

层状介质地震波理论与应用

——祝贺许云先生米寿

本书编委会 编

地质出版社

层状介质地震波理论与应用

——祝贺许云先生米寿

本书编委会 编

地质出版社

· 北 京 ·

内容简介

层状介质地震波理论是化石能源地震勘探技术的基础。本书通过汇编许云教授及其研究生、博士后已发表的学术论文的方式介绍了该理论及其应用,包括地震模型与地震波传播机理、地震波正演模拟、去噪与提高信噪比、高分辨率地震勘探、速度分析、偏移成像、地震反演、时移地震等。

本书可供固体地球物理地震专业本科生、研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状介质地震波理论与应用:祝贺许云先生米寿 /
《层状介质地震波理论与应用》编委会编. —北京:地
质出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 116 - 09881 - 7

I. ①层… II. ①层… III. ①地震波—文集 IV.
①P315. 3 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 188377 号

Cengzhuang Jiezhi Dizhenbo Lilun yu Yingyong

责任编辑:孙亚芸 沈效群 叶 佩 王 萌 徐晶晶

责任校对:韦海军

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 66554528 (邮购部); (010) 66554633 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm × 1092mm¹/₁₆

印 张:18.5 图 版:3 面

字 数:445 千字

版 次:2016 年 8 月北京第 1 版

印 次:2016 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价:78.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 09881 - 7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

《层状介质地震波理论与应用》

编 委 会

编 委	E. B. Karus	艾印双	程志国	刁 顺
	樊计昌	范 旭	刘劲松	唐文榜
	王妙月	王晓华	王 赞	乌达巴拉
	吴立明	肖春燕	徐常练	杨慧珠
	曾友爱	詹治田	张霖斌	郑鸿明
	郑天愉	庄东海		
秘书组	王 赞	刘立民	石 瑛	

前 言

许云教授是我国著名的地球物理学家，是我国勘探地震学科的奠基人之一。从早年的引进国外的层状介质理论和反射地震学，历经几十年的发展成功应用于我国石油天然气勘探，许云先生在地震模型与地震波传播机理、地震波正演模拟^[1]①、去噪与提高信噪比、高分辨率地震勘探、速度分析、偏移成像^[9]、地震反演、时移地震等勘探地震诸多方面进行了理论探索及应用研究，科研成果丰硕，培养了大量的地震科技人才，为我国勘探地震学科的发展和地震在油气能源勘探中的大规模应用奠定了理论基础，做出了突出贡献。下面将分专题对许云先生的科研成果进行总结综述，简单介绍这些成果的创新之处、理论价值及其实践意义。

一、地震模型与地震波传播机理研究

1. 提出了非线性地震模型及地震波传播机理

层状构造模型是真实传播介质的近似，在地震波波长远小于构造起伏变化几何尺度且地震观测排列长度一般均小于反射目的层埋藏深度等相对条件下，这种近似能够在一定程度上提供令人满意的解释结论。

线性模型建立在充分表现地层变化微观结构的测井观测基础上，它是一种几何地震学意义下的模型概念，包含下列主要内容：① 传播介质由大量具有不同弹性性质的“微层”组成，“微层”厚度可与测井曲线变化几何尺度相比拟；② “微层”弹性性质的每一变化均应使入射地震能量形成反射；③ 反射地震记录由波形相同而到达时间不同、具有不同振幅与极性的一次反射相互叠加构成；④ 忽略由吸收等因素形成之地震能量损耗；⑤ 介质具有横向均匀各向同性，且忽略不同类型地震波之间的能量转换。

非线性模型在“微层”的几何结构方面与线性模型完全相同。不同的是，非线性模型是物理地震学意义下的模型，建立在地震层状构造理论的严格基础上。这主要体现于两点（以位移波为例）：① 在层状构造每一层内均应遵守弹性波传播物理规律；② 在层状构造每一分界面上应满足边界条件，即位移与应力在分界面上应具连续性。

1981年，许云老师发表了论文《地震层状构造理论与地震模型》，从地震层状构造理论观点出发，讨论了地震勘探解释及其数字处理中所采用模型的性质，指出：目前作为数字处理技术、反褶积及拟测井技术等方法之基础的线性模型与客观实际之间存在严重矛盾，难以满足精密之岩性勘探与解释的需要。根据地震层状构造理论，进一步讨论了非线性模型的物理合理性，导出了描述其传播特性的传递矩阵^[18]。非线性模型满足波动传播

① “前言”中所列参考文献见本书最后的“参考文献”内容。

的物理规律, 是对于真实层状介质的更高级近似。在数学形式上, 非线性模型的传递矩阵概括了描述反射过程与透射过程所必要的全部传递特性, 本身并不包含任何矛盾, 因此能够比线性模型解释更多的地震波动力学现象。他进一步指出: 在地震地层学解释和地震岩性勘探解释处理中采用非线性模型, 无论在理论上或数字计算处理上都是必要与合理的。

1983 年, 许云老师又在论文《非线性层状构造理论的模型试验研究》中, 通过超声波模型试验, 对地震层状构造理论的线性模型和非线性模型进行了对比研究。结果表明: 建立在几何地震学意义下的线性模型, 是在一定程度上对层状介质的近似, 但它不考虑透射损耗和多次反射现象, 致使它与实验条件下所得的结果的近似程度较差; 建立在物理地震学基础之上的非线性模型是对真实层状介质的更高级近似, 从波的传播规律出发来研究层状介质中的波, 能较好地同物理模型试验结果相符合; 在进行岩性地震研究和资料处理时, 使用非线性模型是必要的, 因为它比线性模型更精密、更合理^[11-12]。

2. 定量分析了反射界面曲率对反射振幅的影响

反射波振幅受多种因素影响, 其中包括记录系统影响、波阵面几何扩散影响、非理想弹性介质影响及反射界面曲率影响等。在地震数字处理技术中, 对前三者已能有成效地进行定量校正, 对反射界面曲率影响尚缺乏完整的定量分析。

具有正曲率的凸界面使反射能量发散, 具有负曲率的凹界面在一定条件下可使反射能量聚焦, 这些都是众所周知的事实。诸如时间剖面上背斜顶部的所谓“秃顶”现象, 以及“亮点”技术中出现的虚假振幅异常——隆起顶部存在“暗点”、凹陷底部却出现“亮点”等, 均属此类不反映任何岩性信息的反射界面曲率对振幅的影响。当地震勘探应用于岩性解释目的, 以及将时间剖面记录道转换为拟测井记录道(相当于反射系数记录道)时, 这类不具有岩性信息意义的曲率影响将是有害因素。许云老师将 Shah 所建立的水平面情形下的时间剖面偏微分方程加以发展, 推广到包括多层曲界面的普遍情形, 并从能量的观点将波阵面曲率、反射界面曲率与反射振幅联系起来, 以几何地震学方法导出反射界面曲率与反射振幅之间的定量关系, 拟定了有效的校正方法: 在二维柱状波阵面的具体情形下, 给出了波阵面扩散影响校正因子 $\sqrt{R}$, 即波阵面曲率半径的平方根。这个校正因子包括反射界面曲率影响在内。通常是在背斜顶部和向斜底部界面曲率变化较大之处进行校正, 将校正因子 $\sqrt{R}$ 乘时间剖面记录道相应时间 T_0 时的振幅就完成了振幅校正处理^[22]。

由于采用射线理论, 所得结论适用于任意多层介质和任意时间剖面记录道位置。但因受所取简化假设的限制, 适用范围将限于反射界面曲率半径大于地层厚度的情形。

3. 给出了 TI 介质裂缝对 P 波和 SH 波散射场的远场解析式

地震波在地下介质中的传播十分复杂, 其原因除了地质构造的多样化外, 还有介质的各向异性。对于各向异性, 地震学常将其弱化为纵向各向同性(竖直层状)或横向各向同性(水平层状), 即 TI 介质。对于地质构造, 可以视其为裂缝体组合, 并将它分为随机裂缝与周期裂缝群, 其基本单元均为单一裂缝。

裂缝体对弹性波的散射, 在力学上主要关心近场衍射效应, 即通过正演计算给出应力强度因子。而在地球物理上, 尤其是在地震衍射 CT 和非线性弹性波反演中, 主要关心裂缝散射场的远场效应, 因为在地面或井中接收到的地震信号广义上可视为散射场。利用这种散射场, 可通过反演技术来探测地下速度结构和岩性参数。

许云老师及其研究团队把地质构造的复杂形态,如断层、地堑、尖灭、不整合等视为裂纹群组合体,阐述了横向各向同性介质(TI 介质)的基本概念及其波传播的基本方程,从而给出了 TI 介质中裂缝对 P 波和 SH 波散射场的远场解析式与数值结果^[4]。该项研究对于地震衍射 CT 以及裂隙几何形状(方位、大小、厚度)的探测均具有理论意义与实用价值。

二、地震波正演模拟

1. 给出了地震反射波波前射线追踪方法

地震波旅行时及反射路径的计算在地震资料处理中起着非常重要的作用,地震波射线路径的计算通常采用常规的射线追踪方法。常规的射线追踪方法存在下述缺点:① 它不能处理首波问题;② 在复杂速度结构中很难确定射线路径;③ 两点射线追踪计算量大,而且通常只能得到一条射线路径及其旅行时。有不少人相继提出了一些新的方法,其中具有代表性的方法是用有限差分直接对程函方程求解的波前法射线追踪。这些方法首先通过解程函方程,快速、准确地计算出源点到网格点上的时间场分布,再由 Fermat 原理找出射线路径。

许云老师及其研究团队在论文《地震反射波波前法射线追踪》中,将波前法射线追踪应用于反射波射线追踪,给出了一种适用于复杂速度结构用有限差分解程函方程的方法;利用有限差分法解程函方程,分别求出震源点及接收点到反射界面任意点的初至旅行时,将两者相加,即可得到总旅行时与界面水平坐标的关系曲线。由 Fermat 原理可知,该曲线上的极值点相对应的时间为反射旅行时,相对应的水平坐标值为反射点位置。此方法由于考虑了首波及散射波的存在,不但可计算出任意检波点能接收到的所有的反射波的旅行时及射线路径,而且具有快速、准确、适应复杂构造模型的优点^[27]。

2. 实现了高斯束射线法的模块化并进行了复杂介质数值模拟试验

地震波场的正演数值模拟方法一般分为两类。一类是波动方程数值解法,如有限元法、有限差分法等,虽然这类方法精度较高,但所需内存一般较大,运算速度也不快,并对模型大小等有一定限制。另一类是高频近似的射线方法,从普通射线法、旁轴射线法,发展到高斯束射线法。由于这类方法前提是高频近似,因此精度比前一类方法要低,但它具有第一类方法不可比拟的长处,即所需内存少,运算速度快,经济有效,并且对模型大小等也没有限制。纵观高频近似射线方法,其中普通射线法是大家所熟悉的,但它有局限性,如在焦散区、临界区等奇异性区域计算出的振幅趋于无穷,因而该方法在奇异性区域失效,然而,这些区域恰恰是我们最感兴趣的;再者,普通射线法对介质的近似及模型细节的变化很敏感。正因为有上述缺点,在 20 世纪 80 年代,Červeny 等人又将波动方程与射线方法相结合,提出了求解波动方程高频近似解的高斯束射线法。高斯束射线法是一般射线方法的概括和推广,它克服了一般射线方法在奇异性区域振幅趋于无穷以及对介质近似和模型细节变化敏感的缺点,能对二维甚至三维的横向非均匀介质复杂构造计算合成地震记录,而且从计算的观点看,它避开了耗时的两点射线追踪,所需内存少,计算速度快。许云老师及其研究团队在论文《高斯束射线法在二维非均匀介质复杂构造中的应用》

中,详细阐述了高斯束射线法的优点及原理,并在 SUN 工作站上实现了该方法的模块化。程序具有以下特点:从模型界面设计,高斯束射线追踪过程图形显示,到最后合成记录显示,均采用人机交互方式,并对功能窗口进行了汉化。对非均匀复杂介质模型进行的数值模拟试验表明:高斯束射线方法不仅适用于复杂的介质模型,而且所需内存资源少,计算速度快,还有令人欣慰的计算精度^[15]。

三、噪声压制与提高信噪比研究

1. 提出了偶然干扰背景上分辨弱地震波的统计判断方法

地震勘探中经常出现随机性偶然干扰,为压制偶然干扰,地震勘探工作中广泛采用了混波与各种组合方法,但存在于仪器以外的干扰源是不能消除的,且因其来源多种多样,企图完全消除它对观测记录的影响是不可能的。因此,从偶然干扰不能完全避免的观点考虑,需将观测记录过程本身作为随机过程来处理,对比追踪时应考虑它的统计性质。

考虑到观测记录过程本身的随机性质来分辨地震信号的各种方法,按其是否涉及偶然干扰的概率分布函数分为概率方法和非概率方法两类。非概率方法只利用观测记录过程的某些平均统计特征,关于偶然干扰,除平稳性假设外,不需要考虑概率分布规律。概率方法则涉及偶然干扰所服从的概率分布规律,在非线性系统作用下,概率分布规律也有相应变化,计算这种变化有很多数学上的困难,因此概率方法的应用常限于线性系统情形。属于这一类的有反概率法,根据反概率极大值出现时间位置判断波到达时。这类方法没有信号失真问题,且可对判断可靠程度进行定量概率估计。

许云老师在其论文《偶然干扰背景上分辨弱地震波的统计判断方法》中,根据统计假设先验理论,讨论了按照最优振幅判据对干扰背景中的弱地震信号进行统计判断的方法。所谓弱地震波系指瞬时信噪比 $A(t)/\sigma \leq 1$ 的情形。由于在这种情形下的统计判断与地震信号 $S(t)$ 无关,因此不需要准确知道 $S(t)$ 的形状或其函数形式,这点较之反概率法必须已知 $S(t)$ 要方便。但所述方法具有平均统计意义,必须进行多道判断才能减少其不确定性。该论文导出了最优振幅判据 $r_{\text{opt}} \approx \sqrt{2}\sigma - 1.5\sigma$,将 r_{opt} 作为对比追踪波时的辅助标志,根据振幅超过 r_{opt} 的时间位置,确定地震波可能出现的时间范围。同时,分析了选择振幅判据与判断错误的关系,近似计算出单位时间内振幅超过 r_{opt} 的平均次数,并讨论了在用自动振幅控制接收时,应用统计判断方法所受的限制^[21]。

2. 提出了波动方程正反向延拓压制面波直达波方法

在地震数据中,为了保持更多波的特征,在野外采用宽频带进行数字记录,因此,在记录了各种有效波的同时,也记录了各种干扰波。有效波与干扰波的差异表现在各个方面,例如频谱、传播方向、能量、传播速度等,利用它们之间的各种不同性质来压制干扰波、突出有效波就形成了不同的滤波方法。从消除干扰波的各种方法来说,不难发现,大都遵从这样一个事实,即:从地震波场中消除干扰波就是将地震波场变换到另一空间,在此空间上,有效波与干扰波分开,据此可以在变换后的空间上进行各种相关的处理去除干扰波,保留有效波,之后,将处理后的空间再反变换到原来最初的空间上,达到消除干扰的目的。

在地震数据中,直达纵横波、面波为典型的干扰波。根据有效波与干扰波不同的到达时间、频率、波数、慢度等,利用正反变换的处理方法,可以消除其中的一种或几种干扰波。如在时间域可以用切除的方法去掉共炮点道集中的直达波,在频率-波数域可以滤除面波等。从有效反射波与干扰波(直达波、面波)的传播特性可以看出,干扰波近于地表传播,而有效波分布于整个空间位置上。根据这个特性,运用波动传播理论的观点,将地面上记录到的波场延拓到它们相应的源处,那么,干扰能量只保留在近地表,而反射能量分布于整个空间位置,这时可采用滤波的办法将干扰波消除,之后再处理后的波场反向延拓回地表记录的形式。这样,浅层传播的波被消除了,达到去干扰的目的。基于这种思想,许云老师及其研究团队在论文《波动方程正反向延拓滤波》中,提出了一种全新的方法,利用波动方程正反向延拓进行滤波。该方法将地表记录通过波动方程正向延拓至一定深度,在此深度上,面波等干扰波分布于浅层,而有效反射保持在原来的层位,将浅层的波场置零后,再反向延拓记录至地表,达到消除干扰的目的^[2]。

作为一种新的滤波方法,波动方程正反向延拓滤波具有一定的新颖性及实用性。这种方法能更好地保持波场的幅值,更符合波场的实际传播状态。应用波动方程进行处理,与常规的时域内褶积方法及其他滤波方法有所不同。要求延拓深度内的速度参数为已知,但所给定的速度并不一定为介质的真实速度,只要大致近似就可以了,但必须保证正反运算过程中速度的一致性。由于是应用延拓方法,运算量要较其他方法大一些,这也是该方法的不足之处。

3. 改进了地震道样点空间调序方式压制近炮点多次波的方法

地震资料处理中,最常见压制多次波的方法是利用多次波和有效波的动校正速度差异来进行识别和压制。不过,对于近炮点道,动校正速度不同造成的剩余时差很小,区分多次波极为困难。为了解决这个问题,Bruland 等人在 SEG (Society of Exploration Geophysist, 美国勘探地球物理学家协会) 第 62 届年会上提出过地震道样点空间调序方式,其原理是增大大多次波和有效波的差异,为压制近炮点多次波创造良好的条件。但是,这种方法的假设条件之一是各道的有效波振幅相同,在这种情况下,样点空间调序只改变了多次波的分布规律,而有效波不受任何影响;可惜这个假设条件很难与客观实际情况相符,造成的后果是有效波的振幅变化部分被当作多次波而受到压制。为了避免这种现象,Bruland 等人又提出:在有效波和多次波中,首先用振幅变化较小者的速度进行动校正,然后采用样点调序和中值滤波法压制有振幅变化的倾斜同相轴;如果振幅变化较小者是多次波,则从原始数据中减去处理结果。然而,这种做法既没有完全解决问题(振幅变化较小不等于没有变化),也很难在实际中应用(实际地震数据中,很可能在一些部位有效波振幅变化较小,而另一些部位多次波振幅变化较小,这时难免顾此失彼)。为了从根本上解决问题,就必须采取一定的措施,使假设条件得到满足。

许云老师及其研究团队在论文《保持振幅特征的近炮点多次波消除方法》中提出了改进的空间调序方式,去掉其苛刻的限制条件,从而扩大了此方法的应用范围,并且在道集和叠加剖面上见到了较好的效果。该方法首先采用最小二乘法线性回归来确定反射信号的振幅变化规律,再对原始数据进行相应的补偿,使各道的有效波振幅达到一致,以满足

样点调序法的假设条件；消除了多次波之后，再进行振幅恢复，以保持有效波振幅原先固有的特征。实际资料处理结果表明，应用该方法可有效地消除近炮点道上的多次波，提高叠加剖面的信噪比^[17]。

4. 提出了约束法分解 P-L 变换压制多次波方法

现代生产中用得最多的压制多次波方法是由 Ryu (1982) 提出的 F-K 滤波，该方法无法解决近道多次波问题，如果这部分多次波不去掉，在叠加剖面上仍会成像从而形成假象。Mai Yang (1989) 针对高覆盖次数地震资料采用等时差部分叠加 F-K 滤波法压制多次波取得了较好的效果，但该方法严重破坏了记录的炮检距关系，对后续的叠前处理造成了一定的困难。对于叠加剖面上的水底多次波，Monk (1993) 用波动方程延拓求出多次波的初始模型，再应用约束法对初始模型从振幅、相位和时间上同时进行修正，然后从叠加剖面上将多次波减去，其压制效果较好。

许云老师及其研究团队在论文《约束法分解 P-L 变换压制多次波》中，在上述后两种方法的基础上，提出了约束分解 P-L 变换压制多次波方法，主要目的是要有效地压制 CMP 道集或共炮点道集上所有道上的多次波，且尽可能地保持有效波原有的振幅随炮检距的相对变化关系。该方法通过 P-L 变换使得多次波由原来的近似抛物线转换成与水平方向成一定夹角的近似直线，在 P-L 域内对远、近道上的多次波均能较好地压制，克服了 F-K 滤波只能压制远道多次波的缺陷；通过分解变换、振幅约束，使得最终输出道集的振幅随炮检距的相对变化关系尽可能地与原始输入道集的变化关系保持一致^[25]。

四、高分辨率地震勘探

随着石油勘探开发的深入发展，地震、测井、石油地质等资料的综合研究分析组成了油藏描述的主要内容，其中高分辨率地震勘探是油藏描述的基本前提。由于生储油构造多发育于沉积岩地区，而沉积环境的变化影响到沉积相变的多旋回，从而形成储集层中的薄互层，油藏描述问题的关键就是要求地震方法提供更准确、更精细的储集层分层情况 ($<1.0\text{m}$)，以及小区域、小构造圈定。这一切都对当前高分辨率地震勘探提出了更苛刻的要求。在目前仪器设备的状况下，各种地震处理方法技术的改进对薄层沉积的高分辨率地震勘探具有重要意义。各种高分辨率处理方法的研究大多以改善信噪比谱，即提高信噪比、拓宽频带宽度为指导思想，由此产生的空间域（或波数域）滤波方法已在生产中广泛应用。

和已有的方法不同，许云老师及其研究团队在论文《地震势能剖面》中用势能转化方法，通过逆时延拓，求取势能剖面，改善了信噪比谱，提高了分辨率^[14]。

地质体在应力场的作用下发生弹性形变，从而具有应变位能（势能），应用应变位能公式，可以将位或位移转化为势能，用势能剖面代替常规地震剖面。由于势能转换能拓宽地震信号的有效频谱，具有高通滤波性质，同时又不损害低频信号，所以，同常规地震剖面相比，势能剖面在保持信噪比的前提下，有更高的纵、横向分辨率。通过势能转换的理论分析及合成数据和实际数据的势能转换处理，证明势能转换确实是行之有效的高分辨率地震处理方法，可用于实际地震资料的处理。

五、速度分析方法研究

1. 对速度分析方法进行了总结, 提出了发展方向

速度分析方法的发展, 早期集中于利用多次覆盖地震记录资料, 以相关或叠加方法求取速度谱。随着地震资料解释要求的不断提高, 近年来, 速度分析方法沿着两个方向发展^[24]: 首先是在时间、时差、振幅、倾角等多维参数空间内的自动检测速度分析, 因而大大提高了时空分辨能力, 有可能在空间内沿反射层连续追踪速度变化规律; 其次是为克服地球物理反问题的多解性, 根据速度信息提取、建立地层模型, 反复对比迭代校正这样一种循环思路发展自适应速度分析。

1) 在速度分析中, 根据速度谱求取速度参量的方法, 目前正在应用。多次叠加记录道组是现行的速度谱分析方法的基本处理对象和基础, 这既是优点, 即速度谱可以利用多道记录中重复出现的信息, 同时, 也使速度谱的适用范围受到一定限制。超过这种限度, 速度谱的解释就将导致严重错误或误差。这些限度主要是两个: 首先是界面性质。现有多次叠加方法的重要前提条件之一是反射界面为线性平界面及一次反射波旅程具有唯一性, 即一次波由震源经反射点反射至接收点的旅程应只有一种可能, 而不应有多种可能旅程。其次一个限度是反射界面倾斜影响的程度。因此, 如果企图以速度谱解释结果进行时间剖面的时间深度转换、偏移校正或是岩性研究, 必须十分谨慎, 除非肯定界面为水平或是能够对叠加速度中的倾角影响进行校正, 否则, 无条件地利用速度谱解释结果, 将导致解释错误。

2) 所谓自动检测速度分析, 是以多次叠加输出的时间剖面资料为基础, 先在时间剖面上对反射界面按倾角扫描方式进行叠加, 获得 T_0 时间、倾角、共反射点坐标、反射信号周期 4 种参量; 然后对这种叠加结果进行速度扫描, 确定反射信号振幅与叠加速度或均方根速度两种参量; 最终, 以上述各参量对反射界面进行连续性检验, 做出检测时间剖面并计算层速度。

3) 所谓自适应速度分析, 就是利用层状介质模型理论合成记录做出的以相似系数为判断准则的速度谱, 与由实际多次叠加记录做出的同类速度谱相比较, 理论计算中包含着待求的各层层速度与层厚度参量, 所用参量合适, 则实际谱与理论谱相像, 否则, 二者有差别; 以是否相像的误差控制, 连续不断自动调整诸参量, 直至参量误差小于允许范围为止, 此时所得参量就是最佳解。

现有速度分析方法均受界面倾角须平缓的限制或只能近似地处理倾斜界面的问题, 而不断提高速度资料解释精度和多方面应用, 均要求对叠加速度与均方根速度加以区别。其次, 所有现有速度分析方法均直接或间接利用时距关系的双曲线性质, 但双曲线性质仅是采用了几何地震学近似的结果。严格地说, 时距曲线并不是双曲线而是某种高次曲线, 为精确起见, 可能有必要在现有的时距关系表达式中增加一项修正项, 以保证时差校正后确为同相叠加。最后, 由于几何地震学近似, 现有速度分析方法不适用于非线性曲界面情形。因此, 速度分析的更进一步发展, 需要摆脱界面倾斜及几何地震学近似所加的限制, 可以设想, 应当有这样一种速度分析方法: 它适用于复杂构造区域和任意多层倾斜介质, 能够在时间空间域的三维条件下, 形成自动寻求最优点的自适应系统。这是速度分析研究

的发展方向^[24]。

2. 提出了速度随炮检距变化的分析方法

在速度分析中,目前采用的双曲时距曲线假设模糊了地层信息在地震数据中的反映,阻碍了速度分析精度的提高。采用井资料约束,可以减少由于射线弯曲、各向异性等原因造成的速度分析结果的系统误差,但要求井足够密集,否则对于由介质横向非均匀和长波长静校正量等原因造成的空变误差则无能为力。因此,为了有效地解决地震速度分析精度的问题,必须采用非双曲线动校正,同时高精度的速度分析结果也有利于速度场反演和时深转换以及其他应用。例如目前的叠加速度分析结果就不能满足深层时深转换的需求。叠加速度是依据动校正时差来求取,反射层越深,动校正时差越小,叠加速度的误差就越大;与之相反,在绝对误差一定的情况下,反射层越深,要求相对误差越小,即速度的误差越小。所以速度分析的精度问题在深层勘探中显得更为突出。尤其是在地层平缓的地区,存在1%的速度误差就足以改变深层界面在构造图上的形态。

地震勘探所面对的地表和地下情况越来越复杂,而勘探目标却要求从地震数据中提取更多、更详细和更精确的信息。为了适应新的情况,在速度分析和动校正处理中,必须考虑到速度随炮检距的变化,对双曲线型时距曲线加以改进,形成更接近实际情况的时距曲线。许云老师及其研究团队在论文《速度随炮检距变化(VVO)分析》中,在旅行时计算公式中引入了炮检距的四次项,并分析了四次项系数的物理含义。为了更符合地震勘探的习惯,采用速度梯度概念来描述速度随炮检距的变化,依次求取速度和速度梯度,可以获得复杂介质中更多的信息,使速度分析结果的精度得到提高,也为时深转换和速度反演提供了更好的条件^[16]。利用VVO信息也改善了动校正和叠加的效果。

六、偏移成像方法研究

1. 提出了各类地震偏移方法的统一理论——广义绕射变换理论

时间剖面中的倾斜反射界面是经过畸变的,为获得关于界面空间位置及其几何形态的正确概念,必须进行界面的空间归位处理。各类空间归位处理按其具体实现方法的不同,在地震数字处理技术中被取名为叠加偏移、绕射扫描、加权偏移、积分法等。

许云老师在其论文《广义绕射变换——论各类地震偏移方法的统一理论》中,从广义绕射的观点对基于严格波动方程积分形式解和非波动方程解的各类偏移方法作了统一的论述^[20]。由于惠更斯原理是实现空间归位所依据的唯一基本原理,因而可以将各类不同偏移方法容纳在统一的理论模式之中,用统一的观点评述处理方法的物理实质和处理效果的限度。根据广义绕射变换观点的分析指出,基于波动方程解的各类偏移方法具有物理地震学意义,偏移剖面的振幅有物理意义;基于时间场方程解的各类偏移方法只具有几何地震学意义,其偏移剖面的振幅仅具有相对参考意义。

2. 将分形理论引入地震处理中,提出了分数维图像方法

地震数据处理方法大多建立在数字信号处理基础上,受信噪比和分辨率的限制,很难获取准确的介质信息,而庞大的地震数据却又包含这些信息。然而,由于地震剖面的形态存在着明显的自相似现象,它具有分形集的如下特点:①结构比较复杂,具有某种程度的

精细结构,因而具有一定的分数维特征;②具有一定的部分与整体之间的相似性;③能通过递归、迭代方式产生。因此,许云老师及其研究团队在论文《地震资料处理的分数维图像方法》中,提出了分形地震图像处理方法。该方法的基本原理是:地震信号由大量的近白噪背景上的微弱有效信号构成,如果把一个工区的所有地震剖面看成是整体,而一张剖面看成是此整体的组成部分,那么这样一个形体实质上就是分形,它符合分形的定义,即其组成部分是以某种方式与整体相似的形体。从剖面处理的结果看,分形处理在一定程度上提高了信噪比和分辨率,突出了目的层,改善了剖面质量。这说明将分形理论应用于地震资料的处理是可行的^[26]。

3. 对细胞自动机方法用于地震偏移进行了探索研究

传统的地球物理学方法在研究介质中的波动问题时,通常是由波动方程出发对介质的波动过程进行描述和分析。近年来出现了一种新的模拟地震波场的方法。该方法以细胞自动机模型为基础,通过描述在离散网格中粒子的运动和相互作用,来达到模拟地震波场的目的。研究表明,这样一种离散粒子系统中的统计平均量随时间的变化满足波动规律。

偏移的波场延拓与波的传播均满足波动方程,因而同样可用细胞自动机来模拟这一过程。许云老师及其研究团队在论文《细胞自动机用于地震偏移:数值模拟试验》中,利用细胞自动机模型进行了地震偏移处理的尝试,采用格子 Boltzmann 模型和三角形网格,以向下两个方向的粒子代表下行波,根据归一化的地震记录计算粒子数密度,在相应的时刻在代表地表的网格点上设定粒子数密度,以下行粒子在网格中的演化模拟波场延拓过程。粒子系统演化结束时即得到偏移后的波场图像^[10]。

4. 提出了共成像点道集(CIG)叠加方法

在构造复杂地区,常规处理中,叠加速度往往难以准确求取。为了淡化成像对速度的依赖性,自 1998 年以来,已出现三类与叠前偏移等效的新叠加方法技术,即在 CMP 道集内实现的等效偏移距方法(EOM)、在 CMP 道集内实现的共反射面元方法(CRS)、在共偏移距剖面内实现的共反射面元方法(CRE),这些处理方法的核心思路是确定成像点的垂直深度(EOM 方法)或是其法线深度(CRS、CRE),处理中仅需已知粗略速度信息(EOM)或近地表速度(CRS、CRE)。三类方法均不以精确已知速度模型为前提条件,受速度信息约束较少,并可自动实现 DMO 及偏移归位。三类方法各有优缺点,如:EOM 方法仍需事前已知粗略速度信息;CRE 方法采用三重扫描方式求取波阵面曲率,工作量巨大,且在构造复杂地区难以掌握波阵面曲率参数的变化范围。

许云老师及其研究团队在上述方法的基础上进行了改进,提出了共成像点道集(CIG)叠加方法。该方法部分处理流程与 EOM 方法相近,但 CMP 道集至共成像点道集之变换预先无需知道任何速度信息,通过基于波阵面曲率的空间-时间域几何变换,将多个 CMP 道集变换成为单一的 CIG 道集,由于消除了界面倾角影响,反射能量更聚焦,而且提高了资料的信噪比^[3]。

七、地震反演

1. 首次将 AVO 反演理论推广到井中有偏 VSP 资料,提出了有偏 VSP-AVO 反演理论

众所周知,AVO 理论是通过研究反射波振幅随炮检距(或入射角)的变化特征来研

讨论反射系数响应随炮检距的变化,进而研究反射界面上覆、下伏介质的岩性特征及其物性参量。显然,AVO 技术依据的基本数据就是含有随炮检距变化特征的地震反射资料。

考虑到困扰地面地震 AVO 反演中保持振幅处理和不甚了解子波特性的情况,许云老师及其研究团队针对井中有偏 VSP 数据,提出了“有偏 VSP-AVO 反演理论”。“有偏 VSP-AVO 反演理论”的提出对于用 AVO 技术解释地层物性是非常有意义的。因为,有偏 VSP 资料在 AVO 反演中的应用,使我们针对同一目标地质体进行物性参数的反演又多了一类资料,从而对同一目标地质体可得到由多种形式观测数据而求解出的多种物性参数信息。这将大大丰富我们的解释信息。同时,研究团队给出了有偏 VSP-AVO 反演的原理与实现方法,并就有偏 VSP-AVO 反演的应用进行了某些理论上的探讨,进一步对多偏移距 VSP 观测提出了 VSP CDP 道集的概念和 VSP CDP-AVO 反演。

许云老师及其团队首次把 AVO 反演理论扩展到井中有偏 VSP 资料中,能够将地面地震资料和井中地震资料更加紧密地结合在一起,而井中有偏 VSP 数据信噪比高,振幅保真性好,井口获得的子波信息量大,也不受地表层对反射振幅的影响。这些对于保证 AVO 反演的可信程度和精度更加有利。无疑,有偏 VSP-AVO 反演理论的提出有力地推动了 AVO 技术的应用和发展^[13]。

2. 开展了地球物理 CT 方法研究

因为地球介质不均匀性和几何不均匀性(断层裂隙),再加上地震入射波又并非全为高频成分,所以地震波传播会产生散射甚至相互干涉而出现衍射现象,于是地球物理 CT 由走时 CT 迈向衍射 CT (DCT)。然而,DCT 的研究均以均匀介质为背景,不足之处就是其背景介质的选取与极度不均匀的地球介质不符,所以必须改进对背景介质的描述,其方法是把走时 CT 的速度结果作为先验信息输入给 DCT 来打底色,再用 DCT 技术对不连续性作定量成像。许云老师及其研究团队在论文《地震走时 CT 波前追踪》中,基于对背景场描述的走时 CT,阐述了波前追踪方法。该方法从 Radon 变换出发,在用泛函分析和微分几何导出的程函方程基础上,用有限差分方法进行数值求解,给出了波前追踪公式,并采取曲框扩大法,开辟周边数组,寻求极小点,一步步地确定各网点之走时^[7]。

地震衍射 CT 在以往的研究中均从声波方程出发,且方程为齐次的,缺少震源项。然而,地震勘探均使用炸药震源或其他震源来激发并接收走时与振幅,所以传统的衍射 CT 应考虑震源函数的影响。许云老师及其研究团队在论文《地震衍射 CT 中的震源函数与入射场》中,从地震衍射 CT 角度出发,应用爆炸力学和理论力学对爆炸震源(球状和柱状)及集中力震源(落重、可控、敲击)进行了研究,给出了地震衍射 CT 中所涉及的震源函数形式和相应的入射场解析解与数值结果,并采用弹塑性理论、冲量定理及 Laplace 变换导出了位移 Green 函数,进而作褶积运算,最后得到位移入射场表达式;柱状震源与集中力震源产生的入射场远场解也一并得出。它的用途一方面可作为 DCT 的输入,另一方面可为提取散射场服务^[6]。

地震衍射层析成像(Diffraction Tomography)一般均从声波方程出发,且大多针对齐次声波方程,即缺少源项。这与地震勘探中既有震源又伴随纵横波耦合的情况不相符,因而有必要作改进。许云老师及其研究团队在论文《弹性波衍射 CT》中,直接从等价于弹性动力学 Navier 方程的耦合齐次与非齐次矢量波动方程组出发,围绕弹性波衍射 CT 展开了理论研究,给出了弹性波衍射层析成像一个较为理想的工作流程。尤其是其非齐次方程

含有震源项,同时适合P波和S波;考虑爆炸震源,引进塑性半径,运用张量运算,推导了Born近似下散射波谱与目标函数的关系,并得到两种数据采集方式下的层析成像FBP公式,可同时适用于P波和S波,尽管与以往不涉及震源项的结果相似,但本结果更符合地震勘探情况^[5]。

3. 将最大熵原理引入波动方程走时反演,形成了最大熵走时波形层析成像方法

地震CT方法可分为两大类,一类是基于几何光学或射线方程的方法,称为射线CT;另一类是基于波动方程的方法,称为波动CT。当目标尺度比地震波长大及速度变化平缓时,射线CT的效果就好,否则其衍射和散射就起主导作用了,这时必须用波动方程来描述这个系统。Pratt(1991)指出,虽然波动CT比射线CT有更高的分辨率,但波动CT只能补充而不能代替射线CT。而二者联合使用则很适合于高分辨率的图像重建。Luo Yi(1991)在分析了射线CT和波动CT的原理、优缺点和互补性后,提出了一种全新的反演方法,称之为波动方程走时反演(简称WT反演)。WT方法吸取了射线CT和波动CT的绝大部分优点,消除了射线CT的一切缺陷。

许云老师及其研究团队以波动方程走时反演方法为基础,将最大熵原理引入到WT方法中,形成了最大熵走时波形层析成像方法。在该方法中,利用 N 步重新开始的PRP共轭梯度法对理论走时与观测走时进行最小二乘意义下的最佳拟合^[8]。该方法有如下优点:①抗噪能力强,对不完全且含有噪声的数据成像很有效;②分辨率高;③对初始模型要求不高。实际处理时需对实测走时进行适当平滑,以保证稳定收敛。应用实例表明,这种方法可用于深地震测深资料的反演。

4. 提出地震道时窗内能量比属性特征检测地震初至时间的新方法

精确地估算地震道的初至时间在地震资料的处理和解释中十分重要。对地震初至拾取有帮助的主要是瞬时属性和时窗属性。由于用瞬时属性特征拾取地震初至易受到噪声的干扰,许云老师及其研究团队将地震属性用于地震自动初至拾取,给出了几种用于初至拾取的地震时窗属性特征的算法。经过试算、比较和分析,指出了地震分形特征初至拾取的不足,提出了地震道时窗内能量比属性特征检测地震初至时间的新方法。该方法能快速和准确拾取初至的起跳时间,抗噪声能力强,合成地震记录试验表明,当随机噪声达75%时,仍能准确拾取初至时间,实际地震资料试算显示,其正确率达90%左右^[30]。

5. 给出了速度分布统计特征与多层构造反射传递函数之间的关系

地震拟测井或称地震近似阻抗测井,是地震记录反演的一种近似解,也是地震岩性解释的一种方法。地震拟测井技术所应用的方法,迄今均以线性模型为基础,这类模型将地震记录道表示为反射系数序列与地震子波之褶积,实质上是一种不遵从波动方程规律的几何地震学模型,因而难以考虑多层构造透过系数的作用以及层间与层内的长程及短程多次反射作用。根据波动传播规律,必须采用一种非线性模型来描述多层构造才能使所采用的地震模型符合于物理规律。

许云老师在其论文《速度分布统计特征与地震拟测井问题》中,根据声测井得出的速度分布统计特征,给出了多层构造反射系数序列的自相关函数形式。在反射系数强度不太大的条件下,导出存在于速度分布统计特征与多层构造反射传递函数之间的一种简单关系,据此,对目前常用的线性地震拟测井处理过程进行了具体分析,指出畸变恒不可免;

在此基础上,提出了实际处理中力求减小畸变的可能途径^[23]。

八、时移地震研究

1. 提出了时移地震资料处理的一般原则及其关键

时移地震主要是利用不同时间采集的地震资料的差异来解释地下储层流体的变化,因此时移地震资料处理有自己的特殊性。为了研究地下储层流体变化所引起的时移地震资料的差异,时移地震必须首先要求时移地震资料在非储层范围内(特别是储层之上)具有重复性或一致性。重复性是时移地震勘探成败的关键。

为了尽可能地减少或消除由非储层因素引起的差异,时移地震资料处理总的要求是相对振幅保持处理、高信噪比处理和一致性处理。许云老师及其研究团队在分析了影响时移地震资料重复性的因素后,给出了时移地震资料处理的一般原则,即:①调查影响时移地震资料非重复性的原因;②保持处理流程的一致性;③尽量保持相同的偏移距范围和覆盖次数;④仔细选择偏移速度和偏移算法;⑤合理选择处理模块;⑥必须进行互均衡处理;⑦尽可能进行零时重复性试验。通过对油田多个先导性试验中所使用的资料处理流程的分析,对时移地震处理的一般原则有了进一步的认识。他最后指出互均衡是时移地震资料处理的关键^[28,31]。

2. 对时移地震资料解释方法进行了归类总结分析

时移地震资料解释可以看成是一个动态油藏描述过程。时移地震资料解释不仅要把井位处的储集层信息推广到井间数据体,而且要通过诸如差异性、相似性技术,储集层描述,储集层模拟和地震模拟等分析手段识别储集层中的流体驱替和泄油路径,产生动态油藏流体特性的直接图像,以识别剩余油区。

根据目前常见的一些时移地震资料解释结果,许云老师及其研究团队将时移地震资料解释方法分成直接分析法、地震属性分析方法和动态储集层描述方法,并对时移地震资料解释的直接分析方法和地震属性分析方法进行了详细讨论。直接分析法包括层间时差分析法、振幅分析法、速度分析法和频谱分析法,其基本特点是利用单个地震属性差值对时移地震资料进行解释。地震属性技术分析包括地震属性特征的提取、优化、标定和聚类分析4个方面的内容,它根据地震瞬时属性、层间属性和平面属性的差值的线性或非线性的优化方法对时移地震资料进行分析,以预测储集层特征和储集层流体性质及其变化,增强对油藏的监测能力^[29]。

如上所述,许云先生在勘探地震学科的众多方面都进行了卓有成效的理论研究、方法试验和应用推广,产生了众多研究成果。这些研究成果不仅为工业界提供了有力的技术支撑,同时也推动了勘探地震相关研究方向的不断发展;在一系列的科学研究过程中,还培养了一大批硕士、博士研究生,为我国油气地震勘探技术的发展输送了大批人才。

值此许云老师米寿之际,祝许老师身体健康,我们共同期待白寿与茶寿再相聚。

本书编委会

目 录

前 言

偶然干扰背景上分辨弱地震波的统计判断方法	许 云 (1)
三维速度分布规律的确定	许云 (译) (15)
速度分析的现状和发展	许 云 (23)
广义绕射变换	许 云 (37)
时间剖面方程与反射界面曲率影响	许 云 (56)
地震层状构造理论与地震模型	许 云 (68)
岩性革命与波动理论	许 云 (83)
反射波的频谱比	唐文榜 许 云 (94)
速度分布统计特征与地震拟测井问题	许 云 (104)
非线性层状构造理论的模型试验研究	唐文榜 许 云 (116)
地震走时 CT 波前追踪	刁 顺 杨慧珠 许 云 (126)
地震衍射 CT 中的震源函数与入射场	刁 顺 杨慧珠 许 云 (131)
弹性波衍射 CT	刁 顺 杨慧珠 许 云 (138)
TI 介质裂纹散射研究	刁 顺 杨慧珠 许 云 (146)
地震反射波波前法射线追踪	张霖斌 许 云 乌达巴拉 曾校丰 (154)
有偏 VSP-AVO 反演理论研究	王晓华 许 云 (160)
最大熵走时波形层析成像	樊计昌 许 云 乌达巴拉 杨 健 (171)
高斯束射线法在二维非均匀介质复杂构造中的应用	吴立明 许 云 乌达巴拉 (179)
地震资料处理的分数维图像方法	詹治田 E. B. Karus 许 云 (188)
波动方程正反向延拓滤波	艾印双 郑天愉 许 云 (193)
地震势能剖面	王 赞 许 云 王妙月 (201)
保持振幅特征的近炮点多次波消除方法	徐常练 许 云 (208)
速度随炮检距变化 (VVO) 分析	徐常练 许 云 乌达巴拉 (213)
四维地震资料处理及其关键	庄东海 肖春燕 许 云 乌达巴拉 王 丹 黄 刚 (222)
约束法分解 P-L 变换压制多次波	曾友爱 许 云 (232)
地震道时窗属性特征检测初至时间的研究	庄东海 许 云 乌达巴拉 (241)