



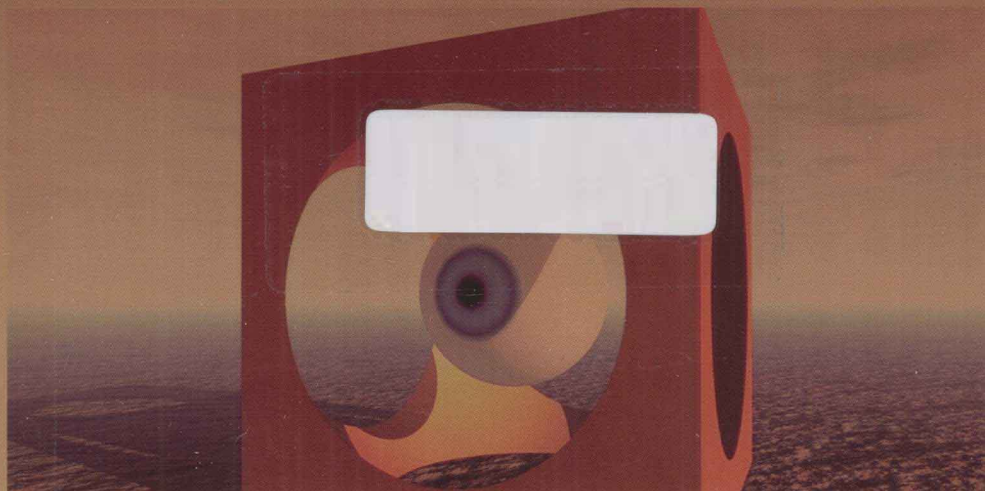
普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育基础力学课程教学改革规划教材

工程力学

简明教程

孙双双 主编

GONGCHENG LIXUE
JIANMING JIAOCHENG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育基础力学课程教学改革规划教材

工程力学简明教程

主编 孙双双

参编 刘文秀 袁向丽 朱惠华



机械工业出版社

本书按教育部高等学校工科工程力学中、少学时教学基本要求和全国各高校中、少学时实际执行教学大纲综合编写,适用 50 ~ 60 学时。

本书在编写过程中,编者结合多年来“工程力学”的教学实践,本着突出重点、简化理论推导、注重实用、易讲易学的原则,力图做到用有限的学时使学生掌握最基本的经典内容,能够解决简单的实际工程问题。

全书分静力学篇和材料力学篇两部分。静力学篇包括静力学基础、平面基本力系、平面一般力系和空间力系;材料力学篇包括材料力学概述、轴向拉压与剪切、扭转、平面弯曲、应力状态和强度理论、组合变形和压杆稳定等内容。

本书可适用于冶金、化工、地矿、测绘、安全、包装、印刷等专业本科中、少学时以及大专院校的专科教学,亦可作为成人教育及工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学简明教程/孙双双主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 4
普通高等教育“十二五”规划教材 普通高等教育基础力学课程
教学改革规划教材

ISBN 978-7-111-41840-5

I. ①工… II. ①孙… 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(2013)第 051711 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联 任正一

版式设计:潘蕊 责任校对:佟瑞鑫

封面设计:马精明 责任印制:张楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13 印张 · 250 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41840-5

定价:23.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书按教育部高等学校工科工程力学中、少学时教学基本要求和全国各高校中、少学时实际执行教学大纲综合编写，可适用于冶金、化工、地矿、测绘、安全、包装、印刷等专业本科中、少学时以及大专院校的专科教学，亦可作为成人教育及工程技术人员参考用书。

本书在编写过程中，编者结合多年来“工程力学”的教学实践，本着突出重点、简化理论推导、注重实用、易讲易学的原则，力图做到用有限的学时使学生掌握最基本的经典内容，可以解决简单的实际工程问题。本书具有以下几个特点：

1. 采用由浅入深、由简单到复杂循序渐进的次序编写，便于学生理解和掌握。

2. 加强了基本概念、基本理论和基本方法的讲述，对于平面一般力系、轴向拉压的强度计算、扭转的强度和刚度计算、弯曲的内力图 and 弯曲的强度计算、压杆稳定等主要内容作了重点讲述。

3. 对主要力学术语作了英文注释，以增加学生力学专业英语词汇量，有利于国际化人才的培养。

4. 精选了每章例题、课后习题，并附加相应思考题，以培养学生独立思考能力，还附有习题答案。

全书内容分静力学篇和材料力学篇两部分，共11章。参加编写人员有：孙双双（第3，5，8章，附录A，B）、刘文秀（第4，9，10章）、袁向丽（第2，7，11章）、朱惠华（第1，6章），由孙双双负责统稿。

本书在编写过程中参阅了各兄弟院校的优秀教材，在此致以衷心的感谢。

限于编者水平有限、编写时间仓促，书中难免有纰漏，衷心希望读者批评指正。

编 者

目 录

前言
绪论

第1篇 静力学

第1章 静力学基础	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学基本公理	5
1.3 约束和约束力	7
1.4 受力分析和受力图	10
思考题	12
习题	13
第2章 平面基本力系	15
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	15
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	17
2.3 平面力对点的矩	20
2.4 平面力偶理论	21
思考题	25
习题	25
第3章 平面一般力系	28
3.1 力线平移定理	28
3.2 平面一般力系的简化	29
3.3 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	30
3.4 物体系的平衡问题	34
3.5 考虑摩擦时的平衡问题	37
*3.6 平面静定桁架的内力分析	42
思考题	45
习题	45
第4章 空间力系	49
4.1 空间力在坐标轴上的投影	49
4.2 力对点的矩和力对轴的矩	51

4.3 空间任意力系的平衡	53
4.4 空间平行力系的中心和物体的重心	54
思考题	58
习题	59
第2篇 材料力学	
第5章 材料力学概述	62
5.1 材料力学的任务	62
5.2 变形固体的基本假设	62
5.3 内力、截面法和应力	63
5.4 变形与应变	65
5.5 构件分类及杆件变形的基本形式	66
思考题	68
习题	68
第6章 轴向拉压与剪切	69
6.1 轴向拉伸或压缩时的内力	69
6.2 轴向拉伸或压缩时的应力	71
6.3 轴向拉伸或压缩时的变形	73
6.4 材料拉伸和压缩时的力学性能	76
6.5 杆件拉伸和压缩时的强度计算	79
6.6 应力集中的概念	81
6.7 剪切和挤压	82
思考题	86
习题	87
第7章 扭转	92
7.1 扭转的概念和工程实际中的扭转问题	92
7.2 杆件扭转时的内力	93
7.3 切应力互等定理与剪切胡克定律	95
7.4 圆轴扭转时的应力	98
7.5 圆轴扭转时的变形	101
思考题	104
习题	104
第8章 平面弯曲	107
8.1 弯曲的概念及梁的分类	107
8.2 剪力与弯矩	108

8.3	剪力图和弯矩图	110
*8.4	载荷集度、剪力和弯矩之间的关系	114
8.5	弯曲正应力及强度条件	116
*8.6	弯曲切应力及强度条件	122
8.7	提高弯曲强度的措施	125
8.8	梁弯曲的基本方程	126
8.9	用积分法求弯曲变形	128
8.10	用叠加法求弯曲变形	130
8.11	梁的刚度条件	133
	思考题	134
	习题	135
第9章	应力状态和强度理论	142
9.1	应力状态的概念	142
9.2	平面应力状态分析	143
9.3	三向应力状态分析	147
9.4	广义胡克定律	148
9.5	强度理论及其应用	150
	思考题	153
	习题	153
第10章	组合变形	156
10.1	组合变形的概念	156
10.2	拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	157
10.3	扭转与弯曲的组合变形	159
	思考题	162
	习题	162
第11章	压杆稳定	164
11.1	压杆稳定的概念	164
11.2	细长压杆临界压力的欧拉公式	165
11.3	临界应力与欧拉公式的应用范围	169
11.4	压杆的稳定性计算	172
11.5	提高压杆稳定性的措施	175
	思考题	177
	习题	177
附录		180
附录A	截面图形的几何性质	180
附录B	型钢规格表(GB/T 706—2008)	184
参考文献		200

绪 论

1. 工程力学的研究内容

工程力学涉及众多的力学学科，所包含的内容极其广泛，本书只介绍静力学和材料力学两部分内容。

静力学主要研究物体在力系作用下的平衡规律，包括物体的受力分析、力系的简化以及各种力系平衡条件的建立。

材料力学是研究物体受力后的内在表现（即变形规律和破坏特征）的学科，主要围绕强度、刚度和稳定问题研究。

2. 工程力学的研究对象

实际工程中，构件在外载的作用下，几何形状和尺寸都会发生改变，这种变化称为变形。发生形状和尺寸改变的构件称为**变形体**。但在处理实际工程问题时，构件的变形是否考虑需根据具体情况而定。在静力学中，构件在外载作用下产生的变形都比较小，几乎不影响构件的受力，因而可以忽略掉这种变形，此时可将物体简化为刚体，即在外载的作用下其内部任意两点之间的距离始终保持不变。这是一种理想化的模型。而材料力学是研究作用在物体上的力与变形的规律。这时，即使变形很小，也不能忽略，因而，材料力学的研究对象是变形体。但是在研究变形问题过程中，当涉及平衡问题时，大部分情况下仍可用刚体模型。

3. 工程力学的研究方法

工程力学的研究方法主要有两种：理论方法和实验方法。

理论方法包括：

1) 人们通过观察生活和生产实践中的各种现象，进行多次的科学实验，经过分析、综合和归纳，总结出力学的基本规律。例如：远在古代，人们为了提水制造了辘轳；为了搬运重物，使用了杠杆、斜面和滑轮等。制造和使用这些生活和生产工具，使人类对于机械运动有了初步的认识，并积累了大量的经验，经过分析、综合和归纳，逐渐形成了如“力”和“力矩”的基本概念，以及“二力平衡”、“杠杆原理”等力学的基本规律。

2) 在对事物观察和实验的基础上，经过抽象化建立力学模型，形成概念，在基本规律的基础上，经过逻辑推理和数学演绎，建立理论体系。如在静力学中，忽略物体的微小变形，把物体简化为刚体；在材料力学中，轴向拉压杆件受轴向力作用的平面假设等。这种抽象化、理想化的方法，既简化了所研究的

问题，同时也更深刻地反映了事物的本质。

3) 将理论用于实践，在解释世界、改造世界中不断得到验证和发展。

所谓实验法，就是以实验手段对各种力学问题进行分析研究，得到第一性的认识并总结出规律（定理、定律、公式、理论），建立以力学模型为表征的理论，并为解决工程问题做出贡献。例如：在静力学中，通过实验可测得两种材料的摩擦因数，在动力学中，通过实验可以测得刚体的转动惯量等；在材料力学中，材料的力学性能可以通过实验测定。另外，经过简化得出的结论是否可信，也要由实验来验证。还有一些尚无理论结果的问题需借助实验方法来解决。因此，理论研究和实验方法同是工程力学解决问题的方法。

4. 工程力学与工程实际的关系

力学和天文学一起是最早形成的两门自然科学。17 世纪牛顿奠定了经典力学的基础，以后得到快速发展，到 19 世纪末，力学已发展到很高的水平，并从此开始了与工程技术问题的结合。

20 世纪，由于力学的参与而得以形成的工程或技术科学有：航空航天技术科学、船舶工程科学、土木工程科学（包含水力工程）、机械工程科学、运输工程科学、能源技术科学、海洋科学、地矿科学以及兵器工程科学等。

进入 21 世纪以来，诸多高新技术无不与力学密切相关，如我国近几年有：长江三峡工程、杭州跨海大桥、动车组提速、嫦娥奔月、神七飞天等。总之，力学在诸多工程技术的发展中起着重要甚至是关键的作用，对人类文明发展起了极大的推动作用。

第1篇 静力学

第1章 静力学基础

本章首先介绍静力学的基本概念和基本原理，然后说明工程中常见的各种约束和约束力的确定方法，最后介绍物体的受力分析和受力图的画法。受力图是分析力学问题的基础，也是本章的重点内容。

1.1 静力学基本概念

1. 力及其相关概念

力(force)是物体与物体之间的相互机械作用，这种作用使得物体运动状态或者形状发生改变。

力的概念是人们在长期的生产、生活实践中建立起来的。力对物体产生的效应有两种：① 外效应，这种效应使得物体的运动状态发生改变；② 内效应，这种效应使得物体的形状发生改变。

力的三要素是力的大小、方向和作用点。这三者决定了力对物体的作用效应。力的大小表示机械作用的强弱程度，可以通过物理方法进行测定。在国际单位制中，力的常用计量单位是牛[顿](N)。力的方向就是力作用的方位和指向。力的作用点就是力作用的位置。

力既有大小又有方向，这样的物理量称为**矢量**或**向量**。力的表示方法如图1-1所示。力的方向用带箭头的有向线段来体现。力的大小用线段的长度来表示。力的作用点用线段的起点或者终点来体现。

力矢量符号是粗斜体字母 F 。若作用在物体上的力有多个，可用下标来区分不同的力。如图1-1中的力也可以记作 F_A ，其中 A 表示力的作用点。力的大小用 F 来表示。

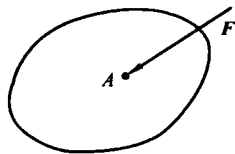


图 1-1

一般情况下，作用在一个物体上的力往往不止一个。

作用在物体上的一群力称为力系。如果作用在物体上的一群力可以用另一群力来替代，而对物体的作用效应保持一致，这样的两个力系称为**等效力系**。如果作用在物体上的一个力系可以用一个力来替代，而对物体的作用效应不变，则这个力称为该力系的**合力**。

2. 刚体

严格来说，在研究一个力学问题时，既要考虑力对物体产生的运动效应，

也要考虑力的变形效应。但在有些工程问题中，物体的变形非常微小，对于整个问题的影响可以忽略不计，因此，在研究这样的力学问题的时候，可以仅考虑力对物体产生的运动效应而忽略其变形效应，即认为被研究的物体是刚体。**刚体就是在力的作用下形状不发生改变**的物体。把物体作为刚体来处理，将大大简化某些问题的研究过程。实践证明，很多情况下这样的简化是可以满足工程实际问题的要求的。

在本书中，静力学部分都把物体作为刚体来处理，而在材料力学部分，物体的变形效应就必须考虑了。

3. 平衡

平衡就是指物体处于静止或者匀速直线运动状态。这是物体机械运动的一种特殊情况，也是一种常见情况。静力学部分主要研究物体的平衡问题。材料力学部分虽然研究的是物体的变形效应，但也是以平衡分析为基础的。

当物体处于平衡状态时，作用在该物体上的全部力构成一个平衡力系。

1.2 静力学基本公理

本节主要阐述静力学的五个基本公理。这五个公理是人们在长期的观察和实践中总结出来的关于力的性质的概括和总结，是分析静力学问题的基础。

公理一 二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力，使刚体平衡的必要和充分条件是：这两个力大小相等、方向相反、作用线在同一条直线上。

如图 1-2a 所示，设某刚体仅在 A 、 B 两点分别受到力的作用而平衡，则根据公理一，这两个力必然大小相等、方向相反、作用线均在 A 、 B 两点的连线上。这两个力的矢量关系可以用矢量式表示为

$$\mathbf{F}_A = -\mathbf{F}_B$$

如果用 F_A 和 F_B 分别表示这两个力的大小，则其大小关系可以用代数式表达为

$$F_A = F_B$$

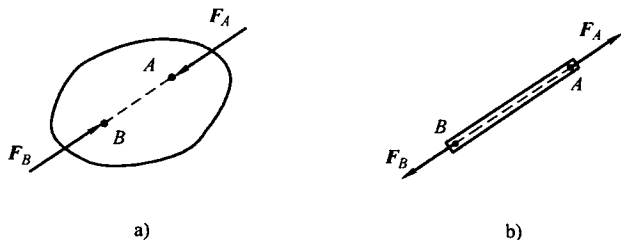


图 1-2

这样的两个力构成最简单的一种平衡力系。

工程中把这种受两个力作用而平衡的物体称为二力体。如果这个二力体是一个杆件，又称为二力杆，如图 1-2b 所示。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的一个力系中，加上或者减去一个平衡力系，不改变原力系对该刚体的作用效应。

这个公理是力系简化的理论依据。

根据这一公理，可以推导出作用在刚体上的力的一个重要性质——力的可传性。

某刚体在 A 点受到一个力 F_A 的作用，如图 1-3a 所示。在 F_A 所在的直线上任选一个刚体内部的点 B ，在该点施加一对平衡力 F_1 和 F_B ，且满足 $F_A = F_B = -F_1$ ，如图 1-3b 所示。根据公理二可知，图 1-3b 所示的三个力与图 1-3a 所示的一个力对刚体的作用效应是一样的。进一步地，由于力 F_A 和 F_1 也构成一对平衡力系，根据公理二，力 F_A 和 F_1 又可以作为一个力系从 F_A 、 F_1 、 F_B 三者构成的力系当中减去，而对刚体的作用效应没有任何影响。这样，在刚体上就只剩下一个力 F_B ，如图 1-3c 所示。比较图 1-3a 和图 1-3c 可以看到，原来力 F_A 与 F_B 作用在刚体上的不同点，而对刚体的作用效应一样，即作用在刚体上一点的力沿其作用线移动到同一刚体内部的任一点，而不改变力对刚体的作用效应。

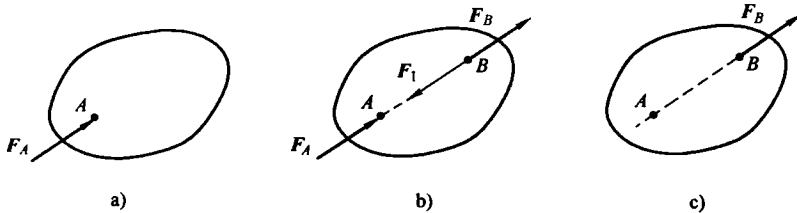


图 1-3

公理三 力的平行四边形法则

作用在物体上某一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线的方向和长度来体现，合力的作用点就是该点。

如图 1-4 所示，物体上 A 点作用有两个力 F_1 与 F_2 ，根据公理三，其合力为图中平行四边形对角线所示的力 F_R 。这三个力之间的矢量关系可以表示为：

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

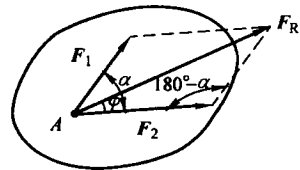


图 1-4

根据余弦定理，可以确定合力 F_R 的大小

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos(180^\circ - \alpha)} \quad (1-2)$$

根据正弦定理，可以确定合力 F_R 的方向

$$\frac{F_R}{\sin(180^\circ - \alpha)} = \frac{F_1}{\sin\varphi} = \frac{F_2}{\sin(180^\circ - \alpha - \varphi)} \quad (1-3)$$

力的平行四边形法则为力系的简化与合成提供了理论基础。根据公理一和公理三，还可推导出三力平衡汇交定理，即如果刚体受三个力作用而处于平衡状态，若其中两个力的作用线交于一点，则第三个力的作用线必通过该点，且这三个力在同一平面内。证明过程略。这一定理可以用于力的方向判断，在物体受力分析中有较多应用。

公理四 作用和反作用定律

两个物体之间的作用力和反作用力总是同时存在的，二者大小相等、方向相反、作用线在同一条直线上，分别作用在这两个物体上。

公理四说明，两个物体之间的作用力与反作用力总是成对出现的。在进行系统受力分析时必须注意这一原则。

公理五 刚化公理

如果一个变形体在某力系作用下处于平衡状态，则将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

公理五说明，处于平衡状态的变形体可以作为刚体来处理，进而对其进行刚体静力学的分析。如图 1-5a 所示，一根弹簧在一对拉力 F_1 和 F_2 的作用下处于平衡状态。根据公理五，将该弹簧视为一个刚性杆，如图 1-5b 所示，则该杆在拉力 F_1 和 F_2 的作用下仍处于平衡状态。

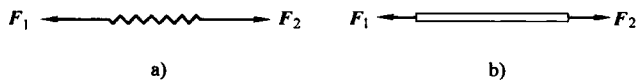


图 1-5

需要注意的是，刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件，而非充分条件。

1.3 约束和约束力

1. 自由体和非自由体的概念

在空间中的运动方向不受限制的物体，称为自由体，如在天空飞翔的小鸟、在宇宙遨游的人造卫星等。在空间中的运动方向受到限制的物体，称为非自由体，如放在桌面的水杯、在公路上行驶的车辆等。在日常生活和工程实际中，绝大多数物体都是非自由体。

2. 约束和约束力的概念

非自由体在运动上所受到的限制，通常来自与之相接触的周围物体。对非自由体的位移起限制作用的周围物体，称为约束。对放在桌面的水杯来说，桌面就是它的约束。对在公路上行驶的车辆来说，路面就是约束。由于约束阻碍了物体的运动，所以二者之间必然存在相互作用力。约束对被约束物体的作用力，称为约束力。约束力的方向总是与物体被限制位移的方向相反，作用点一般在二者的接触点，而其大小则需要根据进一步的力学分析（如平衡分析等）来确定。

3. 几种常见约束及其约束力的确定

在力学分析中，物体受到的约束是多种多样的，下面介绍几种工程中常见的约束类型及其约束力的特点。

(1) 柔索类约束 绳索、传动带、链条等柔性物体只能承受拉力而不能承受压力，因此，柔索类约束的约束力的方向总是沿着柔索、背离物体，作用点在连接点或假想分割点，一般用符号 F_T 表示，如图 1-6 所示。

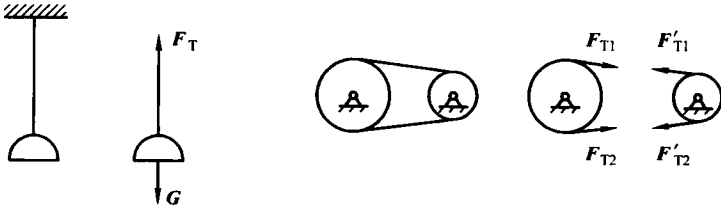


图 1-6

(2) 光滑接触面类约束 当物体与相接触的表面之间的摩擦可以忽略不计时，其约束就称为光滑接触面类约束。光滑接触面类约束的约束力的方向总是沿着接触面的公法线方向，指向被约束物体，作用点在接触点，一般用符号 F_N 表示，如图 1-7 所示。

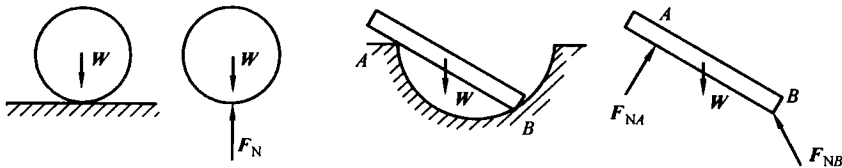


图 1-7

(3) 光滑圆柱铰链类约束 光滑圆柱铰链类约束的实质，仍然是光滑接触面类约束。由于此类约束在工程中应用广泛，且其约束力的方向判定较复杂，这里作为一个大类，单独给出有关分析过程和结果。

如果两个物体之间通过圆柱形的销钉（铰链）来连接，二者或其中一个可以绕销钉转动，则在忽略摩擦的前提下，称这类约束为光滑圆柱铰链约束。根据相对运动形式的不同，光滑圆柱铰链类约束可分为如下三种：

1) **中间铰链**：如图 1-8a 所示为工程中常见的一种结构，由两个杆件与一光滑圆柱铰链连接而成（图 1-8b），两个杆件均可绕圆柱铰链转动。这种圆柱铰链就称为**中间铰链**。在力学分析中，这种结构一般用如图 1-8c 所示的简单图形来表示。该结构中任一杆件与中间铰链之间的连接实质是光滑接触面约束，因此，一定具有这类约束的共同特点，即约束力的方向沿着接触面的公法线方向。但是，由于物体与中间铰链的接触点位置不能预先确定，所以其接触反力的方向不能完全确定。因此，**中间铰链的约束力是一个通过铰链中心、方向待定的力**。在工程上，一般用一对通过铰链中心的正交分力 F_x 和 F_y 来表示中间铰链的约束力，如图 1-8d 所示。

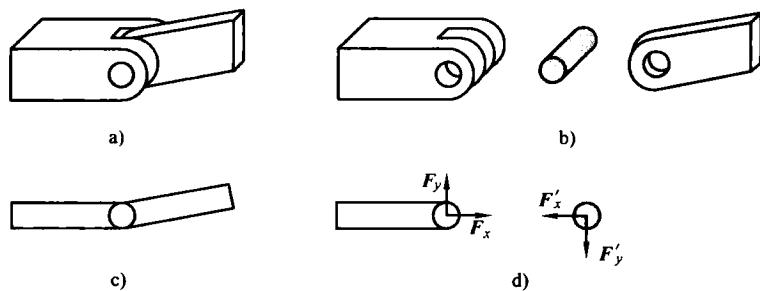


图 1-8

2) **固定铰支座**：图 1-9a 所示为工程中常见的另一种结构，由两个构件与一个中间铰链连接而成（图 1-9b），其中一个构件固定在地面或静止的物体上，这个固定构件就称为**固定铰支座**。在力学分析中，该结构一般用如图 1-9c 所示的简单图形来表示。物体与固定铰支座之间仍然通过两个光滑圆柱面的接触连接，因此，**固定铰支座的约束力也是一个通过铰链中心、方向待定的力**。在工程上，也用一对通过铰链中心的正交分力 F_x 和 F_y 来表示固定铰支座的约束力，如图 1-9d 所示。

3) **活动铰支座**：如果铰支座与固定面之间通过几个辊轴相连接，就称为**活动铰支座**，如图 1-10a 所示。在力学分析中，该结构一般用如图 1-10b 所示的简单图形来表示。与活动铰支座相连的物体，只能沿着固定面方向移动和绕着铰链中心转动，而不能发生垂直于固定面方向的移动。因此，**活动铰支座的约束力总是垂直于支承面且通过铰链中心**，如图 1-10c 所示。

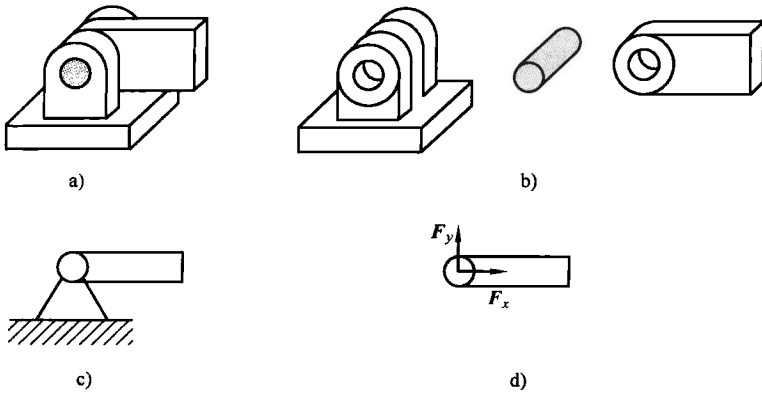


图 1-9

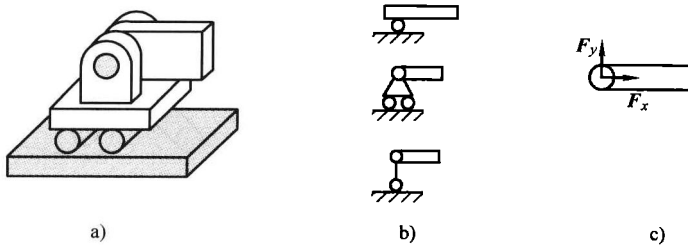


图 1-10

(4) **固定端约束** 如果物体的一端插入某个固定不动的物体内部，这样的约束称为**固定端约束**，如图 1-11a 所示。受固定端约束的物体，在插入点处不能有任何位移。因此，固定端约束的约束力包括一个约束力和一个约束力偶，一般用一对正交分力 F_x 和 F_y 和约束力偶 M 来表示，如图 1-11b 所示。

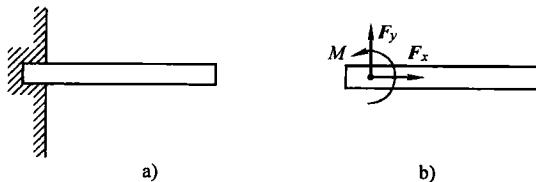


图 1-11

1.4 受力分析和受力图

1. 受力分析和受力图

在研究一个力学问题时，首先要选择一个物体作为研究对象，然后对该物