

高等学校教材

理論力学

郝桐生編

高等教育出版社

高等学校教材



理 論 力 学

郝 桐 生 編

高等教育出版社

本书系根据1962年5月审訂的高等工业学校电机制造、动力类专业课程的“理論力学教学大綱(試行草案)”編写的。內容分静力学、运动学和动力学三部分。

书中帶有星号“*”或用小字排印的內容，可根据专业要求决定取舍。

本书由北京矿业学院理論力学教研室郝桐生編。初稿由唐山铁道学院金傳炳和西安交通大学施明誠审閱。

本书暫作交流讲义印行，供高等工业学校本科五年制电机制造、动力、采矿和冶金类专业选作理論力学課程的教材。

2091/28

理 論 力 学

郝 桐 生 編

北京市书刊出版业營業許可証出字第119号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店經售

统一书号K13010·1164 开本 850×1168 3/32 印张 10 1/2。

字数 280,000 印数 0,001—5,000 定价(5) 1.00

1965年1月第1版 1965年1月北京第1次印刷

序

本书是根据 1962 年 5 月审訂的高等工业学校电机制造、动力类专业适用的“理論力学教学大綱(試行草案)”編写的,可作为上述专业和采矿、冶金类各专业理論力学課程的教学用书。本书主要滿足 110 学时类型各专业的要求,但在讲授时如作适当删减和增补,亦可适用于 90—130 学时范围内的各专业。

考虑到同学的接受能力,本书在靜力学中汇交力系和力偶系采取了平面情形与空間情形分开讲授的安排。在动力学中普遍定理不按质点与质点系分章而是按定理分章,这样的安排一方面是为了节省篇幅,另一方面也是为了便于安排习题課。

本书中例题大致可分为两种类型,一种是典型例题,着重于理論的应用和解题方法的訓練;另一种是联系工程实际的例题,便于培养同学的工程概念。例题数量虽多,但不可能滿足各类专业的需要,因此在讲授时可作必要的增删。

本书中带有星号“*”或用小字排印的内容,可根据专业要求决定取舍。

本书在編写过程中得到了北京矿业学院理論力学教研室同志們的大力协助,同时也吸取了西北工业大学、哈尔滨工业大学和清华大学等学校理論力学教研室所編理論力学讲义中的不少宝贵經驗。

初稿完成后曾在北京矿业学院采煤专业、矿山机电专业試用一次,在試用时教研室同志又提出了不少建設性的意見。本书承唐山铁道学院金傳炳和西安交通大学施明誠同志等审閱,并蒙北京航空学院理論力学教研室提出了宝贵意見,在此一并致謝。

本书虽經几次修改,但限于編者水平,缺点和錯誤在所难免,恳切希望讀者提出批評和指正。

編者

1964年8月

目 录

序.....	ix
緒論.....	1
一、理論力学的研究对象.....	1
二、理論力学的任务及其研究内容.....	1
三、理論力学的研究方法.....	2
四、理論力学发展簡史.....	4
靜 力 学	
第一章 靜力学的基本概念与公理	8
§ 1-1 基本概念.....	8
§ 1-2 靜力学公理.....	11
§ 1-3 約束与約束反力.....	14
§ 1-4 受力图.....	19
第二章 平面汇交力系	21
§ 2-1 汇交力系合成与平衡的几何法.....	21
§ 2-2 力的分解.....	25
§ 2-3 力在軸上的投影.....	26
§ 2-4 汇交力系合成的解析法·汇交力系平衡的解析条件.....	27
第三章 平面力偶系	31
§ 3-1 两平行力的合成.....	31
§ 3-2 力偶·力偶矩.....	34
§ 3-3 力偶的等效.....	35
§ 3-4 力偶系的合成与平衡.....	37
第四章 平面任意力系	39
§ 4-1 力对于点之矩.....	39
§ 4-2 力綫的平移.....	41
§ 4-3 平面任意力系向已知点的簡化·主矢与主矩.....	42
§ 4-4 簡化結果的分析·合力之矩定理.....	45
§ 4-5 平面任意力系的平衡条件与平衡方程.....	47
§ 4-6 平行力系的合成与平衡.....	51
§ 4-7 物体系的平衡·靜定与靜不定的概念.....	54

§ 4-8 平面靜定桁架內力的分析	59
第五章 摩擦	65
§ 5-1 摩擦現象	65
§ 5-2 滑动摩擦·极限摩擦定律	66
§ 5-3 具有滑动摩擦的平衡問題	70
§ 5-4 滚动摩擦	74
*第六章 平面力系图解法	78
§ 6-1 平面任意力系的合成及平衡条件	78
§ 6-2 用图解法求支座反力	81
第七章 空間汇交力系	83
§ 7-1 空間汇交力系的合成	83
§ 7-2 空間汇交力系的平衡条件	86
第八章 空間力偶系	88
§ 8-1 空間力偶的等效·力偶矩矢	88
§ 8-2 力偶系的合成与平衡	90
第九章 空間任意力系	93
§ 9-1 力对于点之矩的矢量表示法	93
§ 9-2 力对于軸之矩	94
§ 9-3 力对于点之矩与力对于通过此点的軸之矩的关系	96
§ 9-4 空間力系向已知点的簡化·主矢与主矩	97
*§ 9-5 簡化結果的分析·合力之矩定理	100
§ 9-6 空間任意力系的平衡方程	102
§ 9-7 平行力系的中心与重心	106
运 动 学	
第十章 运动学的基本概念及点的运动学	114
§ 10-1 运动学的基本概念	114
§ 10-2 决定点的运动的基本方法	116
§ 10-3 点的直綫运动方程·速度与加速度	119
§ 10-4 簡諧运动及曲柄連杆机构中滑块的运动	122
§ 10-5 速度与加速度的矢徑表示法	126
§ 10-6 速度与加速度的直角坐标表示法	127
§ 10-7 自然軸系	131
§ 10-8 速度与加速度的自然表示法	132
第十一章 剛体运动的基本种类	138
§ 11-1 引言	138

§ 11-2	刚体的平行移动	139
§ 11-3	刚体的定轴转动	141
§ 11-4	转动刚体内各点的速度与加速度	144
§ 11-5	绕定轴转动刚体的转动问题	148
§ 11-6	角速度及角加速度的矢量表示·以矢积表示转动刚体内点的速度与 加速度	151
第十二章	点的合成运动	154
§ 12-1	点的合成运动的概念	154
§ 12-2	绝对运动、相对运动和牵连运动的速度与加速度	156
§ 12-3	点的速度合成定理	158
§ 12-4	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	161
§ 12-5	牵连运动为转动时点的加速度合成定理	163
第十三章	刚体的平面平行运动	167
§ 13-1	刚体平面平行运动的概述	167
§ 13-2	平面运动分解为平动与转动·刚体平面运动的运动方程	168
§ 13-3	平面图形内各点的速度·速度投影定理·速度瞬心	171
§ 13-4	平面图形内各点的加速度·*加速度瞬心的概念	178
§ 13-5	刚体绕平行轴转动的合成	181
动力学		
第十四章	动力学基本定律	185
§ 14-1	绪言	185
§ 14-2	动力学基本定律	186
第十五章	质点的运动微分方程	190
§ 15-1	质点的运动微分方程	190
§ 15-2	动力学第一类基本问题	192
§ 15-3	动力学第二类基本问题	195
第十六章	质点的振动	203
§ 16-1	振动的概念	203
§ 16-2	质点的自由振动	203
§ 16-3	阻力对于自由振动的影响	209
§ 16-4	质点的强迫振动·共振	214
§ 16-5	阻力对于强迫振动的影响	219
§ 16-6	振动的利用和消除	221
*第十七章	质点的相对运动	223
§ 17-1	质点的相对运动动力学	223

§ 17-2	牵连运动为平动时质点的相对运动微分方程	223
§ 17-3	牵连运动为定轴转动时质点的相对运动	226
第十八章	动量定理	230
§ 18-1	动力学普遍定理	230
§ 18-2	动量与冲量	230
§ 18-3	质点的动量定理	232
§ 18-4	质点系的动量定理	235
§ 18-5	质心运动定理	240
第十九章	动量矩定理	245
§ 19-1	质点的动量矩定理	245
§ 19-2	质点系的动量矩定理	248
§ 19-3	刚体的定轴转动微分方程	252
§ 19-4	转动惯量	256
第二十章	动能定理	261
§ 20-1	能的概念的起源	261
§ 20-2	功与功率	262
§ 20-3	质点的动能定理	267
§ 20-4	作用于质点系与刚体上的力系的功	269
§ 20-5	质点系和刚体的动能	272
§ 20-6	质点系的动能定理	274
*§ 20-7	势力场·势能·机械能守恒定律	278
第二十一章	碰撞理论	281
§ 21-1	碰撞现象	281
§ 21-2	碰撞的基本方程——碰撞时动量的变化	282
§ 21-3	两物体的对心碰撞	284
§ 21-4	碰撞时动能的变化	287
§ 21-5	小球对于固定面的碰撞·恢复系数的测定	288
§ 21-6	碰撞时动量矩的变化·碰撞对绕定轴转动的刚体的作用	291
§ 21-7	打击中心	293
第二十二章	达朗伯原理与刚体动力学基础	295
§ 22-1	质点的达朗伯原理·惯性力	295
§ 22-2	质点系的达朗伯原理	300
§ 22-3	惯性力系的简化	301
*§ 22-4	转动刚体对于轴承的压力	305
§ 22-5	刚体的平面运动微分方程	308

第二十三章 虚位移原理	310
§ 23-1 质点系的自由度·约束与广义坐标.....	310
§ 23-2 虚位移与理想约束.....	314
§ 23-3 虚位移原理.....	315
§ 23-4 用虚位移原理求约束反力.....	320
§ 23-5 动力学的普遍方程.....	322

緒 論

一、理論力学的研究对象

理論力学是研究物体机械运动一般規律的科学。

所謂机械运动，乃是物体在空間的位置随時間的变化。因为物体的平衡是机械运动的特殊情况，所以理論力学也研究物体的平衡問題。值得注意的是在宇宙中沒有絕對的平衡，“一切平衡都只是相对的和暫时的”^①。

机械运动是生产中最常遇到的运动，因而力学是发展最早的自然科学之一，可見力学的研究具有实际的意义。另一方面，机械运动是物质运动中的最簡單的运动形式，因而力学不能解釋比机械运动更为高級的运动現象。

理論力学所研究的內容是以伽利略和牛頓所建立的基本定律为基础的古典力学。由于物理学中物质构造理論、电动力学和放射性理論的重大发展，证明了古典力学的規律不适用于物体运动接近光速的情形，也不适用于基本粒子的运动。相对論力学的創立給古典力学带来了根本的变化，建立了時間、空間、质量及能量間的联系，并指出了古典力学的局限性。值得指出的是古典力学并未丧失其重要意义，只有在物体运动的速度接近于光速的情况下，由古典力学所得到的結果才有显著的差錯。在工程实际問題中，古典力学仍然是研究机械运动的既准确又方便的工具。

二、理論力学的任务及其研究內容

学习理論力学的目的在于掌握机械运动的客观規律，能动地

① 恩格斯：自然辯证法，人民出版社1959年版，第206頁。

改造客观世界，为生产建設服务。因此学习本課程的任务：一方面是运用力学基础知識結合其他有关的課程，解决工程技术中的实际問題；另一方面是为学习一系列的后继課程，如材料力学、机械原理、水力学、流体力学、彈性力学等以及有关的专业課程提供重要的基础理論。在学习本課程时不仅对于基本理論要有系統的理解，而且还应熟练地掌握力学的計算方法和技能，提高独立解决問題的能力。此外理論力学的学习有助于培养辩证唯物主义世界观，提高对問題的分析能力和树立正确的思想方法，并能自觉的运用科学規律改造自然为社会主义建設服务。

本課程限于古典力学的研究。根据循序渐进的認識規律及科学体系，本課程的內容分为靜力学、运动学及动力学三部分。

靜力学是研究物体平衡規律的科学，同时也研究力的一般性质及其合成法則。

运动学是从几何的角度来研究物体运动的規律而不考虑物体运动的原因。

动力学是理論力学最主要的組成部分，它研究物体的运动与其所受力之間的关系，即由物体的运动出发去認識物体运动的原因，从而建立物体的运动与其所受力之間的規律，以闡明物体运动的各种現象。

三、理論力学的研究方法

任何一門科学由于研究对象的不同而有不同的研究方法，但是任何科学在探索客观規律的过程中都必须符合毛主席指出的“通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理”^①的过程。理論力学也毫不例外，即从实践出发，经过抽象化、綜合、归

^① 毛澤东：实践論，毛澤东选集第一卷，人民出版社1952年版，第285頁。

納，建立公理，再用数学演繹和邏輯推理而得到定理和結論，然后再通过实践来证实理論的正确性。

观察和实验是理論发展的基础。从力学发展的历史过程可以看出，理論体系的建立和形成的每一个阶段都是与人类在生产劳动中的观察和实验分不开的。从观察实际得到的材料必須經過思考的加工才能上升到理論。因为我們所观察到的材料是复杂多样的，不易从中抓住事物的本质；因此必須在各种現象中抓住起决定性作用的主要因素，撇开次要的、局部的、偶然性的因素，这样才能深入現象的本质，明确事物間的內在联系，这样的过程称为抽象化过程。抽象化的力学現象也称为力学的理想模型。例如在研究物体的机械运动时，撇开物体的变形就得到剛体的理想模型，撇开物体的广延性就得到质点的概念，撇开摩擦的作用就得到理想約束的概念，撇开流体的粘性便得到理想流体的概念，等等。經過第一次簡化之后，为了滿足进一步的要求，再考虑初步近似研究中沒有估計到的因素建立新的模型，得出更接近于实际情况的結果。这种由簡單到复杂的研究方法在科学中得到广泛的应用。例如建立剛体平衡規律之后，考虑物体变形的特征就得到彈塑性物体的模型，并进一步闡明变形体的平衡規律。实践的证明指出，正确的抽象不是脫离实际而是更深刻的接近实际，正如列宁所說：“物质的抽象，自然規律的抽象，价值的抽象及其他等等，一句話，那一切科学的（正确的、郑重的、不是荒唐的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然”^①。

通过抽象化，将长期以来从生产活动中直接观察实验所积累的經驗加以分析、綜合和归納，建立最基本的公理或定律作为本課程最基本的理論基础；再根据这些公理，通过演繹推理的方法，考

^① 列宁：黑格尔“邏輯学”一书摘要，列宁全集第三十八卷哲学筆記，人民出版社1959年版，第181頁。

慮到問題的具体条件,从而得出各种形式的定理和結論。

在力学的推理过程中广泛地使用数学工具。数学这一有效的科学工具,不但运用在邏輯推理方面,而且运用于量的計算方面。通过数学語言,有助于更进一步揭示各物理量間的内在联系及机械运动規律的实质。計算机的出現为計算技术在工程技术問題中的应用开辟了广闊的远景。应当指出的是数学工具的运用,不能脱离具体研究的对象,只有数学运算与力学現象的物理本质紧密的結合起来,才能得出符合实际的正确理論。

从实践得到理論,再由理論回到实践。只有当理論很好地符合客观实践时,这样的理論才是正确可靠的;也只有这样的理論,才有指导实践的作用。

四、理論力学发展簡史

古代力学的萌芽、理論力学基础的建立时期

力学的发展与其他自然科学一样,是与社会生产力及社会物质文化的发展有不可分割的联系。力学的发展历史完全证实了恩格斯所指出的科学之有賴于生产,更甚于生产之有賴于科学。

力学是最早获得发展的科学之一。远在奴隶社会时代,人們就通过劳动所积累的經驗开始創造了一些簡單工具;在不断改进工具与克服困難的过程中又积累了不少經驗,从經驗里获得知識,形成力学規律的起点。在这个时期,力学研究的对象主要是簡單的工具和机械(如斜面、杠杆、滑車等),其中所涉及的問題仅限于靜力学的問題。

我国的劳动人民远在春秋战国时代就积累了不少力学知識。在叙述我国古代偉大学者墨子(約公元前468~382)及其学派学說的著作“墨經”中有一部分涉及力学問題,对于力的定义及杠杆平衡問題等提出了正确的見解。古希腊哲学家亚里斯多德(公元前

385~322)也研究过以小制大、以輕举重的杠杆平衡問題。但是用普遍的方法对于杠杆平衡給出完善的解答是由古希腊自然科学家阿基米德(公元前 287~212)完成的。阿基米德在他的著作“比重論”中,总结了前人积累起来的靜力学知識,奠定了靜力学的基础。

在西方,从阿基米德以后很长一个时期,由于封建、神权的长时期的統治,生产力停滞不前,力学及其他科学得不到发展。而我国在这个时期经历了汉、隋、唐、宋几个朝代,力学及机械学得到了发展,汉朝大科学家張衡(78~139)創造了天文仪器“渾天仪”和測量地震的仪器“候風地动仪”,此外独輪車、滑車及輪軸在这个时期也有发展,魏晋时代馬鈞創造了利用差动齿輪傳动的指南車。

在建筑工程上我国的劳动人民发挥了独特的風格,現在无数宏偉的古代建筑足以证明这个問題。隋朝偉大的工程师李春(581~618)建造了“安济桥”,这个单跨石拱桥不但发挥了石料的抗压强度而且具有美观的外形。尽管祖国的劳动人民在力学与其他自然科学方面发挥了偉大的創造精神,但由于长期的封建統治,科学家及劳动人民的創造成果得不到重視,因此,自十五世紀以后西欧在科学技术迅速发展时,我国的科学仍停留在封建时期的水平。

十五世紀后期,在西方,商业資本、手工业、航海工业和軍事工业等都得到了空前的发展,于是力学及其他科学都获得巨大的成就。意大利著名物理学家辽納多·达·芬奇(1452~1519)研究过物体沿斜面运动和滑动摩擦的問題,并第一次用試驗方法得出了滑动摩擦力与接触面大小无关的結論,同时在研究平衡問題时引出了力矩的概念。

达·芬奇以后不久,波兰科学家哥白尼(1473~1543)創立的宇宙太阳中心学說,引起科学界宇宙观的革命。从此自然科学开始从神学中解放出来,科学得到了大踏步的发展。

动力学的奠基人意大利著名科学家伽里略(1564~1642)确

定了自由落体运动規律，并明确地提出了慣性定律及加速度的概念。

由伽里略开始建立动力学基本定律，經過荷兰学者惠更斯(1629~1695)的努力，后来由英国偉大科学家牛頓(1642~1727)总其大成。牛頓在总结了前輩学者成就的基础上，于1687年在他的名著“自然哲学的数学原理”中提出动力学的三个基本定律，并且从这些定律出发将动力学作了系統的叙述。此外，他还建立了质量的概念；創立了物体在有阻力的介质中的运动理論；发现万有引力定律，推动了天体力学的发展。应当指出的是牛頓在自然科学方面还表现了形而上学的錯誤观点。他在古典力学的基础中引入了所謂“絕對空間”和“絕對時間”，他的关于宇宙起源的学說也导致“第一推动”的唯心主义的錯誤結論。

理論力学的发展时期

十七世紀是动力学的奠基时期，十八、十九世紀是理論力学的发展成熟时期。十八世紀由于天文和軍事、造船工业的迅速发展，給力学提出了不少新問題，同时数学的发展为力学的发展創造了有利条件。于是当瑞士学者約翰·伯努利(1667~1748)提出虛位移原理之后，瑞士数学力学家、彼得堡科学院院士欧拉(1707~1783)在他的名著“力学”一书中給出了用微分方程表示的分析方法来解决质点运动的問題。1743年法国科学家达朗伯(1717~1785)在他的著作“动力学論文”中提出一个重要原理——达朗伯原理，提供了非自由质点动力学的普遍解法。

在伯努利和欧拉的工作基础上，法国科学家拉格朗日(1736~1813)在分析力学方面得到了輝煌的成就。拉格朗日把虛位移原理与达朗伯原理結合起来，导出了非自由质点系的运动微分方程即著名的第二类拉格朗日方程。

十九世紀上半期由于大量机器的使用，功和能的概念在科学

技术中得到了发展；能量守恒与轉化定律不但在工程技术問題中具有重大的意义，而且沟通了各門科学之間的联系。

十九世紀剛体动力学及运动稳定性理論获得了迅速的发展。俄国女数学家柯娃列芙斯卡娅(1850~1891)在剛体定点轉动問題上得出了欧拉和拉格朗日以后一个世紀沒有解决的第三种情形的解，这个問題在陀螺仪技术的发展中有重要的作用。俄国数学家李雅普諾夫(1857~1918)在运动稳定性的研究中有重要的貢獻，他的研究超过了当时西欧学者的成就。

变质量质点动力学是现代噴气飞行与火箭技术的理論基础，这一問題是俄国学者密歇尔斯基(1859~1935)首先提出的，与此同时齐奥尔科夫斯基(1857~1935)研究了火箭的运动規律及其計算方法。

理論力学的現代問題

二十世紀以来，由于工业建設、现代国防技术和其他新技术的需要，力学向着专门的方向发展，彈塑性力学、流体和气体力学、运动的稳定性理論、非綫性振动、陀螺动力学以及飞行力学等方面都有很大的发展。

中华人民共和国成立以来，在党和毛澤东主席的正确领导下，我国的科学事业已进入了新的历史时期，力学科学也得到了迅速的发展，并对生产起了很大的促进作用。可以預料，我国的科学事业，包括力学在內，随着工农业生产的不断发展，将在今后获得更大的成就。