

文章编号 1004-924X(2018)12-2902-07

液压油路气液两相传质的光学测量

田 昊*

(大连海事大学 船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为研究液压系统工作压力下管路中自由气体的气液传质过程,解决油液中气泡质量变化的光学测量问题,推导了高压油液环境下气泡直径测量的恒温及零温度梯度条件,设计了高压气液传质光学测量系统,并对该系统的气泡识别与跟踪的关键算法进行研究。根据毕渥数及牛顿冷却定律推导了测量气泡的极限尺寸,提出以气泡圆度为判定阈值的气泡图元识别算法。最后,利用相邻帧间气泡中心最小向量的方法实现对气泡圆心的跟踪。实验结果表明:该系统实现了 14 MPa 下气液传质的光学测量,气泡半径测量误差小于 4%,提供了高压油气传质的试验手段,基本满足液压油路气液两相传质的光学测量要求。

关键词:光学测量;液体可压缩性;气液传质

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.2902

Optical measurement of mass transfer between gas and liquid phases in hydraulic circuits

TIAN Hao*

(Naval Architecture and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: tianhao@dlmu.edu.cn

Abstract: In order to study the mass transfer between the free gas and oil in a fluid power system and realize bubble mass measurement in oil, the radius limit of the bubble during measurement was derived from steady state and zero temperature gradient conditions. A high-pressure gas-oil mass transfer optical measurement system was designed, and the key algorithms for bubble identification and tracking were studied. First, the radius limit of a bubble during measurement was derived from the Biot number and Newton's Law of Cooling, and a high-pressure gas-oil mass transfer optical measurement system was designed. Then, a method to identify bubble elements from a video was demonstrated, based on the roundness of a circle and a set threshold. Finally, a minimum vector length method was used to track the center of a bubble between frames. Experimental results indicate that the system can achieve optical measurements under a pressure of 14 MPa, and the error for measuring the radius of the bubble is within 4%. The experimental method for gas-oil mass transport study can satisfy

收稿日期:2018-05-15;修订日期:2018-05-29.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFC0307003);大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金资助项目(No. JMTZ201703);中央高校基本科研业务费青年教师科技创新项目(No. 3132018200)

the system requirements of optical measurement of gas-oil mass transfer in a fluid power system.

Key words: optical measurement; fluid compressibility; gas-oil mass transfer

1 引 言

明确气液两相流在围压下的质能传递对于深入研究流体传动(或液压)系统的动态特性有着重要意义。流体传动系统在工程机械、生产生活等领域应用广泛,其动态特性由控制原件、执行原件以及传递功率的液压介质的弹性模量所决定。理想情况下液压油的弹性模量为 $1\sim 1.5\text{ GPa}^{[1]}$,一般的工作压力($< 20\text{ MPa}$)不会对油体积造成显著影响,因此控制参量的变化通过液压油的传递将直接反映在做动器的输出上,即通过流量控制可实现做动器的实时响应。实际工况下,除泄漏等损耗外,液压油中的自由气体极大提高了液压油的压缩性,对于控制系统而言相当于增加了弹性环节,这会显著降低做动器对于控制参量变化的响应速度,产生相位延迟,降低控制精度^[2]。因此,建立液压油存在自由气体条件下的弹性模量变化规律对于精确掌握受控液压系统的动态特性极其重要。

目前,液压油在自由气体影响下的弹性模量变化研究主要有解析法和实验法。解析法通常以油压力与气体在油中所占体积分数为变量,利用理想气体状态方程与液体弹性模量定义进行理论推导并建立零维模型^[3]。然而受压力、温度及传质界面的共同作用,零维模型很难从理论上准确描述所有压力段的实验观测结果。光学法通常利用 CCD 摄像机等图像采集设备对气泡体积随时间的变化进行测量,从而计算气体液体两相间的传质率,具有极强的直观与便利性,在微流体、自由液面流体系统的传质传热研究中应用广泛^[4-8]。然而,相比微流控等系统,液压系统一方面具有极高的工作压力(超过 100 倍大气压),对于测量装置承压能力提出了挑战;另一方面由于油液热传导系数低,系统提高到极高压力时气体增加的内能由于无法迅速传导至油体耗散,而导致温度梯度不均,因此在液压系统中直接应用图形测量法将面临气体温度无法标定的难题。本文建立了液压油图形法传质系数测试恒温条件,搭建了高压

气液传质视觉测量系统,并对气液传质系数进行了测量。实验结果表明,该检测系统可实时跟踪监测气液传质进程,为建立更精确的液体弹性模量解析法方程提供理论与实验保障。

2 油中气液传质的计算

2.1 光学法测量气液界面质量流原理

液压系统中自由气体由于边界油膜分子表面张力的作用而呈近似球体分布于液压管路之中,而光学法测量气液传质的关键是对其时变体积的准确测定。如图 1 所示,假设液压管路中存在有限数量的球状自由气体气泡(以下简称“气泡”),则采用摄像机等光学测量手段可获得相机焦平面内气泡在 t_0 时刻的最大半径 r_0 ,利用 $\frac{4}{3}\pi r_0^3$ 可求得气泡体积 V_0 与质量 $\frac{4}{3}\rho\pi r_0^3$ 。

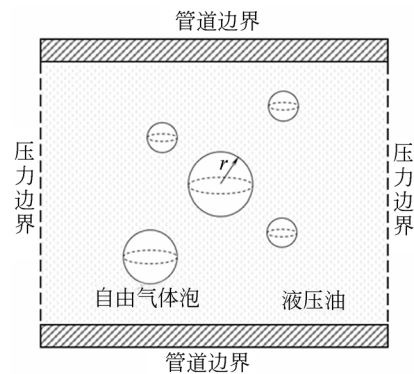


图 1 液压系统中自由气体示意图

Fig. 1 Illustration of free gas bubbles in hydraulic system

对气泡气体密度 ρ_g 与球体体积时间序列的积求时间导数,可得气液传质的质量流 \dot{m}_g :

$$\dot{m}_g = (\dot{\rho}_g V). \quad (1)$$

通常情况下,液压系统的工作压力远高于油液气化压强,因此可以假设穿越气液界面的质量流仅由气体分子组成。由于 ρ_g 仅是压力与温度的函数,在特定实验条件下,若缓慢加减压而保持恒温恒压状态,则在 t_i 时刻可取 ρ_g 为常数。因

此,式(1)中气泡体积的变化率起主导作用,可化简为:

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V}. \quad (2)$$

于是气液两相传质的质量流速为:

$$G = \frac{\dot{m}_g}{A_g} = \dot{r} \rho_g, \quad (3)$$

式中 A_g 为气泡表面积。

2.2 油中自由气体热传导极限直径

由式(1)可知,高压、变压环境中自由气体与油两相间的传质过程,可通过光学法测定自由气体体积随时间的变化。此外,式(1)的 ρ_g 项要求测试系统能准确测量气泡的压力和温度用以计算气体密度。由于气泡与其周围液体处于压力平衡状态,气泡的压力可认为同于围压。相对于压力,气泡的温度却难以直接测量。因此,文献[4-8]提出了将气泡的温度等同于液体温度的假设。但是由于液压系统工作时的高低压相差 200 倍,压缩时气泡由于界面功造成的温升不可忽略,而且要考虑气泡通过对流散热达到气液两相温度梯度为零的时间。为排除气泡内温度梯度、气液温差对 ρ_g 的影响,在测量时选取的气泡与周围液体应满足近似等温条件,即:(一)气泡的直径应满足其内部温度梯度为零的假设;(二)气泡内气体与液体的自然对流散热时间应足够短。

条件一可利用毕渥(Biot)数定义推导。已知毕渥数表征了控制体内部单位导热面积上的热传导系数与对流换热系数之比,小于 0.1 则认为控制体内部温度场均匀^[1]。因此,如果气泡满足其内部温度梯度为零的假设,有:

$$Bi = \frac{L_c/k_t}{1/h_t} < 0.1, \quad (4)$$

式中: L_c 为气泡内部热传导特征长度,对于球形气泡 $L_c = d/6$; k_t 是气泡内部热传导系数; h_t 为气泡边界与油的自由对流换热系数。

如果气泡的半径满足第二条要求,可认为此时气液两相间仅存在质量交换。对于质量为 m_g 、表面积为 A_g 、热容为 C_p 、温度为 T_g 的气泡在温度为 T_∞ 的油液包围下进行自由对流散热的过程可由牛顿冷却公式描述:

$$m_g c_p \dot{T}_g + h_c A_g (T_g - T_\infty) = 0. \quad (5)$$

由常微分方程的解析解可知,式(5)的解的时间常数 τ 为 $m_g c_p / h_c A_g$ 。当传热时间大于 4τ 时,气泡与周围油液的温度差小于 2%。

3 高压气液传质光学测量系统

3.1 高压气液传质光学测量系统的硬件构成

高压气液传质光学测量系统原理图如图 2 所示。该系统由油气混合子系统、光学成像子系统、加压子系统、传感子系统等组成。油气混合子系统由氮气源、液压源、节流阀及油气混合阀块构成。光学成像子系统由 CCD 显微摄像机(640×480)及二维平板流场(30 mm×15 mm×2 mm)组成。加压子系统由活塞缸、活塞以及电推缸等构成。传感子系统由压力传感器以及测量活塞位移的线性可变差动变压器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)构成。除上述系统之外,光学成像、加压、传感以及数据采集均由装有数据采集卡的上位机协调控制。测量时,由上位机控制活塞位移,由位移传感器及压力传感器反馈系统体积及压力的变化,由成像系统获取图像数据,由软件计算质量流量。

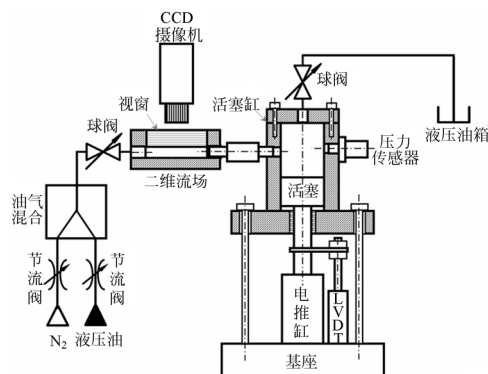


图 2 高压气液传质光学测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical high-pressure gas-liquid mass transfer measurement system

3.2 高压气液传质光学测量系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:通过节流阀手动调整氮气与液压油的比列,将混有毫米-微米级直径自由气体气泡的液压油输送至活塞缸。当活塞缸充满后,关闭活塞缸的两个球阀,使之与外界隔离。通过上位机向电推缸发送信号,根据位移传感器的反馈数据将活塞推至指定位置,并利用压力传感器记录加压过程。在整个加压过程中,使用 CCD 摄像机透过视窗对二维流场中两相液进行视场内成像,如图 3 所示。为保障光学测量的准确性与一致性,可通过变焦距寻找特征像素宽

度拐点(即清晰度函数)实现显微摄像机的准确聚焦,成像清晰^[9]。试验前期,在二维平板流场内临时安装标准板用于标定,手动调节显微摄像机镜头的焦点高度,使得摄像机视场中心处图形元素达到最小像素宽度,即认为对焦准确;之后固定焦点高度,调整显微摄像机安装轴心偏转角,令视场四个边界顶点处采集的标准板刻度像素宽度一致,即认为摄像机焦平面与二维平板流场平行。在上述调整完成后取出标准板,接入液压系统,并将采集的图像进行 A/D 转换后传送至上位机进行处理,得到图 4。

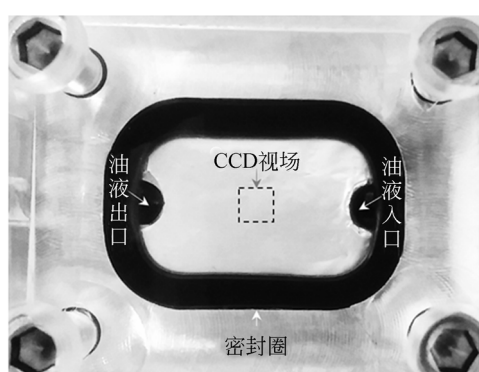


图 3 二维平板流场及 CCD 成像位置

Fig. 3 2D planar flow field and location for CCD imaging

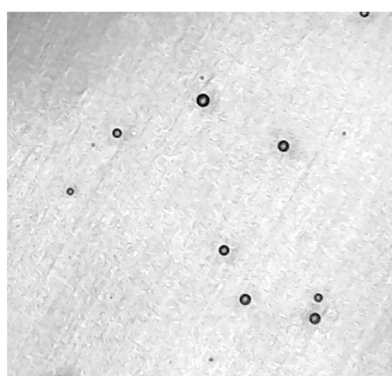


图 4 CCD 显微摄像机拍摄视频中截取的一帧图像

Fig. 4 A frame of image acquired from the video recorded by CCD microscopic camera

图像测量程序在 Matlab 软件环境下编写,可实现以下功能:每帧视频中获取流场图像、对图像进行降噪、图像边缘检测、气泡元素的提取、计算气泡半径、计算气泡中心位置以及在相邻两帧间实现对单个气泡中心位置的跟踪,确保始终保持对视场中一个气泡体积变化过程的凝视。

4 气液传质光学测量的关键算法

4.1 气泡识别算法

由 CCD 摄像机取得气泡时域连续图像后,首先以采样时间间隔为节点截取视频中的一帧图像,应用阈值法进行二值化处理。之后使用 Moore-Neighbor 法^[10]在整幅图像内寻找所有由相邻连续像素组成的图元,并返回其周长、质心以及面积数据。

由于所寻找的气泡在视场内的投影呈圆形,因此可根据二维平面图元面积 A 与周长 s 的关系,建立圆度计算公式,利用圆度 e 来判定某一图元是否为所求气泡:

$$e = \frac{4\pi A}{s^2} \quad (6)$$

当图元接近圆形时, e 值趋近于 1。对于圆形图元,利用面积公式即可反推气泡半径 $\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ 。

4.2 气泡跟踪算法

由于试验装置为封闭系统,加压或减压过程中气液两相体积随压力的变化在二维视场中反映为气泡位置的变化。如果采用固定位置测量法,气泡的移动极有可能造成测量的中断甚至相邻气泡混淆的问题。因此有必要设计气泡跟踪算法,确保始终对同一气泡的测量。

本文提出利用计算相邻帧间气泡中心最小向量的方法实现对气泡圆心的跟踪,其算法如下:

$$(x_{i+1}, y_{i+1}) = \min_{k=1,2,\dots,n} (\sqrt{(x_{i+1}^k - x_i)^2 + (y_{i+1}^k - y_i)^2}) \quad (7)$$

式中: i 为帧标志, k 为图元标识, n 为第 i 帧中的图元数目, (x_{i+1}, y_{i+1}) 为所求第 $i+1$ 帧中气泡的中心位置,初始气泡位置 (x_1, y_1) 由用户指定。

5 气液传质光学测量结果

在正式测量之前,首先将标有刻度的高精度尺置于二维流场 CCD 摄像头测量视场中心处进行标定。经计算,比例尺为 $7.8 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。

5.1 气泡识别

气液传质光学测量的关键是对气泡直径的测定,其先决条件是气泡图元的识别。利用式(6),可以实现对每一帧图像中所有图元圆度的判定。

经试错法发现当圆度阈值设定为 $0.94 < e < 1$ 时, 在每帧图像中可找到所有圆形图元, 如图 5 所示。其中, 圆形图元由实线圆圈标出, 而气泡周围的点画线表明了气泡的边界, 即气泡图元的边界像素。获得气泡半径后带入式(4)即可验证气泡温度梯度为零的条件, 例如, 当检测到的气泡半径小于 $100 \mu\text{m}$ 时, 由文献[11]可知, 在 300 K 温度、100 倍大气压力内, 氮气的热导率为 $0.026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 氮气与矿物油之间的自由对流换热系数为 $60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{[1]}$, 根据式(4), $B_i < 0.1$, 满足气泡温度场均衡条件。

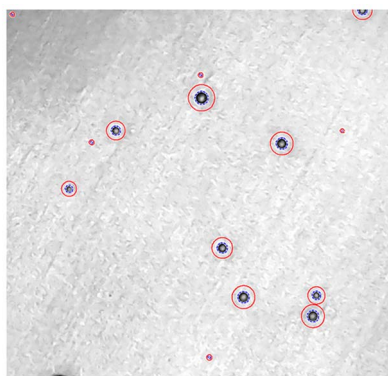


图 5 一帧图像中识别的气泡图元

Fig. 5 Bubble image elements identified in a frame

5.2 单气泡形心跟踪

利用式(7)的跟踪算法, 可实现在上位机记录的视频中对一起始于的气泡在加压过程中造成的位移实施跟踪, 如图 6 所示。从图中可以看出, 气泡形心的移动轨迹与 x 轴呈 40° 左右的夹角, 由此表明: CCD 焦平面虽与二维平面视场重合, 但是两个平面的 x 轴并不重合, 存在 40° 左右的夹角, 但并不影响测量; 由于混有自由气体, 液压介质的可压缩性会在光学测量中体现, 且由于平板流场的约束而呈层流(直线运动)状态; 压缩过程中形心的最大位移超过 $50 \mu\text{m}$, 从侧面证明了气泡形心跟踪的必要性与可行性。

5.3 质量流量测量

在成功识别视频图像中气泡图元, 并对单个气泡在视频图像帧间实现跟踪的前提下, 后处理程序分析了所跟踪气泡直径以及油压随时间的变化, 如图 7 所示。

气泡的初始质量为 $3.3 \times 10^{-10} \text{ kg}$, 半径为 $100 \mu\text{m}$, 氮气的比热为 $1 \times 10^{-3} \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 则根据

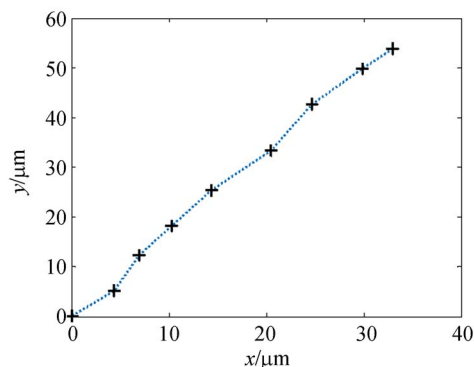


图 6 单一气泡图元形心位置追踪图

Fig. 6 Center position tracking for a single bubble

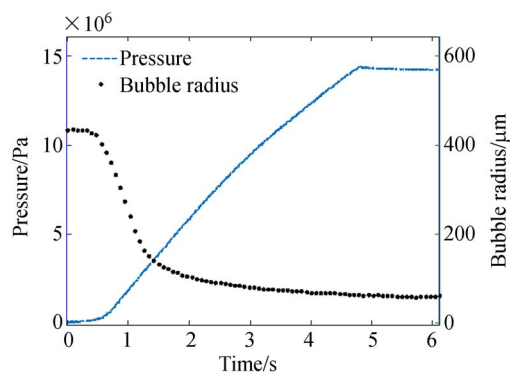


图 7 单一气泡半径及对应系统压力随时间的变化

Fig. 7 Radius of a given bubble and variation of system pressure with time

式(5)计算得热传导时间常数为 $4 \times 10^{-9} \text{ s}$, 可认为气体向液体的传热为瞬间完成。于是从图 7 截取气泡直径小于 $100 \mu\text{m}$ 的部分 ($t > 2 \text{ s}$), 同时认为试验温度环境为恒温 300 K , 则利用气体状态方程式即可计算出气泡质量随时间的变化, 如图 8 所示。对计算得到的气泡质量进行最小二乘法线性拟合, 所得斜率即为所求质量流量 \dot{m}_g , 再带入式(3)可得:

$$\dot{m}_g = -4.4 \times 10^{-11} \text{ kg/s},$$

$$G = -9.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} (r = 62 \mu\text{m}).$$

试验结果表明, 高压气液传质光学测量系统成功记录了二维平板流场中的微米级气泡; 而提出的气泡识别、跟踪等关键算法实现了对单个气泡半径随时间变化的记录。测得在 14 MPa 压力下, 液压油对于自由气泡的吸收率为 $-4.4 \times 10^{-11} \text{ kg/s}$ 。试验中, 系统误差主要来自压力传感器的 0.1% 线性度误差、CCD 显示系统的畸变以及图像处理程序的边界像素误差。其中, 图像处

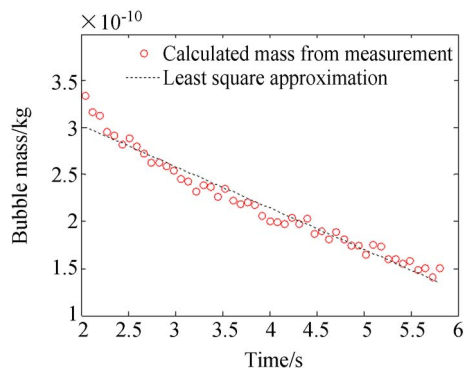


图 8 计算所得单一气泡质量随时间的变化

Fig. 8 Variation of calculated bubble mass with time for a given bubble

理程序的边界像素误差是本次实验中系统误差的主要来源。由于本系统的比例尺为 $7.8 \mu\text{m}/\text{像素}$, 图像处理算法的平均误差可认为像素中心到像素边界的距离, 即对半径检测的误差等同比例

尺的一半。因此当被测气泡半径处于 $100 \mu\text{m}$ 附近时, 半径测量误差为 3.9% 。采用更高物理像素的 CCD, 可以减小像素尺寸对于半径精度的影响。

6 结 论

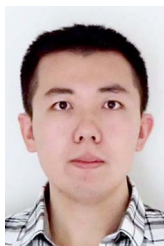
针对液压系统中自由气体对于系统动态特性不确定影响的问题, 本文提出高压气液传质光学测量系统, 从流体力学及传热学理论入手, 推导高压环境下气泡半径光学测量的必要条件, 介绍了该系统的组成与工作原理, 然后提出了动态图像中气泡识别和帧间跟踪的关键算法。最后通过实验测得 14 MPa 下 $100 \mu\text{m}$ 半径气泡向油液的质量流量。试验结果表明, 系统实现了液压系统工作压力下气液传质的光学测量, 极限测量误差小于 4% , 基本满足了气泡体积光学测量与时变质量计算的需求。

参考文献:

- [1] CENGEL Y, TURNER R, SMITH R. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* [M]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [2] 冯斌, 龚国芳, 杨华勇. 液压油弹性模量提高方法与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 219-222.
FENG B, GONG G F, YANG H Y. Method and experiment for increasing effective fluid bulk modulus in hydraulic systems [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 219-222. (in Chinese)
- [3] 梁思伟, 李孝禄, 朱俊江, 等. 汽车含气制动液的有效体积弹性模量的研究[J]. 中国计量大学学报, 2017, 28(4): 454-466.
LIANG S W, LI X L, ZHOU J J, *et al.*. Research on effective bulk modulus of brake fluid with air containing in automobile brake system [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2017, 28(4): 454-466. (in Chinese)
- [4] 薛婷, 周策, 李卓林. 气液环状流周向液膜测量传感器的优化设计[J]. 光学精密工程, 2017(12): 3145-3151.
XUE T, ZHOU C, LI ZH L. Optimum design of measuring sensor for circumference liquid film in gas-liquid annular flow [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017(12): 3145-3151. (in Chinese)
- [5] 姜山, 朱春英, 张璠玢, 等. 微通道内单乙醇胺水溶液吸收 CO_2/N_2 混合气的传质特性[J]. 化工学报, 2017, 68(2): 643-652.
JIANG SH, ZHU CH Y, ZHANG F B, *et al.*. Mass transfer performance of CO_2/N_2 mixture absorption into monoethanolamine aqueous solution in microchannel [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(2): 643-652. (in Chinese)
- [6] 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 ZH 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)
- [7] 张旭升, 郭亮, 胡日查, 等. 红外探测中潜艇冷热尾流的传热传质特性[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 107-114.
ZHANG X SH, GUO L, HU R CH, *et al.*. Heat and mass transfer characteristics of submarine cold-

- thermal wake in the infrared detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1):107-114. (in Chinese)
- [8] 冉绍辉,周慎杰,杨锋琴,等. 错位 Rushton 浆气液分散特性和传质性能实验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2017, 51(7):1368-1373.
RAN SH H, ZHOU SH J, YANG F L, *et al.*. Experimental studying as liquid dispersion and mass transfer of dislocated blade Rushton impeller [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Edition*, 2017, 51(7):1368-1373. (in Chinese)
- [9] 徐征,陈聿夫,孙谦,等. 机器视觉精密测量中的显微光学聚焦[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9):2095-2100.
XU ZH, CHEN W F, SUN Q, *et al.*. Auto-focusing in optical microscopy for machine-vision-based precise measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9):2095-2100. (in Chinese)
- [10] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. *Digital Image Processing Using Matlab* [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [11] STEPHAN K, KRAUSS R, LAESECKE A. Viscosity and thermal conductivity of nitrogen for a wide range of fluid states[J]. *Journal of Physical & Chemical Reference Data*, 1987, 16(4):993-1023.

作者简介:



田昊(1985—),男,辽宁大连人,讲师,硕士生导师,2008、2011年于大连理工大学分别获得学士、硕士学位,2016年于明尼苏达大学双城分校获得博士学位,主要从事流体传动、传热传质、自动控制方面的研究。Email: tianhao@dlmu.edu.cn