



928752

高等学校工程专科教材

工程力学

(理论力学)

庄立球 编



高等教育出版社

高等学校工程类教材

工程力学

(理论力学)

庄立球 编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是根据1990年8月国家教育委员会颁发的“高等学校工程专科工程力学课程教学基本要求”理论力学部分(60学时)编写的。本书与高等教育出版社1994年5月出版的余家琪编《工程力学(材料力学)》配套,也可单独使用,适合高等工程专科非机、非土(或近机、近土)各专业作教材。两书合计120学时,如果舍去两书中少数与专业需要不密切的部分,学时还可适当减少。

本书分三篇:静力学、运动学和动力学,各篇内容叙述简明扼要,各章后配有适量的思考题和习题,习题都附有答案,便于学生作题后核对和教师批改作业时参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学:理论力学 / 庄立球编. —北京:高等教育出版社, 1995

ISBN 7-04-005209-1

I.工… II.庄… III.①工程力学②理论力学 IV.TB
12:031

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第01445号

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行
北京市通县觅子店印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张 10.5 字数 270 000

1995年4月第1版 1995年5月第1次印刷

印数0001— 2 594

定价 6.70 元

序

本书是根据1990年国家教育委员会审订的高等学校工程专科《工程力学课程教学基本要求》结合1993年国家教委高等工程专科力学课程教材编审组在上海召开的力学课程教学基本要求讨论会的精神编写的，适合作高等学校工程专科非机、非土（或近机、近土）类专业理论力学课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

在编写中，考虑到高等工程专科教育培养应用型人才的总目标，遵循“以应用为目的”，“以必需够用为度”，“掌握概念，强化应用”的原则，精选教材内容，力图反映理论力学教学实践的经验。

北京科学技术大学纪炳炎教授对本书稿进行了审阅，提出了许多宝贵的意见，使本书的质量得以进一步提高，编者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有某些疏漏和缺点，恳切希望读者批评斧正，并将意见寄给编者。

编者 庄立球

1994年7月于厦门集美航海学院

目 录

绪言	1
----	---

第一篇 静 力 学

引言	2
第一章 静力学的基本概念和公理	3
§ 1-1 力的概念	3
§ 1-2 静力学公理	4
§ 1-3 约束和约束反作用力	6
§ 1-4 物体的受力分析	11
思考题	16
习题	18
第二章 汇交力系	24
§ 2-1 平面汇交力系合成的几何法	24
§ 2-2 平面汇交力系平衡的几何条件	25
§ 2-3 汇交力系合成的解析法	26
§ 2-4 汇交力系平衡的解析条件	30
思考题	36
习题	37
第三章 力矩与平面力偶	42
§ 3-1 力对点的矩	42
§ 3-2 平面力偶理论	44
§ 3-3 平面力偶系的合成和平衡条件	47
思考题	50
习题	51
第四章 平面任意力系	55
§ 4-1 平面任意力系向作用面内一点简化	56
§ 4-2 平面任意力系的简化结果	60

§ 4-3 平面任意力系的平衡条件	61
§ 4-4 平面平行力系的平衡方程	67
§ 4-5 刚体系的平衡·静定与超静定问题	69
§ 4-6* 简单平面桁架的内力计算	77
思考题	82
习题	83
第五章 摩擦	93
§ 5-1 滑动摩擦	93
§ 5-2 考虑摩擦时的平衡问题	98
§ 5-3 滚动摩擦的概念	102
思考题	104
习题	105
第六章 空间任意力系	110
§ 6-1 力对轴之矩	110
§ 6-2 空间任意力系的平衡方程	112
§ 6-3 重心	118
§ 6-4 用实验方法测定重心的位置	121
思考题	123
习题	123

第二篇 运 动 学

引言	129
第七章 点的运动	131
§ 7-1 点的运动的矢径表示法	131
§ 7-2 点的运动的直角坐标表示法	133
§ 7-3 点的运动自然表示法	139
思考题	148
习题	148
第八章 刚体的基本运动	153
§ 8-1 刚体的平动	153
§ 8-2 刚体的定轴转动	155

§ 8-3	定轴转动刚体内各点的速度和加速度	157
§ 8-4	简单轮系的传动比	161
	思考题	163
	习题	164
第九章	点的合成运动	167
§ 9-1	相对运动、绝对运动和牵连运动	167
§ 9-2	点的速度合成定理	169
§ 9-3*	加速度合成定理	174
	思考题	178
	习题	179
第十章	刚体的平面运动	184
§ 10-1	刚体的平面运动概述	184
§ 10-2	平面运动分解为平动和转动	185
§ 10-3	求平面图形上各点速度的基点法·速度投影定理	188
§ 10-4	求平面图形上各点速度的瞬心法	194
§ 10-5*	平面图形上各点的加速度	200
	思考题	202
	习题	203

第三篇 动 力 学

引言	210	
第十一章	质点动力学的基本方程	211
§ 11-1	牛顿运动定律	211
§ 11-2	质点运动微分方程	212
§ 11-3	质点动力学的两类基本问题	214
	思考题	221
	习题	222
第十二章	动量定理	228
§ 12-1	动量定理	228
§ 12-2	质心运动定理	235
	思考题	239

习题	240
第十三章 动量矩定理	245
§ 13-1 质点动量矩定理	245
§ 13-2 质点系动量矩定理	250
§ 13-3 刚体绕定理转动微分方程	256
思考题	263
习题	264
第十四章 动能定理	270
§ 14-1 功和功率	270
§ 14-2 动能	279
§ 14-3 动能定理	281
思考题	287
习题	288
第十五章 达朗伯原理	295
§ 15-1 惯性力·质点的达朗伯原理	295
§ 15-2 质点系的达朗伯原理	298
§ 15-3 刚体惯性力系简化	300
思考题	308
习题	309
*第十六章 动力学小结	315

绪 言

理论力学是研究物体机械运动规律的科学。

机械运动即物体在空间的位置随时间的变化。它包括移动、转动、流动和变形等等，也包括静止。静止或平衡是机械运动的一种特殊情况。

理论力学的研究对象是工程中的常规物体。它们通常被抽象为质点、质点系和刚体。

质点是具有一定质量而不计尺寸大小的物体；质点系是指包含两个或两个以上的质点的力学系统；刚体是在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。

工程中的常规物体往往是相当复杂的，在应用力学原理解实际问题时，必须抓住起主要作用的因素，摒弃或暂时摒弃一些次要因素，从而将实际的常规物体抽象为力学模型。质点、质点系和刚体就是三个最基本的力学模型。以地球为例，简要说明如何将一个常规的物体抽象为力学模型。研究地球在太阳系中的运动轨道时，地球的大小(半径约为 6370 公里)比其轨道半径(半径为一个天文单位，即约 1.5×10^8 公里)要小得多。因此可将地球抽象为质点。在研究人造卫星绕地球的运行轨道时，地球的大小就不能不考虑，但变形可以忽略，因此可将地球抽象为刚体。由此可见，同一个物体在不同情况下可抽象为不同的力学模型，这完全决定于所研究的问题的性质。

本书只研究质点、质点系和刚体的一些最基本的力学规律，包括静力学、运动学和以牛顿运动定律为基础的动力学中的基本原理。这些原理在工程技术中有广泛的应用，也是学习一些后续课程(例如材料力学、结构力学、机械原理、机械零件)的基础，因此，理论力学是一门重要的技术基础课程，希望同学们认真学习。

第一篇 静力学

引 言

静力学是研究物体受力作用时平衡规律的科学。

所谓平衡，是指物体相对于地球保持静止或作匀速直线运动的状态。

静力学主要研究以下三个问题：

1. **物体的受力分析** 将研究对象单独取出，分析它受哪些力的作用，并确定每个力的作用点和方向，这个过程称为物体的受力分析。

2. **力系的简化** 作用在物体上的一组力称为力系。若作用于同一刚体的两组不同力系，能分别使该刚体的运动状态产生完全相同的变化，则称这两组力系互为等效力系。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。

3. **建立各种力系的平衡条件** 在一定的条件下，作用于刚体上的力系能使刚体处于平衡状态。使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系。平衡力系应满足的条件称为平衡条件。

第一章 静力学的基本概念和公理

§ 1-1 力的概念

力的概念来自实践。人们在劳动中直觉意识到自己在用力。早在远古时代，我们的祖先在《墨经》中就把力总结为“力，形之所以奋也。”就是说，力是使物体奋起运动的原因。经过长期的生产实践，人类不断地加深了对力的认识，特别是伽里略和牛顿的贡献，使力已有了严格的定义：

力是物体间相互的机械作用，能使物体的机械运动状态发生变化或使物体产生变形。

力对物体作用的效应取决于三个要素：大小、方向和作用点。实践证明，力可以按照平行四边形法则进行合成，因此，力是矢量。如图 1-1 所示，我们用矢量 \overrightarrow{AB} 表示力的三要素。矢量的长度(AB)表示力的大小；矢量 \overrightarrow{AB} 的方向表示力的方向；矢量 \overrightarrow{AB} 的始端(点 A)表示力的作用点。矢量 \overrightarrow{AB} 所沿着的直线(图 1-1 上的虚线)表示力的作用线。通常用黑体字 F 表示力矢量，而用普通字母 F 表示力的大小。若以 F^0 表示沿矢量 F 方向的单位矢量，则力矢 F 可写成

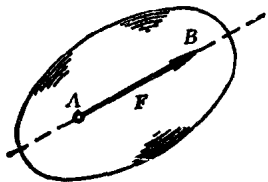


图 1-1

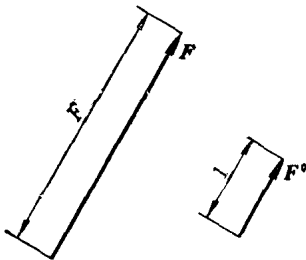


图 1-2

$$F = F F^0$$

(1-1)

即力的矢量可以用它的模(力的矢量的大小)和单位矢量的乘积表示(图1-2)。

在国际单位制(SI)中,以“牛顿”作为力的单位,单位符号为N。有时也以“千牛顿”为单位,单位符号为kN。在以往的工程单位制中,力的单位采用公斤,单位符号为kgf, $1\text{kgf} = 9.80\text{N}$ 。本书采用国际单位制。

§ 1-2 静力学公理

静力学中已被实践反复证实并被认为是无须再证明的真理,称为静力学公理。它们是研究静力学的理论基础。

公理一(二力平衡公理) 作用于刚体的二力,其平衡的充分必要条件是:此二力大小相等,方向相反,作用线沿同一直线。

这公理的条件对于非刚体是不充分的。例如,软绳受两个等值反向的拉力作用可以平衡,而受两个等值反向的压力作用就不能平衡。

公理二(增减平衡力系公理) 在作用于刚体的任一力系上,增加或减去一平衡力系,原力系的效应不变。

这公理只对刚体才成立,对变形体增加或减去一平衡力系,其变形和物体内部单位截面面积上的内力都将改变。

由公理一、二可以导出如下重要推论:

推论1(力的可传性) 作用于刚体上的力可沿其作用线移至刚体的任一点,而不改变此力对刚体的效应。

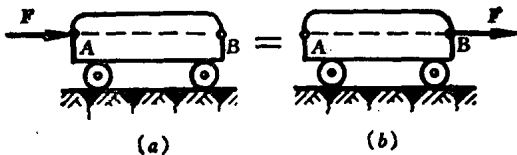


图 1-3

这推论可直接由实践验证，例如在 A 点以力 F 推和在 B 点以力 F 拉车的力学效应相同(图1-3)。

根据这推论，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。但是，此结论完全不适于变形体。对于变形体，力的作用点与作用效果密切相关。作用点不得任意改变的矢量，称为定位矢量，作用于变形体的力是定位矢量。

公理三(力的平行四边形法则) 作用于物体同一点上的力可以合成为一个合力。合力作用点仍在该点，合力的大小和方向由以两分力为邻边构成的平行四边形的对角线确定。

例如，作用于 O 点的二力 F_1 、 F_2 的力矢 \vec{OA} 、 \vec{OB} 构成一平行四边形 $OACB$ ，则对角线 \vec{OC} 就代表合力矢 R (图1-4a)。显然，只作出力三角形 OAC (图1-4b)，也可求得合力 R ，这种求合力的方法称力三角形法则。

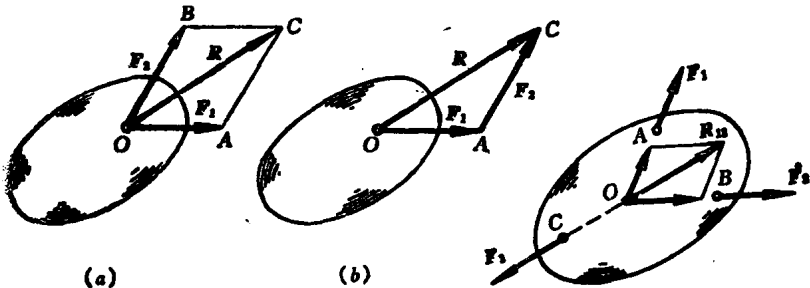


图 1-4

图 1-5

推论2 (三力平衡汇交定理) 作用于刚体上三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则此三力必在同一平面内，且第三个力的作用线也通过汇交点(图1-5)。这个结论亦称三力平衡条件。

公理四(作用和反作用定律) 两物体间的相互作用力，总是大小相等，方向相反，作用线沿同一直线。

必须注意，作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体上；而公理一中的二力平衡是作用在同一物体上的力，因此，不能把作用力和反作用力看成是一对平衡力。

公理三、四都是既适用于刚体，也适用于变形体。

公理五(刚化公理) 若可变形体在已知力系作用下处于平衡，则可将此受力体视为刚体，其平衡不受影响。

公理五主要用于变形体的平衡。刚体平衡的充分和必要条件只是变形体平衡的必要条件，而非充分条件。关于这一点，可以软绳平衡为例说明之，本书从略。

§ 1-3 约束和约束反作用力

可以在空间任意运动的物体，称为自由体，例如航行中的飞机。在空间的运动受到限制的物体，称为非自由体，例如在钢轨上行驶的火车、在轴承中的转轴等等。非自由体之所以不自由，是因为它的某些运动受到周围物体的限制。对非自由体的运动所加的限制称为约束，例如，钢轨对于火车、轴承对于转轴都是约束。

非自由体与约束在接触点间存在着物体间的相互作用，即力的作用。约束作用于非自由体的力称为约束反作用力，亦称约束力或约束反力。在图1-6中，火车所受的铅垂向上的支承力 N_A 、 N_B ，就是钢轨对火车的约束反力，不难想象，如果拆去钢轨，火车在重力 W 的作用下，将沿铅垂方向向下运动。这一运动方向恰好和约束反力 N_A 、 N_B 的方向相反。由此，我们可得到一个一般性的结论：约束反力的方向总是与约束所阻碍的运动的方向相反。

分析火车的受力不难发现，作用在一个物体上的力，除约束反力外，还有一种主动地作用于物体，以改变其运动状态

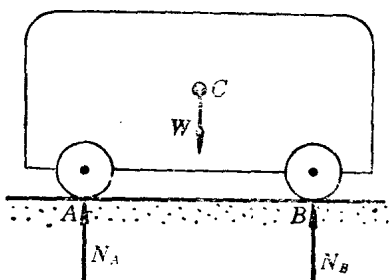


图 1-6

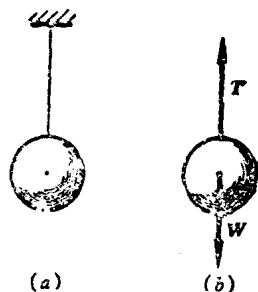


图 1-7

的力，称为主动力，工程中也称为载荷。如火车所受的重力 W 就是主动力。工程中常见的主动力有重力、电磁力、风力、气体压力等等。主动力和约束反力在性质上有根本差别，一般地说，约束反力的大小与被约束物体的运动状态以及主动力有关。在静力学中，约束反力的大小要根据平衡条件(见第二章)才能确定。而主动力的大小与方向均与约束无关，而且可预先独立地测定。

下面介绍几种常见约束及其约束反力的特点。

1. 柔索约束

绳索、链条和皮带通称为柔索，它只能承受拉力作用。因此柔索对物体的约束反力 T 必定沿拉直柔绳的方向，且只能是拉力(图 1-7)。

2. 光滑接触面约束

两个物体互相接触，若接触面非常光滑，摩擦力小到可略去不计，则这样的约束称为光滑接触面约束。这种约束限制被约束物体沿接触点的公法线方向进入接触面的运动。因此光滑接触面约束的约束反力 N 的作用线通过接触点，沿两接触面的公法线方向，指向被约束物体(图 1-8)。

3. 光滑圆柱形铰链

用圆柱销 C 将钻有相同销孔的构件 A 、 B 连接在一起，即成光

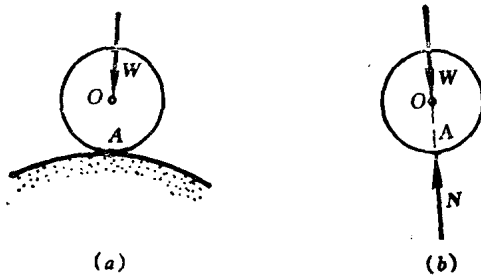


图 1-8

滑圆柱形铰链(图1-9a), 简称铰链。其简图如图1-9b所示。被连接构件A、B可绕销钉C的轴线相对转动, 但不能相对移动。为研究方便, 可认为销钉C留在任意一个被连接构件(例如构件A)的销孔中并与之固结, 这样, 该铰链被拆成两个构件。如略去摩擦和销钉与被连接构件之间的间隙, 可将铰链简化为两个同一直径的光滑圆柱面接触。销钉C作用于构件B的约束反力 N 必通过接触点 K , 作用线沿 K 点的公法线方向, 即通过铰链中心(图1-9c)。但接触点 K 的位置与构件B所受的主动动力有关, 单凭铰链本身结构不能确定, 因而约束反力 N 作用线的方向也不能确定。对于这种方向不能确定的约束反力, 通常用通过铰链中心的两个正交分力 X 、 Y 表示(图1-9d)。

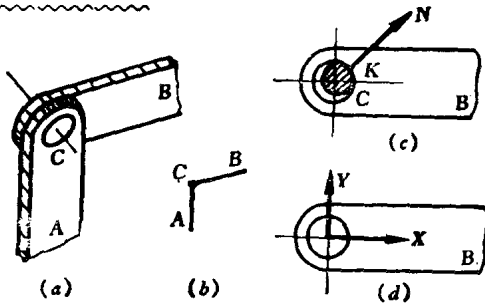


图 1-9

4. 固定铰链支座

将光滑圆柱形铰链中的任一个构件(例如构件 A)固定在地面或机架上,即成固定铰链支座,简称固定支座(图 1-10a),其简图如图 1-10b 所示。它与光滑圆柱形铰链具有同样的约束特性,即约束反力 N 的作用线不能预先确定,但约束反力垂直于销钉轴线并通过铰链中心,故也用两个大小未知的正交分力 X 、 Y 表示,如图 1-10b 所示。

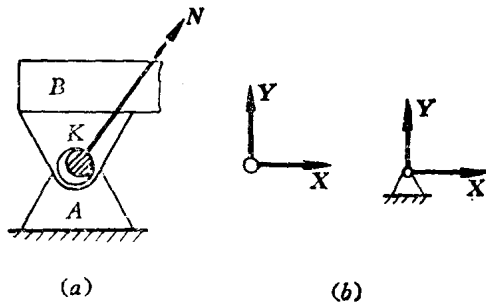


图 1-10

机器中的轴承(图 1-11a)同样具有圆柱形铰链约束的特征,轴承对轴的约束反力 N 的方向也不能预先确定,但其作用线必垂直于轴线并通过轴心,也用两个大小未知的正交分力 X 、 Y 表示,如图 1-11b 或 c 所示。

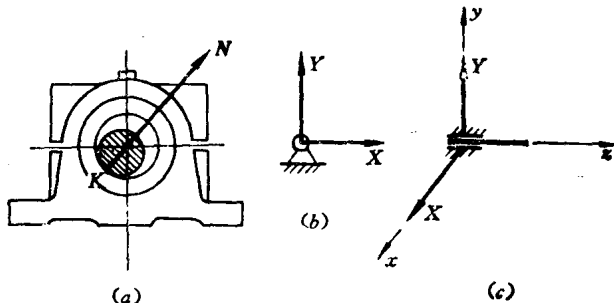


图 1-11