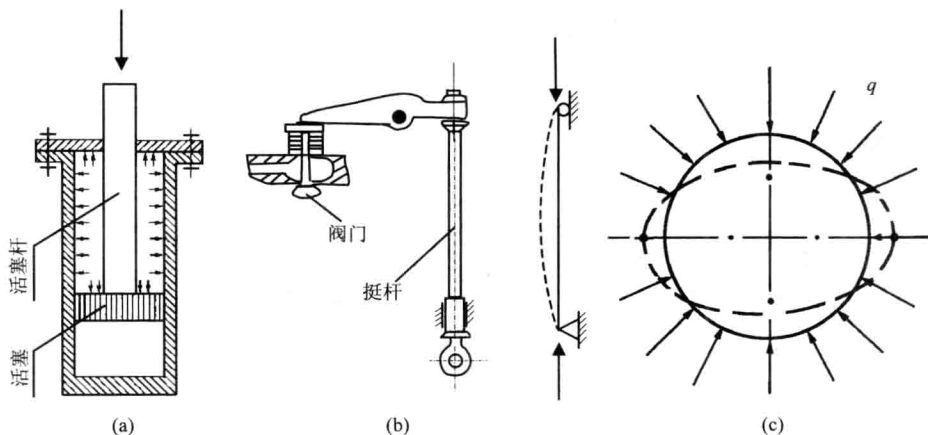


图 0.7

因此，在设计工程构件时，一般要求构件必须满足强度、刚度和稳定性的要求才是安全的。但对于某些特殊构件，却又往往有相反的要求，如为了保证机器不至于超载，当载荷达到某一极限值时，要求安全销立即破坏，以免损坏整个机器；车辆的缓冲弹簧力求有较大的变形，以发挥其缓冲作用。

5. 工程力学的主要内容

保证构件在确定的外力作用下正常工作而不失效，也就是保证构件具有足够的强度、刚度和稳定性，这是工程设计的任务之一。为此，需要我们做好下面几项工作：

- (1) 分析并确定构件所受各种外力的大小和方向；
- (2) 研究在外力作用下构件的内部受力、变形和失效的规律；
- (3) 提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则与方法。

以上三点是本课程的主要研究内容，其中第一点是静力学的主要研究内容，第二点和第三点是材料力学的主要研究内容。

第 1 章 静力学基础

本章在介绍静力学的基本概念和静力学公理的基础上, 讨论各种约束及其约束力, 进而学习分析刚体受力和画受力图的方法。

1.1 基 本 概 念

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。它主要研究物体平衡时作用于物体上的力所应满足的条件。

在静力学中所指的物体都是刚体。所谓**刚体**是指物体在力的作用下, 其内部任意两点之间的距离始终保持不变。刚体是一个理想化的模型。**平衡**是物体机械运动的一种特殊状态。若物体相对于惯性参考系保持静止或做匀速直线平动, 则称此物体处于平衡状态。在工程分析中, 常把固连于地球的参考系近似作为惯性参考系。本书中如无特殊说明, 也将地球视为惯性参考系。因此, 机器静置于地面, 飞机做匀速直线飞行, 都是物体处于平衡状态的实例。

力, 是物体间的相互机械作用, 其对刚体只有外效应 (或运动效应), 且该效应取决于力的三要素, 即力的大小、方向和作用点。

力系是指共同作用在物体上力的集合。为便于研究, 通常将作用在物体上的力按其作用线在空间的分布分为**平面力系**和**空间力系**两大类。各力作用线位于同一平面内的力系称为平面力系, 力作用线不在同一平面内的力系称为空间力系。这两大类力系均可进一步分为**汇交力系**、**平行力系**和**任意力系**。汇交力系是指各力作用线汇交于同一点的力系; 平行力系是指各力作用线相互平行的力系; 任意力系是指各力作用线既不平行又不相交于一点的力系, 又称为一般力系。满足平衡条件的力系称为**平衡力系**。

分别作用在同一刚体上的两组力系, 如果它们对该刚体的作用效果完全相同, 则称此两组力系互为**等效力系**。将一个力系用其等效力系来代替, 称为**力系的等效替换**。用一个简单的力系等效替换一个复杂力系称为**力系的简化**。如果某力系与一个力等效, 则此力称为该力系的**合力**, 而该力系的各力称为此力的**分力**。

在静力学中, 主要研究以下三个问题:

- (1) 刚体的受力分析;
- (2) 力系的简化;

(3) 力系的平衡条件及其应用。

其中刚体的受力分析及力系的简化是研究动力学的基础，而整个静力学内容则是学习材料力学、机械原理、轨道力学等后续课程的必备知识。静力学的理论和方法在解决许多实际工程技术问题的过程中有着广泛的应用。

1.2 静力学公理

人们在长期的生活和实践中，对力的基本性质进行了概括和归纳，得出了一些显而易见的、能深刻反映力的本质的一般规律。这些规律的正确性已被长期的实践反复证明，从而被人们所公认，称为静力学公理。静力学的全部理论都可借助数学论证，从这些公理中推导出来。因此，静力学公理是静力学的理论基础。

公理一 力的平行四边形公理

作用在物体上同一点的两个力，可以合成一个合力。合力作用点也在该点，合力的大小和方向由这两个力构成的平行四边形的对角线确定(图 1.1(a))。

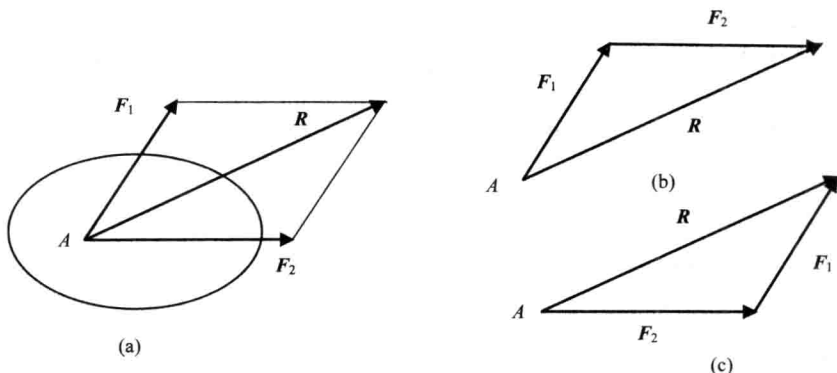


图 1.1

公理一表明力的合成符合矢量求和规则，即力合成的平行四边形法则，合力矢等于这两个力的矢量和(几何和)，即

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

也可以用一个三角形来表示，即将第二个力矢量 $\mathbf{F}_2$ 的首移到第一个矢量 $\mathbf{F}_1$ 的尾，然后从 $\mathbf{F}_1$ 的首到 $\mathbf{F}_2$ 的尾作一矢量，即为简化后的结果，即力系的合力 $\mathbf{R}$ ，如图1.1(b)所示。反之亦然，如图1.1(c)所示。这种简化的方法称为力三角形法。

反之，应用力的平行四边形法则也可将一个力分解为与之共点的两个或多个分力。显然，力的分解不是唯一的。在工程力学中还经常要求力在坐标轴上的投

影,此时必须注意在斜交坐标系,力在坐标轴上的分量大小(图 1.2)并不等于力在该坐标轴上的投影大小(图 1.3)。

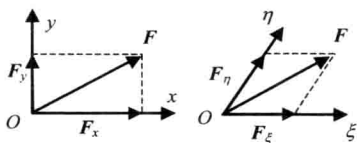


图 1.2

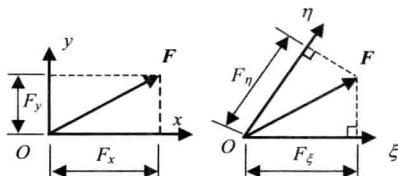


图 1.3

公理二 二力平衡公理

受两力作用的刚体保持平衡的充分必要条件是这两力的大小相等、方向相反且作用在一条直线上。

这个公理总结了作用于刚体上最简单的力系平衡时所必须满足的条件。但对于变形体,这个条件是必要而不充分的。例如,不可伸长的软绳受到等值、反向、共线的两力作用,受拉时可平衡,受压时则不能平衡。

以后经常遇到仅受二力作用而处于平衡的刚体,这类刚体称为二力体。如果是杆件,就称为二力杆;如果它是结构中的构件,就称为二力构件。由二力平衡公理可知,二力体不论其形状如何,所受二力必沿两力作用点的连线。例如,图 1.4(a)所示的三铰拱结构,当不计拱的自重时,拱段 BC 为二力构件。作用于 B 、 C 两点的力的作用线必沿 B 、 C 两点连线,如图 1.4(b)所示。

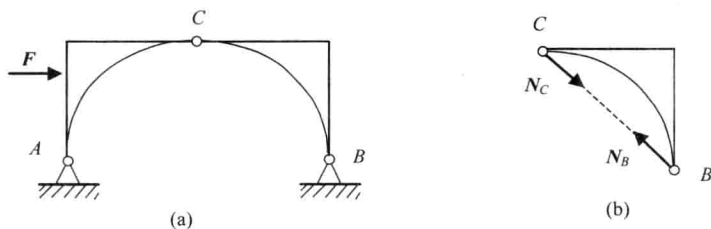


图 1.4

公理三 加减平衡力系公理

可在作用于刚体的力系上增加或除去一个平衡力系,而不改变原力系对刚体的作用。

此公理表明,彼此相差一个平衡力系的两个力系是等效的。另外,加减平衡力系公理只适用于刚体而不适用于变形体。

推论一 力的可传性定理

作用于刚体上的力,其作用点可沿作用线移至刚体上的任意点而不改变它对

刚体的作用效果。

证明 设有力 F 作用在刚体上点 A 处, 如图 1.5(a) 所示。根据加减平衡力系公理, 可在力的作用线上任取一点 B , 并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 , 使 $F = F_2 = -F_1$, 如图 1.5(b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系, 故可去除, 这样只剩下一个力 F_2 , 如图 1.5(c) 所示, 即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

根据力的可传性定理, 作用于刚体的力的三要素可改为: 大小、方向和作用线。沿作用线可任意滑动的矢量称为滑动矢量, 因此作用于刚体的力是滑动矢量。

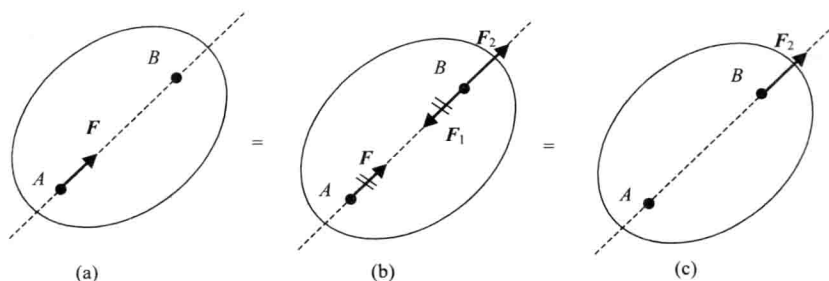


图 1.5

推论二 三力平衡汇交定理

刚体受三力作用而平衡时, 若其中两力作用线交于一点, 则第三力的作用线也必通过此点, 且三力共面。

证明 如图 1.6 所示。在刚体的 A 、 B 、 C 三点上, 分别作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 和 F_3 。根据力的可传性, 将力 F_1 、 F_2 移到汇交点 O , 然后根据力的平行四边形法则, 得合力 R , 则力 F_3 和 R 平衡。由于两个力平衡必须共线, 所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面, 且通过力 F_1 和 F_2 的交点 O , 于是推论得证。

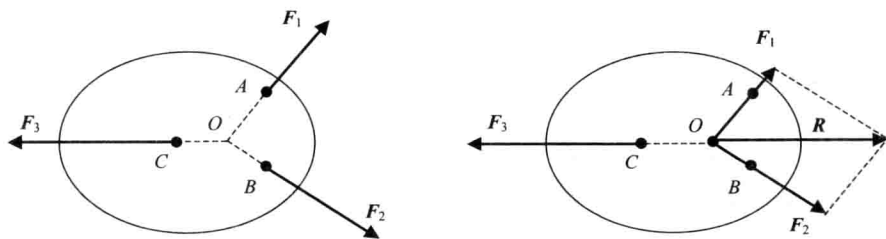


图 1.6

公理四 作用与反作用公理

两物体间的作用力和反作用力总是等值、反向、共线, 并且同时分别作用在