

文章编号:0253-2697(1999)06-0022-26

四维地震数据的归一化方法及实例处理^①

陈小宏*

(石油大学 北京)

摘要:在四维地震油藏监测技术应用中,四维地震数据由于不同时间的采集与处理以及噪音等因素的影响,在地震剖面上存在很多不合理差异。为了获得真正由于油藏内部油气水变化引起的地震响应差异,必须对四维地震数据体进行归一化校正。针对四维地震数据在时间、振幅、频率和相位方面的差异,论述了四维地震数据归一化处理的原理,提出了寻找最佳匹配滤波器获得校正归一化算子的处理方法;对国外某一地区的一块四维地震资料进行了实际处理,结果是令人满意的,表明了方法的有效性。

主题词:四维地震;数据处理;归一化校正;差异分析;算子

1 引言

四维地震勘探方法是在油气田生产过程中,在油藏开发的不同时期重复进行三维地震勘探,不同时间的地震响应随时间的变化可以表征油藏内流体性质的变化,通过特殊的时延地震处理、差异分析和成像以及计算机可视化技术来描述油藏内部物性参数(孔隙度、渗透率、饱和度、压力、温度)的变化。

从理论上讲,时间延迟的三维地震成像相减后,油藏的静态性质(如构造、岩性性质等)被消去,从而导致了油藏动态流体性质(流体饱和度、压力、温度等)的直接成像。因此在油藏生产过程中以时间延迟的形式进行重复三维地震勘探的采集和分析,可以对由于油藏生产引起的油藏内部物性参数(流体饱和度、压力和温度等)的变化进行描述,并追踪流体流动的前缘,从而对油藏进行动态监测与管理。

但是实际问题中,四维地震数据是间隔性采集和处理的,由于时间的差异,在噪音、物理环境变化、近地表影响、采集仪器、采集参数、处理参数、处理软件以及采集、处理人员等方面的不同,从而带来了时延地震剖面上不希望也不应该有的差异,如地震波到达时间、地震振幅、速度、频率、相位等方面的差异。因此直接比较两个三维地震数据体不可能得到真正由于油藏内部油气水变化引起的地震响应差异,必须对两个三维地震数据体进行归一化校正,均等两个三维数据体,才能使它们有合理的同一性和差异性。

本文利用寻找最佳匹配滤波器的方法,建立了四维地震数据时间、振幅、频率和相位归一化处理的方法,并对实际四维地震资料进行了处理。

2 四维地震数据归一化问题及处理原理

同一地区在不同时间采集的地震数据,从剖面上看,大的构造形态等基本一致,但剖面的差异还是明显的。图1为同一区块分别在1985年(图左边)和1994年(图右边)采集的三维地震数据某一测线的地震剖面,剖面反映的构造形态基本相同,但1994年剖面的处理质量较好,断层清晰,而频率却比1985年剖面低,分辨率也低,同时还存在着其他方面的明显差异,这些差异的少部分是由于油藏流体变化引起的,更多的则是由于采集、处理等其他因素引起的,因此必须对二个数据体进行归一化校正,消除这些有害差异。

① 石油大学基础研究基金资助项目(ZX9806)。

* 陈小宏,男,1962年8月生。1993年毕业于石油大学(北京)应用地球物理专业,获博士学位。现为石油大学(北京)地球科学系副教授。通讯处:北京昌平石油大学。邮政编码:102200。

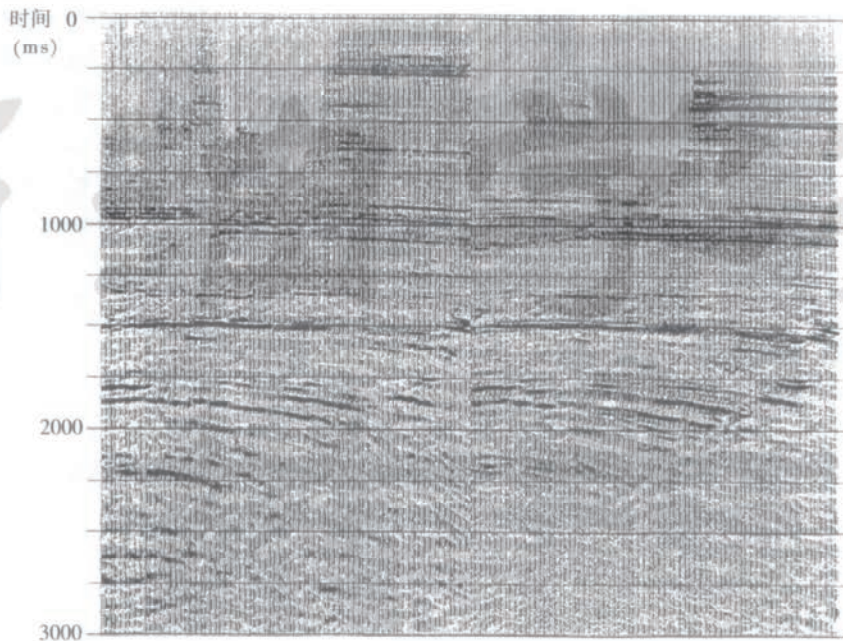


图1 不同时间采集处理的四维地震数据体

Fig. 1 4-D seismic datasets acquired in different time

在我们勘探的地下空间中绝大部分是没有变化的,真正由于油藏部分油气水变化引起的地震信号差异非常小。由计算图1实例来说明反射波同相轴时间随油藏衰竭过程的变化。图1中油藏位于时间剖面上1.98s至2.06s之间,约90m厚。考虑油藏在1.98s附近的双程反射旅行时,假设油藏油层速度为2300m/s,因此从油藏顶部到底部的双程旅行时应该是 $2 \times 90\text{m} / 2300\text{m/s} = 0.078\text{s}$ (78ms)。现假设P-波速度随饱和度而变化,由2300m/s变成2700m/s,则衰竭后的油藏双程地震波旅行时为 $2 \times 90\text{m} / 2700\text{m/s} = 0.067\text{s}$ (67ms)。两者相差11ms,这个变化并不很大。

研究表明,水驱油藏中油水界面变化引起的地震信号差异约为15%左右^[1],实验室实验对人造岩样或天然岩样完全饱和水时比完全饱和油时的声学特性变化进行了研究,变化幅度约为16%^[2]。但是我们试验对图1剖面进行简单的2ms时移所产生的地震差异就达18%,而4°的相移地震剖面也带来了16.6%的地震差异。这些微小的时移或相移误差在地震处理中是很普遍的,因此在四维地震分析之前必须进行细致的校正工作,使非油藏部分时延地震差异的能量达到极小。

四维地震归一化处理的原则是在非油藏部分,由于没有流体流动的变化,因此在理想条件下,不同时间采集的地震数据应该一致,时间、振幅、速度、频率和相位应该相同,而地震信号变化是油藏部分由于抽油生产或注气注水等引起的。实际数据的间隔性导致了地震剖面上非油藏部分地震波到达时间、地震振幅、速度、频率、相位等也有变化,为了获得真正由于油藏部分油气水变化引起的地震差异,对非油藏部分的时延地震数据进行归一化校正,使其尽可能保证剖面一致,剩下油藏部分的差异则可解释为由于油藏内流体变化引起。

3 四维地震数据归一化处理方法

四维地震数据的时间、振幅、频率和相位归一化是四维地震处理的主要方面,是四维地震成功与否的关键。针对四维地震数据的时间、振幅、频率和相位方面的差异,利用多个校正归一化算子分别对地震剖面的主要差异方面进行匹配校正。处理方法是寻找一种最佳匹配滤波器,对每条测线的有效震源信号整形,使其与参考测线的震源信号相同,求出对应的校正匹配算子,再进行校正。校正归一化算子可以是一个全局滤波器在所有的测线和所有的道集上整体完成匹配两个数据体,也可以是单线单道上进行局部化校正得到局部滤波器。

振幅频率校正两个三维地震数据体经过重新编辑后进行。由于两个数据体之间的振幅与频率存在着明显的差别,必须进行频率和振幅匹配使它们具有相同的频带宽度和相同尺度的振幅幅值。对于振幅校正,采用整体归一化方法,在地震剖面上获得校正因子,频率校正则通过带通滤波实现频带宽度的一致,并通过功率谱比较进行频率补偿与校正。

同样,为了分析油藏部分引起的相位差异,必须对非油藏部分进行相位校正处理。采用局部归一化方法,对每条测线的每道进行相位校正,每一道都可以得到一个相位归一化因子,因此整个三维数据体就可以得到一个对应于地震数据体的相位归一化算子族。

设同一地区不同时期 Y_1, Y_2 得到的地震数据分别为 $G^{Y_1}(t), G^{Y_2}(t)$, 相应的第 Y 年份第 i 条测线、第 j 道的地震记录记为 $G_{i,j}^Y(t)$ 。取 Y_1 年份的地震记录为参考测线地震道,使 Y_2 年份相应道的地震记录与之匹配。因此选取归一化算子 P 使得目标泛函式(1)极小。

$$E(t) = \| G^{Y_1}(t) - PG^{Y_2}(t) \| \quad (1)$$

对于整体归一化的振幅校正,可以通过极小化泛函式(1)得到全局的归一化算子 P ,而对于进行局部归一化的相位校正,则可以通过极小化泛函组

$$E_{i,j}(t) = \| G_{i,j}^{Y_1}(t) - P_{i,j}G_{i,j}^{Y_2}(t) \| \quad (2)$$

得到一算子族 $\{P_{i,j}\}$ 构成的算子 $P = \{P_{i,j}\}$ 。

为求式(1)或式(2)极小,考虑离散化处理,求一长度为 L 的匹配滤波器 $\{P(m), m=1,2,\dots,L\}$ 。使

$$E = \sum_k \{G^{Y_1}(k) - \sum_m P(m)G^{Y_2}(k-m)\}^2 = \min \quad (3)$$

计算泛函 E 关于 $P(m)$ 的 Frechet 导数 $\frac{\partial E}{\partial P(m)}, m=1,2,\dots,L$, 并令 $\frac{\partial E}{\partial P(m)}=0$, 则可以得到求解匹配滤波器 $\{P(m), m=1,2,\dots,L\}$ 的 L 个方程的方程组:

$$\sum_k P(m) \left\{ \sum_k G^{Y_2}(k-m)G^{Y_2}(k-n) \right\} = \sum_k G^{Y_1}(k)G^{Y_2}(k-n) \quad n=1,2,\dots,L \quad (4)$$

用匹配滤波器 $\{P(m), m=1,2,\dots,L\}$ 由式(5)校正相应的地震剖面。

$$G_{\text{nor}}^{Y_2}(k) = \sum_{m=1}^L P(m)G^{Y_2}(k-m) \quad (5)$$

4 实例处理

利用国外某一区块同一地区在 1985 年和 1992 年采集的两个三维地震数据体(图 1)进行四维地震处理方法的研究与分析。该区块有一个由断层封堵的 90m 厚的砂岩体油藏,在时间剖面上位于 1.98s 至 2.06s 之间。区块内有两口生产井从 1972 年开始产油,1985 年到 1992 年之间的油藏压力变化很大。四维地震研究的目的就是要弄清这 7 年间油藏内部油气水变化的情况。原始处理剖面由于采集、处理和噪音等因素的影响,两个三维地震数据体在整个剖面上都有一定的差异,因此必须进行地震振幅、频率和相位的归一化处理。

对图 1 中地震剖面非油藏部分振幅、频率和相位进行校正处理,以 1992 年剖面为参考测线,对 1985 年剖面进行归一化处理。图 2 是 800ms 至 1200ms 非油藏时窗内归一化校正的效果分析,从归一化前后的两个差剖面看,归一化后的残差剖面明显减弱,校正后非油藏部分地震剖面的吻合性明显改善,表明归一化校正算法是十分有效的。

通过非油藏部分地震剖面时窗内得到的振幅、频率和相位归一化校正算子应用到油藏部分,非油藏因素引起的地震差异可以得到尽可能的消除,剩下的则主要表现为油藏内部由于油气水变化引起的地震差异。

图 3 为 800ms 至 2200ms 的地震剖面显示,其中包含了油藏与非油藏部分,利用 800ms 至 1200ms 窗口得到的归一化算子应用到 800ms 至 2200ms 的地震剖面上。比较 1992 年剖面与归一化后的 1985 年剖面,其非油藏部分具有明显的一致性。如果利用图像顺序分割的区域生长算法,通过区域追踪、区域合并、区域聚集以及区

域连接等进行区域生长后则可以进一步削弱或消除归一化后的残差剖面^[3]。但从误差剖面(e)分析,归一化在断层附近误差较大,这是由于断层的两次处理结果差别过大所致。因此实际问题中四维地震数据采集与处理的可重复性也是一个非常重要的环节。

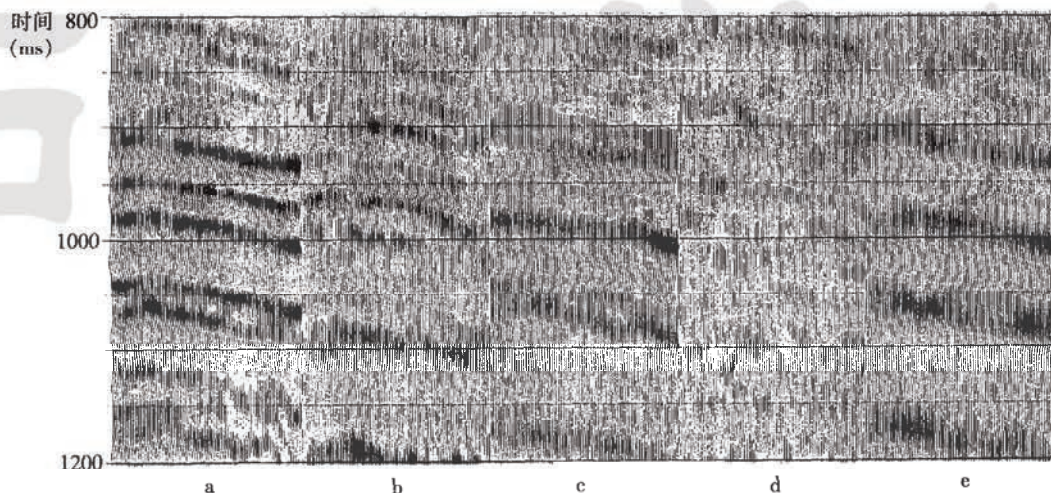


图 2 非油藏时窗内归一化结果比较
(a)1985 年剖面; (b)归一化前剖面之差; (c)1992 年剖面;
(d)归一化后剖面之差; (e)1985 年归一化剖面

Fig. 2 Comparison of normalization in non-reservoir window, (a)original 1985 (b) difference between original 1985 and 1992 (c)original 1992 (d) difference between normalized 1985 and original 1992 (e)normalized 1985

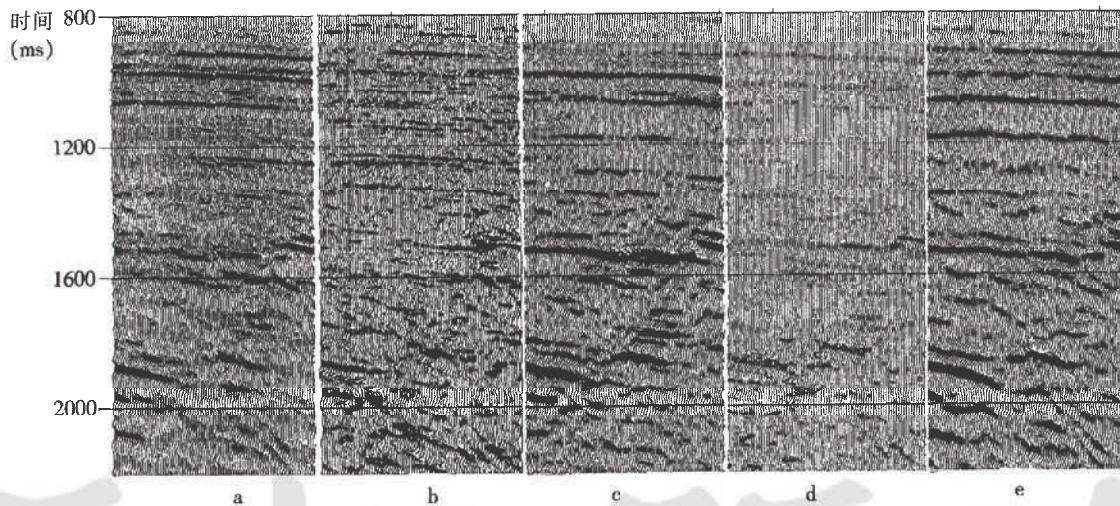


图 3 包含油藏与非油藏窗口的归一化地震剖面
(a)1985 年剖面; (b)归一化前剖面之差; (c)1992 年剖面;
(d)归一化后剖面之差; (e)1985 年归一化剖面

Fig. 3 Comparison of normalization in reservoir and non-reservoir window, (a) original 1985 (b) difference between original 1985 and 1992 (c)original 1992 (d) difference between normalized 1985 and original 1992 (e)normalized 1985

5 结束语

四维地震是最近几年发展起来的新技术、新方法,它结合了多个新近开发的三维地震技术,如油藏表征,油

藏模拟和地震模拟,去决定流体前缘随时间的变化情况。但四维地震还需要三维地震以外的工具和技术,如振幅、频率、相位的归一化软件,更好地均等多个三维地震数据体,获得它们之间可信的同一性和差异性。因此四维地震研究要有一些特殊处理方法和软件。本文针对四维地震数据的时间、振幅、频率和相位方面的差异,寻找一种最佳匹配滤波器的方法,对每条测线的有效震源信号整形,使其在非油藏部分与参考测线的震源信号相同,求出对应的归一化算子,然后对油藏部分进行应用校正,归一化的实际处理表明了方法的有效性,结果是令人满意的。

四维地震研究和应用中,四维地震数据的时间、振幅、频率和相位方面的归一化是最关键的一步,结合四维地震处理的互相关技术、区域生长技术和计算机可视化技术以及岩石物理的桥梁^[4]就可以对时延地震的差异进行分析与描述,从而达到油藏监测的目的。

致谢 本文的四维地震数据是由美国哥伦比亚大学 Lamont 地球观测站四维地震研究小组提供,特此致谢

参 考 文 献

- [1] Anderson R N, Boulanger A, He W et al. 4-D seismic monitoring of reservoir production in the Eugene Island 330 Field, Gulf of Mexico, in AAPG Studies in Geology, 1996, No. 42: 9~20.
- [2] 楚泽涵等. 饱和油砂岩在水洗过程中声学特性变化. 中国地球物理学会年刊. 1997: 64.
- [3] Xu L, Anderson R N, Boulanger A et al. 4-D seismic; The fourth dimension in reservoir management (Part 3). World Oil. 1997, 6: 133~139.
- [4] Lumley D E. Seismic time-lapse monitoring of subsurface fluid flow; Ph. D. thesis, Stanford University. 1995.

(本文收到日期 1998-11-19 修订日期 1999-01-14 编辑 孟伟铭)

欢迎订阅 2000 年《测井技术》(双月刊)

《测井技术》于 1977 年创刊,是经国家科委批准向国内外公开发行的技术性期刊,是国内唯一反映我国测井技术发展现状、水平及动向的正式刊物,她集学术性、技术性和信息性为一体,被列入国家中文核心期刊。1992 年获全国第一届优秀科技期刊评比二等奖,1996 年被评为中国石油天然气总公司优秀科技期刊。目前已被国内外 6 家数据库收录,发行范围覆盖了与测井有关的各个领域。

《测井技术》的主要栏目设置有“综述”,“岩石物性研究”,“测井方法研究”,“测井解释”,“测井装备”,“测井应用”,“计算机应用”,“问题讨论”,“经验交流”,“技术信息”等等。

《测井技术》为双月刊,大 16 开本,每期 80 页,每期定价 9.00 元,全年定价 54.00 元(含邮费)。在校学生半价优惠。订费信汇、邮汇均可,信汇请将汇款单寄财务部门。

信汇收款单位:西安石油勘探仪器总厂;请在信汇单用途栏内注明“测井技术资料费”

开户银行:中国工商银行西安分行南关支行 帐号:215-031007-59

编辑部地址:陕西省西安市红专南路 8 号西安石油勘探仪器总厂

联系人:李 隽 邮编:710061 电话:(029)5265999 转 6110

been formed during the Tongwan tectonic movement. Following are main types of fluid accumulating spaces among the existing 22 kinds of pores, vugs, and fissures.

1. Inter-crystal pores in recrystallized dolomites formed at Hercynian age, secondary pores and vugs formed by dissolution in pore-water with organic acid and CO_2 decomposed from organic matter, and residual pores and small vugs partly filled by dolospars;

2. Rows of karstic vugs formed at Indosinian age along micro-cracks of about 40° , and residual vugs partly filled by rhombic dolomites;

3. Residual vugs after cementation of multi-form and multi-generation fole-spars at Caledonian age, which were first formed through dissolution by underground water along tectonic cracks;

4. Tension fissures about $70^\circ\sim 80^\circ$ formed at Himalayan age.

Key words Sichuan; Dengying formation; dolomites; reserving and permeating body; further understanding

NORMALIZATION FOR FOUR-DIMENSIONAL SEISMIC DATA AND ITS APPLICATION TO REAL DATA ACTA 1999, 20(6): 22~26

Chen Xiaohong (*Petroleum University, Beijing*)

In four-dimensional (4-D) seismic reservoir monitoring, due to different vintages of data requisition and processing philosophies, as well as noisy factor, 4-D seismic data have significant unreasonable differences between two profiles. In order to obtain the real seismic differences resulting from the changes of oil, gas and water in reservoir, 4-D seismic datasets should be well normalized. In this paper, we discussed the principle of normalization processing for 4-D seismic data focusing on the differences in seismic time, amplitude, frequency and phase. A processing method based on finding a best match filter is presented. Then the normalization processing for timelapse seismic has been applied to the field 4-D data. The normalized results are satisfactory, which shows that the method is effective.

Key words 4-D seismic; data processing; normalization; difference analysis; operator

THE EVOLUTION OF FLUID DYNAMIC FIELD AND THE ORIGIN OF SUBNORMAL PRESSURE IN SONGLIAO BASIN, CHINA ACTA 1999, 20(6): 27~31

Lou Zhanghua et al. (*Zhejiang University*)

In Songliao Basin, there are three subnormal pressure areas developed in Fu-Yang oil-bearing formation in the northeastern part and Shiwu fault-depression on the southeastern edge, with the pressure coefficients of 0.93~1.00, 0.65~0.96, and 0.96~0.55 respectively. They are main natural gas accumulation areas. The main reason, which has induced the subnormal pressure, is that the decrease of energy due to natural gas leakage was larger than the increase of energy due to natural gas and underground water recharge.

In Fu-Yang oil-bearing formation at northeastern part of Songliao Basin, the reservoir thickness, porosity and permeability all increased in the direction of natural gas migration. The difference between the decrease of energy due to natural gas leakage and the increase of energy due to natural gas and underground water recharge increased in the direction of gas migration, resulting in decrease of the pressure coefficients.

In Shiwu fault-depression of Songliao Basin, the fluid pressure profile may be divided into 3 zones vertically. They are normal pressure zone (from 0 to 1250m), subnormal pressure zone (deeper than 1500m), and transitional zone (between the other two), which corresponds to free replacing zone, obstructive replacing zone and lagged zone respectively in hydrodynamics. Gas loss is very obvious in the depression, which could have induced ground water and meteoric water recharge. In free replacing zone, the pressure keeps normal because recharge and discharge of pore fluids is in equilibrium. In obstructive replacing zone, there may be a formation with low permeability, through which gas diffusion is slow, and the recharge of subsurface water is difficult. The amount of gas loss in the obstructive replacing and lagged zones is greater than that of subsurface water and gas recharge, which may cause the fluid pressure decreasing and subnormal pressure developing at last. The recharge of subsurface water becomes smaller and stops quickly, while gas diffusion becomes larger as depth increasing. This results in the increase of pressure coefficients along gas migration.