

多类型地震数据融合技术及软件应用

张伟¹,张剑²,白雪³,张旭³

(1. 中石化石油工程地球物理有限公司, 北京 100020;

2. 中石化石油工程地球物理有限公司 科技研发中心, 江苏 南京 211112;

3. 中石化石油工程地球物理有限公司 胜利分公司, 山东 东营 257086)

摘要:近年来,有缆与节点或多种节点地震仪联合采集时,多种仪器地震数据独立生成,数据处理前需要进行不同格式地震数据的融合,以便将同一炮集数据合并成一个炮集数据体。为此,在SEG-Y与SEG-D不同版本地震数据解析的基础上,进行地震数据相位、振幅一致性分析及野外对比试验,研究不同仪器地震数据的一致性校正及数据融合方法,研发多类型地震数据快速合并(融合)软件,以解决各种规则、不规则施工模式下多类型地震数据的融合问题。将该软件应用于我国西部准噶尔盆地DIJ项目及东部济阳凹陷TEH项目实际生产中,取得较好效果,证明该软件可以推广应用到复杂地表条件下有缆与节点规则或不规则布设模式施工的项目。

关键词:多类型地震数据;联合采集;数据融合;一致性;合并软件

中图分类号:P631

文献标志码:A

Multiformat seismic data fusion technology and software application

ZHANG Wei¹, ZHANG Jian², BAI Xue³, ZHANG Xu³

(1. SINOPEC Geophysical Corporation, Beijing 100020, China;

2. R&D Center of Science and Technology, Sinopec Geophysical Corporation, Nanjing 211112, China;

3. Shengli Branch, SINOPEC Geophysical Corporation, Dongying 257086, China)

Abstract: The cabled and node or multi-node seismometers are jointly used to conduct seismic acquisition, which produces separate seismic data. To get all data within a shot set to be emerged into a single shot set, we have to get the data in different formats fused before any data processing. To this end, this study carried out phase and amplitude consistency analysis of seismic data and field comparative experiments based on the analysis of seismic data from different versions of SEG-Y and SEG-D to investigate the uniformity correction and data fusion methods of seismic data from different instruments. Software for rapid fusion of multiformat seismic data was developed to address the fusion problems of multiformat seismic data under various regular and irregular construction modes. The software was applied to the actual production of DIJ project in the Junggar Basin in western China and TEH project in Jiyang Sag in eastern China. Good results were achieved, suggesting that this software can be popularized to projects with cabled and node rules or irregular layout patterns under complex surface conditions.

Key words: multiformat seismic data; joint acquisition; data fusion; uniformity; merging software

收稿日期:2023-07-21

基金项目:中国石化“十条龙”科技攻关项目(JP21001);中国石化科技攻关项目(JP22142);中石化石油工程地球物理有限公司科研项目(SGC-2022-10)

作者简介:张伟(1974—),男,山东东营人,高级工程师,主要从事地震采集方法研究与技术管理工作。

张剑(1985—),男,湖北武汉人,高级工程师,主要从事石油地震采集方法研究与软件开发工作,本文通信作者。

E-mail:sgczhj@126.com

随着油气田勘探开发的不断深入,油气藏地质问题越来越复杂,对地震资料品质的要求越来越高,高密度地震采集技术已成为解决复杂地质问题的主要手段,是当前地震勘探的发展方向^[1-3]。常规有缆地震采集设备布置困难、点位偏移多、安全风险大,而且受到仪器带道能力限制,难以实现更高炮道密度的地震采集。节点地震仪摆脱了对传输线缆的依赖,在穿越复杂地表能力及提升地震资料品质等方面均具明显优势,发挥高密度地震采集技术的优势,有利于“两宽一高”采集技术的实现^[4-5]。

近年来,节点地震采集技术的采集方法、施工作业在实际应用中不断改进和完善,形成了有缆与节点联合采集、全节点采集等多种施工模式^[5-6],尤其是节点地震采集技术推广初期,主要通过有缆与节点地震仪联合采集的施工方法。但由于节点与有缆仪器采集系统不同,地震数据种类多样,在资料整理、数据存储与使用等方面存在诸多问题:首先,有缆地震仪与节点仪地震数据格式不一致,例如,常用的 Sercel 系列地震仪地震数据以 SEG-D 格式为主,而且不同版本格式也不一样;其次,节点地震仪与有缆仪器地震数据独立存放,同一炮集数据无法自动合并成一个炮集数据体;最后,对不规则节点与有缆仪器布置采集的地震数据进行解编、合并的过程相对复杂,道排序花费时间长,占用大量资料处理时间。

为解决不同类型地震数据融合的问题,王增波等^[7]对标准、非标准的 SEG-Y 格式进行解析,并根据地震数据采集或处理平台的地震数据格式差异进行格式转换方法研究。成新选等^[8]研究标准 SEG-D 格式的 Rev2.1 与 Rev3.0 版本,详细分析不同版本的数据结构,并介绍了几种主要数据格式的解编方法,开发了 SEG-D 格式数据文件头与道头软件,在 SEG-D 格式地震数据应用中发挥了一定作用。汪志群^[9]研究多格式地震数据存取与转换技术,提出提高地震数据访问效率的方法以解决各种处理系统内外部数据格式的转换问题。赵玉合等^[10]、徐乐意等^[11]研究了处理过程中的地震数据合并技术,实现同一工区不同时间采集的地震数据融合处理。总体来说,上述研究均以 SEG-Y、SEG-D 数据格式解析为主,为多类型地震数据融合提供了基础或是匹配滤波法等处理融合手段,但方法采集并未分析不同格式地震数据一致性差异的原因,也未进行融合软件的研发,无法在野外快速解决节点与有缆仪器联合采集地震数据融合与使用等方面问题,且采用能量匹配和常规处理软件合并的方法采集地震数据,该方式费时费力、原始数据的道头信息保留较少,无法满足 SEG-D 格式的输出需求。

为解决上述问题,本研究根据 SEG-Y 与 SEG-D 地震数据的格式特点,优化地震数据读取方法,进行地震数据一致性分析及野外对比试验,实现不同仪器地震数据的一致性校正。在此基础上,研发多类型地震数据快速合并软件,实现了各种规则、不规则施工模式下节点与有缆仪器或多种节点地震仪联合采集地震数据的合并,以解决多类型地震数据的融合问题。

1 地震数据融合关键技术

1.1 地震数据格式解析

目前常用的地震仪器输出不同格式的地震数据,如 Sercel 系列有缆 428XL 输出 SEG-D Rev1.0 与 Rev2.1 版本的地震数据,508XT 只能输出 SEG-D Rev3.0 版本的地震数据,节点地震仪一般可输出 SEG-Y Rev1.0 版本或 SEG-D Rev2.1 版本的地震数据。

1) SEG-Y 格式解析

SEG-Y 格式是野外地震采集中使用较为普遍的格式之一,有 SEG-Y Rev1.0 和 SEG-Y Rev2.0 两个版本。SEG-Y Rev2.0 版本是为了满足更多地震道数、更长采样、存储更多信息而进行的升级,但目前一般采用 SEG-Y Rev1.0 格式进行后期数据转储及资料处理解释等,其实际应用更多。

SEG-Y 格式数据由三部分组成:第一部分占有 3 200 个字节,是 EBCDIC 或 ASCII 字符码文件头,用来保存描述地震数据体的信息;第二部分占有 400 个字节,是二进制文件头,用来表示文件的关键信息,包括 SEG-Y 文件的数据格式、采样点数、采样间隔、测量单位等信息;第三部分是实际的地震道数据,每一个地震道包含 1 个 240 字节道头数据和若干采样数据^[7],存储顺序见图 1。

SEG-Y Rev2.0 格式较 SEG-Y Rev1.0 格式多了 1 个或多个扩展文件头与扩展道头,1 个扩展文件头占有 3 200 个字节,1 个扩展道头占有 240 个字节。扩展文件头与扩展道头中将道数、采样点数等信息由原来

2 个字节改为 4 个字节,实现了更大数据量的存储。



图 1 SEG-Y 格式地震数据存储顺序

Fig. 1 Storage sequence of seismic data for SEG-Y format

2) 地震数据 SEG-D 格式解析

SEG-D 格式的版本主要有 SEG-D Rev1.0、SEG-D Rev2.1 和 SEG-D Rev3.0。地震仪器 508XT 系统唯一支持的数据格式是 SEG-D Rev3.0。

SEG-D Rev2.1 格式是在 SEG-D Rev1.0 格式的基础上为适应高密度磁带而制定的,其主要区别是磁带标签不同,而单个数据文件基本相同,因此两个版本对单个 SEG-D 文件的读写基本一致。图 2 为 SEG-D Rev1.0、Rev2.1 格式地震数据存储顺序,该顺序与字节数基本固定不变。

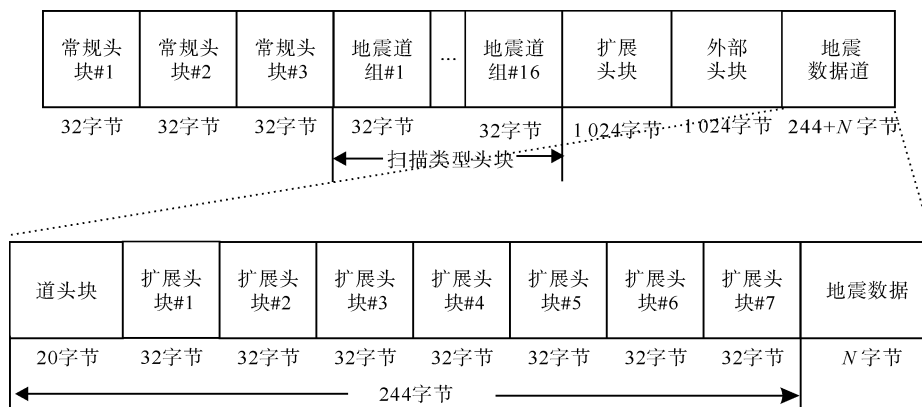


图 2 SEG-D Rev1.0、Rev2.1 格式地震数据存储顺序

Fig. 2 Storage sequence of seismic data for SEG-D Rev1.0 and Rev2.1 format

SEG-D Rev3.0 格式与 SEG-D Rev2.1 格式的构建思路完全不同,SEG-D Rev3.0 格式更加灵活、信息更加丰富、适应更多道数,能够适应未来更高密度采集的数据存储需要,但两者数据编码格式是一致的。图 3 为 SEG-D Rev3.0 格式地震数据展示的顺序,与别的版本区别在于其头块是以 32 个字节为一个单位,且这些 32 个字节的块没有固定顺序,可以随意排列,每个块的第 32 字节是这个块的代号或识别码(identification, ID),为十六进制,通过这个代码确定其内容^[8];而常规头段 1~3 是必须存在的,常规头段 1 无识别码(ID),而且位于第一个 32 字节块。

SEG-D 格式的读取关键在于头块数据的读取,表 1 为 SEG-D Rev1.0、SEG-D Rev2.1、SEG-D Rev3.0 版本的主要头段数据块关键字位置所对应的数据含义。通过关键字的解析可实现 SEG-D 不同版本地震数据的读入。

3) 地震数据读取优化

SEG-Y 和 SEG-D 格式数据解编通常采用顺序读取的方式,逐个字节进行解析并创建对象。经过测试,解编耗时主要是读取 IBM 或 IEEE 格式道数据后转化为内部数据的过程。为了提高解编效率,对解编算法进行优化,采用并行解编的方式,利用计算机多核并行计算能力进行数据的解编(图 4)。

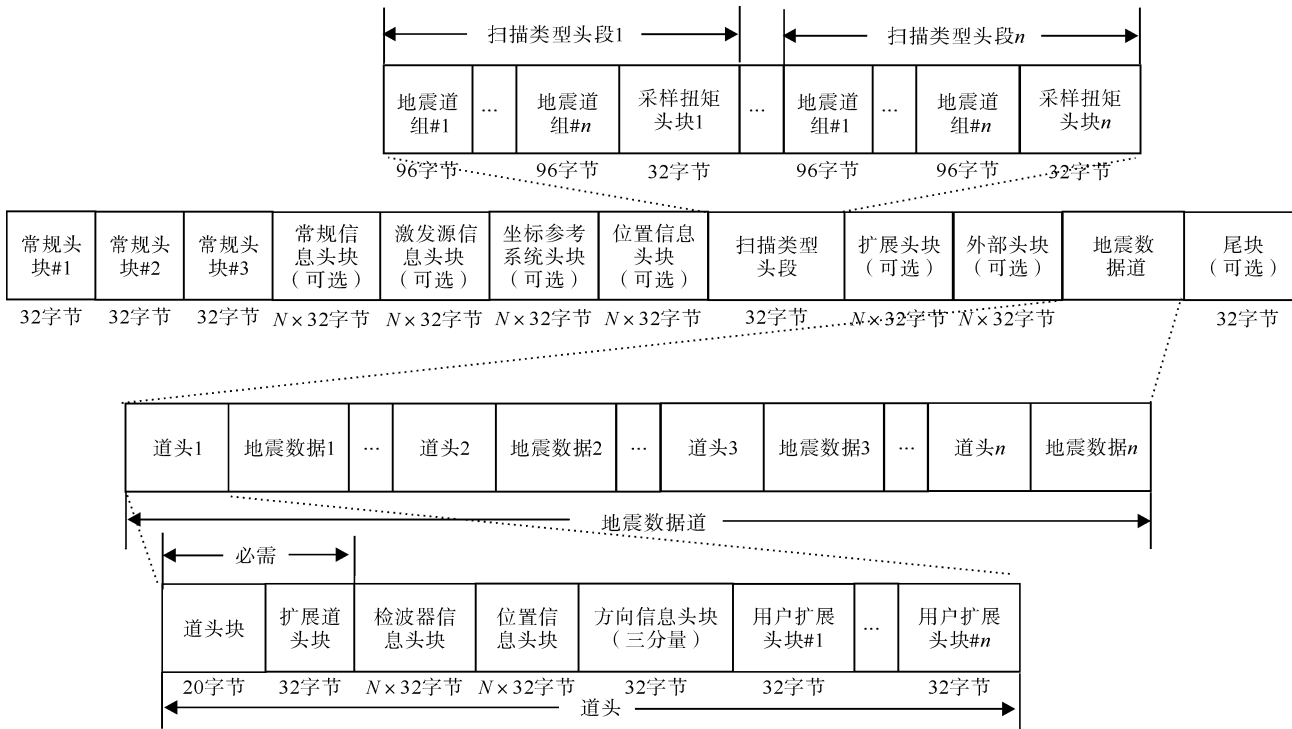


图 3 SEG-D Rev3.0 格式地震数据存储一种顺序

Fig. 3 Storage sequence of seismic data for SEG-D Rev3.0 format

表 1 SEG-D Rev1.0、SEG-D Rev2.1、SEG-D Rev3.0 格式头段数据块关键字

Table 1 Header data block keywords about SEG-D Rev1.0, SEG-D Rev2.1 and SEG-D Rev3.0 formats

SEG-D Rev1.0、Rev2.1				SEG-D Rev3.0			
序号	位置	字节位序号	说明	序号	位置	字节位序号	说明
1	常规头段 #1	3~4	数据格式代码,常用 8058	15	常规头段 #1	3~4	数据格式代码,常用 8058
2	常规头段 #1	23	基本扫描间隔,采样率	16	常规头段 #2	11~12	SEG-D 版本号
3	常规头段 #1	29	地震道组数目,陆地为 16	17	常规头段 #2	13~16	普通尾块长度,一般为 0
4	常规头段 #1	32	外部头段长度	18	常规头段 #2	17~20	扩展记录长度
5	常规头段 #2	8~9	外部头段长度,大于 99 时使用	19	常规头段 #2	28~30	外部头段长度
6	常规头段 #2	11~12	SEG-D 版本号	20	常规头段 #3	17~24	数据总大小,不含尾块
7	常规头段 #2	13~14	普通尾块长度,一般为 0	21	常规头段 #3	25~28	头块大小
8	常规头段 #2	15~17	记录长度	22	扫描类型头块	4	地震道类型标识
9	地震道组 #1	9~10	此地震道组中地震道的数量	23	扫描类型头块	13~16	每个地震道的采样数
10	地震道组 #1	11H	地震道标识,1-地震道,9-辅助道	24	扫描类型头块	17~20	地震道采样 mV 转换系数
11	多路解编道头	4	地震道组号	25	扫描类型头块	24~26	采样间隔,采样率
12	多路解编道头	18~20	扩展文件号,FFID>9999 时使用	26	多路解编道头	10	地震道头块扩展
13	道头块扩展 #7	9~12	地震道采样 mV 转换系数	27	道头块扩展 #1	22~24	扩展地震道编号
14	道头块扩展 #7	15	地震道标识,1-地震道,9-辅助道	28	道头块扩展 #1	25~28	采样数

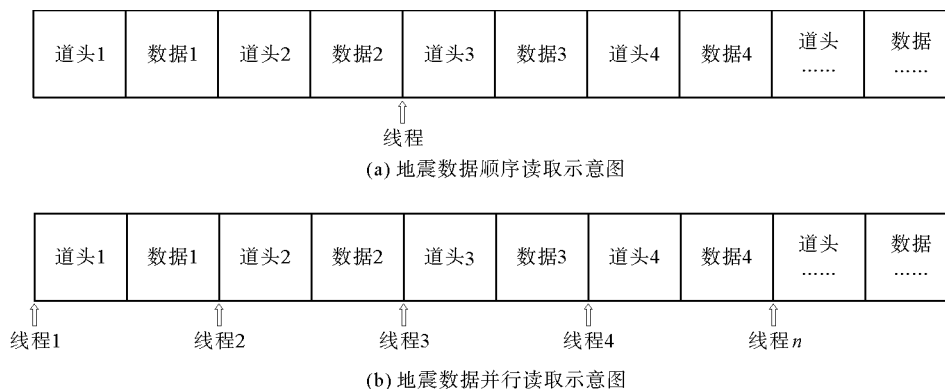


图 4 地震数据读取优化示意图

Fig. 4 Optimization schematic diagram of seismic data reading

1) 顺序读取。假设数据块起始于第 m 字节,每个数据块占 n 个字节。逐道读取时,游标依次下移,如果要读取第 k 道(图 4(a), $k = 3$),则起始位置为第 $m + (k - 1) \times n$ 个字节,读取 n 个字节后,解编内容,创建对象。顺序执行时,第 k 道的数据未解编完成时,不能进行第 $k + 1$ 道的数据解编,但 CPU 存在闲置时间片,没有被充分利用。

2) 并行读取。先将全部单炮数据读入内存,解编总头块数据及通道组和道头数据,创建 k 个单道对象,计算每一道的起始位置,然后再利用多个线程并行读取数据解编(图 4(b)),利用并行计算技术提高解编速度。

1.2 地震数据一致性分析

有缆与节点或多种节点地震仪联合采集时,各种仪器地震数据独立存在,将同一炮集数据合并成一个炮集数据体之前,需要对不同仪器系统地震数据的相位与振幅差异进行校正,保证多类型地震数据准确融合。另外,不同类型检波器接收的地震数据在数据融合时需进行地震数据的一致性分析。

1) 相位差异分析

引起多类型地震数据相位差异的主要原因为节点激发系统整 ms 触发。如图 5 所示,节点地震仪通过全球导航卫星系统(global navigation satellite,GNSS)授时,按照 GNSS 授时时钟进行数据记录,数据样点记录时刻均为整 ms 处;但 428XL、508XT 等有缆地震仪器为有缆实时传输,而非采用授时整 ms 记录的方式,可以在非整 ms 处按一定采样点间隔记录数据。因此,有缆地震仪与节点联合采集时,采集到的数据之间存在一定的相位差。

目前可控震源采集时,电控箱体采用 GNSS 授时模式,仪器 DPG(digital pilot generator)与震源 DSD(digital servo driver)已经设定为整 ms 处触发,消除了因激发系统非整 ms 触发产生的相位差异。但当爆炸机激发时刻不在整 ms 处时,两者记录样点时刻将产生一定误差。因此,可对爆炸机起爆时间进行控制,实现整 ms 处触发,从而消除相位差异。

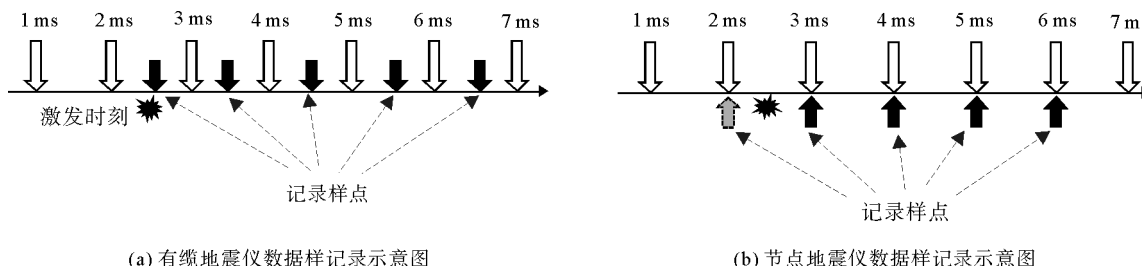


图 5 有缆与节点地震仪数据样点记录示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data sample recording of cabled and node seismographs

2) 振幅差异分析

当地表产生振动时,由于耦合效应,插在地表的地震仪外壳随即振动,进而带动芯子振动产生机械信号,地震仪将机械信号转化为模拟电信号,模拟电信号则通过模数转换(A/D转换)处理得到二进制样点值,最终得到记录了地震信号的 SEG-Y 或 SEG-D 数据,如图 6 所示^[12-16]。其中,地震仪的灵敏度、前置放大器、A/D 转换以及样点值的存储方式等均对输出的 SEG-Y 或 SEG-D 数据产生影响。因此,不同地震仪器记录同一地震信号会存在一定差异,在地震数据合并时需进行一致性校正。

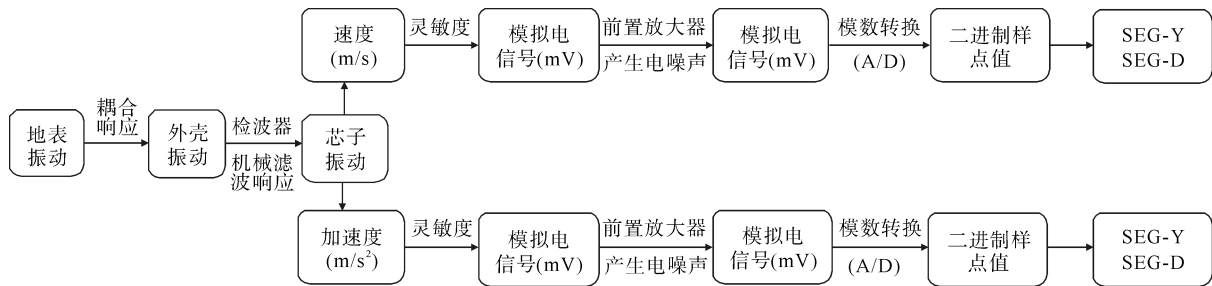


图 6 地震采集数据形成过程

Fig. 6 Formation process of seismic acquisition data

① 前放增益差异

无论是缆仪器还是节点地震仪,采集数据的过程一般采用前置放大器,即接收的数据存在 12 dB 的前放增益,到计算机中记录解编后还原到 0,即没有放大的原始数据。目前,如 428XL 或 508XT 等有缆仪器一般采用这种方式,但部分节点地震数据解编后仍为 12 dB。因此,以有缆地震数据为标准,需将增益不一致的节点地震数据还原为原始数据,数据融合前完成振幅的校正,使得两者数据振幅保持一致。

② 检波器灵敏度差异

检波器灵敏度指的是机械振动转换为电信号后的电压与位移、速度或者加速度的比值。仪器记录的均为电压信号值,而检波器接收的振动信号通过灵敏度进行换算。以速度检波器为例,电压=灵敏度×速度,对于同一振动,不同检波器灵敏度差异也会引起振幅值的差异,这种差异是由检波器的本质不同所产生的。因此,在同一工区选用相同的检波器进行地震数据采集。

③ 振幅存储样点值及相关算法差异

SEG-D 格式执行 32 位 IEEE 754—1985 格式标准,无论是炸药震源还是可控震源,该值直接转换成十进制后,为数量级较大的整型数值,一般称为样本数值(A/D 转换器转换后的数值)。SEG-Y 存储格式为浮点型 mV 电压值,因此 SEG-D 格式数据解编到 SEG-Y 格式时应换算为 mV 电压值。

样本数值读数对 mV 的转换系数 K 为:

$$K = K_1 \times K_2 \quad (1)$$

其中: K_1 取决于检波器类型与前放增益,当采用炸药震源激发、速度检波器 12 dB 采集时, K_1 一般为固定值 6.742×10^{-5} ; K_2 取决于扫描信号长度、自相关最大值和叠加次数,

$$K_2 = \sqrt{\frac{2}{A \times N \times S^2}} \quad (2)$$

其中: A 为参考自相关最大值; S 为叠加次数; N 为参考长度/采样率。

可以看出,当采用炸药震源、速度检波器 12 dB 采集时,转换系数为 6.742×10^{-5} ;当可控震源采集相关时,就与扫描信号有关联,需精确计算。

④ 速度信号与加速度信号

从图 6 可以看出,地震采集数据通常分为速度型数据和加速度型数据,这两种类型数据不仅需要进行上述方法的“物理实现”,还需进行“数学实现”转换到同一物理域。“物理实现”是指采用速度型或加速度型检

波器直接获得相关数据;“数学实现”则可通过微积分计算将速度/加速度型数据转换为加速度/速度型数据^[15-16]。

假设速度信号为:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \tag{3}$$

其中:A 为振动最大振幅; ω 为角频率; φ 为初始相位。因为速度与加速度是微分的关系,对速度信号做微分计算,即可得到加速度信号,实现速度域与加速度域之间的转换:

$$x' = \omega A \cos(\omega t + \varphi) \tag{4}$$

1.3 野外对比试验

在实际应用中,对于有缆地震仪与节点联合采集施工模式,可通过理论分析与计算获取地震数据的振幅校正系数。而多种节点地震仪联合采集时,需通过野外对比试验计算得到各数据的转换系数。

在我国西部准噶尔盆地对 3 种节点地震仪与 428XL 有缆地震仪进行了对比试验。如图 7 所示,每个桩号同时铺设 4 种仪器,检波器灵敏度基本相当,间隔 20 cm,道距 5 m,一共 40 道接收,采样频率为 1 ms。可控震源位于大号 30 m 处。扫描信号参数分别为:扫描频率 1.5~96.0 Hz,扫描长度 10 s,振动出力 70%,振动次数 1 次。

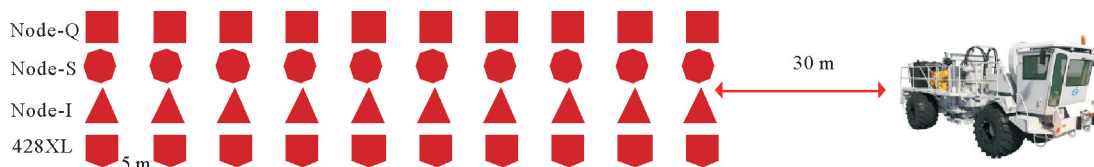


图 7 野外对比试验观测方案示意图

Fig. 7 Schematic diagram of observation scheme for the field comparative test

图 8 为 428XL 有缆地震仪和 Node-I 节点地震仪相关前 10 道原始地震记录,图 9 为 4 种仪器相关前原始资料对比。可以看出,消除前放增益后,不同仪器记录的原始地震数据相位与振幅基本一致。但经过相关后,由于相关算法不同出现振幅不一致的现象,如图 10(a)所示,428XL 与 Node-I 振幅基本一致,Node-S 与 Node-Q 振幅较小。经过试验数据统计和计算,以 428XL 有缆振幅值系数 1 为基础,得到每种地震仪器数据振幅的校正系数:Node-I 幅值系数为 1,Node-S 幅值系数为 14,Node-Q 幅值系数为 50 000。采用该系数校正后,数据真值波形基本一致(图 10(b)),满足合并需求。

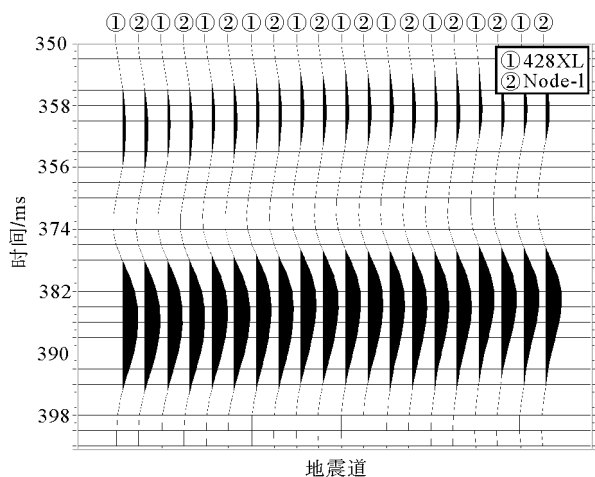


图 8 相关前 428XL 与 Node-I 原始解编记录对比

Fig. 8 Comparison of original records between 428XL and Node-I before correlation

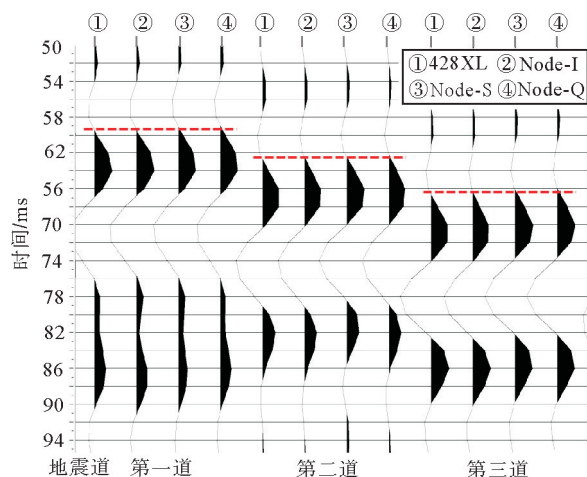


图 9 相关前四种仪器原始解编记录对比(前三道)

Fig. 9 Comparison between original records of the first three channels using four instruments

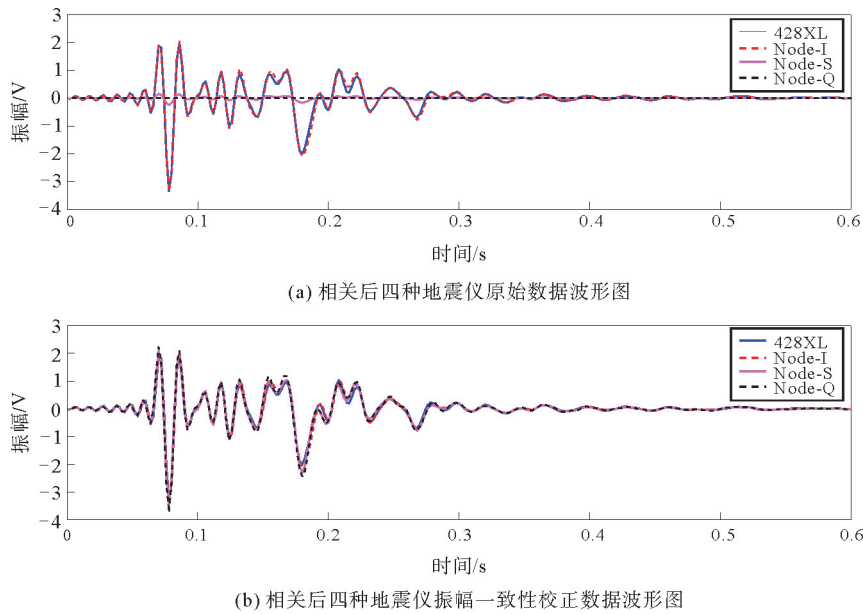


图 10 相关后四种仪器振幅一致性校正前、后数据波形对比图

Fig. 10 Comparison of data waveforms before and after the correction of amplitude uniformity of four instruments after correlation

2 多类型地震数据合并软件研发

基于上述方法研究及野外现场实际应用需求,将多类型地震数据合并软件功能设计为 4 部分:数据导入、地震数据一致性校正、同源混采地震数据合并及多节点地震数据合并,如图 11 所示。软件数据流程如图 12 所示。软件加载数据包括不同仪器产生的不同类型的 SEG-D 格式/SEG-Y 格式地震数据、对应的 SPS 文件以及校正系数。

根据多类型地震数据融合(合并)软件的架构及功能设计要求,基于 .NET 平台采用 C# 程序设计语言进行软件开发,实现软件功能。

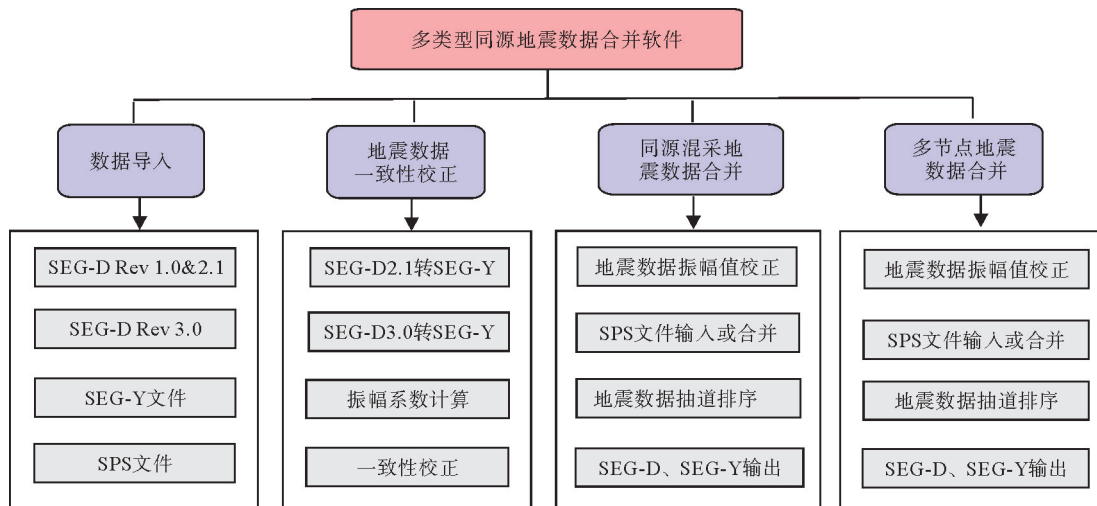


图 11 软件功能设计图

Fig. 11 Design of software functions

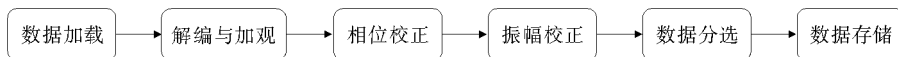


图 12 软件数据流程图

Fig. 12 Data flow chart of software

3 多类型地震数据融合软件应用效果

3.1 西部准噶尔盆地 DIJ 项目应用

准噶尔盆地 DIJ 三维数据采用 428XL 有缆与 Node-I 节点地震仪不规则接收,北部山地全部为节点,其他区域采用一条有缆、一条节点的施工模式,单炮接收道数为 $26 \times 648 = 16\ 848$ 道。图 13(a)为有缆与节点地震数据直接融合的示意图,由于有缆 SEG-D 数据经处理软件解析后采样值已经换算到 mV 电压值上,但节点融合过程并未考虑振幅的校正,因此直接存储的相关后的值并非 mV 电压值。由图 13 可以看出,不同类型地震数据的能量等级差异较大,计算获得的转换系数为 3.452×10^{-15} ,经过一致性校正后,再进行地震数据的融合,输出标准 SEG-D 格式数据,且单炮能量变化趋势稳定。

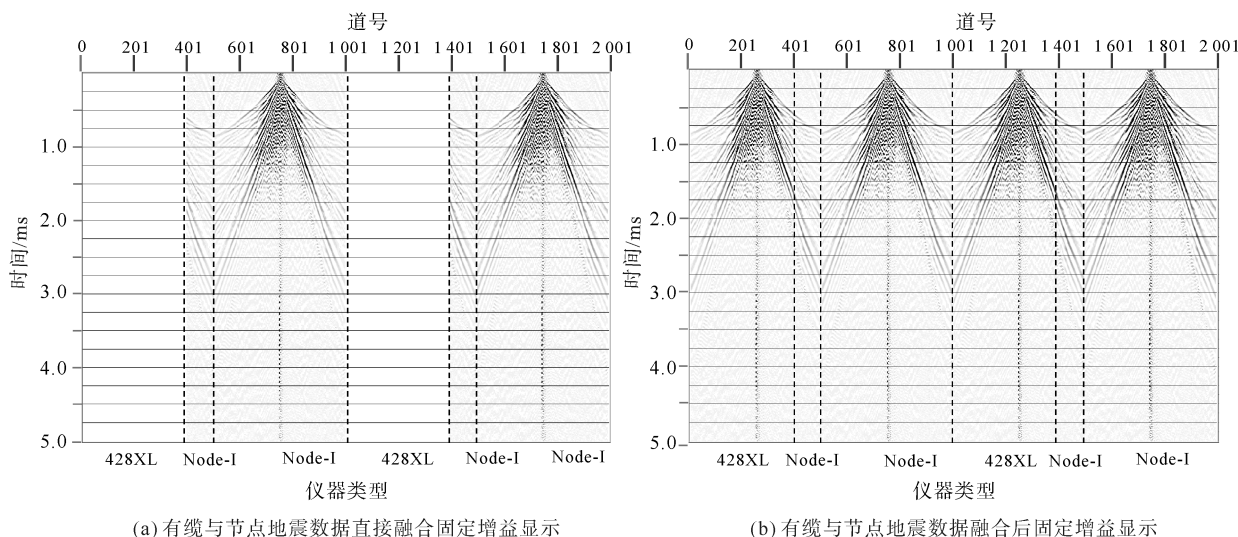


图 13 有缆与节点地震数据融合前后对比图

Fig. 13 Comparison of fixed gains before and after the fusion of cabled and node seismic data

3.2 东部济阳凹陷 TEH 项目应用

THE 三维项目为 Node-I 与 Node-S 两种节点联合采集项目,位于山东省滨州市和东营市,地表条件复杂,涉及虾池、盐池、河流、水库、湿地保护区、烂泥滩、芦苇荡、工业园、村镇、铁路、油气管网等。项目前期开展了两种节点地震数据一致性对比试验,如图 14 所示。可以看出,两种节点存在 4 倍的振幅差异,经分析是由前放增益 12 dB 引起的。因此,需对地震数据校正后再准确融合。图 15 左侧为未经振幅校正直接融合的单炮记录固定增益显示图,可以看出两种节点能量不同;右侧为两种节点经振幅校正后单炮记录固定增益显示,单炮数据得到了较好的融合。经测试,该工区 40 000 道 1.5 GB 的单炮合并需 30 s 左右,合成效率达单日 12 000 炮。

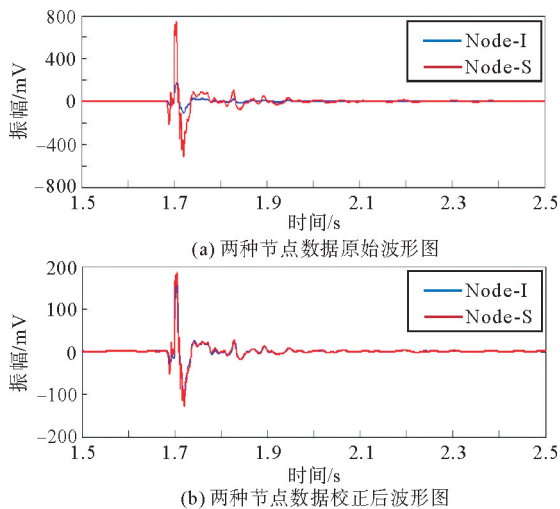


图 14 两种节点振幅校正前后波形对比图

Fig. 14 Comparison of waveforms before and after amplitude correction of two nodes

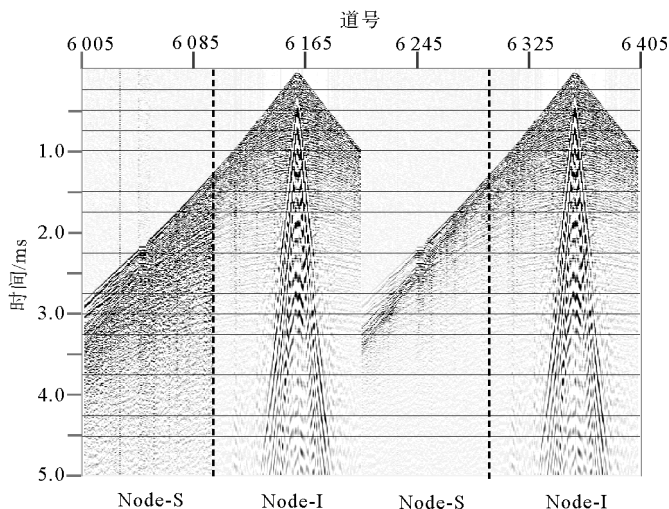


图 15 两种节点地震数据融合后固定增益显示

Fig. 15 Display of fixed gains after seismic data fusion of two nodes

4 结论与建议

通过详细解析各类地震数据格式,对多类型地震仪器产生的地震数据相位与振幅一致性进行分析,结合理论计算与野外试验对比,形成一套多类型地震数据融合技术。

1) 明确了有缆与节点地震仪器 SEG-Y 与 SEG-D 各版本编码格式、存储结构、头段数据块关键字等,能够进行相应格式的解编;

2) 针对不同震源类型,完成数据相位、振幅一致性校正后,进行不同版本的有缆 SEG-D 数据与节点 SEG-Y 或 SEG-D 数据的任意观测系统施工模式的融合,输出的地震数据保留原始道头信息,节省大量存储介质及转储时间;

3) 建议对采用不同仪器联合采集的项目均进行对比试验,将地震数据转换成电压 mV 值,求取校正系数并进行校正后,再进行数据的准确融合。

随着地震勘探的深入,本研究方法适用于更多类型地震数据的快速融合。下一步将进行多类型地震数据融合后质量监控技术研究,为更大道数、更多数据类型的地震数据融合提供监控方法。

参考文献:

[1] 赵邦六,董世泰,曾忠,等. 单点地震采集优势与应用[J]. 中国石油勘探,2021,26(2):55-68.
 ZHAO Bangliu,DONG Shitai,ZENG Zhong,et al Advantages and application of single-point receiving in seismic acquisition [J]. China Petroleum Exploration,2021,26(2):55-68.

[2] 王延光,尚新民,芮拥军. 单点高密度地震技术进展、实践与展望[J]. 石油物探,2022,61(4):571-590.
 WANG Yanguang,SHANG Xinmin,RUI Yongjun. Progress,practice, and prospect of single-sensor high-density seismic technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2022,61(4):571-590.

[3] 尚新民,芮拥军,石林光,等. 胜利油田高密度地震探索与实践[J]. 地球物理学进展,2018,33(4):1545-1553.
 SHANG Xinmin,RUI Yongjun,SHI Linguang,et al. Exploration and practice of high-density seismic survey in Shengli Oil-field[J]. Progress in Geophysics,2018,33(4):1545-1553.

[4] 苏卫民,李孟泽,李献民,等. 节点地震仪与高精度可控震源组合实现“两宽一高”采集的应用实例[J]. 物探装备,2020,30(5):284-288.
 SU Weimin,LI Mengze,LI Xianmin,et al. Application example of “Broadband and Wide azimuth” acquisition by combining node instrument with high precision vibroseis[J]. Equipment for Geophysical Prospecting,2020,30(5):284-288.

- [5] 白珊珊,李从庆,郭磊,等.节点地震采集系统发展现状[J].地震地磁观测与研究,2019,40(6):130-138.
BAI Shanshan,LI Congqing,GUO Lei,et al. A review of the development of nodal seismic acquisition systems[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2019,40(6):130-138.
- [6] 张剑,张旭,白雪,等.节点地震采集质量监控技术研究及应用[C]//中国石油学会2022年物探技术研讨会论文集,海口,2022:99-102.
- [7] 王增波,李雁鸿,赵剑,等.SEG-Y地震数据格式解析及转换方法[J].物探装备,2012,22(3):177-182.
WANG Zengbo,LI Yanhong,ZHAO Jian,et al. Analytical method and conversion method for SEG-Y data[J]. Equipment for Geophysical Prospecting,2012,22(3):177-182.
- [8] 成新选,张留争,顿志平,等.SEG-D Rev3.0数据解析与应用分析[J].物探装备,2017,27(3):203-210.
CHENG Xinxuan,ZHANG Liuzheng,JIE Zhiping,et al. SEG-D Rev3.0 data parsing and application analysis[J]. Equipment for Geophysical Prospecting,2017,27(3):203-210.
- [9] 汪志群.多格式地震数据存取与转换技术研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
WANG Zhiqun. The research of multi-format seismic data access and conversion technology[D]. Daqing:Northeast Petroleum University,2016.
- [10] 赵玉合,臧胜涛,刘文卿,等.多数据融合处理技术在库车地区地震资料处理中的应用[C]//中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集,成都,2019:429-432.
- [11] 徐乐意,林秋金,胡坤,等.多方位拖缆地震数据融合处理在惠州凹陷的应用[J].天然气勘探与开发,2022,45(3):41-48.
XU Leyi,LIN Qiujin,HU Kun,et al. Application of fusion processing of multi-azimuth towing cable seismic data in Huizhou sag[J]. Natural Gas Exploration and Development,2022,45(3):41-48.
- [12] MOREAU M,LAINÉ J,SERRUT M. MEMS-based accelerometers: The quest for low frequencies and weak signals[C]//76th EAGE Conference & Exhibition,Jun. 16-19,2014:165-168.
- [13] LAINÉ J,MOUGENOT D. A high-sensitivity MEMS-based accelerometer[J]. The Leading Edge,2014:1234-1242.
- [14] TELLIER N,LAINÉ J. Understanding MEMS-based digital seismic sensors[J]. First Break,2017,35:93-100.
- [15] 魏继东.适用于陆上石油勘探的地震检波器[J].石油地球物理勘探,2017,52(6):1127-1136.
WEI Jidong. Suitable sensors for land seismic survey[J]. Oil Geophysical Prospecting,2017,52(6):1127-1136.
- [16] 任立刚,张剑.地震勘探中加速度信号转化为速度信号的分析及应用[J].地球物理学进展,2021,36(1):380-385.
REN Ligang,ZHANG Jian. Analysis and application of conversion acceleration signal into velocity signal in seismic exploration[J]. Progress in Geophysics,2020,36(1):380-385.

(责任编辑:高丽华)