

地震反问题研究评述^①

李幼铭

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

杨文采

(地矿部北京计算中心, 北京 100083)

摘 要

本文分析了地球物理反演问题在古典提法下存在的固有缺陷, 继而讨论波动方程反问题的研究进展, 然后讨论地震层析成像和偏移问题, 最后对当前研究中存在的问题及发展方向作一评述。

关键词 地球物理反演, 波动方程反问题, 地震层析成像和偏移。

一、引 言

在地球物理反演问题中, 以前占主导地位的是直接或间接地使用选择法或者试错法, 这就是通常俗称的反问题的正问题解。其基本原理是模型参数给定后, 由正问题计算的理论曲线试图与观测曲线进行对比, 以此为据进行模型参数的修改; 反复进行直到理论曲线与观测曲线间的残差平方和达到可接受的程度。其数学基础是线性和非线性规划问题, 最后靠电子计算机实现资料处理。目前, 沿着这些方向所开展的大量工作还包含了人机联作和模式识别等干预反演过程的措施 (例如美国西方地球物理公司推出的 SLIM 软件等)。在应用上, 这种办法固然直观易行, 也对实际工作产生了许多有益的推进, 但是, 它所能解决的问题毕竟是有限的, 而且不能从根本上摆脱解释理论的贫乏状况。栾文贵和李幼铭 (1990) 认为选择法或者试错法存在着严重的缺陷。这些缺陷在我们看来主要是:

1. 随着所要确定的参数的数目增多, 困难也就大大地增加。
2. 关于基本模型的选取问题, 目前还没有从一种参数选取过渡到下一方案选取的原则, 凭工作人员经验的干预, 终难摆脱经验自身的局限性。
3. 由于观测数据存在着系统误差和干扰, 现有的数学度量不能作为衡量观测场与理论计算场相符合程度的客观标准。
4. 地下介质的物性参数和几何参数都是未知的, 因此, 最大的困难仍然是反问题的多解性。退一步讲, 即使给定物性参数或给定几何参数, 所论正问题的解也未必是唯一的。
5. 由问题解的不唯一性带来的解的不稳定性, 在实践中是不能接受的。换言之, 在曲线拟合程度允许的范围内, 各种解答之间的差别往往是很大的。

在60年代末期, Backus 和 Gilbert 的研究为古典的地球物理反演理论奠定了基础。

^① 本文1992年3月20日收到

Backus-Gilbert 理论的核心是在 Banach 空间研究地球物理反演,从而对其解的非唯一性和反演算子的特性作出精辟的阐述,并对非线性反演的解也提出一种逼近估计的通用迭代格式.

在地震勘探中,最初始的反问题仅是局限于反褶积的研究,以后才发展成为对于波阻抗的递推反演 (Russell, 1988). Cooke 和 Schneider (1983) 计算波阻抗剖面时,运用广义线性反演方法并取得了成功. 在80年代中后期,在开展走时反演和波场反演研究的同时,已形成与层析成像技术相结合进行研究的趋势 (Bishop T. N. 等, 1985; Lines, L. R. 等, 1988; 杨文采, 1989).

近年来,国民经济发展急需地球物理研究的投入,迫切需要建立更加精细地解决反演问题的新方法. 然而,地球物理反演问题在古典提法下却存在着上列缺陷. 因此,人们首先想到需从根本上建立反演问题的新理论框架. 自然,以地球物理的理论为依托,把地球物理反演问题化为相应偏微分方程的反问题,这是当前最引人注目的一个研究方向 (张关泉和马在田, 1990; 栾文贵和李幼铭, 1990), 而在这个方向上最活跃的一个分支则是波动方程反问题的研究. 我国地球物理学和数学家正通过各种形式进行合作,有力地推动着这方面工作的进程.

本文首先讨论波动方程反问题的研究进展,然后讨论地震层析成像和偏移问题,最后对当前研究中存在的问题及发展方向作一评述.

二、波动方程反问题

地震波传播满足弹性波方程,在小角度入射时可近似地用声波方程描述. 数学上它们都属于二阶双曲型微分方程,它的求解称为正问题,即给定源项、系数项及初始边界条件后,可求得波动场随时间空间的变化. 近年来出现的新反演理论是从偏微分方程的角度提出的. 所谓微分方程反问题,是由微分方程解的某种泛函来确定方程的系数项、源项或定解条件. 根据这一理论,地震反演的主要任务就是根据波场的部分信息重建弹性波 (或声波) 方程的系数项.

波动方程反问题的研究开始于70年代后期,到80年代初期已在地震理论界传播 (Newton, 1981; Weglein, 1982; Raz, 1981). 初期的工作主要受量子反散射研究的影响,理论研究的假设条件 (如高频条件) 不能为地震资料所满足,因此在应用上进展不大. 以后美国科罗拉多矿院的 Bleistein 和法国的 Tarantola 分别发展了两类各不相同的波动方程反演方法,而成为地震波动方程反问题研究方面的两个主要中心. 在反射地震方面, Cohen 和 Bleistein (1977-1987) 的反演方法主要以 Born 近似为基础,对非均匀的参数介质则用射线追踪作近似. 这种方法的实际效果和偏移类似.

基于最小二乘准则的非线性优化算法近年来被用于非线性地震成像 (Tarantola, 1984; 1986). 这类方法可导出数据与模型变化之间的线性关系,从而为迭代拟合过程提供了均方差最小化的公式. 这类波动方程反演方法在反射地震波场成像上取得部分成功,但是这类方法的成功在很大程度上仍取决于地球模型的初始猜测,而且计算成本极高.

应该指出,一维弹性波动方程在数学上是一个非常特殊的方程,通过走时变换它可以化为含两个自变量的 Laplace 双曲型方程,对它至少可以提出四种适定的定解问题,但是对于多维方程,即使是声波方程也只能提两种适定的定解问题,而在地球物理中,对应于声波方程的反问题的正问题即是一个不适定的类空 Cauchy 问题.因此,不能用求解一维反问题的方法来解这类多维反问题.

在中国,对于弹性波动方程反问题,马在田(1986)作过简要阐述,黄光远(1985)利用分布参数系统最优理论考虑了确定介质阻抗的问题.谢于权(1986,1990)利用时间褶积和奇性分析将问题转化为一个非线性方程,并给出了算法.张关泉(1988)应用 Picard 逐步逼近法讨论了确定介质阻抗的问题.栾文贵(1989,1990)讨论和分析了脉冲激发和远场响应情况下确定介质阻抗问题的关系,并且基于量子的散射方法导出了一个广义 Gelfand-Levitan 方程.李幼铭(1988,1990)从矢量方程出发提出了利用波形反演层状地球结构的方法.刘洪等(1991)导出了弹性波场的散射算子.欲进行三维完全线性化逆散射求解,应先反演因果场的首阶奇异性;为此,刘洪等(1992)对完全覆盖的射线走时反演导出了一个逆推算法.

60年代末,随着变系数偏微分方程研究的深入,出现了新的数学工具,即 Fourier 积分算子理论. Fourier 变换对求解常系数线性微分方程的用途是众所周知的,但不能用于变系数的偏微分方程. Fourier 积分算子及其退化形式的拟微分算子理论的出现,为变系数偏微分方程的反问题研究提供了崭新的研究手段(Beylkin, 1984; 1985).关于拟微分算子理论在波动方程反演中的应用,仍然是目前正在研究的课题.

三、地震层析成象和偏移

地震层析成象与地震偏移都与波动方程反演有关.利用波场的地震层析成象本身就是一种波动方程反演,但其着眼点在于“反投影”,即要求从不同方向入射的波的投影数据,重建介质参数.地震偏移的出发点也是波动方程,但它的着眼点在于“反传播”,即把地面接收到的反射波场回推到反射面出发的时刻.地震层析成象和偏移是目前地震反演中发展比较快的两个领域.

地震层析成象主要有反射和跨孔成象两种形式.利用走时的地震层析成象在反射地震中也称为走时反演.跨孔地震层析成象则是取直达波走时,采用传统的 BPT、ART、SIRT、LSQR、CGLS 等算法.总的来说,利用走时的地震层析成象方法由于信息降维不能获得高分辨率的图象,因此,发展利用波场的层析成象方法乃是近年来的方向.

地球物理衍射层析最初由 Devaney (1984) 引入,吴如山和 Toksoz (1987) 针对地震勘探的情况导出了二维点源照射下的公式和常见的几种几何布置下的重建公式.吴如山和 Araujo (1991) 导出了多频背向散射层析 MFBT (Multi-Frequency Backscattering Tomography) 的公式,并提出了直接傅氏变换和反向传播两种重建方法.黄联捷和吴如山(1992)借助于 Clayton 和 Stolt 方法(1981),把多频背向散射层析(MFBT)推广到垂向不均匀背景的情况.李幼铭、张霖斌(1992)在共炮点的情况下,由声波方程导出了广义 Radon

逆变换,并借助于吴如山的瑞雷积分方法(1989)反传,由象元成象条件进行反演,提出以此进行介质波速重建的方法。

由于广义全息实质上是基于波场反传播原理的,而这种反传播又是 Radon 反变换的推广。因此,尽管全息成象和衍射层析是从不同的领域发展起来的,但它们之间有着密切的内在联系。事实上,通过广义全息的引入可以把全息成象、衍射层析、多维逆散射、Born 反演等反演成象方法统一在同一个框架之下,并把理论推广到更一般地超出 Born 或 Rytov 近似的情况(Langenberg, 1987)。

李幼铭、尹峰(1989, 1991)借助于 Maslov 方法进行波动方程成象的研究,以期直接针对非均匀背景介质进行层析成象。为了应用的目的,刘银斌、李幼铭(1992)基于 Lee(1982, 1986)和 Winbow(1991)对井下振源辐射特性的工作,详细研究了井中各种组合震源的远场辐射特性,以期在跨井层析实验中对井下振源和检波器的排列、资料处理提供依据。我们相信,在考虑了震源辐射效应后,将有利于提高重建分辨率。

多维逆散射方法是指由已知散射波场反求介质中散射体(或与其相应的次生波源)的各种参数分布的方法。这问题可以从广义 Radon 反变换(Beylkin, 1984, 1985; Beylkin 和 Burridge, 1990; 栾文贵, 1989; 杨文采, 1990, 1992a, b; 李世雄, 1990a, b, c)、逆散射的精确方程解(Newton, 1983, 1989; Sabatier, 1987; Weglein, 1991; 刘洪等, 1991)以及广义全息(Generalized holography)、衍射或散射层析(Diffraction tomography or Scattering tomography)等不同的角度进行研究。

在散射问题研究中,人们特别关心的往往不是要求恢复物性参数的全部,而是迫切要知道其间断性以及梯度变化较大的状况和位置。因此,以反演介质奇性为目标的研究尤为引人注目,李世雄(1990a, b, c)、栾文贵(1986, 1989)都在这个方向上开展了工作。栾文贵(1992)还就均匀介质中零偏移距下光滑无限曲面的情况,基于 Kirchhoff 积分,通过曲面几何函数奇性和距离函数在曲面上拓扑奇性之间的联系,利用 Morse 引理和突变理论对散射曲面的拓扑奇性和相应回波的解析奇性之间的关系和分类作了比较详细的讨论和分析。这不仅丰富和完善了由射线几何拓扑结构组成的衍射模型的古典理论,而且为进一步利用波动理论探究非均匀介质中奇性传播问题提供了坚实的理论依据。

在地震勘探中,地震偏移已取得了明显的效果。马在田(1983)、吴律(1980)、张关泉(1988)、范尚武(1988, 1990)采用有限差分方法作偏移,在算法上都有许多创新。

四、存在的问题和发展方向

4.1 反问题的非线性

对不均匀地球介质声成象的地震反问题属于非线性问题,用小扰动技术常常不可能取得好的效果。换言之,如果把介质波速分为参考波速及波速扰动两部分,波速扰动对波传播的效应是不可忽略的。因此,目前常用的线性化方法(如 Born 近似, Rytov 近似等)在多数情况下不能提供高分辨的波速图象。

前已述之,非线性最优化方法是最早用来解地震波动方程反问题的(Torantora, 1984;

1986). 除了非线性最优化方法之外, 另一类方法是基于逐次逼近的思想 (Yang, 1990; 1992a, b). 其实质是利用各种线性反演成像方法作为单元块, 把它们连接起来构成一个非线性系统, 用于逐步更新参考波速场, 逼近真实的地球波速结构. 当这样的系统采用相同的线性单元块时, 系统则退化为正反馈系统 (Positive gain feedback system), 它极其不稳定, 基本上不能用来解决问题. 利用不同的线性单元块构成反演成像的逐次逼近系统要考虑以下问题: (1) 系统的组织和秩序; (2) 系统的稳定性; (3) 系统的可变性和坚韧性. 系统的结构要依据数据的特征和成像任务来设计, 其原则是:

(1) 可用的线性元块, 包括 BPT、ART、CGLS、LSQR、Born 近似, Rytov 近似等要严格按线性化条件设计, 即使其输出为一阶无穷小;

(2) 线性单元块的组织按算法分辨率由低到高排列, 以实现逐次逼近功能;

(3) 这种非线性反演系统一般是不稳定的, 但重要的不是努力使系统稳定, 而是控制系统走向混沌的程度, 在系统缓慢地走向混沌的临界点停止迭代.

总而言之, 非线性方程的求解一般必须化为线性块的组合才能在计算机上实现. 用现有的线性化单元的组合作为理所当然的, 其它形式的非线性系统 (如神经网络) 也可以用于非线性地震反问题, 这些都是今后要研究的方向.

4.2 混沌反演

混沌反演这个词的含义不是说由混沌理论导出反演算法, 而是指非线性反问题的求解过程本身既不是确定性的, 也不是随机的, 而只有用混沌理论才能描述这个过程本身的固有性态. 对于非线性反问题, 我们构造迭代或递推算法, 希望计算收敛. 然而, 对于实际资料, 如果不用强有力的准则勒令迭代停止, 迭代或递推过程必然走向混沌. 这种迭代过程在数学上是可以和标准的混沌运动比较的. 有人也许会说, 迭代最终可能使方差变大, 而不是走向混沌, 这种直觉的认识有待深化, 因为方差只符合统计规律, 而在无限次迭代过程中解估计的变化具有自相似性等规律, 而且所要求的地球介质参数本身也必须用分形分维理论加以描述, 才有利于非线性地震反演过程的监测和控制.

研究混沌反演切忌生搬硬套动力系统的概念和定理. 要认识到反演是物理上不可实现的系统的数学模拟, 与非线性动力学的研究对象有所区别, 概念和规律上也必定有所不同. 因此, 混沌反演的研究必须是创造性的, 而不是模仿性的.

4.3 开展介质奇性分析的研究

地震资料中的解析奇性本质上反映地下构造的拓扑奇性. 首先要研究利用曲面奇点分类的拓扑方法, 然后进一步讨论利用拟微分算子和 Fourier 积分算子的奇性分析理论工具, 建立介质奇性成像的理论和方法. 近来小波 (wavelet) 变换的发展已引起关注, 人们也在考虑用小波变换探索应用于介质奇性的研究.

4.4 扩大波动方程反演方法的应用领域

应该看到, 虽然新反演理论发展很快, 但是与实际应用还有一些距离, 其原因是多方面的. 为此, 要发展基本的复杂地球模型和粗糙地震数据的反演方法, 使它们尽早石油、矿业勘探和工程等方面得到广泛应用.

参 考 文 献

- (1) 栾文贵、李幼铭, 我国地球物理反演问题研究的某些进展, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 501-509.
- (2) Russell, B.H., Introduction to seismic inversion methods, *Society of Exploration Geophysicists*, Course Note Series, 1988, 2.
- (3) Looke, D. A. and Schneider, W. A., Generalized linear inversion of reflection seismic data, *Geophysics*, 1983, 48: 665-676.
- (4) Bishop, T. N. et al., Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media, *Geophysics*, 1985, 50: 903-923.
- (5) Lines, L. R., Schultz, A. K. and Treitel, S., Cooperative inversion of geophysical data, *Geophysics*, 1988, 53: 8-20.
- (6) 张关泉、马在田, 地球物理反演若干问题的讨论, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 1-5.
- (7) Newton, G. R., Inversion of reflection data for layered media—a review of exact methods, *Geophys. J. Rast. Soc.*, 1981, 65: 191-225.
- (8) Weglein, A. B., Nearfield inverse scattering formalism for the 3D wave equation: the inclusion of a priori velocity information, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, 71: 1179-1182.
- (9) Raz, S., Three-dimensional velocity profile inversion from finite offset data, *Geophys.*, 1981, 46: 837-842.
- (10) Cohen, J. K. and Bleistein, N., An inverse method for determining small variation in propagation speed, *SIAM on Applied Math.*, 1977, 32: 784-799.
- (11) Cohen, J. K. and Bleistein, N., Velocity inversion procedure for acoustic waves, *Geophys.*, 1979, 44: 149-151.
- (12) Bleistein, N., et al., Computational and asymptotic aspects of velocity inversion, *Geophys.*, 1985, 50: 1253-1265.
- (13) Cohen, J. K., et al., Three dimensional Born-inversion with an arbitrary reference, *Geophys.*, 1986, 51: 1552-1558.
- (14) Bleistein, N., et al., Two and one half dimensional Born-inversion with arbitrary reference, *Geophys.*, 1987, 52: 2.
- (15) Torantola, A., The seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophys.*, 1984, 49: 1259-1266.
- (16) Torantola, A., A strategy for nonlinear inversion of seismic reflection data, *Geophys.*, 1986, 51: 1893-1903.
- (17) 马在田, 地震参数连续估计与波动方程反问题, 地球物理学报, 1986, 29(1): 91-102.
- (18) 黄光远、许闻天、傅国华等, 地震勘探数据处理的一种算法——分布参数系统最优理论的应用, 地球物理学报, 1985, 28(1): 74-84.
- (19) Xie, G. Q. (谢干权), A new iterative method for solving the coefficient inverse problem of the wave equation, *Comm. Pure and Applied Math.*, 1986, 39: 307-322.
- (20) 谢干权、李建华、孙英宁, 二维弹性波方程PS波速反演的时卷正则迭代法, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 30-38.

- (21) 张关泉, 一维波动方程的反问题, 中国科学, A辑, 1988, 7: 707-721.
- (22) 栾文贵, 地球物理中的反问题, 科学出版社, 1989.
- (23) 栾文贵, 关于一维弹性波动方程的反问题, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 39-53.
- (24) 李幼铭, 透射波场重建和介质层厚反演研究, 地球物理学报, 1988, 31(6): 649-656.
- (25) 李幼铭, 从矢量波动方程出发反演层状地球结构的方法, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 19-29.
- (26) 刘洪、李幼铭、吴如山, 三维弹性波散射算子的性质与逆散射, 中国地球物理学会年刊, 1991, 18.
- (27) Liu, H. and Li, Y. M., A layer skipping algorithm in multi-dimensional ray travel-time inversion, An invited paper on 20th international symposium on acoustic imaging, Sept. 12-14, Nanjing, P. R. China, 1992.
- (28) Beylkin, G., The inverse problems and applications of generalized Radon transform, *Comm. on Pure and Appl. Math.*, 1984, 37: 579-599.
- (29) Beylkin, G., Imaging of discontinuities in the inverse scattering problem by inversion of a causal generalized Radon transform, *J. Math. Phys.*, 1985, 26: 99-108.
- (30) Beylkin, G. and Burridge, R., Linearized inverse scattering problems in acoustics and elasticity, *Wave motion*, 1990, 12: 15-52.
- (31) Devaney, A.J., Geophysical diffraction tomography, *IEEE Trans.*, GE-22, 1984: 3-13.
- (32) Wu, R.S. (吴如山) and Toksoz, M.N., Diffraction tomography and multi source-holography applied to seismic imaging, *Geophysics*, 1987, 52: 11-25.
- (33) Wu, R.S. (吴如山) and Araujo, F.V., Multi-frequency backscattering tomography the principle and the reconstruction methods, Expanded Abstracts of the Technical Program, SEG 61th Annual Meeting, 1991: 967-970.
- (34) Huang, L.J. (黄联捷) and Wu, R.S. (吴如山), Multi-frequency backscattering tomography in vertically varying background, preprint, 1992.
- (35) Clayton, R.W. and Stolt, R.H., A Born-WKBJ inversion method for acoustic reflection data, *Geophysics*, 1981, 46: 1559-1567.
- (36) 李幼铭、张霖斌, 用于波速重建的波场外推法, (待发表), 1992.
- (37) 吴如山, 仅用位移数据的面积分及其在弹性波场外推中的应用, 勘探地球物理北京 (89) 国际讨论会论文摘要, 1989: 237-241.
- (38) Langenberg, K.J., Applied inverse problems for acoustic, electromagnetic and elastic wave scattering, in "Basic methods of tomography and inverse problems", ed. by Salatiere, Adam Hilger, Philadelphia, 1987. (中译本: 黄联捷、李幼铭译: 层析成像和反问题的基本方法, 石油工业出版社, 1992).
- (39) 李幼铭、尹峰、顾本立, 用位移谱分量比值资料研究二维非均匀介质层析成像, 八十年代中国地球物理学进展, 学术出版社, 1989: 401-409.
- (40) 尹峰、李幼铭, 井间2.5维非均匀背景逆散射问题的迭代算法, 计算机在地学中的应用国际讨论会论文摘要, 1991: 526-527.
- (41) Liu, Y.B. (刘银斌) and Li, Y.M. (李幼铭), Low frequency radiation from a array source in a fluid-filled borehole (abstract), An invited paper on 20th international symposium on acoustic imaging, Sept. 12-14, Nanjing, P. R. China, 1992.

- (42) Lee, M.W. and Balch, A.H., Theoretical seismic wave radiation from a fluid-filled borehole, *Geophysics*, 1982, 47(9): 1308-1314.
- (43) Lee, M. W., Low-frequency radiation from point sources in a fluid-filled borehole, *Geophysics*, 1986, 51(9): 1801-1807.
- (44) Winlow, G. A., Seismic sources in open and cased borehole, *Geophysics*, 1991, 56(7): 1040-1050.
- (45) Yang, W.C. (杨文采), Seismic velocity imaging in an inhomogeneous layered medium, *Chinese Journal of Geophys.*, 1990, 33: 265-282.
- (46) Yang, W.C. (杨文采) and Du, J.K. (杜敏渊), Systematic approach for nonlinear seismic tomography (abstract), An invited paper on 20th international symposium on acoustic imaging, Sept. 12-14, Nanjing, P. R. China, 1992 (b).
- (47) 李世雄、林其彭、叶雅梅, 沿曲线族的Radon变换, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990(a), 33: 69-80.
- (48) 李世雄、叶雅梅、林其彭, 广义Radon变换在散射层析成像法中的应用, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990 (b), 33: 81-88.
- (49) 李世雄、林其彭、叶雅梅, 包络法在带有干扰的广义Radon变换中的应用, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990 (c), 33: 89-93.
- (50) Newton, R.G., The Marchenko and Gelfand Levitan methods in the inverse scattering problem in one and three dimensions, "Conference on inverse scattering: theory and application", SIAM, Philadelphia, 1983.
- (51) Newton, R. G., Inverse Schrodinger scattering in three dimensions, Springer Verlag, New York, 1989.
- (52) Salatier, P.C., Basic concepts and methods of inverse problems, "Basic methods of tomography and inverse problems", ed. by Salatier, Adam Hilger, Philadelphia, 1987. (中译本: 黄联捷、李幼铭译: 层析成像和反问题的基本方法, 石油工业出版社, 1992).
- (53) Weglein, A.B., What can inverse scattering really do for you today? In: proc.SIAM Conf. on inverse scattering, Houston, Texas, 1989, (eds. Bednar et al.)
- (54) 栾文贵, 地球构造反演问题的新途径, 地球物理学报, 1986, 29(4): 369-381.
- (55) 栾文贵, 均匀介质中散射过程的奇性分析, 地球物理学报 (待刊), 1992.
- (56) 马在田, 高阶方程偏移的分裂算法, 地球物理学报, 1983, 26(4): 377-389.
- (57) 马在田, 地震偏移分裂算法的稳定性, 地球物理学报, 1985, 28(1): 101-109.
- (58) 吴律, 在时间域中的大倾角波动方程偏移, 地球物理学报, 1980, 23(3): 320-327.
- (59) 范尚武、程云平、刘超颖, 具吸收边界条件的波动方程偏移的拟合分解方法, 地球物理学报, 1988, 31(4): 439-453.
- (60) 范尚武, 对于非均匀介质的偏移方程及其数值解法, 地球物理学报, 计算地球物理研究文集, 1990, 33: 120-132.

REVIEW ON SEISMIC INVERSION PROBLEMS

Li Youming

(Institute of Geophysics, CAS, Beijing 100101)

Yang Wencai

(Beijing Computer Center of Geology, Beijing 100083)

Abstract

This paper points out some intrinsic drawbacks of classical inversion methods in geophysics, then discusses the developments and progress on wave equation inversion, and seismic tomography as well as seismic migration, finally, gives some comments on the research trend of seismic inverse problems.

Key words Geophysical inversion methods, Wave equation inversion, Seismic tomography and migration imaging.