

三维观测系统属性联合定量分析及其应用

钟家均, 李华科, 涂远良

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041)

摘要: 观测系统设计是地震勘探中资料采集中重要的一环, 其设计的优劣直接影响资料获取是否满足地质任务要求以及是否满足资料品质需求。常规的三维观测系统属性分析一般根据设计观测系统的炮检点几何分布属性(炮间距、道间距、炮线距、接收线距、接收线数、炮点数、接收点数)以及面元内部的覆盖次数、炮检距等多种因素结合进行独立评价来支持技术设计, 但由于每个因素之间是相互制衡且紧密关联的, 独立分析评价结果可能出现混淆模糊的情况。笔者引入观测系统属性定量分析评价方法, 综合三维观测系统的炮检点分布属性、覆盖次数分布、面元属性及针对目的层的设计, 最终获得观测系统属性综合定量因子值, 直接进行不同种类观测系统针对地质任务的优选比较, 在地震采集前期设计观测系统评价中减少了观测系统设计人员的经验判断, 使得设计结果的评价更加简捷、科学、合理, 经实际地震勘探设计应用检验, 这种多属性联合定量分析是可行性。

关键词: 勘探设计; 地震采集; 联合分析; 三维; 观测系统; 面元属性; 定量分析; 因子

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.07

0 引言

三维地震勘探是实现地下构造、岩性成像精度的主要途径之一。但不同的观测系统也就意味着不同的勘探成本、获得不同的勘探效果。前人针对地震勘探观测系统做过很多分析、研究和应用, 并提出了很多有意义的认识和结论。有的研究侧重点在某一方面, 尹成等^[1]、黄迎雪等^[2]针对观测系统炮检距的均匀性变化及优化设计进行了分析和评判, 并将炮检距变化率的方差最小化作为观测系统参数优化选择的目标函数; 步长城等^[3]从覆盖次数、采集投资及资料信噪比权衡, 从而有益于高精度采集和投资决策。有的研究侧重点放在综合评判上, 尝试寻求一种具有普遍性、综合性的观测系统评价方法, 以建立观测系统定量评价与分析的新方法和新思路。吴

永国等^[4]研究考虑了覆盖次数、炮检距和方位角, 并引入了方差及加权因子, 但不尽全面; 陈敬国等^[5]提出了观测系统均匀因子、方位角新横纵比、有效覆盖次数等概念和表达关系式, 尝试从定量角度评价观测系统属性的优劣, 但笔者认为因素考虑不够全面, 计算公式较复杂; 赵虎等^[6]提出了综合评价因子概念, 综合考虑观测系统的覆盖次数、炮检距及方位角等因素, 但其实现方式与笔者不同, 不能独立展示各主要因素变化趋势及影响程度。上述研究结果表明, 观测系统性能综合快速评价是一种变化趋势, 期望能够通过一定的技术手段对冠层系统性能进行分析判断, 达到在地震资料采集设计阶段能够优化选择观测系统的目的。目前主流的观测系统设计软件均提供针对观测系统属性分析手段, 比如面元的炮检距分布图、方位角分布属性、炮检线方向的覆盖次数曲线、整体覆盖次数均匀性等, 且只能独立判断属

收稿日期: 2023-06-08

第一作者: 钟家均(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事石油天然气地球物理勘探及地震资料采集方法技术研究, E-mail: jinzhongyilang@163.com。

性的优劣。笔者基于前人研究成果,重在实现一种能够综合判断炮检点分布、方位角、炮检距、覆盖次数^[7]以及 CMP 点集中度等关键因素对观测系统属性影响的综合效应的方法,并构建了能够表征诸因素的价值的表达式,最终完成观测系统属性综合评价评估,为地震勘探项目观测系统设计定量分析提供了一种有力手段。

1 定量分析目的意义

在三维观测系统设计过程中,使用多大的炮检点密度、面元尺寸、覆盖次数、纵横比值以及观测系统的各种属性是否均匀(尽量消除采集过程中带来的采集痕迹影响)等,都需要通过一定的技术手段进行分析判断。目前,三维观测系统的面元、炮检距、覆盖次数、方位角等属性定性分析评价技术基本成熟,在商业化软件中也实施较多,即使在炮检距属性的均匀性方面也开展了大量的研究,但因为关注的侧重点不同,定量评价计算的手段和方法均存在差异,更不用说利用综合属性进行定量评价去评价一个观测系统了。但不同的观测系统,这些参数如何进行优化调整,调整之后对观测系统的效果评价如何,需要寻求一种衡量尺度来评价最终的变化效果。至少,通过这种评价系统能够在确定的炮检点密度、面元尺寸等参数条件下,了解其它参数改变对观测系统整体评价效果施加一个怎样的影响,明白观测系统属性的优劣变化到底体现在哪里。笔者尝试结合多种因素,将其定量化,联合评价观测系统属性的优劣,避免利用单一因素变化产生的判断结论误区,力求找到一种能够表达不同观测系统之间面元、方

位角、覆盖次数以及最大炮检距等关键影响因素的贡献值或者特征值的定量计算公式。并将该公式应用于日常的地震采集设计方案中,通过直接定量计算各属性以及属性总体的评价值,通过观察值就能够进行定量判断,因子值越大,代表观测系统设计质量越高,越接近满足设计要求的目标,从而为观测系统参数的优化和调整提供决策参考,为最终方案的优化提供便利。

2 观测系统属性量化规则

常规判断观测系统属性影响的重要因素包括炮检点分布、覆盖次数、炮检距分布、方位角等分布的均匀性等^[2-5],笔者在结合前人研究基础之上,优化了这些关键因素的影响程度,并建立了针对性的量化关系,创建了各自的定量计算表达式。

为验证综合定量因子分析观测系统属性优劣的可行性,笔者选择四种常见的束状观测系统进行分析计算(图 1,表 1)。四种观测系统的总覆盖次数保持为 180 次,接收线数 24,接收线距 200 m,道间距 50 m,接收道数为 240,炮点数为 16,炮点距为 50 m,炮线距为 400 m,纵向滚动距 400 m(奇偶式为 200 m)、横向滚动距为 800 m。整体上看,观测系统模板的炮点数量及接收参数相同,但炮点布置方式不同。为了讨论评估观测系统针整体贡献程度以及针对目的层的贡献程度,结合四种观测系统最大炮检距 6 546.47 m~6 913.48 m 的变化范围,设定两个目的层 3 000 m 和 6 500 m 进行对比计算分析。四种观测系统参数值列表如下。

表 1 四种常见观测系统参数对比表

Tab. 1 Comparison of parameters of four common observation systems

观测系统类型	正交	斜交	砖墙	奇偶
排列名称	24L16S240T180F	24L16S240T180F	24L16S240T180F	24L16S240T180F
接收线数	24	24	24	24
接收线距/m	200	200	200	200
接收道数/总道数	240/5 760	240/5 760	240/5 760	240/5 760
接收道距	50	50	50	50
炮点数	16	16	16	8+8
炮点距/m	50	50	100	100
炮线距/m	400	400	200	200
最大纵向炮检距/m	5 975	6 360	6 075	6 075
最大非纵距/m	2 675	2 675	2 675	2 675
最大炮检距/m	6 546.47	6 913.48	6 637.86	6 637.86
滚动距/m	800	800	800	800

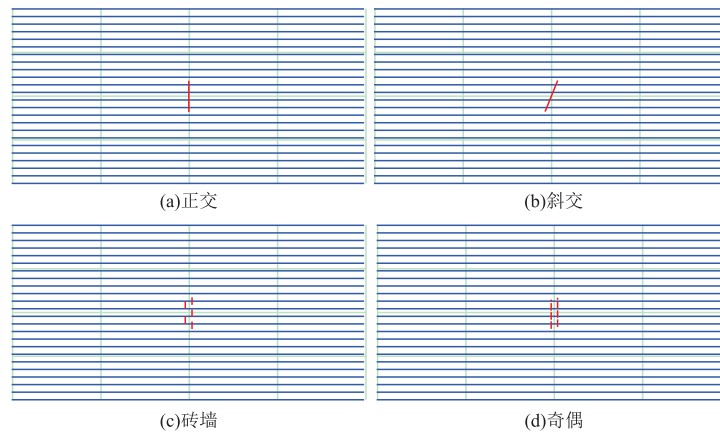


图1 四种常用观测系统模板

Fig. 1 Four commonly used observation system templates

2.1 目的层有效因子

最大炮检距设计与主要目的层埋深紧密相连,设计太小,不能满足较深目的层勘探需要,设计太大,使勘探投入的成本大大增加。因此,我们需要衡量设计最大炮检距对目的层的有效系数。

根据地震资料的处理方法,如果针对目的层设计,假设目的层的深度为 H ,最大炮检距为 X_{max} 。据前人经验,最大炮检距有一些默认的选择原则^[5]:

- 1) $X_{max} = 0.54H$ 收敛 75% 以上,收敛的能量最集中,频率高;
- 2) $X_{max} = 1.02H$ 收敛 85% 以上,是比较经济的采集参数;
- 3) $X_{max} = 1.16H$ 收敛 95% 以上,收敛的能量多数较弱,频率较低;

4) $X_{max} = 2H$ 收敛 100% 能量,收敛的能量多数极弱,频率较低,NMO 处理后频率继续降低。

炮检距价值定量评估时,按成本投入与地质效果的一种折衷处理方式,按满足 $X_{max} = 1.16H$ 为基准,对选择的炮检距最大值因子进行估算,最大炮检距的重要程度通过以下公式进行衡量,只有越接近我们需要的炮检距,才能更大体现观测系统设计的价值,此时系数的值也就越大(表 2)。为了估算这种炮检距贡献,笔者构建了表达式:

$$H_x = \frac{(1.16H - |1.16H - X_{max}|)}{1.16H} \quad (1)$$

式中, H_x 为主要目的层有效系数,系数的值越大代表观测系统价值越大; X_{max} 为观测系统设计的最大炮检距; H 为勘探主要目的层的深度值。

表 2 四种常见观测系统目的层有效因子对比表

Tab. 2 Comparison of effective factor of target layer for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
设计最大炮检距/m	6 546.46	6 913.48	6 637.86	6 637.86
目的层有效因子(3 000 m)	0.118 8	0.013 4	0.092 6	0.092 6
目的层有效因子(6 500 m)	0.868 2	0.916 9	0.880 4	0.880 4

2.2 炮检点贡献因子

每种观测系统设计方案,其炮检点的多少以及它们的布置方式,决定了设计方案的简繁程度。实施一块三维地震勘探,炮检点的数量不仅决定勘探成本的投入,也决定了其地震资料的优劣品质。在一个设计方案的满覆盖区域,炮检点的分布密度是趋于稳定的,该区域的炮检点数量变化和空间分布是具有代表性的,也是炮检点布设方案变化的基础。通过面元尺寸、炮检点数量、满覆盖区域面积、单炮

接收道数来描述一种观测系统的炮检点贡献值是可行的。炮点的分布涉及到的主要变化因子有炮线距、炮距(横向面元尺寸)、接收线距、接收点距(纵向面元尺寸)以及每个炮点涉及的接收道数。

其具体公式如下:

$$R_c = \frac{D_s \times D_r \times TR_s}{B_n \times B_v \times B_h} \quad (2)$$

式中, R_c 为炮检点贡献系数, B_n 满覆盖面元个数,炮点的密度值 D_s (个/ km^2), 检波点的密度值 D_r

(道/km²), Trs 每炮接收道数, Bv 为纵向面元尺寸, Bh 横向面元尺寸。表 3 为四种常见观测系统

炮检点贡献系数表。系数值越大,代表观测系统的炮检点贡献更具有优势。

表 3 四种常见观测系统炮检点贡献因子对比表

Tab. 3 Comparison of shot point contribution factor for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
炮点数	8 000	8 000	8 000	8 000
检波点数	43 200	43 200	43 200	43 200
每炮接收道数	5 760	5 760	5 760	5 760
满覆盖面元数	99 264	92 496	97 008	99 264
纵向面元尺寸	25	25	25	25
横向面元尺寸	25	25	25	25
炮检点贡献因子($\times 10^{12}$)	32 086.65	34 434.46	32 832.86	32 086.65

2.3 覆盖次数贡献因子

如何选取合适的覆盖次数才能既达到所希望的信噪比,又能够合理控制采集的投资,是高精度三维地震资料采集必须考虑的实际问题。观测系统的覆盖次数是否越高就越好?如何识别其均匀性的优劣?这里考虑了总的覆盖次数目标以及面元内覆盖次数的均匀分布因子。一般情况下,三维观测系统的覆盖次数 F_t 是由纵向覆盖次数 F_i 和横向覆盖次数 F_x 之积。即:

$$F_t = F_i \times F_x \quad (3)$$

但我们知道,如果给定了一个研究区域的最高覆盖次数值,也满足我们的勘探需求,但即使在均匀分布的情况下,覆盖次数值一样,也不代表其对资料品质的贡献是一样的。比如覆盖次数 12×12 与 6×24 总覆盖次数都是 144,但对纵横向资料的贡献程度是完全不同的,对于不同的观测系统,覆盖次数值代表的有效性不同。也说明了覆盖次数并不是越高越好,而是能够在明显对资料品质有贡献的基础上按照适当的勘探投入适当提高地震采集的覆盖次数^{[3][8]}。为了能够更加全面的体现覆盖次数影响意义,引入满覆盖区域的有效覆盖次数进行评估,这里笔者引用陈敬国^[5]对有效覆盖次数的表达方式。

$$F_e = \frac{\min(F_i, F_x)}{\max(F_i, F_x)} \times F_t = \frac{\min(F_i, F_x)}{\max(F_i, F_x)} \times F_i \times F_x \quad (4)$$

从公式可以看出,当纵、横向覆盖次数相等的时候,当前给定的总覆盖次数就是最大的有效覆盖次数,否则,其贡献程度均小于实际的总覆盖次数,值越大,观测系统价值越大。在接近最高限值的基础上,要求整体面元有效覆盖次数的分布保证尽量均匀。

可以利用满覆盖区域各个面元的平均覆盖次数

\bar{F} 和满覆盖区域内一个模板面积内有效覆盖次数的标准差来描述整体分布的均匀性,笔者用样本标准偏差的概念来表达:

$$U_f = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (F_k - \bar{F})^2} \quad (5)$$

式中, U_f —覆盖次数的整体均匀度,值越小,代表方案属性越好; k —满覆盖区域内一个模板面积范围的第 k 个面元; N —满覆盖区域内一个模板面积范围的面元总体个数; F_k —第 k 个面元内的覆盖次数值。

最终,我们选择的覆盖该次数综合定量分析因子表达如下:

$$F_c = F_e \times \bar{F} \times \text{Exp}(U_f) \quad (6)$$

式中, F_c —覆盖次数分布特征值,值越大,代表方案满覆盖属性值越好; \bar{F} —统计的多个面元内有效覆盖次数的平均值,值越大,代表观测系统整体覆盖次数值越高,可以表示为:

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_k \quad (7)$$

U_f —代表分析区域内覆盖次数的均匀程度,值越大,越均匀, $\text{Exp}(U_f)$ 代表以自然数 e 为底 U_f 为指数的幂。

不同深度的目的层其覆盖次数分布状态截然不同,系数变化也很大(图 2),只有当整体均匀度为 0 时,该目的层的满覆盖次数特征因子为最大值。根据观测系统参数及对应目的层深度计算得到的覆盖次数特征值见表 4。对于 3 000 m 目的层,覆盖次数特征值顺序为:斜交 > 砖墙 > 正交 > 奇偶;对于 6 500 m 目的层,覆盖次数特征值顺序为:正交 > 砖墙 > 奇偶 > 正交。

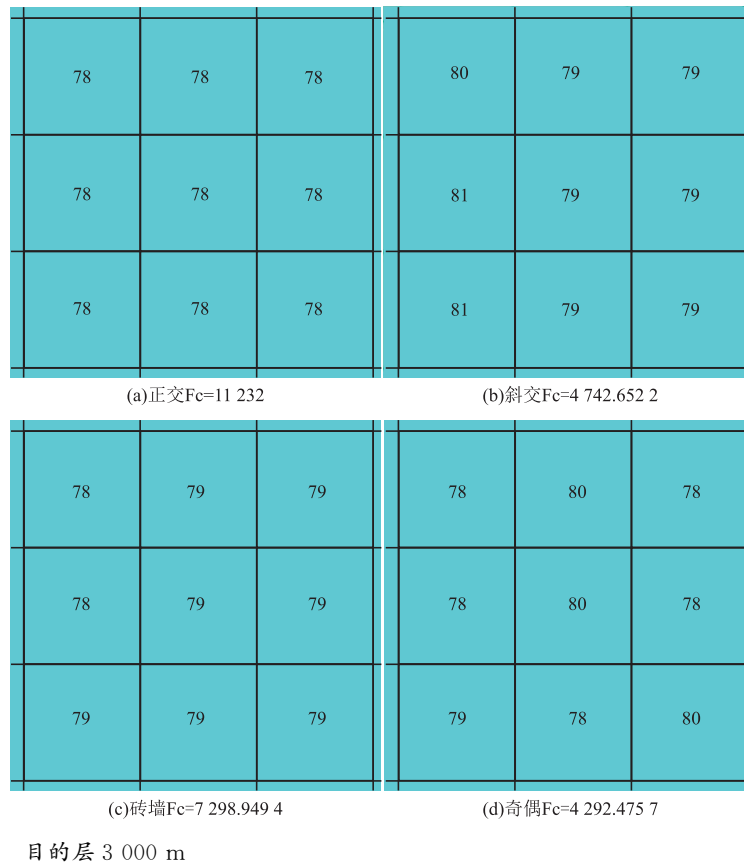


图 2 四种观测系统覆盖次数分布及贡献因子值

Fig. 2 Fold number distribution and contribution factor values of four observation systems

表 4 四种常见观测系统覆盖次数贡献因子对比表

Tab. 4 Comparison of coverage count contribution factor for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
覆盖次数贡献因子(3 000 m)	11 232	9 405.23	4 481.58	9 593.38
覆盖次数贡献因子(6 500 m)	25 920	12 733.005 8	25 920	25 920

2.4 炮检距特征值

最大炮检距是否越大越好? 如何实现面元内炮检距均匀变化度的衡量? 当我们观测的目的层深度只有 1 000 m 时,设计的观测系统最大炮检距如果达到 5 000 m,远远超出了我们目的层的深度,这样的观测系统只会使勘探投入的成本大大增加,因此,不仅仅是成本考虑,也为了获得最佳的地震资料,我们设计的炮检距范围应该刚好达到要求。我们设计了一个炮检距对观测系统的贡献度因子以及炮检距均匀性因子。

1) 炮检距贡献因子。设计观测系统时,在尽量逼近最大炮检距限制的前提下,我们再考虑满覆盖区域内具体面元内的炮检距分布状态,面元内炮检

距变化从小到大能够不重复、间隔均匀的观测系统质量就越好,同时,整个满覆盖内不同面元之间炮检距分布整体越均匀越好,需要结合其满覆盖区域内的炮检距均匀因子进行评判。炮检距的均匀性多种文献具有各自的方法表述,但绝大多数倾向于利用样本标准差进行描述。笔者倾向于认为面元内的炮检距均匀程度评判应该反映出炮检距对面元有效贡献的大小,实际炮检距与理想炮检距之差的绝对值小于或者等于理想炮检距变化增量的一半应视为有效炮检距,如果这种差距变大,对面元的有效贡献程度变小,为此利用加权系数的思想定义每个面元内的炮检距贡献系数^[9],公式为:

$$O_c = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{1}{W_k} \left[1 - \left(\frac{O_{tk} - O_{rk}}{W_k \times \Delta O} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中, O_c —表示满覆盖区域内一个模板面积范围的某个面元炮检距的贡献系数,其值越大,代表炮检距贡献程度越大; W_i —理论炮检距与实际炮检距距离权重系数,表达式为:

$$W_i = INT \left(1.5 + \frac{|O_{tk} - O_{rk}|}{\Delta O} \right) \quad (9)$$

O_{tk} —理论炮检距,表达式为:

$$O_{rk} = \Delta O \times (k-1) + O_{min} \quad (10)$$

O_{rk} —实际炮检距

ΔO —最小炮检距与最大炮检距 N 等分距步长

$$\Delta O = \frac{O_{max} - O_{min}}{M-1} \quad (11)$$

式中, O_{max} 为满覆盖区域内一个模板面积范围的面元中的最大炮检距; O_{min} 为满覆盖区域内一个模板面积范围的面元中的最小炮检距; M 为满覆盖区域内一个模板面积范围的某个面元内炮检距的总数

2)炮检距贡献因子平均值:在分析区域之内,炮检距贡献系数平均值越大,代表该设计方案越能满足目的层需要,需要求取分析区域内平均炮检距贡献系数 $\overline{O_c}$,代表分析区域内第 k 个面元内炮检距:

$$\overline{O_c} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N O_{ck} \quad (12)$$

3)炮检距贡献因子均匀度:得到每个面元的炮检距贡献系数之后,需要考虑整个覆盖区域炮检距贡献度是否分布均匀,因此需要计算分析贡献系数的均匀性及大小程度,表达式为:

$$U_x = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (O_{ck} - \overline{O_c})^2} \quad (13)$$

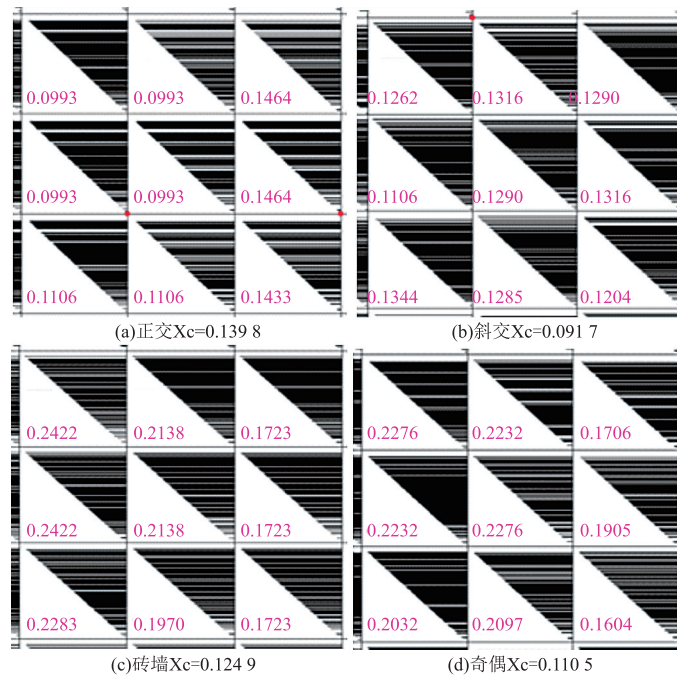
式中, U_x 为满覆盖区域内炮检距的整体均匀度,值越小,代表炮检距分布越均匀,观测系统属性就越好; k 为满覆盖区域内一个模板面积范围的第 k 个面元; M 为满覆盖区域内一个模板面积范围的面元总体个数; O_{ck} 为第 k 个面元内的炮检距的均匀因子。

最终,我们选择的炮检距贡献系数 X_c 表达如下:

$$X_c = \overline{O_c} \times \text{Exp}(U_x) \quad (14)$$

式中, X_c 为贡献系数特征值,值越大,代表方案炮检距分布属性值越好; $\overline{O_c}$ 为统计的多个面元内炮检距贡献系数的平均值,值越大,代表炮检距在观测系统中贡献值越高; U_x 为炮检距分布的整体均匀度,值越小,代表分布的均匀程度越好; $\text{Exp}(U_x)$ 代表以自然数 e 为底 U_x 为指数的幂。

不同深度的目的层其炮检距的分布状态截然不同,系数变化也很大(图 3),只有当整体炮检距贡献系数为 0 时,该目的层的炮检距分布贡献因子为最大值。根据观测系统参数及对应目的层深度计算得



目的层 3 000 m

图 3 四种观测系统炮检距贡献因子分布及整体贡献系数值

Fig. 3 Distribution of shot-receiver offset contribution factor and overall contribution coefficient values for four observation systems

表 5 四种常见观测系统炮检距贡献因子对比表

Tab. 5 Comparison of shot-receiver offset contribution factor for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
炮检距贡献因子(3 000 m)	0.139 8	0.091 7	0.124 9	0.110 5
炮检距贡献因子(6 500 m)	0.114 7	0.125 9	0.200 1	0.198 9

到的炮检距贡献因子值见表 5。根据计算结果,对于 3 000 m 目的层,炮检距贡献因子值顺序为:正交>奇偶>砖墙>斜交;对于 6 500 m 目的层,覆盖次数特征值顺序为:斜交>砖墙>奇偶>正交。

2.5 方位角特征值

首先,我们需要选择一个量可以表示方位角的大小,不同的炮检点分布,其方位角的量化指标可以有很大的不同,比如横向上分布 2 炮和 20 炮,其方位角的变化尽管都可以使用均匀描述,但其意义和效果很明显是不一样的。如果观测系统中,只集中于少数角度的大范围方位角与整体均匀分布于不同方位角的资料,勘探效果截然不同。方位角的变化体现在横向炮检距、纵向炮检距的大小及炮检距数量的积累。描述观测系统的方位角时需要考虑到一个模板中炮点和检波点分布的位置和数量,特别是表征方位角的两个主变因素:一是角度的变化范围,另外一个为角度变化的均匀连续性。

上式表达出了方位角的变化范围,但是在这个范围之内方位角是否连续变化,变化的均匀程度如何?还需要考虑面元内方位角分布的均匀性以及整体变化的一个均匀度,共同组成一个方位角的贡献因子。因此方位角需要考虑方位角贡献系数及其均匀性,其贡献系数也分为两个部分,即方位角贡献系数和方位角的均匀度系数。

1)方位角贡献因子。方位角能够在 360°限制下,变化从小到大能够不重复、间隔均匀的观测系统质量就越好,同时,整个满覆盖内不同面元之间方位角分布整体越均匀越好。借鉴炮检距的加权系数的思想定义每个面元内的方位角贡献系数表达式为,公式为:

$$A_c = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{1}{W_k} \left[1 - \left(\frac{A_{tk} - A_{rk}}{W_k \times \Delta A} \right)^2 \right] \quad (15)$$

式中, A_c 表示满覆盖区域内一个模板面积范围的某个面元炮检距的贡献系数,其值越大,代表炮检距贡献程度越大; W_i 为理论方位角与实际方位角距离权重系数,表达式为:

$$W_i = INT \left(1.5 + \frac{|A_{tk} - A_{rk}|}{\Delta A} \right) \quad (16)$$

A_{tk} 为理论方位角,表达式为:

$$A_{rk} = \Delta A \times (k-1) + A_{min} \quad (17)$$

式中, A_{rk} 为实际方位角; ΔA 为最小方位角与最大方位角 N 等分距步长

$$\Delta A = \frac{A_{max} - A_{min}}{M-1} \quad (18)$$

式中, A_{max} 为分析区域内面元中的最大方位角; A_{min} 为分析区域内面元中的最小方位角; M 为分析区域内某个面元内方位角的总数。

2)方位角贡献因子平均值。在分析区域之内,方位角贡献系数平均值越大,代表该设计方案越能满足目的层需要,需要求取分析区域内平均方位角贡献系数 \bar{A}_c ,代表分析区域内第 k 个面元内方位角:

$$\bar{A}_c = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M A_{ck} \quad (19)$$

3)方位角贡献因子均匀度。得到每个面元的方位角贡献系数之后,需要考虑整个覆盖区域方位角贡献度是否分布均匀,因此需要计算分析贡献系数的均匀性及大小程度,表达式为:

$$U_a = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (A_{ck} - \bar{A}_c)^2} \quad (20)$$

式中, U_a 为满覆盖区域内方位角的整体均匀度,值越小,代表方位角分布越均匀,观测系统属性就越好; k 为满覆盖区域内一个模板面积范围的第 k 个面元 M 为满覆盖区域内一个模板面积范围的面元总体个数; A_{ck} 为第 k 个面元内的方位角的均匀因子。

最终,我们选择的方位角贡献系数 A_c 表达如下:

$$A_c = \bar{A}_c \times \text{Exp}(U_a) \quad (21)$$

式中, A_c 为贡献系数特征值,值越大,代表方案方位角分布属性值越好; \bar{A}_c 为统计的多个面元内炮检距贡献系数的平均值,值越大,代表炮检距在观测系统中贡献值越高; U_a 为炮检距分布的整体均匀度,值越小,代表分布的均匀程度越好,Exp(U_a)代表以自然数 e 为底 U_a 为指数的幂。

不同深度的目的层其方位角分布状态截然不

同,系数变化也很大(图 4),只有当整体方位角分布的均匀系数为 0 时,该目的层的方位角分布系数为最大值。根据观测系统参数及对应目的层深度计算得到的方位角分布特征因子值见表 6。根

据计算结果,对于 3 000 m 目的层,炮检距贡献因子值顺序为:正交>(砖墙=奇偶)>斜交;对于 6 500 m 目的层,覆盖次数特征值顺序为:正交>砖墙>奇偶>斜交。

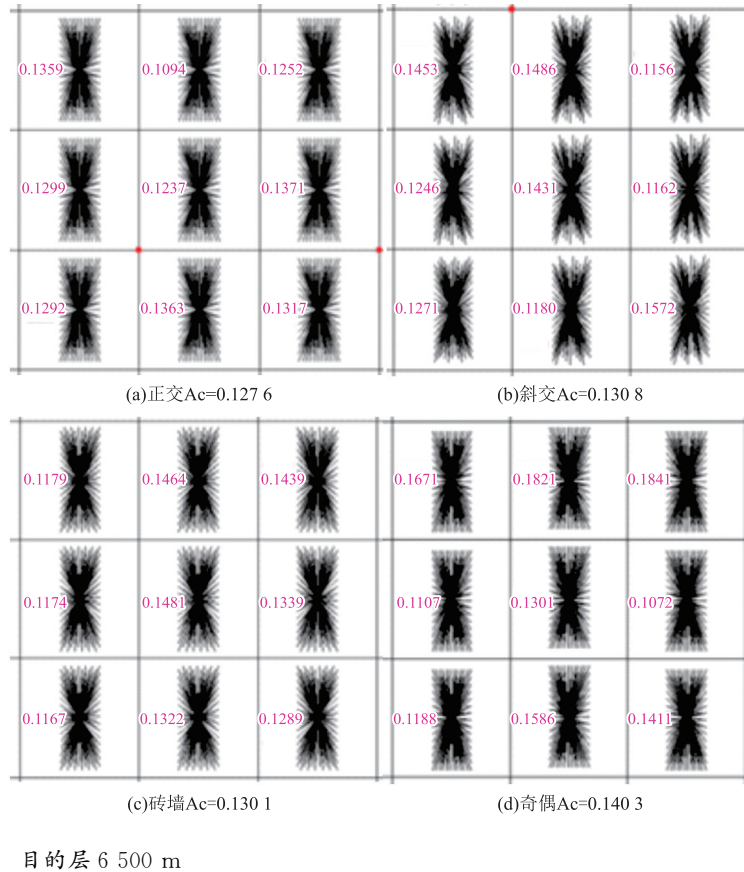


图 4 四种观测系统方位角分布特征及整体贡献因子值

Fig. 4 Distribution characteristics of azimuth angle and overall contribution factor values for four observation systems

表 6 四种常见观测系统方位角贡献因子对比表

Tab. 6 Comparison of azimuth angle contribution factor for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
方位角贡献因子(3 000 m)	0.163 1	0.192 3	0.187 2	0.176 9
方位角贡献因子(6 500 m)	0.127 6	0.130 8	0.130 1	0.140 3

2.6 面元 CMP 集中度

面元内所有 CMP 点的数量以及分布方式。通常情况下 CMP 点集中于一点,但随着炮检点排列方式的不同,会造成面元内 CMP 点分布出现不同的分布方式(图 5)。另外一种情况就是面元从大尺寸细分到小面元的时候,面元内的 CMP 点分布存在一个从分散到集中的变化趋势。如何是一个组合面元,那么需要将组合的面元全部考虑进来,这样对于细分面元观测系统的属性判断也能够起作用。从

而最终影响地震资料的采集质量。

细分面元技术时,最小尺寸的面元一般为实面元,如果面元存在多个组合,那么组合面元的真实性明显降低^[10]。对于组合面元的中心点,要么存在实面元,要么均是虚面元。研究表明,资料分析时最小面元即实面元是资料分析的基础,而选择其它大面元即虚面元就会降低资料的分辨率,对于地震勘探精度来说会出现一个折扣。因此,我们将 CMP 点的分布因子作为参考值进行观测系统价值评估,分析中以距离

较小优先考虑,因此,制定因子时倾向于距离较小对观测系统贡献度就越大的方向进行构建。

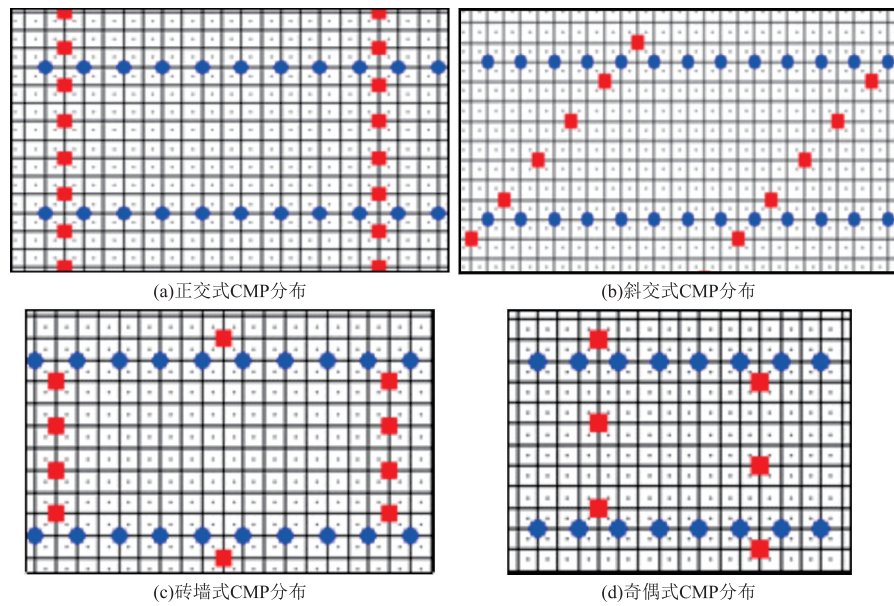


图5 四种观测系统面元 CMP 点分布及集中度数值

Fig. 5 Distribution and concentration value of CMP points for four observation systems

通过计算满覆盖区域内 CMP 点分布的离散度以及其离散度的分布均匀性评估。为减少计算量,这里仅考虑 CMP 点分布的模型,以面元(单面元或者组合面元的组合)中心为坐标原点,设定面元的高为 Bh , 宽为 Bw , 以此表示每个集中分布区域的 CMP 群坐标(图中示例了集中 CMP 点坐标计算方法), 然后进行计算。此时我们可以利用一个简单的数学变化关系表示从分散到集中的变化关系, 公式为:

$$D_c = 1 - \frac{2 \times \bar{D}}{\sqrt{Bw^2 + Bh^2}} \quad (22)$$

式中, D_c 为满覆盖区域内某个面元的 CMP 点组分布的集中程度, 值越大, 表示离散度越大, 面元属性就越差; Bw 为面元的宽度(m); Bh 为面元的高度(m); \bar{D} 为满覆盖区域内某个面元内所有 CMP 点组与中心点距离的平均值, 可以表示为:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_k \quad (23)$$

利用上述公式及坐标系定义规则, 求得四种常规观测系统面元 CMP 集中分布系数见表 7。

表7 四种常见观测系统 CMP 点集中度分析

Tab. 7 Analysis of CMP point concentration for four common observation systems

方案名称	正交	斜交	砖墙	奇偶
CMP 集中度因子值	1	1	1	1

2.7 属性综合定量因子

前面对单一的因子以及对观测系统属性的影响因素以及影响程度进行分解, 了解各自的变化规律。为了能够从整体上对一种观测系统进行综合评估, 笔者综合目的层有效系数、炮检点贡献系数、覆盖次数均匀度、炮检距贡献系数、方位角贡献系数以及 CMP 集中度等多种因素求和得到观测系统的综合定量因子 G_c , 这种效果类似于观测系统综合质量因子^[6], 即:

$$G_c = Rc + Fc + Xc + Ac + Dc \quad (24)$$

因为每种因子的数值变化范围不确定, 为了便于不同的因子能够在同一水平线上比较, 也方便不同的观测系统能够进行直接对比, 多种方案对比时, 采用 Min - Max 标准化思路对 Hc 、 Rc 、 Fc 、 Xc 、 Ac 、 Dc 之后获得标准化值 H_s 、 R_s 、 F_s 、 X_s 、 A_s 、 D_s , 每种因子值在 $[0-1]$ 范围内, 以此求和得到最终总体评价标准因子 G_s , 从而评判当前观测系统属性, 即:

$$G_s = R_s + F_s + X_s + A_s + D_s \quad (25)$$

式中, G_s 为标准化之后观测系统综合评价,值越大,表示观测系统属性越佳。

利用上述公式计算四种观测系统的综合定量分析因子(表 8)。可以初步判断如下,四种观测系统在炮检点贡献、覆盖次数特征、炮检距分布、方位角

特征、CMP 集中度具有不同的指标值,但从综合效应上考虑,针对目的层 3 000 m 设计,观测系统的适应性从优到劣的顺序为:正交>砖墙>奇偶>斜交;针对目的层 6 500 m 设计,观测系统的适应性从优到劣的顺序为:奇偶>砖墙>正交>斜交。

表 8 四种常见观测系统参数对比表

Tab. 8 Comparison of parameters for four common observation systems

观测系统类型	正交		斜交		砖墙		奇偶	
模板名称	24L16S240T180F		24L16S240T180F		24L16S240T180F		24L16S240T180F	
目的层深度(Depth)	3 000 m	6 500 m	3 000 m	6 500 m	3 000 m	6 500 m	3 000 m	6 500 m
目的层系数(Hc)	0.118 8	0.868 2	0.013 4	0.916 9	0.092 6	0.880 4	0.092 6	0.880 4
炮检点贡献系数(Rc)	32 086.65	32 086.65	34 434.76	34 434.76	32 832.86	32 832.86	32 086.65	32 086.65
覆盖次数贡献系数(Fc)	11 232	25 920	4 742.65	12 733	7 298.95	25 920	4 292.48	25 920
炮检距贡献系数(Xc)	0.139 8	0.114 7	0.091 7	0.125 9	0.124 9	0.200 1	0.110 5	0.198 9
方位角贡献系数(Ac)	0.163 1	0.127 6	0.192 3	0.130 8	0.187 2	0.130 1	0.176 9	0.14
CMP 点集中度(Dc)	1	1	1	1	1	1	1	1
综合定量因子(Gc)	43 320.08	58 008.76	39 178.41	47 169.63	40 133.21	58 755.07	36 380.51	58 008.87
综合标准化因子(Gs)	5.779 9	5.363 1	4.191	5.054 3	5.249 3	5.842 8	4.803 1	5.885 9

3 观测系统属性算例分析

在 CX 探区,经济适用型的观测系统是最佳选择,一般会根据勘探目的层需要论证计算,多角度对观测系统进行参数的分析和优选,最终确定性价比较优的那一种观测系统,比如以下是对三种观测系统面元属性的一种定量对比分析。三种观测系统分别是正交细分面元 30L3S240T1R150F、正交矩形面元 30L3S240T1R180F、正交方形面元 30L6S234T1R195F,主要区别在于炮线距不同,因而炮密度也不同。前两

者整体上看,观测系统模板的炮点数量及接收参数相同,但炮点布置方式不同(表 9、图 6)。针对中深层 3 000 m 目的层和 6 000 m 埋深目的层分别进行定量计算评估,从观测系统评估参数值可以看出(表 10),除了覆盖次数最高的方形面元观测系统优势最大之外,方案 1 较方案 2 有一定的优势。从综合效应上考虑,针对目的层,观测系统的适应性从优到劣的顺序为:方案 3>方案 1>方案 2。常规判断是方形面元最好,其次是细分面元、再次是矩形面元。这与笔者从常规手段分析和判断的结论是一致的,从而验证了这种定量评价方法的可行性。

表 9 CX 地区三种观测系统模板参数列表

Tab. 9 Template parameter list of three observation systems in CX area

方案名称	正交细分面元	正交矩形面元	正交方形面元
观测系统类型	30L3S240T1R150F	30L3S240T1R180F	30L6S234T1R195F
接收线数	30	30	30
接收线距/m	240	240	240
接收道数/总道数	240/7 200	240/7 200	234/7 020
接收道距	40	40	40
炮点数	3	3	6
炮点距/m	80	80	40
炮线距/m	240/480	400	360
最大纵向炮检距/m	4 780	4 780	4 660
最大非纵距/m	3 580	3 560	3 580
最大炮检距/m	5 972	5 960.03	5 876.39
滚动距/m	240	240	240
炮密度	52.603 6	30.418 9	70.448
道密度	105.207 1	105.207 1	105.207 1

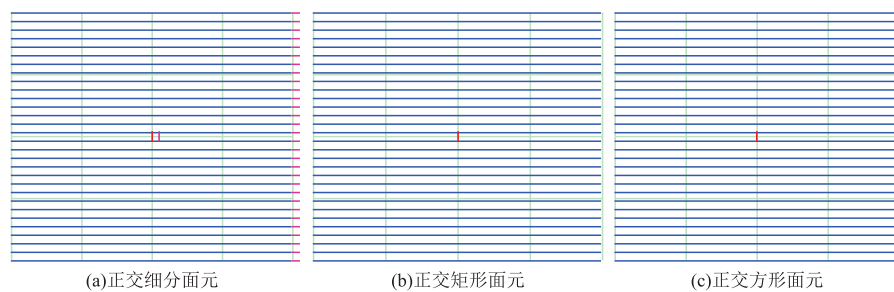


图 6 CX 探区三种观测系统排列模板示意图

Fig. 6 Schematic diagram of template arrangement for three observation systems in CX area

表 10 CX 地区三种观测系统属性联合定量分析结果

Tab. 10 Joint quantitative analysis results of properties for three observation systems in CX area

观测系统类型	方案 1		方案 2		方案 3	
模板名称	30L3S240T1R150F		30L3S240T1R180F		30L6S234T1R195F	
目的层深度(Depth)	3 000	6 000	3 000	6 000	3 000	6 000
目的层系数(Hc)	0.287 3	0.856 3	0.287 3	0.856 3	0.311 4	0.844 3
炮检点贡献系数(Rc)	35 751.99	35 751.99	19 987.65	19 987.65	42 693.75	42 693.75
覆盖次数贡献系数(Fc)	1 515.43	15 000	2 929.61	25 920	9 943.15	32 955
炮检距贡献系数(Xc)	0.072	0.086	0.082	0.087 4	0.075	0.005 8
方位角贡献系数(Ac)	0.228 7	0.136 6	0.195 6	0.114 5	0.164 9	0.142 3
CMP 点集中度(Dc)	1	1	1	1	1	1
综合定量因子(Gc)	1 608.87	15 093.94	3 001.42	25 992.30	10 380.98	33 393.32
综合标准化因子(Gs)	4.790 5	5.003 3	4.541 1	4.657 1	5.636	5.143

4 结语

1) 笔者提出了一种基于针对目的层设计观测系统及观测系统面元属性综合评价的一种定量分析方法,在实际的地震采集观测系统设计之中具有重要的指导意义,让优选的观测系统能够更好的满足项目地质任务需求。

2) 采用国内外较为成熟的观测系统多属性均匀性进行了定量分析评价,给出了具有实际意义炮检点分布、覆盖次数、炮检距、方位角等贡献因子,定量因子意义简单明了,应用简单便捷,能够较好地应用于实际生产之中。

3) 将评价观测系统的多种关键因素影响程度进行量化表达,更容易清楚观测系统优化选择的目标,从而有助于提高三维观测系统定量化和优化设计水平,更多的从方法设计、勘探目标的角度去评价观测系统价值,减少人为因素对观测系统属性综合评价的影响。

4) 关键因素的选择离不开对研究区域资料的认识以及各种关键因素定量值变化范围的统计分析。综合定量因子的建立,可以结合具体研究区域,如实际的勘探成本统计分析、信噪比与覆盖次数关系等,给出相关参量或者权重系数的实际值,能够更有效、更具有针对性地进行观测系统优化设计,从而更好满足研究区域的地质勘探目标,提高资料成像精度。

参考文献:

- [1] 尹成, 吕公河, 田继东, 等. 三维观测系统属性分析与优化设计[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 495—498.
YIN C, LV G H, TIAN J D, et al. Attributes analysis and optimum design of 3-D geometry[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(5): 495—498. (In Chinese)
- [2] 黄迎雪, 代金芝, 黄鹏. 三维观测系统属性分析研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 25—28.
HUANG Y X, DAI J Z, HUANG P. On attribute analysis and research of 3D observation system[J].

- Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9 (1): 25–28. (In Chinese)
- [3] 步长城, 徐辉, 玄长虹, 等. 覆盖次数与信噪比的定量关系分析[J]. 油气地球物理, 2011, 9(3): 48–52. BU C C, XU H, XUAN C H, et al. The analysis on the quantitative relationship between the fold and SNR [J]. Petroleum Geophysics, 2011, 9(3): 48–52. (In Chinese)
- [4] 吴永国, 尹吴海, 何永清, 等. 三维观测系统属性均匀性的定量分析[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47 (3): 361–365. WU Y G, YIN W H, HE Y Q, et al. A uniformity quantitative method for 3D geometry attributes[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 361–365. (In Chinese)
- [5] 陈敬国, 王成河, 白旭明, 等. 三维观测系统属性定量评价方法探讨[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(2): 68–74. CHEN J G, WANG C H, BAI X M, et al. Quantitative evaluation method of 3D geometry attributes[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(2): 68–74. (In Chinese)
- [6] 赵虎, 尹成, 魏福吉, 等. 观测系统综合质量因子分析[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6): 1037–1041. ZHAO H, YIN C, WEI F J, et al. Geometry comprehensive quality factor [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(6): 1037–1041. (In Chinese)
- [7] 朱北舜. 三维观测系统的几个主要参数[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(4): 379–389. ZHU B S. Some important parameters of 3D field geometry[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1985, 20 (4): 379–389. (In Chinese)
- [8] 徐辉, 韩文功, 单联瑜, 等. 基于实际地震资料的覆盖次数和信噪比关系分析[J]. 石油物探, 2011, 50 (2): 181–186. XU H, HAN W G, SHAN L Y, et al. Analysis of the relationship between fold and SNR based on actual seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2): 181–186. (In Chinese)
- [9] 碗学俭, 葛雪钦, 张松平, 等. 三维观测系统采样均匀性分析方法的研究[J]. 中国石油勘探, 2009, 14 (6): 42–48. WAN X J, GE X Q, ZHANG S P, et al. Research of 3D geometry sampling uniformity analytical method [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(6): 42–48. (In Chinese)
- [10] 于世煥, 赵殿栋, 李钰, 等. 观测系统面元细分问题分析[J]. 石油物探, 2010, 49(6): 599–605. YU S H, ZHAO D D, LI Y, et al. Problem analysis of Bin-divisible geometry[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(6): 599–605. (In Chinese)

Joint quantitative analysis of properties of three-dimensional observation systems and its applications

ZHONG Jiajun, LI Huake, TU Yuangen

(Exploration & Production Research Institute, SWPB, Chengdu 610041, China)

Abstract: The design of observation systems is an important part of data acquisition in seismic exploration. Its design quality directly affects whether the obtained data can meet the requirements of geological tasks and the quality of the data. A conventional attribute analysis of three-dimensional observation systems generally relies on independent evaluations based on the geometric distribution properties of the designed observation system's shot points (shot spacing, channel spacing, shot-line spacing, receiver-line spacing, receiver-line number, shot number, and receiver number), as well as coverage counts within bins, shot-receiver offset, and other factors combined with independent evaluation to support technical design. However, independent analysis and evaluation results may be confusing since each factor is interrelated and closely connected. This article introduces a quantitative analysis and evaluation method for observation system attributes, which comprehensively analyzes the shot point distribution properties, coverage count distribution, mesh element properties, and design for the target layer of three-dimensional observation systems. Finally, a comprehensive quantitative factor value for observation system attributes is obtained, directly comparing different observation systems for geological tasks. This significantly reduces the dependence on the designer's experience in evaluating observation system design. The evaluation of design results is more concise, scientific, and reasonable. This multi-attribute joint quantitative analysis is feasible after practical application in seismic exploration design.

Keywords: exploration design; seismic acquisition; joint analysis; three-dimensional; observation system; attribute of bins; quantitative analysis; factor.