

# COMSOL 在井下动液面声波反射特性研究中的应用

仵杰<sup>1</sup>, 王轲<sup>1</sup>

1. 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西省, 西安市

## 1、引言

在油气井开采过程中, 油井液面变化包含了丰富的开采信息。动液面不仅是反映井周围地层供液能力的一个重要指标, 而且是油田确定合理沉没度、制定合理工作制度的重要依据, 是精细注水设计的重要参数。本文基于 COMSOL 软件的压力声学瞬态模块三维数值计算分析在不同情况下井下动液面测量中的声波信号反射特性, 为仪器测量和分析提供理论依据。

## 2、油气井声波反射理论

图 1 为油气井动液面测量物理模型。油气井由套管和接箍连接的油管组成。动液面测量仪器安装在井口, 仪器产生的脉冲声源经套管和油管之间的环空传播到动液面, 声波接收传感器以一定采样率采集环空、动液面和油井周围的声波反射信号。由于油管长度是固定的, 通过测量接箍周期反射信号时间, 可确定声波在环空中的传播速度, 速度乘以动液面单程反射时间等于动液面深度, 这就是动液面测量基本原理, 核心是确定动液面位置和计算声速。下面分析油气井中的声波传播基本理论。

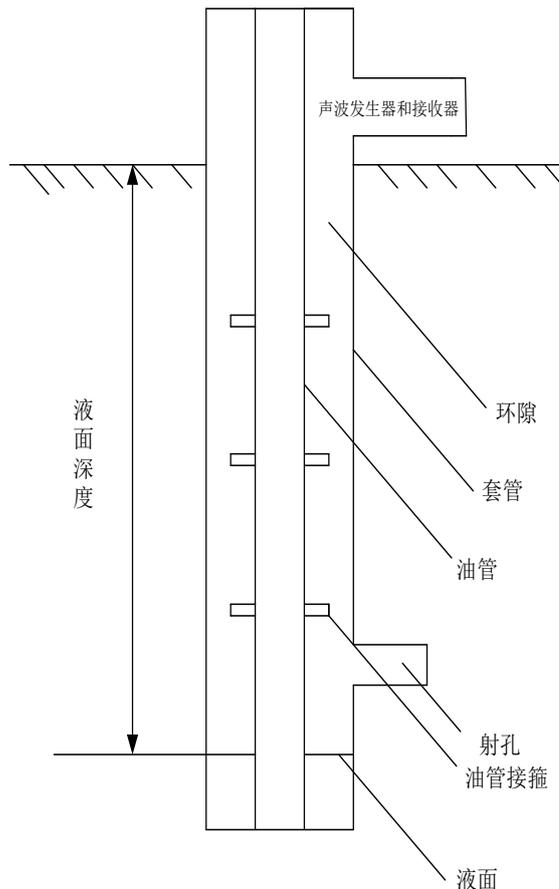


图 1 油气井液位测量示意图

### 2.1 动液面声波信号反射原理

动液面声波信号反射相当于声波信号垂直入射到两种不同阻抗的交界面, 此时, 声压和声速反射和透射定律<sup>[1]</sup>为

$$r_p = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (1)$$

$$r_v = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

$$t_p = \frac{2R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$t_v = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

式(1)和(2)中,  $r_p$  ( $r_v$ )和 $t_p$  ( $t_v$ )分别是声压(声速)反射和透射系数,  $R_1$ 和 $R_2$ 分别是媒质1(环空)和媒质2(油气水)的声阻抗。  $R_1 = \rho_1 c_1$ ,  $R_2 = \rho_2 c_2$ ,  $\rho$ 和 $c$ 分别是媒质(环空、油气水)的密度和声速。式(1)和(2)表明:

1) 正常油气井中, 油气水中的声速远大于环空中的声速, 因此 $R_2 \gg R_1$ , 代入(1)至(4)得1、-1、2和0, 说明分界面上声速发生全反射, 声压以静压方式继续传播。

2) 当声波穿过油气液面上的射孔出水层达到出水层时,  $R_2 > R_1$ , 声压反射系数大于0, 而速度反射系数小于零。反之, 过出水层时,  $R_1 > R_2$ , 负声压, 反射波声压与入射波的声压极性相反, 而声速大于0。

## 2.2 接箍信号的反射原理

声波在通过截面发生变化的接箍时, 可以用不同截面积管中的反射公式描述声压反射系数<sup>[1]</sup>

$$r_p = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

式(5)中,  $S_1$ 和 $S_2$ 为不同区域的横截面积。式(5)表明:

- 1) 在接箍上表面, 面积由大变小, 即 $S_1 > S_2$ , 反射系数大于1, 反射波信号与入射同相位(同极性);
- 2) 在接箍下表面, 面积由小变大, 即 $S_1 < S_2$ , 反射系数小于1, 反射波信号与入射反向(极性相反)。

## 3、计算方法

本文用 COMSOL 中的压力声学瞬态模块求解式(6)描述的声波基本方程, 三维数值计算研究模型1中的脉冲声源在油气井中的瞬态声波传播特性, 分析动液面和接箍反射规律。

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}_t}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho} (\nabla \mathbf{P}_t - \mathbf{q}_d) \right) = \mathbf{Q}_m$$

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{P} + \mathbf{P}_b \quad (6)$$

其右侧的源项由以下方程给出

$$\begin{cases} Q_m = \frac{4\pi}{\rho c} S \delta(X - X_0) \\ S = \frac{\rho c \partial Q_s}{4\pi \partial t} \\ Q_s = A e^{-\pi^2 f_0^2 (t-t_p)^2} \\ t_p - \frac{1}{f_0} < t < t_p + \frac{1}{f_0} \end{cases} \quad (7)$$

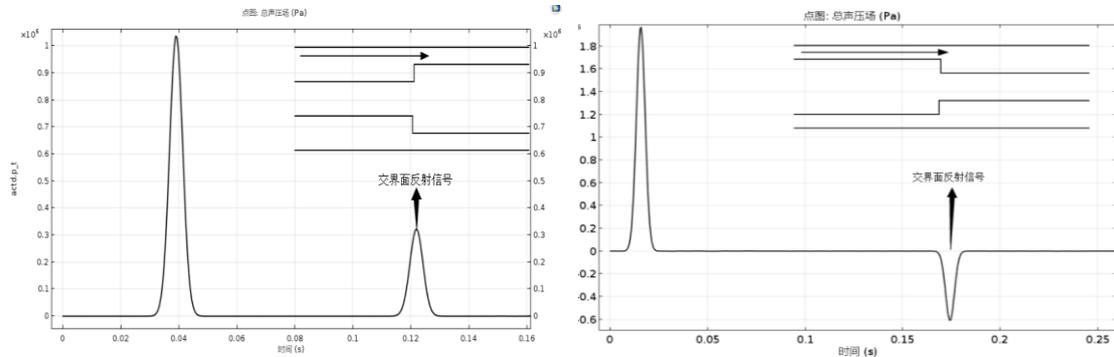
数值模拟中所应用的硬边界条件:

$$-\mathbf{n} \cdot \left( -\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = 0 \quad (8)$$

式(6)中,  $\rho$  和  $c$  分别为媒质的密度和声速,  $p_b$  为环隙里的背景声压,  $p_t$  为总声压场, 环隙里的声压场  $P(X, t)$  通过标量波方程求解  $p_t$  来确定。

#### 4、仿真结果

(1) 仿真声波穿过不同截面积油管的反射特性。分两种情形。情形一: 套管面积不变, 油管横截面积由大变小。情形二: 套管面积不变, 油管横截面积由小变大。数值计算结果如图2所示。图2表明: 当套管截面不变, 油管横截面积由小变大时, 交界面处反射信号形态与入射信号一致, 即两者同极性(图2a)。这是因为此时环空面积由大到小, 由式(5)知反射系数大于0, 即反射与入射同相。反之, 横截面积由大变小时, 环空面积由小到大, 反射系数小于0, 因此界面产生负反射声波信号, 与入射信号极性反向(图2b)。



(a) 油管截面由小到大变化时的反射信号

(b) 油管截面由大到小变化时的反射信号

图2 油管横截面突变时的声波反射现象模拟

(2) 仿真同时存在节箍、射孔和动液面时的声波传播特性。数值计算结果如图3所示。图3表明: 接箍反射信号先正(上升)后负(下降), 而射孔反射信号却完全相反, 先负后正, 动液面反射信号与发射同极性。可用图2解释图3中的现象。声波到达接箍时, 相当于截面积由大到小, 反射信号极性与入射相同, 是正信号; 当声波信号离开接箍下界面时, 截面积由小到大, 反射信号极性与入射相反, 是负信号。声波经过射孔时, 面积从小到大, 然后再从大到小, 与接箍相反, 两者尺寸接近, 因而反射信号刚好相反。

在动液面交界面上, 声波从波阻抗小的空气入射到波阻抗很大的油气界面, 由式(1)知, 声波近似发生全反射, 极性与发射信号相同。

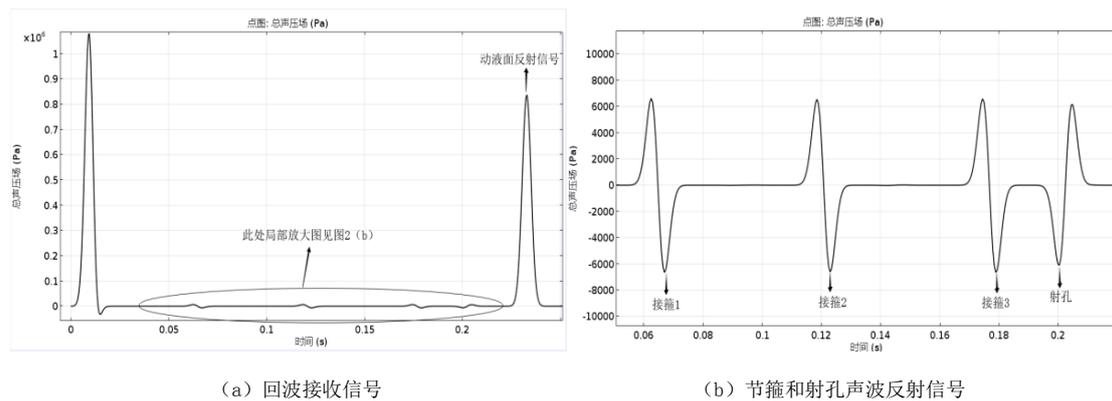


图3 存在接箍、射孔和动液面时的声波反射现象模拟

## 5、结论

(1) 数值模拟验证脉冲压力声波在环形空间传播时在突然变大和突然变小界面反射波极性相反的基本规律。

(2) 同时存在接箍、射孔和动液面时的脉冲声源传播特性模拟揭示接箍、射孔和动液面的反射机理，为实际动液面检测仪接收信号特性分析、声速和液面计算提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬, 声学基础, 131-135 161-163, 南京大学出版社, 2016 年
- [2] 王国栋, 动液面测试干扰因素分析, 山东工业技术, 第 10 期, 2013 年
- [3] 周家新, 王长松, 汪建新, 姚耕耘, 李枝梅, 抽油井套管内声速变化规律分析, 声学技术, 第 26 卷, 2007 年

## 致谢

在本论文完成过程中, 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室提供了数值计算高性能工作站, 西安石油大学张乃禄教授提供了动液面测量仪器相关资料, 在此表示诚挚的感谢。