doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.052

基于等效电容的介电湿润芯片液滴位置检测方法

许晓威[1]　孙立宁[2]　陈立国[2]　江海兵[1]　张玉良[1]　季英瑜[1]

(1.衢州学院机械工程学院,衢州 324000;2.苏州大学机器人与微系统研究中心,苏州 215021)

摘要:数字微流控技术在操作单个微液滴方面所表现出的独特优势使其得到了广泛关注与应用,但数字微流控系统中针对芯片上液滴的位置缺少反馈就会发生液滴不能成功被驱动的现象,致使液滴不能够完成规划的路径。本文采用基于等效电容的液滴位置估算检测原理,系统以相邻两个驱动电极与液滴所构成的等效电容为反馈控制对象,该位置估算原理具有无量纲属性,与液滴的组成成分无关,适用性更加广泛。实验结果表明,基于等效电容的液滴位置估算检测原理和装置能极大地提高液滴连续运动的成功率,从而使液滴能够按照规划好的路径运动到既定目的地。

关键词:数字微流控技术;介电湿润机理;液滴位置估算;等效电容

中图分类号:TH69　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)11-0423-06

Method of Droplet Position Sensing Based on Equivalent Capacitance for Electrowetting-on-dielectric Device

XU Xiaowei[1]　SUN Lining[2]　CHEN Liguo[2]　JIANG Haibing[1]　ZHANG Yuliang[1]　JI Yingyu[1]

(1. *College of Mechanical Engineering*, *Quzhou University*, *Quzhou* 324000, *China*

2. *Robotics and Microsystems Center*, *Soochow University*, *Suzhou* 215021, *China*)

Abstract: Digital microfluidics based on electrowetting-on-dielectric is an emerging popular technology that manipulates single droplets at the microliter or even the nanoliter level. It has the unique advantages of rapid response, low reagent consumption and high integration. Electrowetting-on-dielectric device based digital microfluidics has shown enormous advantages in biology, medicine and chemistry and so on, and it has been used extensively in these subjects for driving single droplet. However, the lack of feedback on droplet position will result in a phenomenon that the droplet cannot be successfully driven. In that case, the droplet fails to complete the programming path. The principle of droplet position estimator based on the equivalent capacitance was adopted, and the equivalent capacitance of two adjacent driving electrodes and droplet was used as the feedback control object. The electrode capacitance was used, which was an inherent electrical property of electrowetting-on-dielectric digital microfluidics devices, to determine the position of any droplet composition in the interval of two electrodes. Capacitance was an electrical property which was sensitive to the presence of a droplet and independent of actuation signal frequency. The dimensionless nature of this droplet position estimator was independent of the droplet compositions, and its applicability was more extensive. Finally, the experimental results showed that the droplet position estimator based on the equivalent capacitance can greatly improve the success rate of the continuous motion. Thus the droplet can be driven to the established destination according to the programming path. A capacitance-based position estimator was implemented which can continuously track the displacement of a droplet within the interval of two adjacent electrodes. The displacement of a droplet was estimated through a dimensionless ratio of two electrode capacitances.

Key words: digital microfluidics; electrowetting-on-dielectric; droplet position estimation; equivalent capacitance

收稿日期:2017-07-29　修回日期:2017-09-05

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LQ16E050008)和国家自然科学基金项目(51275327)

作者简介:许晓威(1984—),男,讲师,博士,主要从事数字微流控芯片及相关技术研究,E-mail:851597503@qq.com

引言

微流控技术随着微制作工艺的快速发展取得了很大的突破,利用介电湿润机理(Electrowetting-on-dielectric, EWOD)的数字微流控技术成为微流控技术的新热点[1-8]。由于数字微流控技术操控液滴是在平板上进行,不需要微泵、微阀和微管道等复杂的机械结构,这样避免了结构复杂部件的制作和装配、交叉使用造成的污染,因此数字微流控芯片在"芯片上实验室"(Lab on a chip)得到了越来越多的应用,其原理是以液滴为载体,液滴中可以包含细胞[9-11]和蛋白质[12]等物质。另外,数字微流控技术在光学[13-14]、电子芯片降温[15]、特种传感器[16-18]等领域也得到了广泛的应用。

在基于介电湿润机理的开环控制系统中,如果液滴由于芯片表面缺陷、灰尘等造成液滴无法运动至驱动电极时,由于缺少针对液滴运动位置的检测和控制,会造成液滴连续运动失败。因此,相对于开环控制系统,加入液滴位置检测的闭环控制系统能保证液滴运动的连续性。SHIN 等[19]发明了基于视觉反馈的液滴位置控制系统,控制器通过检测液滴截面圆与驱动电极的相对位置达到检测液滴位置的目的,但该液滴位置控制系统需要一套高精度的视频设备和较强计算能力的计算机去实时处理视频数据,使用成本较高。SHIH 等[20]研究了基于传感器的液滴位置反馈控制系统,传感器用于检测 EWOD 芯片的交流电信号,然后与所施加的驱动电压信号进行比较以达到检测液滴位置的目的,但该方法对液滴本身的特性依赖性较大,这就会影响传感器检测电信号的准确性。SADEGHI 等[21]研究了基于阻抗电路的液滴位置估算方法,优点是无论液滴导电或绝缘该方法都可以适用,但该方法运算量较大,检测电路复杂。

本文采用基于电容传感器的液滴位置估算原理[21-24],该估算原理中液滴的位置与液滴的组成成分无关,与相应驱动电极的电容之比有关,以实现对 EWOD 芯片-液滴系统实时位置的反馈与控制。

1 等效电容理论模型

1.1 介电湿润机理

数字微流控技术操控液滴是通过给介电层下方的驱动电极加电,如图 1a 所示,此时右侧驱动电极加电,液滴的大部分位于左侧不加电驱动电极之上,位于加电驱动电极之上的液滴接触角 α 减小,当 α 的减小量足够大时,液滴就会向加电驱动电极的方向运动,按时序分别给阵列驱动电极加电,液滴就会被驱动。数字微流控技术包括液滴的分配、分离、合并和运输 4 项基本操控[21]。

由于开环 EWOD 芯片-液滴控制系统缺少位置反馈信息,而当液滴不能正常完成设定的运动时就会致使液滴不能够正常运动到目标位置,如图 1b 所示阵列电极中液滴从 1 号驱动电压运动到目标位置 5 号驱动上。由于灰尘,表面粗糙度过大所导致的 EWOD 芯片表面缺陷就会阻碍液滴的运动,如图 1b 中 3 号驱动电极表面所示,当液滴受到阻碍而没有完成一个运动周期时就会给后续的运动带来一系列的困难,因为外围控制电路的控制信号在液滴开始运动之前已经设定好,施加一定时间的驱动电压,液滴就会相应地完成一个驱动电极长度的运动周期,即,计划完成 4 个驱动电极长度的运动距离,在液滴开始运动前就已经设定了 4 个信号的驱动电压,信号电压数与液滴完成运动周期数存在一一对应的关系。所以,当液滴由于一系列原因在某一个驱动电信号时没有完成一个运动周期的运动,最终会致使液滴不能够准确地到达目的地,图中液滴就很可能停在 3 号驱动电极之上。而 EWOD 芯片-液滴控制系统能够以液滴的运动位置为反馈信息,当检测到液滴没有运动到预期位置"卡"在3 号驱动电极之上时可以给相应驱动电极重复施加驱动电压,甚至更大的驱动电压,从而使液滴能够顺利"翻"过 3 号驱动电极,最终到达目标位置。

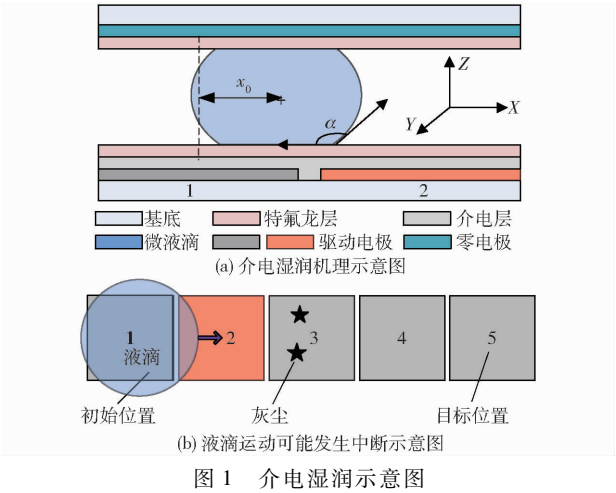


图 1 介电湿润示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of electrowetting-on-dielectric

EWOD 芯片-液滴系统中的等效电容是 EWOD 芯片的一种本质电路属性,与 EWOD 芯片驱动信号电压源的频率无关。液滴位置估算器与液滴的成分无关,与液滴和驱动电极的相对位置有关,该液滴位置估算器通过 EWOD 芯片的等效电容之比可以得到一个无量纲的值,该值可以用来估算相邻 2 个驱动电极之间的液滴位置。该方法与驱动电压信号频率和液滴的组成成分无关,所需计算量少。

1.2　等效电容液滴位置检测原理

图 2 为 EWOD 芯片-液滴等效电路示意图，结合图 1a，其中驱动电极只有一个。等效电路由 2 个平行的电路系统构成，介电层和厌水层构成电容器，液滴周围介质构成一个电容器；由于 EWOD 芯片中的液滴具有一定的电导率，包含有液滴的部分就构成了相互平行的电容和电阻。液滴的弯液面会改变驱动电极之间的电场，但相对于驱动电极与极板间距对电场改变量，弯液面对电场的改变量较小，可以忽略[21-22]。

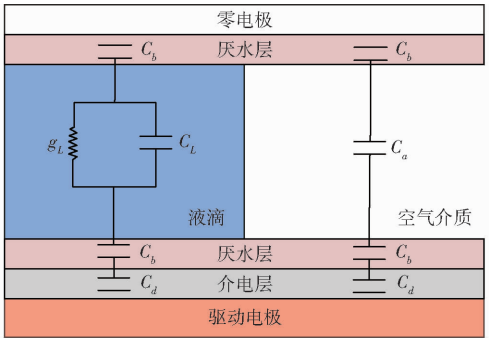


图 2　EWOD 芯片-液滴等效电路示意图

Fig. 2　Sketch of equivalent capacitance for EWOD chip - droplet

当只有单个驱动电极时，其电抗只包含电容，表达式为[23-24]

$$C_{eq} = aA + (b-a)A_L \tag{1}$$

式中　a——与极板间距成反比的常数

b——与介电层厚度成反比的常数

A——驱动电极的表面积

A_L——液滴位于导电电极之上的截面圆面积

其中 a 值较小，b 值较大。在数字微流控芯片中液滴是通过一个电极运动到相邻电极来完成输运液滴的目的。驱动电极等效电容可以表示液滴位置的函数，因为 A_L 的大小取决于液滴位置，因此，以液滴截面圆圆心为液滴位置的反馈位置，该反馈位置可通过检测相邻驱动电极的电容间接获取。

图 3a 表示液滴截面圆圆心距离 1 号驱动电极的距离为 x_0，假定液滴在运动的过程中液滴与电极表面保持为规则的圆形，该液滴固液接触面截面圆半径为 r，1 号驱动电极和 2 号驱动电极都为宽度 L 的方形驱动电极，1 号和 2 号驱动电极的间距为 L_g，1、2 号驱动电极每单位长度的电容表达式为

$$C_1 = aL + (b-a)\left(r + \frac{L}{2} - x_0\right) \tag{2}$$

$$C_2 = aL + (b-a)\left[r - \left(\frac{L}{2} + L_g\right) + x_0\right] \tag{3}$$

2 号驱动电极的电容与 1、2 号驱动电极电容和之比为液滴截面圆圆心位置 x_0 的函数，电容之比为

$$\frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{aL + (b-a)\left[r - \left(\frac{L}{2} + L_g\right) + x_0\right]}{2aL + (b-a)(2r - L_g)} \tag{4}$$

因为介电层的厚度远小于 EWOD 芯片上下极板间间距 h，所以常数 b 远大于液滴运动时的相对位置变化示意图中常数 a，因此方程(4)可以简化为

$$\frac{C_2}{C_1 + C_2} \cong \frac{(b-a)\left[r - \left(\frac{L}{2} + L_g\right) + x_0\right]}{(b-a)(2r - L_g)} = \frac{r - \left(\frac{L}{2} + L_g\right) + x_0}{2r - L_g} \tag{5}$$

在 EWOD 芯片中，为了能够成功驱动液滴，必须保证液滴截面圆的面积稍大于驱动电极的面积，同时驱动电极间间距 $L_g \ll L$，因此，$r \cong L/2 + L_g$ 是一个有效假设，方程(5)又可简化为

$$x_0 \cong \frac{C_2}{C_1 + C_2} \frac{r - \left(\frac{L}{2} + L_g\right) + x_0}{2r - L_g} \cong \frac{C_2}{C_1 + C_2}(L + L_g) \cong \frac{C_2}{C_1 + C_2} L \tag{6}$$

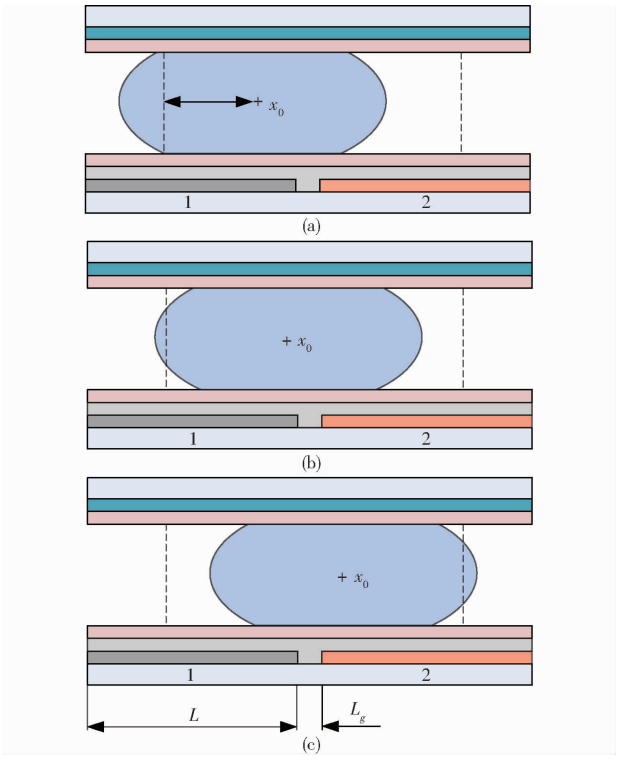


图 3　液滴运动时的相对位置变化示意图

Fig. 3　Sketches of different position changes during droplet moving

综合以上分析可知 EWOD 芯片-液滴系统结构不变，驱动电极间间距远小于驱动电极长度，所以 x_0 为任意值时，$C_1 + C_2$ 的值为一常数。由式(6)可知，液滴位置与液滴组成成分无关，而是与相应驱动电极的电容之比有关。因此，相比文献中其他检测

液滴的方法,该方法检测液滴的实时位置能省略掉对设备进行标准化的过程,而且更有利于 EWOD 芯片-液滴系统中对液滴实时的反馈与控制。测得 EWOD 芯片-液滴的电容就可以估算液滴的实时位置,获得了液滴的实时位置后可把液滴的位置信息作为反馈,当液滴运动失败时能够给相应驱动电极重复施加驱动电压,以保证液滴能够成功被驱动。

1.3 液滴位置检测系统建立

为了消除测量误差,选择把 1 μL 的去离子水液滴放置在图 1a 中 1、2 号电极上的任意位置,同时保持每一次液滴的位置在 y 方向不变,然后通过电容测量仪分别测量液滴位于不同位置时的电容,再根据电容实测值与视频截图估算出 x_0 的值。由图 4 可知,等效电容 C_1 初始时刻时最大,近似为 10 pF/mm;当液滴运动到终点位置时减小到 0,而 C_2 的变化与 C_1 正好相反;当等效电容 $C_1 = C_2$ 时液滴运动到 1、2 号驱动电极之间,根据介电湿润中液滴运动的规律可知,液滴运动到两个驱动电极之间时说明液滴能够成功运动完一个驱动电极的长度。因此,当检测到 $C_2 \geqslant C_1$ 时说明液滴能成功运动到 2 号驱动电极之上;而当检测到 $C_2 < C_1$ 时则说明液滴没能够成功运动。

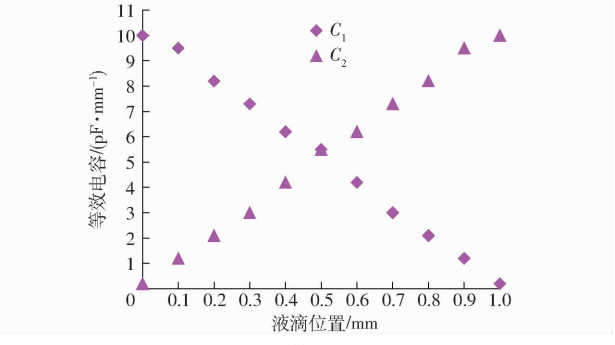


图 4 1、2 号驱动电极等效电容与液滴位置关系

Fig. 4 Relationship between equivalent capacitance of No. 1 and No. 2 driving electrodes and droplet position

当液滴运动时,单片机 MSP430F149 给定电容测量仪采样频率,测量相应驱动电极的电容,然后进行比较,如所测得的电容小于设定值就说明液滴没有运动到带电驱动电极之上,则需要重复给该驱动电极加电,如检测到该驱动电极的电容达到一定区间时就给下一个驱动电极加电。为了减小误差,初始化时采用带电驱动电极与相邻驱动电极的电容之差进行比较,当 $C_2 \geqslant C_1$ 时说明液滴已经运动到 2 号驱动电极之上,此时由单片机发出指令给光电耦合开关,然后给 3 号驱动电极加电;如果 $C_2 < C_1$ 时说明液滴仍停留在 1 号驱动电极之上,此时单片机发出指令给光电耦合开关,再给 2 号驱动电极施加电压。

MSP430F149 微控制器中有 2 个 16 位定时器,由于定时器是 16 位的,则可以在秒、毫秒数量级上进行定时,且具有 2 个中断向量,便于处理各种定时中断,即,可以通过定时器的比较模式实现数模转换功能。另外,定时器还具有捕获模式,可以通过定时器的捕获功能实现各种测量,如脉冲宽度测量,如和比较器结合还可以测量电阻、电容、电压、电流和温度等,因此,利用 MSP430F149 中的定时器和比较器实时测量 EWOD 芯片中液滴的等效电容,从而判断液滴的位置。电容检测设计流程图如图 5 所示。

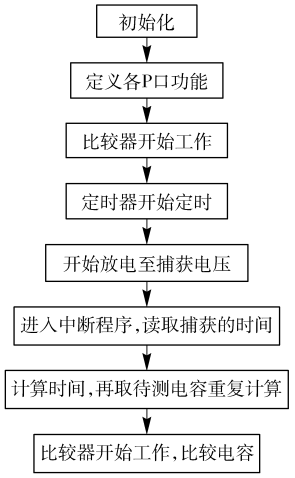


图 5 电容检测设计流程图

Fig. 5 Flow chart of capacitance detection

图 6 所示为液滴位置检测反馈控制图。利用 C 语言在 IAR Embedded Workbench 环境下开发串口接受程序,并参考 EWOD 芯片上的驱动电极单元序号,按顺序选择驱动电极单元序号和光电耦合开关通断的时间,通过仿真器 LSD - PET430UTF 下载到单片机中。根据经验本文中光电耦合开关的首次导

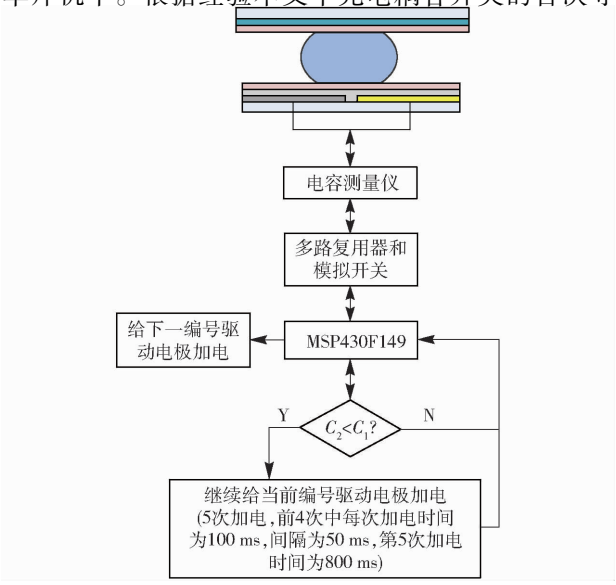


图 6 微液滴位置反馈控制流程图

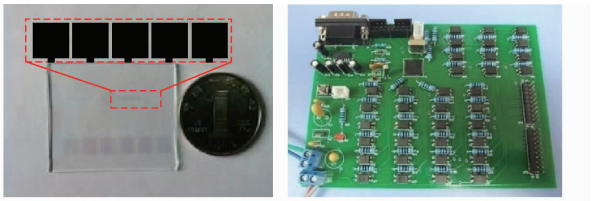
Fig. 6 Flow chart of droplet position feedback control

通时间为 500 ms，断开时间为 300 ms；如检测到 1 号和 2 号驱动电极的等效电容之差小于零，即 $C_2 < C_1$，如图 6 所示，说明液滴仍停留在当前驱动电极之上。然后继续给当前驱动电极施加驱动电压，光电耦合开关的方式为 5 次加电，前 4 次中每次加电时间为 100 ms，间隔为 50 ms，第 5 次加电时间为 800 ms，通过前 4 次抖动式的驱动，液滴更容易克服阻力从而成功跨越障碍。

2　实验测试与结果分析

2.1　芯片的设计制作及系统搭建

加工了尺寸如上文所讨论的数字微流控芯片，驱动电极数为 5 个，呈单排阵列布局，驱动电极尺寸为 1 mm × 1 mm，驱动电极间间距为 20 mm。EWOD 芯片实物图如图 7a 所示，图 7b 为芯片驱动电路板。



(a) EWOD芯片　　(b) 芯片驱动电路板

图 7　芯片和驱动电路板实物图

Fig. 7　Pictures of EWOD chip and driving circuit board

采用 ITO 玻璃作为 EWOD 芯片的基底材料，通过湿法刻蚀技术加工驱动电极和电极引线；然后旋涂一层 1 μm 的介电常数为 3.2 的 SU－8 光刻胶作为芯片的介电层；最后通过旋涂特氟龙溶液，得到 50 nm 的厌水层。芯片上极板采用直接在 ITO 玻璃表面均匀旋涂特氟龙溶液，得到 50 nm 的厌水层。实验时使用双面胶固定芯片上下极板，极板间距为 300 μm，上极板接零电极，驱动电极与经过电压放大电路放大的频率为 100 Hz 的正弦信号相连。采用去离子水为实验对象，操控液滴的介质为空气。

2.2　实验与分析

由于 ITO 玻璃具有很好的透光性，而 SU－8 光刻胶固化之后呈现乳白色变得不透明，因此本文用虚线框把驱动电极的轮廓表示出来，如图 8a 所示。图 8 所示为 1 μL 去离子水液滴往复运动视频截图，介电湿润芯片上下极板间间距为 300 μm，有效交流驱动电压为 40 V。图 8 中，液滴从图 1b 中所示的 2 号驱动电极运动到 5 号驱动电极，与图 8 所对应的位置是从图 8a 中的初始位置运动到图 8e。同理，液滴从图 1b 中所示的 5 号驱动电极返回到 1 号驱动电极之上，与图 8 所对应的位置是液滴从图 8e中的位置运动到图 8i 中的位置。

由图 8 可知液滴从初始位置向右运动到 5 号运动电极之上，然后再向左运动返回到初始驱动电极之上时并没有发生被“卡”而不能够连续运动的情况，但液滴在运动过程中发生了一定的抖动现象，

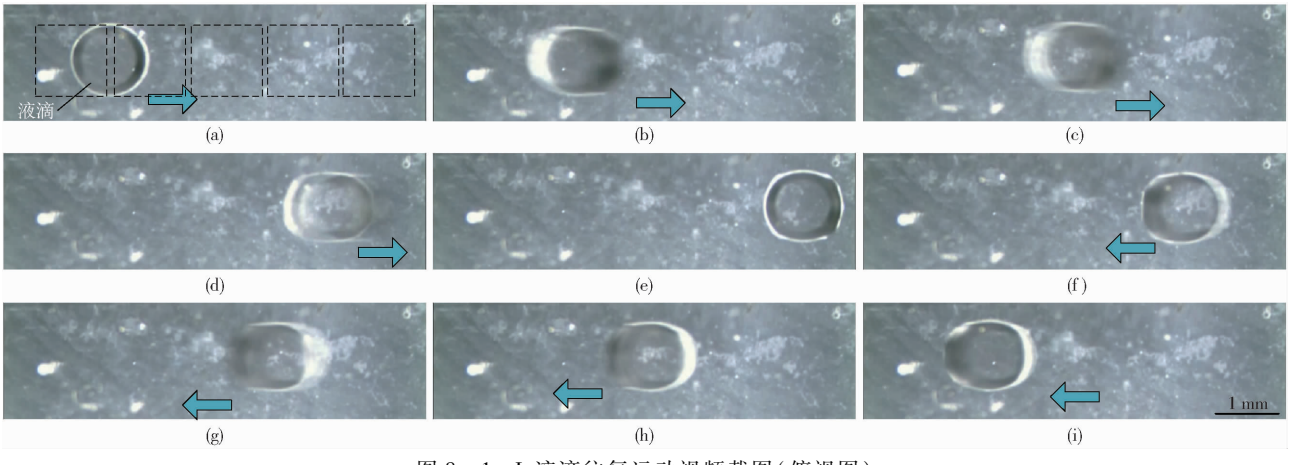


图 8　1 μL 液滴往复运动视频截图（俯视图）

Fig. 8　Screenshots of 1 μL droplet reciprocating motion (top view)

如图 8b、8c、8f 和 8g 液滴运动视频截图所示，由截图可知，液滴轮廓存在虚影现象，这说明微液滴在驱动电极第一次加电时所受介电湿润力小于摩擦阻力，液滴没有被成功驱动到下一个驱动电极之上，只是液滴的一部分发生了运动，直观表现就是液滴的前半部分动了一下就恢复了原状。根据文中液滴估算位置反馈控制系统的设计，此时需要第 2 次给相应电极施加驱动电压，甚至需要第 5 次加电后液滴所受介电驱动力才能够克服摩擦阻力而被成功驱动。该实验结果很好地验证了基于等效电容的微液滴位置估算检测装置检测液滴位置的可行性。

3　结论

（1）采用了基于等效电容的液滴位置估算检测原理，该估算原理根据 EWOD 芯片－液滴系统本身

属性,当液滴在相邻 2 个驱动电极上运动时,通过检测相邻 2 个驱动电极与液滴组成的电容而间接获得液滴的位置,该液滴位置估算检测原理与液滴的组成成分无关,与相应驱动电极的电容之比有关。

(2)搭建实验平台对该液滴位置估算检测原理进行了验证,实验结果表明基于等效电容的微液滴位置估算检测装置能极大地提高液滴连续运动的成功率。

参 考 文 献

1 LIBERALE F, BERNASCONI R, MAGAGNIN L. Fundamentals and application of electrowetting on dielectrics[J]. Current Nanoscience, 2015, 11(3):286 - 298.

2 ZHAO Y P, WANG Y. Fundamentals and applications of electrowetting: a critical review[J]. Reviews of Adhesion & Adhesives, 2013, 1(1):114 - 174.

3 SAMIEI E, TABRIZIAN M, HOORFAR M. A review of digital microfluidics as portable platforms for lab-on a-chip applications [J]. Lab on a Chip, 2016, 16(13):2376.

4 YANG N, LIU X, ZHANG X, et al. A robust and inexpensive composite insulation layer for digital microfluidic devices[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2014, 219(1):6 - 12.

5 RACKUS D G, DRYDEN M D, LAMANNA J, et al. A digital microfluidic device with integrated nanostructured microelectrodes for electrochemical immunoassays[J]. Lab on a Chip, 2015, 15(18):3776.

6 XU X W, SUN L N, CHEN L G, et al. Electrowetting on dielectric device with crescent electrodes for reliable and low-voltage droplet manipulation[J]. Biomicrofluidics, 2014, 8(6):064107.

7 杨丽, 张晖, 王媛媛,等. T 型微通道中液-液两相流流动与混合过程分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):397 - 405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170152&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.052.
YANG Li, ZHANG Hui, WANG Yuanyuan, et al. Hydrodynamics and mixing process analysis of liquid -liquid two- phase flow in microfluidic T-junction [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 397 - 405. (in Chinese)

8 王化明, 陈峰洪, 李鹭扬,等. 介电型电活性聚合物传感单元设计[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3):383 - 389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170349&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.049.
WANG Huaming, CHEN Fenghong, LI Luyang, et al. Design of dielectric electroastive polymer sensing cell [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):383 - 389. (in Chinese)

9 NG A H C, CHAMBERLAIN M D, SITU H, et al. Digital microfluidic immunocytochemistry in single cells[J]. Nature Communications, 2015, 6:7513.

10 HE J L, CHEN A T, LEE J H, et al. Digital microfluidics for manipulation and analysis of a single cell[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(9):22319 - 22332.

11 AIJIAN A P, GARRELL R L. Digital microfluidics for automated hanging drop cell spheroid culture[J]. Journal of Laboratory Automation, 2015, 20(3):283.

12 JANG I, KO H, YOU G, et al. Application of paper EWOD (electrowetting-on-dielectrics) chip: protein tryptic digestion and its detection using MALDI - TOF mass spectrometry[J]. Biochip Journal, 2017,11(2):1 - 7.

13 ANDREAS T, HERBERT E, BERNHARD J. Low-cost silver screen-printed electrowetting on dielectrics structure for optofluidic switches [J]. Procedia Engineering, 2016, 168:1061 - 1065.

14 CLEMENT C E, SI K T, PARK S Y. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD)[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2016, 240:909 - 915.

15 BINDIGANAVALE G S. Study of hotspot cooling for integrated circuits using electrowetting on dielectric digital microfluidic system[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2015:1039 - 1042.

16 TRÖLS A, CLARA S, JAKOBY B. A low-cost viscosity sensor based on electrowetting on dielectrics (EWOD) forces[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2016, 244:261 - 269.

17 LERMA A C, WITTERS D, PUERS B, et al. The use of digital microfluidics for a silicon photonics sensor platform[J]. Proceedings of the Annual Symposium of the IEEE Photonics Society Benelux Chapeter, 2012:49 - 52.

18 LAI Y T, YANG Y T, LEE C Y. An intelligent digital microfluidic processor for biomedical detection[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2015, 78(1):85 - 93.

19 SHIN Y J, LEE J B. Machine vision for digital microfluidics[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(1):014302.

20 SHIH S C, FOBEL R, KUMAR P, et al. A feedback control system for high-fidelity digital microfluidics[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(3):535 - 540.

21 SADEGHI S, DING H, SHAH G J, et al. On chip droplet characterization: a practical, high-sensitivity measurement of droplet impedance in digital microfluidics[J]. Analytical Chemistry, 2012, 84(4):1915 - 1923.

22 BHATTACHARJEE B, NAJJARAN H. Droplet sensing by measuring the capacitance between coplanar electrodes in a digital microfluidic system[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(21):4416.

23 MURRAN M A, NAJJARAN H. Capacitance-based droplet position estimator for digital microfluidic devices[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(11):2053.

24 许晓威. 基于介电湿润效应的微液滴驱动机理与操作方法研究[D]. 苏州:苏州大学, 2014.
XU Xiaowei. Driving mechanism and manipulation of droplets based on electrwetting on dielectric [D]. Suzhou: Soochow University, 2014. (in Chinese)