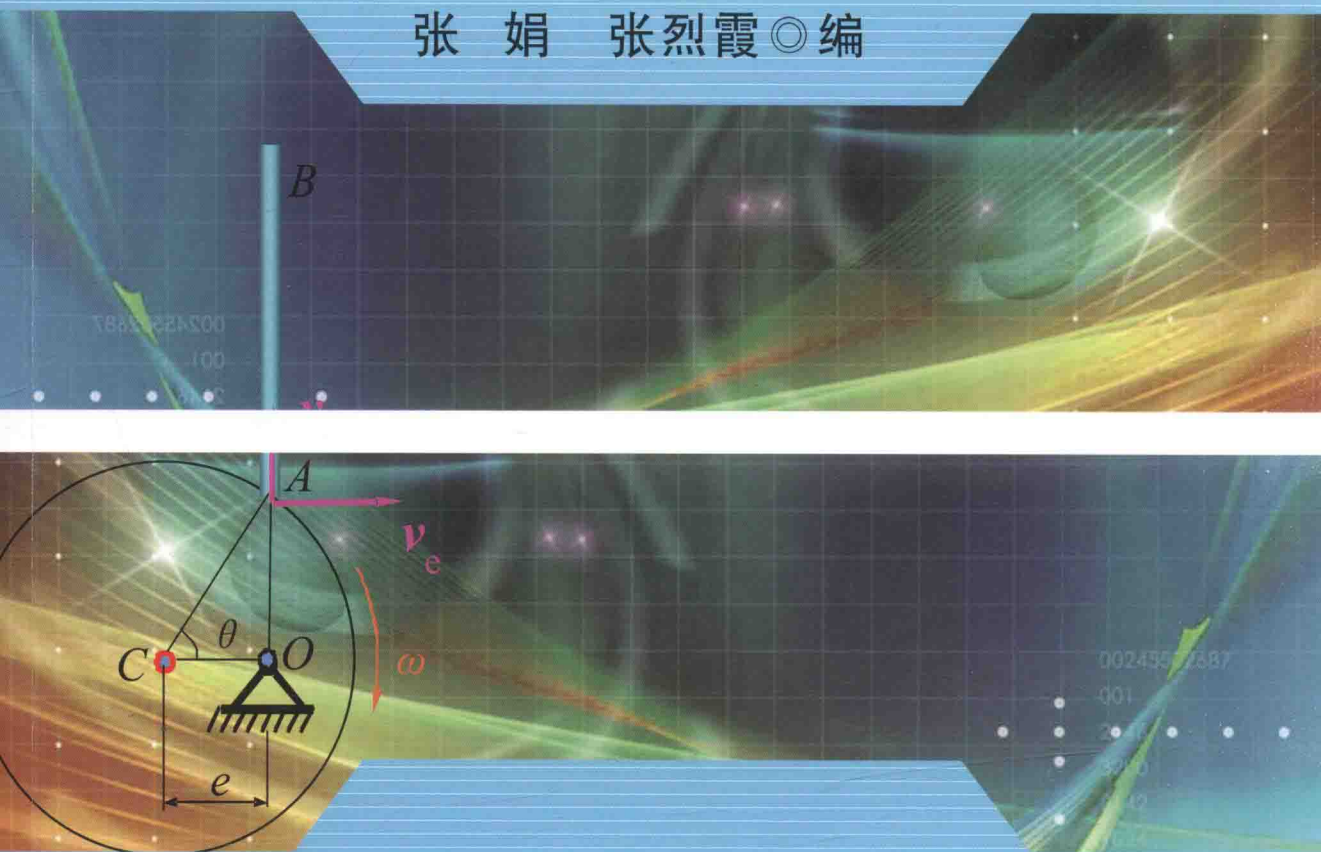


高等学校网络教育规划教材



理论力学

张娟 张烈霞◎编



西北工业大学出版社

LILUN LIXUE

理论力学

张娟 张烈霞 编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据教育部颁布的高等工业院校理论力学教学的基本要求编写的。分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学主要讲述力系的合成与分解,刚体和刚体系的平衡问题以及摩擦等。运动学主要讲述运动的合成与分解,点的复合运动,刚体的基本运动和刚体的平面运动。动力学主要讲述质点动力学,动力学普遍定理,碰撞,达朗贝尔原理,虚位移原理,拉格朗日方程及质点的振动等。每章后都配有习题和参考答案。

本书可作为高等院校力学、机械类、航空、航天、航海、材料、土建、电子等专业的理论力学课程教材,也可供远程教育及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/张娟,张烈霞编. —西安:西北工业大学出版社,2016.1

ISBN 978-7-5612-4675-7

I. ①理… II. ①张… ②张… III. ①理论力学—高等学校—教材 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 304901 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpu.com

印刷者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开本:787mm×1 092mm 1/16

印张:24.25

字数:588 千字

版次:2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定价:49.00 元

前 言

理论力学是高等院校理工科专业普遍开设的一门重要的专业基础课,课时较多,学分较大。在欧美国家,理论力学大都被分为静力学和动力学两门课,而我国开设一门理论力学,内容总体上与之相差无几,只是编排顺序及侧重点上有所不同。本书参考了国家教育部制定的高等理工科院校理论力学教学的基本要求,并广泛参考国内各种版本的理论力学教材及国外的静力学和动力学教材,博采众长,优化课程内容,精心编排而成。本书在内容选取上力求坚持理论力学体系的完整性和严密性,同时力求概念准确,叙述简明,坚持理论联系实际,使教材清晰易懂。

本书有下述特点:

1)编排上采用经典的静力学、运动学、动力学三部分内容,由浅入深,循序渐进,以利于学生逐步深入学习理论力学知识。

2)每章前都有知识要点,以便读者对该章内容有总体的认识,并了解考试重点和学习难点。

3)编写由浅入深。在静力学部分将空间力系和平面力系分开讲,从多年教学经验中,笔者发现这样的教材编排顺序及讲课顺序,易于学生理解。在有了平面力系中力在坐标轴上的投影、合力矩定理、力线平移定理、力系的平衡条件和平衡方程等知识的铺垫,空间力系中的相关概念只需对照平面力系并拓延至空间即可以容易理解。

4)借鉴广泛受欢迎的国外教材,从中引入一些实例,可以更好地帮助读者理解相应章节的内容。

5)语言文字力求简单易懂,举例力求理论联系实际,尽量使读者在较少先修课程的基础上学懂理论力学的核心内容。

6)本书附有两篇力学相关的科技短文,介绍了力学知识在现实生活中的应用,既可以提高读者的读书兴趣,又可以加深读者对本书理论知识的理解。

7)本书有配套习题册,可以作为学生的作业集使用,以便强化和检验学习内容。

本书选材考虑了各类专业的通用性,每章后附有习题,书后附有习题参考答案。本书可作为力学、机械类、航空、航天、航海、材料、土建、电子等各专业的理论

力学课程教材,也可供相关工程技术人员参考。

本书参考学时为 80 学时,具体可根据课时需要选择讲授和学习的内容。

本书静力学和运动学部分由西北工业大学力学与土木建筑学院张娟老师编写,动力学部分由陕西理工大学张烈霞老师编写。

编写本书曾参阅了相关教材和资料,在此,谨向其作者深致谢忱。

由于笔者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月

目 录

绪论	1
----	---

静 力 学

第一章 静力学的基本概念和公理	5
-----------------	---

知识要点	5
1.1 静力学的基本概念	6
1.2 静力学公理	7
1.3 约束和约束力	10
1.4 受力分析和受力图	15
习题一	18

第二章 平面基本力系	21
------------	----

知识要点	21
2.1 平面共点力系合成的几何法	22
2.2 平面共点力系平衡的几何条件	23
2.3 力在坐标轴上的投影	25
2.4 平面共点力系合成的解析法	26
2.5 平面共点力系平衡的解析条件	27
2.6 两个平行力的合成	29
2.7 力偶·力偶矩·共面力偶间的等效条件	30
2.8 平面力偶系的合成及平衡条件	33
习题二	35

第三章 平面任意力系	39
------------	----

知识要点	39
3.1 力对点的矩	41
3.2 力线平移定理	42
3.3 平面任意力系向作用面内任一点的简化·力系的主矢和主矩	43
3.4 平面力系合成结果的讨论	46
3.5 合力矩定理及力矩的解析表达式	47

3.6 分布力的合力	48
3.7 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	50
3.8 平面平行力系的平衡条件	53
3.9 物体系的平衡及静不定问题的概念	54
3.10 简单平面桁架的内力计算	59
习题三	63
第四章 摩擦	68
知识要点	68
4.1 摩擦的概念	69
4.2 滑动摩擦定律	69
4.3 考虑滑动摩擦时的平衡问题	72
4.4 滚动摩擦阻力的概念	75
习题四	77
趣味力学问题 1:斜面的妙用	80
第五章 空间力系	82
知识要点	82
5.1 空间力系	85
5.2 空间共点力系合成的几何法及其平衡的几何条件	86
5.3 力在轴上和平面上的投影	87
5.4 空间共点力系合成的解析法及其平衡的解析条件	89
5.5 力偶作用面的平移·力偶矩矢·力偶等效定理	91
5.6 空间力偶系的合成及其平衡条件	92
5.7 力对点的矩	94
5.8 力对轴的矩	96
5.9 力矩关系定理	98
5.10 空间任意力系向任一点的简化·主矢和主矩	99
5.11 空间任意力系的各种合成结果·一般形式的合力矩定理	101
5.12 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	103
5.13 重心	106
习题五	113
第六章 转动惯量	117
知识要点	117
6.1 转动惯量的概念与计算	117

6.2 刚体对任意轴的转动惯量·惯性积和惯性主轴	123
6.3 质量对称分布刚体的惯性主轴方向的判定	125
6.4* 惯性椭圆	126
习题六	127

运 动 学

第七章 点的运动	131
知识要点	131
7.1 点的运动描述的矢量法	131
7.2 点的运动描述的直角坐标法	133
7.3 点的运动描述的自然法	135
习题七	143
第八章 刚体的基本运动	145
知识要点	145
8.1 刚体的平动	145
8.2 刚体的定轴转动	147
8.3 角速度和角加速度的矢量表示法·刚体内各点的速度和加速度的矢积表示法	152
习题八	154
第九章 点的复合运动	157
知识要点	157
9.1 基本概念	158
9.2 点的相对运动	160
9.3 点的速度合成定理	161
9.4 牵连运动是平动的点的加速度合成定理	164
9.5 牵连运动是定轴转动时点的加速度合成定理	168
习题九	174
第十章 刚体的平面运动	179
知识要点	179
10.1 刚体平面运动的运动方程	179
10.2 平面运动的分解	180
10.3 平面图形上各点速度分析的基点法和投影法	181

10.4 平面图形上点的速度分析的瞬心法·····	185
10.5 平面图形上各点加速度分析的基点法·····	190
10.6 刚体绕平行轴转动的合成·····	190
10.7 运动学综合问题分析·····	198
习题十·····	206

动 力 学

第十一章 质点动力学·····	214
------------------------	------------

知识要点·····	214
11.1 动力学的任务·····	214
11.2 动力学基本定律·····	215
11.3 质点运动微分方程·····	217
11.4 质点动力学的基本问题·····	217
11.5 质点相对运动微分方程·····	222
习题十一·····	226

第十二章 动能定理·····	231
-----------------------	------------

知识要点·····	231
12.1 动力学普遍定理的概述·····	232
12.2 力的功·····	232
12.3 动能·····	237
12.4 动能定理·····	240
12.5 功率·功率方程·····	244
12.6 势力场·势能·机械能守恒定理·····	246
习题十二·····	250

第十三章 动量定理·····	257
-----------------------	------------

知识要点·····	257
13.1 动量·····	258
13.2 动量定理·····	259
13.3 冲量定理·····	263
13.4 质心运动定理·····	264
13.5 变质量质点的运动微分方程·····	267
习题十三·····	269

第十四章 动量矩定理·动力学普遍定理综合应用	273
知识要点	273
14.1 动量矩	274
14.2 动量矩定理	275
14.3 刚体定轴转动微分方程	279
14.4 相对质心的动量矩定理	280
14.5 刚体平面运动微分方程	282
14.6 动力学普遍定理综合应用举例	284
习题十四	287
趣味力学问题 2:“猫旋”之谜	290
第十五章 碰撞	294
知识要点	294
15.1 碰撞的分类·碰撞问题的简化	295
15.2 用于碰撞过程的基本定理	296
15.3 质点对固定面的碰撞·恢复因数	297
15.4 碰撞问题举例	300
15.5 碰撞冲量对绕定轴转动刚体的作用·撞击中心	303
习题十五	305
第十六章 达朗贝尔原理	308
知识要点	308
16.1 惯性力的概念·质点的达朗贝尔原理	309
16.2 质点系的达朗贝尔原理	310
16.3 刚体惯性力系的简化	311
16.4 绕定轴转动刚体的轴承动约束力	317
习题十六	319
第十七章 虚位移原理	322
知识要点	322
17.1 约束·虚位移·虚功	322
17.2 虚位移原理	325
习题十七	331
第十八章 动力学普遍方程和拉格朗日方程	334
知识要点	334

18.1 自由度和广义坐标·····	337
18.2 以广义坐标表示的质点系平衡条件·····	338
18.3 动力学普遍方程·····	340
18.4* 第一类拉格朗日方程·····	341
18.5 第二类拉格朗日方程·····	342
习题十八·····	346
第十九章 振动·····	349
知识要点·····	349
19.1 单自由度系统的自由振动·····	350
19.2 单自由度系统的有阻尼自由振动·····	354
19.3 单自由度系统的无阻尼受迫振动·····	358
19.4 单自由度系统的有阻尼受迫振动·····	362
习题十九·····	365
习题参考答案·····	367
参考文献·····	377

绪 论

1. 理论力学的研究内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。机械运动是指物体在空间的位置随时间的改变,它是人们日常生活和生产过程中最常见、最简单的一种运动。例如,车、船的行驶,机器的运转,大气和水的流动,建筑物的振动及星体的运行等,都是机械运动。研究机械运动不仅可以揭示自然界各种机械运动的规律,而且这些定律和结论还可广泛用于工程实际中,为解决工程实际问题提供理论基础和技术手段。

本书的内容分为静力学、运动学和动力学三部分。

1)静力学研究力系的等效和简化以及物体在力系作用下的平衡问题。

2)运动学从几何的观点出发,研究机械运动的性质(如研究物体的运动方程、速度、加速度等),而不涉及改变物体运动的原因(如受力和做功等)。

3)动力学研究物体机械运动状态的变化与作用力之间的关系。

理论力学研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动,属于古典力学范畴,其科学体系是以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,在 15~17 世纪逐步形成之后,又不断得到改善和发展的。在 20 世纪初,出现了相对论力学和量子力学,打破了传统的时空概念,建立了现代力学的科学体系。速度接近于光速的物体和微观粒子的运动,只有应用相对论力学和量子力学的观点才能给予完善的解释。对此古典力学有明显的局限性,但对于远小于光速的宏观物体的机械运动,应用古典力学能够得到足够的精度。因此,对于一般工程中所遇到的力学问题,即使是一些尖端科学中的大量力学问题,用古典力学的方法来解决,不仅方便,而且能够保证足够的精确性。所以,古典力学至今仍有重要的实用意义,并且仍在不断发展完善之中。

理论力学源于物理学的一个分支,但其内容已大大超过了物理学的内容,它不仅要求建立与力学有关的各种基本概念和理论,而且要求能运用理论知识,对从实际问题中抽象出来的力学模型进行分析和计算。

静力学中所讨论的静止和平衡是运动的一种特殊形态,因此,也可以认为静力学是动力学在加速度为零条件下的一种特殊情况。然而由于工程技术发展的需要,静力学已积累了丰富的内容并且成为一个相对独立的组成部分。另外,动力学问题也可以从形式上变换成平衡问题用静力学理论求解(达朗贝尔原理)。

2. 学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性很强的技术基础课。学习理论力学,掌握机械运动的客观规律,就能够理解并利用许多机械运动。例如,道路的转弯处为什么外侧要比内侧高?道路的表面为什么要宏观上平整,微观上粗糙?车辆为什么多用后轮驱动,前轮刹车?航天器如何进行轨道调整和姿态调整?这些问题都可以由理论力学原理得到解释。当然,学习理论力学不仅仅在于解释日常所见的机械运动现象,还在于掌握并应用机械运动的规律,更好地为工程实际服务。各种机械、设备和结构的设计,机器的自动调节和振动的研究等都包含着大量的力学问

题。尽管有些问题单靠理论力学的知识是不够的,但在解决这些问题时,理论力学的知识却是不可或缺的。

此外,理论力学研究力学中最普遍、最基本的规律。许多工程类专业的其他课程,如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、振动理论、机械原理等都需要用到理论力学的知识。所以,理论力学是大多数工科类专业的重要技术基础课,其基本理论和知识在基础课与专业课之间架起了桥梁,是学习后续一系列课程的基础,其分析问题和解决问题的思路,对后续课的学习也有帮助。随着科学技术的日益发展和现代化进程的加快,不断出现的新的力学问题为力学知识的发展和应用提供了新的机遇和挑战。学好理论力学知识,将有助于解决与理论力学有关的新问题,从而促进科学技术的进步,推动理论力学不断向前发展。

3. 理论力学的研究方法

理论力学的研究方法是从实际出发,经过抽象化、综合、归纳而建立公理,再应用数学演绎和逻辑推理而得到定理和结论,形成理论体系,然后再通过实践来验证理论的正确性。理论力学是一门历史悠久的成熟学科,具有相对的稳定性。它以为数不多的几条公理、定律为基础,以统一的观点深刻地揭示了力学诸定理之间的内在联系,形成了一定的逻辑系统。其处理力学问题所遵循的方法一般是:①将所要研究的问题抽象化为一定的力学模型,这些力学模型既要能反映问题的主体,又要便于求解理;②应用力学原理把有关的力学问题用数学形式表述;③运用数学工具求解;④根据具体问题,对数学问解进行分析讨论,甚至决定取舍。

在理论力学中,当研究物体的机械运动规律时,可把实际物体抽象为力学模型作为研究对象。理论力学中常见的力学模型有质点、质点系和刚体。

1)质点:只有质量而无几何尺寸的几何点。如果物体的尺寸和形状对其研究的问题本质影响不大,就可以把物体抽象为质点。

2)质点系:若物体的运动与其尺寸或形状有关,则该物体可视为有限个或无限个质点组成的系统,称为质点系。它是最一般的力学模型。

3)刚体:当物体大小、形状的改变很小,对问题的研究影响不大时,可视为刚体,它是质点系的一个特例,是对一般固体的理想化,即刚体在力的作用下不发生变形或运动时其内任意两点之间距离保持不变。多个刚体组成的系统称为刚体系统。

上述几种理想的力学模型,都是客观存在的实际物体的科学抽象。它们并不特指某些具体物体,而是概括了各种物体,不论物体的材质,也不论是什么工程构件,在研究它们的平衡或运动时,都可以作为上述几种模型之一加以考察。它表明了理论的普遍意义。

静 力 学

静力学主要研究的是刚体在力系作用下的平衡问题,包括:

- (1)作用于刚体的力系的合成,力的分解,力系的等效和简化。
- (2)刚体及刚体系的受力分析及受力图的画法。
- (3)刚体在力系作用下的平衡条件及其应用。

第一章 静力学的基本概念和公理

知 识 要 点

1. 基本概念

(1) 力: 物体相互间的机械作用, 其作用结果使受力物体的形状和运动状态发生改变。

(2) 刚体: 在外界的任何作用下, 形状和大小都始终保持不变的物体。刚体是一种理想的力学模型。

(3) 等效力系: 对物体的作用效果相同的两个力系称为等效力系。

2. 静力学公理及其两个重要推论

(1) 二力平衡公理。

要使刚体在两个力作用下维持平衡状态, 必须也只需这两个力大小相等、方向相反、沿同一直线作用。

(2) 加减平衡力系公理。

在作用于刚体的任何一个力系上加上或去掉几个互成平衡的力, 不改变原力系对刚体的作用效果。

(3) 力平行四边形公理。

作用于物体上同一点的两个力可合成为一个合力。合力为原两力的矢量和, 即合力矢量由原两力矢量为邻边而做出的力平行四边形的对角线矢量来表示。

(4) 作用和反作用公理。

任何两个物体之间相互作用的力, 总是大小相等, 作用线相同, 但指向相反, 并同时分别作用于这两个物体上。

(5) 刚化公理。

设变形体在已知力系作用下维持平衡状态, 则如将这个已变形但平衡的物体变成刚体(刚化), 其平衡不受影响。

(6) 推论 1(力在刚体上的可传性)

作用于刚体上的力, 其作用点可以沿作用线在该刚体内前后任意移动, 而不改变它对该刚体的作用。

(7) 推论 2(三力平衡汇交定理)

当刚体在三个力作用下平衡时, 设其中两力的作用线相交于某点, 则第三力的作用线必定也通过这个点且这三个力共面。

3. 约束、约束力及物体的受力图

(1) 约束: 限制物体运动的条件称为约束。

(2)约束力:约束对被约束物体的反作用力称为约束力。

(3)物体的受力图:表示物体所受全部外力(包括主动力和约束力)的简图。受力图是求解静力学问题的基础与依据。

1.1 静力学的基本概念

1. 刚体

刚体是指在外界的任何作用下形状和大小都始终保持不变的物体。或者说,刚体内任意两点间的距离保持不变。实际的物体在受力作用时总会有变形,但只要这种变形不影响所研究问题的实质,或者说变形在所研究的力学问题中不起主要作用,仍可以把这些物体看作刚体。一个物体能否被看作刚体,不仅取决于变形的大小。而且和问题本身的要求有关。同一个物体,在理论力学里被看作刚体,而在材料力学里,当需要了解力和变形之间的关系时,又被看作弹性体。本课程中的有些结论是对刚体而言,有些是对实际物体而言,这些差别应该注意。

2. 力

(1)力的概念与效应。

力是物体相互间的机械作用,这种作用使这些物体的形状和运动状态发生改变。

在自然界里可以看到由各种不同的物理原因产生的力,但在理论力学里只研究力所产生的效应,而不研究它的物理来源。力的效应,表现为受力物体的形状和运动状态的改变。我们约定,把引起物体变形的效应称为力的内效应,而使受力物体运动状态改变的效应称为力外效应。力的内、外效应总是同时产生的,但对于刚体,不显示力的内效应。

(2)力的三要素。

力的效应唯一地决定于力的三要素:

- 1)力的作用位置或作用点;
- 2)力的方向;
- 3)力的大小。

它们也称为力的三个特征。只要其中一个要素发生改变,力的效应也必定改变。

力的作用位置,一般来说不是一个点,而是物体的某一部分面积或体积。机械运动的传递,必定是通过物体间的直接接触,或是由物体的每一部分对其他物体的相互作用而引起的,例如,蒸汽压力作用于整个容器壁,重力作用于物体的每一点。这样的力称为分布力。但是,有时力的作用面积不大,例如,当钢索吊起重物时,钢索的拉力作用在与重物的连接处,连接处可以看成是一个点,于是,拉力便集中地作用于这个点。这样的力称为集中力,而这个点则称为集中力的作用点。

在国际单位制(SI)中用牛[顿](N)作为力的计量单位,有时也用千牛(kN)。

3. 力的表示法

在力学里,经常要遇到两类不同的量:矢量和标量。

力是一种矢量。习惯上把表示力大小的有向线段的始端(起点)取在该力的作用点,用以标明该力指向的箭头被加在这线段的末端(终点),如图 1-1 所示。