中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

移动扫码阅读

孙月成,李永飞,孙守亮. 高精度三维地质建模新方法与关键技术研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(9):241-248.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.09.031

SUN Yuecheng, LI Yongfei, SUN Shouliang.Research on key technologies and new method of high precision 3D geological modeling[J].Coal Science and Technology,2019,47(9):241-248.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.09.031

高精度三维地质建模新方法与关键技术研究

孙月成,李永飞,孙守亮

(中国地质调查局沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034)

摘 要:为了充分利用三维地震勘探数据蕴含的有关地下岩性、物性和流体的空间分布信息、进一步提高三维地质模型精度、改善油藏数值模拟效果,探讨了提高叠前地震道集质量、改善井震匹配关系及多学科一体化研究的新方法。通过不同偏移距地震道的频谱均衡对地层吸收作用和动较拉伸效应造成的远偏移距地震数据波形畸变现象进行了校正;通过构建高精度的三维数据体时深转换速度模型提高了地震数据体在深度域与测井曲线深度的一致性;并采用岩石物理、地震反演、地质建模和油气藏数值模拟多学科一体化的研究方法对多学科研究进行循环反馈,不断优化三维地质模型的准确性、提升油藏模拟吻合度。研究结果表明:针对不同偏移距地震道的频谱均衡技术的应用消除了远偏移距地震波形畸变现象,使地震波能量集中到有效频带范围内;将地质统计学反演的高分辨率速度体与层间网格自动剖分技术相结合建立的三维时深转换新方法保障了深度域的三维地震数据体与测井曲线的精细匹配,时深转换后的深度域地震反演数据体与测井曲线在深度和数值两方面一致性都很好;同时基于新建地质模型得到的数值模拟数据与实际生产数据吻合度高、生产历史拟合效果好,重新计算的地质储量与动态储量的差异大大缩小,解决了某气田长期存在的三维地质模型精度不高、动静储量差异大等难题。

关键词:地震道集;频谱均衡;三维时深转换;精细地质建模

中图分类号:P631;TD167 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)09-0241-08

Research on key technologies and new method of high precision 3D geological modeling

SUN Yuecheng, LI Yongfei , SUN Shouliang

(*Shenyang Center of China Geological Survey*, *Shenyang* 110034, *China*)

Abstract:In order to make full use of spatial distribution information of underground lithology, properties and fluids in 3D seismic exploration data, to further improve the accuracy of 3D geological model and improve the numerical simulation effect of reservoirs, the quality of pre-stack seismic gathers and the improvement of well-seismic matching were discussed. Through the spectral equalization of different offset seismic traces, the distortion of the seismic data was corrected by the absorption of the formation by NMD the tensile effect. The consistency of seismic data in depth domain with logging curve has been improved by constructing high-precision 3D velocity model for time-depth conversion. The multi-disciplinary integrated methods of petro physics, seismic inversion, geological modeling and reservoir numerical simulation were used for cyclic feedback to optimize the accuracy of 3D geological model and to improve reservoir production history fitting. The results show that the application of spectrum equalization technique for different offset seismic traces eliminates the distortion of the long-distance seismic waveform, so that the seismic wave energy is concentrated in the effective frequency range. The new method of 3D time-depth conversion was established by combining the high-resolution velocity cube from geo-statistical inversion with the automatic meshing technique of interlayer ensures the fine matching of 3D seismic data and well logging curve in depth domain. And the deep-field seismic inversion data after time-depth conversion,the well logging curve is consistent in both depth and value.At the same time, the numerical simulation data obtained from the new geological model are highly consistent with the actual production data, and the production history is well fitted.The difference between the recalculated geological reserves and the dynamic reserves is greatly reduced. The method solved the problems of lower accuracy geological modeling and large difference between dynamic with static reserves that has long existed in gas field.

Key words:seismic gather;spectral balancing;time to depth conversion for 3D seismic data;fine geological modeling

收稿日期:2019-04-11;**责任编辑**:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604200);中国地质调查局资助项目(DD20190098)

作者简介:孙月成(1979—),男,黑龙江大庆人,高级工程师,硕士。E-mail:sunych1@foxmail.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

0 引　　言

油气资源勘探开发是一项系统工程,需要岩石物理、测井、地震、地质、油藏工程及钻完井等多学科的密切合作[1-2]。如能进行跨学科、跨部门的综合一体化研究,则能更充分地发挥各专业的技术优势、消除技术壁垒、优化整体开发布局,从而提高开发效率,使得油气田的开发效益最大化[3-4]。而在油气藏开发过程中地质模型的精度直接制约后续油气藏数值模拟的准确性,进而影响挖潜增产措施的优选、产量规划和油气藏的高效开发、管理。因而获得空间纵向、横向均具有高分辨率、高精度的油气藏三维地质模型一直是地质学家和油气藏专家不懈的追求[5]。地质学家通常采用平面沉积相约束下的钻井数据插值方法建立地质模型,其井间的地层接触关系和变化规律难以吻合实际地质情况,从而导致后续的油气藏数值模拟难以达到预期的效果。与此同时,三维地震数据蕴含着丰富的关于地下岩性、物性和流体等方面的空间分布信息,随着三维地震各类属性分析和反演技术的发展,这些信息得以被充分挖掘,但是现阶段这些信息在油气藏开发过程中并没有得到充分的利用。

为了充分挖掘三维地震蕴含的丰富地质信息、进一步提高地质模型的准确性和油气藏模拟的历史拟合吻合度,近年来很多学者做了有意义的探索和实践,李绪宣等[6]通过地震数据体推演储层空间变化规律,再以井为条件求取空间估计参数,进而形成了基于地震驱动的储层地质建模方法;胡勇等[7]利用地震正演验证地质模型的可靠性,以地震反演成果约束进行地质建模,提高了模型精度;乐靖等[8]以地震倾角体为导向划分垂向网格层并建立三维地层网格模型,利用敏感地震属性求取的转换函数来建立储层参数模型,提高了井网稀疏条件下地质模型的准确性。可见通过三维地震属性数据、反演成果来约束进行地质建模可以有效提高三维地质模型的精度,再遵从由地震到油气藏模拟再回到地震的井、震、藏一体化工作流程可以循环优化各专业的研究、充分挖掘各专业的潜在信息、并使之达到最佳耦合,从而最大化油气藏开发效益。

在岩石物理、地震、地质、油气藏多学科一体化研究中,提高输入资料的品质是基础、采用高精度的三维地质建模技术是关键、优化多学科一体化的研究方法、流程是保障。为此笔者首先优化了基于地质统计学反演的岩石物理、地震、地质、油气藏等多学科一体化研究方法和针对地震道集的不同偏移距频谱均衡技术以及三维数据体精细时深转换新方法,随后将其应用于 Y 气田的三维地质建模和气藏生产历史拟合研究当中,取得了良好的应用效果。

1　基于高分辨率反演的三维地质建模

三维地震数据蕴含着丰富的有关地下岩性、物性和流体等方面的空间分布信息,随着三维地震各类属性分析和反演技术的发展,这些信息得以被充分挖掘,但是现阶段这些信息在油气藏开发过程中并没有得到充分的利用。实践表明,遵从由地震到油气藏再回到地震的井、震、藏一体化研究方法更有利于充分发挥三维地震技术在油田挖潜中的作用,并深化各专业间的合作、提高勘探开发效率,使得油气藏开发效益最大化[9]。

1.1　基于高分辨率反演的三维地质建模方法

传统三维地质建模和油气藏数值模拟中用到的主要是地震油气藏描述的二维构造研究成果,对于蕴含着丰富地质信息的各类三维地震属性体、反演体并没有得到充分利用。为此可以采用岩石物理分析、地震反演、地质建模和油气藏数值模拟等多学科一体化的研究方法,将三维地震反演得到的岩性体、物性体等成果通过三维数据体的时深转换直接用于地质建模。并且不经过模型粗化、将这些储层参数体采样到油气藏模型的每个网格,从而得到深度域的属性模型,直接用于后续的油气藏数值模拟。该流程在地质统计学反演完成后,首先针对各类属性的多个等概率模型与测井、已知地质信息进行综合对比和地下地质情况的不确定性分析,针对模型进行初步的优选。随后通过油气藏生产历史拟合的优化来进行模型的迭代优选,从而实现地震反演、地质建模和气藏模拟的循环反馈、不断优化,其技术流程如图 1 所示。该研究方法不但能够提高三维地震信息的利用率,而且同时提高了地质建模和气藏模拟的精度以及剩余油分布预测的准确性,真正实现了岩石物理、地震、地质、油气藏多学科的一体化研究。

如今以地震技术为主导的油藏多学科一体化定量预测已成为一种发展趋势[10]。地震反演技术在多学科一体化研究过程中起到了承上启下的关键作用,它不但要有效融合不同学科的多尺度信息,而且为了能够更好地利用三维地震信息,井点处的地震储层预测结果必须与测井解释成果一致,包括构造、储层和含油气性等[9]。常规确定性反演通常是基于地震正演的方法来实现,即通过不断修正初始模型使其合成记录与实际地震记录进行逼近,当达到一定精度后,此模型就是反演结果,该类反演方法虽

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

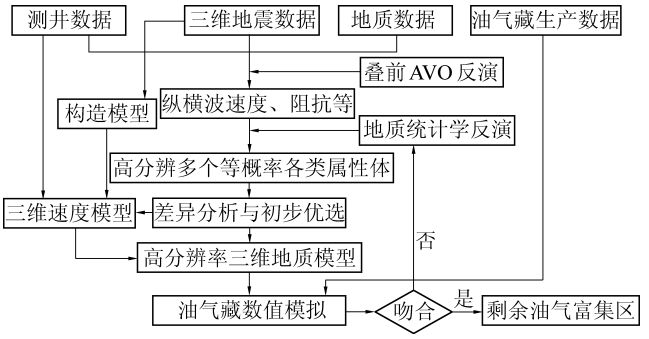


图 1 高精度三维地质建模与多学科循环优化研究流程

Fig.1 High-precision 3D geological modeling and multidisciplinary cycle optimization research process

然充分利用了地震信息,但是很难保证预测结果与井点数据吻合。

地质统计学反演技术可将确定性反演和地质统计学模拟技术的优势相结合,既考虑了地下地质体的结构性、又考虑了其局部的随机特征[11],可以有效综合确定性反演的高横向分辨率和地质统计学模拟的高纵向分辨率,成为新一代高分辨率、高精度的井震联合随机反演方法。HAAS 与 DUBRULE 等[12-13]于 20 世纪 90 年代将地质统计学理论引入到地震反演技术中,随后国内外很多学者不断地对其进行改进发展和推广应用;李方明等[14]应用地质统计学反演的波阻抗体与密度体刻画了薄砂体的厚度和横向变化情况;孙月成等[15]通过地质统计学反演得到了地层岩性和物性等数据体,并进行薄层砂体和砂泥互层的空间分布刻画,支撑了研究区的沉积微相和储层非均质性研究。上述地质统计学方法是以序贯高斯模拟类算法为理论基础,EIDSVIK 等[16-17]于 21 世纪初率先通过马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)方法对储层变量的后验概率模型进行采样,使用最大后验准则来预测储层的孔隙度和流体分布。随后,基于 MCMC 算法的地质统计学反演技术在高分辨率薄层反演和储层的不确定性分析中得到了越来越广泛的应用,PAN 等[18]将马尔可夫链蒙特卡罗反演方法推广到多波多方位地震数据的反演中,与仅考虑 PP 波的标准反演技术相比,该方法抗噪声能力更强,反演过程更加稳定、反演结果更准确。赵海波等[19]采用叠前地质统计学反演技术进行了致密薄储层预测及水平井优化设计,部署实施的水平井油砂钻遇率平均 95% 以上。基于 MCMC 算法的地质统计学反演技术在贝叶斯理论框架下有效融合三维地震、测井和地质统计等多尺度信息,来量化地下情况和反演问题的不确定性[20-21],其反演结果分辨率高、可以提高薄层预测的精度,而且反演结果与测井数据吻合度高[22-23],可实现储层预测的井震一致性。并且能够反演得到后续三维地质建模中急需的岩性体、物性体、泥质含量体等多类储层参数,其通过三维数据体时深转换可以直接建立深度域的相应属性模型。因此这类随机反演方法应该是目前测井、地震、地质、油气藏一体化研究中最为适合的高分辨率反演方法。

1.2 不同偏移距地震道的频谱均衡

高精度三维地质建模的输入信息主要来自测井曲线、三维地震和地质认识等几个方面,其中井间信息主要来自于三维地震数据,其资料质量和可靠性是保障后续研究成果质量的基础。由于地层对地震信号的吸收作用和处理过程中动较拉伸效应的存在,造成远道地震波波形畸变[24],使得不同偏移距表现出不同的频谱特征。偏移距越大则其频谱能量分布的频段范围就越大,导致 AVO 分析不够稳定、影响后续的叠前地震属性分析及反演效果[25-26]。

针对不同偏移距进行频谱均衡处理的主要目的是针对地层吸收和动较拉伸效应进行校正,在不改变地震道集各偏移距上的振幅大小(即 AVO 特征不变)的同时,将不同偏移距(或角度)地震道的频谱整形为一致的频宽,使所有偏移距道集的频谱能量集中到有效频带范围内,从而凸显 AVO 异常,为后续的叠前属性分析、叠前地震反演等提供更高质量的地震道集数据。

由于近道地震数据通常伴有剩余多次波,而远道地震数据常存在不同程度的拉伸畸变,所以在进行地震道的频谱均衡时一般首先选取最大偏移距三分之一处的子波频谱作为标准谱,随后用其它偏移距的待校正地震道频谱与标准谱计算匹配算子,最后应用该匹配算子对待校正地震道进行滤波,从而实现不同偏移距的频谱均衡。

通过图 2 中不同偏移距频谱均衡处理前、后的地震道集数据对比可以看出处理前由近道小偏移距到中远道大偏移距地震道的地震波形逐渐变“胖”,这是由于地震波传播距离越远则高频成分衰减越严重、使得近远道的频谱出现差异造成的;而频谱均衡处理后近、中、远道波形“胖瘦”的差异得到消除,各个偏移距地震道的波形一致性更好,但是振幅的相对大小关系并没有发生变化,即 AVO 特征得到了很好的保持。

从图 3 中频谱均衡处理前、后不同偏移距地震道的子波频谱对比可以看出,频谱均衡处理前,不同偏移距地震道的子波频谱差异大,近道的子波有效频带较宽、主频相对较高,而往中远道高频信息衰减较快、有效带宽逐渐变窄,主频也逐渐降低;而处理

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

后近、中、远道的地震波有效频带较宽,同时其主频均趋于一致。

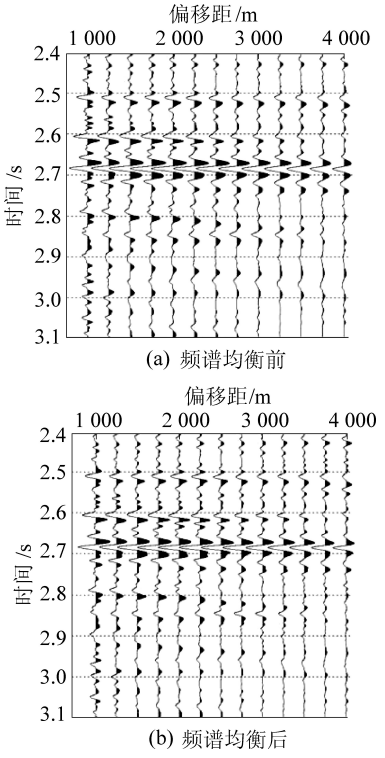


图 2　不同偏移距频谱均衡处理前、后的地震道集对比

Fig.2　Seismic gathers comparisons before and after spectrum equalization under different offsets

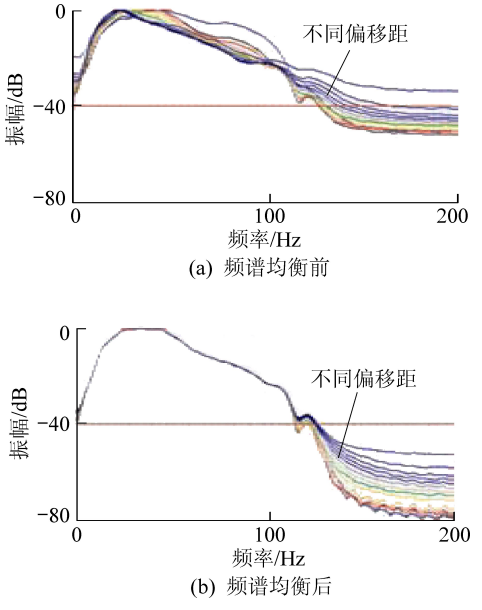


图 3　不同偏移距频谱均衡处理前、后的频谱对比

Fig.3　Spectrum comparisons before and after spectrum equalization under different offsets

1.3　三维数据体精细时深转换技术

三维数据体的时深转换是应用地震反演数据体直接建立深度域三维地质模型的关键,其要求三维速度模型不但对于控制层面要有精确的平均速度,而且层间也要有精细的速度结构[27]。常规时深转换方法大多数都是针对二维构造面的时深转换需求提出的[28-33],难以满足三维数据体精细时深转换的要求。尤其对于控制层之间的地层,其钻井与三维地震深度难以精确匹配,导致关于其储层连通性的认识不够准确,从而制约了蕴含着丰富的有关岩性、物性、流体信息的三维地震各类属性体在油气田开发阶段的充分利用。同时地震深度偏移成像数据的地层深度与测井曲线的深度难以准确对齐,存在较大井震深度差[34-36],无法满足井震精细匹配的要求。为了使得地震反演成果在深度域与测井的深度准确对应需要针对三维体的时深转换方法进行深入研究,但这方面相关的研究和探索鲜见报道。笔者以叠前地质统计学反演的三维高分辨率速度体为初始模型,结合深度域网格的自动剖分等技术提出了一种三维数据体时深转换方法。

由于叠前地质统计学反演结果相对于常规的确定性反演具有更高的纵向分辨率,同时与测井曲线具有相同的采样率,并能直接反演得到高分辨率的纵波、横波层速度体,其中蕴含了精细的井间、层间速度结构信息,因此可将其作为三维体精细时深转换的初始速度模型。为了保证时深转换后地震与测井深度准确对齐,上述初始模型还需要经过井上时深关系和地质分层的精细校正,才能用于三维数据体的时深转换。为此可以通过速度模型精细校正和深度域网格的自动剖分两项技术对上述初始模型的误差进行校正,来保证在深度域数据体的控制层面、层间小层两者都与钻井深度一一对应,从而完成三维速度模型的精细构建,具体流程如图 4 所示。

1)三维速度模型的精细校正。由于地质统计学反演得到的初始速度模型还不能保证深度域数据体的在控制层面和层间小层与钻井深度精确吻合,为此首先需要将各个控制层位的时间域构造应用反演得到的初始速度模型进行时深转换、并应用地质分层对井点误差进行校正得到控制层面的深度域构造数据;随后用深度域构造数据和时间域构造数据相除得到对应控制层面的平均速度数据;接下来分别在时间域和深度域将相邻 2 个控制层构造数据相减,得到相应层段的深度域和时间域地层厚度,再将这两者相除求出对应层段的层速度数据。

针对每个欲进行时深转换的层段都重复上述运

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

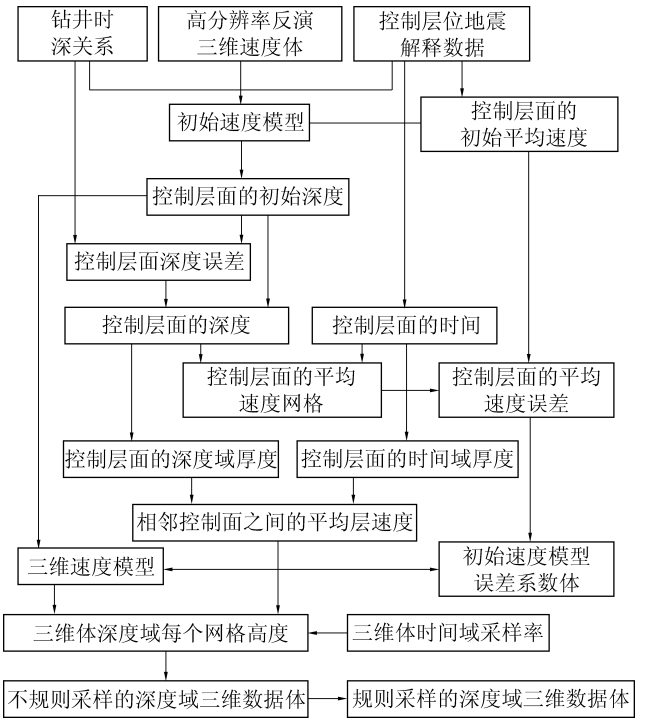


图 4 优化的三维数据体精细时深转换技术流程

Fig.4 Optimized technology flow of fine time-depth conversion for 3D data volume

算过程得到所有控制层面的平均速度和对应层段的层速度;接着将校正后的平均速度与初始速度体中对应层面处提取的平均速度相除得到对应层面的误差系数,再将多个层面的误差系数进行空间插值得到三维误差系数体,并乘以初始速度模型,得到新的三维速度模型。

值得注意的是对于厚度较大的层段来讲,这个新速度模型并不能保证时深转换后层间的小层在深度上与测井曲线的准确对应关系。为此需要进行深度域网格的自动剖分来对控制层面之间的小层深度进行精细校准,同时也对新的速度模型针对层间速度做进一步的校正,最终得到控制层间具有更加精确速度结构的三维速度模型。

2)深度域网格自动剖分。地震勘探数据在时间域是等间距采样的,但是由于三维空间中的每个网格的岩性、物性存在差异,导致其地震波传播速度不同,从而导致对应的深度域网格在纵向上大小不同。为了精确的计算每个网格深度域的纵向高度,需要应用式(1)针对每个网格计算其深度域的高度。之后将每个网格的时间域属性值直接赋予对应的深度域网格即可完成该层段的三维属性体的时深转换。针对每个层段均进行相同的运算,并针对时深转换后的属性体进行保真重采样,即完成了整个三维数据体的时深转换工作。由于该方法以高分辨率反演的三维地震速度体为初始模型,其层间、井间蕴含了丰富的速度结构信息,所以针对层间微构造、井间的局部地质体等也能达到准确的时深转换效果。

$$\Delta h = (V - V_a)/V_a \times \Delta t/2 + V_a \Delta t/2 \qquad (1)$$

其中:Δh 为某个深度域网格高度,m;V 为该网格的层速度,m/s;V_a 为相邻控制层之间与该网格平面位置相同的所有网格层速度的平均值,m/s;Δt 为时间域采样间隔,s。

2 实际应用及效果分析

Y 气田自从投产以来,其个别区块气藏模型精度偏低,生产井历史拟合效果不佳,而且动态储量和静态储量的差异一直较大。为了进一步落实气田的动用储量范围和剩余储量的分布,需要先建立高精度的气藏模型,为此,应用岩石物理、地震反演、地质建模和油气藏模拟等多学科一体化的研究方法,首先基于地质统计学反演得到岩性、物性和含油气性等数据体,并用这些数据落实储层的物性和含气性分布,同时将这些数据通过三维体时深转换直接应用于 Y 气田的三维地质建模和气藏数值模拟中。

地质统计学反演在多学科一体化研究中能起到有效融合多学科信息、提供初始速度模型的关键作用。在此之前,首先采用叠前确定性反演确定储层的横向分布范围和横向变程参数,并基于钻井数据统计得到储地比和纵向变程等地质统计学反演的输入参数。在反演过程中通过盲井检验的办法来抽掉不同位置、不同相带、不同含气性的多批次井来进行参数测试和对比,并评估反演方法的预测性与稳定性,确定最终的地质统计学反演参数和流程。最后基于确定的反演参数和流程应用所有井进行反演生成多组反演结果,平均后得到最终的反演结果。图 5a 中反演的孔隙度剖面与井上实测结果吻合度非常高,同时含水饱和度反演结果(图 5b)也与钻井情况完全吻合,并且提取的储层参数平面属性其横向变化规律也符合该区的地质认识和沉积相分布。

接着,将地质统计学反演得到的孔隙度、含水饱和度等数据体经过时深转换变到深度域,并进行重采样得到深度域的孔隙度、饱和度模型。随后,利用孔渗关系转换得到渗透率模型,应用泥质含量反演体约束建立岩相模型和净毛比模型。

针对时深转换的结果进行质量控制可确保转换后的三维模型与钻井数据在深度域的精准匹配,便于后续的气藏数值模拟。图 6 是深度域井上实测的孔隙度曲线与从模型中井旁道提取的孔隙度曲线对

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

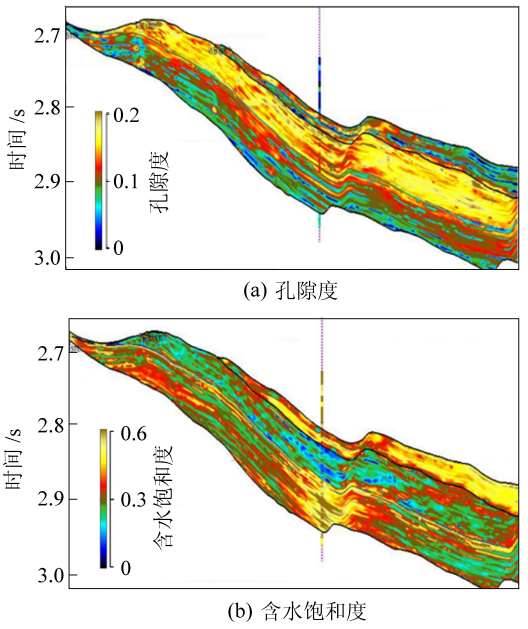
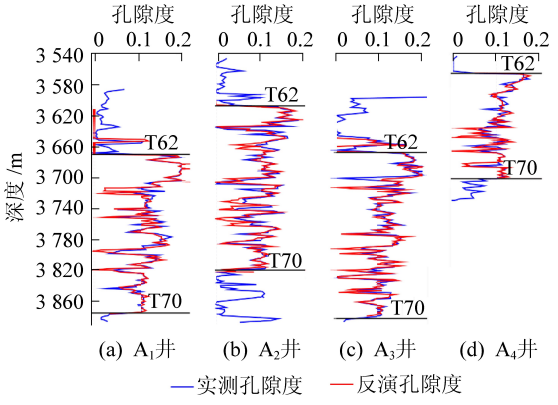


图 5　过 Y4 井地质统计学反演孔隙度、含水饱和度

Fig.5　Cross Well Y4 profiles of porosity and water saturation from geostatistical inversion

比,总体来讲两者无论是变化趋势还是数值的大小吻合都很好,特别是两者的深度几乎不存在差异,从而可以保证后续气藏数值模拟的顺利实施。



T62—目的层顶面;T70—目的层底面

图 6　深度域反演(红)与实测(蓝)孔隙度对比

Fig.6　Comparison of inversion(red)and measured (blue)porosity in depth domain

基于用该套技术建立的地质模型重新计算了气田的地质储量,与动态储量的差异由原来的 30%缩减到了不足 10%,解决了一直存在的动态储量与静态储量差异大的问题,进一步说明该地质模型精度高,可为后续产能预测、调整挖潜提供精确的气藏模型。图 7 为 A5 井基于该三维气藏模型进行的压力历史拟合情况,可以看出无论是地层压力还是井口压力都得到了很好的拟合,充分说明基于地质统计学反演的多学科一体化研究思路和相关地球物理技术的应用为准确地预测气田产能和高效气藏管理提供了高精度的三维气藏模型。

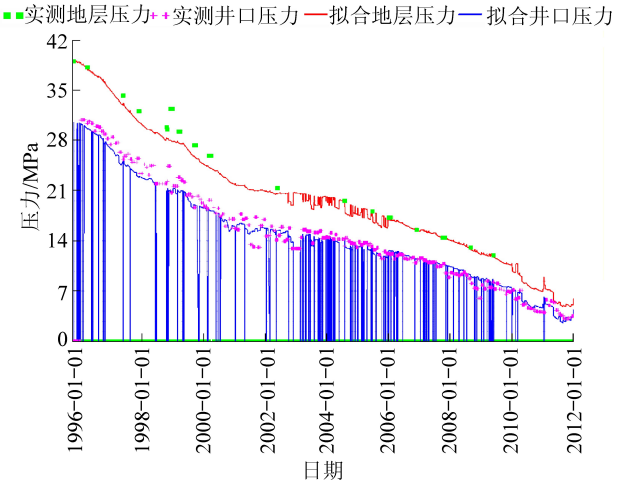


图 7　A5 井地层压力及井口压力拟合情况

Fig.7　History fitting of formation pressure and wellhead pressure of Well A5

3　结　　论

1)针对不同偏移距地震道频谱均衡技术的应用消除了由于地层吸收和动较拉伸造成的远偏移距地震数据波形畸变效应,使地震波能量集中到有效频带范围内,同时保持了不同偏移距地震道的相对振幅关系,提升了地震道集的质量,为后续的 AVO 分析和叠前地质统计学反演提供了高质量的地震道集数据。

2)地质统计学反演的速度体为三维数据时深转换新方法提供了高分辨率的初始速度模型,结合层间网格自动剖分技术优化的三维数据时深转换新方法保障了深度域的三维地震数据体与测井曲线的准确匹配,为使用三维地震属性体、反演体直接建立高精度三维地质模型提供了一种切实可行的三维数据时深转换新方法。

3)地质统计学反演能够充分融合各专业的不同尺度信息,为油气田储层物性、流体的预测提供了一种切实可行的解决方案。并且在岩石物理、地震反演、地质建模、油气藏模拟的多学科一体化研究中起到了承上启下的纽带作用,使得地震与测井、地质、油气藏多学科的研究做到了循环反馈、不断优化,充分发挥了各专业的技术优势,建立的三维地质模型精度高、重新计算的地质储量与动态储量差异小,气藏生产历史拟合效果好。

参考文献(References):

[1]　胡文瑞.论老油田实施二次开发工程的必要性与可行性[J].石

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

油勘探与开发,2008,35(1):1-5.
HU Wenrui.Necessity and feasibility of PetroChina mature field redevelopment[J].Petroleum Exploration and Development,2008,35(1):1-5.

[2] 韩大匡.关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J].石油勘探与开发,2010,37(5):583-591.
HAN Dakuang. Discussions on concepts, counter measures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields[J].Petroleum Exploration and Development,2010,37(5):583-591.

[3] 马永生,张建宁,赵培荣,等.物探技术需求分析及攻关方向思考:以中国石化油气勘探为例[J].石油物探,2016,55(1):1-9.
MA Yongsheng, ZHANG Jianning, ZHAO Peirong, *et al*. Requirement analysis and research direction for the geophysical prospecting technology of SINOPEC[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2016,55(1):1-9.

[4] 甘利灯,戴晓峰,张 昕,等.高含水后期地震油藏描述技术[J].石油勘探与开发,2012,39(3):365-377.
GAN Lindeng,DAI Xiaofeng,ZHANG Xin,*et al*.Key technologies for the seismic reservoir characterization of high water-cut oilfields[J].Petroleum Exploration and Development,2012,39(3):365-377.

[5] 凌 云,郭向宇,高 军,等.油藏地球物理面临的技术挑战与发展方向[J].石油物探,2010,49(4):319-335.
LING Yun,GUO Xiangyu,GAO Jun,*et al*.The challenges and development direction of reservoir geophysical technology[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2010,49(4):319-335.

[6] 李绪宣,胡光义,范廷恩,等.基于地震驱动的海上油气田储层地质建模方法[J].中国海上油气,2011,23(3):143-147.
LI Xuxuan,HU Guangyi,FAN Tingen,*et al*.A method of geological reservoir modeling based on seismic drive for offshore fields[J].China Offshore Oil and Gas,2011,23(3):143-147.

[7] 胡 勇,于兴河,李胜利,等.应用地震正反演技术提高地质建模精度[J].石油勘探与开发,2014,41(2):190-197.
HU Yong,YU Xinghe,LI Shengli,*et al*.Improving the accuracy of geological model by using seismic forward and inversion technique[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(2):190-197.

[8] 乐 靖,王 晖,范廷恩,等.基于地震等时格架的倾角导向储层静态建模方法[J].石油物探,2017,56(3):449-458.
LE Jing,WANG Hui,FAN Tingen,*et al*.A method of dip steering reservoir static modeling based on seismic isochronal stratigraphic framework[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(3):449-458.

[9] 甘利灯,戴晓峰,张 昕,等.测井地震油藏模拟一体化技术及其在老油田挖潜中的应用[J].石油物探,2016,55(5):617-639.
GAN Lideng,DAI Xiaofeng,ZHANG Xin,*et al*.Research and application on well-seismic-reservoir integration technology for mature oilfield development[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2016,55(5):617-639.

[10] 撒利明,杨午阳,姚逢昌.地震反演技术回顾与展望[J].石油地球物理勘探,2015,50(1):184-202.
SA Liming, YANG Wuyang, YAO Fengchang. Past, present and future of geophysical inversion[J].Oil Geophysical Prospecting,2015,50(1):184-202.

[11] 平 瑞.基于地质统计学估算矿区矿产资源量研究[J].煤炭科学技术,2013,41(10):117-120.
PING Rui. Study on quantity estimation of mineral resources in mining area based on geological statistics[J].Coal Science and Technology,2013,41(10):117-120.

[12] HAAS A,DUBRULE O.Geostatistical inversion:a sequential method for stochastic reservoir modeling constrained by seismic data[J].First Break,1994,13(12):61-69.

[13] DUBRULE O,THIBAUT M,LAMY P.Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data[J].Petroleum Geoscience,1998(4):121-128.

[14] 李方明,计智锋,赵国良,等.地质统计反演之随机地震反演方法:以苏丹 M 盆地 P 油田为例[J].石油勘探与开发,2007,34(4):451-455.
LI Fangming,JI Zhifeng,ZHAO Guoliang,*et al*.Geostatistical inversion of stochastic seismic inversion method: with Sudan M Basin Oilfield P as example[J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):451-455.

[15] 孙月成,周家雄,马光克,等.叠前随机反演方法及其在薄层预测中的应用[J].天然气工业,2010,30(12):29-32.
SUN Yuecheng, ZHOU Jiaxiong, MA Guangke, *et al*. Pre-stack stochastic inversion method study and its application in thin layer prediction[J].Natural Gas Industry,2010,30(12):29-32.

[16] EIDSVIK J,AVSETH P,OMRE H,*et al*.Stochastic reservoir characterization using prestack seismic data[J].Geophysics,2004,69(4):978-993.

[17] EIDSVIK J,OMRE H,MUKERJI T,*et al*.Seismic reservoir prediction using Bayesian integration of rock physics and Markov random fields: A North Sea example[J].The Leading Edge,2002,21(3):290-294.

[18] PAN X P,ZHANG G Z,YIN X Y.Bayesian Markov chain Monte Carlo inversion for anisotropy of PP-and PS-wave in weakly anisotropic and heterogeneous media[J].Earthquake Science,2017,30(1):33-46.

[19] 赵海波,唐晓花,李奎周,等.基于地震岩石物理分析与叠前地质统计学反演技术的齐家地区致密薄储层预测[J].石油物探,2017,56(6):853-862.
ZHAO Haibo,TANG Xiaohua,LI Kuizhou,*et al*.Tight thin-bed reservoir prediction using rock physics analysis and pre-stack geostatistical inversion in the Qijia area[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(6):853-862.

[20] SCALES J A,TENORIO L.Prior information and uncertainty in inverse problems[J].Geophysics,2001,66(2):389-397.

[21] 杨 锴,艾迪飞,耿建华.测井、井间地震与地面地震数据联合约束下的地质统计学随机建模方法研究[J].地球物理学报,2012,55(8):2695-2704.
YANG Kai, AI Difei, GENG Jianhua. A new geostatistical inversion and reservoir modeling technique constrained by well-log,cross-hole and surface seismic data[J].Chinese Journal of

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

Geophysics,2012,55(8):2695-2704.

[22] 张广智,王丹阳,印兴耀,等.基于 MCMC 的叠前地震反演方法研究[J].地球物理学报,2011,54(11):2926-2932.
ZHANG Guangzhi, WANG Danyang, YIN Xingyao, *et al*. Pre-stack seismic inversion method MCMC Based[J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(11):2926-2932.

[23] 孙月成.基于 Bayesian-MCMC 算法的地质统计学反演及其在油藏模拟中的应用[J].地球物理学进展,2018,33(2):724-729.
SUN Yuecheng. Geostatistical inversion based on Bayesian-MCMC algorithm and its applications in reservoir simulation[J]. Progress in Geophysics,2018,33(2):724-729.

[24] 侯志平,吴其林,史文英.SOB 道集优化处理方法的应用研究[J].西部探矿工程,2017,29(8):171-179.
HOU Zhiping, WU Qilin, SHI Wenying. The application study of gather optimization processing method [J]. West-China Exploration Engineering,2017,29(8):171-179.

[25] 孙月成,马光克,隋 波,等.EEI 扩展的弹性阻抗及其在储层预测中的应用[J].天然气工业,2013,33(3):28-32.
SUN Yuecheng, MA Guangke, SUI Bo, *et al*. An extended elastic impedance(EEI) method and its application to reservoir mapping [J].Natural Gas Industry,2013,33(3):28-32.

[26] 刘秀娟,梁立锋,刘金朋,等.道集优化技术在惠州某区的应用[J].工程地球物理学报,2017,14(1):62-68.
LIU Xiujuan, LIANG Lifeng, LIU Jinpeng, *et al*. The application of gather optimization technology to a certain huizhou district[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2017,14(1):62-68.

[27] 孙月成,张 楠,李成立,等.三维数据体时深转换速度模型的精细构建方法[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):145-152.
SUN Yuecheng, ZHANG Nan, LI Chengli, *et al*. Fine velocity modeling method of the time-depth conversion for 3D data volume [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018,37(3):145-152.

[28] GERRITSMA P H A. Time-depth conversion in the presence of structure[J].Geophysics,1977,42(4):760-772.

[29] KEYDAR S, KOREN Z, KOSLOFF D, *et al*. Optimum time-to-depth conversion[J].Geophysics,1989,54(8):1001-1005.

[30] 张志明,曹丹平,印兴耀,等.时深转换中的井震联合速度建模方法研究与应用现状[J].地球物理学进展,2016,31(5):2276-2284.
ZHANG Zhiming, CAO Danping, YIN Xinyao, *et al*. Research and application status of well seismic joint velocity modeling in time-depth conversion [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2276-2284.

[31] 李伍志,王璞珺,张功成,等.珠江口盆地深部基底地层的地震时深转换研究[J].地球物理学报,2011,54(2):449-456.
LI Wuzhi, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, *et al*. Research on time-depth conversion of deep-seated basal strata of Pearl River Mouth basin[J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(2): 449-456.

[32] 凌 云,郭建明,郭向宇.油藏描述中的井震时深转换技术研究[J].石油物探,2011,50(1):1-13.
LING Yun, GUO Jianming, GUO Xiangyu. Study of borehole seismic time-depth conversion in reservoir description[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2011,50(1):1-13.

[33] 张英德.大深度低幅度构造多尺度时深转换方法:以阿尔及利亚 X 区块为例[J].地球物理学进展,2013,28(4):1943-1953.
ZHANG Yingde. Multi-scale time to depth conversion method for deep low relief structures: take Block X in Algeria for example [J].Progress in Geophysics,2013,28(4):1943-1953.

[34] GUPTA A, MURALIMOHAN T R, VARADARAJAN C M, *et al*. Well tie tomography an accurate time-depth conversion[C]//Extended Abstracts of 10th SPG Biennial International Conference& Exhibition,2013:435.

[35] SPADAVECCHIA E, PANIZZARDI J, LIPARI V, *et al*. Well-tie constrained tomography in TTI media[C]//Extended Abstracts of 77th EAGE Conference & Exhibition,2015:Tu-N102-11.

[36] 罗红梅,王长江,刘书会,等.深度域高精度井震动态匹配方法[J].石油地球物理勘探,2018,53(5):997-1005.
LUO Hongmei, WANG Changjiang, LIU Shuhui, *et al*. Well-to-seismic calibration in the depth domain using dynamic depth warping[J].Oil Geophysical Prospecting,2018,53(5):997-1005.