

引用本文:邢文举,陈强,刘国权,等.基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法[J].光通信技术,2025,49(1):78–82.

基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法

邢文举^{1,2},陈强³,刘国权³,高宏^{1,2},乔学光^{4*}

(1.西安石油大学 理学院,西安 710065;2.陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心,西安 710065;

3.中国石油测井有限责任公司 测井技术研究院,西安 710005;4.西北大学 物理学院,西安 710127)

摘要:针对传统阵列式光纤探针在测量气液两相流持气率时存在的点位覆盖不足及对流场造成干扰的问题,提出了一种基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法。该方法利用单模光纤探针对所选定的关键位置进行精确测量,并采用克里金插值算法对未直接测量区域的持气率进行估算,从而实现成像。实验结果表明,在气流量设定为 0.2 L/min、0.3 L/min、0.4 L/min 和 0.5 L/min 的情况下,此方法能够生成高质量的持气率图像,成功实现了测量区域内持气率分布的可视化。

关键词:光纤探针;克里金插值算法;持气率;成像

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)01-0078-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Gas-holding rate imaging method for gas-liquid two-phase flow based on single-mode fiber probe

XING Wenju^{1,2}, CHEN Qiang³, LIU Guoquan³, GAO Hong^{1,2}, QIAO Xueguang^{4*}

(1. Science College, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resources Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China; 3. Logging Technology Research Institute, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710005, China; 4. School of Physics, Northwestern University, Xi'an 710127, China)

Abstract: To address the limitations of traditional array-based fiber probes in measuring gas-holding rate in gas-liquid two-phase flows, such as insufficient spatial coverage and flow field disturbance, a new method for gas-holding rate imaging using single-mode fiber probes has been proposed. This method involves precise measurements at selected key positions using single-mode fiber probes and employs Kriging interpolation algorithm to estimate the gas-holding rate in unmeasured regions, thereby achieving imaging. The experimental results show that under gas flow rates of 0.2 L/min, 0.3 L/min, 0.4 L/min, and 0.5 L/min, this method can generate high-quality gas-holding rate images, successfully visualizing the distribution of gas-holding rate within the measurement region.

Key words: fiber probe, Kriging interpolation algorithm, gas-holding rate, imaging

0 引言

光纤探针因其抗电磁干扰、易于阵列化和高灵敏

收稿日期:2024-04-06。

基金项目:国家自然科学基金项目(61927812,61735014)资助;中国石油集团油田技术服务股份有限公司科学研究与技术开发项目(2023T-002-001)资助。

作者简介:邢文举(1999—),男,硕士研究生,本科毕业于河南理工大学光电信息科学与工程专业,现就读于西安石油大学理学院光学工程专业,主要从事光传感、油气井下阵列光纤持气率检测方面的研究工作。

*** 通信作者:**乔学光(1955—),男,理学博士,教授,主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探和油气管线检测等领域的教学与研究工作。



度的特点,在多相流气相检测领域得到了广泛应用^[1-2]。例如,WANG D Y 等人^[3]利用双光纤探针对管道内不同径向位置的气相信号进行了测量,通过计算各位置的气泡弦长序列,成功获得了气相流动参数(如局部流速和局部持气率)的分布情况。YANG Q Y 等人^[4]则采用阵列光纤探针传感器,对气液段塞流和搅拌流中的气相分布进行了实验研究,揭示了沿管径向的持气率分布规律。然而,ATHAR M H 等人^[5]使用高速摄像机对光纤探针测量泡状流持气率的精度进行标定后发现,气泡的变形、减速和漂移效应对光纤探针的测量精度有显著影响。此外,TIEN T M 等人^[6]设计了一种8路

阵列式光纤探针传感系统,能够测量气液两相流中持气率的空间分布,进一步拓展了光纤探针的应用范围。

尽管如此,上述研究中所用的阵列式光纤探针在进行气液两相流持气率测量时,仍然面临测量点位覆盖不足及对多相流动产生干扰的问题。为了解决这些问题,本文提出一种基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法,融合单模光纤探针测量技术和克里金插值算法,不仅能够对测量区域内的持气率分布进行更为全面和细致的可视化展示,还能有效地克服传统方法的局限性。

1 基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法

本文提出的基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法采用单模光纤探针对选定的关键位置进行精确的持气率测量,并利用克里金插值算法对未直接测量区域的持气率进行估算和成像。

1.1 单模光纤探针结构优化设计

相较于多模光纤,单模光纤具有较低的传输损耗和不存在模式干扰的特点。此外,采用单模光纤可以减小探针的尺寸,使得探针能够探测到更小的气泡。基于这些优势,本文选择采用单模光纤设计探针。

假设光纤探针的锥型探头构成一个理想化的均匀且无损波导,在这种情况下,当光抵达探针与物质的分界面时,会发生折射与反射现象,这些现象严格遵循斯涅尔定律和反射定律。通过计算反射光能量与入射光总能量的比例,可以确定光纤探针在不同介质中的反射率。为了评估不同锥角的光纤探针对外光的反射能力,特别是在气相环境中的表现,本文使用 Zemax 软件对不同锥角的光纤探针进行了光线追迹仿真,建立的仿真模型示意图如图 1 所示。本文采用单模光纤进行测量,并设置锥型探头的半径为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$,通过调整敏感头的高度 L ,可以获得不同的锥角 β ,从而研究锥角对反射特性的影响。

在仿真过程中,本文设定光源功率为 3 mW ,通过执行 10^6 次光线追迹,计算了探测器接收的光功率与光源入射光功率的比值,以此确定不同锥角的光纤探针在空气中的反射率。仿真结果如图 2 所示。可以看出,当锥角为 35° 时,光纤探针的反射率达到最大值。这表明在此锥角下探针对气相的识别灵敏度也最高。此外,锥角为 35° 的探针具有更好的穿透小气泡的能力。因此,基于这些仿真结果,本文选择 35° 角作为探针设计的最优锥角。

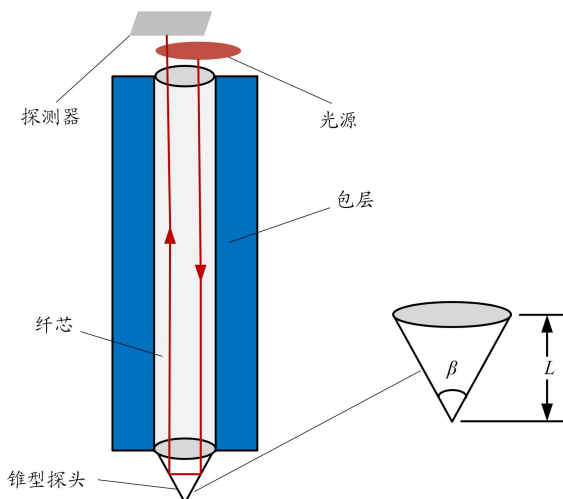


图 1 光纤探针仿真模型示意图

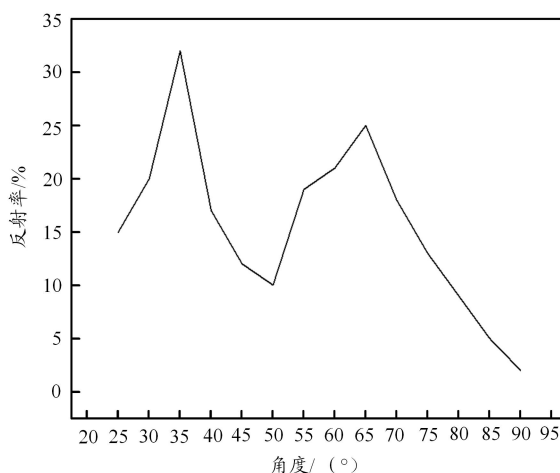


图 2 反射率与光纤探针锥角的关系图

1.2 克里金插值算法

克里金插值算法是一种基于变异函数的局部估计方法,它不仅考虑了估计点与观测点之间的空间位置关系,还考虑了它们之间的空间相关性,从而有效地缓解了数据稀疏性对插值结果的影响,提高了插值精度^[7-8]。基于克里金插值算法的持气率插值成像的具体实现流程如下:

1) 数据收集及预处理。使用光纤探针测量得到的持气率数据构建一个包含管道截面各测量点坐标及其对应持气率的原始数据集,并剔除异常和缺失的数据点。

2) 拟合实验变异函数。对于每一对测量点,首先计算它们之间的距离(滞后距),然后计算这对点之间持气率的半方差,然后将所有测量点对的半方差按照滞后距分组。对于每个滞后距区间,计算该区间内所有点对半方差的平均值,形成实验变异函数的值。根据计算出的实验变异函数值选择合适的模型(如球状

邢文举,陈强,刘国权,等:基于单模光纤探针的气液两相流持气率成像方法

模型^[9]进行拟合,再利用间接平差法求解,可以得到块金效应值 C_0 、偏基台值 C 和变程 α ,以此建立实验变异函数模型。

3)求解权重系数。用已建立的实验变异函数,计算待估算点与已知点间的变异函数值。在以待估算点为中心的搜索范围内,计算该点与所有已知点之间的变异函数值,并结合步骤2)中获得的所有已知点之间的半方差值,代入克里金方程组^[9],建立 $m+1$ 个方程(m 为搜索范围内所有已知点的数量),并求解 m 个权重系数。

4)求解估算值。将求得的 m 个权重系数代入持气率估计公式^[7-8]进行插值计算,得出该点的持气率估算值。

5)可视化结果。使用图像处理软件将这些数据点映射到插值区域的网格中,生成管柱截面的二维持气率图像。在图像中,不同颜色(或灰度级别)代表管柱截面上不同插值点的持气率大小,直观地展示了持气率的空间分布情况。

2 持气率测量实验

2.1 实验装置

实验在内径为 20 mm 的垂直管柱中进行。光纤探针持气率测量系统如图 3 所示,包括光源、光纤探头、1×2 分光比的光纤耦合器、光电探测器以及数据采集卡。激光器(光源)发出波长为 650 nm 的激光,并通过光纤耦合器与光纤探针相连。光电探测器的波长响应范围为 350~1 100 nm,能够将接收到的光信号转换为电信号。这些电信号随后由 NI 公司生产的 USB-6211 型数据采集卡收集,并传输到 LabVIEW 上位机进行处理。

2.2 实验过程

实验中设定了 4 个不同的气流量水平:0.2、0.3、0.4、0.5 L/min。当气体被注入系统时,气泡随之上升,并在流动达到稳定状态后均匀地分散于液体中,呈现出圆形或椭圆形状。根据气泡的这些流动特性,可以判断实验中的气液两相流为泡状流型。

测量点平面位置的示意图如图 4 所示。启动测量系统后,对图中标示的 9 个关键测量点进行持气率测量。数据采集卡的采样频率设定为 5 kHz,每次采样的持续时间为 20 s。为了确保数据的可靠性,每个测量点均进行了多次测量,并对最终结果取平均值。这些测量点分布在 3 个环形区域内:内环有 1 个单一测量点,中间环和外环则各有 4 个测量点。详细的测量点平面位置坐标如表 1 所示。

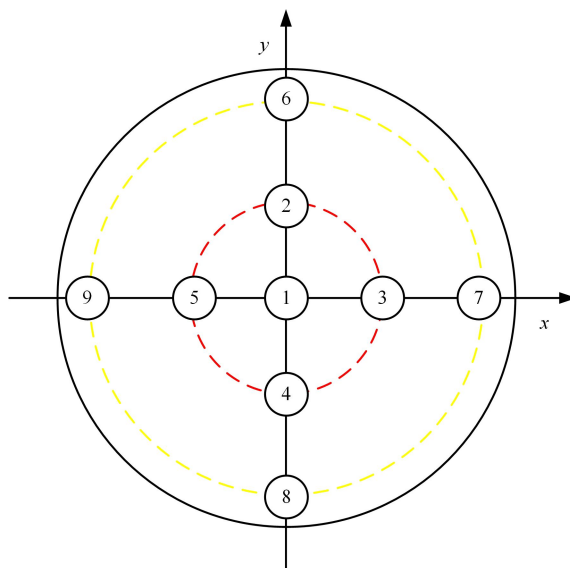


图 4 测量点平面位置示意图

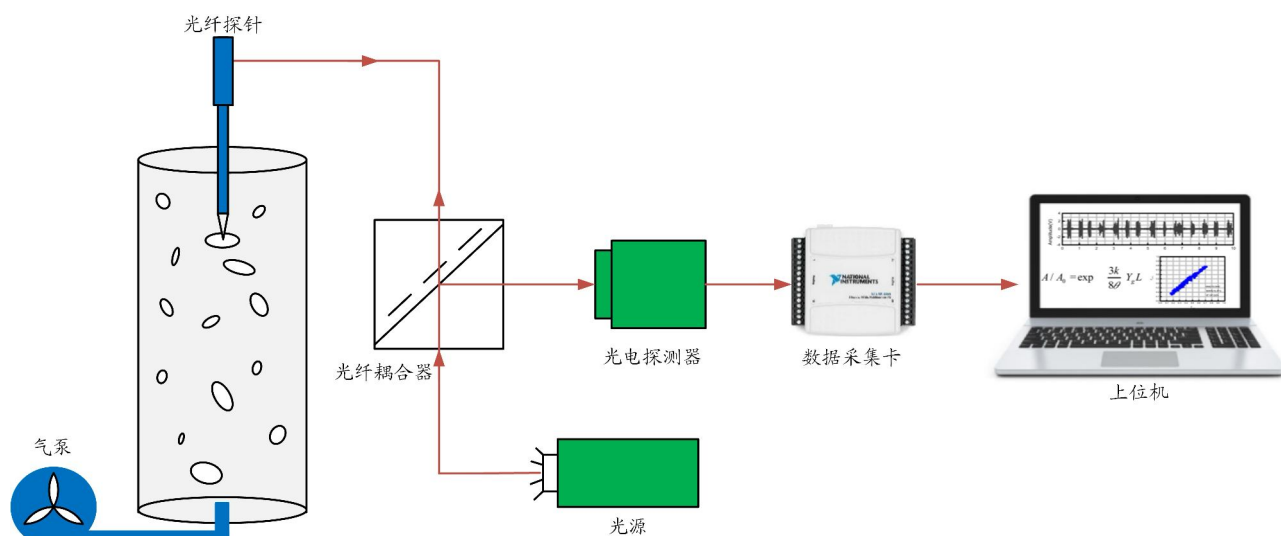


图 3 光纤探针测量系统

表1 测量点平面位置坐标

测量点	X/cm	Y/cm
1	0	0
2	0	0.445
3	0.445	0
4	0	-0.445
5	-0.445	0
6	0	0.89
7	0.89	0
8	0	-0.89
9	-0.89	0

采集完成后,本文采用单一阈值电压方法对采集到的电压信号序列进行处理。阈值电压 V_B 的设定为高压信号 V_H 与低压信号 V_L 差的 30%,即 $V_B=0.3\times(V_H-V_L)$ 。通过应用这一阈值处理,可以将原始电压信号转换成仅包含 0 和 1 的二进制方波信号。当电压信号高于阈值 V_B 时,输出为 1;当电压信号低于或等于阈值 V_B 时,输出为 0。探针所处位置的瞬时持气率 $\alpha(x,t)$ 表达式为

$$\alpha(x,t)=\begin{cases} 1, & V > V_B \\ 0, & V \leq V_B \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_i 表示采集到的电压信号。当 $\alpha(x,t)$ 为 1 时,代表气相;为 0 时,代表液相。如果在给定的时间间隔 $(t, t+T)$ 中,有 n 个气泡经过探针尖端,第 i 个气泡经历时间为 Δt_i ,则探针尖端所在位置处的局部持气率 $\alpha(x)$ 可以表示

$$\alpha(x)=\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \alpha(x,t) dt = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{T} \quad (2)$$

若采样间隔为 ΔT ,共采样 $N=T/\Delta T$ 次,其中高电平共有 N_G 个,则式(2)可简化为

$$\alpha(x)=\frac{N_G}{N} \quad (3)$$

上位机程序通过统计总采样点数和其中高电平点数(1 的数量),并将其代入式(3),即可计算出各点的持气率。

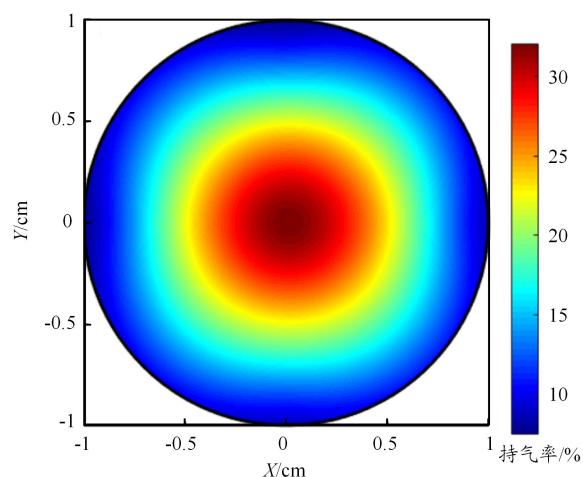
2.3 实验结果分析

本文考虑到克里金插值过程中涉及大量的矩阵和向量运算、模型公式计算、逆矩阵求解以及插值结果的可视化需求,选择了 Matlab 软件中的 DACE 工具箱来完成相关工作。DACE 工具箱集成了克里金模型的预测功能及相关辅助函数,能够高效地处理上述复杂的

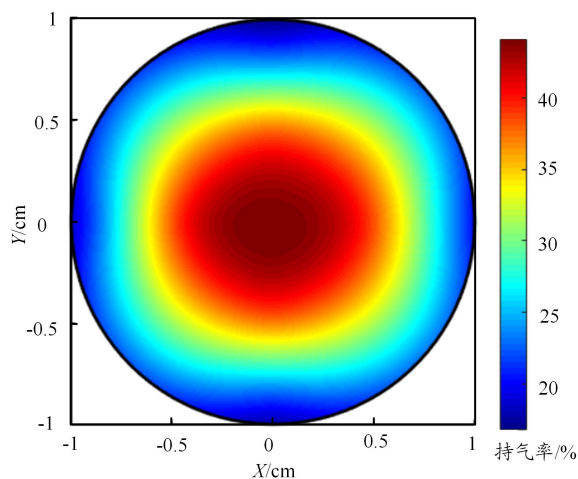
数学运算。此外,本文利用 Matlab 将克里金插值的结果以图形形式展现出来,如图 5 所示。

图 5 中每个像素点代表相应位置的持气率,即该处气相体积分数。持气率较高的区域通常意味着气泡聚集或存在较大的气泡,而持气率较低的地方则表示气泡较为分散或体积较小。

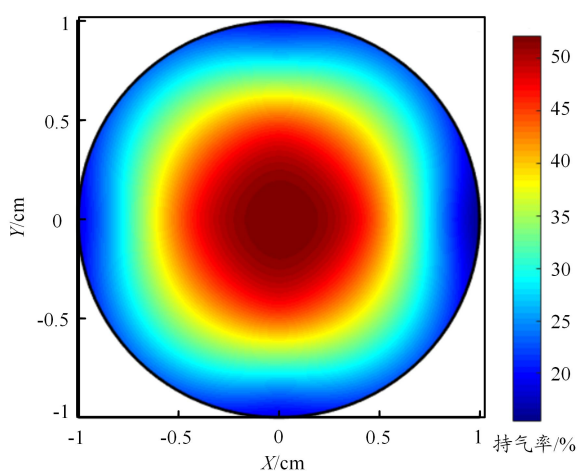
从图 5 可以看出,随着气流量的增加,持气率也随之提升,尤其是在管柱中心这一现象更为明显,而靠近管壁处的持气率则逐渐降低。这种变化反映了气泡向管柱中心集中的趋势。原因在于流体与管壁之间的摩擦使得近壁区的流速减慢,增加了气泡上升的阻力。因此,气泡更倾向于聚集在流速较高、阻力较小的管柱中心,导致该区域的气泡浓度和持气率达到最大值。相比之下,管壁附近的气泡较少,持气率相对较低,形成了中心密集、边缘稀疏的气泡分布模式。持气率图像沿管柱径向展示出的对称性表明,在管柱截面上,气泡分布



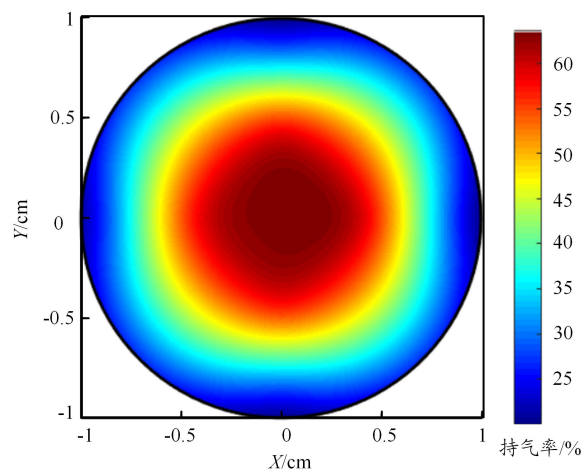
(a) 气流量为 0.2/Lmin



(b) 气流量为 0.3/Lmin



(c) 气流量为 0.4/Lmin



(d) 气流量为 0.5/Lmin

图5 气相流量变化时的管道截面持气率成像结果

较为均匀,没有形成大的气泡或气泡团。此外,持气率的稳定也进一步证明了流动过程的稳定性,这些特征都是泡状流的典型表现。

通过观察实验中的气液流动,本文确认了泡状流型的存在,从而验证了基于持气率图像分析得出的结论。不同的多相流型表现出不同的气相分布特点,持气率成像技术能够帮助识别和区分如泡状流、段塞流和过渡流等不同类型的流型,这对于优化多相流测量技术和制定流程控制策略具有重要意义。

3 结束语

本文介绍了一种新颖的持气率成像技术,该技术结合了单模光纤探针测量与克里金插值算法。为了验

证这种方法的可行性,本文设计并制造了一款锥角为 35° 的单模光纤探针,并在竖直管道中使用该探针对4种不同气体流量条件下的持气率进行了成像实验。在实验中,本文成功获取了气液两相流动的清晰图像,并观察到了典型的泡状流型。成像结果显示,持气率在管道中心达到最高,随后向管壁方向逐渐递减,形成了一种中间高、边缘低的空间分布特征。这一结果有力地验证了本文所提出的成像方法的有效性和准确性。

此方法不仅解决了传统阵列式光纤探针在持气率测量方面的限制,而且得益于光纤传感器的优异稳定性和耐久性,非常适合应用于油气井等复杂环境。通过提供直观的气相分布图像,该成像技术能够辅助调整生产策略、优化注水方案,并有效支持增产措施的实施。此外,实时监测和可视化持气率变化对于早期识别安全风险至关重要,例如,气泡聚集可能导致压力不稳定或设备故障。因此,这项技术对预防潜在问题具有重要的指导意义和实用价值。

参考文献:

- [1] 王蒙,赵庆超,张绪成,等. 用于油井相含率测量的光纤探针传感器研究[J]. 半导体光电,2023,44(3):467-470.
- [2] CUI S F, LIU J F, LI K, et al. Data analysis of two-phase flow simulation experiment of array optical fiber and array resistance probe[J]. Coatings, 2021, 11(11): 1420-1420.
- [3] WANG D Y, JIN N D, HAN Y F, et al. Measurement of gas phase characteristics in vertical oil-gas-water slug and churn flows[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 177: 53-73.
- [4] YANG Q Y, JIN N D, WANG F, et al. Measurement of gas phase distribution using multifiber optical probes in a two-phase flow[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(12): 6642-6651.
- [5] ATHAR M H, NAQVI S M A, ALI H O, et al. Investigation on local gas content for upward air-water two-phase flow and comparison with classical void fraction calculation models[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(12): 16001-16013.
- [6] TIEN T M, HUANG C J, LEE C H, et al. Fiber-optic probe array for measuring spatial distributions of air volume fractions in bubbly flows[J]. Sensors, 2023, 23(3): 1222-1222.
- [7] 周莹莹,张辉国,胡锡健. 基于支持向量机改进的克里金插值算法——以汾渭平原PM2.5数据为例[J]. 科学技术与工程,2023,23(24): 10575-10584.
- [8] 叶爽怡,扈晓翔,司小胜,等. 采用滑动窗口与克里金插值算法的复杂系统可靠性评估方法[J]. 西安交通大学学报,2023,57(4):171-179.
- [9] 张小艳,王萌娟. 基于克里金算法的井田煤层三维建模方法研究[J]. 计算机技术与发展,2022,32(4):164-169.