刘斌. 基于逆时偏移的浅水自由表面多次波成像技术 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(5): 83-92.

LIU Bin. Free surface multiple imaging technology of shallow water based on reverse time migration[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(5): 83-92.

基于逆时偏移的浅水自由表面多次波成像技术

刘斌

(中石化地球物理公司科技研发中心,南京 211110)

摘 要:浅水环境中,多次波广泛发育且很难压制。与一次有效波相比,多次波具有反射角小、 传播路径长、照明范围广等优点,如何较好地处理浅水自由表面多次波是海洋地震资料处理 的重要环节。本文改变将多次波当作噪音进行压制的做法,实现对其有效利用。首先基于确 定性水层多次波压制(DWD)技术加自由表面多次波压制(SRME)技术联合实现对于浅 水自由表面多次波与有效反射波的良好分离;然后利用分离的有效波通过反馈环理论实现不 同阶次多次波的预测;最后基于成像精度更高的逆时偏移成像技术,实现不同阶次多次波的 分阶成像。模型资料和实际资料的试处理结果表明,组合分离方法实现了对浅水自由表面多 次波与反射波的良好分离,而分阶成像既避免了成像过程中串扰嗓音的影响,又通过利用不 同阶次多次波进行成像,扩大了成像照明范围,提升了浅水发育区域地震资料的成像质量,实 现了对浅水自由表面多次波的有效利用。

关键词:浅水区域;自由表面多次波;DWD技术;SRME技术;多次波逆时成像 中图分类号:P631 文献标识码:A **DOI**:10.16028/j.1009-2722.2022.304

0 引言

中国的大部分海上油田分布在浅水海域,其中 产油的核心区域渤海海域平均水深只有 20 m,东海 的主要产油海域水深也在 200 m 以浅^[1]。在海洋地 震勘探中,由于海底、海水面是强反射界面,地震波 进入水层后便会在强反射界面之间发生多次反射, 产生各种不同类型的多次波。在水深较浅时,浅水 自由表面多次波的周期性变短,出现的阶数增多, 尤其是在浅水区能量被封锁,多次波能量很强,当 浅水自由表面多次波与一次有效波相互混叠发生 干扰后,会严重影响一次有效波的识别。因此,为 更加精准地勘探浅水海域,所需地震成像剖面的精 确度要求更高。

1 研究现状

目前,对多次波的处理研究方法主要有2类^[2]:

收稿日期: 2022-11-06

①比较常见的多次波压制技术,是基于原始地震中 只有一次波的假设,只对一次有效波进行成像研究, 而将多次波当作噪音分离掉;②将多次波视为有效 信号,对其进行偏移成像处理。这是因为多次波, 尤其是自由表面多次波中也包含了大量地下介质 的有效信息,比一次波传播路径更长、照明范围更 大、覆盖区域更广,能够提供一次反射波所不能提 供的有效信息。所以将多次波作为一种有效波,利 用多次波来进行成像的方法已逐渐成为多次波处 理的一个重要方向。

基于波动类的偏移方法是最为常用的多次波 成像方法,对复杂地下介质成像有良好的适应性^[3-5]。 GUITTON^[6]于 2002年提出基于波动方程的多次 波成像方法。WHITMORE等^[7] 2010年实现了对 一次有效波和多次波的联合成像。2011年,LIU 等^[8]首次将多次波成像技术推广到了双程波偏移 成像中。2014年,WANG等^[9]将一次有效波正向 外推,将自由表面多次波进行逆时延拓,再进行互 相关成像实现了逆时偏移成像,但存在较为严重的 串扰噪音,影响了成像结果。2015年,LIU等^[10]实 现了南海实际地震数据的多次波偏移成像,首次实 现了对南海多次波的成像方法研究,获得了良好的

资助项目: 中石化项目"单点高密度地震采集技术研究"(JP18024-1) 作者简介: 刘斌(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理采集方法及 管理方面的研究工作. E-mail: 34253534@qq.com

成像结果。同年宋鹏等^[11] 通过分析多次波逆时偏移的原理和串扰噪音假象的产生机制,提出了多次波分阶逆时偏移成像方法,对多次波偏移成像方法 中常见的串扰噪音进行了有效压制。2016年,刘伊 克等^[12]将分阶多次波成像与最小二乘逆时偏移方 法相结合,实现了控阶的多次波成像。2019年,高 智伟^[13]在针对多次波成像方法的研究中,将基于 SRME 方法的多次波分离方法与多次波逆时偏移 结合,发展了多次波分阶逆时偏移成像技术。

从国内外研究现状来看,针对浅水区域的自由 表面多次波成像研究很少。原因在于浅水区域多 次波类型多样,既有在海水和海底之前来回传播的 海底鸣震,又有和海水层相关的短周期、长周期自 由表面多次波,还有和海底以下强反射层相关的多 次波等,如果直接对其进行成像,不同类型多次波 的成像串扰噪音太严重。因此,本文针对浅水发育 的多次波,借鉴前人多次波成像思路,先做分离再 进行成像,以此实现对于浅水多次波的良好处理。 由于不同的分离方法都存在一定的应用局限性,难 以单独实现对浅水自由表面多次波的有效压制,因 此,本文针对浅水水域发育的不同类型的多次波, 开展了组合分离研究,主要是采用确定性水层多次 波压制(DWD)加自由表面多次波压制(SRME)组 合分离技术,发挥不同分离方法的优势,完成对于浅 水多次波的良好分离,获得有效波记录;然后通过 反馈环理论实现利用分离后的有效波重构不同阶 次的多次波;最终,利用成像精度更高的逆时偏移 成像技术,实现对于不同阶次多次波的分阶偏移成像。

2 一次波与多次波分离技术

针对浅水水域不同类型的多次波开展组合压 制技术的研究,发挥不同压制方法的优势,完成对 于浅水多次波的良好压制。首先,采用 DWD 技术 实现对于浅水区发育的短周期多次波进行压制,然 后采用 SRME 方法对长周期自由表面相关多次波 实现衰减,通过 2 种方法联合实现对于浅水海域多 次波的良好压制。

2.1 确定性水层多次波压制(DWD)技术

确定性水层多次波分离方法(DWD)是一种预 测相减的多次波压制方法,非常适合浅水环境的资 料处理;相对于常规的反褶积方法,本文方法可以 有效避免反褶积方法给有效信号带来的损伤,具有 更好的保幅性。此外,本文方法不需要进行近偏移 距的插值,便可以实现对浅水短周期多次波的有效 压制,弥补 SRME 方法对短周期多次波压制效果较 差的问题。

该方法的实现过程是:①首先应用近道自相关 实现海底反射时间拾取,对地震数据进行拉东正变 换;②在拉东域计算海底多次波周期,通过波场延 拓的思路将地震数据下延一个多次波周期,并与反 射系数相乘得到预测的多次波模型;③拉东反变换 后得到时间域的海底多次波模型,在时间域与原始 地震记录通过扩展均衡伪多道匹配技术实现两者 的自适应相减,即可完成对于短周期多次波的压制。 整个压制过程如图1所示。该方法需要水速、水深 等信息,且假设是一维层状介质或者速度沿横向缓 变化以及介质分界面沿横向缓变化的介质。



图 1 DWD 方法压制多次波原理 Fig.1 Principle of multiple-wave suppression using the DWD method

2.2 自由表面多次波压制(SRME)技术

2.2.1 SRME 压制自由表面多次波方法原理

自由表面多次波压制(SRME)方法是一种基于波 动方程压制多次波的方法,其压制多次波实现过程 分为多次波模型的预测和自适应匹配压制多次波 2步。首先预测获得多次波模型,然后将预测得到的 多次波模型与原始地震数据进行自适应匹配相减, 最终得到多次波压制后的地震数据。该方法对长 周期多次波有良好的压制效果。其具体原理如下^[14]:

首先假设存在无限带宽的平面波向地下传播, 产生包含所有地震记录的地层脉冲响应*x*₀(*t*)。形 成的一阶自由表面多次波(*m*₁(*t*))可以表示为:

$$m_1(t) = -x_0(t) \times x_0(t) \tag{1}$$

式中:等号右边的负号代表自由表面的反射系数为 -1。同理,二阶表面多次波表示为:

 $m_2(t) = -x_0(t) \times m_1(t) = x_0(t) \times x_0(t) \times x_0(t) \quad (2)$

由此类推,包含所有自由表面多次波的地震波 总体响应*x*(*t*)就可以表示为: $x(t) = x_0(t) - x_0(t) \times x_0(t) + x_0(t) \times x_0(t) \times x_0(t) - \cdots$ (3)

根据褶积定理,可以由上式推导出不含自由表 面多次波的地层脉冲响应为:

$$x_0(t) = x(t) + x(t) \times x(t) + x(t) \times x(t) \times x(t) + \cdots$$
(4)

当考虑震源的子波特性时,消除自由表面多次 波的地震记录可以表示为:

$$P(t) = d(t) + s^{-1}(t) \times d(t) \times d(t) + s^{-1}(t) \times s^{-1}(t) \times d(t) \times d(t) \times d(t) + \dots$$
(5)

式中: d(t)为实际地震记录;

s(t)为震源子波;

P(t)为消除自由表面多次波的记录。

2.2.2 SRME 方法预测自由表面多次波

根据多次波的传播路径,任何自由表面多次波 都可以看做是由几个一次波连接。如图2所示, abc即为一阶多次波示意图,震源从 a 点被激发,到 达海平面点 b 时发生反射继续向下传播,在检波点 c 接收到一阶自由表面多次波信号,同时可以看作 是由2个在海平面相连的一次波组成, ab 表示从 a 点激发出地震波,在 b 点检波器接收到 a 点激发出 的一次波, bc 表示从 b 点激发出地震波,在 c 点检 波器接收到 b 点激发出的地震波, abc 表示的一阶 自由表面多次波可以看作是由 2 个一次波褶积而 成,将符合此条件的相应一次波褶积后相加,即可 得到所有一阶自由表面多次波。



图 2 自由表面多次波生成示意图



根据分析可知,自由表面多次波可以由一次波 构建,据此由一次波作为初始构建出不同阶次的自 由表面多次波,如一阶自由表面多次波可以由一次 波与自身进行褶积,将一次波进行处理构建出一阶 自由表面多次波,以此类推,构建出高阶的多次波, 这也就是基于 SRME 方法的分阶自由表面多次波 预测方法。此方法的优点是无需速度场,不需要任 何先验信息,完全数据驱动,适用于实际生产资料 的处理。

3 基于逆时偏移的浅水多次波成像 技术

基于双程波动方程的逆时偏移(RTM),具有不 受地下构造倾角和偏移孔径限制等优点,在对大倾 角构造、垂直断层等复杂地质构造成像时有较好的 成像效果。本文将该方法应用到了多次波的偏移 成像当中。

为减少不相干成像串扰噪声的干扰,本文采 用分阶多次波逆时偏移成像技术完成对于多次波 的偏移成像处理,分阶多次波成像的具体实现过 程为:将第 n 次反射的多次波作为正向传播波场, 而将 *n*+1 次反射的多次波作为逆时延拓波场,采 用互相关成像条件实现两者的相关成像,其成像 公式为:

$$Image_{real}(x, y, z) = \sum_{t=0}^{l_{max}} [P_F(x, y, z, t) \times M_B^1(x, y, z, t) + M_F^1(x, y, z, t) \times M_B^2(x, y, z, t) + M_F^2(x, y, z, t) \times M_B^3(x, y, z, t) + M_F^3(x, y, z, t) \times M_B^4(x, y, z, t) + \cdots]$$
(6)

式中: Image_{real}(x, y, z, t)表示真实的多次波成像 结果;

 $P_{\rm F}(x,y,z,t) \times M^{\rm l}_{\rm B}(x,y,z,t)$ 表示一阶自由表面多次波逆时偏移成像结果,即为一次有效波正向外推与一阶自由表面多次波逆向延拓进行互相关成像的结果;

*M*¹_F(*x*,*y*,*z*,*t*)×*M*²_B(*x*,*y*,*z*,*t*)表示二阶自由表面多次波逆时偏移成像结果,即为一阶自由表面多次波正向外推与二阶自由表面多次波逆向延拓进行互相关成像的结果。

依次类推获得更高阶的自由表面多次波逆时 偏移成像结果,各阶次成像结果叠加即为自由表面 多次波分阶逆时偏移结果。虽然原则上自由表面 多次波阶次可以无限延伸,但在实际的地震勘探过 程中,能量会随着阶次的增高而衰减,高阶次多次 波能量微弱,几乎无法识别,因此本文主要利用了 有效波和二阶以内的自由表面多次波进行了分阶 逆时成像。本文自由表面多次波分阶逆时成像的 具体实现流程为:

(1)基于 DWD+SRME 方法压制自由表面多次 波,获得有效的反射波记录,基于 SRME 技术由有 效波预测获得一阶自由表面多次波,由一阶自由表 面多次波预测获得二阶自由表面多次波,以此类推 获得各阶浅水自由表面多次波记录。

(2)基于有效波和不同阶次多次波的分阶逆时 偏移成像,获得利用多次波的成像结果。要想获得 不受串扰噪音影响的成像结果,需要利用 n 阶和 n+1 阶次的多次波对应相关成像。

4 模型试算和实际资料试处理

为验证本方法的正确性、有效性和适应性,本 文基于多层平层模型和实际资料进行了成像试算, 取得了良好的效果。

4.1 多层平层浅水模型

多层平层浅水模型的速度模型如图 3 所示, 共计 7 层。第 1 层为水层,水深只有 50 m,速度为 1 500 m/s,下方地层速度设置随深度逐渐增大,最 大速度 3 700 m/s,模型大小为 150 m×1 000 m,横向 间距设置为 2.5 m,纵向间距设置为 5 m,共 5000 个





采样点,单边放炮,共计 61 炮、61 道,接收时间为 1 s,同样选择 60 Hz 的雷克子波正演。

对于该模型进行有限差分正演,获得去除直达 波的纯有效波炮集记录和含多次波的炮集记录如 图 4 所示。可以看到,含有多次波的炮集上多次波 的同相轴与一次有效波的同相轴发生混叠,两者互 相干扰无法清晰分辨。

首先仅利用单一的 SRME 方法进行浅水自由 表面多次波的压制,图 5 为压制多次波后的记录。 可以看到,单一 SRME 方法压制多次波的剖面上短 周期多次波无法彻底压制(如红色箭头所示位置), 而对长周期浅水自由表面多次波得到了比较好的 压制(如黄色箭头所示位置)。



图 4 正演的不同炮集记录

Fig.4 Different shot records of the modeling





为获取较好的浅水自由表面多次波压制效果, 采用本文提出的 DWD+SRME 组合方法对于该模 型进行浅水多次波的压制。第1步,利用 DWD 方 法来进行压制处理,图 6 为压制多次波前后的单炮 记录对比图,可以看到,对于 SRME 方法压制效果 较差的短周期多次波,DWD 方法有较好的压制效 果。能量较强的短周期浅水自由表面多次波得到 了明显压制(如图 6a 红色箭头所示),有效波组变得 更为突出,但是长周期多次波还是没有实现全部压 制(如图 6b 黄色箭头所示)。

在 DWD 方法压制多次波之后,进而采用 SRME 方法实现残留多次波的进一步压制。图 7 为经过 该方法压制前后的单炮记录对比,可以看到长周期 的浅水自由表面多次波得到了较好的压制,资料信 噪比得到了进一步提升。

将组合方法分离浅水相关多次波的最终成像 结果与仅用 SRME 方法分离多次波的结果进行对 比(图 8),可以明显看到,使用 DWD+SRME 组合压 制浅水自由表面多次波的方法优于 SRME 的单一 压制方法,很好地实现了对于浅水发育的各种多次 波的良好衰减,获得了高品质的有效波记录。

基于 SRME 方法将组合压制多次波后的有效 波记录进行一阶多次波的预测(图 9a),为验证采用 组合方法去除多次波的效果,利用压制多次波后的 一次有效波进行一阶多次波预测,将正演得到只有 一次波的记录同样做一阶自由表面多次波的预测 (图 9b),对比可知,两者预测的一阶浅水自由表面 多次波基本一致,再次验证了组合压制浅水自由表 面多次波的正确性和有效性。

基于压制多次波的有效波,联合预测的一阶多次波,实现一阶多次波逆时成像,将压制多次波后的一次波波场作为震源波场,将一阶浅水自由表面多次波作为接收波场进行互相关成像,获得一阶浅水自由表面多次波的成像结果(图 10a)。与有效波逆时偏移成像结果(图 10b)对比,一阶多次波成像可以获得比有效波逆时偏移成像更为宽广的照明范围,其成像范围更大,且在相同偏移距大小情况下,浅层边界处成像效果好于有效波的成像结果(图 10 矩形框所示)。

4.2 实际资料试处理

模型资料试算验证了利用本文方法进行多次 波成像的正确性和有效性。为进一步验证本文方



图 6 确定性水层多次波压制前后单炮记录对比

Fig.6 Comparison of single shot record before and after suppression by DWD method

















Fig.10 Comparison between first-order multiple imaging and effective wave imaging

法对实际资料的适应性,选取了某工区的浅水实际 资料,对其进行了多次波与有效波分离以及基于不 同阶次多次波的分阶成像。

该工区水深范围为 10~28 m。由于工区水深较 浅,因此发育了大量多次波,其中自由表面多次波 为主要的多次波成分。本文从实际资料中选取了 340 炮满覆盖的数据进行了多次波压制与分阶成像 研究,每炮 408 道接收,道间距 12.5 m,最大偏移距 为 5258 m,记录纵向时间采样 2 ms,记录时间长度 6 s,采用单边放炮的方式进行激发,炮间距 25 m。 在去多次波前进行了涌浪、侧面干扰、线性干扰等 噪音的去除,噪声去除过程中注意不破坏多次波的 传播特性。

对于该工区实际资料,由于横向偏移距较大,

在采用 DWD+ SRME 组合压制短周期多次波和长 周期近偏移距多次波后,又继续采用高精度 Radon 变换,实现对于残留的远偏移距多次波进行了压制, 以获得效果更好的有效波记录。图 11 是组合去噪 前后的单炮记录效果对比,可以看到,组合去噪方 法很好的实现了对于浅水多次波的良好压制。

在组合压制多次波后,对于压制多次波后的有效波进行了基于 SRME 方法的一阶多次波预测。由图 12a 有效波预测得到的一阶多次波如图 12b 所示。

基于压制掉多次波后的有效波和联合预测的一 阶多次波,实现了一阶多次波逆时成像,将分离多次 波后的一次波波场作为震源波场,将一阶浅水自由 表面多次波作为接收波场进行互相关成像,获得了 基于一阶浅水自由表面多次波的成像结果(图 13a)。





Fig.11 Comparison of results before and after multiple suppression by combination method of actual data



图 12 实际资料压制多次波后的有效波及预测的一阶多次波





图 13 实际资料一阶多次波与有效波成像结果对比



与压制多次波后的有效波直接逆时偏移成像结果 (图 13b)对比,一阶多次波成像可以获得比有效波 逆时偏移成像更为宽广的照明范围,其成像范围更 大(如图中矩形框所示)。而与含有多次波记录直 接进行逆时成像结果(图 14)相比,可以看到,直接 对于含多次波记录进行成像存在大量串扰噪声,整 个剖面成像精度受到很大影响,而一阶浅水自由表 面多次波逆时偏移成像结果(图 13a)成像层位准确, 同相轴清晰。由此可知,基于逆时偏移的多次波分 阶逆时偏移成像方法能够消除串扰噪声,其成像范 围更大、成像效果也更好。



5 结论

本文基于确定性水层多次波压制方法(DWD)

以及自由表面多次波压制技术(SRME)联合实现浅 水一次波和自由表面多次波的分离,各取所长,发 挥两种方法的优势对多种类型的浅水多次波实现 了良好的分离,获得了有效波的记录。然后基于自 由表面多次波预测技术,由有效波预测重构各阶多 次波,实现了不同阶次多次波的预测。最后,基于 有效波和多次波的逆时偏移分阶成像,获得利用多 次波进行偏移成像的成像结果。通过模型资料和 实际资料试处理,获得结论如下:

(1)基于 DWD 和 SRME 的多次波分离压制方 法能联合实现对于浅水自由表面多次波的有效压 制,自由表面多次波处理方法 SRME 对长周期多次 波有良好的压制效果,但对浅水短周期自由表面多 次波的压制效果较差。而 DWD 技术对浅水与水层 相关的短周期多次波有很好的适应性,适合短周期 多次波压制。

(2)基于 SRME 技术可以实现利用有效波对不同阶次的自由表面多次波的预测,基于波动理论的 逆时偏移方法最终实现了不同阶次浅水自由表面 多次波的成像。分阶成像能够有效避免逆时偏移 中不相干多次波互相关成像产生的串扰假象,提高 了地下构造的成像质量,获得较为精确的多次波分 阶成像结果,实现了对浅水自由表面多次波的有效 利用,同时分阶成像能够获得相较于一次波逆时偏 移更广的照明范围和更大的成像区域,且对于中浅 层成像相对有效波成像精度更高。

参考文献:

[1] 徐强. 浅水多次波衰减处理技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2018.

- [2] VERSCHUUR D J. 地震多次波去除技术的过去、现在和未 来[M]. 北京:石油工业出版社, 2010.
- [3] YU J. Joint migration of primary and multiple reflections in RVSP data[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 21(1): 2373-2376.
- [4] GLOGOVSKY V, LANDA E, PAFFENHOLZ J. Integrated approach to subsalt depth imaging [J]. Leading Edge, 2002, 21(12): 1217-1223.
- [5] HUANG T, ZHANG Y, ZHANG H Z, et al. Subsalt imaging using TTI reverse time migration[J]. The Leading Edge, 2009, 28(4): 448-452.
- [6] GUITION A. Shot-profile migration of multiple reflections [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2002(44): 1296-1299.
- [7] WHITMORE N D, VALENCIANO A A, SLLNER W, et al. Imaging of primaries and multiples using a dual-sensor towed streamer[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010(1): 1-2.
- [8] LIU Y, XU C, JIN D, et al. Reverse time migration of multiples for subsalt imaging RTM of multiples[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30(1): 3326-3331.
- [9] WANG Y, ZHENG Y, ZHANG L, et al. Reverse time migration of multiples: Eliminating migration artifacts in angle domain common image gathers[J]. Geophysics, 2014, 79(6): 263-270.
- [10] LIU Y K, ZHU W L, LIJUN M I, et al. Migration of multiples from the South China Sea[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(3): 482-490.
- [11] 宋鹏,朱博,李金山,等.多次波分阶逆时偏移成像[J].地球物 理学报,2015,58(10):3791-3803.
- [12] 刘伊克,刘学建,张延保,等. 地震多次波成像[J]. 地球物理学报, 2018, 61(3): 1025-1037.
- [13] 高智伟. 多次波逆时偏移方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [14] 邢子浩,潘军,赵俐红,等. SRME技术在浅剖资料多次波压制中的应用[J].地球物理学进展, 2016, 31(3): 1207-1215.

Free surface multiple imaging technology of shallow water based on reverse time migration

LIU Bin

(Sinopec Geophysical R & D Center, Nanjing 211110, China)

Abstract: In shallow water environment, multiples are widely developed but difficult to suppress. How to deal with the shallow free surface multiples is an important part of marine seismic data processing. Compared with the primary effective wave, the multiples have advantages of small reflection angle, wide illumination range, long propagation path, and high resolution. We improved the traditional suppression practice in which multiples are treated as noise. First, based on the deterministic water layer multiple suppression (DWD) technology and free surface multiple suppression (SRME) technology, shallow water free surface multiples and effective reflected waves could be well separated. Secondly, multiple waves of different orders could be predicted using separated effective waves in the feedback loop theory. Finally, based on the reverse time migration imaging technology with higher imaging accuracy, the imaging of multiples of different orders could be achieved. Our trial processing results of model data and actual data show that the combined separation method could well separate multiples from reflected waves at shallow water free surface. The fractional imaging not only avoided the influence of crosstalk noise in the imaging process, but also expanded the imaging illumination range and improved the imaging quality of seismic data in shallow water areas. Therefore, the effective use of shallow-water free surface multiples is realized.

Key words: shallow water area; free surface multiples; DWD; SRME; multiples inverse time imaging