

文章编号 1004-924X(2017)12-3145-07

气液环状流周向液膜测量传感器的优化设计

薛 婷*, 周 策, 李卓林

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:以气液两相环状流管道横截面的周向液膜为测量对象,采用单台高速摄像机和平面反射镜构建了虚拟双视角的视觉传感器,并对传感器进行了优化。基于虚拟双目立体视觉原理建立虚拟双视角视觉传感器测量模型。为了尽可能增大有效拍摄视角以获得更多液膜流动信息,综合考虑视场区域、传感器尺寸、测量距离以及管道光路折射等因素,对虚拟双视角视觉传感器模型进行了分析和设计,优化了传感器模型的结构参数。理论分析及实验结果表明:优化后的虚拟双视角视觉传感器可以获得近 300° 的有效周向测量视角,远远优于使用单台高速摄像机进行直接拍摄。该项研究为通过双视角视觉传感器进行气液两相环状流周向液膜的实时测量提供了理论基础,对研究液膜厚度和分析环状流流动状态具有重要意义。

关键词:视觉传感器;环状流;周向液膜;有效视角;优化设计

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3145

Optimum design of measuring sensor for circumference liquid film in gas-liquid annular flow

XUE Ting*, ZHOU Ce, LI Zhuo-lin

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xueting@tju.edu.cn

Abstract: By taking the circumference liquid films of cross-sectional pipe in gas-liquid two-phase annular flow for measuring objectives, a novel visual sensor with virtual two-visual angles was designed and optimized by combining a single high-speed camera and planar reflectors. Based on the virtual binocular stereo vision principle, a measurement model for visual sensor with two-visual angles was established. To maximize the effective measurement angle and to obtain much liquid film flow informations, the model of the virtual double-view vision sensor was analyzed and its structure parameters were optimized by considering the field of view, sensor size, measuring distance and the optical path refraction of the pipe. The theory analyzing and experimental results indicate that the optimized sensor can get a view field closed to 300° effective circumference visual angle, which is far better than that using a single high-speed camera to capture directly. It provides a theoretical basis for the real-time measurement of the gas-liquid two-phase annular flow circumference liquid films through the double-view vision sensor, and has great significance to study the film thickness and analyze the flow state of

收稿日期:2017-05-04;修订日期:2017-06-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61671321, No. 61372143);天津市自然科学基金资助项目(No. 17JCYBJC18400)

the annular flow.

Key words: vision sensor; annular flow; circumference liquid films; effective visual angle; optimization

1 引言

气液两相流广泛存在于石油、热动、航天及化工等工业过程中^[1]。环状流是一种常见的气液两相流流型,在典型的环状流中管道中心为气相夹带液滴的两相混合流动,单相液膜沿着管壁流动。环状流液膜的流动状态对研究气液两相流流动特性具有重要的意义。

随着测量技术的不断发展,诸如超声波、电导、光学测量和射线等技术逐渐被应用在环状流流动参数的检测上。赵德喜^[2]等基于超声波在两相流界面处的反射回波的不同,提出了对水平管内气液两相流流型的在线测量方法;Mascarenhas N^[3]等用电导探针对垂直管道外自由降膜进行了研究,对液膜厚度与界面温度同时进行检测与记录,分析了在加热条件下湍流液膜的界面温度与液膜厚度演化特性。电导法作为目前常见的侵入式环状流测量方法,其电导探针会影响液膜流动,且在测量区域具有平均效应;Pham SH^[4]等利用高速摄影结合背景灯照明对环状流进行了研究。研究数据具有较高的时间和空间分辨率,能够获得管道入口和充分下降区域的气液分界面流动细节信息;Saito P^[5]等利用碘-125 γ 射线放射源的衰减原理准确测量了内径 21 mm 的管道中包括环状流在内的各气液两相流流型的含气率,这是一种对流场的无扰测量方法。但稳定的射线源价格较贵,经济性差,同时需要严格控制放射物的污染。

近些年,随着光电测量技术的发展,激光诱导荧光技术(Laser Induced Fluorescence, LIF)因其具有非接触、高精度、无扰和瞬态等优势而逐渐成为国内外研究和应用开发的前沿与热点,并被广泛应用于环状流液膜流动特性的研究中^[6-8]。LIF 技术通过激光光源照射,诱导溶解在液相中的荧光物质分子进入激发态,发出频率波长单一的荧光,实现对被测对象的标记和检测。目前,利用 LIF 技术对液膜流动参数的测量,主要基于单台高速摄像机对沿流动方向的单侧轴向液膜进行

拍摄测量。而在轴向不对称的情况下对管道横截面的周向液膜的观测具有十分重要的研究价值。

若采用单台高速摄像机直接拍摄管道周向截面液膜,测量视角大大受限。基于双目体视原理的测量方法可以增加周向液膜的有效测量视角,对研究周向液膜沿管壁内侧的分布及流动状态具有重要意义。现有的双目立体视觉传感器一般采用两台高速摄像机进行测量^[9-12],但针对气液两相流这种快速变化的动态测量对象,两台摄像机之间的非严格同步会造成测量误差,且传感器成本高、标定复杂。

本文基于双目体视原理,采用单台高速摄像机和反射镜组设计了双视角视觉传感器。双视角视觉传感器不仅增大了有效测量视角,而且和传统的由两台高速摄像机构成的双目体视传感器相比,既节约了成本,又保证了两侧拍摄的严格同步。

利用双视角视觉传感器对管道周向截面的环状流液膜进行测量,为了尽可能增大有效拍摄视角以获得更多液膜流动信息,需要对传感器进行结果分析和参数优化。薛婷等人曾针对气液泡状流中分散相气泡,对虚拟体视传感器进行分析和优化^[13-15],以获得准确的气泡运动轨迹三维重建。本文则针对环状流液膜测量对象,基于虚拟双目体视原理构建双视角传感器测量模型,分析其结构参数,并结合周向液膜的测量原理进行优化,以有效提升管道截面液膜的有效测量角度,并利用优化的传感器对环状液膜流动参数和时空流动结构进行测量分析。

2 双视角测量传感器模型与分析

2.1 双视角传感器的构成及其工作原理

双视角视觉传感器的测量模型如图 1 所示。系统由一台高速摄像机、中间对称平面反射镜 M1、M2 以及两侧对称平面反射镜 P1、P2 构成。M1、M2 关于中心线对称,且与中心线成 α 角,反射面在外侧。P1、P2 距中心线距离为 d ,且与 M1、M2 的夹角为 γ ,反射面在内侧。当被测对象

位于有效视场范围内时,将通过反射镜组映射到摄像机的左半面和右半面,摄像机左右像面在平面镜中的虚像充当了“双目”的角色,从而在一幅图像中得到对被测对象在两个不同方向上的二维信息。

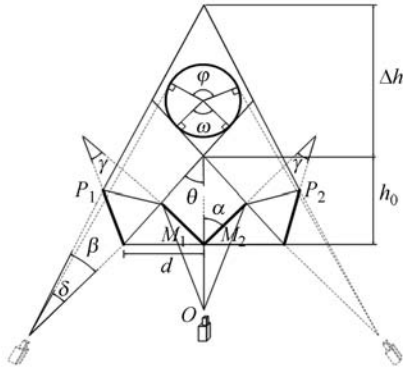


图 1 双视角视觉传感器测量模型

Fig. 1 Measure model of double-view vision sensor

传感器测量模型中其他结构参数如下： β 为摄像机透视中心对像面的张角； θ 为虚拟摄像机光轴与传感器中轴的夹角； h_0 为有效视场相对于反射镜组的最近距离； Δh 为有效视场的深度；圆形部分为被测管道的周向截面； ω 为左右虚拟摄像机均能观测到的有效视场角度； φ 为被测管道的视场盲区； δ 为虚拟摄像机对被测管道的视场张角。

2.2 单侧虚拟摄像机视角分析

由图 1 可知,中心实体高速摄像机的视场张角为 2β ,两侧的虚拟摄像机视场张角为 β ,虚拟摄像机光心为 O' 。单侧虚拟摄像机周向液膜测量原理如图 2 所示,图中 R 为被测管道半径, L 为管道与光心的间距,即摄像机的工作距离, δ 为虚拟摄像机对被测管道的视场张角,通过几何关系可知,单侧摄像机的视场盲区角也等于 δ 。关于视场盲区角 δ 的数学关系如式(1)所示:

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{R}{L}. \quad (1)$$

由式(1)可知在管道半径 R 一定的情况下,拍摄盲区角 δ 由被测距离 L 决定,随 L 的增大而减小。通过式(1)计算,在实际应用中角 δ 通常在 $6^\circ \sim 12^\circ$ 之间,受 L 影响很小,可以近似看作与工作距离 L 无关。

2.3 体视传感器双侧视角分析

对传感器进行整体分析,双视角传感器模型

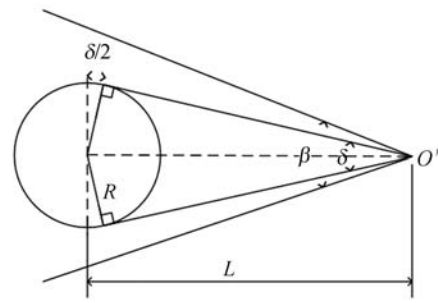


图 2 单侧虚拟摄像机测量视角分析

Fig. 2 Measurement visual angle analysis of one-sided virtual camera

可以视为两个互成角度的单侧虚拟摄像机模型的组合,通过对图 1 的几何分析可知,虚拟摄像机光轴与传感器中轴的夹角 $\theta = 2\gamma$ 。由 2.2 节分析可知,拍摄盲区角在两侧虚拟摄像机的公共视场区域内可以近似视为恒定。下面以管道与两虚拟摄像机光轴相切位置为例进行分析,即图 1 所示的圆形管道。两侧摄像机能够拍摄的公共区域角度为 $\omega = 180^\circ - 2\theta$,盲区角度为 $\varphi = 180^\circ - 2\theta + \delta$ 。因此,需要优化装置参数以增大 θ 来减小测量盲区。增大 θ 可以通过增大 γ 来实现。

3 双视角测量传感器优化

3.1 双视角传感器参数设计与优化

由拍摄盲区角 $\varphi = 180^\circ - 2\theta + \delta$ 可知,当 θ 增大到 90° ,即 $\gamma = 45^\circ$ 时可以得到最小的盲区角 δ , δ 在实际测量中约为 10° ,理论上比较理想,图 3 为盲区最小时测量示意图。如图 3 所示,这种设计在测量时管道必须位于两侧的反射镜组之间,大大增加了传感器的体积和重量,给测量带来了极大的不便。因此,需要寻求一种既能减小盲区角度又便于实际应用的优化方案。

首先对中心平面镜组进行分析。中心反射镜组的光路原理如图 4 所示。由光路原理图知,中心平面镜组宽度最大值为 W_{\max} ,当平面镜宽度大于 W_{\max} 时,会对两侧平面镜的反射光线造成遮挡,这对平面镜夹角 γ 的设计产生了一定的要求。同时,为了测量方便,希望视场区域位于传感器的前方且大小满足测量要求。因此,综合考虑传感器体积、公共视场尺寸、摄像机工作距和传感器误差等因素,选取中心平面镜与传感器中轴夹角 $\alpha = 45^\circ$,两侧平面镜到传感器中轴距离 $d = 150$

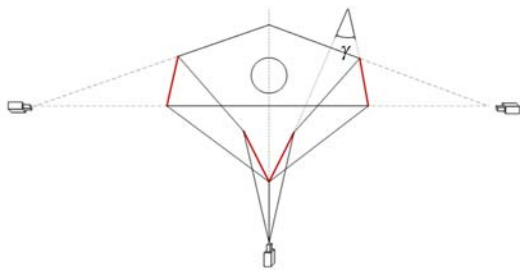


图 3 盲区最小传感器设计示意图

Fig. 3 Schematic of sensor with smallest blind angle

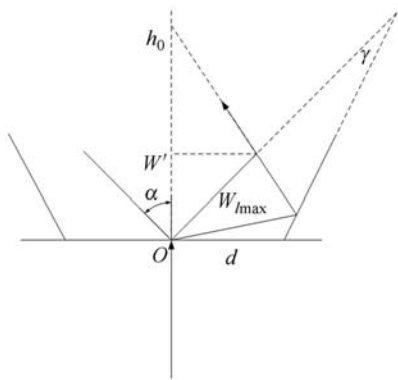


图 4 镜组光路原理图

Fig. 4 Optical path schematic of mirror group

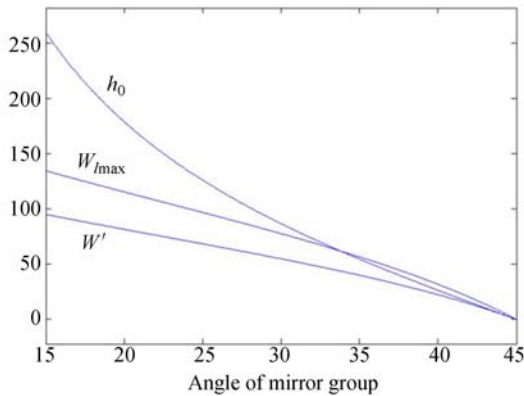


图 5 镜组夹角与视场参数关系

Fig. 5 Relationship between angle of mirror group and field parameters

mm。图 5 所示为该情况下镜组夹角 γ 与中心镜组最大宽度 W_{imax} 、中心镜组端点在传感器中轴线上投影 W' 以及视场最近点位置 h_0 之间的关系。为满足设计要求, W' 到中心 O 的距离应小于视场最近点位置 h_0 。通过几何关系的数学推导有:

$$h_0 = \frac{d \cos(\alpha - \gamma) \cos(\beta + \gamma)}{\sin \gamma \cos \gamma}, \quad (2)$$

$$W_{imax} = \frac{2d \cos(\alpha + \gamma) \cos(\alpha - \gamma)}{\sin(\alpha + 2\gamma)}, \quad (3)$$

$$W' = W_{imax} / \sqrt{2}. \quad (4)$$

考虑摄像机工作距、镜头焦距、传感器尺寸以及平台加工等因素,中心镜组宽度 W_{imax} 取 120 mm,根据图 5 所示各参数关系,平台设计时取 $\gamma = 30^\circ$,即两侧平面镜与中轴线方向成 15° 夹角。经计算,此时视场大小和位置满足测量要求。在此测量装置下, $\alpha = 45^\circ$, $\gamma = 30^\circ$, $d = 150$ mm,此时,两侧虚拟摄像机的公共视场角度约为 60° ,测量盲区约为 70° ,有效视场区域约为 290° 。

3.2 管壁折射与周向测量视角分析

由于周向液膜测量时使用的是透明的有机玻璃管道,具有一定的管壁厚度,管壁对光路的折射会对有效测量视角产生一定的影响。根据折射定律有:

$$n_1 \sin \gamma = n_2 \sin \theta, \quad (5)$$

其中: n_1 和 n_2 为两种介质的折射率, θ 和 γ 为光线的入射角和出射角。当光线从折射率较大的介质射向折射率较小的介质且发生全反射现象时,根据全反射定律有:

$$\sin \theta' = \frac{n_1}{n_2}, \quad (6)$$

其中: $n_1 = 1$ 为空气折射率; $n_2 = 1.49$ 为管壁(有机玻璃)折射率, θ' 为全反射角,故发生全反射时有:

$$\theta' = \arcsin \frac{n_1}{n_2} = \arcsin \frac{1}{1.49} \approx 42.2^\circ. \quad (7)$$

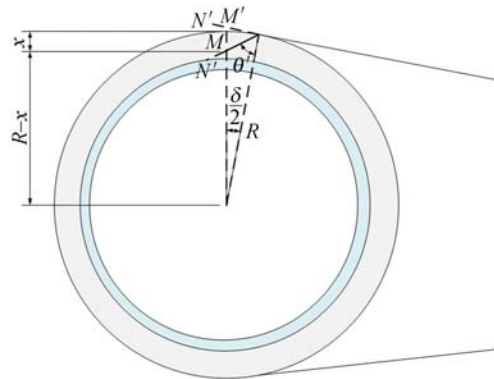


图 6 单侧虚拟摄像机折射光路示意图

Fig. 6 Optical refraction schematic of one-sided virtual camera

周向液膜测量时,管道内外的折射光路如图 6 所示,虚拟摄像机有效视场边界与被测管道相切,发生全反射现象,全反射角为 θ' 。管道外径为 R ,折射光线与管道直径截面的交点 M 到管道

外壁的距离为 x , 这里取 $\delta=10^\circ$, 根据正弦定理有:

$$\frac{R}{\sin(180^\circ-\delta/2-\theta')} = \frac{R-x}{\sin \theta'} \quad (8)$$

可以求得 $x=2.96 \text{ mm}$, 通常小于管壁厚度。因此在考虑管壁折射情况下周向液膜可以观测到点 M 延长线与内壁液膜的交点 N 处, M' 、 N' 分别为点 M 、 N 经过折射形成的虚像。故单侧虚拟摄像机可观测的有效视角略大于 180° 。综合考虑整个双视角视觉传感器, 优化后的有效测量视角可达到 300° 左右。

4 实验结果及分析

4.1 传感器有效视角测量

通过实验对优化的双视角测量传感器有效视角进行分析。图 7 为优化的传感器拍摄的周向靶标图像。为了便于观察和估算有效视场角度, 将圆形靶标以圆心为顶点等分为 16 个扇形并按照十六进制从 0 到 F 进行标号, 每份扇形区域角度为 22.5° 。

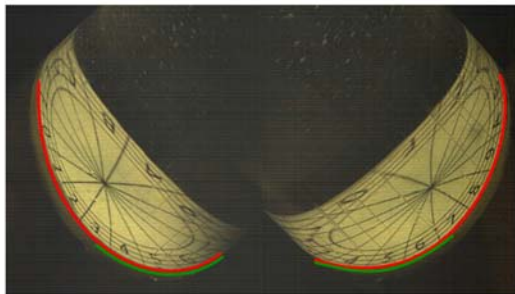


图 7 基于优化传感器拍摄的靶标图像

Fig. 7 Circular target image captured by optimized sensor

由图 7 所示(彩图见期刊电子版)拍摄的靶标图像可知, 左侧虚拟摄像机拍摄的周向有效区域为扇形 F 的右侧到扇形 7 的左侧区域(如图中红色标记), 约占 8 份扇形, 有效视角约为 180° ; 右侧虚拟摄像机拍摄的周向有效区域为扇形 3 的右侧到扇形 B 的左侧区域(如图中红色标记), 约占 8 份扇形, 有效视角约为 180° 。单侧虚拟摄像机的有效拍摄视角与考虑管壁折射情况下的理论分析相一致。两侧虚拟摄像机均能拍摄到的公共区域为扇形 3 的右侧到扇形 7 的左侧区域(如图中绿色标记), 约占 3 份扇形, 故公共视角约为 70° , 整个双视角视觉传感器的周向有效测量视角约为

$180^\circ+180^\circ-70^\circ=290^\circ$, 与理论分析值相近。

4.2 双视角传感器周向液膜测量

图 8 为液相雷诺数 $Re=4\ 000$ 时, 基于 LIF 技术使用优化的双视角视觉传感器拍摄的周向液膜图像。由图 8 可知, 实际液膜范围与使用靶标扇形区域计算的测量结果相符, 单侧有效观测视角约为 180° , 传感器整体的周向液膜有效测量视角约为 290° , 同理论分析一致。

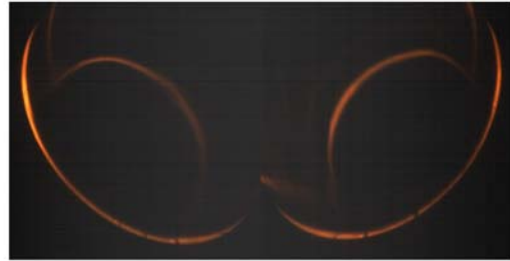


图 8 基于激光诱导荧光拍摄的周向液膜图像

Fig. 8 Circumferential liquid film image based on LIF

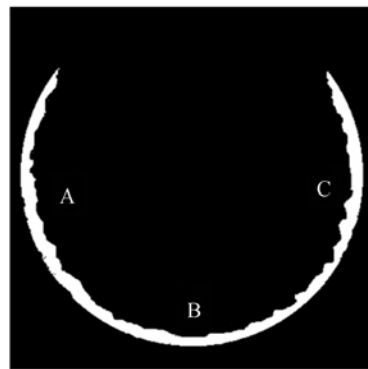


图 9 图像处理后的周向液膜

Fig. 9 Circumferential liquid film after image processing

将双视角传感器以一定角度拍摄的液膜图像进行灰度化、差影、反色、灰度拉伸、畸变校正和阈值分割等处理, 得到正视于管道截面的左右两侧液膜图像, 然后将左右两幅液膜图像进行融合, 融合后的图像如图 9 所示(彩图见期刊电子版), 其中白色部分为提取到的液膜。由图 9 可知, 优化的双视角体视传感器具有较大的周向液膜的有效测量视角, 但由于在图像处理过程中舍弃了部分误差较大的边缘液膜, 使得有效视角略低于理论分析。通过传感器及摄像机标定, 可以求得图 9 所示周向液膜的平均厚度为 0.827 mm 。在 Takahama^[16], Karapanition^[17] 等人对竖直降膜平均液膜厚度的研究中, 液相雷诺数为 $Re=4\ 000$ 时

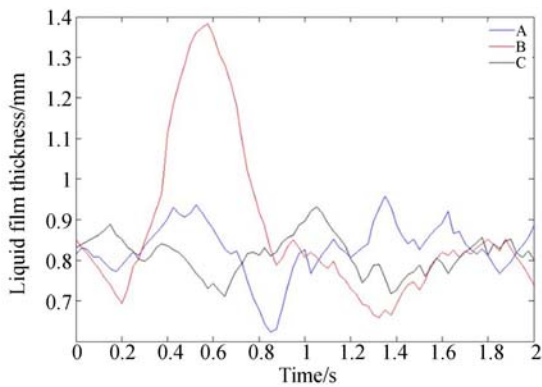


图 10 在时间序列内 A、B、C 3 处的液膜厚度变化

Fig. 10 Liquid film thickness of A, B, C in a time sequence

液膜的平均厚度分别为 0.838 mm 与 0.869 mm, 与本文测量结果相符。选取图 9 中 A、B、C 3 个位置并测量 3 处液膜在时间 $t=0\sim 2$ s 内的厚度变化, 相邻取样间隔为 0.02 s。图 10 为 A、B、C 3 点的液膜厚度波动变化折线图。从图中可以直观看出 3 处液膜厚度在时间序列内的波动变化, 以及在取样时间内 B 点附近有一个较大的扰动波通过。

图 11 为在不同液相雷诺数下测量的周向液膜平均厚度。图中散点为测量数据, 两条实线分别为 Takahama 和 Karapanition 的实验拟合结果。通过对比可知, 本文的测量结果具有较高的准确性, 能够正确反映出竖直管道内自由降膜的流动特性。

通过实验证明了双视角视觉传感器模型理论分析的正确性和传感器优化的可行性, 优化后的传感器能够获得较大的有效周向测量视角, 可以在较高的时空分辨率下对周向液膜进行实时测量与研究, 与典型的电导探针测量方法相比, 实现了从单点测量到截面整体可视化测量的跨越。

参考文献:

- [1] ANUPRIYA S, JAYANTI S. Experimental and modelling studies of gas-liquid vertical annular flow through a diverging section[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 67(S):180-190.
- [2] 赵德喜, 曹学文, 张宇航, 等. 基于超声波技术的水平管气液两相流流型识别方法[J]. *油气储运*, 2014, 33(2): 165-171.

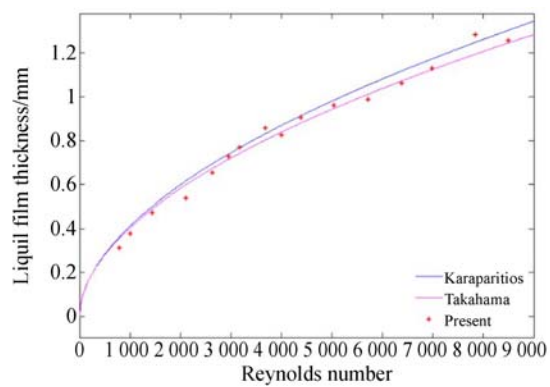


图 11 不同液相雷诺数下的周向液膜平均厚度

Fig. 11 Average circumferential liquid film thickness under different Reynolds numbers

5 结 论

通过对双视角视觉传感器的结构和工作原理进行分析, 建立虚拟双目体视测量模型, 综合考虑影响观测视角的各项因素, 提出了对传感器参数进行优化的方案, 即中间平面反射镜组宽度为 120 mm, 与传感器中轴成 45° , 两侧平面镜组距中轴 150 mm, 与中心镜组成 35° 角。利用激光诱导荧光技术对周向液膜的测量实验进行了验证。经过优化后的传感器可以获得接近 300° 的有效周向液膜测量视角, 实验结果与理论分析相符, 通过图像处理 and 传感器标定, 对周向液膜的平均厚度和时间序列内的周向液膜波动变化进行了测量, 并将测量结果与国外经典的研究成果进行对比, 证明了测量方法的有效性及其准确性。通过双视角视觉传感器的优化能够获得较大的周向液膜有效拍摄视角, 可以获得高时空分辨率下更丰富的周向液膜流动信息, 对提升周向液膜测量效果, 进而分析环状流流动特性具有十分重要的意义。

ZHAO D X, CAO X W, ZHANG Y H, *et al.*. Identification method of gas-liquid two-phase flow pattern of horizontal pipe based on ultrasonic technology[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(2):165-171. (in Chinese)

- [3] MASCARENHAS N, MUDAWAR I. Statistical analysis of measured and computed thickness and interfacial temperature of free-falling turbulent liquid films[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 73: 716-730.

- [4] PHAM S H, KAWARA Z, YOKOMINE T, *et al.*. Detailed observations of wavy interface behaviors of annular two-phase flow on rod bundle geometry [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 59: 135-144.
- [5] STAHL P, VON ROHR P R. On the accuracy of void fraction measurements by single-beam gamma-densitometry for gas-liquid two-phase flows in pipes [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(6): 533-544.
- [6] ZADRAZIL I, MATAR O K, MARKIDES C N. An experimental characterization of downwards gas-liquid annular flow by laser-induced fluorescence: Flow regimes and film statistics[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 60: 87-102.
- [7] CHERDANTSEV A V, HANN D B, AZZOPARDI B J. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 67: 52-64.
- [8] HÄBER T, GEBRETSADIK M, BOCKHORN H, *et al.*. The effect of total reflection in PLIF imaging of annular thin films[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76: 64-72.
- [9] 贾振元, 樊超楠, 刘巍, 等. 双目视觉测量中等匹配点的光条中心提取[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1582-1591.
- JIA Z Y, FAN C N, LIU W, *et al.*. Extraction of laser stripe centers based on equal matching points for binocular vision measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1582-1591. (in Chinese)
- [10] 王向军, 卞越新, 刘峰, 等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2902-2908.
- WANG X J, BIAN Y X, LIU F, *et al.*. Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2902-2908. (in Chinese)
- [11] GE D Y, YAO X F, LIAN Z T. Binocular vision calibration and 3D re-construction with an orthogonal learning neural network[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(23): 15635-15650.
- [12] WANG Q Y, WANG Z Y, YAO Z J, *et al.*. An improved measurement model of binocular vision using geometrical approximation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(12): 125013.
- [13] 金俞鑫, 薛婷, 曹兆峰, 等. 气液两相流三维测量中虚拟立体视觉传感器的优化设计与实验[J]. *光子. 激光*, 2012, 23(2): 297-302.
- JIN Y X, XUE T, CAO ZH F, *et al.*. Optimum design and experiment of the virtual stereo vision sensor for the three-dimensional measurement in the gas-liquid two-phase flow[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(2): 297-302. (in Chinese)
- [14] 薛婷, 曹兆峰, 金俞鑫. 基于虚拟立体视觉的气液两相流三维测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 124-130.
- XUE T, CAO Z F, JIN Y X. Calibration of three-dimensional measurement system for gas-liquid two phase flow based on virtual stereo vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 124-130. (in Chinese)
- [15] XUE T, QU L Q, CAO Z F, *et al.*. Three-dimensional feature parameters measurement of bubbles in gas-liquid two-phase flow based on virtual stereo vision[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 27: 29-36.
- [16] TAKAHAMA H, KATO S. Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1980, 6(3): 203-215.
- [17] KARAPANTSIOS T D, PARAS S V, KARABELAS A J. Statistical characteristics of free falling films at high reynolds numbers[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989, 15(1): 1-21.

作者简介:



薛 婷(1977—),女,山西太谷人,副教授,博士生导师,1998年、2004年、2007年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事多相流测试、光电测试和光学诊断等方面的研究。E-mail: xueting@tju.edu.cn



周 策(1993—),男,吉林延边人,硕士研究生,2011年于天津大学获得学士学位,主要从事多相流测量、图像处理方面的研究。E-mail: zhouce0114@tju.edu.cn

(本栏目编辑:秦 思)