

校企合作优秀教材

21世纪应用型人才培养“十三五”规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE



主 编 杨山波 弓满锋 吴艳阳



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

校企合作优秀教材

21世纪应用型人才培养“十三五”规划教材

主 编 杨山波 弓满锋 吴艳阳
副主编 王 珺 蔡晓娜 舒开鸥
参 编 李月安

工程力学

GONGCHENG LIXUE



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 杨山波,弓满锋,吴艳阳主编. —成都:西南交通大学出版社,2018.1

21 世纪应用型人才培养“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5643-3199-3

I. ①工… II. ①杨…②弓…③吴… III. ①工程力学-高等学校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 153082 号

21 世纪应用型人才培养“十三五”规划教材

工程力学

杨山波 弓满锋 吴艳阳 主编

责任编辑

曾荣兵

封面设计

唐韵设计

出版发行

西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话

028-87600564 028-87600533

邮政编码

610031

网 址

<http://www.xnjdcbs.com>

印 刷

北京俊林印刷有限公司

成品尺寸

185 mm×260 mm

印 张

17

字 数

404 千字

版 次

2018 年 1 月第 2 次印刷

书 号

ISBN 978-7-5643-3199-3

定 价

32.00 元

版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

高等院校教育教材研究与编审委员会

主 任：丁红朝

副主任：（排名不分先后顺序）

魏 力	黄群瑛	郭福琴	陈丽佳	潘邦贵	黄爱科	武跃春	黄超平
周 洁	吴让军	宋君远	周 宇	郭 波	张 莉	王 力	庄小将
田 君	仲 蓬	林光友	刘智勇	肖 湘	耿喜则	程文明	邓 恩
胡景煌	李金伟						

委 员：（排名不分先后顺序）

王汝志	仲崇高	邓光明	王 玲	李青阳	柯晶莹	刘秀峰	梁 珺
郑 璁	颜 伟	冉恩贵	邓景泉	刘恽凡	王东坡	靳炜伟	何春华
马 毅	顾晨婴	周瑞强	李 飞	陈桂平	殷志文	余 鹏	陈力攀
陈 辉	石莉萍	洪 歧	刘春景	李元杰	李建清	李良霄	吴智勇
吴剑锋	熊勇权	何志昂	包耀东	梁 锐	杨荣军	朱纪红	陈晓川
喻建晖	陈瑞霞	朱 飞	王喜荣	徐 霞	马海祥	叶大萌	石敦岗
尹渔清	张雪佳	郑连弟	董 慧	叶 凡	张翠华	游春华	芦书荣
林金兰	李素云	曾晓文	杨子武	谭筱南	禹 青	李 莉	朱增峰
韩俊强	杨保香	张文洲	将 平	刘仁芬	李奇志	陈晓川	廖秀珍
徐仁旭	郝兴武	徐 磊	黄方正	毛光峰	齐佳敏	马世新	冯方友
周 箭	郑小平	孔德元	郑 艳	胡智斌	刘德华	赵 越	高启明
林幼斌	陈兴平	马小红	李 东	李 富	韦家明	张 萍	李秀菊
刘助忠	杨 迪	钱 钊	王 莹	周 庆	白洁宇	封 岚	王玉勤
罗 勇	张建新	杨志学	王希晶	李立辉	夏同胜	刘小军	张秀芳
谭目发	黄宏彬	刘劲志	王 荣	陈田国	周 南	韩在霞	邱惠芳
刘 明	李 锐	刘 舟	张家荣	刘炳康	刘可夫	徐顺志	杨安宁
章志杰	刘静萍	黄 芸	胡久江	王少英	张文华	张崇友	张 莉
吴志军	马 骏	戴小波	韩 芳	陈晓霞	何 方	李 炳	王永照
李文胜	刘 羽	欧 雅	肖莉贞	王焕毅	张 琛	柳志刚	徐 莉
王 彦	李东文	米双红	容 莉	张 薇	黄 健	杨勇军	付宏华
银 峰	卢 瑜	王志强	范玲俐	杨俊峰	张俊峰	吴青松	朱志辉
韩 芳	毛用春	何 辛	朱 琴	吴德永	王 涛	童广印	赵华玮
刘 宏	刘 飞	张元越	罗晓军	李传健	向佐春	岳文忠	于 森
蒋粤闽	陈飞飞	龙 游	李 凯	谭 波	喻靖文	刘丽霞	陶晓峰
邱春高	罗利华	王艳芹	罗志明	徐明川	宋长昆	杨 艳	苏 华
阳玉秀	文英兰	卢 竹	任春茹	张永红	刘 晖	蔡传柏	李 虹
李永华	陈金洪	候学刚	邱漠河	唐荣林	高彩霞	周 冲	邓嘉燕
张福霞	孙建超	沈恒昶	朱玉萍	袁战军	董建利	王绍光	岳士凯
蒋国宏	桑莉琳	范飞飞	夏清明	谢晓杰	张红丽	梁燕燕	王德礼
李芙蓉	马晓明	张艳平	熊义成	程元清	任郁楠	张小亚	黄永强
郭美斌	钟祥荣	覃晓康	张琳茜				

前 言

“工程力学”是高等学校土木工程类专业和机械工程类专业的一门重要的专业基础课。工程力学课程的学习,可为后续专业课的应用和拓展奠定了一定的理论基础,也为工程技术类人员在实际工作中正确分析和解决生产中相关的力学问题提供了知识上的保证,对提高大学生的实际操作技术水平能力起着至关重要的作用。

本书在编写过程中力求针对普通工科院校力学教学的特点,严格把握读者定位,紧密结合工程实践,突出工程观念的培养和力学在工程实际中的应用;力求概念清楚,重点突出,叙述简明,易学易懂,在照顾到理论上严密性的同时,重点培养学生分析问题和解决实际问题的能力。所编写的内容以必需、够用为度,集中反映了编者在力学教学过程中所积累的经验 and 近年来的教学改革成果。

本书内容简洁实用,删除了繁杂的理论推导,注重实用性,便于培养学生理论联系实际的能力。为便于学生复习掌握每章节的基本知识和基本技能,培养分析问题和解决问题的能力,本书每章后面进行了内容小结,并给出了一定的练习题。不同专业学生可以根据具体情况选用。

全书共有十二章,由杨山波、弓满锋、吴艳阳担任主编,负责编写了第二、三、五、六、九、十章,由王珺、蔡晓娜、舒开鸥担任副主编,负责编写了第一、四、七、八章,由李月安担任参编,负责编写了第十一、十二章。

本书适合土木类、机械类专业学生使用。由于各校的学制和教学安排不同,在进行本课程教学时,教师可根据实际情况调整教学内容和教学顺序。

由于时间比较仓促,加之编者水平有限,书中难免会有疏漏之处,恳请各位同行和广大读者读者批评指正。

编者

2018年1月



目 录

主要符号表	1
工程力学总论	3
0.1 工程力学课程内容及其在工程设计中的作用	3
0.2 工程力学的研究模型	4
0.3 工程力学课程的分析方法	5
第1篇 工程静力学	7
第1章 工程静力学基础	8
1.1 力和力矩	8
1.2 力偶及其性质	13
1.3 约束与约束力	15
1.4 平衡的概念	20
1.5 受力分析方法与过程	22
1.6 结论与讨论	24
第2章 力系的简化	30
2.1 力系等效与简化的概念	30
2.2 力系简化的基础—力向一点平移	31
2.3 平面力系的简化	32
2.4 固定端约束的约束力	35
2.5 结论与讨论	36
第3章 工程构件的静力学平衡问题	40
3.1 平面力系的平衡条件与平衡方程	40



3.2	简单的刚体系统平衡问题	46
3.3	考虑摩擦时的平衡问题	51
3.4	结论与讨论	55
第2篇 材料力学		65
第4章 材料力学的基本概念		66
4.1	关于材料的基本假定	66
4.2	弹性杆件的外力与内力	67
4.3	弹性体受力与变形特征	69
4.4	杆件横截面上的应力	70
4.5	正应变与切应变	72
4.6	线弹性材料的应力-应变关系	73
4.7	杆件受力与变形的基本形式	73
4.8	结论与讨论	75
第5章 杆件的内力图		78
5.1	基本概念与基本方法	78
5.2	轴力图与扭矩图	81
5.3	剪力图与弯矩图	84
5.4	结论与讨论	91
第6章 拉压杆件的应力变形分析与强度设计		96
6.1	拉伸与压缩杆件的应力与变形	96
6.2	拉伸与压缩杆件的强度设计	101
6.3	拉伸与压缩时材料的力学性能	105
6.4	结论与讨论	109
第7章 梁的强度问题		117
7.1	工程中的弯曲构件	117
7.2	与应力分析相关的截面图形的几何性质	118
7.3	平面弯曲时梁横截面上的正应力	126



7.4 平面弯曲正应力公式应用举例	132
7.5 梁的强度计算	134
7.6 斜弯曲	140
7.7 弯矩与轴力同时作用时横截面上的正应力	143
7.8 结论与讨论	145
第8章 梁的位移分析与刚度设计	153
8.1 基本概念	153
8.2 小挠度微分方程及其积分	156
8.3 工程中的叠加法	159
8.4 简单的超静定梁	162
8.5 梁的刚度设计	164
8.6 结论与讨论	166
第9章 圆轴扭转时的应力变形分析与强度刚度设计	176
9.1 工程上传递功率的圆轴及其扭转变形	176
9.2 切应力互等定理	176
9.3 圆轴扭转时的切应力分析	177
9.4 承受扭转时圆轴的强度设计与刚度设计	182
9.5 结论与讨论	186
第10章 复杂受力时构件的强度设计	192
10.1 基本概念	192
10.2 平面应力状态分析——任意方向面上应力的确定	194
10.3 应力状态中的主应力与最大切应力	197
* 10.4 分析应力状态的应力圆方法	200
10.5 复杂应力状态下的应力—应变关系应变能密度	203
10.6 复杂应力状态下的强度设计准则	207
10.7 圆轴承受弯曲与扭转共同作用时的强度计算	212
10.8 薄壁容器强度设计简述	216
10.9 结论与讨论	218



第 11 章 压杆的稳定性分析与设计 224

11.1 弹性平衡稳定性的基本概念 224

11.2 细长压杆的临界载荷——欧拉临界力 226

11.3 长细比的概念三类不同压杆的判断 228

11.4 压杆的稳定性设计 230

11.5 压杆稳定性分析与稳定性设计示例 231

11.6 结论与讨论 235

第 12 章 动载荷与疲劳强度简介 242

12.1 等加速度直线运动时构件上的动载荷与动应力 242

12.2 旋转构件的动载荷与动应力 243

12.3 冲击载荷与冲击应力概述 246

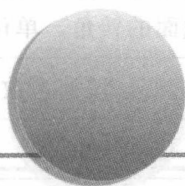
12.4 疲劳失效特征与原因分析 250

12.5 影响疲劳寿命的因素 255

12.6 有限寿命设计与无限寿命设计 257

12.7 结论与讨论 258

参考文献 262



主要符号表

符号	含义	符号	含义
A	面积	M	力偶矩
a	间距	M_x, M_y, M_z	力对 x 、 y 、 z 轴之矩
b	宽度	n	转速
d	直径、距离、力偶臂	$[n]_{st}$	稳定安全因数
D	直径	p	内压力
e	偏心距	P	功率
E	弹性模量、杨氏模量	q	均布载荷集度
f_s	静摩擦因数	R, r	半径
F	力、合力	r	矢径
F_{Ax}, F_{Ay}	A 处铰约束力	S	路程、弧长
F_N	法向约束力、轴力	u	水平位移、轴向位移
F_P	载荷	$[u]$	许用轴向位移
F_{Pcr}	临界载荷、分叉载荷	v_d	畸变能密度
F_Q	剪力	v_v	体积改变能密度
F_R	主矢	ϵ	应变能密度
F_S	牵引力、拉力	V_ϵ	应变能
F_T	拉力	W	功、重力、抗弯截面系数
F_w	重力	W_p	抗扭截面系数
F_x, F_y, F_z	力在 x 、 y 、 z 轴上的分量	α	倾角、线膨胀系数
G	切变模量	β	角、表面加工质量系数



符号	含义	符号	含义
h	高度	θ	梁横截面的转角、单位长度
I	惯性矩	ϵ	应变, 尺寸系数
I_p	极惯性矩	φ	相对扭转角
I_{xy}	惯性积	γ	切应变
K	弹簧刚度系数	Δ	变形、位移
K_d	动载系数、动荷系数	δ	厚度
K_I	惯性力作用下的动载系数、 动荷系数	ϵ	弹性应变
L	长度、跨度	ϵ_p	塑性应变
M	弯矩	ϵ_v	体积应变
M_e	外加扭转力偶矩	λ	柔度、长细比
M_x	扭矩	μ	长度系数
m	质量	ν	泊松比
M_O	力系对点 O 的主矩	ρ	密度、曲率半径
$M_O (F)$	力 F 对点 D 之矩	σ	正应力
σ_t	拉应力	σ_p	比例极限
σ_{bc}	压应力	$\sigma_{0.2}$	条件屈服应力
σ	平均应力	σ_a	屈服点
σ_b	抗拉强度	τ	切应力
σ_d	动应力	$[\tau]$	许用切应力
σ_l	惯性力引起的动应力	w	挠度
$[\sigma]$	许用应力	σ_{-1}	对称循环时的疲劳极限
$[\sigma_b]$	许用拉应力	K_f	有效应力集中系数
$[\sigma_{bc}]$	许用压应力	K_t	理论应力集中系数
σ_{cr}	临界应力	σ_e	弹性极限



工程力学总论

0.1 工程力学课程内容及其在工程设计中的作用

工程力学(engineering mechanics)所包含的内容极其广泛,本书所论之“工程力学”只包含“工程静力学”(analysis of engineering statics)和“材料力学”(mechanics of materials)两部分。

“工程静力学”研究作用在平衡物体上的力及其相互关系。“材料力学”研究在外力的作用下,工程基本构件内部将产生什么力,这些力是怎样分布的,将发生什么变形,以及这些变形对于工程构件的正常工作将会产生什么影响。

20世纪以前,推动近代科学技术与社会进步的蒸汽机、内燃机、铁路、桥梁、船舶、兵器等,无一不是在力学知识的累积、应用和完善的基础上逐步形成和发展起来的。

20世纪以后产生的诸多高新技术,如高层建筑、大跨度桥梁、海洋石油钻井平台、精密仪器、航空航天器以及大型水利工程、核反应堆工程、电子工程等许多重要工程更是在应用力学指导下得以实现,并不断发展完善的。

工程构件(泛指结构元件、机器的零件和部件等)在外力作用下丧失正常功能的现象称为“失效”(failure)或“破坏”。工程构件的失效形式很多,但工程力学范畴内的失效通常可分为三类:强度失效(failure by lost strength)、刚度失效(failure by lost rigidity)和稳定失效(failure by lost stability)。

强度失效是指构件在外力作用下发生不可恢复的塑性变形或发生断裂。

刚度失效是指构件在外力作用下产生过量的弹性变形。

稳定失效是指构件在某种外力(如轴向压力)作用下,其平衡形式发生突然转变。

例如,机械加工用的钻床立柱(见图0-1),如果强度不够,就会折断(断裂)或折弯(塑性变形);如果刚度不够,钻床立柱即使不发生断裂或者折弯,也会产生过大弹性变形(图中虚线所示为夸大的弹性变形),从而影响钻孔的精度,甚至产生振动,影响钻床的服役寿命。

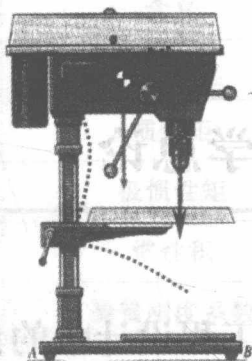


图 0-1 钻床立柱的强度与刚度

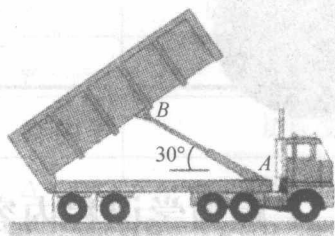


图 0-2 承受轴向压力的构件

稳定失效的例子多见于承受轴向压力的工程构件。图 0-2 所示翻斗货车的液压机构中的顶杆，如果承受的压力过大或者杆件过于细长，就有可能突然由直变弯，发生稳定失效。

工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下正常工作而不发生强度失效、刚度失效和稳定失效，即保证构件具有足够的强度（strength）、刚度（rigidity）与稳定性（stability）。

所谓强度，是指构件受力后不发生破坏或不产生不可恢复的变形的能力。所谓刚度，是指构件受力后不能发生超过工程允许的弹性变形的能力。所谓稳定，是指构件在压缩载荷的作用下，保持平衡形式不发生突然转变的能力（例如细长直杆在轴向压力作用下，当压力超过一定数值时，在外界扰动下，杆会突然从直线平衡状态转变为弯曲的平衡状态）。

为了完成常规的工程设计任务，需要进行以下几方面的工作：

- (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设计方法。

工程力学课程就是讲授完成这些工作所必需的基础知识。

0.2 工程力学的研究模型

实际工程构件受力后，几何形状和几何尺寸都要发生改变，这种改变称为变形，而发生变形的这些构件称为变形体（deformation body）。

当研究构件的受力时，在大多数情形下构件的变形都比较小，故可忽略这种变形对构件的受力分析产生的影响。因此，在工程静力学中，可以将变形体简化为不变形的刚体（rigidity body）。

当研究作用在物体上的力与变形规律时，即使变形很小，也不能忽略。但是，在研究变形问题的过程中，当涉及平衡问题时，大部分情形下依然可以沿用刚体模型。

如图 0-3 (a) 所示塔式吊车, 起吊重物后, 组成塔吊的各杆件都要发生变形, 这时可以认为塔吊是变形体。但是, 如果仅仅研究保持塔吊平衡时重物重量与配重之间的关系时, 又可以将塔吊整体视为刚体, 如图 0-3 (b) 所示。

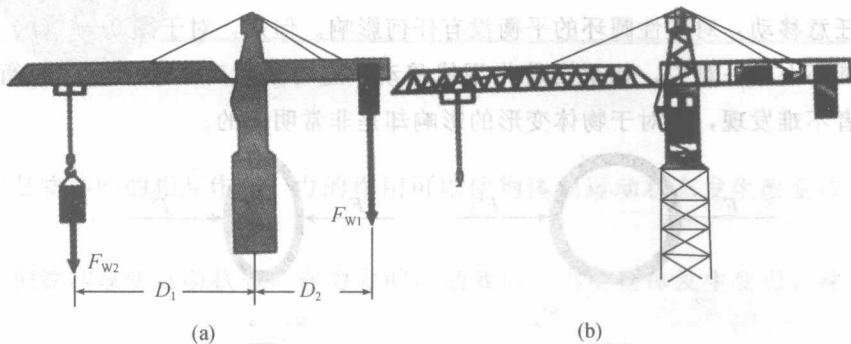


图 0-3 塔式吊车的两种不同的模型

工程构件各式各样, 但其几何形状和几何尺寸可以大致分为杆、板、壳和块体等几类。

(1) 若构件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸大得多, 则称为杆 (bar)。梁 (beam)、轴 (shaft)、柱 (column) 等均属杆类构件。杆横截面中心的连线称为轴线。轴线为直线者称为直杆; 轴线为曲线者称为曲杆。所有横截面形状和尺寸都相同者称为等截面杆; 不同者称为变截面杆。

(2) 若构件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸小得多, 为平面形状者称为板 (plate); 为曲面形状者称为壳 (shells), 穹形屋顶、化工容器等均属此类。

(3) 若构件在三个方向上具有同一数量级的尺寸, 则称为块体 (body)。水坝、建筑结构物基础等均属此类。

本书仅以等截面直杆 (简称等直杆) 作为研究对象。壳以及块体的研究属于“板壳理论”和“弹性力学”课程的范畴。

0.3 工程力学课程的分析方法

工程力学中的“工程静力学”与“材料力学”两部分, 由于所研究的对象各不相同, 分析方法也因此而异。

在工程静力学中, 其研究的对象是刚体, 所研究的是确定构件的受力, 所采用的方法是平衡的方法。与此相关, 必须正确分析各物体之间的接触与连接方式以及不同的接触与连接方式将产生何种相互作用力。

在材料力学中, 其研究对象是变形体, 所研究是在外力作用下, 会产生什么样的变形、什么样的内力, 这些变形和内力对构件的正常工作又会产生什么样的影响。因



此,在这一类问题中,重要的是学会分析变形,分析内力和应力,并应用于解决工程设计中的强度、刚度和稳定性问题。

需要指出的是,工程静力学中所采用的某些原理和方法在材料力学中分析变形问题时是不适用的。例如,图 0-4 (a) 所示作用在刚性圆环上的两个力,可以沿着二者的作用线任意移动,对刚性圆环的平衡没有任何影响。但是,对于图 0-4 (b) 所示作用在弹性圆环上的一对力,如果沿着作用线移动,这时虽然对圆环的整体平衡没有影响,但读者不难发现,这对于物体变形的影响却是非常明显的。

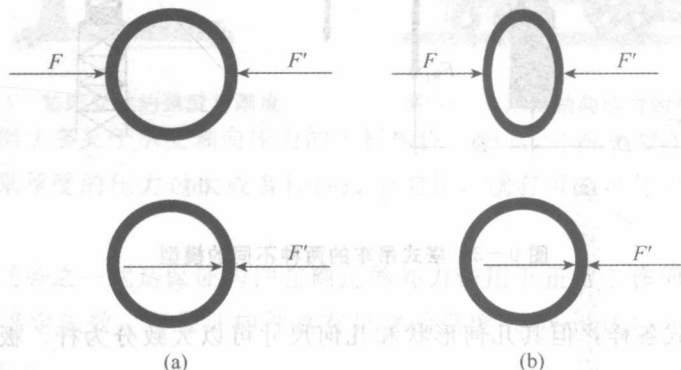


图 0-4 工程静力学中某些原理的适应性



第1章 工程静力学基础

本章首先介绍工程静力学的基本概念,包括力和力矩的概念、力系与力偶的概念、约束与约束力的概念。在此基础上,介绍受力分析的基本方法,包括隔离体的选取与受力图的画法。

1.1 力和力矩

1.1.1 力的概念

力(force)对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点。

(1) 力的大小反映了物体间相互作用的强弱程度。国际单位制中力的计量单位是“牛顿”简称“牛”,英文字母 N 和 kN 分别表示牛和千牛。

(2) 力的方向指的是静止质点在该力作用下开始运动的方向。沿该方向画出的直线称为力的作用线,力的方向包含力的作用线在空间的方位和指向。

(3) 力的作用点是物体相互作用位置的抽象化。实际上两物体接触处总会占有一定面积,力总是作用于物体的一定面积上的。如果这个面积很小,则可将其抽象为一个点,这时作用力称为集中力;如果接触面积比较大,力在整个接触面上分布作用,这时的作用力称为分布力,通常用单位长度的力表示沿长度方向上的分布力的强弱程度,称为载荷集度(density pload),用记号 q 表示,单位为 N/m 。

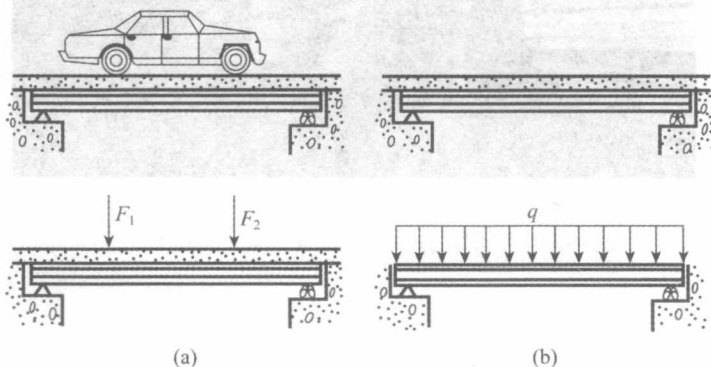


图 1-1 集中力与分布力

例如,图 1-1 (a) 所示汽车通过轮胎作用在桥面上的力,因为轮胎与桥面的接触面积很小,所以可以看做是集中力;而图 1-1 (b) 所示汽车和桥面作用在桥梁上的力,则是沿着桥梁长度方向连续分布的,所以是分布力。

综上所述,力是矢量(见图 1-2)。矢量的模表示力的大小;矢量的作用线方位加