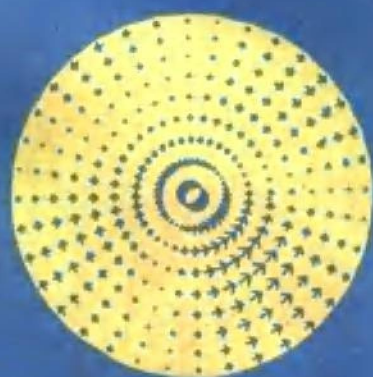


地震学算法理论

计算方法和计算机程序

[挪] Dirk J. Doornbos 主编



地震出版社

地震学算法理论

计算方法和计算机程序

5402/16
[挪] Durk J. Doornbos 主编

宋仁益 傅淑芳 译

郑启康

地质出版社

1992

(京)新登字095号

内 容 提 要

本书是由地震理论和实际应用委员会倡议编写的专著。书中汇集了当前理论地震学中主要研究问题的最新算法。作者是世界各国著名的地震学家。每一种算法都附有计算程序,提供了“建筑块体”和背景材料,使用者可灵活地使用这些块体来构成自己的程序,达到计算目的。因而本书内容中既含有地震学理论与方法,又提供了实际应用的结果性算法。

本书适用于地震学及地球物理勘探专业的科技工作者,也可供有关大专院校的高年级学生及研究生参考。

Seismological Algorithms

Computational Methods and Computer Programs

地震学算法理论

计算方法和计算机程序

[挪] Durk J. Doornbos 主编

朱仁益 傅淑芳 译

郑治真 校

责任编辑:王 伟

责任校对:李 珩

地震出版社出版

北京民族学院南路9号

一二〇一工厂印刷

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 15.5印张 416千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数 001—400

ISBN 7-5028-0504-4/O.12

(892) 定价:10.00元

前 言

出版本书和有关程序包的计划是为了适应地震学界的要求,即认为有必要选择一些基本的、先进的方法和算法,以一种便于查找的方式汇编在一起。这些计划于1985年8月在东京召开的国际地震学和地球内部物理学协会(IASPEI)大会上,得到了地震理论委员会和实际应用委员会的支持,并由联合算法分委员会来负责出版这本书。从某种意义上说,这是稍早开展的两个颇为不同项目的自然延续和合成:(1)分委员会在它的前主席 Engdahl 博士创导下,已在主办一个不断发展的地震算法的文献性项目。1984年,世界资料中心A的报告 SE-35 总结了这个项目的情况。(2)在他们的《计算物理方法》丛书中,学术出版社(Academic Press)在1972年出版过两卷有关地震学的书(由 Bolt 教授编的卷11和卷12)。虽然本工作的宗旨不同于以前的出版物,仍然考虑了及时更新问题。本工作的一个重要特点是,这些算法也适用于计算机程序的形式。这些程序全部收集在磁带或磁盘中,且能从固体地球物理世界资料中心A获得。程序的索引附在本书后部。

与世界各地许多同行们紧密合作对完成本项目来说至关重要。我欣赏每一位作者为一并提供正文与程序所作的大量额外工作。我感谢作者们及给过建议、评论的人们。IASPEI的这一项目由联合国教科文组织资助。

联合算法分委员会主席

Durk J. Doornbos

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 一维介质中的射线与体波

第一章 垂直向变化层构成的地球模型中的体波谱合成	(7)
--------------------------	-----

1. 引言	(7)
2. 实例性体波问题	(9)
3. 地震图的合成	(19)
4. 延伸和特殊应用	(36)
5. 结论	(47)

第二章 WKBJ地震图算法	(49)
---------------	------

1. 引言	(49)
2. WKBJ地震图理论	(51)
3. 子程序说明	(60)
4. 结论	(73)

附录: 有衰减的WKBJ地震图	(73)
-----------------	------

第三章 非球状和椭率修正	(78)
--------------	------

1. 引言	(78)
2. 速度模型	(79)
3. 射线追踪算法	(80)
4. 转动坐标系中的球调和	(82)
5. 椭率修正	(84)
6. 试验情况: 核幔边界	(85)

第二篇 三维介质中的射线和体波

第一章 三维结构中完全地震射线追踪	(91)
-------------------	------

1. 引言	(91)
2. 坐标系	(94)
3. 介质模型	(96)
4. 基本波编码	(107)
5. 完全射线追踪	(107)
6. 射线的起始点	(139)
7. 完全射线追踪结果的应用和处理	(142)
第二章 追踪射线和波前的数值方法	(168)
1. 基本假定和方法	(168)
2. 初始值射线追踪	(175)
3. 两点射线追踪	(180)
4. 动力学射线追踪	(195)
5. 体波脉冲的计算	(216)
附录	(220)

第三篇 层状介质中的反射率法

第一章 地震波场的系统近似方法	(237)
1. 引言	(237)
2. 地震波的反射和折射	(238)
3. 介质对震源的响应	(243)
4. 分裂成层构造	(244)
5. 响应的近似构成	(247)
6. 近似计算实例	(251)
附录: 一叠均匀层的递归法	(256)
第二章 反射率计算中的混合法	(259)
1. 引言	(259)
2. 解两点问题的方法	(262)
3. 混合法	(270)
4. 实例	(271)

第三章 波数积分求积	(276)
1. 引言.....	(276)
2. 梯形 Filon 法	(277)
3. 不同的方法.....	(284)

第四篇 成层介质中的振型法

第一章 计算地震简正振型解的子程序包Disper80	(289)
1. 引言.....	(289)
2. 横向各向同性地球模型.....	(289)
3. 积分法和模型的给定.....	(290)
4. 扭转振荡.....	(292)
5. 非重力地球模型的球状振荡.....	(296)
6. 自重地球的球状振荡.....	(303)
7. Love波和Rayleigh波	(313)

第二章 地球和太阳自由振荡的本征频率和本征函数的 计算	(317)
1. 引言.....	(317)
2. 子行列式代数.....	(322)
3. 矢量子空间的线性变换.....	(333)
4. 线性常微分方程组.....	(338)
5. 控制地球自由振荡的微分方程组.....	(350)
6. 程序说明.....	(365)

第三章 变分法	(368)
1. Rayleigh原理	(368)
2. Rayleigh-Ritz算法	(369)
3. 自然基函数.....	(374)
4. 有限元基函数.....	(379)
5. 频率相关问题.....	(390)
6. 不稳定性.....	(392)

7. 自然基函数再使用.....	(392)
8. 与其他方法比较.....	(393)
9. 结束语.....	(395)

第五篇 通用算法和震源

第一章 矢量和矩阵运算算法.....	(399)
1. 引言.....	(399)
2. 基矢量运算.....	(400)
3. 非稀疏矩阵的运算.....	(403)
4. 稀疏矩阵反演算法.....	(416)
第二章 矩张量源的辐射.....	(422)
1. 引言.....	(422)
2. 点源.....	(423)
3. 体波辐射花样.....	(426)
4. 面波辐射花样.....	(432)
附录: 矩张量主值.....	(434)
第三章 初动资料的单一和联合断层面解.....	(436)
1. 引言.....	(436)
2. 问题的几何学.....	(436)
3. 概率模型和似然函数.....	(438)
4. 联合解.....	(442)
5. 计算机程序.....	(446)
程序索引.....	(447)
术语译名.....	(461)
参考文献.....	(472)

绪 论

目 的

本书及有关程序包中提出的算法所处理的是广范围的地震学问题。然而，我们知道每一个新的研究项目都有要用新程序或对现有程序作修改的计算问题。因此，本书中的算法和程序不一定适合每个用户的特定需要。只是希望给读者提供“建筑块体”及背景材料，以便在读者的程序结构中巧妙地使用这些块体。简言之，本书有双重目的，即：提供有关地震学理论和方法的足够的背景材料；为实际应用提供结果性算法。其中的一些方法是新的；而另外一些则是以最新的专著和研究论文中所载的理论发展为基础，它们列在本书末的参考文献中。鼓励读者去考虑这些工作。

范 围

某些算法是有特殊目的的程序，但许多已成为处理这样一些经常重复的问题，像如何计算体波走时、面波频散曲线、自由振荡本征频率，如何计算振幅、波形和完全地震图或其近似，以及一旦正演问题得到解决，如何在反演问题中应用矩阵法等。在本书中，处理波的传播问题的算法以射线法和广义射线法、反射率法和简正振型法为依据。篇和章的划分反映了方法和目的上的不同。但往往遇到在某一范围或章节中所研究的计算方法，会在另一范围或章节中找到应用。书中有许多这类例子，为了找出“隐藏的”算法，建议读者不单去查寻程序索引和目录，而且去查寻专业术语索引。

适用性

当考虑第一到第四篇中不同方法的适用性时，应记住下列几点：

(1) 某些方法是在平面成层介质中，而另一些则是在球状成层介质中推求公式。两类介质的算法都包括在内。实际上，这些算法常常由于对速度-密度模型有采用所谓地球-展平变换的可能性，因而都可应用到不论哪一种介质的情况。有关这一点的资料可从Aki和Richards的专著(1980)中得到。

(2) 某些程序计算给定点震源的地震响应，另一些程序却是计算Green函数或简正振型项，震源激发因子的计算留给用户去做。对于矩张量点源表达情况，这些因子很容易得到，且已在好几章中被指出，更详细的说明，请读者参考近期的技术书(Aki和Richards, 1980; Kennett, 1983)。

(3) 虽然第一到第四篇的算法求解的是地震学正演问题，但同样的算法常常也是形成反演方法的主要成分。有几个实例在第五篇中给出。

其他资料

很明显，本书并未包揽所有涉及地震学的计算方法。在选定的题目领域内根据可能，尽量提供各种可供选择的算法，但我们承认，有些重要的算法没有包括在内，其中某些算法包含在世界资料中心A报告SE-35中(Engdahl, 1984)。没有涉及或只是沾一点边的题目领域有信号处理方法及三维波动问题中的差分和有限元法。在这些领域内已发表的算法在工程文献中推广，在一些数值分析的书籍中(Press等, 1986)常有一些有用的实例。在地球物理文献内，有许多专著也有这些领域的某些算法实例(Robinson, 1983; Menke, 1984; Claerbout, 1985)。

程序库

所有作者都提供了 Fortran 程序，把这些程序汇集在一起，形成一个综合的软件包。程序编排在文件中（每个文件可以多于一个程序）。文件名列表于本书的程序索引中，软件包能从科罗拉多的Boulder世界固体地球物理资料中心A以磁带或磁盘形式得到。应当理解编写程序的风格、Fortran的水平及机器的轻便性等，不同作者提供的，显然是不相同的。这方面的有关资料，附带程序都被编入。应当指出，作者们没有要求程序无误差，计算的数值结果的正确性责任在用户。当然，作者们欢迎对算法提出改进建议。

第 一 篇

一维介质中的射线与体波



第一章 垂直向变化层构成的地球模型中的体波谱合成

V. F. Cormier

(康涅狄格大学地球物理和地质系)

P. G. Richards

(哥伦比亚大学地质科学系和拉蒙-多霍尔地质观测台)

1. 引言

地球模型参数化方式直接影响着合成地震图的计算方法。本章考虑适用于球对称侧向均匀地球的算法，地球由速度函数参数化，这些速度函数在整个深度上是解析的且在所有厚度范围上都是光滑变化的。用这种方法参数化了的两个地球模型是 PEM (Dziewonski等, 1975) 和 PREM (Dziewonski和Anderson, 1981)。在这两个模型中，地震波速度由几个适用于很大深度范围的半径为参数的多项式给出，这几个深度范围由少数一阶和二阶间断性分开，例如 PREM(图1)给出了用于外核、内核、底地幔、下地幔、上地幔过渡带，低速带，上地幔盖和地壳的速度多项式。使用这两个模型的优点是：与速度对深度的一阶和二阶导数有关的地球物理量的物理意义不会因为参数化而含糊不清。这些量包括分层参数、体积模量的压力导数和 Gruneisen 参数。应用直接以在厚的区域上是解析的速度模型作基础的模型算法，就有可能直接研究某一特定波形资料对这些量的敏感性。

能够处理这类模型参数化的合成方法有 Ascher 写的配置法 (第三篇第二章) 和 Chapman 等写的 WKBJ 法或慢度法 (第一篇第二章), 计算延迟时间 τ 的算法和这里要说的各向同性与横向各向同性模型复转折点的算法补充了 Chapman 所写的方法, 而且能够与 WKBJ/慢度法的体波计算中所用的子程序相结合。

但是, WKBJ 近似法不能精确计算边界掠入射和邻近边界掠入射时的体波散射和通道效应 (图 2)。在这些情况中, 需要应用一致渐近近似法, 即光滑地将行波和波动方程径向分离部分解的指数形式连接起来。这种一致近似法已由 Langer (1932, 1949) 详细说明, 且由 Olver (1954) 予以推广。在非掠入角时, 它重新给出非一致的 WKBJ 近似法, 而在掠入角时, 则给出非一致的 Airy 近似法。简单的用一致性近似代替出现在垂直传播基本矩阵中的径向波函数的 WKBJ 近似, Langer 近似就能合并并在体波合成问题中。当应用修改过的基本矩阵形式计算折射、反射系数时, 能够

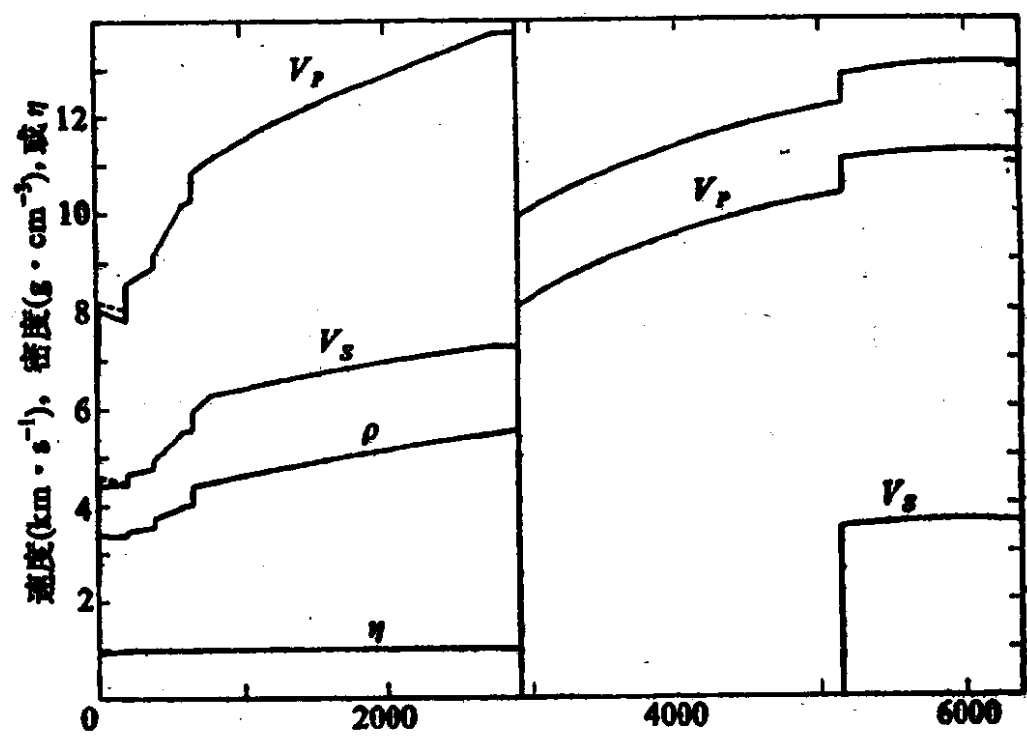


图1 Dziewonski和Anderson (1981)的初步参考地球模型 (PREM) 是分层很少的模型实例, 这些层按速度和密度的一阶或二阶的间断性划分。在每一层中, 速度由半径多项式给定

看到Langer近似已简化到一些广义余弦和由Airy函数定义的垂直波函数比的表达式(Richards, 1976)。本章将叙述计算广义余弦和Langer近似垂直波函数的算法。也大致给出了如何将Langer近似合并并在计算 n 层介质中的反射率响应算法(第三篇第一章)。在这种情况下, Langer近似允许每一层有一垂向变化的速度剖面。

2. 实例性体波问题

2.1 复波谱的表达式

为了迅速引进符号及开展讨论, 现从考虑一个特殊问题开始。P波形式的复波谱渐近表达式为

$$u_r(r, \Delta_0, \omega) = \frac{-i\omega M_0(\omega) i\omega}{4\pi\rho_s a_s^4} \int_{\Gamma} \omega^2 p F^p \pi^{(1)}(r_s) \dot{p} \dot{p} a(r) \times \xi(r) \pi^{(1)}(r) Q_l^{(2)}(\cos \Delta_0) dp \quad (1)$$

P波是由具有地震矩 $M_0(\omega)$ 及辐射花样 F^p 的地震或者爆破产生的。震源位于半径 r_s 的点上。它辐射的P波被单一间断面或者几个间断面组成的区域反射为P波, 位移的径向分量 u_r 为位于半径 r 和距离 Δ_0 的台站所记录。 Γ 代表复射线参数(p)平面上的一条积分路径。 $l = \omega p - 1/2$ 是复角的阶数。表达式(1)由Scholte(1956)和Richards(1973)推导出, 且已引录在Aki和Richards(1980)书中第九章。

函数 $Q_l^{(2)}(\cos \Delta)$ 是Legendre函数的行波分量之一。上行P波函数 $\pi^{(1)}$ 和下行P波函数 $\pi^{(2)}$ 比例于运动方程径向分量 R 的解, 例如取频率的一次方, R 满足如下方程:

$$\frac{d^2}{dr^2}(rR) + \omega^2 \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{p^2}{r^2} \right) rR = 0 \quad (2)$$

$\xi(r)$ 定义为 $\xi = (d\pi^{(1)}/dr)/(i\omega\pi^{(1)})$ 。除非P波接近掠入射, ξ 总能简单取作为在 r 处射线参数 p 的入射平面波的垂直慢度, 即 $\xi(r) \sim$