



高等学校工程专科教材

理论力学

(土建、水利类)

王家荣 主编

王家荣 李家祺 张扬健 编著

高等教育出版社

974585

031
1034

高等学校工程专科教材

理论力学

(土建、水利类)

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

本书是根据国家教委颁发的“高等学校工程专科理论力学课程教学基本要求”编写的,由国家教委高等学校工程专科学课程教材编审组组织编写、审定。本书加强了土建、水利类各专业需要的基础部分的内容,书中带有星号“*”的内容是土建、水利类各专业可不要求的内容。

本书教学内容课内参考学时范围为 72~81 学时。全书共分为十七章,包括静力学、运动学和动力学三个部分。本书在内容叙述和定理推证方面力求物理概念清晰,注意联系工程实际。书中编选有例题、思考题、习题和综合题,并附有习题答案。

本书采用国际单位制(SI)单位。

本书可用作高等学校工程专科土建、水利类理论力学课程的教材,也可供其他专业的教师和学生以及有关工程技术人员参考。

高等学校工程专科教材

理 论 力 学

(土建、水利类)

王家荣 主编

王家荣 李家祺 张扬健 编著

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国农业出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 16 字数 386 000

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

印数 00 001—6 715

ISBN 7-04-004684-9/TU·56

定价 7.35 元

序

为了加快我国高等学校工程专科基础课程教材建设,以适应我国社会主义建设发展的需要,国家教育委员会于1990年7月在长春召开了高等学校工程专科基础课程教材编审组工作会议。会议的主要任务是:(1)成立高等学校工程专科基础课程教材编审组织;(2)审订“高等学校工程专科基础课程教学基本要求”;(3)制订“高等学校工程专科基础课程1991~1995年教材建设规划”。从此,我国高等学校工程专科基础课程教材建设进入了由国家教委统一领导、有组织、有计划的发展阶段。这对于提高我国高等工程专科教育质量有十分重要的意义。

本书是国家教育委员会高等学校工程专科力学课程教材编审组织编写、审定的高等学校工程专科土建、水利类各专业理论力学课程的教材。

本书是根据“高等学校工程专科理论力学课程教学基本要求”编写的。在编写中,考虑到高等工程专科教育培养应用型人才这一总的目标,注意了总结教学经验,注意了贯彻理论联系实际方针和“少而精”的原则,精选了教材内容。

根据“高等学校工程专科理论力学课程教学基本要求”,考虑到土建、水利类各专业的需要,本书加强了土建、水利类各专业需要的基础部分的内容。书中带有星号“*”的内容是土建、水利类各专业可不要求的内容。本书在内容叙述和定理推证方面力求物理概念清晰,注意联系工程实际。本书采用国际单位制(SI)单位。

本书由扬州工学院王家荣教授主编。太原电力高等专科学校李家祺副教授、扬州工学院张扬健副教授参编。本书的内容提要、

序、目录、绪论、第四、六、十、十一、十三、十四、十六章由扬州工学院王家荣教授编著，第一、二、七、九、十五、十七章由太原电力高等专科学校李家祺副教授编著，第三、五、八、十二章由扬州工学院张扬健副教授编著，张扬健副教授还编选了第十六章的习题。本书由王家荣教授对全书进行统稿。

本书由东北水利水电高等专科学校程景山副教授主审，南昌水利水电高等专科学校王志锋副教授参加审阅。北京航空航天大学谢传锋教授复审了书稿。他们对书稿提出了宝贵的意见，谨致谢意。

由于水平所限，编著时间也比较匆促，难免有不足或者欠妥之处，欢迎读者提出宝贵意见。

王家荣

一九九四年二月十六日于扬州工学院

目 录

绪论	1
一、理论力学的研究对象和内容	1
二、学习理论力学的目的	2
三、理论力学的研究方法和学习方法	3

第一篇 静 力 学

第一章 静力学的基本概念和公理	5
§ 1-1 刚体和质点的概念 平衡的概念	5
§ 1-2 力的概念 力系	6
§ 1-3 静力学公理	7
§ 1-4 约束和约束反力	10
§ 1-5 物体的受力分析和受力图	18
思考题	23
习题	25
第二章 汇交力系	29
§ 2-1 平面汇交力系	29
§ 2-2 空间汇交力系	44
思考题	50
习题	51
第三章 力矩 力偶理论	57
§ 3-1 力对点之矩	57
§ 3-2 力对点之矩的矢量表示	60
§ 3-3 平面力偶理论	62
§ 3-4 空间力偶理论	69
思考题	73
习题	74

第四章 平面任意力系	78
§ 4-1 平面任意力系向一点的简化	78
§ 4-2 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	90
§ 4-3 平面平行力系的平衡方程	94
§ 4-4 刚体系统的平衡 静定和静不定问题	97
§ 4-5 桁架	105
思考题	113
习题	116
第五章 摩擦	127
§ 5-1 滑动摩擦	128
§ 5-2 摩擦角和自锁现象	130
§ 5-3 考虑摩擦时物体的平衡	134
*§ 5-4 滚动摩擦的概念	139
思考题	142
习题	142
第六章 空间任意力系	148
§ 6-1 力对轴的矩	148
§ 6-2 力对点的矩与力对通过该点的轴的矩的关系定理	151
§ 6-3 空间任意力系向一点的简化	153
§ 6-4 空间任意力系简化的各种情形	157
§ 6-5 空间任意力系的平衡条件和平衡方程	161
思考题	169
习题	170
第七章 重心	177
§ 7-1 重心的概念和重心坐标的普遍公式	177
§ 7-2 物体重心位置的求法	181
思考题	190
习题	191

第二章 运 动 学

第八章 点的运动	196
----------	-----

§ 8-1 用矢径法研究点的曲线运动	196
§ 8-2 用直角坐标法研究点的曲线运动	199
§ 8-3 用自然法(弧坐标法)研究点的曲线运动	205
§ 8-4 曲线运动的特殊情形	215
思考题	216
习题	217
第九章 刚体的基本运动	222
§ 9-1 刚体的平行移动	222
§ 9-2 刚体的定轴转动	224
§ 9-3 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	228
§ 9-4 定轴轮系的传动比	233
思考题	239
习题	240
第十章 点的复合运动	244
§ 10-1 基本概念与定义	244
§ 10-2 点的速度合成定理	249
§ 10-3 牵连运动是平动时点的加速度合成定理	255
思考题	260
习题	262
第十一章 刚体的平面平行运动	269
§ 11-1 刚体平面运动方程	269
§ 11-2 平面运动分解为平动与转动	272
§ 11-3 平面图形内各点的速度	274
*§ 11-4 平面图形内各点的加速度	283
思考题	288
习题	288
综合题	293

第三篇 动 力 学

第十二章 质点运动微分方程	299
§ 12-1 动力学基本定律	299

§ 12-2	质点运动微分方程	301
§ 12-3	质点动力学的第一类问题——已知运动求力	303
§ 12-4	质点动力学的第二类问题——已知力求运动	305
	思考题	311
	习题	312
第十三章	动量定理	315
§ 13-1	动量和冲量	316
§ 13-2	质点的动量定理	319
§ 13-3	质点系的动量定理	322
§ 13-4	质点系的质量中心运动定理	329
	思考题	336
	习题	338
第十四章	动量矩定理	345
§ 14-1	质点的动量矩	345
§ 14-2	质点的动量矩定理	347
§ 14-3	转动惯量	351
§ 14-4	质点系的动量矩定理	363
	思考题	374
	习题	377
第十五章	动能定理	383
§ 15-1	力的功	383
§ 15-2	质点的动能和动能定理	394
§ 15-3	质点系的动能和动能定理	398
*§ 15-4	势力场和势能的概念 机械能守恒定律	407
§ 15-5	功率和功率方程 机械效率	412
	思考题	418
	习题	420
	综合题	427
第十六章	达朗伯原理	430
§ 16-1	质点的惯性力	430
§ 16-2	质点的达朗伯原理	433

§ 16-3	质点系的达朗伯原理.....	436
§ 16-4	惯性力系的简化.....	437
§ 16-5	刚体绕定轴转动时轴承的动反力.....	447
思考题		450
习题		450
综合题		454
第十七章	虚位移原理.....	456
§ 17-1	质点系(机械系统) 约束.....	456
§ 17-2	自由度数目 广义坐标的概念.....	460
§ 17-3	虚位移的概念.....	463
§ 17-4	理想约束.....	464
§ 17-5	虚位移原理.....	464
思考题		474
习题		476
习题答案		482

绪 论

一、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动的最普遍和最基本的规律的科学。理论力学是力学的一个分支学科。它是各门力学学科的基础,也是各门与机械运动密切联系的工程技术学科的基础。

运动是物质存在的形式,是物质的固有属性。广义地来理解,运动包括了宇宙中所发生的一切变化和过程。因此,物质的运动不仅是指物体在空间的位移,而且还指物体在热、电磁、化学以及其他过程中所发生的任何变化。研究这样广泛的物质的运动是很多门学科的任务。物体的机械运动是指物体在空间相对于另一物体的位置随时间而发生的变化。物体的平衡状态,包括静止和匀速直线平动,在工程上一般是相对于地球而言的,它们是机械运动的特殊情形。

物体作机械运动时,其运动状态往往会发生改变,而促使物体机械运动状态改变的原因就是物体间的相互机械作用。物体间的相互机械作用称为力。物体间相互作用的力与物体机械运动改变之间有着密切的联系,所以更具体地说,理论力学是研究作用在物体上的力与物体机械运动改变之间的确定联系的科学。

为了更好地研究物体机械运动的最普遍和最基本的规律,在理论力学中,我们把作机械运动的物体抽象为几个理想的力学模型,即质点、质点系、刚体和刚体系。质点是指具有质量的几何点。质点系是指相互间有一定联系的一群质点。刚体是指各质点间距离保持不变的质点系。刚体系是指由许多刚体组成的系统。这些

理想的力学模型反映了作机械运动物体的最本质的特征。必须指出,理论力学的研究对象仅限于离散的质点、质点系、刚体和刚体系,统称为离散系统,区别于物质在空间连续分布的连续介质。但是,理论力学所研究的普遍性规律也适用于连续介质。

理论力学所研究的力学规律仅限于古典力学的范畴。古典力学是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础建立起来的力学理论。所谓古典力学是针对相对论力学和量子力学而言的。相对论力学研究速度接近光速的物体的运动。量子力学研究微观粒子的运动。古典力学研究运动速度远小于光速的宏观物体的运动。这虽然说明古典力学有局限性,但绝大多数工程实际的力学问题都属于古典力学的研究范畴,且由于古典力学是在生产和科学实践中发展起来的,因而在一般情形下有足够的准确性。因此,对于宏观物体在速度远小于光速时的运动研究,特别是对绝大多数工程实际的力学问题的研究,仍以古典力学的定律为依据。

根据循序渐进的认识规律和本学科的科学体系,理论力学的内容通常由静力学、运动学和动力学三部分组成。

静力学研究力系的简化以及刚体在力系作用下的平衡规律。

运动学从几何学的观点研究质点、刚体和机构的运动,而不考虑作用于其上的力。

动力学研究作用于质点或质点系(包括刚体和机构)上的力与质点或质点系因力而产生的运动变化之间的关系。

二、学习理论力学的目的

机械运动在自然界和工程技术中是最常见和最重要的运动,一切机器和机构的运动、星体的运动、流体的运动都是机械运动。学习理论力学的主要目的在于掌握机械运动的规律,为解决工程技术问题进而发展力学理论创造良好的基础。

理论力学中关于机械运动规律的基本理论具有普遍的重要意义, 土建、水利等类各专业的许多课程, 例如材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、抗震结构以及许多专业课程等, 都是以理论力学为基础的, 所以理论力学是学习一系列后续课程的重要基础。

理论力学是一门理论性与实践性较强的学科, 学习理论力学有助于培养学生辩证唯物主义世界观, 进一步培养学生分析问题和解决问题的能力, 有助于学好其它课程, 为解决工程技术问题创造良好的条件。

三、理论力学的研究方法和学习方法

通过实践而发现真理, 又通过实践而证实和发展真理, 这是人们认识过程的客观规律。理论力学正是遵循这个客观规律发生与发展的。

在生产实践中, 人们通过实验与观察积累了丰富的材料, 再通过抽象化的方法, 经过去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的思考分析过程, 建立了理论力学的理想模型, 从而更深刻地反映出事物的本质特征, 同时把人类在长期的探索与实践中所积累的大量经验和知识加以分析、综合、归纳, 得到了理论力学的公理和定律。这些公理和定律以最集中的形式深刻反映了物质机械运动的规律性。

以公理和定律为基础, 通过推理和严密的数学演绎, 可以得到各种适用于不同特殊情形的结论与定理或公式, 从而建立了理论力学系统的理论。以公理和定律为基础的理论体系, 深刻地揭示了理论力学各定理之间的内在联系, 形成了严密的逻辑系统, 便于学习、掌握和运用, 这也是理论力学学科发展成熟的标志。

实践是检验真理的唯一标准。由推理和严密的数学演绎得到的各种结论、定理或公式, 还必须回到实践中去, 经过实践检验, 证

明其为正确时才能成立。理论力学正是经过长期实践验证,才逐步发展成为一门成熟的学科,并在指导实践中起重要作用。

应用数学工具进行演绎推理和量的计算,有助于更深入地理解力学规律的实质,从而认识事物的内在联系,同时得到数学结论,为解决工程实际问题提供依据,可见数学演绎是很重要的。但是,在重视数学演绎的同时还要重视实践的作用。

对自然界和工程技术中复杂的实际研究对象进行合理的简化,将工程实际问题抽象成为力学模型,再应用已有的力学理论和数学工具进行分析计算,求得解答,在科学技术和生产的发展中,进而发展力学理论,这是我们的任务。

总之,通过实践而发现真理,又通过实践而证实真理和发展真理。从感性认识而能动地发展到理性认识,又从理性认识而能动地指导实践。这就是理论力学的研究方法。

学习理论力学要充分重视基础理论、基本知识和基本技能的学习。要坚持掌握概念、强化应用的原则,应用理论力学的基本方法多做练习,通过解题加深对基础理论和基本知识的理解。这样才能进一步学好理论力学和其它后续课程,才能进一步提高分析与解决工程技术中实际问题的能力,才能更好地掌握机械运动的客观规律。

第一篇 静 力 学

静力学研究刚体在力系作用下的平衡问题。

为了全面地分析刚体的受力和平衡，静力学主要解决两个方面的问题：1. 力系的简化，即如何用一个简单力系等效地代替一个复杂的力系。2. 力系的平衡条件和它的推证以及如何应用这些条件求解未知量。

力系的简化和平衡是静力学的两大问题。

第一章 静力学的基本概念和公理

§ 1-1 刚体和质点的概念 平衡的概念

在静力学中，常把所研究的物体抽象化为刚体。所谓刚体，是指在力的作用下尺寸和形状都不改变的物体。

刚体是理论力学中抽象化的理想模型，事实上并不存在，因为任何物体受到力的作用都要发生变形，不变形的物体是没有的。但在很多情况下，在研究物体的平衡或运动时，物体的变形非常微小，它只是次要的因素，可以略去不计，因而可把物体看成刚体，使问题简化。

静力学的平衡理论是刚体的平衡理论，所以也叫刚体静力学。虽然如此，它仍是研究变形体力学（如材料力学、弹性力学、结构力学等）的重要基础。

在某些情况下，我们又把物体抽象化成质点。所谓质点，是具

有质量的几何点。在实际应用上,质点指在所研究的问题中,形状和尺寸可以忽略的物体。

相互之间有一定联系的一群质点,称为质点系,或机械系统。刚体内各质点的相对位置保持不变,所以刚体是不变质点系。

工程上,把物体相对于地面保持静止或作匀速直线平动称为物体处于平衡状态。物体的平衡状态是物体机械运动的特殊情形。

§ 1-2 力的概念 力系

力是物体间相互的机械作用。力作用的结果,使物体的运动状态发生改变或使物体发生变形。

上述结论说明,力对物体的作用效应有两种:一种是运动效应,也称外效应。一种是变形效应,也称内效应。力对刚体的效应只有外效应,理论力学只研究力的外效应。力的内效应在变形体力学中研究。

实践明证,力对物体的作用效应由力的大小、力的方向和力的作用点决定,三者合称力的三要素。三要素中任何一个发生变化,力的效应就要发生变化。

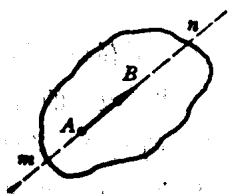


图 1-1

力有大小和方向,又符合平行四边形相加法则,因此力是矢量。力用一有方向的线段表示力,如图 1-1,直线 mn 代表力的作用线, A 点是力矢量的起点, B 点是力矢量的终点, AB 的长度按比例尺等于力的大小,箭头代表力的方向, A 点(或 B 点)代表力的作用点。力矢量用黑体字 $\boldsymbol{F}$ 表示, F 则表示力的大小。

在国际单位制中,力的单位通常用 N 或 kN 。在工程单位制中常用 kgf 或 tf ,二者的换算关系为

在国际单位制中,力的单位通常用 N 或 kN 。在工程单位制中常用 kgf 或 tf ,二者的换算关系为

$$1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$$

$$1 \text{ tf} = 9.8 \text{ kN} = 9800 \text{ N}$$

同时作用于物体上的许多力称为力系。如果有一力系作用于物体上能保持其运动状态不变,则此力系称为平衡力系。如果作用于物体上的力系可用另一力系来代替,而不改变原力系对物体的运动效应,则这两个力系互为等效力系。如果一个力与一力系等效,则这个力称为该力系的合力。

§ 1-3 静力学公理

所谓公理,是人类经过长期的观察和经验积累总结出来的结论,它的正确性已经在实践中得到验证,不用再作证明而为大家所公认。静力学公理是人们对于力的基本性质的概括和总结,是静力学的理论基础。

公理 1 力的平行四边形规则

作用在物体上同一点的两个力可以合成一个合力。合力的作用点也在该点,合力的大小与方向,由以这两个力为边所构成的力的平行四边形的对角线来确定。

如图 1-2,在物体上 A 点作用着力 F_1 和 F_2 ,则它们的合力 R 如图所示,用公式表示为

$$R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

即合力矢量 R 等于两个分力 F_1 和 F_2 的矢量和。

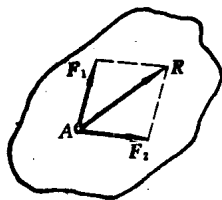


图 1-2

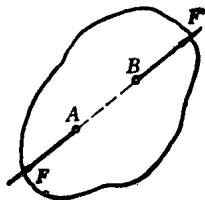


图 1-3