

声纳液面监测技术测得的液面深度修正方法

邹伟¹, 谢进¹, 王瑞娜², 李晓胜¹, 张丽英¹, 徐迎春¹

- 1. 中国石化西北油田分公司完井测试管理中心 新疆轮台 841600
- 2. 中国石油管道局工程有限公司油气储库分公司 河北廊坊 065000

通讯作者: Email: lihh. xbsj@ sinopec. com

引用: 邹伟, 谢进, 王瑞娜, 等. 声纳液面监测技术测得的液面深度修正方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 52-57.

Cite: ZOU Wei, XIE Jin, WANG Ruina, et al. A corrected calculation method of liquid surface depth measured by sonar monitoring technology[J]. Well Testing, 2023, 32(1): 52-57.

摘要 井口带压导致声纳液面监测技术存在 15% 的不准确性, 究其原因因为系统默认声音的传播速度为 340 m/s。通过修正不同条件、不同气体组份的声速, 设计了一款计算软件, 引入烃、二氧化碳、氧气等混合气体的压缩因子、密度、比热容比、摩尔质量等参数, 可计算出不同条件下的实际声速, 提高了井口带压井的液面位置的准确性。顺北 X 井利用原方法和修正方法分别对声纳液面监测技术结果进行计算, 结果显示, 两种方法得到的液面深度变化趋势一致, 但修正方法得到的液面深度值更准确。声纳液面监测技术的液面深度修正方法经矿场应用 120 井次, 精确的液面数据为井控安全提供了科学保障。

关键词 声纳监测技术; 修正方法; 液面深度; 声速; 温度; 压力; 气体组份; 井控

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2023. 01. 009

A corrected calculation method of liquid surface depth measured by sonar monitoring technology

ZOU Wei¹, XIE Jin¹, WANG Ruina², LI Xiaosheng¹, ZHANG Liying¹, XU Yingchun¹

- 1. Sinopec Northwest Oilfield Completion Test Management Center, Luntai, Xinjiang 841600, China
- 2. China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd., Oil and Gas Storage Branch, Langfang, Hebei 065000, China

Abstract: Wellhead pressure leads to an inaccuracy of 15% in the results of sonar monitoring, essentially because the default sound propagation velocity is 340 m/s. By correcting the sound velocity of gas components under different conditions, a calculation software was designed, which introduces the parameters (e.g. compressibility factor, density, specific heat capacity ratio, and molar mass) of gas mixture composed of hydrocarbons, carbon dioxide and oxygen. The software can calculate the actual sound velocity under different conditions, which helps to improve the accuracy of liquid surface depth for wells with wellhead pressure. The original and corrected calculation methods were used to calculate the liquid surface depth of Well SB-X measured by the sonar monitoring technology. The results show that the two methods derive liquid surface depths in the same trend, but the corrected calculation method provides a more accurate value. The corrected calculation method of liquid surface depth measured by sonar monitoring technology has been applied in 120 wells, with accurate liquid surface data obtained for ensuring the safety of well control.

Keywords: sonar monitoring technology; corrected calculation method; liquid surface depth; sound velocity; temperature; pressure; gas component; well control

塔河和顺北油田油藏具有埋藏深、厚度大、地温高、非均质性强等特征, 储集空间主要以裂缝、溶孔、溶洞、缝洞发育, 钻井期间钻遇放空漏失率高达 50%^[1]。漏失井的液面一般都不在井口, 为了保证井控安全需不断向井筒中灌入泥浆, 而井筒内的液面位置是设计合理灌浆量的重要依据, 合理的灌浆量在保证井控安全的同时可节约泥浆用量, 因此漏失井井筒液面位置的准确性尤为重要。

李流军等^[2]首次提出利用监测环空液面, 实现无线监测, 目前该技术由于其便捷性在塔河油气田得到了广泛应用, 准确率可达 85%, 但是对于天然气不断溢出、井口带压的油气井, 该技术准确性较差, 甚至无法监测到井筒内液面位置。这些复杂井灌入井筒的泥浆量无法确定, 不利于下步方案的制定, 且严重威胁井控安全。声纳监测技术测得的液面位置不准确的原因因为监测系统中默认声音的传

播速度为 340 m/s,而实际上声音在不同气体组份、不同压力、不同温度条件下的传播速度是不同的,李更来等^[3]从理论和实际可行性方面提出了热工计算中重要的计算参数—绝热指数的计算方法,从而利用气体绝热指数修正天然气压缩系数;苏亦儒^[4]研制了一套天然气声速计算和超声流量计声速核查软件,可以有效地计算天然气的声速、临界流系数、等熵指数和定压比热容等天然气热力学参数;张福元等^[5]介绍了美国气体协会输送计量委员会 10 号报告和 ISO/DIS20765-1 的主要内容及其提供的天然气声速、临界流系(函)数、等熵指数、定压和定容比热容等热力学参数计算方法在天然气计量和化工等方面的应用;李丹华等^[6]采用 AGA8-92DC 计算方法,用 VB 编程计算了天然气压缩因子,用二分法求解状态方程,精度满足工程需要;刘晖^[7]采用 RKS 状态方程计算实际气体等熵压缩过程的温度绝热指数和容积绝热指数;王春生等^[8]以 BWRS 方程为重点,通过 Excel 求得方程系数,然后从中解出气体密度,再代入气体状态方程中求得压缩因子;韩彬等^[9]利用 AGA8-92DC 方法对天然气压缩因子进行修正,认为对于生产方来说,根据生产条件和组分变化对压缩因子进行适时计算和调整是必要的;麦瑶娣^[10]提出可利用图版法和状态方程修正天然气压缩系数;李师瑶等^[11]以天然气组分为基础,通过对天然气压缩因子的调研,得到影响压缩因子的主要因素,提出一定的建议改进从而修正到天然气输量,以便减少输差。

因此,针对复杂井,引入烃、二氧化碳、氧气等混合气体的压缩因子、密度、比热容比、摩尔质量等参数,计算出不同条件下的实际声速,可大大提高井口带压井的液面位置的准确性,对复杂漏失井的井控安全具有重大意义。

1 天然气压缩因子的计算

根据塔河和顺北油气田的天然气组分,将复杂井井筒中混合气体的组份定为 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 $\text{i-C}_4\text{H}_{10}$ 、 $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$ 、 $\text{i-C}_5\text{H}_{12}$ 、 $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ 、 $\text{n-C}_6\text{H}_{14}$ 、 O_2 、 N_2 、 CO_2 、 He 、 H_2 。气体全分析化验组分数据是以气体体积分给出,因此在进行计算时需要将其换算成摩尔分数^[12-14]。

压力的状态方程为

$$\rho_m(1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^*(b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n})\rho_r^{b_n})$$

$$\times \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) - \frac{p}{RT} = 0 \quad (1)$$

式中: B 为第二维利系数, m^3/kmol ; ρ_m 为摩尔密度, kmol/m^3 ; ρ_r 为相对密度; b_n, c_n, k_n 为常数; C_n^* 为温度和组成函数的系数; p 为绝对压力, MPa ; R 为气体常数(=0.008 314 510), $\text{MJ}/\text{kmol}/\text{K}$; T 为绝对温度, K ; 下标: n 为整数。

相对密度同摩尔密度相关,两者的关系为

$$\rho_r = K^3 \rho_m \quad (2)$$

式中: K 为体积系数, $(\text{m}^3/\text{kmol})^{1/3}$ 。

将式(2)代入式(1)整理得

$$\rho_m + (B - K^3 \sum_{n=13}^{18} C_n^*)\rho_m^2 + \sum_{n=13}^{58} C_n^* K^{3b_n} \times (b_n - c_n k_n K^{3k_n} \rho_m^{k_n})\rho_m^{b_n} \exp(-c_n K^{3k_n} \rho_m^{k_n}) - \frac{p}{RT} = 0 \quad (3)$$

第二维利系数的计算为

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{13} x_i x_j B_{nij}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中: a_n, u_n 为常数; x_i 为组分 i 的摩尔分数; x_j 为组分 j 的摩尔分数; B_{nij}^* 为混合物交互作用系数; E_{ij} 为第二维利系数的二元能量参数, K ; K_i 为组分 i 的体积参数, $(\text{m}^3/\text{kmo1})^{1/3}$; K_j 为组分 j 的体积参数, $(\text{m}^3/\text{kmol})^{1/3}$ 。

混合交互作用系数的计算为

$$B_{nij}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} \times (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \times (F_i^2 F_j^2 + 1 - f_n)^{f_n} \times (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} \times (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad (5)$$

式中: G_{ij} 为二元定位参数; g_n, q_n, f_n, s_n, w_n 为常数; Q_i 为组分 i 的四级参数; Q_j 为组分 j 的四级参数; F_i 为组分 i 的高温参数; F_j 为组分 j 的高温参数; S_i 为组分 i 的偶极参数; S_j 为组分 j 的偶极参数; W_i 为组分 i 的组合参数; W_j 为组分 j 的组合参数。

二元参数的计算见式(6)、式(7)

$$E_{ij} = E_{ij}^* \times \sqrt{E_i \times E_j} \quad (6)$$

式中: E_{ij}^* 为第二维利系数的二元能量交互作用参数; E_i 为组分 i 的特征能量参数, K ; E_j 为组分 j 的特征能量参数, K 。

$$G_{ij} = G_{ij}^* \times \frac{G_i \times G_j}{2} \quad (7)$$

式中: G_{ij}^* 为二元定位交互作用参数; G_i 为组分 i 的定位参数; G_j 为组分 j 的定位参数。

C_n^* 的计算为

$$C_n^* = a_n (G + 1 - g_n)^{g_n} \times (Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} \times (F + 1 - f_n)^{f_n} \times U^{u_n} T^{-u_n} \quad (8)$$

其中

$$U^5 = \left[\sum_{i=1}^{13} x_i E_i^{\frac{5}{2}} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=i+1}^{13} x_i x_j (U_{ij}^5 - 1) E_i E_j^{\frac{5}{2}}$$

$$G = \sum_{i=1}^{13} x_i G_i + 2 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=i+1}^{13} x_i x_j (G_{ij}^* - 1) (G_i - G_j)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{13} x_i Q_i$$

$$F = \sum_{i=1}^{13} x_i^2 F_i$$

式中: C_n^* 为温度和组成函数的系数; F 为混合物高温参数; G 为混合物定位参数; Q 为四级系数; U 为混合能量参数, K ; U_{ij} 为混合二元能量交互作用参数。

体积参数的计算为

$$K^5 = \left[\sum_{i=1}^{13} x_i K_i^{\frac{5}{2}} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=i+1}^{13} x_i x_j (K_{ij}^5 - 1) K_i K_j^{\frac{5}{2}} \quad (9)$$

式中: K_{ij} 为二元体积交互作用参数。

$$Z = \frac{p}{(\rho_m RT)} \quad (10)$$

式中: Z 为压缩因子。

$$\rho = M \rho_m \quad (11)$$

式中: ρ 为相对密度。

$$M = \sum_{i=1}^n x_i M_i \quad (12)$$

式中: M 为摩尔质量, kg/kmol; M_i 为组分 i 的摩尔质量, kg/kmol。

2 声速的计算

天然气声速的计算方法是基于热力学关系计算, 这些关系涉及到压缩因子、密度、比热容比、摩尔质量以及一定温度下压缩因子对密度的偏导数为

$$\nu = \left[\left(\frac{c_p}{c_v} \right) \left(\frac{RT}{M_r} \right) \left(Z + \rho_m \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho_m} \right)_T \right) \right]^{0.5} \quad (13)$$

式中: Z 为压缩因子; ν 为声速, m/s; c_p 为定压条件下的气体热容, J/K; c_v 为定容条件下的气体热容, J/K; M_r 为混合气体摩尔质量, kg/kmol。

定容和定压条件下的气体热容关系为

$$c_v = c_p^0 - R \left[1 + T \int_0^p \left(\frac{T}{\rho_m} \right) \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_\rho + \frac{2}{\rho_m} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho d\rho_m \right] \quad (14)$$

$$c_p = c_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_{\rho_m} \right]^2}{\rho_m \left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho_m} \right)_T \right]} \quad (15)$$

其中

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_{\rho_m} = \rho_m \left(\frac{\partial B}{\partial T} \right) - \rho_m K^3 \sum_{n=13}^{18} \frac{C_n^* (-u_n)}{T^{(u_n-1)}} + \sum_{n=13}^{58} \frac{C_n^* (-u_n)}{T^{(u_n-1)}} (b_n - c_n k_n (\rho_m K^3)^{k_n}) \times (\rho_m K^3)^{b_n} \exp(-c_n (\rho_m K^3)^{k_n})$$

$$\left(\frac{\partial B}{\partial T} \right) = \sum_{n=1}^{18} a_n \frac{(-u_n)}{T(u_n-1)} \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{13} x_i x_j E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^*$$

$$\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_{\rho_m} = \rho_m \left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} \right) - \rho_m K^3 \sum_{n=13}^{18} \frac{C_n^* (-u_n)(-u_n-1)}{T^{(u_n-2)}} + \sum_{n=13}^{58} \frac{C_n^* (-u_n)(-u_n-1)}{T^{(u_n-2)}} (b_n - c_n k_n (\rho_m K^3)^{k_n}) \times (\rho_m K^3)^{b_n} \exp(-c_n (\rho_m K^3)^{k_n})$$

$$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2} \right) = \sum_{n=1}^{18} a_n \frac{(-u_n)(-u_n-1)}{T(u_n-2)} \times \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{13} x_i x_j E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} B_{nij}^*$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho_m} \right)_T = B - K^3 \sum_{n=13}^{18} \frac{C_n^*}{T^{u_n}} + K^3 \sum_{n=13}^{58} \frac{C_n^*}{T^{u_n}} b_n \exp^{(-c_n (\rho_m K^3)^{k_n})} (b_n (\rho_m K^3)^{b_n-1} - c_n k_n (\rho_m K^3)^{(k_n+b_n-1)}) + K^3 \sum_{n=13}^{58} \frac{C_n^*}{T^{u_n}} c_n k_n \exp^{(-c_n (\rho_m K^3)^{k_n})} \times [(k_n + b_n) (\rho_m K^3)^{(b_n+k_n-1)} - c_n k_n (\rho_m K^3)^{(2k_n+b_n-1)}]$$

式中: ρ 为质量密度, kg/m³; c_p^0 为理想气体定压热容, J/K。

3 液面深度计算

通过上述可以得到不同气体组份、压力、温度下的声速, 声纳液面监测技术可以监测到声波从井口发射到液面反射的时间, 这两个参数确定后便可求得液面深度。

3.1 液面深度计算

液面深度的计算公式为

$$H = \frac{\nu \times t}{2}$$

(16)

式中: H 为液面深度,m; T 为声波传播时间,s。

3.2 温度、压力修正

采用声纳液面监测技术只能监测到井口的压力和温度,实际上井筒内井口与液面之间不同位置的温度、压力值是不一样的,不同位置的温度、压力的校正是提高声纳液面监测技术精度的必要手段,校正公式为

$$T_h = T_0 + kh$$

(17)

$$\rho_r = \frac{M_r}{28.98}$$

(18)

$$k = \frac{0.034\ 15 \times \rho_r \times H}{T \times Z}$$

(19)

$$p_1 = p_0 \times \exp^{(2k)}$$

(20)

式中: p_0 为井口压力,MPa; p_1 为计算液面位置压力,MPa。 T_h 为任意点的温度值,℃; T_0 为井口温度,℃; k 为温度梯度,℃/m。

4 软件设计

修正后的液面深度计算公式比较复杂,为了降低操作难度,提高自动化,将其编制成软件系统。

4.1 系统架构

系统功能较为单一,为满足其便捷性采用 Windows 桌面应用程序实现,可在个人电脑上运行。

4.2 系统流程图

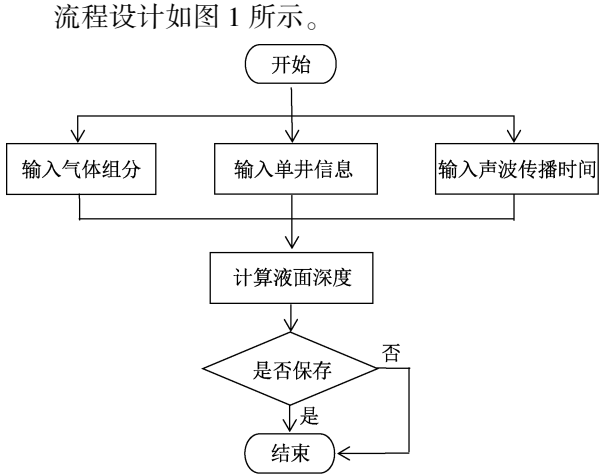


图 1 软件系统流程图

Fig. 1 Software system flow chart

4.3 系统操作过程

该系统操作简单,分三个模块:数据录入模块、计算模块和保存模块。现场井口取得井筒内混合气样送化验室检测气体组分,各组分依次输

入系统中相应输入框内;单井信息输入井口温度、井口压力及井筒温度梯度;声纳液面监测技术测得从井口到液面声波的传播速度。点击计算便可得到液面深度,计算结果可选择保存在系统中,也可不保存。

5 模拟计算及现场应用

液面深度计算修正方法编制成软件系统后先对其进行模拟计算,验证起准确性后在现场进行推广应用。

5.1 模拟计算

相同气体组分和温度梯度下,不同井口压力下修正方法和传统方法计算出的液面深度(见图 2),可以看出,修正方法计算得到的液面深度高于原方法计算得到的液面深度;随着井口压力的升高,修正方法计算得到的液面深度逐渐增加,而原方法计算出的液面深度不变,说明修正方法计算得到液面深度更加准确;随着井口压力的升高,原方法的误差逐渐增大,说明井口压力越大,修正方法计算得到的液面深度约可靠。

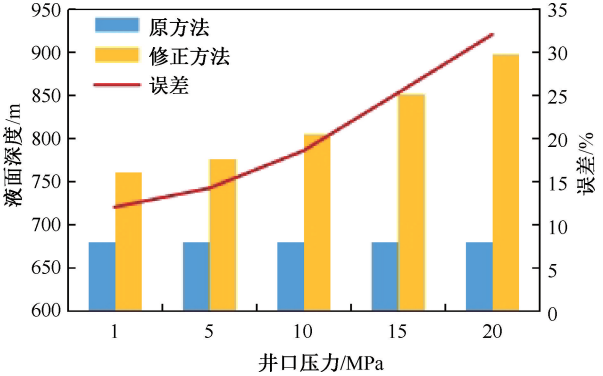


图 2 修正方法和原方法计算额面深度对比曲线

Fig. 2 Comparison curve of frontal depth calculated by modified method and original method

5.2 矿场应用

顺北 X 井四开钻进至井深 8 081.36 m 发生漏失,强钻至 8 260.18 m,期间最高漏速 18.00 m³/h,完井层位 O₁₋₂y,完井井段 7 496.00~8 260.18 m,套管参数见表 1,完井管柱为底带封隔器的 88.9 mm TP-JC 油管,井身结构见图 3。

顺北 X 井完井期间采用声纳液面监测技术实时监测液面位置,通井时多次在漏失点位置遇阻,下钻时液面上升,开钻井冲划通过遇阻点后液面下降,判断地层发生垮塌且不断有可燃气体溢出,关井井口压力最高 4.2 MPa。利用修正方法和原方法计算得到完井期间井筒内液面位置如图 4 所示,不

同井口压力下原方法的计算误差与井口压力的关 系如图 5 所示。

表 1 顺北 X 井套管参数表
Table 1 Casing parameters of Shunbei well x

开钻次序	钻头尺寸/mm	井深/m	套管尺寸/mm	扣型	套管壁厚/mm	套管下深/m	抗内压/Ma	抗外挤/MPa
一开	374.65	2 000.00	298.50	偏梯	11.05	2 000.00	24.50	14.30
			219.10	气密	12.70	1 499.79	76.97	58.10
			219.10	偏梯	11.43	2 898.37	69.20	44.10
二开	269.90	6 660.00	219.10	偏梯	12.70	4 499.01	76.97	58.10
			219.10	偏梯	12.70	4 999.25	76.97	58.10
			219.10	偏梯	12.70	6 658.96	76.97	72.70
三开	190.50	7 505.25	168.30	气密	10.59	7 496.00	85.00	98.30
四开	143.90	8 260.18	裸眼					

备注:168 mm 套管悬挂器 6 439.41~6 444.43 m。

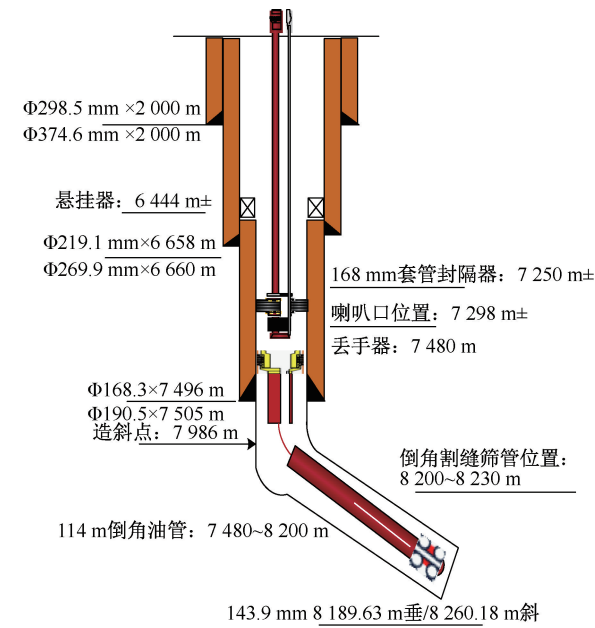


图 3 顺北 X 井井身结构图
Fig. 3 Well bore structure diagram of Shunbei well x

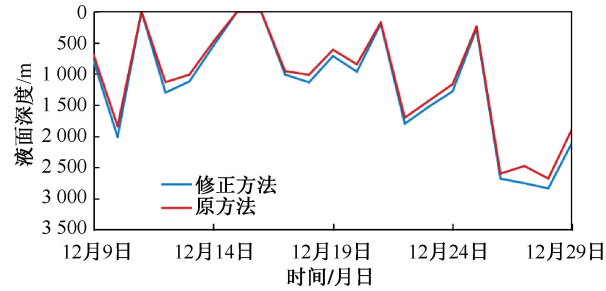


图 4 顺北 X 井完井期液面深度曲线
Fig. 4 Surface depth curve of Shunbei x well during completion

顺北 X 井原方法和修正方法利用利用声纳液面监测技术结果计算得到液面深度变化趋势一致,原方法计算误差和井口压力呈正相关,误差值最高 16.5%。封隔器坐封前液面深度为 2 096 m,而坐封合格后环空验封时补液 48.7 m³ 灌满,进一步证明

修正方法得到的液面深度准确性。

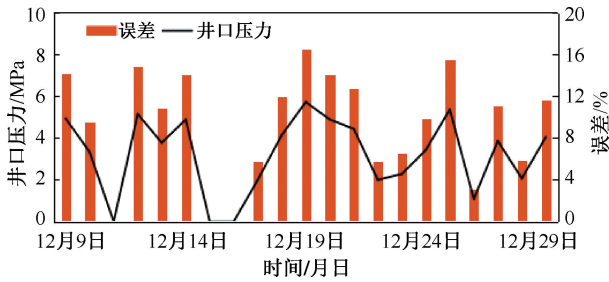


图 5 顺北 X 井原方法误差与井口压力关系曲线
Fig. 5 Relation curve between original method error and wellhead pressure of Shunbei x well

6 结论

(1)考虑声音在不同气体介质、不同温度、不同压力条件下不同传播速度,建立了声纳液面监测技术液面深度计算的修正方法,提高了监测精度。

(2)液面不在井口的带压气井,原方法计算得到的液面深度偏小,且随着井口压力的升高,原方法计算得到的液面深度误差逐渐增大。

(3)液面深度的修正方法现场应用已达 120 井次,为井控安全的保障提供了精确的数据支撑。

致谢:感谢中石化西北油田分公司完井测试管理中心同意本文公开发表。

参考文献

[1] 董周丹. 塔河油田碳酸盐岩漏失井酸化分析[J]. 现代商贸工业, 2019, 40(24): 206-207.
DONG Zhoudan. Acidizing analysis of carbonate leakage wells in Tahe oilfield[J]. Modern Business Trade Industry, 2019, 40(24): 206-207.
[2] 李流军, 刘俊峰. 声纳环空液面监测仪现场试验[J]. 内蒙古石油化工, 2008, (10), 16-18.
LI Liujun, LIU Junfeng. Field test of monitor for the depth of liquid in annulus by sonar[J]. Inner Mongolia Petro-

- chemical Industry, 2008, (10): 16-18.
- [3] 李更来, 陈红梅. 气体绝热指数的计算方法[J]. 油气田地面工程, 1997, 16(5): 15-16.
LI Genglai, CHEN Hongmei. Computation method of natural gas adiabatic exponent[J]. Oil-Gas Filed Surface Engineering, 1997, 16(5): 15-16.
- [4] 苏亦儒. 天然气声速计算方法及其在超声流量计的应用[J]. 科技信息, 2013, (6): 507-508.
SUN Yiru. Calculation method of sound's velocity in natural gas and its application in ultrasonic flowmeter[J]. Science & Technology Information, 2013, (6): 507-508.
- [5] 张福元, 王进春. 天然气热力学参数计算新方法[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(1): 62-63.
ZHANG Fuyuan, WANG Jinchun. A new method for calculation of thermodynamic properties in natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2005, 34(1): 62-63.
- [6] 李丹华, 姜东琪. AGA8-92DC 计算方法天然气压缩因子计算[J]. 煤气与热力, 2011, 31(3): 35-38.
LI Danhua, JIANG Dongqi. Calculation of compression factor of natural gas by AGA8-92DC method [J]. Gas&Heat, 2011, 31(3): 35-38.
- [7] 刘晖. 实际气体温度绝热指数和容积绝热指数的计算[J]. 石油化工高等学校学报, 2000, 13(4): 42-45.
LIU Hui. Calculation of the isentropic temperature change exponent and isentropic volume change exponent of real gases[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2000, 13(4): 42-45.
- [8] 王春生, 徐玉建, 田明磊, 等. 天然气压缩因子计算及影响因素分析[J]. 当代化工, 2015, 44(6): 1408-1411.
WANG Chunsheng, XU Yujian, TIAN Minglei, et al. Calculation of natural gas compressibility factor and its influence factors [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(6): 1408-1411.
- [9] 韩彬, 朱玉琪. 天然气计量中压缩因子的修正[J]. 上海化工, 2019, 44(6): 18-20.
HAN Bin, ZHU Yuqi. Correction of compressibility factor in natural gas metering [J]. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(6): 18-20.
- [10] 麦瑶娣. 工程设计中气体压缩因子确定方法[J]. 石油天然气学报, 2006, 16(1): 17-18.
MAI Yaodi. Method for determining gas compression factor in engineering design[J]. Chemical Engineering Design, 2006, 16(1): 17-18.
- [11] 李师瑶, 石涛. 天然气压缩因子影响因素的研究[J]. 当代化工, 2016, 45(10): 2378-2380, 2390.
LI Shiyao, SHI Tao. Research on impacting factors of natural gas compressibility factor [J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(10): 2378-2380, 2390.
- [12] 全国天然气标准化技术委员会. 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法: GB/T 11062—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
National Technical Committee on Gas of Standardization Administration of China. Natural gas—Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition: GB/T 11062—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [13] 张其芳, 程群, 童玉贵, 等. 天然气组分物理参数表: SN/T 2944—2011. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-8.
ZHANG Qifang, CHENG Qun, TONG Y G, et al. Table of physical properties for components of natural gas: SN/T 2944—2011. Beijing: Standards Press of China, 2011: 1-8.
- [14] 全国天然气标准化技术委员会. 天然气压缩因子的计算 第2部分 用摩尔组成进行计算: GB/T 17747.2—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
National Technical Committee on Gas of Standardization Administration of China. Natural gas—Calculation of compression factor—Part 2: Calculation using molar composition analysis: GB/T 17747.2—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

编辑 穆立婷

第一作者简介:邹伟,男,1986年,工程师,学士,2009年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事石油天然气开发研究及完井测试技术工作。电话:0996-4687086, 18999626244; Email: zouw. xbsj@ sinopec. com。通信地址:新疆巴音郭楞州轮台县轮南镇完井测试管理中心,邮政编码:841600。