

断层模型正演模拟研究与应用实例

吴艳梅,周 华,胡 敏

(中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院,江苏 扬州 225009)

摘要:复杂断块区勘探开发过程中常遇到地层产状井震不吻合、假断层、假构造等现象,导致构造解释偏差。为更好地分析产生这种现象的原因,得到更准确的构造储层信息,以实际工区地质特征为基础建立断层模型,应用波动方程二维正演模拟方法,重建断层系统的地震响应过程,剖析复杂断块区地震响应特征。正演模拟结果表明,断层两盘速度差异、断层倾角变化、断层平面间距远近等对地层、断层反射成像会产生影响,并可能引起假的地震反射。研究成果有效指导了地震资料在油田开发中后期实际生产中的应用。

关键词:构造刻画;正演模拟;断层模型;波动方程;地震反射异常

中图分类号:TE321 **文献标志码:**A

Fault model forward simulation and application case

WU Yanmei, ZHOU Hua, HU Min

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In the process of exploration and development of complex fault block areas, there are often phenomena such as inconsistent well-seismic formation, false faults, and false structures, which cause structural interpretation deviations. In order to better analyze the causes of this phenomenon and obtain more accurate structural reservoir information, a fault model was established based on the geological characteristics of the actual work area, and a wave equation two-dimensional forward modeling method was used to reconstruct the seismic response process of the fault system, and analyze the seismic response characteristics of the complex fault block area. The results of seismic simulation show that the speed difference between the two plates of the fault, the change of the dip angle of the fault, the distance between the fault planes, etc. can affect the formation and the fault reflection imaging, and may cause false seismic reflections. The research results have effectively guided the application of seismic data in actual production in the middle and late stages of oilfield development.

Key words: structure characterization; forward simulation; fault model; wave equation; seismic reflection abnormal

断层的存在会导致多种地震反射与实际地质特征不吻合的现象,地震正演模拟是研究异常地震反射的有效手段之一。刘南等^[1]通过地震正演模拟发现断层阴影带内地层的地震响应会出现异常;马改正等^[2]指出随着速度变化和深度增加,断层两侧差异压实作用会使部分断层在地震反射中消失,且提出“通过正演模型无法得到的断层和断层组合都是值得怀疑的”观点。为了有效解释断层,前人对多种影响断层识别的因素进行了研究。郝宇刚^[3]建立简单地质模型,进行正演模拟,研究地层速度、噪声、地震资料主频、砂泥互层以及特殊地质体对断层及两侧层位的地震响应的影响;束宁凯等^[4-5]利用正演模拟研究不同断距小断层的地震响应特征,从而识别小断层;陈军等^[6]建立断层和侵入岩的不

同组合模型,正演模拟其地震响应,从而识别实际地震剖面中侵入岩影响下的断层。为得到复杂地质模型的更准确的地震响应,季玉新等^[7]建立观测系统,分析速度误差,利用叠前深度偏移处理得到更趋于实际地震剖面的地震响应。

苏北盆地高邮凹陷构造破碎,断层数量多,形态多,组合模式多。在实际研究中断层发育区常出现地层产状井震不吻合、假断层、假构造、地震反射

收稿日期:2021-04-19;改回日期:2021-05-28。

第一作者简介:吴艳梅(1984—),女,硕士,高级工程师,现从事地震资料综合解释研究工作。E-mail:wuyanmei.jsyt@sionpec.com。

基金项目:江苏油田科技攻关项目“滚动勘探单元划分及潜力评价”(JS20016)。

异常、小断层识别难等问题,大大降低了开发中后期滚动研究及剩余油挖潜的成功率。在排除地质认识及技术因素后,认为地震资料本身可能存在某些问题,从而引起构造解释偏差。为分析可能产生的问题,采用二维地震正演模拟方法进行研究。

1 二维断层模型正演模拟

1.1 二维断层模型正演模拟思路及流程

根据实际工区要解决的问题及地质特点建立断层模型;参考实际地震资料采集参数建立观测系统,采用适当方法进行二维正演模拟;对得到的模拟剖面进行偏移、校正等处理,处理方法参考实际地震资料的成像方法。通过全面模拟实际地震资料产生过程,得到更趋于实际地震资料的断层模型反射剖面,其流程如图 1 所示。

1.2 二维断层模型设计

断层解释过程中主要考虑的因素有断距、倾

角、产状、组合模式等。本文用倾角变化体现产状变化,用简单的平行式、Y 字形和负 Y 字形体现多种多样且复杂的断层组合模式。实际研究中设计了不同断距、倾角、断层平面距离和断层组合模式下的 6 个断层模型。各模型的地层接触关系、厚度变化及速度根据实际工区得到(见图 2)。

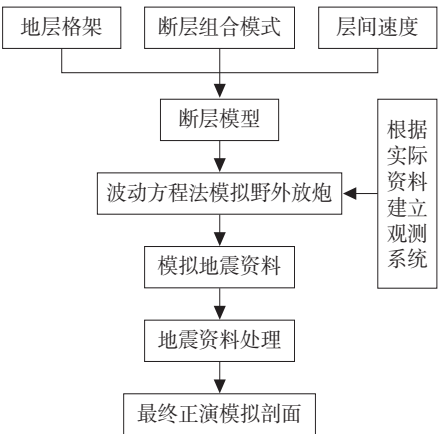


图 1 断层模型波动方程正演模拟流程

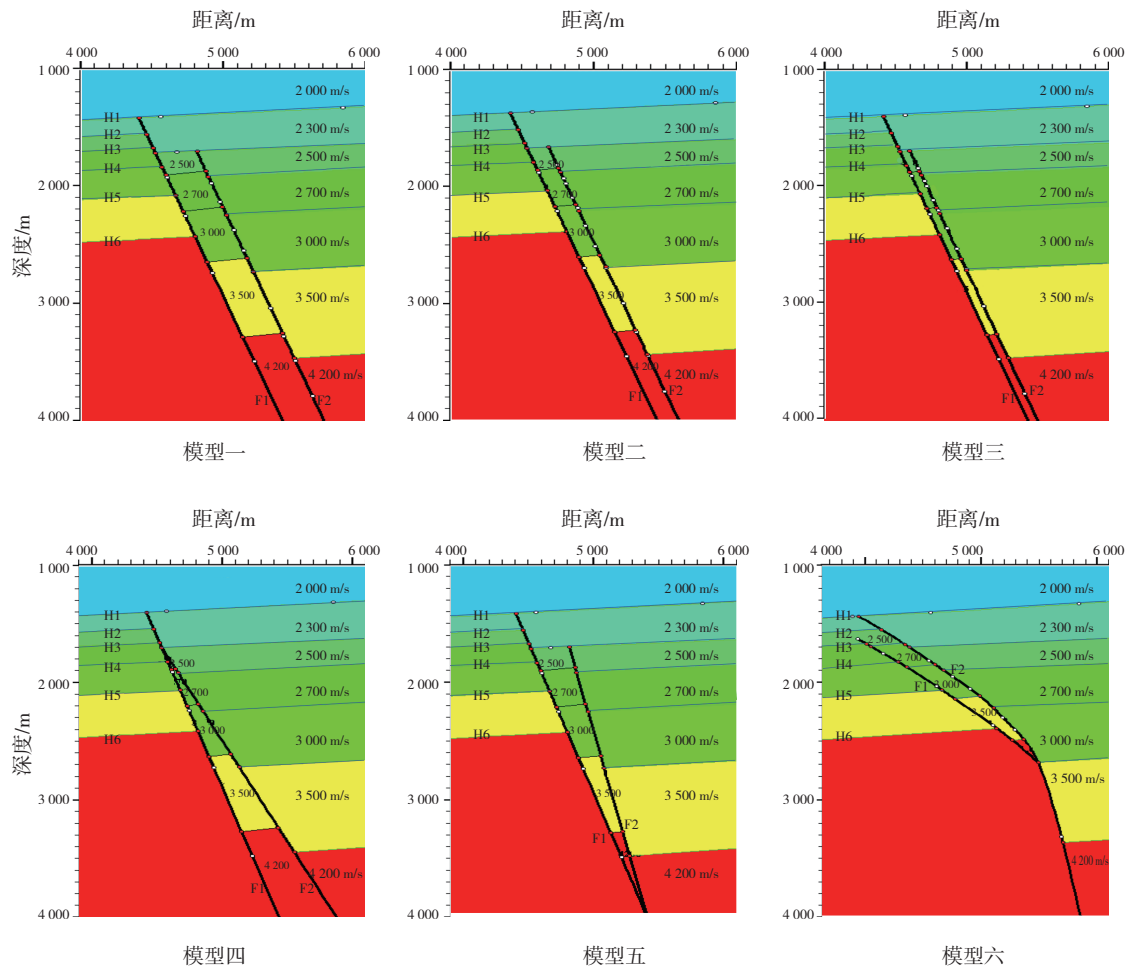


图 2 断层地质模型示意

图2中6个地质模型均由7套地层加2条断层组成,模型中所用地层速度一致,数值来源于高邮凹陷ZW地区实际地层平均速度;从上到下断层断距逐渐增大。模型一、二、三中的两条断层F1和F2互相平行,区别在于断层平面距离不同:模型一平面距离300 m,模型二平面距离160 m,模型三平面距离80 m,主要研究两条断层平面间距对地震响应的影响。模型四断层组合为帚状,模型五断层组合为Y字形,从浅到深,断层断距和平面距离不断变化,主要研究组合模式不同对地震响应的影响;模型六从浅到深,断层倾角逐渐增大,主要研究断层倾角变化对地震响应的影响。

1.3 二维断层模型正演模拟

二维地震正演模拟方法最常用的有波动方程法和射线追踪法。波动方程法同时保持了地震波传播的运动学和动力学特征,更趋近实际地震波传播过程,模拟结果与实际地震资料更吻合^[8-9]。本文为得到更趋近实际资料的正演剖面,采用波动方程法进行正演模拟研究。

实际野外采集参数受到地面条件约束(苏北地区农田湖泊密布,公路河流交错,施工难度很大),采用双边放炮2820-40-0-40-2820的观测系统。在正演模拟过程中,由于模拟的噪音对远偏移距资

料的影响相对弱一些,为了更好地成像,采用了4000-40-0-40-4000观测系统。相对于实际采集的地震资料,正演更好保留了一部分低频信息。正演模拟过程中,利用声波+有限差分法波动方程(10阶)模拟野外放炮,得到初始地震采集资料。由于实际地震资料处理采用了叠前时间偏移成像方法,本次研究利用Omega2软件对采集资料进行处理,通过去噪、反褶积、静校正等手段,消除绕射、多次波等干扰现象,进一步提高资料品质,然后建立偏移速度场,通过柯希霍夫叠前时间偏移得到最终的正演模拟剖面。该模拟方法是常规正演手段中计算量最大,仿真度最高的正演模拟方法,最大限度还原了实际地震资料的采集处理过程。

1.4 二维断层模型正演模拟地震响应问题分析

图3为针对6个断层模型正演模拟得到的地震响应,其中F1、F2断层和H1-H6层位分别对应断层模型中的F1、F2断层和H1-H6层位。通过对比地震响应和地质模型的层位和断层位置,从6个地震响应剖面中发现以下可能引起地震解释差异的问题。

(1)断层上升盘存在地震同相轴下拉现象,经分析认为,断层下降盘地层速度小于上升盘地层速度,导致其双程旅行时增大,因此受断层影响的区域时间增大,且越靠近断层影响越大,同相轴下拉

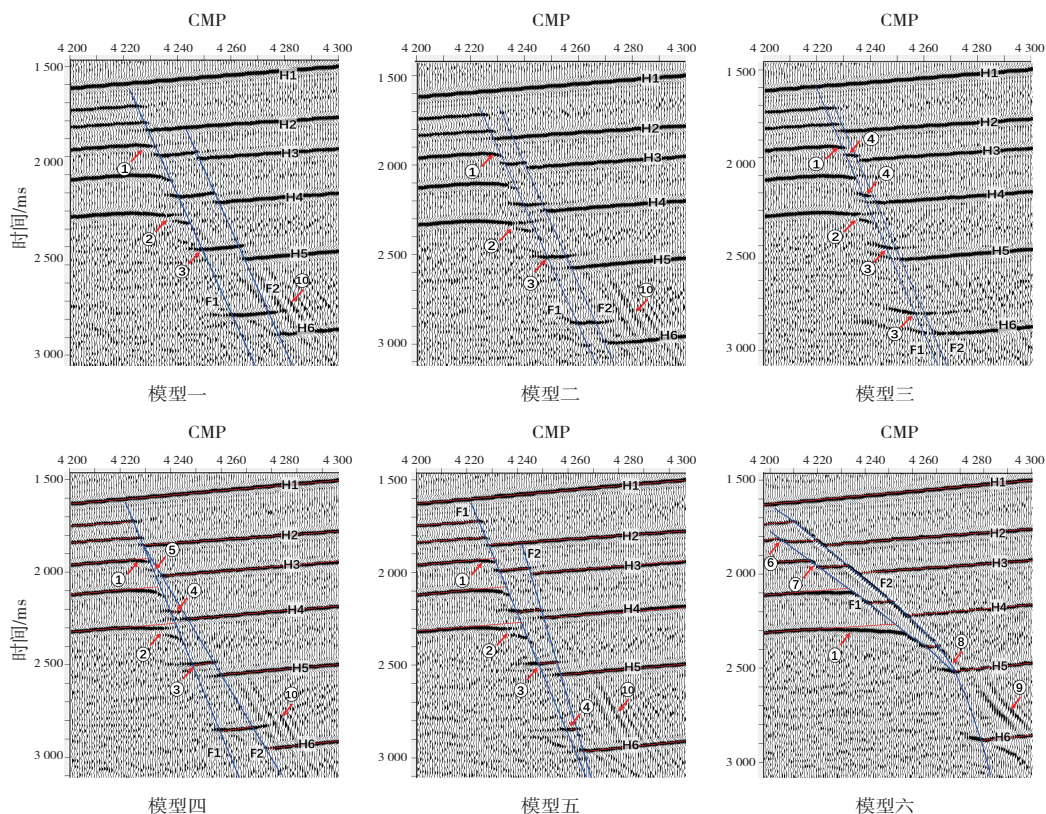


图3 断层地质模型地震响应示意

越明显(图3中①号箭头所示)。

(2)靠近断层的部分同相轴出现地质模型中不存在的断点(图3中②号箭头所示)。

(3)地震同相轴上表现为层段轴不断现象,分析认为是由断点处的绕射现象引起(图3中③号箭头所示)。

(4)两条断层间距较小时,断层间的同相轴产状与实际地层产状不吻合(图3中④号箭头所示)。

(5)断层间距小于2个道间距时,地震同相轴上不能有效反映地层(图3中⑤号箭头所示)。

(6)断层断距小于 $\lambda/4$ 时,同相轴存在扭曲现象;大于 $\lambda/4$ 同相轴错段(图3中⑥号、⑦号箭头所示)。

(7)小倾角断层的断面地震反射成像清晰,当断层倾角小于 60° 时,断面地震反射成像难,无断面波显示(图3中⑧号箭头所示)。

(8)当断层倾角由小到大快速变化时,正演剖面中出现延低角度断面波向下延伸的假断面波响应,假断面波与地质模型中的断层位置存在较大偏差(图3中⑨号箭头所示)。

(9)深层地震响应中存在多个与断层近似平行的反射轴,实际地质模型中地层并无变化(图3中⑩号箭头所示)。

2 实际应用

2.1 同相轴下拉现象分析指导断层上升盘高部位井位部署

CB油田存在一条断距较大的F1断层,油气聚集在断层上升盘高部位。油田开发生产中,高部位实钻井井深常高于部署井井深,部分挖潜高部位剩余油井目的层断缺。图4为过well1、well2、well3和well4井的地震剖面,根据well1井的速度标定结果,该剖面中对 K_2t_2 地层的地震解释层位为T1(图4蓝色虚线所示),而实际钻探后标定的well2、well3和

well4井的 K_2t_2 地层均高于T1,且越靠近断层,差异越大。对原地震剖面图进行分析,认为F1断层断距非常大,断层两盘地震速度差异很大,存在上述正演模拟研究中的异常现象(1)——同相轴下拉现象。结合正演研究中的地质模型与地震响应的对比分析,认为实际地震解释层位应为H1(图4蓝色实线所示)。根据T1层位部署的“设计1”井目的层会断缺,可改为“设计2”井的位置。

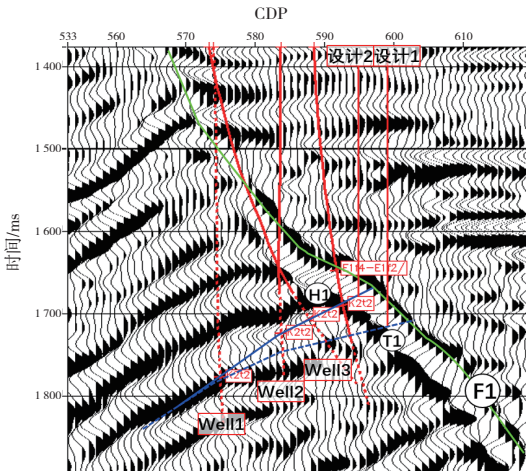


图4 过well1-well2-well3-well4井地震剖面

2.2 同相轴错断假象指导失利井原因分析

ZZ油田产量高,滚动研究过程中研究人员根据地震同相轴的错断现象(如图5a中①和②号箭头所示),解释断层F1;结合井上分层 K_2t_2 位置,解释层位H1。由于断层存在,上盘层位抬升,形成新的有利圈闭①(如图5b所示),结合该区油水边界预测了新圈闭的含油面积,在构造高部位设计井well1(如图5b所示)。实钻后目的层 K_2t_2 实际井深比设计井深低40 m,经分析认为F1断层不存在。解释方案由图5(a)变为图5(c),断层F1消失,目的层H1解释方案变化。结合上述地质模型正演模拟研究中出现的异常现象(2),认为地震资料中的同相轴错断并非由断层引起,而是大断层反射引起的假象。

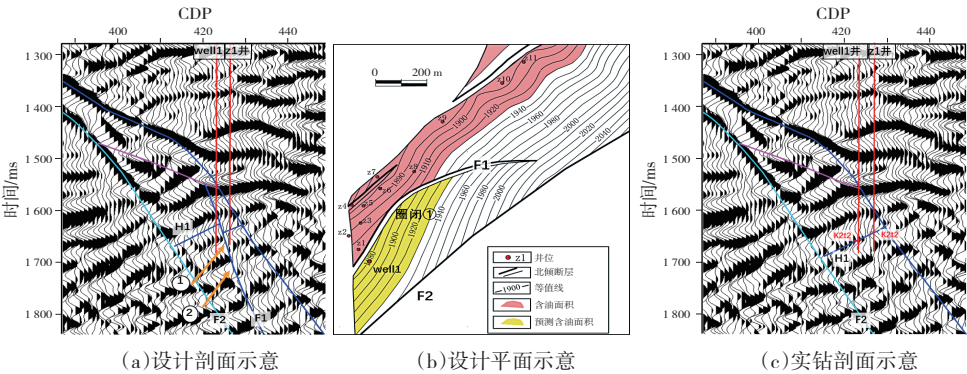


图5 ZZ油田well1井钻探前后示意

2.3 同相轴反射假象指导地震层位解释

XZ油田构造复杂,多条大断层存在,F1、F2、F3和F4断层夹持的区域下部地震同相轴产状与F2和F3断层近似平行。根据同相轴特征,结合XZ1井标定的地质分层 E_{1f_3} ,解释地震层位H1old(如图6中黄色虚线所示)。后续钻探XZ2和XZ3井,两口井实钻目的层深度均比设计深度高。结合断层模型的正演模拟研究中出现的异常现象(9),认为剖面中与大断层近似平行的同相轴是断层引起的反射假象,在较深层位出现,浅层的反射更符合实际地层产状。结合新井 E_{1f_3} 层位标定,重新解释层位H1new(图6中紫色实线所示)。图6中所示新解释层位H1new与其上部地层同相轴产状更一致,更符合地层变化趋势。

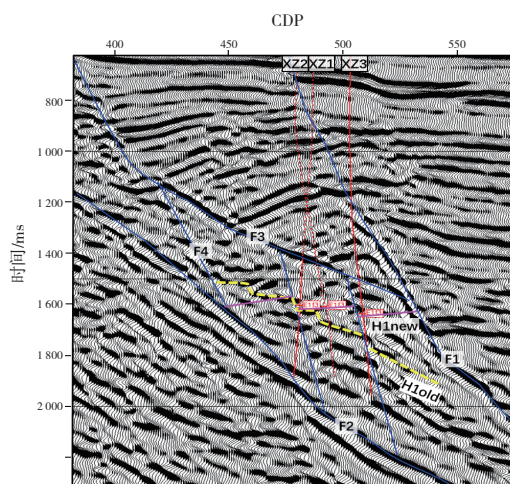


图6 XZ油田过XZ1、XZ2和XZ3井地震解释示意

3 结论

油田开发中后期,随着基础资料和研究成果的丰富,以及地质认识的深入,地震资料本身引起的地质认识出现偏差的问题逐渐显现,在此情况下,地震正演是发现地震资料本身问题和消除偏差的有效途径。本文通过地震正演模拟研究及实际资料验证,认为:

(1)断层两盘速度变化会引起同相轴的下拉现

象,速度差异越大,下拉现象越明显。

(2)断层平面间距越小,地层反射受断层影响越大,地震同相轴所反映的地层产状越不可靠,需结合整体构造趋势和相邻地层产状来综合判断。

(3)断层倾角较大时,断点处易出现层段轴不断的现象,地质断点位置和地震断点位置有差异;断层倾角越小,断面波越明显;倾角变化较大的位置易出现断面假象。

(4)深层断层附近会出现与断层近似平行的地震反射,形成假的地层反射现象。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马改正,毛立华.关于断层的几点认识[J].中国石油勘探,2008,13(4):72-75.
- [3] 郝宇刚.断层地震识别方法效果分析及应用——以黑51-黑47区块为例[D].大庆:东北石油大学,2017:6-13.
- [4] 束宁凯,宋力,汪新文.基于地震正演与井震结合的低序级断层描述技术及应用[J].现代地质,2017,31(2):338-347,366.
- [5] 刘彦,孟小红,胡金民,等.断层识别技术及其在MB油气田的应用[J].地球物理学进展,2008,23(2):515-521.
- [6] 陈军,周彬,陈剑铭,等.利用侵入岩地震相变化特征识别断层[J].石油地球物理勘探,2011,46(5):790-794.
- [7] 季玉新,韩文功,沈财玉,等.胜利油田典型地质模型的地震正演[J].石油地球物理勘探,2006,41(5):561-572.
- [8] 王志美,畅永刚.射线追踪与波动方程正演模拟方法对比研究[J].科技资讯,2007(12):47-48.
- [9] 章婷.复杂介质地震波波场正演模拟[D].成都:电子科技大学,2014:8-40.

(编辑 谢 葵)