



新世纪高职高专实用规划教材

• 机电·模具·数控系列

工程力学

GONGCHENG LIXUE

龚良贵 主 编
熊拥军 副主编



清华大学出版社

新世纪高职高考实用规划教材 机电·模具·数控系列

工 程 力 学

龚良贵 主 编
熊拥军 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是面向新世纪高等职业技术教育教学系列教材之一。全书共5部分18章,按整合优化方式编写,把理论力学和材料力学的内容加以精选、融合与贯通为静力学、材料力学、运动学、动力学、构件强度问题专题研究5个模块。基本理论以“必需”、“够用”为度,突出“知识和能力”这条主线,强化应用性的教学内容,重点培养学生分析、解决问题的能力,符合高等职业技术教育培养应用型工程技术人才的目标要求。

本书适用于高等学校及高等职业技术教育土建、机械和近机械类各专业,也可作为其他层次教学用书和广大工程技术人员的自学用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/龚良贵主编;熊拥军副主编. —北京:清华大学出版社,2005.2
(新世纪高职高专实用规划教材 机电·模具·数控系列)

ISBN 7-302-09442-X

I. 工… II. ①龚…②熊… III. 工程力学—高等院校:技术学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第090991号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

组稿编辑:刘建龙

文稿编辑:葛昊晗

封面设计:陈刘源

印 装 者:北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:28.5 字数:673千字

版 次:2005年2月第1版 2006年1月第2次印刷

书 号:ISBN7-302-09442-X/O·402

印 数:4001-6000

定 价:38.00元

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

《新世纪高职高专实用规划教材》序

编写目的

目前,随着教育的不断深入,高等职业教育发展迅速,进入到一个新的历史阶段。学校规模之大,数量之众,专业设置之广,办学条件之好和招生人数之多,都大大超过了历史上任何一个时期。然而,作为高职院校核心建设项目之一的教材建设,却远远滞后于高等职业教育发展的步伐,以至于许多高职院校的学生缺乏适用的教材,这势必影响高职院校的教育质量,也不利于高职教育的进一步发展。

目前,高职教材建设面临着新的契机和挑战:

(1) 高等职业教育发展迅猛,相应教材在编写、出版等环节需要在保证质量的前提下加快步伐,跟上节奏。

(2) 新型人才的需求,对教材提出了更高的要求,即教材要充分体现科学性、先进性和实用性。

(3) 高职高专教育自身的特点是强调学生的实践能力和动手能力,教材的取材和-content设置必须满足不断发展的教学需求,突出理论和实践的紧密结合。

有鉴于此,清华大学出版社在相关主管部门的大力支持下,组织部分高等职业技术学院的优秀教师以及相关行业的工程师,推出了一系列切合当前教育改革需要的高质量的面向就业的职业技术实用型教材。

系列教材

本系列教材主要涵盖以下领域:

- 计算机基础及其应用
- 计算机网络
- 计算机图形图像处理与多媒体
- 电子商务
- 计算机编程
- 电子电工
- 机械
- 数控技术及模具设计
- 土木建筑
- 经济与管理
- 金融与保险

另外,系列教材还包括大学英语、大学语文、高等数学、大学物理、大学生心理健康等基础教材。所有教材都有相关的配套用书,如实训教材、辅导教材、习题集等。

教材特点

为了完善高等职业技术教育的教材体系，全面提高学生的动手能力、实践能力和职业技术素质，特意聘请有实践经验的高级工程师参与系列教材的编写，采用了一线工程技术人员与在校教师联合编写的模式，使课堂教学与实际操作紧密结合。本系列丛书的特点如下：

- (1) 打破以往教科书的编写套路，在兼顾基础知识的同时，强调实用性和可操作性。
- (2) 突出概念和应用，相关课程配有上机指导及习题，帮助读者对所学内容进行总结和提高。
- (3) 设计了“注意”、“提示”、“技巧”等带有醒目标记的特色段落，使读者更容易得到有益的提示与应用技巧。
- (4) 增加了全新的、实用的内容和知识点，并采取由浅入深、循序渐进、层次清楚、步骤详尽的写作方式，突出实践技能和动手能力。

读者定位

本系列教材针对职业教育，主要面向高职高专院校，同时也适用于同等学历的职业教育和继续教育。本丛书以三年制高职为主，同时也适用于两年制高职。

本系列教材的编写和出版是高职教育办学体制和运作机制改革的产物，在后期的推广使用过程中将紧紧跟随职业技术教育发展的步伐，不断吸取新型办学模式、课程改革的思路和方法，为促进职业培训和继续教育的社会需求奉献我们的力量。

我们希望，通过本系列教材的编写和推广应用，不仅有利于提高职业技术教育的整体水平，而且有助于加快改进职业技术教育的办学模式、课程体系和教学培训方法，形成具有特色的职业技术教育的新体系。

教材编委会

前 言

本书是为适应高等职业技术教育的教学需要而编写的。适用于高等职业技术教育机械、土建和近机械类各专业；也可作为高等专科学校，以及职大、夜大、业大、电大、函大等成人教育的教学用书和广大工程技术人员的学习用书。

根据高等职业技术教育的特色及“工程力学”在人才培养计划中的地位和作用，本书在编写过程中力求体现“以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为重点”的原则，在以下方面做了一定的努力：

1. 在体系编排上，改变了原“理论力学”和“材料力学”两门课程自成体系的格局，将两门课程整合优化成5个部分18章，而且每章的知识结构也作了适当调整。第1部分“静力学”，突出刚体平衡时的力学特征；第2部分“材料力学”，突出变形体平衡时的力学特征；第3部分“运动学”，突出刚体运动形态；第4部分“动力学”，突出刚体运动时的力学特征；第5部分“构件强度问题专题研究”，突出变形体的动强度问题。通过调整，目的突出了“知识和能力”这条主线，减少重叠，以符合工程设计思路要求，便于读者接受。

2. 在内容安排上，注意处理好本课程与前修课程和后续课程间的衔接；处理好内部相关内容间的关系；精选经典内容，渗透现代力学思想，重在讲清概念，减少理论推导；加强工程意识和工程方法的训练。

3. 本书在每章后都附有小结以及复习思考题和习题，旨在指导学生学习，启发学生思考；书末附有习题答案。

4. 对专科学生，书中加*的章节为选学内容。

本书由龚良贵、熊拥军、张鸿飞共同编写。分工如下：绪论、第1章、第8章、第9章、第10章、第11章、第12章、第13章、第16章、第17章由龚良贵（南昌大学）编写；第2章、第3章、第4章、第5章、第6章、第7章、第14章、第15章、附录A、B、C由熊拥军（南昌大学）编写；第18章由张鸿飞（江西蓝天职业技术学院）编写。

龚良贵任主编，熊拥军任副主编。龚良贵完成最后统稿。

本书由南昌航空工业学院童勤德教授主审。他认真审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵的修改意见。对此，我们表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到了江西蓝天职业技术学院领导及机电系主任邱映辉教授的大力支持，在此致以诚挚的谢意。

限于作者水平，加之时间仓促，书中难免存在缺点和不妥之处，恳请各位专家、同仁和广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	3.4 物体系统的平衡 静定和静不定问题	49
第一部分 静力学		3.4.1 滑动摩擦	52
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	4	3.4.2 摩擦角与自锁现象	53
1.1 静力学公理	4	3.4.3 有滑动摩擦的平衡问题	54
1.2 约束和约束反力	6	3.5 小结	58
1.3 物体的受力分析与受力图	10	3.6 思考题	59
1.4 小结	13	3.7 习题	62
1.5 思考题	14	第二部分 材料力学	
1.6 习题	15	第 4 章 构件的内力分析	74
第 2 章 基本力系	17	4.1 材料力学的基本概念	74
2.1 汇交力系的合成与平衡	17	4.1.1 材料力学的任务	74
2.1.1 几何法	17	4.1.2 变形固体的基本假设	74
2.1.2 解析法	19	4.1.3 杆件变形的基本形式	75
2.2 力矩	22	4.2 内力和截面法	78
2.2.1 力对点之矩	22	4.3 轴力和轴力图	79
2.2.2 合力矩定理	23	4.4 扭矩和扭矩图	81
2.2.3 力对轴之矩	25	4.5 剪力与弯矩及受力分析图	83
2.3 力偶及力偶系的合成与平衡	26	4.5.1 剪力与弯矩	84
2.3.1 力偶和力偶矩	26	4.5.2 剪力方程与弯矩方程	86
2.3.2 力偶的性质	27	4.5.3 剪力、弯矩和分布载荷集度间的微分关系	89
2.3.3 力偶系的合成与平衡	28	4.5.4 按叠加原理作弯矩图	92
2.4 小结	31	4.6 小结	94
2.5 思考题	32	4.7 思考题	95
2.6 习题	34	4.8 习题	95
第 3 章 一般力系	41	第 5 章 拉伸、压缩与剪切	100
3.1 力线平移定理	41	5.1 拉伸、压缩时的应力	100
3.2 平面一般力系向一点简化	42	5.1.1 应力的概念	100
3.3 一般力系的平衡方程	44	5.1.2 横截面上的正应力	101
3.3.1 平面一般力系的平衡方程	44	5.1.3 斜截面上的应力	102
3.3.2 空间一般力系的平衡方程	48	5.2 拉伸、压缩时的强度计算	104

5.3 拉伸、压缩时的变形.....	106	7.4.3 用叠加法求梁的变形.....	169
5.4 拉伸、压缩时材料的力学性能.....	109	7.4.4 梁的刚度计算和提高梁 弯曲刚度的措施.....	171
5.4.1 拉伸时材料的力学性能.....	109	7.5 超静定梁.....	173
5.4.2 压缩时材料的力学性能.....	112	7.6 小结.....	175
5.5 拉伸、压缩时超静定问题.....	114	7.7 思考题.....	176
5.6 连接件的实用强度计算.....	117	7.8 习题.....	177
5.6.1 剪切实用强度计算.....	118	第 8 章 应力状态和强度理论.....	185
5.6.2 挤压实用强度计算.....	120	8.1 应力状态的概念.....	185
5.7 小结.....	122	8.2 二向应力状态.....	187
5.8 思考题.....	124	8.2.1 解析法.....	187
5.9 习题.....	125	8.2.2 图解法.....	191
第 6 章 扭转.....	133	8.3 三向应力状态.....	194
6.1 薄壁圆筒的扭转.....	133	8.4 广义胡克定律.....	196
6.1.1 薄壁圆筒扭转时的 应力和变形.....	133	8.5 强度理论及其应用.....	198
6.1.2 切应力互等定理.....	134	8.5.1 材料的破坏形式.....	198
6.1.3 剪切胡克定律.....	134	8.5.2 常用的强度理论及其应用.....	199
6.2 圆轴扭转时的应力和强度计算.....	135	8.6 小结.....	202
6.2.1 横截面上的应力.....	135	8.7 思考题.....	204
6.2.2 极惯性矩和抗扭截面系数.....	137	8.8 习题.....	204
6.2.3 圆轴扭转时的强度计算.....	138	第 9 章 组合变形的强度计算.....	208
6.3 圆轴扭转时的变形和刚度计算.....	140	9.1 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形.....	209
6.3.1 圆轴扭转时的变形.....	140	9.2 扭转与弯曲的组合变形.....	212
6.3.2 圆轴扭转时的刚度计算.....	141	9.3 斜弯曲.....	214
6.4 小结.....	143	9.4 小结.....	218
6.5 思考题.....	144	9.5 思考题.....	219
6.6 习题.....	145	9.6 习题.....	220
第 7 章 弯曲.....	148	第 10 章 压杆稳定.....	224
7.1 梁的正应力和强度计算.....	148	10.1 压杆稳定的概念.....	224
7.1.1 梁的正应力.....	148	10.2 细长压杆的临界力.....	225
7.1.2 梁的正应力强度条件.....	152	10.2.1 两端铰支压杆的临界力.....	225
7.2 梁的切应力及强度计算.....	155	10.2.2 杆端约束对临界力的 影响.....	227
7.2.1 梁的切应力.....	155	10.3 压杆的临界应力及临界 应力总图.....	228
7.2.2 梁的切应力强度计算.....	157	10.3.1 细长压杆的临界应力.....	228
7.3 提高梁弯曲强度的措施.....	159	10.3.2 临界应力总图.....	230
7.4 梁的变形和刚度计算.....	163		
7.4.1 挠曲线近似微分方程.....	163		
7.4.2 用积分法求梁的变形.....	165		

10.4	压杆的稳定计算.....	232
10.5	提高压杆稳定性的措施.....	235
10.6	小结.....	236
10.7	思考题.....	237
10.8	习题.....	237

第三部分 运动学

第 11 章 点的运动学与刚体的

基本运动.....242

11.1	点的运动学.....	242
11.1.1	矢量法.....	242
11.1.2	直角坐标法.....	244
11.1.3	自然法.....	247
11.2	刚体的平行移动.....	252
11.3	刚体的定轴转动.....	254
11.3.1	转动方程、角速度和 角加速度.....	254
11.3.2	转动刚体内各点的 速度和加速度.....	255
11.3.3	定轴轮系.....	258
11.4	小结.....	260
11.5	思考题.....	261
11.6	习题.....	262

第 12 章 点的合成运动.....266

12.1	点的合成运动的基本概念.....	266
12.2	点的速度合成定理.....	267
12.3	点的加速度合成定理.....	270
12.3.1	牵连运动为平移时点的 加速度合成定理.....	270
12.3.2	牵连运动为转动时点的 加速度合成定理.....	273
12.4	小结.....	275
12.5	思考题.....	276
12.6	习题.....	277

第 13 章 刚体的平面运动.....281

13.1	基本概念与运动分解.....	281
13.2	平面图形内各点的速度计算.....	283
13.2.1	基点法.....	283

13.2.2	瞬心法.....	285
--------	----------	-----

13.3	平面图形内各点的加速度计算.....	288
------	--------------------	-----

13.4	小结.....	292
------	---------	-----

13.5	思考题.....	293
------	----------	-----

13.6	习题.....	294
------	---------	-----

第四部分 动力学

第 14 章 动量定理和动量矩定理..... 300

14.1	质点动力学的基本方程.....	300
14.2	动量定理.....	303
14.2.1	质点系的动量定理.....	304
14.2.2	质心运动定理.....	307
14.3	动量矩定理.....	310
14.3.1	质点系的动量矩定理.....	310
14.3.2	刚体定轴转动的微分方程 和转动惯量.....	313
14.3.3	刚体平面运动的 微分方程.....	317
14.4	小结.....	318
14.5	思考题.....	319
14.6	习题.....	320

第 15 章 动能定理..... 326

15.1	功与功率.....	326
15.1.1	力的功.....	326
15.1.2	功率.....	330
15.2	动能定理.....	330
15.2.1	质点系和刚体的动能.....	330
15.2.2	质点系的动能定理.....	333
15.3	势力场、势能、机械能 守恒定律.....	335
15.4	动力学普遍定理的综合应用.....	338
15.5	小结.....	339
15.6	思考题.....	341
15.7	习题.....	341

第 16 章 机械振动基础..... 345

16.1	单自由度系统的自由振动.....	345
16.1.1	自由振动微分方程 及其解.....	345

16.1.2 无阻尼自由振动的特点.....	347	17.6 思考题.....	379
16.1.3 弹簧的并联与串联	349	17.7 习题.....	380
16.1.4 计算固有频率的能量法.....	351	第 18 章 构件的疲劳强度.....	384
16.2 单自由度系统的有阻尼		18.1 交变应力与应力循环特性	384
自由振动	353	18.2 疲劳破坏的概念	386
16.3 单自由度系统的受迫振动.....	356	18.3 疲劳极限及其测定	387
16.3.1 受迫振动微分方程		18.4 影响构件疲劳极限的主要因素	388
及其解	357	18.5 对称循环的疲劳强度计算	391
16.3.2 阻尼对受迫振动的影响.....	360	18.5.1 对称循环的疲劳	
16.4 隔振	361	强度计算	392
16.5 小结	362	18.5.2 提高构件疲劳	
16.6 思考题	363	强度的措施	392
16.7 习题	363	18.6 小结.....	394
第五部分 构件强度问题的专题研究		18.7 思考题.....	394
第 17 章 构件的动载荷强度.....	366	18.8 习题.....	395
17.1 惯性力 动静法.....	366	附录 A 重心和截面的几何性质	397
17.1.1 质点的动静法	366	附录 B 梁在简单载荷作用下的变形	408
17.1.2 质点系的动静法	367	附录 C 型钢表	411
17.1.3 刚体惯性力系的简化	368	附录 D 习题答案.....	424
17.2 考虑惯性力时的应力计算.....	371	主要符号	438
17.3 受冲击载荷时的应力		参考文献.....	440
和变形计算	374		
17.4 提高构件抗冲击能力的措施.....	376		
17.5 小结	377		

绪 论

工程力学是一门理论性较强的专业基础课，它是诸多力学课程的基础，并在工程技术领域中有着广泛的应用。

一、工程力学的任务

机械设备或工程结构都是由若干构件组成的。当它们传递运动或承受载荷时，各个构件都要受到力的作用。首先，必须确定作用在各个构件上有哪些力以及它们的大小和方向；其次，在确定了作用在构件上的外力后，还必须为构件选用合适的材料，确定合理的截面形状和尺寸，以保证构件既能安全可靠地工作又符合经济要求。这些都是工程力学所要解决的问题。

工程力学是高等工科院校的一门理论性较强的技术基础课程，为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学的基本理论和方法。工程力学涉及众多的力学分支学科，本书介绍其中最基础的一部分，主要研究物体的机械运动和杆件弹性变形的一般规律。

机械运动是指物体在空间的位置随时间而发生的改变。机械运动是物质各种运动(如发热、发光、电磁现象、化学过程等)中最基本以及人们在生产和生活中最常见的一种运动形式。

变形是指物体在外力作用下形状和尺寸的改变。物体的变形按其性质可分为两种：一种是**弹性变形**，随外力的解除而消失；另一种是**塑性变形**，或称残余变形，在外力解除后仍不能消失。杆件是指一个方向(长度方向)尺寸远大于其他两个方向(宽度和厚度方向)尺寸的构件。本课程主要研究杆件的弹性变形问题。

本课程所研究的内容以牛顿定律为基础，属经典力学范畴，适用于速度远低于光速的宏观物体的运动。在近代物理学的发展过程中，发现经典力学的研究范围存在许多局限性。但在一般工程技术中的力学问题中，所研究的对象都属宏观、低速范畴，经典力学的准确性还是可以肯定的。

工程力学课程的任务，概括起来可分为两个方面。

1. 研究物体的机械运动与所受力之间的关系。包括力的一般性质，力系的简化及物体在力系的作用下平衡规律的研究；物体运动几何性质的描述；物体运动状态的改变与它所受力之间的关系。目的是掌握物体机械运动的基本规律和研究方法。

2. 研究物体变形与所受力之间的关系。研究物体在外力作用下变形和破坏的规律，为解决构件强度、刚度和稳定性问题提供基本理论和计算方法。

二、工程力学的研究方法

由观察和实验可知，在外力作用下，任何物体均会变形。工程力学的研究方法是实验观察—建立模型—理论分析—实验(实践)验证。这是自然科学研究问题的一般方法。

本课程研究的物体，大多是各种工程结构物及其构件。这些结构物和构件，形状大小

各异，组成也很复杂。因此，在研究它们的运动和变形时，首先必须根据问题的性质，抓住主要因素，略去次要因素，合理简化，使其抽象为力学模型。这是重要的一步。

在研究物体的平衡规律时，由于物体变形量很小或变形因素对问题的研究影响很小，可忽略物体的变形而将其抽象为“刚体”。在研究物体机械运动的几何性质和运动状态改变与受力之间关系时，因为物体的运动范围远大于物体本身的大小，所以可将物体抽象为一个“质点”，或者由质点组成的“质点系”。但在研究物体的变形与受力之间关系时，则不能再将物体视为刚体，而应看成可变形固体。

建立模型之后，可运用数学方法进行分析计算。这种解决工程力学问题的方法称为理论方法。然而，许多工程实际问题，仅靠理论方法不能有效地解决，还要通过实验的方法才能得到满意的结果。另外，在解决构件的承载能力问题时，需要通过实验来测定材料的力学性质。可见，实验方法也是解决工程力学问题的一个必不可少的方法。

随着计算机技术的迅速发展，计算机分析方法在工程力学领域中得到日益广泛的应用，并促进了工程力学研究方法的更新。这将使工程力学在解决日常生活，环境、交通和国防等工程问题中发挥更大的作用。

三、工程力学的地位和作用

工程力学既是基础学科，又可直接面向工程应用。这门课程讲述力学的基本知识和基础理论，以及处理工程力学问题的基本方法，为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学知识基础。

学习工程力学不仅要深刻理解力学的基本概念和基本定律，还要牢固地掌握由此而导出的解决工程力学问题的定理和公式，同时也要注意培养自己处理工程力学问题的能力。

第一部分 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。

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。这是一个理想化的力学模型。事实上，任何物体受力后或多或少都会发生变形，因此，实际上并不存在绝对的刚体。但是，对那些在运动中变形极小，或虽有变形但不影响其整体运动的物体，忽略变形，对问题的研究结果不仅没有显著影响，而且可以使问题简化。这时，该物体可抽象为刚体。将物体抽象为刚体是有条件的，这与所研究的问题的性质有关。当物体的变形(即使很小)成为所研究问题的主要方面而不应忽视时，就不能抽象为刚体，而应当作为变形体处理。

由于静力学中所研究的物体只限于刚体，所以又称为**刚体静力学**。

力，是指物体间相互的机械作用。这种作用使物体的机械运动状态发生变化或形状发生变化。前者称为运动效应(又称外效应)，后者称为形变效应(又称内效应)。力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素，因此，力应以矢量表示，在本书中用**黑色字体** F 表示力矢量。在工程力学中采用国际单位制(SI)，力的单位是牛顿，用 N 表示，或千牛顿，用 kN 表示。

力系，是指同时作用在物体上的一群力。作用线在同一平面内的力系叫平面力系；作用线不在同一平面内的力系叫空间力系；作用线汇交于一点的力系叫汇交力系；作用线相互平行的力系叫平行力系；作用线既不汇交于一点，又不相互平行的力系叫一般力系。

平衡，是指物体相对于惯性参考系处于静止或作匀速直线运动的状态。它是机械运动的特殊形式。在工程实际中，通常把固连于地球的参考系作为惯性参考系，用此参考系来研究物体相对于地球的平衡问题，所得结果能很好地与实际情况相符合。

在静力学中，我们将研究以下三个问题：

- 1. 物体的受力分析** 分析某个物体或物体系统共受几个力，以及每个力的作用位置和方向。
- 2. 力系的等效与简化** 将作用在物体上的一个力系用另一个与其等效的力系来代替，这两个力系互为**等效力系**。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系，则称为**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**，而力系中各力称为此力的**分力**。
- 3. 力系的平衡条件** 研究作用在物体上的各种力系所需满足的条件。使物体处于平衡状态的力系称为**平衡力系**。

力系的平衡条件在工程中有十分重要的意义，是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此，静力学工程中有最广泛的应用。

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

本章将阐述静力学公理，并介绍工程中常见的约束和约束反力的分析及物体的受力图。静力学公理是静力学理论的基础。物体的受力分析是力学中重要的基本技能。

1.1 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，又经过实践反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定。如图 1.1(a)所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$\boldsymbol{F}_R = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 \quad (1-1)$$

力的平行四边形也可演变成为力三角形，它能更简便地确定合力的大小和方向，如图 1.1(b)、(c)所示，而合力作用点仍在汇交点 A 。

这个公理表明了最简单力系的简化规律，它是复杂力系简化的基础。

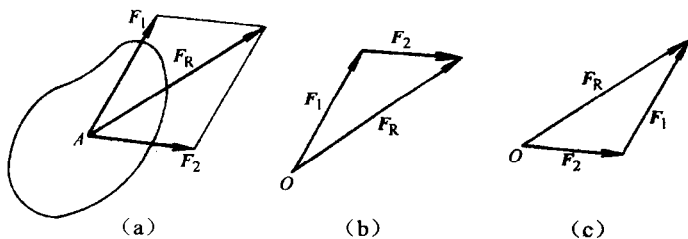


图 1.1 力的平行四边形法则

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力，使刚体保持平衡的必要与充分条件是：这两个力的大小相等、方向相反、且在同一直线上，如图 1.2 所示，即

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2 \quad (1-2)$$

这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。对刚体来说这个条件既是必要的，又是充分的；但对于变形体，它只是平衡的必要条件，而不是充分条件。例如，软绳受两个等值、反向、共线的拉力作用可以平衡，而受两个等值、反向、共线的压力作用就不能平衡。

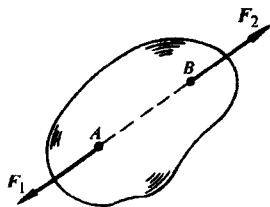


图 1.2 二力平衡条件

工程上,把只受两个力作用而处于平衡状态的物体,称为**二力构件**(又称**二力杆**)。根据二力平衡条件可知,二力构件不论形状如何,其所受的两个力的作用线,必沿这两个力作用点的连线。这一性质在对物体进行受力分析时极为有用。

公理 3 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的已知力系中加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

这个公理是研究力系等效替换的重要理论依据。但必须注意,此公理只适用于刚体而不适用于变形体。

由上述公理可以导出如下重要推论:

推论 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力,可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点,并不改变该力对刚体的作用。

如图 1.3(a)所示的刚体,在 A 点受力 F 作用,若在力 F 的作用线上任一点 B 加上一平衡力系 F_1 、 F_2 ,且使 $F = F_2 = -F_1$ (图 1.3(b)),则 F 与 F_1 又构成一平衡力系,将此力系去掉后,可得到作用于 B 点的力 F_2 (图 1.3(c))。于是,原作用于 A 点的力 F 沿其作用线移到 B 点。

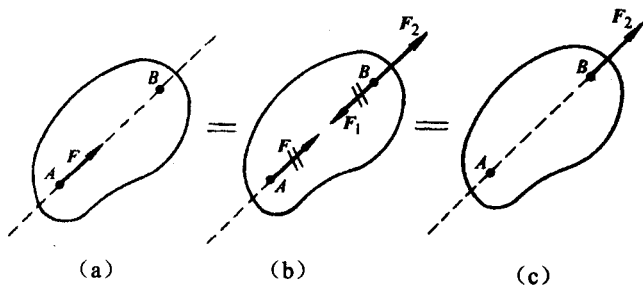


图 1.3 力的可传性

根据力的可传性,力对刚体的效应与力的作用点无关。因此,对于刚体来说,力的三要素是力的大小、方向和作用线。在这种情况下,力矢可沿其作用线任意滑动,成为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三个力

必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点。

设有三个互相平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用于刚体上的 A 、 B 、 C 三个点(图 1.4)。已知 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点，根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O ，并用力的平行四边形规则，求得其合力 F_{12} 。则 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两力平衡必须共线，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 的汇交点 O 。

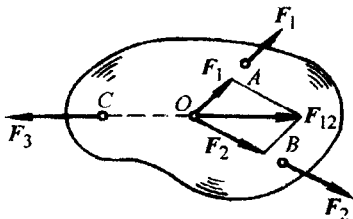


图 1.4 三力平衡汇交定理

三力平衡汇交定理说明了不平行的三个力平衡的必要条件，有时用此来确定第三个力的作用线的方位。

公理 4 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在，且大小相等，方向相反，沿着同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。

这一公理概括了物体间相互作用力的关系，表明作用力和反作用力总是成对出现。由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上，因此，不能视为平衡力系。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡时，如将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体抽象为刚体模型的条件。刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件，而非充分条件。

静力学全部理论都可以由上述五个公理推证而得到。这既能保证理论体系的完整和严密性，又可以培养读者的逻辑思维能力。

1.2 约束和约束反力

在空间的位移不受任何限制，可以自由运动的物体，称为**自由体**。位移受到某些限制的物体称为**非自由体**。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体，称为**约束**。例如，绳子是电灯的约束；合页是门、窗的约束；滑道是冲头的约束；轴承是飞轮和轴的约束；支座是桥梁的约束等。

既然约束阻碍着物体的运动，那么当物体沿着约束所能限制的方向运动或有运动趋势时，约束对该物体必然有力的作用，以阻碍物体的运动，这种力称为**约束反力**，简称反力。因此，约束反力的方向总是与该约束所能阻碍的运动方向相反，这是确定约束反力方向的

准则。

物体所受的力,除约束反力外,还有如重力、水压力、风力、电磁力等,它们是使物体运动或使物体有运动趋势的力,这种力称为**主动力**。

在一般情况下,约束反力是由主动力的作用引起的,因此,它又是一种被动力。静力分析的重要任务之一就是确定未知约束反力。

工程中约束的种类很多,对于一些常见的约束,按其所具有的特性,可以归纳为下列几种基本类型。

1. 柔性约束(柔索) 柔性约束是由绳索、胶带或链条等柔性物体构成的。这类约束的性质决定它只能承受拉力,所以它给物体的约束反力也只能是拉力。因此,柔性约束对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着柔索背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束反力。

例如,图 1.5(a)所示,用绳索悬挂一重物,则绳索对重物的约束反力是沿绳索的拉力 F_1 和 F_2 ,如图 1.5(b)所示。

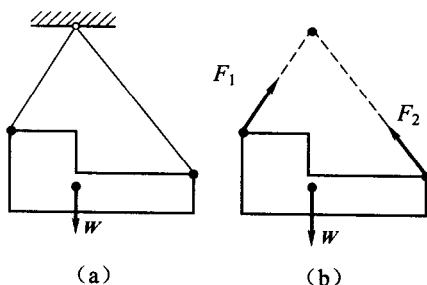


图 1.5 柔性约束

2. 光滑接触面约束 光滑接触面约束可忽略摩擦,将接触表面视为理想光滑的约束。此时,不论接触面是平面还是曲面,都不能限制物体沿约束表面切线的运动,而只能限制物体沿着接触表面法线方向,并向约束内部的运动。因此,光滑接触面对物体的约束反力通过接触点,方向沿接触表面的公法线方向,并指向受力物体。这种约束反力称为法向反力,通常用 F_N 表示。

例如,图 1.6(a)、(b)所示,支持物体的固定面、啮合齿轮的齿面都可视为光滑接触面,它们的约束反力分别为图 1.6 中的 F_{NA} 和 F_{NB} 。

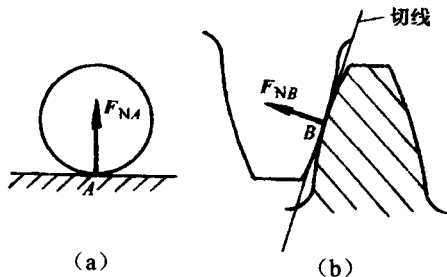


图 1.6 光滑接触面约束

3. 光滑圆柱形铰链 两物体分别被钻上直径相同的圆孔并用销钉连接起来,不计销钉