

杨小江, 文晓涛, 王亚会, 等. 支持向量回归约束去除断层阴影研究——以南海珠江口盆地东部 YP 油区某油田为例[J]. 华南地震, 2021, 41(1): 78–83.
[YANG Xiaojang, WEN Xiaotao, WANG Yahui, et al. Research on Support Vector Regression Constraint to Remove Fault Shadows – A Case Study of an oil Field in the Pearl River Estuary Basin, South China Sea[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 78–83]

支持向量回归约束去除断层阴影研究 ——以南海珠江口盆地东部 YP 油区某油田为例

杨小江^{1,2}, 文晓涛¹, 王亚会², 闫正和², 侯 凯²

(1. 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059; 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067)

摘要: 珠江口盆地东部 YP 油区不同油田主力油藏均为断层圈闭油藏, 断层引起的地层横向速度变化导致该区地震资料大量存在断层影响畸变成像区, 给该区构造评价带来挑战。传统解决断层阴影一般采用多方位或宽方位地震资料重采集或针对断层成像的目标性处理等, 其涉及采集费用高, 处理周期长。本文提出利用地层倾角属性定量刻画断层阴影带范围, 然后再结合 YP 油区海相地层横向分布稳定的地质特征, 引入支持向量回归算法计算该区高精度非线性构造趋势面, 在该趋势面的约束下完成对断层阴影带畸变区域构造进行重新恢复预测。理论模型试算和 YP 油区某油田实例均显示该方法有较大应用潜力。

关键词: 支持向量机; 趋势面; 断层阴影

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)01-0078-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.11

Research on Support Vector Regression Constraint to Remove Fault Shadows – A Case Study of an oil Field in the Pearl River Estuary Basin, South China Sea

YANG Xiaojang^{1,2}, WEN Xiaotao¹, WANG Yahui², YAN Zhenghe², HOU Kai²

(1. College of geophysics, Chengdu University of technology, Chengdu 610059, China; 2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract: The main reservoirs in different fields in the YP oil region of the eastern Pearl River Estuary Basin are all fault-locked reservoirs. A large amount of seismic data in this area has fault-influenced distortion imaging zones, which poses a challenge to the tectonic evaluation of the area. Traditional solutions to fault shadows generally use reacquisition of multi-directional seismic data or targeted processing for fault imaging, which involves the acquisition of high cost and long processing cycle. This paper proposed to quantitatively depict the shadow zone range of faults using 3D stratigraphic dip attributes, and then combined it with the lateral

收稿日期: 2020-12-10

作者简介: 杨小江(1987-), 在读博士, 工程师, 主要从事油藏地球物理研究。

E-mail: yangxj30@cnooc.com.cn

distribution of marine stratigraphy features in the YP oil region. the paper introduced a support vector regression algorithm to calculate a high-precision nonlinear tectonic trend surface in the area. Under the constraint of this trend surface, the paper completed the prediction of distortion area structure of the fault shadow zone. The theoretical model test calculations and the production application of an oil field in the YP oil region show that the method has a great potential for application.

Keywords: SVR; Trendsurface; Fault shadow

0 引言

断层阴影 (Fault shadow)指断层下盘地震成像不可靠区域。1989年, James L. Allen 等人^[1]发现断层两盘速度变化会引起时间域地震资料出现假构造, 并把构造畸变区域称为断层阴影区域; 1996年, Fagin S^[2]及其研究团队研究认为叠前深度偏移(PSDM)才能从根本解决断层阴影带的成像问题; 2001年, Oong K. Youn^[3]利用正演模拟指出利用叠前深度偏移解决阴影畸变问题时必须得有精确的速度场; 2006年, Ramin Nawab^[4]通过构造和井中地震联合反演 PSDM 偏移速度一定程度解决了 SISI-NUBI 油田断层阴影带异常; 2017年, Hai-Long Peng^[5]提出利用时间域解释断层和层位并建立解释成果控制下的深度偏移速度模型, 他们的应用结果表明解释成果控制下的深度偏移速度模型有效降低了钻井误差; 2010年, Sergey Birdus^[6]研究发现断层阴影带畸变程度与地震采集方向相关, 并指出要想更好的解决断层阴影问题可能需要多方位角地震数据; 2013年, Anthony Hardwick^[7]提出考虑多方位和宽方位地震采集, 提高地质体照明度以解决阴影问题; 2017年, BolarinwaSolanke^[8]对断层阴影带进行研究建议利用多方位角地震数据进一步挖潜断层阴影带内潜力; 2016年、2019年, 我国学者宋亚民等^[9]、刘南等^[10]和姜岩^[11]等研究人员利用模型正演技术对断层阴影畸变构造的机理和影响因素进行了大量研究, 并指出单一因素的分析方法导致数值模拟解决断层阴影问题存在一定局限性。

综上, 解决断层阴影问题的方法主要可分为地震采集和地震处理两类。其中采集类中的多方位地震采集可增加断层阴影区照明度和覆盖次数, 可有效改善阴影带内成像质量, 但多方位地震采集周期漫长、经济成本高, 且采集后还需投入不菲的处理成本。因此, 地震采集实施的经济性和周期性是制约采集类方法解决断层阴影问题的主要原因。而针对断层阴影带进行速度分析和处理

类方法解决断层阴影问题受限于有限的处理速度资料, 处理精度难以满足油田生产需求, 且同时受处理成本、处理条件等限制, 致使处理类办法也难以大规模应用于油田生产中。

为此, 本文提出: 通过断层阴影带内畸变地震波形和正常地震波形特征差异提出利用地层倾角属性描述断层阴影带, 定量圈定失真构造范围, 其次结合目标区海相地层横向沉积稳定、构造平缓的地质特征, 提出利用支持向量回归技术计算该区高精度非线性构造趋势面, 最后利用该趋势面约束恢复断层阴影带内构造。该方法不需要对研究区进行地震资料多方位采集, 也不受研究区地震处理条件、油田经济性门槛等限制, 仅通过解释性处理即可为 YP 油区的断层阴影畸变区提供一种畸变构造的快速评价及解决方法。

1 方法

研究区断层阴影带内地震资料主要体现为同相轴双程旅行时突然增加、减小, 在地震剖面上表现为“下拉”或“上翘”, 以及由两者叠加形成的复杂变化, 致使阴影带内地震同相轴与正常地层发生较大相对变化, 其本质是同相轴倾角的剧烈变化。

基于 3D 地震数据的倾角^[12] τ 表达式可写为:

$$\tau(t) \approx \frac{1}{dx} \frac{T'_n(t)[T_{n+1}(t)-T_n(t)]}{(T'_n(t)^2+\varepsilon)} \quad (1)$$

上式中, t 为地震资料纵先采样时间或深度, $T_n(t)$ 代表第 n 道地震记录在 t 时刻地震振幅, $T'_n(t)$ 代表 $T_n(t)$ 的导数, dx 代表空间采样间隔。 ε 为附加稳定因子, 引入后可避免 T'_n 为零时倾角无限大情况, 从而增强算法计算的稳定性

对倾角值较小正常地层, 因海相沉积且构造运动弱而使得本区构造平缓, 则可以引入支持向量回归趋势面进行正常地层构造拟合描述, 给定训练样本 $D=\{(x_1, z_1), (x_2, z_2), \dots, (x_n, z_n)\}$, $x_i \in R^n$, $z_i \in R$, 希望得到一个回归模型, 使得 $f(x)$ 和 z 尽可能接近:

$$f(x) = \omega^T \Phi(x) + b \quad (2)$$

上式中 ω 和 b 为待确定的模型参数, Φ 为原始变量至特征变量的映射函数。

假设我们容忍 $f(x)$ 和 z 之间最多有 ε 的偏差, 即仅当 $f(x)$ 和 z 之间的差别值大于 ε 时才计算损失。于是, 式(2)的最优化形式为:

$$\min_{\omega, b, \xi, \xi^*} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3)$$

$$s.t. z_i - \omega^T \Phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \quad (4)$$

$$\omega^T \Phi(x_i) + b - z_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad (5)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0, i=1, \dots, n \quad (6)$$

式(3)中 C 代表惩罚系数, ξ_i, ξ_i^* 代表松弛变量。对式(3)引入广义拉格朗日法则可将优化问题转化为:

$$\min_{\alpha, \alpha^*} \frac{1}{2} (\alpha - \alpha^*)^T Q (\alpha - \alpha^*) + \varepsilon e^T (\alpha + \alpha^*) - z^T (\alpha - \alpha^*) \quad (7)$$

$$s.t. e^T (\alpha - \alpha^*) = 0 \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C, i=1, \dots, n \quad (9)$$

式(7)中 $Q_{ij} = K(x_i, x_j) = \Phi(x_i)^T \Phi(x_j)$, 通过求解(7)式满足(8)和(9)式最优化问题, 则支持向量回归方程模型参数为:

$$\omega = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i) \quad (10)$$

$$b = z - \varepsilon - \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i)^T \Phi(x) \quad (11)$$

将(10)和(11)式带入(2)式则可求得 SVR 趋势面方程:

$$f(x) = \sum_{i \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (12)$$

上式中 b 值, 可以取为利用不同支持向量满足(11)式而求出的所有 b 值的平均值。

2 实例

为验证本文方法的可行性, 设计三层层状断层速度模型, 并分别考虑第二层为高速地层(3000 m/s)和低速地层(2000 m/s), 并对中间地层设计倾角 55° , 垂直断距 100 m 的断层模型, 见图 1(a)-(b)。

图 1(c)-(d)为 1(a)-(b)时间域正演地震记录, 在该记录中可观察到断层下方水平地层受到断层影响发生“畸变”。当中间层为高速地层时, 图 1(a)中由虚线 AA' 至 BB' 时, 高速地层厚度线性减薄, 该区域平均速度值逐渐降低, 因此图 1(c)中 A' B' 旅行时线性增加, 出现同相轴下拉; 由虚线 BB' 至 CC' 时, 高速地层为最薄区域, 同相轴下拉达到最低值; 由虚线 CC' 至 DD' 时, 高速地层厚度增加从而使平均速度从左至右逐渐增大, 导致图 1(c)

中 CC' 断面旅行时逐渐减小, 因此 CC' 斜率低于 AB 段断面斜率。同理, 当中间层为低速地层时, 则出现中间层底部反射靠近断面附近出现同相轴上翘, 断层下降盘断面斜率增大, 见图 1(b)和图 1(d)。

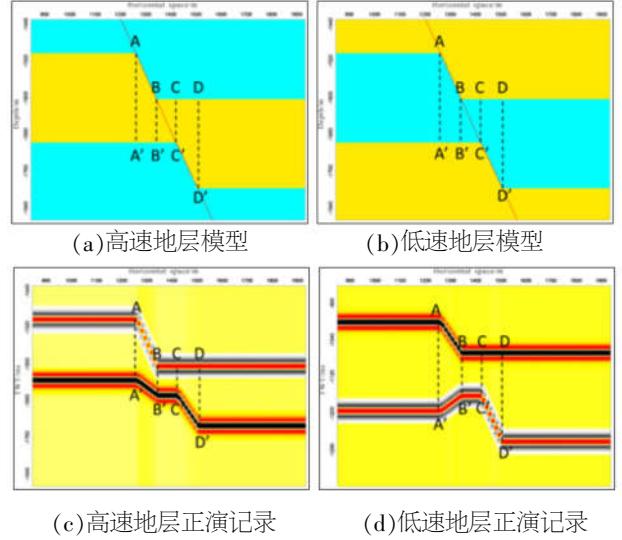


图 1 断层阴影带数值模拟

Fig.1 Numerical simulation of fault shadow zone

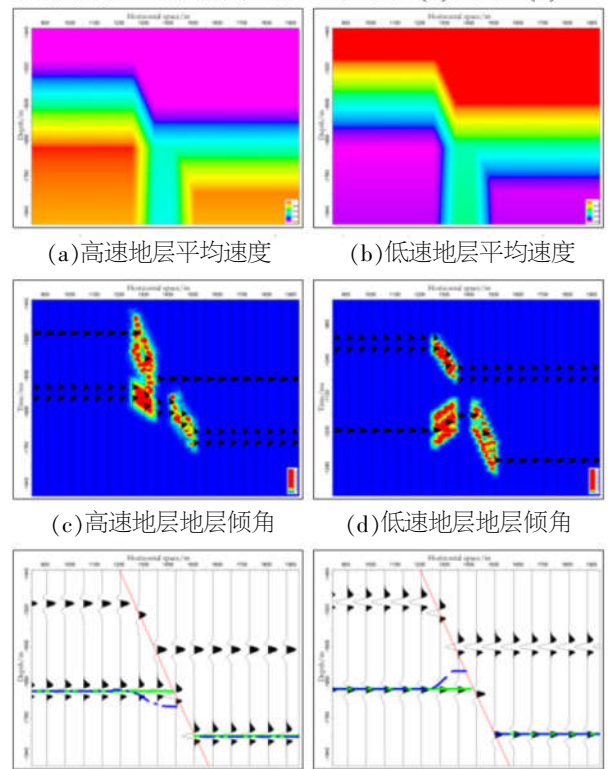


图 2 断层阴影带刻画及恢复

Fig.2 Delineation and restoration of fault shadow zone

图1(c)–(d)时间域构造形态如需要通过时深转换恢复到图1(a)–(b)中真实形态,则需要图2(a)–(b)的平均速度,图2(a)–(b)显示断层下方平均速度出现了强横向速度突变,该突变是因为断层附近地层厚度陡变引起横向平均速度的突变造成。实际构造解释工作中,通常采用断面两盘测井速度信息,横向利用层位约束,无法获得断层下方高精度横向突变速度场,因此实际工作中通常无法得到图2(a)–(b)中正确的平均速度模型,从而致使最终的深度构造成图中依然存在断层下方的上拉或上翘等“畸变”。

利用地层倾角属性对断层阴影进行描述,图2(c)–(g)理论模型数值模拟描述结果显示,地层倾角属性可以很好的描述断层位置及断层下方断层阴影范围。

利用图2(c)–(d)描述结果确定畸变构造范围,先删除断面下方红色异常高值倾角区域解释方案,利用剩下构造生成回归趋势面,并利用该趋势面对畸变构造进行恢复。图2(e)–(f)中蓝色虚线为恢复前构造,红色虚线为恢复后构造,波形显示为图2(c)–(d)利用图2(a)–(b)平均速度进行转深后的真实深度域构造形态。恢复结果表明,断层阴影带内(倾角异常范围)构造得到有效恢复,而正常地层构造与恢复前构造保持一致,该结果表明本文方法可有效恢复理论模型断层阴影带内畸变构造。

YP油区A油田主断层F1下方地震同相轴存在明显的“上翘”畸变,图3中上部黑色同相轴(虚线解释方案下方),从右至左在靠近断层时同相轴出现明显的上翘,地震成像受断层影响较大。

利用(1)式对YP油区A油田进行三维地层倾角计算,计算结果见图4,图5。图4中红色代表

地层倾角大值,蓝色为小值,黑色实线为f1断层,该计算结果显示断层下方地层倾角值高于远离断层处地层倾角,且该倾角值由浅至深分布范围逐渐增加,图5中可观察到地层倾角高值异常与断层走向平行,通过对三维地层倾角设置阈值得到断层阴影带全部影响范围。图6粉色虚线即为 β 层断层阴影分布范围。

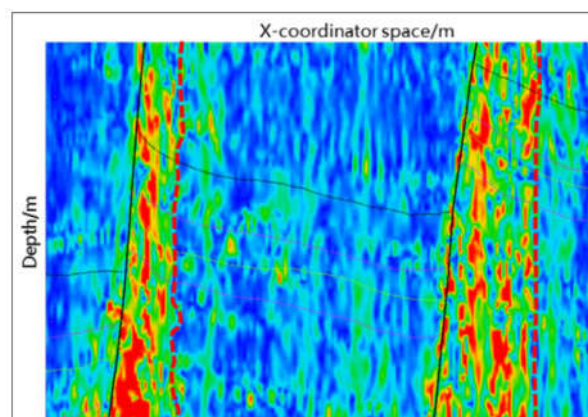


图4 地层倾角属性剖面

Fig.4 Stratigraphic dip profile

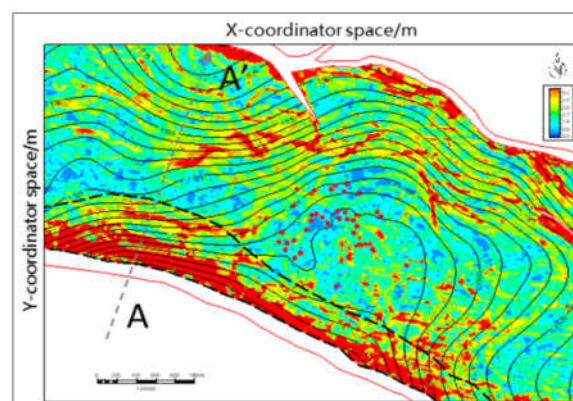


图5 地层倾角属性与构造叠合图

Fig.5 Overlay map of stratigraphic dip and structure

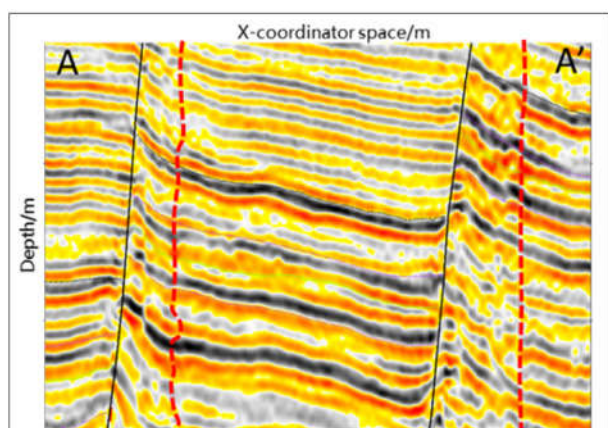


图3 地震剖面

Fig.3 Seismic profile

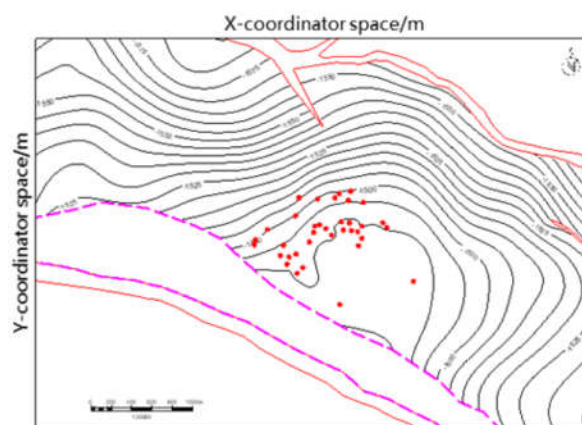


图6 去除畸变后构造

Fig. 6 Structure after removal of distortion

利用 β 层去除畸变后构造数据进行 SVR 趋势面训练, 训练结果见图 7。该趋势面显示断层周边构造较平缓。

图 8 为去除畸变后的构造(图 6 在 SVR 趋势面(图 7)约束下重新插值恢复构造)。由恢复结果可知, 图 8 中断圈构造特征更加明显, 断层附近断层阴影畸变构造得到有效压制。图 8 中绿色小点为断层附近后验钻井, 其钻井误差见图 9。

图 9 中红色为原始构造深度, 在断层附近钻井误差为 $-5.7 \sim -21.9$ m, 该误差主要源于断层阴影引起的同向轴上翘, 本文使用趋势面约束恢复后构造钻井误差为 $-2.9 \sim 10$ m, 整体构造误差得到明显降低。W7 井虽然依然存在较大误差, 可能因 SVR 趋势面中 ε 和 C 值没有优化到最优, 但即便如此, 该井钻井绝对误差依然降低了 11.9 m。

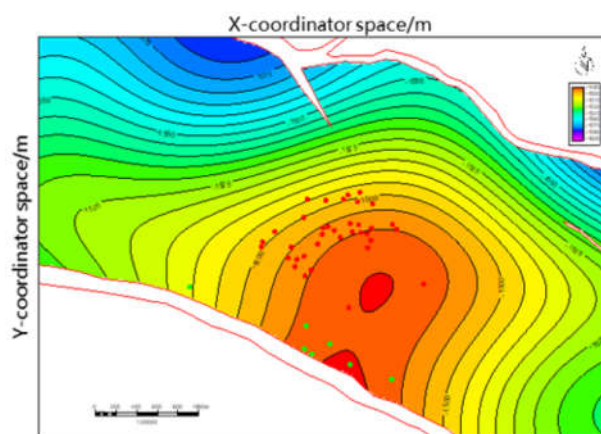


图 7 SVR 趋势面

Fig.7 SVR trend surface

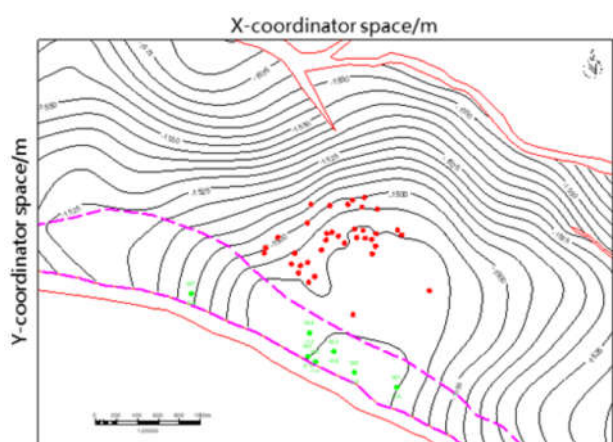


图 8 SVR 趋势面约束恢复构造

Fig.8 Restored structure under the constraint of SVR trend surface

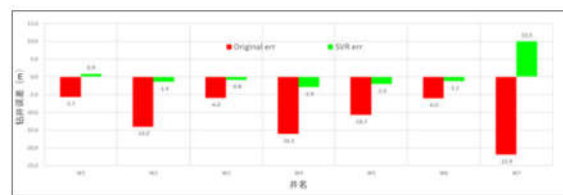


图 9 畸变构造恢复前后深度误差对比图

Fig. 9 Comparison of depth error before and after restoration of distorted structure

3 结论

本文提出利用基于 3D 地震数据的地层倾角属性刻画断层阴影带范围, 可定量确定断层阴影的边界。在此基础上结合研究区平缓地层沉积地质特征建立了支持向量回归畸变构造恢复模型, 该模型不但在理论模型中取得了完全成功, 并有效恢复了 YP 油区阴影带畸变构造, 且该结果经受了该区后验钻井数据的考验。该方法不需要对地震数据进行重新采集或目标性处理, 因而该方法不受处理周期和经济成本等因素限制, 使得该方法在本区具有较大应用潜力。

致谢: 感谢李潇在本文公式理解及推导中提供的帮助, 感谢李立峰对本文研究程序包安装所提供的专业指导。

参考文献

- [1] James L Allen, J.M. Bruso. A case history of velocity problems in the shadow of a large growth in the Frio formation, Texas Gulf Coast[J]. Geophysics, 1989, 54 (2): 426-439.
- [2] Richard C. Bain. The fault shadow problem: Its nature and elimination[J]. The Leading Edge, 1996 (15): 1005 - 1013.
- [3] Youn O K, Soponpongpiat P, Pinpipat N. A modeling study of fault-shadow, shallow-gas, and low-velocity chimney effects on seismic data [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2001: 1245-1248.
- [4] Nawab R, Schnitzler J J, Delbushaye P, et al. Fault shadow correction estimation in Sisi-Nubi Field using an integrated surface and well seismic inversion approach[J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2006: 3467-3471.
- [5] Peng H L, He J W, Deng D, et al. A new 3D velocity modeling method for removing fault shadow distortions [J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2017: 5751-5755.

- [6] BirdusS, Artyomov A. Fault shadow distortions on 3D seismic data and their removal by depth processing [J]. Aseg Extended Abstracts, 2010(15): 1 - 4.
- [7] Hardwick A, Rajesh L. A 3D Illumination Study to Investigate Fault Shadow Effects over the Hoop Fault Complex [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 3315-3319.
- [8] Solanke B. Resolving fault shadow Challenge; Onshore Niger Delta case history [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2017: 4514-4519
- [9] 宋亚民, 赵红娟, 董政. 基于地震正演的断层阴影恢复技术及其在南海A油田的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(4): 521-527.
- [10] 刘南, 李熙盛, 侯月明, 等. 模型正演在断层阴影带内构造研究中的作用 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 65-74.
- [11] 姜岩, 程顺国, 王元波, 等. 大庆长垣油田断层阴影地震正演模拟及恢复方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(2): 320-329.
- [12] Aarre V. Globally consistent dip estimation [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 1387-1391.
- [13] Chang CC, Lin CJ. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. ACM transactions on intelligent systems and technology (TIST), 2011, 2(3): 1-27.