



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109187278 B

(45)授权公告日 2020.01.17

(21)申请号 201810875984.6

(22)申请日 2018.08.03

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109187278 A

(43)申请公布日 2019.01.11

(73)专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 雷达 林緬 江文滨 曹高辉

徐志朋 李曹雄 姬莉莉

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.

G01N 13/00(2006.01)

(56)对比文件

刘中春.微尺度流动界面现象及其流动.《水动力学研究与进展》.2006,第21卷(第3期),

审查员 甄卫萌

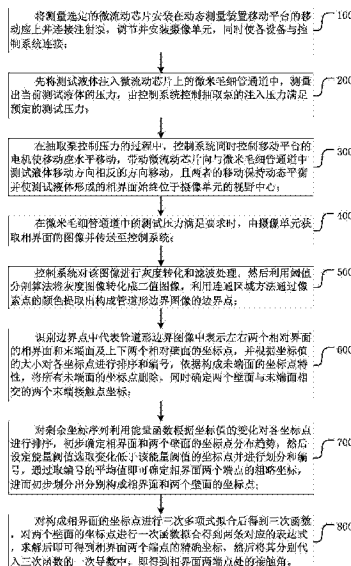
权利要求书5页 说明书15页 附图7页

(54)发明名称

一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法

(57)摘要

本发明提供了一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法,本发明利用动态测试装置实现了对微米尺度的毛细管导内的气液两相流动过程的压力或流速的控制,首次实现了在低毛细管数、低邦德数状态下的动态接触角测量。第一次采用了基于图像处理方法的接触角、相界面速度的测量,极大提高了数据处理的效率及测量精度。本发明还提出了多种控制两相流动过程压力控制、电动平台速度控制的算法,提高了实际操作时的灵活性以便满足各种工况的需求。



1. 一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,将测量选定的微流动芯片安装在动态测量装置移动平台的移动座上并连接注射泵,调节并安装摄像单元,同时使各设备与控制系统连接;

步骤200,先将测试液体注入微流动芯片上的微米毛细管通道中,测量出当前测试液体的压力,由控制系统控制抽取泵的注入压力满足预定的测试压力;

步骤300,在抽取泵控制压力的过程中,控制系统同时控制移动平台的电机使移动座水平移动,带动微流动芯片向与微米毛细管通道中测试液体移动方向相反的方向移动,且两者的移动保持动态平衡并使测试液体形成的相界面始终位于摄像单元的视野中心;

步骤400,在微米毛细管通道中的测试压力满足要求时,由摄像单元获取相界面的图像并传送至控制系统;

步骤500,控制系统对该图像进行灰度转化和滤波处理,然后利用阈值分割算法将灰度图像转化成二值图像,利用连通区域方法通过像素点的颜色提取出构成管道形边界图像的边界点;

步骤600,识别边界点中代表管道形边界图像中表示左右两个相对界面的相界面和末端面及上下两个相对壁面的坐标点,并根据坐标值的大小对各坐标点进行排序和编号,依据构成末端面的坐标点特性,将所有末端面的坐标点删除,同时确定两个壁面与末端面相交的两个末端接触点坐标;

由于末端面为一条竖线,因此其横坐标值变化一致或在一定范围内,而纵坐标变化为渐增,根据所有坐标点中横、纵坐标值的大小对各坐标点进行从小到大的排序,选择横坐标值变化在预定范围内的坐标点全部删除,即删除了末端面;

步骤700,对剩余坐标序列利用能量函数根据坐标值的变化对各坐标点进行排序,初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势,然后设定能量阈值选取变化低于该能量阈值的坐标点并进行划分和编号,通过取编号的平均值即可确定相界面两个端点的粗略坐标,进而初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点;

步骤800,对构成相界面的坐标点进行三次多项式拟合后得到三次函数,对两个壁面的坐标点进行一次函数拟合得到两条对应的表达式,求解后即可得到相界面两个端点的精确坐标,然后将其分别代入三次函数的一次导数中,即得到相界面两端点处的接触角。

2. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述步骤500中提取出构成管道形边界图像的边界点的具体处理步骤如下:

步骤510,将二值图像中黑色区域的像素点记为数值0,白色区域的像素点记为数值1;

步骤520,将所有像素值 $I(x_i, y_i) = 1$ 的坐标点同其相邻的像素点进行“与”运算;若运算结果为1则将像素点标记为内部点,若运算结果为0则将该像素点标记为边界点;

步骤530,运算结束后将所有边界点提出来,即得到所有构成管道形边界图像的边界点。

3. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述步骤600中,初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点的过程如下:

步骤610,从任意一个坐标点 $(x_1^B, y_1^B)$ 开始,将另一个坐标点 $(x_2^B, y_2^B)$ 以 $x_2^B \geq x_1^B$ 或者 $y_2^B \geq y_1^B$ 的条件相对坐标点 $(x_1^B, y_1^B)$ 进行排列,待所有的坐标点排列成一个序列

$(x_1^B, y_1^B)$ 、 $(x_2^B, y_2^B)$ 、...、 $(x_k^B, y_k^B)$ 后,设定一个能量阈值 $E_T$ ,其取值范围为 $1 \leq E_T \leq m$ ,在所有坐标点中搜索满足 $E_i \leq E_T$ 的所有坐标点,得到由两段连续编号坐标点组成的区域序列;

步骤620,将区域序列中编号最小者作为上壁面的一个端点,其与对应的上壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成上壁面的坐标点编号范围;

将区域序列编号中最大者作为下壁面的一个端点,其与对应的下壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成下壁面的坐标点编号范围;

对区域序列中所有编号求和后取平均值,则第一个小于平均值的编号为相界面的一个端点,而第一个大于平均值的编号则为相界面的另一个端点,两个端点之间的坐标点则为形成相界面的坐标点编号范围。

4. 根据权利要求3所述的接触角测量方法,其特征在于,

还包括对坐标点排序时的顺序修正程序:

设置边界点序列的能量函数,由两个壁面的末端接触点坐标之间的区域且根据两个末端接触点坐标的纵坐标的差值确定极大值,即 $E_{\max} = |y_D - y_C|$ ,再通过寻找单个最大值算法确定 $E_i = E_{\max}$ 的坐标编号,设其编号为 $i = i_{\max}$ ,将坐标点序列中的第一坐标点分别与能量函数进行循环位移,将编号 $i_{\max}$ 变成编号0,仍然是 $n+1$ 个坐标点,从0开始编号,新的编号 $j$ 和原编号 $i$ 的关系为:

$$\begin{cases} j = i - i_{\max} & i_{\max} \leq i \leq n+1 \\ j = i_{\max} + i & 0 \leq i \leq i_{\max} - 1 \end{cases}$$

通过对排序的坐标点进行循环位移方式调整排序后,使得随着编号的递增,代表管道形边界图像的四个边界点依次出现。

5. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述步骤700中,所述初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势的过程如下:

将坐标点序列上的任意一个坐标点 $(x_i, y_i)$ ,与其在序列上相距 $m$ 位的坐标点 $(x_{i+m}, y_{i+m})$ 按照下式进行比较:

$$E_i = ||x_i - x_{i+m}| - |y_i - y_{i+m}||$$

可得到相界面上的坐标点在 $x$ 方向上的变化较弱,在 $y$ 方向上变化较强,因此 $E_i \approx m$ ;而两个壁面上的坐标在 $x$ 方向上的变化较强,在 $y$ 方向上变化较弱,会有 $E_i \approx m$ ;而从两个壁面过渡到相界面的这部分边界点其在 $x$ 方向和 $y$ 方向上的变化基本相同 $E_i \approx 0$ 。

6. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述步骤800中,得到相界面两个端点的精确坐标的步骤如下:

步骤810,设构成相界面的第一个坐标点为 $P$ ,最后一个坐标点为 $Q$ ,用 $P$ 至 $Q$ 范围内所有坐标点进行三次多项式拟合,以横坐标 $x$ 为因变量,纵坐标 $y$ 为自变量,拟合得到弯月面形状的三次函数 $x = f_{PQ}(y)$ ;

步骤820,设构成上壁面的第一个坐标点为 $D$ ,最后一个坐标点为 $O$ ;构成下壁面的第一个坐标点为 $R$ ,最后一个坐标点为 $C$ ;采用一次函数拟合,以横坐标 $y$ 为因变量,纵坐标 $x$ 为自变量,得到两条直线的表达式 $y = k_{DO}x + c_{DO}$ 及 $y = k_{RC}x + c_{RC}$ ,其中 $k_{DO}$ 和 $k_{RC}$ 为直线的斜率;

步骤830,根据拟合得到的三次函数及两条直线表达式,求解以下两个方程组;

$$\begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{DO}}{k_{DO}} \Rightarrow (x_A, y_A) \\ y = k_{DO}x + c_{DO} \end{cases} \quad \begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{RC}}{k_{RC}} \Rightarrow (x_B, y_B) \\ y = k_{RC}x + c_{RC} \end{cases}$$

即得到相界面上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及相界相下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 。

7. 根据权利要求6所述的接触角测量方法,其特征在于,获得接触角的过程如下:

根据相界面的拟合函数 $x = f_{PQ}(y)$ ,将上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 分别代入 $f_{PQ}$ 的一次导数中即可计算出接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ :

$$\theta_A = \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right]$$

$$\theta_B = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right]$$

8. 根据权利要求7所述的接触角测量方法,其特征在于,还包括倾斜修正程序:

设两个壁面的倾斜角度为上壁面和下壁面倾斜角度的平均值,即 $(\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2$ ;则修正后的接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ 为:

$$\theta_A = \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right] - (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2$$

$$\theta_B = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right] + (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2$$

9. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,所述动态测量装置包括:微流动芯片,用于供测试液体通过,设置有微米毛细管通道;

压力控制管路,包括通过管路与所述微流动芯片连接的注射泵,在管路上安装有检测压力的压力传感器;

移动平台,包括作为支撑的基座,和安装在基座上的丝杆,通过螺纹套在丝杆上沿直线移动的移动座,驱动丝杆转动的电机,所述微流动芯片安装在移动座上;

摄像单元,设置在所述微流动芯片的上方,用于获取测试液体的相界面图像并输出;

控制系统,根据所述压力传感器的信息控制所述注射泵的注射过程,同时通过控制所述电机使所述微流动芯片的水平移动速度与所述微流动芯片内的测试液体移动速度相同且方向相反,以使测试液体形成的相界面始终保持在所述摄像单元的视野范围内。

10. 根据权利要求9所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述微流动芯片为透明材料制成的板状结构,一面上设置有内凹的凹槽,在所述凹槽上盖有贴合所述凹槽上表面的盖板,所述微米毛细管通道设置在所述凹槽内且以阵列方式设置有多个,每个所述微米毛细管通道的两端分别设置有进液区和出液区;所述微米毛细管通道的宽度为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,所述进液区和所述出液区的宽度至少为所述微米毛细管通道宽度的 $15 \sim 20$ 倍。

11. 根据权利要求10所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述进液区和所述出液区为水滴形且水滴形的尖端与所述微米毛细管通道连通,在所述进液区的中间设置有底部开口的进液孔,在所述出液区的中间设置有底部开口的出液

孔;在所述进液区和所述出液区内分别均匀地设置有多根垂直的防止微米塌陷的立柱,所述立柱以环形的方式逐圈布置,且中间留出所述进液孔和所述出液孔的设置空间。

12. 根据权利要求11所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述移动座的上表面安装有两个相对间隔且垂直的支撑板,在两个所述支撑板的相对面上分别安装有固定所述微流动芯片的固定台;在所述移动座上设置有多个安装孔,所述支撑板通过L形折片利用所述移动座上的安装孔与所述移动座固定,在所述支撑板上设置有垂直于放置后所述微流动芯片的滑动槽,所述固定台通过所述滑动槽可调节的安装在该所述支撑板上。

13. 根据权利要求12所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述固定台为条状的支撑条,或为设置有夹持所述微流动芯片侧边的凹槽的夹持条;在两个所述支撑板之间安装有为所述微流动芯片照明的光源。

14. 根据权利要求12所述的接触角测量方法,其特征在于,

在所述移动座的一侧通过L形折片安装有带三通的透明接头,其中两个通孔为水平且相对设置的直通,另一个通孔为垂直于两个直通中部的竖通,在竖通上通过螺纹安装有与所述控制系统连接的压力传感器,在两个直通过上通过螺纹连接有鲁尔接头,所述注射泵通过柔性软管与所述鲁尔接头连接,另一直通的鲁尔接头通过柔性软管与所述进液区的进液孔连接,所述出液区的出液孔通过柔性软管与接水盒连接。

15. 根据权利要求1所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述控制系统控制所述注射泵注压包括如下方式:

设微米毛细管道入口的压力值为 $P_d$ ,微米毛细管通道内的希望压力值为 $P_t$ ,注射泵的注射流量为 $Q$ ,则:

一、人工控制,当 $P_d < P_t$ ,则增加 $Q$ ,使 $P_d$ 上升至 $P_t$ ;当 $P_d > P_t$ ,则减小 $Q$ ,使 $P_d$ 减小至 $P_t$ ;

二、比例控制,控制系统给定一个有量纲比例系数 $K_p$ ,设系统为线性响应函数,则:

$$Q = K_p (P_t - P_d);$$

三、理论控制,根据Washburn公式有:

$$P_t = \frac{S^2 \mu x V}{0.5623 A^2} - \frac{2\gamma \cos \theta}{R}$$

式中 $V$ 为相界面速度, $x$ 为测试液体在微米毛细管通道中的长度, $\theta$ 为相界面的接触角, $\mu$ 为测试液体粘度, $S$ 为微米毛细管通道截面边长, $A$ 为微米毛细孔通道截面面积, $R$ 为微米毛细管通道的等效半径, $\gamma$ 为界面张力;

由于 $Q = AV$ ,因此上式可改写为:

$$Q = \frac{0.5623 A^3}{S^2 \mu x} \left( P_t + \frac{2\gamma \cos \theta}{R} \right)$$

根据希望压力值 $P_t$ ,接触角实测值 $\theta$ 和测试液体在微米毛细管通道中的长度 $x$ 直接计算出理想的注射流量 $Q$ ,控制系统根据 $Q$ 则可以实时控制注射泵的流量。

16. 根据权利要求15所述的接触角测量方法,其特征在于,

所述比例控制中的比例系数 $K_p$ 的估算方法如下:

在所述微米毛细管通道中注入有测试液体,在所述注射泵至所述微米毛细管通道之间的管路中注入有密封液体,且所述密封液体与所述测试液体之间留有空气间隔,其中空气

间隔所在位置避开管路的连接处；

设管路中存在的空气体积为 $V_a$ ，密封液体为 $\Delta V$ ，目标压力为 $P_t$ ，对于绝热压缩过程的理想气体有：

$$(P_a + P_d) V_a = (P_a + P_t) (V_1 - \Delta V)$$

式中 $P_a$ 为大气压，造成以上变化需要的时间为 $\tau_p$ ，使管道压力从 $P_d$ 变化到 $P_t$ 的注射流量 $Q$ 则为：

$$Q = \frac{\Delta V}{\tau_p} = \frac{V_a}{\tau_p (P_a + P_t)} (P_t - P_d)$$

上式可以根据 $P_t$ 和 $P_d$ 计算需要的流量 $Q$ ，再由控制系统控制注射泵，进而得到比例系数 $K_p$ 的估算值：

$$K_p = \frac{V_1}{\tau_p (P_a + P_t)} \approx \frac{V_1}{\tau_p P_a}$$

式中 $V_1$ 为管路中空气的体积，可采用入口处管路的总体积； $\tau_p$ 为时间常数，可根据实验要求具体调整； $P_a$ 为大气压， $P_t$ 为目标压力，由于微尺度流动需要的驱动压力 $P_t$ 会远小于大气压，可以忽略 $P_t$ 。

17. 根据权利要求1所述的接触角测量方法，其特征在于，

所述步骤300中，控制所述移动座速度 $v$ 的方式如下：

$$n = f/k$$

其中， $n$ 为电机的转速， $f$ 为控制系统发出的脉冲信号频率， $k$ 为转频比；

$$v = L_p n$$

$L_p$ 为丝杆的螺距。

18. 根据权利要求17所述的接触角测量方法，其特征在于，

还包括对所述移动座的位移记录步骤：设移动座从0时刻到 $t$ 时刻的位移为 $s$ ，根据位移的公式：

$$s = \int_0^t v dt$$

控制从时刻0开始，每隔 $\Delta t$ 的时间间隔记录移动座的速度 $v_i$ ， $i = 1, 2, 3 \dots m$ ，到时刻 $t$ 时总共记录了 $m$ 个速度数据，则该式可以离散成：

$$s = \sum_{i=0}^m v_i \Delta t$$

其中， $\Delta t$ 的取值依赖于实际操作过程中所述移动座的速度是否会有快速的变化。

19. 根据权利要求18所述的接触角测量方法，其特征在于，

使相界面始终自动维持在摄像单元的视野宽度的中间的方法如下：

$$v = - \left[ V + \frac{1}{\tau_v} \left( d - \frac{W_s}{2} \right) \right]$$

其中， $V$ 为实时采集的相界面速度， $d$ 为相界面在摄像单元的视野宽度中距离左边缘的距离， $v$ 为移动座的速度， $\tau_v$ 为时间常数，其物理意义为从将相界面偏离摄像单元的视野中央的距离 $d - W_s/2$ 降到0所需要的时间， $W_s/2$ 为摄像单元的视野中央的水平坐标，而 $W_s$ 为摄像单元的视野宽度。

## 一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及石油强化开采领域,特别是涉及一种利用具备微米毛细管通道的动态测量装置获取气液动态驱替相界面接触角的方法。

### 背景技术

[0002] 单个微米尺度的毛细管中的两相驱替机理是自然环境多孔介质内的两相驱替的基础,多孔介质中的两相驱替发生在众多的工业或自然过程中,比如致密油藏的水驱气、溶解气驱、水驱油等过程,上述的工业过程的特点是粘性力微弱(毛管数的范围 $10^{-10}<Ca<10^{-5}$ ),重力微弱(邦德数 $Bo$ 小于 $10^{-4}$ )。影响驱替过程的关键因素为毛管力,而计算毛管力的关键参数是两相界面与管道壁面的接触角。毛管力的计算按照Young-Laplace公式计算,如下式所示,

$$[0003] \quad P_c = \frac{2\gamma}{R} \cos\theta$$

[0004]  $\gamma$  是界面张力,接触角 $\theta$ 的实际范围为 $0\sim 180^\circ$ ,当 $\theta<90^\circ$ 时 $P_c$ 为正值,当 $\theta>90^\circ$ 时, $P_c$ 为负值,因此毛管力有可能是阻碍驱替的阻力也可能是推进驱替的动力。不仅如此,接触角评估的错误将会使毛管力计算存在严重的误差,从而导致驱替过程的评估失误。因此,获取上述工业条件下的动态接触角信息对于评估整个多孔介质内两相驱替过程至关重要。

[0005] 现已较完善的测量相界面运动状态下(动态)接触角的技术,比如平板浸没法、毛细管液升法。平板浸没法是将一块待测固体平板,以一定速度、以平板垂直于液面的姿态进入或抽离液面,这个过程采用高速摄像机拍摄液面与平板接触点处相界面的接触角,在通过图像测量接触角的大小;或者采用测力计测量平板在这个运动过程中的受力,测算出界面张力反推出接触角。

[0006] 毛细管液升法,是将一根已知半径的毛细管入口垂直伸入湿润相液体的液面下,通过高速摄像机拍摄湿润相液面上升的高度及对应的时间,通过Washburn公式推算出接触角。

[0007] 但是采用上述两种方案都不能够测量毛管数 $10^{-10}<Ca<10^{-5}$ 及邦德数 $Bo<10^{-4}$ 工况下的动态接触角。

[0008] 此外,为了观察到接触角,需要采用高倍数的显微镜获得放大的图像,也就意味着观察的视野小。然而动态的驱替过程意味着相界面会移动一定的距离,因此高倍数的显微镜无法观察到相界面的运动过程。如果采用低倍数的显微镜进行观察,可以观察到相界面位置的变化,却无法观察到相界面,也就无法直接测量接触角。

[0009] 综上所述,现需要一种既可观察清晰观察到相界面的动态测试平台,又可以精确计算出相界面接触角的方法。

### 发明内容

[0010] 本发明的目的是要提供一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法。

[0011] 特别地,本发明提供一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法,包括

如下步骤:

[0012] 步骤100,将测量选定的微流动芯片安装在动态测量装置移动平台的移动座上并连接注射泵,调节并安装摄像单元,同时使各设备与控制系统连接;

[0013] 步骤200,先将测试液体注入微流动芯片上的微米毛细管通道中,测量出当前测试液体的压力,由控制系统控制抽取泵的注入压力满足预定的测试压力;

[0014] 步骤300,在抽取泵控制压力的过程中,控制系统同时控制移动平台的电机使移动座水平移动,带动微流动芯片向与微米毛细管通道中测试液体移动方向相反的方向移动,且两者的移动保持动态平衡并使测试液体形成的相界面始终位于摄像单元的视野中心;

[0015] 步骤400,在微米毛细管通道中的测试压力满足要求时,由摄像单元获取相界面的图像并传送至控制系统;

[0016] 步骤500,控制系统对该图像进行灰度转化和滤波处理,然后利用阈值分割算法将灰度图像转化成二值图像,利用连通区域方法通过像素点的颜色提取出构成管道形边界图像的边界点;

[0017] 步骤600,识别边界点中代表管道形边界图像中表示左右两个相对界面的相界面和末端面及上下两个相对壁面的坐标点,并根据坐标值的大小对各坐标点进行排序和编号,依据构成末端面的坐标点特性,将所有末端面的坐标点删除,同时确定两个壁面与末端面相交的两个末端接触点坐标;

[0018] 步骤700,对剩余坐标序列利用能量函数根据坐标值的变化对各坐标点进行排序,初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势,然后设定能量阈值选取变化低于该能量阈值的坐标点并进行划分和编号,通过取编号的平均值即可确定相界面两个端点的粗略坐标,进而初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点;

[0019] 步骤800,对构成相界面的坐标点进行三次多项式拟合后得到三次函数,对两个壁面的坐标点进行一次函数拟合得到两条对应的表达式,求解后即可得到相界面两个端点的精确坐标,然后将其分别代入三次函数的一次导数中,即得到相界面两端点处的接触角。

[0020] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤500中提取出构成管道形边界图像的边界点的具体处理步骤如下:

[0021] 步骤510,将二值图像中黑色区域的像素点记为数值0,白色区域的像素点记为数值1;

[0022] 步骤520,将所有像素值 $I(x_i, y_i) = 1$ 的坐标点同其相邻的像素点进行“与”运算;若运算结果为1则将像素点标记为内部点,若运算结果为0则将该像素点标记为边界点;

[0023] 步骤530,运算结束后将所有边界点提出来,即得到所有构成管道形边界图像的边界点。

[0024] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤600中,构成末端面的坐标点特性如下:

[0025] 由于末端面为一条竖线,因此其横坐标值变化一致或在一定范围内,而纵坐标变化为渐增,根据所有坐标点中横、纵坐标值的大小对各坐标点进行从小到大的排序,选择横坐标值变化在预定范围内的坐标点全部删除,即删除了末端面。

[0026] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤600中,初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点的过程如下:

[0027] 步骤610,从任意一个坐标点 $(x_1^B, y_1^B)$ 开始,将另一个坐标点 $(x_2^B, y_2^B)$ 以 $x_2^B \geq x_1^B$ 或者



$y_2^B \geq y_1^B$  的条件相对坐标点  $(x_1^B, y_1^B)$  进行排列,待所有的坐标点排列成一个序列  $(x_1^B, y_1^B), (x_2^B, y_2^B), \dots, (x_k^B, y_k^B)$  后,设定一个能量阈值  $E_T$ ,其取值范围为  $1 \leq E_T \leq m$ ,在所有坐标点中搜索满足  $E_i \leq E_T$  的所有坐标点,得到由两段连续编号坐标点组成的区域序列;

[0028] 步骤620,将区域序列中编号最小者作为上壁面的一个端点,其与对应的上壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成上壁面的坐标点编号范围;

[0029] 将区域序列编号中最大者作为下壁面的一个端点,其与对应的下壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成下壁面的坐标点编号范围;

[0030] 对区域序列中所有编号求和后取平均值,则第一个小于平均值的编号为相界面的一个端点,而第一个大于平均值的编号则为相界面的另一个端点,两个端点之间的坐标点则为形成相界面的坐标点编号范围。

[0031] 在本发明的一个实施方式中,还包括对坐标点排序时的顺序修正程序:

[0032] 设置边界点序列的能量函数,由两个壁面的末端接触点坐标之间的区域且根据两个末端接触点坐标的纵坐标的差值确定极大值,即  $E_{\max} = |y_D - y_C|$ ,再通过寻找单个最大值算法确定  $E_i = E_{\max}$  的坐标编号,设其编号为  $i = i_{\max}$ ,将坐标点序列中的第一坐标点分别与能量函数进行循环位移,将编号  $i_{\max}$  变成编号0,仍然是  $n+1$  个坐标点,从0开始编号,新的编号  $j$  和原编号  $i$  的关系为:

$$[0033] \quad \begin{cases} j = i - i_{\max} & i_{\max} \leq i \leq n+1 \\ j = i_{\max} + i & 0 \leq i \leq i_{\max} - 1 \end{cases}$$

[0034] 通过对排序的坐标点进行循环位移方式调整排序后,使得随着编号的递增,代表管道形边界图像的四个边界点依次出现。

[0035] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤700中,所述初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势的过程如下:

[0036] 将坐标点序列上的任意一个坐标点  $(x_i, y_i)$ ,与其在序列上相距  $m$  位的坐标点  $(x_{i+m}, y_{i+m})$  按照下式进行比较:

$$[0037] \quad E_i = ||x_i - x_{i+m}| - |y_i - y_{i+m}||$$

[0038] 可得到相界面上的坐标点在  $x$  方向上的变化较弱,在  $y$  方向上变化较强,因此  $E_i \approx m$ ;而两个壁面上的坐标在  $x$  方向上的变化较强,在  $y$  方向上变化较弱,会有  $E_i \approx 0$ ;而从两个壁面过渡到相界面的这部分边界点其在  $x$  方向和  $y$  方向上的变化基本相同  $E_i \approx 0$ 。

[0039] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤800中,得到相界面两个端点的精确坐标的步骤如下:

[0040] 步骤810,设构成相界面的第一个坐标点为  $P$ ,最后一个坐标点为  $Q$ ,用  $P$  至  $Q$  范围内所有坐标点进行三次多项式拟合,以横坐标  $x$  为因变量,纵坐标  $y$  为自变量,拟合得到弯月面形状的三次函数  $x = f_{PQ}(y)$ ;

[0041] 步骤820,设构成上壁面的第一个坐标点为  $D$ ,最后一个坐标点为  $O$ ;构成下壁面的第一个坐标点为  $R$ ,最后一个坐标点为  $C$ ;采用一次函数拟合,以横坐标  $y$  为因变量,纵坐标  $x$  为自变量,得到两条直线的表达式  $y = k_{DO}x + c_{DO}$  及  $y = k_{RC}x + c_{RC}$ ,其中  $k_{DO}$  和  $k_{RC}$  为直线的斜率;

[0042] 步骤830,根据拟合得到的三次函数及两条直线表达式,求解以下两个方程组;

$$[0043] \quad \begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{DO}}{k_{DO}} \Rightarrow (x_A, y_A) \\ y = k_{DO}x + c_{DO} \end{cases} \quad \begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{RC}}{k_{RC}} \Rightarrow (x_B, y_B) \\ y = k_{RC}x + c_{RC} \end{cases}$$

[0044] 即得到相界面上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及相界相下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 。

[0045] 在本发明的一个实施方式中,获得接触角的过程如下:

[0046] 根据相界面的拟合函数 $x = f_{PQ}(y)$ ,将上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 分别代入 $f_{PQ}$ 的一次导数中即可计算出接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ :

$$[0047] \quad \begin{aligned} \theta_A &= \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right] \\ \theta_B &= \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right] \end{aligned}$$

[0048] 在本发明的一个实施方式中,还包括倾斜修正程序:

[0049] 设两个壁面的倾斜角度为上壁面和下壁面倾斜角度的平均值,即 $(\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2$ ;则修正后的接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ 为:

$$[0050] \quad \begin{aligned} \theta_A &= \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right] - (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2 \\ \theta_B &= \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right] + (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2 \end{aligned}$$

[0051] 在本发明的一个实施方式中,所述动态测量装置包括:

[0052] 微流动芯片,用于供测试液体通过,设置有微米毛细管通道;

[0053] 压力控制管路,包括通过管路与所述微流动芯片连接的注射泵,在管路上安装有检测压力的压力传感器;

[0054] 移动平台,包括作为支撑的基座,和安装在基座上的丝杆,通过螺纹套在丝杆上沿直线移动的移动座,驱动丝杆转动的电机,所述微流动芯片安装在移动座上;

[0055] 摄像单元,设置在所述微流动芯片的上方,用于获取测试液体的相界面图像并输出;

[0056] 控制系统,根据所述压力传感器的信息控制所述注射泵的注射过程,同时通过控制所述电机使所述微流动芯片的水平移动速度与所述微流动芯片内的测试液体移动速度相同且方向相反,以使测试液体形成的相界面始终保持在所述摄像单元的视野范围内。

[0057] 在本发明的一个实施方式中,所述微流动芯片为透明材料制成的板状结构,一面上设置有内凹的凹槽,在所述凹槽上盖有贴合所述凹槽上表面的盖板,所述微米毛细管通道设置在所述凹槽内且以阵列方式设置有多个,每个所述微米毛细管通道的两端分别设置有进液区和出液区;所述微米毛细管通道的宽度为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,所述进液区和所述出液区的宽度至少为所述微米毛细管通道宽度的 $15 \sim 20$ 倍。

[0058] 在本发明的一个实施方式中,所述进液区和所述出液区为水滴形且水滴形的尖端与所述微米毛细管通道连通,在所述进液区的中间设置有底部开口的进液孔,在所述出液区的中间设置有底部开口的出液孔;在所述进液区和所述出液区内分别均匀地设置有多根垂直的防止微米塌陷的立柱,所述立柱以环形的方式逐圈布置,且中间留出所述进液孔和所述出液孔的设置空间。

[0059] 在本发明的一个实施方式中,所述移动座的上表面安装有两个相对间隔且垂直的支撑板,在两个所述支撑板的相对面上分别安装有固定所述微流动芯片的固定台;在所述移动座上设置有多个安装孔,所述支撑板通过L形折片利用所述移动座上的安装孔与所述移动座固定,在所述支撑板上设置有垂直于放置后所述微流动芯片的滑动槽,所述固定台通过所述滑动槽可调节的安装在所述支撑板上。

[0060] 在本发明的一个实施方式中,所述固定台为条状的支撑条,或为设置有夹持所述微流动芯片侧边的凹槽的夹持条;在两个所述支撑板之间安装有为所述微流动芯片照明的光源。

[0061] 在本发明的一个实施方式中,在所述移动座的一侧通过L形折片安装有带三通的透明接头,其中两个通孔为水平且相对设置的直通,另一个通孔为垂直于两个直通中部的竖通,在竖通上通过螺纹安装有与所述控制系统连接的压力传感器,在两个直通上通过螺纹连接有鲁尔接头,所述注射泵通过柔性软管与所述鲁尔接头连接,另一直通的鲁尔接头通过柔性软管与所述进液区的进液孔连接,所述出液区的出液孔通过柔性软管与接水盒连接。

[0062] 在本发明的一个实施方式中,所述控制系统控制所述注射泵注压包括如下方式:

[0063] 设微米毛细管道入口的压力值为 $P_a$ ,微米毛细管通道内的希望压力值为 $P_t$ ,注射泵的注射流量为 $Q$ ,则:

[0064] 一、人工控制,当 $P_a < P_t$ ,则增加 $Q$ ,使 $P_a$ 上升至 $P_t$ ;当 $P_a > P_t$ ,则减小 $Q$ ,使 $P_a$ 减小至 $P_t$ ;

[0065] 二、比例控制,控制系统给定一个有量纲比例系数 $K_p$ ,设系统为线性响应函数,则:

[0066]  $Q = K_p (P_t - P_a)$ ;

[0067] 三、理论控制,根据Washburn公式有:

$$[0068] \quad P_t = \frac{S^2 \mu x V}{0.5623 A^2} - \frac{2\gamma}{R} \cos \theta$$

[0069] 式中 $V$ 为相界面速度, $x$ 为测试液体在微米毛细管通道中的长度, $\theta$ 为相界面的接触角, $\mu$ 为测试液体粘度, $S$ 为微米毛细管通道截面边长, $A$ 为微米毛细孔通道截面面积, $R$ 为微米毛细管通道的等效半径, $\gamma$ 为界面张力;

[0070] 由于 $Q = AV$ ,因此上式可改写为:

$$[0071] \quad Q = \frac{0.5623 A^3}{S^2 \mu x} \left( P_t + \frac{2\gamma}{R} \cos \theta \right)$$

[0072] 根据希望压力值 $P_t$ ,接触角实测值 $\theta$ 和测试液体在微米毛细管通道中的长度 $x$ 直接计算出理想的注射流量 $Q$ ,控制系统根据 $Q$ 则可以实时控制注射泵的流量。

[0073] 在本发明的一个实施方式中,所述比例控制中的比例系数 $K_p$ 的估算方法如下:

[0074] 在所述微米毛细管通道中注入有测试液体,在所述注射泵至所述微米毛细管通道之间的管路中注入有密封液体,且所述密封液体与所述测试液体之间留有空气间隔,其中空气间隔所在位置避开管路的连接处;

[0075] 设管路中存在的空气体积为 $V_a$ ,密封液体为 $\Delta V$ ,目标压力为 $P_t$ ,对于绝热压缩过程的理想气体有:

$$[0076] \quad (P_a + P_d) V_a = (P_a + P_t) (V_1 - \Delta V)$$

[0077] 式中 $P_a$ 为大气压,造成以上变化需要的时间为 $\tau_p$ ,使管道压力从 $P_a$ 变化到 $P_t$ 的注射

流量Q则为:

$$[0078] \quad Q = \frac{\Delta V}{\tau_p} = \frac{V_a}{\tau_p (P_a + P_t)} (P_t - P_d)$$

[0079] 上式可以根据 $P_t$ 和 $P_d$ 计算需要的流量Q,再由控制系统控制注射泵,进而得到比例系数 $K_p$ 的估算值:

$$[0080] \quad K_p = \frac{V_1}{\tau_p (P_a + P_t)} \approx \frac{V_1}{\tau_p P_a}$$

[0081] 式中 $V_1$ 为管路中空气的体积,可采用入口处管路的总体积; $\tau_p$ 为时间常数,可根据实验要求具体调整; $P_a$ 为大气压, $P_t$ 为目标压力,由于微尺度流动需要的驱动压力 $P_t$ 会远小于大气压,可以忽略 $P_t$ 。

[0082] 在本发明的一个实施方式中,所述步骤300中,控制所述移动座速度 $v$ 的方式如下:

$$[0083] \quad n = f/k$$

[0084] 其中, $n$ 为电机的转速, $f$ 为控制系统发出的脉冲信号频率, $k$ 为转频比;

$$[0085] \quad v = L_p n$$

[0086]  $L_p$ 为丝杆的螺距。

[0087] 在本发明的一个实施方式中,还包括对所述移动座的位移记录步骤:设移动座从0时刻到 $t$ 时刻的位移为 $s$ ,根据位移的公式:

$$[0088] \quad s = \int_0^t v dt$$

[0089] 控制从时刻0开始,每隔 $\Delta t$ 的时间间隔记录移动座的速度 $v_i$ , $i=1,2,3 \dots m$ ,到时刻 $t$ 时总共记录了 $m$ 个速度数据,则该式可以离散成:

$$[0090] \quad s = \sum_{i=0}^m v_i \Delta t$$

[0091] 其中, $\Delta t$ 的取值依赖于实际操作过程中所述移动座的速度是否会有快速的变化。

[0092] 在本发明的一个实施方式中,使相界面始终自动维持在摄像单元的视野宽度的中间的方法如下:

$$[0093] \quad v = - \left[ V + \frac{1}{\tau_v} \left( d - \frac{W_s}{2} \right) \right]$$

[0094] 其中, $V$ 为实时采集的相界面速度, $d$ 为相界面在摄像单元的视野宽度中距离左边缘的距离, $v$ 为移动座的速度, $\tau_v$ 为时间常数,其物理意义为从将相界面偏离摄像单元的视野中央的距离 $d - W_s/2$ 降到0所需要的时间, $W_s/2$ 为摄像单元的视野中央的水平坐标,而 $W_s$ 为摄像单元的视野宽度。

[0095] 本发明实现了对微米尺度的毛细管导内的气液两相流动过程的压力或流速的控制,首次实现了在低毛管数、低邦德数状态下的动态接触角测量。第一次采用了基于图像处理方法的接触角、相界面速度的测量,极大提高了数据处理的效率及测量精度。本发明还提出了多种控制两相流动过程压力控制、电动平台速度控制的算法,提高了实际操作时的灵活性以便满足各种工况的需求。

[0096] 本发明的优点在于鲁棒性强,测量结果稳定,具有较强容错性,对于质量不好的图像也能提供准确的测量结果;采用该计算方法编程简单,程序运行效率高,采用常规处理器

处理一张 $2300 \times 1730$ 像素的图片耗时小于1s。

### 附图说明

- [0097] 图1是本发明一个实施方式的接触角测量方法流程示意图；
- [0098] 图2是本发明一个实施方式的动态测试装置的结构示意图；
- [0099] 图3是本发明一个实施方式的移动平台结构示意图；
- [0100] 图4是微流动芯片的整体结构示意图；
- [0101] 图5是判断任意一个坐标点是否是边界点的示意图；
- [0102] 图6是识别出的形边界图像示意图；
- [0103] 图7是相界面、上下壁面和末端面的示意图；
- [0104] 图8是识别并提出的形边界图像示意图；
- [0105] 图9是形边界序列上的坐标点排列及各个顶点的示意图；
- [0106] 图10是能量函数算法的示意图；
- [0107] 图11循环位移前的坐标点序列示意图；
- [0108] 图12相界面和两个壁面的拟合以及接触点的确定示意图。
- [0109] 图13是拟合相界面的示意图；
- [0110] 图14是微米毛细管的进液区结构示意图；
- [0111] 图15是图3中接头的结构示意图。

### 具体实施方式

[0112] 如图1所示,本发明提供一种微米毛细管通道中气液相界面的接触角测量方法,一般包括如下步骤:

[0113] 步骤100,将测量选定的微流动芯片安装在动态测量装置移动平台的移动座上并连接注射泵,调节并安装摄像单元,同时使各设备与控制系统连接;

[0114] 如图2、3、4所示,本实施方式涉及的动态测量装置一般包括微流动芯片20、压力控制管路40、移动平台30、摄像单元50和控制系统10。

[0115] 该微流动芯片20用于供测试液体通过,设置有微米毛细管通道21;具体的微流动芯片20可以是玻璃、有机材质等制作的板形结构。微米毛细管通道21是气液动态两相驱替发生的场所,其需要具有足够的强度、加工精度和可操作性。根据本实施方式的需要,微米毛细管通道21的特征尺寸在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内,如本实施方式采用的为20、40和 $80 \mu\text{m}$ 分别进行测试。

[0116] 具体的微流动芯片20可以采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料,而微米毛细管通道21则可以采用软刻蚀工艺制作,微米毛细管通道21的加工截面可以为矩形或圆形。本实施方式采用正方形,实验中的条件为:1.刻蚀深度为20微米(即高度为20微米),长度以满足相界面的足够移动距离即可;2.测试液体为交联剂,浓度为10%;3.键和温度为100摄氏度;4.硬化时间为120分钟。工艺要求2、3和4可以保证结构的弹性模量为2000KPa,可满足小于20KPa的实验要求(弹性应变小于1%)。

[0117] 压力控制管路40包括通过管路与微流动芯片20连接的注射泵41,在管路上安装有检测压力的压力传感器42。压力传感器42用于测量注射泵41施加至管路内的压力,即测试

注射泵41注射流量产生的实时压力并传递给控制系统10。注射泵为高精度注射泵,而且在控制系统的控制下实现注射速率的调整。

[0118] 该移动平台30包括作为支撑的基座32,和安装在基座32上的丝杆34,通过螺纹套在丝杆34上沿直线移动的移动座33,驱动丝杆34转动的电机31,微流动芯片20安装在移动座33上。整个移动平台30相当于是一个丝杆结构,通过电机31驱动丝杆34的转动来使移动座33水平移动,进而使微流动芯片20实现水平移动。

[0119] 摄像单元50设置在微流动芯片20的上方,用于获取测试液体在微米毛细管通道21中的相界面图像,然后输出至控制系统10进行接触角等数据分析。摄像单元50可以采用高精度的数码相机。

[0120] 控制系统10可以是一个带有控制程序的计算机,其根据压力传感器37的信息控制注射泵41的注射过程,以调节压力;同时通过控制电机31使微流动芯片20的水平移动速度与微米毛细管通道21内的测试液体移动速度相同且方向相反,以使测试液体形成的相界面始终保持在摄像单元50的视野范围内,既实现高精度观察,又具备足够的观察视野。

[0121] 各设备之间的配合工作过程如下:

[0122] 先将设置好的微流动芯片20水平安装在移动座33上,数码相机与计算机连接后安装在微流动芯片20的正上方,调整好拍摄距离;将相应的测试液体注入微流动芯片20的微米毛细管通道21内,通过计算机对注射泵41的工作过程进行控制,使注入压力相对实验要求的微米毛细管通道21内的预定目标压力达到一致;同时计算机需要控制电机41的转动来使移动座33带动微流动芯片20移动,由于测试液体的相界面会随着注射泵31的压力波动而在微米毛细管通道21内来回移动,影响数码相机的观察;此时,可以控制微流动芯片20相对相界面的移动而同步移动,但每次移动的方向与相界面的移动方向相反,使相界面虽然移动但被动态地限制在数码相机的观察视野内,从而保证既有足够的观察视野又可获取清晰的相界面图像。

[0123] 本实施方式的动态测量装置可以通过相互独立的移动结构和气液两相驱替结构实现气液相界面当前停留位置的自动控制,使显微镜能够始终观察到最合适的相界面图像,提高了实际操作时的灵活性以便满足各种工况的需求。

[0124] 步骤200,先将测试液体注入微流动芯片上的微米毛细管通道中,测量出当前测试液体的压力,由控制系统控制抽取泵的注入压力满足预定的测试压力;

[0125] 当前测试液体的压力可由压力传感器42得到。

[0126] 控制系统10控制注射泵41压力方式包括如下几种:

[0127] 设微米毛细管通道入口的压力值为 $P_a$ ,希望的标准压力值为 $P_t$ ,注射泵的注射流量为 $Q$ ,则:

[0128] 一、人工控制,当微米毛细管通道入口的压力值 $P_a < P_t$ ,则增加注射泵的注射流量 $Q$ ,使压力值 $P_a$ 上升至 $P_t$ ;当 $P_a > P_t$ ,则减小注射流量 $Q$ ,使压力值 $P_a$ 减小至 $P_t$ ;该过程可以完全由实验人员根据当前压力值的变化手动控制。

[0129] 二、比例控制,控制系统给定一个有量纲比例系数 $K_p$ ,设系统为线性响应函数,

[0130]  $Q = K_p (P_t - P_a)$ ;

[0131] 其中,比例控制中的比例系数 $K_p$ 的估算方法如下:

[0132] 假设注射过程液体或者气体没有通过微米毛细管流出,整个系统为封闭绝热的系

统,充当压力传递介质的水是不可压缩液体;由于研究气液驱替过程,系统中会存在一定体积 $V_a$ 的空气(约40~50 $\mu\text{L}$ ),初始压力为 $P_a$ ;注射泵往系统中推进了一定体积的水 $\Delta V$ ,造成空气的体积减少 $\Delta V$ 而压力上升为 $P_t$ ,对于绝热压缩过程的理想气体有:

$$[0133] \quad (P_a+P_d)V_a = (P_a+P_t)(V_1-\Delta V)$$

[0134] 式中 $P_a$ 为大气压,造成以上变化需要的时间为 $\tau_p$ ,使管路压力从 $P_a$ 变化到 $P_t$ 的注射流量则为:

$$[0135] \quad Q = \frac{\Delta V}{\tau_p} = \frac{V_a}{\tau_p(P_a+P_t)}(P_t-P_a)$$

[0136] 上式可以根据目标压力 $P_t$ ,实时压力 $P_a$ 计算需要的流量 $Q$ ,再由控制系统控制注射泵;从上式可以得到比例系数 $K_p$ 的估算值:

$$[0137] \quad K_p = \frac{V_1}{\tau_p(P_a+P_t)} \approx \frac{V_1}{\tau_p P_a}$$

[0138] 式中 $V_1$ 为管路中空气的体积,可使用入口处管路的总体积; $\tau_p$ 为时间常数,可根据实验要求具体调整; $P_a$ 为大气压, $P_t$ 为目标压力,由于微尺度流动需要的驱动压力 $P_t$ 会远小于大气压,可以忽略 $P_t$ 。

[0139] 三、理论控制,由于整个系统的压力损失在于微米毛细管内的两相流动过程,因此可以根据描述微米毛细管中两相流动的基本方程Washburn公式推导得到流量 $Q$ 与目标压力 $P_t$ 之间的关系。根据Washburn公式有:

$$[0140] \quad P_t = \frac{S^2 \mu x V}{0.5623 A^2} - \frac{2\gamma}{R} \cos \theta$$

[0141] 式中 $V$ 为相界面速度, $x$ 为液体在微米毛细管通道中的长度, $\theta$ 为相界面的接触角, $\mu$ 为液体粘度, $S$ 为微米毛细管通道截面边长(这里需要根据截面的形状调整相应系数), $A$ 为微米毛管通道截面面积, $R$ 为微米毛细管通道的等效半径, $\gamma$ 为界面张力;

[0142] 根据体积流量 $Q$ 与相界面速度 $V$ 的关系: $Q=AV$ ,因此上式可改写为:

$$[0143] \quad Q = \frac{0.5623 A^3}{S^2 \mu x} \left( P_t + \frac{2\gamma}{R} \cos \theta \right)$$

[0144] 根据目标压力 $P_t$ ,接触角实测值 $\theta$ 和液体在微米毛细管通道中的长度 $x$ 直接计算出理想的注射流量 $Q$ ,控制系统根据 $Q$ 则可以实时控制注射泵的流量。

[0145] 得到注射流量 $Q$ 后,可以此与电机的转速和移动座的移动速度建立联系,进而则可控制微流动芯片上相界面的位置。

[0146] 步骤300,在抽取泵控制压力的过程中,控制系统同时控制移动平台的电机使移动座水平移动,带动微流动芯片向与微米毛细管通道中测试液体移动方向相反的方向移动,且两者的移动保持动态平衡并使测试液体形成的相界面始终位于摄像单元的视野中心;

[0147] 控制移动座速度 $v$ 的方式如下:

$$[0148] \quad n = f/k$$

[0149] 其中, $n$ 为电机的转速, $f$ 为控制系统发出的脉冲信号频率, $k$ 为转频比;

$$[0150] \quad v = L_p n$$

[0151]  $L_p$ 为丝杆的螺距。由此,移动座的移动速度可由控制系统进行精确控制,电机的控制器可以接受控制方向的电压信号,设比较电压为2.5V,给控制器输入一个高电压(如5V),

则电机将会正转,给控制器输入一个低电压(如1V),则电机将会反转。因此移动座的移动速度 $v$ 和方向都是可以由计算机进行实时控制和记录的。具体移动座往某个方向移动时速度 $v$ 为正数,反之 $v$ 为负数则可以由人为规定。

[0152] 记录移动座的位移对计算相界面的位移和速度很重要,根据上述控制步进电机的思路,设计了如下的移动座位移记录方案:设移动座从0时刻到 $t$ 时刻的位移为 $s$ ,根据位移的公式:

$$[0153] \quad s = \int_0^t v dt$$

[0154] 控制从时刻0开始,每隔 $\Delta t$ 的时间间隔记录移动座的速度 $v_i, i=1, 2, 3 \dots m$ ,到时刻 $t$ 时总共记录了 $m$ 个速度数据,则该式可以离散成:

$$[0155] \quad s = \sum_{i=0}^m v_i \Delta t$$

[0156] 其中, $\Delta t$ 的取值依赖于实际操作过程中所述移动座的速度是否会有快速的变化。只要时间间隔 $\Delta t$ 取得足够小,如10ms~100ms,则可以获得高精度的位移数据。 $\Delta t$ 的取值依赖于实际操作过程中移动座的速度是否会有快速的变化。

[0157] 使相界面始终自动维持在摄像单元的视野宽度的中间的方法如下:

$$[0158] \quad v = - \left[ V + \frac{1}{\tau_v} \left( d - \frac{W_s}{2} \right) \right]$$

[0159] 其中, $V$ 为实时采集的相界面速度, $d$ 为相界面在摄像单元的视野宽度中距离左边缘的距离, $v$ 为移动座的速度, $\tau_v$ 为时间常数,其物理意义为从将相界面偏离摄像单元的视野中央的距离 $d - W_s/2$ 降到0所需要的时间, $W_s/2$ 为摄像单元的视野中央的水平坐标,而 $W_s$ 为摄像单元的视野宽度。

[0160] 自动控制模式下,当相界面以某一个速度 $V$ 偏离视野中央,移动座需要采用大于该速度的反向速度将相界面维持在视野中央,并且当相界面回到视野中央后,移动座的速度应当为 $v = -V$ 。

[0161] 步骤400,在微米毛细管通道中的测试压力满足要求时,由摄像单元获取相界面的图像并传送至控制系统;

[0162] 步骤500,控制系统对该图像进行灰度转化和滤波处理,然后利用阈值分割算法将灰度图像转化成二值图像,利用连通区域方法通过像素点的颜色提取出构成管道形边界图像的边界点;

[0163] 如图6所示,摄像单元获取的无论是彩色图像还是灰度图像,都进行转化,以仅得到反映相界面的微米毛细管通道的图像。

[0164] 图像中的白对应灰度值255,黑对应0,其余不同程度的灰色的灰度值在0和255之间。滤波处理是为了去除图像中像素的噪点、小面积的独立斑块。

[0165] 其中提取出构成管道形边界图像的边界点的具体处理步骤如下:

[0166] 步骤510,将二值图像中黑色区域的像素点记为数值0,白色区域的像素点记为数值1;

[0167] 这里采用阈值分割算法将灰度图像转化成二值(黑白)图像,此时液体区域和固体区域被划分为黑色区域(数值为0),空气所占据的区域为白色区域(数值为1),因此图像中存在两个区域黑色区域及白色区域。



[0168] 步骤520,将所有像素值 $I(x_i, y_i) = 1$ 的坐标点同其相邻的像素点进行“与”运算;若运算结果为1则将像素点标记为内部点,若运算结果为0则将该像素点标记为边界点;

[0169] 如图5所示,这里是通过识别连通区域来提取边界,先将所有像素值 $I(x_i, y_i) = 1$ 的坐标点同其相邻的8个(若在图像边缘则为5个,若在图像四个角落中则为3个)像素点的像素值为1进行“与”运算;若运算结果为1则将像素点标记为内部点,若像素点相邻的8个坐标点中存在一个像素值 $I = 0$ (黑色点)的像素点,则运算的结果为0,该坐标点标记为边界点。

[0170] 步骤530,运算结束后将所有边界点提出来,即得到所有构成管道形边界图像的边界点。如图7、8所示。

[0171] 步骤600,识别边界点中代表管道形边界图像中表示左右两个相对界面的相界面和末端面及上下两个相对壁面的坐标点,并根据坐标值的大小对各坐标点进行排序和编号,依据构成末端面的坐标点特性,将所有末端面的坐标点删除,同时确定两个壁面与末端面相交的两个末端接触点坐标;

[0172] 对提取后各坐标点进行排序的方式如下:从任意一个边界点 $(x_1^B, y_1^B)$ 开始,将另一个边界点 $(x_2^B, y_2^B)$ 排列在 $(x_1^B, y_1^B)$ 之前或之后,排列条件为 $x_2^B \geq x_1^B$ 或者 $y_2^B \geq y_1^B$ ,以此类推,将k个边界点排列成一个序列 $(x_1^B, y_1^B)$ 、 $(x_2^B, y_2^B)$ 、... $(x_k^B, y_k^B)$ ,即获得了构成形边界的所有点的坐标,以方便后续对相界面、接触点和壁面等的识别。

[0173] 这里的编号是指从0开始按1、2、3……的顺序对排序后的坐标点依次进行编号。

[0174] 构成末端面的坐标点特性如下:

[0175] 如图9所示,由于末端面为一条竖线,理论上应该是一条垂直的直线,但实际获取的图像中其可能会产生一定的偏差,因此其横坐标值变化一致或在一定范围内,而纵坐标变化为渐增,根据前面获取的坐标点中横、纵坐标值的大小对各坐标点进行从小到大的排序,选择横坐标值变化在预定范围内的坐标点全部删除,即删除了末端面。

[0176] 本发明中的壁面指显微图像中微毛细管道的内壁,相界面指气体和液体的交界面,接触点指相界面与上下两个壁面的交点,末端面则为与相界面相对的管道末端。具体地,设管道末端的横坐标为 $x = W_s$ ,对于任意边界点 $i$ ,只要满足 $x_i = W_s$ ,则将点 $i$ 从边界点的序列中剔除,则如图所示,线段 $c$ (末端面)会被剔除,而剩余的点中与上壁面(线段 $d$ )和下壁面(线段 $b$ )两端相邻的末端接触点坐标 $D$ 和 $C$ 则可以获得。

[0177] 步骤700,对剩余坐标序列利用能量函数根据坐标值的变化对各坐标点进行排序,初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势,然后设定能量阈值选取变化低于该能量阈值的坐标点并进行划分和编号,通过取编号的平均值即可确定相界面两个端点的粗略坐标,进而初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点;

[0178] 初步确定相界面和两个壁面的坐标点分布趋势的过程如下:

[0179] 设边界点中除去线段 $c$ 之后还剩余 $n+1$ 个像素点,坐标组成的坐标点序列为 $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、... $(x_n, y_n)$ ,在实际图像中,相界面并不是一条光滑的曲线,上壁面和下壁面同样也不是笔直的直线。通过能量函数来计算坐标点的变化趋势,可将相界面和上壁面、下壁面进行粗略区分。

[0180] 将坐标点序列上的任意一个坐标点 $(x_i, y_i)$ ,与其在序列上相距 $m$ 位的坐标点 $(x_{i+m}, y_{i+m})$ 按照下式进行比较:

$$[0181] \quad E_i = ||x_i - x_{i+m}| - |y_i - y_{i+m}||$$

[0182] 可得到相界面上的坐标点在x方向上的变化较弱,在y方向上变化较强,因此 $E_i \approx m$ ;而两个壁面上的坐标在x方向上的变化较强,在y方向上变化较弱,会有 $E_i \approx m$ ;而从两个壁面过渡到相界面的这部分边界点其在x方向和y方向上的变化基本相同 $E_i \approx 0$ 。

[0183] 初步划分出分别构成相界面和两个壁面的坐标点的过程如下:

[0184] 步骤710,从任意一个坐标点 $(x_1^B, y_1^B)$ 开始,将另一个坐标点 $(x_2^B, y_2^B)$ 以 $x_2^B \geq x_1^B$ 或者 $y_2^B \geq y_1^B$ 的条件相对坐标点 $(x_1^B, y_1^B)$ 进行排列,待所有的坐标点排列成一个序列 $(x_1^B, y_1^B)$ 、 $(x_2^B, y_2^B)$ ... $(x_k^B, y_k^B)$ 后,设定一个能量阈值 $E_T$ ,其取值范围为 $1 \leq E_T \leq m$ ,在所有坐标点中搜索满足 $E_i \leq E_T$ 的所有坐标点,得到由两段连续编号坐标点组成的区域序列;

[0185] 比如编号10、11、12、20、21、22中,10、11和12是连续的,20、21和22是连续的,但是12到20是不连续的。

[0186] 步骤720,将区域序列中编号最小者作为上壁面的一个端点,其与对应的上壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成上壁面的坐标点编号范围;

[0187] 将区域序列编号中最大者作为下壁面的一个端点,其与对应的下壁面的末端接触点坐标之间的坐标点为形成下壁面的坐标点编号范围;

[0188] 对区域序列中所有编号求和后取平均值,则第一个小于平均值的编号为相界面的一个端点,而第一个大于平均值的编号则为相界面的另一个端点,两个端点之间的坐标点则为形成相界面的坐标点编号范围。

[0189] 如图10所示,假设这两段连续的区域的首末两个坐标点的编号为总共u个坐标点(如编号分别是10、11、12、20、21、22,此时 $u=6$ );搜索序列中最小值(例子中的编号10),令此点为O点;搜索序列中最大值(例子中的编号22),令此点为R点;将序列所有编号进行求和运算并处以u(在例子中为 $(10+11+12+20+21+22)/6=16$ ),令计算结果为 $\bar{J}$ ;令序列中第一个小于 $\bar{J}$ 的编号为P(例子中的编号12),令第一个大于 $\bar{J}$ 的编号为Q(例子中的编号20)。其中编号P到Q范围内的坐标点是粗略的相界面,而编号D到O范围内的坐标点是粗略的下壁面b,编号R到C范围内的坐标点是粗略的上壁面d。

[0190] 前述得到的坐标点序列不一定按照上壁面右端点(D)-相界面上端点(A)-相界面下端点(B)-下壁面右端点(C)的顺序排列,为了避免保证能按前述方法正确获得点O、P、Q和R,需要在采用循环位移的方式,调整坐标点序列的排序,使得随着编号的递增,关键点D-A-B-C依次出现。具体的对坐标点排序时的顺序修正程序如下:

[0191] 如图11所示,设置边界点序列的能量函数,由两个壁面的末端接触点坐标之间的区域且根据两个末端接触点坐标的纵坐标的差值确定极大值,即 $E_{\max} = |y_D - y_C|$ ,再通过寻找单个最大值算法确定 $E_i = E_{\max}$ 的坐标编号,设其编号为 $i = i_{\max}$ ,将坐标点序列中的第一坐标点分别与能量函数进行循环位移,将编号 $i_{\max}$ 变成编号0,仍然是n+1个坐标点,从0开始编号,新的编号j和原编号i的关系为:

$$[0192] \quad \begin{cases} j = i - i_{\max} & i_{\max} \leq i \leq n+1 \\ j = i_{\max} + i & 0 \leq i \leq i_{\max} - 1 \end{cases}$$

[0193] 通过对排序的坐标点进行循环位移方式调整排序后,使得随着编号的递增,代表

管道形边界图像的四个边界点依次出现。

[0194] 步骤800,对构成相界面的坐标点进行三次多项式拟合后得到三次函数,对两个壁面的坐标点进行一次函数拟和合得到两条对应的表达式,求解后即可得到相界面两个端点的精确坐标,然后将其分别代入三次函数的一次导数中,即得到相界面两 endpoints 处的接触角。

[0195] 如图12所示,得到相界面两个端点的精确坐标的步骤如下:

[0196] 步骤810,设构成相界面的第一个坐标点为P,最后一个坐标点为Q,用P至Q范围内所有坐标点进行三次多项式拟合,以横坐标x为因变量,纵坐标y为自变量,拟合得到弯月面形状的三次函数 $x=f_{PQ}(y)$ ;

[0197] 步骤820,设构成上壁面的第一个坐标点为D,最后一个坐标点为O;构成下壁面的第一个坐标点为R,最后一个坐标点为C;采用一次函数拟合,以横坐标y为因变量,纵坐标x为自变量,得到两条直线的表达式 $y=k_{DO}x+c_{DO}$ 及 $y=k_{RC}x+c_{RC}$ ,其中 $k_{DO}$ 和 $k_{RC}$ 为直线的斜率;

[0198] 步骤830,根据拟合得到的三次函数及两条直线表达式,求解以下两个方程组;

$$[0199] \quad \begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{DO}}{k_{DO}} \Rightarrow (x_A, y_A) \\ y = k_{DO}x + c_{DO} \end{cases} \quad \begin{cases} f_{PQ}(y) = \frac{y+c_{RC}}{k_{RC}} \Rightarrow (x_B, y_B) \\ y = k_{RC}x + c_{RC} \end{cases}$$

[0200] 即得到相界面上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及相界相下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 。

[0201] 如图13所示,在已知两个端点的情况下,相界面A-B范围内各点坐标的计算范围是对于y坐标为 $y_A < y < y_B$ ,采用拟合得到三次函数 $f_{PQ}$ 进行计算,就可以得到A到B范围内所有点的坐标,就可以得到拟合的相界面A-B的曲线坐标。

[0202] 获得接触角的过程如下:

[0203] 根据相界面的拟合函数 $x=f_{PQ}(y)$ ,将上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 以及下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 分别代入 $f_{PQ}$ 的一次导数中即可计算出接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ :

$$[0204] \quad \begin{aligned} \theta_A &= \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right] \\ \theta_B &= \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right] \end{aligned}$$

[0205] 将上端点A的坐标 $(x_A, y_A)$ 带入 $f_{PQ}$ 的一次导数中可以得到相界面的函数在上端点A的切线斜率,通过 $\arctan$ 函数可将斜率转化为角度,由于测量的是位于液体那一侧的接触角,因此需要加上 $\pi/2$ 就可以得到 $\theta_A$ ;将下端点B的坐标 $(x_B, y_B)$ 分别代入 $f_{PQ}$ 的一次导数中,可以求得相界面在下端点B的切线斜率,同样采用 $\arctan$ 将斜率转化成角度,由于下端点B处的斜率是负值,因此转化成角度后需要乘上一个负号,再加上 $\pi/2$ 就可以得到 $\theta_B$ 。

[0206] 还包括对两条壁面的倾斜修正程序:

[0207] 设两个壁面的倾斜角度为上壁面和下壁面倾斜角度的平均值,即 $(\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2$ ;则修正后的接触角 $\theta_A$ 和 $\theta_B$ 为:

$$[0208] \quad \begin{aligned} \theta_A &= \frac{\pi}{2} + \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_A)}{dx} \right] - (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2 \\ \theta_B &= \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{df_{PQ}(y_B)}{dx} \right] + (\arctan k_{DO} + \arctan k_{RC})/2 \end{aligned}$$

[0209] 本发明的优点在于鲁棒性强,测量结果稳定,具有较强容错性,对于质量不好的图

像也能提供准确的测量结果;采用该计算方法编程简单,程序运行效率高,采用常规处理器处理一张 $2300 \times 1730$ 像素的图片耗时小于1s。

[0210] 如图4、13所示,在本发明的一个实施方式中,为方便观察,该微流动芯片20可以由透明材料制成的板状结构,在其一个平面上设置内凹的凹槽22,凹槽22的形状可以是圆形或是矩形,在凹槽22上盖有贴合凹槽22内上表面的活动盖板(同样为透明),盖板可以采用卡扣或键槽一类结构固定在凹槽22上;微米毛细管通道21设置在凹槽22内的平面上,且可以阵列方式设置多个,各微米毛细管通道21相互之间平行,如本实施方式在微流动芯片20上设置六条微米毛细管通道21;每个微米毛细管通道21的两端分别设置有进液区211和出液区212,微米毛细管通道21的宽度可根据实验要求设置在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 内,而进液区211和出液区212的宽度至少为微米毛细管通道21宽度的 $15 \sim 20$ 倍;这是因为微米毛细管通道21本身的宽度是微米级,测试液体如果直接进入不易控制压力,采用进液区211和出液区212可以在微米毛细管通道21的两端形成一个测试液体进入和排出的缓冲通道,以引导测试液体的流动,使其在微米毛细管通道21内形成的相界面能够呈稳定的移动状态。

[0211] 进液区211和出液区212的形状以使测试液体能够平稳进入微米毛细管通道21内为准,如圆形、椭圆;在本发明的一个实施方式中,该进液区211和出液区212采用水滴形,水滴形的尖端与微米毛细管通道21连通,尖端与微米毛细管通道21连接处形成的夹角可在 $60$ 度左右,以使测试液体能够在收缩状态下平稳进入微米毛细管通道21。

[0212] 在进液区211和出液区212内分别均匀地设置有多根垂直的防止微米塌陷的立柱213,立柱213与立柱213之间相互间隔,同时立柱213的直径可以和微米毛细管通道21的宽度相同或为其 $1 \sim 2$ 倍,立柱213之间的间隔距离可以是立柱213的直径。采用立柱213是因为PDMS材料属于弹塑性材料,在宽深比大于2(需要说明这个是什么意思)的孔道结构中,材料会因为重力的作用而产生微米量级的“塌陷”变形。立柱213可避免变形对测试液体流动造成的影响。而供测试液体进入和排出的进液孔和出液孔分别设置在进液区211和出液区212的中间位置且开口在凹槽22的底部。进液管路和排液管路可直接与相应的进液孔和出液孔连接。

[0213] 立柱213的布置方式可以根据进液区211和出液区212的形状确定,如本实施方式中立柱213以环形的方式逐圈布置,中间留出进液孔和出液孔的设置空间。

[0214] 如图3所示,在本发明的一个实施方式中,为方便移动和调整微流动芯片20,可以在移动座33的上表面安装两个相对间隔且垂直的支撑板36,支撑板36之间的间隔距离与微流动芯片20的宽度对应;在两个支撑板36的相对面上分别安装有固定或支撑微流动芯片20的固定台361;在移动座33上设置有多个安装孔331,安装孔331可以使支撑板36相对微流动芯片20的宽度调整安装位置;支撑板33通过L形折片35利用移动座33上的安装孔331与移动座33固定,L形折片35的两折边上分别设置有固定孔,其通过螺栓分别与移动座33和支撑板36固定。

[0215] 进一步地,可以在微流动芯片20的下方两个支撑板36之间安装一个光源,光源用于使微流动芯片20更明亮,以方便摄像单元50获取清楚的相界面图像。具体的光源可以是LED灯。

[0216] 此外,为方便调整固定台361的高度,可以在每块支撑板36上分别设置垂直于放置后微流动芯片20的两道间隔滑动槽(图中未示出),固定台361可利用穿过滑动槽的螺栓可

调节的安装在支撑板36上。这里给出的是调整微流动芯片20的方法,在其它的实施方式中也可以直接调整数码相机的高度,而微流动芯片20保持不动。

[0217] 此外,为方便观察,支撑板36、固定台361和L形折片35都可以采用与微流动芯片20同样的透明材料制作。

[0218] 具体的固定台361可以为条状的支撑条,以对微流动芯片20形成水平支撑;还可以为设置有夹持微流动芯片20侧边的凹槽的夹持条,微流动芯片20在安装时,其相对的两侧可以夹持地安装在夹持条的凹槽内,该结构能够提高安装后微流动芯片20的稳定性。

[0219] 如图14所示,在本发明的一个实施方式中,为方便安装压力传感器42,可以在移动座33的一侧通过L形折片35安装一个带三通的透明接头37,接头37其中两个通孔为水平且相对设置的直通371,另一个通孔为垂直于两个直通371中部的竖通372,在竖通372上通过螺纹安装有与控制系统10连接的压力传感器42,在两个直通371上通过螺纹连接有鲁尔接头373,注射泵41可通过柔性软管与鲁尔接头373连接,另一直通371的鲁尔接头373则通过柔性软管与进液区211的进液孔连接,而出液区212的出液孔通过柔性软管与接水盒43连接。

[0220] 在测试过程中,则注射泵41推出的压力可以由压力传感器42直接测量并传送给控制系统10,控制系统10则根据该压力大小与预定的目标压力值进行比对,控制系统10在这个过程中根据压力传感器42的压力值持续控制注射泵41的注射过程,直至微米毛细管管路21中的压力值达到预定的目标压力值。

[0221] 在本实施方式中,为防止接头处泄露,可仅在微米毛细管通道21中注入测试液体,保证测试液体的量能够在微米毛细管通道21中形成相应的相界面,后面则由注射泵41注入密封液体以在管路内形成注射压力,密封液体既可以是测试液体同一种液体,也可以是其它类液体,如水;在实验前将管路中预先充满液体,由液体传递压力并占据连接点处的缝隙。由于泄漏量与流体粘度成反比,空气粘度为 $0.01\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,液体的粘度远远大于空气(如水的粘度在标况下约为 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ),采用液体作为压力传递介质可使泄漏量可以大大减少。在该结构下密封液体与测试液体之间有一段空间间隔(空气柱),空气柱不接触涉及到管路接头连接的区域,可起到隔离测试液体和密封液体的作用。

[0222] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

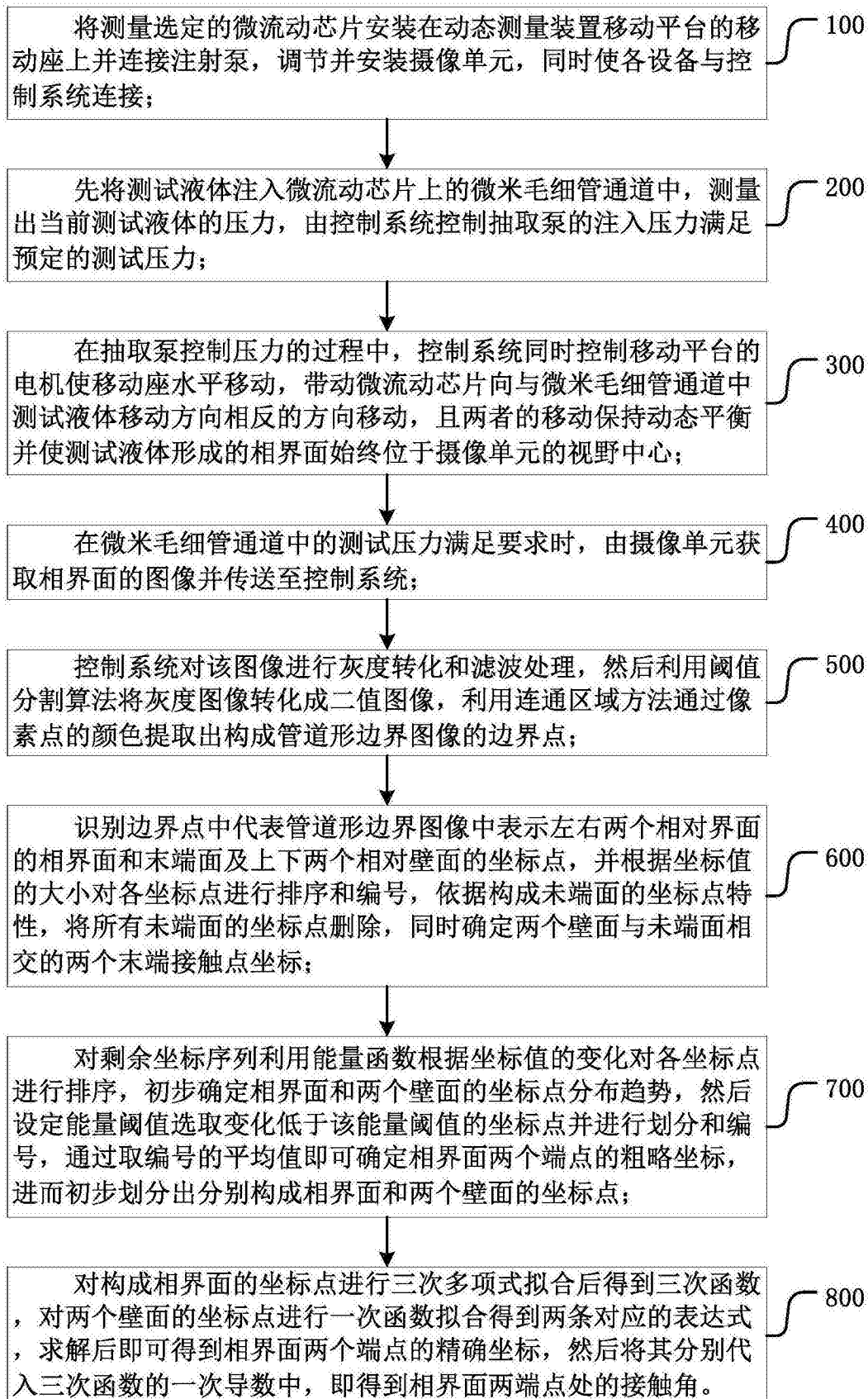


图1

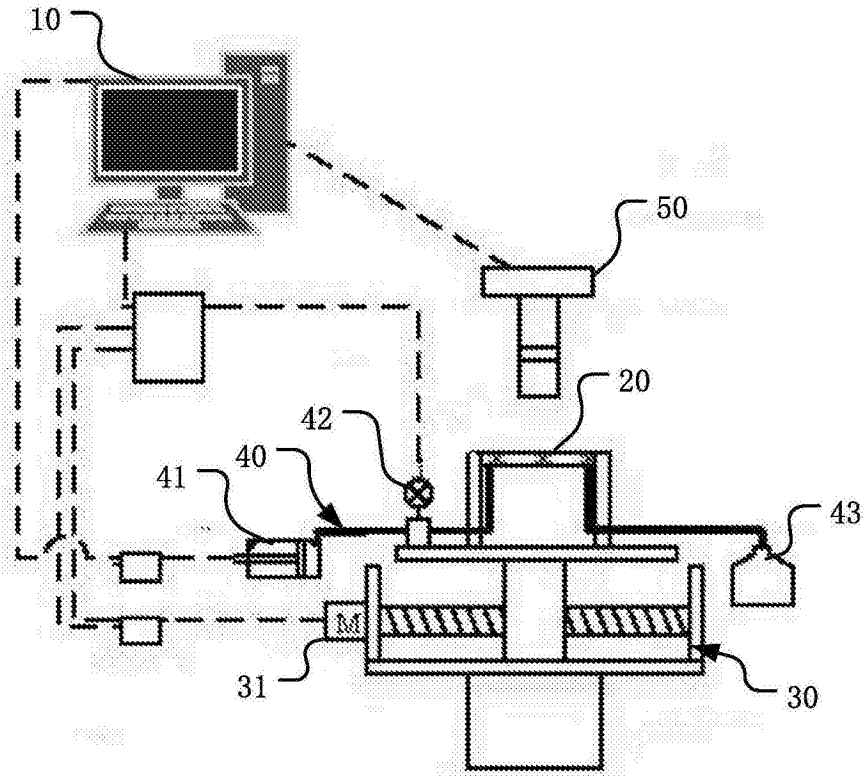


图2

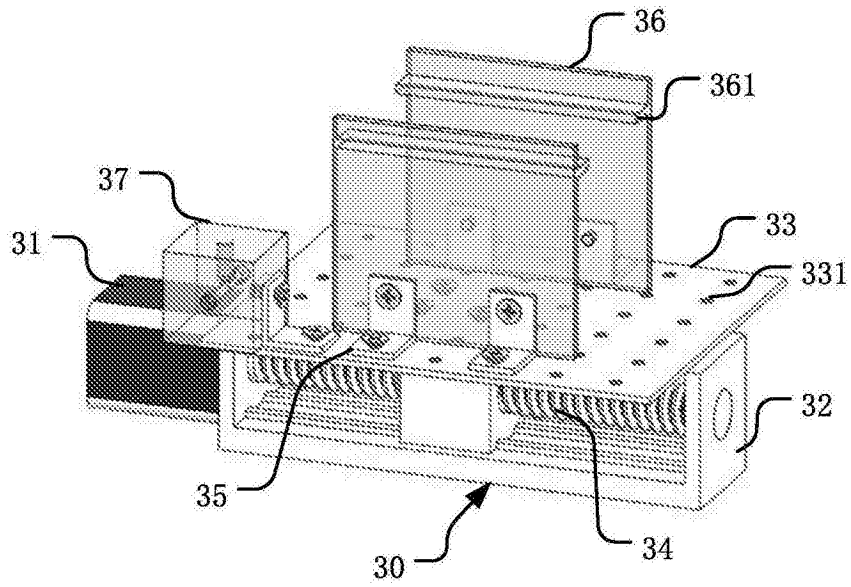


图3

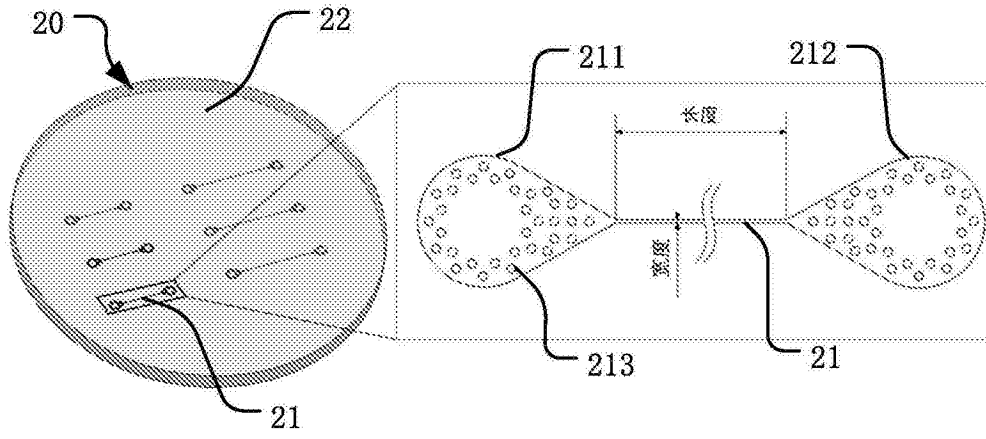


图4

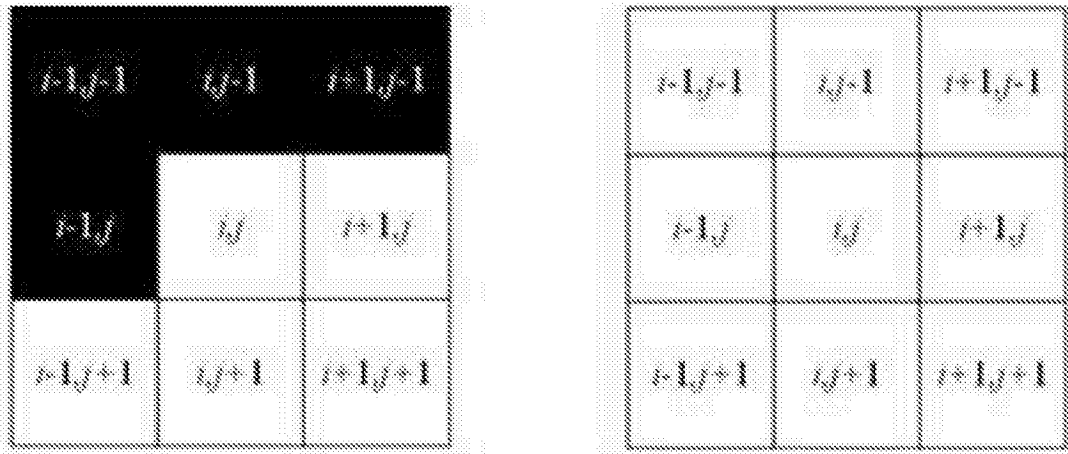


图5





图6

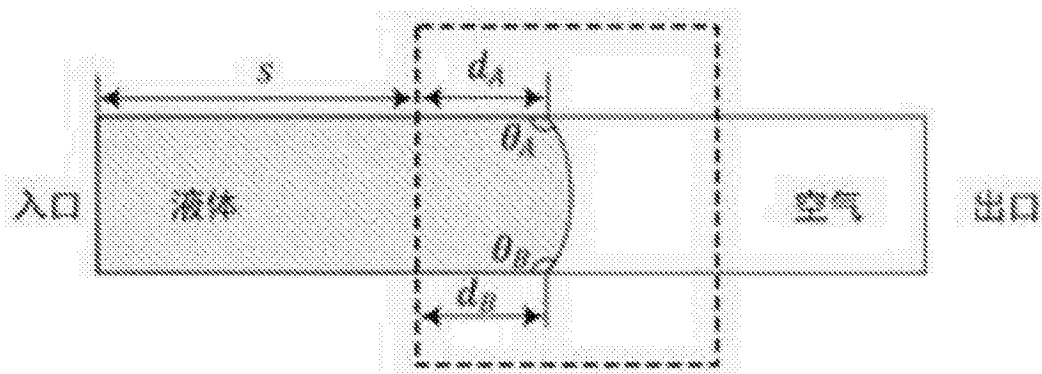


图7

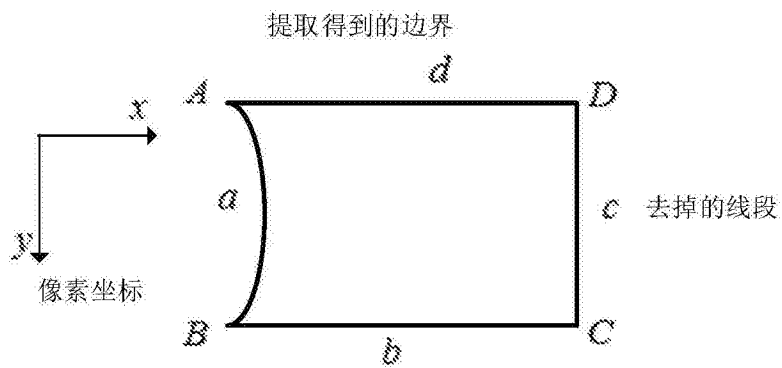


图8

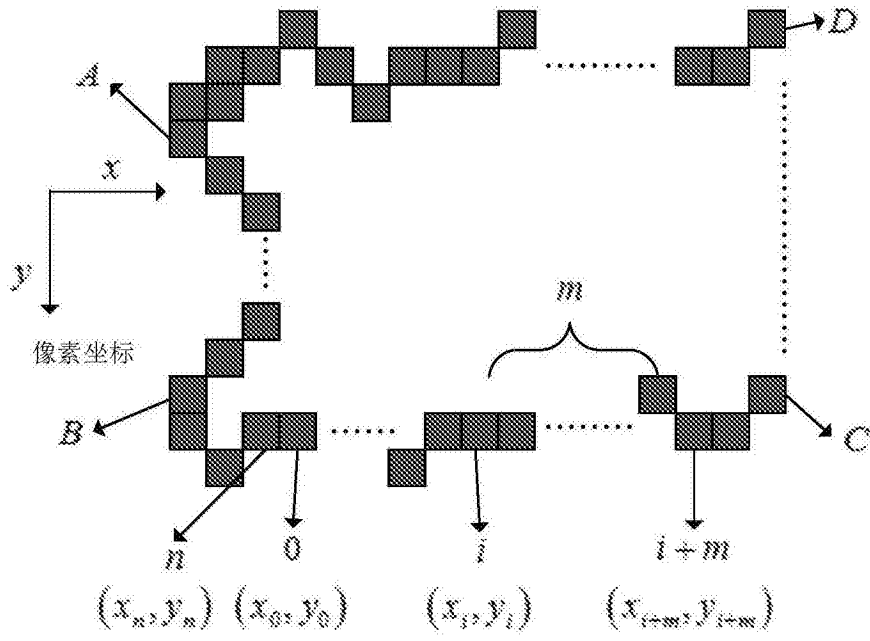


图9

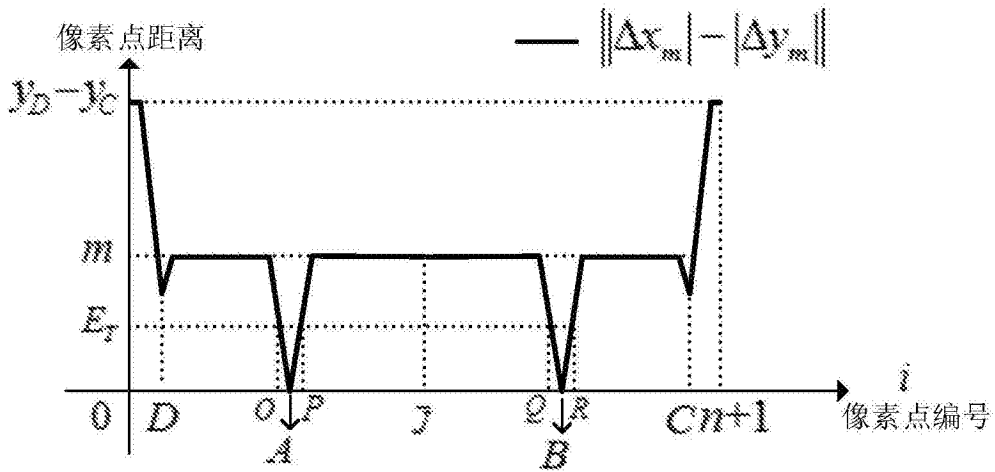


图10

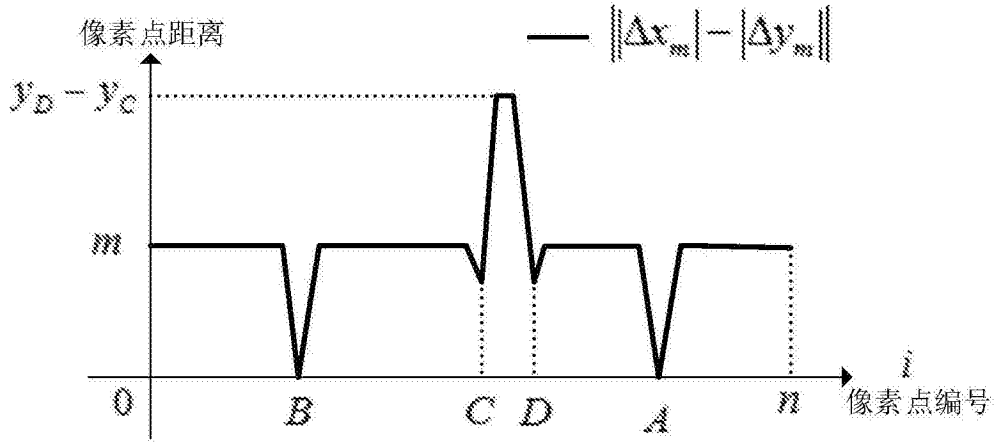


图11

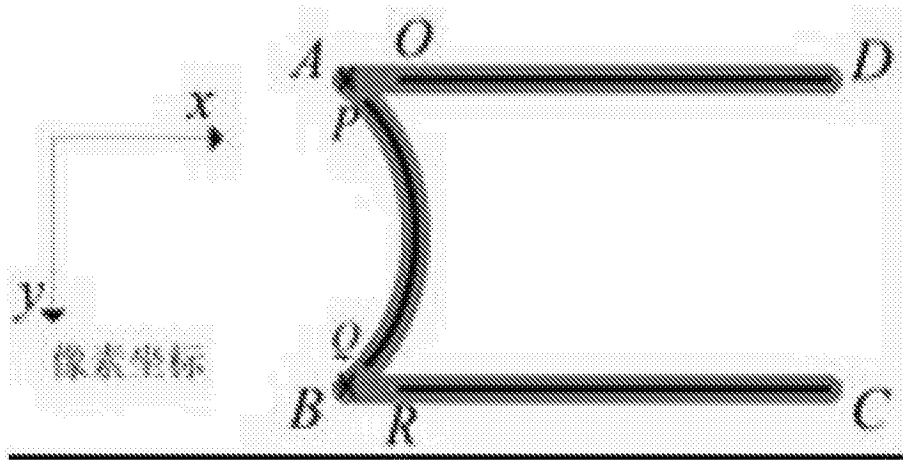


图12

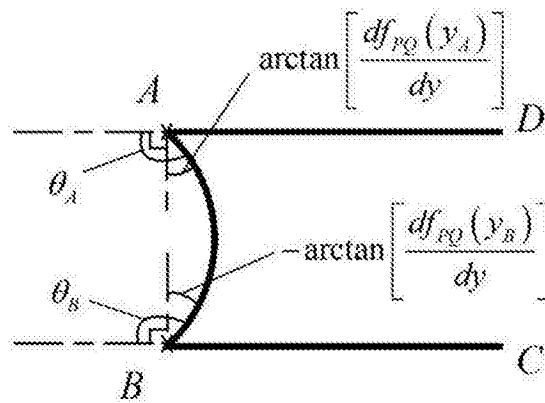


图13

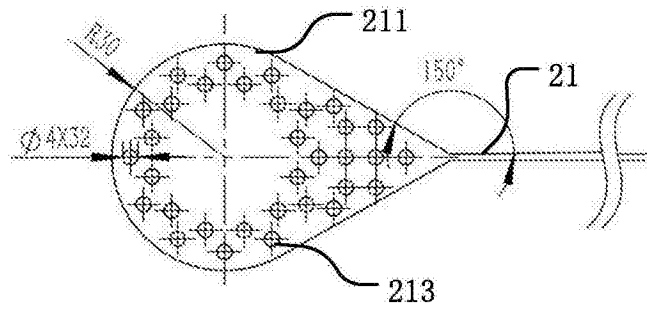


图14

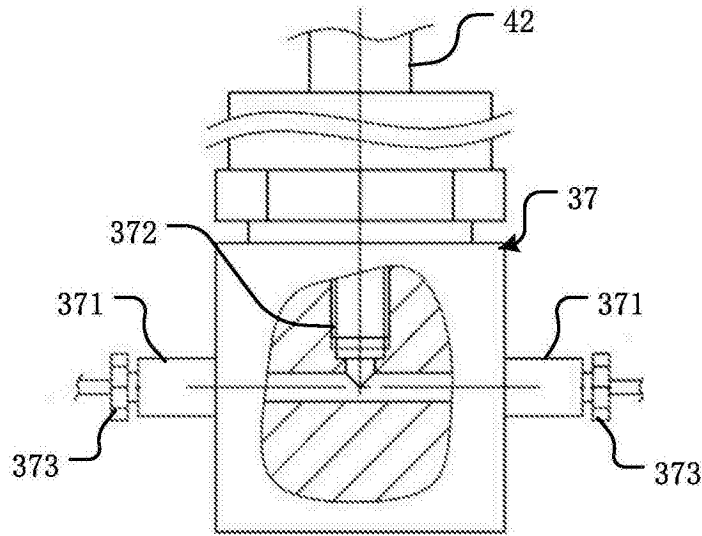


图15