

路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室 / 郑海峰, Zhejiang 310013 (CN)。

- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第 21 条 (3))。

基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源

技术领域

本发明属于气枪震源设计领域,尤其为一种基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源。

背景技术

目前海上常用的气枪震源是由多杆容量不同的气枪在同一深度处组合而成。采用多枪同时激发的方式实现首波同相叠加,同时由于利用容量差异造成的气泡振荡周期不同抵消残留气泡。当首波传播到海面时发生极性反转形成鬼波。震源鬼波的存在,造成了频率域一些特定频率的缺失,降低了地震资料的分辨率,称之为陷波效应。为了消除陷波效应,人们提出将气枪子阵或者单枪放置在不同深度处,采用延时激发保证首波同相叠加,而激发时间的延迟造成鬼波不再同相叠加,从而实现陷波的补偿。然而理论和实际观测都表明这种立体组合并不会改善超低频端(主要是 7Hz 以下)的响应,这主要是由鬼波陷波和气泡震荡主频主导的“中和效应”(Hopperstad, et al., 2012)造成的。引用文献信息如下: Hopperstad, J.F., Laws, R., and Kragh, E. 2012. Hypercluster of airguns – more low frequencies for the same quantity of air. 74th Annual International Meeting, EAGE, Expanded Abstracts, Z011.

造成低频缺失的“中和效应”可以从两方面理解: 1) 高压气体在释放到水中后,会产生周期振荡,振荡的主频随着气枪激发深度增加而增大,对低频能量的压制变强,如图 1 所示; 2) 鬼波在频率域引入的陷波效应随着深度的增加而减弱,对低频能量的压制减弱,如图 2 所示。两种效应在远场相互作用,即使深度变化也不会造成低频能量的改变,如图 3 所示。从图 3 中还可以发现,鬼波陷波造成了中高频的一些特定频率缺失,影响了频谱的完整性。同时陷波频率随着深度而变化,呈现多样性特点。

Ni et al. (2017) 提出利用比主震源容量小的辅助震源(如 1/3 主震源能量)抵消部分主震源鬼波,在一定程度上增强了低频能量。但由于是部分抵消,因此低频改善非常有限,同时对于由此引入的低频陷波以及原有的中高频陷波都没有

进行补偿。引用文献信息如下：Ni, Y., Shen, H., and Elboth, T. 2017. Method and device for boosting low-frequencies for a marine seismic survey. US2017/0276774A1. 本发明基于辅助震源实现鬼波完全抵消极大地增强了低频响应，同时结合真实深度组合的陷波多样性，实现了宽频带气枪震源的设计目的。

发明内容

本发明的目的在于克服现有技术的不足，本发明拟在多深度立体组合的基础之上通过引入辅助震源来抵消主震源鬼波，从而打破中和效应，改善低频响应，同时补偿中高频陷波，实现真正意义上的宽频带气枪震源的设计。

本发明的技术方案如下：

基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源包括：主震源和 N 级辅助震源， $N \geq 1$ ；主震源用于得到主激发信号；

所述 N 级辅助震源中，第一级辅助震源用于激发得到第一辅助激发信号；所述第一辅助激发信号与主激发信号形成的鬼波相同，但极性相反，第一级辅助震源的激发时刻为主震源的鬼波到达第一级辅助震源的时候，第一级辅助震源的首波与主震源的鬼波在远场完全抵消；

下一级辅助震源的激发信号与其上一级辅助震源的激发信号形成的鬼波相同，但极性相反，下一级辅助震源的激发时刻为其上一级辅助震源的鬼波到达该级辅助震源的时候，下一级辅助震源的首波与其上一级辅助震源的鬼波在远场完全抵消。

优选的，所述的主震源和 N 级辅助震源均为多深度立体震源。

优选的，所述的主震源和 N 级辅助震源均由位于不同深度的多级气枪单元组成；每级气枪单位包括一把或多把气枪，主震源和 N 级辅助震源的气枪单元级数相同。

优选的，所述的主震源和 N 级辅助震源的气枪类型、容量组合、布置深度和深度间隔均相同。

本发明还公开了一种所述海上宽频带气枪震源的深度组合激发方法，包括如下步骤：

1) 根据勘探需求，设计和布置主震源，其中主震源为多深度立体震源，并根据主震源设计和布置 N 级辅助震源，使第一辅助激发信号与主激发信号形成

的鬼波相同，但极性相反，下一级辅助震源的激发信号与其上一级辅助震源的激发信号形成的鬼波相同，但极性相反；

2) 根据立体震源的布置深度间隔，采用延时激发的方式，激发主震源，使主震源各组成气枪的首波同相叠加；

3) 当主震源的鬼波到达第一级辅助震源的时候，同样采用延时激发的方式激发第一级辅助震源，使第一级辅助震源的首波与主震源的鬼波在远场完全抵消；当上一级辅助震源的鬼波到达下一级辅助震源的时候，以相同的方式激发下一级辅助震源，使下一级辅助震源的首波与其上一级辅助震源的鬼波在远场完全抵消，直至 N 级辅助震源均激发完毕。

在上述方法中，辅助震源并非一定要与主震源相同（组合模式以及放置深度等），当两者深度不同时，可以对辅助震源进行改变，通过调整容量、压强以及多枪组合模式得到与主震源鬼波近似的波场，也可以实现主震源鬼波的抵消。作为优选的实施方案，所述的 N 级辅助震源为多深度立体震源。

更加进一步的，所述的 N 级辅助震源和主震源均由位于不同深度的多级气枪单元组成；每级气枪单位包括一把或多把气枪，主震源和 N 级辅助震源的气枪单元级数相同。此时，所述的步骤 3) 辅助震源的延时激发方式具体为：

主震源的鬼波由主震源各级气枪单元激发的鬼波组合而成，各级气枪单元的鬼波到达第一级辅助震源的时间不同；第一级辅助震源中的各级气枪单元分别用于完全消除主震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波；第一级辅助震源中的各级气枪单元的激发时间为主震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波到达该级气枪单元的时刻；

下一级辅助震源中的各级气枪单元分别用于完全消除上一级辅助震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波；其激发时间为上一级辅助震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波到达该级气枪单元的时刻。

更加进一步的，所述的主震源和 N 级辅助震源的布置深度相同、气枪类型相同、容量组合和深度间隔相同，在此种情况下，所述的主震源或 N 级辅助震源内不同深度处的气枪采用延迟激发方式，根据深度设定不同的激发时间 t_i ；

$$t_i = \begin{cases} t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} & (i \in S_p) \\ t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} + \frac{2 * N * h_i}{c} & (i \in S_a, N \geq 1) \end{cases}$$

其中, t_0 、 h_s 分别对应于主震源中放置深度最浅的气枪深度以及激发时间, h_i 、 t_i 为同一震源中第 i 气枪的放置深度和相应的激发时间, c 为声波在水中速度, N 为辅助震源级别, S_p 、 S_a 分别表示主震源和辅助震源。

与现有技术相比, 本发明所具有的有益效果是:

本发明在常规震源 S_p (主震源) 设计的基础之上引入辅助震源 S_a , 当 S_p 的鬼波到达 S_a 所在深度处时, 激发 S_a , 此时 S_a 所激发得到的首波因与 S_p 鬼波极性相反, 在到达远场时两者实现相互抵消, 这样最终得到的远场子波就是主震源的首波以及辅助震源鬼波的叠加。此时首波对应于主震源激发时的深度 h , 而鬼波相对于首波而言, 到达时间被进一步延后, 近似于气枪放置于虚拟深度 $2h$ 处激发的结果, 由此打破了由同一深度所主导的中和效应。

本发明提出将多深度立体震源引入到虚拟深度震源设计之中, 将不同气枪或者子阵放置于不同深度处, 采用延时激发的方式可以实现不同气枪的首波同相叠加, 同时利用了陷波频率随深度变化的多样性, 因此可以进行有效地陷波补偿。

本发明的基于虚拟和真实深度组合震源有效地提高了低频响应, 同时补偿了水平震源的陷波; 实现了宽频带震源子波的设计目的。

附图说明

图 1 为 250cu.in 单枪在不同深度处激发时近场子波模拟结果, 图 1 (a) 为时间域子波形态; 图 1 (b) 为相应的频谱曲线。

图 2 为鬼波陷波效应在不同深度激发条件下的脉冲响应对比结果, 图 2 (a) 为脉冲震源子波形态; 图 2 (b) 为相应频谱, 其中假设海面反射系数为-1。

图 3 为 250cu.in 单枪在不同深度处激发所得到的远场子波模拟结果, 图 3(a) 为时间域子波形态; 图 3 (b) 为相对应的频谱曲线。

图 4 为虚拟深度构建过程。图 4 (a) 为观测系统示意图; 图 4 (b) 为主震源和辅助震源激发时间及相应鬼波时间关系示意图。

图 5 为虚拟深度震源工作原理示意图。图 5 (a) 为时间域脉冲子波, 假设主震源和辅助震源深度为 6m; 图 5 (b) 为相应的振幅谱。

图 6 振幅调节因子 *Scalar* 随辅助震源数量以及频率变化曲线。计算结果基

于深度 6m 以及水速 1500m/s 得到。 $n=0$ 对应于只有主震源的情况，对于选定的频率信号都存在压制影响。

图 7 基于倾斜气枪模式的虚拟深度震源示意图。图中主震源和辅助震源均为多个气枪倾斜排列组合而成。

图 8 基于两层深度组合的虚拟深度震源远场子波到达时间示意图。

图 9 基于水平（图 8（a））和倾斜（图 8（b））组合模式的虚拟深度震源振幅调节因子对比结果。水平震源放置深度为 6m，而倾斜震源深度组合为 6-7-8-9-10-11m。两种震源都采用 6 枪组合，振幅调节因子 $Scalar=1$ 对应于保真信号。

图 10 为常规水平调谐枪阵与包含一个辅助震源的倾斜组合模拟虚拟深度震源对比。图 9（a）为时间域子波形态，图 9（b）为相应的频谱曲线。

具体实施方式

下面结合附图对发明做进一步说明。

为了打破中和效应，本发明的基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源包括：主震源和 N 级辅助震源， $N \geq 1$ ；所述 N 级辅助震源中，第一级辅助震源用于激发得到第一辅助激发信号；所述第一辅助激发信号与主激发信号相同，第一级辅助震源的激发时刻为主震源的鬼波到达第一级辅助震源的时候，第一级辅助震源的首波与主震源的鬼波完全抵消；下一级辅助震源的激发信号与其上一级辅助震源的激发信号相同，下一级辅助震源的激发时刻为其上一级辅助震源的鬼波到达该级辅助震源的时候，下一级辅助震源的首波与其上一级辅助震源的鬼波完全抵消。

结合附图说明如下：在常规震源 S_p （主震源）设计的基础之上引入辅助震源 S_a ，如图 4（a）所示。当 S_p 的鬼波到达 S_a 所在深度处时，激发 S_a ，此时 S_a 所激发得到的首波因与 S_p 鬼波极性相反，在到达远场时两者实现相互抵消，这样最终得到的远场子波就是主震源的首波以及辅助震源鬼波的叠加，如图 4（b）所示。此时首波对应于主震源激发时的深度 h ，而鬼波相对于首波而言，到达时间被进一步延后，近似于气枪放置于虚拟深度 $2h$ 处激发的结果，由此打破了由同一深度所主导的中和效应。为了实现 S_p 鬼波的完全抵消，最为简单的方法就是将辅助震源设计为与主震源组成以及放置深度完全相同。

图 5 给出了以脉冲子波为例的虚拟深度震源，此时主震源和辅助震源都放置在 6m 深度处，通过图 5 (a) 可以看出，最终的鬼波具有两倍的时间延迟，对应于 12m 虚拟深度处。相应地在频率域，低频能量就会得到补偿，如图 5 (b) 所示。但相应的会在大约 60Hz 处引入陷波。

对于如图 4 和图 5 所示的只有一个辅助震源时，最终的远场子波 $P(t)$ 可表示为：

$$P(t) = P_p(t) - P_p(t + 4h/c) \quad (1)$$

其中 $P_p(t)$ 为主脉冲的首波， h 为主震源和辅助震源的放置深度， c 为水中声波速度。

为了进一步提高低频响应，可以相应的引入更多的辅助震源用于抵消上一级别辅助震源的鬼波，这样最终的远场子波 $P(t)$ 就是主震源首波与最后一个辅助震源的鬼波叠加结果：

$$P(t) = P_p(t) - P_p(t + 2(n+1)h/c) \quad (2)$$

其中 n 为辅助震源的个数。通过公式 (2) 可以看出，与首波相比，鬼波可以看作对应于 $(n+1)*h$ 深度的激发结果。

将公式 (2) 做傅立叶变换到频率域，并求取振幅谱得到：

$$P(f) = \text{Scalar} |P_p(f)| \quad (3)$$

$$\text{Scalar} = \sqrt{2 - 2\cos(4\pi fh(n+1)/c)} \quad (4)$$

其中 $P(f)$ 和 $P_p(f)$ 分别为 $P(t)$ 和 $P_p(t)$ 的振幅谱。辅助震源的引入对于首波的改变可以通过乘积项振幅调节因子 Scalar 来描述。

图 6 给出了 Scalar 随着辅助震源数量 n 以及频率 f 变化的规律。当 $\text{Scalar} > 1$ 时表示首波能量得到增强，相反则被压缩。而理想的情况是所有频率的调节因子数值都为 1，意味着信号保真度高。从图 6 可以看出，对于 7Hz 以下低频部分，在 Sa 少于 5 个时，其能量随着 Sa 增多近似线性增强，尤其对于超低频率信号，如图中 2Hz 信号，需要足够数量的 Sa （如该例中的 10 个）才可以完全抵消鬼波的压制效果。对于 7Hz 以上频率，过多的 Sa 由于虚拟深度过大造成陷波频率变低，因此呈现先增后减特点，如 15Hz 频率信号，在 $n=7$ 时被强烈压制，频率响应甚至低于只有主震源的情况，虚拟深度的引入导致陷波频率减小的现象与图 5 一致。对于全波形反演，由于主要以低频信号为主，这种辅助震源引入的中高频

陷波并不会造成很大影响，但是对于高分辨率地震勘探，由于需要宽频带震源保证频谱完整度，因此需要对中高频陷波进行补偿。

为了克服这一问题，本发明提出将多深度立体震源引入到虚拟深度震源设计之中。鬼波引起的陷波频率 f_n 与深度有关，可以表示为：

$$f_n = \frac{c}{2h \sin \theta} \quad (5)$$

其中 θ 为子波入射角度，在垂直气枪下方时 $\theta=90^\circ$ 。

将不同气枪或者子阵放置于不同深度处，采用延时激发的方式可以实现不同气枪的首波同相叠加，同时利用了陷波频率随深度变化的多样性，因此可以进行有效地陷波补偿。图 7 给出了基于倾斜气枪组合模式的虚拟深度震源示意图。图 7 左部分即为常规的倾斜气枪震源，图右部分为辅助震源。气枪的激发时间 t_i 可表示为：

$$t_i = \begin{cases} t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} & (i \in S_p) \\ t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} + \frac{2h_i}{c} & (i \in S_a) \end{cases}$$

其中， h_s 和 t_0 分别为最浅处主震源气枪深度及激发时间， h_i 为气枪 i 的放置深度。辅助震源中的各个单枪激发时间要比放置于相同深度处的主震源单枪延后 $2h_s/c$ 。

图 8 展示了由两层深度组合的虚拟深度震源中各气枪激发时间示意图。可以看出利用真实深度组合，可以破坏鬼波的同相叠加性，同时差异化的鬼波到达时间打破了由同一深度主导的中和效应。

同样地，对于有 n 级辅助震源（以倾斜阵列为单元）的情况，最终的远场子波 $P(t)$ 可表示为：

$$P(t) = \sum_{i=1}^m [P_i(t) - P_i(t + 2h_i/c + 2nh_i/c)] \quad (7)$$

其中， $P_i(t)$ 为气枪 i 的子波， m 为主震源气枪个数。这里假设主震源和辅助震源子波形态一致，只是存在时间上的延迟。可以通过在同一深度处以相干枪的方式布设来实现（主震源和辅助震源气枪各一只，此时图 7 中 $d \sim 1m$ ）。

采用与公式（3）和（4）相同的思路，对公式（7）做傅立叶变换同时求取其振幅谱，可以得到倾斜气枪组合模式下的振幅调节因子 *Scalar*：

$$Scalar = \frac{1}{m} \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^m [1 - \cos(4\pi f(n+1)h_i / c)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^m [\sin(4\pi f(n+1)h_i / c)] \right\}^2} \quad (8)$$

基于公式(8),对于辅助震源数量的影响进行了模拟,得到如图9所示结果。这里假设倾斜组合的主震源由6枪组合而成,且深度组合为6-7-8-9-10-11m。左图为基于水平气枪组合模式(深度为6m)的虚拟深度震源结果,可以明显看出,随着辅助震源数量的增多,低频能量被增强,凹陷程度得到缓解,但于此同时,在同样的频带范围内,辅助震源数量的增加提高了陷波出现的频率。而对于倾斜气枪组合的虚拟深度震源,低频改善效果与水平模式相当,同时得益于多深度的陷波多样性,中高频陷波出现的次数明显低于常规水平模式。在气枪激发的优势频带频带范围内(如10-150Hz),二次陷波直到引入4组辅助震源时才会出现。

图10对比了6枪组合的水平震源(250-150-100-80-60-40cu. in 调谐枪阵)、12枪组合的水平震源(2组6枪调谐枪阵)以及基于6-11m倾斜模式包含一层Sa的虚拟深度震源(250-150-100-80-60-40cu. in 次序组合,深度间隔1m)远场子波形态及频谱曲线。与6枪组合震源相比,可以明显看出虚拟深度震源有效地提高了低频响应,同时补偿了水平震源位于125Hz的陷波。实现了宽频带震源子波的设计目的。与12枪组合相比(两者所用气枪总容量相同),虚拟震源对于低频增强能力略有优势,同时可以避免常规的容量直接累加造成的高脉冲(图10(a)中长虚线)对于海洋环境的破坏。

需要指出的是,辅助震源并非一定要与主震源相同(组合模式以及放置深度等),当两者深度不同时,需要对辅助震源进行改变,通过调整容量、压强以及多枪组合模式得到与主震源鬼波近似的波场,也可以实现主震源鬼波的抵消。

权利要求书

1.一种基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源，其特征在于包括：
主震源，用于得到主激发信号；

N级辅助震源， $N \geq 1$ ；

所述N级辅助震源中，第一级辅助震源用于激发得到第一辅助激发信号；所述第一辅助激发信号与主激发信号形成的鬼波相同，但极性相反，第一级辅助震源的激发时刻为主震源的鬼波到达第一级辅助震源的时候，第一级辅助震源的首波与主震源的鬼波在远场完全抵消；

下一级辅助震源的激发信号与其上一级辅助震源的激发信号形成的鬼波相同，但极性相反，下一级辅助震源的激发时刻为其上一级辅助震源的鬼波到达该级辅助震源的时候，下一级辅助震源的首波与其上一级辅助震源的鬼波在远场完全抵消。

2.根据权利要求1所述的基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源，其特征在于所述的主震源和N级辅助震源均为多深度立体震源。

3.根据权利要求1或2所述的基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源，其特征在于所述的主震源和N级辅助震源均由位于不同深度的多级气枪单元组成；每级气枪单位包括一把或多把气枪，主震源和N级辅助震源的气枪单元级数相同。

4.根据权利要求1或2所述的基于虚拟和真实深度组合的海上宽频带气枪震源，其特征在于所述的主震源和N级辅助震源的气枪类型、容量组合、布置深度和深度间隔均相同。

5.一种基于权利要求1所述海上宽频带气枪震源的深度组合激发方法，其特征在于包括如下步骤：

1) 根据勘探需求，设计和布置主震源，其中主震源为多深度立体震源，并根据主震源设计和布置N级辅助震源，使第一辅助激发信号与主激发信号形成的鬼波相同，但极性相反，下一级辅助震源的激发信号与其上一级辅助震源的激发信号形成的鬼波相同，但极性相反；

2) 根据立体震源的布置深度间隔，采用延时激发的方式，激发主震源，使主震源各组成气枪的首波同相叠加；

3) 当主震源的鬼波到达第一级辅助震源的时候, 同样采用延时激发的方式激发第一级辅助震源, 使第一级辅助震源的首波与主震源的鬼波在远场完全抵消; 当上一级辅助震源的鬼波到达下一级辅助震源的时候, 以相同的方式激发下一级辅助震源, 使下一级辅助震源的首波与其上一级辅助震源的鬼波在远场完全抵消, 直至 N 级辅助震源均激发完毕。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于所述的 N 级辅助震源为多深度立体震源。

7. 根据权利要求 6 所述的方法, 其特征在于所述的 N 级辅助震源和主震源均由位于不同深度的多级气枪单元组成; 每级气枪单位包括一把或多把气枪, 主震源和 N 级辅助震源的气枪单元级数相同。

8. 根据权利要求 7 所述的方法, 其特征在于所述的步骤 3) 辅助震源的延时激发方式具体为:

主震源的鬼波由主震源各级气枪单元激发的鬼波组合而成, 各级气枪单元的鬼波到达第一级辅助震源的时间不同; 第一级辅助震源中的各级气枪单元分别用于完全消除主震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波; 第一级辅助震源中的各级气枪单元的激发时间为主震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波到达该级气枪单元的时刻;

下一级辅助震源中的各级气枪单元分别用于完全消除上一级辅助震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波; 其激发时间为上一级辅助震源中对应级数的气枪单元产生的鬼波到达该级气枪单元的时刻。

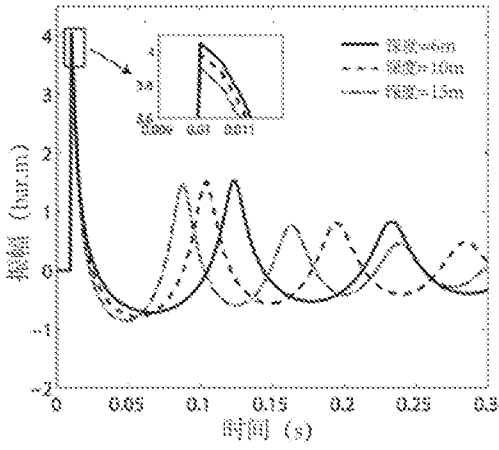
9. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于所述的主震源和 N 级辅助震源的布置深度相同、气枪类型相同、容量组合和深度间隔相同。

10. 根据权利要求 9 所述的方法, 其特征在于: 所述的主震源或 N 级辅助震源内不同深度处的气枪采用延迟激发方式, 根据深度设定不同的激发时间 t_i :

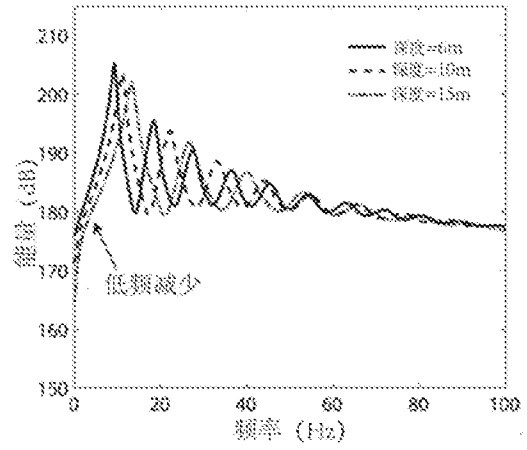
$$t_i = \begin{cases} t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} & (i \in S_p) \\ t_0 + \frac{h_i - h_s}{c} + \frac{2 * N * h_i}{c} & (i \in S_a, N \geq 1) \end{cases}$$

其中, t_0 、 h_s 分别对应于主震源中放置深度最浅的气枪深度以及激发时间, h_i 、 t_i 为同一震源中第 i 气枪的放置深度和相应的激发时间, c 为声波在水中速度, N

为辅助震源级别， S_p 、 S_a 分别表示主震源和辅助震源。

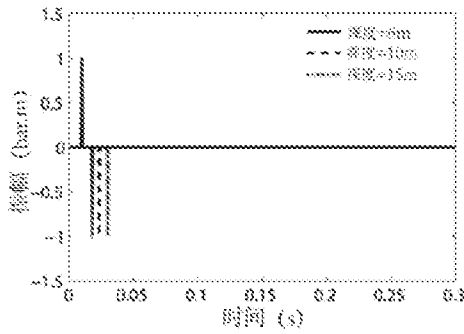


(a)

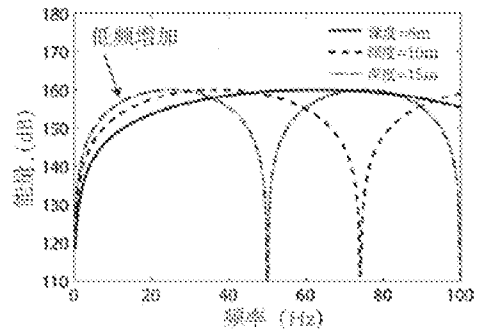


(b)

图 1

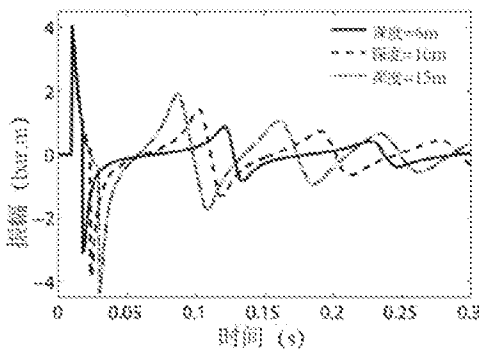


(a)

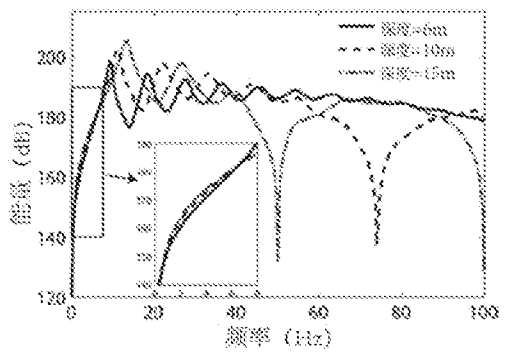


(b)

图 2



(a)



(b)

图 3

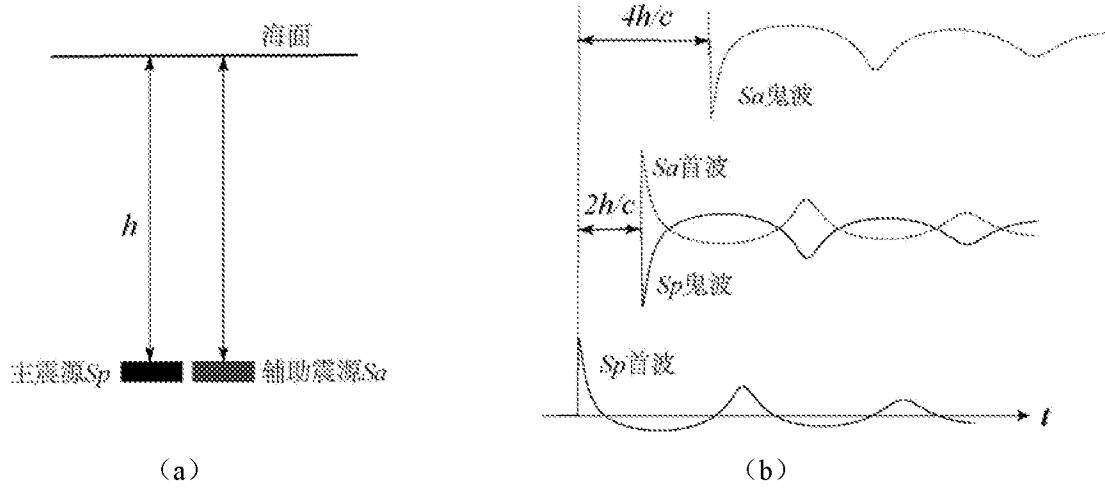


图 4

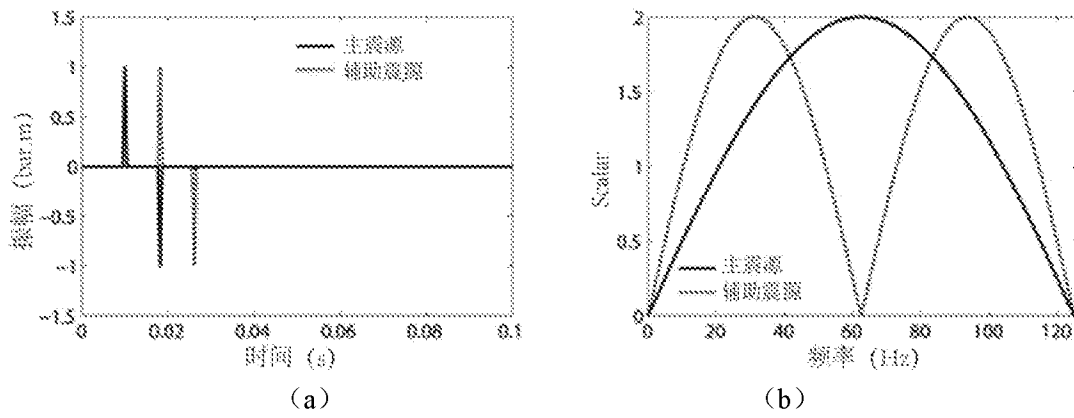


图 5

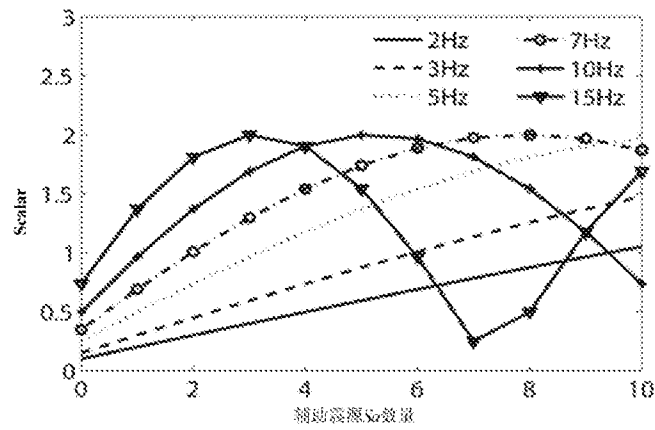


图 6

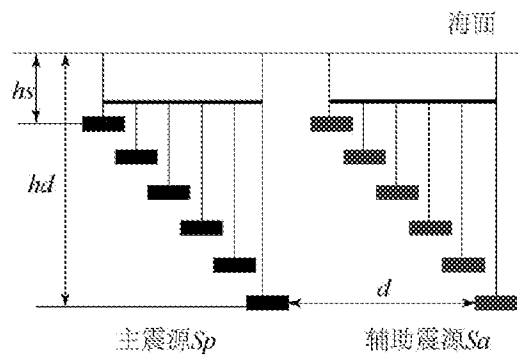


图 7

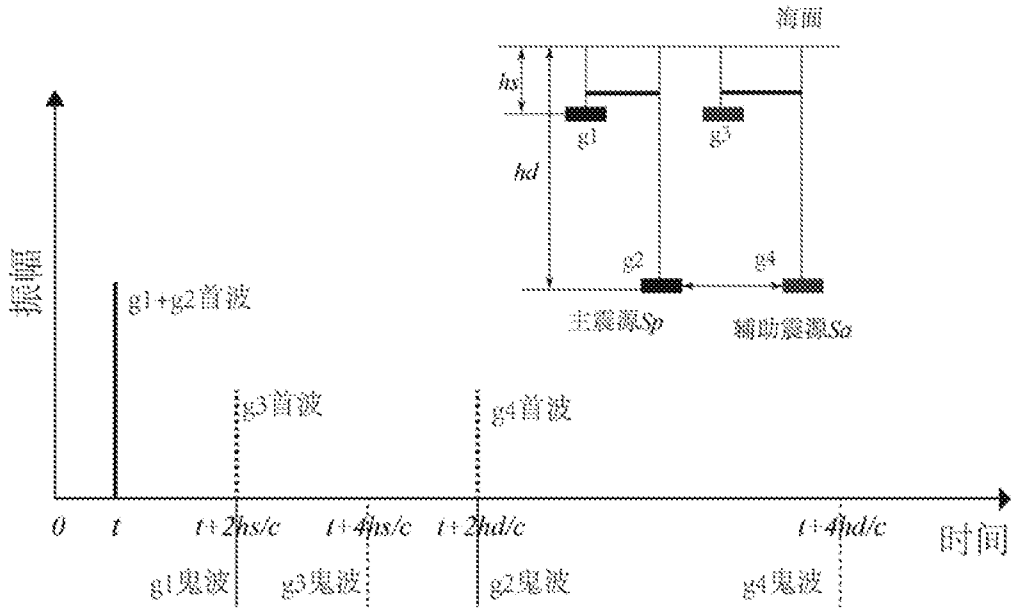


图 8

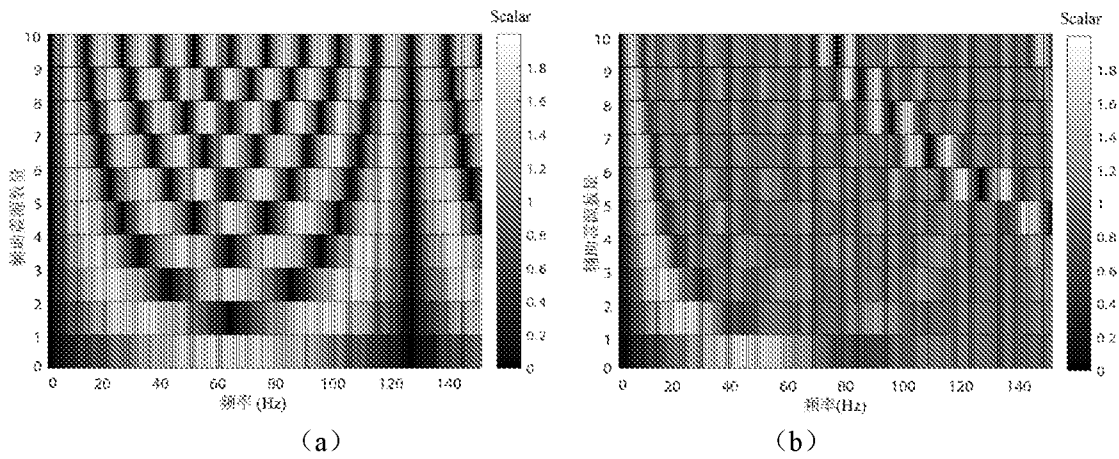


图 9

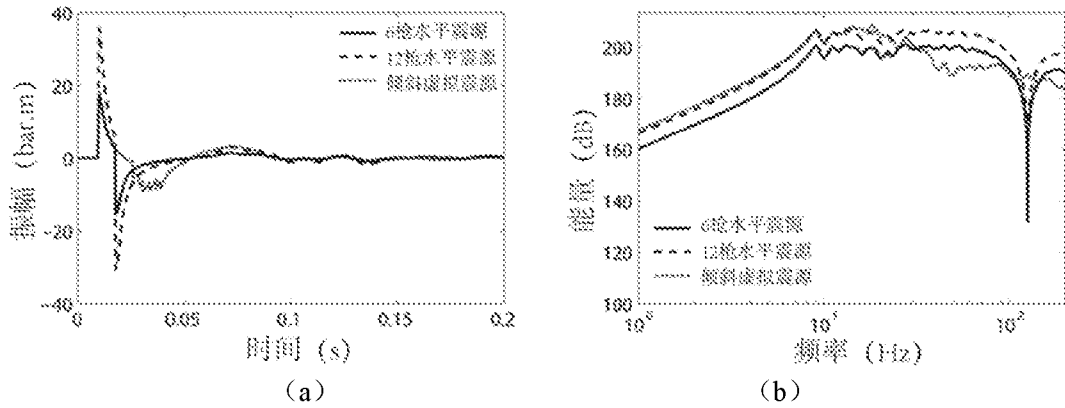


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/115606

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G01V 1/133(2006.01)i; G01V 1/137(2006.01)i; G01V 1/04(2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
G01V		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: 海洋, 海上, 激发, 多, 主, 辅助, 极性, 相反, 震源, 鬼波, 虚反射, 伴随波, 气枪, 深度, marine, actuat+, multi, major, auxiliary, impulsive, source, ghost wave, air-gun, opposite, polarity, depth		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2017276774 A1 (CGG SERVICES SAS) 28 September 2017 (2017-09-28) description, paragraphs 15-18 and 51-54, and figures 1, 8A and 8B	1-10
A	US 2013333974 A1 (WESTERNGECO L.L.C.) 19 December 2013 (2013-12-19) entire document	1-10
A	US 2012014212 A1 (CONOCOPHILLIPS COMPANY) 19 January 2012 (2012-01-19) entire document	1-10
A	CN 103582828 A (GECO TECHNOLOGY B.V.) 12 February 2014 (2014-02-12) entire document	1-10
A	CN 104049278 A (THE FIRST INSTITUTE OF OCEANOGRAPHY, SOA et al.) 17 September 2014 (2014-09-17) entire document	1-10
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
01 August 2019		19 August 2019
Name and mailing address of the ISA/CN		Authorized officer
State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China		
Facsimile No. (86-10)62019451		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/115606

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2017276774	A1	28 September 2017	WO	2016055867	A2	14 April 2016
				AU	2015329670	A1	20 April 2017
				EP	3204796	A2	16 August 2017
				MX	2017004419	A	07 December 2017
				CA	2963340	A1	14 April 2016
US	2013333974	A1	19 December 2013	EP	2841967	A1	04 March 2015
				BR	112014030257	A2	27 June 2017
				WO	2013188743	A1	19 December 2013
				AU	2013274081	A1	04 December 2014
				MX	2014014559	A	07 August 2015
US	2012014212	A1	19 January 2012	EP	2596384	A1	29 May 2013
				WO	2012012399	A1	26 January 2012
				CA	2785823	A1	26 January 2012
				AU	2011282286	A1	07 February 2013
				US	2012035853	A1	09 February 2012
				AU	2011282292	A1	07 February 2013
				US	2012014213	A1	19 January 2012
				US	2012057429	A1	08 March 2012
				AU	2011282257	A1	07 February 2013
				AU	2011282261	A1	26 July 2012
				CA	2806007	A1	26 January 2012
				WO	2012012424	A1	26 January 2012
				WO	2012012395	A1	26 January 2012
				EP	2596381	A1	29 May 2013
				CA	2806005	A1	26 January 2012
				CA	2806074	A1	26 January 2012
				EP	2596382	A1	29 May 2013
				WO	2012012430	A1	26 January 2012
				EP	2596383	A1	29 May 2013
				ID	201302677	A	25 July 2013
CN	103582828	A	12 February 2014	RU	2013158695	A	20 July 2015
				WO	2012170608	A2	13 December 2012
				CA	2838403	A1	13 December 2012
				AU	2016202629	A1	19 May 2016
				MX	2013014463	A	27 March 2014
				AU	2012268004	A1	09 January 2014
				US	2012314536	A1	13 December 2012
				EP	2699942	A2	26 February 2014
				BR	112013031627	A2	29 August 2017
CN	104049278	A	17 September 2014	None			

<p>A. 主题的分类</p> <p>G01V 1/133 (2006.01) i; G01V 1/137 (2006.01) i; G01V 1/04 (2006.01) i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																				
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01V</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE:海洋, 海上, 激发, 多, 主, 辅助, 极性, 相反, 震源, 鬼波, 虚反射, 伴随波, 气枪, 深度, marine, actuat+, multi, major, auxiliary, impulsive, source, ghost wave, air-gun, opposite, polarity, depth</p>																				
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 2017276774 A1 (CGG SERVICES SAS) 2017年 9月 28日 (2017 - 09 - 28) 说明书第15-18, 51-54段, 附图1, 8A, 8B</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2013333974 A1 (WESTERNGECO L. L. C.) 2013年 12月 19日 (2013 - 12 - 19) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2012014212 A1 (CONOCOPHILLIPS COMPANY) 2012年 1月 19日 (2012 - 01 - 19) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103582828 A (格库技术有限公司) 2014年 2月 12日 (2014 - 02 - 12) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104049278 A (国家海洋局第一海洋研究所 等) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	US 2017276774 A1 (CGG SERVICES SAS) 2017年 9月 28日 (2017 - 09 - 28) 说明书第15-18, 51-54段, 附图1, 8A, 8B	1-10	A	US 2013333974 A1 (WESTERNGECO L. L. C.) 2013年 12月 19日 (2013 - 12 - 19) 全文	1-10	A	US 2012014212 A1 (CONOCOPHILLIPS COMPANY) 2012年 1月 19日 (2012 - 01 - 19) 全文	1-10	A	CN 103582828 A (格库技术有限公司) 2014年 2月 12日 (2014 - 02 - 12) 全文	1-10	A	CN 104049278 A (国家海洋局第一海洋研究所 等) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文	1-10
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
X	US 2017276774 A1 (CGG SERVICES SAS) 2017年 9月 28日 (2017 - 09 - 28) 说明书第15-18, 51-54段, 附图1, 8A, 8B	1-10																		
A	US 2013333974 A1 (WESTERNGECO L. L. C.) 2013年 12月 19日 (2013 - 12 - 19) 全文	1-10																		
A	US 2012014212 A1 (CONOCOPHILLIPS COMPANY) 2012年 1月 19日 (2012 - 01 - 19) 全文	1-10																		
A	CN 103582828 A (格库技术有限公司) 2014年 2月 12日 (2014 - 02 - 12) 全文	1-10																		
A	CN 104049278 A (国家海洋局第一海洋研究所 等) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17) 全文	1-10																		
<p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																				
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)</p> <p>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>“&” 同族专利的文件</p>																				
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2019年 8月 1日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2019年 8月 19日</p>																		
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>		<p>授权官员</p> <p>曹妹妹</p> <p>电话号码 86-(10)-53961315</p>																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/115606

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
US	2017276774	A1	2017年 9月 28日	WO	2016055867	A2	2016年 4月 14日
				AU	2015329670	A1	2017年 4月 20日
				EP	3204796	A2	2017年 8月 16日
				MX	2017004419	A	2017年 12月 7日
				CA	2963340	A1	2016年 4月 14日
US	2013333974	A1	2013年 12月 19日	EP	2841967	A1	2015年 3月 4日
				BR	112014030257	A2	2017年 6月 27日
				WO	2013188743	A1	2013年 12月 19日
				AU	2013274081	A1	2014年 12月 4日
				MX	2014014559	A	2015年 8月 7日
US	2012014212	A1	2012年 1月 19日	EP	2596384	A1	2013年 5月 29日
				WO	2012012399	A1	2012年 1月 26日
				CA	2785823	A1	2012年 1月 26日
				AU	2011282286	A1	2013年 2月 7日
				US	2012035853	A1	2012年 2月 9日
				AU	2011282292	A1	2013年 2月 7日
				US	2012014213	A1	2012年 1月 19日
				US	2012057429	A1	2012年 3月 8日
				AU	2011282257	A1	2013年 2月 7日
				AU	2011282261	A1	2012年 7月 26日
				CA	2806007	A1	2012年 1月 26日
				WO	2012012424	A1	2012年 1月 26日
				WO	2012012395	A1	2012年 1月 26日
				EP	2596381	A1	2013年 5月 29日
				CA	2806005	A1	2012年 1月 26日
				CA	2806074	A1	2012年 1月 26日
				EP	2596382	A1	2013年 5月 29日
				WO	2012012430	A1	2012年 1月 26日
				EP	2596383	A1	2013年 5月 29日
				ID	201302677	A	2013年 7月 25日
CN	103582828	A	2014年 2月 12日	RU	2013158695	A	2015年 7月 20日
				WO	2012170608	A2	2012年 12月 13日
				CA	2838403	A1	2012年 12月 13日
				AU	2016202629	A1	2016年 5月 19日
				MX	2013014463	A	2014年 3月 27日
				AU	2012268004	A1	2014年 1月 9日
				US	2012314536	A1	2012年 12月 13日
				EP	2699942	A2	2014年 2月 26日
BR	112013031627	A2	2017年 8月 29日				
CN	104049278	A	2014年 9月 17日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)