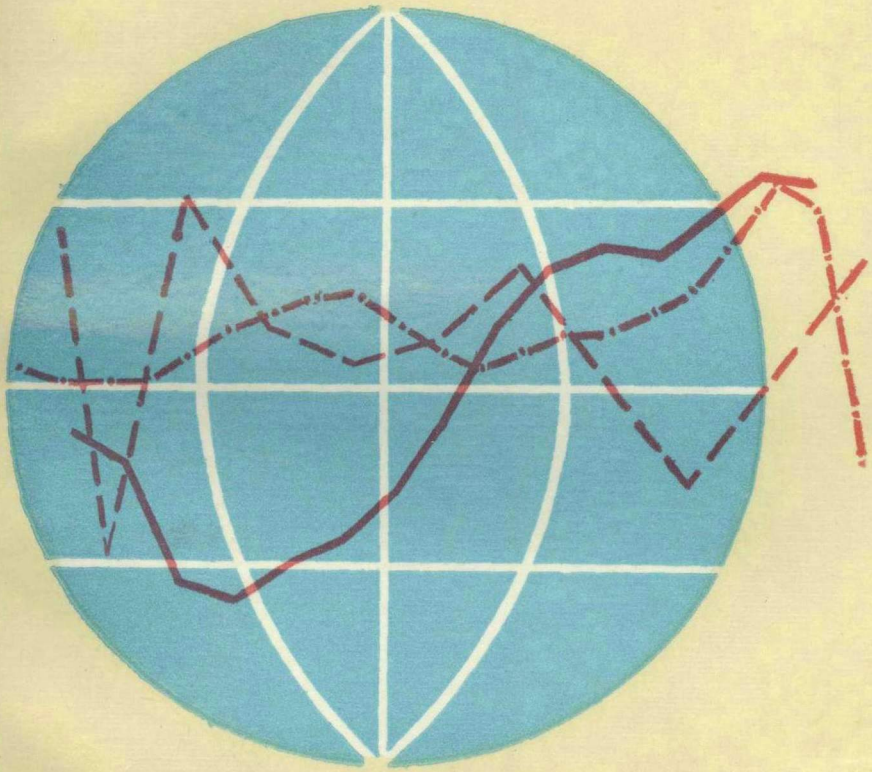
固体地球物理进展丛书

地球内部物理

周惠兰　编著



地震出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com



作 者 简 介

本书作者周惠兰，中国科技大学研究生院副教授，1941年生，1965毕业于中国科技大学。曾长期在中国科技大学从事教学和科研工作。在基础地震学、地震活动性、震源机制和震源物理方面发表过一系列论文，并与他人合作编著出版过《地震学原理》一书。

地震科学联合基金会资助出版

固体地球物理进展丛书

地球内部物理

周蕙兰　编著

地震出版社
1990

内 容 提 要

本书阐述了地球内部物理的主要研究课题的基本理论和研究方法，介绍了近年来的新发展与新结果。本书可作为高等院校地球物理专业及有关的其他地学专业的研究生和大学生的学习参考书，也可供有关专业科研人员和教师参考。

固体地球物理进展丛书
地球内部物理
周惠兰 编著
责任编辑：姚家榴
责任校对：李 珺

地震出版社出版
北京复兴路63号
北京朝阳小红门印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 10.25印张 278千字
1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷
印数 0001—1200
ISBN 7-5028-0186-3/P·114
(574) 定价：6.00元

序

地球物理学是建立在物理学基础上的一门应用科学。它的发展和当代的物理学和技术科学的水平有密切的联系。直到本世纪50年代，这门科学的进展速度是比较缓慢的，但在50年代之后，由于物理学的发展和电子计算机的出现，现代地球物理学为了适应生产建设的需要，也正在经历着一个飞跃的变化，在内容和应用两方面，地球物理学的面貌都日新月异。一个地球物理学家若信息不通，在极短时期就会落伍。现代科学家若想成为一个通才简直是不可能的，即使成为一个具有通才的固体地球物理学家也几乎是不可能的。于是若想不落后于时代，一个地球物理学家如何选择读物便成了一个问题。

我们在1978年招收第一批地球物理研究生时，曾尝试过一个方案：对于这个专业的研究生，只开两门专业课：一门是“地球物理学基础”，一门是“当代地球物理学进展”。这是因为地球物理学的基础格局变化并不快，编一本基础教材可以适用好几年；但是地球物理学的应用和计算技巧却五花八门，日新月异。

要培养一个能独立工作的地球物理人才，两方面都不可偏废，但后一方面是有选择的。我们只选一些我国正有人在做的或迫切需要做的课题，请从事这方面工作的有关专家进行短期的讲授，要求说清楚问题的来龙去脉和展望，使学生听过后很快就可以了解问题的情况以便进一步投入工作。这种课题一般是有时间性的。随着工作的进展和需要，不同学年的专题是不固定的。这个办法看来还有一定的成效，因此也引起出版社同志的注意。他们建议将这些专题的讲义印制出版以供更多的读者参考，这就是《固体地球物理进展》这部丛书的由来。其实国外出版界早已有

需要全本请访问 www.ertongbook.com

了这种做法，不过我们选题要有我们自己的特色，要适合当前我国研究工作的需要。因为要出书，内容比讲义要编排得完整些。要讲清内容的实质，但又不要学院式的长篇大论。文章要精干，针对性要强。对象是有关的专业人员，而不是一般的读者。书的长短和出版时期应当是灵活的。最重要的是针对需要和不失时机。书中还应附有参考文献目录，这对研究人员是极其宝贵的资料。

傅承义

前　言

近二十年来，随着地震观测台网的扩大，观测技术的提高和观测数据的大量增加，计算机的广泛使用和地球物理反演理论及其方法的发展，固体物理理论（如晶体位错缺陷等）在地球内部物质上的应用，人们对无法直接接近的地球深部的研究取得了很大进展。对球对称地球介质的速度、密度、弹性、重力和流体静压力的分布的大量研究已经导致初始地球参考模型（PREM）的建立。地震波层析成象术（seismic tomography）为地球内部三维速度结构、介质三维不均匀性和物质对流图景的研究提供了有效的探索方法。高温高压下的物理化学实验，也为研究地球内部物质的微观结构和成分带来了光明前景。因此，一本反应现代地球内部物理发展情况的书是需要的。

本书是在作者给地球物理专业研究生讲课内容的基础上写成的，力求反映一些新的研究成果。但由于地球内部物理涉及很多学科内容，而作者的水平和工作范围有限，因此在内容上仍只能侧重几个方面。作者热诚盼望读者对错误和不妥之处提出批评指正。

作者在工作过程中，得到傅承义教授的热情鼓励、指导和审稿斧正，以及曾融生教授、郭自强教授和其他许多同志的大力支持。在此谨致谢忱。

作者

1988年　北京

PREFACE

In the recent twenty years, following the expansion of seismostation networks, improvement of observation technique, extensive use of computer, development of theory and method of geophysical inversion, and application of solid physics to medium of the earth's interior, people have made great progresses in understanding the earth's interior which can not be reached directly. The great quantity studies on velocity, density, elasticity, gravity and pressure of spheric symmetric earth lead to the establish ment of "Preliminary Reference Earth Model" .Seismic tomography provides an useful method to investigate the three-dimensional inhomogeneity and convection pattern of the earth's interior. Physical and chemical experiments in conditions of high pressure and high temperature also bring out some of bright future on finding out the micro-construction and composition of medium of the earth's interior. Therefore, it seems that a book is required to reflect these modern developments and new research results about physics of the earth's interior, and this book strived to achieve these goals.

This book was written based on author's teaching material for the graduate students of geophysics speciality in the University of Science and Technology of

China and in the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences. The contents only lay particular emphasis on several subjects, since author's work field is limited while physics of the earth's interior involves many branches of learnning. Criticisms from readers are welcome.

The author particularly wishes to thank Professor Fu Chengeyi who went over the manuscripts and gave a lot of very valuable advice. The author is also grateful to Professor Zeng Yongsheng, Professor Guo Ziqiang and other colleagues for their friendly support.

Zhou Huilan
1988 Beijing

目　录

第一章　地球内部速度结构 ……（1）
§1.1　地球的弹性和地震波动 ……（1）
§1.2　用体波走时研究速度随深度的变化 ……（6）
§1.3　利用理论地震图研究速度结构 ……（13）
§1.4　用面波研究速度结构 ……（28）
§1.5　用地球自由振荡研究速度结构 ……（35）
§1.6　初步参考地球模型（PREM）的速度结构 ……（40）
§1.7　速度各向异性 ……（50）
§1.8　地震波层析成象与地球的三维速度结构 ……（67）
第二章　地球内部的密度、弹性和压力 ……（72）
§2.1　由地震波速度分布求密度分布的理论公式 ……（73）
§2.2　由波速求密度的实验定律 ……（82）
§2.3　地球密度模型发展概况和 PREM 的密度分布 ……（86）
§2.4　关于地心密度 ……（89）
§2.5　地球内部弹性、重力和压力的分布 ……（91）
§2.6　线性反演 ……（94）
第三章　地球内部的状态方程 ……（101）
§3.1　有限应变 ……（101）
§3.2　地球内部流体静压力和有限静压应变 ……（108）
§3.3　热力学条件与内能表示式 ……（110）
§3.4　地球内部的状态方程 ……（114）
第四章　地球内部的物质成分 ……（122）
§4.1　地球外部资料用于研究地球化学成分 ……（122）
§4.2　地壳的物质成分 ……（131）
§4.3　上地幔的物质成分 ……（148）
§4.4　下地幔和地核的物质成分 ……（156）

第五章　地球内热和温度 ……(167)
§5.1　地球内部热源 ……(167)
§5.2　地球内部的热传输机制 ……(170)
§5.3　热传导方程 ……(179)
§5.4　地面热流和地壳的温度 ……(182)
§5.5　地幔和地核温度的下限——绝热自压温度 ……(189)
§5.6　地幔和内核温度的上限——熔点温度 ……(194)
§5.7　对地幔和地核实际温度的研究现状 ……(202)
§5.8　地球内部物质热对流和涌流 ……(205)
§5.9　岩石层板块的冷却和下沉升温问题 ……(213)
第六章　晶体位错控制的地幔介质蠕变特性和地震波吸收衰减 ……(218)
§6.1　测量 Q 值的地震学方法和地球的 Q 观测值 ……(218)
§6.2　地震波吸收衰减的线性粘弹理论 ……(231)
§6.3　对地幔物质吸收衰减机制的约束和地幔物质晶体位错 ……(238)
§6.4　受地幔物质晶体位错弯曲滑移所控制的地震波衰减物理 ……(244)
§6.5　地球的吸收带 Q 模型 ……(253)
§6.6　晶体位错控制的上地幔吸收衰减和蠕变流动 ……(256)
第七章　地球内部的电磁特性 ……(265)
§7.1　地磁场的基本特征 ……(265)
§7.2　古地磁场研究 ……(271)
§7.3　地球基本磁场的起源 ……(278)
§7.4　电磁感应和地球内部的电磁特性 ……(291)
参考文献 ……(306)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

CONTENTS

Chapter 1. Velocity Construction of the Earth ……(1)
§1.1 Elastic earth and seismic waves ……(1)
§1.2 Earth's velocity construction from data of body-wave travel-times……(6)
§1.3 The use of surface-waves to study velocity construction ……(13)
§1.4 The use of free oscillation to study velocity construction ……(28)
§1.5 The use of synthetic waves to study velocity construction ……(35)
§1.6 Velocity construction of PREM……(40)
§1.7 Velocity anisotropy ……(50)
§1.8 Seismic tomography and three-dimensional velocity construction ……(67)
Chapter 2. Density, Elasticity, and Pressure in the Earth……(72)
§2.1 Theoretical formula of estimating density from data of velocity ……(73)
§2.2 Experimental law of relating density to velocity……(82)
§2.3 Development of earth's density models and density of PREM ……(86)
§2.4 Density of the earth's centre ……(89)
§2.5 Elasticity, pressure and gravity distributions in the earth's interior……(91)
§2.6 linear inversion ……(94)

Chapter 3. State Equation of Earth's Interior ····· (101)
§ 3.1 Finite deformation ····· (101)
§ 3.2 Fluid static pressure and finite static strain of the earth's interior ····· (108)
§ 3.3 Thermodynamic condition and internal energy ····· (110)
§ 3.4 State equation of the earth's interior ····· (114)
Chapter 4. Composition of the Earth's Interior ····· (122)
§ 4.1 Study on chemical composition of earth from data outside of earth ····· (122)
§ 4.2 The composition of the crust ····· (131)
§ 4.3 The composition of upper mantle ····· (148)
§ 4.4 The composition of lower mantle and core ····· (156)
Chapter 5. The Internal Heat and Temperature of the Earth ····· (167)
§ 5.1 The heat sources of the earth ····· (167)
§ 5.2 Mechanisms of heat-conduction of earth's interior ····· (170)
§ 5.3 Equation of heat conduction ····· (179)
§ 5.4 Heat flow and temperature of the crust ····· (182)
§ 5.5 Lower limit of temperature of mantle and core ····· (189)
§ 5.6 Upper limit of temperature of mantle and inner core ····· (194)
§ 5.7 Present situation of study on temperature of earth interior ····· (202)
§ 5.8 Thermal convection and thermal plume ····· (205)
§ 5.9 Drift-cooling and subduction-heating of lithosphere slabs ····· (213)

Chapter 6. Dislocation-Controlled Creep and Attenuation in the Mantle ……(218)
§6.1 Seismological methods of measuring Q and Q of the earth ……(218)
§6.2 Linear viscoelasticity theory of attenuation of seismic waves……(231)
§6.3 Restraints to attenuation mechanisms of mantle and dislocation in crystallinic medium of mantle ……(238)
§6.4 Wave attenuation physics controlled by dislocation glide of crystallinic mantle ……(244)
§6.5 Absorption band Q model for the earth……(253)
§6.6 Attenuation and creep controlled by dislocation in upper mantle……(256)
Chapter 7. Electromagnetic Property of the Earth's Interior ……(265)
§7.1 Observational characteristics of geomagnetic field ……(265)
§7.2 Palaeomagnetic study ……(271)
§7.3 Origin of the main geomagnetic field ……(278)
§7.4 Electromagnetic induction and electromagnetic property in the earth ……(291)
References……(306)

第一章　地球内部速度结构

人们关于地球内部结构的知识，主要来自对地震波（体波和面波）以及由大地震所激发起来的长周期地球自由振荡的观测和研究。在这类研究中，地震只是被视为地震波的发生器。而且，由于任何地震的震源尺度相对于地球半径来说都是微不足道的，震源通常以点源来处理。观测表明，中等以上地震释放的能量，就足以使地震波穿透地球内部各处，而被分布在地球表面的许多个观测台记录到。通过分析研究这些地震记录图，人们获得了关于地球内部结构的信息。因此，正如苏联学者伽利津所说的，地震波就象是X射线那样，是照亮地球内部的一盏明灯。

§1.1　地球的弹性和地震波动

自18世纪以来，人们已经发现各向同性完全弹性体在无限小形变情况下的应力应变关系对描述在普通温度压力条件下的许多材料的力学性质是有用的。人们首先采用这一模型来描述地球介质，这就是（以下使用求和约定）：

$$p_{ij}=\left(k-\frac{2\mu}{3}\right)\theta\delta_{ij}+2\mu e_{ij}, \tag{1-1}$$

式中，p_{ij}为介质中某点的应力张量，e_{ij}为该点的应变张量，$\theta=e_{mm}$，为体膨胀系数，k为介质的不可压缩性系数，μ为介质的剪切模量，而

$$\delta_{ij}=\begin{cases}1 & i=j,\\ 0 & i\neq j.\end{cases}\qquad e_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right),$$

u_i为形变位移分量。有时记 $\lambda = k - \frac{2}{3}\mu$，称为拉梅常数。

引入偏应力张量 P_{ij}

$$P_{ij} = p_{ij} + p\delta_{ij}, \tag{1-2}$$

式中，$p = -\frac{1}{3}p_{mm}$，是三个主应力的平均值，称为平均主应力或平均压应力。

同时，又引入偏应变张量 E_{ij}

$$E_{ij} = e_{ij} - \frac{1}{3}\theta\delta_{ij}. \tag{1-3}$$

以(1-2)(1-3)代入(1-1)式，得到

$$\begin{cases} p = -k\theta, & (1\text{-}4) \\ P_{ij} = 2\mu E_{ij}. & (1\text{-}5) \end{cases}$$

(1-4)(1-5)与(1-1)式是等价的。同时，由(1-4)式取微元形式得

$$k = -\frac{dp}{d\theta}. \tag{1-6}$$

即 k 是平均压应力对体积压缩的变化率。

连续介质运动方程为

$$\rho f_i = \frac{\partial p_{ij}}{\partial x_j} + \rho X_i,$$

式中，ρ 为介质密度，f_i 为加速度分量，X_i 为作用于单位质量的体力分量。略去体力，分别把 p_{ij} 和 θ 与应变的关系变换成与位移 u 的关系，联同 f_i 与位移的关系式，代入上式，得到（写成向量形式）：

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot u) + \mu\nabla^2 u. \tag{1-7}$$

将位移场分解为无旋场 u_{I} 和无散场 u_{II}：

$$u = u_{\mathrm{I}} + u_{\mathrm{II}},$$

则(1-7)式分解为两个自由波动方程：

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial^2 \boldsymbol{u}_{\mathrm{I}}}{\partial t^2}&=\alpha^2\nabla^2\boldsymbol{u}_{\mathrm{I}}\quad,\qquad \alpha=\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}},\\ \frac{\partial^2 \boldsymbol{u}_{\mathrm{II}}}{\partial t^2}&=\beta^2\nabla^2\boldsymbol{u}_{\mathrm{II}}\quad,\qquad \beta=\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}\quad.\end{aligned}\right\}\tag{1-8}$$

这表明，当把地球介质视为弹性固体时，可以存在两种扰动传播，即

$\boldsymbol{u}_P=\boldsymbol{u}_{\mathrm{I}}$，纵波或P波；$\boldsymbol{u}_S=\boldsymbol{u}_{\mathrm{II}}$，横波或S波。

如果介质内部有一扰动被激发时(例如地震发生)，我们就应该能观测到这两种波。事实上，1897年奥尔德姆（Oldham）在地震记录图上果然分辨出了P波和S波，而且还分辨出了P波和S波在地表或成层结构条件下相互叠加干涉所形成的沿地表传播的面波。这一切都和理论是一致的。随后，大量观测研究表明，(1-1)或(1-4)(1-5)式确实给出了对地球弹性的基本正确的描述（这里说基本正确，因为事实上地球介质并非完全理想弹性体，见第六章）。

正如在弹性动力学和地震学方面的研究中(傅承义，1985)[1]所指出的，如果所考虑的地震波在一个波长距离内速度梯度变化比波频率小得多，同时如果我们又肯舍弃有关波的振幅、相位等动力学方面的信息，那么就可以用射线方程代替波动方程。根据费马原理，射线路径使波沿其传播时间为稳定值，进而导出地震波射线在球对称介质中所遵循的斯内尔（Snell）定律：

$$\frac{r\sin i}{v(r)}=\cdots=\frac{r_0\sin i_0}{v_0}=p.\tag{1-9}$$

式中，r_0为地球半径，v_0为地表附近的波速，r为地球内部一点距地心的距离，$v(r)$为该点的波速，p称为射线参数，对于某一条射线而言，它是一个常数。射线上任意两点之间的走时曲线的参数方程为

需要全本请访问 www.ertongbook.com