

# 豁免源多相流量计在多井合采混输单井计量中的应用

庞振力<sup>1</sup>, 季鹏<sup>1</sup>, 张小玲<sup>2</sup>, 王瑞娜<sup>3</sup>, 张文海<sup>1</sup>, 刘孝强<sup>1</sup>

1. 中国石油集团海洋工程有限公司天津分公司 天津 300454

2. 华北油田公司经济技术研究院 河北任丘 062552

3. 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: pangzl01.cpoec@cnpc.com.cn。

引用: 庞振力, 季鹏, 张文海, 等. 豁免源多相流量计在多井合采混输单井计量中的应用[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 18-22.

Cite: PANG Zhenli, JI Peng, ZHANG Xiaoling, et al. Application of multiphase flowmeter with exempt radiation source in single-well flow-rate measurement under the multi-well production and gathering mode [J]. Well Testing, 2022, 31(4): 18-22.

**摘要** 传统多相流量计计量精度低、放射源存在安全隐患且工艺复杂、费用高。豁免源多相流量计利用文丘里原理测量多相流的总流量, 利用豁免源伽马传感器放射性吸收技术测量多相流的相分率, 根据总流量和相分率的计算, 得到油流量、水流量和气流流量。经滩浅海某平台多井合采混输单井计量实例应用表明, 与传统的计量相比, 豁免源多相流量计测量精度高、作业安全、经济效益好。该设备减少了复杂配置, 工艺简洁, 无污染, 具有一定推广价值。

**关键词** 豁免源; 多相流量计; 相分率; 计量精度; 放射源; 三相分离器; 多井合采; 单井计量

中图分类号: TE931 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.04.004

## Application of multiphase flowmeter with exempt radiation source in single-well flow-rate measurement under the multi-well production and gathering mode

PANG Zhenli<sup>1</sup>, JI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>2</sup>, WANG Ruina<sup>3</sup>, ZHANG Wenhai<sup>1</sup>, LIU Xiaoqiang<sup>1</sup>

1. PetroChina Offshore Engineering Co., Ltd., Tianjin Branch, Tianjing 300454, China

2. North China Oilfield Institute of Economics and Technology, Renqiu, Hebei 062552, China

3. China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd. Oil and Gas Storage Branch, Langfang, Hebei 065000, China

**Abstract:** Traditional multiphase flowmeters are deficient for low measurement accuracy, risky radiation sources, complex processes and high costs. The multiphase flowmeter with exempt radiation source measures the total flow rate of multiphase fluids according to the Venturi principle and the phase fraction of the multiphase fluids by using the exempt source gamma sensor radiation absorption technology. According to the total flow rate and phase fraction obtained, the flow rates of oil, water, and gas are determined. The application in measuring single-well flow-rate under the multi-well production and gathering model on a platform in paralic zone shows that the multiphase flowmeter with exempt radiation source achieves higher measurement accuracy, safer operation, and better economic benefits than traditional flowmeters. Moreover, the multiphase flowmeter with exempt radiation source avoids complex configuration, with simple process and no pollution. It is worth of promotion.

**Keywords:** exempt radiation source; multiphase flowmeter; phase fraction; measurement accuracy; radiation source; three-phase separator; multi-well production; single-well flow-rate measurement

在原油开采过程中, 为了掌握油藏动态和油井产量, 确定最佳产量和油田开采时间, 需要经常监视单井动态产量, 通过对单口油井的产出油、气、水体积流量进行计量, 优化生产参数, 提高采收率<sup>[1-5]</sup>。常规的多井合采混输单井计量需要多个分离器进行气液分离计量, 之后通过仪器仪表和计量罐进行计量, 得出各相所占的比率。受海上采油平台空间及开采成本的限制, 应减少计量设备, 提高

设备利用率。

多相流测量技术和设备在石油工业中实现无须相分离的原油、水和天然气产量的计量。刘平等<sup>[6]</sup>在国内某海域油气构造评价延长测试项目中, 为了有效提高在延长测试中流量计的测量精度, 研究了 $\gamma$ 源多相流量计的计量原理, 分析了影响多相计量精度的相关因素。首次采用 $\gamma$ 源多相流量计进行单井计量。陈艳<sup>[7]</sup>通过介绍分离计量方案和

多相不分离计量方案过程、测量原理和应用情况,对二者优缺点进行比较。孙婧等<sup>[8]</sup>针对海上稠油油田的开发特点,分析了不同类型的计量方法的适应性,给出了海上稠油单井计量方案的选择方案。刘志成等<sup>[9]</sup>针对油田多相流量计用源要求,研究了在不更改放射源外形和活性区尺寸的情况下,结合原制备工艺及搪瓷工艺技术研制多相流量计用源。毛志豪等<sup>[10]</sup>对国产水下多相流量计的原理和参数进行了介绍,并对相关规范进行了分析。彭卫芳等<sup>[11]</sup>对某海域油气田生产平台使用的多相流量计根据国家规范进行辐射检测,并对多相流量计正常运行时辐射剂量进行检测和分析,油气生产平台工作人员的辐射危害符合国家标准。KIM等<sup>[12]</sup>和潘艳芝等<sup>[13]</sup>统计了 Roxar MPFM 型流量计测量塔里木高压凝析气田气井产出流体的测量不确定度,气、油、水三相分别在 7.6%、9.4%、5.1% 以内。王晋等<sup>[14]</sup>利用在线流量计测量不同石油公司的油气井产出流体,发现多相流中不含固体杂质时,测量结果的不确定度在合理范围以内,而含有固体杂质(如泥浆)时,测量结果(日产气量、日产液量、含水率)的不确定度超过 200%,测量数据无法采用。张兴华等<sup>[15]</sup>研究了 PhaseWatcher Vx 型流量计在渤海油田的使用情况,监测数据发现气、液相含率的不确定度分别在 6.0%、9.5% 以内。PhaseWatcher Vx 型流量计应用于中国南海、渤海等油气田<sup>[16]</sup>。该流量计采用文丘里管测定多相流总流量,采用配备有单个低强度放射性化学源的双能谱伽玛射线探测器测定相含率,当伽玛射线穿过介质时,每

22 ms 可完整地计算一次油、气、水含量。马跃等<sup>[17]</sup>等通过分析总结流量计的校正情况,发现所用流量计的校正系数通常在 0.9~1.1 之间,但从校正系数随时间的变化关系可知:某些时段校正系数变化幅度超过 10%。此时,若不及时更新校正系数,则测量结果的不确定度很可能由 10% 升至 20%。彭彬等<sup>[18]</sup>通过现场使用该流量计发现,差压系统零点漂移导致测量不确定度明显增大,低差压、低雷诺数情况下测量不确定度会增大,流量计直径偏大也会引起测量不确定度增大。

豁免源多相流量计是利用文丘里原理测量多相流的总流量,利用豁免源伽玛传感器放射性吸收技术的原理测量多相流的相分率。然后根据总流量和相分率,通过一系列的计算,即可得到油流量、水流量和气流量。它即解决海洋平台空间狭小、环境恶劣、计量不连续、成本高等问题,又避免了放射源使用带来的施工风险,具有体积小,工艺简洁,测量范围广,计量精度高,无污染等优点,具有一定的推广应用价值。

## 1 豁免源多相流量计

豁免源多相流量计结构、工作原理及主要技术参数如下。

### 1.1 结构

豁免源多相流量计由文丘里管、单能伽玛传感器、油气水三相含水仪、双能伽玛传感器、数据采集和处理单元、辅助性测量仪表及控制装置等组成,结构图见图 1。

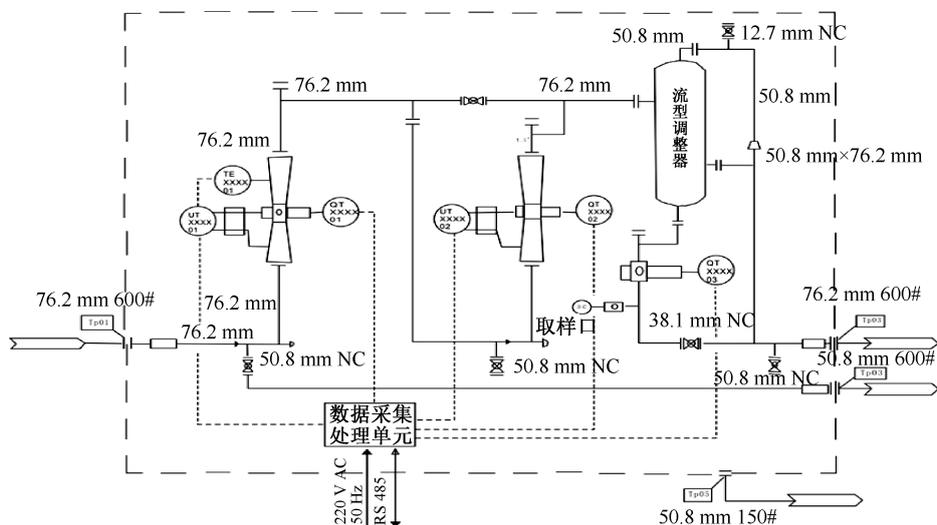


图 1 豁免源多相流量计结构图

Fig. 1 Structure of the multiphase flowmeter with exempt radiation source

(1) 豁免源多相流量计利用文丘里管及单能伽玛传感器,完成多相流气、液两相流量的实时测量。

(2) 豁免源多相流量计利用油、气、水三相含水仪流型调整装置及双能伽玛传感器,测量油、气、水三相状态标态下油水混合液的相分率。

(3) 豁免源多相流量计利用数据采集和处理单元,对单能伽玛传感器、双能伽玛传感器及仪表的信号采集、处理,利用多相流动模型计算各相率下的含量,最终将测量结果输出到中控或数据传给业主。

(4) 豁免源多相流量计系统还包括一部分辅助性测量仪表及控制装置,用于流量计的操作和控制。

(5) 豁免源多相流量计根据产量的高低,设置不同尺寸的测量管径开关阀,便于实时调节,确保计量精确。

## 1.2 工作原理

豁免源多相流量计利用文丘里流量计测量多相流在工况条件下的总流量,利用伽玛传感器射线吸收技术测量多相流的相分率,即管道中多相流气体的体积分额—含气率(GVF)、液相中水的体积分额—含水率(WC)。根据总流量和相分率,通过多相流模型计算,可得到油流量、水流量和气流量。

文丘里流量计是利用文丘里效应<sup>[19]</sup>,它的主体是一节中部缩颈(喉部)的测量管段(文丘里管),当流体流经文丘里管时,在它的入口与喉部之间会产生一个压差( $\Delta p$ )。流体的总流量( $q$ )与压差的平方根成正比: $q \sim \sqrt{\Delta p / \rho}$ ; ( $\rho$  是流体的混合密度)。当文丘里管的尺寸和加工工艺符合一定的标准时,即可确定上式中比例常数,即测得流经文丘里管流体的总流量。

伽玛传感器用来测量气和液的相分率以及液相的含水率。伽玛射线是放射性同位素发射的一种电磁辐射,它有很强的穿透介质的能力。当一束从放射源发射的伽玛射线穿过介质时,它的强度将因介质的吸收作用而减弱。不同的介质对伽玛射线的吸收能力也不同,它主要与介质的化学组成和密度有关。对能量较低的伽玛射线而言,水的吸收大于油的吸收。对低压下的天然气,它对伽玛射线的吸收可以忽略。在伽玛传感器中,用一种被称为 Na(Tl) 闪烁探测器的探头来测量伽玛射线的强度<sup>[20]</sup>。这种探头输出一连串的电脉冲,在单位时间内的脉冲计数即代表被测量的伽玛射线的强度。

当一束伽玛射线穿过气液两相混合介质时,它的强度衰减与气和液的相对比有关。如果已知伽玛束的初始强度,测量它穿过一定厚度的介质后的强度,即可确定气和液的相分率。但在这种情况下,液相必须为单一介质,或组份不变或已知的二元介质。这就是单能伽玛传感器测量含气率的原理。

当被测量介质是相对比未知的油、气、水的混合物时,用一种能量的一束伽玛射线既不能确定含气率也不能确定含水率。这时,需要增加能量不同的另一束伽玛射线,这就是双能伽玛传感器<sup>[21]</sup>。同时测量两束伽玛射线的强度,即可确定油、气、水的混合介质的含水率和含气率。

使用豁免源伽玛传感器测量相分率有如下技术优势:①不受乳化液相互转化的影响;②可测量全范围相分率;③操作方便,计量精度高;④不受液中含气的影响。

## 1.3 主要技术参数

### (1) 测量范围

豁免源多相流量计测量范围分布如图2所示,即含水率测量范围:0~100%;含气率测量范围:0~100%;流量测量范围:0~3 000 m<sup>3</sup>/d;气量测量范围:0~30×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。

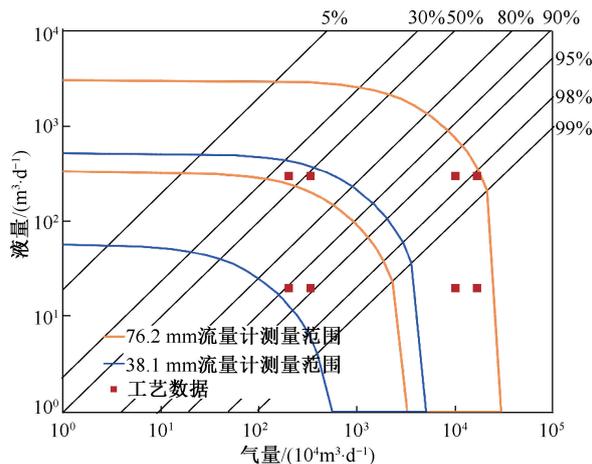


图2 豁免源多相流量计测量范围分布图  
Fig.2 Measurement range of the multiphase flowmeter with exempt radiation source

### (2) 测量准确度

豁免源多相流量计测量精度在全量程体积含气率(GVF)0~100%状态下,总液量测量精度达到5%以内,气体流量测量精度10%以内,含水率测量精度达到2%以内,其中气液均为相对误差,含水率为绝对误差,全量程GVF范围内实现各单相流量计及含水率实时计量,进行产量连续监测。

### (3) 基本设计参数

豁免源多相流量计设计口径 76 mm, 测量管线满足大尺寸和小尺寸两种方案, 分别为 76 mm、38 mm, 操作压力 500 ~ 6 000 kPa, 操作温度 30 ~ 90 °C, 整橇设计寿命 20 年, 可在油田生命周期内的实现持续应用。采用两路 220VAC 供电, 一路为电伴热供电, 另一路为橇内仪表供电; 核心部件均采用 SS316 不锈钢制造, 其中含水率和含气率的测量部件为伽马传感器, 使用 Ba133 豁免源, 其辐射泄露等同于本底水平, 采用 CH133 探头, 满足海上高湿高盐雾环境下的防护。

## 2 现场应用

豁免源多相流量计在大港埕海 XX 油田区块 8 口井合采混输单井计量得到成功应用, 合采混输单井计量产量见表 1, 单井产量最高产液量 388.98 m<sup>3</sup>/d, 最高产气量 74 495 m<sup>3</sup>/d; 总液量误差值小于 5%, 气体流量误差值小于 7%, 含水率小于 2%, 达到了计量作业要求。

表 1 合采混输单井计量产量

Table 1 Result of single-well flow-rate measurement under the multi-well production and gathering mode

井号	油嘴/mm	产液/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产气/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
A	3	220.31	24 895
	5	180.37	40 289
	1.2	48.89	15 075
B	3	248.99	52 290
	3.5	184.61	65 638
	2	72.36	34 733
C	8	336.90	62 784
	3.5	41.60	74 495
	3.5	28.95	44 205
D	3	28.50	56 783
E	10	303.00	24 673
	4	33.45	14 321
F	6	236.57	38 765
	6	111.06	24 326
J	4	218.85	56 598
	2	105.00	48 593
H	7	388.98	34 870

## 3 结论

(1) 使用豁免源多相流量计在多井合采混输单井计量有足够的准确度, 可以实现实时、连续测量, 基本上可以做到无人值守等特点使其可以代替部分三相分离器, 具有一定的推广价值。

(2) 豁免源多相流量计可以实现在线测量多相

流的总流量和单相相分率, 方便计算各相流体的流量, 可及时监测油井井况, 提高计量的及时性和准确性, 通过产量变化进行有效把握, 为油田动态管理提供可靠的数据支持, 确保现场生产稳定运行。

(3) 豁免源多相流量计安装工艺简单, 结构紧凑, 解决了海洋平台空间狭小、环境恶劣、成本高等问题, 具有一定的经济效益和社会效益。

致谢: 感谢中国石油集团海洋工程有限公司天津分公司对本文的大力支持并同意公开发表。

### 参考文献

- [1] 叶兵. 多相计量技术新进展[J]. 国外油田工程, 2010, 26(2): 52-54.  
YE Bing. New progress of multiphase metering technology [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2010, 26(2): 52-54.
- [2] 苏洋. 浅谈国外油气田多相流量计的选型及应用[J]. 化学工程与装备, 2015, (11): 84-85.  
SU Yang. Brief discussion on the selection and application of multiphase flow meter in foreign oil and gas fields [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015, (11): 84-85.
- [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 domestic market [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(2): 99-104.
- [4] 吴佳欢, 潘峰, 吴刚, 等. 油田工业多相流量计技术适用性分析[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 4(43): 341-346.  
WU Jiahuan, PAN Feng, WU Gang, et al. Study on applicability of technologies for multi-phase flowmeters in oil field industry [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016, 4(43): 341-346.
- [5] 高书香, 周星远, 单秀华, 等. 国内在线不分离式多相流量计技术现状[J]. 油气储运, 2019, 38(6): 667-671.  
GAO Shuxiang, ZHOU Xingyuan, SHAN Xiuhua, et al. The technical status of in-line multiphase flow meter in China [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 667-671.
- [6] 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 flow meter in extended test [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(8): 77-79, 83.
- [7] 陈艳. 油田单井计量方案[J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(4): 459-461.  
CHEN Yan. Oilfield single well metering scheme [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2014, 41(4): 459-461.
- [8] 孙婧, 王春升, 尚超, 等. 海上油田稠油单井计量方案选

- 择[J]. 石油规划设计, 2018, 29(3): 17-21.  
SUN Jing, WANG Chunsheng, SHANG Chao, et al. The choice of metering plans for offshore heavy oil well [J]. Petroleum Planning and Design, 2018, 29 (3): 17-21.
- [9] 刘志成, 邹永建. 多相流量计用源的研制[J]. 同位素, 2016, 29(3): 181-183.  
LIU Zhicheng, WU Yongjian. Preparation of radioactive source used in multiphase flow meter [J]. Journal of Isotopes, 2016, 29 (3): 181-183.
- [10] 毛志豪, 尹丰, 孙钦, 等. 国产水下多相流量计高压舱测试技术[J]. 石油工程建设, 2020, 46(13): 78-81.  
MAO Zhihao, YIN Feng, SUN Qin, et al. High pressure test technique for domestic subsea multiphase flow meter in high pressure chamber [J]. Petroleum Engineering Construction, 2020, 46 (13): 78-81.
- [11] 彭卫芳, 尧振宇, 睢罡, 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. Radiation detection results of multiphase flowmeter on an offshore oil and gas production platform in 2015 [J]. Occupation and Health, 2017, 33 (10): 1300-1302.
- [12] KIM J H, JUNG U H, KIM S, et al. Uncertainty analysis of flow rate measurement for multiphase flow using CFD [J]. Acta Mechanica Sinica, 2015, 31(5): 698-707.
- [13] 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.
- [14] 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, 75.  
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, 75.
- [15] 张兴华, 许峰, 翟洪军, 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.
- [16] 丘砾霏. PhaseWatcher Vx 多相流量计原理和应用 [J]. 中国高新技术企业, 2016, (24): 45-46.  
QIU Luofei. Principle and application of PhaseWatcher VX multiphase flowmeter [J]. China High-Tech Enterprises, 2016, (24): 45-46.
- [17] 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 MPPFM to the heavy oil field of Bohai sea [J]. Petroleum Planning and Design, 2012, 23 (1): 36-38, 41.
- [18] 彭彬, 向晶晶, 张冲, 等. 曹妃甸油田多相流量计应用的改造与升级 [J]. 船海工程, 2014, 43(5): 44-47.  
PENG Bin, XIANG Jingjing, ZHANG Chong, et al. Innovation and upgrading of the multiphase flow meter for Caofeidian oil field [J]. Ship & Ocean Engineering, 2014, 43 (5): 44-47.
- [19] 王永强, 张凯权, 汪建伟, 等. 使用科力质量流量计的多相流量计的研制 [J]. 油气井测试, 2021, 30(3): 20-23.  
WANG Yongqiang, ZHANG Kaiquan, WANG Jianwei, et al. Development of multiphase flow meter using coriolis mass flow meter [J]. Well Testing, 2021, 30 (3): 20-23.
- [20] 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 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.
- [21] 吴生杰, 解安伟. 多相流量计自动检测系统的设计和应用分析 [J]. 智能城市, 2018, 4(23): 157-158.  
WU Shengjie, XIE Anwei. Design and application analysis of automatic detection system for multiphase flowmeter [J]. Intelligent City, 2018, 4 (23): 157-158.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 庞振力, 男, 工程师, 2008年毕业于重庆科技学院石油工程专业, 主要从事现场试油测试施工、试井资料解释工作及油气藏研究。电话: 022-25832701, 18202209362; Email: pangzl01.cpo@cnpc.com.cn。通信地址: 天津滨海新区石油科技大厦五楼, 邮政编码: 300454。