

理论力学

THEORETICAL MECHANICS

主编 李明宝

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

Civil Professional Textbooks for the 11th Five-Year Plan

主审 王平

031/140

2007

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

理论力学

Theoretical Mechanics

丛书审定委员会

王思敬 彭少民 石永久 白国良

李杰 姜忻良 吴瑞麟 张智慧

主编 李明宝

主审 王平

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/李明宝 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年10月
ISBN 978-7-5609-4167-7

I.理… I.李… II.理论力学-高等学校-教材 IV.O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第133627号

理论力学

李明宝 主编

责任编辑:张淑梅

封面设计:张璐

责任校对:陈骏

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:850mm×1065mm 1/16

印张:15.75

字数:320 000

版次:2007年10月第1版

印次:2007年10月第1次印刷

定价:29.80元

ISBN 978-7-5609-4167-7/O·418

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书主要内容为静力学、运动学和动力学三大部分。结合土木工程专业以及相关专业的特点,在保证基本理论完整性的前提下,适当更新课程内容,减少与其他课程的重复。本书重点阐述静力学、运动学和动力学的基础理论和方法,对烦琐的数学论证力求从简,注重与工程实际相结合,为土木工程或其他相关专业后续课程打下基础。本书通过大量例题深入浅出地阐述分析问题、解决问题的思路及方法,以加强读者对基本概念的理解,同时提高其分析能力。各章对解题的要点与技巧问题均作了简明的总结,并附有多种形式的思考题和习题,书末附有参考答案。

总 序

教育可理解为教书与育人。所谓教书,就是教给学生科学知识、技术方法和运作技能等,教学生以安身之本。所谓育人,则要教给学生做人的道理,提升学生的人文素质和科学精神,教学生以立命之本。我们教育工作者应该从中华民族振兴的历史使命出发,来从事教书与育人工作。作为教育本源之一的教材,必然要承载教书和育人的双重责任,体现两者的高度结合。

中国经济建设高速持续发展,国家对各类建筑人才需求日增,对高校土建类高素质人才培养提出了新的要求,从而对土建类教材建设也提出了新的要求。这套教材正是为了适应当今时代对高层次建设人才培养的需求而编写的。

一部好的教材应该把人文素质和科学精神的培养放在重要位置。教材中不仅要内容上体现人文素质教育和科学精神教育,而且还要从科学严谨性、法规权威性、工程技术创新性来启发和促进学生科学世界观的形成。简而言之,这套教材有以下特点:

第一,从指导思想来讲,这套教材注意到“六个面向”,即面向社会需求、面向建筑实践、面向人才市场、面向教学改革、面向学生现状、面向新兴技术。

第二,教材编写体系有所创新。结合具有土建类学科特色的教学理论、教学方法和教学模式,这套教材进行了许多新的教学方式的探索,如引入案例式教学、研讨式教学等。

第三,这套教材适应现在教学改革发展的要求,提倡所谓“宽口径、少学时”的人才培养模式。在教学体系、教材编写内容和数量等方面也做了相应改变,而且教学起点也可随着学生水平做相应调整。同时,在这套教材编写中,特别重视人才的能力培养和基本技能培养,以适应土建专业特别强调实践性的要求。

我们希望这套教材能有助于培养适应社会发展需要的、素质全面的新型工程建设人才。我们也相信这套教材能达到这个目标,从形式到内容都成为精品,为教师、学生以及专业人士所喜爱。

中国工程院院士

王 思 敬

2006年6月于北京

前 言

本教材是在华中科技大学出版社的精心组织下,以土木专业指导委员会颁发的专业培养目标为依据,由几所院校联合编写的教材。本教材注重科学性、实用性以及普遍性,尽量满足普通院校同类专业的需求。参考学时数为 72~80 学时,课程学时数少于 72 学时的专业也可选用。本书重点介绍了理论力学课程的基础内容,注重基本概念、基本规律和基本方法的讲解,从多角度阐述分析力学理论体系,充分体现了本门课程的基础性、前沿性与时代性,突出它在现代科学技术中和科学人才的素质、能力培养方面所起的基础作用。

本教材可作为高等院校土建、水利、机械、航空和力学等专业的课程教材,也可满足工科院校机电类专业、非机电类专业的课程教学以及有关技术人员作为自学用书。全书共分 3 篇 14 章,分别讲述静力学、运动学和动力学的基本原理及其应用。第 1~5 章由东北林业大学土木工程学院李明宝和贾永峰编写;第 6~8 章由山西师范大学生物技术与工程学院王建正编写;第 9 章由山西师范大学黄秋艳编写;黑龙江大学建筑工程学院王洪波和东北林业大学土木工程学院刘瑶参与编写了运动学习题;第 10 章、第 11 章和第 13 章由哈尔滨商业大学土木与制冷学院刘宇晓编写;第 14 章由哈尔滨商业大学土木与制冷学院田琳编写;第 12 章由哈尔滨玻璃钢研究所工程师任立宁编写,莱阳农学院王欣编写了动力学所有习题。李明宝对全书进行统稿,东北林业大学土木工程学院教授王平主审。限于作者的水平和经验,书中难免有错误和欠缺之处,敬请读者给予批评指正。

编者

2007 年 4 月

目 录

第 1 篇 静力学

引言	(3)
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	(5)
1.1 静力学公理	(5)
1.2 约束与约束力	(8)
1.3 物体的受力分析和受力图	(12)
【本章要点】	(15)
【思考与练习】	(15)
第 2 章 平面汇交力系与平面力偶系	(19)
2.1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	(19)
2.2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	(22)
2.3 平面力对点之矩	(25)
2.4 平面力偶系	(27)
【本章要点】	(31)
【思考与练习】	(32)
第 3 章 平面任意力系	(35)
3.1 力的平移定理	(35)
3.2 平面任意力系向作用面内一点简化	(36)
3.3 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	(41)
3.4 物体系的平衡·静定和静不定问题	(45)
【本章要点】	(50)
【思考与练习】	(51)
第 4 章 空间力系	(57)
4.1 力在直角坐标轴上的投影	(57)
4.2 力对轴的矩和力对点的矩	(59)
4.3 空间力系的平衡条件和平衡方程	(62)
【本章要点】	(69)
【思考与练习】	(70)
第 5 章 摩擦	(74)
5.1 滑动摩擦	(74)

5.2 摩擦角和自锁现象	(76)
5.3 考虑摩擦时物体的能平衡问题	(77)
5.4 滚动摩阻	(79)
【本章要点】	(81)
【思考与练习】	(81)

第 2 篇 运动学

引言	(87)
第 6 章 点的运动	(88)
6.1 矢量法	(88)
6.2 直角坐标法	(90)
6.3 自然法	(93)
【本章要点】	(99)
【思考与练习】	(100)
第 7 章 刚体的简单运动	(102)
7.1 刚体的平行移动	(102)
7.2 刚体绕定轴的转动	(103)
7.3 转动刚体内各点的速度和加速度	(105)
7.4 轮系的传动比	(108)
7.5 以矢量表示角速度和角加速度·以矢积表示点的速度和加速度	(111)
【本章要点】	(113)
【思考与练习】	(114)
第 8 章 点的合成运动	(117)
8.1 相对运动·牵连运动·绝对运动	(117)
8.2 点在平移参考系中运动的合成	(119)
8.3 点在转动参考系中运动的合成	(125)
【本章要点】	(130)
【思考与练习】	(131)
第 9 章 刚体的平面运动	(134)
9.1 刚体平面运动的概述与运动分解	(134)
9.2 求平面图形内各点速度的基点法	(136)
9.3 求平面图形内各点速度的瞬心法	(139)
9.4 用基点法求平面图形内各点的加速度	(143)
9.5 运动学综合应用举例	(145)
【本章要点】	(148)
【思考与练习】	(148)

第 3 篇 动力学

引言	(157)
第 10 章 质点动力学的基本方程	(158)
10.1 动力学基本定律	(158)
10.2 质点的运动微分方程	(159)
【本章要点】	(165)
【思考与练习】	(166)
第 11 章 动量定理	(168)
11.1 动量与冲量	(168)
11.2 动量定理	(169)
11.3 质心运动定理	(171)
【本章要点】	(174)
【思考与练习】	(175)
第 12 章 动量矩定理	(177)
12.1 动量矩定理	(177)
12.2 刚体绕定轴转动微分方程	(180)
12.3 刚体对轴的转动惯量	(182)
12.4 质点系相对于质心的动量矩定理	(185)
12.5 刚体的平面运动微分方程	(187)
【本章要点】	(189)
【思考与练习】	(190)
第 13 章 动能定理	(195)
13.1 力与功	(195)
13.2 质点和质点系的动能	(200)
13.3 动能定理	(201)
13.4 功率、功率方程和机械效率	(204)
13.5 势力场、势能和机械守恒定律	(206)
13.6 普遍定理的综合应用举例	(208)
【本章要点】	(211)
【思考与练习】	(212)
第 14 章 达朗贝尔原理(动静法)	(220)
14.1 惯性力·质点的达朗贝尔原理	(220)
14.2 质点系的达朗贝尔原理	(222)
14.3 刚体惯性力系的简化	(223)
14.4 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	(226)

【本章要点】	(230)
【思考与练习】	(230)
各章习题答案	(234)
参考文献	(241)

第 1 篇 静力学

引 言

理论力学是研究物体机械运动普遍规律的学科,而静力学是研究在力的作用下物体的平衡规律。

平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动的情况,这是物体运动的一种特殊情形。地面上的静物,如桥梁、堤坝、房屋建筑以及沿直线轨道匀速行驶的火车等都是平衡的实例。

静力学,主要是刚体静力学,研究的主要问题如下。

(1) 物体的受力分析

物体的受力分析即分析物体共受几个力,以及每个力的作用位置、大小和方向。分析物体所受的力,画出它的受力图,是解决静力学问题的重要步骤。

(2) 力系的简化及其运算(包括合成和简化的方法)

所谓力系的简化就是将原力系用一个与之等效的更为简单的力系来代替。这时,这两个力系互称等效力系。

(3) 作用于刚体上力系的平衡条件及其应用

当物体处于平衡状态时,作用在物体上的各种力系必须满足一定的条件。

静力学从基本公理出发,借助数学工具进行演绎和推理,得出力系简化和平衡的系统理论和各种计算方法,这些结论和方法是研究动力学、材料力学、结构力学以及其他力学学科和相关工程学科的重要基础和工具。

刚体和力都是力学中最基本的概念,现分别加以说明。

1) 刚体

刚体是一个理想的力学模型。刚体是指在力的作用下形状和大小都始终保持不变的物体;或者说,受力时刚体内任意两点间的距离保持不变。实际上物体在受力作用时总会有变形,但只要变形很小而不影响所研究问题的实质,就可以把这些物体看做刚体。静力学以刚体为研究对象,所以又称为刚体静力学。

2) 力

力是物体间相互的机械作用,这种作用使受力物体的形状和运动状态发生改变。引起物体变形的效应称为内效应,引起物体运动状态发生改变的效应称为外效应。因为理论力学是以刚体为研究对象,所以它研究的是力的外效应。

力的作用效应取决于力的三要素:

- (1) 力的大小;
- (2) 力的方向;
- (3) 力的作用位置或作用点。

力是一个矢量,用 $\boldsymbol{F}$ 表示。本书中矢量都用一个粗斜黑体字母表示,用细斜体字母表示该矢量的模。

在国际单位制(SI)中,力的单位为 N(牛顿)。

力的作用位置一般来说是物体的一部分面积或体积。若作用面积或体积很小时,可抽象为点,作用在此点的力称为集中力,否则称为分布力。分布力的大小用力的集度表示。例如,重力是体积分布力,其大小用重力集度 γ 表示,单位为 N/m^3 或 kN/m^3 ;房屋屋面的雪荷载可以简化为面积分布力,其单位为 N/m^2 或 kN/m^2 ;楼板传给梁的力可以简化为线分布载荷,其单位为 N/m 或 kN/m 。

作用于同一物体或物体系的一群力称为力系。力系有各种分类,比如,按其作用线的空间关系可分为平面力系和空间力系;按其作用线的相互关系可分为汇交力系、共线力系、平行力系和任意力系。这些力系将在后边的章节中分别介绍。

静力学在工程中有广泛的应用,结构物的设计常常需要先作静力分析。静力学关于力的性质及运算方法也是动力学研究的基础,因此,本课程先来学习静力学。

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学,本章将学习静力学公理和物体的受力分析。静力学公理讲述了五个公理和两个推论,这五个公理和两个推论也是我们对物体进行受力分析的理论基础。在物体受力分析的过程中,必须确定研究对象,确定对象受力的数目,能够根据公理正确画出约束力。

1.1 静力学公理

静力学公理是人们在长期生活和生产中,经过反复观察和实践总结出来的客观规律。它正确地反映了作用于物体上力的基本性质。静力学中所有的定理和结论都是由这几个公理推演出来的,这些公理已被大量的实验和实践所证实。

公理一 二力平衡原理

刚体受两个力作用而保持平衡的充分必要条件是这两个力大小相等、方向相反,且作用在同一条直线上。如图 1-1 所示。

该公理阐述了静力学最简单力系的平衡条件。这个公理对刚体来说是必要和充分的,但对于变形体就不是充分的。例如,软绳的两端受两个等值、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。

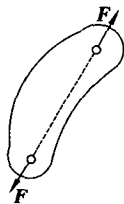


图 1-1

根据二力平衡原理,在两个力作用下处于平衡的杆件(构件),称为二力杆。

公理二 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 1-2(a) 所示。或者说,合力矢等于这两个力矢的几何和(矢量和),即

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

应用此公理求两汇交力合力的大小和方向(即合力矢)时,可由任一点 O 起,另作一力三角形,如图 1-2(b)、(c) 所示。力三角形的两个边分别为 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$, 力矢和为第三边 $\mathbf{F}_R$, 即代表合力矢,而合力的作用点仍在汇交点 O 。

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。

公理三 增减平衡力系原理

力系作用于物体上而不改变其运动状态,称该力系为平衡力系。如果两个力系分别作用于同一个物体上的效应相同,则这两个力系称为等效力系。

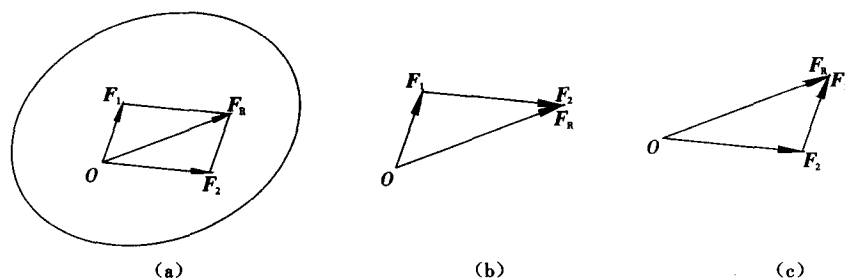


图 1-2

在作用于一个刚体的任意力系中,增加(或减少)一个平衡力系,不会改变原力系对刚体的作用效应,前后两个力系为等效力系,这就是增减平衡力系原理。这个公理也只适用于刚体。对变形体来说,增加或减去一组平衡力系,改变了变形体各处的受力状态,将引起其内、外效应的变化。

由上述公理可导出以下重要推论。

推论一 力的可传性

作用于刚体的力,它的作用点可以沿其作用线在刚体内任意移动,而不改变它对该刚体的作用。

证明:设在刚体上点 A 作用着力 F ,如图 1-3(a)所示,根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = -F_1 = F_2$,如图 1-3(b)所示,则 F 和 F_1 构成一对平衡力系。再根据加减平衡力系原理,可将力 F 和 F_1 同时去掉,如图 1-3(c)所示。这样,得到的新力系与原力系等效。也就是说,力 F_2 就是原来的力 F ,只不过作用点沿着其作用线由 A 移动到了 B 而已。

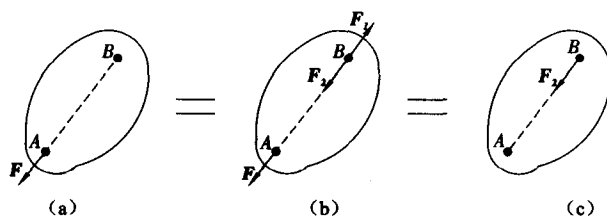


图 1-3

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上的力的三要素是:力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

推论二 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通过汇交点。

证明:如图 1-4 所示,在刚体的 A、B、C 三点上,作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O,然后根据力的平行四边形规则,得合力 F_{12} ,则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面,且通过力的交点 O。于是推论得证。

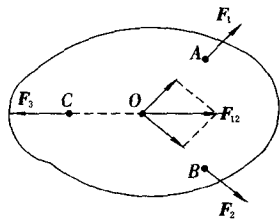


图 1-4

公理四 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,且分别作用在两个相互作用的物体上。

这个公理概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。

下面举一个实例来说明。如图 1-5(a) 所示,绳索悬吊一重物,重物的重量为 P 。绳索受到的拉力为 F_T ,如图 1-5(b)。此外,重物受到重力 P 和绳索拉力 F'_T 的作用,如图 1-5(c)。其中, F_T 与 F'_T 是作用力和反作用力关系,即 $F_T = -F'_T$ 。作用力和反作用力用同一字母表示,但其中之一,在字母的右上方加一“'”表示。

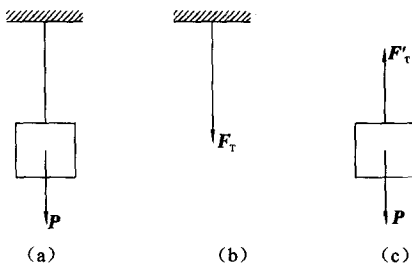


图 1-5

公理五 刚化原理

当变形体在已知力系作用下处于平衡时,如将此变形体变为刚体(刚化),则平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看成为刚体模型的条件。处于平衡状态的变形体,我们总可以把它视为刚体来研究,这就建立了刚体力学与变形体力学间的联系。

必须指出,刚体的平衡条件对于变形体来说,只是必要条件,而非充分条件。如图 1-6 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化成刚体,其平衡状态保持不变。若绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

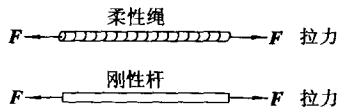


图 1-6

由此可见,对于变形体的平衡来说,除了满足刚体静力学的平衡条件外,还应满足与变形体的物理性质有关的某些附加条件。

静力学全部理论都可以由上述五个公理推证而得到,如前述的推论一和推论二。