

DOI: 10.11949/0438-1157.

静态混合器对油水两相流含水率测量影响的仿真与实验研究

孙涔崴^{1,2}, 徐英^{1,2}, 袁超^{1,2}, 左荣基^{1,2}, 宋子瑞^{1,2}, 王达¹, 袁港³

(¹天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; ²天津市过程检测与控制重点实验室, 天津 300072; ³中海油天津化工研究设计院有限公司, 天津 300131)

摘要: 油水两相流含水率的准确测量对石油勘探开发意义重大。然而, 油水流动呈现明显的非均匀性, 导致传统测量方法精度受限。为此, 设计开孔式SK型静态混合器P-SK, 并联合微波谐振腔传感器实现含水率测量。通过CFD仿真对比4种结构, 结合截面相分布与混合指数, 选取6单元结构P-SK-6用于实验。结果表明, P-SK-6的双对称开孔与旋转扰动可有效削弱分层与局部聚集, 改善流体均匀性, 谐振腔 S_{21} 幅频响应随含水率变化的单调特征更连续, 分辨能力更强。有效单调频点数量平均提高约3.8倍, 局部分辨率最大值提高约2.6倍。基于高斯过程回归方法建立双频点预测模型, 在含水率10%~30%条件下, 安装P-SK-6后绝对误差和相对误差范围分别为-0.08%~0.06%和-0.39%~0.27% (P=95%), 显著优于未安装时的-3.83%~3.86%和-15.21%~25.18%。

关键词: 油水两相流; 静态混合器; 数值模拟; 微波谐振腔; 含水率; 高斯过程回归

中图分类号: TE 81

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-13

Numerical and experimental investigation on influence of static mixer on water cut measurement in oil-water two-phase flow

SUN Cenwei^{1,2}, XU Ying^{1,2}, YUAN Chao^{1,2}, ZUO Rongji^{1,2}, SONG Zirui^{1,2}, WANG Da¹, YUAN Gang³

(¹School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Key Laboratory for Process Measurement and Control, Tianjin 300072, China; ³CenerTech Tianjin Chemical Research and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300131, China)

Abstract: Accurate measurement of water cut in oil-water two-phase flow is crucial for petroleum exploration and development. However, pronounced phase inhomogeneity induces fluctuations in the measured medium's equivalent dielectric properties, compromising the stability and accuracy of conventional methods. To address this issue, the Perforated SK Static Mixer (P-SK) was designed, and a combined measurement method using P-SK and a Microwave Resonant Cavity Sensor (MRCS) was proposed to enhance measurement precision by upstream flow regulation. Four mixer configurations were evaluated by Computational Fluid Dynamics (CFD). Based on cross-sectional phase distribution and the coefficient of variation (COV), the six-unit P-SK-6 was selected as the optimal device for experiments. Results show that P-SK-6, featuring dual symmetric perforations and rotational perturbation, mitigates phase stratification and local agglomeration, improving flow uniformity in the measurement

收稿日期: 2026-01-22 修回日期: 2026-04-22

通信作者: 徐英(1970—), 女, 博士, 教授, xuying@tju.edu.cn

第一作者: 孙涔崴(1998—), 男, 博士研究生, suncw@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(62273252); 国家重点研发计划项目(2024YFB3214004)

引用本文: 孙涔崴, 徐英, 袁超, 左荣基, 宋子瑞, 王达, 袁港. 静态混合器对油水两相流含水率测量影响的仿真与实验研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-13

Citation: SUN Cenwei, XU Ying, YUAN Chao, ZUO Rongji, SONG Zirui, WANG Da, YUAN Gang. Numerical and experimental investigation on influence of static mixer on water cut measurement in oil-water two-phase flow[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-13

section. Consequently, the transmission coefficient (S_{21}) magnitude spectra exhibit a smoother dependence on water cut. Compared with the case without P-SK-6, the average number of monotonic frequency points increases by ~ 3.8 times and the maximum local resolution improves by ~ 2.6 times, substantially enlarging the reliable frequency bands for calibration and modeling. Based on Gaussian Process Regression (GPR), a dual-frequency-point prediction model was established. Under water-cut conditions of 10% to 30%, the absolute and relative error ranges after installing P-SK-6 were reduced to -0.08% to 0.06% and -0.39% to 0.27% ($P=95\%$), respectively, which are significantly better than those without the mixer (-3.83% to 3.86% and -15.21% to 25.18%).

Keywords: oil-water two-phase flow; static mixer; numerical simulation; microwave resonant cavity sensor; water cut; gaussian process regression

引 言

石油工业生产与开发过程中,低产液量油田单井占有较大比例,开发早期油井常呈现高含油、低含水特征,含水率多处于0~30%区间。该阶段对含水率的测量精度要求很高,然而,由于低流速与低含水率工况下油水两相流动的非均匀性,使得传统的测量方法难以保证在线高精度计量^[1-3]。

理想的测量条件应保证流体在测量段内均匀混合且流动结构稳定,以确保传感器信号能够真实反映整体介质的介电特性。但在低流速条件下,竖直管内油水两相流对微小扰动高度敏感,流动结构可在短时间尺度内发生显著变化,局部聚并、相分离和界面波动频繁出现。不仅降低了测量信号的稳定性,而且常存在随机噪声和瞬态波动,从而放大了含水率测量的不确定性^[4-6]。因此,低流速、低含水率条件下的流型非均匀性已成为油水两相流更高精度测量的核心难题之一。

为此,近年来研究者普遍认为,在传感器上游引入结构性流场调控元件,改善流体分布的非均匀性,是提高含水率测量精度的有效途径。静态混合器作为一种无需外加动力的流场调控装置,可依靠固定混合单元强化流体径向掺混与界面更新,促进液滴破碎与再分散,并在一定程度上抑制大尺度非均匀结构的形成^[7,8]。

标准静态混合器主要分为SV型、SK型、SX型、SL型和SH型五类^[9]。其中,SV型通过流道形变实现流体分割与旋转,适用于低黏度或洁净介质,但易出现局部混合死区,且在含杂质介质条件下存在堵塞风险^[10-12];SX型可提供较强的局部剪切与重组作用,混合强化效果突出,但往往伴随较大压降^[13-15];SL型有利于流体导向与重新分布,但界面更新能力偏弱,混合强化通常依赖更长的作用距

离^[16,17];SH型可兼顾流体分布整形与混合强化,但结构较复杂,对参数设计和应用条件更为敏感^[18,19]。相比之下,SK型则依靠交错螺旋叶片诱导流体持续经历剪切、扭转与再汇合,兼具较强的混合能力、较低的压降损失和较宽的工况适应范围,在液液及气液混合过程中应用广泛^[20-23]。结合本文低流速、低含水率油水两相流的应用背景,并综合考虑混合效率、压降控制和结构实现等因素,选取SK型为基础结构。

微波谐振腔传感器(Microwave Resonant Cavity Sensor, MRCS)凭借其其对介电特性变化的高灵敏度、非接触测量特性及快速响应速度等优势,近年来已成为油水两相流含水率检测领域的研究热点^[24-27]。Oon等^[24]设计基于圆柱形谐振腔的测量系统,面向0~100%全量程油水分层流开展含水率预测研究,指出在5.0~5.7 GHz频段内温度影响可被有效抑制。Sharma等^[25]提出开放式谐振腔测量方案,在0~50%含水率范围内实现了绝对误差 $\pm 0.1\%$ 以内的高灵敏度测量。杨以光等^[26]基于 TM_{010} 模式的谐振腔结构,建立了谐振腔含水率测量方法,在30%~100%含水率区间内将测量误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。徐英等^[27]提出非侵入式谐振腔方案,实现了全量程(0~100%)含水率检测,误差小于3%。这些研究充分证明MRCS在油水两相流测量中的潜力,但其测量精度与稳定性高度依赖于流体在腔体内部的混合均匀性与流型稳定性。

综上所述,本文针对低流速、低含水率油水两相流因流型复杂、分布非均匀导致的信号波动与模型精度下降问题,设计开孔式SK型静态混合器(Perforated SK Static Mixer, P-SK),并提出与微波谐振腔(MRCS)联合应用的含水率测量方法。通过CFD仿真对比分析4种不同结构静态混合器混合效果,选取最优结构P-SK-6。实流实验中,在测量段

前端设置P-SK-6,以期改善两相混合均匀性,同时利用矢量网络分析仪获取MRCs的 S_{21} 扫频数据。在此基础上,引入高斯过程回归方法(Gaussian Process Regression, GPR),建立双频点含水率预测模型。旨在验证“流型调控—谐振响应稳定—含水率测量模型精度提升”的整体思路,为低含水率油水两相流在线高精度测量提供一种可实现且具有工程应用潜力的技术方案。

1 开孔式SK型静态混合器(P-SK)设计

1.1 几何模型

确定SK型静态混合器为基础结构后,本研究在其螺旋叶片上进行开孔设计,以调节局部流动路径并强化径向交换。已有研究针对SK型开展了开孔结构优化:Meng等^[28]提出交错螺旋段开孔的改进型Kenics静态混合器(MKSM),发现开孔结构能显著增强流体内部的层流与混沌对流混合特性。Wang等^[29]则通过径向、轴向和对角开孔排布(PSM系列)优化了流体的相间掺混与分散效果。然而,面向低流速的油水两相流,尤其是作为测量段前端的流场调控部件来提升下游传感器信号稳定性与测量精度的研究鲜有报道。

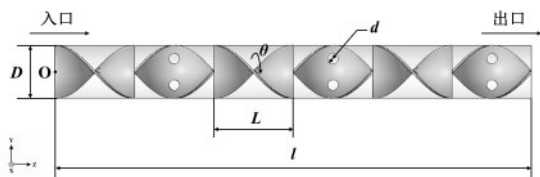


图1 P-SK几何模型

Fig.1 Geometric model of P-SK

在低含水率、低流速工况下,为进一步优化混合性能并兼顾能耗控制,本文在标准SK型结构基础上,设计了叶片中心对称开孔的开孔式SK型静态混合器(P-SK),如图1所示。P-SK混合单元保持 180° 扭转基本构型,并在叶片中心设置两个对称圆孔,使部分流体能够穿透叶片形成局部射流,叠加于强剪切与流向扭转作用之上,从而提升了径向穿透与相间接触机会,增强了局部界面更新频率从而在较短轴向距离内获得更均匀的相分布,同时一定程度减小了局部压降,在混合性能与能耗之间取得更优平衡。

综合考虑混合效果、压降代价及安装空间限制

等因素,本文选取4单元和6单元两种结构进行比较。在SolidWorks中构建了四种几何模型:(a)标准SK型6单元结构SK-6;(b)开孔式SK型6单元结构P-SK-6;(c)标准SK型4单元结构SK-4;(d)开孔式SK型4单元结构P-SK-4。关键结构参数见表1。

表1 四种混合器结构参数

Table 1 Structural parameters of four static mixer types

	SK-6	P-SK-6	SK-4	P-SK-4
管道直径 D (mm)	50	50	50	50
混合单元长径比 L/D	1.5	1.5	1.5	1.5
扭转角 θ ($^\circ$)	180	180	180	180
开孔直径 d (mm)	-	10	-	10
厚度 C (mm)	5	5	5	5
混合单元个数 n	6	6	4	4
总长度 l (mm)	450	450	300	300

1.2 数值模拟模型设置及工况条件

在混合器上游与下游分别设置6D入口直管与10D出口直管,以减弱边界条件对混合器内流动结构的影响并保证下游流场充分发展。网格划分在ICEM CFD中完成,混合器区域曲面复杂,几何细节较多,采用非结构化四面体网格以适应复杂边界;上下游直管段采用结构六面体网格以降低数值伪扩散并提高计算效率,同时对环形入口外环进行局部加密。选择P-SK-6作为网格无关性检验对象,其计算域如图2所示。经验证后,最终选取单元数为1204706的网格用于后续计算,其网格质量均大于0.354,最小正交质量为0.389,最大纵横比为10.275。

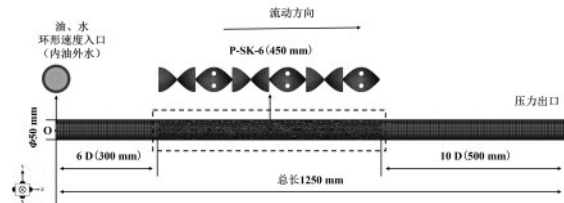


图2 流体仿真计算域几何尺寸和网格划分

Fig.2 Geometric dimensions and mesh of the computational domain

数值模拟在ANSYS Fluent中完成,仿真介质采用常压0.1 MPa(绝压),室温 25°C 条件下的水和 15° 白油,具体工况设置与后续实流实验一致,详见表2。多相流模型采用Mixture模型,相间拖曳与滑移分别选用Schiller-Naumann和Manninen-et-al模型。

考虑到仿真工况为低流量、低含水率条件,基

于连续相(油相)物性参数、两相混合流速与管径,计算得到入口等效雷诺数 Re 约为 206~618,整体处于层流范围,此时流动以黏性作用主导。尽管流体在流经静态混合器时,受螺旋叶片及开孔结构的几何作用,会产生空间二次流、径向位移以及局部流向反转,但在该雷诺数范围内,流动主要表现为几何诱导的层流扰动。因此,为真实地反应低速条件下开孔式静态混合器内部流场演化特征,黏性模型采用 Laminar 模型,可避免湍流模型经验常数及近壁处理带来的附加不确定性,使不同结构间的对比更具可解释性。同时,在低雷诺数条件下, Laminar

模型具有更好的数值稳定性,有利于获得可靠收敛解。

入口设置为同心环形双速度入口,内环为油相入口,外环为水相入口,出口为压力出口。壁面无滑移并考虑重力沿竖直方向作用。采用压力基求解器(Pressure-Based Solver),压力-速度耦合采用 Phase-Coupled SIMPLE 算法,压力项选择适用于旋流和多相流的 PRESTO! 格式,动量方程对流项采用二阶迎风格式离散,体积分数方程采用 Modified HRIC 格式离散。为保证求解可靠性,残差收敛标准设置为 1×10^{-5} 。

表 2 数值模拟计算工况条件表(0.1 MPa, 25°C)

Table 2 Operating conditions for numerical simulation (0.1 MPa, 25°C)

总流量 $Q(\text{m}^3/\text{d})$	混合流速 $U(\text{m/s})$	水相表观流速 $U_w(\text{m/s})$	油相表观流速 $U_o(\text{m/s})$	体积含水率 $\beta_w(\%)$
10	0.059	0.009/0.012/0.015/0.018	0.050/0.047/0.044/0.041	15/20/25/30
15	0.088	0.013/0.018/0.022/0.027	0.075/0.071/0.066/0.062	15/20/25/30
20	0.118	0.012/0.018/0.024/0.029/0.035	0.106/0.100/0.094/0.088/0.083	10/15/20/25/30
25	0.147	0.015/0.022/0.029/0.037/0.044	0.133/0.125/0.118/0.111/0.103	10/15/20/25/30
30	0.177	0.018/0.027/0.035/0.044/0.053	0.159/0.150/0.141/0.133/0.124	10/15/20/25/30

1.3 数值模拟结果

在定性对比轴向监测截面相分布云图的基础上,进一步引入混合指数(Coefficient of Variation, COV)定量表征截面混合均匀性,其定义为:

$$COV = \frac{\sigma(\beta_w)}{\bar{\beta}_w} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\beta_{w,i} - \bar{\beta}_w)^2}}{\bar{\beta}_w} \quad (1)$$

式中, N 为截面节点数, $\beta_{w,i}$ 为截面上第 i 个节点的含水率, $\bar{\beta}_w$ 为该截面含水率的平均值。根据定义可知, COV 越小,表示分布越均匀,混合效果越好。

以本研究最小总流量 $Q=10 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例,分别在含水率 $\beta_w=15\%$ 与 $\beta_w=30\%$ 条件下对四种结构的混合性能进行对比分析。

1.3.1 四种结构静态混合器混合效果对比($Q=10 \text{ m}^3/\text{d}$, $\beta_w=15\%$) 由图 3 可见, $\beta_w=15\%$ 时,在混合器上游,由于入口设置为环形入口,上游 0~6D 为环状特征,水相主要分布于外环区域,截面非均匀性显著。流体进入混合器后,四种结构均能在一定程度上诱导水相发生径向再分配,但其混合效果与下游稳定状态存在明显差异。

图 4 展示了不同轴向位置的 COV ,其中横坐标为静态混合器沿 Z 轴的轴向距离。 $Z=0 \text{ mm}$ 为仿真模型入口, $Z=300 \text{ mm}$ 为静态混合器入口, $Z=600 \text{ mm}$

和 $Z=750 \text{ mm}$ 分别为四混合单元和六混合单元出口。

仿真结果表明,混合单元数相同时,开孔式 P-SK 混合性能优于标准 SK。由图 3 可见,在第二至第四单元范围内, P-SK-6 和 P-SK-4 的截面云图颜色过渡更连续,水相径向扩散更充分,局部聚集区被更快打散。对应图 4 中, P-SK 的 COV 整体低于同单元数的标准 SK,说明开孔结构有利于增强截面掺混与界面更新,从而加快两相均匀化过程。六单元结构中, P-SK-6 在 $Z=600 \text{ mm}$ 、 750 mm 和 1000 mm 处 COV 分别为 0.338、0.201 和 0.199,均小于 SK-6 对应位置的 0.339、0.351 和 0.251;四单元结构中, P-SK-4 的 COV 同样低于 SK-4。

结构相同时,六单元优于四单元。因为六单元结构提供了更多次分割、旋转与再汇合过程,使两相在更长作用距离内持续重构。图 4 中, P-SK-6 的 COV 下降最快,并在混合器出口附近已接近稳定,其出口处 COV 为 0.201,为四种结构中最小。相比之下,四单元结构中流体离开混合器后,在下游空管段内 COV 仍继续下降,说明在混合器出口处尚未完成充分相分布重构。流体经过螺旋叶片和开孔结构后仍保留一定的切向与径向速度分量,由几何结构诱导形成的旋转与二次流会在下游发展段维

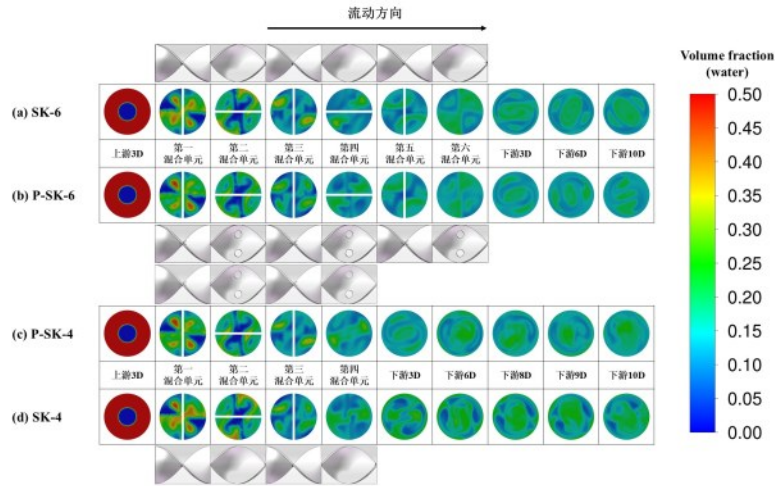


图3 四种结构静态混合器的水相相分布云图($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=15\%$)

Fig.3 Water phase volume fraction contours of four static mixer configurations ($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=15\%$)

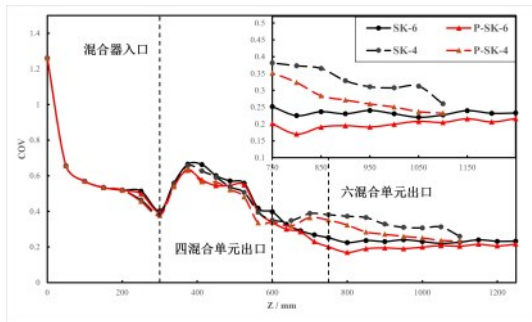


图4 不同轴向位置的混合指数 $COV(Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=15\%)$

Fig.4 Coefficient of variation (COV) at different axial positions ($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=15\%$)

持一段距离,使截面体积分数分布进一步趋于均匀。相较而言,六单元结构在出口附近已基本完成主要均匀化过程,下游 COV 变化幅度较小,说明其

所需的发展长度更短。

1.3.2 四种结构静态混合器混合效果对比($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=30\%$) 如图5所示, $\beta_w=30\%$ 时, P-SK-6 的截面相分布均匀性仍为最优, 在第4单元后已无明显局部聚集。对应图6中 COV 在混合器出口后迅速降至较低水平, 并在下游保持最小值。标准SK结构 COV 下降速度与下游稳定值仍高于同单元数的P-SK, 六单元的优势同样优于四单元。P-SK-6 在 $Z=600\text{ mm}$ 、 750 mm 和 1000 mm 处 COV 分别为 0.176 、 0.089 和 0.078 , 明显低于其他三种结构。其中, 在混合器下游 $Z=1000\text{ mm}$ 处, P-SK-6 相较 SK-6、P-SK-4 和 SK-4 的 COV 分别降低了 48.3% 、 35.5% 和 63.9% 。

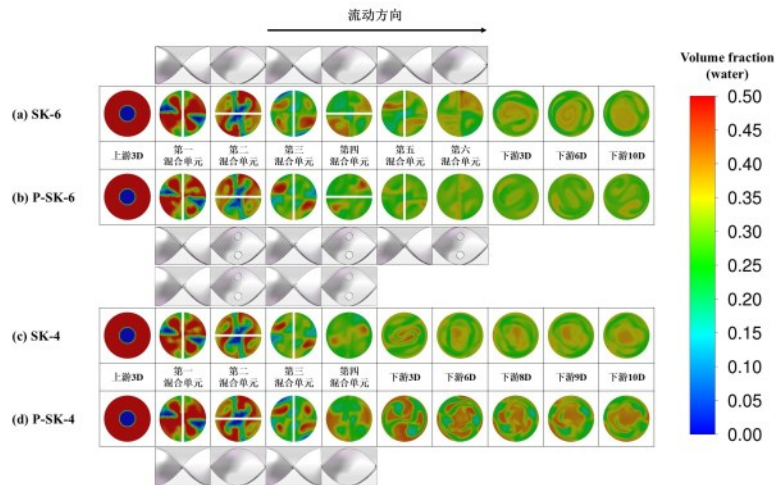


图5 四种结构静态混合器的水相相分布云图($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=30\%$)

Fig.5 Water phase volume fraction contours of four static mixer configurations ($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=30\%$)

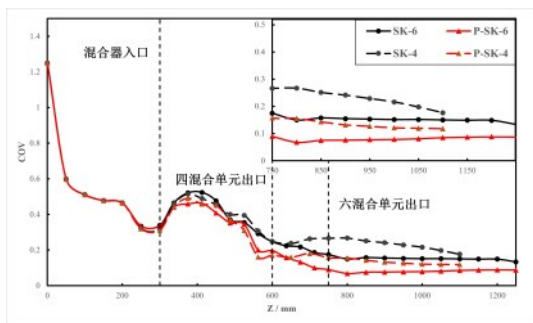


图6 不同轴向位置的混合指数 $COV(Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=30\%)$
Fig.6 Coefficient of variation (COV) at different axial positions
($Q=10\text{ m}^3/\text{d}, \beta_w=30\%$)

对比两组结果可见,尽管含水率变化会影响两相分散状态与界面演化强度,但四种结构的相对优劣顺序保持一致:P-SK-6的截面均匀性最佳、下游 COV 稳定值最小,其次为SK-6,之后依次为P-SK-4与SK-4。说明P-SK-6的优势并非偶然,而是来源于其开孔结构对径向穿透、界面更新的系统性强化。

综合分析可知,安装P-SK-6后流体流动呈现出更均匀、更连续的相分布特征,其 COV 下降最快,并在混合器末端至下游维持最小且稳定水平,能以更短的发展长度获得更高的混合均匀性。因此,本文最终选择P-SK-6作为后续实验中的流型调控结构。

2 实验方案

2.1 实验装置简介

油水两相流实验在天津大学油气水多相流动态实验装置上进行,实验介质为水(密度 $998\text{ kg}/\text{m}^3$,黏度 $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$)和 $15^\#$ 白油(密度 $860\text{ kg}/\text{m}^3$,黏度 $0.012\text{ Pa}\cdot\text{s}$)。水相与油相分别由离心泵输送至各自的不锈钢单相管路(管径 50 mm),并通过标准表管段实现流量测量与调节。油/水流量计量范围为 $0.1\sim 10\text{ m}^3/\text{h}$,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。混合段上游设置Y型汇合管路,油相与水相在此处汇合经直管段充分发展后进入测量段。详细流程图详见参考文献^[30]。

2.2 实验样机与安装方式

采用课题组研制的圆柱形微波谐振腔结构进行测试,其结构、工作原理、 S_{21} 参数等详细描述见参考文献^[27]。本文主要关注静态混合器对谐振腔含水率测量性能的影响,因此不再对传感器本体的校准与验证过程作重复展开。

本实验安装方案如图7所示,P-SK-6与MRCS

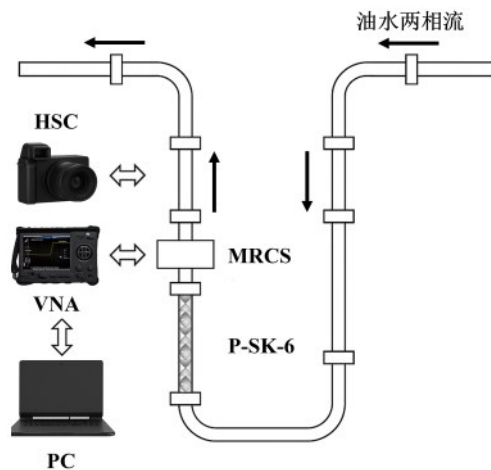


图7 实验装置测试段安装方式

Fig.7 Installation of the test section for the experimental setup

串联安装于竖直U型管段的竖直向上段,油水两相流自下而上流动,依次流经P-SK-6与MRCS。为便于观测流动状态,在传感器下游设置透明视窗,并通过高速摄像机(HSC)进行同步可视化记录。全局式快门时间为 $1\ \mu\text{s}$, 1280×1024 像素下拍摄速度为 506 fps 。为了提高成像质量,在透明视窗的背面安装有多根并列的LED灯,用来增加相机的进光量。实验用透明视窗采用有机玻璃制成,透光率达到 92% 。

传感器测试系统由矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)和计算机组成。其上位机是利用MATLAB软件开发的基于GUI的数据采集系统,实现VNA触发控制, S_{21} 数据采集等。实验时 S_{21} 数据采集与实验装置流动工况数据同步采集。

2.3 实验方法

实验设计油水两相流总流量范围为 $10\sim 30\text{ m}^3/\text{d}$,变化间隔为 $5\text{ m}^3/\text{d}$ 。体积含水率的范围为 $10\%\sim 30\%$,变化间隔为 5% 。在传感器测量系统中,VNA采用扫频模式,设定采集带宽为 $1000\sim 5000\text{ MHz}$,频率步长为 5 MHz ,每个工况下连续扫频 100 次,单次扫频时间约为 2 s ,并取平均值作为当前工况点下 S_{21} 信号,记录 S_{21} 扫频特性曲线。同时,高速摄像机同步启动,对两相流体的流动状态进行 60 s 记录,以便对流型特征和测量结果进行对比分析。

3 实验结果与讨论

3.1 流动结构可视化观测

为评估P-SK-6对竖直向上油水两相流流动结

构的调控作用,采用高速摄像机对测量段视窗区域进行可视化观测,重点对比有、无P-SK-6条件下两相分布形态、界面特征及均匀性差异。

3.1.1 $\beta_w=15\%$ 时不同总流量条件有、无P-SK-6的典型流型对比 图8给出了 $\beta_w=15\%$ 时不同总流量

($Q=10\sim 30\text{ m}^3/\text{d}$)条件有、无P-SK-6两种工况的典型流动状态对比。其中竖直方向表示有无P-SK-6(上:无;下:有),水平方向表示总流量变化,从左至右递增。

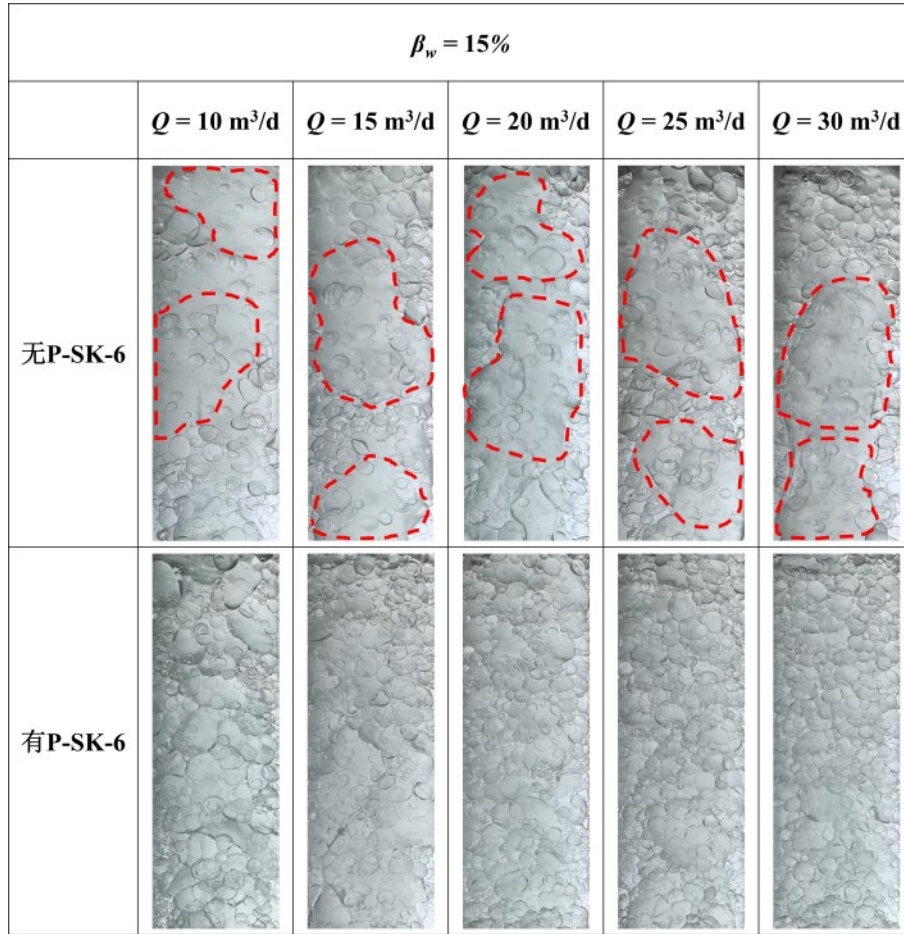


图8 $\beta_w=15\%$ 时不同总流量条件有、无P-SK-6的典型流型对比

Fig.8 Comparison of typical flow patterns with and without P-SK-6 at $\beta_w=15\%$ under different total flow rates

无P-SK-6时,低流量工况下两相分布易呈现明显的局部聚集现象,分散相尺度分布不均。随着流量增加,整体混合程度略有改善,但仍可观察到局部尺度较大的非均匀结构。相比之下,有P-SK-6条件下,流体在其内部经历强剪切与整流作用,各流量工况下均呈现出更均匀分布特征,流场中原有的大尺度结构进一步破碎,液滴尺度减小且分布更加细化,且随流量变化的敏感性降低,表现为更均匀的混合状态。说明P-SK-6在低流速条件下能够有效提高流场的均匀性,从而为下游测量提供更稳定的流动基础。

3.1.2 $Q=30\text{ m}^3/\text{d}$ 时不同含水率条件有、无P-SK-6的典型流型对比 为进一步探讨含水率变化对流

动态的影响,图9展示了 $Q=30\text{ m}^3/\text{d}$ 时不同含水率($\beta_w=10\%\sim 30\%$)条件下的典型流动状态。

实验结果显示,无P-SK-6时,随着含水率升高,油水两相间的密度差与界面张力作用导致局部聚集与尺度不均现象更易出现,流动结构非均匀性增强。在低含水率区间表现更为突出,这会导致测量段内等效介电特性在空间与时间波动,增加微波测量的信号噪声;而有P-SK-6时,各含水率工况下,两相分布更加均匀,团聚与分层现象被明显抑制。说明P-SK-6可在较宽工况范围内实现油水两相流的均匀化调控,为后续微波测量中 S_{21} 信号的稳定采集与高精度含水率预测模型的构建提供了实验依据。

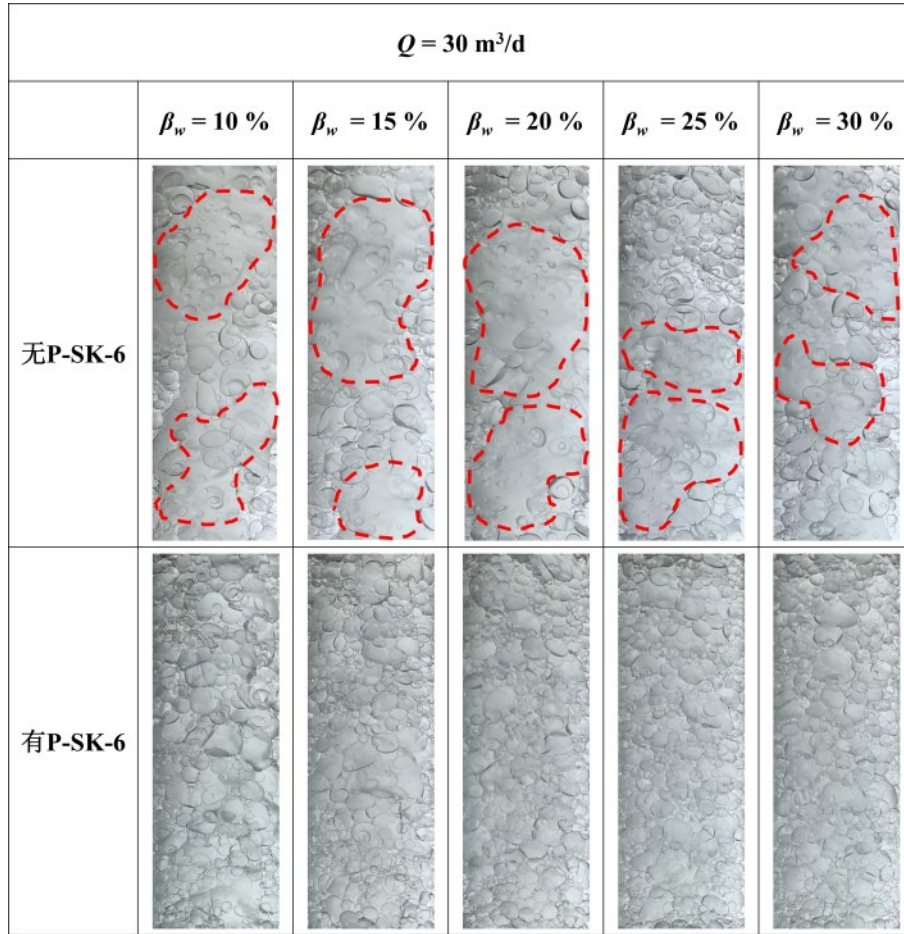


图9 $Q=30\text{ m}^3/\text{d}$ 时不同含水率条件有、无P-SK-6的典型流型对比

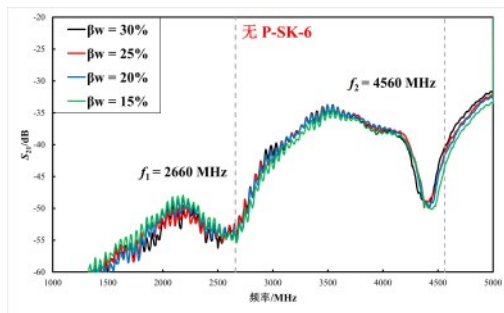
Fig.9 Comparison of typical flow patterns with and without P-SK-6 at $Q=30\text{ m}^3/\text{d}$ under different water cuts

3.2 微波谐振腔 S_{21} 幅频特性对比分析

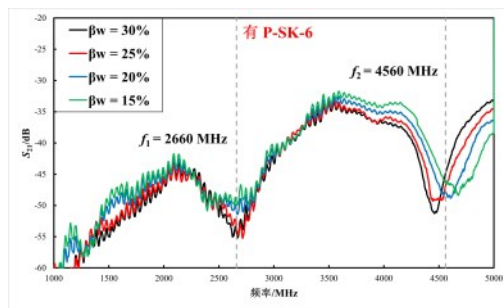
3.2.1 S_{21} 幅频特性 为研究P-SK-6对微波谐振腔测量信号稳定性与灵敏度的影响,图10展示了 $Q=10\sim 30\text{ m}^3/\text{d}$ 条件下, β_w 变化时 S_{21} 幅频曲线对比结果。其中左列为无P-SK-6、右列为有P-SK-6,可直观反

映P-SK-6对微波信号的影响;从上至下依次为 $Q=10\sim 30\text{ m}^3/\text{d}$ 工况,便于系统分析流量变化的影响。

为便于观察后续建模所选特征频点在幅频曲线中的位置,图中预先以虚线标识了2660 MHz和4560 MHz两个频点,具体说明见3.3节。



(a) $Q=10\text{ m}^3/\text{d}$, 无P-SK-6



(b) $Q=10\text{ m}^3/\text{d}$, 有P-SK-6

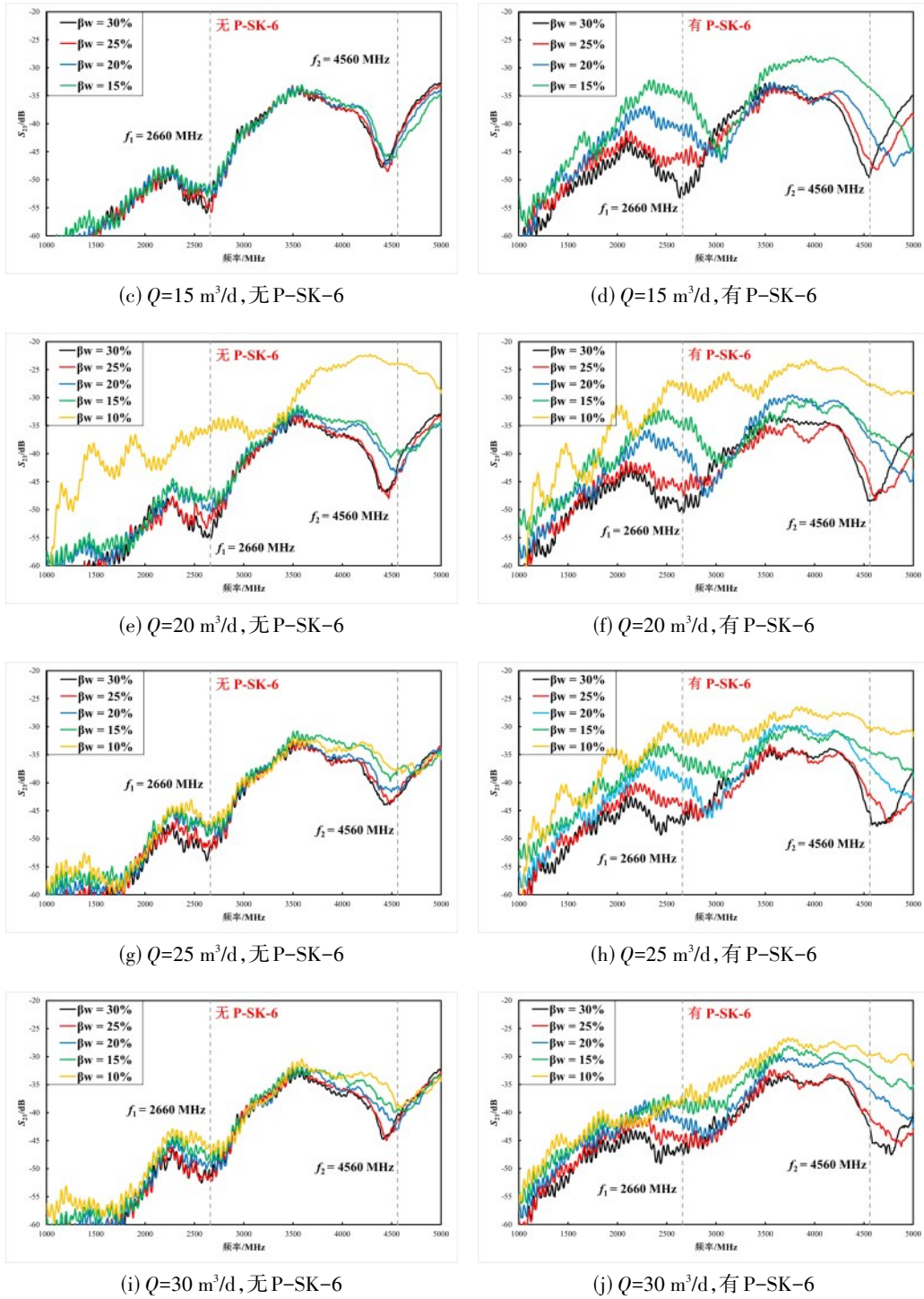


图 10 不同总流量时有、无P-SK-6条件 S_{21} 幅频特性随含水率的变化

Fig.10 Variation of S_{21} amplitude-frequency characteristics with water cut with and without P-SK-6 under different total flow rates

无 P-SK-6 时(图 10(a)、(c)、(e)、(g)、(i)), 不同含水率曲线在部分频段存在明显重叠甚至交叉, 导致 S_{21} 幅值随 β_w 变化难以保持一致的单调关系, 在低含水率区间($\beta_w=10\% \sim 20\%$)更为突出。结合 3.1 的可视化结果可知, 此时油水分布非均匀性更强,

使腔体内介质等效介电常数呈现更显著的波动, 从而表现为扫频曲线的随机扰动增强与可分辨性下降, 进而减少了可用于建模与标定的有效单调频段。

有 P-SK-6 时(图 10(b)、(d)、(f)、(h)、(j)), 不

同曲线在主要敏感频段的分辨性明显增强, S_{21} 幅值随 β_w 增大呈现更连续的单调趋势。表明 P-SK-6 能有效改善流动的均匀性, 使谐振腔内介质分布更趋均匀, 从而增强对含水率变化的分辨能力。

3.2.2 单调频点数统计与分辨率分析 当 S_{21} 幅值低于 -60 dB 时, 信号衰减过大, 将显著降低检测与特征提取的可靠性。为进一步定量表征 P-SK-6 对微波测量信号的改善效果, 统计不同总流量条件下满足单调性的频率区间内的 S_{21} 幅值高于 -60 dB 的频点数, 记为有效单调频点数 N_m 。将相邻含水率工况 $\beta_{w,i}$ 与 $\beta_{w,i+1}$ 之间, 单位含水率变化引起的 S_{21} 幅值变化为定义局部分辨率 R (dB/1% β_w):

$$R = \frac{|S_{21}(\beta_{w,i+1}) - S_{21}(\beta_{w,i})|}{100|\beta_{w,i+1} - \beta_{w,i}|} \quad (2)$$

式中, $\beta_{w,i}$ 与 $\beta_{w,i+1}$ 分别为相邻的第 i 和第 $i+1$ 工况下含水率, $S_{21}(\beta_w)$ 为表示含水率为 β_w 时该频点处 S_{21} 幅值 (dB)。

取同一总流量条件下所有局部分辨率最大值 R_{max} 作为分辨率特征量:

$$R_{max} = \max\{R\} \quad (3)$$

图 11 给出了不同总流量条件下有、无 P-SK-6 的 N_m 与 R_{max} 对比结果。图中采用双纵坐标轴: 左纵轴表示 N_m , 右纵轴表示 R_{max} 。无 P-SK-6 时, 不同总流量的 N_m 均较小 ($N_m=17\sim54$), 且随流量变化波动明显, 表明可用于建模的单调频段受流动结构扰动限制; 相比之下, 有 P-SK-6 时, N_m 显著增加至 148~278, 平均提升约 3.8 倍。同时, R_{max} 由 0.18~0.47 提升至 0.63~0.80, 平均提高约 2.6 倍。

综合来看, P-SK-6 不仅改善了谐振腔内的介质分布特性, 而且有效提升了 S_{21} 信号随含水率变化的

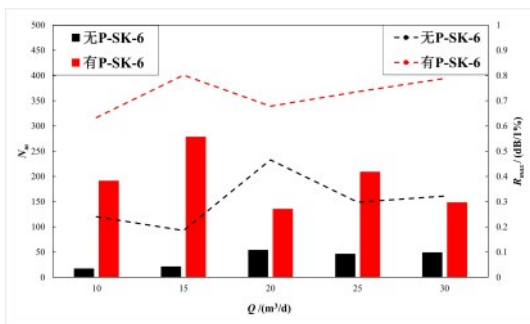


图 11 不同总流量条件下有、无 P-SK-6 的谐振腔单调频点数与局部分辨率最大值

Fig.11 Monotonic frequency-point count and maximum local resolution of the resonant cavity with and without P-SK-6

注: under different total flow rates

有效单调频段规模与局部分辨能力, 为后续高精度含水率建模提供了稳定可靠的实验数据支撑。

3.3 基于高斯过程回归的含水率预测模型

为进一步提升含水率预测精度, 构建了高斯过程回归 (Gaussian Process Regression, GPR) 含水率预测模型。GPR 属于贝叶斯非参数回归方法, 可在小样本与非线性映射场景下实现平滑拟合并兼顾泛化能力, GPR 具有更高的灵活性与可解释性, 并已在多相流测量、复杂介质建模等领域得到广泛应用。

在建模频点的选取方面, 综合考虑不同总流量下 S_{21} 幅值数据的单调性与信号分辨率特征。统计结果表明, 满足上述要求的频段主要集中在 2545~2720 MHz 与 4450~4675 MHz。为确保特征输入具有代表性, 在两频段内分别选取分辨率较高的 2660 MHz 与 4560 MHz 作为建模特征频点, 以保证模型输入在不同流量条件下具有更好的鲁棒性。

将上述两个固定频点的 S_{21} 幅值数据作为特征输入, 以含水率作为输出目标, 模型训练在 MATLAB 回归学习器框架下完成, 并采用二次有理 (Rational Quadratic) 核函数以兼顾局部拟合能力与整体平滑性。

图 12 给出了有、无 P-SK-6 两种条件下的预测结果对比。无 P-SK-6 时预测点相对分散, 部分含水率区间存在明显偏离; 有 P-SK-6 时, 预测点更紧密分布于理想对角线附近, 说明 P-SK-6 的应用不仅改善了谐振信号的稳定性, 也有效提升了模型输入特征的辨识度和映射单调性, 从而提高预测精度。

3.4 含水率预测模型的性能评价

为了评估不同条件下模型的性能, 本研究采用了均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 作为

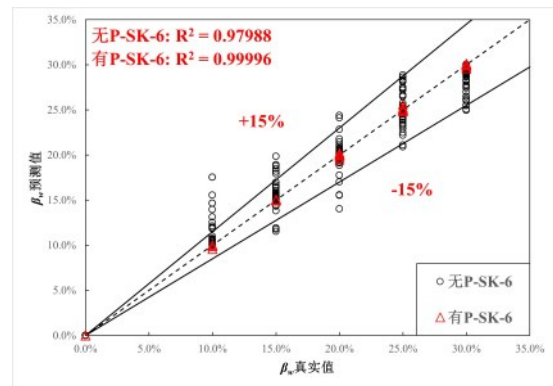


图 12 GPR 模型的含水率预测结果

Fig.12 Water cut prediction results of the GPR model

评价指标。

均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_{pred} - y_{exp})^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |y_{pred} - y_{exp}| \quad (5)$$

式中, y_{pred} 和 y_{exp} 分别是含水率的预测值和实验值; N 是数据的数量。

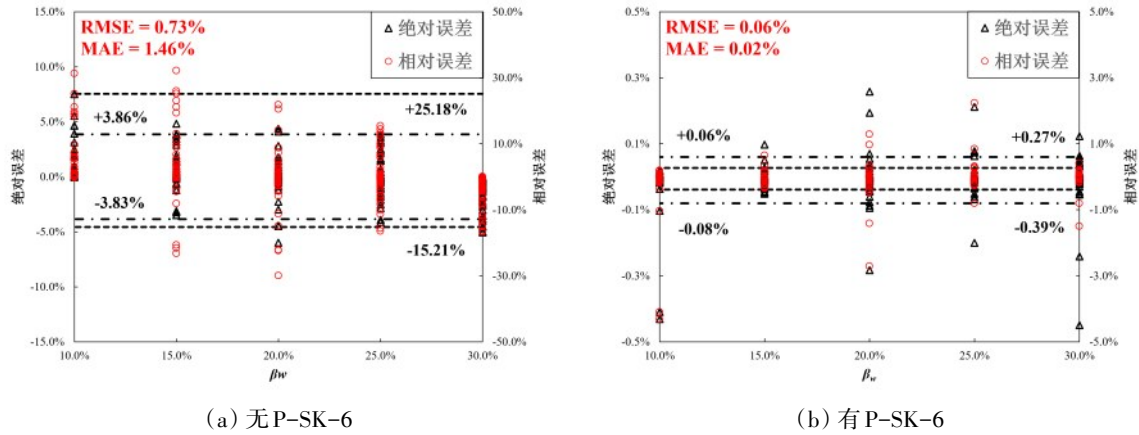


图13 含水率预测模型的误差分布

Fig.13 Error distribution of the water cut prediction model

图13给出了两种条件下含水率预测模型的误差分布特征。左纵轴表示绝对误差,右纵轴表示相对误差。在总流量10~30 m³/d、含水率10%~30%变化范围内,置信概率为95%时,无P-SK-6条件下,含水率预测的绝对误差范围为-3.83%~3.86%,相对误差范围为-15.21%~25.18%,RMSE=0.73%、MAE=1.46%;有P-SK-6条件下,预测误差显著减小,绝对误差范围为-0.08%~0.06%,相对误差范围为-0.39%~0.27%,RMSE=0.06%、MAE=0.02%。

结果表明,P-SK-6在改善油水流型稳定性和提高信号分辨率的同时,显著提升了含水率预测模型的精度与可靠性。该结果不仅验证了其在油水两相流测量中对信号质量和建模精度的协同优化作用,也表明了其在复杂流动条件下具有较高的可靠性。

4 结论

(1)通过CFD仿真对比4种结构静态混合器的混合效果,综合分析截面相分布特征与混合指数,优选出开孔式SK型6单元结构P-SK-6用于实流实验,为后续流场调控与测量精度提升奠定了可靠的结构基础。

(2)实验结果表明,P-SK-6通过周期性扭转与对称开孔引入附加径向扰动与剪切作用,可有效抑

制油水两相的局部分层与团聚,增强径向掺混与界面更新,从而改善测量段内流体分布均匀性,为微波谐振腔传感器提供了更稳定的流动条件。

(3)相较于未安装条件,安装P-SK-6后 S_{21} 幅频特性曲线随含水率变化的单调特征更连续,有效单调频点数平均提高约3.8倍,局部分辨率最大值平均提高约2.6倍。

(4)基于高斯过程回归方法构建的双频点 S_{21} 幅值含水率预测模型精度显著提高,在含水率10%~30%范围内,安装P-SK-6后,绝对误差与相对误差范围分别减小至-0.08%~0.06%与-0.39%~0.27%(P=95%),RMSE=0.06%、MAE=0.02%,均明显优于未安装条件。

综上,P-SK-6和MRCS联合测量方案实现了从流型调控到信号质量提升,再到模型精度提高的协同优化,为低流速、低含水率油水两相流的含水率高精度测量提供了一种切实可行的技术路径。

符号说明

- C ——静态混合器叶片厚度,mm
- COV ——混合指数
- D ——管道直径,mm
- d ——开孔式静态混合器P-SK叶片开孔直径,mm
- L ——静态混合器混合单元长度,mm

L/D ——静态混合器混合单元长径比

l ——静态混合器总长度, mm

MAE ——平均绝对误差

N_m ——有效单调频点数

n ——静态混合器混合单元数

Q ——流量, m^3/d

R ——局部分辨率, $dB/1\% \beta_w$

R_{max} ——局部分辨率最大值, $dB/1\% \beta_w$

$RMSE$ ——均方根误差

S_{21} ——传输系数, dB

U ——流速, m/s

U_s ——表观流速, m/s

α ——截面相含率

β ——体积相含率

θ ——静态混合器混合单元扭转角角度, $^\circ$

下角标

o——油

w——水

参考文献

- Yang Y G, Xu Y, Zhang T. Research on low water volume fraction measurement of two-phase flow based on TM010 mode microwave cavity sensor[C]//2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2019: 1-5.
- Shi X W, Tan C, Dong F, et al. Conductance sensors for multiphase flow measurement: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(11): 12913-12925.
- Kamal B, Abbasi Z, Hassanzadeh H. Water-cut measurement techniques in oil production and processing: a review[J]. Energies, 2023, 16(17): 6410.
- Yuan C, Bowler A, Davies J G, et al. Optimised mode selection in electromagnetic sensors for real time, continuous and in-situ monitoring of water cut in multi-phase flow systems[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 298: 126886.
- 徐英, 孟峥, 袁超, 等. 油水两相流超低含水率微波相位检测方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(10): 1080-1089.
Xu Y, Meng Z, Yuan C, et al. Microwave phase detection method for ultralow water fraction in oil-water two-phase flow[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57 (10): 1080-1089.
- Cai J Y, Li C, Tang X P, et al. Experimental study of water wetting in oil-water two phase flow: Horizontal flow of model oil[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73: 334-344.
- Thakur R K, Vial C, Nigam K D P, et al. Static mixers in the process industries: a review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81(7): 787-826.
- Valdés J P, Kahouadji L, Matar O K. Current advances in liquid-liquid mixing in static mixers: a review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 177: 694-731.
- 中华人民共和国工业和信息化部. 静态混合器: JB/T 7660-2016[S]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Ministry of Industry and Information Technology. Static mixer: JB/T 7660-2016[S]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- Lobry E, Theron F, Gourdon C, et al. Turbulent liquid-liquid dispersion in SMV static mixer at high dispersed phase concentration[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(23): 5762-5774.
- 禹言芳, 刘桓辰, 孟辉波, 等. Lightning静态混合器内气泡分散流体动力学特性实验研究[J]. 化工学报, 2022, 73(8): 3565-3575.
Yu Y F, Liu H C, Meng H B, et al. Experimental investigation of turbulent dispersion and hydrodynamic behavior of bubble in Lightning static mixer[J]. CIESC Journal, 2022, 73 (8): 3565-3575.
- 张春梅, 吴剑华, 王宗勇. SV型静态混合器湍流阻力的初步研究[J]. 化学工程, 2009, 37(1): 19-23.
Zhang C M, Wu J H, Wang Z Y. Preliminary study on turbulent flow resistance of SV static mixer[J]. Chemical Engineering (China), 2009, 37(1): 19-23.
- Baumann A, Jeelani S A K, Holenstein B, et al. Flow regimes and drop break-up in SMX and packed bed static mixers[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73: 354-365.
- Liu S P, Hrymak A N, Wood P E. Laminar mixing of shear thinning fluids in a SMX static mixer[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(6): 1753-1759.
- 甄一毫, 王建康, 李治建. 不同排列角度SX型静态混合器的数值模拟[J]. 塑料, 2020, 49(6): 108-111.
Zhen Y H, Wang J K, Li Z J. Numerical simulation of SX static mixer with different arrangement angles[J]. Plastics, 2020, 49(6): 108-111.
- Meijer H E H, Singh M K, Anderson P D. On the performance of static mixers: a quantitative comparison[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(10): 1333-1349.
- 杨云兰, 张鑫, 刘玉辉, 等. 大口径长输天然气管道掺氢混气特性研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2024, 37(5): 11-19.
Yang Y L, Zhang X, Liu Y H, et al. Study on the characteristics of hydrogen-mixed gas in large-diameter long-distance natural gas pipeline[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2024, 37 (5): 11-19.
- 张江伟. 静态混合器的研究进展[J]. 中外能源, 2022, 27(6): 65-69.
Zhang J W. Research progress of static mixer[J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(6): 65-69.
- Ghanem A, Lemend T, Della Valle D, et al. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods: a review [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92(2): 205-228.
- Kumar V, Shirke V, Nigam K D P. Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139(2): 284-295.
- 龚斌, 包忠平, 张春梅, 等. 混合元件数对SK型静态混合器流场特性的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(8): 1974-1980.
Gong B, Bao Z P, Zhang C M, et al. Effect of number of mixing elements on flow field in Kenics static mixer[J]. CIESC Journal, 2009, 60(8): 1974-1980.
- Jaworski Z, Pianko-Oprych P. Two-phase laminar flow simulations in a Kenics static mixer standard Eulerian and Lagrangian approaches[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2002, 80(8): 910-916.
- Haddadi M M, Hosseini S H, Rashtchian D, et al. Comparative

- analysis of different static mixers performance by CFD technique: an innovative mixer[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, **28**(3): 672–684.
- [24] Oon C S, Ateeq M, Shaw A, et al. Experimental study on a feasibility of using electromagnetic wave cylindrical cavity sensor to monitor the percentage of water fraction in a two phase system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, **245**: 140–149.
- [25] Sharma P, Lao L Y, Falcone G. A microwave cavity resonator sensor for water-in-oil measurements[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, **262**: 200–210.
- [26] Yang Y G, Xu Y, Yuan C, et al. Water cut measurement of oil-water two-phase flow in the resonant cavity sensor based on analytical field solution method[J]. Measurement, 2021, **174**: 109078.
- [27] Xu Y, Zuo R J, Yuan C, et al. A water cut measurement method based on TM010 mode microwave cavity sensor[C]//2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2022: 1–5.
- [28] Meng H B, Jiang X H, Yu Y F, et al. Laminar flow and chaotic advection mixing performance in a static mixer with perforated helical segments[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017, **34**(5): 1328–1336.
- [29] Wang C Y, Wang J K, Li Z J, et al. Study on mixing performance of perforation static mixers applied to high viscosity polymer mixing[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2025, **103** (6): 2953–2964.
- [30] 杨以光. 基于微波谐振腔传感器的两相流相含率测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- Yang Y G. Study on measurement method of phase fraction for two-phase flow using microwave resonant cavity sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.