

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

工程动力学 (第二版)

GONGCHENG DONGLIXUE

郑权旌

华中理工大学出版社

工程动力学

(第二版)

郑权旌 编

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

工程动力学/郑权旌 编. -2 版

武汉:华中理工大学出版社, 1997. 6

ISBN 7-5609-1533-7

I. 工...

II. 郑...

III. 工程动力学

IV. TB122

工程动力学

(第二版)

郑权旌 编

责任编辑: 刘启茂

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/32 印张:13 字数:295 000

1997年6月第2版 1997年6月第3次印刷

印数:7 001-10 000

ISBN 7-5609-1533-7/TB·42

定价:10.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

145741

内 容 简 介

本书是修订版。它是在 1991 年第一版的基础上，根据教学实践并参考读者的意见修订而成的。

本书包括动力学基本定律和质点运动微分方程、质心运动定理、动量定理、动量矩定理、动能定理、碰撞、动静法、虚位移原理、动力学普遍方程和拉格朗日方程、线性振动理论基础，共十章。各章均附有适量的习题，书末附有习题答案。书中带 * 的内容，可根据专业需要，酌情取舍。

本书可作为高等工业学校的动力学课程或多学时、中学时理论力学课程动力学部分的教材，也可供有关工程技术人员参考和作为高等教育自学教材。

华南理工大学

第二版序

这本教材是在1991年第一版的基础上,为了适应当前教学改革和今后发展的需要,根据教学实践并参考读者的意见修改、补充而成。

在修订中,本着贯彻“打好基础,精选内容,逐步更新,以利教学”的原则和保持本书原有的特色,对本书第一版作了较全面的增删和修改。优化了讲法,加强了课程内容与工程实际的结合,并对课程的教学体系作了适当的调整。教材内容尽量减少与先修课程不必要的重复,删去了第一版中的第二章(质点的振动),增补了线性振动理论基础一章,其余各章在理论和应用上亦有所加强。希望再版后的《工程动力学》,会更有利于“因材施教”和有关工程技术人员参考。

本书在修订过程中,得到了教研室全体同志的大力支持和帮助,谨向他们表示衷心的感谢。

本版虽然经过反复修改,注意改正了前版中的一些缺点和错误,但限于水平,还会有许多不足之处,诚恳期望读者,特别是使用本书作为教材的教师和学生批评指正。

编者

1996年2月于华中理工大学

第一版序

本书是按照国家教委审定的《高等工业学校理论力学课程教学基本要求》，为适应教育改革的需要而编写的。鉴于当前高等学校普通物理、高等数学的教学情况，后继课程和工程实际的需要以及为了便于“因材施教”和自学，本书适当提高了起点，增补了一些高于基本要求的内容，并由浅入深地编选了一定数量的例题和习题。

本书既可供单独开设工程动力学课程使用，也可作多学时或中学时类型理论力学课程中动力学部分的教材使用。

本书承蒙西安交通大学党锡淇教授审阅并提出了许多宝贵意见，对此表示衷心感谢。在本书的编写中，还得到华中理工大学理论力学教研室和兄弟院校同志们的关心和大力帮助，在此一并致谢。

由于编者水平所限，缺点错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

1989年7月

引言

动力学是研究物体的机械运动和作用力之间关系的科学。它和静力学、运动学同为经典力学（或称牛顿力学）中的三个基本组成部分。在静力学中，研究了作用于物体上的力系的简化方法和平衡条件，至于物体在非平衡力系作用下将如何运动的问题，则完全没有涉及。在运动学中，从几何学的观点研究了物体的各种运动类型及其性质，但未阐明物体的各种运动是在什么条件下产生的。动力学则在静力学和运动学的基本上，进一步研究物体的运动和产生这种运动的原因，即研究物体的运动变化和受力之间的关系，建立物体运动的一般规律和介绍解决力学实际问题的各种方法。

动力学在工程技术中应用很广，其产生和发展的过程，也就是人类对于物体机械运动规律认识的过程，是和社会生产力的发展密切相联的。近代工业和科学技术的迅速发展，不断对动力学提出许多复杂的新课题，例如高速旋转机械的振动和均衡、工程结构的动荷分析、系统的运动稳定性、宇宙飞行和人造卫星轨道的计算等等问题，都需要应用动力学的理论来加以研究。学好动力学的基本理论和方法，将为今后进一步学习新的科学技术和解决工程实际问题打下必要的基础。

为便于研究问题，在动力学里将实际物体简化为质点、质点系或刚体等力学模型。质点是指具有一定质量的几何点。质点系是由有限或无限个相互联系着的质点所组成的系统。刚体是质点系的一种特殊情形，其特点是系统内任意两个质点间的

距离始终保持不变，因此刚体也称为不变的质点系。在实际问题中，对于作平动的物体，由于体内各点运动相同，一般均可简化为质点来研究。对于作任意运动的物体，则由于研究问题的性质不同，有时可简化为质点，有时则应简化为刚体或质点系。例如当研究飞机航行的轨迹时，由于只需研究整个飞机随同其质心平动的情况，故可略去飞机的形状大小而把它简化为质点；而当研究低速飞机的稳定性和操作性能时，则飞机本身形状大小的影响不能略去，即既要研究运动的平动部分，还必须研究运动的转动部分，这时就应将飞机作为刚体来处理（因各部分的变形很小，仍可忽略）。如果是研究高速飞行中机翼的颤动（振动）问题，就必须考虑机翼的变形，这时就应将它视作弹性体，即当作一般的质点系来研究。

动力学可分为质点动力学和质点系动力学两部分，而前者是后者的基础。考虑到已有的物理学知识以及工程实际中的应用，本书将着重研究质点系动力学。

目 录

引言	(I)
第一章 动力学基本定律和质点运动微分方程	(1)
§ 1-1 动力学基本定律	(1)
§ 1-2 动力学基本方程的直接应用	(4)
§ 1-3 质点运动微分方程	(9)
§ 1-4 质点相对于非惯性参考系的运动	(20)
习题	(36)
第二章 质心运动定理	(43)
§ 2-1 质点系的质量 质量中心	(44)
§ 2-2 质心运动定理	(46)
习题	(57)
第三章 动量定理	(63)
§ 3-1 动量和冲量	(63)
§ 3-2 动量定理	(68)
§ 3-3 动量定理在流体中的应用	(74)
* § 3-4 变质量质点的运动	(79)
习题	(88)
第四章 动量矩定理	(94)
§ 4-1 质点的动量矩定理	(94)
§ 4-2 质点系的动量矩定理	(100)
§ 4-3 动量矩定理在流体中的应用	(116)
§ 4-4 质点系相对于动点的动量矩定理	

	刚体平面运动微分方程	(119)
*	§ 4-5 陀螺近似理论	(133)
	习题	(143)
第五章	动能定理	(153)
	§ 5-1 力的功	(153)
	§ 5-2 动能	(160)
	§ 5-3 动能定理	(164)
	§ 5-4 势力场和势能 机械能守恒定理	(183)
	§ 5-5 动力学普遍定理的综合应用	(190)
	习题	(196)
第六章	碰撞	(206)
	§ 6-1 碰撞力的概念	(206)
	§ 6-2 碰撞的基本假设与基本理论	(208)
	§ 6-3 两物体的对心碰撞	(211)
	§ 6-4 碰撞对定轴转动刚体及平面运动刚体的作用	(220)
	习题	(230)
第七章	动静法	(235)
	§ 7-1 达朗伯原理 质点的动静法	(235)
	§ 7-2 质点系的动静法	(238)
	§ 7-3 惯性力系的简化	(239)
	§ 7-4 定轴转动刚体对轴承的动压力	(249)
	§ 7-5 静平衡与动平衡的概念	(257)
	习题	(259)
第八章	虚位移原理	(266)
	§ 8-1 几个基本概念	(268)
	§ 8-2 虚位移原理	(275)
	§ 8-3 用虚位移原理求静定结构的约束力	(281)

§ 8-4	自由度和广义坐标	(285)
§ 8-5	用广义力表示的质点系的平衡条件	(288)
	习题	(295)
第九章	动力学普遍方程和拉格朗日方程	(301)
§ 9-1	动力学普遍方程	(301)
§ 9-2	拉格朗日方程	(307)
* § 9-3	拉格朗日方程的初积分	(317)
	习题	(324)
第十章	线性振动理论基础	(330)
§ 10-1	单自由度系统的自由振动	(332)
§ 10-2	单自由度系统的衰减振动	(351)
§ 10-3	单自由度系统的受迫振动	(358)
§ 10-4	减振与隔振	(369)
* § 10-5	两个自由度系统的自由振动	(372)
§ 10-6	两个自由度系统的受迫振动	(382)
	习题	(387)
	习题答案	(393)

第一章 动力学基本定律和 质点运动微分方程

本章首先在普通物理学的基础上对动力学基本定律作简要复习，进一步阐明其物理意义，然后着重介绍质点运动微分方程和质点相对运动微分方程的应用。重点是运动微分方程的建立，运动初条件的分析和积分的方法。

§ 1-1 动力学基本定律

动力学的理论基础是牛顿运动三定律，这些定律是牛顿在总结前人、特别是伽利略和惠更斯等人研究成果的基础上提出来的。从这些定律出发，应用数学演绎法，得到一系列解决动力学问题的定理和方法，使动力学成为一门系统完整、说理严密的学科。

第一定律（惯性定律）：不受力作用的质点，将始终保持静止或作匀速直线运动。

由此定律可知，任何质点都有保持其静止或匀速直线运动状态的性质，这是物质本身所固有的机械属性，这种性质称为惯性。质点的匀速直线运动称为惯性运动。

由运动学知道，描述任一物体的运动，只有相对于一个既定的参考系才有实际意义。选用不同的参考系来描述同一物体的运动，可以得出不同的结果。第一定律表明，在研究物体受力和运动的关系时，客观上存在着这样的参考系，当质点不受

外力作用时，它相对于此参考系作惯性运动，这样的参考系称为惯性参考系。在实际问题中，惯性参考系应根据研究问题的性质和所要求的精确度来选取。例如，在绝大多数工程问题中，将地球作为惯性参考系，所得结果是足够精确的。而在研究远程导弹的偏差或人造卫星的运动时，由于不能忽略地球自转的影响，这时就应该以地心参考系（以地球中心为坐标原点，而三个轴指向三个恒星的坐标系）作为惯性参考系。在研究太阳系中行星运动时，因为地心参考系本身在作公转，这时则必须取日心参考系为惯性参考系。由此可知，在实际分析计算中，只有近似的惯性参考系，而没有“绝对的”惯性参考系。本书中，在研究具体问题时，若不加以特别的指明，均以地球作为惯性参考系。

第二定律（力与加速度关系定律）：质点的质量与加速度的乘积，等于作用于质点的力的大小，加速度的方向与力的方向相同。即

$$ma = F \quad (1-1)$$

实验证明，若同时有多个力作用于质点上，则质点的加速度等于各个力单独作用时所产生的加速度的矢量和。上述关系称为力的独立作用原理。根据此原理，牛顿第二定律可表示为

$$ma = \Sigma F \quad (1-2)$$

即质点的质量与加速度的乘积等于作用在质点上的力系的合力。式(1-2)建立了作用于质点上的力、质量与加速度三个独立的物理量之间的关系，是研究动力学问题的基本依据，称为质点动力学基本方程。

和第一定律一样，第二定律也只能适用于惯性参考系，对于非惯性参考系则不能简单地直接应用这条定律，这个问题将在§1-4中作详细的研究。应用运动学的知识易知，所有相对于

某一惯性参考系保持静止或作匀速直线平动的系统都可作为惯性参考系，而在所有这些惯性参考系中，都可利用牛顿第二定律得到相同的力学规律。

普通物理学中已经阐明，在经典力学的范围内，质点的质量是不随其运动状态而改变的常量。由第二定律表明，以相同的力作用于不同的质点上所产生的加速度与它们的质量成反比。即对质量大的，所产生的加速度小；对质量小的，所产生的加速度大。这说明质点的质量越大，若改变其原有运动状态就越困难，也就是说它的惯性越大。由此可知，质量是质点惯性大小的度量。由于刚体平动时可将其视为质点来研究，因此，质量也是反映刚体平动时惯性大小的特征量。但当刚体绕某轴转动时，度量其转动惯性的大小则不能用质量，而应该用刚体对该轴的转动惯量（见第四章）。

物体的质量可通过其重量来求得。若不计空气阻力，将式(1-1)应用于地球表面上的自由落体运动，则有

$$mg = P$$

式中 P 为物体所受的重力， g 为重力加速度，将此式在铅直方向投影，得

$$mg = P \quad \text{或} \quad m = \frac{P}{g} \quad (1-3)$$

即物体的质量等于其重量除以重力加速度。在地球表面不同纬度和不同高度的地方， g 的数值是不同的，因而物体在不同地点的重量也不同。但 g 的数值在地球表面各处相差甚微，通常在计算中 g 的数值采用 9.80m/s^2 （相当于北京地区的 g 值）。

根据国家规定，本书采用国际单位制（SI），这种单位制以长度、时间和质量为基本量，分别以量纲符号 L 、 T 和 M 表示，而取米（m）、秒（s）和公斤（kg）为基本单位，其它量均属导

出量，它们的量纲和单位可通过基本公式由这三个基本量的量纲和单位导出。例如，由式(1-1)可知，力的量纲表示为 dinl 、 $F = \text{MLT}^{-2}$ ，单位为公斤·米/秒² ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)，称为牛顿(N)。在工程实际中常用千牛顿(kN)或兆牛顿(MN)作为力的单位。

$$1\text{kN} = 10^3\text{N}, \quad 1\text{MN} = 10^6\text{N}$$

第三定律(作用和反作用定律): 对应于任一作用力，必有一与其等值、反向、共线的反作用力，它们分别作用在相互作用的两个质点(或物体)上。

这条定律在静力学中已作为公理讲述过。需要指出的是，它不仅适用于平衡的物体，也适用于作任何运动的物体，而且它与参考系的选取是无关的。

第三定律对于研究质点系动力学问题具有重要的意义，由此定律可知，任何质点系内部各质点之间相互作用的内力，必然是成对地等值、反向、共线的，因而它们的矢量和以及对任何点或轴的力矩和必然都等于零。也就是说，**质点系内力系的主矢以及对任一点或轴的主矩必然都等于零**，即

$$\sum F_i^{(o)} = 0 \quad (1-4)$$

$$\sum m_o(F_i^{(o)}) = 0 \quad \text{或} \quad \sum m_z(F_i^{(o)}) = 0 \quad (1-5)$$

以上二式中的 F_i 标以上标 (i) 表示内力， o 为任意一点， z 为任意一轴。这两个公式在质点系动力学中推证定理时经常要用到。

§ 1-2 动力学基本方程的直接应用

质点动力学的问题可分为两种基本类型：第一类问题是已知质点的运动，求解作用在质点上的未知力；第二类问题是已

知作用在质点上的力，求质点的运动。实际问题中可能同时兼有上述两类问题，即已知运动的一部分和受力的一部分，要求另一部分未知的运动和力。两类问题中的某些较为简单的问题，可以直接应用动力学基本方程，即式(1-3)解决。解题时应按下述步骤进行：(1) 根据题意选取研究对象；(2) 分析对象所受的力，包括所有的主动力和约束力，画出其受力图；(3) 分析对象的运动，确定其加速度或设出加速度的方向；(4) 列出对象的动力学基本方程，然后选取适当的投影轴，应用投影法求解。

例 1-1 有一圆锥摆如图 1-1 所示。摆锤质量 $m=5\text{kg}$ ，摆绳长 $l=2\text{m}$ 。已知摆锤在水平面内作匀速圆周运动，且摆绳与铅垂线成 $\alpha=40^\circ$ 的夹角。求摆锤的速度 v 与绳的拉力 T 的大小。

解 将摆锤视为质点并取作研究对象。摆锤所受的力有已知重力 P 和绳的拉力 T ，各力方向如图 1-1 所示。因已知摆锤在水平面内沿半径为 $l\sin\alpha$ 的圆

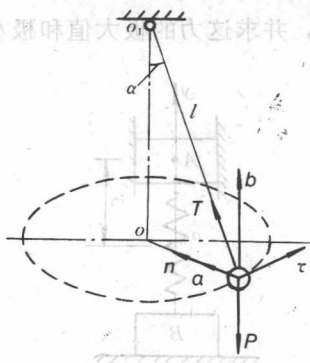


图 1-1

周作匀速运动，故宜用自然法描述其运动。由运动学知摆锤的 $a_r = \frac{dv}{dt} = 0$, $a_n = \frac{v^2}{l\sin\alpha}$ (沿主法线指向圆心 o)， $a_b = 0$ 。列出动力学基本方程在自然轴上的投影式，得

$$m \frac{v^2}{l\sin\alpha} = T\sin\alpha \quad (a)$$

$$0 = T\cos\alpha - mg \quad (b)$$

另一投影式 $ma_r = \Sigma F_r$ ，由于 $a_r = 0$ 和 $\Sigma F_r = 0$ 而自然成立，故对

解题不起作用。

由式 (a) 解得

$$T = \frac{mg}{\cos\alpha} = \frac{5 \times 9.8}{\cos 40^\circ} \text{N} = 63.96 \text{N}$$

代入式 (a), 可求得

$$v = \sqrt{\frac{TL}{m} \sin\alpha} = \sqrt{\frac{2 \times 63.96}{5} \sin 40^\circ} \text{m/s} = 3.25 \text{m/s}$$

例 1-2 物块 A、B 的质量分别是 $m_A = 20\text{kg}$, $m_B = 40\text{kg}$, 二者用弹簧连接如图 1-2 所示。已知物块 A 的铅直运动规律 $y = \sin 8\pi t$, 其中 y 以 cm 计, t 以 s 计。试求物块 B 对支承面的压力, 并求这力的极大值和极小值。弹簧质量忽略不计。

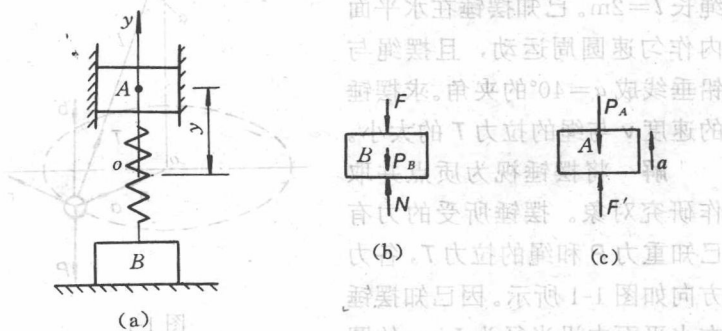


图 1-2

解 取物块 B 为研究对象 (图 (b)), 它受重力 $P_B = m_B g$ 、弹性力 F 和支承面的约束力 N 而平衡, 列平衡方程 $\Sigma F_y = 0$, 有

$$N = m_B g + F \quad (a)$$

再取物块 A 为研究对象 (图 (c)), 其上作用有重力 $P_A = m_A g$ 和弹性力 F' 。由物块 A 的运动规律可知其加速度在 y 轴上的投影为