

周含蕊, 宋建国, 宫云良. 两种斜缆采集正演模拟及虚反射压制效果分析[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(3): 319-330.  
doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.03.08.

Zhou HR, Song JG, Gong YL. Effectiveness analysis of forward modeling and ghost suppression for two kinds of variable-depth streamer acquisitions[J]. CT Theory and Applications, 2016, 25(3): 319-330. (in Chinese).  
doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.03.08.

## 两种斜缆采集正演模拟及虚反射压制效果分析

周含蕊<sup>1</sup>, 宋建国<sup>1</sup>, 宫云良<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580  
2. 中海油田服务股份有限公司物探事业部, 天津 300451

**摘要:** 斜缆采集是近些年发展起来的海上采集技术, 主要为了压制虚反射, 获得高品质的宽频地震资料。线形斜缆和弧形斜缆是目前最常用的斜缆类型, 能够获取较多的高低频信息。针对这两种斜缆采集方式, 通过对比不同采集参数的地震记录及其消除虚反射后的数据, 发现弧形斜缆采集观测系统明显优于线形斜缆, 不仅在波场模拟中表现出较好的特征, 而且在虚反射消除的过程中, 引入了较小的噪声, 能够获得较高信噪比的地震资料。分析模型测试的结果, 证明海上地震勘探中更适合采用弧形斜缆。

**关键词:** 斜缆采集; 斜缆正演模拟; Radon 域消除虚反射; 凹陷模型

doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.03.08 中图分类号: O 242; P 631 文献标志码: A

斜缆采集方法是近些年国内外专家学者研究的热点。斜缆宽频采集技术是为了提高海上地震原始资料品质而发展起来的。在传统的海上水平缆采集中, 电缆水平放置, 各个检波器深度固定不变, 因而存在固定的陷波点, 后续处理中往往难以消除该陷波点。在斜缆地震勘探中, 电缆的检波器深度随着炮检距而呈现有规律地变化, 使得不同炮检距检波器的陷波点发生移动, 不同炮检距资料的频带相互补充, 能够获得较多的高低频信息, 高频信息有助于提高地震资料的分辨率, 低频信息能够提高深层成像效果。从海上地震资料处理的角度来看, 相对比水平缆采集而言, 斜缆采集能够获得更多来自海底的反射信息, 可以较大程度压制海上勘探中不可避免的虚反射, 从而拓宽频带的有效范围, 提高地震资料分辨率和成像精度。

最近几年, 国内外相关专家学者相继对斜缆采集进行了深入研究与应用, 取得了较大发展。斜缆采集数据的处理方法最早是由 Soubaras<sup>[1]</sup>于 2010 年提出, 该方法是先将斜缆采集的地震数据分别进行常规偏移和镜像偏移, 之后对两个偏移后的数据进行反褶积, 从而获得压制虚反射后的地震记录。随后, Soubaras 等<sup>[2-6]</sup>发展和完善了该方法。Lin 等<sup>[7-8]</sup>根据斜缆数据提出了一套优化的处理流程用于高效地消除检波器虚反射和多次波, 建立速度模型, 提高地震资料的分辨率。Sablon 等<sup>[9-10]</sup>运用斜缆数据对深水和浅水环境进行多次波压制, 在处理过程中, 使用了 Tau-P 域反褶积和 SRME 方法, 消除了检波器虚反射。Wang 等<sup>[11]</sup>在 2013 年发展了 Radon 域消除虚反射的方法, 该方法使用的

是原始数据和镜像数据，根据最小二乘反演，最终得到压制虚反射后的地震数据。Pooler<sup>[12]</sup>在 2013 年发展了基于斜缆 Radon 域消除虚反射方法，利用斜缆和水平缆检波器几何关系，得到适用于斜缆数据的 Radon 域正反变换算子，针对预测出的虚反射记录进行匹配相减。2014 年，张振波等<sup>[13]</sup>、张振波等<sup>[14]</sup>，分别在珠江口盆地和白云凹陷深水复杂构造区，应用了斜缆宽频采集技术进行实际勘探。从获得的勘探效果看出，斜缆采集技术使虚反射得到较大程度的压制，增加了高低频能量，拓宽了有效频带范围，提高了地震资料分辨率和复杂构造的成像效果。

在海上地震勘探中，主要有两种常见的斜缆类型<sup>[15]</sup>。第一种是线形斜缆，这种电缆每个检波器的深度是随着炮检距的增加而线性变化；第二种类型是弧形斜缆，也称变深度缆，该缆上的检波器先随着炮检距的增加呈现弧形变化，到炮检距较大的部分，电缆基本水平，检波器深度不发生变化。

本文在 Soubaras 等<sup>[1-6]</sup>的研究基础上，根据斜缆采集的地震波几何传播特性与正演模拟理论，采用线形和弧形两种不同类型的电缆，分别沉放到不同的深度，使用同一凹陷模型进行正演模拟。最后，利用基于斜缆 Radon 域消除虚反射方法，能够压制检波器虚反射，从而去除频谱中的陷波点，恢复地震资料的低频和高频信息，保留一次波能量。通过对比频谱曲线，综合分析斜缆类型和电缆沉放深度在消除虚反射方面的影响。

## 1 方法原理

### 1.1 斜缆采集的地震波传播特性

以线形斜缆为例，根据斜缆采集的地震波传播示意图（图 1），可计算出一次波和检波器虚反射的走时之差，如公式（1）和公式（2）所示。

在图 1 中，蓝色实线为一次波传播的射线路径，黑色实线为检波器虚反射的传播路径。可以分别推导出一次波走时  $t_p$  和检波器虚反射走时  $t_m$

$$t_p = \frac{\sqrt{x^2 + (2h - h_s - h_r)^2}}{v} \quad (1)$$

$$t_m = \frac{\sqrt{x^2 + (2h - h_s + h_r)^2}}{v} \quad (2)$$

其中， $x$  为炮点到检波器距离， $h$  为水层深度， $h_s$  为炮点深度， $h_r$  为检波器深度，且满足  $h_r = h_s + x \cdot \tan \alpha$ ， $\alpha$  为斜缆的倾斜角度， $v$  为水层速度。根据公式（1）和（2），可得一次波与检波器虚反射的走时之差  $\Delta t$  为

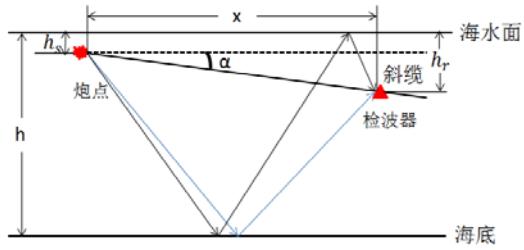


图 1 斜缆采集地震波传播示意图

Fig. 1 The schematic of seismic wave propagation of variable-depth streamer acquisition

$$\Delta t = t_m - t_p = \frac{\left(x^2 + (2h - h_s + h_r)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{v} - \frac{\left(x^2 + (2h - h_s - h_r)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{v} =$$

$$\frac{4}{v} \cdot \frac{1}{\left(\left(\frac{x}{h_r(2h-h_s)}\right)^2 + \left(\frac{1}{h_r} + \frac{1}{2h-h_s}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\left(\frac{x}{h_r(2h-h_s)}\right)^2 + \left(\frac{1}{h_r} - \frac{1}{2h-h_s}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

## 1.2 斜缆正演模拟

检波器是否恰好位于网格点上, 是斜缆正演模拟区别于水平缆正演模拟的主要因素。在水平缆正演模拟中, 检波器是规则排布在每个网格点上, 因此计算每个网格点上的波场值较为容易。但是在斜缆采集中, 检波器的深度随着水深不断变化的, 并不能保证每个检波器恰好位于网格点上, 因此需要在水平缆正演模拟中加入插值算法, 本文使用的是拉格朗日插值。

### 1.2.1 波动方程差分近似

本文采用波动方程有限差分的方法对海上斜缆地震勘探进行正演模拟。首先, 根据二维声波波动方程, 如下式所示

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2(x, z)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

其中,  $u(x, z, t)$  为质点的位移,  $v(x, z)$  为介质的纵波波速。

对上式 (4), 将时间的高阶差分转换为空间差分, 对时间  $t$  进行 Taylor 展开, 可以得到如下两式:

$$u(x, z, t + \Delta t) = u(x, z, t) + \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial t^2} (\Delta t)^2 + \dots + o(\Delta t^{2N+1}) \quad (5)$$

$$u(x, z, t - \Delta t) = u(x, z, t) - \frac{\partial u(x, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial t^2} (\Delta t)^2 + \dots + o(\Delta t^{2N+1}) \quad (6)$$

将式 (5) 和 (6) 相加, 可得

$$u(x, z, t + \Delta t) = 2u(x, z, t) - u(x, z, t - \Delta t) + \frac{\partial^2 u(x, z, t)}{\partial t^2} (\Delta t)^2 + \dots + o(\Delta t^{2N+1}) \quad (7)$$

联立式 (4) 的二维声波波动方程和式 (7) 的时间离散差分公式, 推导出关于时间二阶空间  $2M$  阶精度的差分格式, 如下式所示:

$$u_{i,j}^{n+1} = 2u_{i,j}^n - u_{i,j}^{n-1} + \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x}\right)^2 \sum_{m=1}^M a_m \left[ u_{i+m,j}^n + u_{i-m,j}^n - 2u_{i,j}^n \right] +$$

$$\left(\frac{c\Delta t}{\Delta z}\right)^2 \sum_{m=1}^M a_m \left[ u_{i,j+m}^n + u_{i,j-m}^n - 2u_{i,j}^n \right] \quad (8)$$

### 1.2.2 拉格朗日插值

在常规有限差分对地震波场进行模拟过程中, 计算出来的波场值都是在网格点上, 而在斜缆地震勘探中, 检波器不一定正好全部分布在网格点上, 因此需要将邻近几个网格点的波场值参与运算, 进行插值来计算不在网格点上检波器的波场值。所谓拉格朗日插值方法, 是将一个函数  $P(x)$  的构造转化为  $n+1$  个插值函数  $l_i(x)(i=0,1,\cdots,n)$  的构造。通过推导, 得到  $n$  阶拉格朗日插值公式, 如下式所示:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n l_k(x) y_k = \sum_{k=0}^n \left( \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^n \frac{x - x_j}{x_k - x_j} \right) y_k \quad (9)$$

式中,  $n$  次插值函数  $L_n(x)$  满足  $L_n(x_i) = y_i(i=0,1,\cdots,n)$ ,  $x_i$  为第  $i$  个插值点,  $l_i(x)$  为每个插值点上的函数, 当  $k=i$ ,  $l_k(x_i)=1$ ; 当  $k \neq i$ ,  $l_k(x_i)=0$ 。在进行拉格朗日插值时, 需将所求检波器所在位置插值点位于已知插值点的中间位置。

### 1.3 斜缆 Radon 域消除虚反射基本原理

斜缆数据 Radon 变换消除虚反射的方法<sup>[12]</sup>, 主要根据斜缆炮点、检波点位置关系, 近似一次波与检波器虚反射时差, 得到斜缆 Radon 变换算子。通过最小二乘反演迭代, 利用得到的虚反射变换算子, 预测出斜缆虚反射数据。最后, 进行匹配相减技术, 获得最终消除虚反射的地震记录。

首先, 根据斜缆炮点、检波点位置的几何关系, 近似一次波与检波器虚反射时差, 如下式 (10) 和 (11) 所示

$$\tau_p = (x + \Delta x) p - \frac{\sqrt{h^2 + (\Delta x)^2}}{v} \quad (10)$$

$$\tau_g = (x - \Delta x) p + \frac{\sqrt{h^2 + (\Delta x)^2}}{v} \quad (11)$$

式中,  $\tau_p$  为一次波到达时间,  $\tau_g$  为虚反射到达时间,  $p$  为射线参数,  $x$  表示斜缆检波器的炮检距, 而  $\Delta x$  则表示斜缆检波点对应于海平面检波器的水平距离之差,  $h$  为斜缆检波器的沉放深度,  $v$  为地震波在海水中的传播速度。

由于水平缆 Radon 反变换并没有考虑到波传播的时差问题, 因此, 原始 Radon 反变换公式已不再适用于斜缆数据。根据一次波与检波器虚反射时差, 斜缆 Radon 反变换算子可写成式 (12)

$$L_{ud} = L_u + RL_d \quad (12)$$

其中,  $L_{ud}$  为斜缆 Radon 反变换算子,  $L_u$  为一次波反变换算子,  $L_d$  为虚反射反变换算子,  $R$  为海平面的反射系数。

之后, 使用 Radon 变换公式, 如下式 (13), 代入式 (10)、式 (11) 和式 (12), 通过最小二乘反演方法, 获得  $\tau-p$  域海平面接收无虚反射的地震数据  $p$ 。对该数据使用虚反射反

变换算子, 得到预测的虚反射数据  $p_d$ 。

$$d = L_{ud} p \quad (13)$$

$$p_d = L_d p \quad (14)$$

将原始数据与预测的检波器虚反射数据进行匹配相减, 最终获得消除虚反射的斜缆数据。

## 2 模型试算

为了研究线形和弧形两种类型斜缆参数对地震波场的影响, 选取一个凹陷模型, 速度模型如图 2 所示。总模型大小为  $1101 \text{ m} \times 1500 \text{ m}$ , 网格大小为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 水层深度  $600 \text{ m}$ , 总记录长度  $2.4 \text{ s}$ , 时间采样间隔  $2 \text{ ms}$ , 540 道进行接收, 道间隔  $2 \text{ m}$ 。对两种斜缆分别使用不同电缆沉放深度进行数值模拟, 从而分析地震记录中的差别。针对图 2 的模型, 设计两种斜缆观测系统, 分别如图 3 所示。线形和弧形斜缆, 选取的震源和电缆参数设置如表 1 所示。

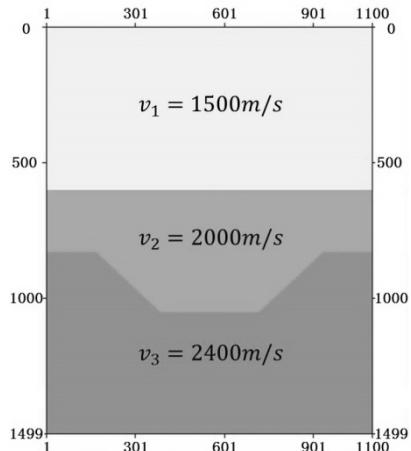


图 2 速度模型图  
Fig. 2 Velocity model

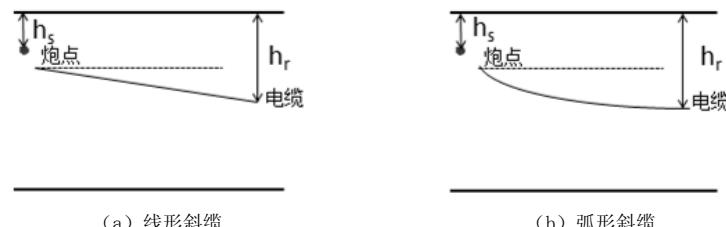


图 3 两种类型斜缆观测系统  
Fig. 3 Two kinds of variable-depth streamer acquisitions

表 1 线形和弧形斜缆的震源和电缆参数设置

Table 1 Parameters setting for sources and receivers of variable-depth streamers

电缆编号	震源沉放深度 $h_s/\text{m}$	电缆沉放深度	
		起始深度/ $\text{m}$	终止深度 $h_r/\text{m}$
1			15
2	3	5	35
3			55

### 2.1 两种斜缆的正演地震记录对比

针对两种不同类型斜缆的采集观测系统(图 3)、表 1 所示参数设置和速度模型(图 2),

利用斜缆正演模拟, 获得不同电缆沉放深度的地震记录如图 4 和图 5 所示。

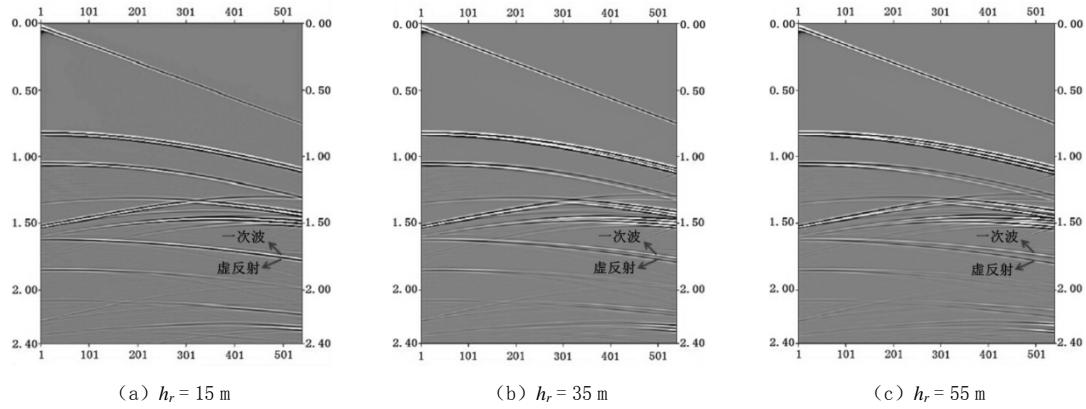


图 4 线形斜缆沉放深度  $h_r$  的正演模拟地震记录

Fig. 4 Seismic forward records of linear variable-depth streamer with different  $h_r$

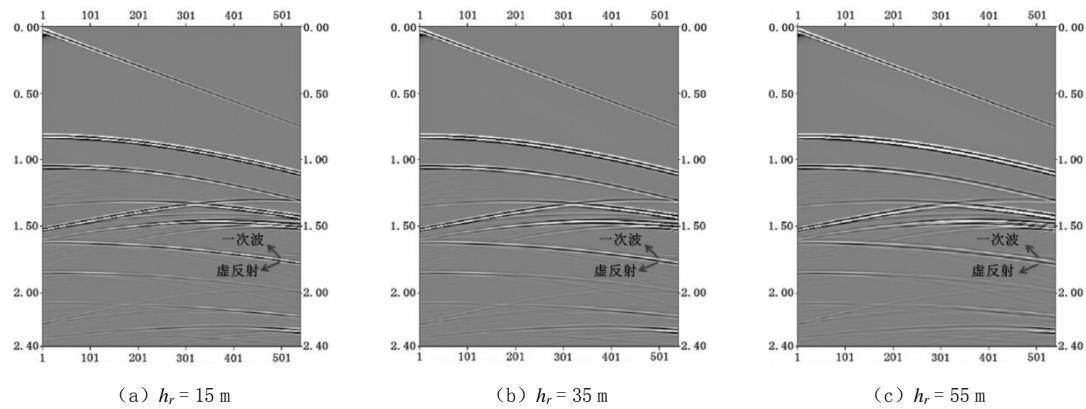


图 5 弧形斜缆沉放深度  $h_r$  的正演模拟地震记录

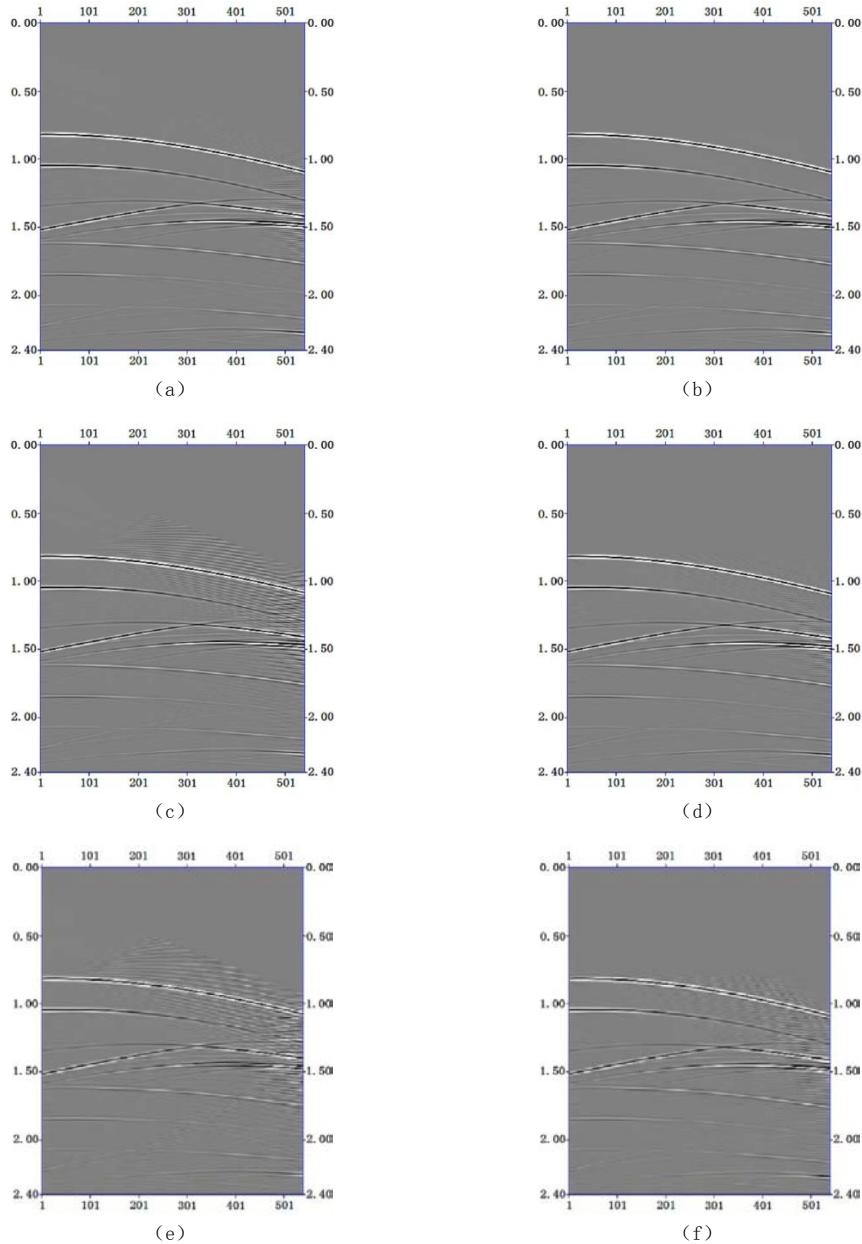
Fig. 5 Seismic forward records of curved variable-depth streamer with different  $h_r$

在海上勘探中, 由于震源和检波器均在海面之下, 因此, 震源激发后会出现三种类型的虚反射, 在地震记录中表现为一次波与虚反射混叠在一起, 从而改变一次波的形态, 降低有效波的能量。从图 4 和图 5 箭头标注部分可以看出, 当线形斜缆和弧形斜缆的电缆沉放深度从 15 m 变化到 55 m 时, 两种斜缆地震记录中一次波与虚反射同相轴的分离程度都会随着电缆沉放深度的增加而逐渐增大。

在电缆沉放深度相同的情况下, 将线形斜缆和弧形斜缆的地震记录进行对比发现, 线形斜缆地震记录中一次波与虚反射的同相轴分离程度比弧形斜缆的一次波与虚反射的同相轴分离程度大。从两者的单炮记录中看出, 弧形斜缆的炮记录在远偏移距时, 一次波与虚反射同相轴几乎是平行的 (如图 5)。但是, 线形斜缆在远偏移距时, 两种波的同相轴分离程度仍然会逐渐增加。这也是线形斜缆的缺陷所在, 即当电缆沉放深度增大到一定程度时, 会与下个界面的一次波同相轴相交 (如图 4 (b) 和 (c)), 影响下层有效波的能量和形态, 从而导致在压制虚反射的过程中损失部分有效波。因此, 弧形斜缆比线形斜缆更加适用于海上地震勘探。

## 2.2 消除虚反射的效果对比

使用基于 Radon 域消除虚反射方法, 切除地震记录中的直达波, 针对线形和弧形斜缆的检波器虚反射进行压制, 并对比相同的电缆沉放深度数据, 得到消除虚反射后的地震记录。不同沉放深度的斜缆单炮记录分别如图 6 所示。



(a) (c) (e) 为线形斜缆; (b) (d) (f) 为弧形斜缆; (a) (b) 在  $h_r=15\text{ m}$  时分别为线形斜缆和弧形斜缆地震记录; (c) (d)  $h_r=35\text{ m}$  时分别为线形斜缆和弧形斜缆地震记录; (e) (f)  $h_r=55\text{ m}$  时分别为线形斜缆和弧形斜缆地震记录。

图 6 消除虚反射后的斜缆地震记录

Fig. 6 Seismic de-ghosting records of variable-depth streamers

为了验证虚反射的消除效果, 使用沉放深度为  $h_r = 35$  m 的线形斜缆和弧形斜缆数据, 选取如图 7 (a) 和图 8 (a) 所示的时窗, 对比不同斜缆消除检波器虚反射前后的波形图和频谱曲线, 分别如图 7 (b) ~ (e) 和图 8 (b) ~ (e) 所示。

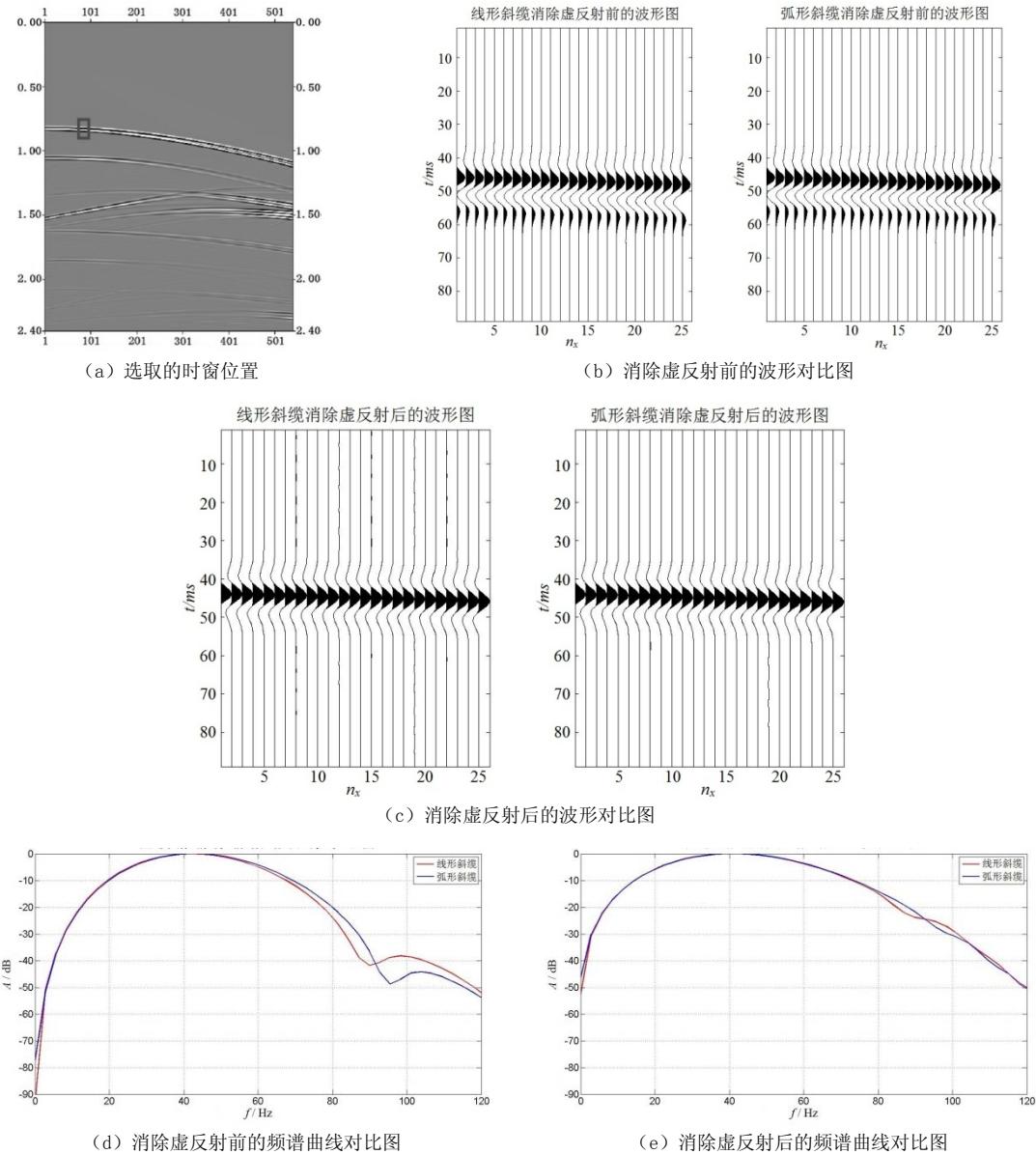


图 7  $h_r = 35$  m 线形斜缆和弧形斜缆消除虚反射前后的特征对比图  
Fig. 7 The linear and curved streamers' comparison of raw data and de-ghosting data,  $h_r = 35$  m

对比图 6 不同斜缆消除虚反射后的地震记录和图 7、图 8 消除虚反射前后的特征对比图中能看出, 无论是线形斜缆还是弧形斜缆, 近偏移距还是远偏移距, 虚反射均得到了较好的消除效果。从图 7 ((b) 和 (c)) 和图 8 ((b) 和 (c)) 的波形图可以看出, 两种斜缆的

检波器虚反射同相轴基本去除, 恢复了一次波的时间、振幅和相位及部分能量, 得到了较为完整和自然的有效波波形, 提高了地震资料的品质。分析图7((d)和(e))和图8((d)和(e))的频谱曲线明显发现, 该方法也明显消除了检波器虚反射产生的陷波点, 恢复了地震数据的低频和高频信息, 拓宽了有效频带的范围, 证明基于 Radon 域消除虚反射的方法在虚反射压制方面有较好的效果。

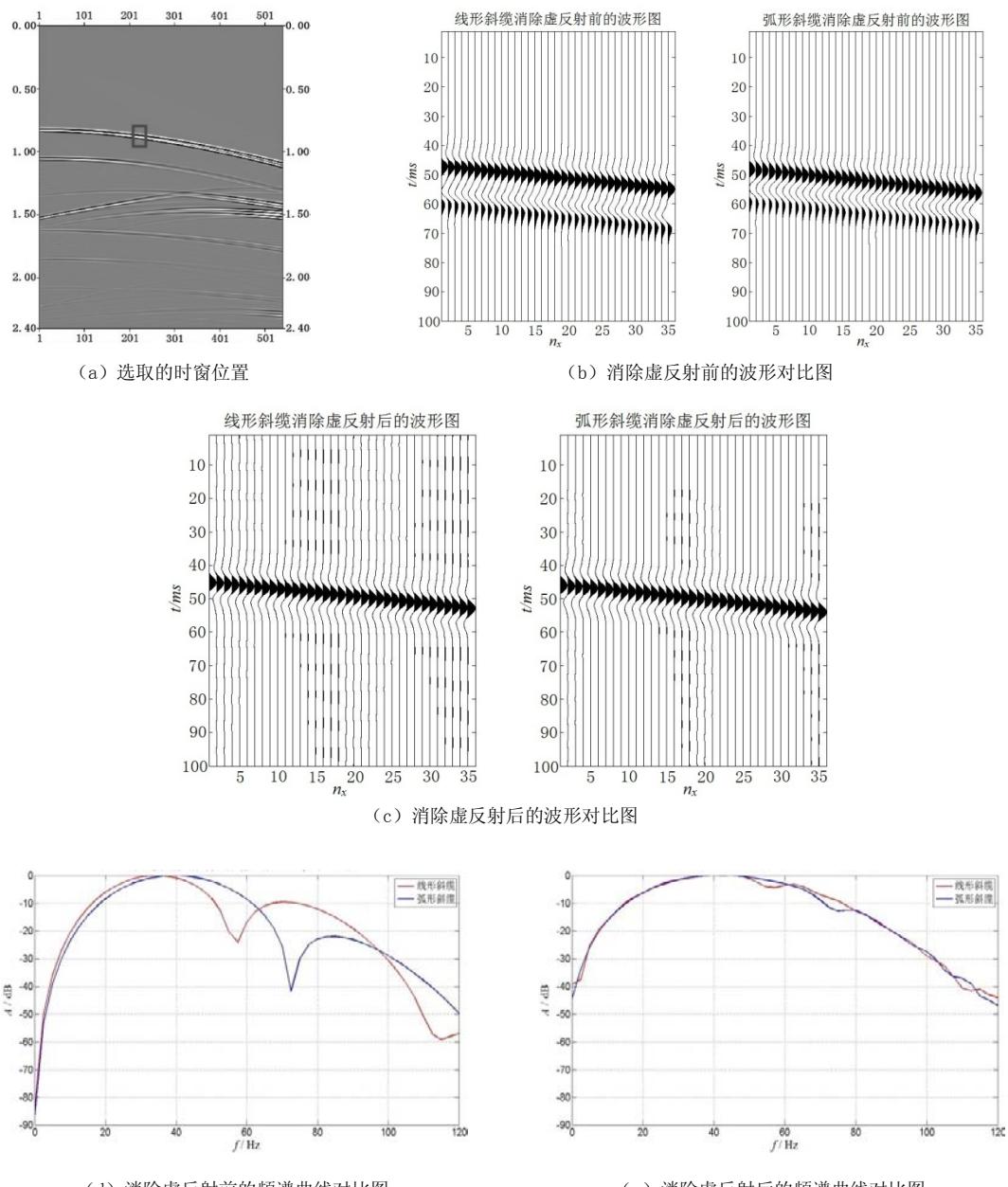


图 8  $h_r = 35$  m 线形斜缆和弧形斜缆消除虚反射前后的特征对比图

Fig. 8 The linear and curved streamers' comparison of raw data and de-ghosting data,  $h_r = 35$  m

但是, 在去除虚反射后的地震记录中, 出现了随机噪声, 降低了地震资料的信噪比, 这是由于算法问题而引入的。观察图 6 发现, 随着电缆沉放深度的增大, 引入的噪声越严重。当两种斜缆沉放深度都为 35 m 时, 对比图 7 (c) 和图 8 (c), 弧形斜缆在去除虚反射的过程中, 引入的随机噪声较小; 而线形斜缆所引入的噪声较大。因此, 本文建议在实际海上地震勘探中尽量使用弧形斜缆。

图 6 (f) 所示的弧形斜缆沉放深度为 55 m, 地震波的尾部已经出现了较明显的随机噪声; 并且随着沉放深度的增加, 引入的随机噪声会越严重, 从而影响后续地震数据的处理效果。根据陷波点出现的频率位置和引入的随机噪声大小并结合工区的实际情况, 选择合适的电缆沉放深度, 就本文凹陷模型而言, 将斜缆沉放深度限制在 50 m 左右。

### 3 结论

本文以凹陷模型为例, 分别使用线形斜缆和弧形斜缆两种采集方式, 对比不同采集参数的正演模拟和 Radon 域消除虚反射记录, 得到如下结论:

(1) 从斜缆模拟的地震记录可看出, 无论是线形斜缆还是弧形斜缆, 随着电缆沉放深度的增加, 一次波与虚反射的同相轴分离程度越来越大。针对同一沉放深度的不同类型斜缆数据来说, 线形斜缆的一次波与虚反射同相轴分离程度比弧形斜缆大; 但是, 当电缆沉放到一定深度后, 线形斜缆地震记录中的虚反射同相轴会与下一地层的有效波同相轴相交, 影响一次波形态和能量。

(2) 从消除虚反射后的地震记录可看出, 基于 Radon 域消除虚反射的方法, 能够压制虚反射同相轴, 恢复一次波能量, 消除频谱中的陷波点, 拓宽有效频带的范围, 虚反射压制效果较好。随着两种斜缆沉放深度的增加, 弧形斜缆引入的随机噪声更小, 压制效果更好; 但是, 无论采用哪种采集方式, 在使用斜缆 Radon 域压制虚反射方法时, 震源和电缆的沉放深度之差都不能太大。

通过对两种斜缆采集方式的正演模拟及消除虚反射的效果分析证明, 在实际海上地震勘探中更适合采用弧形斜缆, 并根据实际勘探情况选择合适的斜缆沉放深度。

### 参考文献

- [1] Soubaras R. Deghosting by joint deconvolution of a migration and a mirror migration[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010, 29(1): 3406–3410.
- [2] Soubaras R, Dowle R. Variable-depth streamer—a broadband marine solution[J]. First Break, 2010, 28(12): 89–96.
- [3] Soubaras R. Variable-depth streamer: Deep towing and efficient deghosting for extended bandwidth[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 289–292.
- [4] Soubaras R, Lafet Y. Variable-depth streamer acquisition: Broadband data for imaging and inversion[J]. Geophysics, 2013, 78(2): WA27–WA39.
- [5] Soubaras R, Dowle R, Sablon R. BroadSeis: Enhancing interpretation and inversion with broadband marine seismic[J]. CSEG RECORDER, 2012, 9: 41–46.
- [6] Soubaras R. Pre-stack deghosting for variable-depth streamer data[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012: 1–5.
- [7] Lin D, Sablon R, Gao Y, et al. Optimizing the processing flow for variable-depth streamer data[J]. First Break, 2011, 29(9): 89–95.

[8] Lin D, Sablon R, Gao Y, et al. Challenges in processing variable-depth streamer data[C]// SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 82–86.

[9] Sablon R, Russier D, Zurita O, et al. Multiple attenuation for variable-depth streamer data: From deep to shallow water[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 3505–3509.

[10] Sablon R, Gao Y, Cavalie A, et al. Processing variable-depth streamer data—first attempt[C]// 73rd EAGE Conference & Exhibition, 2011.

[11] Wang P, Ray S, Peng C, et al. Premigration deghosting for marine towed streamer data using a bootstrap approach in tau-p domain[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 4221–4225.

[12] Poole G. Pre-migration receiver de-ghosting and re-datuming for variable depth streamer data[C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 4216–4220.

[13] 张振波, 李东方. 斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 451–456.  
Zhang ZB, Li DF. Variable-depth streamer seismic acquisition and processing in Pearl River Mount Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 451–456. (in Chinese).

[14] 张振波, 李东方, 轩义华, 等. 白云凹陷深水复杂构造区斜缆地震资料处理关键技术及应用[J]. 石油物探, 2014, 53(6): 657–664.  
Zhang ZB, Li DF, Xuan YH, et al. Variable-depth streamer seismic data processing in deepwater complex structure area of Baiyun Sag[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(6): 657–664. (in Chinese).

[15] Soubaras R. Method and device to acquire seismic data. U.S. Patent, 8593904[P]. 2013-11-26.

[16] 丁洪波, 宋建国. 海上地震资料鬼波机理与消除方法研究[D]. 中国石油大学(华东), 2013.  
Ding HB, Song JG. Multiple elimination research based on variable-depth streamer data[D]. China University of Petroleum (East China), 2013. (in Chinese).

[17] 刘廷旭, 宋建国. 基于偶极子震源的斜缆数据偏移成像方法研究[D]. 中国石油大学(华东), 2014.  
Liu YX, Song JG. Research of migration based on dipole source for variable-depth acquisition data[D]. China University of Petroleum (East China), 2014. (in Chinese).

[18] 谢玉洪, 李列, 袁全社. 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 430–435.  
Xie YH, Li L, Yuan QS. Broadband marine seismic exploration in Qiongdongnan Basin deepwater areas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 430–435. (in Chinese).

[19] 刘喜武, 刘洪, 李幼铭. 高分辨率 Radon 变换方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 8–15.  
Liu XW, Liu H, Li YM. High resolution Radon transform and its application in seismic signal processing[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(1): 8–15. (in Chinese).

[20] 郭全仕, 张卫华, 黄华昌, 等. 高精度 Radon 变换方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 40(6): 622–627.  
Guo QS, Zhang WH, Huang HC, et al. High precision Radon transform method and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 40(6): 622–627. (in Chinese).

# Effectiveness Analysis of Forward Modeling and Ghost Suppression for Two Kinds of Variable-depth Streamer Acquisitions

ZHOU Han-rui<sup>1</sup>, SONG Jian-guo<sup>1✉</sup>, GONG Yun-liang<sup>2</sup>

1.School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2.Geophysical Department, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China

**Abstract:** In recent years, variable-depth streamer acquisition is a kind of seismic exploration technique. The mainly propose of this acquisition is to suppress ghost and obtain high quality broadband seismic data. The commonly used variable-depth streamers are linear streamer and curved streamer, which could obtain more high frequency and low frequency information. By comparing the different parameters of seismic data and de-ghosting data, we found that curved variable-depth streamer data in wave-field analyze showed better characteristics, and have a higher signal-to-noise ratio. That is to say, the observation system of curved variable-depth streamer is superior to the linear variable-depth streamer. According to the result, it is recommended that curved variable-depth streamer is a better choice in the seismic exploration.

**Keywords:** variable-depth streamer; forward modeling of variable-depth streamer; de-ghosting in radon domain; depression model



**作者简介:** 周含蕊 (1991—), 女, 中国石油大学 (华东) 地质资源与地质工程专业硕士研究生, 主要从事各向异性介质地震波传播规律和海上多次波、虚反射的消除方法研究, Tel: 13792489116, E-mail: zhouhanrui2009@sina.com; 宋建国<sup>✉</sup> (1971—), 男, 中国石油大学 (华东) 地球科学与技术学院副教授, 硕士生导师, 主要从事地震资料高分辨率处理与解释理论和方法研究工作, Tel: 18563997376, E-mail: sjg@upc.edu.cn。