

# 定容管活塞式油气水多相流量计

何云腾<sup>1</sup>, 吴奇霖<sup>2</sup>, 陈三君<sup>2</sup>, 李东晖<sup>1</sup>, 吴辰<sup>3</sup>, 朱沫<sup>3</sup>

- 1. 中国科学院力学研究所 北京 100190
- 2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司生产作业部 广东深圳 518067
- 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

通讯作者: Email: donghui\_li@imech.ac.cn

项目支持: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)“超常环境下系统力学问题研究与验证”(XDB22000000)、中国海洋石油总公司“十三五”重大科技项目“海相砂岩油田‘双特高’开发后期提高采收率技术”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 22 LTD 03 SZ 2016)

引用: 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.

Cite: HE Yunteng, WU Qilin, CHEN Sanjun, et al. Piston-type oil-gas-water multiphase flowmeter with constant volume tube [J]. Well Testing, 2019, 28(4): 45-50.

**摘要** 为验证定容管活塞式油气水多相流量计的计量精度及适用性,在 XJ24-3 平台和 EP24-2 平台上进行测试实验。受现场测试条件限制,将多相流量计串联入测试管汇。8 口单井实验结果表明,多相流量计计量液量和含水率测试与传统测试分离器计量和手工取样测含水的结果误差约±5%;与平台上现有传统计量设备相比,能快速进行单井井口计量切换,且测试结果吻合度较好。该多相流量计现场环境友好,计量准确快速,可简化现场工艺流程,具有推广应用价值。

**关键词** 定容管; 活塞; 油气水多相流量计; 相含率; 体积流量; 单井计量; 油井采出液

**中图分类号**: TE353      **文献标识码**: B      **DOI**: 10.19680/j.cnki.2019.04.008

## Piston-type oil-gas-water multiphase flowmeter with constant volume tube

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

- 1. Institute of Mechanics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China
- 2. Department of Production, Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518067, China
- 3. Shenzhen Branch, CNOOC Enertech Equipment Technology Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518067, China

**Abstract:** In order to verify the measurement accuracy and applicability of the piston-type oil-gas-water multiphase flowmeter with constant volume tube, test trials were carried out on XJ24-3 platform and EP24-2 platform. Due to the limitation of field test conditions, multiphase flowmeters were connected in series to the test manifold. The test results of 8 single wells show that the error of liquid volume and water content measured by the multi-phase flowmeter was less than ±5% when compared with the results of traditional separator measurement and manual sampling measurement. Compared with the existing traditional measurement equipment on the platform, the multi-phase flowmeter can quickly switch the metering of wellhead in single well, and the test results were in good agreement. The multi-phase flowmeter was environmentally friendly, accurate and fast in measurement, and can simplify the process flow on site. It has the values of popularization and application.

**Keywords:** constant volume tube; piston; oil-gas-water multiphase flowmeter; phase holdup; volume flow; single well metering; produced fluids of oil well

油田单井采出液的计量问题是典型的多相流检测问题。由于单井采出液多相流动的复杂性和应用条件的多变性,给多相流量计在单井流量测试应用中带来了很多困难。特别是在海洋平台这种管道内压力和温度较高,液相产量大,且在管道内有不稳定气相流量的条件下,经常伴随段塞等复杂流态。这就使得在陆上油田具有一定应用规模的

多相流量计在海上平台的使用遇到了很大困难。在现阶段,海洋平台的计量工作主要通过测试分离器进行,将油井来流通入测试分离器,经过三相分离,分别得到油、气、水的各相流量。同时配合人工采样,对含水率进行综合分析。传统计量工作繁重复杂,为得到单口油井的各相流量常常需要耗费数小时甚至更久时间。另外,测试分离器本身占地体

积庞大,同时由于内部蓄液问题的存在,单井测试前都需要对其中的工质进行置换。这更延长了计量等待时间。

近年来,海上平台油气水计量研究不断深入。李明海等对单井测试时多相流量计进行可靠的改造,准确获得了单井的油、气、水含量<sup>[1]</sup>。卢壮杰对比分析了各种计量装置应用效果,提出胜利海洋平台计量装置的选取依据,为自动化生产管理提供准确的计量数据奠定了基础<sup>[2]</sup>。许晓英等对多相流量计在海上应用条件等做了综述<sup>[3]</sup>。毕权、张丝雨等对商业的多相流量计使用进行了分类总结<sup>[4-5]</sup>。Richard T. 等对多种多相流量计在海上应用条件做了比较全面的阐述<sup>[6]</sup>。Tomren A. L. 等使用红外(IR)及气相色谱(CG)分析方法,对多个原油样本进行了理化参数分析,明确了样品的介电常数等参数,对相关多相流量计仪器测量参数的整定提供了重要依据<sup>[7]</sup>。王雪飞等对分离器进行不断改进,经渤海油田渤中区块3口井试验性应用,实现了高黏度稠油的精确计量<sup>[8]</sup>。

国内外一些工程技术人员尝试将现有商品化的多相流量计用于陆地油田或海洋石油平台的单井测试实验<sup>[9-10]</sup>。王晋等使用双能 $\gamma$ 射线型多相流量计对四口油井进行了检测,测试结果表明能够有效的计量工况稳定的生产井,但对流体工况多变的油井测试效果不甚理想<sup>[11]</sup>。张兴华等在渤海某平台使用Vx多相流量计Phase Tester进了4口单井的测试,取得较好效果<sup>[12]</sup>。刘平等在延长油田使用 $\gamma$ 射线型多相流量计取得了一定数据的基础上,提出了相应的计量性能保障措施<sup>[13]</sup>。目前,在海洋石油平台现场使用多相流量计较多依赖于双能 $\gamma$ 放射源进行各相含率的检测,此种检测手段在大气量工况下的偏差较大。而且由于使用了放射性部件,虽然在正常工作情况下,多相流量计表面检测到的放射当量小于国家相关标准,但长期低剂量的辐射环境仍然可能加大现场一线人员的职业卫生风险<sup>[14]</sup>。

吴浩达等设计了一种微差压式多相流量计,目前已完成实验室计量测试,效果较好,具有一定的工业现场测试前景<sup>[15]</sup>。潘艳芝等以流量大小进行分类,低流量时使用质量法,高流量时采用文丘里法,为稠油计量提供了一种思路方法<sup>[16]</sup>。汪沪亮使用旋流式多相分离计量系统在新疆风城SAGD油田的应用<sup>[17]</sup>。刘颖使用GLCC多相分离计量系统在

辽河油田的稠油热采井进行了计量应用,均获得了较为理想的结果<sup>[18]</sup>。但由于海洋平台对于占地面积的敏感性,三相分离式计量装置并不适合在石油钻井平台大规模部署。

Shamael A. A. 等使用超声层析成像技术(UTM)配合先进的压缩感知(CS)重建方法,提高了UTM的图像质量,使其在油井计量的精度上更进一步<sup>[19]</sup>。

虽然许多工程师在现场进行了大量工作,但由于多相流的复杂性,现场工况多样以及现有多相流量计应用条件的局限性,并没有一种具有宽泛使用范围的多相流量计替代现行计量装置。

本文使用一种定容管活塞式油气水多相流量计对XJ24-3、EP24-2平台共八口油井进行了单井采出液计量测试实验。在平台的测试实验中,新建了临时测试管线,选择合适的位置进行了多相流量计的安装。多相流量计的测试数据分别与平台现有流量计量设备和现场人工采样化验的含水率进行比对。最终的实验结果表明,这种定容管活塞式油气水多相流量计能够在线同步实时完成液相流量、含水率、气相流量等指标,并给出准确的日产量数据,且数据取得迅速,能够较好的适用于海洋石油平台生产环境。

## 1 原理特点及技术指标

定容管活塞式多相流量计基本组成包括:一根定制的定容标准计量管,计量管内置可以上下运动的活塞。活塞运动方向通过换向阀门控制流体运动方向来推动。通过计量管内液体和气体体积来计算来液的体积流量,计量体积管内还装有温度、压力以及密度测量等仪表,使用综合密度分析法来确定相含率。测量过程和管道中原油的黏度、流速和油气水的相分布等参数无关,也和多相流体的流态无关。因此,简化了原本复杂的多相流问题,实现了计量的快速和准确。这种多相流量计具有计量精度高( $\pm 5\%$ )、具有高达100倍以上流量比和耐受10倍以上的气液比等特点。由于系统中没有使用放射线测量,因而简化了监管手续,使用安全,环境友好,受到油田用户普遍欢迎。

定容管活塞式油气水多相流量计主要技术指标如下:

(1) 体积流量测量范围:  $2 \sim 500 \text{ m}^3/\text{d}$  (三相总工况体积)。

- (2) 相含率范围:含油 2%~98%,含水 2%~98%,含气 0~99%。
- (3) 计量精度:工况气液比小于 3:1 时,各相误差小于±3%~±5%;工况气液比在 3:1 与 100:1 之间时,各相误差±5%。
- (4) 工作压力:不大于 1.6 MPa,设计压力 2.5 MPa。
- (5) 体积和重量:0.8 m×0.8 m×2.6 m(高);800 kg。

2 测试实验工艺流程

在 XJ24-3 平台,单井来液通过管汇切换待测油井进入测试管路,先进入平台现有的科氏力流量计得到总液相流量,流量计可以容许少量气相流量而不影响测量结果。流量计出口是一段长度为 1.5 m 的垂直管,垂直管上设置有取样口,流体随后进入带手动旁通的多相流量计进行计量,流量计出口流向生产分离器。整个实验流程如图 1 所示。

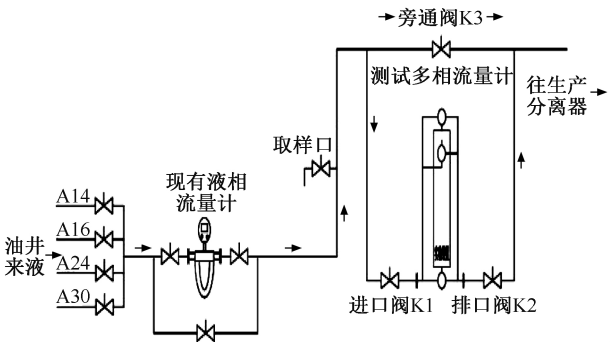


图 1 XJ24-3 平台实验流程图  
Fig.1 Experiment workflow chart of XJ24-3 platform

在 EP24-2 平台,单井来液体首先经过垂直管段的取样口后进入管汇,通过阀门选择需要测试的油井。由于原工艺流程上有一段作为分离测试的“T”型管段,为尽量保持管道内多相流动不受影响,将“T”型管上端及中端出口用盲板封堵。仅留下端出口,通过软管与测试流量计入口及旁通相连,通过测试多相流量计后导入平台现有的测试分离器。整个实验流程如图 2 所示。

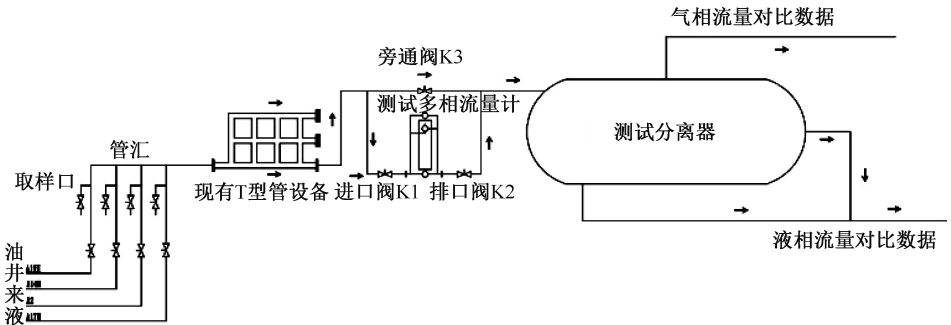


图 2 EP24-2 平台实验流程图  
Fig.2 Experiment workflow chart of EP24-2 platform

3 误差计算

在平台上不可能知道单井流量的客观值。因此,测试试验的测量值只能和平台上现有测试设备进行对比。在 XJ24-3 平台上总液相流量和平台上现有的科氏力单相流量计对比,含水率通过手工放样静置后待油水分层人工读取;在 EP24-2 平台上总液相流量和测试分离器液相出口流量计进行对比,含水率为人工放样装瓶经离心机保温离心分层后人工读取。因此,本实验的测试结果是一种对比实验结果。另外,多相流量计的测试值的误差分析使用满度误差来进行分析。

总流量误差计算公式如下:

$$\beta_m = \frac{\overline{Q}_{d\text{ MPFM}} - \overline{Q}_{d\text{ FM}}}{Q_{d\text{ max}}} \times 100\%$$

式中: $\beta_m$  为流量满度相对误差,%; $Q_{d\text{ MPFM}}$  为多相流量计单日平均流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $Q_{d\text{ FM}}$  为平台现有流量计单日平均流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $Q_{d\text{ max}}$  为多相流量计单日满度流量, $\text{m}^3/\text{d}$ 。

对于 XJ24-3 平台,多相流量计单日满度流量  $Q_{d\text{ max}} = 637\text{ m}^3/\text{d}$ ;对于 EP24-2 平台,多相流量计单日满度流量  $Q_{d\text{ max}} = 500\text{ m}^3/\text{d}$ 。

含水率计算公式如下:

$$\overline{W}\%_{d\text{ MPFM}} = \frac{\overline{V}_{\text{MPFMW}}}{\overline{V}_{\text{MPFML}}} \times 100\%$$
$$\overline{W}\%_{d\text{ t}} = \frac{V_{\text{W}}}{V_{\text{L}}} \times 100\%$$

对于含水率偏差:

$$B\%_{\text{W}} = \overline{W}\%_{d\text{ MPFM}} - \overline{W}\%_{d\text{ t}}$$

式中： $\overline{W\%_{d,MPFM}}$  为多相流量计日均含水率，%； $W\%_{d,1}$  为平台取样化验日均含水率，%； $V_{MPFMW}$  为多相流量计水相单日累积量， $m^3$ ； $V_{MPFML}$  为多相流量计液相单日累积量， $m^3$ ； $V_W$  为平台取样化验单日水相累积量， $m^3$ ； $V_L$  为平台取样化验单日液相累积量， $m^3$ ； $B\%_W$  为含水率偏差，%。

### 4 测试结果

测试实验于 2018 年 1-6 月分别在南海 XJ24-3、EP24-2 两个平台进行应用测试，其中 XJ24-3 平台为南海冬季环境测试；EP24-2 平台为南海夏季环境测试。由于此次测试多相流量计样机的型号最大工况流量  $Q_{max}$  为  $637\text{ m}^3/\text{d}$ （XJ24-3 平台）和  $500\text{ m}^3/\text{d}$ （EP24-2 平台）。所以，仅挑选了适应流量条件的油井进行测试。

XJ24-3 平台已安全运行二十多年，所属油井普遍进入高含水、低含油、基本不产气的采油终末期。液量测量使用科氏力流量计，依靠人工读取流量计数据，配合手工采样静置法测得总液量和含水率。

表 1 中所列多相流量计数据是三次测量的均值，每次测量包含六个测量组，现有流量计读数为现场工作人员同步读取的数据。

表 1 XJ24-3 平台各井流量对比

Table 1 Flow comparison of XJ24-3 platform

井号	多相流量计日均 液量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	现有流量计均 流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	液相流量满度 误差/%
A14	213.91	222.83	-1.40
A16	155.34	159.16	-0.60
A24	131.63	143.25	-1.83
A30	581.74	620.73	-6.13

从表 1 数据可以看出，多相流量计的日均液量与平台现有单相流量计的数据吻合度较好。A30 号井由于超过此型号的流量计量上限，所以计量误差略有增大。图 3 为多相流量计及现场流量计液相流量对比的柱状图，由图可看出具体差距幅度。

多相流量计可以在测量时实时给出含水率，而油井采样含水率需要在现场进行取样，通过静置法得到数值进行比对。对比结果见表 2。

从表 2 看出，多相流量计的日均含水率与现场多次采样化验的日均含水率吻合度较好，偏差基本维持在±3%以内。

以上四口油井的生产报表显示其采出液基本无游离气相，多相流量计也未检测到气体流量。从以上数据可以看出，这四口油井基本进入了以高

含水为特征的油水两相流生产阶段。

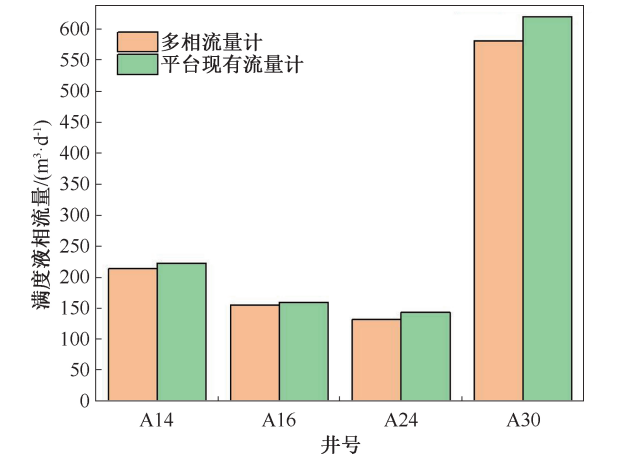


图 3 XJ24-3 平台各井流量柱状图  
Fig.3 Flow histogram of XJ24-3 platform

表 2 XJ24-3 平台各井含水率对比

Table 2 Comparison of water content of XJ24-3 platform

井号	多相流量计日均 含水率/%	油井采样 含水率/%	含水率百分 偏差/%
A14	80.19	82.30	-2.11
A16	97.49	96.86	0.63
A24	93.22	92.93	0.29
A30	91.48	94.18	-2.70

EP24-2 平台为近年新投产的大型钻采石油平台。所属油井流量和含水率分布情况多样，气相含量差异较大，平台上具有测试分离器，可以同步给出总液量和气体流量，含水率则需通过采样离心法得到。

表 3 中所列日均液量为多相流量计 8~10 次测量数据的均值，每次测量包含六个测量组，测试分离器流量数值为现场工作人员和多相流量计同步读取中控数据平均得到。

表 3 EP24-2 平台各井流量对比

Table 3 Flow comparison of EP24-2 platform

井号	多相流量计日均 液量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	测试分离器日均 流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	液相流量满度 误差/%
A19H	80.09	82.68	-0.52
A14H	82.67	75.29	1.48
A2	100.63	103.01	-0.48
A17H	283.65	262.78	4.17

从表 3 数据可以看出，多相流量计的日均液量与平台现有单相流量计的数据吻合度较好。多相流量计液相流量对比测试分离器的误差维持在±5%以内。图 4 所示为多相流量计及现场测试分离器液相流量对比的柱状图，由图可看出具体差距幅度。



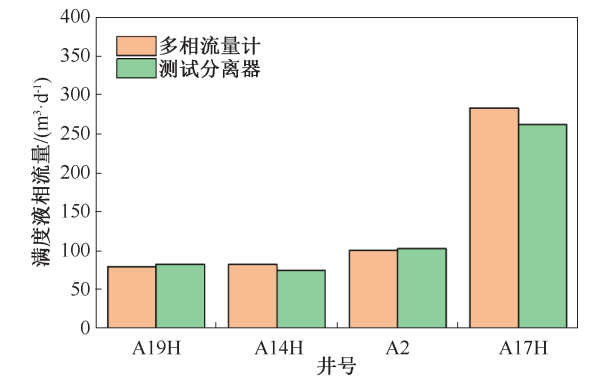


图 4 EP24-2 平台各井流量柱状图

Fig.4 Flow histogram of EP24-2 platform

EP24-2 平台取样测试含水率数据见表 4,平台含水率测定采用离心法,即在多相流量计测试同时进行手工取样并在离心机离心,待油水分层后读取数据。

表 4 EP24-2 平台各井含水率对比

Table 4 Comparison of water content of EP24-2 platform

井号	多相流量计日均	油井采样	含水率百分
	含水率/%	含水率/%	偏差/%
A19H	85.68	85.00	0.68
A14H	34.32	38.30	-3.98
A2	57.29	53.00	4.29
A17H	36.88	39.00	-2.12

从表 4 中可以看出多相流量计的日均含水率与人工多次采样化验的日均含水率吻合较好,具有较高的置信度。

多相流量计的满度流量是工况下 500 m³/d,气相流量测试对比结果见表 5。在气相流量测定时,需要根据温度和压力换算成标况流量,具体数据如下:A19H 井:4 206.22 Nm³/d; A14H 井:4 293.32 Nm³/d; A2 井:4 099.20 Nm³/d; A17H 井:4 172.91 Nm³/d。

表 5 EP24-2 平台各井气相流量对比

Table 5 Comparison of gas flow rates of EP24-2 platform

井号	多相流量计日均	测试分离器日均	气相流量满度
	产气量/(Nm³·d⁻¹)	产气量/(Nm³·d⁻¹)	误差/%
A19H	17.51	0.00	0.42
A14H	28.83	0.00	0.67
A2	39.76	347.00	-7.50
A17H	184.44	654.73	-11.27

在气相流量测试时,平台使用的气体流量计在流量较小的情况下无法给出流量值。达到启动流量后相对差别仍然较大。与历史生产数据报表对比发现,多相流量计的气相测试数据对其变化趋势的跟踪是准确的。因而,对比结果还需进一步分析。

通过两个平台总共八口单井的测试结果可以看出,定容管活塞式油气水多相流量计的液量和含水率测试与传统测试分离器和手工取样测含水的对比测试结果误差不大,吻合度较高,总体能够达到±5%的精度。多相流量计有较高的置信度。相比较而言,平台上目前手段进行气相测量误差更大,存在问题更多。多相流量计的测量结果难以和它对比。目前只能进行流量变化趋势的比对。

与平台现有测试分离器对比,定容管活塞式多相流量计不仅在占地载荷和能耗上有优势,同时在计量效率上的优势更加明显。特别是此多相流量计能保证进入仪器的单井采出液为单向一过性的,可以快速进行单井井口的计量切换,无需测试分离器对各井计量前要长时间润洗的过程,节省了大量时间。

通过此测试实验可以看出,定容管活塞式油气水多相流量计具有技术先进,占地小,现场环境友好,计量准确快速等特点。能够简化现场工艺流程,降低成本,具有推广应用的价值。

5 结论

(1)定容管活塞式多相流量计在海洋平台的成功测试应用,为采油平台多相计量提供了一种新方法。为现有采油平台在全生命周期中进行多相流量计量创造了可能性。

(2)这项技术与管道中流体的各相流动性性质基本无关,仅对各相单一理化参数敏感,使之可以胜任绝大部分油田单井采出液的多相计量任务,从油井的前期勘探井到单井进入高含水的采油终末期,都可以进行准确有效计量。

(3)未来多相流量计将向着管道化、低功耗、智能化的方向演进;布置位置将向井下发展,为更好的监测油井生产状态,提供一手数据资料创造条件。

致谢:感谢中国科学院力学研究所、中海石油(中国)有限公司深圳分公司同意本文公开发表;感谢中国科学院战略性先导科技专项(B类)“超常环境下系统力学问题研究与验证”、中国海洋石油总公司“十三五”重大科技项目“海相砂岩油田‘双特高’开发后期提高采收率技术”的支持。

参考文献

[1] 李明海,强群. 海上生产平台测试多相流量计改造[J]. 化学工程与装备,2018(12):51-53.

LI Minghai, QIANG Qun. Modification of Multiphase Flowmeter for Offshore Production Platform Testing [J].

- Chemical Engineering & Equipment, 2018(12):51-53.
- [2] 卢壮杰. 胜利油田海洋平台油气计量装置的发展[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(5):89-92.  
LU Zhuangjie. Development of Oil and Gas Measuring Device on Shengli Offshore Platform [J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(5):89-92.
- [3] 许晓英, 赵庆凯, 陈丰波, 等. 多相流量计在国内市场的应用及发展趋势[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(2):99-104.  
XU Xiaoying, ZHAO Qingkai, CHEN Fengbo, et al. Application and development trend of multiphase flow meter in the domestic market [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(2):99-104.
- [4] 毕权. 多相流计量综述[J]. 辽宁化工, 2015, 44(12):1463-1465.  
BI Quan. Overview of multi-phase flow measuring [J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(12):1463-1465.
- [5] 张丝雨, MIAO Henry, 吴浩达, 等. 油井多相流计量技术研究进展[J]. 数码设计, 2017, 6(2):21-27.  
ZHANG Siyu, MIAO Henry, WU Haoda, et al. Research progress on multiphase flow measurement technology of oil wells [J]. Peak Data Science, 2017, 6(2):21-27.
- [6] RICHARD T, ANTON G, ERLING A H. Three-phase flow measurement in the offshore oil industry is there a place for process tomography? [C]. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, April 14-17, 1999:228-235.
- [7] TOMREN A L, BARTH T, FOLGER K. Multivariate analysis of crude oil composition and fluid properties used in multiphase flow metering (MFM) [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(9):5679-5688.
- [8] 王雪飞, 谭忠健, 张金煌, 等. 稠油测试中油气分离与产量计量方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(2):33-39.  
WANG Xuefei, TAN Zhongjian, ZHANG Jinhuan, et al. Method for oil and gas separation and production measurement in heavy oil testing [J]. Well Testing, 2019, 28(2):33-39.
- [9] 刘忠明, 罗京. 多相流量计在海洋石油采油平台的开发与应用[J]. 中国造船, 2012, 53(S2):437-444.  
LIU Zhongming, LUO Jing. Development and application of multiphase flow meter at offshore oil recovery platforms [J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(S2):437-444.
- [10] 马跃, 郑举, 唐晓旭, 等. 多相流量计在渤海稠油油田的应用研究[J]. 石油规划设计, 2012, 23(1):36-38, 41.  
MA Yue, ZHENG Ju, TANG Xiaoxu, et al. Application of the MPFM to the heavy oil field of Bohai sea [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2012, 23(1):36-38, 41.
- [11] 王晋, 刘士旺, 程高峰, 等. 多相流量计在油气井测试中的应用[J]. 油气井测试, 2013, 22(6):45-48.  
WANG Jin, LIU Shiwang, CHENG Gaofeng, et al. Application of multiphase flowmeter in oil and gas well testing [J]. Well Testing, 2013, 22(6):45-48.
- [12] 张兴华, 许峰, 翟洪君, 等. Vx 多相流量测试技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(4):60-62.  
ZHANG Xinghua, XU Feng, ZHAI Hongjun, et al. Research of Vx mutiphase flow test technology and its application [J]. Well Testing, 2017, 26(4):60-62.
- [13] 刘平, 雷聚明.  $\gamma$  源多相流量计在延长测试中的应用分析[J]. 自动化仪表, 2018, 39(8):77-79, 83.  
LIU Ping, LEI Juming. Application analysis of  $\gamma$ -source multiphase flowmeter in extended test [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(8):77-79, 83.
- [14] 彭卫芳, 尧振宇, 睢昱, 等. 2015 年某海域油气生产平台多相流量计辐射检测结果[J]. 职业与健康, 2017, 33(10):1300-1302.  
PENG Weifang, YAO Zhenyu, SUI Gang, et al. Detection of the radiation of multiphase flow meter on the oil and gas production platform in a sea area in 2015 [J]. Occupation and Health, 2017, 33(10):1300-1302.
- [15] 吴浩达, 项勇, 张丝雨, 等. 油井多相流在线计量装置实验研究[J]. 2016, 5(3):35-39.  
WU Haoda, XIANG Yong, ZHANG Siyu, et al. Experimental study on online metering device of multiphase flow in oil well [J]. Peak Data Science, 2017, 6(2):21-27.
- [16] 潘艳芝, 王栋, 巩大利, 等. 一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7):140-144.  
PAN Yanzhi, WANG Dong, GONG Dali, et al. Investigation on the oil-water-gas measurements in viscous oil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7):140-144.
- [17] 汪沪亮. 旋流式多相流计量系统在新疆风城 SAGD 油田的应用[J]. 石化技术, 2016, 23(11):121, 123.  
WANG Huliang. Application of CMS in SAGD Block, Fengcheng, Xinjiang Oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(11):121, 123.
- [18] 刘颖. 稠油热采单井计量装置[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(9):55.  
LIU Ying. Single well metering device for heavy oil thermal recovery [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(9):55.
- [19] SHAMAEI A A, MOHAMED N N. Image reconstruction of multiphase flow metering: A compressed sensing approach[C]. SPE 192369, 2018.

编辑 刘述忍

第一作者简介:何云腾,男,1989 年出生,工程师,2013 年毕业于南京工业大学应用化学系,现主要从事多相流检测技术原型机的测试工作。电话:010-82544173, 18614049261; Email:HYT@imech.ac.cn。通信地址:北京市海淀区北四环西路 15 号中国科学院力学研究所,邮政编码:100190。