

引用格式: 吴奇霖, 何云腾, 李雁飞, 等. 多相计量撬现场参数整定及单井计量测试[J]. 中国测试, 2024, 50(4): 31-37. WU Qilin, HE Yunteng, LI Yanfei, et al. Field parameter setting of multiphase metering skid and single well metering test[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(4): 31-37. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022030048



## 多相计量撬现场参数整定及单井计量测试

吴奇霖<sup>1</sup>, 何云腾<sup>2</sup>, 李雁飞<sup>1</sup>, 吴辰<sup>3</sup>, 朱沫<sup>3</sup>, 李东晖<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
3. 中海油能源发展装备技术有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067)

**摘要:** 单井多相计量一直是油田迫切需要突破的问题, 科氏力流量计以其较高的质量流量精度, 实时提供含水率而广受欢迎。但受限于现场条件, 作为含水率及体积流量换算的密度参数并不准确或无法提供。基于此阐述一种在油田现场对单井采出液就地进行油水分离及密度检测的方法。以现场实验获取的单井采出液原油, 地层水水密度值作为基于科氏力多相计量撬的参数, 进行所采样单井的计量测试实验, 与平台现有高精度流量计及取样化验含水率数据比对, 相对误差在±5% 以内。

**关键词:** 计量学; 单井计量; 现场采出液分析; 密度整定; 石油平台

中图分类号: TB9; TE135; TE863.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2024)04-0031-07

### Field parameter setting of multiphase metering skid and single well metering test

WU Qilin<sup>1</sup>, HE Yunteng<sup>2</sup>, LI Yanfei<sup>1</sup>, WU Chen<sup>3</sup>, ZHU Mo<sup>3</sup>, LI Donghui<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

**Abstract:** Single-well multiphase metering has always been an urgent problem in oilfields. Coriolis flowmeters are widely popular for their high mass flow accuracy and real-time water cut. However, due to site conditions, the density parameters used as water content and volume flow conversion are not accurate or available. Based on this, a method for on-site oil-water separation and density detection of single-well produced fluid is expounded. Using the single well produced liquid crude oil and formation water density values obtained from field experiments as the parameters of the multiphase metering skid based on Coriolis force, the measurement test experiment of the sampled single well is carried out, which is consistent with the existing high-precision flowmeter and sampling test of the platform. Comparison of moisture content data, relative error within ±5%.

**Keywords:** metrology; single well metering; field produced fluid analysis; density setting; oil platform

收稿日期: 2022-03-07; 收到修改稿日期: 2022-07-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B) 类 (XDB22030201); 中国海洋石油总公司十三五重大科技项目联合资助 (CNOOC-KJ 135 ZDXM 22 LTD 03 SZ 2016)

作者简介: 吴奇霖(1981-), 男, 吉林梅河口市人, 高级工程师, 主要从事深水气田生产和运行方面的工作。

通信作者: 何云腾(1989-), 男, 北京市人, 工程师, 主要从事工业现场参数化验分析及多相计量测试工作。

## 0 引言

多相计量由石油工业提出需求并兴起,在石油采油工艺中,油-气-水单井多相计量一直是石油开采行业急需解决的问题<sup>[1]</sup>。随着海洋石油向深海的进一步探索,区块水深的进一步加大,自动化程度的不断提高,单个石油公司的勘探风险与开采成本大幅上升,使得单一区块采油引入了股份分配制度<sup>[2-5]</sup>。单个区块的产量分配,甚至一座合资石油平台的单井产量分配关系到入股公司的切身利益。这也直接导致以往对于地质油藏人员较为重要的单井油气水多相计量数据,附带了直接的商业利益,逐渐引起各个石油公司的重视<sup>[6-7]</sup>。

相关学者近年来聚焦于多相计量实验室测试的复现性,新一代传感器的研发与整合,以期提高日后相含率检测的准确性。如杜馨等研究了基于红外光谱法的原油含水率检测技术,为此技术应用于相含率检测提供了基础<sup>[8]</sup>。贾惠芹等研究了基于射频法测量原油含水率的射频天线,分析了测试误差,并提出了修正算法,其含水率测试结果与国标蒸馏法结果相对误差 $\leq \pm 5\%$ <sup>[9]</sup>。青美伊等通过交流阻抗法测量待测油水乳状液的复阻抗参数,进而得到含水率特征,在未来检测流动原油含水率方向上有一定前景<sup>[10]</sup>。ELLIOTT A J 等研究了多相流量计在实验室测试中影响其复现性的因素<sup>[11]</sup>。O'NEILL K T 等测试了一种基于 NMR 技术的油水两相流量计<sup>[12]</sup>。史雪薇等开发了一种基于电-超声联用传感器测定油气水波状流流速与相分数的技术<sup>[13]</sup>。陈基亮等研发了一种基于光纤-电导技术的油气水多相流检测装置<sup>[14]</sup>。FADAEI M 等对比了孔板与科氏力流量计用于气液两相流检测的适应条件及模式<sup>[15]</sup>。

现场工程师更专注于使用市售测量或传感仪表改进现有测试计量系统,以尽量小的成本,达到良好的效果<sup>[16-17]</sup>。目前市售和试验的多相流量计有较多种类,多数基于单/双能 $\gamma$ 射线-文丘里管<sup>[18]</sup>,如兰州海默,ROXAR 等;科里奥利质量流量计,如艾默生高准系列,首科实华等;微波含水测试-数据库匹配,如 AGAR MPFM-50 等。近年来随着电子技术的突飞猛进,涌现了联合阻抗,电阻层析等技术的单井多相流量计,如 PIETRO FIORENTINI,深圳联恒星等<sup>[19]</sup>。服务于海洋石油水下生产系统的国产多相流量计也在进行测试,张宁等以基于双能伽

马射线的国产水下多相流量计样机,取得了挪威船级社(DNV)的第三方认证,为国产水下多相流量计的批量安装创造了条件<sup>[20]</sup>。

西江 24-3(XJ24-3)平台位于海珠江口盆地 15/11 区块,投产于 1994 年 11 月,已安全开采近 30 年,平台通过大水平位移井技术兼顾开采 24-1 构造边际区,至今仍保持较为旺盛的采油能力<sup>[21]</sup>。平台含水率与产液量近年来上升明显,气相含量相对逐年减少<sup>[22]</sup>。平台目前使用质量流量计检测单井液相流量,人工取样后通过蒸馏或离心法进行单井含水率的测定。个别油井采出液中少量的游离气相经常干扰质量流量计的流量数据测定<sup>[23]</sup>;人工取样化验含水率具有一定的偶然性,所以需要不断的累积数据,才能得到较为准确的单井含水率均值。

科氏力流量计的原理已有专著进行阐述<sup>[24]</sup>。目前相关人员对科氏力流量计的算法改进和计量应用较为关注<sup>[25-28]</sup>。

文中阐述了基于科氏力流量计的油气水多相计量工业化试验装置(以下简称多相计量撬)在 XJ24-3 平台的单井计量参数整定实验及单井计量测试工作,全部实验在平台井口区甲板完成,节约大量送样到陆地实验室化验的时间<sup>[29]</sup>,为相关仪表在类似场景的高精度应用提供参考。

## 1 多相计量测试实验

测试实验过程分成两部分,第一部分是对油井单井采出液的取样,分离与单井计量密度参数的整定;第二部分将单井计量密度数据作为多相计量撬的仪表参数,进行相应单井的多相计量测试实验。

### 1.1 单井取样,分离与密度参数的整定

#### 1.1.1 实验仪器设备及试剂

1) 仪器设备:安东帕防爆便携密度计, DMA35 Ex Petrol V4, 量程: 0~3 000 kg/m<sup>3</sup>, 准确度:  $\pm 0.1$  kg/m<sup>3</sup>; 迷你金属浴, 设置温度: 室温 5~100.00℃, 加热模块规格: 2 mL; 便携高速离心机: 0~12 000 r/min, 2 mL。FEP 分液漏斗, 规格: 500 mL; PFA 烧杯, 规格: 500 mL, FEP 取样瓶, 规格: 500 mL; 离心管, 规格: 2 mL, 注射器, 规格 3 mL; 不锈钢针头, 规格: 14 G; 低压保温伴热护套等。

2) 实验试剂: 石油醚, 馏程 90~120℃, A.R.; 无水乙醇: A.R.; 淡水, 平台提供。

#### 1.1.2 实验过程

1) 选取待测油井接入平台测试管汇, 至少连续

运行 30 min, 置换管道内工质。之后在取样口放样, 待放出的管道工质稳定后, 使用 FEP 取样瓶接样。

2) 将取好的单井试样趁热倒入 FEP 分液漏斗。进行油水两相的预分离, 分离的含油污水备用。FEP 分液漏斗具有自润滑性, 原油不易挂壁, 可较好的满足高含水井原油试样的富集取得。

3) 将预分水后的原油试样倒入 2 mL 离心管中, 为满足后续金属浴伴热及离心的需要, 每个离心管加液量为 1.5 mL, 每个单井至少准备 12 mL 粗分水的原油试样。

4) 分别将装有含水原油试样和含油污水试样的离心管入迷你金属浴中, 设定温度 85 °C, 恒温至少 30 min, 保证试样的流动性。

5) 将金属浴中的试样快速放入高速离心机, 转速: 12000 r/min(相对离心力 RCF=9960×g), 离心时间 1 min。

6) 将离心好的试样放回金属浴再次恒温 10 min。之后再次离心 1 min。重复加热-离心循环, 直至离心管中油水界面不再明显变化。

7) 开启加热护套对密度仪及注射器进行伴热。先进行地层水的密度检测, 使用带有针头的加热注射器, 吸取离心管中的地层水试样, 注射进振荡管密度仪中, 待数据稳定后读取水相密度数据, 并记录温度。之后分别用淡水, 无水乙醇清洗, 最后以空气排空吹干密度仪管路, 备用。

8) 小心处理含水原油试样, 吸取离心管内处理后的原油相, 待吸入约 2.5 mL 原油试样后, 更换注射器鲁尔堵头, 将注射器中的试样伴热摇匀, 防止后续检测时密度不均。

9) 将伴热的原油试样缓慢注入振荡管密度仪, 待数据稳定后读取密度数据, 并记录温度。先后使用石油醚, 无水乙醇清洗密度仪内管路至洁净, 最后用空气吹干排空, 备用。

10) 测得的单井原油密度数据根据经验公式, 换算成原油标准密度<sup>[30]</sup>, 经验公式如下:

$$\rho_{20} = \rho_1 \times (1.0172663 - 7.4384 \times 10^{-4} \times t - 7.1 \times 10^{-7} \times t^2 + 2.896 \times 10^{-9} \times t^3) + 1.35998 \times t - 27.1996 \quad (1)$$

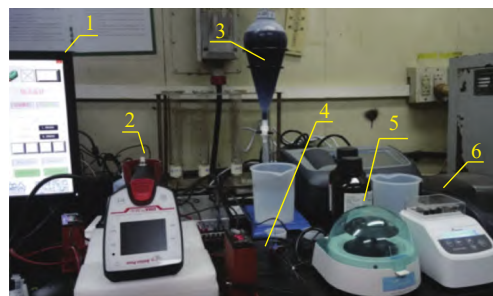
式中:  $\rho_{20}$ ——单井原油在 20 °C 时的标准密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_1$ ——单井原油的测试密度, kg/m<sup>3</sup>;

$t$ ——单井原油测试时的摄氏温度, °C。

需要说明的是, 此经验公式是基于脱气原油附

温测试拟合得到的, 目前仅用于产气量较小或不产气的单井原油密度附温转换。原油/地层水分离与密度检定系统及多相计量撬上位机如图 1 所示。

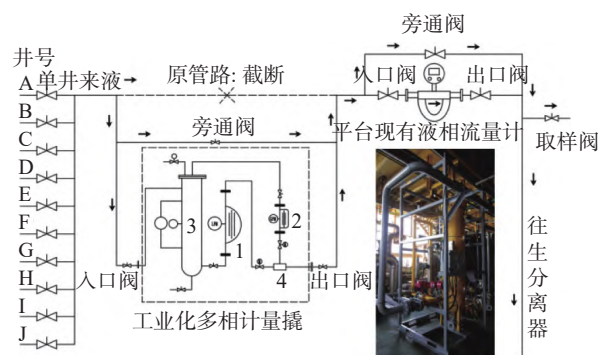


1.多相计量撬上位机; 2.伴热便携密度仪; 3.FEP/FPA 材质实验容器; 4.试样转移注射器伴热器; 5.便携离心机; 6.便携金属浴。

图 1 便携原油/地层水分离与密度检定系统及多相计量撬上位机

## 1.2 单井计量测试实验

多相计量撬长, 宽各为 1.5 m, 占地面积 2.25 m<sup>2</sup>, 高度 4 m。测试实验计划接入平台现有计量测试管道。通过人工切井, 对所有计划测试的油井依次导入进行单井计量测试, 多相计量撬流量数据与串联的平台现有流量计进行对比, 含水率数据与平台取样化验数据及历史报表数据均值进行对比, 实验系统流程及多相计量撬实物如图 2 所示。



1.液相质量流量计及调节阀; 2.气相质量流量计及调节阀; 3.气液分离罐及附属配件(包含液位变送器, 压力变送器, 安全阀, 排污阀等); 4.气液两相混合器。

图 2 多相计量撬测试流程及实物图

## 2 结果与讨论

### 2.1 单井原油, 地层水密度参数整定结果

总计测试了十口单井原油试样密度, 通过经验公式 (1) 计算其标准密度, 对比平台提供的外输海管处混合原油标准密度, 与各个单井原油密度皆有差别, 相对误差甚至可达到±5%左右, 如图 3 所示。

图 2 中显示 I 油井的原油, 地层水密度与其余被测油井数据差别较大, 原因在于 I 井为首批海上



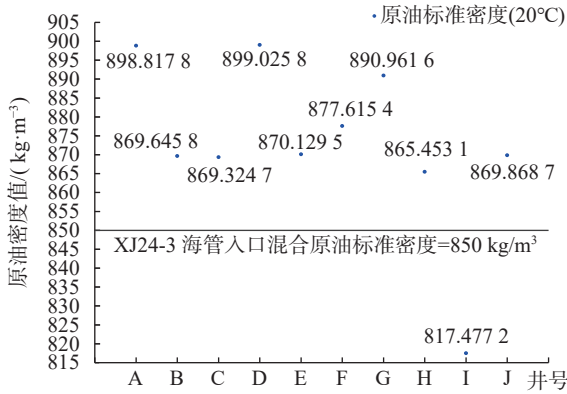


图3 单井与混合标准密度对比

油田大水平位移井, 水平位移长度约 8.06km, 其开采的区块位于西江 24-1 构造<sup>[31]</sup>。油品较为清稀, 凝固点低。

公式 (2) 的应用使得现场测试原油的温度可以适当降低, 以尽量减少轻组分的散逃, 检测温度仅需维持其在振荡管密度计检测池的可流动性。表 1 列举了所测单井的原油密度检测值及检测温度。单井水样的测定密度及温度, 并附等温纯水密度值作为对比。

表 1 单井油/水密度附温检测值

井号	测定原油密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	测定温度/℃	单井水密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	单井工况温度/℃	等温纯水密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
A	879.1	46.5	1001.3	64.5	980.736
B	842.2	56.6	996.0	77.0	973.632
C	844.9	52.4	995.3	74.7	974.837
D	873.4	55.2	994.0	73.2	976.022
E	842.9	56.4	991.5	78.7	972.405
F	851.5	55.1	1005.3	62.7	981.621
G	863.4	57.7	996.2	70.4	977.433
H	834.1	62.0	998.0	72.5	976.303
I	785.2	61.2	981.0	91.0	964.630
J	838.3	62.5	990.5	80.8	971.159

从表中数据对比可发现, 在油井工况温度下, 如果使用 1990 纯水密度温标数据表<sup>[32]</sup> 作为多相计量装置的水相密度参数表, 在等温条件下, 与实测值的矿化水密度值相对误差可达-2.35%。在使用混合密度法计算其质量相含率时, 与完全使用两相工况密度计算的含水率偏差甚至可达到-15%。但将水密度值全设置成 1000 kg/m<sup>3</sup> 时, 所得到的含水率偏差在±6% 以内, 可能的原因是: 地层水的高

矿化度导致其密度远比等温条件下的纯水高, 且这些单井的工作温度较高, 导致矿化水的工况密度值更接近纯水在 4℃ 的密度。

## 2.2 多相计量测试液相流量与相含率数据

液相流量通过使用平台现有流量计与多相计量撬数据进行比。考虑到实际工业生产中的油井受井底设备或地层影响, 流量和相含率可能发生细小的波动, 计量数据使用多次读数或报表的均值进行比对。平均值比对可以较好的消弭油井细小波动带来的极端偶然误差。但对于地质油藏人员来说, 监测生产井的流量与相含率波动又是油井调产, 维护等措施的依据。表 2 列举了十口被测油井的流量对比数据。

表 2 液相流量数据比对

井号	平台现有流量计/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	多相计量撬/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
A	335.68	335.36
B	1414.60	1432.33
C	836.85	857.22
D	1633.88	1629.51
E	1722.94	1751.66
F	187.27	189.23
G	660.00	678.77
H	316.28	301.65
I	1661.64	1692.98
J	2125.97	2159.66

在使用工况温度计算单井原油密度及输入工况水密度测定值的情况下, 以多相计量撬测得的工况下混合密度为依据, 就可以计算出单井的质量相含率, 集合工况密度数据, 可以进一步计算出单井体积相含率与取样化验相含率数据比对。需要指出的是, 体积相含率随温度变化而产生变化, 如果具备条件, 建议使用质量相含率进行对比, 准确性相对较高<sup>[33]</sup>。相含率对比数据如表 3 所示。

表 3 中取样体积含水率数据, 如单井低含水则参照国标离心法<sup>[34]</sup>, 高含水则参照国标蒸馏法<sup>[35]</sup>。结合单井测试液相流量与相含率误差数据绘制对比图, 如图 4 所示。

## 2.3 单井含水率的周期波动

海洋石油平台的油井一般使用井下电潜泵进行生产。流量及相含率保持相对稳定。多相计量撬

表 3 单井原油工况计算密度与相含率数据

井号	油水混合 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	计算工况油 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	计算质量 含水率/%	计算体积 含水率/%	取样体积 含水率/%
A	997	866.8116	97.22	96.07	97.26
B	989	827.5734	96.52	95.77	96.67
C	989	828.6335	96.93	96.91	98.00
D	991	860.7830	98.04	96.48	97.24
E	987	826.9035	97.71	97.00	97.40
F	938	846.6302	61.72	57.55	59.00
G	987	854.5631	94.38	93.65	94.30
H	907	826.593	51.62	47.00	49.60
I	974	761.6201	97.50	96.69	97.20
J	985	825.3158	97.21	96.63	97.20

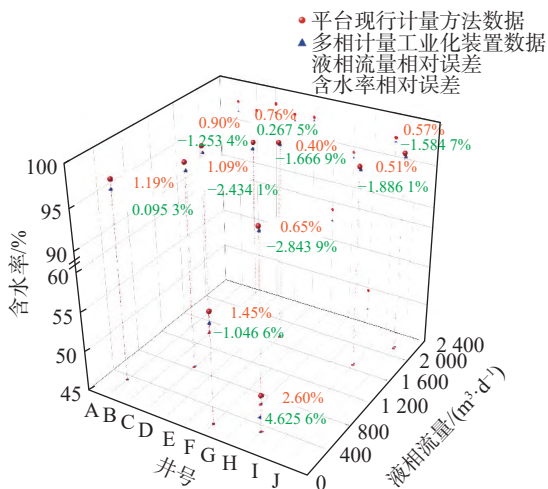


图 4 单井液相流量, 含水率计量结果相对误差

在 D 油井的计量测试中发现, 其含水率周期性波动的特殊情况, 波动周期约 3.5 min, 含水率波动范围为 96%±2%, 这种波动度达到 4% 的油井在长期稳定的生产井中并不常见, 有继续跟踪监测以完善生产措施的必要, 波动趋势如图 5 所示。

### 2.4 油井的产气计量

XJ24-3 平台生产井产气量微小, 与其地层情况有关。通过多相计量撬发现, 大部分油井采出液无游离气相。测试试验中仅 C, I 两口油井有微小的非连续游离气相流量。多相计量撬本身配置 3~300 kg/h 的气相质量流量计, 但由于受到极低流量检测精度大幅下降及小信号切除的影响, 无法计量单井微小的气相流量。

多相计量撬具备气-液缓冲分离罐, 装备有高精度液位变送器, 可以实时提供罐内液位信息, 在液

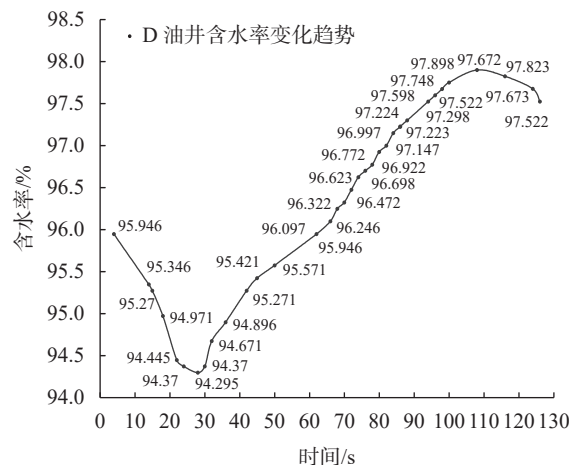


图 5 D 油井含水率波动图

位变送器变化的一定范围内, 气液分离罐内部为标准圆柱体。这样结合修改计量撬本地可编程逻辑控制器(PLC)及上位机电控程序, 当关闭气路电动调节阀时, 以液位下降至位置点  $h_1$  时, 记录时间点为  $t_1$ , 随着计量的进行, 当液位下降到位置点  $h_2$  时, 记录时间点为  $t_2$ 。同时记录罐内温度  $T_1$ , 压力数据  $P_2$ , 结合多相计量撬机械尺寸, 则可以计算出一段时间内的平均气体标况流量, 计算公式如下:

$$Q_1 = \frac{r_1^2 \times \pi \times (h_1 - h_2)}{t_2 - t_1} \times 3.6 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中:  $Q_1$ ——工况下单井平均气体流量, m<sup>3</sup>/h;

$r_1$ ——气液分离器内半径, mm;

$h_1$ ——液位起始记录点, mm;

$h_2$ ——液位终止记录点, mm;

$t_1$ ——时间起始记录点, s;

$t_2$ ——时间终止记录点, s。

参考气体状态方程, 工况与标况的体积换算公式如下:

$$V_1 = \frac{P_3 \times V_2 \times T_1}{P_1 \times T_2} \quad (3)$$

式中:  $P_1$ ——标况压力, kPa, 取标准大气压 101.325 kPa;

$V_1$ ——标况体积, m<sup>3</sup>;

$T_1$ ——标况, K, 取 273.15 K(即 0 °C);

$P_2$ ——现场管线压力表的表压数据, MPa;

$P_3$ ——为工况压力,  $10^3 \times P_2 + P_{\text{现}}$ , kPa;

$P_{\text{现}}$ ——现场实际大气压, 因测试地点为海洋石油平台, 故近似按标准大气压取值,  $P_{\text{现}} = P_1$ ;

$V_2$ ——工况流量, m<sup>3</sup>;

$T_2$ ——工况温度, 为现场管线温度表读数+273.15 K。

联立公式(2)、(3)可得:

$$NQ_1 = \frac{r_1^2 \times (h_1 - h_2) \times P_3 \times 3.048856 \times 10^{-5}}{(t_2 - t_1) \times T_2} \quad (4)$$

其中  $NQ_1$  为标况下单井平均气体流量,  $N \cdot m^3/h$ 。

通过公式(4)结合多相计量撬上位机计算程序,在不增加硬件及施工成本的情况下,可得到微小产气井的平均气相流量,为计算气-油比提供了依据。通过每次约4h的累计,分别计算出C井的气相平均流量为:  $0.124 N \cdot m^3/h$ , I井的气相平均流量为:  $0.0793 N \cdot m^3/h$ 。需要说明的是,由于XJ24-3平台建造时间较为久远,甲板面积较小,且近年来为帮助处理临近平台的产液,导致本平台并未配置传统的测试分离器,而是装备了两套生产分离器。对于气相流量,平台方无法提供对比历史数据。基于测试时观察,此平台排空火炬情况反应的是本平台24口在产油井及处理临近平台产液的游离气体状态。排空火炬不仅无法点燃,且气体也为间歇排出,从侧面佐证了平台油井产气量的微小,如图6所示。



图6 XJ24-3平台排空火炬

### 3 结束语

井口取样分离并检测油,水单相密度的准确性,对油水两相流的相含率分配及体积流量转换精度起到至关重要的影响。相比于传统的比重瓶法和玻璃管密度计法,本方法检测时需要的试样量较小,仅需3~5 mL;所述仪器设备皆为市售,方便整合替换;可极大的减少相关取样及化验人员的工作强度。可为需要相关密度数据的平台及时提供支持。

多相计量工业化试验装置能够精确的计量单井采出液流量,并实时给出含水率,温度,压力等参数。计量范围较宽,精度较高。在单井计量测试中发现了含水率周期波动的油井,如应用多相计量撬长期跟踪监测其变化趋势,将为油田的单井精细化管理提供依据。

石油平台占地面积受限,尤其对现有平台升级

改造的过程中,较难找到一处完整的空位放置多相计量工业化装置。模块化分体设计将是其之后的产业化发展趋势

### 参考文献

- [1] (英) ROGER C B. 流量测量手册: 工业设计、工作原理, 性能和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020: 359-373, 395-425.  
ROGER C B. Flow measurement manual: industrial design, working principles, performance, and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 359-373, 395-425.
- [2] 刘培林, 刘飞龙. 深水油气田水下生产系统双管输送流动安全研究——以流花21-2油田为例[J]. 中国海上油气, 2021, 33(4): 156-163.  
LIU P L, LIU F L. A study on the flow safety of double pipe transportation in underwater production systems of deepwater oil and gas fields - taking liuhua 21-2 oilfield as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(4): 156-163.
- [3] 胡冬, 郝蕴, 王春升, 等. 南海无人井口平台工艺方案研究[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(1): 35-37.  
HU D, HAO Y, WANG C S, et al. Research on the process scheme of unmanned wellhead platform in the South China Sea[J]. Petro-Chemical Equipment, 2021, 24(1): 35-37.
- [4] 张宁, 王跃曾. 浅谈十种深水和超深水油田开发生产解决方案[J]. 中国设备工程, 2021(12): 199-201.  
ZHANG N, WANG Y Z. A brief discussion on ten solutions for deepwater and ultra deepwater oilfield development and production[J]. China Plant Engineering, 2021(12): 199-201.
- [5] 朱迎辉, 陈维华, 廖意, 等. 国外深水油田高效开发关键策略与技术[J]. 中外能源, 2017, 22(6): 50-54.  
ZHU Y H, CHEN W H, LIAO Y, et al. Key strategies and technologies for efficient development of deepwater oilfield abroad[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(6): 50-54.
- [6] 万广峰, 刘成彬, 张洁, 等. 中油国际巴西深水油气项目提质增效创新与实践[J]. 国际石油经济, 2021, 29(3): 96-101.  
WAN G F, LIU C B, ZHANG J, et al. Innovation and practice in improving quality and efficiency of China National Petroleum Corporation's Brazil deepwater oil and gas project[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(3): 96-101.
- [7] 张颖, 李慧明, 郭嘉宁. 巴西深水油田开发工程降本增效措施[J]. 化工管理, 2021(31): 183-184.  
ZHANG Y, LI H M, GUO J N. Cost reduction and efficiency improvement measures for Brazil's deepwater oilfield development projects[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(31): 183-184.
- [8] 杜馨, 孙晓荣, 刘翠玲, 等. 原油含水率的红外光谱快速检测技术[J]. 中国测试, 2020, 46(1): 50-55.  
DU X, SUN X R, LIU C L, et al. Infrared spectroscopy for



- rapid detection of moisture content in crude oil[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(1): 50-55.
- [9] 贾惠芹, 戴阳. 螺旋天线原油含水率测量仪的误差分析与校准[J]. *中国测试*, 2021, 47(3): 117-121.  
JIA H Q, DAI Y. Error analysis and calibration of crude oil water cut measurement instrument with spiral antenna[J]. *China Measurement & Test*, 2021, 47(3): 117-121.
- [10] 青美伊, 梁华庆, 袁月. 剪切条件下油水乳状液含水率测量装置的设计[J]. *中国测试*, 2019, 45(1): 100-106.  
QING M Y, LIANG H Q, YUAN Y. Design of water-content testing device for oil-water emulsions under shear conditions[J]. *China Measurement & Test*, 2019, 45(1): 100-106.
- [11] ELLIOTT A J, FALCONE G, PUTTEN D V, et al. Investigating reproducibility in multiphase flow metrology: results from an intercomparison of laboratories[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 79: 101951.
- [12] O'NEILL K T, BRANCATO L, STANWIX P L, et al. Two-phase oil/water flow measurement using an earth's field nuclear magnetic resonance flow meter [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, (202): 222-237.
- [13] SHI X W, TAN C, DONG F, et al. Flow rate measurement of oil-gas-water wavy flow through a combined electrical and ultrasonic sensor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131982.
- [14] 陈基亮, 孔德明, 郝虎, 等. 石油生产多组分监测光纤电导一体式传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(6): 261-271.  
CHEN J L, KONG D M, HAO H, et al. Research on fiber optic conductivity integrated sensor for multi component monitoring in petroleum production[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(6): 261-271.
- [15] FADAEI M, AMELI F, HASHEMABADI S H. Investigation on Different Scenarios of Two-phase Flow Measurement Using Orifice and Coriolis Flow Meters: Experimental and Modeling Approaches[J]. *Measurement*, 2021, 175: 108986.
- [16] 陈艳, 王军, 刘畅. 自标定多井在线计量方案[J]. *化工自动化及仪表*, 2021, 48(6): 562-565.  
CHEN Y, WANG J, LIU C. Self calibration multi well online measurement scheme[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2021, 48(6): 562-565.
- [17] 刘帅, 郝永顺. 某平台测试分离器与 GLCC 多相流量计使用效果对比分析[J]. *化工管理*, 2021(15): 175-177.  
LIU S, HAO Y S. Comparative analysis of the effectiveness of testing separators and GLCC multiphase flow meters on a certain platform[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021(15): 175-177.
- [18] 余海, 贺公安. 多相流量计装置在油井计量中的应用[J]. *化工管理*, 2021(24): 189-190.  
YU H, HE G A. The application of multiphase flow metering devices in oil well metering[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021(24): 189-190.
- [19] MERIBOUT M, AZZI A, GHENDOUR N, et al. Multiphase flow meters targeting oil & gas industries[J]. *Measurement*, 2020, 165: 108111.
- [20] 张宁, 孙钦, 侯广信, 等. 国产水下多相流量计第三方认证[J]. *中国海洋平台*, 2021, 36(5): 96-100.  
ZHANG N, SUN Q, HOU G X, et al. Third party certification of domestic underwater multiphase flow meters[J]. *China Offshore Platform*, 2021, 36(5): 96-100.
- [21] 黄浩清. 西江 24-3-A20ERW 大位移井钻井液技术[J]. *钻井液与完井液*, 2002(1): 31-34.  
HUANG H Q. Drilling fluid technology for Xijiang 24-3-A20ERW extended reach well[J]. *Drilling Fluid and Completion Fluid*, 2002(1): 31-34.
- [22] 何云腾, 吴奇霖, 陈三君, 等. 定容管活塞式油气水多相流量计[J]. *油气井测试*, 2019, 28(4): 45-50.  
HE Y T, WU Q L, CHEN S J, et al. Fixed volume tube piston type oil gas water multiphase flow meter[J]. *Well Testing*, 2019, 28(4): 45-50.
- [23] 徐浩然, 徐科军, 张伦, 等. 科氏质量流量计测量含气液体流量关键技术综述[J]. *计量学报*, 2021, 42(4): 483-494.  
XU H R, XU K J, ZHANG L, et al. Overview of key technologies for measuring gas liquid flow with coriolis mass flowmeters[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(4): 483-494.
- [24] 蔡武昌, 应启夏. 新型流量检测仪表[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
CAI W C, YING Q J. New flow detection instruments [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [25] 杨辉跃, 涂亚庆, 毛育文. 科氏质量流量计振动幅值的仿人智能控制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(5): 118-123.  
YANG H Y, TU Y Q, MAO Y W. A humanoid intelligent control method for vibration amplitude of coriolis mass flowmeter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(5): 118-123.
- [26] 赵敏涛. 科氏质量流量计的应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.  
ZHAO M T. Research on the application of Coriolis mass flowmeter [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [27] 陶波波, 徐科军, 侯其立, 等. 变传感器设定值的科氏质量流量管控制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3): 712-720.  
TAO B B, XU K J, HOU Q L, et al. Control method for Coriolis mass flow tube with variable sensor settings[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3): 712-720.
- [28] 王永强, 张凯权, 汪建伟, 等. 使用科氏力质量流量计的多相流量计的研制[J]. *油气井测试*, 2021, 30(3): 20-24.  
WANG Y Q, ZHANG K Q, WANG J W, et al. Development of multiphase flow meters using Coriolis force mass flow meters[J]. *Well Testing*, 2021, 30(3): 20-24.

(下转第 82 页)

- CAO Q, LI J, QU D W. Construction of typical driving cycle for passenger cars in the city of Dalian[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(11): 1537-1542.
- [9] ZHANG M, SHI S M, LIN N, et al. High-efficiency driving cycle generation using a markov chain evolution algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1288-1301.
- [10] 张文林, 孙建功. 运用小波分析的振动信号采集系统[J]. *中国测试技术*, 2005(1): 49-51.
- ZHANG W L, SUN J G. System of vibration signal acquisition based on wavelet analyzing[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2005(1): 49-51.
- [11] 高建平, 任德轩, 郝建国. 基于全局 K-means 聚类算法的汽车行驶工况构建[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(1): 112-118.
- GAO J P, REN D X, XI J G. Construction of vehicle driving cycle based on global K-means clustering algorithm[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2019, 38(1): 112-118.
- [12] 任田园. 基于马尔可夫链的西安市线路公交典型工况开发与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- REN T Y. Research on development of typical driving cycles based on markov chain and application research of driving cycles[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [13] 闫桢. 中国汽车行驶工况标准正式发布[J]. *中国汽车*, 2019(11): 6-7.
- [14] 王鑫, 韩秀坤, 葛蕴珊, 等. 北京市公交车典型行驶工况的构建[J]. *汽车工程*, 2010, 32(8): 703-706.
- WANG C, HAN X K, GE Y S, et al. Construction of typical driving cycle for public bus in Beijing city[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(8): 703-706.
- [15] 杜爱民, 步曦, 陈礼璠, 等. 上海市公交车行驶工况的调查研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006(7): 943-946.
- DU A M, BU X, CHEN L P, et al. Investigation on bus driving cycles in Shanghai[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2006(7): 943-946.
- [16] 彭美春, 林权臻, 梁晓峰, 等. 广州市公交车行驶工况与ETC城市工况的比较[J]. *汽车工程*, 2012, 34(11): 1044-1048.
- PENG M C, LIN Q Z, LIANG X F, et al. Comparison between the driving mode of city buses in Guangzhou city and the urban part of ETC circle[J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(11): 1044-1048.
- [17] 郝艳召, 张洁, 王生昌, 等. 武汉市公交车典型行驶工况的构建[J]. *交通信息与安全*, 2014, 32(6): 139-145.
- HAO Y Z, ZHANG J, WANG S C, et al. Construction of typical driving cycle for public buses in Wuhan city[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2014, 32(6): 139-145.

(编辑:商丹丹)

(上接第 37 页)

- [29] 尹晶晶. 对原油密度化验影响因素的分析[J]. *化工管理*, 2021(26): 79-80.
- YIN J J. Analysis of influencing factors on crude oil density assay[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2021(26): 79-80.
- [30] 何云腾, 张健, 李华, 等. 比较振荡管法和比重瓶法测定 15~80℃ 原油视密度换算标准密度的研究[J]. *计量学报*, 2022, 43(5): 629-635.
- HE Y T, ZHANG J, LI H, et al. A study on the conversion of apparent density to standard density of crude oil at 15~80 °C by comparing the oscillation tube method and the pycnometer method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(5): 629-635.
- [31] 张武攀, 张天祥. 一口大位移井开发一个油田——创造多项世界纪录的中国南海西江 24-3-A14 大位移井钻井新技术[J]. *中国海上油气(工程)*, 1998(3): 9-14.
- ZHANG W N, ZHANG T X. Developing an oilfield with a large displacement well - a new drilling technology for the Xijiang 24-3-A14 large displacement well in the South China Sea, creating multiple world records[J]. *China Offshore Oil and Gas (Engineering)*, 1998(3): 9-14.
- [32] 周渭生. 最新温标纯水密度表[J]. *计量技术*, 2000(3): 40-42.
- ZHOU M S. The latest temperature standard pure water density table[J]. *Measurement Technique*, 2000(3): 40-42.
- [33] 何云腾, 张健, 李华, 等. 利用振荡管密度计检测循环流动附温油水混合物密度[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(5): 29-34.
- HE Y T, ZHANG J, LI H, et al. Using an oscillating tube densitometer to detect the density of circulating flow with attached temperature oil-water mixture[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(5): 29-34.
- [34] 原油中水和沉淀物的测定 离心法:GB/T 6533—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Determination of water and sediment in crude oil by centrifugation method: GB/T 6533-2012 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2013.
- [35] 原油水含量的测定 蒸馏法:GB/T 8929—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Determination of water content in crude oil by distillation method: GB/T 8929-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.

(编辑:刘杨)