

检波器反褶积对低频信息的补偿作用

魏继东*

(中国石化石油工程地球物理公司胜利分公司, 山东东营 257100)

魏继东. 检波器反褶积对低频信息的补偿作用. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 224-231.

摘要 动圈式模拟检波器接收到的数据在自然频率以下的低频成分被大幅度衰减, 这种相当于物理滤波的低频衰减可用传递函数做数学描述。从确定型号检波器的特性参数(如自然频率、阻尼、灵敏度等), 易得检波器系统的传递函数(频率效应), 再通过“检波器反褶积”补偿此低频衰减。该补偿会受到检波器允差和“非检波器振动系统输出噪声”两因素的影响。研究表明: 对于目前广泛采用的 10Hz 自然频率动圈式模拟检波器(如 20DX), 在当前地震勘探背景(多次覆盖、强噪声、耦合条件差异大且极弱信号识别能力有限)下, 上述两个因素对反褶积效果(表现为信噪比)影响较小; 通过检波器反褶积可将动圈式检波器损失的低频数据恢复到与 MEMS 数字检波器(无低频衰减)相当的水平; 对所有通过模拟检波器采集的以往地震数据(现场施加低截滤波的除外)做检波器反褶积, 可提高采集数据中低频分量的占比, 为后续处理、解释提供更宽频的高质量基础数据。

关键词 检波器反褶积 低频衰减 允差 模拟检波器 数字检波器 非机械振动系统输出噪声 机电比

中图分类号: P631 文献标识码: A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.02.003

1 问题的提出

作为地震勘探数据采集关键部件之一的检波器, 其性能的好坏直接关系到采集数据的质量及后续地质综合解释的效果。依托相关技术的进步, 根据输出数据的不同类型, 地震检波器的发展历经模拟检波器和数字检波器两个阶段。前者的典型代表为动圈式检波器, 如 20DX; 后者常见的为 MEMS 数字检波器, 如 Sercel 公司的 DSU3。对于这两种检波器之间(特别是低频端)的数据差异及导致差异的原因、低频信号的应用等, 前人进行了大量研究^[1-8]。

不同于 MEMS 数字检波器, 普通动圈式检波器的最显著特点是速度型, 即输出的电压值与速度数据在一定频带内具有线性关系; 而 MEMS 数字检波器为加速度型, 其输出电压值与加速度在一定频带内具有线性关系。二者的频率响应分别表示为

$$H_a(\omega) = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + 2j\zeta\omega\omega_n + \omega_n^2} \quad (1)$$

$$H_d(\omega) = \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + 2j\zeta\omega\omega_n + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: H_a 、 H_d 分别为动圈式模拟检波器和 MEMS 数字检波器的频率响应; ω 为角频率; ζ 为阻尼系数; ω_n 为自然频率; j 为虚数单位。这两类检波器的幅频曲线和相频曲线如图 1 所示。

从图 1 可见, MEMS 检波器(红线)无论在相频特性还是幅频特性方面均优于普通动圈式检波器(蓝线), 在地震勘探频带内基本没有畸变, 而动圈式检波器则存在很大的畸变(图中灰色阴影部分)。

笔者认为, 动圈式模拟检波器的低频畸变可在一定程度上通过“检波器反褶积”(即根据检波器已知的频率响应, 利用反褶积方法消除检波器滤波效应, 以补偿其损失的低频成分)加以纠正, 进而取得与 MEMS 数字检波器基本相当的低频接收效果。

根据获得因子方式的不同可将反褶积分为“确定性反褶积”和“统计性反褶积”。文献[9, 10]采用统计性反褶积法实施动圈式检波器的低频信息补偿。但统计性反褶积法存在两个问题: ①需要低频无衰减或衰减非常小的检波器作为期望输出, 这在很多情况下难以满足; ②期望输出与被反褶积信号都会受到噪声的影响, 信噪比都较低, 补偿因子难以保持稳定。作为一个传递系统, 检波器的传递函数

* 山东省东营市牛庄镇中国石化石油工程地球物理公司胜利分公司, 257086。Email: jidong.wei@aliyun.com

本文于 2015 年 1 月 4 日收到, 最终修改稿于 2016 年 1 月 29 日收到。

(频率响应)是已知的,故宜用确定性反褶积补偿低频信息。

实际在用的检波器各特性参数(阻尼、自然频率、灵敏度等)会随时间、环境等因素变化,与出厂标称值之间存在允差(Tolerance),而实时观测每个检波器的相关指标在现今技术条件下是不可能的。因此,允差的存在会影响确定性反褶积的效果。同时,依据动圈式模拟检波器工作机理,即使是在检波器指标合格,并被垂直、紧固地埋置于地面介质中的情况下,低频(主要是 1~3Hz 及以下)信息也

会大幅度衰减,低于此频带的机械振动(包含机械信号和机械噪声)的强度较“非检波器振动系统输出”(表现为多种“非系统噪声”,如热噪声、脱耦噪声(检波器耦合不好时)、采样噪声、非线性噪声等,见图 2)的强度会大大降低。因为“反褶积不会改变某个频率的信噪比”(此处可理解为由检波器正常输出的机械信号转换而来的电信号与“非检波器机械振动系统输出”的电信号的比值),如果前者较后者更弱,则该频段就难以通过检波器反褶积进行恢复。

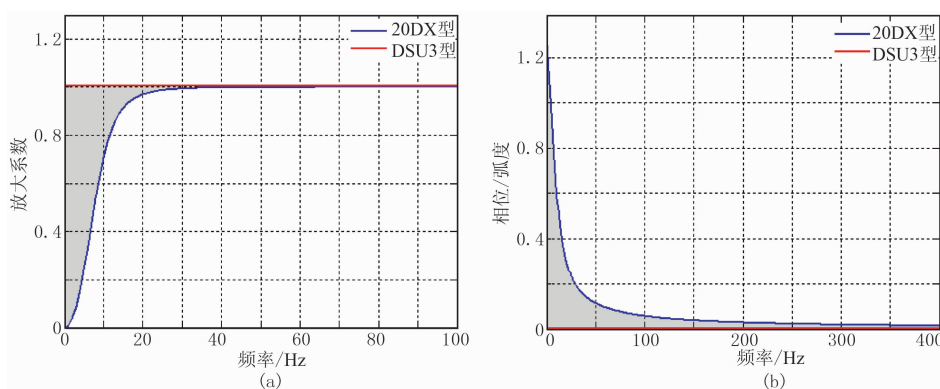


图 1 两类检波器的幅频响应曲线(a)和相频响应曲线(b)

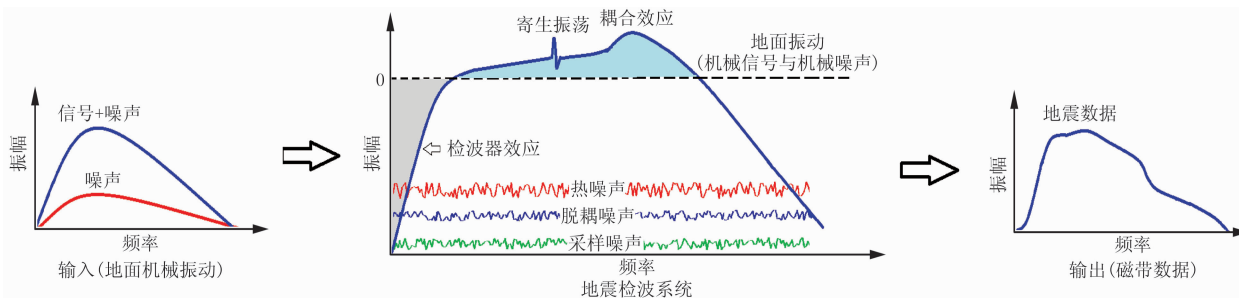


图 2 地震检波系统示意图

因此,本文将重点讨论允差和“非检波器机械振动系统输出”这两个因素对检波器反褶积低频信息补偿作用的影响。在上述多种非系统噪声中,热噪声具有一定的代表性,且在极低频段(1~3Hz 及以下)占据很大比例,故下文以热噪声为例,讨论非系统噪声对检波器反褶积效果的影响。

2 允差的影响

检波器各特性参数的实际值与标称值之间的可接受的误差范围称为允差。检波器各特性参数的实际值大多随时间、环境的变化而改变。工业用普通

动圈式检波器的允差通常为 5%,而允差更小(如 2.5%)的检波器被称为超级(或高精度)检波器。超级检波器的更高指标(表 1)主要体现在自然频率、阻尼和灵敏度等三个特性参数上。

灵敏度的变化对于检波器输出电压的影响相当于一种“乘”的关系。在现今以多次覆盖为基础的勘探背景下,无论是 5%,还是 2.5%的灵敏度允差,其影响无疑可通过统计效应加以消除。因此,重点讨论自然频率和阻尼两个因素的影响。

如果检波器自然频率和阻尼存在允差,其幅频曲线和相频曲线都会相应地偏离每个检波器固有的标准响应曲线(图 3)。

表1 超级检波器与普通检波器指标对比

参 数	PS-10ES 超级检波器	20DX-10Hz 常规检波器
自然频率/Hz	10±2.5%	10±5%
线圈电阻/Ω	375±2.5%	开路:395±5% 并 1kΩ:283±5%
灵敏度/(V·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	28.8±2.5%	28±5%
并电阻灵敏度/(V·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	20.9±2.5%(1kΩ)	20.1±5%(1kΩ)
开路阻尼	0.25	0.3±5%
并电阻阻尼	0.686(0~+5%)(1kΩ)	0.705±5%
谐波失真/(%)	≤0.1	≤0.2
假频/Hz	>240	>200
最大限位/mm	2	1.5
惯性体质量/g	11	11
外型尺寸(d×b)/mm ²	25.4×32	25.4×34
适用温度	-40℃~100℃	-40℃~100℃

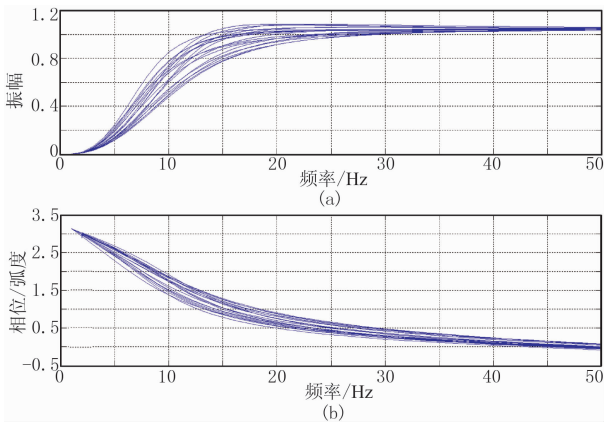


图3 有允差时不同检波器的幅频曲线(a)和相频曲线(b)

在多个检波器信号叠加的前提下,可模拟计算同一机械振动信号(相当于地面振动,图4a)输入不同允差检波器后得到的波形(图4b、图4c)。从图4可见:雷克子波经过检波器后,即使检波器没有允差,其波形仍发生了较大变化(图4b),这是由检波器滤波效应造成的;存在不同允差时,不同检波器输出不同的波形(图4c),这就是允差带来的影响。

对于动圈式检波器而言,其频率响应为式(1);当存在允差时,式(1)则变为

$$H_{ae}(\omega) = \frac{[\omega_n(1+e_{r_\omega})]^2}{-\omega^2 + 2j\zeta(1+e_{r_\zeta})\omega\omega_n(1+e_{r_\omega}) + [\omega_n(1+e_{r_\omega})]^2} \quad (3)$$

若仍采用标称参数做反褶积,则此时检波器反褶积的频率响应可表达为

$$H(\omega) = \frac{H_{ae}(\omega)}{H_n(\omega)} = \frac{[\omega_n(1+e_{r_\omega})]^2}{-\omega^2 + 2j\zeta(1+e_{r_\zeta})\omega\omega_n(1+e_{r_\omega}) + [\omega_n(1+e_{r_\omega})]^2} \times \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + 2\zeta\omega\omega_n + \omega_n^2} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: $H_{ae}(\omega)$ 为存在允差时检波器的频率响应; $H(\omega)$ 为存在允差时检波器反褶积的频率响应; r_ω 为自然频率允差; r_ζ 为阻尼允差; 其余参数同式(1)。

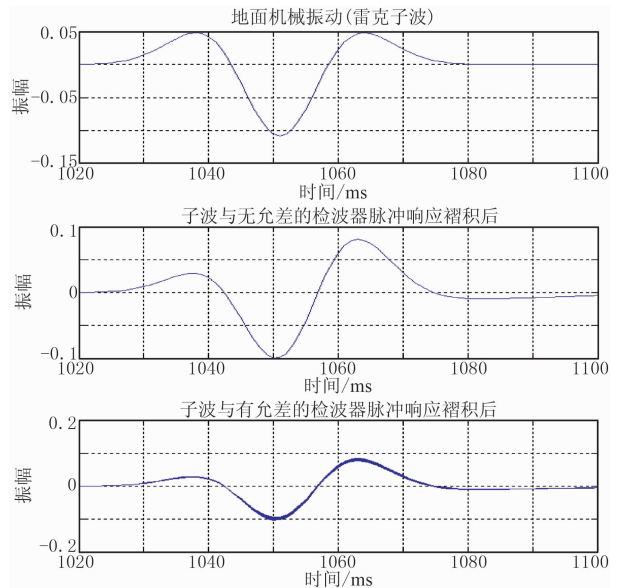


图4 检波器允差对地震子波的影响

图5展示了式(4)的幅频特性、相频特性及相移曲线。可见若检波器存在+5%误差(此处不是允

差)、但仍用检波器标称值做反褶积时,在 10Hz 以下会产生最多 10% 的振幅衰减(图 5a)、最大 0.08 的相位增加(图 5b)及 1ms 的时移(图 5c,10Hz 附近)。这看起来是一个较严重的结果!使人们担心存在允差时用标称参数对接收数据做反褶积会产生更大误差,这也诱导人们倾向于选用更小允差的检波器。

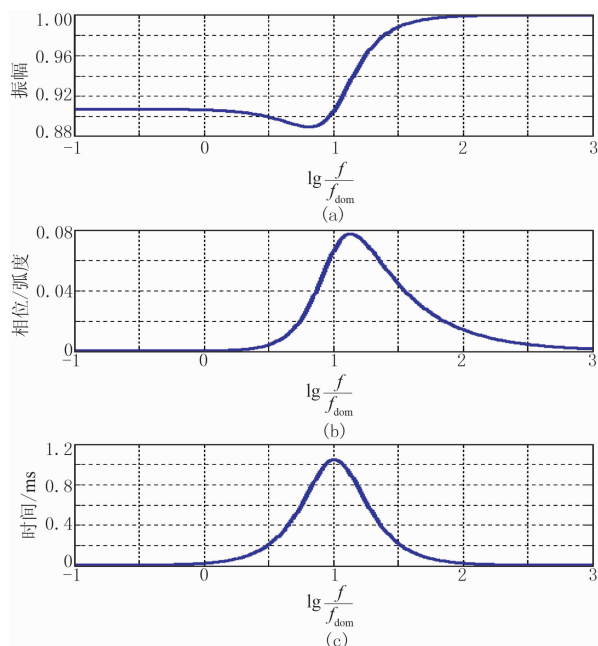


图 5 存在 5% 误差、用标称值做检波器反褶积时传递函数幅频(a)、相频(b)及相移(c)曲线(f_{dom} 为自然频率)

现今地震勘探建立在多次覆盖基础上,多次覆盖是衰减噪声的最有效方法之一。对于每个面元内包含的同一目的层的反射波而言,是由同一地震道内多个检波器以及同一道集内多个接收道叠加而成的。因此,当考查允差对检波器滤波效应及检波器反褶积的影响时,应站在多次叠加基础上、在统计角度上考虑问题。讨论允差对子波波形的影响时,应将多个检波器的输出进行累加,然后与不存在允差的检波器输出波形进行对比,才能判断允差对多次叠加后地震数据的最终影响。

假设某种检波器的允差在 5% 以内,另外一种检波器的允差在 2.5% 以内,该允差符合具有各态历经性质的平稳随机分布,可计算出经受允差影响的检波器输出(图 6,振幅谱)。从图 6 可见:在统计效应作用下,5% 允差(蓝线)与 2.5% 允差(粉线)及不存在允差(绿线)时的振幅差别非常小,即在统计效应作用下,5% 允差与 2.5% 允差的数据意义基本

一样;但当允差增加到 10% (黑线),甚至 20% (红线)时,振幅误差就显著增加,此时允差对地震信号的畸变作用就不容忽视了。因此,基于统计性效应,无论是灵敏度,还是自然频率、阻尼等参数的 5% 允差,均不会对地震波形产生明显影响,研发更小允差的高精度或超级检波器并无实质上的意义——仅提高机电学指标,不会体现到数据精度上。

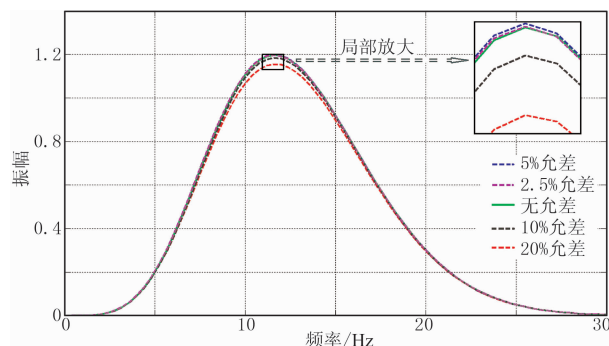


图 6 2.5%、5%、10%、20% 允差及无允差时 20 个检波器组合的振幅谱(30Hz 雷克子波)

在实际现场数据采集中,检波器组合很难总是被摆放到一个标准水平面上。在中国东部地区,不超过 1m 的组内高差被认为是符合施工标准的。若当地低速带速度约为 300m/s,则道内时差可达 3ms,这就远超出检波器反褶积形成的 $\pm 1\text{ms}$ 的误差。同时,叠加道集内反射信号自身差异、环境噪声及检波器—大地耦合条件差异等,都会产生远大于 5% 允差所造成的影响。图 7 为超级检波器(2.5% 允差,蓝)与普通检波器(5% 允差,红)的实际数据对比(相距数厘米),可见无论是其波形还是频谱都非常相似。

既然 5% 和 2.5% 允差及无允差(标称值)的检波器在经过多个检波器组合后的输出基本一致,那么根据标称值对多个检波器组合输出信号进行检波器反褶积,所得的结果就是可靠的。

3 非检波器机械振动系统输出噪声

受当前技术手段限制,由震源激发的地面机械震动的检测只能通过具有机电转换能力的检波器进行间接测量。地面振动中携带了人们期望识别的地球物理和地质信息,这是人们力争得到的(当然其中的噪声应尽量剥离)。在将地面振动转换为磁带数据的过程中,不可避免地会产生噪声(除有效反射以

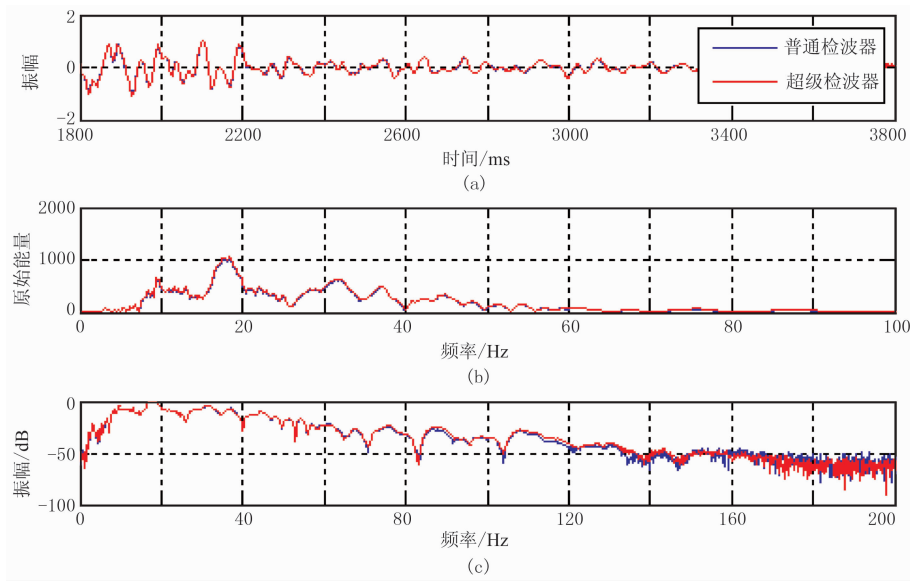


图7 36个普通(5%允差)和超级(2.5%允差)检波器组合后的波形(a)及其频谱(b,c)

外的所有信息)。如耦合条件差导致检波器摇晃产生的脱耦噪声,良好耦合时形成的耦合噪声,检波器歪斜造成的检波器机械系统畸变噪声,机电转换过程中产生的热噪声,模数转换过程中形成的采样噪声、检波器机械振动系统的非线性噪声等。这些噪声都不遵循检波器机械振动系统的传递规律,故在基于检波器传递函数做检波器反褶积时,将其都视为噪声。由于地面机械振动中包含的面波、折射波、次生干扰等噪声遵循检波器传递响应的规律,在做检波器反褶积时,可不被视为噪声(尽管在最终处理过程中仍将其视为噪声,图2)。

在检波器指标合格、被垂直埋置并与地面良好耦合的情况下,脱耦噪声、机械系统畸变噪声及采样噪声、非线性噪声等均较微弱,且耦合噪声主要影响

数据的高频段,所以下面以热噪声为例说明“非系统”噪声对检波器反褶积低频恢复效果的影响。

目前仪器中广泛存在的输入噪声是一种等效噪声,它是由各种电子元件产生、换算至入口处的热噪声,在不同前放增益条件下当输入短路时,由A/D(模/数)输出端测得的电压值折合到前放输入端的数值,一般为数微伏。该等效噪声经前放放大后输入A/D,决定了地震仪动态范围(表2,以428XL为例)。

从时域来看,即使是深层反射的能量也往往比热噪声强许多倍(图8),故很多时候热噪声对地震数据的影响会被忽略。但当采用动圈式模拟检波器,并希望以检波器反褶积恢复低频(特别是1~3Hz及以下)信号时,热噪声的影响就会显现出来。

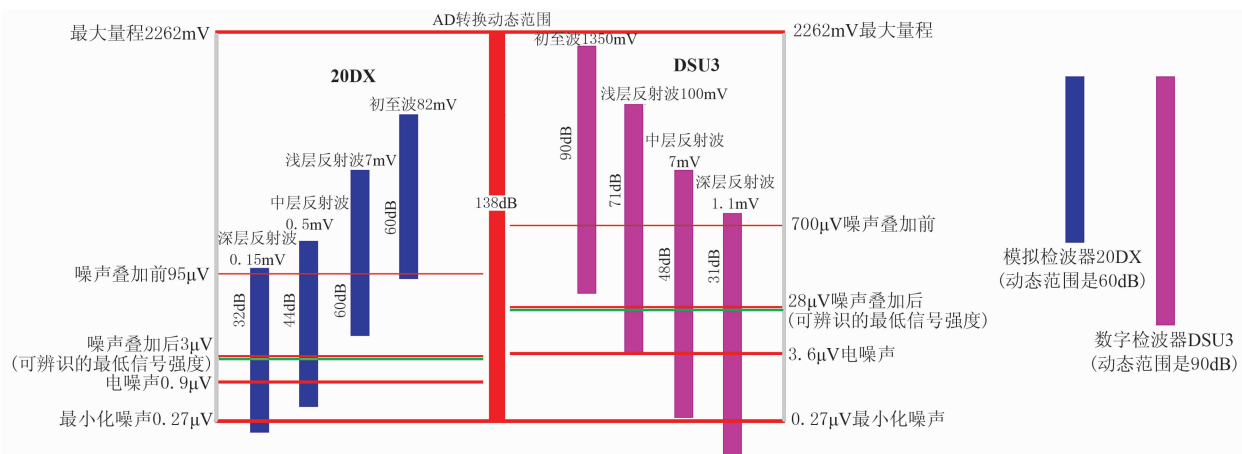


图8 东营HJ地区信号与噪声强度的相对关系

表 2 428XL 地震仪的动态范围

检波器/采样率	入口噪声~最大量程	动态范围
DSU3/4ms	1.8 μ V~2262mV	122dB
DSU3/1ms	3.6 μ V~2262mV	116dB
20DX/4ms	0.45 μ V~2262mV	134dB
20DX/1ms	0.9 μ V~2262mV	128dB

从机电转换角度看,地震仪输出数据包含两部分:机械振动转换的电信号和检波器、地震仪产生的热噪声。前者包含机械有效信号和机械噪声,后者是由设备产生的无用热噪声,故应越小越好。

对检波器传递函数而言,它反映的是机械振动系统的特性,通过该系统的机械信号均遵循其传递规律。因为检波器脉冲响应是最小相位的,若不存在电噪声及其他影响因素,则可通过脉冲反褶积将该系统的输出信号大体恢复为系统的输入信号。但电噪声并不服从检波器机械系统的传递规律,若在某个频段(如 1~3Hz 及以下),机械信号转换的电信号弱于热噪声转换的电信号时(二者对比关系可称为“机电比”:某个确定频率下机械信号转换的电信号与该转换过程中产生的热噪声误差之间的比值,见图9),将数据做检波器反褶积后,低频端信号

可能会呈现“过补偿”现象(图 10 左),这是由于低频端机电比较低导致的——因为反褶积不会改变单个频率的信噪比(此处等同机电比)。但当机电比较高时,通过检波器反褶积可较好地恢复地震机械信号(图 10 右)。

图 11 是用一个动圈式检波器(20DX)与一个 MEMS 数字检波器(DSU3)做对比的实例:每组一个 20DX、一个 DSU3 型检波器,二者相距约 10cm,共计 36 组;将该 36 组数据叠加后作为一个组合道输出。从该图可见,无论是近/小炮检距的浅层反射,还是远/大炮检距的深层反射,动圈式检波器 20DX 经过检波器反褶积后与 MEMS 数字检波器输出数据在 10Hz 以下低频段符合很好(中、高频段符合更好),这充分说明检波器反褶积对低频信号的补偿是有效的和可行的(DSU3 检波器在低频端无衰减)。对于曾经使用动圈式模拟检波器施工的地区,若基于检波器反褶积对已采集数据做低频补偿,则在浅、中层应可达到与加速度型 MEMS 检波器(电噪声影响其低频弱反射接收能力)相当的低频接收效果(已施加低截滤波者除外)。但在某些地区若深层反射太弱,或许会出现过补偿现象,需视具体工区的反射强度而定。

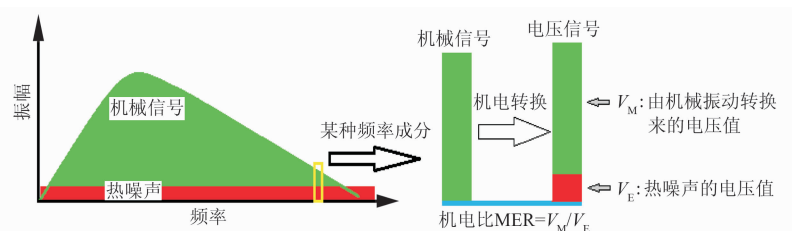


图 9 机电比的定义

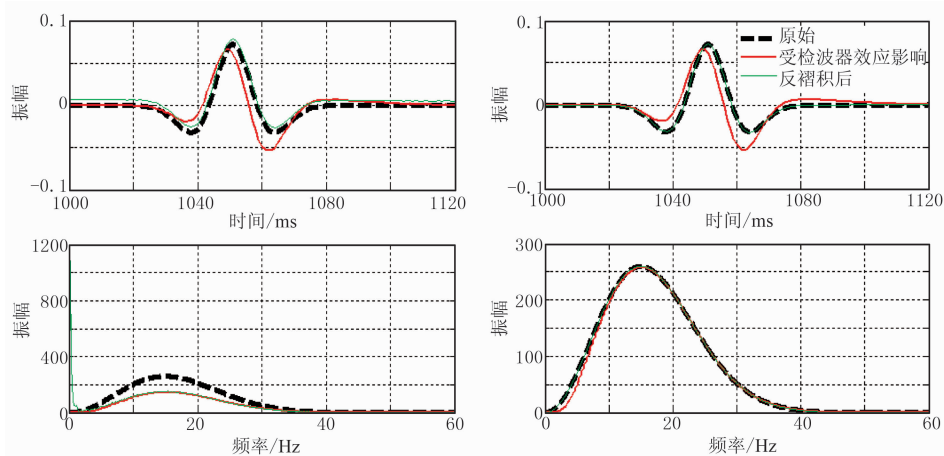


图 10 低(左)、高(右)机电比对检波器反褶积波形(上)及频谱(下)的影响

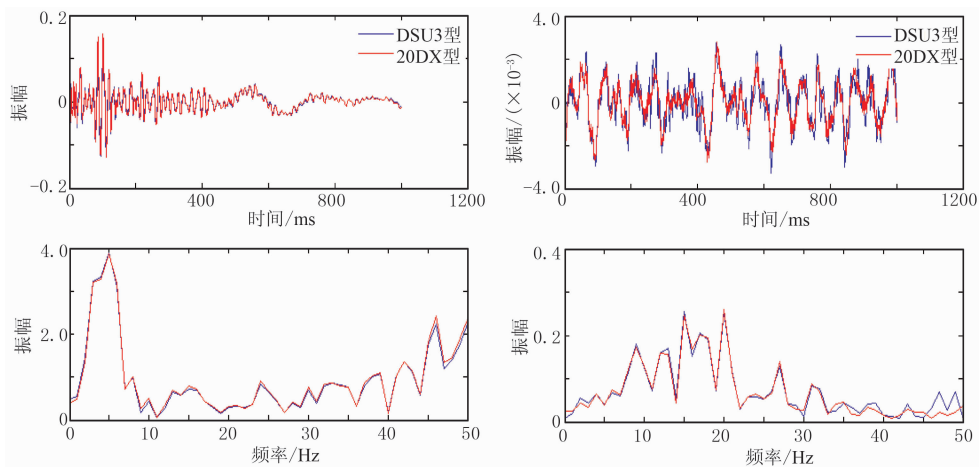


图 11 近(左)、远(右)炮检距检波器反褶积波形(上)及频谱(下)的对比(分别为 36 个单点检波器组合,加速度域)

从提高低频段机电比,进而提高检波器反褶积效果的角度而言,宜采用以下三种方法:

(1)降低动圈式模拟检波器主频。在灵敏度相同的情况下,4.5Hz 主频检波器比 10Hz 检波器的机电比大约提高 5 倍。但不良后果是检波器使用寿命降低,采集费用大幅增加。

(2)提高检波器的灵敏度,但会受到地震仪动态范围的限制。

(3)提高地震仪的动态范围,但可能受到设备制造及成本等诸因素制约。

如果震源激发的低频信息足够强,且能保证低频段有较高的机电比,则以上措施就没有必要了。

4 实际应用效果

从单道层面(图 11)看,动圈式模拟检波器 20DX

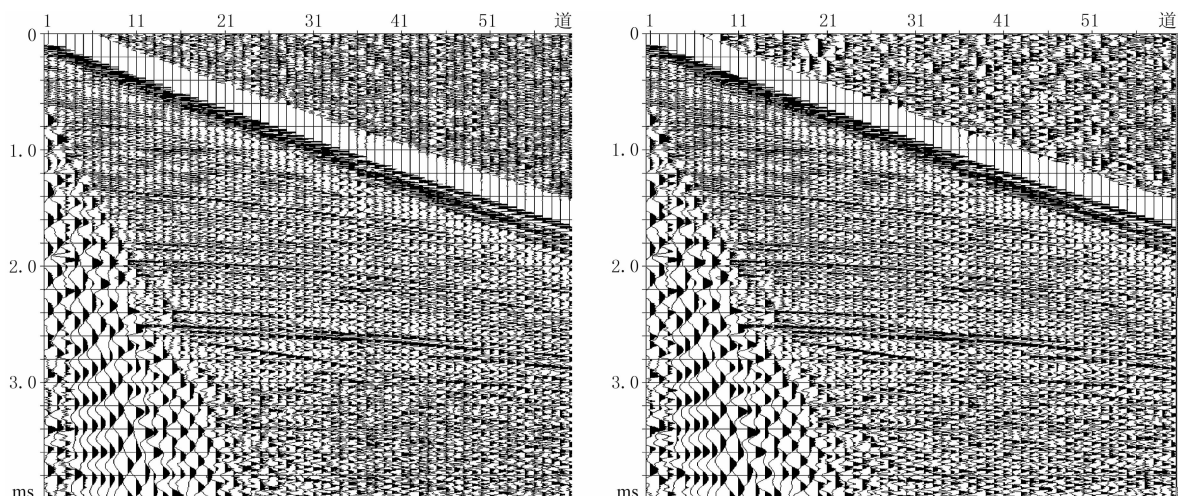


图 12 经过检波器反褶积后的 20DX 数据(右)与 DSU3 数据(左)的单炮比较(加速度域)

经过检波器反褶积后,其低频端与 MEMS 数字检波器 DSU3 几乎重合;从同时进行的单炮对比(图 12)可看出,二者非常一致。

在通过理论分析证明了检波器反褶积的有效性和可行性后,对 M 地区一条实际二维测线进行了检波器反褶积处理。从所得初叠剖面(图 13)看,其信噪比、同相轴连续性及深层成像效果均有大幅度提高或改善。但在处理过程中如何保护低频、将数据处理为最终剖面、展现地质效果,以及如何将恢复的低频信息用于波形反演、速度分析、低频阴影检测、深层成像等,还有待进一步研究。

5 结束语

(1)检波器反褶积在机电比较高的浅、中层可有效补偿因检波器机械滤波效应而衰减的低频成分。

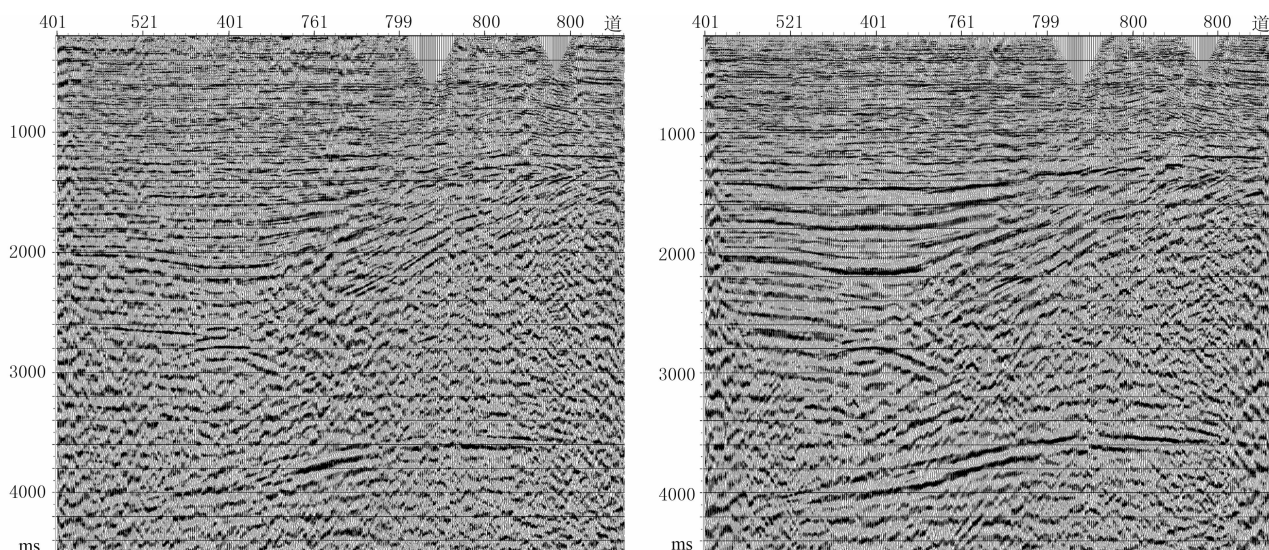


图 13 检波器反褶积前(左)、后(右)的初叠加剖面对比

因此,可对以往采用动圈式模拟检波器采集的数据(未施加低截滤波)做检波器反褶积,补偿低频成分,然后重新进行数据处理和综合解释,使老资料得到二次或多次利用。

(2)高精度(或超级)检波器在组合叠加后并不会接收到明显的、可感知的更高质量数据。

参考文献

- [1] 刘振武,撒利明,董世泰等. 地震数据采集核心装备现状及发展方向. 石油地球物理勘探,2014,48(4):663-675.
Liu Zhenwu, Sa Liming, Dong Shitai et al. The present situation and developing direction of seismic data acquisition core equipment. OGP, 2014, 48(4): 663-675.
- [2] 李庆忠,魏继东. 论检波器横向拉开组合的重要性. 石油地球物理勘探,2007,42(4):375-382.
Li Qingzhong, Wei Jidong. Discussing the importance of detector horizontal pull combination. OGP, 2007, 42(4): 375-382.
- [3] 罗福龙. 组合检波器的响应特性及效果试验. 石油地球物理勘探,2012,47(2):194-201.
Luo Fulong. The combination of detector response characteristics and effect test. OGP, 2012, 47(2): 194-201.
- [4] 王增明. 地震采集中检波器自然频率的试验分析. 石油地球物理勘探,2003,38(3):222-225.
Wang Zengming. Test and analysis of the natural frequency of geophone seismic acquisition. OGP, 2003, 38(3): 222-225.
- [5] 曹孟起,刘占族. 叠前时间偏移处理技术及应用. 石油地球物理勘探,2006,41(3):286-289.
Cao Mengqi, Liu Zhanzu. Prestack time migration processing technique and application. OGP, 2006, 41(3): 286-289.
- [6] 刁瑞,冯玉苹. 利用储层的频谱吸收特性识别油气藏. 石油地球物理勘探,2012,47(5):766-772.
Diao Rui, Feng Yuping. Hydrocarbon recognition based on spectrum absorption characteristics of reservoir. OGP, 2012, 47(5): 766-772.
- [7] 徐锦玺,吕公河,谭绍泉等. 检波器尾锥结构对地震采集信号的影响. 石油地球物理勘探,1999,34(2):204-209.
Xu Jinxi, Lü Gonghe, Tan Shaoquan et al. The influence of geophone tail cone structure upon acquired seismic signals. OGP, 1999, 34(2): 204-209.
- [8] 石战结,田钢,谷社峰等. 检波器与灰岩地表耦合效应的理论和试验研究. 石油地球物理勘探,2011,46(4):529-534.
Shi Zhanjie, Tian Gang, Gu Shefeng et al. Theoretical study and test on geophone limestone coupling effect. OGP, 2011, 46(4): 529-534.
- [9] Zhang Yimeng, Zou Zhihui and Zhou Huawei. Estimating and recovering the low-frequency signals in geophone data. SEG fall meeting, Las Vegas, 2012.
- [10] Chiu S K, Eick P, Davidson M et al. The feasibility and value of low-frequency data collected using co-located 2Hz and 10Hz. SEG fall meeting, Las Vegas, 2012.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



魏继东 高级工程师,博士,1974年生;2008年在中国海洋大学获海洋地球物理学博士学位;2009年在英国帝国理工大学做访问学者;发表专业论文近20篇、专著1部;现在中石化地球物理公司胜利分公司从事地震数据采集及信号处理方法研究。