



地球物理学进展
Progress in Geophysics
ISSN 1004-2903, CN 11-2982/P

《地球物理学进展》网络首发论文

题目： 基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法
作者： 马振，徐德奎，丁洪波，张金辉
收稿日期： 2022-09-01
网络首发日期： 2023-06-14
引用格式： 马振，徐德奎，丁洪波，张金辉. 基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法[J/OL]. 地球物理学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2982.P.20230613.1359.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法

马振, 徐德奎, 丁洪波, 张金辉

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300450)

摘要 勘探过程中部分岩性目标跨多个采集工区, 由于不同工区检波器类型、观测系统、处理流程和偏移速度的不同, 不同工区地震资料存在明显的差异。传统叠后地震资料拼接方法仅消除不同工区间频率、相位、振幅的差异, 而忽略浅中深不同层位间的对应关系, 因此创新性提出一种基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法, 利用递推规划算法综合计算不同工区地震道的振幅、相位、频率等距离参数特征, 确定两者之间的对应关系, 得到地震资料匹配的校正量, 实现资料的拼接。模型数据测试和渤海地区地震资料应用的结果均表明, 基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法能够有效实现地震资料的拼接。

关键词 动态时间规整; 资料匹配; 拼接处理; 匹配滤波; 振幅校正

3D post stack seismic data splicing method based on dynamic time warping algorithm

MA Zhen, XU Dekui, DING Hongbo, ZHANG Jinhui

(CNOOC Ltd Tianjin Branch, Tianjin 300450, China)

Abstract During the exploration process, some lithologic targets span multiple acquisition work areas. Due to the different geophone types, observation systems, processing flow and migration velocities in different work areas, there are obvious differences in seismic data in different work areas. The traditional post stack seismic data splicing method only eliminates the differences of frequency, phase and amplitude between different work areas, and ignores the corresponding relationship between different layers in shallow, medium and deep. Therefore, an innovative 3D post stack seismic data splicing method based on dynamic time warping algorithm is proposed, which uses recursive programming algorithm to comprehensively calculate the amplitude, phase, frequency and other distance parameter characteristics of seismic traces in different work areas, and determine the corresponding relationship between them, Get the correction amount of seismic data matching, and realize data splicing. The results of model data testing and seismic data application in Bohai Sea area show that the 3D post stack seismic data splicing method based on dynamic time warping algorithm can effectively realize the splicing of seismic data.

Key words Dynamic time warping; Data matching; Splicing processing; Matched filtering; Amplitude correction

0 引言

随着油气田勘探开发的不断深入, 我国已逐渐进入岩性油气藏勘探阶段, 勘探过程中部分岩性目标跨多个采集工区, 单一采集工区资料难以满足岩性圈闭的落实, 开展面向跨界目标的连片处理已成为近年来资料处理的常态。由于不同工区采集参数及处理流程差异大, 导致不同工区地震资料在频率、相位、振幅、波组特征等方面存在明显差异, 同时由于不同工区检波器类型、观测系统及偏移速度的差异, 导致不同工区成像资料存在明显的时差, 常规叠后地震资料拼接处理以满足目的层构造解释为目的, 在实现不同工区频率、相位、振幅、波组特征等方面的匹配后, 更多考虑目的层的匹配,

收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(91958206)资助。

作者简介: 马振, 男, 1994年生, 硕士, 物探工程师, 现在中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院从事地震资料处理工作。E-mail: mazhen3@cnooc.com.cn

网络首发时间: 2023-06-14 11:02:06 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2982.P.20230613.1359.008.html>

仅以目的层地震数据成像位置趋于一致为目标, 其他层位在不同工区仍然存在明显时差, 严重影响拼接资料后续的构造解释和岩性圈闭落实。虽然叠前地震资料拼接处理能够有效解决上述问题, 但面临着数据量大、处理周期长的问题, 难以满足目前勘探开发的快节奏。

地球物理学者探讨了地震资料振幅(王兆旗等, 2014; 左海等, 2008; 李越涛, 2018)、频率(Weiner, 1947; Narayana et al., 1999; Maeschall, 1978)、相位(王守君等, 2015; 王守君等, 2012; 王希萍, 2008)的拼接问题, 王西文等(2002)提出基于小波变换的地震子波处理方法; 程金星等(2004)提出基于小波变换的三维地震资料拼接方法, 实现相位和振幅的同时校正; 仲伯军等(2008)阐述了基于地震信号运动学和动力学特征的一致性处理技术, 保证了地震数据的运动学特征和动力学特征的一致; 吴琼等(2009)针对滩海过渡带地震资料拼接, 分析了不同工区资料差异的原因并提出一系列解决方法; 冯心远等(2007)基于叠后地震记录求取整形算子进行叠前地震资料的拼接; 冯永强等(2005)采用测井约束下的振幅一致性处理技术和匹配滤波统一子波处理技术进行地震资料匹配; 程亮等(2017)利用步进迭代法提高测井和地震资料在地震频带内频率匹配; 邬达理等(2001)分析不同工区资料之间的差异及原因, 并提出一系列连片处理技术措施。

20世纪80年代 Sakoe (1978) 提出动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)方法, 该方法将未知量伸长或缩短(压扩), 使其与参考模板的长度一致, 同时未知量的时间轴会产生扭曲或弯折, 以便其特征量与参考模板对应; Anderson 等(1983)将该算法引入地球物理问题中, 进行动态波形匹配; Hale (2013) 利用动态时间规整算法进行纵波与转换波的匹配以及断层断距的估算; 董林等(2021)利用动态时间规整算法进行断层增强; 罗红梅等(2018)基于 DTW 提出深度域高精度井震动态匹配方法, 实现深度域井震匹配; 吴天麒等(2020)基于互相关改进的动态时间规整算法, 对角道集中的地震道进行匹配, 拉平同相轴且对波形畸变具有良好的鲁棒性; 张一琛(2019)利用动态时间规整算法实现纵横波时间域的匹配; Zhao 等(2021)基于动态时间规整构建约束因子, 实现多道稀疏脉冲反褶积。

受动态时间规整算法的启发, 本文从叠后地震资料出发, 通过分析不同采集工区重叠区地震资料之间的差异, 提出一种基于动态时间规整算法的三维叠后地震资料拼接方法。通过分析不同采集工区重叠区地震资料之间的相似性和差异, 利用递推规划算法综合计算地震道的振幅、相位、频率等距离参数特征, 确定两者之间的对应关系, 进而求取不同采集工区地震资料同相轴之间的时差, 得到地震资料匹配的校正量, 实现不同采集工区三维叠后地震资料的拼接。本文通过理论数据和实际资料验证了该方法的有效性。

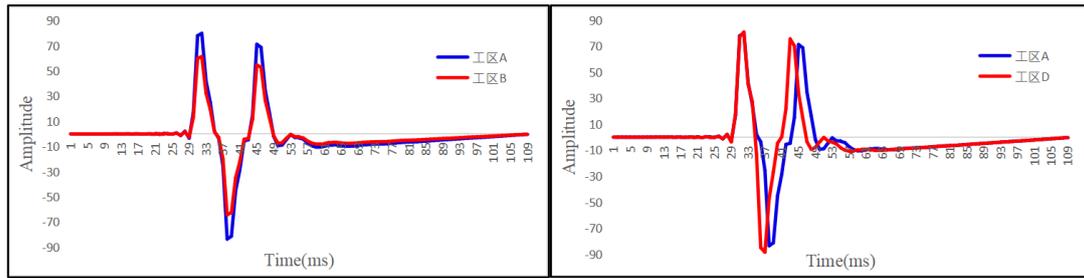
1 方法原理

以渤海某构造不同采集工区为例, 在地震资料采集过程中, 如表 1 所示, 不同工区采集参数往往存在差异, 正是由于震源容量、组合方式和沉放深度的差异造成地震资料振幅、频率、相位存在较大差异。

表1 渤海某构造不同工区采集参数
Table 1 Acquisition parameters in different work areas of a structure in Bohai

采集工区	A	B	C	D	
气枪类型	SLEEVE	SLEEVE	G 枪	SLEEVE	
震源系统	震源容量	2940cu.in	2250cu.in	3150cu.in	2940cu.in
	震源深度	5m	5m	5m	4m
缆	电缆深度	6m	6m	6m	5m

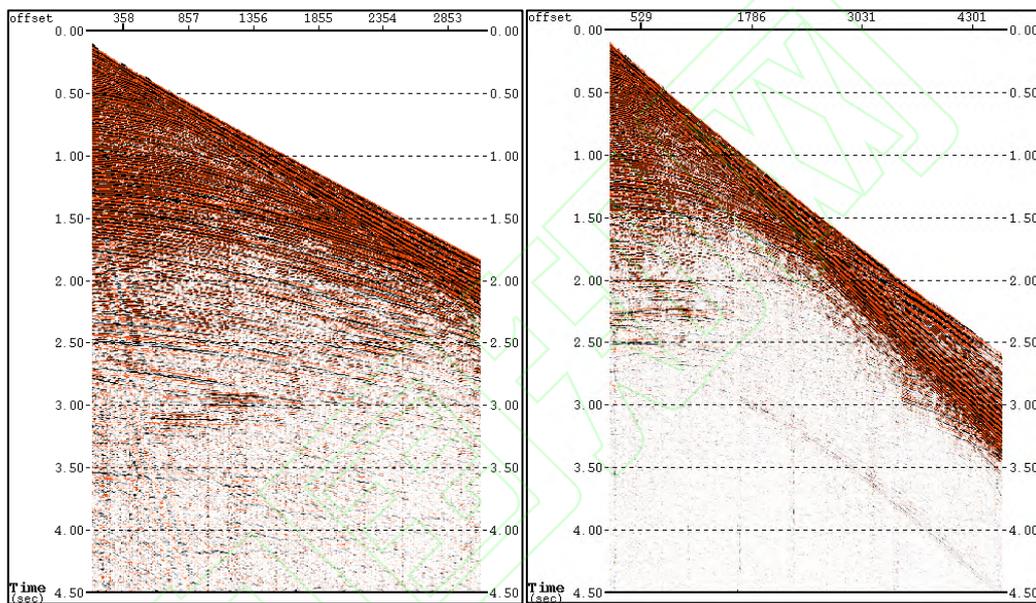
分别提取工区 A、工区 B 和工区 D 带震源和电缆鬼波的子波得到图 1, 通过图 1(a) 可知不同震源容量导致子波振幅存在差异, 图 1(b) 表明采集过程中震源和电缆沉放深度差异则导致不同工区采集地震资料相位存在差异。图 2 为工区 A 和工区 C 重叠区的单炮地震记录对比, 通过对比可知激发震源容量差异和气枪组合差异造成地震波穿透能力差异大, 导致不同工区采集地震资料振幅和频率存在较大差异。



(a) 工区 A 和工区 B 子波 (b) 工区 A 和工区 D 子波

图 1 不同采集工区带源缆鬼波子波对比

Fig.1 Comparison of wavelet with source and cable ghost in different acquisition work areas (a) Wavelet of work area A and work area B (b) Wavelet of work area A and work area D



(a) 工区 A 单炮 (b) 工区 C 单炮

图 2 不同采集工区单炮对比

Fig.2 Comparison of shot in different acquisition work areas (a) Shot of work area A (b)Shot of work area C

实现不同采集工区地震资料振幅、频率、相位匹配后，由于处理流程及偏移速度的差异，不同工区地震资料各层仍然存在不同程度的时差，单纯通过地震资料整体时移无法解决不同资料各层之间的匹配，为了更好的实现地震资料拼接处理，本文提出一种基于 DTW 算法的高精度地震资料匹配方法，该方法能够刻画地震道局部拉伸或压缩关系，通过寻求重叠区地震资料之间的最优匹配，即可得到不同采集工区地震资料之间的误差校正量，实现重叠区地震资料的匹配，进而将校正因子沿层扩展至非重叠区，从而完成整个地震资料拼接处理。

1.1 DTW 方法原理

将工区 A 和工区 B 重叠区地震资料按照同一间隔均匀采样，得到工区 A 地震记录 $S(j), (j=1,2,3,\dots,N)$ ， N 表示地震记录长度， $S(j)$ 为每个采样点对应的振幅值。工区 B 地震记录表示为 $R(i), (i=1,2,3,\dots,M)$ ， M 表示地震记录的长度， $R(i)$ 为每个采样点对应的振幅值。对 $S(j)$ 和 $R(i)$ 的匹配过程中，由于资料不同往往导致 M 和 N 的大小存在一定的差异，因此在确定选取范围时，利用解释层位进行约束，选取 $S(j)$ 和 $R(i)$ 的共同部分。

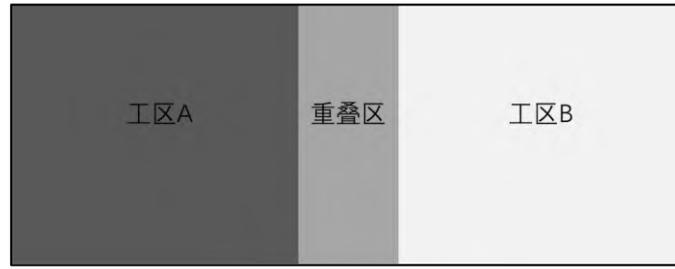


图3 不同采集工区及其重叠区示意图
Fig.3 Schematic diagram of different acquisition work areas and their overlapping areas

为实现重叠区地震资料的匹配, 分别以 $R(i)$ 和 $S(j)$ 作为 x 和 y 坐标轴构建 $M \times N$ 的矩阵网格, 网络的任意一交汇点 $G(i, j)$ 表示工区 B 地震记录的第 i 个值和工区 A 地震记录的第 j 个值的距离, 此处采用欧式距离: $d(i, j) = (R(i) - S(j))^2$, 表示工区 B 地震记录每一点和工区 A 地震记录每一点之间的相似度, 距离越小则相似度越高。从图 4 中明显可以观察到工区 A 地震记录与工区 B 地震记录时间存在明显的偏差, 不能严格匹配, 地震记录存在局部的压缩或者拉伸现象, 因此实现重叠区地震资料匹配转换为寻找一条在通过该 $M \times N$ 网格矩阵中若干网格点的路径, 路径通过的格点即为实现重叠区地震资料匹配的点。

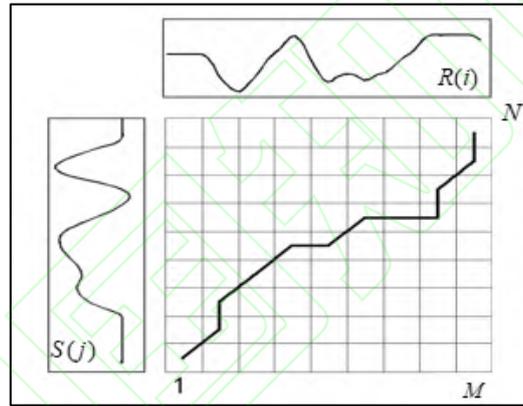


图4 DTW 算法示意图
Fig.4 Schematic diagram of DTW algorithm

定义该规整路径为 W , 该路径表示工区 B 地震记录每个点的时间和对应工区 A 地震记录时间的映射, 即 W 第 k 个样点 W_k 表示为第 k 个工区 A 地震时间点对应的工区 B 时间点。由于各点并不是一一对应的, 可能会存在多个点与一个点对应或者一个点与多个点对应的情况, 因此 k 的值大于等于 M 和 N 的最大值。

路径的选取需满足以下三个约束条件:

(1) 边界条件: $W_1 = (1, 1)$ 和 $W_k = (M, N)$ 。采用递推的方法求取累计距离, 其各部分的先后次序不能改变, 因此所选取的路径必须从左下角出发, 在右上角结束。

(2) 连续性: 对于 $W_{k-1} = (i', j')$, 那么对于路径的下一个点 $W_k = (i, j)$ 需满足 $(i - i') \leq 1$ 以及 $(j - j') \leq 1$ 。也就是不能跨过某个样点去匹配, 只能和自己相邻的点对齐, 这样可以保证地震记录和合成地震记录中每个样点都在 W 中出现。

(3) 单调性: 对于 $W_{k-1} = (i', j')$, 那么路径上的下一个点 $W_k = (i, j)$ 需满足 $(i - i') \geq 0$ 以及 $(j - j') \geq 0$ 。这要求 W 上的点必须是随着时间单调进行的, 并且不会出现路径相交的情况。

综合连续性和单调性约束条件, 对于某匹配点 (i, j) , 那么下一个通过的匹配点只能是下列三种情况之一: $(i+1, j)$, $(i, j+1)$ 或者 $(i+1, j+1)$ 。用 $D = (i, j)$ 表示到达匹配点 (i, j) 的累计最小距离, 则:

$$D(i, j) = w(i, j) + \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\} \quad (1)$$

从最后一个点出发向前递推，直到地震记录时间的第一个样点，搜索一条累计距离最小的路径，即为重叠区地震资料匹配的最优路径，该路径通过的格点即实现工区 A 和工区 B 重叠区地震资料匹配的采样点，从而实现资料的匹配。

1.2 三维地震资料拼接方法的建立

1.2.1 振幅一致性校正

在三维地震资料拼接过程中，由于激发震源容量和震源组合差异导致不同工区采集地震资料振幅能量存在较大差异，该差异包括横向能量的差异及振幅纵向衰减差异。

利用 DTW 算法对重叠区地震资料进行匹配前，需消除不同工区地震资料之间的能量差异，首先确定“基准”工区，在确定“基准”工区过程时，需综合考虑地质构造、资料品质等多方面因素。以选取工区 A 为“基准”工区为例，通过求取工区 A 和工区 B 重叠区地震资料的均方根振幅 $RMS(A)$ 和 $RMS(B)$ ，得到横向校正因子 $a=RMS(A)/RMS(B)$ ，将横向校正因子应用到工区 B 资料，即 $AMP(B)*a$ ，其中 $AMP(B)$ 为校正前工区 B 振幅，从而消除横向振幅能量的差异。

为了消除纵向振幅差异，基于吸收补偿原理，对工区 B 地震道按时间进行指数增益补偿。根据目标区研究需要，补偿可以从该道的第一个采样点开始，也可以指定起始时间。

如果从第一个采样点开始，则补偿按照以下公式进行计算：

$$A_0(t)=A_i(t)\cdot\exp(PAR(t))0<t<T_L \quad (2)$$

$$A_0(t)=A_i(t)\cdot\exp(PAR(T_L))T_L\leq t \quad (3)$$

如果从指定起始时间开始，则补偿按照以下公式进行计算：

$$A_0(t)=A_i(t)0<t\leq T_S \quad (4)$$

$$A_0(t)=A_i(t)\cdot\exp(PAR(t))T_S<t<T_L \quad (5)$$

$$A_0(t)=A_i(t)\cdot\exp(PAR(T_L))T_L\leq t \quad (6)$$

式中， $A_0(t)$ 表示补偿后的样点值， $A_i(t)$ 表示补偿前样点值， t 表示采样时间， T_S 为指定起始时间， T_L 为指定终止时间， PAR 为线性的增益指数函数，使得工区 B 该时窗内振幅补偿后的能量与工区 A 振幅能量一致。当需要多个时窗进行补偿时，则需从浅层依次向深层时窗进行补偿，且深层时窗的起始时间需大于浅层时窗的终止时间。最终消除工区 B 和工区 A 纵向振幅能量差异。

1.2.2 频率、相位一致性校正

三维地震资料拼接过程中，频率及相位匹配是实现资料一致性的关键之一，相位差异导致不同工区地震资料波形存在较大差异，因此在进行拼接前，将地震资料进行零相位化处理，一方面有利于不同工区地震资料拼接，另一方面有利于后续砂体刻画和储层描述。

地震资料频率差异导致不同工区分辨率存在较大差异，针对频率进行一致性处理时，首先分析重叠区地震资料频谱，当两个工区资料频带存在较大差异时，根据目的层分辨率需求，确定“基准”工区。当频带较窄的资料即可满足目的层研究需求时，则对宽频地震资料进行带通滤波处理；当频带较窄的资料无法满足目的层研究需求，则将宽频地震资料作为“基准”工区，进行匹配滤波处理，同样以工区 A 作为“基准”工区为例，工区 A 和工区 B 重叠道分别用 $S(i)$ 和 $R(i)$ 表示，分别对其进行傅里叶变换得：

$$S(i) \xrightarrow{\text{FFT}} F_S(f), f = 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$R(i) \xrightarrow{\text{FFT}} F_R(f), f = 1, 2, \dots \quad (8)$$

得到其频率谱。进而在频率域进行匹配，设计匹配算子 P 使得：

$$E(f) = \|F_S(f) - P(f)F_R(f)\|_2^2 + \beta\|P(f)\|_2^2 \quad (9)$$

最优化处理，得到算子 $P(f)$ ，在本文中采取 L2 模约束来对方程 (9) 进行最优化处理，那么方程 (9) 可进一步改写为

$$\min\|F_S(f) - P(f)F_R(f)\|_2^2 + \beta\|P(f)\|_2^2 \quad (10)$$

方程 (10) 中， β 为约束因子，用来平衡数据匹配项和约束项的权重。用反演得到的 $P(f)$ 改造

$F_R(f)$ ，将改造后的地震资料 $P(f)F_R(f)$ 通过傅里叶反变换：

$$P(f)F_R(f) \xrightarrow{\text{IFFT}} R_n(i) \quad (11)$$

得到匹配后的地震道 R_n 。在实际资料处理过程中，可以试算不同的 β ，通过对比重叠区地震资料 $F_S(f)$ 和匹配后的地震道 $P(f)F_R(f)$ 之间的能量差异，挑选最优的 β 。用最优 β 对应的算子 $P_{best}(f)$ 改造 $F_R(f)$ ，将改造后的地震资料 $P_{best}(f)F_R(f)$ 通过傅里叶反变换：

$$P_{best}(f)F_R(f) \xrightarrow{\text{IFFT}} R_n(i) \quad (12)$$

得到 R_n 即为最终匹配后的最优地震道。

1.2.3 距离参数优选

重叠区地震资料匹配过程中，仅考虑振幅是不全面的，不同工区地震资料匹配的差异是振幅、频率、相位的综合影响，由于在实际资料匹配过程中，无法完全消除频率、相位的差异，因此在计算距离的过程中应加入频率及相位的信息，同时加入不同类型的地质体的误差量板能够提高匹配的效率和精度。在距离参数的优选过程中，本文以振幅大小为主体，辅助以某一采样点为中心的一定时窗内的信号频率及相位信息得到以下距离公式：

$$d(i, j) = a_1 * (R(i) - S(j))^2 + a_2 * (F[R(i)] - F[S(j)])^2 + a_3 * (P[R(i)] - P[S(j)])^2 \quad (13)$$

其中 a_1 、 a_2 、 a_3 为加权因子， $F(\cdot)$ 表示频率， $P(\cdot)$ 表示相位。

针对于频率项 $F(\cdot)$ ，首先求其地震记录的低、中、高频数据，分别对相应频率的数据进行加权匹配。其中利用低频数据确定大尺度的地层界面的匹配关系，进而利用中频数据、高频数据逐渐确定中小尺度界面的匹配关系，从而减小距离计算的误差，提高重叠区地震资料匹配的精度。由于零相位化处理的不确定性，导致零相位化后的地震资料存在残余相位，因此距离参数优选过程中利用以样点为中心的一定宽度内的相位信息加以辅助，提高地震资料匹配的精度。

1.2.4 层位约束

在 DTW 算法计算距离过程中，在重叠区处利用已解释的确定性层位进行约束，将层位时间对应数据点振幅值修改为距离最大值的 1000 倍，因此在动态规划路径选取中基于距离最小原则，该层位处对应的不同资料的振幅值的距离为零，而与其他任一点距离都会非常大，从而使优选的路径必须通过这一确定的时间点，可以较好的实现层位约束。

1.2.5 非重叠区地震资料处理

实现重叠区地震资料振幅、频率、相位一致性校正及 DTW 算法校正之后，需要进一步对非重叠区地震资料进行处理。由于地层构造存在起伏变化，为避免匹配过程中引起构造的改变，需要利用已解释的确定性层位进行约束控制，非重叠区地震道的校正因子通过重叠区校正因子沿层位扩展到整个三维地震数据体，层间数据校正因子则通过插值获取，并对插值得到的校正因子进行一定的平滑处理，防止引起构造的畸变，进而实现全区地震资料的匹配。

2 模型试算

根据渤海地区实际构造，设计如图 5 所示的模型，并根据渤海实际情况进行速度填充。将模型分为工区 A、B，对工区 A、B 利用 30Hz 主频、60 度相位和 25Hz 主频、30 度相位子波，分别利用精确速度和误差速度进行合成地震记录，同时工区 B 地震记录随深度振幅衰减，通过图 6 可以看到，由于振幅、频率和相位的差异，不同工区褶积记录存在较大差异，同时由于误差褶积速度导致各层位置存在误差，不同工区地层无法精确匹配，且通过对工区 B 地震记录整体移动，无法解决该问题。

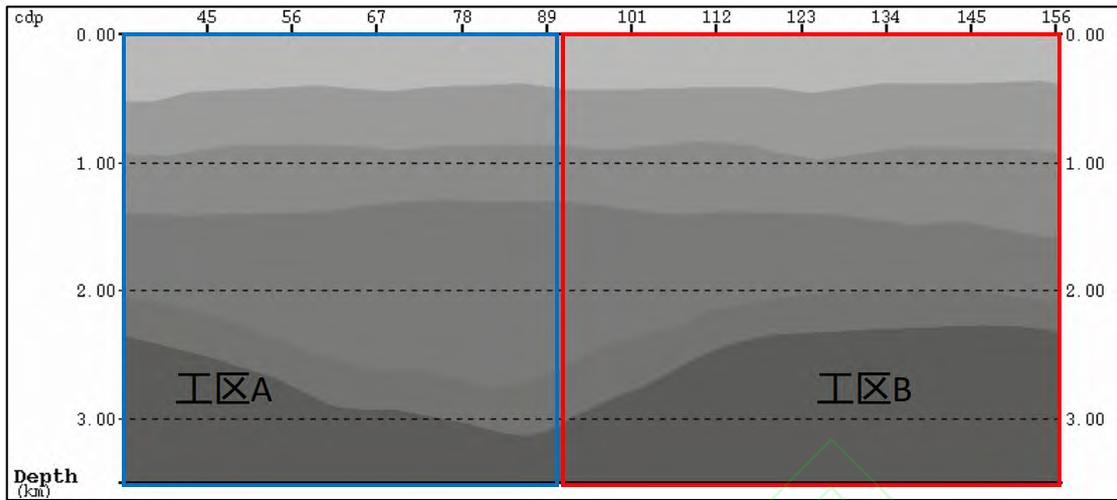


图 5 砂泥岩速度模型
Fig.5 Velocity model of sandstone and mudstone

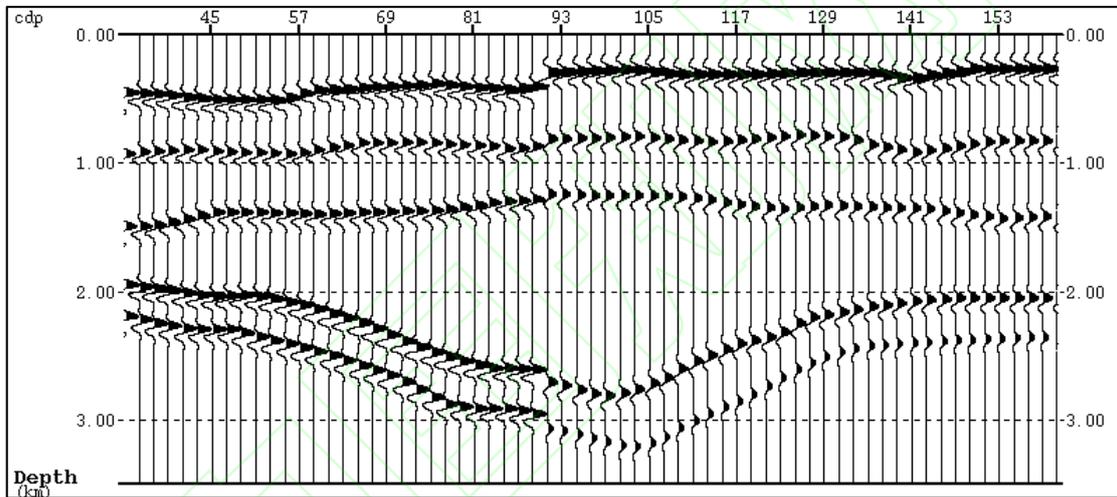
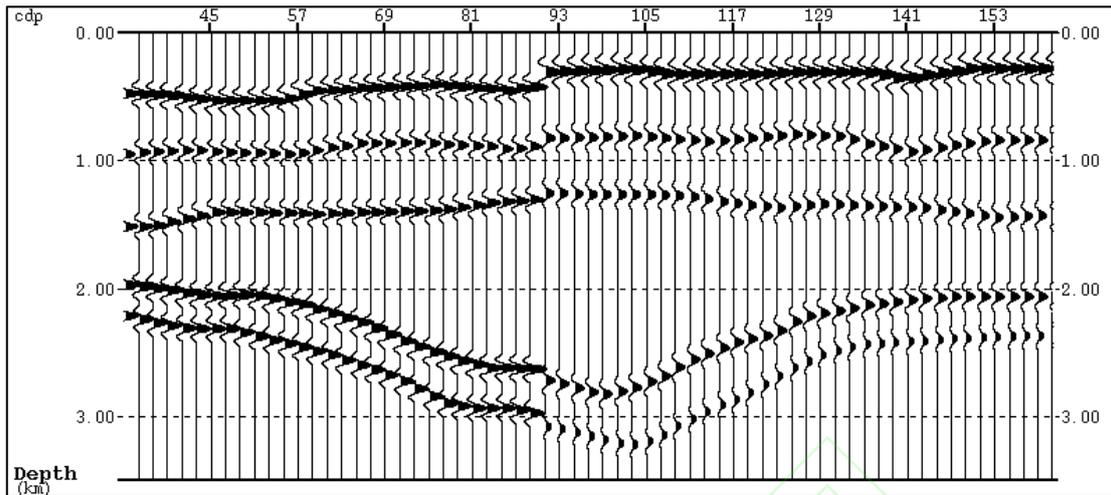
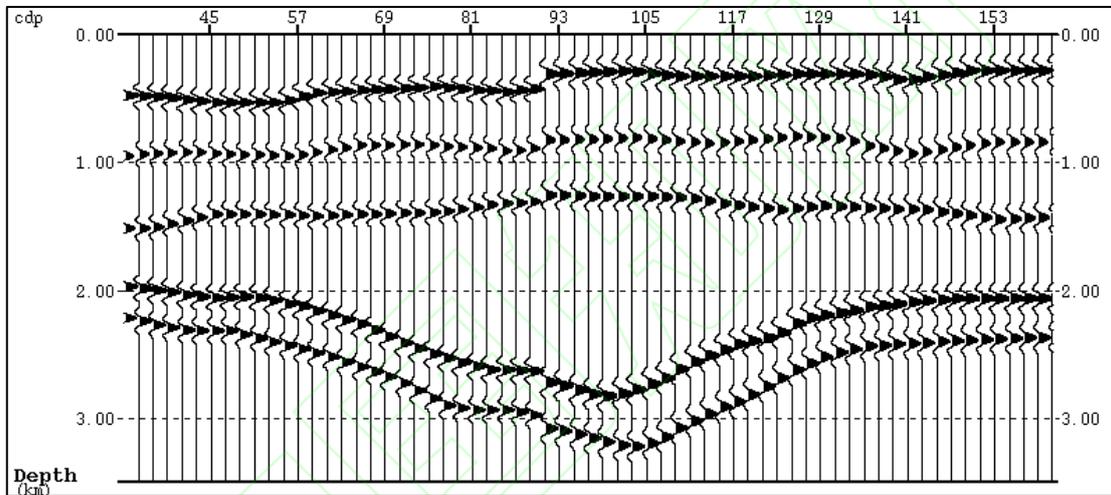


图 6 不同褶积资料拼接结果
Fig.6 Splicing results of different convolution data

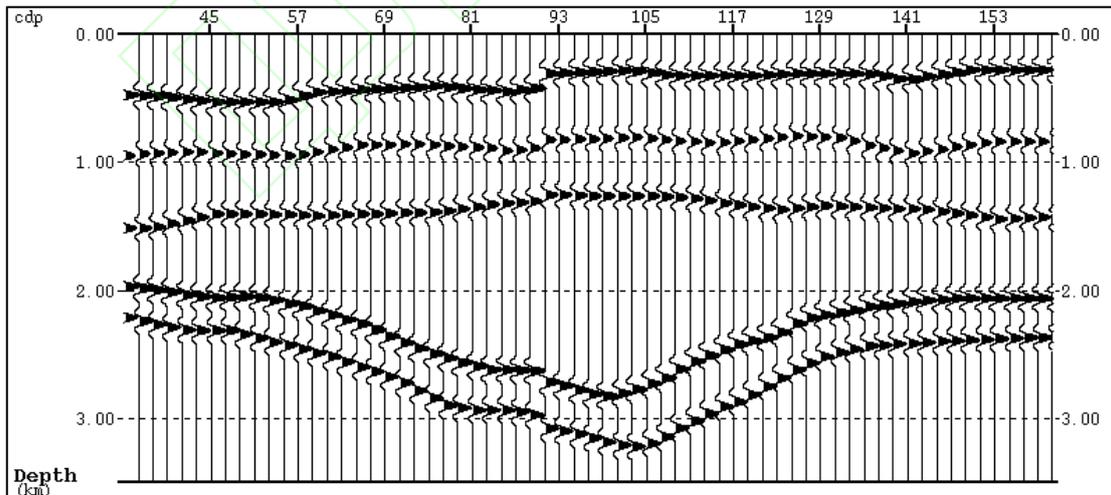
本次模型试算选取工区 A 为“基准”工区，对工区 B 振幅、频率和相位进行校正，对不同工区地震资料进行零相位化处理得到图 7 (a)，实现不同工区相位一致，进而对工区 B 地震资料进行振幅吸收补偿处理得到图 7 (b)，实现振幅与工区 A 一致，最后对工区 B 资料进行匹配滤波处理得到图 7 (c)，使其主频与工区 A 一致，完成匹配。



(a) 相位匹配



(b) 振幅匹配



(c) 频率匹配

图 7 地震记录一致性处理
Fig.7 Seismic data consistency processing (a) Phase matching (b) Amplitude matching (c) Frequency matching

完成振幅、频率、相位匹配后，利用本文开展不同地震资料匹配试算，采用 DTW 算法，将振幅信息作为基本的距离参数，加上主频和时频分布等就可以实现不同工区合成地震记录的匹配。通过图 8 可以发现，利用本文方法对工区 B 地震记录进行校正之后，可以发现两者在位置上能够精确对应，实现两者的精确匹配。

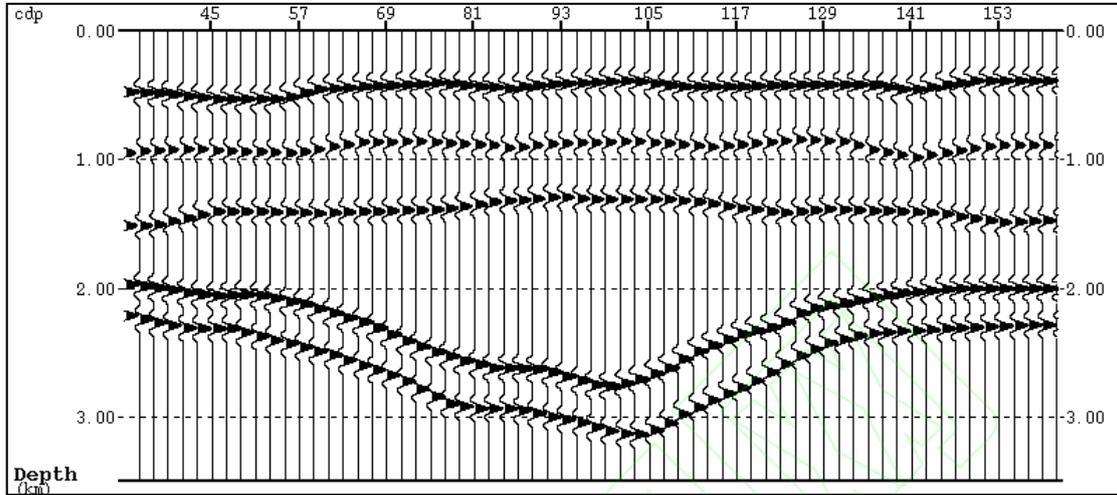


图 8 匹配后地震道对比
Fig.8 Seismic trace comparison after matching

3 应用实例

本次研究以渤海 R 油田为例，如图 9，不同工区地震资料差异较大、且层位存在时差，影响后续解释工作的开展，利用本文方法对不同采集工区叠后地震资料进行三维拼接，进而消除不同工区资料间差异，解决跨界岩性圈闭难以落实的问题。

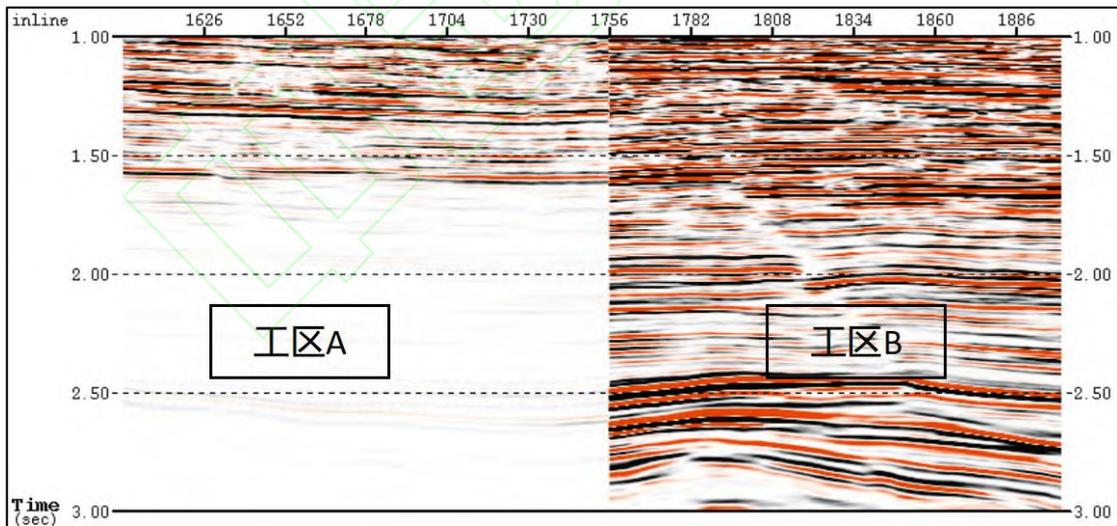
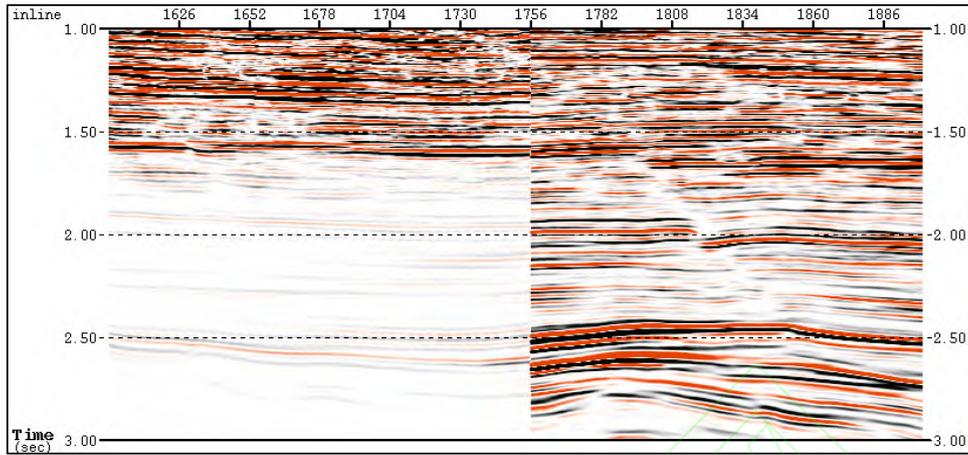


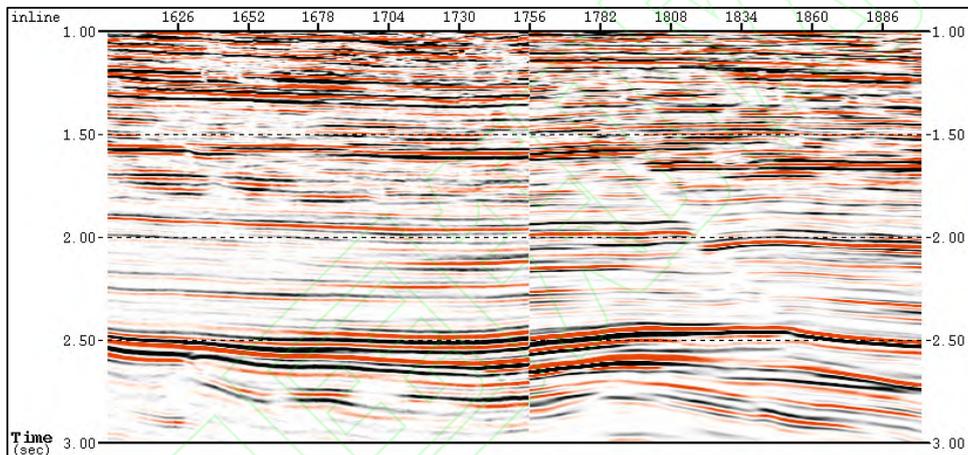
图 9 原始资料直接拼接资料
Fig.9 Direct splicing of original seismic data

首先分析重叠区处地震资料振幅，提取工区 A、B 均方根振幅分别为 175、381，计算横向振幅校正因子为 2.18，对工区 A 资料进行振幅校正后得到图 10 (a)，可见浅层振幅基本一致，但中深层振幅仍然存在较大差异，对工区 A 地震道按时间进行补偿，时窗选择分别为 1000-1500ms、1505-1800ms、1805-3000ms，利用图 11 所示的振幅增益指数进行补偿，补偿后的工区 A 地震记录如图 10

(b) 所示，可见校正后的工区 A 和工区 B 振幅趋势一致，消除了横向和纵向能量的差异。



(a) 横向振幅校正结果



(b) 横向及纵向振幅校正结果

图 10 振幅校正结果

Fig.10 Amplitude correction result (a) Lateral amplitude correction result (b) Lateral and longitudinal amplitude correction results

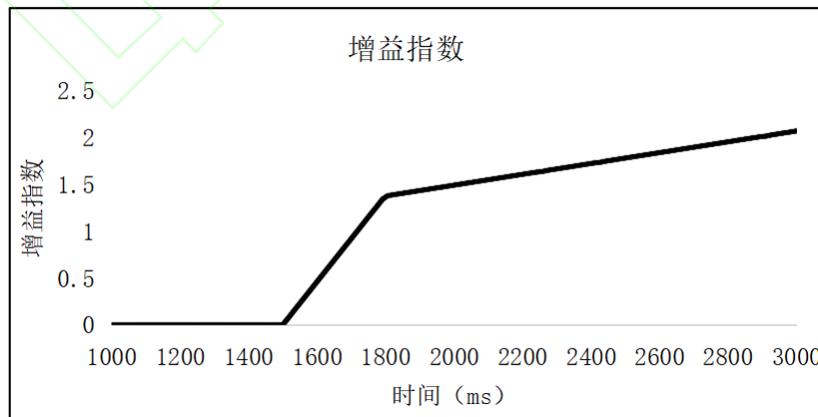


图 11 振幅增益指数

Fig.11 Amplitude gain index

通过井震标定分析可知，工区 B 地震资料为零相位资料，工区 A 地震资料相位为 60 度，因此首

先对工区 A 地震资料进行相位校正, 相移 60 度, 实现工区 A 地震资料近零相位化, 完成相位的匹配; 对重叠区地震资料进行频谱分析得到图 12 (a), 可知工区 A 和工区 B 主频一致, 但是工区 A 相比工区 B 缺失高频及低频成分, 同时在实际解释过程中发现, 工区 B 地震资料中的高频成分更有利于储层研究, 因此本次研究以工区 B 地震资料频率为“基准”, 对工区 A 进行匹配滤波处理, 图 13 为频率域匹配滤波算子, 通过图 12 (b) 所示的频谱可知, 工区 A、B 频率基本一致, 实现频率的匹配。

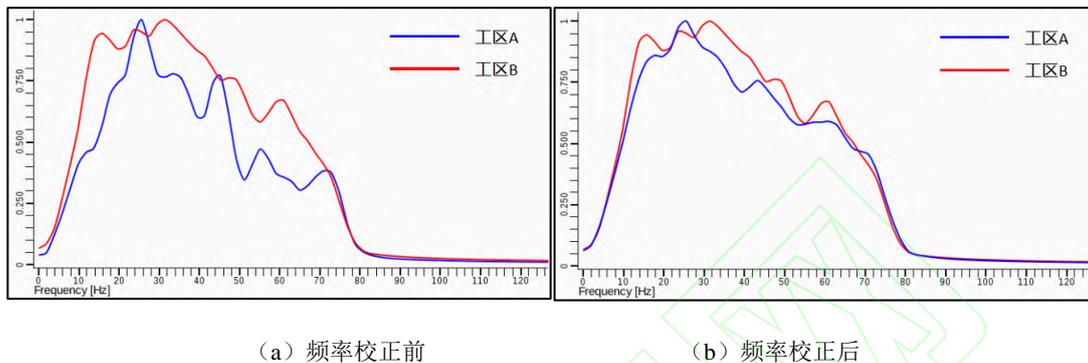


图 12 频率校正前后对比

Fig.12 Comparison before and after frequency correction (a) Before frequency correction (b) After frequency correction

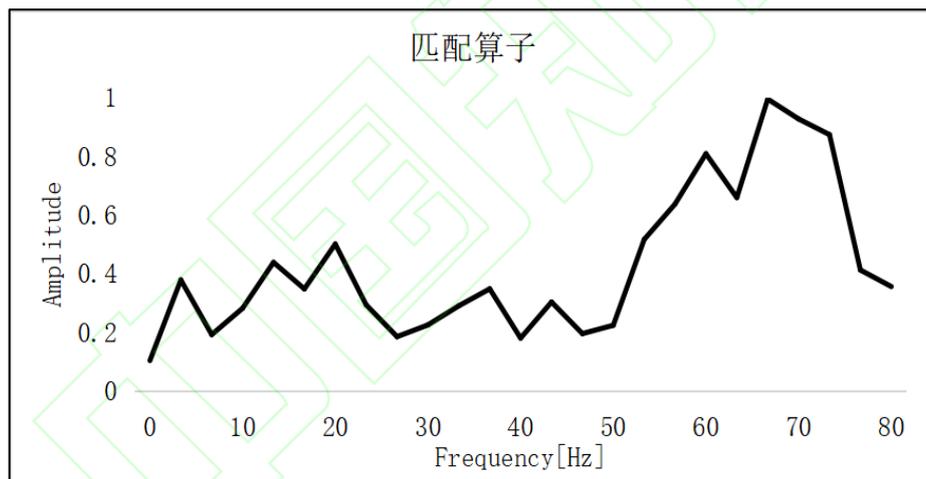


图 13 频率匹配算子

Fig.13 Frequency matching operator

工区 A、B 消除振幅、频率、相位的差异后, 通过浅层层位匹配可知, 工区 A 资料与工区 B 资料存在 15ms 的时差, 对工区 A 平移 15ms 后, 即完成常规的地震资料拼接。通过图 14 可知, 常规拼接后的地震资料不同层位仍然存在时差, 单纯通过平移难以实现整体资料的拼接。通过本文的方法, 利用重叠区地震资料的振幅、频率及相位信息对地震道进行匹配, 如图 15 为重叠区单道匹配前后结果, 匹配后两者的对应关系得到较大改善, 消除层位间的时差, 实现各层位的精确匹配, 根据重叠区的位置信息可以得到工区 A 地震资料纵向上每个层位的时间校正量。

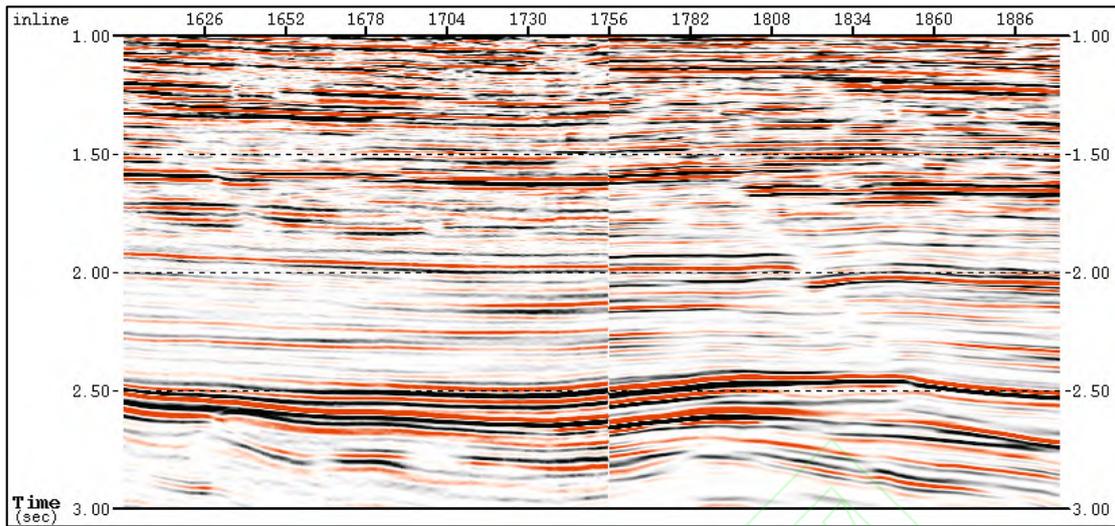
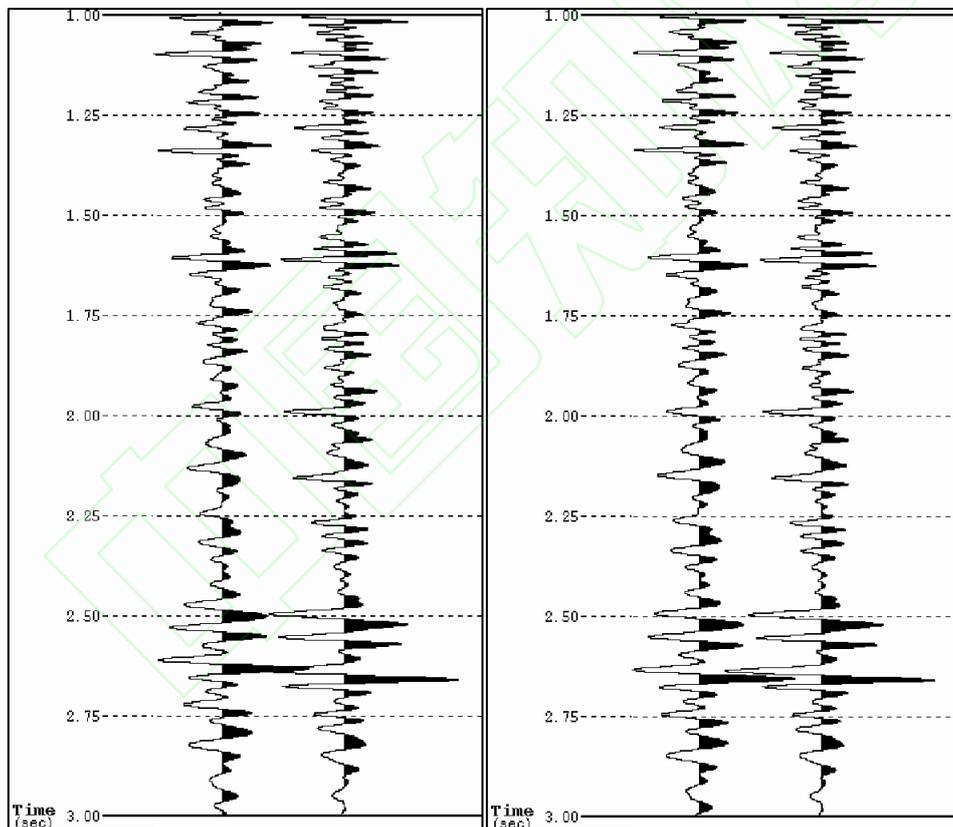


图 14 渤海某构造常规拼接地震资料
Fig.14 Conventional splicing seismic data of a structure in Bohai



(a) 常规方法

(b) 本文方法

图 15 新方法和常规方法匹配单道对比

Fig.15 Matching single trace comparison between new method and conventional method (a) Conventional method (b) Method in this paper

将重叠区地震道进行匹配后可以得到个层位的时间偏差校正量，沿层将该误差校正量通过插值扩展到非重叠区，从而实现整个三维数据体的拼接，从图 16 可知，拼接后的地震资料同相轴更加连续，不同工区地震资料浅中深层都能实现较好的拼接，不同工区地震资料振幅、频率、相位一致，有利于后续岩性圈闭范围的落实和储层研究。

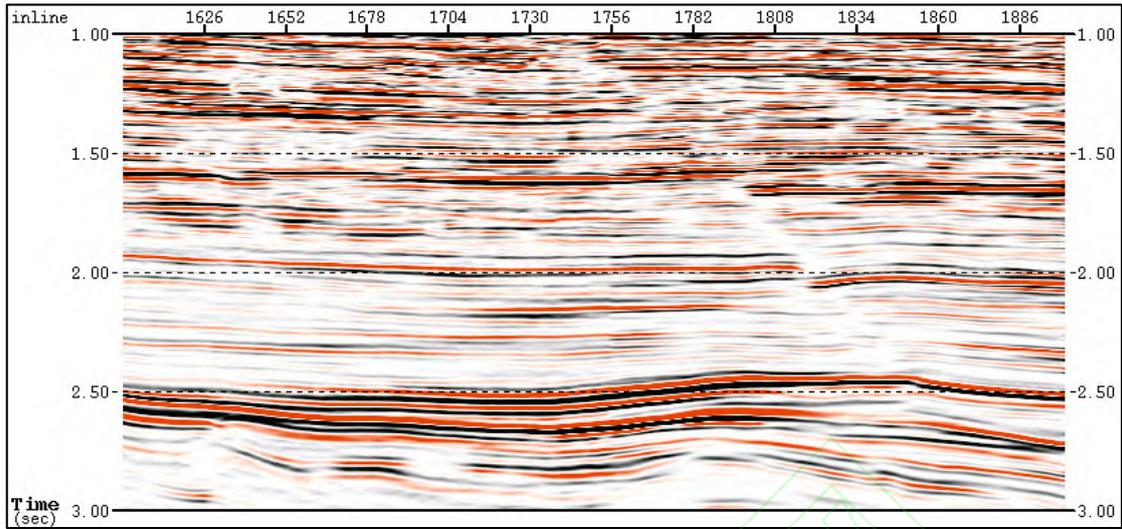


图 16 本文方法渤海某构造拼接地震资料
Fig.16 New method for splicing seismic data of a structure in Bohai Sea

本文方法在渤海多个油田的地震资料拼接中进行了推广应用，如图 17，渤海 Q 油田主要目的层是中深层，研究区位于两个采集工区的交界处，且构造起伏变化较大，利用本文方法进行叠后地震资料拼接得到图 18，有效的消除了不同工区资料间差异，为后续的勘探评价和储量研究提供准确的地震资料。

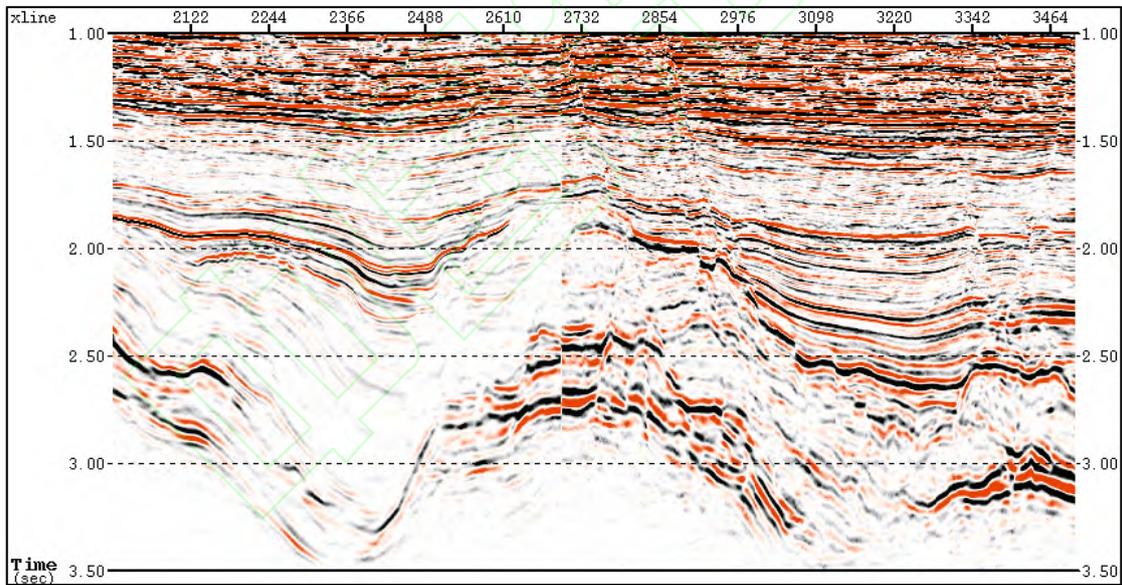


图 17 原始资料直接拼接资料
Fig.17 Direct splicing of original seismic data

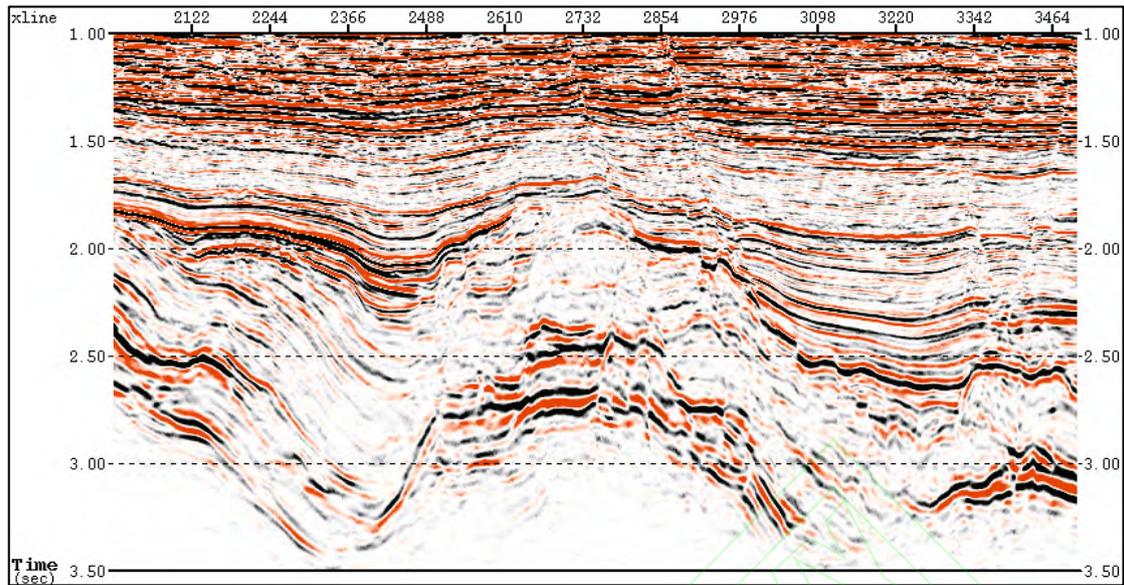


图 18 本文方法渤海 Q 油田拼接地震资料
Fig.18 New method for splicing seismic data of Q oil field in Bohai Sea

4 结论

为了消除叠后地震资料拼接过程中,不同工区地震资料振幅、频率、相位、时差上的一致,本文从不同工区地震资料的差异入手,利用波形之间的相似性,基于动态时间规整算法对重叠区地震资料进行匹配,实现高精度三维叠后地震资料拼接处理。可以得到以下几点结论。

1) 从激发震源出发,认识到激发震源容量差异和震源组合差异是导致不同工区采集地震资料振幅和频率差异的根源;采集过程中震源和电缆沉放深度差异是导致不同工区采集地震资料相位差异的根本原因。

2) 提出一种基于动态时间规整算法的高精度三维叠后地震资料拼接方法,实现了不同工区重叠区地震资料的匹配,得到不同工区地震道各层的偏差校正量,并且通过沿层插值,得到非重叠区各层位的偏差校正量,实现三维数据体的资料拼接。

3) 本文既考虑了地震道振幅、频率、相位的自身影响因素,又考虑了地质条件的约束,对 DTW 算法进行改进,使得重叠区地震资料匹配精度大大提高。在此拼接资料的基础上进行构造解释、地质体识别,可以更高的改善岩性圈闭识别精度,为勘探开发提供更好的资料基础。

References

附中文参考文献

- [1] Anderson K, Gaby J. 1983. Dynamic waveform matching. *Information Sciences*, 31(3): 221-242.
- [2] Cheng J X, Zhu L H, Yang C C, et al. 2004. Putting 3-D seismic data together based on wavelet transform. *Oil Geophysical Prospecting*, 39(04): 406-408.
- [3] Cheng L, Kong Q F, Song J G. 2017. A step-by-step iteration for joint frequency expanding. *Oil Geophysical Prospecting*, 52(04):696-703.
- [4] Dong L, Song W Q, Hu J L, et al. 2021. A fault enhancing method based on dynamic time warping. *Oil Geophysical Prospecting*, 56(03): 574-582.
- [5] Feng X Y, Wang Y C, Hu Z D, et al. 2007. Prestack seismic data splicing techniques based on shaping operator derived from poststack record. *Lithologic Reservoirs*. 19(3): 93-96.
- [6] Feng Y Q, Guo X B, Xie H, et al. 2005. Matching processing technology of marine old seismic data. *Marine Geological Dynamics*, 21(10): 31-35.
- [7] Li Y T. 2018. The study on pre-stack merge processing technology of offshore 3D seismic multi-blocks. China University of Petroleum (East China).
- [8] Luo H M, Wang C J, Liu S H, et al. 2018. Well-to-seismic calibration in the depth domain using dynamic depth warping. *Oil Geophysical Prospecting*, 53(5): 997-1005.
- [9] Hale D. 2013. Dynamic warping of seismic images. *Geophysics*, 78(2): S105-S115.
- [10] Maeschall R. 1978. Derivation of two-sided recursive filters with seismic application. 48th SEG meeting, San Francisco.
- [11] Narayana M J, Shanker T, Niyogi K. et al. 1999. Merging of differently oriented 3D seismic data sets. *Geohorizons*, 4(2): 1-11.
- [12] Sakoe H, Chiba S. 1978. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 26(1): 43-49.

- [13] Wang S J, Fang Z Y, Shi W Y, et al. 2015. Marine seismic wavelet zero-phasing technology and its application. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 54(05): 551-559.
- [14] Wang S J, Wang Z. 2012. Zero-phase processing and its application on marine seismic data. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 51(04): 402-407.
- [15] Wang X P. 2008. Research the methods of deep layer seismic signal phase consistency processing. China University of Petroleum.
- [16] Wang X W, Zhou L H. 2002. Wavelet transform used in the concatenation of 3-D seismic data sets. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 41(04): 448-451.
- [17] Wang Z Q, Zhuang X J, Chen J W, et al. 2014. Key technologies of seismic data pre-stack depth migration multi-survey joint processing. *Progress in Geophysics*, 29(01): 318-323.
- [18] Weiner N. 1947. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationany time series. Technology Press of the Massachusetts Institute Technology.
- [19] Wu D L, Zheng W J, Jin X L, et al. 2001. Unified seismic data processing of multiple 3D surveys and case study. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 40(01): 9-19.
- [20] Wu Q, Yang C C, Zhang W Z, et al. 2009. Research on processing technology for matching seismic data acquired in seashore and marine prospect. *Progress in Geophysics*, 23(03): 761-767.
- [21] WU T Q, WANG Y Z, GUO X B, et al. 2020. The application of improved Dynamic Time Warping in angle-domain gather stacking. *Progress in Geophysics*, 35(5): 1878-1887.
- [22] Zhang Y C. 2019. Method study on time domain registration of P- and C-wave. China University of Petroleum(BeiJing).
- [23] Zhao X W, Wang S X, Yuan S Y, et al. 2021. Multichannel sparse spike deconvolution based on dynamic time warping. *Acta Geophysica*, 69(5):783-793.
- [24] Zhong B J, Yin X Y. 2008. Consistent processing technology for splicing 3-D seismic data in complex area. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 47(04): 393-397.
- [25] Zuo H, Wei G Y, He X S. 2008. Block-jointed together processing technique of 3-D prestick seismic data. *Oil Geophysical Prospecting*, 43(S1): 29-35.
- [26] 程金星, 朱立华, 杨长春, 等. 2004. 基于小波变换的三维地震资料拼接方法. *石油地球物理勘探*, 39(04): 406-408.
- [27] 程亮, 孔庆丰, 宋建国. 2017. 步进迭代法井地联合地震资料拓频处理. *石油地球物理勘探*, 52(04): 696-703.
- [28] 董林, 宋维琪, 胡建林, 等. 2021. 动态时间规整的断层增强方法. *石油地球物理勘探*, 56(03): 574-582.
- [29] 冯心远, 王宇超, 胡自多, 等. 2007. 基于叠后地震记录求取整形算子的叠前资料拼接技术. *岩性油气藏*, 19(3): 93-96.
- [30] 冯永强, 郭晓宾, 谢辉. 2005. 海洋老地震资料匹配处理技术. *海洋地质动态*, 21(10): 31-35.
- [31] 李越涛. 2018. 海上多区块三维地震叠前连片处理技术研究[D]. 中国石油大学(华东).
- [32] 罗红梅, 王长江, 刘书会, 等. 2018. 深度域高精度井震动态匹配方法. *石油地球物理勘探*, 53(5): 997-1005.
- [33] 王守君, 方中于, 史文英, 等. 2015. 海洋地震资料子波零相位化技术研究与应用. *石油物探*, 54(05): 551-559.
- [34] 王守君, 王征. 2012. 海上地震资料零相位化处理技术研究. *石油物探*, 51(04): 402-407.
- [35] 王希萍. 2008. 深层信号相位一致性处理方法研究. 中国石油大学.
- [36] 王西文, 周立宏. 2002. 三维地震资料拼接中的地震子波处理. *石油物探*, 41(04): 448-451.
- [37] 王兆旗, 庄锡进, 陈见伟, 等. 2014. 地震资料叠前深度偏移连片处理关键技术. *地球物理学进展*, 29(01): 318-323.
- [38] 鄢达理, 郑伟建, 金晓雷, 等. 2001. 复杂三维地震联片处理技术及其应用实例分析. *石油物探*, 40(01): 9-19.
- [39] 吴琼, 杨长春, 张文忠, 等. 2009. 过渡带拼接地震资料处理方法研究. *地球物理学进展*, 23(03): 761-767.
- [40] 吴天麒, 王云专, 郭雪豹, 等. 2020. 基于互相关改进的 DTW 在角道集叠加优化中的应用. *地球物理学进展*, 35(5): 1878-1887.
- [41] 张一琛. 2019. 纵横波时间域匹配方法研究. 中国石油大学(北京).
- [42] 仲伯军, 印兴耀. 2008. 复杂地区三维地震资料拼接中的一致性处理技术. *石油物探*, 47(04): 393-397.
- [43] 左海, 魏庚雨, 何小松. 2008. 三维地震资料叠前连片处理技术. *石油地球物理勘探*, 43(S1): 29-35.