

何勇, 张建中. 海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(5): 689–700. doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.05.06.

He Y, Zhang JZ. Ray tracing illumination analysis on marine seismic vertical cable acquisition system[J]. CT Theory and Applications, 2015, 24(5): 689–700. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.05.06.

海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析

何勇^{a,b}, 张建中^{a,b}

中国海洋大学 a. 海底科学与探测技术教育部重点实验室; b. 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100

摘要: 垂直缆地震法是海洋地震勘探学里新发展起来的一种具有潜在应用前景的观测技术。本文基于射线追踪理论, 采用基于不规则单元的双线性走时插值和快速波前扩展的高精度和高效率方法, 并以目标层反射点分布密度作为衡量观测系统的主要参数, 通过一系列三维海底地层模型和炮点、垂直接收缆及其水听器布设的数值模拟实验, 对海洋地震垂直缆观测系统进行照明分析, 取得了垂直缆观测系统参数对目标层反射点分布的影响规律, 为最佳垂直缆观测系统设计和提高地震成像质量提供参考依据。

关键词: 垂直缆; 照明分析; 射线追踪; 反射点密度

doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.05.06 中图分类号: P 631, P 315 文献标志码: A

近年来随着国家海洋战略的实施和社会对油气资源的巨大需求, 国内石油公司加大了海上资源勘探力度。为了提高海洋地震成像质量和勘探效果, 一些新的海上地震勘探技术得以引进和发展, 垂直缆地震法^[1] (vertical-cable seismic, VCS) 就是其中之一。如图 1 所示, 垂直接收缆上部分放置可调控浮标, 使电缆具有上浮的拉力, 底部用锚固定在海底, 使电缆相对于海面保持竖直状态。垂直缆布设在海水中, 调查船上空气枪震源激发地震波, 垂直缆上挂载着水听器接收地震波信息, 并通过无线电传回调查船上。

1987 年, Texaco 公司在墨西哥湾首次应用垂直缆进行地震调查实验^[2]。此后更多的学者、机构参与到垂直缆地震法的研究和应用工作中, 并取得了一系列成果。例如: Kraill^[3] 在墨西哥湾多次用垂直缆地震对盐下远景层进行成像研究, 得到盐下层的地质结构; Sukup 等^[4] 在墨西哥湾某同一海域分别用垂直缆和拖缆进行地震探测对比试验, 发现两者经过处理后的地震资料结果非常相近; Leach^[5] 在 Strathspey 地区的北部海域开展了大规模的垂直缆地震调查, 获得的数据质量比过去的三维资料有明显的提高; Guimarães 等^[6] 根据现有资料构建物理模型, 将模拟出来的垂直缆上行波和下行波进行叠加处理, 提高了资料的信噪比等。

与常规海上三维地震勘探法相比, 垂直缆法具备一些突出的优点, 如: 垂直缆在工作中相对静止, 只有震源移动。这种采集方式减少了背景噪声的干扰和海况变化对垂直缆作

收稿日期: 2015-07-29。

基金项目: 国家自然科学基金(41230318; 41074077); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130132110023)。

业的影响，降低了工作环境的限制，可以使垂直缆更靠近钻井平台等障碍物，减少了勘探盲区；垂直缆的上行波和下行波地震记录可以通过分开处理并叠加以提高信噪比。

地震照明分析技术是在地质模型的基础上研究地震波在传播过程中受地下介质结构影响的能量分布特征，用于指导实际观测系统设计和调节振幅补偿强度，提高野外工作效率和地震成像质量。

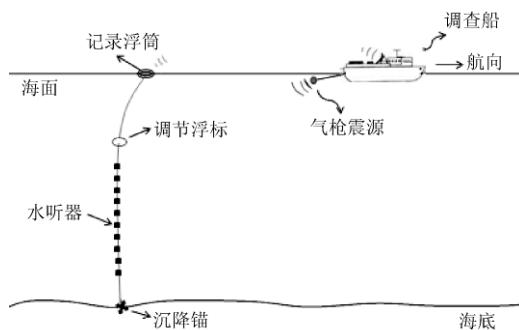


图 1 垂直缆观测系统原理图
Fig. 1 The schematic diagram of vertical cable system

当前，地震波照明分析方法主要分为射线追踪^[7-9]和波动方程两类^[10]。前者基于射线理论，主要利用的是地震波的运动学特性，能快速、准确地统计地下介质各单位面元内反射波的覆盖次数，但不适用于速度横向变化太大的复杂地质结构。而基于波动方程的地震照明分析克服了射线照明法对速度模型的限制，可以通过模型节点的波场值来分析地震波在介质中传播的能量特性，但对于规模较大的三维地质模型，波动方程法的计算量太大。

地震垂直缆观测系统在国内还处在研究和试验阶段，通过地震照明分析，了解垂直缆观测系统与勘探目标之间的联系，对于设计最优的垂直缆观测系统具有重要意义。本文利用高精确的三维射线追踪算法，对不同的垂直缆观测系统和地下模型进行照明分析，研究反射点在目标层中的分布规律，以便设计高效的观测系统来提高采集效率和成像质量。

1 三维射线追踪方法

1.1 波前扩展方法

采用张建中等^[11]提出的层状介质的离散化的方法，把复杂三维层状介质离散成若干不规则六面体单元，既模拟了反射界面的起伏又建构了地层内速度的纵横向变化。模型离散化后，从炮点开始，采用 GMM (group marching method, GMM) 算法^[12]向外扩展波前，获得网格节点的波前时间。地震波在地下介质传播时，遇到介质分界面产生两种传播方式：一种是透过介质分界面继续向下层介质传播，即透射波；另一种是被介质分界面反射后向原介质传播，即反射波。

图 2 所示透射波和反射波的波前传播过程。对于透射波，从源点开始，计算波前走时至分界面，再从介质分界面上的最小走时节点向下计算界面以下介质节点上的波前时间，如图 2 (a) 所示，图中的波前用走时等值线表示；而对于反射波，将界面上波前走时最小的节点作为新震源，向上计算各介质节点的波前时间，如图 2 (b) 所示。

1.2 波前走时计算方法

根据惠更斯原理, 从震源开始, 地震波通过一系列子震源不断向外扩展, 直到计算出所有网格节点的走时。在这个过程中, 用单元网格内已知节点的波前走时, 计算相邻未知节点的波前走时。

我们采用 Zhang 等^[13]提出的基于波前时间双线性插值的三维波前时间计算方法。该算法假设在图 3 所示的不规则六面体单元边界面上 ABCD 上, 波前走时呈双线性变化, 即边界面上任一点的走时都可由该边界的四个已知节点走时双线性插值得到, 再根据费马原理, 求得子震源 S 到未知节点 R 的最小走时射线与边界面 ABCD 交点 P 的位置和走时, 进而计算出从原点 S 到 R 的波前时间。

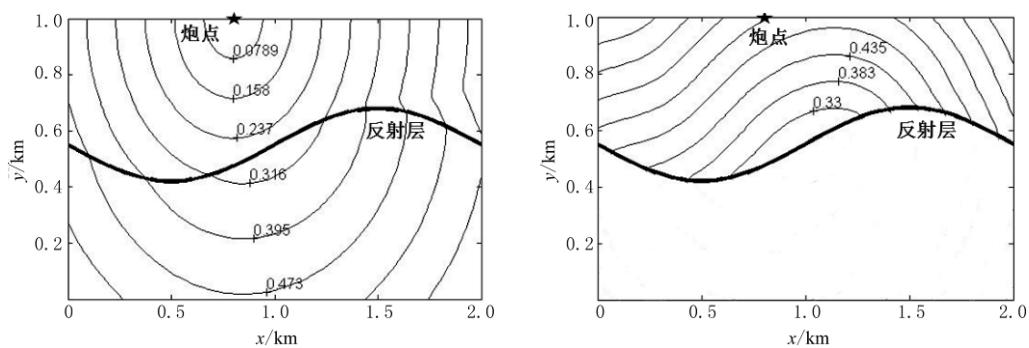


图 2 (a) 波前透射波, (b) 波前反射波

Fig. 2 (a) transmitted wave fronts, (b) reflected wave fronts

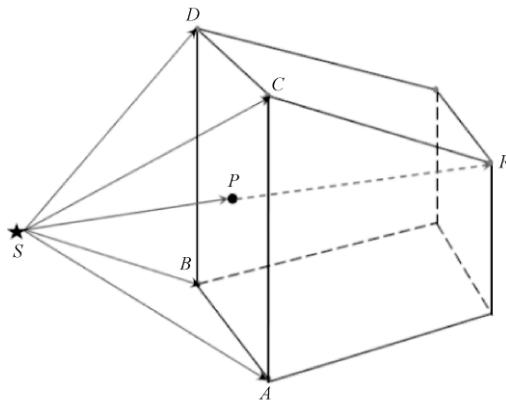


图 3 不规则单元内波前时间计算的几何关系示意图

Fig. 3 Geometry of travel-time computation in an irregular cell

1.3 反射线追踪方法

计算出离散介质所有网格节点的波前走时后, 根据互换原理, 利用反射波的上行波波前走时, 从接收点开始, 反向确定各单元中的射线, 直到介质分界面上为止, 射线与界面的交点即为对应的反射点。再从该反射点开始, 用下行波波前走时反向追踪反射点与震源

点之间的各个单元的射线，连接炮点至反射点以及反射点到接收点的各段射线即为反射波射线路径。

在这个过程中，我们需要不断地在一个个如图 3 所示的不规则六面体单元内确定射线路径。任意一个六面体单元内射线路径的计算过程实际上可以看成是计算波前时间的一个反过程，即在单元边界上求一点，使通过该点到接收点的走时最小，该点与接收点的连线为该单元内的射线路径。将从炮点到接收点之间相关单元的射线顺次相连就得到炮点到接收点的完整射线路径^[14-15]。

2 射线照明分析方法

射线追踪照明分析是在已知的观测系统下，对地震模型进行反射射线追踪，获得目标区域内射线路径和反射点的分布情况，以此分析观测系统的有效性。图 4 (a) 中上层是海底，下层是目标层。左边 3 点为水听器，右边 36 个点为炮点，图中黑线为反射波射线路径。射线照明分析方法通常考虑反射点分布和覆盖次数，前者反映观测系统对目标区的照明范围，后者反映照明强度。图 4 (b) 为图 4 (a) 中射线在目标层上的反射点分布情况，可以通过反射点的分布范围和面元内的反射点数来分析照明强度。一般地，反射点在目标区域分布越广、越均匀，则观测系统对地下目标区的照明程度越高，地震成像质量就会越好。

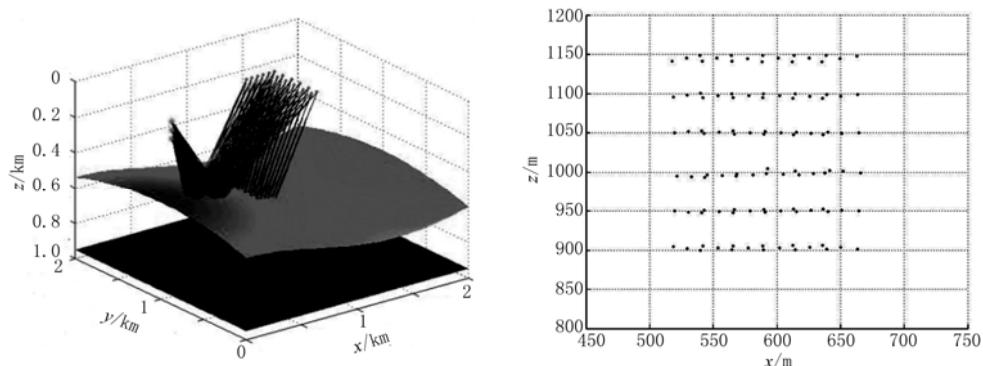


图 4 (a) 反射波射线路径, (b) 反射点在目标层分布

Fig. 4 (a) the ray path of seismic reflected wave, (b) the reflection point spread on the target layer

目标层上地震反射点的分布，不但与目标层本身的深度、形态炮点、检波点的分布范围和排列方式有关，而且受上覆地层结构的影响很大。考虑到这些因素的影响，我们利用射线追踪照明分析方法，通过模型实验，研究单条缆上水听器的分布、炮点的分布、多条接收缆的布设方式以及海底地层产状等对目标区域内反射点的分布范围和单位面元内覆盖次数的影响规律。

3 模型试验和结果分析

3.1 三维地质模型和目标区域的设定

模型在 x 和 y 方向长为 2 000 m，深度为 1 000 m，由三层介质组成，如图 5 (a) 所示。

最上层为海水层, 波速为 1500 m/s, 中间层速度为 2000 m/s, 最下层速度为 2500 m/s。上面界面为海底, 根据不同实验的需要, 在 x 和 y 方向可能有起伏, 下面的界面为目标层。竖直星点表示垂直缆上的水听器。

炮点在海面附近分布于整个工区内, 如图 5 (b) 中的红色矩形框及红色点所示, 在 x 和 y 方向上的长度均为 2000 m, 炮点布设密度用炮间距 $dx \times dy$ 表示, 即在 x 方向上炮间距为 dx , 在 y 方向上炮间距为 dy 。黄色矩形框表示目标区域, 在 x 和 y 方向的范围都为 500~1500 m, 目标区域单位面元的大小为 100 m × 100 m。在下列的实验中, 除了炮检距、炮间距、垂直缆数量和海底地形起伏有所不同外, 其他模型参数包括目标区域的大小都不变。

3.2 实验 1: 垂直缆上水听器的分布

布设垂直缆时, 水听器可以均匀放置在整条垂直缆, 也可集中放置在某一段上, 不同的放置方式将影响目标区域内反射点的分布。实验模型如图 5 (a) 所示, 海底水平深度为 400 m, 目标层上界面深度为 900 m。一条垂直缆位于目标区域中心, 缆长 400 m, 炮间距为 100 m × 200 m。

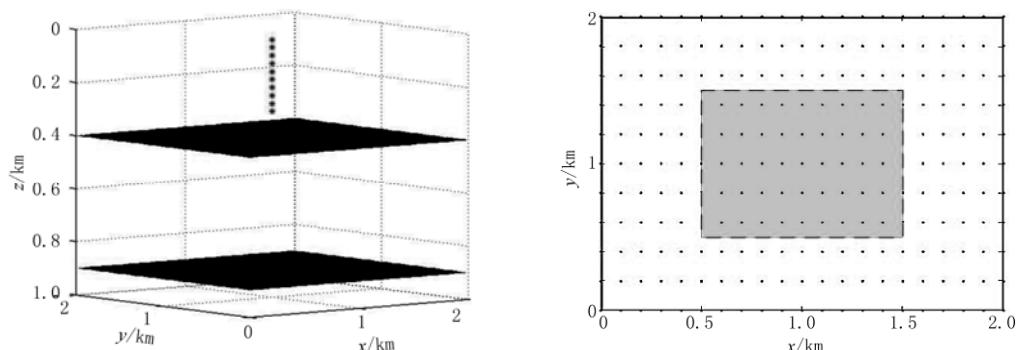


图 5 (a) 三维地质模型, (b) 炮点、目标区域示意图
Fig. 5 (a) Three-dimensional view of the geological model, (b) diagram of shot point grid and target area

图 6 (a) 为 16 个水听器均匀分布在垂直缆上的反射点密度图, 图 6 (b) 为水听器均匀的分布在上半部 20~180 m 得到的反射点密度图, 图 6 (c) 为水听器均匀的分布在下半部 220~380 m 时的反射点密度图, 其中的三角形代表垂直缆位置。由于在 x 方向的炮间距比 y 方向的炮检距小, x 方向反射点分布比 y 方向要多。可以看出, 当水听器集中分布在缆的下部位时, 反射点主要分布在目标区中部, 且覆盖次数较高, 但周边区域反射点较少; 而当接收点位于缆的上部时, 反射点分布范围被扩大。因此, 当勘探目标区较大时, 要使用较长的垂直接收缆, 减小水听器间的距离, 且水听器应均匀分布在整条缆上。

3.3 实验 2: 加密接收点和炮点

一般来说, 增加水听器和炮点都会提高反射点密度, 但对于垂直缆观测系统, 是加密接收点还是加密炮点更利于提高目标区域的覆盖次数, 实验模型与实验 1 相同。垂直缆布设在工区中心处。

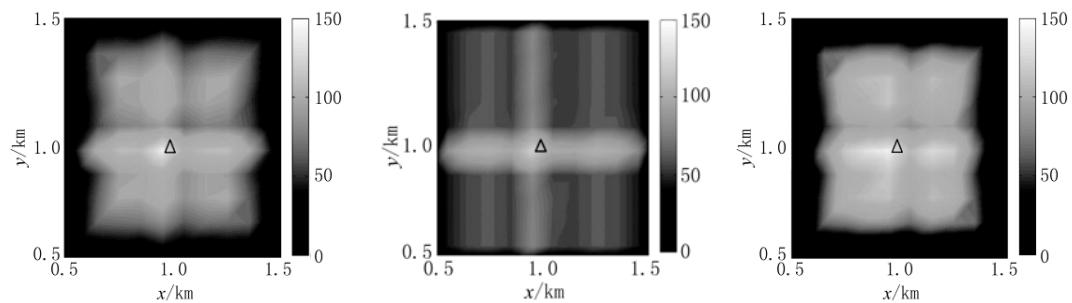


图 6 单条垂直缆上水听器不同分布方式下的反射点覆盖次数

Fig. 6 Fold for hydrophones distribute on different parts of the vertical cable

图 7 (a) 为单条垂直缆上均匀分布 16 个水听器、炮间距为 $100\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的反射点分布密度图, 平均覆盖次数为 35 次左右; 图 7 (b) 为 32 个水听器、炮间距为 $100\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的反射点分布密度图, 平均覆盖次数为 80 左右。水听器个数增加 2 倍, 覆盖次数相应也增加 2 倍多。图 7 (c) 为 16 个水听器、炮间距变为 $50\text{ m} \times 100\text{ m}$ 时的反射点分布密度图, 平均覆盖次数是 140 次左右, 炮点个数增加 4 倍, 覆盖次数也增加了 4 倍多。可见, 加密水听器和加密炮点对提高覆盖次数的效果相当。但是, 由于垂直缆观测系统的炮点布设灵活方便, 因此, 应选择增加炮点的方式提高成像质量。

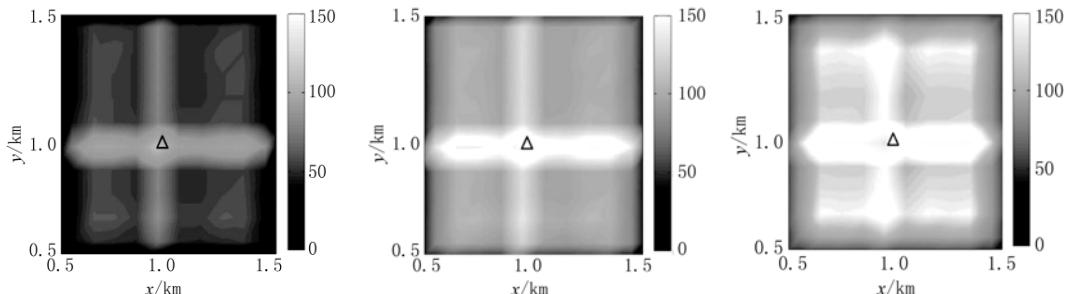


图 7 单条垂直缆不同水听器和炮点排列下反射点覆盖次数

Fig. 7 Fold for different distribution of hydrophones and shot points arrangement

3.4 实验 3: 多条垂直缆的布设

通过布设多条垂直缆, 增加水听器的数量, 可以提高目标区域的覆盖次数。如何布设多条垂直缆才能到达最佳覆盖效果。我们利用布设 4 条垂直缆进行实验。每条缆长 400 m, 均匀分布 16 个接收点, 炮间距为 $100\text{ m} \times 200\text{ m}$ 。

图 8 (a) 是 4 条垂直缆在目标区域的内部, 位置分为 $(750\text{ m}, 750\text{ m})$, $(750\text{ m}, 1250\text{ m})$, $(1250\text{ m}, 750\text{ m})$ 和 $(1250\text{ m}, 1250\text{ m})$ 时目标层上的反射点分布密度图, 平均覆盖数在 110 次左右。图 8 (b) 为 4 条垂直缆分布在目标区域 4 个边界点 $(500\text{ m}, 500\text{ m})$, $(1500\text{ m}, 500\text{ m})$, $(500\text{ m}, 1500\text{ m})$ 和 $(1500\text{ m}, 1500\text{ m})$ 上时的反射点分布图, 平均覆盖次数在 80 左右。由此可见, 多条接收缆位置不同, 目标层上的反射点分布也不同, 一般地, 多条垂直缆布设在目标区域范围内部比布设在目标区域外部成像效果更好。

3.5 实验 4: 垂直缆、炮点分布与有效勘探范围

图 9 是一条垂直缆和一个炮点对应的反射射线及反射点位置, 反射点往往位于接收点和炮点之间, 接收点越靠近海面, 它的对应的反射点离垂直缆位置越远; 越靠近海底, 对应的反射点离垂直缆位置越近。当垂直缆位置和炮点布设区域确定后, 有效勘探目标区域也就确定了。当目标层起伏不大时, 有效勘探区边界在最外侧的炮点与垂直缆位置的中点附近, 当地层起伏较大时, 有效勘探区边界有一定的变化, 但仍然位于最外侧炮点和接收缆位置之间。当布设多条垂直缆时, 有效勘探区将是每条垂直缆所对应的有效勘探区的并集。一般来说, 对于目标区域、垂直缆布设位置和炮点有效区域这 3 个因素, 当已知其中两个时, 就可确定第 3 个, 据此可以灵活高效地设计观测系统。

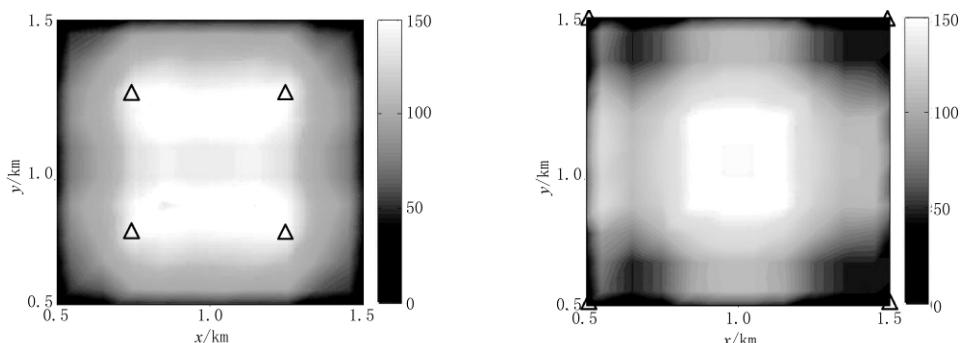


图 8 (a) 4 条垂直缆在目标区域内部, (b) 外部反射点覆盖次数

Fig. 8 (a) fold for four vertical cables in the target area, (b) outside the target area

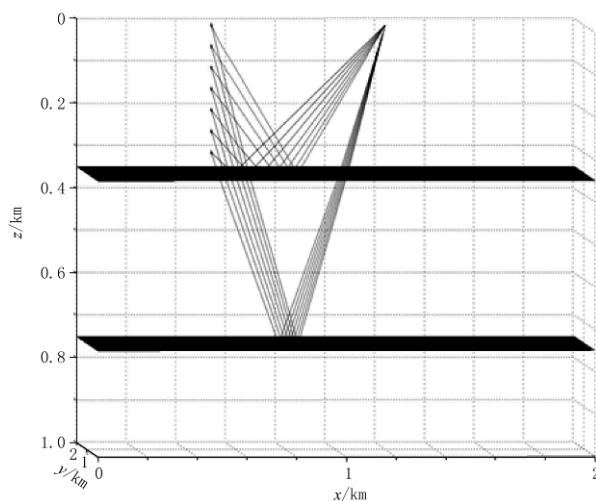


图 9 单炮点到垂直缆的射线路径

Fig. 9 The ray path of the single shot to the vertical cable

图 10 是垂直缆位置、炮点范围和有效勘探区域的相对位置关系图。黑点密集的部分表示目标区域, 大小为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$; 蓝色矩形表示炮点有效工作区域, 大小为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$;

红色三角形表示垂直缆的布设位置。

3.6 实验 5：反射点密度随偏移距的变化

海上垂直电缆上挂载的水听器是沿着竖直方向布设的，每个水听器的深度不同，为讨论偏移距对反射点分布的影响，以水听器与炮点在水平方向上的距离作为偏移距的大小，并取 0 到 1/3 最大偏移距为近偏移距，1/3 到 2/3 最大偏移距为中偏移距，大于 2/3 最大偏移距为远偏移距。实验所用的地质模型与实验 1 相同。

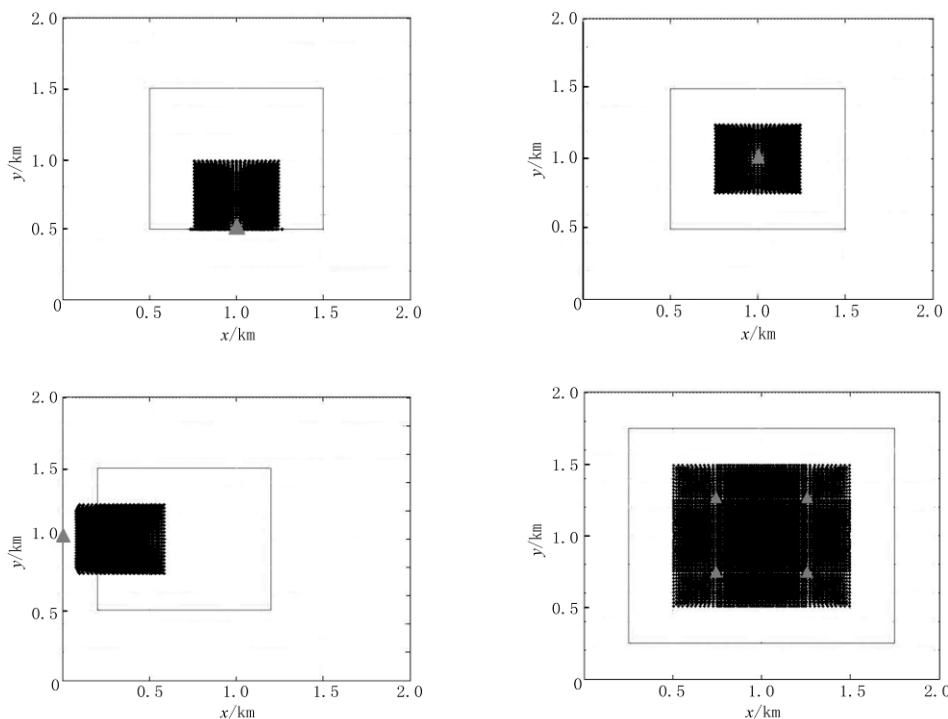


图 10 垂直缆位置、炮点布设范围和有效勘探目标区域之间的关系

Fig. 10 The relationship among vertical cable position, shot point deploying range and effective exploration target area

图 11 上 3 幅图为单条垂直缆在近偏移距、中偏移距和远偏移距三种情况下的反射点分布图（垂直缆放置在目标区域中心）。不同炮检距下的反射点的分布范围不同，各区域内反射点分布都比较均匀。这样可以根据目标区域范围，通过选择偏移距范围来减少采集工作量，提高工作效率。图 11 下面 3 幅图为 4 条垂直缆在三种不同偏移距范围下的反射点分布图（垂直缆分布位置与图 8 (a) 中的相同）。在近偏移距和远偏移距下的反射点分布较均匀，但中偏移距下的反射点分布范围最大并且较集中覆盖在中间区域。可见，中偏移距对整个目标区域上的反射点覆盖贡献最大，这样，在实际采集地震资料的过程中可通过加密中偏移距范围内的炮点来提高地震资料的品质。

3.7 实验 6：倾斜产状目标层的接收缆布设

当目标层倾斜，多条接收缆沿不同方位布设时，其目标层上的反射点分布密度也会不

同。如图 12 所示, 海底水平深度为 400 m, 目标层沿着 x 方向倾斜 (图 12 (a))。每条缆长 400 m, 均匀分布 16 个接收点, 炮间距为 100 m \times 200 m。若两条垂直缆沿 x 方向布设, 位置分别为 (750 m, 1000 m) 和 (1250 m, 1000 m) 时, 平均反射点密度值为 70 左右 (图 12 (b)); 若两条垂直缆沿 y 方向布设, 位置分别为 (1000 m, 750 m) 和 (1000 m, 1250 m) 时, 平均反射点密度值为 50 次左右 (图 12 (c)), 且目标区域边界处反射点分布较少。可见, 沿着目标层倾斜方向布设多条垂直缆的效果较好。

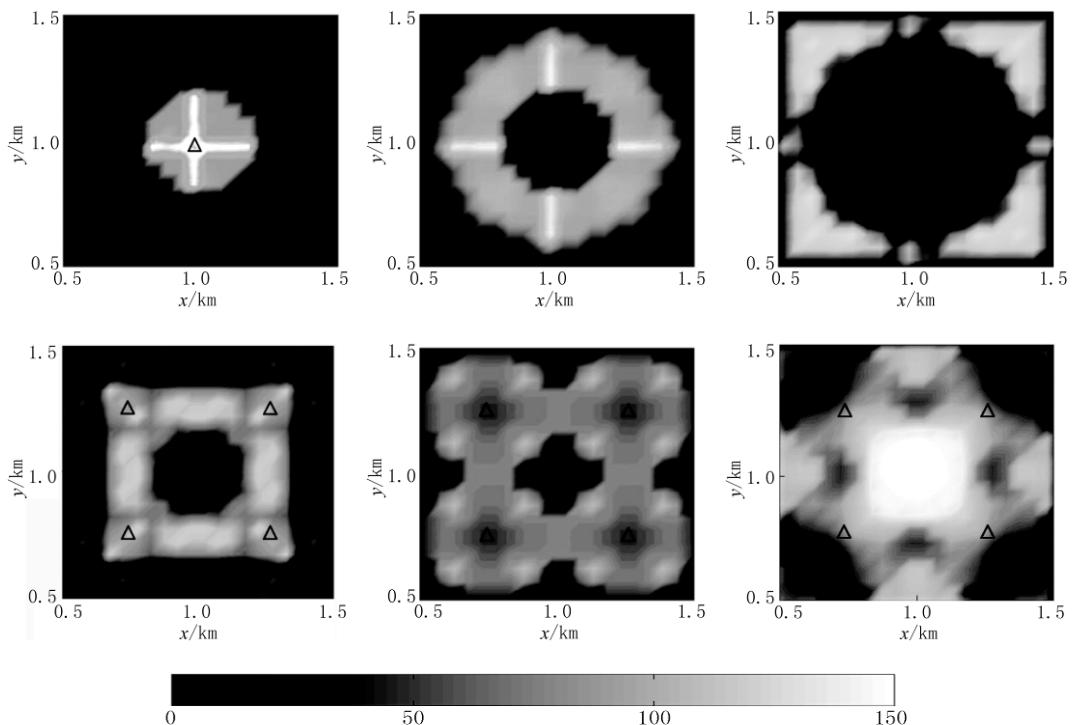


图 11 单条垂直缆和 4 条垂直缆在不同炮检距下目标区域反射点覆盖次数

Fig. 11 Fold for different offsets when a vertical cable at the center of target and four vertical cables positioned on target corner limits

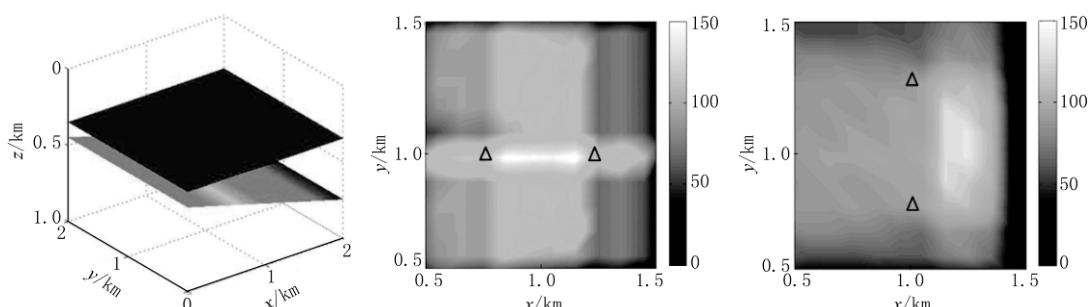


图 12 (a) 倾斜目标层模型; (b) 2 垂直缆沿 x 方向; (c) y 方向布设时的反射点覆盖次数

Fig. 12 (a) the sloped target layer model; (b) fold for 2 cables along X-axis; (c) fold for 2 cables along Y-axis

3.8 实验 7：海底地形起伏的影响

海底地形的起伏对目标层上的反射点分布有较大地影响，复杂地形可能使得在某区域的反射点分布相对集中，而使其他区域的反射点覆盖次数变少。在图 13 (a) 中，海底地形在 x 和 y 方向都有起伏变化。一条挂载有 16 个水听器的垂直缆布设在工区中心位置，炮间距采用 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ，受地形起伏的影响，目标层上反射点密度分布不均匀，如图 13 (b) 所示，垂直缆右边的部分区域反射点明显比左边密集。针对这种情况，可以通过增加垂直缆，根据地形适当改变垂直缆布设位置，减小地形对反射点分布的影响。如图 13 (c) 所示，两条都挂载 8 个水听器垂直缆的位置分别为 $(750\text{ m}, 1000\text{ m})$ 和 $(1050\text{ m}, 1000\text{ m})$ ，炮间距与图 13 (b) 相同，可以看出反射点在目标区域上覆盖的比较均匀。

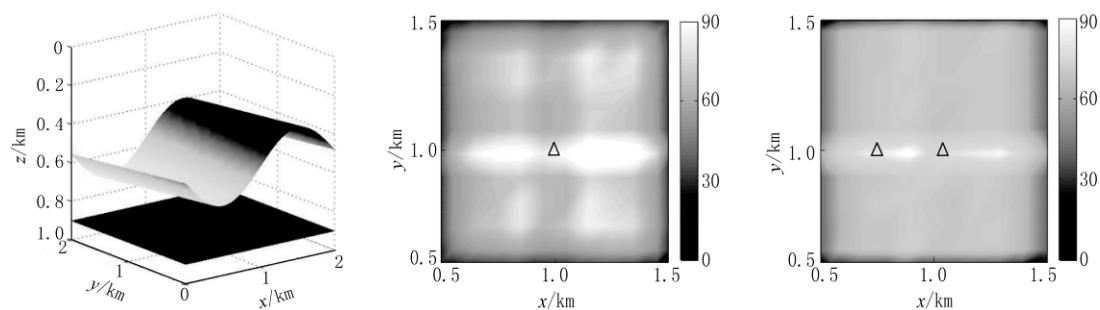


图 13 海底起伏模型和不同垂直缆条件下的反射点覆盖次数

Fig. 13 Submarine relief model and fold for different vertical cables positioned on different places

4 结论

本文在高精度三维射线追踪方法的基础上，通过建立不同的地质模型、炮点密度和垂直接收缆布设方式，对垂直缆观测系统进行照明分析，取得了有利于垂直缆观测系统设计的相关认识：

- (1) 反射点位置往往位于垂直缆和炮点之间，当炮点分布一定时，垂直缆越长，水听器越靠近海面，它对应的反射点离垂直缆位置越远，反射点分布范围就越大，而垂直缆越短，接水听器越靠近海底，对应的反射点越集中分布在垂直缆周围；
- (2) 当垂直缆数量和炮点分布范围一定时，增加每条缆上的接收点数量或增加炮点密度，都可提高目标区的覆盖次数，但增加炮点个数更灵活方便；
- (3) 多条接收缆位置不同，目标层上反射点分布及其密度也不同，一般地，多条垂直缆布设在目标区域范围内部比布设在目标区域外部更有效；
- (4) 炮点与接收点之间的偏移距制约着反射点的分布密度，中等偏移距对整个目标区域上反射点密度贡献最大，这样可以通过加密中等偏移距范围内的炮点来提高反射点覆盖次数；
- (5) 当目标层的产状倾斜时，沿着倾斜方向布设多条垂直缆比垂直于倾斜方向布设的效果更好；

(6) 海底地形起伏对目标层上反射点分布也有较大影响, 复杂地形可使得在某区域的反射点分布相对集中, 导致整个目标区域的反射点分布不均匀, 因此, 垂直缆观测系统优化设计时要考虑海底地形起伏的影响。

参考文献

- [1] Asakawa E, Murakami F, Tsukahara H, et al. Vertical cable seismic (VCS) survey for seafloor massive sulphide (SMS) exploration[C]//76th EAGE Conference and Exhibition 2014, 2014.
- [2] Krail PM. Case history vertical cable 3D acquisition[C]//53rd EAEG Meeting, 1991.
- [3] Krail PM. Sub-salt acquisition with a marine vertical cable[C]//1993 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 1993.
- [4] Sukup D, Anderson J, Boyd S, et al. 3D vertical cable processing to obtain a prestack depth migrated image[C]//59th EAGE Conference & Exhibition, 1997.
- [5] Leach PE. Strathspay vertical-cable seismic survey: A North Sea first[C]//Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series. Geological Society of London, 1999, 5: 1235–1242.
- [6] Guimaraes MG, Sekharan KK, Sukup DG, et al. 3-D pre-stack depth migration of vertical cable data over SEG/EAGE physical model[C]//1998 SEG Annual Meeting, 1998.
- [7] Muerdter D, Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, Part 1: Simple 2-D salt models[J]. The Leading Edge, 2001, 20(6): 578–594.
- [8] Muerdter D, Kelly M, Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, Part 2: Dipping salt bodies, salt peaks, and nonreciprocity of subsalt amplitude response[J]. The Leading Edge, 2001, 20(7): 688–697.
- [9] Muerdter D, Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, part 3: Salt ridges and furrows, and the impact of acquisition orientation[J]. The Leading Edge, 2001, 20(8): 803–816.
- [10] Xie XB, Jin S, Wu RS. Wave-equation-based seismic illumination analysis[J]. Geophysics, 2006, 71(5): S169–S177.
- [11] 张建中, 丁兴号. 一种 2.5 维井间透射波层析成像方法[J]. 声学学报, 2007, 32(1): 91–96.
Zhang JZ, Ding XH. An approach to 2.5-D crosswell seismic transmission tomography[J]. Acta Acoustica, 2007, 32(1): 91–96. (in Chinese).
- [12] Kim S. 3-D eikonal solvers: First-arrival traveltimes[J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1225–1231.
- [13] Zhang JZ, Huang Y, Song LP, et al. Fast and accurate 3-D ray tracing using bilinear traveltime interpolation and the wave front group marching[J]. Geophysical Journal International, 2011, 184(3): 1327–1340.
- [14] 张建中, 陈世军, 徐初伟. 动态网络最短路径射线追踪[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 899–904.
Zhang JZ, Chen SJ, Xu CW. A method of shortest path raytracing with dynamic networks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 1013–1018. (in Chinese).
- [15] 张建中, 陈世军, 余大祥. 最短路径射线追踪方法及其改进[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 146–150.
Zhang JZ, Chen SJ, Yu DX. Improvement of shortest path ray tracing method[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 146–150. (in Chinese).

Ray Tracing Illumination Analysis on Marine Seismic Vertical Cable Acquisition System

HE Yong, ZHANG Jian-zhong[✉]

a).Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education;
b).College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The vertical cable recording geometry is showing considerable promise as a seismic acquisition technology of marine exploration. Based on the ray tracing algorithm, the article adopts the method of bilinear interpolation on irregular cell boundaries and fast wave-front expansion to determine ray paths and reflection points on target layer. And the distribution density of reflection points on target layer is served as the key parameter to measure the acquisition geometry. The illumination analysis of marine seismic vertical cable is implemented by a series of experiments with the three-dimensional models of the seabed strata, shots, vertical cables and hydrophones. By the illuminating analysis experiment, the rules that the factors related the acquisition geometry affect the reflection point distribution are understood, which provide the basis for designing optimal vertical cable geometry and enhancing seismic imaging quality.

Keywords: vertical cable; illumination analysis; ray tracing; reflection point density



作者简介: 何勇 (1990—), 男, 中国海洋大学硕士研究生, 主要从事地震正演与成像方法研究工作, Tel : 15666697030, E-mail : 843558571@qq.com; 张建中[✉] (1963—), 男, 中国海洋大学海洋地球科学学院教授、博士生指导教师, 主要从事地球物理数据处理和解释方法研究工作, Tel: 0532-66782551, E-mail: zhangjz@ouc.edu.cn。