

# 基于图像的植物叶面雾滴接触角稳定区间法测量<sup>\*</sup>

邱白晶 赵晓丽 贾卫东 张振磊

(江苏大学现代农业装备与技术江苏省重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 发展了单侧液滴轮廓拟合生成接触角的方法,提出了接触角稳定区间概念,建立了拟合函数选优和拟合像素数选取的数值试验方法。本文方法与轴对称积分法相比,偏差为1.92%。但本文方法没有引入轴对称条件,因而可测非对称液滴接触角。对桂花叶上去离子水滴接触角的测量研究表明:可用三阶多项式在像素数区间[110,160]上拟合生成接触角;主叶脉方向和与之垂直的方向之间接触角差异明显,均值相差7.15°,同一方向上左右接触角均值相差1.33°。

**关键词:** 雾滴 叶面 接触角 测量 图像处理 数值方法

**中图分类号:** S447.11

**文献标识码:** A

## Stable Interval Method Based on Images to Measure Drop Contact Angles on Plant Leaf Surfaces

Qiu Baijing Zhao Xiaoli Jia Weidong Zhang Zhenlei

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology,  
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

The measurement method was developed for determining contact angle by fitting the unilateral drop profile. The concept of contact angle's stable interval was put forward, and a numerical experiment method for the optimization of fitting functions and fitting pixel numbers was established. The presented method was compared to the axisymmetric integral method, with contact angle deviation 1.92%. Because the axisymmetric condition was not introduced in this method, it can be used to measure contact angles of non-axisymmetric drops. The contact angles of deionized water on *Osmanthus fragrans* leaves were measured, and the research results show that: three degree polynomial can be used to fit the drop profile in the pixel number interval and determine contact angle; the contact angles between the principle vien direction and the direction perpendicular to it are obviously different, with the average discrepancy 7.15°, the average discrepancy of left and right contact angles on the same direction is 1.33°.

**Key words** Drops, Plant leaf surface, Contact angle, Measurement, Image processing, Numerical method

### 引言

雾滴与植物叶面的相互作用是典型的湿润现象。接触角是分析湿润现象的重要参数<sup>[1]</sup>,利用接

触角不仅可以分析植物叶面的亲水性、疏水性以及铺展能力,而且可以直接指导农业喷雾作业<sup>[2]</sup>。尽管接触角在理论和实践中都很重要,但对植物叶等天然生物材料而言,目前缺少直接从理论上计算接

收稿日期: 2008-07-07 修回日期: 2008-08-26

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30571240)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B.05)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100905、2006AA10A305-3)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2008229)

作者简介: 邱白晶,教授,主要从事农业机械化工程及系统监测与控制研究, E-mail: qbj@uj.s.edu.cn

触角的有效方法,现阶段获取接触角信息仍然依赖于试验测量。另一方面,根据 Neinhuis C 等人的试验结果<sup>[3]</sup>,天然生物材料的湿润现象与人工材料相比有很大不同,其试验结果不能由杨氏湿润理论很好地解释。因此,Whilhelm 吊片法、量高法、液滴形状分析法等基于杨氏湿润理论的接触角测量方法不能直接用于天然生物材料。研究天然生物材料湿润现象必须采用非接触式测量手段。其中,又以基于图像提取三相接触点处液滴轮廓的方法最受研究者重视。

从利用图像方法测量接触角的研究来看<sup>[4~6]</sup>,图像方法面临两大类问题。第一是如何从图像信息中有效提取三相接触点附近液滴轮廓,从而方便后续算法生成接触角。这类问题的解决主要依赖于图像处理技术的发展。第二是获得三相接触点附近轮廓图像后,如何有效地生成接触角算法问题,即图像后处理算法适应性问题。它包括:① 图像处理所产生的三相接触点附近轮廓图像并非数学意义上的严格曲线,而是在轮廓的不同位置处像素数不同,亦即精度不同,这就面临着不同精度数据的融合问题。② 即使确定了算法框架,在具体算法参数选择上也存在材料相依性,因此必须针对具体材料类别积累算法经验并发现规律。

本文以疏水性植物叶面液滴接触角为对象,重点研究图像后处理算法问题,以期积累针对这类固液系统的经验和规律。

## 1 试验设备与材料

### 1.1 试验设备

微量注射器(上海佳安公司),其量程为  $1\ \mu\text{L}$ ; SMZ1000 型带有 CCD 照相机的变焦体视显微镜(日本尼康公司),其中 CCD 照相机像素分辨率为  $1\ 280\times 960$ ; SCHOTT - KL1500 LCD 型卤素灯(德国 SCHOTT 公司); Minolta SPAD - 502 型叶绿素计; TES - 1332A 型照度计(中国台湾泰仕公司)。

### 1.2 植物叶样本制备与液滴生成

(1) 植物叶种类:选择疏水性植物叶,具体为桂花树叶。

(2) 植物叶取样:选取生长于 5 月中旬的桂花树,树高约 5 m。在树的中层部位摘取叶脉相近的树叶,并用叶绿素计测量叶绿素含量,使选取的树叶叶绿素质量分数差值不超过 1%。用清水将树叶清洗干净,自然风干。在距主叶脉一侧 3 mm 处,从主叶脉中心沿主脉方向截取 5 mm 长的叶段。

(3) 液滴生成:将制备好的叶段放置在显微镜载物台上,用微量注射器垂直缓慢地将去离子水滴

加在叶段表面的 2 个侧脉中间,重复滴加 3 次形成体积为  $3\ \mu\text{L}$  的液滴。

### 1.3 液滴显微图像采集

接触角测量系统如图 1 所示。其中载物台配有旋转机构,便于对液滴进行多角度拍摄。

在室温  $20^\circ\text{C}$  下,待液滴形成 60 s 达到平衡时,由卤素灯照射液滴,液滴处照度为  $17.55\ \text{klx}$ 。液滴经显微镜放大 30 倍,由 CCD 照相机拍摄。拍摄的液滴图像传输到计算机,以 bmp 格式保存。

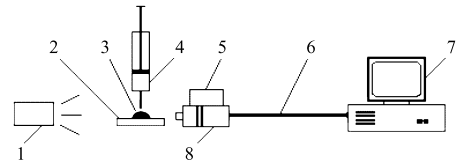


图 1 接触角测量系统

Fig. 1 System for the measurement of contact angles

1. 卤素灯 2. 载物台 3. 液滴 4. 微量注射器 5. CCD 照相机  
6. 数据线 7. 计算机 8. 显微镜

## 2 试验研究的主因子

### 2.1 与植物叶生长形态相关联的主因子

#### 2.1.1 植物叶方向性因子

选取互成  $90^\circ$  的两个方向来获取桂花叶上液滴图像,其一方沿着主叶脉方向。这是因为:植物叶按叶脉生长,具有取向性,这种生长的取向性是否会导致其上液滴接触角的差异,以及差异程度如何,需由试验确定。

#### 2.1.2 液滴对称性因子

对同一幅液滴图像,同时测量左右接触角,以比较左右接触角差异。理论上,只有当液滴和植物叶构成的固液系统具有各向同性时,左右接触角才会相等。植物叶生长的取向性,是否会导致左右接触角的差异尚缺乏定量的理论依据,因此也需通过试验确定。

### 2.2 与接触角算法框架相关联的主因子

#### 2.2.1 液滴轮廓提取算法

目前还没有针对接触角测量的专用轮廓提取算法。本文从图像处理领域选取已有算法,详见 3.1 节和 3.2 节。选定算法后不再调整,而是作为试验的固定因子。

#### 2.2.2 图像后处理算法

液滴轮廓图像在接近三相接触点处像素点密集,精度较低,必须采用数据融合算法生成三相接触点处的单值轮廓曲线,才能确定接触角。文献<sup>[4~6]</sup>采用多项式、椭圆和圆为拟合框架,但关于拟合像素数以及多项式拟合时阶次的确定,没有给出具体方法。本文以多项式为拟合框架,将多项式阶次和拟

合像素数作为主因子, 并采用数值试验方法来定阶和定点。

### 3 图像处理

#### 3.1 图像去噪处理

一般用滤波方法对图像进行去噪。典型的图像滤波方法有空间滤波、频域滤波以及形态学滤波。形态学滤波可在保持图像基本几何形态不变的基础上去除噪声<sup>[7]</sup>。本文去除噪声的关键是保证液滴边缘的完整性, 因此采用形态学滤波进行图像去噪。

形态学滤波器按照结构元素形状和滤波顺序选取具体算法<sup>[8~9]</sup>。选用  $3 \times 3$  圆盘结构元素和  $5 \times 5$  菱形结构元素先后对图像执行开运算和闭运算, 以达到抑制噪声和保存边缘的目的。

#### 3.2 液滴轮廓提取

比较边缘检测算子中的 Canny 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子以及 LOG (Laplacian of Gaussian) 算子, 只有 Canny 算子检测到的液滴轮廓最为连续而且变形程度最低。决定 Canny 算子的 3 个参数是连续性阈值  $T_1$ 、 $T_2$  以及高斯平滑滤波器的标准偏差  $J$ <sup>[10]</sup>, 本文选取  $T_1 = 0.1$ ,  $T_2 = 0.2$ ,  $J = 2$ 。图 2 是经过形态学滤波后, 采用 Canny 算子提取出的典型液滴轮廓。图中 A 点为三相接触点。

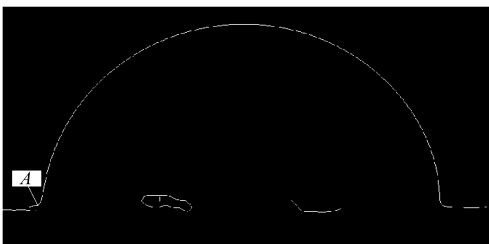


图 2 采用 Canny 算子提取的典型液滴轮廓  
Fig. 2 Extracted typical drop profile using Canny operator

## 4 数值试验结果与分析

#### 4.1 数据融合问题

利用液滴轮廓确定接触角的关键是如何由轮廓数据生成三相接触点附近的单值曲线。一旦获得了这种单值曲线, 便可根据接触角的定义, 采用求导方法得出接触角。

图 2 所示液滴轮廓似乎已经是一单值曲线, 但这只是图 2 没有显示出像素细节的视觉效果。如图 3 所示, 一旦把图 2 放大到足以显示像素细节, 则明显看出提取的液滴轮廓上像素数并不均匀, 尤其是在接近三相接触点 A 处, 像素点呈竖阶梯状。越靠近 A, 像素点越密集, 越远离 A, 像素点越稀疏。各位置像素数的不同反映了各位置定位精度的不同。如仅用 A 附近的像素数据来拟合决定接触

角的单侧曲线, 将会因为参与拟合的数据都是低精度数据, 致使所测接触角精度降低。反过来, 如果过多地利用远离 A 的像素数据, 虽然像素数据精度提高, 但这些像素所在位置远离三相接触点, 因而位置精度偏低, 致使所测接触角精度也会降低。因此, 如何恰当地把高精度像素数据和低精度像素数据融合, 以达到提高接触角精度的目的, 正是当前研究者所要解决的问题。

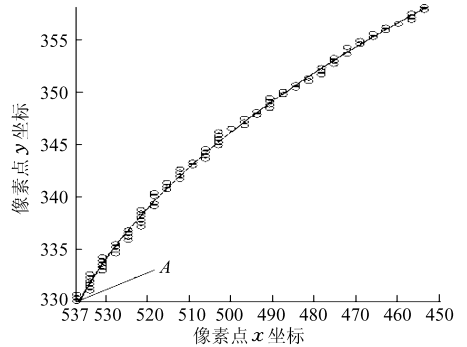


图 3 像素点及拟合结果

Fig. 3 Pixels and fitting result

虽然 Bateni A, del Río O I 和 Li Lei 等人分别以多项式、圆和椭圆为拟合框架, 讨论过曲线拟合中数据融合问题<sup>[4~6]</sup>, 但其结论并不一致。特别是针对数据拟合量, 只是给出了具体参与拟合像素数  $N$ , 而没有给出导出  $N$  的一般性方法。由于利用的拟合像素数  $N$ , 不仅与形成固液系统的材料相关联, 而且还与液滴的尺度相关联, 因此, 这种以拟合像素数为目标的结论, 在推广应用的普适性方面存在较多的限制。显然, 无论是学术上还是应用上, 与其给出具体的像素数  $N$ , 不如建立决定  $N$  的方法。

采用数值试验研究数据融合问题, 以多项式为拟合框架, 建立决定参与拟合像素数的原则和方法。

#### 4.2 数据融合试验方案

##### 4.2.1 数据拟合框架

选取多项式为拟合框架, 具体表达式为

$$f(x) = \sum_{i=0}^M a_i x^i \quad (1)$$

式中,  $x$ 、 $f(x)$  为拟合像素点的位置坐标。系数  $a_0$ ,  $a_1, \dots, a_M$  由最小二乘法确定。

##### 4.2.2 数值试验因子

针对式(1)的拟合函数, 选取多项式阶次  $M$  和参与拟合的像素数  $N$  为试验因子。其中  $M = 1, 2, \dots, 9$ , 共 9 种取值。  $N$  定义为: 从图 3 中三相接触点 A 处开始, 沿液滴轮廓逐渐向右上延伸时, 所取到的累积像素数。  $N$  取值区间为  $[10, 250]$ , 步长  $h = 10$ 。前述图 3 实线显示了  $M = 3$ 、 $N = 140$  两因子组合下的拟合结果。

### 4.3 数据融合结果与分析

#### 4.3.1 接触角稳定区间

接触角稳定区间  $L$  是本文提出的概念,它可用图 4 来说明。图 4 中曲线表示接触角测量值  $\theta$  与像素数  $N$  的数量关系  $\theta = \theta(N)$ ,  $\Delta$  是允许离差,相距  $\Delta$  的两水平线表示公差带直线。根据公差带直线与曲线  $\theta = \theta(N)$  的交点可以确定出长度区间  $L = [N_1, N_2]$ , 使  $\theta$  在此区间的波动不超过  $\Delta$ , 并且  $|L| \geq 2h$ , 这样的长度区间称为接触角稳定区间。

接触角稳定区间概念的意义在于:为确定像素数  $N$  提供依据。只要  $N$  在该稳定区间内取值,则不同的  $N$  对应测得的接触角之间离差不会超过允许离差  $\Delta$ , 亦即数值稳定。允许离差可根据现行图像方法测量接触角所达精度来选取。文献[4]采用多项式拟合液滴轮廓分别测量了癸烷和正癸醇在聚四氟乙烯表面以及甲酰胺在氟化表面 DF55 和 DF13 上的接触角, 试验给出的测量精度为  $1.5^\circ$ 。本文选取允许离差  $\Delta = 1.5^\circ$ 。

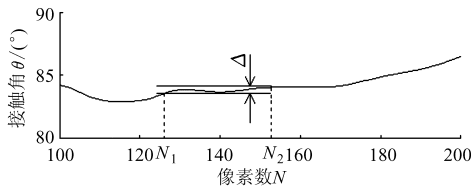


图 4 接触角稳定区间示意图

Fig. 4 Sketch map of contact angle's stable interval

#### 4.3.2 不同阶次多项式的数值试验结果

针对 4.2.2 节试验因子, 9 种多项式拟合生成接触角  $\theta$  与参与拟合像素数  $N$  的关系  $\theta = \theta(N)$  如图 5 所示。其中, 单个  $\theta(N)$  值的计算方法可用三阶多项式(即  $M = 3$ )计算  $N = 140$  时接触角  $\theta(140)$  来说明: 从图 3 中三相接触点 A 处开始, 沿液滴轮廓逐渐向右上延伸时, 取累积像素数至  $N = 140$ , 用这 140 个像素按 4.2.1 节方法得出拟合后三阶多项式如图 3 实线所示, 求此拟合后三阶多项式在三相接触点 A 处的导数, 并经反正切三角函数变换便得出了接触角  $\theta(140)$ 。按此原理, 改变  $N$  可计算其他  $\theta(N)$  值, 改变  $M$  可计算其他阶次多项式所对应的  $\theta(N)$  值。

由图 5 可知: 当  $N$  取较小值时, 所求接触角随  $N$  波动大。而较小的  $N$  所对应的像素数据恰恰是图 3 中接近三相接触点 A 处的数据, 这进一步说明了不能仅用 A 附近的像素数据来测量接触角。从图 5a 中还可以看出, 所求接触角随  $N$  增加呈单调变化, 不存在接触角稳定区间, 因此一阶和二阶多项式不适合于本文所研究的植物叶上接触角的测量。从图 5c 可以看出, 七阶多项式存在着 2 个不同的接

触角稳定区间, 八阶、九阶多项式不存在接触角稳定区间。故阶次大于六的多项式也不适合于测量植物叶上接触角。

图 5b 所示为多项式阶次  $M \in \{3, 4, 5, 6\}$  的情况, 这 4 种多项式的  $\theta = \theta(N)$  数量关系均存在单一的接触角稳定区间。其  $\theta(N)$  的定性变化规律可概括为: 当  $N$  较小时,  $\theta(N)$  有较大的起伏波动; 随着  $N$  的增加,  $\theta(N)$  进入允许离差  $\Delta = 1.5^\circ$  的稳定区间; 当  $N$  进一步增大时,  $\theta(N)$  进入发散区。

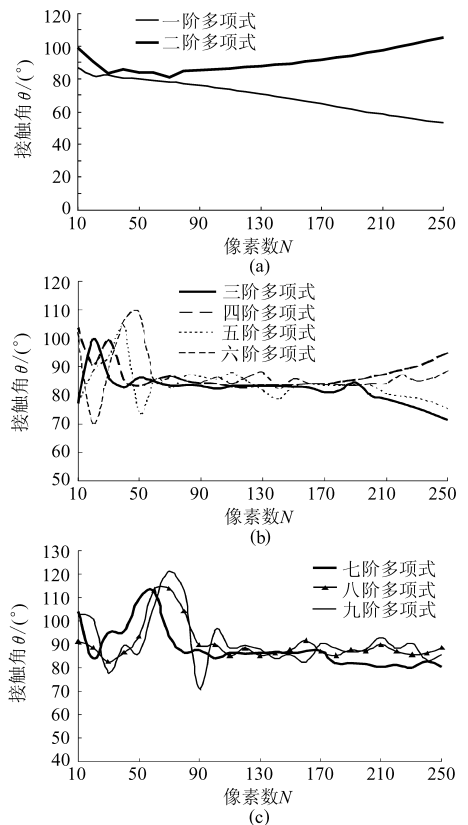


图 5 接触角稳定区间

Fig. 5 Contact angle's stable intervals

综合上述讨论, 可以得出关于接触角稳定区间存在性的结论: ① 并非所有阶次的多项式都存在接触角稳定区间。② 对于同一阶次的多项式, 接触角稳定区间的数目也可能不止一个。③ 当多项式的阶次  $M \in \{3, 4, 5, 6\}$  时, 接触角稳定区间存在且唯一, 故理论上可用于本文所研究的植物叶上接触角的测量。

由于上述数值试验所依据的试样是叶段上的液滴样本, 因此, 接触角稳定区间  $L$  的具体数值存在试验研究所不可避免的随机性。必须采取统计方法处理。针对多项式阶次  $M \in \{3, 4, 5, 6\}$  的 4 种多项式, 其接触角稳定区间分别为  $[110, 160]$ ,  $[130, 170]$ ,  $[150, 200]$ ,  $[170, 210]$ 。

#### 4.3.3 拟合品质度量

尽管阶次  $M \in \{3, 4, 5, 6\}$  的多项式都可以用来

测量植物叶上接触角,但考虑到高阶多项式存在数值病态的可能性,多数研究者倾向于用低阶多项式。选取三阶和四阶多项式来测量接触角。此外,拟合品质是多项式选优的重要指标,运用剩余标准差  $\sigma$  和决定系数  $r^2$  度量拟合品质,计算方法为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2}{N - (M + 1)}} \quad (2)$$

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中  $i$ ——像素点序号

$y_i$ ——像素点纵坐标观测值

$f(x_i)$ ——像素点纵坐标预测值

$\bar{y}$ ——像素点纵坐标观测均值

采用三阶和四阶多项式对每个接触角位置轮廓拟合,在接触角稳定区间  $L$  内,求置信度为 95% 时的  $\sigma$  和  $r^2$ ,并分别求其平均值,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,在  $N < 170$  时,  $\sigma < 0.5$ ;  $N > 110$  时,  $r^2 > 0.999$ ,接近于 1。因此,三阶和四阶多项式在接触角稳定区间内拟合,可用来测量接触角。

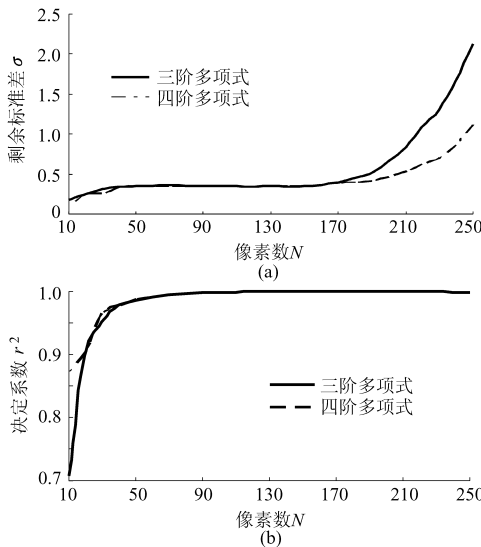


图 6 三阶和四阶多项式拟合效果

Fig.6 Fitting effect of 3th and 4th degree polynomials  
(a) 剩余标准差 (b) 决定系数

#### 4.3.4 多项式选优

根据上述分析,三阶和四阶多项式在接触角稳定区间内拟合品质相当。但三阶多项式比四阶多项式的稳定区间更宽,由此选用三阶多项式在像素数区间  $[110, 160]$  上拟合生成接触角。

#### 4.3.5 试验验证

##### (1) 试验验证对象选取

选定的用于比较的固液系统为玻璃表面上的去

离子水液滴,选定用于比较的参照方法为基于轴对称的标准积分法。这是因为:① 植物叶生长的取向性会在多大程度上引起液滴形状不规则,目前尚无定量结论,而且植物叶上接触角也没有标准测量方法和公认测量值可予以对比。② 玻璃表面上去离子水液滴是经典的固液系统,液滴形状具有对称性,可采用图像法中成熟的高精度轴对称法得出公认测量值。

##### (2) 试验验证结果

以多项式为拟合框架,根据前述利用接触角稳定区间、剩余标准差和决定系数来定阶和定点的原则,测量了去离子水在玻璃表面上的接触角。对 40 个试样测量左右接触角,测得的接触角值与由 OCA-20 型接触角测量仪(德国 Dataphysics 公司,其原理采用轴对称积分法)测得的接触角值<sup>[11]</sup>进行比较,偏差为 1.92%,结果如表 1 所示。

表 1 水在玻璃表面上的接触角  
Fig.1 Contact angles of water on glass surfaces (°)

参数	左接触角	右接触角	平均接触角	文献值
	$\theta_l$	$\theta_r$		
样本均值	40.78	41.01	40.9	41.7 ± 0.1
样本标准差	0.65	0.54		

## 5 植物叶上接触角的差异

测量了桂花叶主叶脉方向和垂直于主叶脉方向两个方向上的接触角。20 个叶段样本的测量结果表明:两方向上接触角有明显差异,均值相差 7.15°;同一方向上左右接触角也有差异,均值相差 1.33°。虽然实际拍摄时难以保证主叶脉方向的准确定位,但两垂直拍摄方向的相对定位由载物台旋转定位机构保证,因此,两垂直方向上接触角有明显差异的结论仍然成立,这也说明植物叶上雾滴接触角存在轴向不对称情形。如果需要得到接触角相对于叶面的几何关系,则需采用叶上坐标系来定位。

## 6 结论

(1) 发展了利用单侧液滴轮廓像素拟合生成接触角的方法,提出了接触角稳定区间概念,并以允许离差  $\Delta = 1.5^\circ$  来判别接触角稳定区间。采用本文方法测量了玻璃表面上液滴接触角,与轴对称积分法相比,偏差为 1.92%。由于本文方法没有引入轴对称条件,因而可应用于非对称液滴接触角的测定。

(2) 以图像方法测量去离子水在桂花叶面上的接触角为例,建立了实现试验选优的一套完整数值试验方法,并运用接触角稳定区间、剩余标准差和决

定系数来评定数值试验结果。结果表明:对于此类固液系统,可用三阶多项式在像素数区间[110,160]上拟合液滴轮廓生成接触角。

(3) 针对植物叶生长的取向性是否会导致其上液滴接触角不同,选取桂花叶主叶脉方向和垂直于主叶脉方向为试验的2个方向主因子。试验结果表明,两方向上接触角有明显差异,均值相差 $7.15^\circ$ ,

同一方向上左右接触角也有差异,其均值相差 $1.33^\circ$ 。

(4) 完整研究动态喷雾需要采用动态图像分析,这种分析也要以单帧为基础,因此本文方法可作为动态接触角研究的单帧算法。另一方面,平衡和稳定总是对应能量的极值,因此本文方法和结论也可用于动态喷雾过程的极值状态预估与分析。

#### 参 考 文 献

- 1 Levanon S S, Marmur A. Validity and accuracy in evaluating surface tension of solids by additive approaches[J]. *Colloid Interface Sci.*, 2003,262(2): 489~499.
- 2 Lam CNC, Lu J Y, Neumann A M. Measuring contact angle[M]. *Handbook of Applied Surface and Colloid Chemistry, Part 5: Analysis in Surface Chemistry*, John Wiley & Sons.Ltd, 2001.
- 3 Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79(6): 667~677.
- 4 Bateni A, Susnar S S, Amirfazli A. A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2003, 219(1~3): 215~231.
- 5 del R'io O I, Kwok D Y, Wu R. Contact angle measurements by axisymmetric drop shape analysis and an automated polynomial fit program[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, 143(2~3):197~210.
- 6 Li Lei, Kang Wei, Dattin Y E. A contact angle measurement method for the droplets in EWOD-based chips [C] // *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Bangkok, Thailand, 2007, 16~19: 1 071~1 075.
- 7 Kumar J, Shunmugam M S. A new approach for filtering of surface profiles using morphological operations[J]. *Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(3~4): 260~270.
- 8 Soille P. *Morphological image analysis: principles and applications*[M]. 2nd Edition. Berlin, Germany: Springer, 2003.
- 9 Alvarez J M, Amirfazli A, Neumann A W. Automated image analysis module for axisymmetric drop shape analysis-diameter [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 156(1~3): 163~176.
- 10 Canny J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679~698.
- 11 庞红宇,黄琴,马琛. 雾滴体积和测量时间与雾滴接触角的关系[J]. *河南农业科学*,2005(12): 51~54.  
Pang Hongyu, Huang Qin, Ma Chen. Studies on relation of droplet contact angle to droplet volume and measuring time [J]. *Journal of He'nan Agricultural Sciences*, 2005(12): 51~54. (in Chinese)

(上接第 148 页)

- 5 Rovira Más F, Zhang Q, Reid J F. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereo images [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 251~259.
- 6 Suzuki S, Abe K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following[J]. *CVGIP*, 1985,30(1): 32~46.
- 7 Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or it's caricature [J]. *The Canadian Cartographer*, 1973,10(1):47~55.
- 8 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1 330~1 334.
- 9 王勇,沈明霞,姬长英. 基于颜色信息和形状特征的棉桃识别方法[J]. *农业机械学报*,2007,38(11):77~79,87.  
Wang Yong, Shen Mingxia, Ji Changying. Using color data and shape properties for cotton fruit recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007,38(11):77~79,87. (in Chinese)