

# Design of Shot Depth with Multiple Information Constraints in Hangjinqi Area

Chengzeng Yang<sup>1</sup>, Chunjiang Du<sup>1</sup>, Ru Zhang<sup>2</sup>, Wengang Luo<sup>1</sup>, Xin Nie<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>The Exploration and Development Research Institute, The North China Oil and Gas Branch of SINOPEC, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Well logging Company of North China Petroleum Engineering Company of SINOPEC, Xinxiang Henan

<sup>3</sup>College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: \*niexin\_cugb@126.com

Received: Feb. 7<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 16<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Good explosion effect is one of the important conditions for obtaining high-quality seismic data in desert-grassland area. Because of the thickness and velocity change dramatically in the low-velocity zone, the burial depth of the favorable excitation layer is unstable. The velocity and thickness of near-surface stratification can be obtained from near-surface data, but due to the limited distribution of control points and the limitation of surface survey methods, it is difficult to ensure that the location outside the control points is designed in the favorable excitation layer. In this paper, a design method of shot depth under multi-information constraints is proposed. The near-surface velocity model is determined by multi-information constraints, then the excitation layer velocity of surface area is determined according to the parameters of experimental, and then the optimum shot depth of each point is obtained according to the coordinates of the design shot points. This method can better solve the influence of the inadequate of interpolation accuracy and topographic to the design of shot depth, and improve the condition of seismic and the quality of data.

## Keywords

Near-surface Data, Constrained Inversion, Seismic Acquisition, Shot Depth Design

---

---

\*通信作者。

# 杭锦旗地区多信息约束下激发井深设计

杨城增<sup>1</sup>, 杜春江<sup>1</sup>, 张 儒<sup>2</sup>, 罗文刚<sup>1</sup>, 聂 昕<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>中石化华北油气分公司勘探开发研究院, 河南 郑州

<sup>2</sup>中石化华北石油工程有限公司测井分公司, 河南 新乡

<sup>3</sup>长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉

Email: \*niexin\_cugb@126.com

收稿日期: 2020年2月7日; 录用日期: 2020年3月4日; 发布日期: 2020年3月16日

## 摘 要

激发效果良好是沙漠草原区地震勘探获得高品质资料的重要条件之一, 由于低降速带厚度和速度变化剧烈, 导致有利激发层的埋深不稳定。低测资料可以获得施工点的近地表分层速度和厚度, 但由于控制点分布有限及表层调查方法的局限性, 难以保证控制点之外的激发位置设计在有利激发层内。本文提出了一种多信息约束下激发井深设计方法, 先由多信息约束确定近地表速度模型, 然后依据试验论证参数确定地表类型区域对应的激发层速度, 进而依据设计炮点坐标获得各炮点的最佳激发井深。该方法较好地解决了内插精度不足和地形起伏变化等因素对激发井深设计的影响, 改善地震激发条件, 提高地震资料品质。

## 关键词

低测资料, 约束反演, 地震采集, 激发井深设计

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地震采集是油气地震勘探中的第一道工序, 地震采集是指按照地震采集设计, 在地面激发地震波, 通过地层传播后的地震信号经过放大、滤波和数字转换被地面检波器接收的过程。在井炮地震勘探野外采集中, 需通过合理精确的分线设计保证在有利激发层中进行激发, 因此, 在地震勘探施工中首先需要通过激发试验和近地表调查获得采集区的最佳激发岩性及其空间展布, 以合理设计激发参数[1] [2]。

在地震采集中, 常规确定激发井深的方法是首先进行小折射、微测井和潜水面等表层结构调查[3], 然后通过内插运算得到全区的高速底界面分布, 结合激发试验论证, 进而确定最佳激发井深。该方法在表层结构变化小、高速层速度横向差异不大的地区, 能取得较好的效果[4] [5] [6] [7]。

随着地震勘探技术不断进步, 有很多针对不同区域的激发井深设计成功案例, 比如: 结合微测井运动学及动力学特征进行表层精细解释的三步分层法、基于精细近地表分层和正演模拟的盐岩区激发井深设计原则[8]、非地震和微测井综合火成岩调查方法; 激发井深设计的主要方法有: 基于激发岩性、低降速带厚度、虚反射界面和能量[9]、低频带厚度和地震子波形态等因素的激发设计井深方法[10]; 最佳激

发面法[11]、微测井动力学、正演模拟分析法、近地表模型法、三维空间内插法[12]和逐点激发设计法[13]等。尽管这些方法趋于成熟,但仍存在三个缺陷:① 低测资料的局限性,缺乏相对深层的结构调查;② 表层调查点的个数和分布有限,不能保证内插的准确性;③ 不能适用于高程起伏变化大、表层结构横向变化较大的区域。因此,在地震资料处理中,这些方法的应用受到了限制。本文通过融合研究区的多类近地表信息建立高精度近地表速度模型,利用模型的速度趋势来设计地震采集激发井深,较好地解决了常规方法出现内插精度不足和随地形起伏变化的问题,能够保证地震资料品质、低幅构造[14]和属性预测精度。

## 2. 多信息融合约束反演

### 2.1. 层析反演原理

层析反演静校正技术是一种利用地震初至进行近地表速度反演的方法。广义地讲,反演的目的在于依据模型和实际数据之间的关系,利用观测数据反推模型。在层析反演中,将地质模型假设由离散速度单元组成,每个单元的速度是常速,不同单元的速度不同,初至时间是模型单元和模型慢度的乘积。由于层析反演常常是欠定的,没有准确解,只能求它的最优解。目前层析反演采用正交分解最小二乘算法,该算法占用内存较小、速度适中、收敛快且结果稳定,通过迭代就可以获得稳定的最小均方误差解。首先给定一个初始的速度模型,通过射线追踪计算初至时间,该时间与实际记录旅行时的差被用来计算速度模型的修正量;模型修改后,再计算基于新的速度模型的初至旅行时;这个过程经过多次迭代后,当新模型正演旅行时和实际观测走时残差减小并达到给定精度时,则可近似地认为得到了最终的速度分布。层析反演包括5个步骤:① 初至拾取;② 给定初始速度模型进行射线追踪;③ 正演得到每一道的射线路径和理论走时;④ 计算记录旅行时和基于当前速度模型的初至时间的差;⑤ 通过迭代,计算模型的修正量[15]。

假设地震波从任意一个源点  $S$  到任意一个接收点  $R$  的旅行时为  $t(S, R)$ ,介质的慢度分布为  $s(x, y, z)$ ,传播路径为  $L$ ,那么旅行时可写为如下的公式

$$t(S, R) = \int s(x, y, z) dl \quad (1)$$

因为传播路径  $L$  随介质的速度分布变化而变化,路径  $L$  是一曲线,因此(1)式是一曲线积分,  $dl$  是弧长微元。层析反演时,我们仅知道旅行时  $t$ , (1)式中  $s(x, y, z)$  和  $L$  都是未知的。这实际上为一个非线性反演问题。

现在把反演区域的慢度离散化,假如离散化后的单元个数为  $N$ 。每个单元慢度为一对对应常数记为  $s_1, s_2, \dots, s_N$ , 这样,根据公式(1)第  $i$  条射线的旅行时表示为:

$$t_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j \quad (2)$$

$a_{ij}$  是第  $i$  条射线穿过第  $j$  个网格单元的长度。当有大量射线(如  $M$  条射线)穿过反演区域时,根据(2)式就可以得到关于未知量  $S_j (j=1, 2, \dots, N)$  的  $M$  个方程 ( $i=1, 2, \dots, M$ ),  $M$  个方程组合成一线性方程组为:

$$AS = T \quad (3)$$

式中:  $A = (a_{ij})_{M \times N}$  称作距离矩阵;  $T = (t_1, t_2, \dots, t_M)^T$  为旅行时列向量,即接收器得到的初至旅行时;  $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)^T$  为慢度列向量。从形式上看,通过求解(3)方程组就可以得到离散慢度分布,从而实现射线覆盖区域的速度场反演值。但实际上,矩阵  $A$  是由  $S$  确定的,  $S$  是未知的,因此  $S$  不可能从(3)式直接获得。解决的方法是通过不断迭代,逐渐逼近正确的慢度值,迭代过程步骤如下:

$n = 0$ , 假设一个初始的慢度分布为  $S(n)$  的模型; 对  $S(n)$  模型射线追踪, 获得  $S(n)$  模型的旅行时  $T(n)$  和 Jacob 矩阵  $A(n)$ ; 求解, 获得慢度修正量  $\Delta S^{(n)}$ ;

$$A^{(n)} \Delta S^{(n)} = \Delta T^{(n)} \tag{4}$$

其中,  $\Delta T^{(n)} = T - T^{(n)}$ ,  $T$  为实际拾取的旅行时列向量。

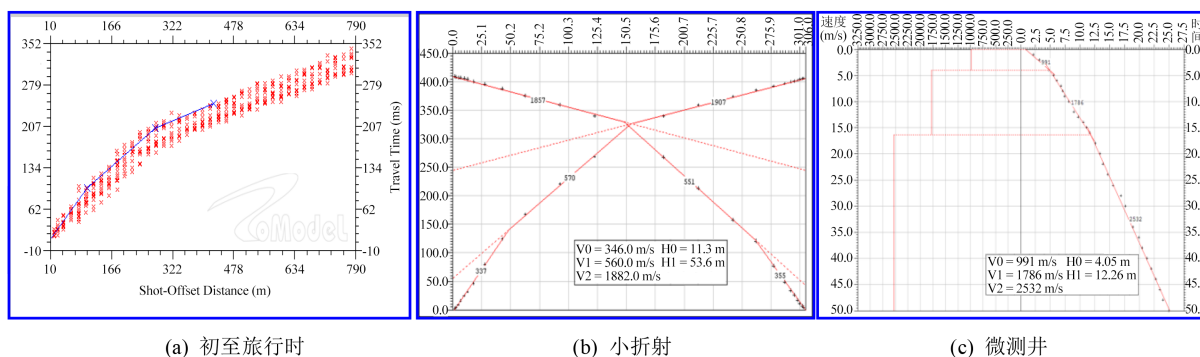
$$S^{(n+1)} = S^{(n)} + \Delta S^{(n)}, n = n + 1 \tag{5}$$

重复(1)~(5), 直到  $\|\Delta T^{(n)}\| < \varepsilon$  停止迭代, 其中  $\varepsilon$  为最小均方误差; 这时, 就认为  $S(n)$  已非常逼近真实慢度  $S$ , 因此, 把  $S(n)$  作为层析反演结果。

## 2.2. 多信息约束反演

以杭锦旗地区的三维地震资料采集为例, 已知该研究区范围为  $685 \text{ km}^2$ , 属于沙漠草原地貌, 地表高程在  $1340 \sim 1500$  米之间, 地形整体趋势相对平坦(分为高地区、低洼区、断裂区和斜坡区), 沙土覆盖厚, 近地表厚度和速度横向变化剧烈; 研究区的地质背景相对简单, 地震成果显示中生界和古生界地层极为平缓, 整体呈东北高西南低的斜坡, 东北部位发育大型应力构造, 断裂出露地表; 研究区内已有前期两个年度的二维地震采集资料, 共计 50 条测线, 测网密度为  $4 \times 2 \text{ km}$ , 表层低测资料(小折射、微测井)丰富, 有已完钻井约 8 口(包括探井、直井、水平井), 井点分布相对均匀。

收集研究区的前期地震数据、前期表层资料 and 新的表层调查点资料; 将所述前期地震数据在静校正处理软件中打开, 线性校正后采用神经网络快速、高效地拾取初至, 利用校正、拾取和编辑等循环迭代的方式, 得到精确的初至旅行时(图 1(a)), 它是建立近地表速度模型和进行层析反演的资料基础。表层资料为研究区实施的各个低测调查点的小折射和微测井解释成果(图 1(b)和图 1(c)), 包括表层调查点的 XY 坐标、岩性特征和解释成果分层数据表格。



**Figure 1.** First arrival travel time and near-surface data  
**图 1.** 初至旅行时及表层资料

依据研究区的地表和低速带变化特点, 包括地表类型、低速带厚度和速度的纵向、横向变化, 确定近地表模型反演深度和反演偏移距, 编辑和优化初至旅行时; 针对反演参数, 包括反演深度、反演偏移距、反演次数、反演面元等, 通过迭代误差和射线密度的指标, 测试近地表模型反演深度和反演偏移距范围, 进而确定大炮初至; 依据大炮初至, 结合反演深度, 在静校正处理相关软件中点取分层数据的速度和厚度, 建立近地表初始速度模型, 同时开展层析反演, 建立近地表速度模型; 将研究区的前期表层资料和新表层调查点资料作为约束条件, 在近地表速度模型的基础上再次进行反演建模, 获得高精度近地表速度模型。

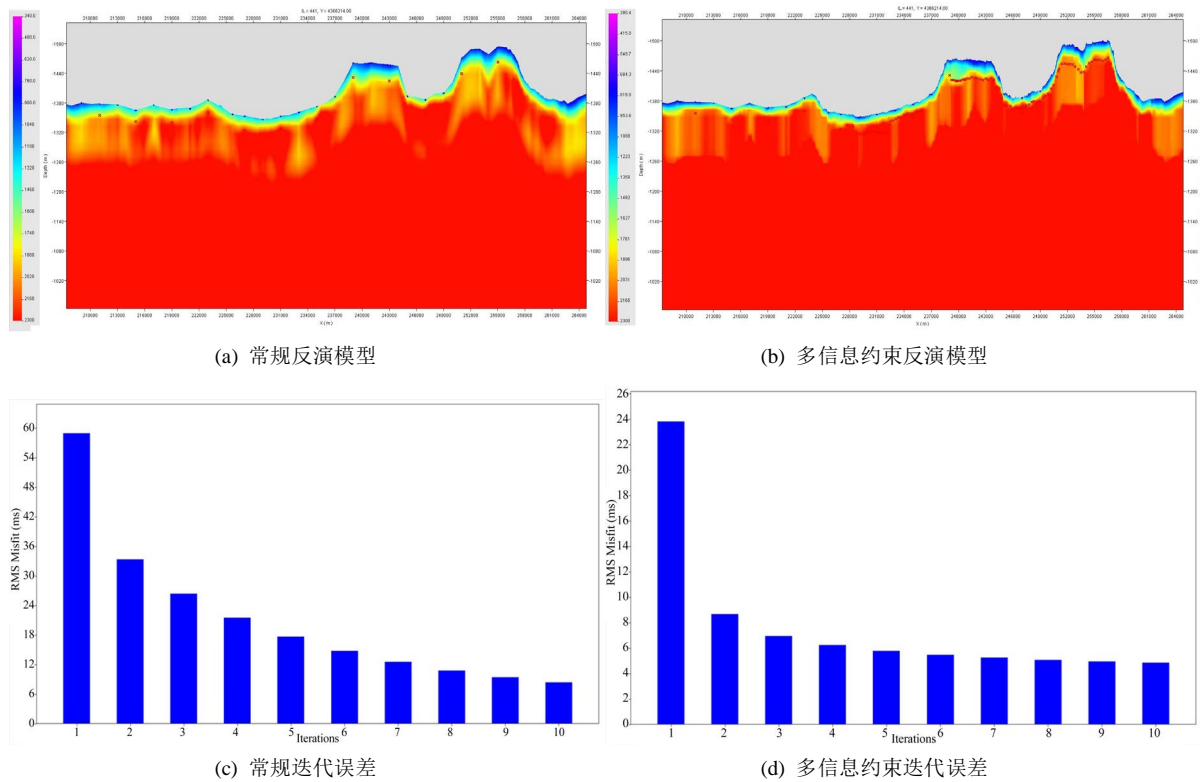


Figure 2. Comparison of the inversion for conventional and multi-information constrained

图 2. 常规和多信息约束反演对比

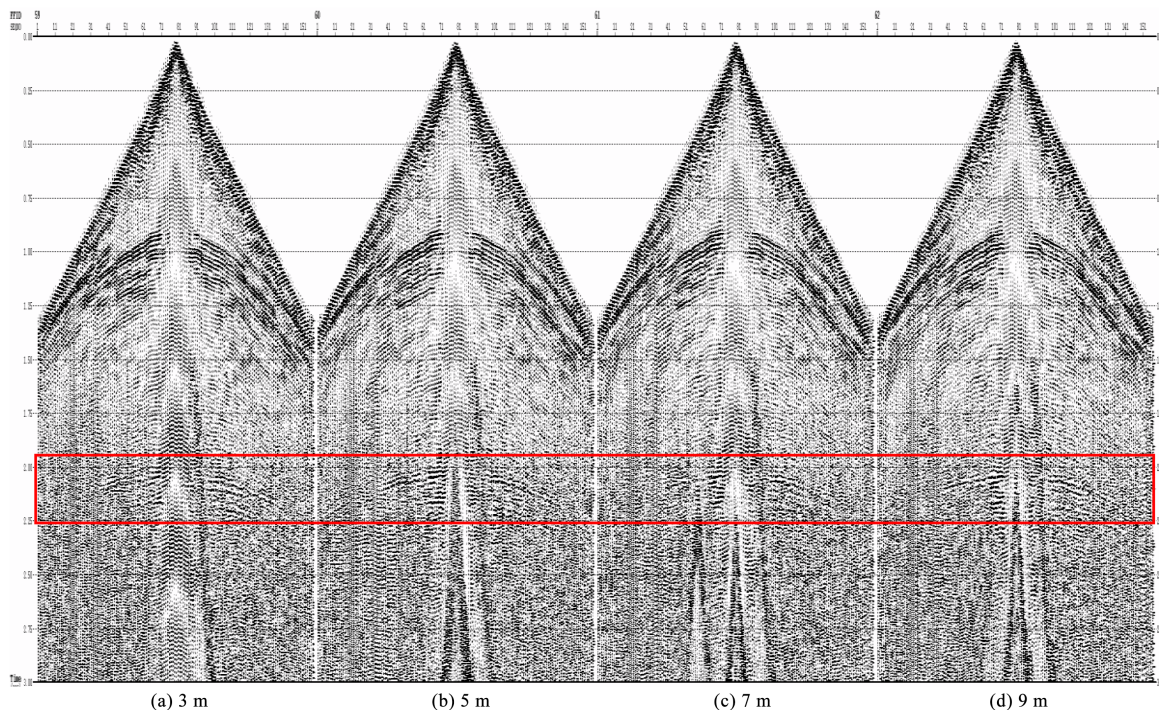
通过常规和多信息约束反演模型对比看出, 后者的浅表层速度低, 接近真实地表, 见图 2(a)和图 2(b)的黑色框部位; 两者均是进行了十次迭代反演, 前者迭代误差收敛趋势缓慢, 最终误差达到 8 ms, 见图 2(c), 后者迭代误差急剧收敛, 最终误差达到 4 ms, 见图 2(d); 多信息约束反演模型精度更高, 速度更加精确, 为后续激发井深设计奠定基础。

### 3. 激发井深设计

#### 3.1. 最佳激发速度确定

收集研究区当前和前期的表层岩性调查和试验论证资料。表层岩性调查主要是指微测井岩性解释, 按照表层调查(包括地表露头调查、潜水面调查和微测井解释)的试验点, 查看详细岩性录井信息, 获得试验点位置、高程、潜水面等地表条件, 以及每一段深度对应的岩性, 比如: 表层沙、含泥砂岩、含砾砂岩及对应的深度和速度。试验论证资料包括分辨反射同向轴连续性的原始单炮对比、分辨能量差异的固定增益显示、查看不同频率段记录品质差异的分频扫描和主要目的层的定量化指标(能量、频率、信噪比、子波等)。

根据研究区的地表高程进行地表类型分类, 针对每一种地表类型, 结合该区域的表层岩性调查和单炮记录的试验论证参数, 充分考虑地表条件影响, 了解地震资料品质和井深之间的关系, 确定最佳的井深因素, 即在微测井底以下多少米激发才能获得最好的地震记录, 反映到表层反演模型中, 确定该区域在层析反演模型中的最佳激发速度面。依次类推, 确定不同地表类型区域对应的激发层速度界面, 以此适应不同地表类型区域的井深设计。



**Figure 3.** The 50~100 Hz scanning records of different depth at test point S  
**图 3.** 试验点 S 不同井深的 50~100 Hz 扫描记录

试验点 S 的地表属于研究区的高地类型，由该点微测井底以下不同井深处的 50~100 Hz 的扫描记录 (图 3) 看出，在微测井以下 5 m 时，主要目的层的有效反射更加连续、清晰，信噪比相对较高；依据该井深，优选和确定研究区的高地类型在层析反演模型中的最佳激发速度面为 1750 m/s。

### 3.2. 激发井深设计

在各区域最佳激发速度面的基础上，结合多信息约束反演得到的高精度近地表速度模型，如图 2(b)，开展研究区的地震采集激发井深设计。收集和整理研究区地震采集施工范围和技术设计，获取采集区的设计炮点数据；将采集区的设计炮点数据转化为适合静校正处理软件的文本文件，该文本文件包含线点号、X 坐标、Y 坐标、地表高程、插值井深等五列的 prn 或 txt 文件。

将设计炮点数据和激发层速度界面作为输入，加载到多信息约束反演速度模型中，输出地震采集区设计炮点的激发井深。计算得到的激发井深以文本格式导出，如图 4 所示，各列依次为线点号、X 坐标、Y 坐标、地表高程、基底厚度、设计井深、常规插值井深、设计误差等八列的 prn 或 txt 文件。

22081096	228587.5	4385462.4	138.2	1367.2	17	21.7	-4.7
13041114	229487.4	4362862.6	1352.5	1339.3	13.2	17.9	-4.7
14281174	232487.5	4365962.3	1361.6	1346.6	15.1	19.8	-4.7
16721219	234737.4	4372062.5	1380.7	1356.9	23.8	28.5	-4.7
20221139	230737.5	4380812.6	1402.1	1375.7	26.4	31.1	-4.7
20681168	232187.4	4381962.3	1388.5	1372.4	16	20.7	-4.7
22201153	231437.6	4385762.5	1368.9	1353	15.9	20.6	-4.7
15381258	236687.5	4368712.5	1377.2	1363.1	14.1	18.8	-4.7
11341294	238487.5	4358612.4	1464.2	1438.7	25.5	30.2	-4.7
21861216	234587.6	4384912.6	1392.2	1373.3	18.9	23.6	-4.7

**Figure 4.** Output text of shot depth  
**图 4.** 输出的激发井深文本

## 4. 应用效果及误差分析

### 4.1. 应用效果

为了检验该方法的效果和优势,将此应用到杭锦旗地区,通过对比常规井深设计和该方法的单炮记录显示,分析单炮记录的频谱、子波、能量、信噪比等定量指标的差异,以便为地震采集工区的生产提供技术指导。

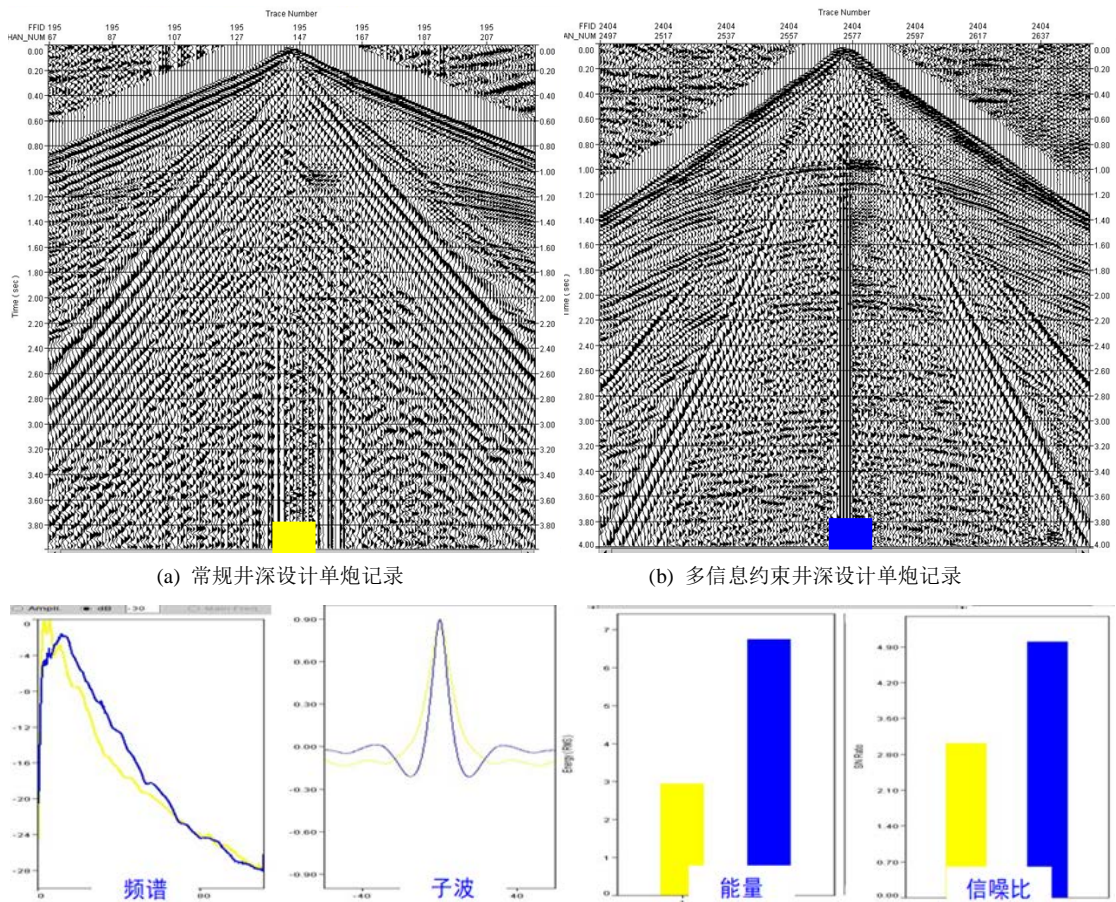


Figure 5. Comparison of the shot recording for conventional and multi-information constrained  
图 5. 常规与多信息约束井深设计的单炮对比

常规井深设计的单炮记录见图 5(a), 井深为 16 m, 药量为 16 kg; 该方法设计的单炮记录见图 5(b), 井深为 37.2 m, 药量为 16 kg; 后者采集到的单炮记录上因波阻抗差异而产生的反射波更清晰, 同时发育沿界面传播、能量强且频散严重的面波和波场入射角达到临界角而产生的折射波。黄色代表常规井深设计, 蓝色代表本方法设计, 见图 5, 通过对比分析单炮记录的频谱、子波、能量、信噪比等定量指标看出, 本方法设计的单炮频谱更宽、子波形态更好、能量和信噪比更高。因此, 较前期资料, 本方法得到的地震资料品质得到大幅提高。

### 4.2. 误差分析

检验通过该方法设计井深与实钻微测井底深的误差分析, 验证该方法的科学和合理性。本方法设计井深与实钻微测井对比见图 6, 试验点 S 优选速度为 1750 m/s 的界面, 高精度近地表模型输出的井深为

33.3 m; 单井微测井口接收解释成果, S 点岩性调查特征为沙土厚 19 m, 含砾砂岩厚 12 m, 其他均为含泥砂岩, 潜水面 80~90 m, 微测井解释成果给出的高速层顶底界面处为 37.0 m, 两者误差-3.7 m。可以看出, 该方法设计的激发井深与实钻微测井底深基本符合, 设计误差较小。

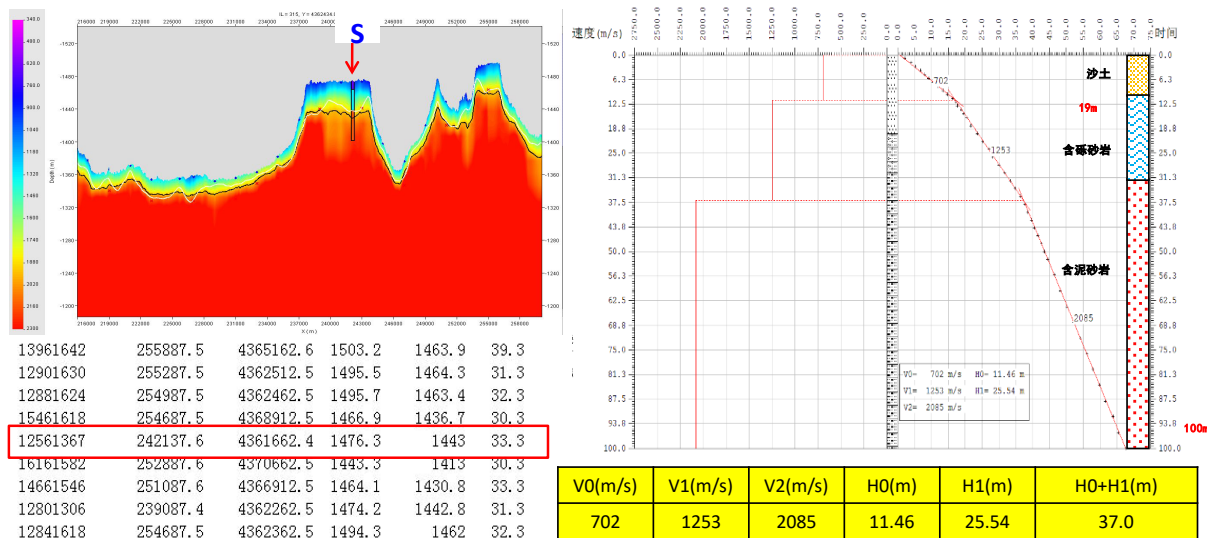


Figure 6. Error analysis of shot depth design with multi-information constraints  
图 6. 多信息约束井深设计的误差分析

## 5. 结论

1) 本方法充分利用精度更高的近地表模型的速度趋势指导激发井深设计, 可以较好地解决常规井深设计方法出现内插精度不足和随地形起伏变化的问题。

2) 本方法针对不同地表类型的井深设计具有很强的适用性, 误差分析评价为等效模型与真实地质模型转换研究提供依据, 设计井深总和为估算钻井施工成本提供测算参考依据, 对其他复杂地表研究区的激发井深设计具有借鉴意义。

3) 本方法获得的激发井深更加合理、可靠, 方法经济、科学, 在杭锦旗地区中取得良好的效果, 明显改善地震资料品质, 对优化激发参数、改善激发条件、提高地震资料品质具有重要意义。

## 基金项目

华北油气分公司高效勘探科技工程“鄂尔多斯盆地地球物理处理与解释技术研究”(2019GXKT-04)。

## 参考文献

- [1] 傅朝奎. 关于地震采集中的井深和药量的研究[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(S1): 31-35.
- [2] 高银波, 张研. 关于井炮激发参数优化设计的思考[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 938-943.
- [3] 葛利华, 姜弢, 徐学纯, 等. 辽西葫芦岛东部表层调查方法比对实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 616-625.
- [4] 张剑, 刘梦花, 苏腾飞. 山前带砾石区激发技术优化[J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1228-1234.
- [5] 刘杰烈, 李崇灿, 周志才. 实时动态激发井深设计[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(2): 327-329.
- [6] 罗春波, 卢殿龙, 于水, 等. 大情字井地区基于薄激发层的井深设计技术[C]//物探技术研讨会. 中国石油学会 2015 年物探技术研讨会论文集, 2015: 5-9.



- 
- [7] 王昀, 王福宝, 岳承琪, 等. 低信噪比地区地震采集激发技术探讨[J]. 石油物探, 2013, 52(3): 259-264.
- [8] 张光德, 刘斌, 张志林, 等. 柴达木盆地三湖地区盐岩区表层调查方法研究[J]. 石油物探, 2013, 52(2): 195-200.
- [9] 黄棱, 杨光大, 韩立国. 深层地震勘探激发井深探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(S2): 113-116.
- [10] 魏明阳. 巴楚地区基于多重条件下约束下激发参数设计[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2774-2778.
- [11] 杨战军, 江汶波, 雷栋, 等. 表层火山岩区最佳激发面综合调查与井深设计[C]//物探技术研讨会. 中国石油学会 2015 年物探技术研讨会论文集, 2015: 403-406.
- [12] 陈楠. 三维空间内近地表激发井深设计插件的开发与应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 940-946.
- [13] 张剑, 江锋, 刘梦花, 等. 逐点激发井深设计网格化方法的选取[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(2): 204-212.
- [14] 杨城增, 金东民, 梁殿文, 等. 长波长静校正问题的识别与解决方法——以鄂尔多斯黄土塬地震资料为例[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2212-2218.
- [15] 杨城增, 蒋红志, 杜春江. 人机交互和全自动层析静校正技术的应用效果对比分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 745-752.