

高等学校教学参考书

理论力学导学

李传起 主编



中国矿业大学出版社

the guide for theoretical mechanics

内容简介

本书对理论力学的主要内容进行了归纳和总结,主要包括静力学、运动学、动力学、分析力学四个部分,共十六章。本书可作为理工科各专业理论力学学习者的辅导教材,也可供高校相关专业的师生、中等专业学校教师及工程技术人员参考。

责任编辑 褚建萍

图书在版编目(CIP)数据

理论力学导学/李传起主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.3

ISBN 7-81070-143-6

I. 理… II. 李… III. 理论力学-概论 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 11295 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 10 字数 256 千字

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印数 1~3000 册 定价 15.80 元

前 言

理论力学是理工科各专业的重要基础理论课,它主要是讨论物体运动变化的基本规律,系统介绍运用高等数学解决物理问题的基本方法,培养学生的抽象思维能力,对学习者将来的工作和科研有着重要的指导作用。

近年来,随着电子技术和计算机技术的迅速发展,高校各专业纷纷开设大量电子类课程。相形之下,基础理论课显得繁复枯燥,在一定程度上影响了学生的学习兴趣。因此,提高理论力学的可读性,增强应用性十分必要。编者在参阅大量理论力学教材、广泛听取学生对本课程的建议和意见的基础上,编写出版了这本《理论力学导学》。

全书包括静力学、运动学、动力学、分析力学四个部分,工科学以前三部分为重点,理科学生则以后三部分为主要学习内容。

本教材以简单明晰的语言叙述,指导学生掌握理论力学的基本概念和主要定理定律;精选典型例题,以灵活多样的方法求解,进行解题小结。全书共分十六章,各章均由学习要点、基本内容、典型题解、自我测试题四部分组成,最后附有三套综合测试题,便于学生学习、复习和测试。

南京气象学院金明德教授、赵德林老师十分关心本书的编写工作,对本书的出版给予了全面协助和大力支持,编者在此谨表诚挚的谢意。

限于编者水平,本书缺点和误漏之处在所难免,竭诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

一九九九年十月于南京

目 录

第一篇 静力学

第一章 静力学基本知识和受力分析.....	1
学习要点.....	1
基本内容.....	1
典型题解.....	5
自我测试题.....	9
第二章 平面力系和力偶理论	12
学习要点	12
基本内容	12
典型题解	19
自我测试题	28
第三章 空间力系和重心	33
学习要点	33
基本内容	33
典型题解	41
自我测试题	47

第二篇 运动学

第四章 质点的简单运动	52
学习要点	52
基本内容	52
典型题解	55
自我测试题	67
第五章 质点的合成运动	70

学习要点	70
基本内容	70
典型题解	72
自我测试题 A 卷	82
自我测试题 B 卷	86
第六章 刚体的基本运动	90
学习要点	90
基本内容	90
典型题解	94
自我测试题	102
第七章 刚体的平面运动	107
学习要点	107
基本内容	107
典型题解	111
自我测试题 A 卷	123
自我测试题 B 卷	127

第三篇 动力学

第八章 质点动力学基本定律	131
学习要点	131
基本内容	131
典型题解	134
自我测试题	141
第九章 动量定理及守恒定律	145
学习要点	145
基本内容	145
典型题解	149
自我测试题 A 卷	156

自我测试题 B 卷	159
第十章 动量矩定理及守恒定律	163
学习要点	163
基本内容	163
典型题解	169
自我测试题 A 卷	178
自我测试题 B 卷	180
第十一章 动能定理及机械能守恒	185
学习要点	185
基本内容	185
典型题解	190
自我测试题 A 卷	201
自我测试题 B 卷	203
第十二章 刚体动力学	208
学习要点	208
基本内容	208
典型题解	211
自我测试题	220
第十三章 非惯性系和惯性力	222
学习要点	222
基本内容	222
典型题解	224
自我测试题	237
动力学综合测试题	239

第四篇 分析力学

第十四章 虚功原理及达朗伯方程	244
学习要点	244

基本内容·····	244
典型题解·····	249
自我测试题·····	255
第十五章 拉格朗日(Lagrange)方程 ·····	259
学习要点·····	259
基本内容·····	259
典型题解·····	261
自我测试题·····	270
第十六章 哈密顿正则理论 ·····	273
学习要点·····	273
基本内容·····	273
典型题解·····	279
自我测试题·····	290

附录 综合测试

A 卷 ·····	293
B 卷 ·····	298
C 卷 ·····	302
主要参考书目 ·····	307

第一篇 静力学

第一章 静力学基本知识和受力分析

一、学习要点

(1) 掌握静力学研究的对象——力系的平衡,学会三种主要问题的处理方法:① 物体的受力分析;② 力系的等效变换;③ 力系的平衡条件。

(2) 完整准确地理解力的概念,力的三要素——大小、方向、作用点。

(3) 熟记静力学公理;力的平行四边形法则、二力平衡、加减平衡力系、作用与反作用、刚化原理等。

(4) 理解约束概念,准确分析约束反力。

(5) 正确分析物体受力,准确绘出受力分析图。

二、基本内容

1. 静力学的基本概念

物体的平衡 指物体相对于周围环境或其他物体保持静止或匀速直线运动的状态。物体平衡是相对的、暂时的、局部的。

力系的平衡条件 作用在物体上,使得物体处于平衡状态的一群力之间的内在联系。讨论物体平衡就是讨论物体受力的平衡。

力系的简化 将物体所承受的复杂实际力系等效为一个效果相同的简单力系。

刚体 指在任何力作用下永不变形的物理模型。它是实际物体抽象出来的理想物体,其特征是刚体静止或运动时内部任意两点的相对位置不变。

质点 指忽略了形状和大小而只考虑其质量的物体,质点是一种理想模型,质点模型的条件是物体线度与所讨论的空间尺度相比可忽略不计。

质点系 指由有限个或无限个有一定内在联系的质点所组成的质点群,也称机械系统。若系中各质点相对位置不变,则称不变质点系。刚体为不变质点系。

力 指物体间的相互作用。这种作用使得受力物体的运动状态发生变化。应注意物体间的相互作用是多种多样的(热、电磁等),但力只是机械作用。

力的外效应和内效应 物体在力的作用下改变了整体的运动状态,称为外效应或运动效应,同时也使物体自身的形状发生了变化,称为内效应。

力的三要素 指大小、方向和作用点。图 1-1 中:线段 AB 长为大小,箭头指向为方向, A 为作用点, l 为力的作用线。

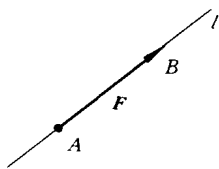


图 1-1

若一群力的作用线在同一平面内,称平面力系;若经过同一点,称汇交力系;若相互平行,称平行力系。非平面力系为空间力系,非平行力系为任意力系(第二章详述)。

等效力系 若两力系各自作用于同一物体时,效果完全等同,该二力系等效。

2. 静力学公理

二力平衡公理 作用于刚体上的二力平衡的充分必要条件是:该二力大小相等,方向相反,作用线为同一直线,如图 1-2 所示。

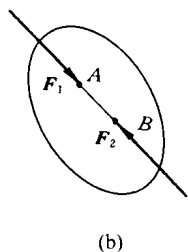
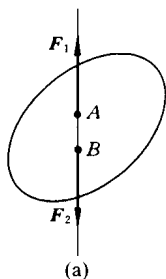


图 1-2

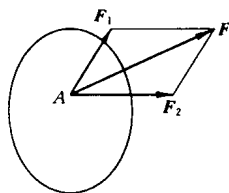


图 1-3

力的平行四边形法则 作用于同一点的两个力的合力(等效力)的作用点不变,大小和方向由该二力构成的平行四边形的对角线表示,如图 1-3 所示。用矢量式表示为

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

合力 $\mathbf{F}$ 是分力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 的矢量和。

该法则是定量讨论力的合成与分解的重要依据。

推论(三力平衡汇交定理) 当刚体受三力平衡时,若其中二力的作用线相交于一点,则第三力也交于同一点,且三力的作用线在同一平面内,其中任意二力的合力与第三力等大反向。

加减平衡力系公理 在作用于刚体的任意力系上添加或撤去任何平衡力系,新力系与原力系对刚体的作用效果不变。

推论 作用于刚体的力可沿其作用线滑动,而不改变其对刚体的作用。这叫力的可传性原理。力是滑动矢量。

作用与反作用定律 即牛顿第三定律。两物体之间的相互作用同时存在,大小相等,方向相反,作用在同一直线上。

注意 该二力的作用对象不同,作用效果也不同。在做隔离体受力分析时,不可同时绘出。如图 1-4 所示,绳



图 1-4

对物体的拉力 T 与物体对绳的拉力 T' 是相互作用力;地球对物体的引力 G 与物体对地球的引力 G' 是相互作用力。

刚化公理 变形体在受到已知力系的作用下处于平衡状态,若将该物体抽象为刚体(刚化),则平衡状态不受影响。

注意 变形体平衡换成刚体也平衡,但刚体平衡换成变形体则不一定平衡。如柔性绳受拉力平衡时,换成刚性杆受同样拉力也平衡;但刚性杆受推力平衡时,换成柔性绳受同样推力则不平衡。

3. 主动力与约束反力

主动力 促使物体运动或使物体具有运动趋势的力。

约束体 提供限制物体运动(位置和速度)的周围其他物体,其约束作用通过约束反力表现出来。

约束反力 当约束体受到物体施加的力的作用时,会对物体施以等大反向的反作用力,简称反力。反力取决于约束体本身的性质、主动力和物体的运动状态。

柔性约束 只承受拉力、不承受压力和抗弯曲力的约束。反力作用点在连接点或假想切割处,方向沿轴线背离物体,如图 1-5 所示,常用字母 T 表示。

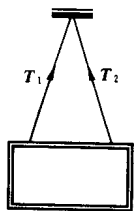
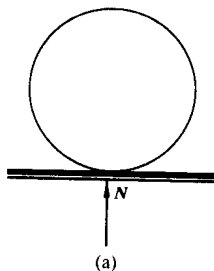
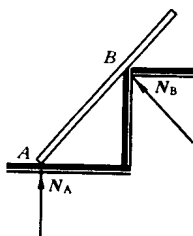


图 1-5



(a)



(b)

图 1-6

光滑接触面约束 接触面视为理想光滑面形成的约束(图 1-6)。只承受压力,不承受拉力,反力作用点在接触处,方向沿

接触表面在接触处的公法线上,指向物体,常用字母 N 表示。

光滑铰链约束 接触点可转动但通常不能平移的约束。反力大小和方向都是未知量,其约束反力以分力形式给出。当主动力在同一平面内时,铰链反力也在该平面内,此时,只有两个分力。

解除约束原理 当非自由物体在约束体和主动力共同作用下平衡时,将其部分或全部约束撤去,代之以相应的约束反力,则物体的平衡不受影响。受约束的非自由体的平衡问题即是主动力与约束反力的平衡问题。

4. 物体的受力分析

解决受力分析问题的一般思路是:

(1) 根据问题的已知条件和题意要求确定讨论对象,正确绘出物体示意图。对象可以是单个物体,也可以是物体系统。

(2) 详细分析讨论对象受到周围哪些物体的作用,绘出主动力和约束反力。必须注意约束反力的位置和方向。

(3) 可根据二力平衡、三力平衡汇交等公理确定约束反力的方向。

注意 ① 当取两个或两个以上物体为研究对象时,内力必为作用力与反作用力,对整个系统是平衡力,不必画出;② 约束反力是由每个约束体本身的性质决定的。

三、典型题解

例 1-1 轧路机向轧轮提供牵引力 F , 轧轮在压平路面时受到一石块的阻碍,如图 1-7(a)所示,试绘出轧轮的受力图。

解 (1) 取轧轮为研究对象(隔离体);

(2) 绘出主动力——重力 P 和牵引力 F ;

(3) 绘出约束反力。轧轮所受约束在 A 、 B 两处,即石块和地面的约束, A 处受石块的约束反力 F_{NA} 的作用, B 处受地面的约束反力 F_{NB} 的作用,如图 1-7(b)所示。它们都作用在接触面的公

法线上。

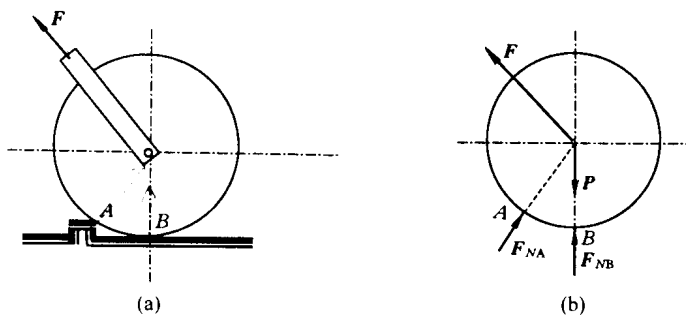


图 1-7

例 1-2 如图 1-8(a) 所示, 梯子的两部分 AB 和 AC 在点 A 铰接, 又在 D 、 E 两点用水平绳连接。梯子放在光滑水平面上, 若其自重不计, 但在 AB 的中点 H 处作用一铅直荷载 P 。试分别画出绳子 DE 和梯子的 AB 、 AC 部分以及整个系统的受力图。

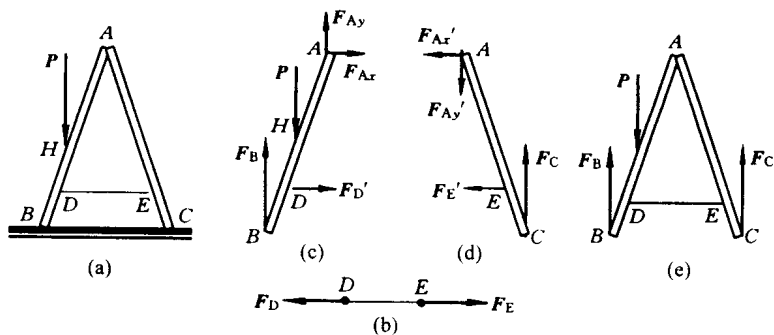


图 1-8

解 (1) 绳子 DE 的受力分析。绳子两端 D 、 E 分别受到梯子对它的拉力 F_D 、 F_E 的作用(图 1-8(b))。

(2) 梯子 AB 部分的受力分析。它在 H 处受载荷 P 的作用, 在铰链 A 处受 AC 部分给它的约束反力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 的作用。在点 D 受绳子对它的拉力 F_D' (与 F_D 互为作用力和反作用力)。在点 B 受光滑地面对它的法向反力 F_B 的作用。

梯子 AB 部分的受力图如图 1-8(c) 所示。

(3) 梯子 AC 部分的受力分析。在铰链 A 处受 AB 部分对它的作用力 F_{Ax}' 和 F_{Ay}' (分别与 F_{Ax} 和 F_{Ay} 互为作用力和反作用力)。在点 E 受绳子对它的拉力 F_E' (与 F_E 互为作用力和反作用力)。在点 C 受光滑地面对它的法向反力 F_C 。

梯子 AC 部分的受力图如图 1-8(d) 所示。

(4) 整个系统的受力分析。当选整个系统为研究对象时, 可把平衡的整个结构刚化为刚体。由于铰链 A 处所受的力互为作用力与反作用力关系, 即 $F_{Ax} = -F_{Ax}'$, $F_{Ay} = -F_{Ay}'$; 绳子与梯子连接点 D 和 E 所受的力也分别互为作用力与反作用力关系, 即 $F_D = -F_D'$, $F_E = -F_E'$, 这些力都成对地作用在整个系统内, 称为内力。内力对系统的作用效应相互抵消, 因此可以除去, 并不影响整个系统的平衡。故内力在受力图上不必画出。在受力图上只需画出系统以外的物体给系统的作用力, 这种力称为外力。这里, 载荷 P 和约束反力 F_B 、 F_C 都是作用于整个系统的外力。

整个系统的受力图如图 1-8(e) 所示。

注意 内力与外力的区分不是绝对的。例如, 当我们把梯子的 AC 部分作为研究对象时, F_{Ax}' 、 F_{Ay}' 和 F_E' 均属外力; 但取整体为研究对象时, F_{Ax}' 、 F_{Ay}' 和 F_E' 又成为内力。可见, 内力与外力的区分, 只有相对于某一确定的研究对象才有意义。

例 1-3 如图 1-9(a) 所示, 均质杆 OB 重 Q , B 端悬挂一物重 P , A 处的两根钢索 AC 、 AD 在水平面内, O 端为光滑铰链约束。试画出 OB 杆的受力图。

解 以 OB 杆为研究对象, 画出分离体图。先画上主动力 Q ; A

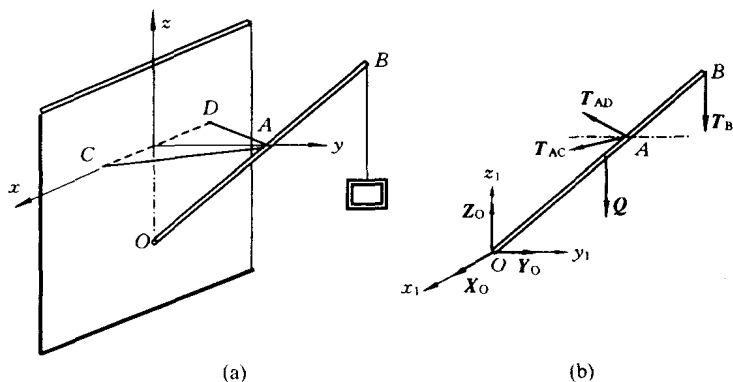


图 1-9

处分别受两根钢索的拉力,画上 T_{AC} 与 T_{AD} ; O 处为光滑铰链约束,画上约束反力 X_O 、 Y_O 、 Z_O ;此外, B 点还受绳索的拉力 T_B 。必须注意, B 点不能画上力 P ,因为力 P 是地球对重物的引力,它只作用在重物上。但 T_B 的大小与 P 的大小相等。 OB 杆的受力图如图 1-9(b) 所示。

小结

(1) 不要漏画约束反力。首先弄清讨论对象与周围哪些物体相接触,所有接触处均有约束反力;

(2) 不要多画力,取定讨论对象后,画出的力应是对象所受的力;

(3) 当分析两物体间的相互作用时,要注意这些力的箭头是否符合作用与反作用的关系;

(4) 若讨论的对象处于平衡时,系统受力图只画外部物体对讨论对象的作用力(外力),不画成对出现的内力;

(5) 刚体在光滑铰链处的受力需要以分力形式表示。

四、自我测试题 (1 小时)

1. 问答题 (每题 5 分, 共 20 分)

(1) 下列三个等式或说法的意义和区别是什么?

(a) $P_1 = P_2$; (b) $P_1 = P_2$; (c) 力 P_1 等效于力 P_2 。

(2) 二力平衡条件和牛顿第三定律中的两个力都是等大反向共线, 二者的区别是什么?

(3) 为什么说二力平衡条件、加减平衡力系原理和力的可传性原理等都只适用于刚体?

(4) $F = F_1 + F_2$ 和 $F = F_1 + F_2$ 两式所代表的意义的区别是什么?

2. 改错题 (每题 5 分, 共 25 分)

指出下列受力分析图中的错误, 并改正之。

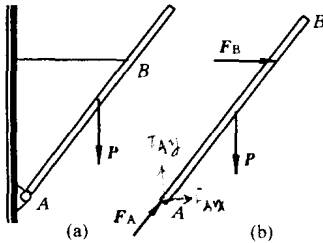


图 1-10

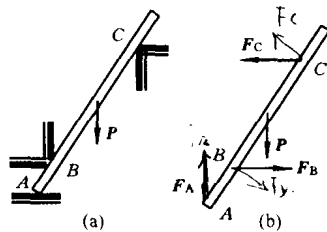


图 1-11

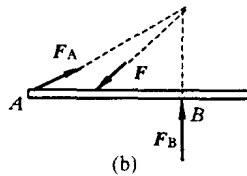
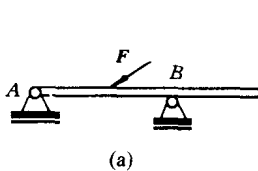


图 1-12

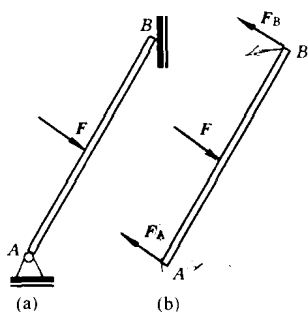


图 1-13

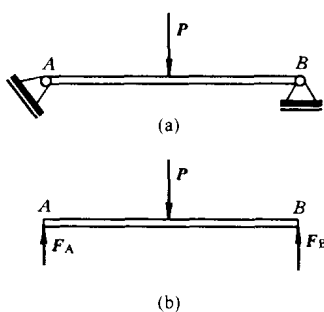


图 1-14

3. 作图题 (每题 5 分, 共 55 分)

绘出下列各图中标注字母的物体的受力图(所有物体均为刚性的, 所有接触面为光滑的)。

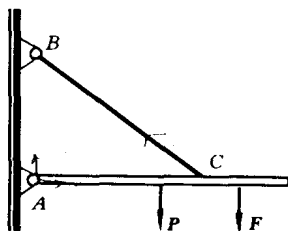


图 1-15

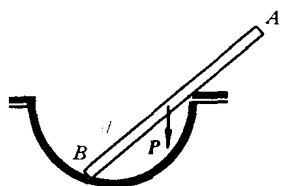


图 1-16

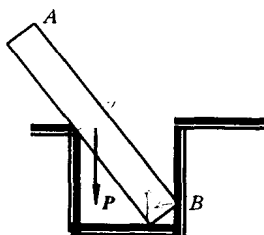


图 1-17

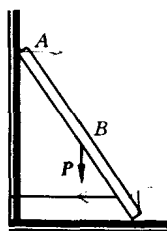


图 1-18

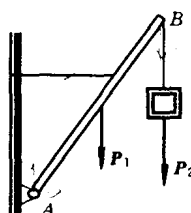


图 1-19