

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1086

王振涛. 测井方位遮挡下的反距离加权建模方法[J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 810-815. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1086>

Wang Z T. Inverse-distance weighted modeling method under logging azimuth occlusion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 810-815. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1086>

测井方位遮挡下的反距离加权建模方法

王 振 涛

(胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022)

摘 要: 现有测井建模方法未考虑地质沉积方向性, 建模精度低, 为了解决这一问题, 通过对测井反距离加权建模方法优缺点分析, 提出了一种测井方位遮挡下的反距离加权建模方法。该方法采用方位遮挡反距离加权插值公式, 在考虑已知信息点与插值点的距离影响因素的同时, 还考虑了已知信息点间的方位遮挡因素, 通过综合非方位遮挡权重系数来定量描述已知样本间方位遮挡影响。数值试验和实际资料对该方法和传统方法的对比结果表明, 该方法建模结果空间变化更加平缓 and 自然, 符合地质沉积变化规律。测井方位遮挡下的反距离加权建模方法, 体现了地质沉积空间连续性和方位性的特点, 在提高测井地质建模精度方面优势明显, 具有很好的实际应用价值。

关键词: 测井建模; 方位遮挡; 反距离权重系数; 非方位遮挡权重系数

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-0810-06

0 引言

地震和测井数据是油气勘探开发中最为常用的两类地球物理观测数据。地震数据对地质构造空间描述性强, 但其信息频带有限, 往往不能满足薄储层研究要求。测井数据具有频带宽、精度高及靶向性强等特点, 可较好揭示井点处储层厚度、岩性、物性及流体等油藏特征, 但测井数据是一维数据, 难以表征地质储层三维空间连续变化。地震构造约束下构建测井模型能够直观表征地质储层空间变化, 可直接用于油气勘探开发储层油藏描述^[1-5], 还可用于地震反演约束, 提高地震弹性参数反演精度, 再进行储层油藏描述^[6-9]。利用已知点数值估计未知点数值是测井插值建模的关键, 常用的方法有反距离加权法、克里金插值、最近邻点插值等方法, 建模方法众多, 最终结果也不尽相同。因此, 针对不同的数据需要根据其类型、分布特征及相关性等影响因素进行优选^[9-17]。

测井数据具有空间相关性, 符合地理学第一定律: 地理空间上的所有值均互相联系, 且距离近的值

联系更强^[18]。因此, 反距离加权作为描述数据距离相关性的方法在数据建模中得到广泛应用, 其具有以下假设: 2 个物体相似性随距离增大而减小, 以插值点与样本点的距离的倒数作为加权系数进行样本点数值加权平均, 从而得到插值点数值。该方法中每个样本点均会对插值点有贡献, 只是贡献大小会随距离远近而变化, 离插值点越近的样本点贡献越大, 越远的样本点贡献越小, 如 2 个样本点与插值点相同, 其贡献就完全相同。

最近邻点插值方法和克里金插值法中, 只有靠近插值点的已知点有贡献, 反距离加权方法所有未知点都会有贡献, 贡献大小与距离相关^[19-20]。克里金插值方法也是常用的一种数据建模方法, 是由法国地理学家 Matheron 和南非矿山工程师 Krige 提出, 用于矿山勘探。与反距离加权方法最大的不同在于加权系数的求取, 克里金法加权系数是满足插值点估计值与期望值差最小目标条件的一套优化权重系数, 需要计算半方差函数(也称为变差函数或变异函数), 利用观测数据两两计算距离和半方差数据对, 然后利用球状、指数及高斯等理论模型拟合距离和半方差关系函数, 一般距离近方差小, 距离远方

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 中国石化科技攻关项目“基于粘弹介质地震流体识别新技术研究”(P21046)

第一作者: 王振涛(1980-), 男, 高级工程师, 2003 年 7 月毕业于合肥工业大学资源与环境工程学院勘查技术与工程专业, 主要从事地震反演和储层预测方法研究以及生产应用等工作。Email: wangzhentao998.slyt@sinopec.com

差大,方差随着距离变化到一定程度会相对稳定不再变化,称为基台值,此时对应的距离称为变程。利用变差函数可估算插值点到任意距离样本点的半方差,然后利用方差函数并优化目标函数得到权系数,其加权系数仍为与距离有关的函数,距离插值点越近的样本点贡献越大。克里金插值方法与反距离插值方法的不同在于,样本点对插值点贡献大小并非由距离倒数决定,而是取决于变差函数,同时当样本点与插值点距离超过统计变程就不会产生贡献。克里金方法用变程距离描述了空间数据不相关性,更匹配实际数据变化情况。

最近邻点插值、反距离加权和克里金插值等方法均只考虑了数据点空间相关性与距离关系。由于地质沉积具有连续性和方向特点,因此测井数值大小与地质构造和沉积物源方向密切相关,测井数据不仅具有强空间相关性,而且具有连续性和方向性。测井建模中除了要考虑距离因素,还应该考虑方位因素,距离预测点近的测井会对较远测井产生方位遮挡,常用测井插值建模方法只考虑距离而没考虑这种方位遮挡关系,影响测井建模精度。

针对常用插值方法存在的问题,笔者提出了一种测井方位遮挡反距离加权插值方法,在常规插值建模分析对比的基础上,构建了方位遮挡反距离加权插值公式,研究距离和方位双影响因素的权系数计算方法,并利用模型数据进行了数值对比试验,并且在实际资料中开展了应用。

1 方法原理

1.1 测井反距离加权建模

测井反距离加权插值是常用的测井建模方法,其插值建模公式通常表示为:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \left(\frac{1}{d_i}\right)^p}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^p}, \quad (1)$$

式中: z 为待插数值; z_i 为测井点号 i 处对应的测井数值, $i = 1, 2, \dots, n$; d_i 为插值点到已知测井点的距离; $\frac{1}{d_i}$ 为反距离加权系数; p 称为加权幂指数,是大于 0 的常数,该值越大插值结果会越平滑。

从式(1)中可以看出,测井样本点对插值点的影响除了样本点自身的属性大小外,只与 2 点间的距离远近有关系,距离越远的样本点对插值点贡献

会越小,任一测井样本点会对任何位置和方向的点产生影响,但该方法只考虑了空间数据相关性,没有考虑地质沉积由于物源和构造控制造成的空间数据方向性。

1.2 测井方位遮挡反距离加权建模

针对地质沉积和测井数据具有空间相关性和方向性的特点,研究发展并形成测井方位遮挡反距离加权插值方法,其插值建模公式为:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \beta_i^q \left(\frac{1}{d_i}\right)^p}{\sum_{i=1}^n \beta_i^q \left(\frac{1}{d_i}\right)^p}, \quad (2)$$

相比式(1),式(2)中增加了综合非方位遮挡权系数 β_i ,描述了测井点被其他测井遮挡情况, q 同样为加权幂指数,是大于 0 的常数,该值越大插值结果会越平滑。在相同方位上,距离插值点近的测井样本点会对远距离的测井产生遮挡,测井点对插值点的贡献不仅与距离有关,而且与其他测井点的分布方位有关。

图 1 为测井方位遮挡反距离加权建模方法示意,测井点 $zk(x_1, y_1)$ 对插值点 $z(x, y)$ 的贡献不仅与两者距离 d_1 有关,而且也与距离插值点更近的测井点对其遮挡有关,图 1 中,测井点 $zk(x_2, y_2)$ 会对测井点 $zk(x_1, y_1)$ 产生遮挡效应,用综合非方位遮挡权系数 β_{ij} 定量表示,计算过程为:以插值点 $z(x, y)$ 为顶点,以测井点 $zk(x_1, y_1)$ 和 $zk(x_2, y_2)$ 到插值点 $z(x, y)$ 连线为边组成夹角 ∂_{12} ,该角度越小, $zk(x_1, y_1)$ 被 $zk(x_2, y_2)$ 遮挡越严重,当夹角为 0 时,可认为 $zk(x_1, y_1)$ 被完全遮挡,其对插值点无贡献;随着该夹角增大, $zk(x_1, y_1)$ 受 $zk(x_2, y_2)$ 遮挡影响小,可设定最大遮挡夹角角度 ω ,当夹角 ∂_{12} 大于 ω 时,认为 $zk(x_1, y_1)$ 不受 $zk(x_2, y_2)$ 遮挡,其对插值点贡献由其到插值点的距离决定。两个测井间的这种遮挡关系,可以用非方位遮挡权系数 β 表示,样本点 $zk(x_i, y_i)$ 被样本点 $zk(x_j, y_j)$ 的两两非方位遮挡权系数计算公式为:

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \sin \partial_{ij} & 0 \leq \partial_{ij} < \omega, \quad d_j < d_i \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ∂_{ij} 为遮挡角度, $0^\circ \leq \partial_{ij} \leq 180^\circ$; ω 为根据实际数据分析确定的最大遮挡角度,一般取值 $0^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$ 。

通过测井已知点两两组合可以得到测井点相互间的非方位遮挡权系数,然后将每个测井点与其他测井点计算得到非方位遮挡权系数相乘,就可以得到每个测井点对插值点的综合非方位遮挡权系数,

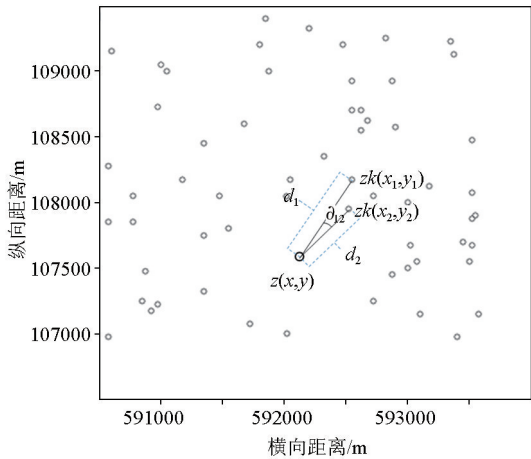


图 1 测井方位遮挡反距离插值原理示意
Fig. 1 Schematic diagram of logging azimuth occlusion
inverse distance interpolation

计算公式为:

$$\beta_i = \prod_{j=1}^n \beta_{ij} \quad (4)$$

与距离倒数作用一样,综合非方位遮挡权系数的大小也会影响样本点对插值点的贡献,该值越大,测井点受其他测井点方向遮挡越小,与距离插值点相同测井点相比,对插值点的贡献越大,最后插值大小是由所有测井数值进行反距离加权系数和综合非方位遮挡权系数进行加权平均得到。通过理论方法对比可以看出,该方法考虑到地质数据空间的相关性和方向性,相比反距离加权建模方法更适合测井数据建模。

2 数值试验

图 2 为从三维速度体提取的一平面切片。作为数值试验平面比对速度模型,模型纵、横向长均为 3 000 m,是面积为 9 km² 的正方形,根据实际地震

采集处理参数,设置网格为 25 m×25 m。可以看出,提取模型属性中,速度宏观表现为北高南低,局部速度存在变化。从该平面比对速度模型中分别随机提取 60 个点和 120 个点速度值并记录坐标,用来模拟测井点某沉积时期的平均速度,然后分别利用测井方位遮挡反距离加权建模方法和测井反距离加权建模方法进行建模试验,并与平面比对速度模型进行对比分析。

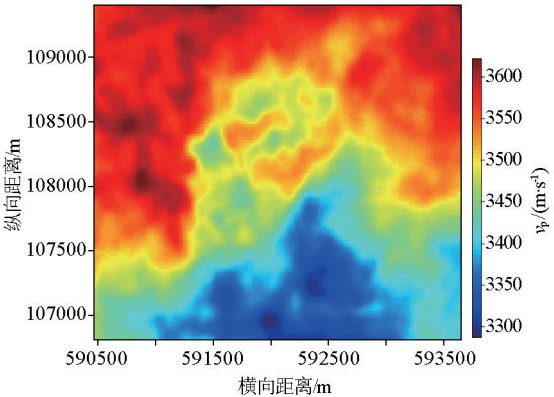
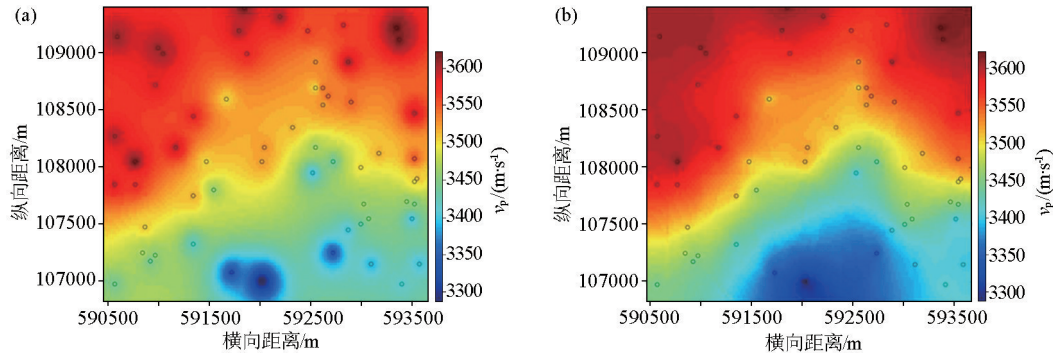


图 2 实际速度模型平面切片
Fig. 2 Actual velocity model flat slice

图 3 为采用 60 个模拟测井点进行建模试验结果,模拟测井点分布密度为 6.6 个/km²,与平面比对速度模型对比(图 2)可以看出:两种建模方法结果均能宏观表现速度北高南低变化特征;测井反距离加权建模速度存在井点局部异常“牛眼效应”(图 3a);而测井方位遮挡反距离加权建模速度变化自然,在试验工区南部低速度区域,控制井位少,因为考虑了井间方位遮挡,不会受高速度区域内大数量测井点的影响,建模结果体现了区域速度特点,与平面比对速度模型吻合情况更好(图 3b)。

图 4 为采用 120 个模拟测井点进行插值建模的试验结果,模拟测井分布密度为 13.3 个/km²,相比



a—测井反距离加权建模;b—测井方位遮挡反距离加权建模
a—inverse distance weighted modeling of logging;b—inverse distance weighting modeling under logging azimuth occlusion

图 3 采用 60 个模拟测井点速度建模切片
Fig. 3 Velocity modeling slice with 60 simulated logging points

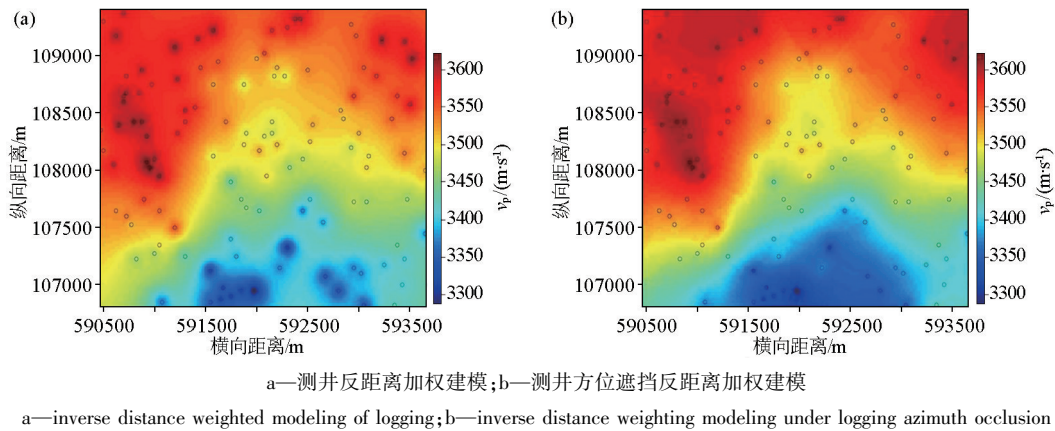


图 4 采用 120 个模拟测井点速度建模切片

Fig. 4 Velocity modeling slice with 120 simulated logging points

图 3 所示试验,样本点增加一倍。试验结果表明,2 种建模方法精度均随着测井控制点数量增多而提高。测井反距离加权建模方法在测井局部分布密度低、速度横向变化快的区域,依然存在局部异常“牛眼效应”,只是异常范围变小(图 4a)。测井方位遮挡反距离加权建模结果速度变化自然(图 4b),相比采用 60 个模拟测井点进行平面速度建模试验结果(图 3b),由于增加了测井控制点,模型速度横向细节变化表现能力增强,同时较好地保持宏观速度变化特征,与比对模型速度吻合程度进一步提高了。

3 实际数据应用

在 SL 油田开展了实际资料测井速度建模应用,

工区网格为 25 m×25 m,面积约为 55 km²,采用 7 口测井数据,井口分布密度相对较低,仅为 0.13 口/km²,为匹配实际地震频带,将测井速度曲线进行了高截频滤波处理,高截频率 120 Hz,然后开展了测井速度模型构建。

图 5 为采用不同建模方法获得的速度模型剖面对比,2 种速度建模结果中,井点处模型速度与测井速度都吻合较好。图 5a 采用测井反距离加权建模方法得到速度剖面,可以看出,井点周围受井影响明显,测井横向连续性差。图 5b 采用测井方位遮挡反距离加权建模方法得到速度剖面,井间速度过渡变化更加自然。

对速度建模提取的整个模型时窗平均速度平面属性进行分析(图6)可以看出,2种方法均能够反

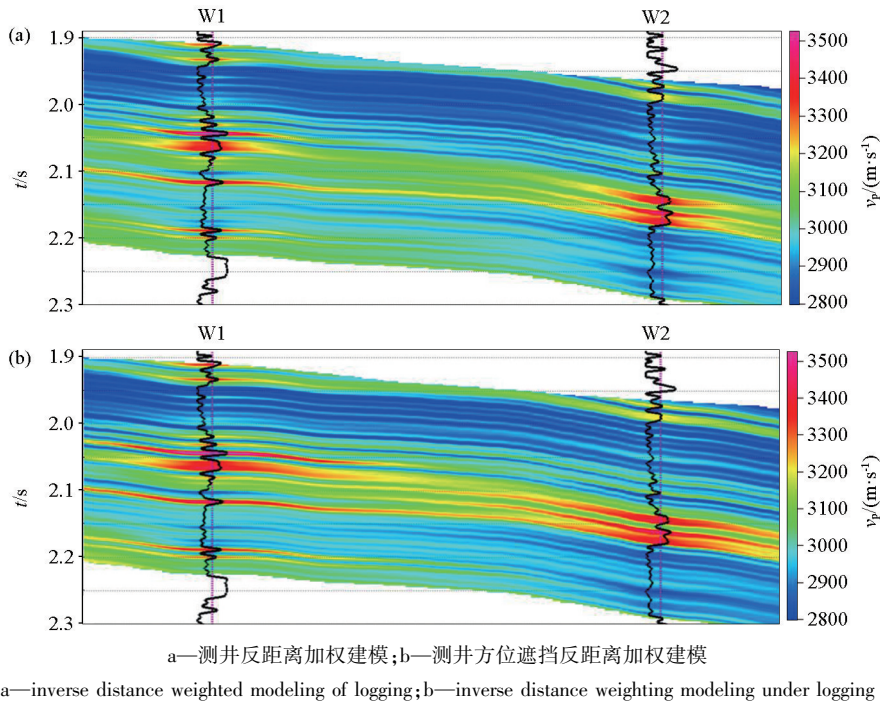
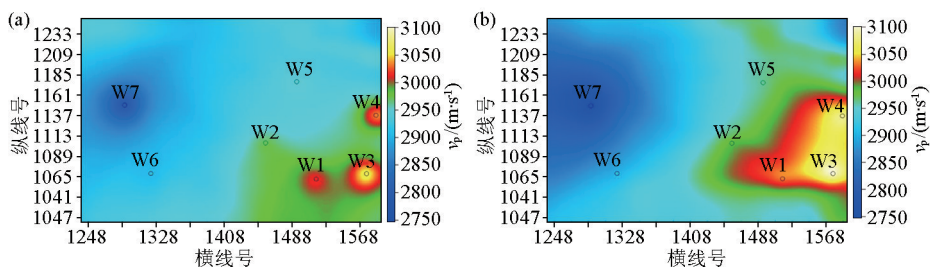


图 5 SL 油田测井速度建模剖面

Fig. 5 Velocity modeling profile of SL oil field



a—测井反距离加权建模;b—测井方位遮挡反距离加权建模

a—inverse distance weighted modeling of logging;b—inverse distance weighting modeling under logging

图 6 SL 油田速度建模切片

Fig. 6 Velocity modeling slice of SL oil field

映区域速度宏观变化特征,整个建模工区为深湖相沉积,物源来自东南方向,西北部为沉积洼陷中心,主要为低速度泥岩沉积地层,东南部靠近物源,地层为深湖相泥岩夹浊积砂岩组合,砂泥比相对较高,因此地层速度整体偏高。2 种方法对比显示,图 6a 为采用测井反距离加权建模方法得到速度平面属性,井点周围受井影响明显,有明显的“牛眼现象”,当井与其他钻井速度差异大时,这种现象会更明显;图 6b 为采用测井方位遮挡反距离加权方法速度建模剖面,速度变化更加自然,体现地质沉积空间方向性和连续性的特征,该速度模型提高了地质研究区域地质沉积认识,可为地震反演提供更可靠的初始速度模型。

4 结论与认识

本文研究了测井方位遮挡反距离加权建模方法,利用反距离权系数和综合非方位遮挡权系数联合加权建模,并提供了非方位遮挡权系数的计算方法,该方法能够顾及测井距离和方位双重因素影响,更能够体现地质沉积岩性空间相关性和方向性特点。测井方位遮挡反距离加权建模方法能够提高建模精度,建模结果变化过渡自然,符合地质沉积变化,测井控制点越多,建模精度越高;在测井及其他非均匀离散数据建模中具有广阔的推广应用前景。

参考文献 (References):

- [1] Vail P R, Michum R M, Thompson S. Global cycles of relative changes of sea level[J]. AAPG Memoir, 1977, 26: 83-97.
- [2] Vail P R. Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy[J]. AAPG Annual Converntion Short Course; Sequence Stratigraphy Interpretation of Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure, 1988.
- [3] 凌云,郭向宇,夏竹,等. 基于储层构造和沉积等时格架的储层静态建模实例而研究[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 795-806.

- Ling Y, Guo X Y, Xia Z, et al. A case study of reservoir static modeling based on reservoir structure and sedimentary isochronous framework[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1): 795-806.
- [4] 孙伟,刘远洋,高蕾,等. 储层速度建模分析及域转换[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2017, 44(6): 744-755.
- Sun W, Liu Y Y, Gao L, et al. Analysis of reservoir velocity modeling and domain conversion[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2017, 44(6): 744-755.
- [5] 黄继新,彭仕宓,黄健全. 储集层参数随机建模方法在扇三角洲储集层非均质性研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 52-55.
- Huang J X, Peng S M, Huang J Q. Application of stochastic simulation of reservoir parameters on heterogeneity in fan delta reservoir[J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(6): 52-55.
- [6] 伍宁南,陈玉明,刘漪. 测井约束反演技术在建南地区南部储层预测中的应用[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2011, 8(2): 44-45.
- Wu N N, Chen Y M, Liu Q. Application of logging constrained inversion technology in reservoir prediction in the south of Jiannan District[J]. Journal of Yangtze University: Natural and Science Edition, 2011, 8(2): 44-45.
- [7] 姜雄鹰,傅志飞. 高分辨率地震反演技术及应用[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2011, 38(3): 271-276.
- Jiang X Y, Fu Z F. High-resolution seismic inversion technology and its application[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2011, 38(3): 271-276.
- [8] 余为维,冯磊,杜艳艳,等. 测井约束与神经网络联合反演储层预测技术[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2232-2238.
- Yu W W, Feng L, Du Y Y, et al. Reservoir prediction technology based on joint inversion of logging-constrained and neural network[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2232-2238.
- [9] 尹力,方伍宝,李振春,等. 测井模型约束全波形反演的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(3): 156-160.
- Yin L, Fang W B, Li Z C, et al. Application of the well logging model constraining the full waveform inversion[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3): 156-160.
- [10] 郭良辉,孟小红,郭志宏,等. 地球物理不规则分布数据的空间网格化法[J]. 物探与化探, 2005, 29(5): 438-442.
- Guo L H, Meng X H, Guo Z H, et al. Gridding methods of geophys-

ical irregular data in space domain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(5): 438-442.

[11] 李小东, 金胜, 王阳玲, 等. 散乱离散点数据的三角形网格化快速成图[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 156-160.

Li X D, Jin S, Wang Y L, et al. Triangular grid-based rapid mapping of scattered data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 156-160.

[12] 刘兆平, 杨进, 武炜. 地球物理数据网格化方法的选取[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 93-97.

Liu Z P, Yang J, Wu W. The choice of gridding methods for geophysical data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 93-97.

[13] 王长海, 陈碧宇. 基于离散光滑插值的三维地质体构造网格模型[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2014, 31(6): 600-607.

Wang C H, Chen B Y. 3D geological grid model based on discrete smooth interpolation[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(6): 600-607.

[14] 余继峰, 于泳, 付文钊, 等. 测井数据 Matlab 插值与地质旋回性分析应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1679-1682.

Yu J F, Yu Y, Fu W Z, et al. Application of interpolation of well logs based on Matlab to analysis of geological cyclicity[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1679-1682.

[15] 刘志怀. 沿层微测井插值方法反演复杂地区近地表模型[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(1): 121-124.

Liu Z H. Near-surface model inversion in complex terrain area by along-horizon interpolation method[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2013, 34(1): 121-124.

[16] 张学宏, 李颜, 郝培章, 等. 水文资料插值计算方法探讨[J]. 海洋预报, 2008, 25(1): 5-13.

Zhang X H, Li Y, Hao P Z, et al. Discussion on the interpolation calculation methods of hydrological data[J]. Marine Forecasts, 2008, 25(1): 5-13.

[17] 胡刚, 赵刚, 宋慧. 不同插值方法对降水量空间不确定性的影响[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2012, 26(4): 428-432.

Hu G, Zhao G, Song H. Influence of different interpolation methods on spatial uncertainty of rainfall[J]. Journal of University of Jinan: Sci. and Tech., 2012, 26(4): 428-432.

[18] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(s1): 234-240.

[19] 刘国峰, 孟小红, 岳延波, 等. 克里金法在 GPS 数据内插中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(2): 175-178.

Liu G F, Meng X H, Yue Y B, et al. The application of kriging to GPS data interpolation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(2): 175-178.

[20] 段平, 盛业华, 李佳, 等. 自适应的 IDW 插值方法及其在气温场中的应用[J]. 地理研究, 2014, 33(8): 1417-1426.

Duan P, Sheng Y H, Li J, et al. Adaptive IDW interpolation method and its application in the temperature field[J]. Geographical Research, 2014, 33(8): 1417-1426.

Inverse-distance weighted modeling method under logging azimuth occlusion

WANG Zhen-Tao

(Geophysical Research Institute of SINOPEC Shengli Oilfield Branch Company, Dongying 257022, China)

Abstract: Existing log modeling methods fail to consider the directionality of geological deposition, yielding low modeling precision. To overcome this obstacle, this study proposed an inverse-distance weighted (IDW) modeling method under logging azimuth occlusion by analyzing the advantages and disadvantages of the IDW log modeling method. The new method proposed in this study adopted the IDW interpolation formula under azimuth occlusion. In addition to the influencing factors of the distance between known information points and interpolation points, the new method also considered the azimuth occlusion between known information points. Moreover, this study quantitatively described the influence of azimuth occlusion between known samples by integrating the weighting coefficients of non-azimuth occlusion. As indicated by the comparison between the new method and conventional methods based on numerical experiments and actual data, the modeling results of the new method showed gentler and more natural spatial variation, which conformed to the variation patterns of geological deposition. In sum, the method proposed in this study reflects the spatial continuity and directionality of geological deposition, has distinct advantages in improving the precision of geological log modeling, and thus can be widely applied to practical applications.

Key words: log modeling; azimuth occlusion; inverse-distance weighting coefficient; non-azimuth occlusion weighting coefficient

(本文编辑: 叶佩)