

模拟倾斜界面情况下区域地震范围内的 长周期 Pnl 波

曹柏如 谢小碧 姚振兴

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

摘 要

中国大陆地壳厚度的特点是东部地区薄西部地区厚,因此在计算 Pnl 波的 Green 函数时进一步考虑了莫霍界面倾斜的影响. 本文将广义射线理论推广到倾斜层结构模型,该方法的计算结果与有限差分的计算结果有很好的-致性. 理论计算表明,在同一个倾斜结构模型中沿相反方向传播的 Pnl 波有明显的差异. 因此当地壳厚度的变化不能忽略时,根据水平层模型的理论计算结果拟合 Pnl 波记录时效果不够理想. 对菏泽、门源地震资料的处理结果表明,用一个更接近实际地壳的倾斜层模型来拟合 Pnl 波比用等效厚度平行层模型来拟合要更为合理.

关键词 Pnl 波, 广义射线理论, 综合地震图.

一、引 言

在区域地震范围内 (2° — 13°) 长周期地震仪记录图上 P 波初动到 S 波到达之间的波列称 Pnl 波. 研究结果表明,地震的震源深度和震源时间函数对 Pnl 波的影响较小,主要由地壳介质结构和地震的震源机制决定. 这一性质对震源机制的求解十分有利. Helmberger 等(1980)^[1]基于一层半无限平行层地壳模型,利用广义射线理论成功地拟合了这组震相. 其后徐大方和姚振兴(1988)^[2]对广义射线按运动学相似性进行了分组,改进了 Pnl 波 Green 函数的算法,进一步促进了 Pnl 波的应用研究工作.

中国大陆地壳结构的特点是东部地区地壳厚度薄,而西部地区厚. 例如,东南沿海地区地壳平均厚度为 32 km,华北地区为 40 km,西北地区为 50 km,青藏高原为 70 km. 因此在中国大陆范围内拟合沿东西方向传播的 Pnl 波时,采用平行层模型是有缺陷的. 1983 年兰州台($36^{\circ}05'12''N$, $103^{\circ}50'40''E$)记录到的山东菏泽地震($35.2^{\circ}N$, $115.3^{\circ}E$)和 1986 年泰安台($36^{\circ}12'41''N$, $117^{\circ}07'28''E$)记录到的甘肃门源地震($37^{\circ}42'N$, $101^{\circ}34'E$)是两个几乎经过同一地区东西路径但沿相反方向传播的地震记录. 拟合兰州台记录时采用的地壳平均厚度为 32 km^[2],拟合泰安台记录时采用的平均地壳厚度为 39 km^[3],这是不合理的. 因此我们提出了一种在倾斜层结构模型中计算 Pnl 波理论地震图的方法,用这一方法对于拟合中国大陆范围内的 Pnl 波记录更为合理.

本文 1990 年 8 月 22 日收到, 1991 年 3 月 20 日收到修改稿.

基于上述考虑,本文将 Hong 等 (1977, 1978)^[4,5], Helmberger 等 (1985)^[6] 在倾斜结构模型中 SH 波的广义射线理论推广到 P 、 SV 波情况。对于一层倾斜层结构模型,曾与谢小碧和姚振兴 (1988)^[7] 的有限差分计算结果进行了比较,有很好的一致性。当地壳界面的倾角为零时与平行层 Pnl 波的计算结果是完全一致的。这些比较证明了对 P 、 SV 波的推广是正确的。文中还基于同一倾斜层结构模型重新拟合了兰州台、泰安台记录的菏泽、门源地震的 Pnl 记录。资料处理结果表明,当地壳厚度不均匀性无法忽略时,倾斜层结构模型有较大的优越性。

二、理 论

在圆柱坐标系内剪切位错点源在地面产生的 Pnl 波垂向和径向位移为^[8]

$$\begin{cases} w(t) = \frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{d}{dt} \left[\dot{D}(t) * \sum_{m=0}^2 A_m(\lambda, \delta, \theta) W_m(t) \right], \\ q(t) = \frac{M_0}{4\pi\rho} \frac{d}{dt} \left[\dot{D}(t) * \sum_{m=0}^2 A_m(\lambda, \delta, \theta) Q_m(t) \right], \end{cases} \quad (1)$$

其中 M_0 为地震矩, ρ 为震源处介质密度, $\dot{D}(t)$ 为震源的远场时间函数,

$$A_0(\lambda, \delta, \theta) = \frac{1}{2} \sin \lambda \sin 2\delta,$$

$$A_1(\lambda, \delta, \theta) = \cos \theta \cos \lambda \cos \delta - \sin \theta \sin \lambda \cos 2\delta,$$

$$A_2(\lambda, \delta, \theta) = \sin 2\theta \cos \lambda \sin \delta + \frac{1}{2} \cos 2\theta \sin \lambda \sin 2\delta,$$

$W_m(t)$ 和 $Q_m(t)$ 为地壳介质的单位响应 (Pnl 波的 Green 函数), 分别表示三个基本断层 ($m=0$, 45° 倾滑断层; $m=1$, 垂直倾滑断层; $m=2$, 垂直走滑断层) 的贡献。

1. 平行层模型

对于长周期的 Pnl 波, 地壳上地幔结构用一层半无限介质模型近似, 其中覆盖层为一平行层表示地壳, 半无限介质代表上地幔介质。利用广义射线理论, Pnl 波垂向和径向的 Green 函数为^[9]

$$\begin{cases} W_m(t) = \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{p}}{\eta_\alpha} P_m(p) R_{n*}(p) \Pi(p) \frac{dp}{dt} \right)_{r_j} \right] \\ \quad + \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{p}}{\eta_\beta} SV_m(p) R_{n*}(p) \Pi(p) \frac{dp}{dt} \right)_{r_j} \right], \\ Q_m(t) = \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{p}}{\eta_\alpha} P_m(p) R_{nr}(p) \Pi(p) \frac{dp}{dt} \right)_{r_j} \right] \\ \quad + \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{p}}{\eta_\beta} SV_m(p) R_{nr}(p) \Pi(p) \frac{dp}{dt} \right)_{r_j} \right], \end{cases} \quad (2)$$

式中 p 为射线参数, r 为震中距,

$$\eta_\alpha = \left(\frac{1}{\alpha^2} - p^2\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \eta_\beta = \left(\frac{1}{\beta^2} - p^2\right)^{\frac{1}{2}},$$

$R_{nz}(p)$ 和 $R_{nr}(p)$ 为垂向和径向接收函数。射线最后一节为 P 波时 n 取 p , 否则取 s 、 $P_m(p)$ 和 $SV_m(p)$ 为位错点源 P 和 SV 波的震源系数。 $\Pi(p)$ 为第 j 条射线全部反射系数乘积。 Γ_j 是第 j 条射线的 Cagniard-deHoop 积分回路, 由条件 t 为单调增加的正实数决定。其中 t 为

$$t = pr + \sum_{i=1}^{NEND} \eta_i h_i, \quad (3)$$

$$\eta_i = \begin{cases} \left(\frac{1}{\alpha^2} - p^2\right)^{-\frac{1}{2}}, & \text{若第 } i \text{ 节射线为 } P \text{ 波,} \\ \left(\frac{1}{\beta^2} - p^2\right)^{-\frac{1}{2}}, & \text{若第 } i \text{ 节射线为 } S \text{ 波,} \end{cases}$$

$NEND$ 为第 j 条射线射线节的总数, 在(2)式中 $\frac{dp}{dt}$ 沿 Cagniard-deHoop 回路求导

$$\frac{dp}{dt} = \left(r - \sum_{i=1}^{NEND} \frac{h_i p}{\eta_i}\right)^{-1}. \quad (4)$$

2. 倾斜界面模型

对于在中国大陆沿东西方向传播的 Pnl 波, 我们提出用一层半无限倾斜介质模型近似地壳上地幔结构更为合适。其中倾斜层表示地壳, 半无限介质表示上地幔。在倾斜模

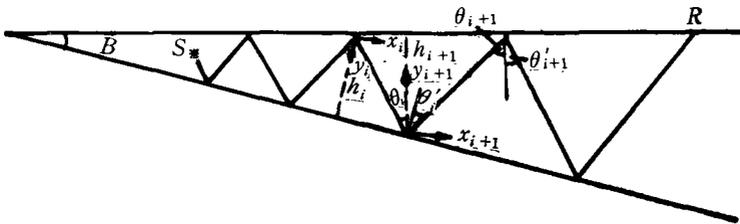


图 1 一条射线的几何路径及局部坐标系的定义

型中引入局部坐标系, 如图 1 所示。其中 B 为倾角, S 为震源, R 为接收点。每一节射线都有各自的坐标系, 它的定义是 x_i 轴 y_i 轴分别平行于射线所到达界面处界面的切线、法线。 d_i 、 h_i 是第 i 节射线的几何射线路径在局部坐标系中分别沿 x_i 轴和 y_i 轴的投影。这里射线总的传播时间为

$$t = \sum_{i=1}^{NEND} (p_i d_i + \eta_i h_i), \quad (5)$$

其中 p_i 是局部坐标系中的射线参数。在倾斜模型中对 SH 波 Hong 等(1977)^[4]曾给出局部射线参数为

$$p_i = \frac{\sin(a + bi + (i-1)B)}{\beta}, \quad (6)$$

$$p_1 = \frac{\sin(a + bi)}{\beta}.$$

对 P, SV 情况, 由于存在波型转换上式不再适合, 我们用下列递推关系来取代(6)式, 即

$$p_i = p_{i-1} \cos B + \sqrt{\frac{1}{v_i^2} - p_{i-1}^2} \sin B, \tag{7}$$

$$p_1 = \begin{cases} \frac{\sin(a + bi)}{\alpha}, & \text{若射线第一节为 } P \text{ 波,} \\ \frac{\sin(a' + b'i)}{\beta}, & \text{若射线第一节为 } SV \text{ 波.} \end{cases}$$

其中 B 为倾斜层的倾角. 若第 i 节射线为 P 波, 则 $v_i = \alpha$; 若为 S 波, 则 $v_i = \beta$. α 和 β 为第 i 节射线所处介质层的 P 波和 S 波速度. 在倾斜层模型条件下, 先利用射线追踪方法求出几何射线路径在局部坐标系中的投影 d_i 和 h_i . 然后根据(5)式和(7)式及条件 t 为单调增加的正实数, 可以求出在 Cagniard-deHoop 回路上局部射线参数 p_i 的值. 由(7)式可知, 当 v_i 固定为 β , 即相当于 SH 波时, (7)式可简化成(6)式. 因此 Helmberger 等(1985)^[6]得到的在倾斜层模型中剪切位错点源 SH 波在自由表面的位移解可直接推广到 $P-SV$ 波. 这时对应倾斜界面的单位响应为

$$\left\{ \begin{aligned} W_m(t) &= \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \text{Im} \left(\frac{\sqrt{p_1}}{\eta_\alpha} P_m(p) R_{nz}(p) \Pi(p) C_s \frac{dp_1}{dt} \right)_{\Gamma_j} \right] \\ &\quad + \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \text{Im} \left(\frac{\sqrt{p_1}}{\eta_\beta} SV_m(p) R_{nz}(p) \Pi(p) C_s \frac{dp_1}{dt} \right)_{\Gamma_j} \right], \\ Q_m(t) &= \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \text{Im} \left(\frac{\sqrt{p_1}}{\eta_\alpha} P_m(p) R_{nr}(p) \Pi(p) C_s \frac{dp_1}{dt} \right)_{\Gamma_j} \right] \\ &\quad + \sqrt{\frac{2}{r}} \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} * \sum_{j=1}^{\infty} \text{Im} \left(\frac{\sqrt{p_1}}{\eta_\beta} SV_m(p) R_{nr}(p) \Pi(p) C_s \frac{dp_1}{dt} \right)_{\Gamma_j} \right]. \end{aligned} \right. \tag{8}$$

上式与平行层模型的结果(2)式形式上类似, 只增加了校正因子 C_s

$$C_s = \sqrt{\frac{r}{p_1}} \left(\sum_{i=1}^{NEND} \frac{d_i}{p_i} \right)^{-\frac{1}{2}}. \tag{9}$$

对每条射线, (8)式中 p 不再是常数, 将依据每一个数学表达式的物理含义取与之相应的局部射线参数 p_i . 例如, $P_m(p)$ 表示震源系数, 其中的射线参数应取为 p_i ; 而 $R_{nr}(p)$ 表示接收函数, 则相应的射线参数应取为 p_{NEND} . (8)式中 $\frac{dp_1}{dt}$ 沿该射线的 Cagniard-deHoop 回路求导

$$\frac{dp_1}{dt} = \left[\sum_{i=1}^{NEND} \left(d_i - \frac{h_i p_i}{\eta_i} \right) \frac{dp_i}{dp_1} \right]^{-1}. \tag{10}$$

三、数值计算与讨论

为了检验本文所提出的广义射线方法的正确性, 我们将它的计算结果与其它方法的计算结果进行了对比.

首先,对于如图 2 上部所示的平行层模型,将倾斜层广义射线方法的计算结果(即令倾角为零)与平行层中的广义射线结果进行了比较.其垂向和径向 Green 函数如图 2 下部所示,其中左边一组曲线为平行层广义射线计算结果,右边一组曲线为倾斜层广义射线计算结果. DS、SS 和 45DS 分别对应倾滑、走滑和 45° 倾滑三种基本断层,从图中可以看出二者结果是完全一致的.

其次,对于图 3a 和图 3b 上部所给出的倾斜层模型,将倾斜层中广义射线结果与有限差分结果进行了对比.所用的有限差分方法是由谢小碧和姚振兴(1988)^[7]给出的.该方法适用于位错震源并做了从二维到三维的校正,因此可以直接与广义射线的结果进行对比.图 3a 和图 3b 中的模型是同一介质结构从两侧看到的剖面图,只将震源与接收点位置进行了交换.两种方法所得的相应三种基本断层的位移响应

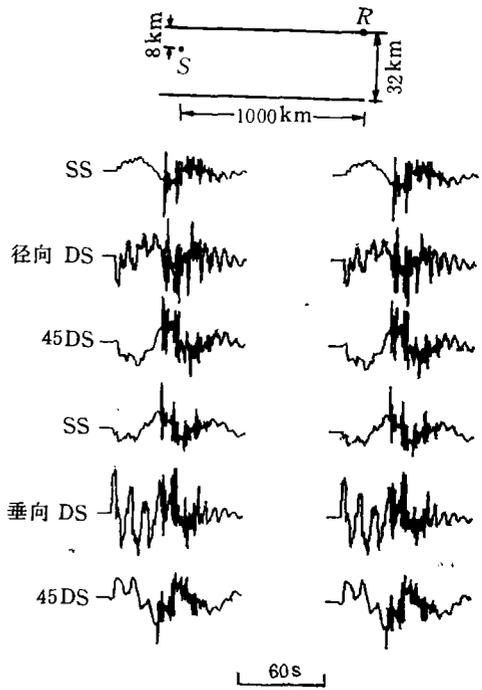


图 2 倾斜层与平行层广义射线计算结果的比较

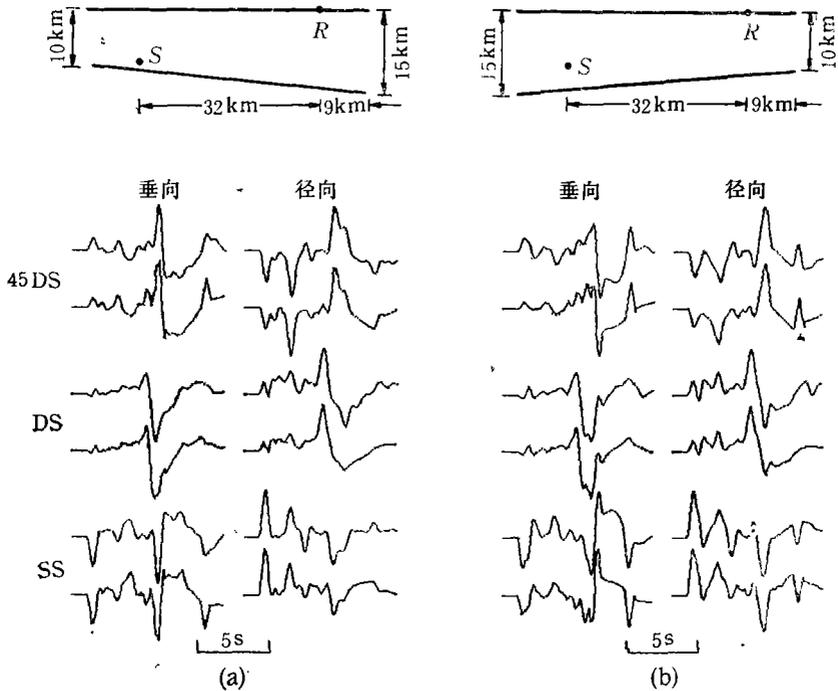


图 3 对倾斜层模型用广义射线与有限差分计算结果的比较

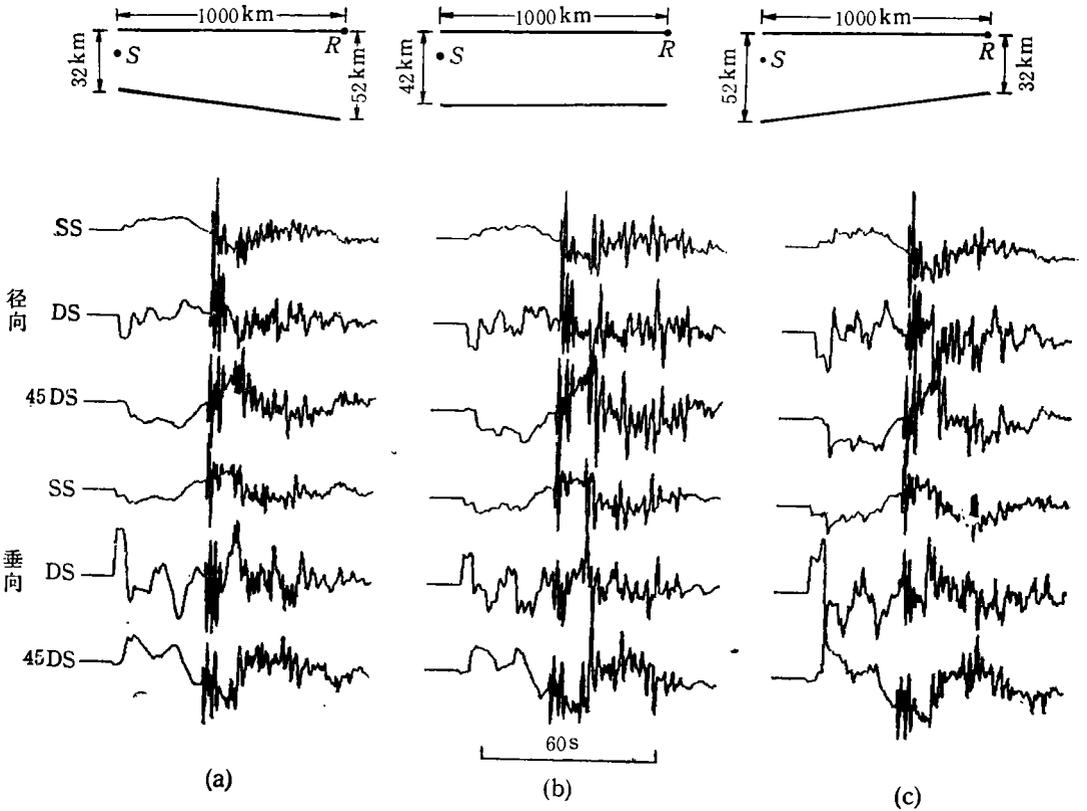


图 4 左倾(a)、右倾(c)和平行层(b)模型 Pnl 波 Green 函数计算结果的比较

对比如图 3a 和图 3b 下部曲线所示。每组曲线的上面一条为有限差分计算结果，下面一条为倾斜层广义射线计算结果。从图 3 中可以看出两者结果符合得很好，说明本文将位错点源 P、SV 波的广义射线理论推广到倾斜结构模型是正确的。

此外，在平行层模型中，由于介质结构的对称性，源与接收点位置互换后在接收点得到的介质响应不变。但是在倾斜层模型中，这一特性将不再存在。由于介质结构的非对称性，震源与接收点互换后在接收点得到不同的介质响应。以下算例将说明这一现象。图 4 上部给出了左倾、右倾和平行层三个模型图。图 4a 和图 4c 可看作同一介质结构，只作了源与接收点的互换，图 4b 为具有平均层厚的平行层模型。当震源深度 $h = 10\text{km}$ 时，对应的 Green 函数分别为图 4a—图 4c 曲线所示。可以看出，当界面为倾斜时，地震波在沿不同方向经过同一介质后在地表接收到的介质响应有明显差别，无法用平行层等效。

四、资料处理

从兰州台记录的菏泽地震和泰安台记录的门源地震资料看出，它们恰好沿着同一路径向相反方向传播。基于水平层模型，徐大方和姚振兴(1988)^[2]拟合菏泽地震兰州台 Pnl 波记录时采用的平均地壳厚度为 32 km，而徐大方等(1989)^[3]拟合门源地震泰安台 Pnl 波

时采用的平均地壳厚度为 39km。对同一地区采用两种不同的地壳厚度, 这是不合理的。这两张记录给我们提供了用同一个模型来拟合两个地震 Pnl 波的机会。由于这两个地震的震源机制是由多台记录同时拟合给出的, 因此我们仍然采用由他们给出的两个地震的震源机制解: 门源地震 $\theta = 328.0^\circ$, $\delta = 45.0^\circ$, $\lambda = 77.0^\circ$, $h = 14\text{km}$; 菏泽地震 $\theta = 216.0^\circ$, $\delta = 85.0^\circ$, $\lambda = -150.0^\circ$, $h = 15\text{km}$ 。

我们采用的倾斜模型是: 中国大陆东部地区平均地壳厚度 $h = 32\text{km}$, 向西倾斜, 倾角为 1° , $\alpha_1 = 6.2\text{km/s}$, $\beta_1 = 3.5\text{km/s}$, $\rho_1 = 2.7\text{g/cm}^3$, $\alpha_2 = 8.2\text{km/s}$, $\beta_2 = 4.5\text{km/s}$, $\rho_2 = 3.4\text{g/cm}^3$, 结果如图 5 所示。可以看到, 用倾斜层模型拟合的结果比平行层模型拟合的结果有较大的改善, 尤其是兰州台的结果更为明显。这说明, 当我们拟合沿中国大陆东西方向传播的 Pnl 波记录时, 采用倾斜模型更加合理。

致谢 所做工作得到郑天愉、王凯、高莉萍等同志的帮助, 在此特表感谢。

参 考 文 献

- [1] HelMBERGER, D.V. and Engen, G.R., Modeling the long-period body-waves from shallow earthquakes at regional ranges, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **70**, 1699—1714, 1980.
- [2] 徐大方、姚振兴, 区域地震范围内地壳介质的低频响应, *地球物理学报*, **31**, 176—183, 1988.
- [3] 徐大方、高莉萍、王 凯, 中国西北地区几个中强地震的 Pnl 波研究, *中国地震*, **5**, 53—58, 1989.
- [4] Hong Tai-Lin and HelMBERGER, D. V., Generalized ray theory for dipping structure, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **67**, 995—1008, 1977.
- [5] Hong Tai-Lin and HelMBERGER, D. V., Glorified optics and wave propagation in nonplanar structure, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **68**, 1313—1330, 1978.
- [6] HelMBERGER, D.V., Engen, G., Grand, S., Upper-mantle cross-section from California to Greenland, *J. Geophys.*, **58**, 92—100, 1985.
- [7] 谢小碧、姚振兴, 二维不均匀介质中点源 $P-SV$ 波响应的有限差分近似算法, *地球物理学报*, **31**, 540—555, 1988.
- [8] HelMBERGER, D.V., Theory and application of synthetic seismograms, *Earthquakes: observation, theory and interpretation*, edited by Kanamori, H. and Boschi, E., 174—222, 1983.

MODELING LONG-PERIOD Pnl WAVEFORMS AT REGIONAL RANGES IN DIPPING STRUCTURE

CAO BAI-RU XIE XIAO-BI YAO ZHEN-XING
(Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100101)

Abstract

The crustal thickness of Chinese continent is thin in east and thick in west, so we consi-

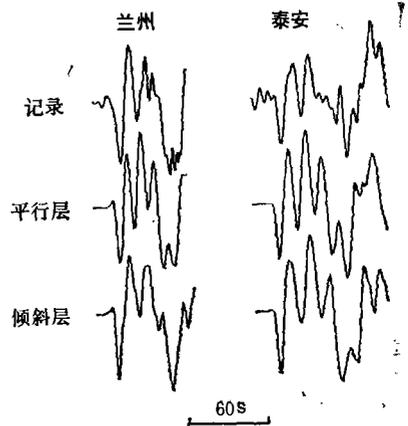


图 5 菏泽地震兰州台和门源地震泰安台的 Pnl 波拟合结果

dered the effects of inclination of Moho by calculating Green function of Pnl waves. In this paper the generalized ray theory is extended to dipping structure, the result of this method has excellently consistence with the finite-difference. Theoretical calculation shows that the Green functions of Pnl waves traveling in opposite direction are obviously different in the same dipping structure. If the variations of crustal thickness can not be ignored, synthetic seismograms based on parallel model are not reasonable. Treating the result of Heze and Meyuan earthquake records shows that a dipping model is more suitable than a parallel model to simulate Pnl waveforms.

Key words Pnl waves, Generalized ray theory, Synthetic seismograms.

第 2 次全国大地电磁学术讨论会

由中国地球物理学会委托国家地震局地质研究所刘国栋教授负责组织筹备的第 2 次全国大地电磁学术讨论会,于 1991 年 12 月 17 日至 21 日在北京举行。会议得到全国 15 个单位的大力支持,来自各地的专家学者共 95 人,收到国内外学术论文 68 篇。

这次学术会议除大会报告外,还进行了专题讨论。报告内容主要涉及大地电磁仪器设备与数据采集,方法理论与资料处理,畸变效应与静位移校正,资料解释与二维正反演,应用成果和软件开发等方面,反映了自 1984 年第 1 次全国大地电磁学术讨论会以来,大地电磁方法在我国已取得突飞猛进的发展。全国大地电磁测深点数由 500 多个增加到 6500 个左右,其中 80% 用于油气普查勘探。在查明石油区域地质构造和某些含油盆地内部构造以及在圈定含油、气远景区、段方面,取得了一批有价值的成果。特别是在石油地震勘探难以取得有效信息和无法开展工作的地区,大地电磁法正在发挥它的作用。在地壳上地幔构造研究及其与地震活动性关系的研究方面,已取得一些新认识,我国境内的 11 条地学大断面,都有大地电磁方法提供的深、浅部地质信息;在监视大地震前地壳深、浅部各种电性参数的变化方面,已见到一些有说服力的观测结果。在地热田和地下水资源勘探方面也获得一些新进展。

一些报告提出了新的思想,总结了应用新的测量技术和处理技术的经验。如将模糊数学应用于大地电磁资料的解释,二维大地电磁资料的偏移,二维参数化逐点反演解释,静校正的多种方法联合应用,EMAP 测量技术和处理新方法的应用等。

这次讨论会学术气氛浓厚,既总结了工作,又找出了问题,并明确了大地电磁法的发展方向。为了发挥在适于大地电磁法应用前提下解决国民经济发展中更多的有实际价值的问题,目前亟待研究和解决的问题有: 1. 发展我国的高精度、低噪声、宽频带、低功耗、多功能的电磁仪器; 2. 深入地研究 MT 曲线的畸变,发展更完善的静校正方法和软件; 3. 发展多参数的二维反演解释技术和三维数值模拟技术; 4. 发展 EMAP 等测量技术,以解决静位移和三维构造问题; 5. 发展水域和海洋大地电磁勘探; 6. 开展大地电磁测深的勘探精度和次高阻勘探目的层的信息提取的研究。

代表们还建议: 制定全国性的大地电磁测深规范;在有条件时,在学会之下成立全国电磁感应方法专业委员会;举办电磁方法的培训班;建立全国或地方性的复测点;希望石油部门的单位提供一条较高质量的 MT 观测剖面数据和相应的地质背景材料,供各单位采用不同的反演方法进行解释,以利比较,促进解释水平的提高。会议最后还建议于 1994 年召开第 3 次全国电磁学术讨论会,由中国地质大学(武汉)筹办。

(本刊编辑部)

**THE SECOND SYMPOSIUM ON MT, DEC. 17—21,
1991, BEIJING**