

高等工业学校函授教材
(高等教育自学通用)

上册

理论力学

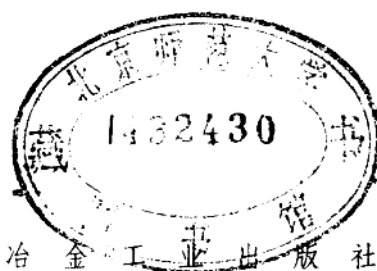
冶金工业出版社

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



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

111/43/29



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—1	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

第三篇 动 力 学

前 言

一、动力学的任务

在运动学前言中曾提到，当物体所受的力系不满足平衡条件时，物体将失去平衡而发生运动状态的变化，因此就产生两个问题：物体按什么样的规律运动？物体为什么会产生这样或那样的运动？前一个问题在运动学中已作阐述，后一问题正是动力学需要研究和解决的问题。因此，动力学是研究物体的机械运动与物体间相互作用之间关系的科学。在动力学里将建立物体运动与作用在其上的力之间的普遍规律。

我们知道，静力学只研究了物体的平衡规律，即研究力的性质以及物体平衡时作用在其上的力必须满足的条件，因此，静力学只研究了力，而没有涉及到运动状态的变化，故静力学又称“平衡力学”。运动学只从几何的角度来描述物体的运动规律，即只研究了物体运动的一些几何特性，因此，运动学只研究了运动而没有涉及到力，故运动学又称“几何运动学”。动力学则要研究运动与力之间的关系，因此，动力学又称“运动力学”。显然，从三者的研究任务可知，静力学和运动学是研究物体机械运动的两个不同的侧面，它们是动力学的基础；而动力学研究物体机械运动的普遍规律，它是静力学与运动学的综合。

动力学知识，在实际工程和其它自然科学领域中都有广泛的应用。特别是近代科学技术的飞速发展，对动力学提出了更高的要求。如现代机器逐步向高速、精密方向发展，建筑结构也愈来愈需要研究动载荷的作用。因此，在设计机器和建筑结构时愈来愈广泛地需要进行动力学计算。又如，近代宇航和火箭技术的发展要求研究宇航的轨道、火箭的反推力以及飞行方向的控制等，这就涉及到行星运行理论、变质量力学以及运动稳定性方面的知识。这些问题在本教材中不可能一一加以研究，但是动力学所建立的

机械运动普遍规律则是研究和解决这些问题的必备的理论基础。

二、动力学两类问题

工程中的动力学问题是非常广泛的，但根据动力学的任务来概括，一般分为两大类。

1. 已知物体的运动规律，求作用在该物体上的力。如确定机器在正常运转时各构件所受的力以及作用在基础上的力；提升钢丝绳的张力；宇航员的超重等等，称为动力学第Ⅰ类问题。

2. 已知物体所受的力，求物体的运动规律。如抛射体运动方程与运行轨道的确定；宇宙速度的确定等等，称为动力学第Ⅱ类问题。

三、动力学的内容

动力学包括三个定律，三个定理，二个原理，二个专题。

动力学的全部内容以几个基本定律为基础，在这个基础上，运用数学演绎的方法，建立几个普遍定理：

动量定理（及质心运动定理）；

动量矩定理（及刚体平面运动微分方程）；

动能定理（及功率方程）。

各个定理进一步从不同的方面阐明了物体运动的某些物理量的变化与力的相应的作用量之间的关系，它们比基本定律具有更普遍的意义。

动力学还讲述两个原理，并以此提出两种方法：

达伦贝尔原理，据此提出动静法，即把动力学问题在形式上变为静力学问题来处理的方法。

虚位移原理，即从功的观点建立系统平衡的普遍原理，从而提供解决系统平衡问题的更一般的方法。

在运动学中讲过点的复合运动，讨论了点对不同坐标系运动之间的关系，与之对应，动力学中也将讨论点对不同坐标系来说，如何建立其运动与力之间的关系，这就是“质点的相对运动微分方程”。

最后，动力学还讨论两个工程应用专题：碰撞与振动。

第十四章 动力学的基本定律

提 要

动力学基本定律，即牛顿定律，是整个动力学的理论基础。
包括

1. 惯性定律；
2. 力与加速度关系定律；
3. 作用与反作用定律。

对于阐述定律时涉及到的一些重要概念（如惯性、质量），以及各定律的实质、内容、适用范围等问题必须深刻理解。

§ 14-1 动力学基本定律

所谓定律，乃是指对客观外界进行大量的观测以及在大量实验的基础上经过概括而总结出的规律性的东西。如开普勒经过长期的观测而发现了行星运动规律；伽利略经过大量的观测和实验而提出了惯性定律、落体定律等，并建立了以观测和实验为出发点的科研方法；牛顿在继承前人成就的基础上，又经过自己的艰苦工作，把动力学的规律总结概括成几个基本定律，于1687年在他的“自然哲学的数学原理”一书中提出，并对整个动力学作了系统的叙述。因此，动力学基本定律又称牛顿定律。

一、第一定律（惯性定律）

如果物体^①不受外力的作用，它将永远保持静止或作匀速直线运动。就是说，物体如不受外力作用，则其运动状态将不发生改变，物体这种保持原有运动状态不发生改变的性质，称为惯性，惯性是物体的一种基本属性，故第一定律又称惯性定律。

此定律表明，物体运动状态的千变万化不是凭空产生的，而

① 这里所说的物体均指质点而言。

是与物体之间的相互机械作用（力）密切联系在一起的。物体如不受力，其运动状态不改变；为使物体运动状态发生改变，必须有力的作用。因此，惯性定律定性地表示了物体运动状态的变化与力之间的关系。

第一定律给出了物体惯性的定义并指明物体具有这一普遍属性，而且说明了力是物体机械运动发生变化的原因。

二、第二定律（力与加速度关系定律）

物体^①运动量的变化与它所受的力成正比，而且沿着力的作用方向发生。牛顿提的“运动量”是指物体的质量与速度的乘积 $m\mathbf{V}$ ，即动量，而变化是指随时间的变化。运动量的变化也就是动量对时间的一阶导数。因此，第二定律的数学表达式为

$$\frac{d(m\mathbf{V})}{dt} = \mathbf{F} \quad (14-1)$$

由于工程中大部分的问题，物体的质量是不随时间而变的，且有 $\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{a}$ ，所以，第二定律又可以表示为如下形式

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (14-2)$$

即：物体受力作用产生加速度，加速度方向与力的方向相同，加速度的大小与质点质量的乘积等于力的大小。这是在物理学中已熟知的牛顿第二定律的关系式，它表示了质量、力、加速度三者的关系，称为动力学基本方程，它定量地表述了物体运动与力之间的关系。

显然，式（14-2）不适用于质量随时间而变的物体。

从式（14-2）可以看出，如果作用在物体上的力保持不变，则物体的质量与它的加速度成反比，即 m 大， a 就小，物体运动状态的改变就小； m 小， a 就大，物体运动状态的改变就大。另外，如果要求产生一定的加速度，即加速度保持不变，则 m 大，所需要的力 F 也大； m 小，则需要的力 F 也小。这就表明，质量

① 这里所说的物体均指质点而言。

越大越不容易改变运动状态，如要改变，则相应地需要较大的力。所以说，**质量是物体惯性大小的度量**。所以，常常又把由此定律规定的物体的质量称为**惯性质量**。

我们知道，根据牛顿万有引力定律有

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中 m_1 与 m_2 分别为两质点的质量， r 为它们之间的距离， f 为万有引力常数。将此公式应用于地面的物体，用 m 表示物体的质量^①， P 表示地球对该物体的引力（即重量^②），得

$$P = f \frac{mM}{R^2}$$

式中 M 与 R 分别表示地球的质量与半径。

设有质量为 m 的质点，在重力作用下，朝地面自由降落（在真空中不计阻力），用 g 表示自由降落的加速度，则根据动力学基本方程有

$$P = mg = f \frac{mM}{R^2}$$

即

$$g = f \frac{M}{R^2} \quad (14-3)$$

可见，在重力场中，自由落体的加速度与落体的质量无关，这一加速度称为**重力加速度**。所以，在真空中，一切物体都以同一加速度降落，这一结论已为伽利略以试验证实。

由于地球是扁球体，地球半径将随着纬度的增加而减小，由式（14-3）看出，物体的重力加速度将随纬度的增加而增加，如

① 这里的质量应指引力质量，在真空中，一切物体都以同一加速度降落的试验事实说明，物体的惯性质量等于它的引力质量。

② 严格讲，由于地球自转的影响，物体的重量并不等于地球对它的引力，参看 § 16-2。

地 点	纬 度	重力加速度值
赤 道	0°	978.039 cm/s ²
上 海	31°12'	979.436 cm/s ²
北 京	39°56'	980.122 cm/s ²
“标 准”	45°	980.665 cm/s ²
哈 尔 滨	46°	980.77 cm/s ²
两 极	±90°	983.215 cm/s ²

根据我国南北各地实测的结果取平均值可取为

$$g = 980 \text{ cm/s}^2$$

或

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

因为重力加速度 g 的大小随所在地的纬度而改变，所以重量也随物体在地面上的位置不同而改变。

在工程中，由于物体的重量易于测定，所以常用重量来计算质量。

因为

$$P = mg$$

所以

$$m = \frac{P}{g} \quad (14-4)$$

要注意，物体的重量和质量大小有确定的关系，但决不应该把这两个量混淆起来。重量是地球对物体的吸引力，即作用在物体上的重力的大小，它只有在重力场中才有意义，而且它是随地域不同而变的量；而质量则是物体惯性的度量，是物体本身所固有的，在经典力学中是视为与物体运动速度无关的不变的恒量。

三、第三定律（作用与反作用关系定律）

物体之间的作用力与反作用力总是大小相等、方向相反、作用在同一直线上，分别作用在两个互相作用的物体上。这个定律在静力学中已讲过，它说明物体之间的作用力与反作用力总是相互地，成对地出现，它们必然是等值、反向、共线。这一结论不仅在物体平衡时适用，而且也适用于作任何形式运动的物体。这一定律是研究解决系统动力学的依据。

以上就是牛顿三定律，表述了质点在一个力作用下的运动规