

高等学校试用教材

理论力学

下 册

南京工学院 西安交通大学 主编

南京工学院 西安交通大学 浙江大学
华中工学院 西北工业大学 陕西机械学院 合编
上海工业大学 镇江农业机械学院 华东工程学院

人民教育出版社

高等学校试用教材^u

理 论 力 学

下 册

南京工学院 西安交通大学 主编

南京工学院 西安交通大学 浙江大学
华中工学院 西北工业大学 陕西机械学院 合编
上海工业大学 镇江农业机械学院 华东工程学院

人 民 教 育 出 版 社

本书系根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科力学教材会议上拟定的编写大纲编写的,可作为高等学校工科机械类各专业 120~180 学时理论力学课程的教学用书,也可供工程技术人员参考。

全书分上、下两册,上册为静力学及运动学部分,下册为动力学及专题部分。本书采用国际单位制(SI),每章附有习题,书末并附有习题答案。

理 论 力 学 下 册

南京工学院 西安交通大学 主编

南京工学院 西安交通大学 浙江大学
华中工学院 西北工业大学 陕西机械学院 合编
上海工业大学 镇江农业机械学院 华东工程学院

人 民 教 育 出 版 社 出 版

科学书店上海发行所发行

浙江台州印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 13 12/16 字数 331,000

1979年2月第1版 1983年1月第7次印刷

印数 570,001—718,000

书号 15012·0132 定价 1.15 元

目 录

第三篇 动 力 学

第十二章 动力学基本方程	3
§ 12-1 动力学基本定律	3
§ 12-2 力学单位制	7
§ 12-3 质点运动微分方程	9
习 题	23
第十三章 动量定理	29
§ 13-1 质点动量定理	30
§ 13-2 质点系动量定理	36
§ 13-3 质心运动定理	45
§ 13-4 流体在管道内流动时产生的动压力	50
*§ 13-5 变质量质点的运动	55
习 题	60
第十四章 动量矩定理	65
§ 14-1 质点动量矩定理	65
§ 14-2 质点系动量矩定理	71
§ 14-3 刚体的转动惯量 平行移轴定理	76
§ 14-4 刚体绕定轴转动的微分方程	82
*§ 14-5 质点系相对于质心的动量矩定理	88
*§ 14-6 刚体平面运动微分方程	93
习 题	98
第十五章 功能原理	105
§ 15-1 力的功	105
§ 15-2 质点动能定理	113
§ 15-3 质点系动能定理	117

§ 15-4 势力场 势能 机械能守恒定律	127
§ 15-5 功率 功率方程 机械效率	136
习 题	142
第十六章 达朗伯原理	150
§ 16-1 质点的惯性力的概念	150
§ 16-2 质点的达朗伯原理	152
§ 16-3 质点系的达朗伯原理	156
*§ 16-4 刚体绕定轴转动时轴承的动反力	165
习 题	172
第十七章 碰撞	179
§ 17-1 碰撞现象及其基本特征 瞬时力	179
§ 17-2 碰撞的两个阶段 恢复系数	181
§ 17-3 碰撞时的基本定理 两球对心正碰撞	184
§ 17-4 碰撞过程的动能损失	189
§ 17-5 碰撞冲量对转动刚体的作用 撞击中心	193
习 题	197
第十八章 虚位移原理	201
§ 18-1 问题的提出	201
§ 18-2 系统的约束及其分类	202
§ 18-3 虚位移及其计算	205
§ 18-4 理想约束	210
§ 18-5 虚位移原理	212
*§ 18-6 自由度与广义坐标	218
*§ 18-7 以广义坐标表示的系统的平衡条件	221
习 题	225
第十九章 机械振动基础(一)	231
§ 19-1 概述	231
§ 19-2 单自由度系统的自由振动	234
§ 19-3 阻尼对自由振动的影响——衰减振动	252
§ 19-4 单自由度系统的受迫振动	259
§ 19-5 隔振的理论基础	272

§ 19-6 转轴的临界转速·····	278
习 题·····	280

第四篇 动力学专题

第二十章 质点的相对运动·····	287
§ 20-1 质点相对运动的动力学基本方程·····	287
§ 20-2 质点相对运动基本方程的应用·····	289
§ 20-3 抛射体的偏移·····	296
习 题·····	301
第二十一章 动力学普遍方程和拉格朗日方程·····	306
§ 21-1 动力学普遍方程·····	306
§ 21-2 拉格朗日方程·····	309
习 题·····	321
第二十二章 机械振动基础(二)·····	326
§ 22-1 二自由度系统振动方程的建立·····	326
§ 22-2 二自由度系统的自由振动·····	332
§ 22-3 二自由度系统的受迫振动 动力减振器·····	340
§ 22-4 阻尼对受迫振动的影响 阻尼减振器·····	345
§ 22-5 多自由度系统振动的概念·····	349
§ 22-6 自激振动的概念·····	354
§ 22-7 非线性振动简介·····	359
习 题·····	371
第二十三章 陀螺仪理论基础·····	375
§ 23-1 刚体绕相交轴转动的合成·····	376
§ 23-2 定点转动刚体内各点的速度·····	379
§ 23-3 欧拉角 欧拉运动学方程·····	381
§ 23-4 定点转动刚体的动量矩·····	384
§ 23-5 赖柴定理 进动规律·····	386
§ 23-6 刚体定点转动的欧拉动力学方程·····	388
§ 23-7 规则进动时的外力矩·····	390
§ 23-8 陀螺力矩与陀螺效应·····	392

§ 23-9	在万向支架上的陀螺仪的运动微分方程.....	398
§ 23-10	陀螺仪的技术方程.....	403
§ 23-11	冲击力矩对陀螺仪自转轴运动的影响.....	406
§ 23-12	常值力矩作用时陀螺仪自转轴的运动.....	409
§ 23-13	陀螺仪初级近似理论的基本假设.....	413
§ 23-14	陀螺仪的基本特性及其某些应用.....	414
习 题		416
附录: 力学单位表		420
习题答案		422

第三篇 动 力 学

我们在静力学中研究了物体的平衡问题，但没有考虑物体在不平衡力系的作用下将会怎样运动；在运动学中只研究了物体运动的几何性质，但没有考虑物体的运动与作用于物体上的力之间的关系。上述的在静力学和运动学中没有考虑的这些问题正是动力学要研究的问题。所以动力学的任务就是研究物体运动的变化和作用于物体上的力之间的关系。与静力学和运动学相比，动力学研究的是机械运动的更一般的规律。

动力学在力学中占有重要的地位，对促进科学技术的发展也有着重大的意义。我们在绪论中已指出：随着生产的日益发展和科学技术的日益进步，对力学提出了更多更高的要求。特别是由于现代机械向着高速、高效、精密的方向发展，这些要求大多与动力学密切相关。因为随着机器转速的提高，转动构件上各点的向心加速度将以转速的平方数增大，在设计选材和制造上就不能不考虑这个因素。发射地球同步卫星，在轨道、高度方面都有更严格的要求，如果发射的最后一级火箭的速度即使有千分之二的误差，卫星就会偏离预定的轨道近百公里，要使卫星准确地进入预定的轨道，就必须严格控制火箭的运行方向和速度。这就需要高精度的自动控制系统和测速、定位系统等。因此，许多过去只进行静力分析（即不考虑其加速度的影响）的问题，由于高速、高效、精密等的要求，现在就必须进行动力分析和计算。其它如运动稳定性，结构、管道、运输工具等的振动，转子平衡，临界转速，机床的动刚度等问题，都是与动力学有关的。本课程当然不可能对涉及到的许多专业的动力学问题一一进行研究，但是动力学的基本理论和方

法,对于了解和处理这些问题都是十分重要的基础。

动力学问题可以用大家熟知的动力学基本定律来研究,也可以用从基本定律推导出来的几个普遍定理来研究,还可以象静力学那样用建立平衡方程的方法来研究。途径是多种多样的,要根据问题的特点及复杂程度作具体分析。我们将对这些基本内容作较为详尽的讨论。有些比较专门的问题将列为专题介绍。

在动力学中经常用到的两种力学模型是质点和质点系。所谓质点是指具有一定质量的几何点。所谓质点系是指许多(有限的或无限多的)相互联系着的质点所组成的系统。在实际问题中,并不是所有的物体都可以抽象为单个的质点。当物体不能抽象为单个质点时,可把它看成由许多质点所组成的系统。刚体可以看作是由无数个质点组成的,而其中任意两质点间的距离都保持不变的系统,故称为不变质点系。机构、流体(包括液体和气体)等则称为可变质点系。动力学的内容包括质点动力学和质点系动力学两大部分。

第十二章 动力学基本方程

本章在复习动力学基本定律的基础上，着重讲述应用动力学基本方程解决质点动力学两类问题的方法及应注意的问题，还介绍了力学的单位制及其应用。

§ 12-1 动力学基本定律

在物理学中，大家已经知道动力学有三条基本定律。这些定律是人们在长期的生产斗争和科学实验中有关力学方面的丰富经验的结晶，并为大量实践所证实。它们是牛顿在总结前人经验的基础上概括出来的，所以通常称为牛顿三定律。这三条定律描述了动力学最基本的规律。

(一) 第一定律

质点如不受其它物体作用，则将保持其原来静止的或匀速直线运动的状态。

大家知道，静止着的物体如不受其它物体的作用，将继续保持静止。运行中的汽车虽然关了油门，但并不立即停止运动而继续滑行，由于受到阻力的作用，滑行了一段距离才慢慢停下来；而且阻力愈小，滑行的这段距离愈长。在一切阻力不存在的理想情况下，可以推断，汽车将不会停止而一直沿水平面滑行下去。这一现象说明：如果物体不受其它物体的作用，将保持它原有的运动状态（包括静止）不变。也就是说，若原来是静止的将继续保持静止；若原来在运动的则将保持它原来的速度大小和方向作匀速直线运动。物体力图保持其运动状态不变的特性称为惯性。因此，这个定律也叫惯性定律。

第一定律指出了力是改变物体运动状态(即获得加速度)的外部原因。自然界根本不存在绝对不受力作用的物体。在分析实际问题时,可以将物体不受力作用理解为物体受平衡力系的作用。

(二)第二定律

质点受到力作用时所获得的加速度的大小与合力的大小成正比,与质点的质量成反比;加速度的方向与合力的方向相同。

如果物体的运动状态(速度的大小、方向)发生了变化,即物体有了加速度,由第一定律可知,它必然是受到了其它物体的作用。人们对自然界的长期观察和科学实验证明:质点受力作用所获得的加速度的大小,与力的大小成正比,与质点的质量成反比;加速度的方向与力的方向相同。如以 $\boldsymbol{a}$ 表示质点的加速度, m 表示质点的质量, $\boldsymbol{\Sigma F}$ 表示作用于质点上所有力的合力,则在选择适当的单位后此定律可表示为

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{\Sigma F}}{m}$$

或

$$\boldsymbol{\Sigma F} = m\boldsymbol{a} \quad (12-1)$$

上式是解决动力学问题的基本依据,故称为动力学基本方程。

由式(12-1)可知:同样的力作用在不同质量的质点上,则质量小的获得的加速度大,质量大的获得的加速度小,即质量愈大,它的运动状态愈不容易被改变,也就是说质量愈大,惯性愈大。可见,质量是质点惯性的度量。质量的单位为公斤(kg)。

如物体的重量为 G ,因其在真空中自由降落的加速度(重力加速度)为 g ,则根据式(12-1)知,这个物体的重量与质量的关系为

$$G = mg \quad (12-2)$$

这说明重量和质量是两个完全不同的概念,前者是地球对物体引力的大小,而后者是物体的固有属性,物体惯性大小的度量,

二者不能混为一谈。严格地说，重量与重力加速度都是随着物体在地球上所处位置的纬度、高度和地质情况的不同而有差异的；但二者的比值，即质量，却保持不变。即使脱离了地球的引力范围，在重量不存在的情况下，质量仍旧存在。由于各地的重力加速度都能通过实验测定，因此，知道了物体的重量就可根据式(12-2)求出其质量。反之，知道了物体的质量也可以根据式(12-2)求出其重量。

需要特别指出的是：动力学基本方程并非在任何坐标系中都成立，而是只适用于某些特定的坐标系。凡动力学基本方程能够适用的坐标系称为惯性坐标系。在一般工程技术中，将固连于地球的坐标系或相对于地面作匀速直线运动的坐标系作为惯性坐标系，就可以得到相当精确的符合实际的结果。在一些特殊问题中，如研究人造卫星的轨道、洲际导弹的飞行等，由于物体运动的范围相当大，这时，地球自转产生的影响比较显著，若再把固连于地球的坐标系作为惯性坐标系，就会产生较大的误差。因此，对于需要考虑地球自转影响的那些问题，就要选取地心-恒星坐标系。这种坐标系是以地心为原点，三根轴指向三个恒星的坐标系。在研究天体的运动时，则采用日心-恒星坐标系，即将上述坐标系的原点移至太阳中心。今后，如无特别说明，我们都采用和地球固连的坐标系。

(三)第三定律

两个物体间的作用力和反作用力，总是大小相等、方向相反、并沿同一作用线分别作用在这两个物体上。

这个定律也叫做作用与反作用定律，我们已经在静力学中熟悉了，它同样也适用于动力学。它提供了从质点动力学过渡到质点系动力学的桥梁。

动力学基本定律有其适用的范围。

牛顿所处的时代是十七、八世纪。由于当时生产水平的限制，因而牛顿本人认为这些基本定律只适用于“绝对运动”。他所谓的“绝对运动”，是指相对于“与任何其它外界事物无关、而永远相同和不动的”“绝对空间”的运动，而时间也是“与任何其它外界事物无关地流逝着”的“绝对时间”。在这里，牛顿一方面承认空间和时间的客观性，这是他唯物主义的一面；另一方面，他却又认为它们是孤立的、不变的、与物质运动完全无关的，这又是他形而上学的一面。

辩证唯物主义认为：运动是物质不可分割的根本属性，是物质存在的方式。物质的运动是在时间和空间中的运动，所以时间、空间也是物质存在的方式。“世界上除了运动着的物质，什么也没有，而运动着的物质只有在空间和时间之内才能运动。”^①因此，根本就不存在“与任何其它外界事物无关的”所谓不变的“绝对空间”和“绝对时间”。由于人类对自然界的认识是逐步深入的，人们的时空概念也是在不断发展的。

近代物理学的研究证明：空间、时间以至质量都与物体运动的速度有关，物体的速度愈接近光速(3×10^8 公里/秒)，时间、空间和质量受速度的影响就愈加明显。当物体运动的速度能够与光速相比拟时，动力学基本定律就不适用了。同时，对于微观粒子的研究，在一般情况下，上述基本定律也不适用。然而，在一般工程技术中，物体运动的速度都远小于光速。例如，人造地球卫星能够环绕地球运转所需的最小速度，即第一宇宙速度（在工程技术中已属比较高的速度）只有 8 公里/秒。第二宇宙速度（能脱离地球而绕太阳运转的人造行星的最小速度）也仅 11.2 公里/秒。所以，在一般工程技术中，物体运动速度对于时间、空间和质量的影响都是微不足道的，应用上述基本定律得到的结果，都是十分精确的。因而

^① 《列宁选集》第二卷，177 页。

以基本定律为基础的所谓古典力学或牛顿力学，在今日工程技术中仍具有十分重要的价值，并得到了广泛的应用。

§ 12-2 力学单位制

力学的单位制有多种，随所选用的基本单位而不同。本书采用国际单位制(代号 SI)。在参阅其它资料时须注意国际单位制和其它单位制的换算关系(见附录)。

(一) 国际单位制

国际单位制是一种比较科学的计量单位制，它是米制发展的现代形式。原来的米制是多种单位制和单位并用，因之，同一个量就有多种不同的单位。为了消除这些缺点，国际计量委员会吸取米制的优点制定了国际单位制。国际单位制涉及所有专业领域，采用国际单位制将来可以废除几乎所有其它单位制和单位。因此采用国际单位制就可以消除各种单位制和单位并存造成的混乱，节省大量的人力和物力，有利于促进国民经济和国际交往的发展。

在国际单位制中，所有单位分为三类：

(1) 基本单位；(2) 导出单位；(3) 辅助单位。

基本单位是国际单位制的基础，共有七个单位。在这些基本单位中，和本门课程有关的只是三个单位(表 12-1)。因此，以下仅仅介绍和这三个单位有关的单位。

表 12-1 国际单位制基本单位示例

量	名 称	代 号
长 度	米	m
质 量	公斤(千克)	kg
时 间	秒	s

导出单位是借助乘或除的数学符号通过代数式用基本单位表示的单位, 如表 12-2 所列。

有些导出单位已具有专门名称和特有代号, 如表 12-3 所列。

表 12-2 基本单位表示的国际单位制导出单位示例

量	国 际 单 位 制	
	名 称	代 号
面 积	平方米	m^2
体 积	立方米	m^3
速 度	米每秒	m/s
加速度	米每平方秒	m/s^2
密 度	公斤(千克)每立方米	kg/m^3

表 12-3 具有专门名称的国际单位制导出单位示例

量	国 际 单 位 制			
	名 称	代 号	用其它国际制单位表示的关系式	用国际制基本单位表示的关系式
频 率	赫 兹	Hz		s^{-1}
力	牛 顿	N		$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
应 力	帕斯卡	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
能、功	焦 耳	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
功 率	瓦 特	W	J/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

辅助单位是尚未规定它们是属于基本单位还是导出单位的个别国际制单位。这类单位目前有两个, 只有弧度与本课程有关。辅助单位可用于构成导出单位, 如角速度和角加速度的单位等。

由表 12-3 可以看出, 在国际单位制中力的单位属于导出单位。根据式(12-1)中质量、加速度与力的关系, 质量为 1 公斤(kg)的物体, 若在某一力的作用下正好获得 1 米/秒² (m/s^2) 的加速度, 则这个力的大小应为 1 单位, 规定的专门名称就叫 1 牛顿(N)。所

以牛顿(N)与基本单位长度(m)、质量(kg)、时间(s)的关系式是

$[\text{牛顿(N)}] = [\text{质量单位}] \times [\text{加速度单位}] = \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ 如表 12-3 所示。

(二)工程单位制

在力学和工程中,过去常采用工程单位制。它是以长度、时间和力这三种量的单位为基本单位的,其它力学量的单位都由这三种基本单位通过力学公式导出,为导出单位。例如,取长度单位为米、时间单位为秒、力的单位为公斤,则质量的单位就可根据式(12-1)导出:

$$\begin{aligned} [\text{工程质量单位}] &= \frac{[\text{力的单位}]}{[\text{加速度单位}]} = \frac{\text{公斤}}{\text{米} \cdot \text{秒}^{-2}} \\ &= \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}} \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \right) \end{aligned}$$

这个单位没有专门名称,称为工程质量单位。显然,如果物体在 1 公斤力的作用下,能获得 1 米/秒²的加速度时,该物体的质量就是 1 工程质量单位。

所谓 1 公斤力(kgf)就是在纬度 45° 的海平面上质量为 1 公斤的物体所受的重力。国际计量委员会在实验基础上规定的标准重力加速度之值为 9.80665 米/秒²,故由式(12-2)知

$$\begin{aligned} 1 \text{ 公斤力(kgf)} &= 1 \text{ 公斤质量(kg)} \times 9.80665 (\text{m/s}^2) \\ &= 9.80665 \text{ 牛顿(N)} \\ &\approx 9.8 \text{ 牛顿(N)} \end{aligned}$$

而由式(12-1)又可以看出: 1 公斤力即 9.80665 牛顿的力产生 1(m/s²)加速度时的质量应为 9.80665 公斤,故

$$1 \text{ 工程质量单位的质量} = 9.80665 \text{ 公斤} \approx 9.8 \text{ 公斤}$$

§ 12-3 质点运动微分方程

动力学基本方程由于其中质点的加速度等于质点的矢径对时

间的二阶导数, 是矢量形式的微分方程, 故也称为质点的运动微分方程。应用时常将它投影于坐标轴上。

(一) 质点运动微分方程的直角坐标形式

设质量为 m 的质点 M 受合力 $\Sigma \mathbf{F}$ 作用而作空间曲线运动, 它的矢径为 $\mathbf{r}$, 加速度 $\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{r}}$, 如图 12-1 所示。根据运动学知识及动力学基本方程有

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \Sigma \mathbf{F}$$

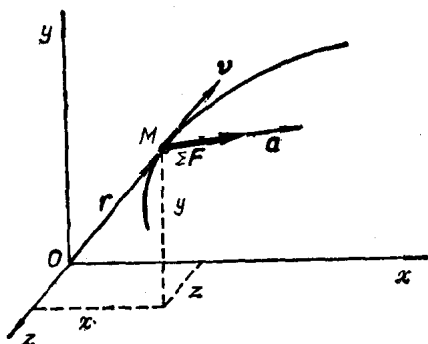


图 12-1

将上式投影于任意选定的 x 、 y 、 z 惯性直角坐标轴上, 得直角坐标形式的质点运动微分方程:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= \Sigma X \\ m\ddot{y} &= \Sigma Y \\ m\ddot{z} &= \Sigma Z \end{aligned} \right\} \quad (12-3)$$

如质点在 Oxy 坐标平面内作平面曲线运动, 则由于质点的加速度和质点受的力在坐标轴 Oz 上没有投影, 将只有两个运动微分方程。当质点沿直线运动时, 如将它的直线轨迹选为 x 轴, 则只有一个运动微分方程。

(二) 质点运动微分方程的自然形式

由运动学知, 有时用质点沿其轨迹的运动规律描述质点的运