

高等工业学校函授教材

(高等教育自学通用)

上册

理论力学

冶金工业出版社

高等工业学校函授教材
(高等教育自学通用)

理论力学

(上册)

臧剑秋 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校函授教学大纲编写的理论力学函授教材, 适合机械及土建类各专业选用。全书分上、下两册, 上册包括静力学(物体的受力分析、平面力系、图解静力学基础、摩擦、空间力系、重心等八章)和运动学(点的运动学和刚体运动学等五章; 下册为动力学(质点运动微分方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、碰撞、振动等十章)。

作者有多年函授教学经验。编写时根据成人教育的特点, 除在文字叙述方面注意启发诱导、由浅入深以及在定理、公式推导方面做到详细明确外, 每章的开头写了提要, 结尾写了小结, 复习思考题及习题, 力求使本教材能起到“日校教材+教师”的作用。

本教材可供函授、电大、职大、夜大及自学考试者等选用。

前 言

“四化”建设要求大力发展高等成人教育，当前函授、电大、夜大、自学考试等多种形式的成人教育正在迅速发展，本书就是应这种蓬勃发展的新形势的需要而编写的。

本书是参照高等工业学校函授教学大纲并根据成人教育的特点编写而成。除在内容、文字的叙述方面注意启发诱导，由浅入深、通俗易懂以及在定理、公式的推导方面做到详细明确等外，还考虑到自学的要求，在写法上力求能起到“日校教材+教师”的作用，因此，将教学方法以及自学方法指导贯穿在教材之中，每章开头有提要，结尾有小结、复习思考题及习题，使读者在没有教师的条件下，能通过自学顺利地掌握这一门学科。

本书分上、下两册，上册包括静力学和运动学；下册为动力学。本书适合机械及土建类各专业使用，其中上册第五章图解静力学基础供土建类专业选用；第十三章刚体转动的合成供机械类专业选用。书中附有“*”号的内容供学有余力或工作中有需要的读者选学用。

编写一本适合成人自学的教材，是编者多年的愿望，过去虽曾从事函授教学并多次作过调查，但由于水平有限、经验不足，加之编写时间仓促，书中不妥及错误之处一定不少，恳请读者多提宝贵意见，以便在实践中不断修正、完善。

本书特请杨熙冲老师审阅，提出不少宝贵意见，全书插图由刘孟鸾老师进行设计、绘制。

在本书编写工作的收尾阶段，发现我患了不治之症——癌症。因此，本书的编写收尾工作，深得北京钢铁学院的党政领导，尤其是力学教研室的领导，以及冶金工业出版社的关怀和帮助。在我卧病期间，宋锡铭老师、庞云同学协助完成了全书的编写收尾工作，

赵彦芳、寻尹君为本书描了全部插图。现借本书出版之机，对上述领导和为本书的出版提供过帮助的所有同志表示由衷的感谢。

臧剑秋

一九八四年十月

高等工业学校函授教材
(高等教育自学通用)

理 论 力 学

(下 册)

臧剑秋 编著

冶金工业出版社

上册 目 录

绪论	1
第一篇 静力学	6
前言	6
第一章 力的基本性质及物体的受力分析	9
§ 1—1 力的概念	9
§ 1—2 力的基本性质	11
§ 1—3 约束和约束反力	17
§ 1—4 物体的受力分析·受力图	25
第二章 平面汇交力系	41
§ 2—1 工程中的平面汇交力系问题	41
§ 2—2 平面汇交力系合成与平衡的几何法	44
§ 2—3 平面汇交力系合成与平衡的解析法	55
第三章 力矩与力偶	78
§ 3—1 力矩	78
§ 3—2 力偶及其性质	84
§ 3—3 平面力偶系的合成与平衡条件	91
第四章 平面一般力系	105
§ 4—1 工程中的平面一般力系问题	105
§ 4—2 平面一般力系的简化	109
§ 4—3 平面一般力系的平衡条件·平衡方程	121
§ 4—4 平面平行力系	133
§ 4—5 物体系统的平衡问题	140
§ 4—6 简单桁架的内力计算	149
第五章 图解静力学基础	173
§ 5—1 绳索平衡与索多边形	173
§ 5—2 用图解法简化平面一般力系	176

§ 5—3	平面一般力系平衡的图解条件	180
§ 5—4	关于图解法的几点说明	188
第六章	摩擦	194
§ 6—1	工程中的摩擦问题及分类	194
§ 6—2	滑动摩擦	195
§ 6—3	考虑摩擦时物体的平衡问题	200
§ 6—4	摩擦角的概念·自锁现象	206
§ 6—5	滚动摩擦	214
第七章	空间力系	231
§ 7—1	工程中的空间力系问题	231
§ 7—2	空间汇交力系的合成与平衡条件	232
§ 7—3	空间力偶系的合成与平衡条件	240
§ 7—4	力对点之矩的向量表示法与力对轴之矩	246
§ 7—5	空间一般力系向一点的简化	254
§ 7—6	空间一般力系的平衡条件·平衡方程	258
§ 7—7	空间平行力系的平衡条件	267
§ 7—8	将空间问题化为平面问题来处理	272
第八章	重心	286
§ 8—1	工程中的重心问题	286
§ 8—2	重心的概念与重心的坐标公式	287
§ 8—3	简单形状物体的重心	290
§ 8—4	组合形状物体重心的求法	296
§ 8—5	重心的实验求法	302
第二篇	运动学	315
前言		315
第九章	点的运动学	319
§ 9—1	基本概念	319
§ 9—2	点的曲线运动的向径法	320
§ 9—3	点的曲线运动的直角坐标法	323
§ 9—4	点的曲线运动的自然坐标法	330

§ 9—5 点的直线运动·····	345
第十章 刚体的基本运动·····	359
§ 10—1 刚体的平动·····	359
§ 10—2 刚体的转动·····	363
§ 10—3 转动刚体内各点的速度与加速度·····	367
§ 10—4 定轴轮系的传动比·····	372
§ 10—5 角速度与角加速度向量·*以向量积表示速度与加 速度·····	378
第十一章 点的复合运动·····	392
§ 11—1 点的相对运动、牵连运动和绝对运动·····	392
§ 11—2 速度合成定理·····	395
§ 11—3 速度合成定理的应用举例·····	399
§ 11—4 牵连运动为平动时的加速度合成定理·····	407
§ 11—5 牵连运动为转动时的加速度合成定理·哥氏加 速度·····	414
第十二章 刚体的平面运动·····	438
§ 12—1 平面运动方程式·····	438
§ 12—2 平面图形上各点的速度·····	445
§ 12—3 求速度的瞬心法·····	453
§ 12—4 平面图形上各点的加速度·····	464
第十三章 刚体转动的合成·····	491
§ 13—1 刚体绕两个平行轴转动的合成·····	491
§ 13—2 刚体绕两个相交轴转动的合成·····	497

下 册 目 录

第三篇 动力学·····	507
前言·····	507
第十四章 动力学的基本定律·····	509
§ 14—1 动力学基本定律·····	509

§ 14—2	动力学基本定律的适用范围·惯性坐标系·····	513
第十五章	质点运动微分方程·····	517
§ 15—1	质点的运动微分方程式·····	517
§ 15—2	质点动力学第Ⅰ类问题——已知运动求力·····	519
§ 15—3	质点动力学第Ⅱ类问题——已知力求运动·····	524
§ 15—4	质点动力学的综合问题·····	541
第十六章	质点的相对运动微分方程·····	557
§ 16—1	质点的相对运动微分方程·····	557
§ 16—2	几种特殊情形·····	563
第十七章	动量定理·····	575
§ 17—1	动力学普遍定理概述·····	575
§ 17—2	质点的动量定理·····	580
§ 17—3	质点系的动量定理·····	589
§ 17—4	质心运动定理·····	597
*§ 17—5	变质量质点动力学的基础知识·····	613
第十八章	动量矩定理·····	629
§ 18—1	质点的动量矩定理·····	629
§ 18—2	质点系的动量矩定理·····	639
§ 18—3	刚体的转动微分方程·转动惯量的计算·····	649
§ 18—4	刚体平面运动微分方程·····	673
第十九章	动能定理·····	696
§ 19—1	力的功·····	696
§ 19—2	物体的动能·····	713
§ 19—3	动能定理·····	720
§ 19—4	功率与功率方程·····	732
§ 19—5	势力场与势能·机械能守恒定律·····	737
第二十章	达朗伯原理·动静法·····	777
§ 20—1	惯性力·····	777
§ 20—2	质点的达朗伯原理·动静法·····	782
§ 20—3	质点系的达朗伯原理·····	789

§ 20—4	惯性力系的简化·惯性力系的主向量与主矩·····	795
第二十一章	虚位移原理·····	825
§ 21—1	约束及其分类·····	825
§ 21—2	虚位移·····	836
§ 21—3	理想约束·····	844
§ 21—4	虚位移原理·····	844
*§ 21—5	广义坐标形式的虚位移原理·····	857
第二十二章	碰撞·····	882
§ 22—1	工程中的碰撞问题·碰撞现象的特点·····	882
§ 22—2	两物体的对心正碰撞·····	885
§ 22—3	碰撞时质点系动量的变化·碰撞冲量对质点系质心运动的作用·····	899
§ 22—4	碰撞时质点系动量矩的变化·碰撞冲量对定轴转动刚体及平面运动刚体的作用·····	900
§ 22—5	碰撞对转动刚体轴承的作用·撞击中心·····	908
第二十三章	振动·····	921
§ 23—1	工程中的振动问题及其分类·····	921
§ 23—2	单自由度系统的自由振动·····	923
§ 23—3	单自由度系统的衰减振动·····	951
§ 23—4	单自由度系统的受迫振动·····	961
§ 23—5	振动的利用与消除·隔振·····	980

绪 论

(一)

马克思主义的辩证唯物主义认为，客观世界是物质的，而物质处于永恒的、不停的运动之中。物质的运动形式是多种多样且十分复杂的，如机械运动、发热、发光、电磁现象、化学过程、生物的新陈代谢以及人类的思维活动等，都是不同的运动形式。正如恩格斯所说：“运动，就一般的意义来说，就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说，它包括宇宙中发生的一切变化和过程，从单纯的位置移动起直到思维”。

自然界的各种运动形式都包含各自的内在的矛盾规律，它们之间既有密切的联系，也存在本质上的差别。对于各种运动形式的特有的矛盾规律性的研究，就形成各门不同的自然科学。

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

所谓机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化，它是自然界和工程中最普遍的一种运动。如星辰日月、江河湖海的运动；气体与液体的流动；各种机器的运转；各种运输工具（车辆、轮船、飞机、火箭、飞船）的运动以及建筑物的振动等都是机械运动。

机械运动是物质的各种运动形式中最简单也是最基本的一种形式。由于一切运动都是和一定的位置移动相联系的，因此，机械运动是其它各种运动形式的基础和组成部分。理论力学中的一些概念（如力、质量），一般规律（如能量转化与守恒），以及研究方法在一定程度上将应用到其它学科领域中去，因此理论力学是工程技术的重要理论基础，学好理论力学将为进一步学习其它自然科学创造一定的条件。在机械类专业教学计划中理论力学是材料力学、机械原理、机械零件及专业课的基础。

由于机械运动在自然界和工程中的普遍存在，理论力学所揭示

的一般规律，亦将直接用来指导工程实践和推动工程技术的进一步发展。因此，学习理论力学对于解决工程技术问题也有一定的直接意义。

(二)

人类对于自然界运动规律的认识，是在实践中一步一步地由低级向高级、由简单向复杂发展的。由于机械运动的规律比较简单、明显，而且在生产实践中最早应用，所以理论力学是最早发生并获得发展的科学之一。

理论力学的发展过程与其它一切自然科学一样是紧密地依附于社会生产力的发展的。人们在长期的生产实践活动中，最初，由于农业、建筑、运输、军事、商业、手工业等的需要，大量发明并使用斜面、杠杆、滑轮、辘轳、绞盘……等简单机械，积累了丰富的力学经验，并掌握了一些规律。

我国早在三千多年前的夏代（公元前2033—1560）已制造出世界上第一辆车，殷代（公元前1560—1123）已经出现有轮辐的车轮和四马战车，周代（公元前1123—723）已经开始应用金属轴承并使用油来润滑。秦汉以后，我国正处在封建社会的初期，由于生产关系适合当时的生产力水平，生产曾获得较快的发展，在一定程度上推动了科学技术的发展，特别是力学在应用方面有了很大发展，如深井取水用的辘轳；水排——一种用水带动风箱的冶炼鼓风设备；指南车；记里鼓车；测量地震的地动仪；天文仪器——浑天仪；离心抛石机等。广泛应用了杠杆原理、齿轮传动、凸轮传动、重心及惯性等原理。公元前四世纪，我国就出现了世界上第一部有力学论述的典籍《墨经》。总之，一直到十四世纪，我国在力学上的成就一直在世界上居于领先地位。但以上这些力学的最早成就，主要还局限于使用和研究一些简单工具和机械，涉及到的主要是平衡问题，也就是说内容只限于静力学的范围。后来由于长期的封建统治以及半封建半殖民地社会的统治，生产力的发展受到极大的阻碍，科学的发展失去生产实践的基础，加上统治阶级为麻醉和统治人民，大

力宣扬唯心主义，严重遏制了科学技术的发展，因此，至解放前，我国力学的发展却一直落在发达国家后面。

在欧洲，早期，力学也曾得到一定的发展，后来，由于封建和神权的统治，生产力受到束缚，力学和其它的自然科学一样，几乎处于停滞状态。直至十五世纪后半期，资本主义兴起，由于工商业资本的发展，生产力迅速提高，纺织、钟表制造、磨坊、航海、造船、武器、建筑等的发展，开始大量使用较复杂的机械，并逐步提高了机器的运转速度。生产和技术中的大量问题迫切要求力学的发展，如航海事业的发展，迫切需要研究天体的运动规律。而生产和技术的发展又为力学的发展提供了物质技术条件和大量的科学材料，如望远镜、精确的钟表等仪器和工具的相继制成，为动力学问题的观察和实验提供了必要的条件和大量的材料。这些就是力学中的动力学部分能在这一时期得到迅速发展的根本原因。通过大量的观察和系统的实验，在掌握了大量科学材料的基础上，人们进行了科学的总结和概括，发现了力学的一些规律。首先应当提到的是哥白尼（1473—1543）的“太阳中心说”，它首先向宗教神学宣战，从此自然科学便开始从“迷信”中解放出来。在此以后，开普勒（1571—1630）根据长期天文观测的资料，总结出行星运动的三大定律。伽利略（1564—1642）系统研究了落体速度变化的规律，并发现了惯性定律。牛顿（1643—1727）用物质的普遍运动规律的观点对前人的发现进行了概括，系统地提出了力学的基本定律，奠定了经典力学^①的理论基础。

近代，由于科学技术高度发展，一些新技术，如高速大型机器，精密仪器，自动控制，火箭技术，导弹，宇宙航行等都促使力学发展而形成许多专门的分支，如振动理论，陀螺理论，运动稳定性理论，工程控制理论，变质量力学，外弹导学等。特别是电子计算机的出现为力学的迅速发展提供了有力的工具并开辟了广阔的前景。

① 经典力学是指以牛顿运动定律为基础而形成的力学体系，又称牛顿力学或古典力学，以区别本世纪初创立的相对论和量子力学。

综上所述,力学的发生与发展是以生产力的发展状况为转移的,同时力学的形成与发展反过来又对工程技术的发展起推动作用,从而进一步促进生产的发展,科学与生产是相互依赖互相推进的,但起决定作用的是生产,正如恩格斯所说:“科学之有赖于生产更甚于生产之有赖于科学”。

(三)

理论力学的特点是理论体系严密而完整,并与工程实际问题紧密地联系着,是一门理论性与方法性都很强的学科。

在理论力学的概念和理论的形成过程中,抽象化和数学演绎这两种方法起着重要的作用。抽象化是在通过观察、实验和实践而占有大量材料的基础上,根据所研究问题的性质和范围,抓住那些起决定性作用的主要因素,舍弃那些次要的、偶然的因素,从而得到不同于实际的对象,但本质上最能反映对象特定规律的概念和理想模型。抽象不能是任意的,它应能真正反映出事物中起根本作用的那些性质,就是说必须是“科学的抽象化”。只有这样,我们才能把握真理,而客观规律才能通过对理想模型的研究顺利地揭示出来。经抽象、概括而得到一些基本概念和基本规律之后,可借助于数学演绎的方法,得到一些定理和公式,构成完整的理论体系,这些理论是否正确还需经过实践的检验,而且建立理论的目的也在于指导实践,促进生产力的发展。因此,学习方法的总的要求是理论联系实际,学习中随时注意应用理论力学所总结的规律去解释一些机械运动现象,更重要的是指导解决生产中存在的大量力学问题,正如毛泽东同志所说:“马克思主义的哲学认为十分重要的问题,不在于懂得了客观世界的规律性,因而能够解释世界,而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界”。在学习上要着重培养分析问题和解决问题的能力。要善于从实际中提出问题,并善于用力学的理论去分析、解决工程实际中的问题。在学习时,对一些力学概念、原理、定律的理解是十分重要的;同时,力学方法,特别是从生产实际问题抽象化为力学问题的方法更重要。这两方面是密切联

系不可偏废的。书中例题是应用力学理论解决实际问题的一种形式，应重视对例题的分析，对解题的思路和步骤应充分理解并能熟练地掌握。

理论力学是一门理论系统性很强的学科，各部分内容之间存在着内在的联系，学习中应注意类比，在类比中了解共性，掌握规律，从而加深理解，增强记忆。在学习时要注意抓两头：开始问题的提出及最后内容的小结，由此带动一章内容的学习。自学时应抓住内容的基本线索，如：本章要解决什么问题？这些问题是如何提出的，它与前面内容有何关系？解决这些问题的依据或出发点是什么？解决这些问题的方法与过程怎样？最后得出一些什么结论？这些理论如何用来指导解决实际问题，它们的应用范围如何？解决实际问题的方法与步骤是什么？等等。

只要读者坚持刻苦自学、掌握科学方法，一定能够学好理论力学，为祖国“四化”作出贡献的。

(四)

理论力学的内容包括三个部分：静力学；运动学；动力学。

静力学——研究物体的平衡规律，即研究物体平衡时，作用在其上的力应满足的条件。

运动学——研究物体运动的几何性质（如轨迹、速度、加速度等），而不考虑作用在物体上的力。

动力学——研究物体的运动与作用在物体上的力之间的关系，因此动力学是静力学与运动学的综合。

第一篇 静 力 学

前 言

静力学的任务是研究刚体平衡的规律及其应用。刚体平衡规律指的是刚体平衡时作用在其上的力所满足的条件。因此，静力学首先研究力的性质。

平衡通常指的是物体相对于地球的运动状态不发生变化，它包括两种情况：第一，相对于地面处于静止状态，例如房屋、机器座等；第二，相对于地面处于匀速（运动快慢不变）直线（运动方向不变）运动状态，例如匀速提升的料车、罐笼等。显然，平衡是机械运动的一种特殊情况。由于地球本身在运动，所以平衡是相对的。

静力学中一般将物体视为刚体。所谓刚体，就是在任何情况下都不变形的物体，或者说，在任何外力作用下，任意两点间的距离始终不变的物体。显然，宇宙中并无刚体存在，物体在外力作用下都会产生一定的变形，变形是物体的一种属性。在大量的工程实际问题中，物体的变形都是很微小的，在静力学部分研究物体的平衡时，这种微小的变形对所研究的问题的结果并无明显的影响，另一方面，如果考虑这种变形，将会使问题的研究一开始就变得很复杂，以致难以解决。因此，在静力学中，忽略物体的变形这一次要因素，而将物体看成刚体，这不仅在实际上是允许的，而且在研究上也是必要的。这种忽略问题的次要因素而抓住主要因素，从而将事物理想模型化的方法就是科学抽象。如图静前所示桥式起重机结构，由于结构本身的重量及载荷的作用，横梁会发生微小的弯曲变形，设计要求铅垂方向最大变形（即最大挠度）不能超过梁长的 $1/500$ 。又如一般机械中的轴，最大挠度都不超过轴承间距离的万分之五，最大扭转角为每米轴长不超过 $0.5 \sim 1^\circ$ 。这种微小的变形对物体的平衡及受力等问题都影响甚小，因此，可以将起重机横梁