



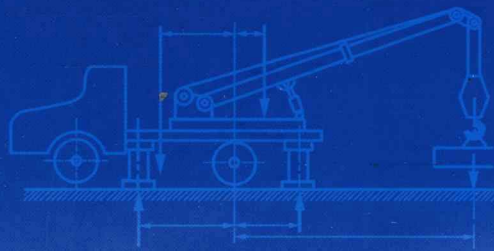
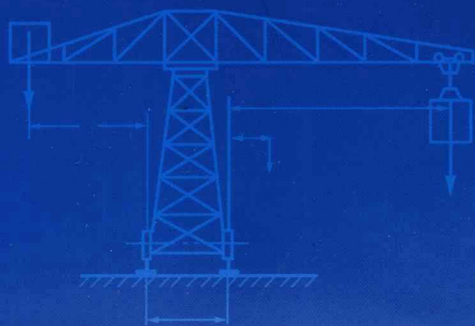
高职高专“十一五”规划教材

GONGCHENG LIXUE

工程力学

杨林娟 季维英 主编

张鸿晨 副主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

工 程 力 学

杨林娟 季维英 主编

张鸿晨 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书分为三部分：第一部分为静力学（第1章～第3章）；第二部分为运动学和动力学（第4章、第5章）；第三部分为材料力学（第6章～第13章）。内容包括平面力系和空间力系的平衡、质点和刚体运动学、质点系动力学基础、材料力学基础、材料力学基本变形、组合变形、压杆稳定等。本书重要章节后均附有结合工程实践的习题，并在书后附有答案。本书强调掌握力学基本概念和解决工程力学问题的基本方法，采用“结构化、模块化”设计，精简优化教学内容体系，体现“必需够用”，兼顾专业需求和个性发展，注意对新技术、新知识的介绍。

本书可作为高职高专院校机械、建筑、化工、纺织等专业的工程力学教学用书，也可供初、中级工程技术人员学习参考。

图书在版编目（CIP）数据

工程力学/杨林娟，季维英主编. —北京：化学工业出版社，2009.1
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-04127-2

I. 工… II. ①杨…②季… III. 工程力学-高等学校：技术院校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第180552号

责任编辑：王听讲
责任校对：陈 静

文字编辑：张 艳
装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）
印 装：化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数326千字 2009年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：23.00元

版权所有 违者必究

前 言

高职高专教育越来越突出职业技能培养的教育目标，其教学内容也在向着强化实训和实践、理论知识的教学以“必需够用”为度的方向发展。工程力学作为一门技术基础课程，教学课时进一步减少，教学内容更加精选。本书为适应高职高专教学改革的需要，总结工程力学课程长期教学的经验，精心编写而成。

本书分为三部分：第一部分为静力学（第1章～第3章）；第二部分为运动学和动力学（第4章、第5章）；第三部分为材料力学（第6章～第13章）。本书内容的重点在于静力学部分，并且以平面力系为主，以空间力系为辅，以刚体系统内各个构件之间的约束为主线，突出工程概念，融入现代科技成果，以建立力学模型、求解力学模型和计算机应用为基本要求。在运动学和动力学部分主要介绍质点及刚体的基本运动，点的运动的合成以及刚体的平面运动，动量定理、动量矩定理、动能定理和动静法。在材料力学部分，以四种基本变形为基础，介绍应力状态、组合变形及压杆稳定等。在内容的深度方面加强了改革，突出了理论教学与工程实际的联系，做到以应力应变状态为主线，以材料和构件的失效分析为目标，以解决工程构件的强度分析和刚度分析为基本要求。在内容组织上，从内力分析入手，分析基本变形的应力、应变、强度、刚度。本书力求使读者通过学习，掌握建立力学模型和简化力系的方法，能利用力系的平衡条件解决实际工程构件的受力，从而进一步对构件进行强度、刚度及稳定性方面的分析。

本书采用“结构化、模块化”设计，精简优化教学内容体系，体现“必需够用”，兼顾专业需求和个性发展，以培养实用型人才为主要目标；每章例题、习题精心选择，具典型性，强调工程概念，使力学教学与工程实践相结合；注意对新技术、新知识的介绍。

本书可作为高职高专院校机械、建筑、化工、纺织等专业的工程力学教学用书，也可供初、中级工程技术人员学习参考之用。

全书由杨林娟、季维英主编，张鸿晨副主编。参加本书编写的有杨林娟（绪论、第1章～第3章、第7章）、季维英（第9章～第11章）、张鸿晨（第12章、第13章）、姜宁（第8章）、楚焱芳（第5章）、陈淑侠（第4章）、谭华（第6章）。

在本书的编写过程中，得到了南通职业大学李业农教授的热情帮助和指导，在此深表感谢！

限于编者水平有限，疏漏和欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正！

编 者

2008年10月

目 录

绪论	1
第 1 章 静力学基本概念及受力图	3
1.1 静力学基本概念	3
1.2 力的基本规律	4
1.3 约束与约束反力	6
1.3.1 柔索约束	7
1.3.2 光滑接触面约束	7
1.3.3 光滑圆柱铰链约束	7
1.3.4 固定端约束	9
1.4 物体的受力分析与受力图	10
习题	12
第 2 章 平面力系的平衡	15
2.1 平面汇交力系的合成与平衡	15
2.1.1 平面汇交力系合成的几何法与平衡的条件	15
2.1.2 平面汇交力系合成的解析法	17
2.2 力矩及平面力偶系的平衡	20
2.2.1 力矩和合力矩定理	20
2.2.2 平面力偶理论	21
2.2.3 力线平移定理	23
2.3 平面任意力系的平衡	24
2.3.1 平面任意力系向平面内任一点简化	24
2.3.2 平面任意力系的简化结果分析	26
2.3.3 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	27
2.3.4 平面平行力系的平衡	29
2.4 物体系统的平衡问题	30
2.5 静定与静不定问题	32
2.6 考虑摩擦时的平衡问题	33
2.6.1 滑动摩擦	33
2.6.2 考虑摩擦时的平衡问题	35
2.6.3 滚动摩擦	36
习题	37

第3章 空间力系的平衡	42
3.1 力在空间直角坐标轴上的投影.....	42
3.1.1 直接投影法.....	42
3.1.2 二次投影法.....	42
3.2 力对轴的矩.....	44
3.3 空间力系的平衡条件及平衡计算.....	44
3.3.1 空间任意力系的平衡条件和平衡方程.....	44
3.3.2 空间特殊力系.....	45
3.4 物体的重心.....	47
3.4.1 重心的概念.....	47
3.4.2 重心的坐标.....	48
3.4.3 重心位置的实验法.....	49
习题	50
 第4章 质点和刚体运动学	52
4.1 质点的绝对运动、相对运动和牵连运动.....	52
4.2 速度合成定理.....	53
4.3 刚体的基本运动.....	55
4.3.1 刚体的平动.....	55
4.3.2 刚体的定轴转动.....	56
4.4 刚体的平面运动.....	59
4.4.1 刚体平面运动的概念.....	59
4.4.2 刚体平面运动的分解.....	60
4.4.3 平面运动刚体内各点的速度.....	61
习题	65
 第5章 质点系动力学基础	69
5.1 动量定理.....	69
5.1.1 质点的动量.....	69
5.1.2 质点的冲量.....	69
5.1.3 质点的动量定理.....	70
5.1.4 质点系的动量.....	70
5.1.5 质点系的动量定理.....	70
5.2 动量矩定理.....	73
5.2.1 质点的动量矩.....	73
5.2.2 质点系对轴的动量矩.....	74
5.2.3 质点动量矩定理.....	75
5.2.4 质点系动量矩定理.....	75
5.2.5 动量矩守恒.....	76
5.3 动能定理.....	77

5.3.1	力的功	78
5.3.2	质点的动能	80
5.3.3	质点系的动能	80
5.3.4	质点的动能定理	81
5.3.5	质点系的动能定理	82
5.4	动静法	84
5.4.1	质点惯性力的概念	84
5.4.2	质点的达朗伯原理	84
5.4.3	质点系的达朗伯原理	85
	习题	87
第6章	材料力学基础	89
6.1	材料力学的任务	89
6.2	变形固体的基本假设	89
6.3	内力与应力	90
6.3.1	内力的概念	90
6.3.2	截面法	90
6.3.3	应力的概念	91
6.4	杆件变形的基本形式	92
第7章	轴向拉伸和压缩	93
7.1	拉伸和压缩的概念	93
7.2	轴向拉伸和压缩时的内力	93
7.2.1	轴力	93
7.2.2	轴力图	94
7.3	拉(压)杆横截面上的应力	95
7.4	拉(压)杆的变形	97
7.4.1	纵向变形	97
7.4.2	虎克定律	97
7.4.3	横向变形	98
7.5	材料在轴向拉伸和压缩时的力学性能	99
7.5.1	材料在拉伸时的力学性能	100
7.5.2	材料在压缩时的力学性能	103
7.6	轴向拉伸和压缩的强度计算	104
7.6.1	许用应力和安全系数	104
7.6.2	强度计算	105
	习题	108
第8章	剪切和挤压	110
8.1	剪切和挤压的概念	110

8.2 剪切和挤压的实用计算	110
8.2.1 剪切实用计算	110
8.2.2 挤压实用计算	111
8.3 切应变和剪切虎克定律	113
8.3.1 切应力互等定理	113
8.3.2 剪切虎克定律	114
习题	114
第9章 圆轴扭转	116
9.1 扭转的概念和外力偶矩的计算	116
9.1.1 扭转的概念	116
9.1.2 外力偶矩的计算	116
9.2 扭矩和扭矩图	117
9.3 圆轴扭转时的应力	118
9.3.1 变形几何关系	119
9.3.2 物理关系	120
9.3.3 静力关系	120
9.4 圆轴扭转时的强度计算	121
9.5 圆轴扭转时的变形与刚度计算	123
9.5.1 变形计算	123
9.5.2 圆轴扭转时的刚度计算	123
习题	125
第10章 直梁弯曲	127
10.1 平面弯曲的概念	127
10.1.1 平面弯曲	127
10.1.2 静定梁的基本形式	128
10.1.3 梁上载荷的简化	128
10.2 弯曲时的内力——剪力和弯矩	128
10.3 剪力图和弯矩图	130
10.4 纯弯曲时横截面上的正应力	134
10.4.1 纯弯曲的概念	134
10.4.2 纯弯曲横截面上的正应力	134
10.4.3 简单截面的惯性矩和抗弯截面模量	137
10.5 梁的弯曲强度计算	138
10.6 提高梁的弯曲强度的主要措施	141
10.7 梁的弯曲变形	143
10.7.1 梁的挠曲线	143
10.7.2 挠曲线近似微分方程	144
10.7.3 用叠加法求梁的弯曲变形	144

10.8 梁的刚度条件和提高弯曲刚度的措施	146
10.8.1 梁的刚度条件	146
10.8.2 提高梁的弯曲刚度的措施	147
习题	147
第 11 章 组合变形	151
11.1 应力状态的概念	151
11.1.1 一点处的应力状态	151
11.1.2 应力状态的表示方法	151
11.1.3 应力状态的分类	152
11.2 强度理论简介	152
11.2.1 强度理论概述	152
11.2.2 四种强度理论	153
11.2.3 强度理论的应用	154
11.3 组合变形的概念	155
11.4 拉(压)弯组合时的强度计算	155
11.5 弯扭组合的强度计算	158
习题	162
第 12 章 压杆稳定	165
12.1 压杆稳定的概念	165
12.2 细长压杆的临界力——欧拉公式	166
12.2.1 两端铰支细长压杆的临界力	166
12.2.2 其他支撑条件下压杆的临界压力	167
12.3 压杆的临界应力	168
12.3.1 临界应力	168
12.3.2 欧拉公式的适用范围	169
12.3.3 临界应力的经验公式	169
12.4 压杆的稳定计算	170
12.4.1 压杆的稳定计算	170
12.4.2 提高压杆稳定性的措施	172
习题	173
第 13 章 变形体力学的几个问题	175
13.1 应力集中	175
13.2 动载荷和交变应力	176
13.3 材料的疲劳极限及影响因素	179
13.3.1 疲劳极限	179
13.3.2 影响构件疲劳极限的因素及提高构件疲劳强度的措施	180
13.3.3 构件的疲劳强度计算	181

附录	183
附录 I 截面图形的几何性质	183
附录 II 型钢表	184
附录 III 阅读材料——复合材料	192
附录 IV 习题答案	199
参考文献	204

绪 论

1. 工程力学研究的内容

由于工程力学包含着极其广泛的内容，人们对于工程力学的理解不尽相同。本书所论工程力学包含以下三部分。

- ① 静力学。
- ② 运动学和动力学。
- ③ 材料力学。

其中第一部分研究物体的受力与平衡规律，即根据所研究的物体及其周围物体之间的联系，确定作用在所研究物体上有哪些力以及这些力之间的相互关系。第二部分研究物体的运动规律，分析物体产生运动的原因，建立物体的运动与作用力之间的关系。第三部分研究物体在力作用下的内效应，即研究物体在力作用下的变形规律、由变形引起的物体内部产生的内力、变形与内力之间的关系以及这些内力超过一定限度时，物体将会丧失哪些正常功能。

对于一个工程设计，往往需要综合应用上述三部分的理论和方法，所以工程力学是分析和解决工程问题的基础。

例如图 0-1 所示的单梁吊车，从单梁到减速箱、传动轴、吊钩、拉索的设计，首先要分析在确定的起吊重量下，它们将各受到什么样的力；其次是在不同力的作用下，这些零部件将发生怎样的变形，这些变形对于吊车的正常工作会有什么影响；此外，在突然起吊或起吊过程中突然刹车时，重物将产生怎样的运动以及这种运动对吊车的零部件有什么影响。在整个设计中，首先应用静力学理论和方法求得在确定的起吊重量下吊车系统的各零部件将受到力的大小和方向，然后应用材料力学的理论与方法解得在这些力的作用下，各零部件将发生变形和应力的大小以及这些变形和应力对吊车正常工作的影响；对于突然起吊或起吊过程中突然刹车对吊车各零部件的影响，则要应用运动学和动力学的知识。

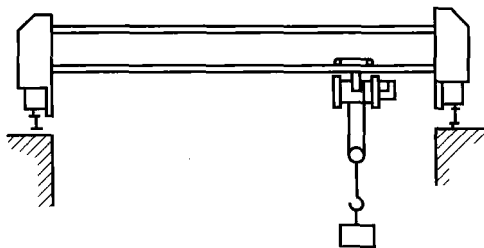


图 0-1 单梁吊车

上述例子中的问题，不单纯属于工程力学，而是与不同的工程设计都有关系。但是工程力学为分析和解决这些工程问题打下必要的基础。

2. 课程的研究对象与模型

工程结构和机械是由若干构件或零件组成的。在机械力（简称力）的作用下，只有每一个构件或零件都正常工作，才能保证整个结构和机械整体的正常工作。因此，工程力学的研

研究对象是一个个的构件或零件，主要是杆件。

对于工程力学研究的对象，常被抽象为两种模型：刚体和变形体。实际物体受力后都要发生不同程度的变形，但在绝大多数工程问题中这种变形是很小的。因此，当分析物体的运动和平衡规律时，这种微小变形的影响是很小的，故可忽略不计，这时的物体被抽象为“刚体”。当分析构件的强度、刚度、稳定问题时，由于这些问题与变形密切相关，因而即使是微小的变形也必须加以考虑，这时的物体被抽象为“变形体”。

本课程中所涉及的研究对象可能是相同的，但是，在研究不同的问题时，所采用的模型则是不同的。本书的静力学、运动学和动力学部分，主要研究物体的平衡与运动规律，故其模型为刚体。材料力学部分在研究与变形有关的问题时，其模型为变形体。

第 1 章 静力学基本概念及受力图

本章主要介绍静力学基本概念、公理和物体受力分析的方法。重点是力的基本概念、静力学公理、物体的受力分析和正确画出物体的受力图，为解决静力平衡条件下求解未知力问题奠定基础。

1.1 静力学基本概念

1. 力的概念

力的概念是人们在长期劳动生产和生活实践中逐渐建立起来的。例如推车、抛物、拧螺母都要用力；同样，机车牵引列车由静止到运动，拉伸试验机将试件拉长等，也是力的作用。在力学中，力是物体间的相互作用。

力对物体的作用会产生两种效应。一种是外效应，指物体的运动状态发生变化；另一种是内效应，指物体的外形和尺寸发生改变。静力学研究力的外效应，材料力学研究力的内效应。

力对物体的作用效果取决于以下三个要素：力的大小、力的方向、力的作用点。这三个要素中有一个改变时，力对物体作用的效果也随之改变。

力的作用点表示力对物体作用的位置。力的作用位置，实际中一般不是一个点，而往往是物体的某一部分区域。当该区域很小，可以看作一个点时，该点就称为力的作用点，这样的力称为集中力。当力的作用范围比较大时，则称为分布力。分布力有线分布力、面分布力和体分布力。

力的大小反映物体间相互作用的强度，在法定计量单位中，力的单位为牛顿（N）或千牛顿（kN）， $1\text{kN}=1000\text{N}$ 。

力是具有大小和方向的量，所以力是矢量。力的三要素可用带箭头的有向线段示于物体作用点上，如图 1-1 所示。线段的长度表示力的大小，箭头指向表示力的方向，线段的起始点或终点表示力的作用点。本书中用黑体字母表示矢量（例如 $\mathbf{F}$ ），用 F 表示力 $\mathbf{F}$ 的大小。

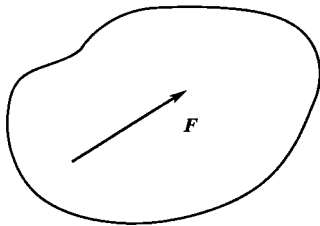


图 1-1 力的表示

力系是指作用在物体上的一组力。如果两个力系对物体的作用效应完全相同，则称这两

个力系互为等效力系。当一个力系与一个力的作用效应完全相同时，把这—个力称为该力系的合力，而该力系中的每一个力称为合力的分力。

2. 刚体的概念

在力作用下形状和大小都保持不变的物体称为刚体。在静力学中，常把研究的物体抽象为刚体。实际上，任何物体在力的作用下都将产生不同程度的变形，不过当构件的变形很小时，略去变形不会影响静力学研究的结果，而使研究的问题大大简化，这种研究方法称为抽象化方法。在解决工程力学问题时，常常将实际物体抽象为力学模型，使问题大为简化，因此能更准确地反映客观事物的本质。

3. 平衡的概念

所谓物体的平衡，是指物体相对于地球保持静止或做匀速直线运动的状态。平衡是相对的、有条件的、暂时的，是物体机械运动的一种特殊形式。

刚体在一个力系作用下处于平衡状态，则此力系称为平衡力系。

1.2 力的基本规律

静力学公理是静力学中最基本的规律。这些规律是人类对经长期的观察和实验所积累的经验加以总结和概括而得到的结论。它的正确性也在实践中得到验证。静力学公理概括了力的一些基本性质，是静力学全部理论的基础。

公理 1 二力平衡公理 受两力作用的刚体，其平衡的充分必要条件是：这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上，如图 1-2 所示。矢量式表示为： $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$

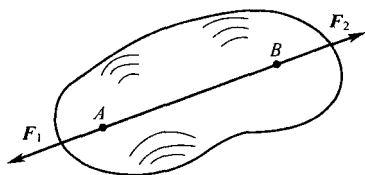


图 1-2 二力平衡

上述条件对于刚体来说，既是必要又是充分的；但是对于变形体来说，仅仅是必要条件。例如绳索受两个等值反向的拉力作用时可以平衡，而受两个等值反向的压力作用时就不能平衡。

工程上将只受两个力作用而平衡的构件称为二力构件。当构件呈杆状时，则称为二力杆。二力构件的受力特点是：这两个力的作用线必定沿着两个力作用点的连线，且大小相等，方向相反。如图 1-3 所示的构件 BC，在不计自重时，也可以看作是二力构件。

公理 2 加减平衡力系公理 在刚体的原有力系中，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效果。

这个公理常被用来简化已知力系，后面许多定理的推导都要用到。作为公理 2 的应用，给出下面的推论。

推论 力的可传性原理 作用于刚体上的力可以沿其作用线移至刚体内任一点，而不改变原力对刚体的作用效应。这称为力的可传性原理。

证明 设有力 $\mathbf{F}$ 作用于小车上的 A 点，如图 1-4(a) 所示。在力 $\mathbf{F}$ 的作用线上任取另一点 B，并在 B 点加一平衡力系 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ ，使 $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 = \mathbf{F}$ ，如图 1-4(b)。根据公理 2 可知，

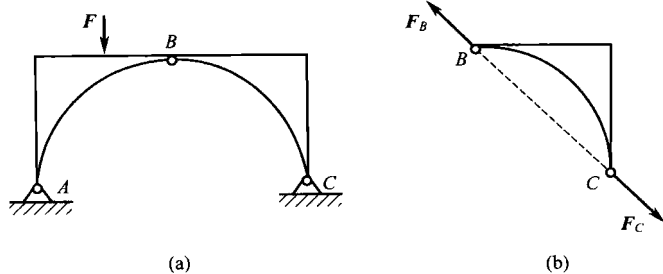


图 1-3 二力构件

力系 F 、 F_1 、 F_2 对刚体的作用，与力 F 单独作用的效果相同。由于 F_2 与 F 等值、反向、共线，组成一平衡力系，据公理 2，可以将它们从刚体上去掉，如图 1-4(c)。于是，刚体上就只剩下力 F_1 、 F_1 的大小、方向和 F 相同，这就相当于把力 F 沿其作用线移到了 B 点。经验也告诉我们，用力 F 在 A 点推小车，与用力 F 在 B 点拉小车，两者的作用效果是相同的。应注意，这个推论只适用于刚体，而不适用于变形体。

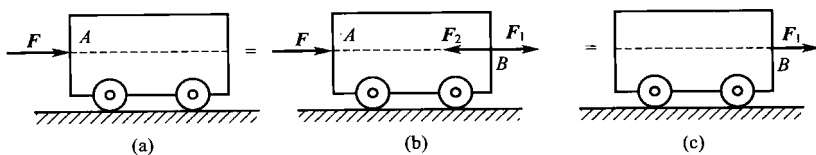


图 1-4 力的可传性

公理 3 力的平行四边形公理 作用于物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力也作用于该点。合力的大小和方向，用这两个分力为边所构成的平行四边形的对角线表示。

设在刚体 O 点处作用有 F_1 、 F_2 两个力，如图 1-5(a)，以这两个力为边作平行四边形 OACB，则对角线 OC 即为 F_1 与 F_2 的合力 R ，或者说，合力矢 R 等于原来两个力矢 F_1 与 F_2 的矢量和，可用矢量式来表示

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

为了便于求两个汇交力的合力，也可不画整个平行四边形，而从 O 点作一个与 F_1 大小相等方向相同的矢线 OA，再过 A 点作一个与 F_2 大小相等方向相同的矢线 AC，则矢线 OC 即表示合力 R 的大小和方向，如图 1-5(b) 所示。这种求合力的方法称为力的三角形法则。必须注意，力三角形中的每一力矢只具有大小、方向意义，而不表示力的作用点或力的作用

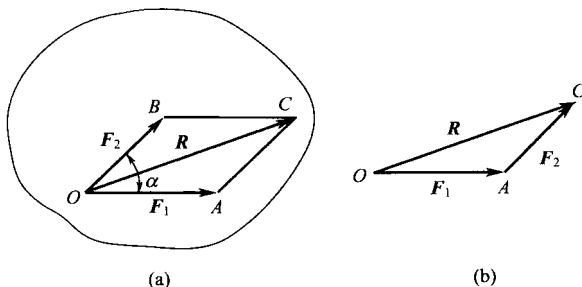


图 1-5 力的合成

线位置。

推论 如果刚体受同一平面的三个互不平行的力作用而平衡，则此三个力的作用线必定汇交于一点。这称为三力平衡汇交定理。

证明 如图 1-6 所示，刚体上 A、B、C 三点上的作用力分别为 F_1 、 F_2 和 F_3 ，其中 F_1 与 F_2 的作用线相交于 O 点，刚体在此三力作用下处于平衡状态。据力的可传性原理，将力 F_1 和 F_2 合成得合力 R_{12} ，则力 F_3 应与 R_{12} 平衡，因而 F_3 必与 R_{12} 共线，即 F_3 作用线也通过 O 点，即 F_1 、 F_2 、 F_3 汇交于 O 点。

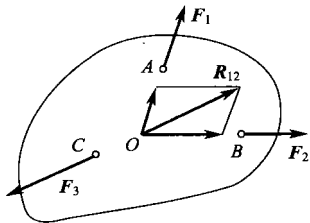


图 1-6 三力汇交

公理 4 作用与反作用公理 两个物体间的作用力与反作用力，总是大小相等、方向相反、沿同一直线分别作用在两个物体上。

作用力与反作用力同时出现，同时消失。但必须注意，作用力与反作用力不能互相抵消，它们不是一对平衡力，因为它们分别作用在两个物体上。

1.3 约束与约束反力

在机械及工程结构中，各构件都以一定的方式互相连接，形成一个承受外力的整体。如图 1-7 所示的悬臂吊车，横梁 AB 被铰链 B 与拉杆 BC 固定，拉杆 BC 由销钉与铰链 C 固定，小车只能沿梁 AB 运动。它们之间互相连接的方式不同，相互间的作用力也不同。

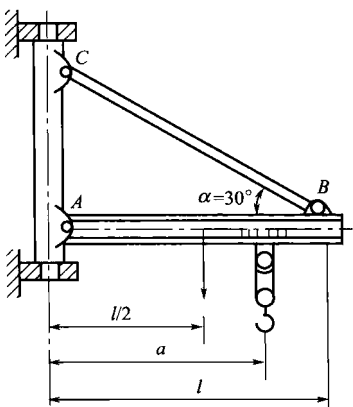


图 1-7 悬臂吊车示意

在工程力学中，通常根据物体在力的作用下的运动情况，把物体分成两大类。凡是可以沿空间任何方向运动的物体称为自由体。如飞行中的飞机。凡是受周围物体的限制而不能沿某些方向运动的物体称为非自由体。如用钢索悬吊的重物受到钢索限制，不能下落；列车受

钢轨限制，只能沿轨道运动等。一个物体的运动受到周围物体的限制时，这些周围物体就称为该物体的约束，而这个受到约束的物体称为被约束物体。

既然约束限制着物体的运动，所以约束必然对物体有力的作用，这种力称为约束反力。约束反力是阻碍物体运动的力，所以属于被动力。促使物体运动的力称为主动力，如地球的引力、拉力等，其大小和方向通常是已知的。

约束反力作用点位置 and 方向一般是已知的，其确定准则如下。

- ① 约束反力的作用点就是约束与被约束物体的相互接触点。
- ② 约束反力的方向总是与约束所能限制的被约束物体的运动方向相反。

至于约束反力的大小，一般是未知的。在静力学问题中，主动力和约束反力组成平衡力系，因此可以利用平衡条件来求得约束反力。

物体间的约束形式多种多样。在工程上，把一些常见的约束进行简化、分类，使之成为力学模型。下面先介绍四种约束及其反力的确定。

1.3.1 柔索约束

工程中钢丝绳、带、链条、尼龙绳等都可以简化为柔软的绳索，简称柔索。这类约束只能承受拉力，所以它给物体的约束反力也只能是拉力。如图 1-8 所示，约束反力的作用点在约束与被约束物体的接触点，约束反力的方向沿约束背离被约束物体。约束反力用 F_T 表示。图 1-9 所示为带传动，带对两个带轮的约束反力都是拉力，沿带与轮缘的切线方向，背离带轮。

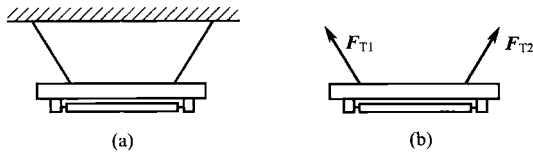


图 1-8 柔索

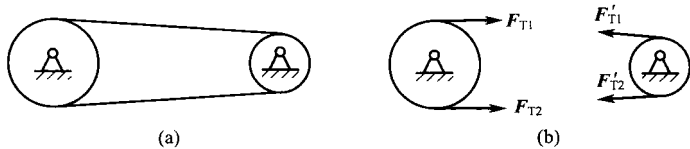


图 1-9 带传动

1.3.2 光滑接触面约束

如果两个物体接触面之间的摩擦力很小，可忽略不计，就构成光滑接触面约束。这种约束只能限制物体沿着接触点处的公法线朝接触面方向运动，而不能限制其他方向的运动。因此，约束反力方向必定是沿着接触面的公法线方向，并且指向物体。约束反力用 F_N 表示，如图 1-10 所示。

1.3.3 光滑圆柱铰链约束

光滑圆柱铰链约束由两个带有圆孔的构件并由圆柱销钉连接构成。最常见的光滑圆柱销