

高等学校教学用书·理论物理基础系列教程

8

弹性体与流体

〔日〕 恒藤敏彦 著
张世泽 译
丁明新 校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书

理论物理基础系列教程

第八册

弹性体与流体

〔日〕恒藤敏彦 著

张世泽 译

丁明新 校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书
理论物理基础系列教程
第八册

弹性体与流体

〔日〕 恒藤敏彦 著

张世泽 译

丁明新 校

•

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
交通出版社印刷厂印刷

开本: 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张: 7.25 字数: 170千
1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷
印数: 1—2 200

ISBN 7-303-00434-3/O·95

定价: 1.80 元

原 序

物理学是理工科学生必不可少的基础课之一。因为理工科任何专业的基础必然与物理学有密切关系。理工科学生要想在学习专业课之后,再自学物理学,很难获得令人满意的结果。就是说,必须在大学一、二年级扎实地掌握物理学的基础知识。

这样,最重要的就是同学们要有积极的学习热情。同时,需要有一本向学生们传授物理学知识、指导学生学习方法的入门书。这套《理论物理基础系列教程》正是为了起到以上作用而编辑的,这套书的编辑方针与以往教科书有很大差别。

力学和电磁学是所有与物理学有关的重要学科的基础。因此,大部分学校要在低年级学完此课程。但象流体力学则可以作为选修课开设,也可以由同学们自学。另外,还需要有大学二年级学历能够阅读的、内容充实的量子力学和相对论等教材。

编者基于这种观点,选择了物理学的基础课,编写了《理论物理基础系列教程》,这套丛书共10册,包括《力学》、《分析力学》、《电磁学》(上、下)、《量子力学》(上、下)、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》及《物理用数学》等八个科目。所有这些科目不都是(日本)大学一、二年级的课程,但各科目可以各自独立学习,力争做到大学一年或二年级的学生能够读懂。

在物理学教材中,往往有很多公式和现象,在期末考试之前,学生们常常要死记硬背,这不但掌握不了物理现象的本质,反而产生厌恶情绪。我们对这套教程的读者所应考虑的最重要问题,不是死记公式和现象,而是学会掌握事物本质的能力。

物理学相信一切事物都源于少数基本事实,而它们又遵循少数基本定律,物理学求得这些定律。这些明确的基本事实和定律一定有助于同学们理解,在彻底理解的基础上,同学们通过自己亲身的努力去摸索事物的本质,这就是所谓的“物理学的思考方

法”。

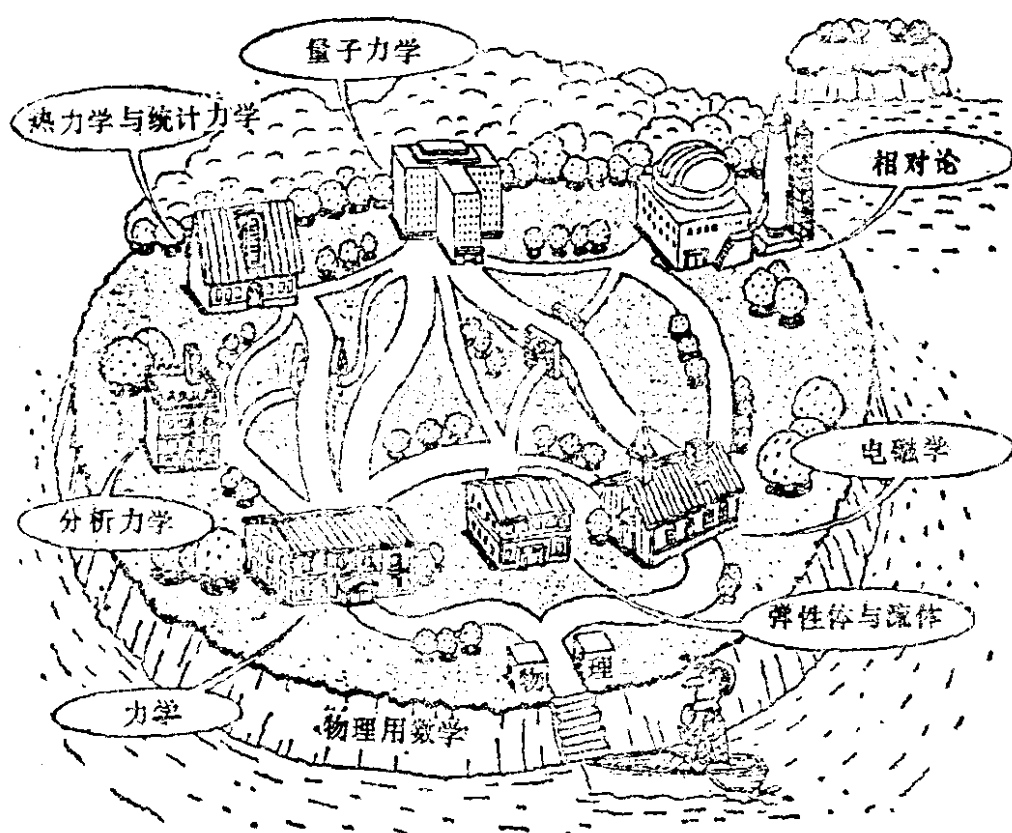
不仅限于物理学，科学的每个领域，都要探求事物的本质，但由于物理学发展的比较早，基础部分成熟，可以看做一个典型例子，因此，掌握“物理思考方法”的能力不仅对于将来钻研物理学的同学们，而且对于钻研其它领域的同学都应该说是大有好处的。

在日常生活中，我们经常无意识地使用象时间、空间、力、压强、热量、温度、光等这样的物理学基本概念，物理学对这些日常使用的概念又重新给予了严格的定义，并与基本规律联系起来，物理学这样繁杂也是同学们厌烦的原因之一。但是，如果想根据基本事实和规律探索事物的本质，即使是日常感知的事物，也有必要详细弄清其实验的根据，重新明确与基本规律的关系，何况还涉及到超过我们日常体验的领域。例如：处理原子内部问题时，甚至有必要提出似乎与常识和直观相矛盾的新概念。因为物理学根据实验和观测不断扩大我们的经验世界，所以与其这样，倒不如改变常识和直观更有必要。

正如这样，用“物理学的思考方法”考虑事物，决不是很容易的事情。但是，如果采用正确的方法，是有可能掌握的。本教程的撰稿者们力求做到精选内容，所选的素材力争讲述通俗易懂，便于掌握。希望读者们和作者一起探求事物的本质。这样一来，自然而然地就能够学会“物理学的思考方法”。各卷篇幅都不大，不需要其它参考书就能读懂，但决不是简单的物理学摘要。希望读者认真阅读。

如上所述，因为各科目基本上可以独立阅读，所以根据需要，从哪个科目开始阅读都可以。但是，作为基本联系，可用图解的形式来表示各科的相互关系。

从图的前面向里延伸的宽路，表示传统的路线，窄路则表示做为相关联的学科，可以共同阅读。例如，《弹性体与流体》是集中了现代风格的弹性力学和流体力学的，但与《电磁学》中的场的概念相关联。而作为场的经典理论，又可以与《相对论》加以对



比,这一卷的波动部分,对于《量子力学》的理解也有帮助。另外,每卷都广泛涉及到数学,为不脱离物理学本身,同时阅读《物理用数学》是大有益处的。在整理这套《理论物理基础系列教程》之际,编者阅读了全卷的原稿,也请执笔者提出了各种要求再三改稿。另外,不断采用了执笔者们的相互意见和岩波书店编辑部所提出的见解。今后在听取读者意见的同时,将进一步加以修正。

编者 户田盛和
中嶋贞雄
1982年 8 月

译 者 序

这套《理论物理基础系列教程》是根据日本岩波书店 1982—1984 年出版的《物理入门コース》(物理学入门教程) 翻译而成。原教程的主编者是户田盛和与中嶋貞雄。本书在日本颇受欢迎, 在全套书出齐之前, 先出的几本已经重印了三四次。中译本根据我国习惯, 定名为《理论物理基础系列教程》。

这套《系列教程》共十本, 计有《力学》、《分析力学》、《电磁学》(上下)、《量子力学》(上下)、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》和《物理用数学》。各册篇幅不大, 自成体系, 而十本合起来又构成一个完整的整体。本书的起点相当低, 有我国工科一年物理课基础的读者即可学习。但其达到的深度并不低, 大体上只略低于我国综合性大学的理论物理各课的大纲要求, 而在广度上则广于后者, 并含有较多新鲜内容。

本书富有日本教材所独有的风格和特点: 选材精炼; 讲解简练而明快又不失科学性; 系统经过精心安排, 组织周密, 突出重点, 深入浅出。在引导读者逐步掌握正确概念方面有其独到之处, 书中不乏精辟的论述和精采简捷的推导与证明, 在不知不觉之中把读者带到较难较深的境界。本书是我国高等学校理论物理各课较好的教学参考书, 师范院校和成人教育院校可以直接采用作为课本。本书也是中学教师进修、工程技术人员知识更新和知识青年自学的理想读物。

本书的翻译工作由喀兴林、王锡绂、梁绍荣和任萍四人组成工作小组负责, 他们担任组织译校、联系出版、保证译文质量和其它各项事务工作。本书的译校人员以北京师范大学和东北师范大学的人员为主, 他们大多数都具有高级职称及多年的日文经历。翻译工作以忠于原作为原则。

由于我们学识有限，加之翻译人员众多，译文中容或有不当之处或彼此不甚统一之处，敬请各界读者指正，以便再版时修改。

喀兴林 1988年6月

前 言

连续介质力学即流体和弹性体的力学，对于理解环绕我们周围的自然现象是不可欠缺的。它的基本体系在20世纪以前就已完备了，是经典物理学的成果之一。到了20世纪诞生了量子论，在1930年前后形成了量子力学，物理学的主流转向探明原子、分子或原子核进而基本粒子的微观世界，并在其成果的基础上向理解物质的结构与性质的方向迈进。因此，近年来的物理教学也自然地把量子物理学放为重点，使人感到属于经典物理学的连续介质力学已稍稍转移到配角的地位。但是即使只考察波动，也希望在弦振动、声波和水波等身边的题材上具体的理解它的物理内容。例如从声波的辐射开始学习会比骤然学习电磁波辐射的方式要容易理解得多。对于在量子力学中出现的本征函数等数学工具的建立也是这样。

在原子、分子或是原子核层次上的物理学体系已完备的今天，以湍流为代表的非线性现象的研究等属于经典物理学范围内的研究又极为活跃了。再有作为连续介质力学应用舞台的地球物理学、宇宙物理学的研究也呈现出惊人的发展。将这些情况综合起来考虑，学习物理的各位在初期阶段内把连续介质力学的基础学到手决不是没用的。

本书设想以理解流体、弹性力学的基本思考方法和物理内容为目标。与此相应地在数学处理上作相当的省略或作简单处置。例如在理想流体的二维流动中复变函数论本有完美的应用，但因无论在哪本流体力学书中都有详细的论述，所以在此全没涉及。再有，由于流体部分占用了较多的篇幅，处理弹性力学的第七章就不得不大幅度的压缩，只限于对基本框架的说明。关于上述诸点希望按卷末所举的参考书继续学习。还有在各节的习题中，有很多以具体的例子求各种量值大小的内容。为了掌握‘感性知识’

希望一定要做。

当写本书之际，承蒙主编户田盛和、中嶋贞雄两位先生及京都大学理学院巽友正先生多方面指教。作为流动可视化研究权威的九州大学应用力学研究所的田定俊先生慨然提供了绕圆柱流动实验的照片。在此深致谢意。还有对始终耐心与笔者磋商，不惜余力的岩波书店片山宏海先生表示衷心的感谢，没有他的热忱帮助本书恐难面世。最后向先作读者的本研究室的田崎秀一、坪田诚两位致谢，特别是由于与田崎君深入的探讨得以订正不少错误。

恒藤敏彦

1983年6月3日

目 录

第一章 连续介质力学.....	(1)
第二章 弦与膜的力学.....	(7)
§ 2-1 张力	(7)
§ 2-2 弦的运动方程	(11)
§ 2-3 弦振动——达朗伯解	(14)
§ 2-4 单波色, 固有振动	(17)
§ 2-5 动量流与能量流	(23)
§ 2-6 反射、透射、衰减	(25)
§ 2-7 膜的弹性能	(32)
§ 2-8 二维波动	(36)
第三章 理想流体的运动	(44)
§ 3-1 作用在流体上的力	(44)
§ 3-2 流体的描述	(50)
§ 3-3 连续性方程	(55)
§ 3-4 欧拉方程	(60)
§ 3-5 动量守恒定律	(64)
§ 3-6 能量守恒定律	(66)
§ 3-7 有旋流	(68)
§ 3-8 开耳芬涡定理	(72)
§ 3-9 无旋流动	(77)
第四章 不可压缩理想流体的流动.....	(82)
§ 4-1 不可压缩流体的无旋流动	(82)
§ 4-2 流动的例子	(85)
§ 4-3 绕球流动	(88)
§ 4-4 绕圆柱的流动——升力	(94)
§ 4-5 有涡流动	(95)
§ 4-6 涡线模型	(101)
§ 4-7 涡线运动的例子	(105)

第五章 流体的波动	(112)
§ 5-1 声波	(112)
§ 5-2 声波的能量	(116)
§ 5-3 声波的一般处理法, 固有振动	(120)
§ 5-4 声波的辐射	(124)
§ 5-5 圆盘辐射	(130)
§ 5-6 反射与折射	(134)
§ 5-7 流动的效应, 多普勒效应	(137)
§ 5-8 水面波: 浅水情况	(140)
§ 5-9 水面波: 深水情况	(144)
§ 5-10 群速度	(149)
第六章 粘性流体的流动	(154)
§ 6-1 粘滞力	(154)
§ 6-2 纳维尔-斯托克斯方程	(159)
§ 6-3 稳定流简例	(163)
§ 6-4 绕球的缓慢流动及斯托克斯阻力	(167)
§ 6-5 由于平板振动的流动	(171)
§ 6-6 旋度的扩散	(174)
§ 6-7 涡的成长	(179)
§ 6-8 相似律与雷诺数	(183)
§ 6-9 边界层, 湍流	(187)
第七章 弹性体	(193)
§ 7-1 形变	(193)
§ 7-2 应变能量	(195)
§ 7-3 应力能量	(198)
§ 7-4 胡克定律	(200)
§ 7-5 泊松比与杨氏模量	(202)
§ 7-6 弹性体中传布的波	(204)
习题略解	(209)

第一章 连续介质力学

我们日常观察的是固体、气体、液体等具有广泛性的物体伴随着形变而产生的运动。虽然支配它们的毫无疑问是牛顿力学，但是在形式上与质点系力学不同，即必须应用将在本书中学习的连续介质力学。在进入正文之前，首先明确弹性体、流体或是将它们概括成的所谓连续介质都意味着什么内容。

牛顿力学是以开普勒定律所表征的天体运动为焦点而形成的。研究行星运动时，因为太阳与行星间的距离比起它们的大小是十分巨大的，而且太阳和行星都几乎是球形的，所以可将它们看作质量集中于质心且没有大小的质点。于是，太阳系就成为万有引力作用下的质点系。因为质点的运动以各瞬间的位置坐标来描述，所以由于将天体看作质点的这种理想化，使问题得以极大的简化。

虽然对于现实的太阳系这种理想化近似得极好，但毕竟是理想化。例如太阳不是完全球形的事实影响了水星的运动，尽管是十分微小的。又如由于月亮的运动，产生地球上的潮汐，因此月亮绕地球转动的周期逐渐地稍有增长。在讨论有关这种效应的问题时，当然不能把太阳和地球看作质点。再把眼光转向我们身边发生的现象上，就必须讨论怎么也不能当作集聚的质点来处理的物体，即具有广延性且其形状变化的物体的运动。牛顿本人也对空气和水的阻力问题以及波动问题给予了深切的关心，在《原理》第二篇的〈关于在阻尼介质中物体的运动〉中展开了详细的讨论。牛顿以后的力学向有延展但不变形的刚体力学、亦向既可伸缩又可变形的固体以及可自由变形的空气和水的力学推广开来。由本书学习的是有关弦和膜的振动、它们形成的声音的传播、水的流动以及波动等这些日常频繁接触的现象的力学。

固体和流体 金属和冰等固体受外力时，将抵抗外力而保持原来的形状。气体和液体则与此相反，以密封在塑料袋中的空气和水为例，可知其虽然抵抗体积的变化，但对无论多小的力都会产生体积不变的形变。气体和液体虽然在密度大小、压缩难易等物理性质上有差异，但因在运动方式是相同的，所以一般将此二者概括起来称作**流体**。

我们以通常的宏观尺度看来，固体也好、流体也好，都不是质点的集聚，莫不如看作是质量连续分布的连续物体。将质量在空间连续分布、具有广延性的物体称作**连续体**。特别是当考察在流体与固体中传播的波的运动时，将连续体看作是充满介质的空间，称作连续介质。

微观描述与连续体 把真实的物体看作连续体是一种理想化。所谓“质点”也可以说是与此相反的理想化。我们知道无论什么物体都是由原子(或是其构成要素电子和原子核)构成的。例如拿铁棒来说，从微观上看它处于铁原子以晶格形式排列的结晶状态。一般，当原子取一定的排列方式时，原子间的相互作用能是最低的，这种排列方式没被热运动破坏时它是固体。相邻原子间的距离，铁大约是 $2.5 \text{ \AA}$ ，其它固体大体也是这个程度的数值。因此，在 1 cm^3 中大约有 10^{23} 个那样巨大数目的原子。若用微米 ($10^{-4} \mu\text{m}$) 级波长的光去看它，即使使用显微镜观察，因为光学显微镜的分辨率受波长的限制，也只能看到光滑的物体。只有用高性能的电子显微镜才能识别原子的排列，把它们宏观地看作连续体就是这个意思。

在外部以力作用于固体，则固体发生变形，原子的排列方式发生变化。于是在原子间作用着趋于恢复原状的力，当变形达到某一大小时，可与外力相平衡。如果知道原子间的相互作用由原来的结晶格子排列方式到原子位置发生某一切变时就可知道与其相应地在原子间作用着什么样的力。因此可将铁棒的变形和运动作为组成它的各个原子上作用力的平衡与其运动来处理。其实这种微观的描述不一定必要，因为铁棒的压缩与伸长或是振动时所

产生的变形是在宏观尺度上发生的，所以原子排列方式的变化在原子间距离的微观尺度上来看是极其缓慢的。所以将铁棒作为连续体来处理更方便。将固体当作连续体来处理时，其力学形式，我们将在第七章中讨论。

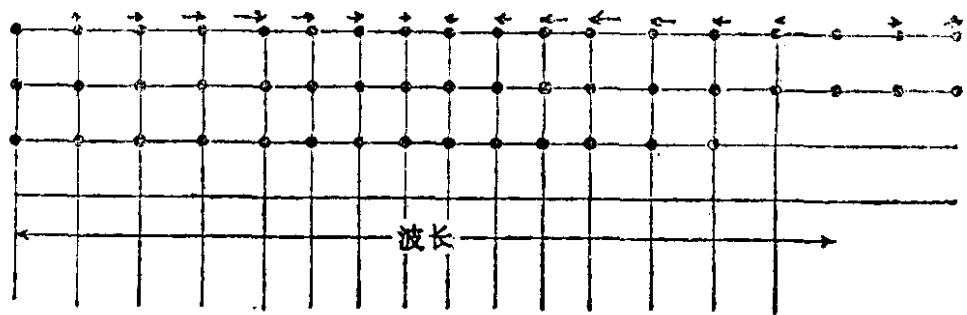


图 1-1 声波传播时，固体原子的位移

显示连续体的近似在什么情况下有效的适当例子，是在固体中传播的声波。伴随着声波，原子作如图1-1那样的位移。由此图可知，位移以波长为尺度而变化。图1-2表示声波频率和波长倒数（即波数）之间的关系，虚线是以连续体近似求得的结果。波长接近于原子间距

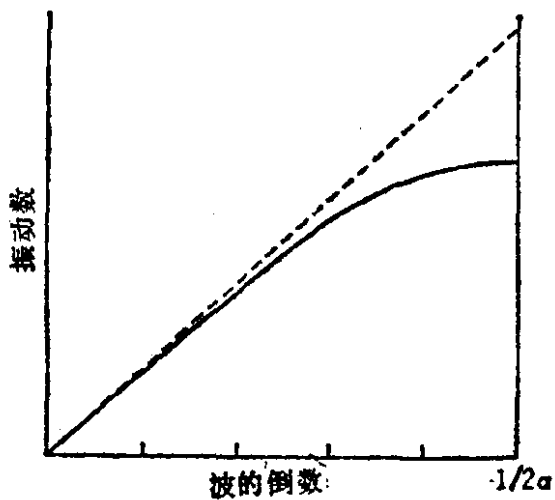


图 1-2 在固体中传播的声波的频率与波长倒数的关系

a 时，即形变的形式以微观尺度发生时，已不能使用连续体近似。反之，当波长为原子间隔的10倍左右时近似就已经极好了。

弹性体 若以外部加在固体上的力超过某一限度，则去掉此力时固体也不能恢复原形，就是说发生了永久形变。图1-3表示拉伸铜线时力的大小与伸长的关系，如果所加的力在箭头所指的点以上，则伸长急剧增大，同时产生永久变形。在不发生这种永久变形范围内处理力学现象时，将固体叫作弹性体。在第七章中考

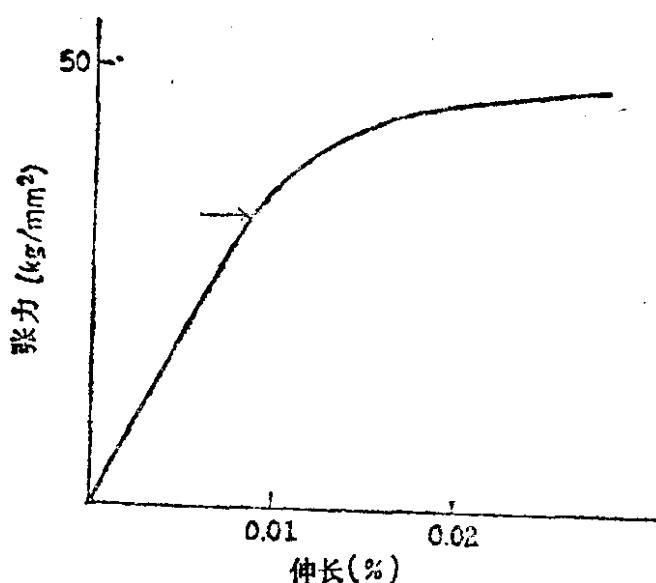


图 1-3 拉伸铜系时加上超过箭头所指出的力，则发生永久变形

察的都是弹性体。

流体 本书的主要部分（第三章到第六章）为流体力学。在流体情况下，无论如何也必须作为连续体处理。在流体中，原子平均距离与固体几乎相同，是几个 Å 的程度，对于气体在标准状态（一个大气压、0℃）下 1cm^3 中也有约 10^{19} 个分子。在气体和液体中，这极大数目的原子或分子不象在固体中那样占有确定的位置，而是经常做混乱的热运动。因此追踪单个原子和分子的运动已经不可能，可以讨论的问题只是平均量，即所谓密度、压力、温度或流动速度等量，或者说只有这些平均量才是我们想知道的。因此，把流体作为连续体来讨论是极其自然的。

为使象密度那样的平均量具有意义，必须考察某一大小的区域。同理，为使混乱运动平均化，至少必须经过某一段时间作平均，或设某体积 v 中的分子数为 n ，则分子质量为 m 的气体密度 ρ 以 $\rho = mn/v$ 给出。如果取体积 v 为与分子间平均距离同等大小的区域，则其中的分子数就成为激烈且混乱变化的量。取多大才是合适的标准，则由分子相互碰撞前自由运动的距离——称作平均自由程的长度 l 给出。在液体中 l 约为分子间距离的量级，在标准状态下的气体中 l 约为 10^{-6}cm 的量级。在尺度比它大的

区域内作平均，则可认为密度和压力都有意义。而时间的尺度则由碰撞间的时间来确定，在气体状态下约为 10^{-10} 秒的程度。处理在时间上比它长得多的时间内变化，在空间上比 l 大的范围内变化的宏观运动时，可以把密度和压力作为各瞬间、各点上具有的量来考虑。就是说流体可以看作连续体。在第三章中着眼于流体的微小部分，考察它的质量或是周围流体作用给它的力，这个微小部分的大小是宏观的微小，在微观上，上述的意义必须充分大。例如液体中，象花粉那样微小的粒子所受的力，不仅是平均的压力，布朗运动清楚地表明，涨落也成为重要内容。

场的力学 讨论一下连续介质力学最重要的内容。若以流体为例，则流体的某一部分的运动不能与它周围的流体无关。为使某部分运动也必须推动其周围的流体，流体各部分总是相互挤压着运动的。即在连续体中，某部分与同其相接触的部分作强烈的相互作用而运动。换言之，在连续体上作用的力是近程作用力（当然也有着象重力那样的远程作用力）。应该研究在这种力的作用下将发生什么样的运动。

连续体可以被看作是在空间中广延的媒质，它的形态用空间各点处的密度、压力、流速等物理量来描述。象这样在空间各点上考察的量称作**场量**。连续体的运动方程就是支配这些场量变化的方程，在这个意义上，连续介质力学可以说是象电磁场那样的场的力学之原型。在历史上，电磁学的形成过程中，在18、19世纪中发展了的弹性体力学及流体力学起了很大的作用。为什么象拉普拉斯、高斯、斯托克斯等在电磁学中极为人所熟识的名字在这里也再三出现，就可以理解了吧。为将在电磁场理论中使用的守恒定律定型化，熟悉矢量分析，偏微分方程等数学工具，掌握其物理意义从而加深理解，对此说来，日常观察到的流体和弹性体的运动都是好题材。对具体问题的处理也是同样的。接触作用的作用介质最有特征的运动就是波动，无论流体和弹性体中的声波也好、电磁场中的电磁波和光也好，波动理论的基础都是相同的。本书首先从讨论最简单的弦和膜的波动开始。