

热毛细对流速度场测试研究

冯传玉 何世平

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要 为了探索微重力状态下表面张力驱动流速度场的测试技术, 本文在地面进行了模拟实验, 对位于热壁下流体中气泡周围的表面张力驱动流进行了研究, 并用 PIV 技术测量了流场的速度分布.

关键词 热毛细对流, PIV, 互相关算法

1 引言

微重力科学是空间科学的前沿领域, 是一个新兴交叉学科, 也是国际上最热门的研究领域之一. 微重力科学基本规律的研究, 将大大促进地面及空间应用研究. 微重力流体力学是微重力科学的主要内容之一. 在这方面, 美国、日本和西欧的一些国家在地面和空间都进行了很多的研究工作. 中科院力学所国家微重力实验室, 对热毛细对流的研究取得了重大突破, 研究工作处于国际前沿水平.

微重力流体力学着重研究微重力环境中的对流、扩散、两相流等现象, 但无论哪一项研究都希望能定性或定量显示流体的速度分布. 因此, 流体速度场测试技术的研究, 无论对地面或太空流体物理研究都是极其重要的. 在地面上对位于热壁下液体中气泡周围表面张力驱动流的研究, 不仅对于研究工业生产中热壁或冷壁上的空气泡或蒸汽泡与周围流体的相互作用有十分重要的实际意义, 也可为将来的太空热毛细对流研究进行必要的地面预研.

对于速度场的测量, 目前常用激光多普勒测速仪或激光双焦点测速仪. 但这些技术是逐点检测法, 无法用于流场的全场实时检测. 粒子成像测速法(PIV)是一种较为理想的全场速度检测技术, 可用于流体速度场的全场测量. 中科院力学所阿燕等在文献[3]中, 用 PIV 技术成功地测量了半浮区液桥热毛细对流横向定常速度场, 获得了一系列重要的研究成果. 文献[1, 3], 将微胶囊液晶粒子作示踪剂, 将液晶(LC)测温技术与 PIV 测速技术相结合, 发展成 LC/PIV 测温/测速技术, 可同时检测流场的温度和速度分布. 这是目前唯一能同时检测全场温度分布和速度分布的新技术.

国家自然科学基金资助项目

1998-03-31 收到第 1 次稿, 1998-09-25 收到修改稿

本文侧重于应用 LC/PIV 技术测量热毛细对流的速度分布.

2 PIV 测速技术

PIV 测速技术是一种应用较广的流场速度检测技术,其基本思想是先测出示踪粒子在 Δt 时间间隔内的位移 Δr , 然后通过 $\Delta r/\Delta t$ 求出流场的速度.

PIV 测速法可分为照相 PIV 和录相 PIV 两种. 前者通过光学记录和分析手段获得速度场; 后者则通过录相方式记录粒子场的数字图像, 再运用互相关算法或快速付里叶变换法, 求得有时间差的两幅粒子场间的相对位移, 进而求得速度场.

对照相 PIV 法, 光学记录和分析的手段原则上都可以用作速度场的定量测量, 但由于其过程繁琐, 自动化程度不高, 实际使用中受到一定的限制.

而录相 PIV 法采用的数字互相关技术与之相比, 有一些突出的优点: (1) 通过对图象进行预处理, 可以消除一些噪声 (2) 用数字图像处理和分析技术代替粒子图像的光学处理和分析, 省时、省事、便于自动化 (3) 可以利用录相记录下来的流场粒子图像, 在事后进行各种形式的处理. 缺点是空间分辨率不如照相法高.

录相 PIV 测速法是一种新兴的最具应用潜力的速度计量技术, 是经典光测技术与现代光电技术相结合的产物. 它不但具有全场测量的优点, 又具有电子技术处理数据的高速度、自动化、操作简便等特点.

3 互相关算法

为了获得相差 Δt 时间间隔的两幅粒子图之间的相对位移分布, 经典互相关法采用如下算法: 设具有时差 Δt 的两幅粒子场的灰度分布分别为 A 、 B , 若 A 中任一小区 a 在 Δt 时间后流动至 B 中的某一小区 b , 则可由下式求出相关度 C_1 :

$$C_1 = \frac{\int a(\vec{r}_0) a(\vec{r}_0 - \vec{l}) I_1(\vec{r}) I_2(\vec{r} - \vec{l}) d\vec{r}}{\left[\int a(\vec{r}_0) I_1(\vec{r}) d\vec{r} \cdot \int a(\vec{r}_0 - \vec{l}) I_1(\vec{r} - \vec{l}) d\vec{r} \right]^{1/2}}$$

让 b 在 B 上漫游, 找出最大的 C_1 所对应的位移, 即为真实位移, 此即经典互相关算法.

对于经典的互相关算法, 一旦涉及到亚像素的计算, 其计算量迅速增大, 导致计算速度很慢, 测量精度也难以得到保证.

本文对互相关算法进行了较为系统的探讨, 充分考虑到速度场的连续性特点, 提出了多种子点起始、粗——细搜索结合的算法, 并将经典的图像分析技术——金字塔搜索成功引入到互相关搜索之中, 该方法使计算量有了量级上的减小. 为提高互相关系数判据的可信度, 本文引进了邻域不变判据, 从而使误匹配几乎成为不可能.

改进互相关的具体做法是:

- 1) 将有时差的两幅灰度图分成一一对应的小区, 分区计算.
- 2) 设 A_{rea1} 和 A_{rea2} 是其中一对对应的小区, 在 A_{rea1} 中取一点 A 作为起始点, 即种子点, 运用经典互相关在 A_{rea2} 中搜索出 A 的对应点 A' .
- 3) 设 B 为 A 的邻域点, 由连续性特点我们知道 B' 一定是 A' 的邻域点, 运用经典互相关找出 B_0' (整像素点).

4) 在 B_0' 的 $1/2\text{pixel}$ 范围内的邻域中以 $1/2\text{pixel}$ 精度找出 B_1' , 即完成了 $1/2\text{pixel}$ 精度的搜索. 依次可完成 $1/2^2$ 至 $1/2^n$ 像素级的搜索, B_n' 即为所求 B 对应的位置, 从而求出 B 的位移. 此处是类似金字塔式的搜索, 可有效减少计算量.

5) 依据 3、4, 对整个小区进行处理, 就可求出全区内各个点的位移.

6) 在相邻小区的边界处, 我们可以判断速度值是否相符, 从而进一步判断计算是否正确, 此即邻域不变判据.

根据以上算法, 作者编制了全套 PIV 程序, 并通过刚体平动和转动验证了算法及程序的可靠性, 实验表明, 在转角不太大的情况下, 无论平动或转动, 该互相关算法的测试精度好于 3%. 若转角大于 3 度, 则测试精度会有所下降.

本文提出的这种改进的互相关算法, 大大提高了测试速度和可信度.

4 实验装置

热毛细对流模拟装置如图 1 所示, 该装置主要包括箱体、加热器和热电偶三部分. 箱体的前后面为 2mm 厚的石英玻璃板, 两个侧面为有机玻璃块, 箱体的上下盖由两块加热器构成, 箱体的空腔大小为 $60 \times 3 \times 38 (\text{mm}^3)$. 加热器由铜块和插在铜块中的两个电烙铁芯构成, 加热器的两端接到可调压电源上, 通过调节所加电压的大小, 可以控制上下液面的温度. 在箱体侧面的有机玻璃上等间隔地插入了 5 个铜-康铜热电偶(其顺序分别用 No. 1- No. 5 表示), 用于监控流场中的温度.

在上面的铜块中间位置开有 0.2mm 宽的毛细缝, 毛细缝通过软胶管与一注射器相连. 当箱体内存满实验流体时, 可以用注射器在实验流体上液面注入适当大小的柱状气泡. 当从上面加热下面冷却时, 在气-液界面上就存在着温度梯度场, 而这温度梯度场将造成气-液界面上表面张力的不均匀, 从而形成表面张力驱动流, 也即热毛细对流.

实验装置示意图如图 2 所示. 采用白光在斜后方照明, 用 SONY CCD-TR750E 型摄像机, 在箱体正前方对热毛细对流进行实时记录. 实验时, 在液体中掺入 0.1% 的微胶囊液晶粒子.

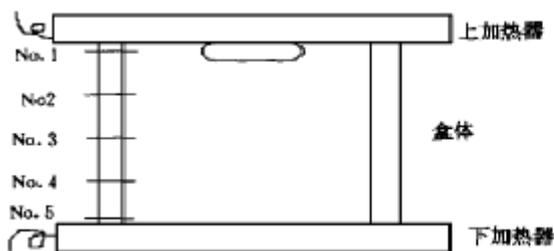


图1 模拟装置示意图

Fig. 1 Simulation setting

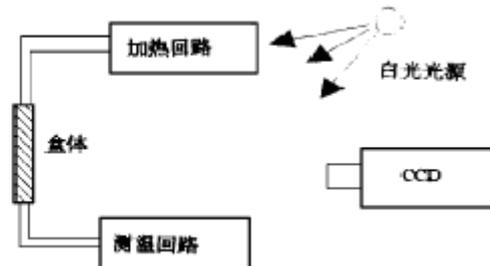


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental arrangement

5 模拟实验及结果

该实验以硅油作流体, 示踪粒子为 BM/R294W/S-33 液晶. 通过改变温度梯度, 研究了

热毛细对流从发生、发展直至振荡的全过程,并用改进的互相关算法,算出了不同温度梯度时的热毛细对流速度场。

实验得出了一系列的结果,下面仅给出部分典型的实验分析结果。图中 T_1 表示上液面处 (No. 1 热电偶) 的温度, $\Delta T/\Delta y$ 是 No. 1 与 No. 2 两个热电偶之间的平均温度梯度。

图 3~ 图 6 分别是硅油在不同温度梯度时的热毛细对流速度场矢量图。实验结果表明,当 $\Delta T/\Delta y = 0.50^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时,在气泡表面附近的液体中首先出现了微弱的热毛细对流;随着 $\Delta T/\Delta y$ 的增加,热毛细对流的速度逐渐增大,对流范围也逐步扩大。当 $\Delta T/\Delta y$ 达到 $4.5^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时,对流出现了紊乱的现象,最大速度也开始下降。

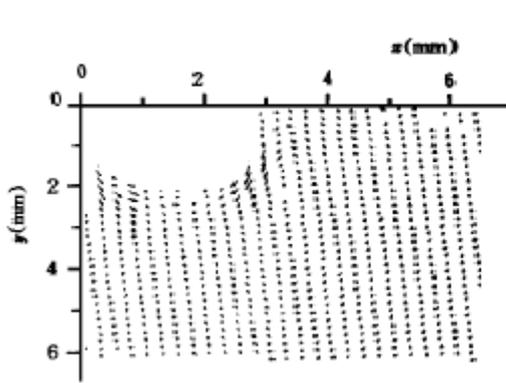


图 3 $T_1 = 41.7^\circ\text{C}$, $\Delta T/\Delta y = 1.05^\circ\text{C}/\text{mm}$
 $V_{\max} = 65.6\mu\text{m}/\text{s}$

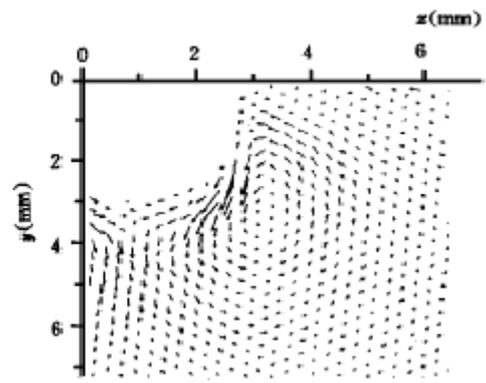


图 4 $T_1 = 55.1^\circ\text{C}$, $\Delta T/\Delta y = 1.94^\circ\text{C}/\text{mm}$
 $V_{\max} = 114.2\mu\text{m}/\text{s}$

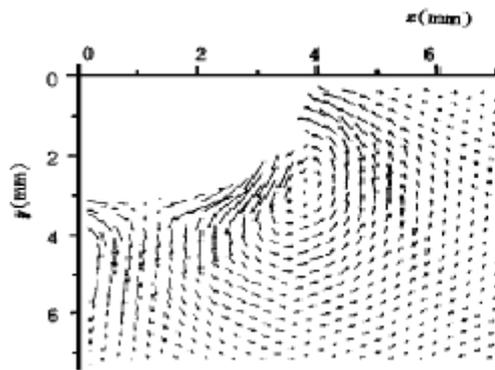


图 5 $T_1 = 67.6^\circ\text{C}$, $\Delta T/\Delta y = 2.72^\circ\text{C}/\text{mm}$
 $V_{\max} = 180.7\mu\text{m}/\text{s}$

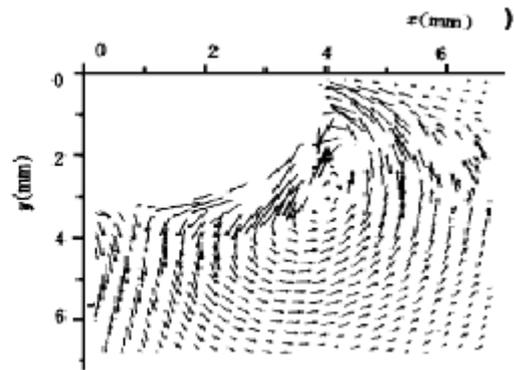


图 6 $T_1 = 81.5^\circ\text{C}$, $\Delta T/\Delta y = 3.70^\circ\text{C}/\text{mm}$
 $V_{\max} = 200.2\mu\text{m}/\text{s}$

6 结论和讨论

本文的研究结果表明,利用液晶微胶囊粒子作示踪剂,借助录相 PIV 技术,可以精确地测量流场的速度分布。该技术也可以应用于太空流体物理实验研究,用微型摄录机记录下实验全过程的粒子图像,回地面进行分析处理。由于互相关算法计算工作量大,计算速度慢,在太空直接算出速度信息有困难。

热毛细对流区域小,且是一个漩涡,这给利用互相关算法测量速度分布增加了很大的难

度。但利用本文提出的改进互相关算法,成功地计算出了热毛细对流的速度场,而且计算速度快,测试精度高,这表明该算法具有很强的适应性。

我们的研究结果还表明,当气泡表面的温度梯度由小逐渐增大时,热毛细对流的速度不断增加,对流的区域范围也逐步扩大。而当 $\Delta T/\Delta y$ 达到某一临界值后,对流出现了紊乱现象。

实验结果的误差主要有两个来源,一是由粒子的跟随性引起的误差,一是互相关计算时引进的误差。

对于前者,由于液晶粒子的比重与硅油很接近,且能很好地混合于硅油中,因而由跟随性引起的误差很小,在本实验中可以忽略。

至于互相关计算引进的误差,主要是由图像的细化所引起的,这是因为一方面不可能无限地细化,细化到真实的位移所对应的精度;另一方面,在细化过程中插值又会引入一定的误差。

根据我们的模拟计算,在本文的计算条件下的,精度不低于 $1/8\text{pixel}$ 。

参加本文工作的还有关锷和张曦同志,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Wozniak G et al. Buoyancy and Thermocapillary Flow Analysis by the Combined Use of Liquid Crystals and PIV. *Exp. Fluids*, 1994, 17: 141- 146
- 2 鞠向阳,伍小平,何世平. 用胶囊式液晶粒子同时测量流场的温度和速度. *力学学报*, 1996, 28(4): 503- 506
- 3 阿燕,唐泽眉,胡文瑞. 半浮区液桥热毛细对流横向定常速度场测量. 第三届中国微重力科学学术会议论文集,江西庐山, 1997, 37- 39

A Study on the Measurement of Thermocapillary Flow Velocity Field

FENG Chuanyu HE Shiping

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract To study the flow velocity under microgravity condition, as a simulation, the surface tension driven flow around the gas bubbles in the liquid near a heated solid wall is investigated. The flow velocity field is examined by particle image velocimetry technique.

Key words thermocapillary, particle image velocimetry, cross-correlation method