

# 提高地下金属管振动波测试中 冲击响应信号的信噪比

韩修廷, 王洁春, 焦振强, 高飞, 宋宇波

(大庆油田有限责任公司采油工程研究院, 大庆 163453)

**[摘要]** 提出了在套损振动波检测过程中提高信号信噪比的方法。检测过程中, 在井口敲击套管并接收、分析套管的回波, 以了解介质的变化情况。由于反射波信号强度较微弱, 单纯用一组接收信号无法进行正确的套损分析, 采用信号增强方法, 即利用多个类似信号进行叠加, 增强反射波的有效信号, 降低背景噪声, 从而得到有用信息, 进行正确的套损状况分析。开发了相应的信号处理软件, 提高了信号处理速度。通过 10 井次的测试表明, 技术原理可行, 软件工作稳定、可靠, 便于操作, 可以进行多种方法的信号处理, 极大地提高了工作效率。

**[关键词]** 振动波; 反射波; 信号增强; 信号叠加

**[中图分类号]** TN911.72

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1009-1742(2005)10-0064-05

## 1 前言

由于大庆油田油、水井套管损坏相当严重, 影响到油田的正常生产, 因此套损已经是油田可持续发展面临的严重问题。对于油水井的套损状况检查目前主要是以多臂井径测试和井壁超声成像为主。前者测试简单、快捷, 费用不很高; 后者给出的套管测试部位的三维直观图象可读性好, 但解释周期较长, 测试成本高, 且两者都需要在停产作业的条件下进行测试, 增加了作业费用, 耽误原油生产。所以采用不用动管柱就能进行套损状况测试的方法成为生产井套损现状普查亟待解决的问题。

振动波测试技术是通过激励被测件, 使之产生机械振动, 应变波在介质中传播时遇到介质的几何性质及波阻抗发生变化时会产生波的反射、漫射和衍射, 反射波的频率、相位发生变化, 通过分析这些信号的特性, 推断介质的形状、质量等变化。它的特点是经济、简易、快速、高效又不影响生产。但就目前该技术的发展状况, 要达到理想的测试水平还有很多工作要做。由于声波的反射信号较弱,

在井口的法兰盘上安装数只传感器, 以此接收振动波的反射波。由于声波信号以指数形式衰减, 套管的长度一般在 1 000 m 以上, 因此接收到的对应信号实际上相当微弱, 有时甚至 500 m 以上的反射信号强度与背景噪声强度具有相同的数量级, 也就是说有用信号已经淹没在背景噪声中。对于这样的信号, 如果不进行信号处理, 一般是无法利用的。

图 1 是一个典型的冲击响应信号。 $X(i)$  以后的信号与  $T_0$  前的背景噪声的强度基本一样。因此, 对于这样的响应信号, 必须采用适当的信号处理方法来提高信噪比, 以便从中提取有用的信息。

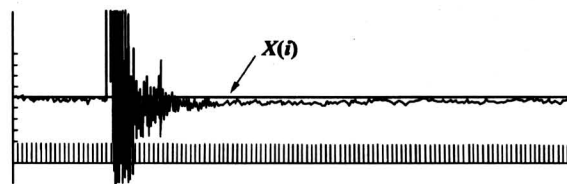


图 1 振动波的冲击响应信号

Fig.1 A response signal of plus vibrating

**[收稿日期]** 2004-09-13; **[修回日期]** 2004-10-18

**[作者简介]** 韩修廷 (1957-), 男, 山东郯城县人, 大庆油田有限责任公司科技发展部教授级高级工程师, 博士生导师

## 2 信号增强的理论依据

对于上面的冲击响应信号来说，信号与噪声具有加和性，即总信号是由有用信号加上噪声组成的，可表示为：

$$Y(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中： $s(t)$ ，有用信息量； $n(t)$ ，背景噪声； $Y(t)$ ，获取的实际信号； $t$ ，采样时间序列，取整数。

多组有用信息的和  $S(t)$  表示为：

$$S(t) = s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_i(t) + \dots + s_n(t) = \sum s_i(t) \quad (2)$$

其中  $s_i(t)$  为第  $i$  组数据。

对于任意  $s_i(t)$ ，是在人为施加的脉冲能量后由介质的应变特性产生的响应，因能量逐渐消失而具有渐进稳态性。其值对应着相应时刻对应深度部位的反射信号能量值的大小。该能量值对应着反射界面的形变与连续特性。由于振动波在同一介质中的传播速度是恒定的，因此每一次的  $s_i(t)$  中，相同时间的采样数据应该包含被测介质相同深度的物理信息，叠加后的信息量只会增强而不是减弱。

背景噪声的和， $N(t)$ ：

$$N(t) = n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_i(t) + \dots + n_n(t) = \sum n_i(t) \quad (3)$$

由于背景噪声不是由冲击能量的施加而产生的，其能量来自被测介质外的自然界，因此具有非稳态性和随机性，为随机噪声，由于其概率分布为均匀分布，可视为白噪声，在无数多组类似信号叠加后，其均值趋于零。即：

$$N(t) \rightarrow 0,$$

即便背景噪声为有色噪声，经多次叠加后其值趋于一个常数  $C$ ，即：

$$N(t) \rightarrow C,$$

该常数可以在式中减去  $C$  而消去。这样，由式 (1)，式 (2)，式 (3) 式可得：

$$Y_n(t) = s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_n(t) + n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_n(t) = \sum s_i(t) + \sum n_i(t) = \sum s_i(t) + 0 = \sum s_i(t) \quad (4)$$

从上式可以看到，对于一个特定的振动波冲击

响应信号，在按相同相位进行多组信号叠加后，不会因采集的信号的多组叠加后造成有用信息丢失，相反，叠加信号会将因单一冲击响应信号采集时的采样间隔丢失的信息陆续地概括在一起，从而使信息量更丰富，更有利于进一步的特征分析。

## 3 信号叠加技术

对于采集的冲击响应信号，每次采集的数据包含了数次振动波冲击信号，数据长度达数万到数十万。如何采用有效的方法进行正确的信号叠加是至关重要的。

1) 基准点的确定。采用信号叠加法，不仅要减低噪声，还要保证信息位置的准确。所以信号的相位确定至关重要。在此我们确定以脉冲的第一个上(下)跳沿为相位基准点 ( $T_0$  点)，按此基准进行数据的叠加，如图 2 所示。

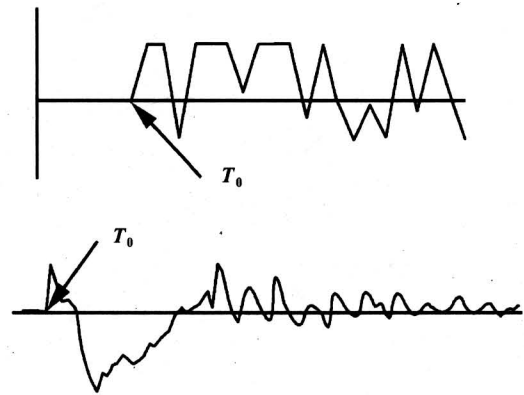


图 2  $T_0$  点的确定示意

Fig.2 Sketch of  $T_0$  point setting

2) 数据长度的设定。叠加信号的数据长度应根据套管深度以及采样参数如采样频率、波速等确定，应满足下式：

$$D_L > 2 * D_t * F/V \quad (5)$$

其中， $D_L$ ，数据长度 ( $T_0$  后长度)； $D_t$ ，套管深度； $F$ ，采样频率； $V$ ，介质中波的速度。

$T_0$  前的数据也是必要的，其值  $V_{P,P}$  的大小是背景噪声的体现。

3) 叠加后信噪比的比较方法。信噪比是表征采样数据中 有用信息与噪声相对值，一般用对数值的比表示。由于振动波的脉冲响应的特点是头大尾小，信号值的选取应在我们感兴趣的数据附近，背景噪声则在  $T_0$  前的数据中选取最大的峰峰值，即

$V_{P,P_0}$

$$S/N = 10 \lg(P_S / P_N) \text{ (dB)} \quad (6)$$

其中,  $P = V_{P-P}^2 / 2;$  (7)

$V_{P-P}$ 为信号的峰-峰电压值。

### 4 软件实现

由于仪器及测试环境对测试过程中信号的采集有一定的影响,并不能保证每一次的冲击响应信号都是合格可用,因此信号叠加时需要对所加的信号进行目测,选取合格的冲击响应。为此,设计编制了数据叠加软件。软件界面见图3。

该软件目前包含了3个模块。其中振动波信号叠加模块用于振动波冲击响应的叠加处理。界面有一般的文件操作菜单及相应操作键。原始波形图框用于浏览原始波形,确定所要选定的波形的相位点,设定  $T_0$  点前后的数据长度,并可将原始图形进行纵轴(幅值)及横轴(时间)的放大,以利于数据的观察与相位点的精确确定。叠加波形图框则是观察叠加图形的窗口,附带的操作键可进行放大、存储、打印、清除等文件操作。如果对当前所叠加的数据图形不满意,则可以点击“清结果波形”键来清除该叠加数据。

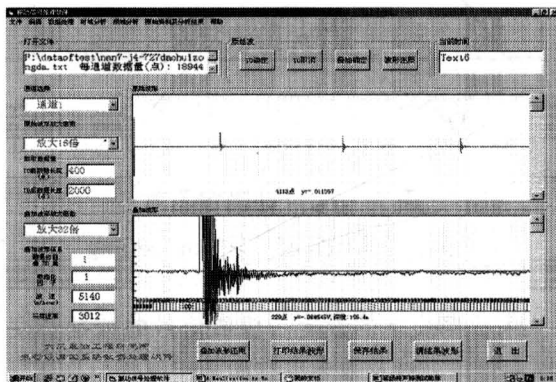


图3 信号处理软件数据叠加模块的界面

Fig.3 Interface of signal processing software

点击“保存结果”键可将当前已经叠加的数据保存为TXT格式的文件。存储后的文件可被其他模块的信号处理程序打开,进行后续的信号处理,如固有模式函数、差分运算等。

从图中可以看出,  $T_0$  前的数据反映了背景噪声具体情况,  $T_0$  后的数据则是总信号的具体表现。叠加信号的信噪比就是由这两个部分对比而得。波速和采样速率的值可以根据实际情况设定,其值的

大小直接影响数据点代表的油(套)管的深度值。

### 5 效果

例1:图4a中的信号是用压电加速度传感器经电荷放大后采集到的振动波的加速度脉冲响应信号,压电加速度传感器的频率响应为54000 Hz,采样速率为3011点/s。图4是叠加前后的对比,其中第一幅为一组采样数据,是仪器的一个输入通道的3个按时间顺序排列的振动波冲击响应信号。第二幅为冲击响应采样过程中3个冲击响应的其中之一放大信号,图中能清晰地看出冲击前的随机背景噪声。第三幅为以这3个冲击响应为叠加数据源,按同相位叠加后的信号图形。

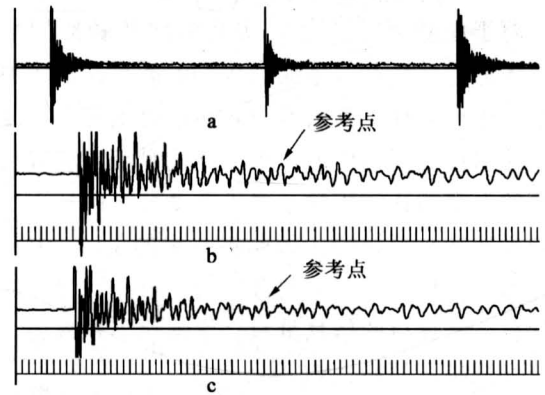


图4 原始信号与叠加后的信号的对比图形

Fig.4 Comparison between non-superposition and superposition signal

从图中能看出,叠加3次后的信号的波形与单一的原始波形相比没有明显的变化,但信噪比有了明显地改善。事实上,在以参考点为基准的信号的信噪比为:

$$S/N(\text{原始}) = 10 * \lg(0.792^2 / 0.102^2) = 17.802 \text{ dB};$$

$$S/N(\text{叠加}) = 10 \lg(2.036^2 / 0.105^2) = 25.752 \text{ dB}.$$

叠加后信号的信噪比是原来的提高了7.95 dB。由此可以看出,采用上述方法可以显著改善信号的可用性,提高冲击响应信号的信噪比。

例2:图5是南7-j4-727井的一个振动波脉冲响应曲线,图6是南7-j4-727井的一组文件中3个脉冲响应的叠加数据图。传感器的频率响应带宽为5~4000 Hz,采样速率为3011点/s。从图中可以看出,叠加后的数据图  $T_0$  前的背景噪声没有明显

地增加, 但响应信号增加了近 3 倍, 响应的信噪比也增加了 3 倍。



图 5 南 7-j4-727 原始数据图形

Fig.5 Original vibration signal

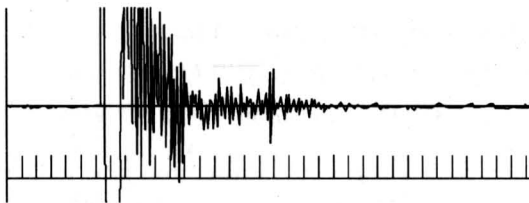


图 6 南 7-j4-727 3 组数据叠加图形

Fig.6 Processed signal with several superpositions

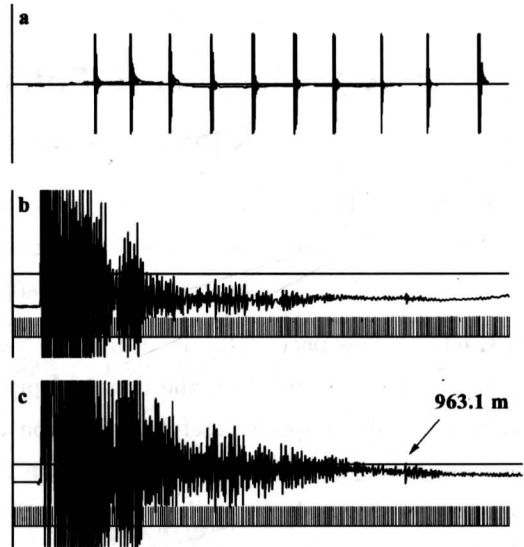
例 3: 图 7 为在四厂进行的杏 474-2333 井的试验测试资料, 主要目的是检验振动波测试是否能够检测到 1 000 m 长的油管的端面反射信号。

该井设计下  $\phi 60$  油管 126 根, 长为 1 055.07 m, 另外下端还有 100 多 m 的  $\phi 55$ 、 $\phi 52$  的工具及封隔器。信号采集是在已经下了 116 根油管后对油管进行测试而获得。压电传感器紧贴在油管端面, 采样频率设定为 6 000 点/s。用铁锤以一定间隔敲击 10 次, 采集到的响应信号见图 7 (a)。图 7 (b) 是图 7 (a) 中的 10 个响应信号之一。图 7 (c) 是图 7 (a) 中的 8 个响应信号的叠加组合。从图 7 (c) 中可以看出, 经多次叠加处理后的信号在冲击响应前的背景噪声比未叠加的信号 (图 7 (b)) 的噪声要小得多, 而且在 963.1 m 处的油管端面反射信号明显增强, 也就是说叠加后的信号的有用信息得到了增加。这说明该信号叠加技术在降低背景噪声、增强有用信息方面确有较好的效果。

## 6 应用范围

上述信号叠加处理方法适用于具有较高初始频率的脉冲响应信号, 并要以较高采样速率对信号进行 A/D 转换, 即满足 SANON 采样定理的要求。在油田现场测试中一般采样频率为 3 000 ~

20 000 Hz。运用同相位叠加处理方法, 对同一检测介质的同种振动波冲击响应信号及类似信号有明显的提高信噪比、增加信息量的作用。在以相同相位点为基准进行叠加时, 数据序列的相位点偏差不应该超过 1 点, 也就是说在此范围内数据信息的位置偏差不会超过 0.25 m (采样频率 10 kHz 时)。否则可能降低信号的可用度。



a. 为一次测试过程中的 10 个振动冲击响应;  
b. 为 10 个冲击响应的其中之一; c. 为将 10 次冲击中的 8 个响应进行叠加处理后的信号

图 7 杏 474-2333 井的现场测试信号

Fig.7 An example of vibration signal with superposition

## 7 应用前景分析

信号叠加技术可提高振动波测试信号的信噪比及改善信息捕获率。该技术有望在下述方面得到具体的应用: a. 套损井振动波测试技术; b. 钻井过程中的钻杆损伤检查技术; c. 抽油机的油杆损伤检查技术; d. 输油管损伤检查技术; e. 地下连续管道损伤检查技术。

## 8 结论

论证了信号叠加原理的可行性, 给出了信号叠加方法, 利用编制的专业软件进行了 10 多口井的振动波信号的叠加增强处理。实践证明, 信号叠加方法去除随机背景噪声原理可行, 实现方法简单, 叠加软件界面友好, 操作简单方便且直观, 处理信号效率较高。处理后的信号信息量有所增加。

## 参考文献

- [ 1 ] Microsoft corporation: Visual Basic6. 0 Programmer's Guide 中文版程序员指南 [M]. 北京: 北京希望电脑公司
- [ 2 ] Huang N E, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. The Royal Society, 1996, 4: 903~995
- [ 3 ] Boggess A , Narcowich F J. A First Course in Wavelets with Fourier Analysis [M]. 北京: 电子工业出版社, Pearson Education Inc.

## A Realization to Enhance the Signal Noise Ratio With Superposition on the Same Phase Signal

Han Xiuting, Wang Jiechun, Jiao Zhenqiang, Gao Fei, Song Yubo  
(*Research Institute of Petroleum Production and Engineering, Daqing Oilfield Corporation Ltd, Daqing, Heilongjiang 163453, China*)

[Abstract] This paper talks about method to enhance vibration signals gotten by hitting iron pipe to cause a vibrating response from which the damaged pipe information will be found. However, the reflection wave is usually too weak to acquire useful information correctly. The method, in which multiple similar signals are superposed, can not only decrease the noise in the signal, but also receive more message that may be lost before because of the interval of sample collection. Since the noise in signals could be treated as white noise, after multiple superposition the added noise will become to zero. The programmed the software to performs efficiently and conveniently. There are some examples in practice to express that this method is correct.

[Key words] vibrating wave; reflection wave; signal enhancement; software for superposition signal

(cont. form p. 63)

## Research on Simulating Optimization of Long-distance Complex Water Conveyance Systems

Zhong Denghua<sup>1</sup>, Liu Jianmin<sup>1</sup>, Xiong Kaizhi<sup>2</sup>  
(1. *Civil Engineering Academy of Tianjin University, Tianjin 300072, China*;  
2. *Ertan Hydropower Development Co. Ltd., Chengdu 610021, China*)

[Abstract] Operating optimization of long-distance water conveyance systems is always intractable for their complexity. In this paper, self-optimization model is introduced to study the problem, which is based on the digital simulation models. Through the on-line optimization tache in it, the decision input can be optimized according to the feedback information of simulating output, so the system can be optimized automatically. With the MATLAB software, simulating optimization of an engineering instance has been achieved, which gives a new way for the research of operating optimization of long-distance complex water conveyance systems.

[Key words] water conveyance system; simulating optimization; self-optimization; response surface method