

组合激发参数理论分析

刘福烈*^① 徐峰^① 李志勇^① 梁向豪^②

(^①西南石油大学资源与环境学院,四川成都 610500; ^②中国石油塔里木油田分公司,新疆库尔勒 841000)

刘福烈,徐峰,李志勇,梁向豪. 组合激发参数理论分析. 石油地球物理勘探,2013,48(1):1~7

摘要 本文将相控阵理论技术应用于组合激发理论分析中,给出了理论信噪比的定义及计算方法。通过改变震源数目、组内距和波长等参数控制相邻震源的波程差,使各震源产生的地震波在某一方向同相叠加,进而使理论信噪比最大化。同时利用波动方程正演,验证了理论信噪比与主要组合参数的内在关系,剖析了复杂地区组合激发压制噪声提高信噪比的机理,从而设计出最佳的组合激发震源数目、组内距等参数。

关键词 组合激发 信噪比 相控理论 组内距 组合震源数 地震数据采集

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

在地震资料低信噪比地区,采用组合激发对提高单炮记录的信噪比有明显效果。黄洪泽^[1]在新疆沙漠地区通过试验证明组合激发是提高信噪比的重要手段。刘怀山等^[2]提出组合激发能使优势信噪比的频带展宽,而且可兼顾中深层的反射能量。王卫华^[3]指出梅花图形组合是模拟点源激发的有效方法。赵延江^[4]和刘依谋等^[5]利用组合激发技术先后在黄土覆盖区取得了良好效果。国外组合激发技术也有许多成功实例:美国石油公司于20世纪70年代就在Tulsa地区做过地震波束形成试验,证实定向地震波方向与延时时间间隔的关系同电磁波定向理论相一致^[6];PGS公司在泰国海湾HD地区对空气枪震源及其阵列组合模式进行了探讨,在提高中、浅层分辨率等方面取得了显著效果^[7]。

炸药震源组合激发在实际应用中具有较强灵活性,而爆炸激发机理是关键。爆炸形成的波场可分为三个区:近区为冲击波传播区,中区为应力波传播区,远区为地震波传播区。在近区和中区,由于应力和应变是非线性的,弹性波动理论难以描述波的传播机理。肖建华等^[8]应用黏弹性波动理论对点爆炸震源邻域进行理论分析,获得了地震子波的解析解,

但缺少对组合激发机理的分析。

陈士海等^[9]分析了5种常见岩石介质并得到如下认识:冲击波的波速、压力和能量随着距离的增加而快速衰减,在离爆炸中心 $20\sim 25R_0$ (R_0 为药包半径)处进入远区。如果各单个激发点的距离超过 $25R_0$,即可应用弹性波动理论分析组合激发提高信噪比的机理^[10]。

2 理论信噪比定义与计算

汪仁富等^[11]认为地震波激发后据其能量类型可划分为如图1所示的潜在信号区和潜在噪声区两部分。地震勘探中噪声能量大小主要取决于上传及侧传区能量,这是因为散射、折射等噪声源一般分布于近地表,且邻近激发点,上传、侧传地震波引入噪声的能量远大于地下反射波引入噪声的能量,因此上传和侧传区能量可定义为潜在噪声能量;同理,在明确地下地震地质条件时,地震波有效反射信号能量大小取决于下传区能量,因此下传区能量可定义为潜在信号能量。下传区能量与上传、侧传区能量之比定义为理论信噪比。

计算理论信噪比首先要确定能量下传区分布范围,即图1中 θ 值。当激发深度远小于目的层深度时,可推导出

* 四川省成都市西南石油大学资源与环境学院,610500。Email: penglaihai@126.com

本文于2012年1月10日收到,最终修改稿于同年12月21日收到。

本研究为国家科技重大专项(2008ZX05046-01)研究课题。

$$\theta \approx 2\arctan \frac{L}{4H} \quad (1)$$

式中: L 为排列长度; H 为目的层深度。

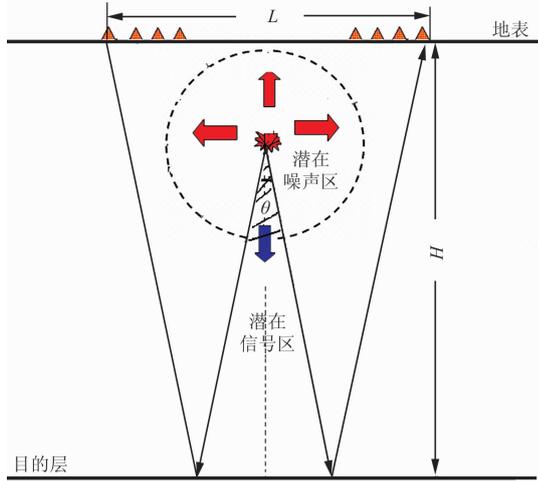


图1 震源激发后能量分区示意图

根据雷达阵列相控理论,组合激发的方向因子可表示为^[11]

$$F(\alpha) = \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (kd \sin \alpha + \beta) \right]}{n \sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \alpha + \beta) \right]} \quad (2)$$

式中: $F(\alpha)$ 为组合激发后某个方向上的归一化能量; n 为震源数目; d 为震源组内距; k 为在激发层传播的子波波数; α 为观测点方位角; β 为相邻震源间的相位差。相控震源形成的地震波具有方向性,其最强方向 θ_{\max} 被称为主波束方向或定向地震波方向。由式(2)可知组合的关键是如何控制震源使其爆炸后形成的地震波指向某个确定方向 θ_{\max} 。

要使相控震源产生的地震波在 θ_{\max} 方向最强,由 $\alpha = \theta_{\max}$ 时, $kd \sin \alpha + \beta = 0$ 的条件,可得

$$\begin{cases} \beta = -kd \sin \theta_{\max} \\ kd (\sin \alpha + \beta) = kd (\sin \alpha - \sin \theta_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

即阵列中各震源的相位需依次滞后一个 θ_{\max} 对应的波程角度

$$\beta = -kd \sin \theta_{\max} = -\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_{\max}$$

此时,相邻震源产生的地震波场在 θ_{\max} 方向上同相叠加,信号最强,信噪比最高。这种情况下,组合激发的方向因子(式(2))可改写为

$$F(\alpha) = \frac{\sin \left[\frac{nk d}{2} (\sin \alpha - \sin \theta_{\max}) \right]}{n \sin \left[\frac{kd}{2} (\sin \alpha - \sin \theta_{\max}) \right]} \quad (4)$$

当目的层倾角较小时,组合期望 $\theta_{\max} \approx 0^\circ$,式(4)可进一步写成

$$F(\alpha) = \frac{\sin \left(\frac{nk d}{2} \sin \alpha \right)}{n \sin \left(\frac{kd}{2} \sin \alpha \right)} \quad (5)$$

该式可用极坐标表示(图2)。由于能量在方向上的对称性,当确定下传能量区分布范围 θ 后, α_1 和 α_2 即确定了,则理论信噪比可表示为

$$P(n, d, k) = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\alpha) d\alpha}{\int_{0^\circ}^{360^\circ} F(\alpha) d\alpha - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} F(\alpha) d\alpha} \quad (6)$$

野外地震数据采集施工中, $L = 0.5 \sim 1.5H$, 由式(1), θ 的取值范围可大致确定。则理论信噪比就只是震源数目、组内距和波数的函数,它是评价和设计组合参数的重要依据。利用相控理论,计算激发后各传播方向上的能量,进而推算理论信噪比,再结合波动方程正演技术,即可分析组合激发提高信噪比的机理。

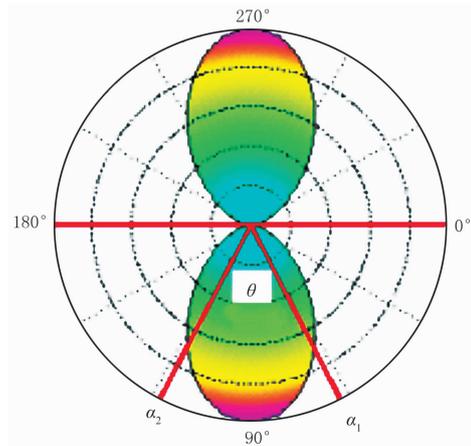


图2 组合激发某方向的归一化能量

3 组合与理论信噪比的关系

3.1 震源数目对信噪比的影响

固定子波波长和组内距,理论信噪比为震源数目的单值函数。

设组合震源由 n 个单震源组成,沿直线以等间距排列。固定组内距为 2m,子波波长为 20m,由式(5)计算得到不同震源数目的组合能量方向图。从图3中可明显看出,震源个数越多,能量聚焦程度越高。

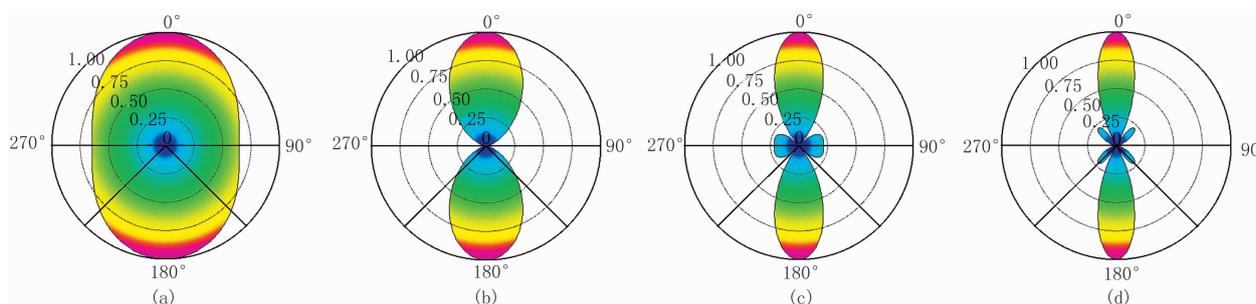


图 3 不同震源数目的组合能量方向图
(a) $n=5$; (b) $n=10$; (c) $n=15$; (d) $n=20$

固定子波波长,改变组内距,统计震源个数 n 与下传总能量的关系(图 4)。由于单个震源的能量是固定的,随着震源个数的增加下传总能量也会增加,但增加的快慢与组内距有关,组内距越小,能量增加的速度越慢,这是由于两个震源波场干涉程度不同造成的。再统计震源个数 n 与上传、侧传总能量的关系(图 5),可见能量的变化趋势和下传总能量基

本一致,但变化速度有差异。

在上述参数情况下统计震源个数 n 与信噪比的关系。从图 6 可看出:当组内距小于 $1/2$ 波长时,信噪比随震源个数的增加而增加(图 6a);当组内距大于 $1/2$ 且小于 $3/4$ 波长时,信噪比随震源个数增加先快速增加而后缓慢降低(图 6b);当组内距大于 $3/4$ 波长时,信噪比随震源个数增加而降低(图 6b)。

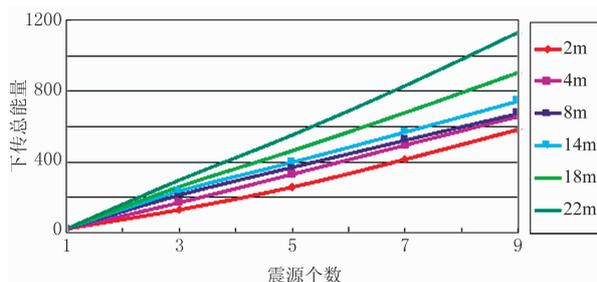


图 4 震源个数与下传总能量的关系

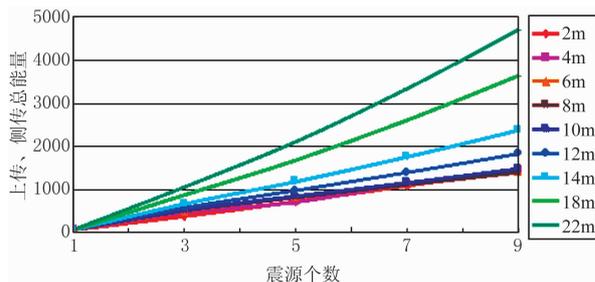


图 5 震源个数与上传、侧传总能量的关系

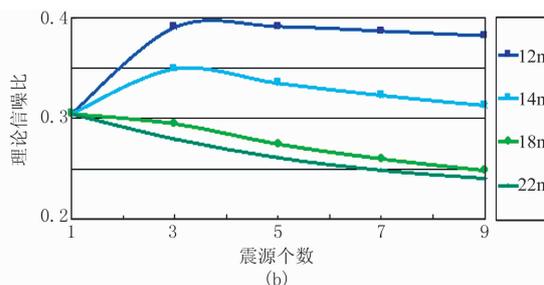
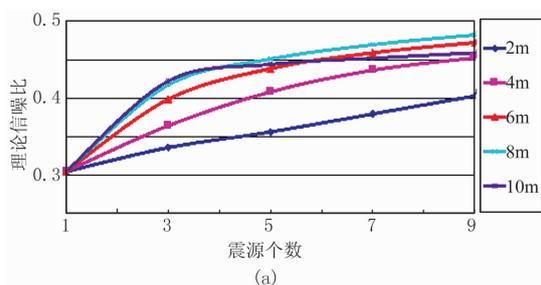


图 6 震源个数与理论信噪比的关系

3.2 组内距对信噪比的影响

固定子波波长和震源个数,理论信噪比为组内距的单值函数。

设组合震源由 5 个单震源组成,沿直线以等间距排列,固定子波波长为 20m,得到不同组内距的组合能量方向图。从图 7 可明显看出,组内距越大,能量聚焦程度越高。

固定子波波长,改变震源个数,统计组内距与下

传总能量的关系。从图 8 中可看出,当 nd 小于 1 个波长时,下传总能量随组内距的增加而快速增加;当 nd 大于 1 个且小于 3 个波长时,下传总能量随组内距的增加而略有增加;当 nd 大于 3 个波长时,下传总能量随组内距的增加而快速增加。

再统计同样条件下组内距与上传、侧传总能量的关系。从图 9 中可看出,当 nd 小于 1 个波长时,总能量随组内距的增加而快速增加;当 nd 大于 1 个

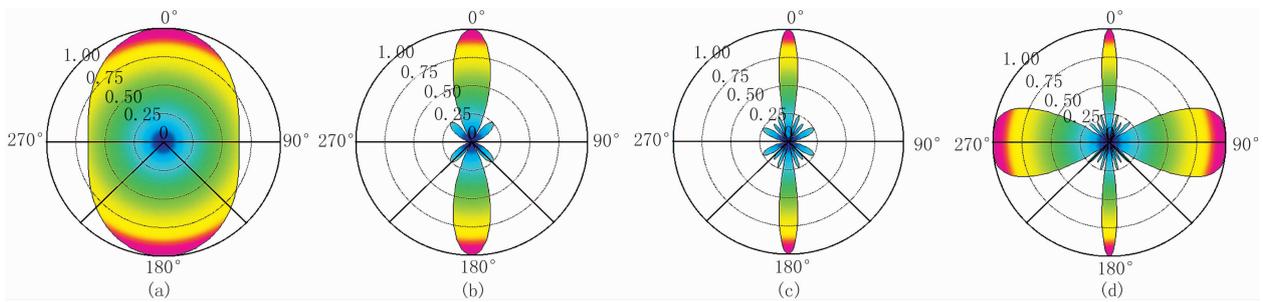


图7 不同组内距的组合能量方向图

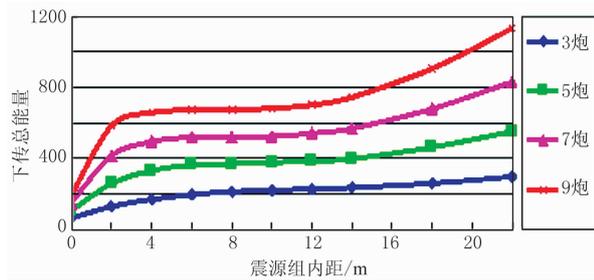
(a) $d=2\text{m}$; (b) $d=8\text{m}$; (c) $d=16\text{m}$; (d) $d=20\text{m}$ 

图8 组内距与下传总能量的关系

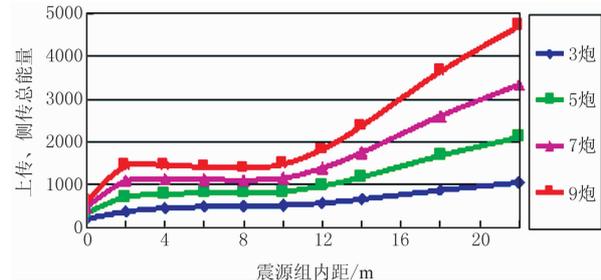


图9 组内距与上传、侧传总能量的关系

且小于3个波长时,总能量随组内距的增加而略有减少;当 nd 大于3个波长时,总能量随组内距的增加而快速增加。

在上述参数情况下统计组内距与理论信噪比的关系。从图10可看出:每一数目的震源组合,其信噪比都可在某一组内距达到最大值,且最大值对应的组内距随震源个数的增加而减小。

3.3 波长对信噪比的影响

固定组内距和震源个数,理论信噪比为子波波长的单值函数。

设组合震源由5个单震源组成,沿直线以等间距排列,固定组内距为8m,得到不同子波波长的组合能量方向图。从图11中可看出,随着子波波长的增加,聚焦能力逐渐减弱。

固定震源个数,统计组内距分别为8,14,20m

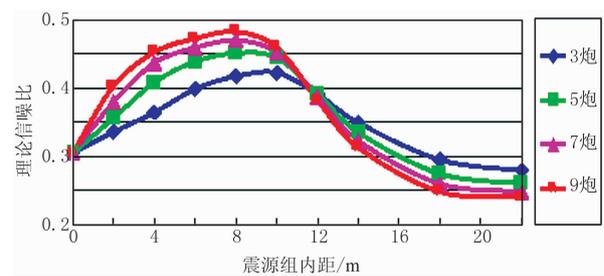


图10 组内距与理论信噪比的关系

时波长与下传、上传和侧传总能量的关系。观察图12和图13可知:不同组内距条件下,统计能量曲线的形态基本一致,随着波长的加大,能量都表现为先降后升,存在一个最小极值点,且极值点对应的波长值均随组内距的增加而增大。

同时改变震源个数和组内距,统计波长与理论信噪比的关系。从图14可看出:当震源数目固定

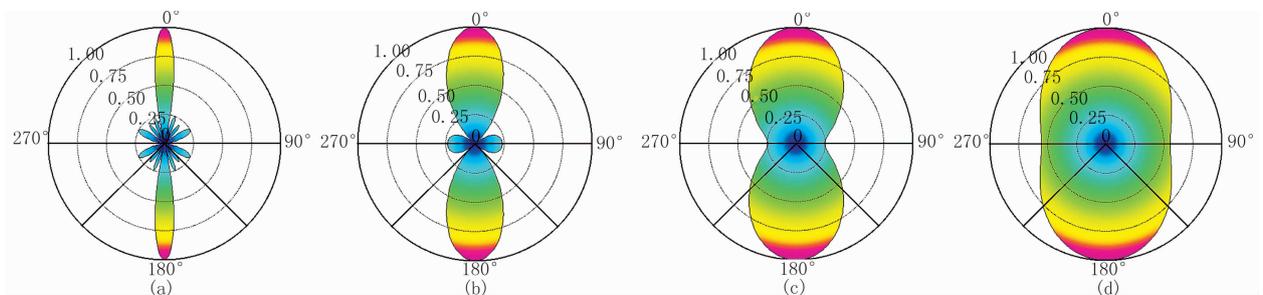


图11 不同子波波长的组合能量方向图

(a) $\lambda=10\text{m}$; (b) $\lambda=30\text{m}$; (c) $\lambda=50\text{m}$; (d) $\lambda=70\text{m}$

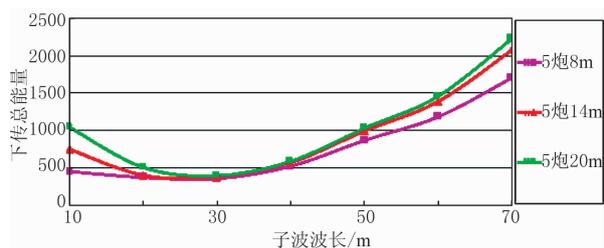


图 12 不同子波波长与下传总能量的关系

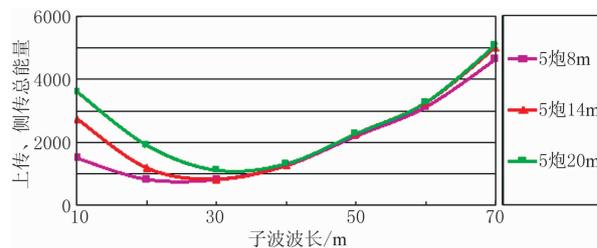


图 13 不同子波波长与上传、侧传总能量的关系

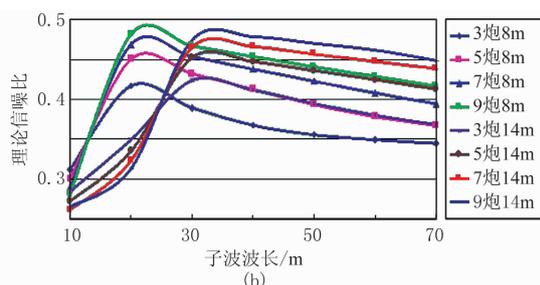
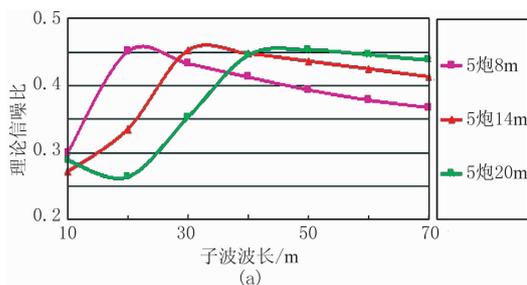


图 14 不同子波波长与理论信噪比的关系

时,随着波长加大,信噪比总体呈先增后降的趋势,组内距不同极值点位置也不同,极值点对应的波长值随组内距的增加而增大;当组内距固定时,随着波长加大,信噪比也呈现出先增后降的曲线形态,极值点对应的波长值基本不随震源个数的变化而变化,但极值点对应的信噪比随震源个数增加而增大。

4 数值模拟

4.1 正演方法

有限差分是实现多震源波动方程正演的有效技术^[12]。本文采用均匀各向同性介质二维声波方程的数值模拟方法做正演模拟。均匀各向同性介质二维声波方程可表示为

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (7)$$

式中: $p = p(x, z, t)$ 为声波波场; $v = v(x, z)$ 为速度场。时间导数采用二阶中心差分、空间导数为 $2N$ 阶差分精度的二维声波方程高阶有限差分格式为

$$p^{n+1}(i, j) = 2p^n(i, j) - p^{n-1}(i, j) + \Delta t^2 v^2 [L_x^2 p^n(i, j) + L_z^2 p^n(i, j)] \quad (8)$$

式中

$$L_x^2 p^n(i, j) = \sum_{l=-N}^N \frac{a_l}{\Delta x^2} p(i+l, j) \quad (9)$$

$$L_z^2 p^n(i, j) = \sum_{l=-N}^N \frac{a_l}{\Delta z^2} p(i, j+l) \quad (10)$$

其中

$$a_l = \frac{(-1)^{l+1}}{l^2} \frac{\prod_{i=1, j \neq l}^N i^2}{\prod_{i=1}^{l-1} (l^2 - i^2) \prod_{i=l+1}^N (i^2 - l^2)} \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

且有

$$a_l = a_{-l} \quad a_0 = -2 \sum_{l=1}^N a_l \quad (12)$$

若设 N_1 为不超过 N 的最大奇数,则二维声波方程规则网格有限差分格式的稳定性条件为

$$\Delta t v \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \sum_{l=1}^{N_1} a_{2l-1}} \leq 1 \quad (13)$$

4.2 理论模型分析

为进一步阐明上述规律,设计如图 15 所示的理论模型,共有 6 套水平地层,长为 1000m,深为 400m, $dx=dz=2m$ 。采用主频为 30Hz 的零相位雷克子波作为震源,在地表下 10m 深度激发,表层激发速度为 600m/s(可换算得子波波长为 20m);近地表存在散射源(图中蓝色分布点),速度为 2500m/s;当采用单一震源激发时所得单炮记录如图 16 所示。分别固定组内距为 4m 和 14m,采用多个震源沿直线均匀排列的组合模式,得到模拟地震记录如图 17 所示,为保证与单一震源激发总能量一致,组合激发时各单炮能量取 $1/n$ 。观察图 17 可知:当组内距不大于 $1/2$ 波长时,随组合震源个数的增加,上传、侧传(噪声)能量大幅度降低、下传(有效)能量基本保持一致,单炮记录的信噪比随震源个数的增加而增加(图 17a~

图 17d);当组内距大于 1/2 地震波长时,随组合震源个数的增加,信噪比先增后减(图 17e~图 17h)。

选定组合震源个数为 3,沿直线均匀排列,得到不同组内距的模拟地震记录。从图 18 中可看出:随着组内距的增加信噪比先增加后减小;在当前参数下采用 10m 组内距(图 18c)可获得最大信噪比。

选定震源个数为 3、组内距为 6m,改变子波波波长(通过改变子波主频实现),得到模拟地震记录如图 19 所示。从该图中可看出:当组合震源数目和组内距确定后,不同波长的地震波响应不同;对于 3 炮 6m 组合方式,波长 30m 子波具有最高信噪比(图 19d)。

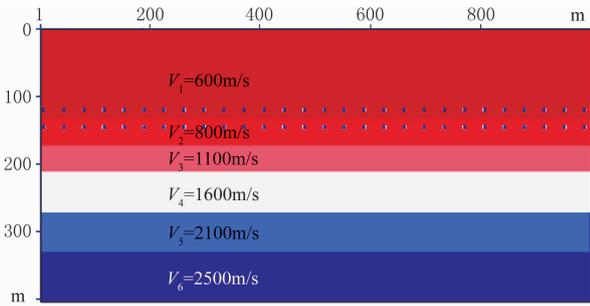


图 15 用于正演的理论模型

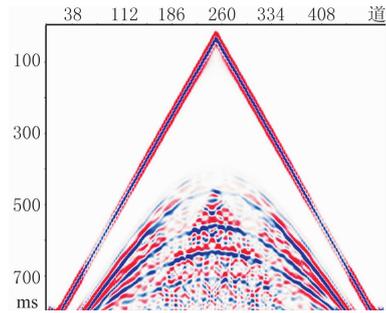


图 16 单炮记录(不组合)

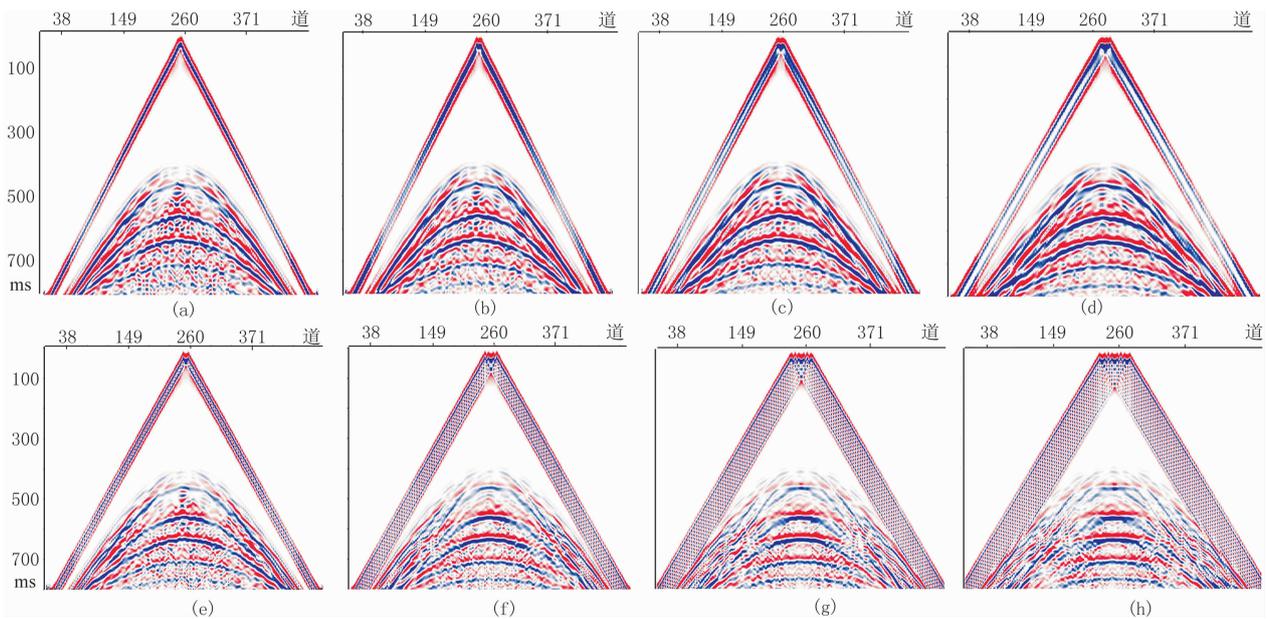


图 17 不同震源个数的地震记录

(a)3 炮 4m; (b)5 炮 4m; (c)7 炮 4m; (d)9 炮 4m; (e)2 炮 14m; (f)4 炮 14m; (g)6 炮 14m; (h)8 炮 14m

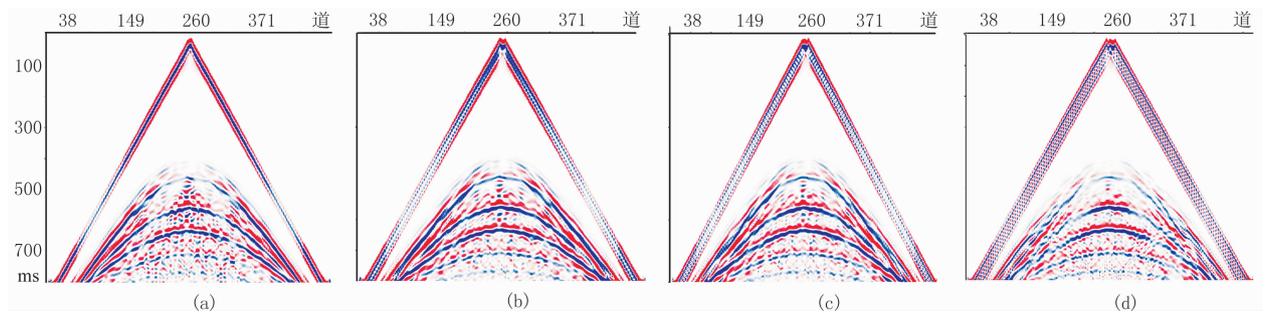


图 18 不同组内距的地震记录

(a)3 炮 4m; (b)3 炮 8m; (c)3 炮 10m; (d)3 炮 14m

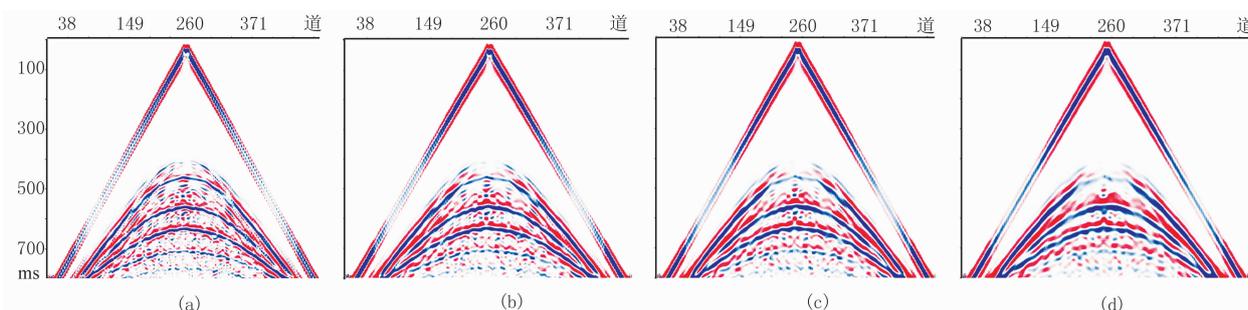


图 19 不同波长的地震记录

(a) $\lambda=15\text{m}$; (b) $\lambda=20\text{m}$; (c) $\lambda=24\text{m}$; (d) $\lambda=30\text{m}$

5 结论

震源激发后,各传播方向的地震波对信噪比的贡献不同;有效信号能量取决于下传方向的地震波能量;噪声的强度主要取决于上传和侧传方向的地震波能量。

选取合适的组合激发参数,能使波场在空间相互叠加、干涉,上传、侧传方向的能量大幅度降低,下传能量增强,从而大幅度地提高地震资料的信噪比。

组合参数及地震波波长与信噪比有如下关系:

(1)组合震源数目 当组内距不大于半个地震波长时,信噪比随震源数目的增加而增加,不存在最大值;当组内距大于半个地震波长时,信噪比随震源数目的增加先增加而后减小,信噪比存在最大值点,该点对应的震源个数就是最佳震源数目。

(2)组内距 无论震源数目多少,信噪比随组内距的增加先增加后减小;信噪比存在最大值点,该点对应的组内距就是最佳组内距;地震波波长和震源数目不同时,其最佳组内距不同。

(3)地震波长 不同的组合方式,对不同波长地震波的响应不同;当组合方式确定后,随着波长加大,信噪比先增后降,存在最大值点;信噪比最大值点对应的波长与组内距和震源数目有关。

参考文献

- [1] 黄洪泽. 沙漠区浅井组合法的生命力. 石油物探, 1984, 23(4): 99~101
Huang Hongze. The vitality of shallow-well combination in desert area. *GPP*, 1984, 23(4): 9~101
- [2] 刘怀山, 王玉岭. 组合爆炸法在高分辨率地震勘探中的应用. 石油地球物理勘探, 1990, 25(6): 734~743
Liu Huaishan, Wang Yuling. Multiple shot array applied in high resolution seismic exploration. *OGP*, 1990, 25(6): 734~743
- [3] 王卫华. 纵波勘探中的炸药激发方式分析. 石油地球物理勘探, 1999, 34(3): 249~259
Wang Weihua. Analysis of dynamite source pattern in compressional wave exploration. *OGP*, 1999, 34(3): 249~259
- [4] 赵延江. 黄土塬地区地震勘探激发技术探讨. 石油物探, 2006, 45(6): 646~650
Zhao Yanjiang. Research on shooting techniques of seismic prospecting in loess tableland area. *GPP*, 2006, 45(6): 646~650
- [5] 刘依谋, 梁向豪等. 塔里木盆地西南坳陷巨厚黄土区地震采集技术. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 255~257
Liu Yimou, Liang Xianghao et al. Seismic acquisition techniques in thick loess area in Southwest Depression, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(2): 255~257
- [6] Arnold M E. Beam forming with vibrator arrays. *Geophysics*, 1977, 42(7): 1321~1338
- [7] Ramsden C, Bennett G and Long A. High-resolution 3D seismic imaging in practice. *The Leading Edge*, 2005, 24(4): 423~428
- [8] 肖建华, 孙文涛. 关于点爆炸震源产生的地震子波. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 809~817
Xiao Jianhua, Sun Wentao. Seismic wavelet generated by point explosive source. *OGP*, 1997, 32(6): 809~817
- [9] 陈士海, 王明洋, 钱七虎. 岩体中爆破破坏分区研究. 爆破器材, 2001, 33(3): 33~36
Chen Shihai, Wang Mingyang, Qian Qihu. Study on distinction of blasting crack zones and time course of stress in rocks. *Explosive Materials*, 2001, 33(3): 33~36
- [10] 汪恩华, 贺振华, 李庆忠. 炸药激发子波信号的记录与研究. 石油地球物理勘探, 2001, 36(3): 352~363
Wang Enhua, He Zhenhua, Li Qingzhong. Record and study of exploded wavelet signal by explosive. *OGP*, 2001, 36(3): 352~363
- [11] 汪仁富, 徐峰, 刘福烈等. 波动方程震源组合模拟定量研究. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4): 538~544
Wang Renfu, Xu Feng, Liu Fulie et al. Quantitative analysis of source array effectiveness based on wave equation. *OGP*, 2011, 46(4): 538~544
- [12] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟. 北京: 石油工业出版社, 2005

(本文编辑:朱汉东)