

# 储油罐多层内储物的红外检测实验研究

肖山, 陈红伟\*, 李成功, 钱郁文, 太东晨

辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001

DOI: 10.61369/SSSD.2025110032

**摘 要 :** 通过红外成像检测技术, 针对原油或化工储罐模型内部多层内储物开展相关实验研究。利用红外光学原理设计并部署合适的传感器系统, 实现对储罐内各层液体的非接触式检测。通过对采集的数据进行精准的图像参数分析, 以确定不同层次的内储物性质和体积。结果表明: 实验系统能够实现非接触式的内储物红外检测; 所开发的图像识别算法具有较好的计算精度, 能够实现内储物的定量识别。该研究对内储物检测技术、红外成像技术等领域具有重要的推动作用, 能够提高储罐检测的效率和安全性。

**关 键 词 :** 储罐; 内储物; 红外成像; 检测; 图像识别

## Experimental Study on Infrared Detection of Multi-Layer Storage in Oil Storage Tanks

Xiao Shan, Chen Hongwei\*, Li Chenggong, Qian Yuwen, Tai Dongchen

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001

**Abstract :** Through infrared imaging detection technology, experimental research was conducted on multi-layer internal storage materials within crude oil or chemical storage tank models. By utilizing the principles of infrared optics, a suitable sensor system was designed and deployed to achieve non-contact detection of liquid layers inside the tanks. Precise image parameter analysis of the collected data was performed to determine the properties and volume of internal storage materials at different layers. The results indicate that the experimental system can achieve non-contact infrared detection of internal storage materials, and the developed image recognition algorithm exhibits high computational accuracy, enabling quantitative identification of internal storage materials. This research makes significant contributions to the fields of internal storage material detection technology and infrared imaging technology, enhancing the efficiency and safety of tank inspection.

**Keywords :** storage tank; internal storage; infrared imaging; detection; image recognition

## 引言

定期对原油或化工储罐进行检测十分必要, 可以防止油泥堆积、腐蚀穿孔等问题<sup>[1-3]</sup>。国内外现有的储罐内储物检测技术主要包括密度计法、超宽带雷达法、多波束声呐检测法、红外成像法等<sup>[4-6]</sup>。其中, 红外成像技术以其非接触、高效率、安全可靠而逐渐获得重视<sup>[7-9]</sup>。本文针对储罐内储物的红外成像检测技术, 利用自建储罐模型, 开展相关实验测量与图像识别研究。

## 一、实验系统

### (一) 实验设计

图1为储罐内储物红外测量实验系统, 主要由以下部分组成: 1) 储罐模型; 2) 多层内储物(油泥、油、水、空气); 3) 热像仪; 4) 水平支架, 实验中的储罐模型为特殊定制, 储罐直径30cm、内径29cm、罐壁厚5mm, 储罐罐高26.5cm, 容积

17495cm<sup>3</sup>, 主体材料为亚克力, 由底座、储罐整体、外壁管道、加热盘、罐顶构成。

在实验过程中, 设置不同起伏高度、不同沉积厚度的油泥分布, 覆盖实际储罐常见场景, 利用红外热像仪采集不同状态下的油泥沉积模型的红外图像。固定红外摄像机位置、角度及曝光参数, 确保图像采集条件一致。实验在恒温且不透光的实验室(温度波动 $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )进行, 排除环境温度变化对红外成像的干扰。

基金项目: 辽宁石油化工大学创新创业训练计划(S202110148015)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212510148019)。

罐体与环境的温差为20~40℃，以确保获得清晰的液位边界。

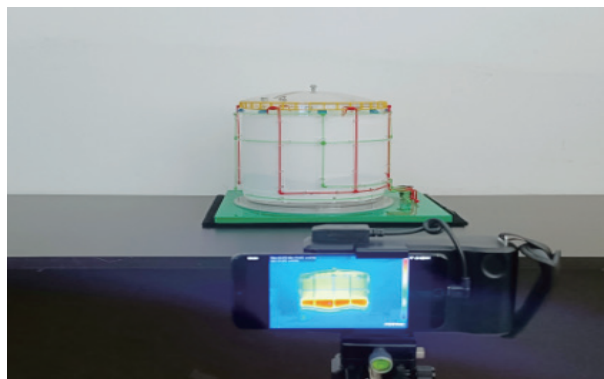


图1 储罐内储物红外测量实验系统

## (二) 图像处理方法

储罐红外图像的处理主要有图像灰度化、降噪、对比度增强、滤波、边缘检测等步骤<sup>[10]</sup>。

首先通过对储罐红外图像中R、G、B三个通道的亮度值进行平均计算，并将结果作为灰度图像的灰度值来对储罐红外图像进行处理。利用平均值法进行图像灰度化的控制方程如式(1)所示<sup>[11]</sup>。

$$Gray(i, j) = \frac{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}{3} \quad (1)$$

式中， $(i, j)$  为储罐红外图像像素的坐标位置。

高斯滤波作为一种经典的线性平滑滤波手段，在图像处理领域被广泛用于滤除高斯噪声，二维高斯滤波如式<sup>[12]</sup>

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中， $x, y$  为二维图像像素点灰度值， $\sigma$  为高斯分布的标准差。

采用直方图均衡化方法开展红外图像的增强处理，原理如式(3)所示<sup>[13]</sup>。

$$p(r_k) = \frac{n_k}{N}, (k=0, 1, \dots, L-1) \quad (3)$$

式中， $r_k$  为第  $k$  个灰度级； $n_k$  为灰度级为  $k$  的像素数量； $p(r_k)$  为该灰度级的像素概率。

基于线性回归模型开展引导滤波处理，假设滤波输出  $q_i$  与引导图像  $I_i$  满足局部线性关系<sup>[14]</sup>：

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (4)$$

当引导图像与输入图像相同时（即  $I_i = p_i$ ），输出  $q_i$  退化为局部均值滤波，此时低频区域被平滑，而高频边缘区域则保留原值，从而实现图像的保边平滑。

最后，采用一种基于小波变换和改进数学形态学的边缘检测算法，获取储罐多层内储物的分层边界，从而计算得到各层的体积<sup>[15]</sup>。

## 二、结果分析

实验过程中，通过向储罐模型内注入不同体积的物体来模拟实际储罐情况。实验共研究了三种工况，即储罐中只有水的情况、储罐中有水和规则油泥的情况、储罐中有水和不规则油泥的情况。在实验中，共采集8幅液位图像和42幅油泥液体多层图

像。为了更好的确定油泥基底的位置，故在拍摄时放置标志物来确定基底位置。在对储罐红外图像进行预处理之后，针对储罐附属消防水和消防泡沫管道造成的遮挡问题，采用基于图像修复的去遮挡方法，精准还原被遮挡的储罐红外图像。

利用1.1节建立的实验系统测量得到的储罐红外图像。将1.2节建立的图像处理算法应用于储罐液位与油泥检测。在实验中，油泥体积以约2000cm<sup>3</sup>的恒定量逐渐递增，而水量则以1000mL的间隔逐量递增，实验结果如表1所示。

当水量从2000mL递增至4000mL时，对于每个特定的起伏油泥含量，水和油泥上边界体积的计算误差介于0.97%至2.72%之间，水量变化对上边界体积计算结果的影响相对稳定，上边界整体误差平均值为1.92%。水和油泥下边界体积的计算误差范围则在-2.64%至-1.37%之间，整体仍保持在相对稳定的区间内，下边界整体误差平均值为-1.82%，如果取上下边界的平均值，可以得到一个很小的误差是0.1%。本实验中，整体识别与单独识别的误差之间没有必然的联系。实验结果表明，所提出的图像增强算法与边缘检测算法均具有良好的有效性，且最终计算得到的内储物体积误差不超过0.4%，显著提升了计算精度。

将上述实验方法分别应用于液位检测和油泥（固体）检测。应用于储罐液位检测时，水量由2000mL至9000mL，以1000mL的间隔逐量递增。实验结果表明，随着水量的增加，上边界计算误差百分比呈下降趋势（从3.45%降至1.20%），表明高水量下处理结果更准确，上边界整体误差平均值为2.18%。下边界误差则波动明显，下边界整体误差平均值为-1.90%。上下边界的误差方向呈现稳定偏差，如果取上下边界的平均值，可以得到一个很小的误差0.28%。

应用于油泥（固体）检测时，油泥体积以约2000cm<sup>3</sup>的恒定量逐渐递增，而水量则以1000mL的间隔逐量递增。随着水量从2000 mL增至6000mL，上边界误差始终为正且波动范围较大，如水量5000mL，油泥体积2839cm<sup>3</sup>时误差达4.06%，而水量3000mL、油泥体积6535.8cm<sup>3</sup>时误差低至0.74%，上边界整体误差平均值为2.92%。下边界误差系统性地为负，整体波动幅度显著，如极端值可达-5.14%（水量6000mL，油泥体积2839cm<sup>3</sup>时），下边界整体误差平均值为-2.52%。不同规则油泥体积对误差的影响亦较明显，如果取上下边界的平均值，可以得到一个很小的误差是0.4%。在处理储罐起伏油泥检测中，上边界误差始终为正，波动范围显著，如水量4000mL，油泥体积2245cm<sup>3</sup>时误差为5.50%，而水量3000mL，油泥体积6536 cm<sup>3</sup>时误差为2.15%，上边界整体误差平均值为3.53%。下边界误差系统性地为负，且整体波动范围较广，如极端值可达-4.70%（水量2000mL，油泥2245cm<sup>3</sup>时），下边界整体误差平均值为-3.47%。不同起伏油泥体积对误差的影响亦较明显，如果取上下边界的平均值，可以得到一个很小的误差0.06%。

## 三、结论

建立了一套储罐多层内储物的红外检测实验系统，提出了红

外图像处理方法，获得了多层内储物条件下的实验数据并进行了方法验证，结论如下：

（1）所建立的储罐多层内储物红外测量实验系统具有较好的稳定性与可靠性，能够用于非接触式的红外测量研究。

（2）所提出的图像增强算法与边缘检测算法均具有良好的有

效性，最终得到的内储物体积误差不超过0.4%，显著提升了计算精度。

（3）所使用的非接触式红外检测方法能够较好地适应有遮挡的复杂工况，精确捕捉目标细节。

参考文献

[1] 梁霄. 基于深度学习的储罐红外液位检测技术研究 [D]. 中北大学, 2021.

[2] 张健铭, 石磊, 付存银, 等. 储罐油泥在线检测技术研究现状 [J]. 安全、健康和环境, 2023, 23(02): 8-15.

[3] 邓连军, 王冲, 雷克辉, 等. 红外热成像扫描技术在原油储罐油泥测量中的应用 [J]. 清洗世界, 2020, 36(06): 15-16+52.

[4] 王学平, 牟龙龙. 大型常压储罐漏磁检测及其完整性评价 [J]. 中国化工装备, 2023, 25(4): 33-37.

[5] Shuai Jian, Han Kejiang, Xu Xuerui. Risk-based inspection for large-scale crude oil tanks[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 166-175.

[6] 程伟, 周鹏, 陈炜, 等. 常压储罐的风险评估和检验检测研究进展 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2018, 35(05): 1-4+13.

[7] 韩克江, 帅健, 石磊, 等. 大型原油储罐内检测周期的预测方法 [J]. 油气储运, 2013, 32(02): 189-195.

[8] 张健铭, 石磊, 付存银, 等. 储罐油泥在线检测技术研究现状 [J]. 安全、健康和环境, 2023, 23(02): 8-15.

[9] 梁海明, 胡圣忠, 许锋, 等. 原油储罐运行状态下罐底外壁的腐蚀控制 [J]. 广州化工, 2024, 52(23): 162-164+183.

[10] 郑君. 储罐罐机械清洗技术的探讨与分析 [J]. 石化技术, 2020, 27(11): 62-63.

[11] Waldemar Minkina. How infrared radiation was discovered—Range of this discovery and detailed, unknown information[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9824.

[12] 史凡. 基于红外成像的原油罐底图像边缘检测研究 [D]. 徐州：中国矿业大学, 2021.

[13] 李延威, 李飞, 尚新文, 等. 热辐射对行波管阴极温度的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(10): 28-39.

[14] Jibanananda Meheha. Medical images edge detection based on mathematical morphology[J]. Journal of Computer and Communication Technology, 2013, 4(1): 2.

[15] Waldemar Minkina. How infrared radiation was discovered—Range of this discovery and detailed, unknown information[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9824.