

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于 RESNET 及微波文丘里技术的湿气双参数测量方法

徐英¹, 欧杰俊¹, 侯金龙², 吴存玮¹, 景轩¹, 刘一龙¹, 袁超¹(¹ 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; ² 唐山冀东石油机械有限责任公司, 河北唐山 063200)

摘要: 构建了微波谐振腔-文丘里组合式测量系统, 利用 COMSOL Multiphysics 进行了文丘里的动态流场仿真, 通过流场和电磁场耦合, 发现 TM_{310} 模式有利于湿气含水率测量, 提出一种 MRCS 含水率感知-Venturi 虚高流量测量-深度残差网络多参数预测的湿气测量方法, 将微波谐振腔 12 个频点的检测值、文丘里差压、压力及虚高气相流量拼接为 15 维输入特征, 通过融合微波谐振特征与文丘里的差压规律, 实现湿气双参数的精确测量。首先在 0.9 MPa、1.2 MPa 下开展了湿气两相流实验, 采集湿气两相流数据, 进一步, 设计残差网络 (RESNET), 并引入通道注意力机制 (SE-Block) 为低含水样本增加权重, 实现低含液率下的湿气含水率测量。结果表明, 对于气相流速 3m/s~20m/s, 含水率为 0%~4% 的湿气, 在 95% 置信概率下, LVF 和气相体流量的预测 MARE 分别为 2.57% 和 1.74%, 为湿气在线计量提供了一种无需放射源、精度高且易工程化的新思路。

关键词: 气液两相流; 测量; 算法; 微波谐振腔; 文丘里; 气相流量; 含水率; 深度残差网络

中图分类号: O359⁺.1; TB937

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Two-parameter measurement method for wet gas based on RESNET and microwave Venturi technology

XU Ying¹, OU Jiejun¹, HOU Jinlong², WU Cun'wei¹, JING Xuan¹, LIU Yilong¹, YUAN Chao¹

(¹ School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ² Tangshan Jidong Petroleum Machinery Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: In this study, a wet gas measurement method is proposed by integrating a microwave water-cut sensor with a Venturi meter and a deep residual network (RESNET). The method combines microwave resonance-based water fraction sensing, Venturi over-reading gas flow extraction, and data-driven multi-parameter prediction, aiming to overcome the limitations of weak liquid-phase sensitivity and low signal-to-noise ratio under low water-cut conditions. Dynamic simulations of the Venturi flow field were conducted using COMSOL Multiphysics, and coupled flow - electromagnetic analysis identified the TM_{310} mode as optimal for water fraction measurement. A microwave resonant cavity - Venturi measurement system was then developed, and experiments were performed at 0.9 MPa and 1.2 MPa. A total of 15 input features, including 12 microwave resonance responses, differential pressure, static pressure, and the over-reading gas flow rate ($Q_{g_{OR}}$) was calculated. A RESNET model with squeeze-and-excitation attention was designed to enhance sensitivity to low water-cut conditions. Results show that for gas velocities of 3 -

收稿日期: 2026-04-14 修回日期: 2026-07-07

通信作者: 袁超 (1987—), 男, 博士, 副教授, yuanchao@tju.edu.cn

第一作者: 徐英 (1970—), 女, 博士, 教授, xuying@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (622732252); 国家重点研发计划项目 (2024YFB3214004)

引用本文: 徐英, 欧杰俊, 侯金龙, 吴存玮, 景轩, 刘一龙, 袁超. 基于 RESNET 及微波文丘里技术的湿气双参数测量方法[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-12

Citation: XU Ying, OU Jiejun, HOU Jinlong, WU Cun'wei, JING Xuan, LIU Yilong, YUAN Chao. Two-parameter measurement method for wet gas based on RESNET and microwave Venturi technology[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-12

20 m/s and water volume fractions(LVF)of 0 - 4%,the proposed method achieves mean absolute relative errors of 2.57%for LVF and 1.74%for gas volumetric flow rate at a 95%confidence level.This study provides a high-accuracy and non-radioactive solution for online wet gas metering.

Keywords: Gas - liquid two-phase flow; Measurement; algorithm; Microwave resonant cavity; Venturi meter; Gas flow rate; Water volume fraction (LVF); Deep residual network (RESNET)

引 言

湿气通常是指气体体积分数大于95%或LM数小于0.3的气液两相流^[1]。在石油天然气开采、化工生产、能源输送等工业领域,湿气(气液两相流)作为一种常见的流动介质,其流量与含水率参数的精准测量直接关系到生产效率评估、工艺优化调控及安全生产保障。目前,湿气计量主要有分离计量和非分离计量两种方式^[2],非分离计量技术可以减少对生产过程的影响,因此,湿气的非分离计量技术一直以来都是多相流领域的研究热点^[3]。在湿气的测量中,由于湿气中液相体积分数较低,液相信号弱且易受流形、压力和流速变化影响,仅依靠单一测量信号难以同时获得气相流量和液相含率。因此,工业湿气流量计多采用组合式测量方案,即将文丘里、V锥或孔板等差压节流件与相含率传感器、压力和温度传感器等结合,通过多源信号融合实现湿气参数测量^{[4][5]}。过去30余年海默与斯伦贝谢国际公司基于射线技术的相含率测量方法已较成熟,目前,Roxar 2600系列、海默FR-MPFM/WGM等产品已在油气田多相流和湿气计量中得到应用,具有较高测量精度,但放射源的使用受到安全监管、现场维护和应用审批等因素限制,因此,发展安全、非放射、结构紧凑且适用于低含液率湿气工况的在线非分离测量方法仍具有重要意义。

文丘里流量计是湿气流量计量的理想装置^[6],经典文丘里管用于湿气计量的算法在文献中有广泛的研究,并最终被纳入ISO/TR 11583^[7]标准。量纲分析常被用于湿气研究中,Yuan^[8]等采用量纲分析法,建立了静压为0.2~1.2 MPa工况下双差压文丘里管中湿气的关键无量纲参数关联式,在实验室和现场测试中均表现良好。k理论是气液两相流与湿气流动数值模拟的核心基础,He等^[9]采用DPM模型对文丘里管内湿气流动进行数值研究,对比多种湍流模型,发现标准k- ϵ 模型与实验虚高误差吻合较好。近年来,Li等^[10]提出物理约束深度学习两相流量测量方法,提高了差压式气液两相流量预测模型

的泛化能力。Fang^[11]等提出了基于均质流和分层流理论的湿气新模型,该模型HS模型能够准确预测各种流动条件下的文丘里管OR值,且HS湿气模型的误差随OR值的增加保持稳定,在5%以内,证明了新型湿气模型具有良好的适应性和广泛的应用范围。Xu^[12]等采用了一种文丘里管和V形锥组成的湿气流量计量装置,提出了一种基于三重差压的新型计量方法。该方法基于气体密度弗劳德数、气液密度比和差压比建立了关联式。Wang等^[13]通过分析两个文丘里装置测得的压差,提出了一种基于盲源分离技术的气液两相段塞流测量方法,该测量模型结合了节流关系和盲源分离模型,并利用独立成分分析技术来估计混合矩阵,其中混合矩阵是两个文丘里差压信号的方差。Zheng等^[14]提出了一种由旋风分离器和TEVM组成的湿气计量装置,通过旋风分离器将湿气流形转化为环状流,分析了TEVM的压差比与弗劳伦数之间的关系,建立了一个新的虚高误差模型用于湿气计量。Li等^[15]设计了一种配备声发射探头的EVT,并提出了一种基于DP模型和集成学习方法的空隙率融合关联式,适用于分层流、段塞流和活塞流。然而,上述组合式流量计成本较高,在低含液率下存在含水率测量精度偏低的问题。

微波谐振腔(microwave resonant cavity system, MRCS)对水分子极化损耗具有高选择性,在含水率的测量方面极具优势,以谐振腔为基础的微波传感器,结构上可实现非侵入设计,测量区域可实现体测量。2018年,Liu^[16]等对平行线微波谐振腔传感器进行了深入的研究,通过仿真找到了最佳工作频率,并进行了实验验证,对高含水油水混合物的测量有较好效果,2019年,Yang等^[17]利用微波谐振腔TM₀₁₀模态的频移研究了0%-10%范围内的气-水(自来水)湿气两相流含水率测量,2023年,Xu等^[18]通过在微波谐振腔测量段前加入旋流器,选择灵敏度更高的低频模态作为最佳工作频率,给出了湿气两相流不分离测量新方案,Arsalan等^[19]将ETV与两个微波谐振器相结合组成多相流量计,通过关联这

两个传感器的时域响应,可以提取平均流速和体积流量。

综上,不少学者对组合式流量计来测量湿气进行了大量研究,然而,使用微波谐振腔和文丘里进行组合式湿气测量,并通过深度学习进行高精度建模预测的方法却鲜有报道,更未见基于残差网络(Residual network, RESNET)对 MRCS - Venturi 特征进行端到端映射的报道,本研究提出了一种“MRCS 含水率感知—Venturi 虚高流量提取—RESNET 深度残差网络多参数预测”的端到端湿气计量框架,并开展湿气流相流量与含水率同步预测方法研究。

1 实验装置和方法

1.1 测量原理

1.1.1 微波谐振腔测量原理 微波谐振腔是一种工作在微波频段的谐振元件,当外围射频电路产生的激励信号在金属空腔内形成驻波时就会产生谐振^[20],理想圆柱谐振腔 TM_{mnp} 模式下的谐振频率如式(1)所示:

$$f_{rm} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_{rm}\epsilon_{rm}}} \sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \quad (1)$$

式中, μ_{rm} 为腔内介质的等效相对磁导率, ϵ_{rm} 为等效相对介电常数, μ_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数, m, n, p 分别为圆柱谐振腔周向(φ 向), 径向(r 向)以及轴向(z 向)上的半驻波的数量, R 为谐振腔的半径, l 为谐振腔的长度。由于气和水均为非磁性介质, 电磁场对其将不产生磁化作用, 即相对磁导率不变, 故谐振频率主要取决于相对混合介电常数 ϵ_{rm} , 文献^{[15][21]}给出了9种两相经典介电常数模型, 其中串联和并联模型适用于气水两相流, 其中 ϵ_{rm} 主要取决于 ϵ_{rw} 和 ϵ_{rg} 以及各相占比。由于水相与气相介电常数存在显著差异, 故湿气的 ϵ_{rm} 主要取决于含水率, 随着含水率增大, ϵ_{rm} 增大, 从而引起谐振频率和传输特性发生变化, 通过监测谐振频率或传输参数的变化即可实现含水率的测量。该测量机理及相关理论模型在本课题组前期研究中已进行了详细推导与验证, 具体理论分析过程可参见文献^[15]。

本研究测量了含矿化度的湿气, 当水中含盐时, 水的电导率 σ 会发生变化, 矿化度是用来评价水中总的含盐量的指标, 水的复介电常数可以表示为:

$$\epsilon_{rw} = \epsilon' - j\left(\epsilon'' + \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_0}\right) \quad (2)$$

其中 ϵ' 为水的介电常数实部, ϵ'' 为极化损耗, f 为频率, ϵ_0 为真空介电常数。式(2)中可以看出, 水的介电常数实部受电导率影响小, 随频率增加, 电导率对水介电常数虚部的附加贡献减弱。Xu 等^[22]和马慧敏^[23]分析了在 2GHz 之后, 该附加贡献远小于水介电常数实部。本研究使用的微波频率在 2GHz 以上, 故矿化度对测量的影响较小。综上, 通过测量 MRCS 的谐振频率与 S21 幅值, 可得到腔内等效介电常数, 从而反演计算得到湿气的含水率。

1.1.2 文丘里管测量原理 文丘里管是流量测量中常用的经典节流式流量计。由伯努利方程和连续性方程可推导出单相流质量流量与节流压差有关。当管道中流过气液两相流时, 因液相的存在使得气相流量示值比等量气相单独流过时偏高, 这就是虚高流量 Qg_{or} , 其计算公式如下:

$$Qg_{or} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} C\epsilon \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P_p}{\rho_g}} \quad (3)$$

式中 β 为节流比; C 为流量计的流出系数; ϵ 为流量计的可膨胀系数; D 为文丘里管直径, 单位为 m; ρ_g 为气相密度, 单位为 kg/m³, ΔP_p 为气液两相流工况下的前差压值, 单位为 Pa。 Qg_{or} 与含水率密切相关, 因此若能准确获取湿气含水率, 便可测得更精确的气相流量。

结合上述文丘里和微波谐振腔的测量原理, 本研究提出了一种湿气流相流量和含水率预测的多参数融合方法, 该方法包括 MRCS 含水率感知、文丘里虚高流量提取、深度残差网络多参数预测三个环节。使用的传感器结构与 Xu 等^[24]相似, 区别在于没有起旋器, 通过测量 MRCS 的 12 个频点的检测值得到含水率相关特征, 再通过差压计算 Qg_{or} , 最后构建 RESNET 模型, 将 12 个频点检测值、差压、压力及 Qg_{or} 作为多模态输入, 通过融合流动物理模型和微波谐振特征, 解决传统节流式流量计在湿气测量中液相敏感性差、信噪比不足的问题, 从而实现湿气双参数的精确测量。

1.2 微波谐振腔动态仿真

湿气在文丘里喉部流动过程中, 气液两相界面会随时间发生波动, 导致谐振腔测量区域内的局部含水率和等效介电常数呈现瞬态变化。为进一步分析动态流形条件下微波谐振腔对含水率波动的响应能力, 本节开展流场—电磁场耦合动态仿真,

为后续实验频点选择和深度学习模型输入特征构建提供理论依据,湿气的入口气相表观流速 u_{sg} 范围为3.00m/s~20m/s,喉部气相表观流速为11.99m/s~79.96m/s,体积含液率LVF为0%~4%,研究工况点的流形分布如图1所示,其中三角形图例表示入口直管段流形,圆形图例表示喉部流形,从ISO21354流形图中可以看出,所研究的工况中,主要包括波浪流和弥散流。

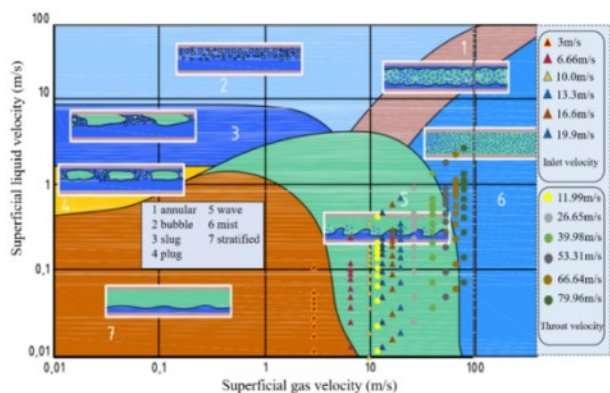


图1 工况点流形分布图

Fig 1 Flow Regime Distribution of Operating Points

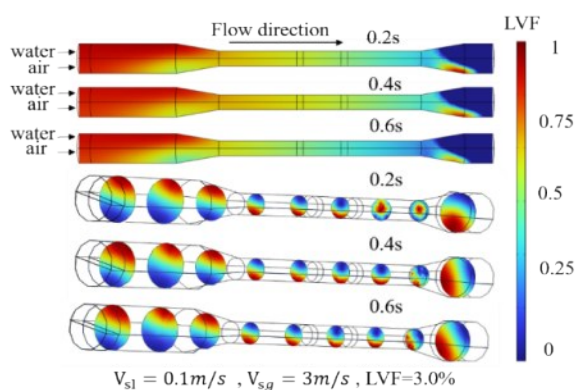


图2 波状流轴向及截面水体积分数分布图

Fig 2 Axial and Cross-sectional Water Volume Fraction Distributions for Wavy Flow

1.2.1 两相流数值模拟 为准确描述气液两相界面的演化过程,本研究基于多物理场仿真软件COMSOL Multiphysics,采用VOF(Volume of Fluid)模型对气液两相流进行数值模拟。VOF模型能够有效捕捉气液界面的形态变化,适用于描述波状流、环状流等具有明显相界面的两相流流动特征。仿真入口条件为气液表观流速,出口条件为压力出口,网格采用物理场控制网格。通过瞬态求解方法获得文丘里喉部区域内气液两相的时变相分布信息,工况中包含多组波状流,以气相表观流速3m/s,

液相表观流速0.1m/s,LVF3%为例,在0.2s,0.4s,0.6s其流场分布如图2所示,此时文丘里喉部的流形为波状流。

1.2.2 耦合仿真 在流场计算完成后,将气液两相体积分数分布导出,结合并联模型建立等效介电常数分布,并将其导入电磁场模型中进行电磁场仿真计算。谐振腔电磁场采用频域求解方法,通过求解麦克斯韦方程组获得不同流形条件下谐振腔内部的电场分布特性。以2.2.1中的流场结果为例,经过流场电场耦合,得到谐振腔电场分布云图,如图3所示,图3中(a)~(d)为截面流场分布,从图中可以看出,此时截面湿气流动呈现分层流,通过计算的瞬态含水率可以看出含水率在小范围波动,该稳定的相分层结构为电磁场对介电扰动进行响应提供了较强的空间一致性。图3(e)~(h)分别为0.2s,0.4s,0.6s,0.8s时刻的电场分布云图,从图中可以看出,此时谐振腔近似工作于 TM_{310} 模式,TM模式为横磁模,即磁场轴向分量为零而电场存在轴向分量;下标3、1、0分别表示周向三阶、径向一阶和轴向零阶模态。电场分布呈现典型的周向多峰环状结构,随着含水率变化, ϵ_m 发生改变,从而引起电磁场分布变化,对比不同时刻的电场云图可以发现,腔体区域局部电场发生了变化,但整体模态结构保持不变。液相区域介电常数显著高于气相,会导致局部电场降低,该变化虽然在幅值上较小,但具有良好的规律性,表明系统对含水率变化具有良好的敏感性。

1.2.3 均相流和环状流仿真 弥散流下,流速极高,液体都以微小液滴形式弥散在气相中,仿真中以均相流来进行探究,均相流和环状流下的电场分布如图4所示,图4(a)~(c)中,在均相流条件下,不同含水率工况下的电场分布均保持稳定的六瓣对称结构,模态形态未发生明显变化,这与 TM_{310} 模态的固有场分布特征一致。随着含水率的增加, ϵ_m 逐渐增大,导致电场能量分布轻微重构,表现为局部电场强度幅值的变化,而电场空间分布形态基本保持不变。从图4(d)~(f)可以看出,环状流状态下,由于气液两相在径向上的非均匀分布,高介电常数液膜主要附着于壁面区域,形成显著的径向介电梯度,在该条件下,电场向高介电液膜区域偏移,高场区沿壁面增强,同时原有对称性出现不同程度畸变,随含水率升高,径向介电不均匀性增强,畸变程度加剧,说明 TM_{310} 模态对径向介电梯度变化极为敏感,适用于含水率的测量。仿真结果表明,谐振腔

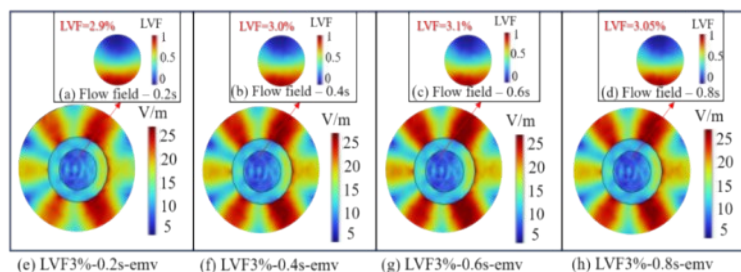


图3 LVF3%截面流场分布及谐振腔电场云图

Fig 3 Flow Field and Electric Field Contours at 3% LVF Cross Section

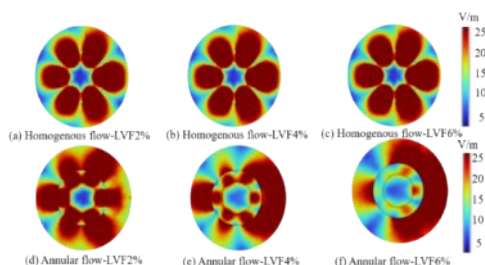


图4 均相流和环状流电场分布图

Fig 4 Electric Field Distributions for Homogeneous and Annular Flow

工作在 TM_{310} 时,对介电分布变化具有较高敏感性,且模态结构稳定,因此,本文选取 TM_{310} 模式作为谐振腔的工作模式来测量含水率。

1.2.4 S21 幅频特性分析 为分析含水率对谐振腔幅频特性的影响,改变液相流速,获得了 LVF=0.5%~6% 范围内 TM_{310} 模式的幅频特性曲线,扫频范围为 3000MHz 到 6000MHz,扫频步长为 10MHz,仿真结果如图 5 所示,从图 5 中可以看出,随着含水

率从 0.5% 增大到 6%,谐振频率向低频方向单调左移,分别从 3950MHz 减小到了 3880MHz 和从 5720MHz 减小到了 5670MHz,且谐振峰值(S21 幅值)随含水率增大而逐渐减小。谐振频率变化主要源于 ϵ_m 增大,因为谐振频率 f 和 ϵ_m 近似满足 $f \propto 1/\sqrt{\epsilon_m}$,因此表现为频率随含水率增加而单调左移。对于 S21 幅值的变化,主要因为水相具有较大的介电损耗因子,随着含水率增加,等效介电损耗显著提高,导致微波能量在传播过程中被更多吸收与耗散,最终表现为测得的 S21 幅值减小。为进一步分析其规律,固定频率为 4000MHz 和 5850MHz 观察 S21 幅值,两频率点处幅值分别减小了 0.48dB 和 3.34dB,且高频段对含水率变化更为敏感。这是因为在较高频率下,介电损耗增强更为明显,从而导致 S21 衰减更强。综上,谐振频率主要反映介电常数变化,而 S21 幅值则对介电损耗更为敏感,因此可以根据谐振频率和 S21 幅值确定管道内的含水率。

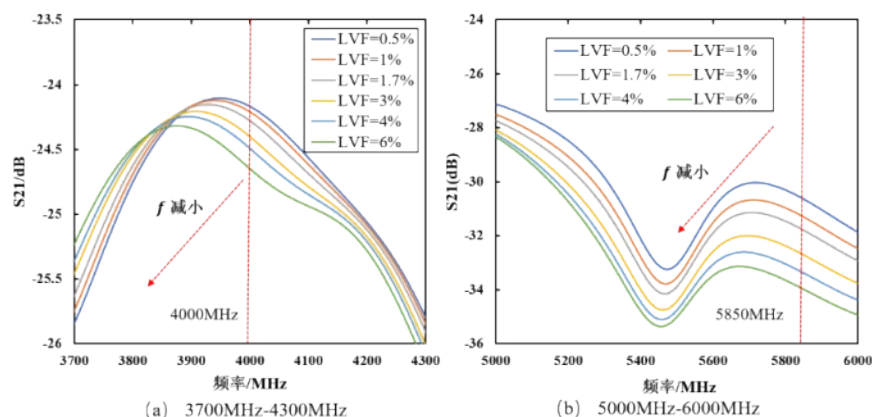


图5 S21 幅频特性曲线

Fig 5 S21 Frequency Response Curve

1.3 实验装置及工况

本研究在天津大学的双闭环中压可调湿气流装置上进行了湿气流实验^[25],实验装置内的液

体流量由变频水泵产生,流量上限为 16m³/h。液相标准仪表是精度为 0.3% 的横河电磁流量计,流量可调范围为 0.05~8 m³/h。活塞式空压机流量范围可调

1~400m³/h。气相标准表为SICK的气体超声波流量计,精度为1%。实验流动介质为空气和水,表压可调范围为0~1.6MPa。更多详细介绍见参考文献^[26]。实验部分的安装情况见图6。实验中使用的管段是气路四、水路一和水路二。本研究中,实验运行压

力 p 为0.9、1.2MPa(绝对压力),入口气相表观流速 u_{sg} 为3.00、6.66、10.00、13.33、16.66、19.99m/s,体积含液率LVF为0%~4%,稳态采样阶段压力波动小于 $\pm 0.3\%$,流量波动小于 $\pm 0.5\%$ 。

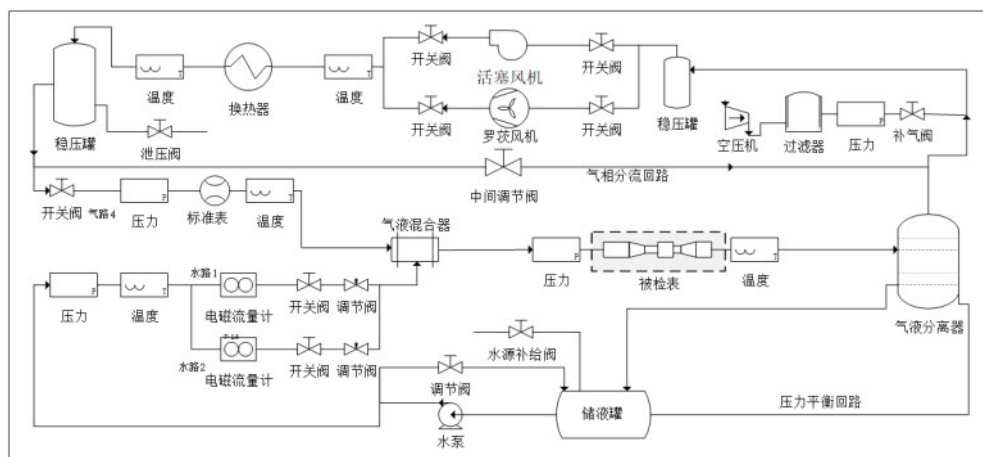


图6 实验装置

Fig 6 experiment setup

2 模型的建立

2.1 传感器信号

2.1.1 文丘里信号特征规律提取 通常认为,差压信号的平均值及其波动特征都蕴含着丰富的气体和液体流量信息^{[27][28]}。因此,本研究中提取了差压信号及压力信号,并采用200ms时间窗口进行了平均处理,所提取的差压信号如图7所示,图7中横轴为含水率,纵轴为差压。在相同工况气体体积流量下,随着含水率的增大,差压逐渐升高,当LVF从

0%增大到2%时,差压呈明显上升趋势,原因在于随着液相含率增加,混合物平均密度升高,使流体在收缩段至喉部的加速过程中需要更大的压力差来维持流体加速,因此测得的文丘里差压明显升高。从不同流量曲线间的分离程度来看,在本实验工况内,气体工况体流量的变化对差压的影响强于LVF变化带来的影响,说明气体工况体流量仍是决定差压的主要控制参数,而液相则主要表现为对差压响应的附加放大作用。

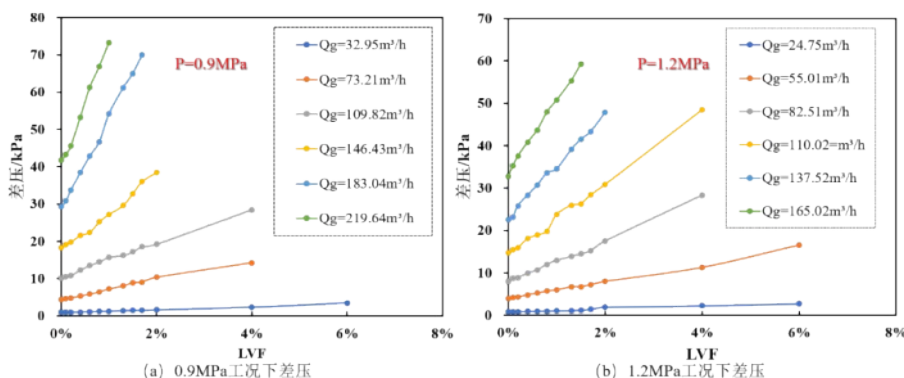


图7 文丘里差压信号

Fig 7 Venturi differential pressure signal

对比压力变化对差压的影响,图7中0.9 MPa和1.2 MPa两组工况对应的气相流量范围并非完全一

致,应在相近气相流量时分析,对比气相流量约为110m³/h时,在纯气相下,0.9MPa与1.2MPa差压差异

较小;引入液相时,1.2MPa下的差压整体高于0.9MPa下的差压,且该差异随LVF的增加而扩大,表明系统压力对湿气文丘里差压的影响不局限于气相密度变化,还可能与两相间动量耦合增强、滑移效应减弱以及混合物平均密度提高有关。因此,结合实测差压与压力,可依据式(3)计算文丘里的虚高流量。

2.1.2 微波谐振腔信号特征规律 根据 MRCS 系

统设计的转换电路,将微波谐振腔的S21幅值转化为0~3.3V电压输出,S21幅值越大,对应的输出越小。实验采用1~6GHz扫频测试,扫频步长5MHz。为筛选适用于含水率测量的特征频点,本文对不同LVF下各频点电压响应的单调性和分辨率进行分析。以矿化度20000ppm,压力0.9MPa,气相流量 $Q_g=109.82\text{m}^3/\text{h}$,气相流量 $Q_g=73.21\text{m}^3/\text{h}$ 为例,如图8所示:

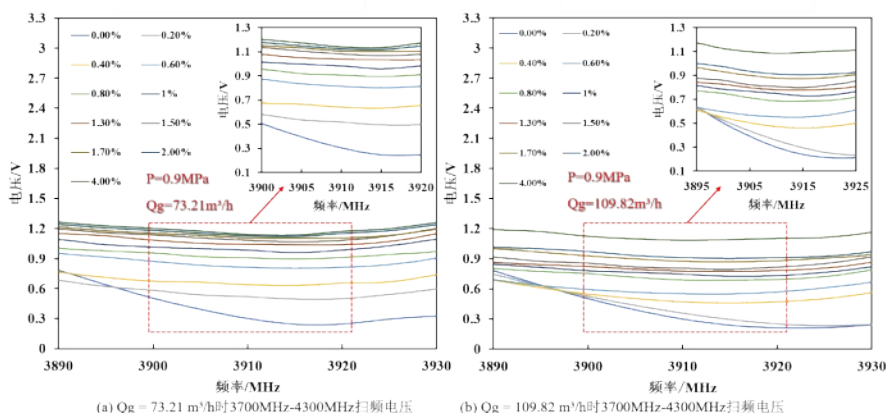


图8 3700MHz~4300MHz扫频电压

Fig 8 sweep voltage of 3700MHz~4300MHz

在频点3910MHz、频点3920MHz处,随着含水率的增加,输出电压呈单调增加趋势,与仿真分析中S21幅值随含水率减小的规律一致。随着LVF的增大, ΔV 减小,表现出一定的非线性特征。在较低含水率条件下,液相通常以分散液滴形式存在,此时 ε_{rm} 对含水率变化敏感,微小的LVF变化即可引起明显的电压响应。随着含水率继续增加,液相逐渐向连续或半连续结构过渡, ε_{rm} 随LVF变化速率降低,导致输出电压对含水率变化的响应灵敏度下降,从而表现为 ΔV 减小。对比不同气相流速下的电压信号, $Q_g=73.21\text{m}^3/\text{h}$ 对应的电压信号较 $Q_g=109.82\text{m}^3/\text{h}$ 的更高,这是由于较高气速增强了气液两相的剪切作用,使液滴更加细化并趋于均匀分布,从而减弱了局部介电不均匀性对电磁场分布的扰动程度。为定量评价各频点对含水率变化的分辨能力,定义分辨率 R_m ,其计算公式如式(4)所示:

$$R_m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{LVF_{\max} - LVF_{\min}} \#(4)$$

式中, $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为对应频点下电压的最大值和最小值, $LVF_{\max}$ 和 $LVF_{\min}$ 分别为对应频点下的含水率最大值和最小值。 $Q_g=73.21\text{m}^3/\text{h}$ 时,3910MHz和3920MHz处的分辨率分别为0.198mv/

0.001%, 0.222mv/0.001%, $Q_g=109.82\text{m}^3/\text{h}$ 时,3910MHz和3920MHz处的分辨率分别为0.2005mv/0.001%, 0.22mv/0.001%。综合3700~4300MHz频段内各工况的电压响应规律,结合扫频步长,选取3900MHz、3910MHz、3915MHz和3920MHz作为该频段的特征频点。

频段5600MHz~6000MHz范围内的电压变化曲线如图9所示:

该频段中,5850~5910MHz范围内电压随LVF变化具有较好的单调性和分辨能力。 $Q_g=73.21\text{m}^3/\text{h}$ 时,5860MHz、5880MHz处的分辨率分别为0.652mv/0.001%, 0.602mv/0.001%, $Q_g=109.82\text{m}^3/\text{h}$ 时,5860MHz、5880MHz处的分辨率分别为0.287mv/0.001%, 0.265mv/0.001%, 综合分析5600MHz~6000MHz范围内实验中所有工况的电压规律,选取了5845MHz、5850MHz、5860MHz、5870MHz、5880MHz、5890MHz、5900MHz、5910MHz等8个频点。两个频段范围内总共选取了12个频点用于含水率的计算。

实际应用中,对电压信号采用200ms时间窗口进行平均处理,考虑到测量数据中可能存在的异常值与极端波动,采用RobustScaler进行数据标准化

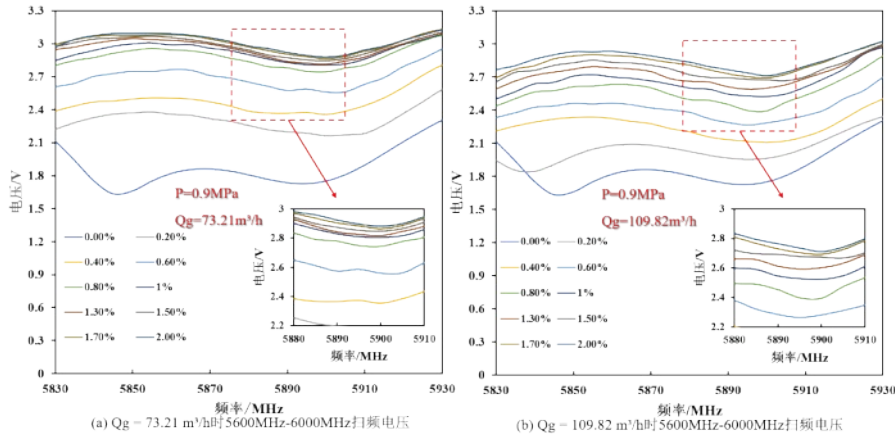


图9 5600MHz-6000MHz扫频电压
Fig 9 sweep voltage of 5600MHz-6000MHz

处理。该方法基于数据的四分位数范围(IQR)计算,对异常值具有更强的稳健性,其变换公式如(5)所示,式中, X_{norm} 标准化后的数据,X是采集的数据,Q1、Q2、Q3分别为数据的第一四分位数、中位数和第三四分位数。

$$X_{norm} = \frac{X - Q_2}{Q_3 - Q_1} \quad (5)$$

2.2 残差网络模型(RESNET)

2.2.1 RESNET结构 湿气液相流量数据存在显著的分布偏斜特性,传统机理模型在高含气率时误差较大,单一的数据驱动模型难以兼顾多参数特征,本研究采用了双任务深度残差网络+物理引导损失的湿气双参数预测方式。深度残差网络(RESNET)的核心思想是通过引入残差块和跳跃连接,使得网络可以学习到输入与输出之间的残差,而非直接拟合复杂函数,这种设计可以允许信息绕过某些层进行直接传递,在残差块中,输入通过跨层链接直接传递到输出,形成一种恒等映射结构,这种结构可以使得网络更容易得到优化,缓解网络训练过程中的梯度消失和梯度爆炸问题。本研究采用RESNET风格的残差块(Resblock)设计,其数学表达式为:

$$F(x) = \text{ReLU}\left(x + \text{BN}\left(W_2 \cdot \text{ReLU}\left(\text{BN}\left(W_1 \cdot x + b_1\right)\right) + b_2\right)\right) \quad (6)$$

其中,x为残差块的输入特征, W_1, W_2 为全连接层权重矩阵, b_1, b_2 为偏置,BN为批量归一化(BatchNorm1d)操作,ReLU为激活函数。通过使用残差块,增强了特征传播能力,显著降低深度神经网络训练的难度,使其更好地拟合训练样本,同时保持对测试样本的优异泛化能力。本研究所用的RESNET网络如图10所示:

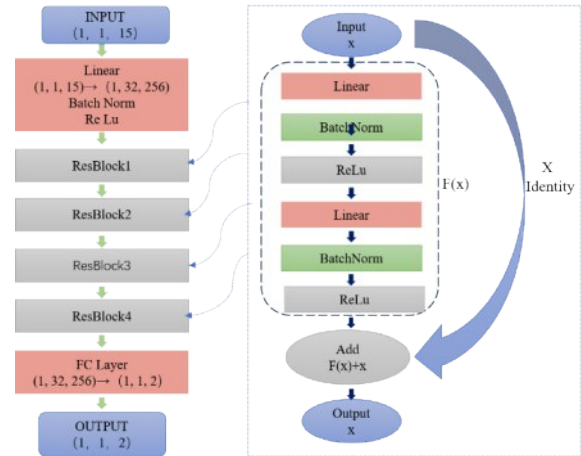


图10 Resnet网络

Fig 10 Resnet

2.2.2 Huber损失函数与通道注意力机制 为了解决液相小流量样本预测精度不足的问题,采用了加权分位数 Huber 损失函数,降低异常值的影响,同时还引入了通道注意力机制(SE-Block)自适应分配样本权重,对液相小流量样本赋予更高权重,确保模型在训练中充分关注此类样本。其计算如式所示:

$$L_{Huber}(r) = \begin{cases} \frac{1}{2}r^2 & |r| \leq \delta \\ \delta\left(|r| - \frac{1}{2}\delta\right) & |r| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

$$L_{quantile}(r, q) = q \cdot \max(r, 0) + (1 - q) \cdot \max(-r, 0) \quad (8)$$

$$w_l = \frac{1}{1 + \log(1 + y_{l,nz})} \quad (9)$$

其中 $r=y-y^*$ 为预测残差, δ 为Huber的阈值函数,q为分位数参数,用于调整正负残差权重,本研

究中设置 $q=0.5$,实现无偏预测。 w_l 为液相样本权重, $y_{l,nz}$ 为标准化处理后的液相值, $\bar{\cdot}$ 表示平均值。

2.3 湿气双参数测量方法流程

图11为所提出的湿气双参数测量方法流程图,计算方法主要过程描述如下:

(1)数据处理:采用 RobustScaler 进行数据标准化处理,对干气样本进行标记,对湿气样本 $y_{liq,nz}$ 进行 $\log_{1p}$ 变换($y_{liq,log} = \log(1 + y_{liq,nz})$);

(2)模型准备:k折交叉验证数据划分,模型初始化,超参搜索;

(3)残差块对输入进行处理,样本权重自适应分配,加权分位数 Huber 损失计算,模型参数更新;

(4)k折交叉验证(K-Fold)构建集成模型,气相流量和含水率集成推理,将5个基模型的预测结果取平均值,逆标准化,零值恢复,气相流量和含水率预测值输出;

图中,蓝色箭头表示训练过程,包含上述算法描述流程的(1~4),橙色箭头表示应用过程,应用时,(2)、(3)中所得模型已打包,应用过程包含打包模型及流程(1)、(4)。

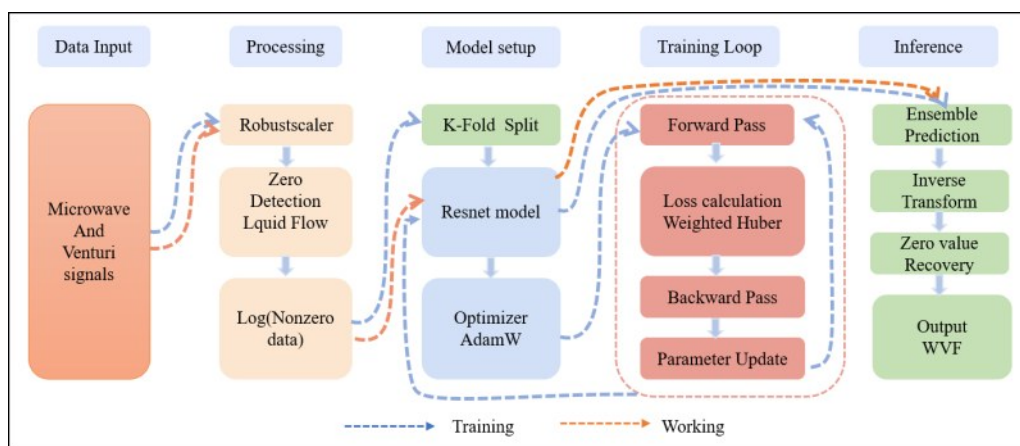


图11 湿气双参数测量方法流程图

Fig 11 Flowchart of Wet Gas Two-Parameter Measurement Method

2.4 误差分析

2.4.1 训练集误差分析 基于 RESNET 的模型进行

双参数预测,得到气相体积流量和含水率的预测相对误差如图12所示

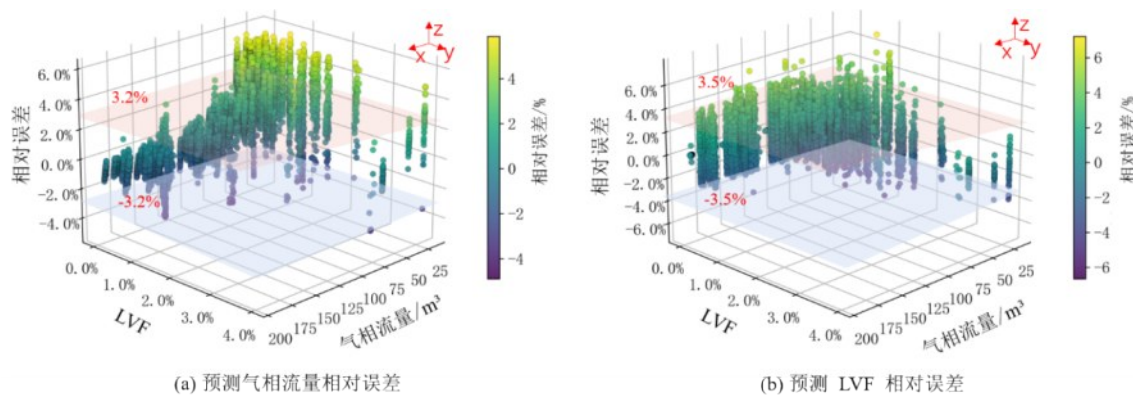


图12 RESNET模型预测气相相对误差和LVF相对误差(训练集)

Fig 12 Relative Errors of Gas Phase Prediction and LVF Prediction by RESNET Model (Training Set)

图12(a)给出了气相流量预测相对误差随气相流量和含水率变化的分布特征,从训练集结果可以看出,在含水率保持不变时,低气相流量区域的预测相对误差离散性较大,局部样本出现较明显的正负波动;而随着气相流量增大,预测相对误差整体呈减小趋势,并逐渐收敛至较小范围。该现象表

明,在当前训练样本范围内,模型对高气相流量工况的拟合稳定性优于低流量工况。可能的原因是低流量下,差压信号幅值较小,导致特征信号的区分度下降。此外,200毫秒时间尺度下瞬时响应保留了局部瞬态波动,使低流量区域表现出更高的误差离散性。当气相流量保持不变时,超低含水率区

域的气相流量预测误差相对较小且分布更为集中；随着含水率升高，误差略有增大。这可能是因为随着液相含量增加，液相对文丘里差压响应的附加影响增强，增加气相流量反演难度，在95%置信区间下，气相流量预测的相对误差为 $\pm 3.2\%$ 。

图12(b)给出了含水率预测相对误差随气相流量和含水率变化的分布特征。从训练集结果可以看出，在气相流量保持不变时，低含水率区域的预测误差主要集中在零误差附近；随着含水率增大，误差离散程度略有增加。这可能与高含水率下液相分布和气液界面形态更加复杂有关，使微波谐振信号对局部扰动更为敏感。在含水率保持不变时，随着气相流量变化，含水率预测相对误差整体变化不显著，说明模型对气相流量变化具有较好的鲁棒性，且未观察到明显的系统性偏移。在95%置信区间下，训练集中含水率预测的相对误差为 $\pm 3.5\%$ 。图12所示结果反映的是模型在训练样本上的拟合

特征，其泛化性能仍需结合独立验证集结果进一步评估。

2.4.2 验证集误差分析 更换实验工况点，对所建立的RESNET模型进行验证，得到的气相体积流量预测的相对误差和含水率预测相对误差如图13所示，验证模型的工况点包含气相流量范围从 $24\text{m}^3/\text{h}$ 到 $165\text{m}^3/\text{h}$ ，含水率范围从0%到4%，从图13中可以看出，在置信概率95%的区间内，气相体积流量相对误差为 $\pm 1.84\%$ ，LVF预测相对误差为 $\pm 3.2\%$ ，气相体积流量和LVF的MARE分别为1.74%和2.57%，说明微波谐振腔对介电常数变化具有较高灵敏度，使模型能够准确捕捉微小含水率变化，随着含水率增加，部分数据点在误差带内略有扩散，但预测相对误差仍被有效限制在 $\pm 6\%$ 以内，未出现明显失配现象，通过新的实验工况验证了所建立的RESNET模型的有效性。

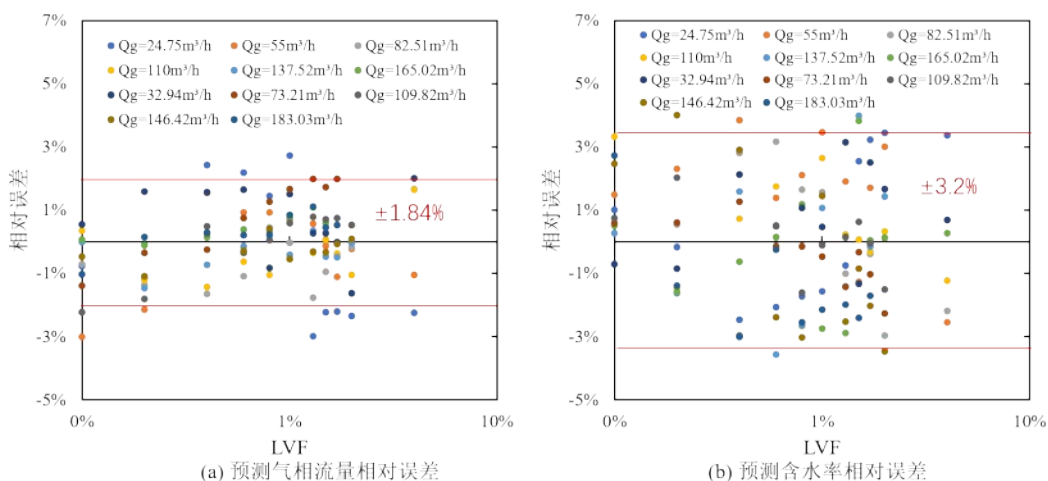


图13 气相流量相对误差和LVF相对误差(验证集)

Fig 13 Relative Errors of Gas Phase Flow Rate and LVF

2.4.3 测量结果对比

表1 本文研究方法与引言中的方法对比

Table 1 Comparison of Research Methods in This Paper with Those in the Introduction

文献	工况范围	气相相对误差	液相流量/LVF相对误差
Xu等 ^[12]	u_{sg} : 4 – 8 m/s; LVF: 1%–3%	$\pm 3\%$	$\pm 6\%$
Zheng等 ^[14]	Qg: 108–260 m^3/h ; Ql: 0.15–1.7 m^3/h	$\pm 3\%$	$\pm 8\%$
Roxar 2600 ^[29]	u_{sg} : 5 m/s–25 m/s; LVF: 0%–100%	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
本文	u_{sg} : 3 m/s – 20 m/s; LVF: 0%–6%	$\pm 1.84\%$	$\pm 3.2\%$

从表1可以看出，本文所提出的微波谐振腔与文丘里差压融合测量方法在实验工况范围内具有较好的测量精度，尤其在低含水率湿气含水率预测

方面表现出较高的分辨能力。需要指出的是，不同文献的传感器结构、工况范围和误差定义并不完全一致，因此该对比主要用于说明本文方法在相近低

含液率湿气工况下的测量性能。

3 结论

湿气的流量与含水率双参数的精准测量对生产效率评估具有重要意义,本研究基于微波谐振腔信号及文丘里的信号,提出了一种MRCS含水率感知—虚流量提取—深度残差网络多参数预测的湿气测量方法,基于仿真与实验分析,主要结论如下:

(1)利用COMSOL Multiphysics构建文丘里-微波谐振腔多物理场耦合模型,对湿气两相流条件下的动态响应进行了系统分析,结果表明,谐振腔在 TM_{310} 模式下电场能量集中、模式稳定,对湿气介电扰动具有较高灵敏度,适用于低含水率湿气的含水率检测。

(2)依据微波谐振腔对介电特性变化的敏感性,选取了两个频段范围内的12个频点用于含水率的预测,在保留了含水率信息的同时降低了模型的输入维度,结果表明,该方法在高矿化度条件下,仍具有良好的适用性。

(3)将基于文丘里差压计算得到的虚高气相流量作为模型的输入,为深度学习模型引入物理约束信息,提高了湿气流量的预测精度,实验工况下,响应时间为200毫秒,在置信概率95%的区间内,气相体积流量的相对误差为 $\pm 1.84\%$,LVF预测相对误差为 $\pm 3.2\%$ 。

符号说明

LVF—液相体积含水率

Qg, Ql, QgOR—分别为气相流量、液相流量和虚高气相流量, m^3/h

usg—气相表观流速

μ_{rm} —等效相对磁导率

ϵ —可膨胀系数

$\epsilon_0, \epsilon_{rm}, \epsilon_{rw}, \epsilon_{rg}, \epsilon', \epsilon''$ —分别为真空介电常数、两相混合等效相对介电常数、水相对介电常数、空气相对介电常数、水介电常数实部、极化损耗

σ ——水电导率

参考文献

[1] Abdul-Majeed G H. Liquid holdup in horizontal two-phase gas: liquid flow[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996, **15**(2/3/4): 271-280.

[2] 张强, 刘丁发, 王辉. 湿天然气不分离测量技术在页岩气井口的应用研究[C]//2018年全国天然气学术年会, 2018: 251-257.

Zhang Q, Liu D F, Wang H, et al. Application research of wet natural gas non separation measurement technology in shale gas wellhead [C]//Proceedings of the 2018 National Natural Gas Academic Annual Conference, 2018:251-257.

[3] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.

Lin Z H. Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.

[4] Meribout M, Azzi A, Ghendour N, et al. Multiphase flow meters targeting oil & gas industries[J]. Measurement, 2020, **165**: 108111.

[5] Zhao F, Li S S, Zheng X B, et al. A modified model for wet gas flowrate measurement considering entrainment downstream of a cone meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, **77**: 101839.

[6] Fang L D, Zhang T, Jin N D. A comparison of correlations used for Venturi wet gas metering in oil and gas industry[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, **57**(3/4): 247-256.

[7] ISO/TR 11583:2012(E). Measurement of Wet Gas Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits[S].

[8] Yuan C, Xu Y, Zhang T, et al. Experimental investigation of wet gas over reading in Venturi[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, **66**: 63-71.

[9] He D H, Bai B F. Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, **28**: 1-6.

[10] Li S S, Bai B F. Gas-liquid two-phase flow rates measurement using physics-guided deep learning[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2023, **162**: 104421.

[11] Fang L D, Zhang T, Xu Y. Venturi wet gas flow modeling based on homogeneous and separated flow theory[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2008, **2008**: 807287.

[12] Xu Y, Yuan C, Long Z H, et al. Research the wet gas flow measurement based on dual-throttle device[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, **34**: 68-75.

[13] Wang W W, Liang X, Zhang M Z. Measurement of gas-liquid two-phase slug flow with a Venturi meter based on blind source separation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, **23** (9): 1447-1452.

[14] Zheng W B, Liang R M, Zhang X K, et al. Wet gas measurements of long-throat Venturi Tube based on forced annular flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, **81**: 102037.

[15] Li C F, Zhang T, Zang X L, et al. Void fraction measurement based on flow noise decoupling and differential pressure[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, **71**: 1-12.

[16] Liu W X, Jin N D, Han Y F, et al. Characterising dynamic instability in high water-cut oil-water flows using high-resolution microwave sensor signals[J]. Zeitschrift für Naturforschung A, 2018, **73**(6): 485-499.

[17] 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). May 20-23, 2019. Auckland, New Zealand. IEEE, 2019: 1-5.

[18] Xu Y, Zuo R J, Yuan C, et al. A water volume fraction measurement method based on flow regime insensitivity-

- microwave resonant cavity sensor (FRI-MRCS)[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, **23**(18): 21226–21233.
- [19] Arsalan M, Karimi M A, Shamim A. Multiphase flow meter combining extended throat venturi with microwave resonators: EP20715616.7[P]. –0–0.
- [20] David M. Pozar. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- Pozar D M. Microwave engineering[M]. Zhang Z Y, Zhou (L./Y)Z, Wu D M, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [21] Qian J B, Yan S M, Li Z Y, et al. Modification of the Maxwell – Wagner heterogeneous dielectric model for heterogeneous polymers and emulsions[J]. Polymers, 2022, **14**(13): 2743.
- [22] Xu Y, Sun Z B, Yuan C, et al. Research on frequency-tunable microwave resonant cavity sensor to overcome the influence of salinity in ultralow water content detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, **25**(15): 28341–28348.
- [23] 马慧敏. 正交微波场中两相流的相含率及流量测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- Ma H M. Study on phase holdup and flow measurement method of two-phase flow in orthogonal microwave field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2023.
- [24] Xu Y, Zuo R J, Yuan C, et al. Research on the measurement method of gas–water two–phase flow based on dual–sensor system [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2023, **93**: 102393.
- [25] Xu Y, Zhang Y M, Yuan C, et al. Measurement method of wet gas two–phase flow rate based on the main frequency and the modulus of vector acceleration of swirl flowmeter[J]. Measurement, 2023, **221**: 113539.
- [26] Xu Y, Wei C S, Yuan C, et al. Using three–axis acceleration sensor to measure the frequency of the precession vortex signal [C]//2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). May 16–19, 2022, Ottawa, ON, Canada. IEEE, 2022: 1–6.
- [27] Xu L J, Zhou W L, Li X M, et al. Wet gas metering using a revised venturi meter and soft–computing approximation techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, **60** (3): 947–956.
- [28] Shaban H, Tavoularis S. Measurement of gas and liquid flow rates in two–phase pipe flows by the application of machine learning techniques to differential pressure signals[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, **67**: 106–117.
- [29] Emerson Automation Solutions, "Roxar 2600 Multiphase Flow Meter Product Data Sheet," Emerson Electric Co.[EB/OL].[2025–06–02]. <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-roxar-2600-multiphase>.