

[美] G. 韦德 编

声 成 像

交通大学声全息研究室 译

声学出版社 出版

内 容 简 介

在透声而不透光的物体成像中,声学成像技术有其独特而重要的作用。它在医学诊断、工业无损检验、海洋调查、地震感知和超声显微等领域有广泛的应用和发展的前景。本书共十二章,前两章复习了声波在液体、固体中的基本特性,回顾了声成像的研究历史,以下各章分别介绍了全息成像、布喇格衍射成像、动态波纹衍射成像和透镜成像等各类成像系统,包括系统的详细描述和应用、理论上的阐述与最新进展的评论,并专章介绍了“压电阵成像理论”与“用于声成像的集成电子学”。出版前,其内容在加利福尼亚大学作为教材试用过。

本书可供在各个领域从事声全息和声成像技术研究、成像设备的制造与使用的人员、大专院校有关的师生参考。

Acoustical Imaging
cameras, microscopes, phased arrays and
holographic systems
G. Wade
Plenum Press 1976

*

声 成 像

照像机、显微镜、相控阵和全息系统

〔美〕 G. 韦德 编

上海交通大学声全息研究室 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 7¹³/₁₆ 195 千字

1981年9月第一版 1981年9月第一次印刷 印数: 0,001— 2,400册

统一书号: 15034·2209 定价: 0.99元

译者序

超声波作为能量的一种辐射形式，可以用来使物体成像。在诸如可见光、X射线、红外线、微波等已知形式的辐射中，利用超声波来成像是最近的事，追溯到最初的研究活动，迄今也不过是五十年内的事。但在发明全息和激光出现之后，声成像的研究活动则大为活跃并推向高涨，X射线层析术的原理与微处理机也很快在声成像中得到应用。由于很多物体具有不透光而透声的特性，欲使其内部的细节成像，须有赖于超声的方法；有些物体虽透光，但光学反差远不如声学反差强烈，声学成像方法就更为可取；在医学诊断中，为了避免X射线的累积对人体引起的损害，超声成像更有优越之处。因此，目前在美、欧、澳和日本各国竞相研制各种各样的声成像系统。虽然在本书写成时，其中已成为商品仪器的并不多，多数还处在实验室阶段，但是却已成熟到可在工业设备和临床中进行考核，以便对它们作出估价的地步。然而，近两年来，这类产品显然在逐渐增加。

声成像在医学诊断、工业无损检验、海洋调查、地震感知和超声显微等方面的应用越来越多，虽然还有大量尚待研究与解决的问题，但前景甚为乐观。有人认为，总有一天声成像工艺会发展到“使人体变为透明”的地步。最新出现的一些商用医学显像仪器说明，这一天已经临近。在海洋学的发展方面，有人甚至提出了要使“大海变为透明”的计划，前景令人鼓舞。

关于声成像方面的著作，已经出版的寥寥可数，本书是系统地、全面地介绍声成像技术的一本专著，出版前在加利福尼亚大学作为“声全息与声成像”课程的教材试用过。全书共十二章。第一、二两章复习声波在液体、固体中的基本特性并对声成像的历史

作了回顾，以下各章详细介绍全息成像、布喇格衍射成像、动态波纹衍射成像和透镜成像等各类成像系统及其应用，也包括理论上的阐述与最新进展的评论，第七、八两章专门介绍了在声成像中占重要地位的“压电阵成像理论”与“用于声成像的集成电子学”，在第十二章的全书总结中还提到了不少本书前面没有叙述到的新发展。

在校长朱物华教授的关心指导下，本室部分同志参加了本书的翻译工作，郑德连、姬树森两同志对全书作了校订和文字上的润饰。由于水平有限，疏漏谬误之处请读者指正。

原 序

用声来“看”一直是吸引人的概念。某些动物，如蝙蝠和海豚，确实能这样做，但是人类却没有这种天赋。然而，可以采用适当的技术来克服这种本能的缺陷。例如，近来在很多实验室中，工作人员用声而不用光去照射物体，已能实时得到物体的真聚焦的正投影像。在第一次世界大战中首先用于声纳系统中的脉冲-回波技术，由此发展而来的横截面像已在较长的时期内得到应用。现在，有了各种各样的声成像系统的概念，包括从纯粹全息式的直到纯粹透镜式的某些较新的系统。

显然，超声能量可给出用光所不能得到的物体的像，例如，一个深嵌在完全不透光而相对地透声的材料中特殊目标物的像。此外，人体软组织对光辐射、X射线常常反差很弱，而对声辐射反差较强。同时，X射线的累积效应可能强烈地损伤这些组织，而低强度的声却是绝对安全的。

基于这些理由，如在很多情况下所做的那样，这个相当新的领域正给科学、医学、工程、研究仪器等很多部门，带来极大的动力。在这一领域内技术上的进展，不但对诊断医学，而且对无损检验、地震感知、海洋研究甚至显微术都确已产生重要的影响。

本书叙述了这些题目，从指导性的解释直到评述最近的研究进展。从分析和实验两种着眼点选题，包括：一般背景、历史发展、近代系统的分类特性、这些系统的详细描述及其在声成像中的应用。本书还引用许多应用实例，在依据体内结构诊断成像的医学方面尤为如此。在最后完稿前，书中各种讲法都在加利福尼亚大学作为教材试用过，课名为“声全息与声成像”。

编者深谢各位作者和他们所在协会的通力合作。同时也感谢加利福尼亚大学分校同人们的意见与协助，尤其是西德尼·戈伦 (Sidney Goren) 博士、朱戴·韦斯曼 (Judy Weisman) 硕士、约翰·马克斯韦尔 (John Maxwell) 先生和拉里·尼克林 (Larry Nicklin) 先生。

G. 韦德

加利福尼亚州 圣巴巴拉 1976.3.

目 录

第一章 声波的传播	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 波的描述	2
1.2.1 用质点位移来描述	2
1.2.2 用压力来描述	2
§ 1.3 材料的性质和波速度	5
§ 1.4 能量与强度	7
§ 1.5 辐射压力	8
§ 1.6 速度势	10
§ 1.7 液-固体界面上的折射和反射	10
§ 1.8 通过薄板的透射	15
§ 1.9 吸收	16
§ 1.10 声波与自由液面的互作用	16
第二章 历史的回顾	18
§ 2.1 引言	18
§ 2.2 早期的先驱者	19
2.2.1 朗之万 (Langevin)	19
2.2.2 索科洛夫 (Sokolov)	20
2.2.3 墨尔蒙塞 (Muhlhauser)	23
2.2.4 波尔曼 (Pohlman)	24
2.2.5 费尔斯通 (Firestone)	25
§ 2.3 全息方法	26
2.3.1 声图板	26
2.3.2 逐点扫描系统	27
2.3.3 液面系统	28
§ 2.4 固体表面系统	29
§ 2.5 布喇格衍射系统	31
§ 2.6 压电读出的系统	31

§ 2.7 结论	32
第三章 声成像系统导论	35
§ 3.1 基本的成像系统	35
§ 3.2 声成像系统分类	38
§ 3.3 声传播特性	39
§ 3.4 系统概念	39
3.4.1 压电系统	39
3.4.2 薄层接收器	42
3.4.3 表面畸变接收法	43
3.4.4 光声互作用	48
§ 3.5 结束语	49
第四章 近代系统中的斑点与灵敏度	51
§ 4.1 引言	51
§ 4.2 斑点与振纹	51
§ 4.3 灵敏度	56
第五章 扫描声全息	61
§ 5.1 引言	61
§ 5.2 改进的结构	62
§ 5.3 方块图	62
§ 5.4 初步分析	64
§ 5.5 源-接收器互易性	66
§ 5.6 成像的几何关系	67
§ 5.7 放大率	72
§ 5.8 分辨力	73
§ 5.9 源-接收器同时扫描方式	73
§ 5.10 像差	74
第六章 液面全息	76
§ 6.1 引言	76
§ 6.2 声场的描述	78
§ 6.3 光与液面的互作用	80
§ 6.4 液面运动动力学	81
§ 6.5 脉冲声波产生的效应	84

第七章	阵成像理论	86
§ 7.1	引言	86
§ 7.2	成像阵	86
§ 7.3	用电子扫描和聚焦的阵	89
§ 7.4	二维聚焦系统	95
第八章	用于声成像阵的集成电子学	99
§ 8.1	引言	99
§ 8.2	对系统的要求	101
8.2.1	分辨力	101
8.2.2	视场	102
8.2.3	作用距离	103
8.2.4	帧频	103
8.2.5	其他因素	103
8.2.6	分类表	104
§ 8.3	单换能器系统	104
8.3.1	手动扫描	105
8.3.2	机械扫描	117
§ 8.4	线阵系统	118
8.4.1	手动扫描	118
8.4.2	机械扫描	120
8.4.3	电子扫描	123
8.4.4	其他方法	132
§ 8.5	面阵系统	132
8.5.1	声聚焦式	132
8.5.2	电子聚焦式	136
8.5.3	全息式	141
§ 8.6	结论	142
第九章	布喇格衍射成像	147
§ 9.1	引言	147
§ 9.2	系统的描述	150
§ 9.3	光声互作用	151
§ 9.4	空间傅立叶变换	153
§ 9.5	布喇格衍射系统的滤波能力	156
§ 9.6	布喇格衍射成像的优缺点	160
9.6.1	用像的全息检测来改善灵敏度	161

9 6.2	斑点与振纹	169
9 6.3	声学的和光学的柱面透镜	170
§ 9.7	结束语	173
第十章	动态波纹衍射成像	176
§ 10.1	引言	176
§ 10.2	工作界面响应特性的原理	177
§ 10.3	在实际系统中的应用	181
第十一章	透镜成像	184
§ 11.1	引言	184
§ 11 2	扫描声显微镜	185
11.2.1	背景	185
11.2.2	系统的概述	188
11.2.3	目前仪器的形式	189
11.2.4	液体中的声吸收	195
11.2 5	生物材料中的声吸收	201
11.2 6	关于哺乳动物细胞和组织切片方面目前的工作	204
§ 11.3	菲涅尔波带片透镜	214
11.3.1	成像方法的描述	214
11.3.2	成像系统与结果	218
§ 11.4	柱面电子透镜	220
11.4.1	一些结果	228
§ 11 5	关于透镜系统的结束语	230
第十二章	应用与一般结论	234

第一章 声波的传播

布伦登 (B. B. Brenden)

霍罗索尼克斯 (Holosonics) 公司

§ 1.1 引言

用声能来成像的想法，且不管它的实际应用如何，其本身就是吸引人的。它可以与电磁波频段的红外、紫外、微波或X射线的成像相比拟。但是，声能成像却把视觉延伸到电磁波波段以远的区域，因此它又是十分不同的。在这个意义上，声成像有它独特的性质，它代替电子光学，把视觉延伸到非电磁波领域内。然而，在最后阶段，所有形式的成像，必须回到光的领域，以产生最后的视觉印象。

尽管声成像是一种独特的成像形式，但是许多成像的原理是转自光学成像的技术。因为一些与光学成像系统不同的、然而等效的术语还没有得到普遍的使用，因此在讨论声学成像系统时，要避免使用“光学”或“光学的”的术语是困难的。即使不说“声学透镜系统”，人们总得提到声学成像系统的“光学”。“光轴”一词的含义似乎是“声轴”所不能表达的。光学的透镜和反射镜在声学成像系统中的确有着可以承认的对应物，尽管用来制作这些对应物的材料和制作方法很不相同，但是许多公式是一样的。光学的斯奈尔定律在声学透镜设计中有它严格的对应式。然而声学的设计问题比光学的类似问题稍为复杂些，这是由于存在着两种型式的波，即纵波和剪切波的缘故。

本章致力于复习声波在液体和固体中传播的基本特性。关于术语方面，认为“声学”、“声音”和“声”在频率方面是无限定的，而“音频”则限定频率约从15赫到20千赫，人耳能够响应

的范围内，“超声”则指的是频率高于音频的范围，“声学”、“声音”或“声”并无这种限制。

§ 1.2 波的描述

1.2.1 用质点位移来描述

在空间或时间上无界的平面波前且沿 z 正方向传播的声波，可以用下式表示

$$w = w_0 \cos(\Omega t - Kz) \quad (1.1)$$

式中， w 表示材料的体积元（一个质点）离开没有振动时的正常的或未被扰动的位置的位移瞬时值， w_0 表示 w 的最大值（振幅）， t 表示从某一任意时刻开始所经过的时间， z 是 x 、 y 、 z 坐标系中沿 z 轴的距离。

Ω 和 K 由下式来定义

$$K = 2\pi/\Lambda \quad (1.2)$$

$$\Omega = 2\pi c/\Lambda \quad (1.3)$$

这里， Λ 是声波波长， c 是声波速度。

式 (1.1) 对纵波和横波两者都能很好地描述其标量特性。在本章的其余部分，横向声波指的是剪切波。

1.2.2 用压力来描述

声波用压力来描述可参看图 1.1 导得。如果把我们的描述限定为在无界空间或时间中沿 z 正方向传播的纵波，则任何给定的体积元 $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ 将沿平行于 z 轴的方向移动。我们把体积元内的材料看作一个质点。在任何给定的 x - y 平面内的压力是恒定的，但是由于波的存在，此压力在 z 方向上是变化的。因为在体积内的压力是变化的，所以在 z 方向上有一个净力。它做了两件事：在给定的时间间隔 dt 内把质点移动一段距离 w ；把 z 方向上的初始值 Δz 改变为新值 $\Delta z \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right)$ 。结果体积变化是

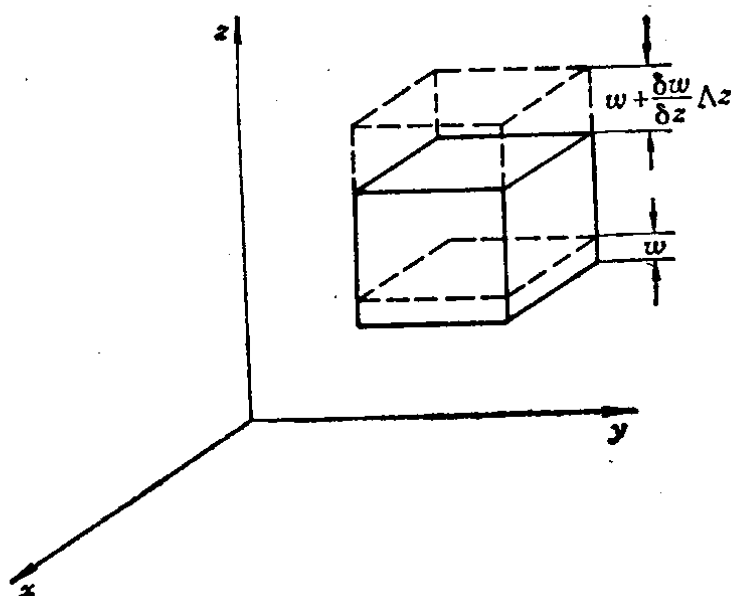


图1.1 增量体积对声波压力的响应

$$\Delta V = V \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - V \quad (1.4)$$

由此可见

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.5)$$

任何固体、液体或气体材料，其特性之一是它的可压缩性。定义压缩系数为由压力变化 ΔP 所引起每单位体积的体积变化 $\Delta V/V$ 。如果当体积压缩或膨胀时，没有热的流动，结果测得的压缩系数的值

$$\beta = - \frac{\Delta V}{V \Delta P} \quad (1.6)$$

称为绝热压缩系数。当一个声波快速振荡时，通常热转移是很小的，所以绝热状态是很普遍的。

比较式 (1.5) 和式 (1.6)，并以 p 代替 ΔP ，我们得到

$$p = - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.7)$$

对式 (1.1) 微分，得

$$p = - \frac{K}{\beta} w_0 \sin(\Omega t - \bar{K} z) \quad (1.8)$$

并使

$$p_0 = -\frac{K}{\beta} w_0 \quad (1.9)$$

有

$$p = p_0 \sin(\Omega t - Kz) \quad (1.10)$$

式 (1.9) 提供了质点位移振幅 w_0 和压力振幅 p_0 之间的一个有用的关系式。

再考虑图 1.1 的体积元和 z 方向上压力变化, 我们注意到, 如果质点底部的压力是 P , 则质点顶部的压力是 $P + (\partial P / \partial z) \Delta z$, 所以作用在质点上的净力是

$$F = -\frac{\partial P}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (1.11)$$

和每单位体积上的力是

$$F_v = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.12)$$

考虑压力 P 为总压力, 但是如果我们把 P 考虑为由一个恒定的正压力 P_0 和一个可以或正或负的变动分量 p 组成的话, 则

$$P = P_0 + p \quad (1.13)$$

和

$$F_v = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.14)$$

使式 (1.14) 给出的单位体积的力, 等于单位体积质量 ρ 和质点加速度 $\partial^2 w / \partial t^2$ 的乘积, 我们有

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (1.15)$$

p 和 w 的表示式可以由式 (1.1) 和式 (1.8) 得到, 把它们代入式 (1.15) 中, 我们有

$$p_0 K = -\rho \Omega^2 w_0 \quad (1.16)$$

由此, 可导出压力振幅 p_0 和质点位移振幅 w_0 之间的第二个关系式, 即

$$p_0 = -\Omega \rho c w_0 \quad (1.17)$$

§ 1.3 材料的性质和波速度

虽然超声的速度能够容易地直接测得，但是了解它怎样依赖于材料的物理性质是有用的。把式 (1.9) 与式 (1.16) 联解，有

$$\frac{K^2 w_0}{\beta} = \rho \Omega^2 w_0 \quad (1.18)$$

而且

$$\left(\frac{\Omega}{K}\right)^2 = \frac{1}{\rho\beta} \quad (1.19)$$

因为 Ω 除以 K 给出波速度 c ，所以可用密度 ρ 和材料的绝热压缩系数来表示波速，即

$$c = \sqrt{1/\rho\beta} \quad (1.20)$$

在估算某些表上未列的材料中的超声速度时，式 (1.20) 特别有用（参见表 1.1 中的示例）。

对固体来说，更常用的是体积弹性系数 B ，它是压缩系数 β 的倒数。因此，在固体中纵向超声波的传播速度 $V(LB)$ 给定为

$$V(LB) = \sqrt{B/\rho} \quad (1.21)$$

通过泊松比 σ ，体积弹性系数 B 与杨氏模量 E 有关系

$$\frac{E}{B} = \frac{1 - \sigma - 2\sigma^2}{1 - \sigma} \quad (1.22)$$

为了更清楚地阐明杨氏模量与泊松比的物理意义，参看图 1.2 来说明这些量是如何测量的。一根均匀的棒，初始直径为 d 、初始长度为 L ，以刚性结构将其一端固定，另一端加一力 F ，于是长度增加 ΔL ，直径减小 Δd 。如果此材料服从于虎克定律，则此应力 $4F/\pi d^2$ 将产生应变 $\Delta L/L$

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{1}{E}\right) \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1.23)$$

即给出杨氏模量 E

$$E = \frac{4F}{\pi d^2} / \frac{\Delta L}{L} \quad (1.24)$$

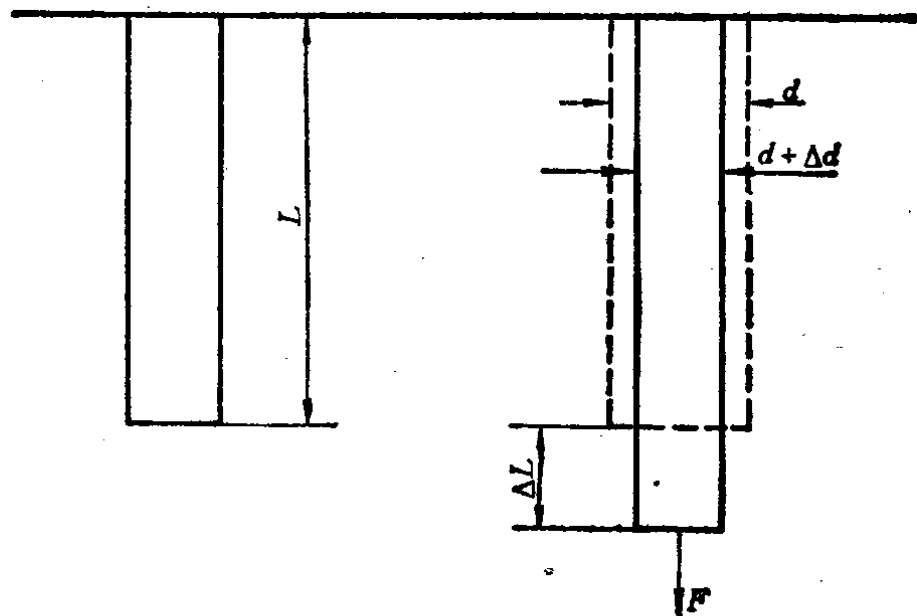


图1.2 弹性杆在张力作用下的情况

应变 $\Delta d/d$ 对应变 $\Delta L/L$ 的比, 称为泊松比, 即

$$\sigma = (\Delta d/d) / (\Delta L/L) \quad (1.25)$$

固体能承受压缩波, 还能承受剪切波。在剪切波中, 质点的位移垂直于传播方向。在图 1.3 中, 剪切应力 S 可认为是由一个力偶引起的, 它由两个方向相反、间隔 Δz 的作用力 F 所组成。这样

$$S = F / \Delta x \Delta y \quad (1.26)$$

如果把 Δz 等效作长度 L , 剪切应变 γ 等效作 $\Delta L/L$, 剪切模量可表达为十分类似于杨氏模量的形式, 即

$$\mu = \frac{F}{\Delta x \Delta y} / \frac{\Delta L}{L} \quad (1.27)$$

剪切波的传播速度 $V(S_\mu)$ 可用剪切模量来表示, 并且这样表示后, 除了剪切模量 μ 代替了体积弹性系数 B 以外, 与式(1.21)是等同的, 即

$$V(S_\mu) = \sqrt{\mu/\rho} \quad (1.28)$$

固体中纵波速度与剪切波速度的比值可表示为⁽¹⁾

$$\frac{V(LB)}{V(S_\mu)} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (1.29)$$

表1.1 两种液体在25°C时计算的与测得的声速

材 料	含氟聚醚	硅 酮 液
密度〔公斤/米 ³ 〕	1.79×10^3 ①	0.96×10^3
压缩系数〔米 ² /牛顿〕●	9.58×10^{-10} ①	1.31×10^{-10} ●
计算的速度〔米/秒〕	764	893
测得的速度〔米/秒〕	727	982

●资料来源：Du Pont Dow Corning
Tech. Bull. EL-8B Bull 22-0690。

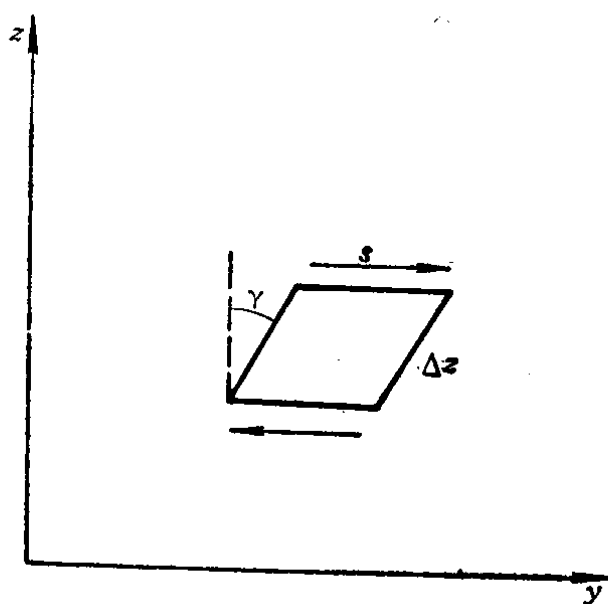


图1.3 定义剪切应变各参数的图解

此比值总是大于 1.4。实际上，所有材料的 σ 值 介于 $1/4$ 和 $1/2$ 之间。采用“硬”材料的典型值 $\sigma = 1/3$ ，比值

$$\left. \frac{V(LB)}{V(S_p)} \right|_{\sigma=1/3} = 2 \quad (1.30)$$

表明剪切波速度总是小于纵波速度。

§ 1.4 能量与强度

再参看图 1.1，我们注意到体积元 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 的质点以速度 U 在运动着

●原文量纲误为〔米顿/米²〕。——译注