

文章编号: 1000-1441(2004)05-0450-03

# 地层吸收衰减与地震仪器记录性能

袁子龙, 李婷婷

(大庆石油学院, 黑龙江大庆 163318)

**摘要:**要想分辨埋深 1500 m 以下厚度达到或接近 1 m 的地层, 要求地震仪器应能记录 1000 Hz 以上的高频信号, 瞬时动态范围应达到或接近 120 dB。无论是早期的集中式数字地震仪还是当代 24 位遥测地震仪, 均还远未达到这一技术要求。从均匀介质出发, 选择主频 150 Hz 的 Ricker 子波, 计算了地震波在地层传播过程中的能量衰减和频率吸收情况, 并在此基础上分析计算了地震仪器的瞬时动态范围和所能记录的信号最高频率。针对时间  $t_0$  大于 1.5 s 的地震反射, 计算结果表明其瞬时动态范围在 60 dB 左右, 所能记录的信号最高频率不超过 170 Hz。

**关键词:**地层吸收衰减; 地震仪器; 瞬时动态范围; 高频信号; 主频率; 分辨率

**中图分类号:** P631.43

**文献标识码:** A

地震勘探技术在石油精细勘探及开发领域的应用中, 面临一些挑战性技术问题, 其中最主要的问题是地震勘探分辨率的进一步提高。在砂泥岩结构的沉积盆地中, 埋深 2 000~3 000 m 处的地层, 地震资料可以分辨的地层厚度约为 10~15 m, 这样的分辨率远不能满足中国陆相沉积层识别薄互层的要求<sup>[1]</sup>。高分辨率地震勘探的基础工作是野外数据采集, 其中的采集仪器扮演着极其重要的角色, 与分辨率密切相关的仪器技术指标是瞬时动态范围和仪器记录高频信号的能力。但是, 无论是早期的集中式数字地震仪还是当代 24 位遥测地震仪, 只有在 200~300 m 的浅层才能记录 1 000 Hz 左右的信号, 并且仪器处于满标记录, 瞬时动态范围为 84 dB(集中式数字地震仪)或 114 dB(24 位遥测地震仪)<sup>[1,2]</sup>。埋深 km 以下的地层, 集中式数字地震仪或 24 位遥测地震仪的瞬时动态范围均在 60 dB 左右<sup>[1]</sup>, 记录高频信号的能力也在 200 Hz 以内, 这显然离高分辨率地震勘探的要求相差甚远。我们从地震子波在地层中传播的理论机制入手, 从理论上分析了地震仪器的瞬时动态范围和记录高频信号的能力。

## 1 地层吸收衰减计算

### 1.1 子波选择

理论研究中, 具有代表性的子波为 Ricker 子波

$$R(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] \exp[-(\pi f_p t)^2] \quad (1)$$
式中,  $f_p$  为峰值频率,  $t$  为地震波的旅行时间。用  $f_b$  表示主频率, 它与  $f_p$  的关系为  $f_b = 1.3 f_p$ <sup>[3]</sup>, 于

是(1)式又可以表示为

$$R(t) = [1 - 11.68(f_b t)^2] \exp[-5.84(f_b t)^2] \quad (2)$$

一般情况下, 中国陆相沉积盆地浅层地震反射波的主频率在 100 Hz 左右, 与此相适应, 选择子波的原始主频为  $f_b = 150$  Hz, 将其代入(2)式

$$R(t) = (1 - 26.28 \times 10^4 t^2) \exp(-13.14 \times 10^4 t^2) \quad (3)$$

### 1.2 地层吸收衰减

选择均匀地质模型, 并且以某一实际地区的参数为例( $v_0 = 1880$  m/s,  $\beta = 0.00026$ /m), 目的层以上的上覆地层平均速度为<sup>[4]</sup>

$$v_{av} = \frac{2}{\beta t_0} \left[ \exp\left(\frac{v_0 \beta t_0}{2}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

式中,  $t_0$  为上覆地层垂直入射的双程旅行时间。根据文献<sup>[5]</sup>, 同时将球面扩散因素考虑在内<sup>[6]</sup>, 并以平均速度代替纵波速度, 球面波在地层中传播的振幅吸收衰减因子可表示为

$$D(f, t_0) = \frac{1}{t_0 v_{av}} \exp(-0.224 f t_0 / v_{av}^2) \quad (5)$$

分别选择  $t_0$  时间为 0.2 s(浅层)、1.5 s(中深层)和 2.5 s(深层)代入(4)式和(5)式。 $t_0$  时间确定以后,  $v_{av}$  即为常数, (5)式仅仅是频率  $f$  的函数, 反映频率越高, 地层吸收衰减越严重。将(3)式进行傅里叶变换, 在频率域内将  $R(t)$  的振幅谱函数与地层吸收衰减因子相乘, 之后再将其变换至时间

收稿日期: 2003-10-08; 改回日期: 2003-11-21。

作者简介: 袁子龙(1961—), 男, 教授, 现主要从事高分辨率地震数据采集方面的研究。

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(E0317)资助。

域,这样就获得了子波经地层传播以后的结果,以此定性分析子波经地层传播以后的能量衰减和频

率吸收特性。表 1 是地层吸收衰减计算结果的参数统计,其中振幅  $A$  已经做了统一线性处理。

表 1 地层吸收衰减参数统计

$t_0/s$	$v_{av}/(km \cdot s^{-1})$	$G/(dB \cdot Hz^{-1})$	$A/mV$	$f_b/Hz$
0			3 773. 585	150. 0
0. 2	1. 927	0. 092	400. 000	106. 0
1. 5	2. 271	0. 481	1. 448	32. 5
2. 5	2. 592	0. 599	0. 404	26. 0

## 2 地震仪器性能指标分析

### 2.1 仪器记录的瞬时动态范围和最高频率

#### 2.1.1 集中式数字地震仪

DFS-V 型仪器是集中式数字地震仪的典型代表,其采集系统的信号通道如图 1a 所示<sup>[7]</sup>,选择前置放大器的增益为  $2^4$ ,此时仪器的等效输入噪声为  $0.6 \mu V$ ,IFP 放大器的电压比较窗口为  $1.46 \sim 7.11 V$ ,14 位 A/D 的基本量化电平为  $0.5 mV$ (当电压小于  $0.5 mV$  时,A/D 记录全 0),瞬时动态范围与信号频率的关系如图 2a<sup>[8]</sup>。当浅层地震反射波到达时( $t_0 = 0.2 s$ ),进入 IFP 放大器的入口电压为  $2^4 \times 0.4 = 6.4 V$ ,它处于 IFP 电平窗口之内,故 IFP 放大器的增益为  $2^0$ ,进入到 A/D 的噪声电平为  $0.6 \times 2^4 \times 2^0 = 9.6 \mu V$ ,该噪声电平在 A/D 中反映不出来,主频为  $106.0 Hz$ 、振幅为  $6.4 V$  的地震波占居了 14 位 A/D 的最高位,故瞬时动态范围达到最大,为  $84 dB$ ,随频率的升高,振幅迅速衰减,瞬时动态范围变小,当频率升高至  $951 Hz$  时,振幅将衰减到  $0.5 mV$ ,所以能记录的信号最高频率为  $951 Hz$ ;当中深层地震反射波到达时( $t_0 = 1.5 s$ ),进入 IFP 放大器的入口电压为  $2^4 \times 1.448 = 23.168 mV$ ,IFP 放大器的最佳增益为  $2^6$ ,进入 A/D 的信号电压为  $1482.752 mV$ ,噪声电平为  $0.6 \times 2^4 \times 2^6 \times 10^{-3} = 0.614 mV$ ,该噪声电平占居 14 位 A/D 的最低位,主频为  $32.5 Hz$ 、振幅为  $1.48 V$  的地震波占居 14 位 A/D 的中间 11 位,最高 2 位是空位,故瞬时动态范围为  $66 dB$ ,当频率升至  $170.0 Hz$  时,信号振幅衰减至噪声以下,所以能记录的信号最高频率为  $170.0 Hz$ ;当深层地震反射波到达时( $t_0 = 2.5 s$ ),进入 IFP 放大器的入口电压为  $2^4 \times 0.404 = 6.464 mV$ ,IFP 放大器的最佳增益为  $2^8$ ,进入 A/D 的信号电压为  $1654.784 mV$ ,噪声电平为  $0.6 \times 2^4 \times 2^8 \times 2^{-3} = 2.458 mV$ ,该噪声电平

占居 14 位 A/D 的低 3 位,主频为  $26.0 Hz$ 、振幅为  $1654.784 mV$  的地震波占居 14 位 A/D 的中间 9 位,最高 2 位是空位,故瞬时动态范围为  $54 dB$ ,当频率升至  $116 Hz$  时,信号振幅衰减至噪声以下,所以能记录的信号最高频率为  $116 Hz$ 。

#### 2.1.2 24 位遥测地震仪

SN388 型仪器是当代 24 位遥测地震仪的典型代表,其采集系统的信号通道如图 1b<sup>[7]</sup>,选择前置放大器的增益为  $2^2$ ,此时仪器的等效输入噪声为  $0.4 \mu V$ ,进入 A/D 的噪声电平为  $4 \times 0.4 = 1.6 \mu V$ ,它占居 24 位  $\Delta-\Sigma$ A/D 的低 4 位,这也是信号可记录的死亡线,瞬时动态范围与信号频率的关系如图 2b。当浅层地震反射波到达时( $t_0 = 0.2 s$ ),进入 A/D 的信号电压为  $4 \times 0.4 = 1.6 V$ ,使 24 位  $\Delta-\Sigma$ A/D 记录处于满标状态,瞬时动态范围达到最大,为  $114 dB$ ,当频率升至  $1341 Hz$  时,信号振幅衰减至噪声以下,所以能记录的信号最高频率为  $1341 Hz$ ;当中深层地震反射波到达时( $t_0 = 1.5 s$ ),进入 A/D 的信号电压为  $4 \times 1.448 = 5.792 mV$ ,该电平占居 24 位  $\Delta-\Sigma$ A/D 的中间 11 位,瞬时动态范围为  $66 dB$ ,当频率升至  $170 Hz$  时,信号振幅衰减至噪声以下,所以能记录的信号最高频率为  $170 Hz$ ;当深层地震反射波到达时( $t_0 = 2.5 s$ ),进入 A/D 的信号电压为  $4 \times 0.404 = 1.616 mV$ ,该电平只占居 24 位  $\Delta-\Sigma$ A/D 的中间 10 位,瞬时动态范围仅为  $60 dB$ ,当频率升至  $126 Hz$  时,信号振幅衰减至噪声以下,所以能记录的信号最高频率为  $126 Hz$ 。

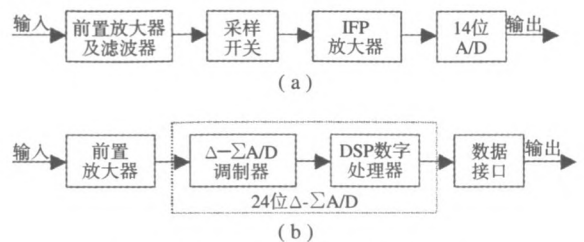


图 1 地震仪器采集系统信号通道  
(a)集中式数字地震仪;(b)24 位遥测地震仪

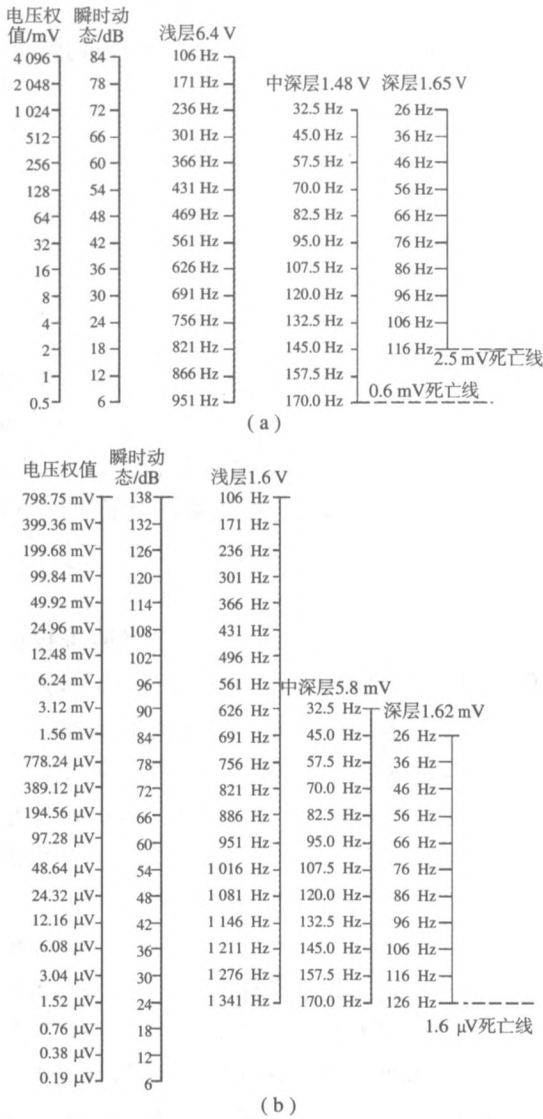


图 2 地震仪器瞬时动态范围与信号频率关系  
(a)集中式数字地震仪(DFS-V);(b)24 位遥测地震仪(SN388)

2.2 可分辨地层的最小厚度——垂向分辨率

根据可记录信号的最高频率  $f_h$  和速度  $v_{av}$ , 可以推算出垂向分辨率  $\Delta H$ ,  $f_h$  的确定依据图 2 和仪器的最高采样率。针对 DFS-V 数字地震仪, 最高采样率为 0.5 ms, 仪器的高端截止频率为 500 Hz, 它小于图 2a 中的最高频率 951 Hz, 所以仪器可记录的浅层最高频率为 500 Hz; 对于 SN388 遥测地震仪, 最高采样频率为 0.25 ms, 其高端截止频率为 1600 Hz, 它大于图 2b<sup>[8]</sup> 中的最高频率 1341 Hz, 所以仪器可记录的浅层最高频率为 1341 Hz。有了最高频率, 按照带宽 3 个倍频程的要求, 可计算最高主频率  $f_{bh}$  和垂向分辨率  $\Delta H$ <sup>[9]</sup> 为

$$\left. \begin{aligned} f_{bh} &= 0.5625 \times f_h \\ \Delta H &= v_{av} / 4f_{bh} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

计算结果统计如表 2。

表 2 最高主频率与垂向分辨率

仪器类型	$f_{bh}/\text{Hz}$			$\Delta H/\text{m}$		
	2.5s	0.2s	1.5s	2.5s	0.2s	1.5s
DFS-V	281	96	65	1.7	5.9	10.0
SN388	754	96	71	0.6	5.9	9.1

3 结束语

在高分辨率地震数据采集工作中, 更加重视的是地震仪器的瞬时动态范围, 它由模数转换器的位数及勘探目的层埋藏深度来决定。早期的集中式数字地震仪, 针对浅层、中深层和深层, 它的瞬时动态范围分别为 84 dB、66 dB 和 54 dB; 当代 24 位遥测地震仪的瞬时动态范围分别为 114 dB、66 dB 和 60 dB。石油与天然气均埋藏在 km 以下的地层中, 两类仪器在此深度以下的瞬时动态范围均不超过 70 dB, 这还远远满足不了高分辨率地震勘探的需要。其次应该重视的是仪器对高频信号的记录能力, 它直接决定了仪器的垂向分辨率。导致高频信号难以记录的根本原因是地层的吸收衰减作用, 在这方面两类仪器的性能相差无几。浅层均具有较高的垂向分辨率(1 m 左右), 到了中深层以下地层, 垂向分辨率均较低(近 10 m), 满足不了石油勘探与开发对地震勘探分辨率的要求。

参 考 文 献

- 1 陈祖传. 发展适应我国需要的新一代物探仪器[J]. 石油仪器, 1997, 11(5): 3~10
- 2 唐建人, 李勤学. 高分辨率地震勘探理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 38~40
- 3 钱绍瑚, 刘来祥. 零相位子波的垂向分辨率[J]. 石油物探, 1998, 27(2): 1~9
- 4 董敏煜. 地震勘探[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2000. 181~183
- 5 袁子龙, 曹广华. 频谱均衡滤波器的改进[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 25(1): 10~13
- 6 钱绍瑚, 李套山, 高洪强, 等. 地震仪器对高频信息可记录性的影响及其试验[J]. 石油物探, 1996, 35(1): 38~51
- 7 袁子龙, 曹广华, 张庆国. 应用地球物理仪器基础[M]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003. 50~56
- 8 李庆忠. 地震高分辨率勘探中的误区与对策[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 751~783
- 9 袁子龙, 庄红艳. 高分辨率地震数据采集系统中的低切滤波器[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(3): 297~299

(本文编辑: 潘中平)