

300

B. 古 登 堡

地球内部物理学

科 学 出 版 社

地球内部物理学

[美]B.古登堡著

王子昌译

傅承义校

科学出版社

1965

B. GUTENBERG
PHYSICS OF THE EARTH'S INTERIOR
International Geophysics Series, Volume 1
Academic Press
New York and London
1959

內 容 簡 介

本书共分九章,扼要地叙述了地球内部物理学的问题,并对某些现有数据和资料进行了讨论分析并作出了明确的结论。

作者首先叙述了地球内部的观测方法、基本数据和地球本体的主要分层(地壳、地幔和地核),其次对这些主要分层的特征和组成进行了详尽的讨论,最后作者对地球内部各种性质(弹性、密度、导热性、粘性等)和所发生的过程(热过程、弹性过程、非弹性过程等),以及对它们发生影响的因素如压强、温度等进行了认真的讨论并提出了自己的看法。

本书内容丰富,文字简练,较少采用繁赘的数学公式。本书除适合地球物理工作者和地质学工作者参考外,也能帮助其他对地球科学有兴趣的工作者了解地球内部的物理学的主要内容。

地 球 內 部 物 理 学

[美] B. 古登堡 著
王 子 昌 译
傅 承 义 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号
北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965年5月第一版 开本:850×1168 1/32
1965年5月第一次印刷 印张:7 3/8
印数:0001—3,700 字数:190,000

统一书号:13031·2100

本社书号:3208·13-15

定价:[科七] 1.30 元

序 言

“地球内部物理学”一书所包含的性质和过程的范围这样广泛，以致在一本书的有限篇幅里来讨论它们，将具有很大的局限性。此外，任何一个地球物理学家对这里所涉及的自然科学许多领域的熟悉程度的不平衡，也促使他们所作的论述不够全面。为此，作者的讨论只限于有关重力、地磁、构造过程和地球历史的某些问题上。如果这些问题能得到解决，也许会带给人们有关地球内部的知識。另一方面，地震学的研究也只限于它们有关地球构造和地球内部物理这些范围的讨论；地震学则将在本丛书的另一专著中详细讨论。

有关地球内部的各种推断和假说目前仍处于发展过程中。有些在十年前认为几乎是肯定了的基本结论，在最近几年则发现是不正确的。其他许多根本问题，象地球的起源、地球的热历史、温度、成分和地核的状态，或所谓地幔里的 20° 间断，还象一、二十年前那样莫衷一是。因此，书中许多章节里所指出的一些未解决的问题，要比表面上已解决的结果的报道多得多。

本书每章后面都附有参考文献。这些优先选择出来的最近出版的文献里，或者包含新近的结果和更详尽的观察或者包括其他的重要的追加引证。

作者感谢 H. Benioff 博士允许采用一些由 R. Gilman 先生绘制的未经公布的例图。其他大多数的例图是由 L. Lenches 先生所绘制或重绘的，还有少数是由 J. Nordquist 先生所绘制的。

B. 古登堡

加利福尼亚，帕萨迪纳
加利福尼亚理工学院地震实验室
1959 年 9 月

經常採用的符号表

(有关通过地球的波的符号,参看 5.1 节)

a 地球的赤道半径	的指标
a 振幅	t 时间
a, b 在书中所定义的各种常数	u 在书中所定义的各种量
c 地球的地极半径	v 以公里/秒表示的横波速度
c 比热	w 体积
d 一层的深度或厚度	x, y 水平分量
f 在书中所定义的各种函数和常数	z 豎直分量
g 重力	A 到 G 地球里的分层 (图 2.2)
h 深度或高度	$A \left. \begin{array}{l} B \\ C \end{array} \right\}$ 在书中所定义的各种量
h 乐甫数之一	
i 入射角	A 绕 a 轴的转动惯量
k 体积弹性模量	C 绕 c 轴的转动惯量
k 热导率	D 在书中所定义的特殊的深度
k 吸收系数	E 东
k^* 乐甫数之一	E 杨氏模量
l 乐甫数之一	F 在书中所定义的各种因子
m 质量	G 万有引力常数
n 数据的数目等	H 在书中所定义的特殊深度或高度
n 折射率	
o 表示地面上的量的指标	I 在内地核中地震射线的纵波部分
p 压强	
q 在书中所定义的各种量	J 能量
r 半径	K 在外地核中(或整个地核中)射线的纵波部分
r_0 地球的平均半径	
s 表示一条地震射线最低点的量	K 玻耳兹曼常数

L	波长		地面的视速度
L	熔解热	W	西
Lg	在花崗层中的导波	W	势
M	莫霍间断面的深度 (地壳的厚度)	Z	高度
M	地震的震级	α	热膨胀系数
N	北	α	扁率, $(a - c)/a$
P	放射性物质的发热率	α	在书中所定义的角度
P	地幔中的纵波	β	体热膨胀
Pa	M 下面的纵导波	β	在书中所定义的各种量
PcP	在地核界面上反射的地幔中的纵波	γ	在海平面上的重力
PP	在地面上反射的地幔中的纵波	γ	切向脅变
Q	热通量	γ	格鲁乃辛比
Q	在书中所定义的各种量	γ	乐甫数的组合 (第八章)
R	r/r_0	δ	乐甫数的组合 (第八章)
S	脅强	δ	对数减缩
S	脅变回跳 (Benioff)	ϵ	电子电荷
S	熵	η	腊道常数
S	南	η	粘滞系数
S	地幔中的横波	κ	热扩散率
SH	在水平面里的横波分量	λ	电子的传导率
SV	在豎直面里的横波分量	λ	拉美常数
Sa	类似于 Pa	λ	弛豫时间
ScS	类似于 PcP	λ_r	推迟时间
SS	类似于 PP	μ	刚性系数
T	周期	μ	推迟弹性运动系数
T	以摄氏度表示的温度或注明是其他的温度	ρ	密度
T^*	熔点温度	ρ	曲率半径
U	以公里/秒表示的羣速度	ρ_m	平均密度
V	以公里/秒表示的纵波速度	σ	电导率
$\bar{V}$	$=d\Delta/dt$, 以公里/秒表示的沿	σ	泊松比
		τ	实际上负的绝热温度梯度
		τ	章动的强德列尔周期
		φ	纬度

ψ 经度

ω 角速度

ω 倾角

ω 不透明度

$\Gamma = 1 - (d\Phi/dr)/g$

Δ 以公里表示的沿地面距离

Δ “变化”的符号

Δg 重力异常

θ 以度表示的角距离

Λ 乐甫数的组合(第八章)

$\Phi = V^2 - \frac{4}{3} v^2$

Ω 算符(方程式 9.3)

目 录

序言	(iii)
經常采用的符号表	(viii)
第一章 基本問題和基本数据	(1)
1.1 研究地球内部的方法和结果的准确度	(1)
1.2 地球的体形和有关常数	(7)
1.3 海平面上的重力	(9)
1.4 天文数据	(10)
参考文献	(12)
第二章 地球的构造	(13)
2.1 历史评述	(13)
2.2 地球主要单元的分界面	(17)
2.3 地球里面产生间断面的原因	(18)
参考文献	(19)
第三章 地壳	(21)
3.1 定义	(21)
3.2 各层里的速度和各层厚度的测定方法	(21)
3.3 根据弹性波观察结果所得出地壳各层里的速度和间断面的深度	(29)
3.4 地壳对反射波 PP 振幅的影响	(36)
3.5 从通道波和地震脉动所得出的结论	(38)
3.6 从面波的频散和消失所得出的结论	(42)
3.7 重力异常和地壳的构造	(47)
3.8 根据几种方法得出的结果	(55)
3.8.1 “山根”	(55)
3.8.2 太平洋盆地的“边界”;“安山线”	(59)
3.8.3 地震带	(61)
3.8.4 从海洋型地壳过渡到大陆型地壳	(63)

3.8.5 地面上负载减小和增大对地壳均衡的影响	(64)
3.9 地壳里存在间断面的原因	(65)
参考文献	(66)
第四章 地幔	(73)
4.1 地幔的分层	(73)
4.2 从莫霍间断面到 200 公里深度左右的区域 B. “20°间断”	(73)
4.3 深度约在 200 和 950 公里之间的区域 C	(88)
4.4 深度约在 950 公里和地核界面之间的区域 D	(93)
参考文献	(96)
第五章 地核	(99)
5.1 通过地核的走时和所得波速的一般讨论	(99)
5.2 外地核(区域 E)	(107)
5.3 地核里的过渡带(区域 F)	(109)
5.4 内地核(区域 G)	(112)
5.5 地核的状态和成分	(113)
5.6 地球的磁场和地核	(116)
参考文献	(117)
第六章 地球的温度和热过程	(120)
6.1 地球表面上的温度和温度梯度	(120)
6.1.1 在地面上的温度	(120)
6.1.2 地壳最上层温度的周期变化	(120)
6.1.3 大陆上的温度梯度	(122)
6.1.4 海底的温度梯度	(123)
6.2 地球的热导率	(123)
6.2.1 地壳里的热导率	(123)
6.2.2 地幔里的“热导率”	(124)
6.2.3 地核里的热导率	(128)
6.3 通过地球表面的热流	(128)
6.4 火山所放射的热和地震波所产生的热	(130)
6.5 地球里面热的产生	(130)
6.6 地球里面物质的熔点	(135)
6.7 在地球历史里地球温度变化的计算	(138)
6.8 地球里面温度的估计	(141)

6.9 地幔上部有熔解部分的可能性; 火山山根	(144)
参考文献	(145)
第七章 地球的密度、压强、重力和扁率	(148)
7.1 地球的平均密度	(148)
7.2 测定地球里面随深度而改变的密度时所应用的方程式	(149)
7.3 假定连续的密度-深度曲线	(150)
7.4 假定由不连续所分开的直线型密度-深度曲线	(151)
7.5 在地球由均匀层物质组成的假定下的密度-深度曲线	(152)
7.6 有关地球里面密度问题的一般结果	(155)
7.6.1 地核界面上的密度变化	(155)
7.6.2 在高压下物质的密度	(156)
7.7 地球里面密度的估计	(156)
7.8 地球里面的重力	(158)
7.9 地球里面的压强	(160)
7.10 地球里面几近等势椭球面的扁率	(160)
参考文献	(163)
第八章 地球的弹性常数和弹性过程	(165)
8.1 弹性常数和乐甫数	(165)
8.2 地球的自由章动、纬度的变化	(168)
8.3 地球的固体潮	(170)
8.4 地球的自由振动	(172)
8.5 乐甫数的数值	(172)
8.6 地球里面的刚性	(176)
8.7 地球里面的体积弹性模量	(180)
8.8 地球里面的泊松比	(181)
8.9 地球里面的杨氏模量和拉美常数 λ	(182)
参考文献	(183)
第九章 地球的非弹性过程	(185)
9.1 地球里面非弹性过程的理论论述	(185)
9.2 地球里面弹性波的衰减	(189)
9.3 阻滞流动过程的强度(屈服点)	(192)
9.4 地球外层的“粘性”. 冰期后的上升	(193)
9.5 在地球深部的流动	(201)

9.6 地震组和余震的脅变-回跳特征	(203)
9.7 地球里面的对流	(206)
9.8 大地块之间的相对运动	(207)
9.9 地极的长期运动	(213)
9.9.1 旋转极的运动	(213)
9.9.2 地磁磁极相对大陆的运动	(215)
参考文献	(221)

第一章 基本問題和基本数据

1.1 研究地球内部的方法和結果的准确度

对深度在几公里以下的地球内部各种性質，目前还没有直接的观察方法。实验室里的实验也許可以用来定量地研究相当于地壳里的压强和温度对岩石試样的共同作用，并且对較高温度和压强的某些作用也曾进行过定性的研究。但在研究地幔¹⁾和地核里的过程和物理常数时应用这些結果，要包含随深度加深而剧增的不准确性，尤其是对温度和地球内部組成的估計，随深度加深而越加不准确。

在地壳最上部以下的各种性質和过程的大部分知識，是把理論应用到地面上所观察到的現象而得到的。把所观察到的弹性波经过地球内部的传递時間用来計算弹性波速度与深度的关系，就是一个例子。另一个例子是以所观察到的地面潮汐为基础来研究地球内部的刚性。潮汐是由太阳和月球对整个地球的起潮力作用所产生的。

对地球里深度很大的地方各种性質和过程的研究，常常需要把理論方程式外推到远远地超出推导方程式时的条件范围。同样，常数数值的应用，一方面远远地超出实验室里的数据范围，而另一方面又远远地超出理論知識的范围。試图計算地幔下部的热导率或求出地幔和地核里物質的熔点，就是这种研究的一些例子。常常发生这样一些困难，在到达某一深度以后，它的压强一方面大

1) 地幔：英文是 Mantle，俄文是 Оболочка，德文是 Zwischenschichten，原译成中间层或壳下层。

大地高于实验室里用来得出定量结果的数值，而另一方面又远远地低于应用托馬斯-狄喇克-費密模型或其他分子模型作为理論計算基础可容許的数值。当研究地球内部深层时，在许多理論中都必需对这两个压强范围里的結果之間或方程式之間应用內插法；但从任何一边进行外推都很困难，而且通常还包含也許会导致严重誤差的理論上和数值上的假定。然而地球物理学家往往对分子理論不够熟悉，因而不能理解这些基本假定；根据对这些理論外推到远远超出认为是良好地近似的范围而得出各种結果的准确度，往往要比使用这些結果的人所信任的小得多。因此有关地幔下部和地核的結論中可能有两个誤差主要来源：对观察的不正确解释所引起的，以及对問題并不十分合适或竟絲毫也不合适，和还可能包含不正确的測定数值在內的理論方程式的应用所引起的。誤差的主要来源常常不在这些方程式的数学推导上，而在对問題的物理方面沒有充分認識或作不正确的解答。

大多数数学上的困难是在要解决涉及地球上部問題（特別在地震学領域內）的方程式时所遇到的。在这些情形中，我們常常需要一些比現有的、更良好的近似法，以根据众所周知的詳細观察而得出更准确結果。另一方面，在有关内部深处的問題中，理論的数学部分常常比考虑有关过程物理机制的不严格假定时（特別是涉及分子理論时），所必需的准确度要大得多。

目前大部分有关地球内部的結論，都是在最近五十年里得出的。它們里面有許多直到現在还多少有些令人怀疑。随着仪器的改进以及观察台和观察数目的增多，我們不断得出先前认为是很好的近似結論跟实际情况相差很大。

有关地球内部的許多結果，很多是根据地震或人工爆炸所产生的弹性波的观察而得出的。然而在地球里波传播速度的許多早期研究中，对这些波应用了不准确的走时。一部分原因是在有关波的記錄周期范围里（通常从 1 到 10 秒）地震仪的放大率太小；另一部分原因是記錄滾筒的轉速太低和这些滾筒的运动不均匀。此外偶尔还有对地震图上所观察到的波的錯誤解释或对这些波在地

球里传播路径的不正确假定，都可以在测定地球个别部分的构造中产生較大的誤差，甚至会因此而提出地球里实际上不存在的間断面。

在研究地球内部的性質时最小二乘法常常是很有用的。有时很小的“可几誤差”可以认为是一个結論的一种高准确度的征象，但实际上它們主要不过是多次观察之間很好一致的征象。地震图的系統性錯誤解释，或在作为一个距离函数的綜合观察中，应用不正确的假定，可能产生远远地超过計算上“可几誤差”的真实誤差。为了查明观察数据是否可能有各种不同曲綫的組合，把这些数据标繪出来往往是比較可取的。震中距在 200 和 1000 公里之間到达的縱波的时距曲綫，就是一个适当的例子 [Gutenberg, 1954, 341 頁]。

地球物理学家在他的研究里必須应用一些自己不熟悉領域內的結論，有时引証一些模型，例如作为深度函数的波传播速度的模型，认为是很好地确定的事实，虽然这些模型（有时从几个里面选出）过去只作为一种研究上的假說而提出的。有时只是这种模型的一个特殊的細目作为一个确定的結果而提出。在有关地球构造的文献里再三引用的“413 公里深度地方的間断面”就是一个例子。这个間断面通常叫做“二十度間断面”，在 4.2 节里将更詳細地討論。1957 年在多伦多举行的地震学和地球内部物理学国际协会上，提出了在 400 公里深度左右是否存在一个間断面的征象問題。显然沒有人相信 400 公里深度附近有一个間断面，而分別在 200 公里和 500 公里附近的深度，則被认为是所观察到的、复杂的时距曲綫是在二十度附近不連續的一种可能原因。其他一些学者还对 100 和至少到 900 公里之間的深度內存在任何显著間断面发生怀疑。

許多研究工作者对某些类型的观察数据的看法非常接近，但每当用这些数据进行計算时，矛盾就可能随数学运算的次数而增加，特別是有导数参加在內时。例如近来对縱波通过地球的传播時間 t 跟沿地球表面的震中距 Δ (公里) 之間的关系的各个表里，

即使時間到达 1000 秒以上，各个表間的差別很少有到达 3 秒的。但沿地球表面的“視速度” $\bar{v} = d\Delta/dt$ 作为 Δ 的一个函数，則常常是必需的。作为一个 Δ 函数的各种 $\bar{v}$ 曲綫之間的差別要比各种 $t(\Delta)$ 曲綫之間的差別大得多。如果有 $\bar{v}^2$ 参加在內时，相对誤差还要大。在含有对縱波的 $\bar{v}^2$ 和对横波的对应 $\bar{v}^2$ 之間的差的問題中，根据差不多同样的 $t(\Delta)$ 曲綫所得出的結果，在某些距离时相差几乎可以到达 2 倍。

在各种不同类型問題中的一个共同困难，是由地壳构造的地方性差异所引起的，特别是海洋地区和大陆地区之間的差异。通常这些差异并不严重影响有关內部深处的結論。但在許多問題中，例如在海平面上測定重力时，这些差异就可能使問題变得复杂。虽然对地球自然表面上某一个地点的重力，測定的准确度可以很高，但要确定一个公共等势面（通常是海平面）上的重力数值，就必需有关地壳构造的假說。結果，在海平面上重力与緯度的关系方程式里，作为基础的一些改正到海平面上的重力数值，可能含有数量級比原始測量誤差大上百倍的地方性誤差。

对許多有关地球內部的問題，大家持有非常不同的見解。例如对地球內部的温度，它的数值范围至今还是很大。和許多其他問題一样，这里一个基本的困难是：虽然地球的年龄差不多大家一致公認是 4×10^9 年左右，但地球的历史則仍不清楚。特别是有关地球开始时是一个由許多比較小的固体質点組成的冷物体，还是由一团熾热的气体，或由任何其他途径而形成的問題，意見仍很分歧。如果地球內部的温度是根据一个假定的历史来計算的，那么这些問題是必須考虑的。此外，对不同深度地方，地球里面的放射性物質在不同时候所放出的热量，大家的意見也沒有取得完全一致，同时对随深度和時間而改变的热传导問題則更分歧。

大家对內地核的密度和成份；內地核是否固体的問題；地幔上部波速的較大增加比用速度随压強而增大所算得的数值还要大的理由；地球里面的間断面哪些是由一种給定的物質的固态相改变到另一种固态相，或由一种状态的变化而引起，和哪些是由两种物

質之間化学上不同的結果的問題；以及其他問題，都有相当不同的看法。

在理論研究中所推出的方程式，常常是比較复杂的，因而也許必須采用近似的方法。特別在根据地震波观察来研究地球內部时所应用的方程式，經常是略去二次（和高次）項而推出的。在应用这些方程式时，人們常常忘記在推导中所做的各种假定。例如他們認為，能通量是在波传播的方向上的。虽然这个假定对均匀物体是正确的，但在波速随深度而改变的情况下一般是不适用的。不加这些近似方法推出的方程式可以具有更高的准确度，但它們很复杂，以致在地球內部的研究中不能应用。加用近似方法得出的方程式对通过地球传播的地震波振幅的計算，可能有显著影响，但在地球里面的波速計算中，由应用它們而产生的誤差通常是比較小的。

在許多問題中，地球里面物質的非弹性性質起着重要的作用。在理論研究中予以引用是必需的，例如在弹性波通过外地核（液体）和內地核（固体？）之間的过渡带里传播的研究中。此外，它也許有助于对有关一些有摩擦在里面起作用的过程的观察的解释。物質非弹性性質的理論，在研究跟延續几百年或更長時間运动有关的过程时也是很重要的，例如在“壳下流”、地球外部大块質量彼此之間的相对运动或“冰期后上升”的研究中。通常这样一些問題的理論上探討往往由一些假定的必要选择而造成困难。这些假定，一方面至少要跟以上过程很好地相适应，而另一方面則又要能得出有用的方程式。然而即使在流变学家中对这些过程的物理机制和表达它們的方程式，也常常沒有接近一致的見解。

关于地球物理問題的物理机制所作的理論假定或理論中所含有的数字常数，时常会含有各种不知不觉的誤差，所以地球物理的研究結果，虽然有时被它們的作者認為是“可靠的”或“可几的”，而实际上它們的可信程度，則要比所認為的小得多。这种情况特別由 Birch [1952, 234 頁] 加以指出。对結果的准确度过份乐观，在涉及物理条件知道很少和物理常数很不可靠的地球內部深处时，

要比涉及解决地球上部問題时更显得突出。在地球内部深处非弹性过程的影响,可能是意想不到的誤差的一个主要根源。

不幸的是,不可能对讀者經常告戒,不要太倚賴一些过份乐观的結論。許多科学家(包括作者在內)多少有些倾向于不时过高地估計自己的結果的准确度和过少地留意自己專門領域以外(有时以內)其他学者的文章。另一方面,一个地球物理学家的一个試驗性建議或“模型”,竟由其他領域內的学者用来作为自己一个假說的証据,这是毫不稀奇的。这种情况是部分地由于没有一个地球物理学、地球化学或地質学問題的研究者对自己研究工作中所涉及的所有地球科学領域都很熟悉的緣故。此外,对許多有关地球内部的問題,观察結果不容許得出一个单值的解。这个事实通常由得到一定可几的解的专家們指出。但另一些学者在应用一些已发表的、带有某些局限性的結果时,在自己文章里造成一种印象,认为这些解是肯定的单值的結果。

对一个解所預期的誤差是大还是小并非沒有征象的。如果增添的数据,特别是由应用新方法而得到的,証实原有的結論,那就不一定有大的誤差。但有很好的理由令人怀疑,是否更多的或改进后的数据反而会引起所採納的結論的偏差有更大的分散,或者是否标繪在图上的新点反而会增大对一条預期的曲綫的偏差。“通过两点很容易画一条直綫,但如果有三点,問題就可能变得困难了。”

以上討論只提出在判断有关地球内部研究結果的預期的准确度时应予考虑的几点。在許多情形中,早先(譬如說十年以前)我們认为,对地球所知道的要比現在我們认为所知道的多得多。我們的地磁起因基本理論的历史或有关地核的假說的历史,是歌德的話“Es irrt der Mensch so lang er strebt”(人們在追求真理中要不断犯錯誤的)应用到我們对地球内部的許多結論的突出例子。