文章编号: 1672-8785(2015)09-0021-04

储罐液位传热反问题的识别 方法及实验分析

石宏臣 孙丰瑞 杨 立 陈 林 (海军工程大学动力工程学院,武汉 430033)

摘 要:基于储罐表面温度反演液位是一种全新的液位识别方法,其识别精度高,应 用范围广。建立了储罐的物理模型,利用有限体积法求得简体的表面温度场,并反演 了简体内的液位和温度。为了验证识别精度,设计了压力容器对比实验。实验表明, 在实际允许的测量误差内 (σ=2 °C),模拟识别误差小于 1%,实验识别的液位误差在 2% 左右,利用反演算法能识别简体内的液体温度,精度也比较高。实验结果验证了该 识别方法的有效性,为红外液位检测和温度识别提供了理论和实验依据。

关键词: 传热反问题; 液位识别; 红外热像仪; 压力容器; 实验

中图分类号: TK124 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.005

Algorithm and Experimental Analysis of Inverse Heat Transfer for Liquid Level Detection of Storage Tank

SHI Hong-chen, SUN Feng-rui, YANG Li, CHEN Lin

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract: The inverse of liquid-level based on the surface temperature of a tank is a new liquid-level recognition method with high identification accuracy and wide application range. A physical model for a storage tank is established. The surface temperature field of the tank is derived by a finite volume method and the liquid-level and temperature inside the tank are inverted. In order to verify the recognition accuracy, an experiment for pressure vessel comparison is designed. The experimental results show that the simulation recognition error is less than 1% in the range of acceptable measurement error ($\sigma=2^{\circ}$ C) and the experimental recognition level error is about 2%. The liquid temperature inside the cylinder can be recognized by the inversion algorithm and the recognition precision is higher. The experimental result shows that this recognition method is effective and can provide the theoretical and experimental basis for infrared liquid-level detection and temperature recognition.

Key words: inverse heat transfer problem; liquid-level detection; infrared thermography; pressure vessel; experiment

0 引言

储罐液位红外成像测量技术是一种新型液

位检测方法,它具有测量精度高、应用范围广 等优点。传统的红外液位检测方法主要是对目 标的红外图像进行一系列数字处理,从而求得

收稿日期: 2015-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (51479203)

作者简介:石宏臣(1978-),男,湖北钟祥人,博士研究生,工程师,主要从事传热、传质、热流体学及应用。 E-mail:shihongchenbobo@163.com 目标的液位,识别精度不是很高^[1,2]。基于储罐表 面温度场反演识别储罐液位的相关文献很少。 文献 [3] 从理论上详细介绍了基于红外成像测温 的储罐液位传热反问题识别方法,结果表明此方 法是有效的,识别精度也很高。该方法提供了一 种新的液位检测思路和途径。本文主要是在前一 阶段工作的基础上对其进行实验验证和分析。 通过实验对比数值计算结果,表明该方法是可 行的。

1 物理模型及计算方法

1.1 储罐物理模型

储罐的三维模型如图 1 所示。为了便于讨 论问题,储罐简化为圆筒结构,其内径、外径和 高度分别为 r_1 、 r_2 和 L_z ,液位在 L_m 处。表面 z=0和 $z=L_z$ 为绝热; $r=r_1$ 面与流体通过对流换 热, $r=r_2$ 面为自然对流换热。上部为气体,下 部为液体, $r=r_2$ 面为检测表面。



图1 储罐模型

1.2 基本假设及控制方程

为简化模型和便于分析,作以下合理假设: (1) 三维稳态导热; (2) 简体均匀,各向同性; (3) 热物性为常数,表面换热系数已知; (4) 简 体上下表面绝热;基于上述假设,建立三维柱坐 标系下的稳态导热方程^[4]:

$$\frac{1}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \times \frac{\partial}{\partial \theta} (k \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

1.3 网格划分和边界条件

采用的结构网格为柱坐标系中的 3D 模型六 面体。在计算过程中,当网格大于 32×7×72 时, 网格的疏密将不会影响计算的结果,所以采用 32×7×72 的网格。边界条件为

$$k\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \qquad (z = 0, z = L_z)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial r} + h_{in}(T - T_{in}) = 0$$

$$(r = r_1, z \ge L_m, h_{in} = h_{gas}, z < L_m, h_{in} = h_{liquid})$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial r} + h_{out}(T - T_{out}) = 0 \quad (r = r_2) \qquad (2)$$

式中, T 为温度, k 为试件的导热率, h_{gas} 为 圆筒内表面和气体的对流换热系数, h_{liquid} 为 圆筒内表面和液体的对流换热系数, h_{out} 为外 表面的自然对流换热系数。

1.4 Levenberg-Marquardt(L-M) 方法

L-M 方法是一种简单高效的优化算法, 在要 计算的未知参数较少时具有简单、收敛快等优 点^[5-8]。具体的理论计算过程可参考文献[3]。 在后面的实验对比中, σ为实际测量的标准偏 差。

2 实例计算及实验对比分析

实验用的压力容器的内直径为 600 mm,高 度为 700 mm,水位为 475 mm,不锈钢壁厚为 3 mm,室温为 27 ℃。容器内注入自来水,内有三 组大功率加热电阻安装在容器下部,通过温控 设备自动控制容器内水的温度。实验用的红外 热像仪为 Fluke 公司产的 Ti30,数据分析软件为 热像仪自带的 InsideIR。

算例中参数取值对照实验所用容器数据: $L_z=0.7$ m, $r_1=0.3$ m, $r_2=0.303$ m, $L_m=0.475$ m, $T_{in}=100$ °C, $T_{out}=27$ °C, $h_{gas}=20$ W·m⁻²·K⁻¹, $h_{liquid}=100$ W·m⁻²·K⁻¹, $h_{out}=10$ W·m⁻²·K⁻¹, k=15.2 W·m⁻²·K⁻¹。

根据上述数据进行正问题计算。简体外表 面的温度场如图 2 所示,图 3、图 4 和图 5 分别 为在水温 80 °C、100 °C 和 130 °C 时红外热像 仪拍摄的容器外表面红外图像。用分析软件从 其中提取数据,进行反问题求解,并把数值模拟 结果与实验结果进行对比分析。



图 2 简体外表面温度分布 (T_{in}=100 °C)



图 3 水温 80°C 时的红外图像



图 4 水温 100°C 时的红外图像



图 5 水温 130°C 时的红外图像

2.1 液位单独识别时模拟和实验的结果与分析 简体内液位为待求参数,简内温度和其他 参数已知,数值计算和实验结果见表1和表2。

表1 测量误差对液位识别结果的影响

 $(T_{in} = 100 \,^{\circ}\text{C})$

$\sigma(^{\circ}C)$	Real value(m)	Identification results(m)	RE(%)
1.0	0.4750	0.4749	0.21
2.0	0.4750	0.4797	0.99
3.0	0.4750	0.4960	4.42
实验	0.4750	0.4820	1.44

表 2 不同温度下模拟和实验对结果的影响 (σ=2.0°C)

T_{in} (°C)		Real value(m)	Identification results(m)	RE(%)
80	模拟	0.4750	0.4737	0.27
	实验	0.4750	0.4700	1.05
100	模拟	0.4750	0.4787	0.99
	实验		0.4820	1.44
130	模拟	0.4750	0.4714	0.76
	实验	0.4750	0.4835	1.79

表1表明,在简内温度相同时,随着误差的 增加,识别结果的精度将下降。实验数据表明, 该算法能精确识别液位,且精度比较高。由表2 可以看出,在简内温度不同时,该算法可精确识 别液位,实验结果误差比模拟结果稍大,但在允 许范围内。表1和表2也说明了在施加不同测量 误差、简体内温度变化较大的情况下,该算法都 可以有效地识别出液位,误差小于1%。实验结 果也证实了该算法的有效性,实验误差在 2% 左 右。

2.2 液位和温度联合识别时模拟和实验的结果 与分析

简体内液位和温度为待求参数,其他参数 已知,数值计算和实验结果见表3和表4。表中 括号内前一个数据为液位值,后一个数据为温度 值。

$\sigma(^{\circ}C)$	Real value(m)	Identification results (m, $^{\circ}C$)	RE(%)
1.0	(0.4750, 100.00)	(0.4736, 99.94)	0.30
2.0	(0.4750, 100.00)	(0.4773, 99.88)	0.48
3.0	(0.4750, 100.00)	(0.4831,100.59)	1.70
实验	(0.4750, 100.00)	(0.4811,99.59)	1.28

表 3 测量误差对液位识别结果的影响

表4 不同温度下模拟和实验对结果的影响 (σ=2.0 °C)

$T_{in}(^{\circ}\mathrm{C})$	Real value(m, $^{\circ}C$)	$Identification\ results(m,^\circ C)$	RE(%)	
80	模拟	(0.4750, 80.00)	(0.4765, 79.38)	0.32
	实验		(0.4802, 80.38)	1.09
100	模拟	(0.4750, 100.00)	(0.4773, 99.88)	0.48
	实验		(0.4811, 99.59)	1.28
130	模拟	(0.4750, 130.00)	(0.4783, 129.87)	0.69
	实验		(0.4845, 130.29)	2.00

表 3 表明,随着测量误差的增加,液位识别 结果的精度逐渐下降,实验识别误差范围介于测 量误差 2 °C 到 3 °C 之间。从表 4 中可以看出, 随着表面温度的升高,液位识别精度受相同大 小误差 (σ=2.0 °C)的影响就会变大,识别精度就 相应降低,但总体误差小于 1%。实验识别相应 误差有所增大,但总体误差在 2% 左右。表 3 和 表 4 也说明,在筒内液位和温度联合识别的情况 下,数值模拟和实验都可以精确识别出液位和 温度。数值模拟时误差较小,实验时误差有所增 大,在 2% 左右。

3 结论

主要通过对一储水压力容器进行加热,利

用红外热像仪测量了容器表面的温度,依据传热 反问题方法反演计算了容器内的液位和温度, 并与模拟数值结果进行了对比和分析。结果表 明,该方法可准确识别液位。

(1) 在实际允许的测量误差内 (σ=2°C),模 拟识别的液位精度很高,其误差小于 1%;通过 对比实验和模拟识别结果,验证了算法的有效 性,实验识别的液位误差在 2% 左右;

(2) 反演算法可识别简体内的液体温度,精 度也比较高,实验结果也证明了这一点。

该方法为储罐红外液位检测和温度识别提 供了理论和实验依据。

(下转第34页)