

T/SSM

团 体 标 准

T/SSM XX-202X

基于图像处理技术的管内气液两相流含气 率测量方法

A gas content measurement method for gas-liquid two-phase flow in a pipe based
on image processing technology

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

山东计量测试学会 发布

目次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 测量原理 4

5 测量系统组成 4

6 技术要求 6

7 检测方法 6

8 测量结果分析 8

9 实施要求与适用范围 9

附录 A：图像处理算法伪代码 10

参考文献 11

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由山东计量测试学会提出并归口。

本文件起草单位：淄博市检验检测计量研究总院、江苏大学能源与动力工程学院、淄博海关、淄博齐翔腾达化工股份有限公司、山东新华制药股份有限公司、南京明德软件有限公司。

本文件主要起草人：。

基于图像处理技术的管内气液两相流含气率测量方法

1 范围

本文件规定了管内气液两相流动状态下的含气率测量方法。

本文件规定的测量方法适用于透明液体介质。

本文件适用于水平管内注入气体含气率测量，垂直管道和其他类似工况可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 30821-2014 无损检测 数字图像处理与通信

JF 1001-2011 通用计量术语及定义

ISO/TS 21354:2020 Measurement of multiphase fluid flow

ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems

SF/T 0152-2023 图像处理技术规范

CSN 75 0102-2001 流体力学术语

3 术语和定义

3.1

含气率 gas holdup

单位体积内气相所占体积与总流体体积之比，用于描述两相流中气相体积分布情况。

[来源：ISO/TS 21354:2020 - Measurement of multiphase fluid flow]

3.2

灰度图像 grayscale image

每个像素点具有 256 级（8-bit）灰度等级，用于表示亮度分布的图像。

[来源：ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems]

3.3

二值图像 binary image

由两个像素值（通常为 0 和 255）构成的图像，用于明确区分不同区域（如气相和液相）。

[来源：ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems]

3.4

图像分割 image segmentation

将图像划分为具有不同特征区域的过程，以便提取有意义的信息，如识别气泡区域。

[来源：ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems]

3.5

中值滤波 median filtering

图像去噪方法，用于保留边缘特征的同时降低椒盐噪声。

[来源：ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems]

3.6

背光照明 backlighting

将光源置于拍摄对象的背后，使得气液两相边界具有高对比度的成像技术。

[来源：ISO 19264-1:2021 Photography — Archiving systems]

4 测量原理

利用图像采集设备获取透明观察段气液两相流截面图像，结合图像预处理、阈值分割和像素统计技术识别气相区域，将气相和液相区域分离，计算气相区域在图像中所占的面积比例，得到当前观察段截面的气液两相流含气率。

5 测量系统组成

测量系统由液相流量控制装置、气相流量控制装置、观察段、光源系统、图像采集系统、图像处理系统组成。

5.1 液相流量控制装置

用于调节和控制测量过程中液体流量的设备，建议配备稳压罐以稳定流量。

5.2 气相流量控制装置

用于调节和控制实验过程中气体流量的设备，建议配备稳压罐以稳定流量。

5.3 观察段

制作透明材料观察窗（如石英玻璃、亚克力），材质要求透光率好（ $>85\%$ ）、耐压性符合管路安全设计要求，无划痕、无污渍，并保证气液流体行为不受管段几何形状干扰。观察段需位于流场稳定区域，远离液体流量控制装置的进出口，避开弯头、阀门等扰动区域，距离管道入口 ≥ 10 倍管径的平直段。

5.4 光源系统

采用均匀稳定的背光源或环形前照光源，光源亮度应可调节，色温应稳定，照明应避免阴影和强反光。

5.5 图像采集系统

为了保证图像质量及后续图像处理的可靠性，图像采集系统和图像采集应满足以下要求：

5.5.1 成像设备

图像采集需配备高速成像设备。高速相机建议搭配工业镜头，应具备自动对焦与曝光控制能力，帧率应不低于 500 fps，分辨率应不低于 1280×1024。

5.5.2 成像角度

垂直于观察段管道轴线的拍摄，确保图像无畸变，避免角度偏差带来的误识别。

5.5.3 成像区域

成像区域应覆盖管道横截面区域的主要部分，图像中实际截面高度占视野高度的比例不低于 70%。

5.5.4 分辨率要求

采集图像的空间分辨率应不低于 10 pixel/mm，以确保气泡细节能够被准确识别。建议图像分辨率不少于 1280×1024 像素。

5.5.5 帧率要求

帧率应依据流动速度和流型特征合理选择。对于快流动或高速气泡团，应不低于 500 fps；缓慢流动情况，可适当降低帧率，不应低于 100 fps。

5.5.6 曝光设置

曝光时间应足够短，以避免运动模糊。通常建议曝光时间小于帧间隔的 1/3；对于高速气泡运动情况，建议使用 1/5000 秒及以下曝光。

5.5.7 图像格式及采集数量

图像应保存为无损格式（如 PNG 或 BMP）。每组实验工况下采集图像数量不少于 500 帧。

5.6 图像处理系统

包括采集卡、存储设备及处理计算平台，推荐使用配备 MATLAB 或 Python 的工作站，支持批量图像处理和可视化。

5.6.1 图像预处理

图像预处理旨在提高图像质量，增强气液边界特征，为图像分割与特征提取提供稳定基础。处理步骤包括灰度化处理、去噪处理、图像增强、图像裁剪、处理结果验证。

5.6.1.1 灰度化处理

彩色图像需先转换为灰度图像，常用加权平均法。转换公式如下：

$$I(x,y) = 0.299R(x,y) + 0.587G(x,y) + 0.114B(x,y)$$

式中：(x,y) 为像素点坐标。

5.6.1.2 去噪处理

常用中值滤波（窗口尺寸可调，如 3×3 或 5×5）去除孤立噪点，或采用高斯滤波进行平滑处理，保留边缘特征的同时抑制高频噪声。

5.6.1.3 图像增强

可采用对比度拉伸、直方图均衡化等方法提升图像的亮暗层次差异，强化气液边界。

5.6.1.4 边缘保持滤波（可选）

可选用双边滤波（bilateral filter）或引导滤波（guided filter）进行细节保留的平滑处理，适用于低对比图像增强。

5.6.1.5 图像裁剪

去除图像中无关边缘区域，仅保留包含气液界面的有效区域，以提高计算效率并避免干扰。

5.6.1.6 处理结果验证

应对处理后的图像进行人工校验，确认边界清晰、气液区域可分、无显著伪影。

5.6.2 图像分割

图像分割是将气相和液相区域从图像中有效分离，本文件采用基于灰度阈值的分割方法，并辅以形态学处理提高分割准确性。

5.6.2.1 灰度阈值分割法

根据气液两相的灰度差异，采用固定或自适应阈值进行图像二值化处理：

固定阈值法：通过实验校准确定最佳阈值 T ，对每个像素 $I(x, y)$ 判断：

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & I(x, y) > T \quad (\text{气相}) \\ 0, & I(x, y) \leq T \quad (\text{液相}) \end{cases}$$

局部自适应阈值：针对亮度不均或有阴影区域的图像，根据局部区域计算阈值 T ，常用于大截面图像。

5.6.2.2 形态学处理

为修复分割后存在的小孔、断裂或伪边界，本文件采用如下形态学操作：

腐蚀与膨胀：先腐蚀去除噪点，再膨胀恢复气泡形状。结构元素尺寸依实际图像尺寸选择。

开运算：腐蚀后再膨胀，可去除孤立小气泡。

闭运算：膨胀后再腐蚀，用于填补边缘缺失的小空洞。

连通域分析：识别所有封闭气相区域，剔除小于面积阈值（如 10 px）的孤立伪气泡。

5.6.2.3 气相区域提取

处理完成后，图像中值为 1 的区域为气相，值为 0 的区域为液相。建议对结果图像进行颜色可视化显示以便检查。

5.7 同步触发系统（可选）

对于需要与流量调节或外部传感器联动的系统，建议配置同步触发模块，实现图像采集的时序控制。

6 技术要求

6.1 光照条件技术要求

光源类型优先选择连续发光的冷光源（如氙灯、LED），避免热光源（如白炽灯）产生的气流扰动影响流场。建议采用均匀背光照明，并通过漫射板调节光照分布，以获得清晰的边缘轮廓。光照强度应避免过曝或欠曝，图像直方图应接近双峰分布。

6.2 图像采集技术要求

被测流场需流动状态可控、稳定，可通过外部参数控制、调节流场的特征参数，保证图像采集设备可清晰拍摄流场形态，保证输出图像质量。

可通过液相、气相流量控制设备控制流场状态，同时可配备稳压罐辅助提升流场稳定性；配备管路压力监测设备（压力变送器、压力表），实时监测管路压力，确保管路压力小于观察段管路最大承压；配备环境参数记录设备（温湿度计），记录图像采集时的温湿度条件；配备高速相机固定支架，稳定相机位置与姿态，保障流场成像的清晰度。

7 检测方法

7.1 图像采集

用固定支架将高速相机布置于被测透明管段前方，在被测管段后方布置散光板及背光源，通过液、气流量控制设备调整气液相流场状态，在稳定流场的同工况下，启动高速相机捕捉流型细节和气泡运动图像。拍摄图像数量根据流型、气泡尺寸分布、相机帧率和测量精度要求等因素调整。图像采集示意图如图1所示。

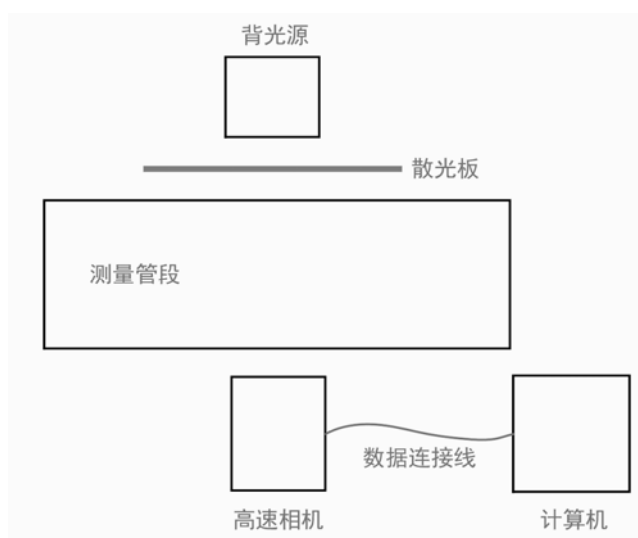


图 1：图像采集示意图

7.2 图像选取与标注

选取同工况下连续或均匀间隔的图像，并对图像进行标注。图像标注应包含以下信息：工况编号、流速、图像帧编号、采集时间、含气区域伪彩色标识（如红色或蓝色）等。

7.3 单帧图像含气率计算

根据5.6，对图像进行处理，获取图像有效区域内总像素数量、气相区域像素数量。按式（1）计算单帧图像含气率 ϵ 。

$$\epsilon = \frac{N_g}{N_t} \quad (1)$$

式中： ϵ —单帧图像含气率；

N_g —气相区域像素数量；

N_t —有效区域内总像素数量。

7.4 多帧图像平均含气率

按式（2）计算多帧图像平均含气率 $\bar{\epsilon}$ 。

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (2)$$

式中： $\bar{\epsilon}$ —多帧图像平均含气率；

ϵ_i — 第 i 张图像含气率；

n — 图像数量。

本文件以多帧图像平均含气率作为测量结果。

8 测量结果分析

8.1 误差来源

主要误差来源包括：图像采集误差、图像处理误差、区域选取误差、统计误差。

图像采集误差：如曝光不足、运动模糊、成像畸变；

图像处理误差：如阈值分割不准确、伪气泡识别、边缘检测不清；

区域选取误差：如分析区域（ROI）未覆盖实际气泡区域或包含背景干扰；

统计误差：样本数量不足导致的结果波动较大。

8.2 异常值剔除

测量过程中若发现部分帧出现突变或无物理意义的含气率（如过高/为零），应采用 3σ 原则或箱线图法（Boxplot）判定并剔除异常帧。

8.3 重复性检验

在相同工况下重复采集不少于 3 组图像序列，每组不低于 500 帧图像，分别计算平均含气率，若其相对误差小于 5%，视为具有良好重复性。

8.4 不确定度评估

含气率测量的不确定度可通过误差传播法或 Bootstrap 方法进行评估。若设定单帧误差为 σ ，包含 n 帧图像，平均含气率 σ_{avg} 的估计标准差为：

$$\sigma_{\bar{\varepsilon}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

8.5 含气率时间序列图

为了直观反映气液两相流中的含气率变化特征，应采用图表结合的方式对测量结果进行展示与分析。

对连续图像帧计算出的含气率，按照时间顺序绘制为时间序列图。横坐标为时间（或帧号），纵坐标为对应帧的截面含气率，可用于观察含气率的周期性变化、波动幅度和稳定性。图示时标注平均值、最大值、最小值。推荐加上滑动平均曲线以平滑数据趋势。如图 2 所示。

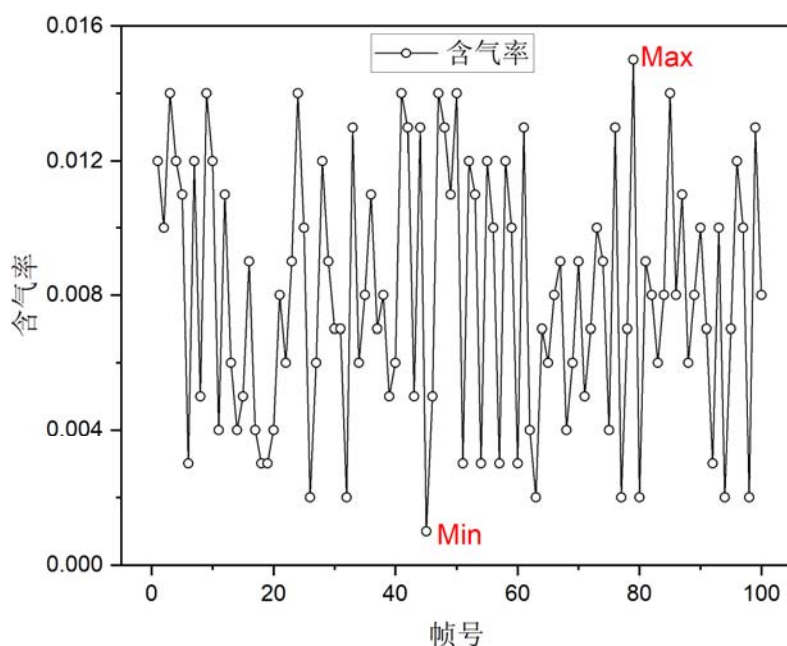


图2 含气率时间序列样图

9 实施要求与适用范围

9.1 实施要求

本标准适用于采用图像处理手段测量管内气液两相流动过程中截面含气率的实验与工程应用。使用单位应具备以下基本条件：

- 配备满足分辨率和帧率要求的高速成像设备；
- 拥有稳定的背光或侧光光源系统，确保图像对比度；
- 配备图像处理计算平台，并具备相应图像处理软件或自主开发程序；
- 能实现对实验工况参数（如流速、气液比、温度）准确控制和记录。

9.2 适用范围

本标准适用于以下类型的气液两相流动测量：

- 水平或近水平管内气液两相流（包括气泡流、塞状流、环状流等）；
- 管径在 10 mm 至 200 mm 之间的透明或半透明材料制成的实验管道；
- 可清晰识别气泡轮廓的液体介质（如水、油等）；
- 气相为空气或其他透明气体（如氮气、氦气）；

9.3 限制说明

在以下条件下应谨慎使用或进行补充校准：

- 图像质量不满足分割条件（如严重光斑、反光、边界模糊）；
- 流动剧烈扰动导致气泡变形严重，或三维气泡叠加过多；
- 管道为不透明材料，无法进行可视化采集；
- 光照条件显著变化导致阈值分割失败。

附录 A：图像处理算法伪代码

(资料性)

以下为推荐的图像处理算法伪代码，用于分割气相区域并计算含气率：

输入：图像序列 ImageSeq[N]，每帧尺寸为 $H \times W$

输出：每帧含气率 Eps[N]

for i = 1 to N do

Img $\leftarrow$ ImageSeq[i]

// Step 1: 图像预处理（去噪、增强对比）

Img_filtered $\leftarrow$ 中值滤波(Img, 窗口=3×3)

// Step 2: 二值化处理

Threshold $\leftarrow$ Otsu(Img_filtered)

Binary $\leftarrow$ Img_filtered > Threshold

// Step 3: 形态学操作

Binary_morph $\leftarrow$ 闭运算(Binary, 结构元素=3×3 圆形)

Binary_morph $\leftarrow$ 开运算(Binary_morph, 结构元素=3×3 圆形)

// Step 4: 连通域处理（去除伪气泡）

Labellmg $\leftarrow$ 连通域标记(Binary_morph)

Binary_clean $\leftarrow$ 保留面积 > 10 px 的气相区域

// Step 5: 含气率计算

Ng $\leftarrow$ 统计 Binary_clean 中像素值为 1 的个数

Nt $\leftarrow$ 有效分析区域像素总数

Eps[i] $\leftarrow$ Ng / Nt

end for

参考文献

- [1] ISO 9300:2022 利用临界流量喷嘴测量气体流量. ISO 国际标准化组织, 2022.
 - [2] ISO/IEC JTC 1/SC 24. 计算机制图、图像处理和环境数据表示. ISO 国际标准化组织, 2023.
 - [3] ISO 17089-1:2019 密封管道中流体流量的测量-气体超声波仪表, ISO 国际标准化组织, 2019.
-