
JY-PHa 型接触角测定仪 (V2.0)

使用说明书



目 录

一、	主要结构及技术指标	4
1.	主要结构	4
2.	硬件性能指标	4
1)	工业相机	4
2)	显微镜头	5
3)	调焦支架	5
4)	下载物台	5
5)	上载物台	5
6)	进样器	5
7)	背光	5
3.	软件功能	5
1)	拍照	5
2)	录像与视频分析	6
3)	接触角测量	6
4)	表面能计算	6
5)	图片与数据管理	6
二、	接触角概述	6
1.	润湿作用及接触角	6
2.	润湿过程	7
1)	沾湿	7
2)	浸湿	7
3)	铺展	7
3.	接触角与润湿方程	8
4.	接触角的测定	9
4)	切线角度测量法	9
5)	量高法	9
6)	量角法	10
7)	4、自动测量法	10
8)	增减滴体积法测量前进角和后退角	11
三、	仪器安装	12
四、	四、仪器操作	12
1.	使用前的检查	13
2.	软件安装与启动	13
3.	操作	14
1)	视频图像调节	14
2)	接触角测试基本过程	15
3)	视频录制与定时拍照	16
4)	视频播放与截取	16
5)	接触角分析	17
4.	文档管理	22
1)	保存项目	22
2)	读入项目	22
3)	导出测试结果	22
4)	添加已有图片	22

5) 保存图片	22
6) 删除图片	23
5. 表面能分析	23
1) Fowkes 方程	23
2) Owens 方程	24
3) YGGF 方程	25
五、 使用注意事项	25

(使用前请仔细阅读本说明书!)



接触角测定仪用于对固体-液体-气体三相界面间形成的接触角进行测定，进而分析三相介质之间的相互作用，并由此分析固体的表面能等数据。是热力学、物理化学、表面化学必备的仪器。

本接触角测定仪采用高分辨率工业相机与显微镜头，对固-液-气三相界面进行拍照，得到清晰的界面图像。提供录像功能，对于高速变化的界面可记录变化的每一瞬间，然后通过任意速度的回放，抓取其变化的关键图像进行分析。软件吸收了国际最新接触角测量接表面能计算方法，多种接触角测量方法和表面能计算方法可直接进行对比，以便找到符合该界面的理想的测量与计算方法。该仪器广泛用于石油、化工、医药、造纸、染料等领域，适用于大专院校、科研院所、质检机构、工厂矿业等部门使用。

一、 主要结构及技术指标

1. 主要结构

仪器主要如图 1-1 所示

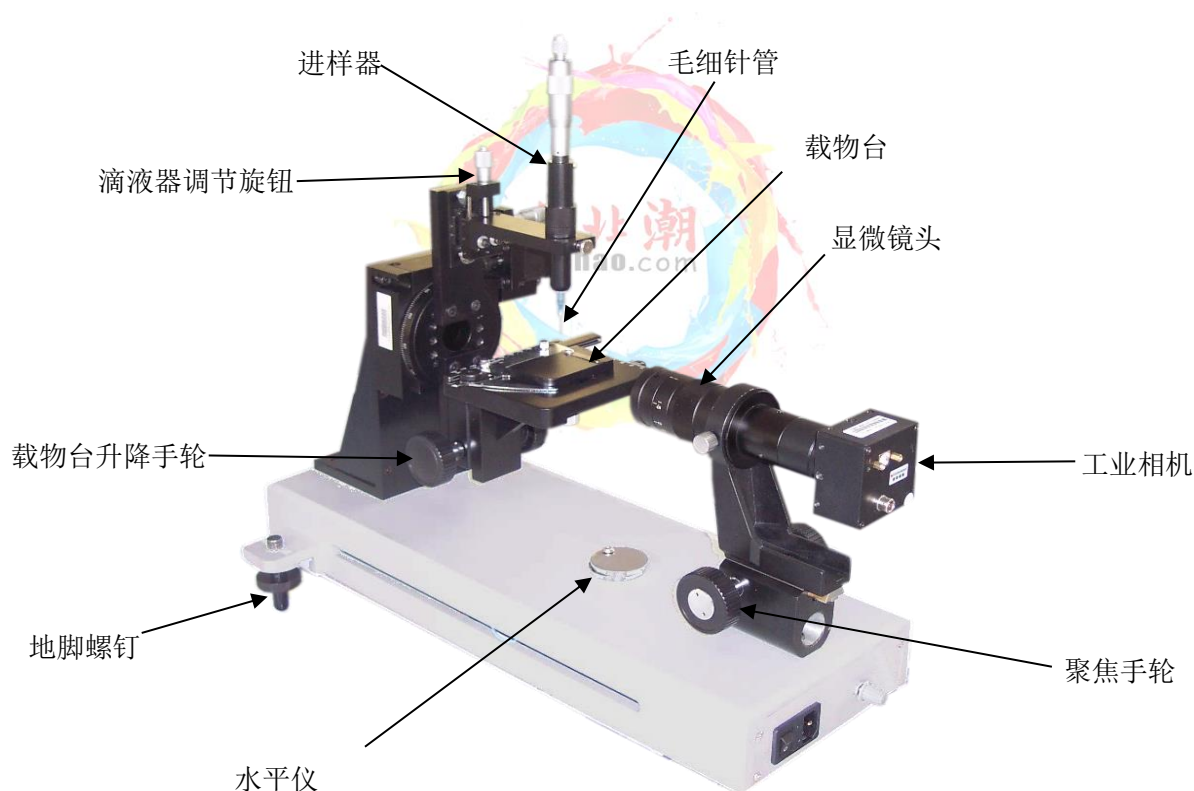


图 1-1 接触角测定仪主要结构

2. 硬件性能指标

1) 工业相机

色彩方式：黑白

最大分辨率：2048*1536 像素

最小分辨率：640*480 像素
录像帧频：最高 25FPS。

2) 显微镜头

变倍比：0.7~4.5X
放大倍数：30~130
工作距离：95mm
筒长：168mm
视场角：18mm

3) 调焦支架

F 型调焦支架
调节范围：60mm

4) 下载物台

移动方式：手动，平滑光学部件
载物台尺寸：125*95mm
X 方向（横向）：80mm，精度 0.1mm
Y 方向（纵向）：30mm，精度 0.1mm
Z 方向（上下）：50mm

5) 上载物台

尺寸：70*45mm，一侧圆角

6) 进样器器

最小进样体积分辨率：2.5 μ L
上下调节范围：12mm
左右调节范围：12mm
进样器容量：5mL

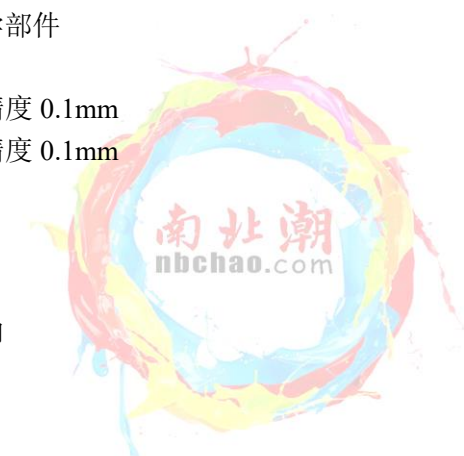
7) 背光

半导体冷光源，量度连续可调

3. 软件功能

1) 拍照

单张拍照、连续拍照（间隔时间任意设定）
拍照分辨率：1280*960、1024*768、800*600、640*480
大小图预览功能
图像增益、亮度调节功能



2) 录像与视频分析

重放视频
重放抓拍照片
逐帧抓取照片
可单帧向前、向后播放

3) 接触角测量

自动测量方法：基线位置特征明显的图片可以全自动测量，基线特征不明显的图片需要手工标识基线位置。

量高法测量：绘制液滴基线矩形，自动计算接触角。

量角法测量：通过量角器工具测量。

切线法：完全手工方式，通过绘制基线和切线计算接触角。

4) 表面能计算

提供 Fowkes 方程、Owens 方程和 YGGF 方程。

5) 图片与数据管理

拍摄图片后图片进入小图列表。

可以添加现有图片到小图列表。

可以单独保存图片到磁盘，并可以选择图片上绘制的测试工具。

单击小图打开分析界面进行接触角分析。

各种接触角分析结果均自动添加到结果列表中。

结果列表可以导出为 Excel 表。

可以将分析结果整体保存到项目文件，可以再次打开编辑。

二、 接触角概述

1. 润湿作用及接触角

润湿（Wetting）是指在固体表面上一种液体取代另一种与之不相混溶的流体的过程。因此，润湿作用必然涉及三相，其中两相是流体。常见的润湿现象是固体表面上气体被液体取代的过程。

润湿是最常见的现象之一，也是人类生活与生产中的重要过程，可以毫不夸张地说，若无润湿作用，则人类将难以生存。因为如果没有润湿作用，动植物的生命活动便无法进行（请设想一下水对土壤及动植物机体不润湿的后果）。此外，润湿作用还是许多生产过程的基础。例如机械润滑、注水采油、洗涤、印染、焊接等等，皆与润湿作用有密切关系，当然，在人类的生活和生产中也不总是要求润湿，有时倒是需要其反面。例如矿物浮选常常要求有用矿物不为水所润湿；防雨布、防水及抗粘涂层等都要求形成不被润湿的表面。

那么，液体在什么条件下可以润湿固体，怎样改变液体和固体的润湿性质以满足人们的需要？这就要研究固体和液体、气体之间的接触特性。

另外，由于润湿现象是固体表面结构与性质、液体表面与界面性质以及固液两相分子间相互作用等微观特性的宏观表现，润湿现象的研究可以为了解不易得到的固体表面性质提供有用的知识。

液体对固体的润湿特性可以通过固液气三相的接触角来衡量，通过接触角的测定还可以分析固体表面的表面能、表面张力等许多特性，所有在研究液体对固体的润湿特性和固体的表面特性时，不可避免的要涉及到接触角的测定。

2. 润湿过程

润湿过程可以分为三类：沾湿（adhesion）、浸湿（immersion）和铺展（spreading），它们各自在不同的实际问题中起作用。下面分别讨论这些过程的实质及自动进行的条件。

1) 沾湿

指液体与固体从不接触到接触、变液气界面和固气界面为固液界面的过程（图 2-1）。例如农药喷雾能否有效地附着到植物枝叶上？雨滴会不会沾在衣服上？此皆沾湿过程能否自动进行的问题。

设形成的接触面积为单位值，此过程中体系自由能降低（ $-\Delta G$ ）应为：

$$-\Delta G = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{sl} = W_a \quad (2-1)$$

式中， γ_{sg} 为气固界面自由能； γ_{lg} 为液体表面自由能； γ_{sl} 为固液界面自由能； W_a 称为黏附功，是沾湿过程体系对外所能作的最大功，也是将接触的固体和液体自交界处拉开，外界所需作的最小功。显然，此值越大则固体和液体结合越牢。故 W_a 值反映固

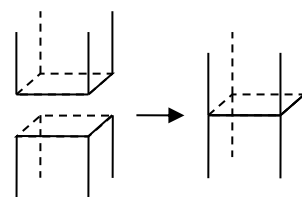


图 2-1 沾湿过程

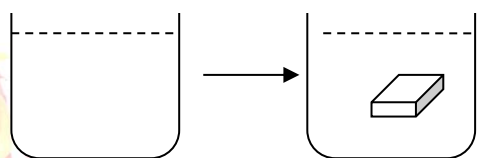


图 2-2 浸湿过程

体和液体自交界处拉开，外界所需作的最小功。显然，此值越大则固体和液体结合越牢。故 W_a 值反映固液界面结合能力及两相分子间相互作用力的大小。根据热力学第二定律，在恒温压条件下， $W_a > 0$ 的过程为天然过程。这也就是沾湿发生的条件。

2) 浸湿

指固体浸入液体中的过程。洗衣时把衣服泡在水中就是浸湿的过程。此过程的实质是固气界面为固液界面所代替，而液体表面在此过程中没有变化，如图 2-2 所示。在浸湿面积为单位值时，此过程的自由能降低值为：

$$-\Delta G = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} = W_i \quad (2-2)$$

W_i 称作浸润功，它反映液体在固体表面上取代气体（或另一种与不相混溶的流体）的能力， $W_i > 0$ 是浸湿过程能否自动进行的判据。

3) 铺展

多种工业生产中应用涂布工艺，其目的在于在固体基底上均匀地形成一流体薄层。这时不仅要求液体能附着于植物枝叶上生产药效，而且能自行铺展，以便覆盖面积最大，达到最好的植物保护效果。铺展过程的实质是以固液界面代替气固界面的同时还扩展了气液界面（图 2-3）。当铺展面积为单位值时体系自

由能降低为

$$-\Delta G = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} - \gamma_{lg} = S \quad (2-3)$$

S 称为铺展系数，在恒温压下， $S > 0$ 时液体可以在固体表面上自动展开，连续地从固体表面上取代气体。只要用量足够，液体将会自行铺满固体表面。将式 2-2 和式 2-3 结合可得

$$S = W_i - \gamma_{lg}$$

此式说明若要铺展系统 $S > 0$ ，则 W_i 必须大于 γ_{lg} 。 γ_{lg} 是液体的

表面张力，表征液体收缩表面的能力。与之相应， W_i 则体现了固体与液体间粘附的能力。因此，又称之为黏附张力，用符号 A 来代表

$$A = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (2-4)$$

三种润湿过程自发进行的条件皆可以用黏附张力来表示

$$W_a = A + \gamma_{lg} > 0 \quad (2-5)$$

$$W_i = A > 0 \quad (2-6)$$

$$S = A - \gamma_{lg} > 0 \quad (2-7)$$

由于液体的表面张力总是正值，对于同一体系 $W_a > W_i > S$ ，故凡能自行铺展的体系，其它润湿过程皆可自动进行。因而常以铺展系数为体系润湿指标。

从式 2-5、2-6、2-7 还可以看出，固体表面能对体系润湿特性的影响都是通过黏附张力 A 来起作用。其共同的规律是：固气界面能越大、固液界面能越小，也就是黏附张力越大，越有利于润湿。液体表面张力对三种润湿过程的影响各不同：对于沾湿 γ_{lg} 大有利，对于铺展 γ_{lg} 小有利，而对于浸湿则 γ_{lg} 大小与之无关系。

从上述内容应该得出一个结论：根据有关界面能的数值可判断各种润湿过程能否自动进行；再通过改变相应的界面能的办法即可达到所需要的润湿效果。但实际却关非如此简单，且不说随意改变各种界面能并非易事，就是有关各界面能的数值也不是都能求之即得的。在三种界面中只有液体表面张力可以方便地测定。因此应用上述润湿判断实际上是困难的。然而，在固液接触存在接触角的情况下，在很久以前人们已经找出接触角与有关界面能的关系，为研究润湿现象提供了方便。

3. 接触角与润湿方程

将液滴滴于固体表面上，液体或铺展而覆盖固体表面，或形成一液滴停于其上，如图 2-4 所示，随体系性质而异。所形成液滴的形状可以用接触角来描述。接触角是在固、液、气三相交界处，自固液界面经液体内部到气液界面的夹角，以 θ 表示。平衡接触角与三个界面自由能之间有如下关系：

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (2-8)$$

此式最早由 T.Young 在 1805 年提出的，常称为杨氏方程。它是的基本公式，亦称为润湿方程。可以看作是三相交界处三个界面张力

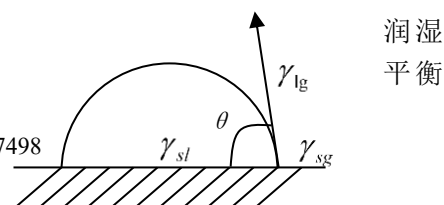


图 2-4 接触角示意图

的结果。此关系适用于具有固液、固气连续表面的平衡体系。尽管用力学方法导出的润湿方程是完全正确的，但由于固体界面的不均匀性，固液及固气界面张力的性质不易了解，人们用多种热力方法导出润湿方程。下面介绍其中的一种。

设停于固体表面上液滴在平衡条件下扩大固液界面面积 dA ，相应的气液界面面积的增值为 $dA \cos(\theta - d\theta)$ (如图 2-5 所示)，体系自由能变化为

$$\Delta G = \gamma_{sg} dA - \gamma_{sl} dA - \gamma_{lg} \cos \theta dA$$

导出此式时因为 $d\theta$ 值很小而加以忽略。由于是平衡条件下的变化，故 $\Delta G = 0$ ，于是

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta$$

即得润湿方程。

将润湿方程与式 2-1、2-2、2-3 结合则得

$$W_a = \gamma_{lg} (\cos \theta + 1) \quad (2-10)$$

$$A = W_i = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (2-11)$$

$$S = \gamma_{lg} (\cos \theta - 1) \quad (2-12)$$

因此，原则上说，测定了液体表面张力和接触角即可得到黏附功、黏附张力和铺展系数的数值，从而解决了应用各种润湿判断的困难。从式 2-10、2-11、2-12 不难看出接触角的大小是很好的润湿标准。接触角越小润湿性能越佳。习惯上常将 $\theta = 90^\circ$ 定为润湿与否的标准。 $\theta > 90^\circ$ 为不润湿， $\theta < 90^\circ$ 为润湿，平衡接触角等于 0 或不存在为铺展。

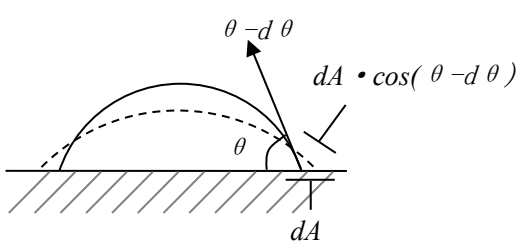


图 2-5 接触角与界面能

4. 接触角的测定

测定接触角有许多种方法，可根据直接测定的物理量分为四大类：静滴法（角度测量法）、长度测量法、力测量法、透过测量法。前三种适用于连续的平固体表面，后一种方法可用于粉末固体表面的接触角测定。本仪器支持以下基本测试方法。

4) 切线角度测量法

这是应用最广泛，也是最直接的一类方法，如图 2-6 所示，在表面滴一滴液体，通过仪器进行拍照，然后把液滴与固体表面接近分看作圆弧，在软件支持下对这个圆弧做切线，然后测量该切线与表面角度。该方法的优点是过程简单、测量方便，能适应不同角度滴。缺点是人为的误差比较大。

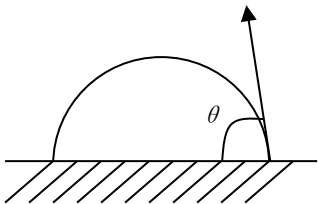


图 2-6 切线角度测量法

固体的部分
固体的液

5) 量高法

为避免作切线的困难，消除人为操作的误差，发展了从长度测量数据计算出接触角的方法，它的依据是对于小的液滴，其外形可以看作是球形的一部分，在液滴拍照的图上测出液滴的高度和底面的长度，如图 2-7 所示，即可根据下式求得接触角。

$$\sin \theta = 2hr / (h^2 + r^2)$$

或

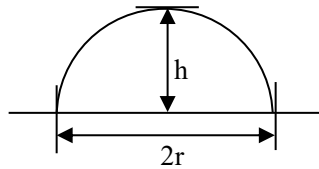


图 2-7 长度测量法

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = h/r$$

这种方法的前提是液滴足够小，其重力影响可以忽略不计，此时液滴边缘在表面张力作用下是球体的一部分。

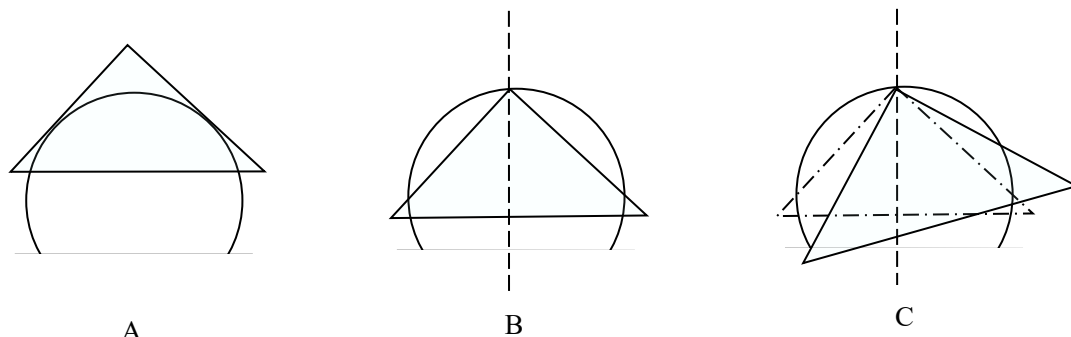


图 2-8 量角法测量步骤

6) 量角法

量角法是使用软件模拟直角尺，通过直角尺的移动及旋转测量出圆球的切线角度。如图 2-8 所示，首先画出直角量角器，使其与液滴圆相切，如图 2-8A 所示。然后向下移动量角器，使其直角定点与液滴圆的定点重合，如图 2-8B 所示。再以直角顶点为原点旋转量角器，让它的一条直角边和相邻的三相交界点重合，根据旋转的角度就可以计算出接触角，如图 2-8C 所示。

该方法的特点与弦高长度法相同，优点是测量比较准确，人为因素影响小。但要求液滴基本为圆形，且滴落在水平的平面上。

7) 4、自动测量法

自动测量法利用机器视觉技术，提取液滴的轮廓线，通过轮廓线分析得到液滴的形状特征，由于液滴受重力影响，不会保持理想的球冠形，这样量高法和量角法会形成较大误差。自动测量提取液滴特征后，会根据液滴形状得到液滴的二次方程，并根据基线位置自动计算三相交界点的切线方程，目前来讲是精度较高的一种方法。

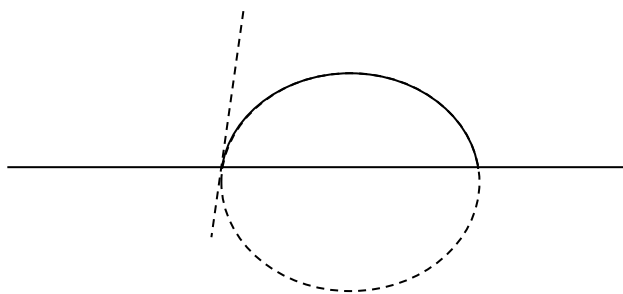


图 2-9 自动法示意图

液滴接触固体表面后，会随时间推移湿润程度发生变化，尤其是粗糙物体表面，这一现象更为明显，这时需要测试其动态变化过程，这个过程一般以其前进角和后退角来表示。

8) 增减滴体积法测量前进角和后退角

退角

实际固体表面一般都是非理想表面，或大或小总会出现接触角的滞后现象，因此，一般需要同时测定接触角的前进角和后退角，如图 2-10 所示，通过注液器来控制液滴的体积，同时进行连续拍照，当增加液滴体积时可测出前进角，减少液滴体积时可测出后退角。注意在测定时要将毛细管尖端插入液滴中。

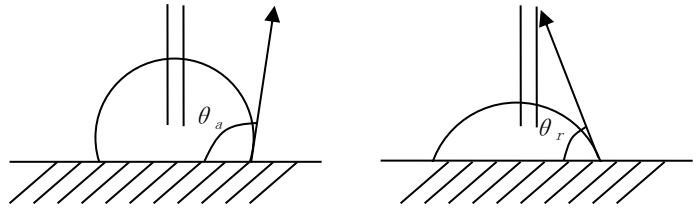


图 2-10 前进角和后退角



三、 仪器安装

设备拆箱后，首先对照装箱单检查附件是否齐全，若缺少附件，请立即与本公司联系。

将接触角测定仪主机安装在平稳无振动的工作台上，并根据水平仪的指示把设备调到水平状态。

按照如下顺序安装附件：

- 1、 将工业相机和显微镜镜头组件安装到调焦支架上，并确保安装牢固，工业相机应处于水平位置，若不能确定，可在软件安装好后根据基线进行调整。
- 2、 将进样器组件从中间滚花位置拧开，将附带的注射器吸入测试用液体，然后放入进样器芯筒内，调节螺旋测微计的位置，然后将进样器安装好。让针头向上，旋转测微头，把针管中的空气排出。再把进样器安装到进样器架上，紧固。
- 3、 把电脑安装在设备的附近，然后按下图 3-1 的接口说明将接触角测定仪和电脑连接起来。接触角测定仪和电脑都使用单相三线制电源，要有可靠的接地保护。

四、

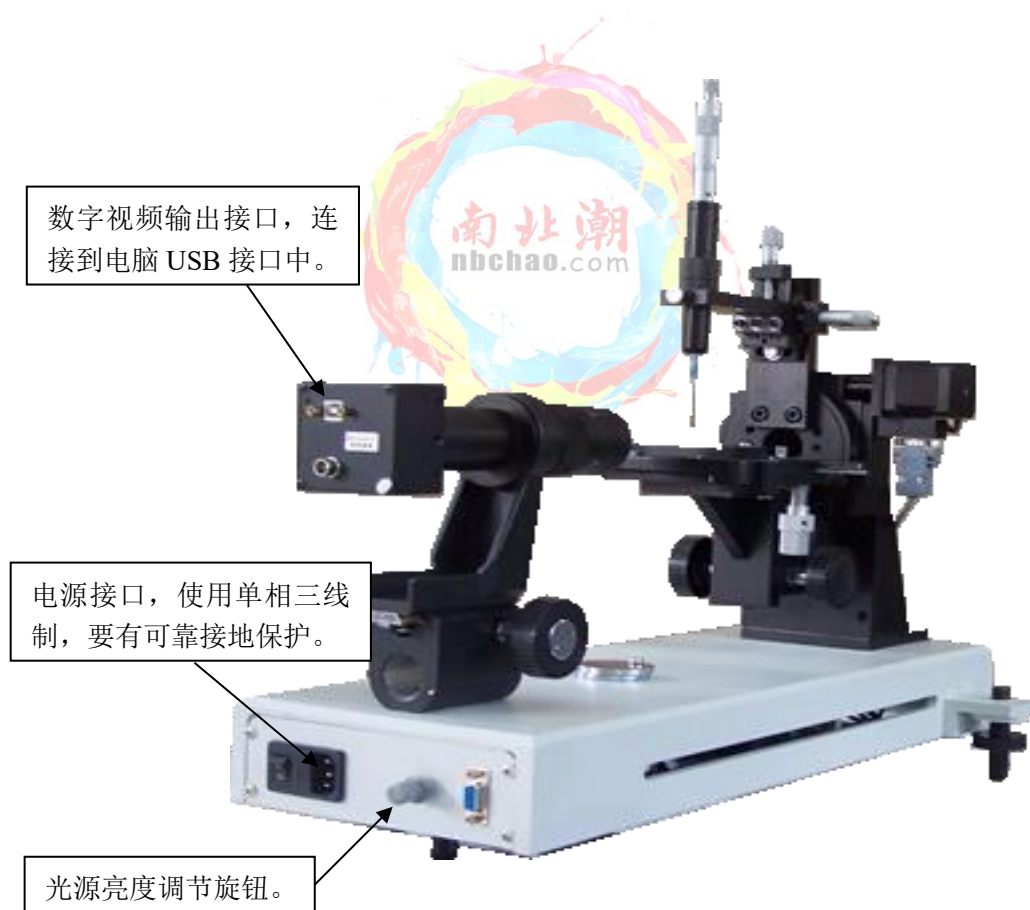


图 3-1 接口接线说明

四、仪器操作

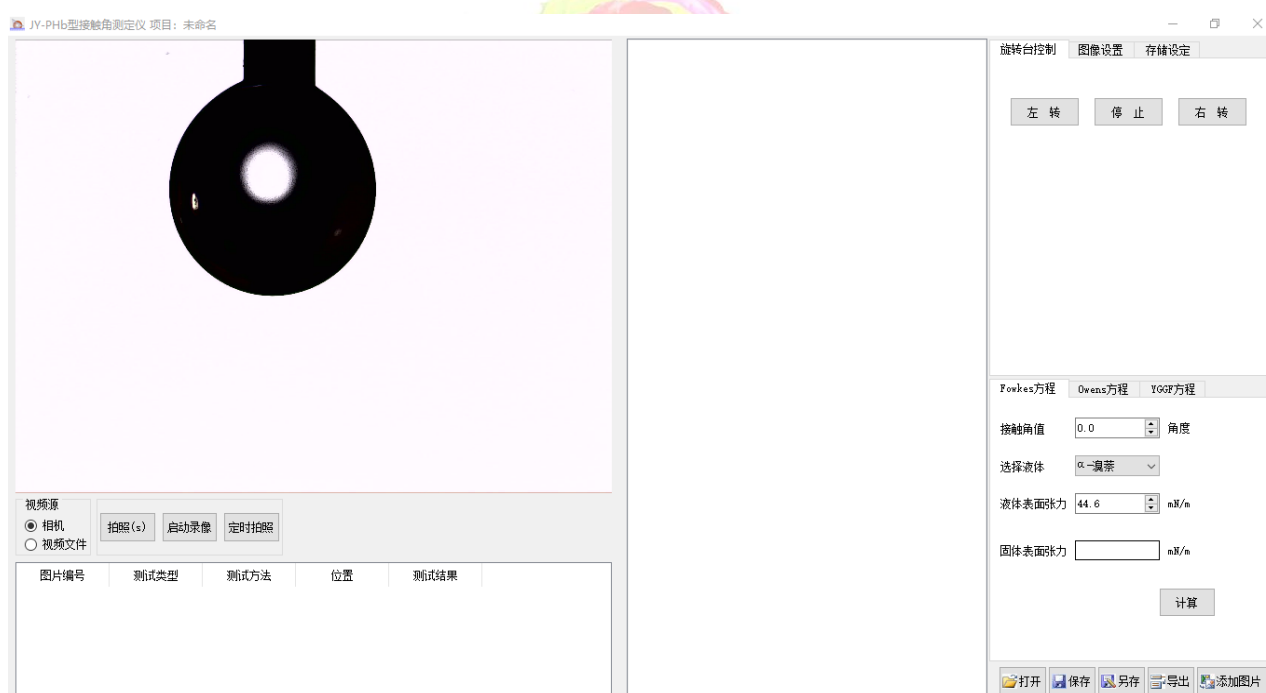
1. 使用前的检查

- 各信号及控制线连接无误。
- 电脑和仪器电源连接可靠，并有良好接地。
- 再次检查仪器是否处于水平状态。
- 打开仪器主机电源，调整背光灯，使背光灯的亮度处于适中位置。
- 将相机信号线插入到主机 USB 接口中。

2. 软件安装与启动

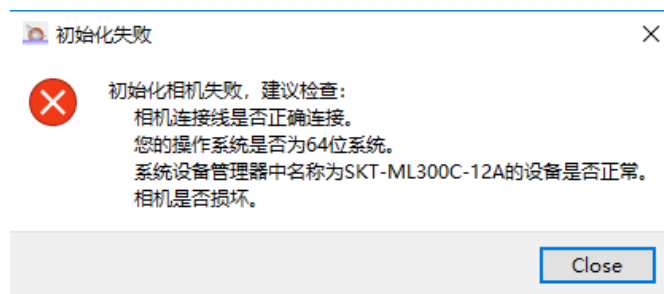
运行随机软件盘中的“JY_PHbAngleSetup.exe”程序，完全按照默认，点击“下一步”，直到安装完成。

双击图标，进入软件。进入软件后的界面如下图所示。



软件主界面

如果在启动软件是没有安装好相机，会出现如下提示：



像机没有正确安装提示

确定后软件将自动退出, 请重新连接相机后再次进入。

3. 操作

1) 视频图像调节

安装好进样器并在针头形成一个小的液滴, 便于对焦使用。

在软件的图像预览窗口观察液滴图像情况, 如果液滴图像没有位于图像中央, 请调节滴液器支架根部的螺旋测微计, 移动图像到画面左右中间部位。

调节镜头上的变焦环, 使液滴在画面中的显示处于合适位置, 并调节镜头支架上的调焦旋钮, 使液滴图片达到最佳的清晰状态。如下图所示:



调整理想的图片

图片背景亮度调整

图像背景由背光灯、视频亮度和对比度配合调整, 背光灯亮度旋钮在主机电源线的位置, 图像亮度和对比度在软件右上方, 如下图所示:



图像设置界面

适当调整背光灯亮度、图像亮度和对比度，使图像达到最佳状态。

图片背景应为白色，如果颜色不正，可以调节色度和白平衡，使背景颜色变成纯白色。

可以通过增益和锐度调整图片边缘的清晰程度。

可以调整图像分辨率，来改变照片的分辨率。如果计算机屏幕分辨率比较低，推荐使用 800*600 的分辨率，否则推荐使用 1600*1200 的图像分辨率。

在 JY_PHa/b 型号中，背光灯控制项无效果。

2) 接触角测试基本过程

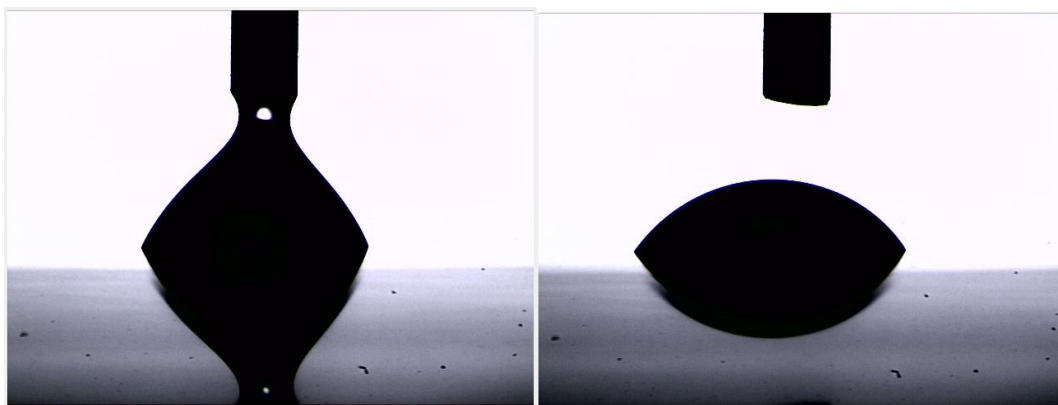
视频源、拍照和录像等功能在视频窗口下方，如下图所示：



拍照操作界面

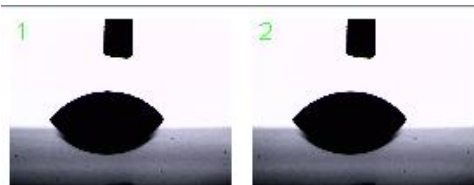
1) 将被测试的样品放置或固定到上载物台上，并将上载物台放置到下载物台的固定夹中，便于移动位置。注意在放置样品时不要污染样品表面，影响测试结果。

2) 旋转载物台升降手轮提升载物台，在视频中观察样品的位置，使样品接触液滴后下降少许，使液滴离开进样针头，在样品上形成液滴。



测试时液滴形成过程

3) 点击“拍照”按钮拍照，照片出现在缩略图区，并按照顺序编号。



缩略图

4) 单击缩略图或右击缩略图选择“数据分析”，进入接触角分析界面，进行接触角测量。

3) 视频录制与定时拍照

如果液体接触固体后液滴形状有快速变化，或者需要了解液滴形成及变化的每一瞬间情况，可以在液滴滴落过程中单击“启动录像”按钮，开始视频录制，或者单击“定时拍照”按钮，间隔一段时间自动拍摄照片，然后再去操作液滴滴落过程。

视频文件保存位置及定时拍照设定在软件右上角的“存储设定”中，如下图所示：

旋转台控制	图像设置	存储设定
接触角定时拍照间隔 1		
接触角视频存储路径 D:/test/ ...		
接触角视频文件前缀 AV		
表面张力文件前缀 TV		

存储设定

“接触角定时拍照间隔”，时间单位为秒。

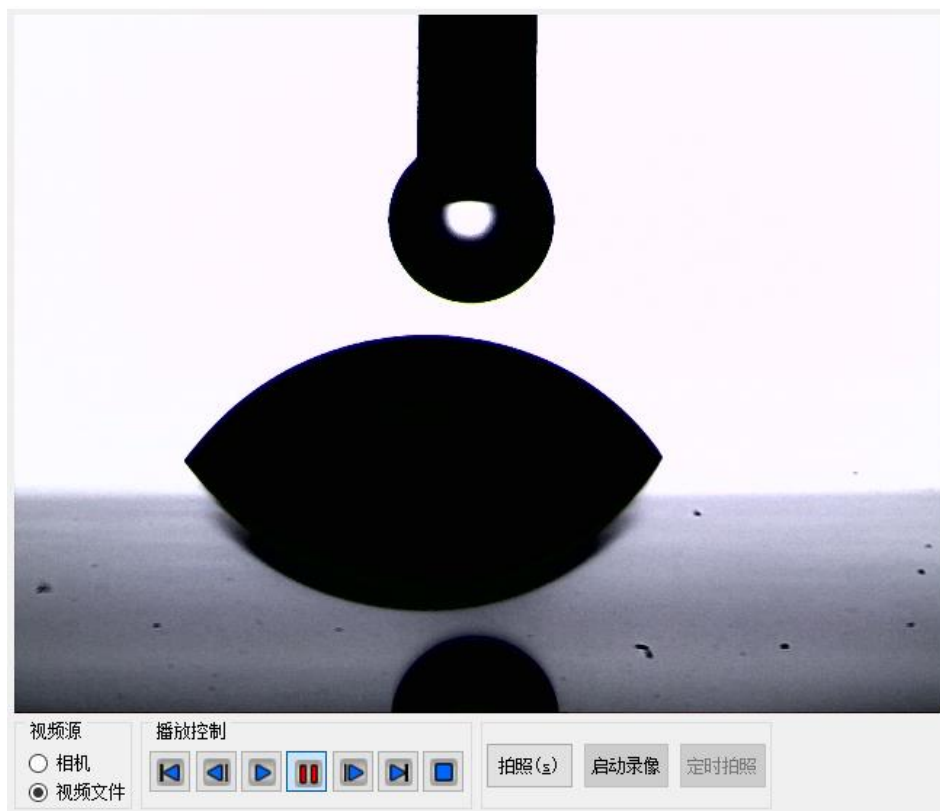
“接触角视频存储路径”，指定视频的默认存储位置，实际上也是整个软件默认的工作目录。

“接触角视频文件前缀”，视频文件录制时文件名是自动生成的，文件开头的字符在这里设定；系统会以这里指定的字符开头，加上当前日期时间，最后加2位数的随机序号，构成完整的主文件名。文件类型为MP4。

定时拍照的照片放在内存中，由于内存容量的限制，请不要拍摄超过100幅图片，否则本软件可能因为内存不足而崩溃。

4) 视频播放与截取

进行录像操作后，点击“视频源”组中的“视频文件”会弹出打开视频文件的对话框，刚刚录制的视频文件名由“前缀+日期时间+2位数字”构成，找到视频后打开，视频窗口如下图所示：



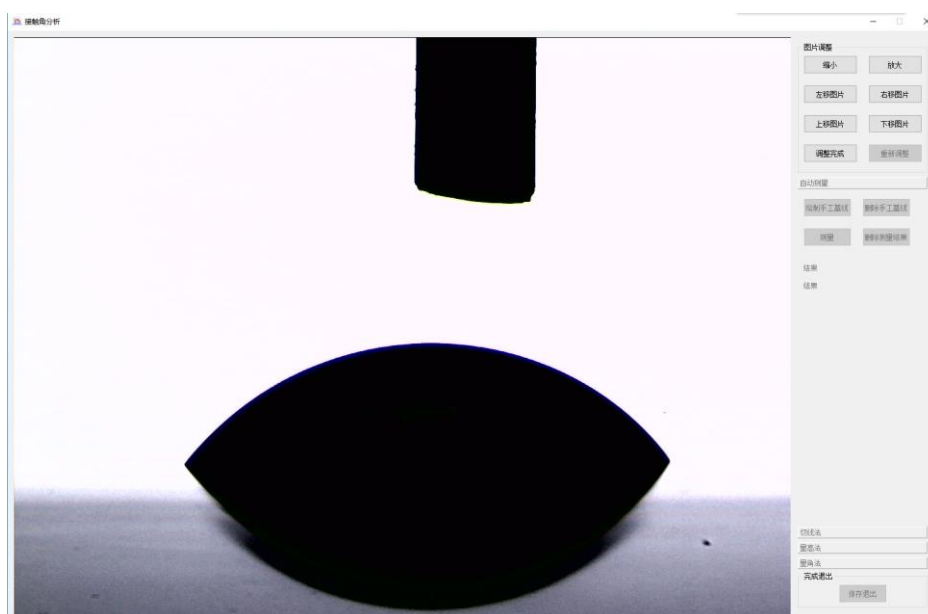
视频播放与截取

在视频下方出现播放控制工具，依次为回到视频开头、后退一帧、正常播放、暂停、前进一帧、跳到视频结尾、退出视频分析。

无论是在视频播放过程中还是在暂停时，都可以点击“拍照”按钮来抓取当前视频图片。但是在视频分析时不可以再启动录像和定时拍照。

5) 接触角分析

点击一幅要分析的图片，进入接触角分析界面，如下图所示：



接触角分析主界面

如果屏幕比较小，但拍摄的图片比较大，图形预览区可能无法显示完整，请用右侧的调整工具进行调整。

整，调整工具如下图所示：



图片调整工具

图片处于合适位置后点击“调整完成”，分析工具变成可用状态。

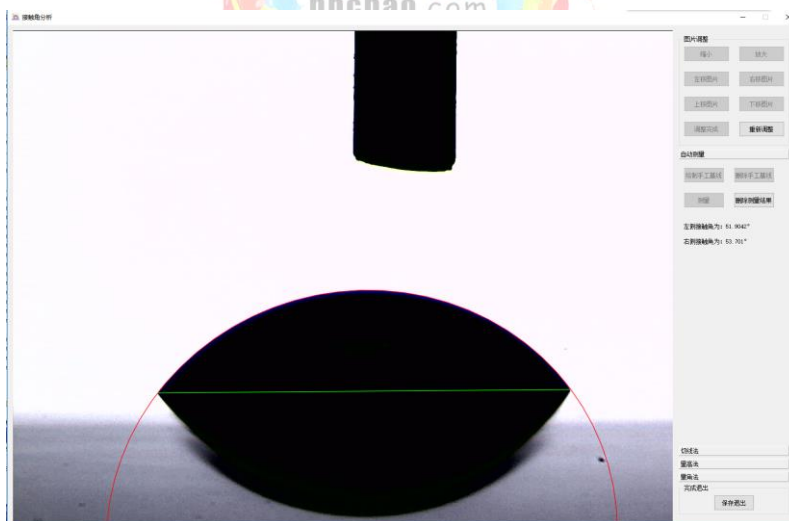
1) 自动测量

选择自动测量工具组，显示如下工具：



自动测量工具

直接点击“测量”按钮，测量结果会显示到下方。且图片上会绘制测量工具，如下图所示：



自动测量结果

在如下情况需要绘制手工基线：

①如果接触角接近 90 度，液滴图像和倒影构成接近圆形，计算机视觉系统将无法分辨基线位置，这时需要指定手工基线。

②如果基线位置有阴影或其他干扰因素，导致基线无法识别。

绘制基线时，点击“绘制手工基线”按钮，在图像上按下并拖动鼠标，绘制一条直线，然后调整直线位置，使其与两个三相交界点重合即可。

2) 切线法测量

点击切线法工具组，显示如下工具：

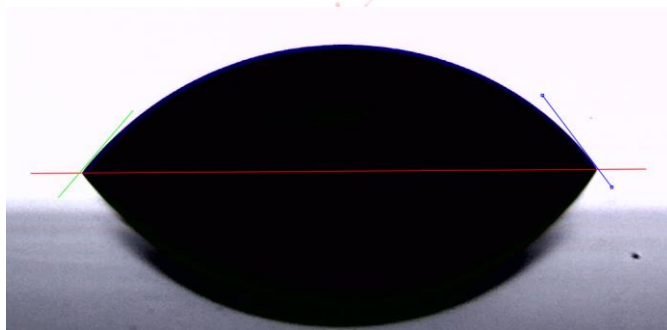


切线法工具

首先点击“绘制基线”按钮，在图像中标出基线位置，然后分别点击“绘制左切线”和“绘制右切线”按钮，绘制左右两条切线，然后点击“显示结果”，测量完毕。

切线法是最传统的接触角测量方法，使用灵活方便。但是操作中完全由操作员去识别线条与圆弧的相切情况，受人为因素影响较严重。

如果某条切线不需要，或者需要重新绘制，可以点击右侧对应的删除按钮删除。测试完成的图形如下图所示：



切线法绘图结果

3) 量高法测量

量高法是基于弦长和弧高，根据三角函数计算得到切线角度。这种方法把液滴看成理想圆形的一部分，所以测试时液滴尽可能小，减少重力对球冠的影响。

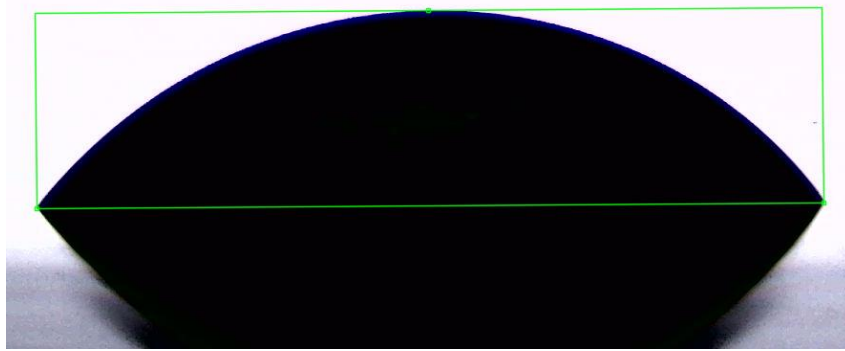
其工具如下图所示：



量高法工具

点击“绘制矩形”按钮，从左侧三相交界点按下鼠标并拖动到右侧的三相交界点，然后选定矩形，调整矩形上边与球冠最高点重合，然后点击“显示结果”，测量完成。

测量图片如下图所示：



量高法绘图结果

4) 量角法测量

量角法测量要使用一个虚拟量角器，通过相切、旋转等方式测量切线角度，它的基本原理和量高法相同，同样把液滴看做圆形的一部分。

点击量角法工具组，工具如下图所示：

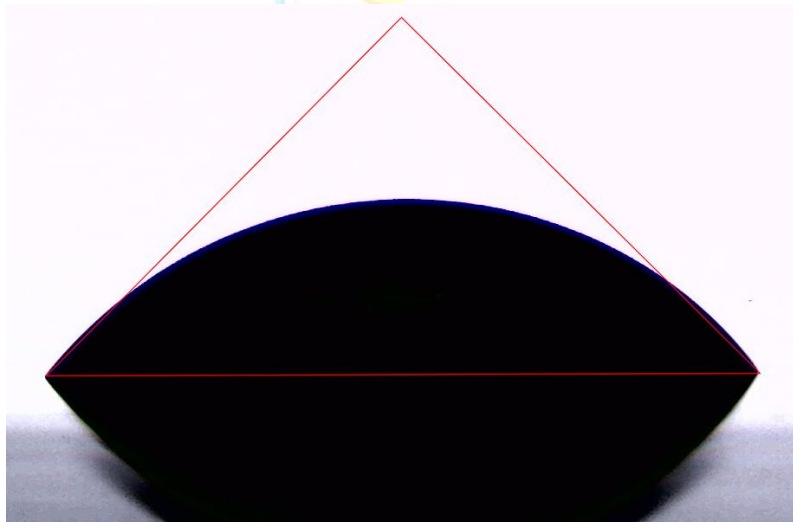


量角法工具

测量过程分 5 个步骤，分别叙述如下：

①创建量角器

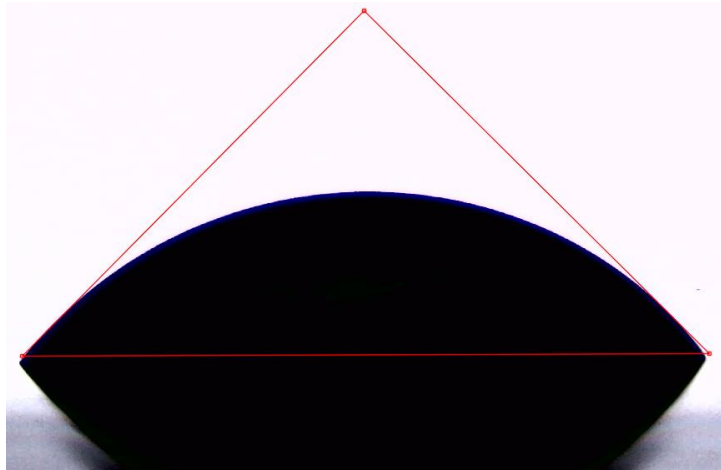
点击创建量角器按钮，沿基线从左到右画线，自动形成一个直角等腰三角形，其斜边要与基线重合。如下图所示：



创建量角器绘图结果

②与外圆相切

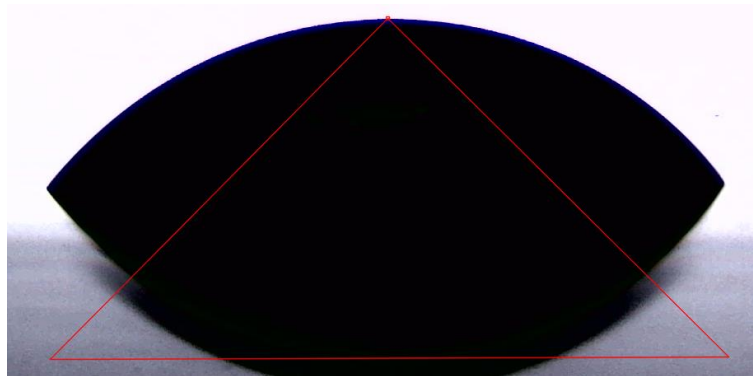
点击“与外圆相切”按钮，调整量角器的两个直角边，与圆弧相切。如下图所示：



与外圆相切绘图结果

③与顶点重合

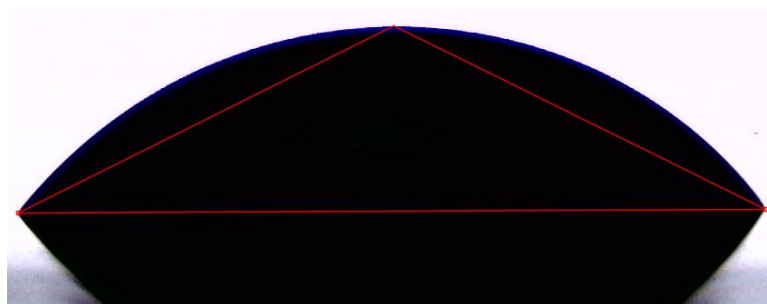
点击“与顶点重合”按钮，调整量角器直角顶点与圆弧重合。此时量角器只能沿某一直线移动。如下图所示：



与顶点重合绘图结果

④交界点重合

点击“交界点重合”按钮，移动三角形斜边的两个端点，分别于对应侧的三相交界点重合。如下图所示：



与三相交界点重合绘图结果

然后点击“结束测量”，测量完成。

可以只使用一种方法来进行分析，也可以同时使用多种方法进行分析，最后将结果进行比较。分析完成后，点击“保存退出”按钮，退出分析窗口，分析结果会添加到视频窗口下方的数据表格中，如下图所示：

	图片编号	测试类型	测试方法	位置	测试结果
1	1	接触角	自动法	左侧	51.9042
2	1	接触角	自动法	右侧	53.701
3	1	接触角	切线法	左侧	48.9916
4	1	接触角	切线法	右侧	53.3507

测试数据列表

4. 文档管理

文档管理功能有两个入口，一是主窗口右下角的工具栏，另一个是在缩略图上右击的上下文菜单。
工具栏如下图所示：



主窗口工具栏

1) 保存项目

可以把整个测试结果整体保存为一个项目，启动包含测试图片、已绘制的测试工具和测试结果等数据，保存后可以随时调阅和修改。

点击工具栏的“保存”按钮，弹出保存对话框，输入文件名后保存。

再次点击保存时将不会提示输入文件名，若需要换名存盘，请点击“另存”按钮。

2) 读入项目

在工具栏中点击“打开”按钮，弹出打开项目对话框，选择一个项目打开即可。项目打开后仍然可以删除图片、加入图片、重新进行测试等操作。

3) 导出测试结果

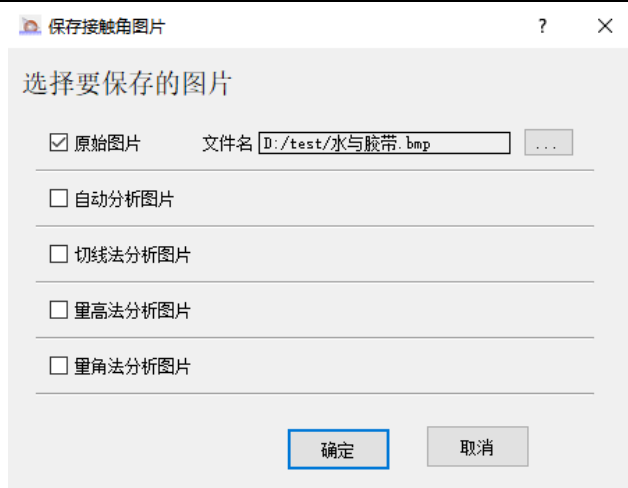
可以将结果表格中的数据以 Excel 格式保存，点击工具栏中的“导出”按钮，弹出保存对话框，输入文件名即可将测试数据保存为 Excel 文件。

4) 添加已有图片

点击工具栏中的“添加图片”按钮，可以将已有图片添加到项目中，和从相机拍摄的图片一样进行接触角分析。

5) 保存图片

在缩略图上右击，选择“保存图片”，弹出选择保存图片对话框，可以分别保存原始图片和绘制有各种分析工具的图片，便于引用的文档中。保存对话框如下所示：



保存图片对话框

选择对应的分析图片，并输入文件名，单击确定即可。

6) 删除图片

右击缩略图，选择“删除当前图片”或“删除所有图片”，可以删除项目中的图片。

5. 表面能分析

本软件提供了 Fowkes 方程、Qwens 方程和 YGGF 方程，可以通过输入这些方程的参数来计算固体的表面能。并且提供了典型液体的相关参数，可以选择使用。

1) Fowkes 方程

Fowkes 方程认为表面张力可以有两部分组成：一部分为 London 色散力 γ^d ，另一部分是由偶极作用力、氢键以及诱导力等组成的非色散力，并且认为只有 London 色散力对液-固界面产生作用。假定液体和固体的分子间距和电离能相近，则液固界面的粘附功可用几何平均法表示成：

$$W_{sl} = 2\sqrt{(\gamma_{sg}^d \gamma_{Lg}^d)}$$

式中：

γ_{sg}^d ：固体的 London 色散力（非极性力）

γ_{Lg}^d ：液体的 London 色散力（非极性力）

与 Young-Dupre 方程 $W_{sl} = \gamma_{Lg}(\cos\theta + 1)$ 结合可得

$$\cos\theta = -1 + \frac{2\sqrt{(\gamma_{sg}^d \gamma_{Lg}^d)}}{\gamma_{Lg}}$$

式中：

θ ：固液气三相接触角

γ_{sg}^d ：固体的 London 色散力（非极性力）

γ_{Lg}^d ：液体的 London 色散力（非极性力）

γ_{Lg} ：液体的表面张力

对于非极性固体 $\gamma_{sg} = \gamma_{sg}^d$ ，对于非极性液体，由于 $\gamma_{Lg}^d = \gamma_{Lg}$ ，则有

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sg}^d = \frac{\gamma_{Lg}(1 + \cos\theta)^2}{4}$$

γ_{sg} 为固体表面张力。
根据 Fowkes 方法的假定条件，使用本方法估算固体的表面张力时，需要测定该固体与非极性液体之间的接触角。

常用非极性测试液体	
名称	London 色散力 γ_{Lg}^d
α -溴萘	44.6
正十六烷	27.6

2) Owens 方程

1969 年 Owens 和 Wendt 发展了 Fowkes 方法，他们认为在液固界面上除了存在 London 色散力 γ^d 外，还存在包括氢键在内的极性作用 γ^p ，从而得到如下表达式

$$\gamma_{sl} = r_{sg} + r_{lg} - 2\sqrt{\gamma_{sg}^d \gamma_{Lg}^d} - 2\sqrt{\gamma_{sg}^p \gamma_{Lg}^p}$$

将其与 Young 方程结合则有

$$1 + \cos\theta = 2\sqrt{\gamma_{sg}^d} \left[\frac{\sqrt{\gamma_{Lg}^d}}{r_{lg}} \right] + 2\sqrt{\gamma_{sg}^p} \left[\frac{\sqrt{\gamma_{Lg}^p}}{r_{lg}} \right]$$

变形为：

$$r_{lg}(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_{sg}^d \gamma_{Lg}^d} + 2\sqrt{\gamma_{sg}^p \gamma_{Lg}^p}$$

式中：

- r_{lg} ：液体表面张力
- γ_{Lg}^d ：液体的 London 色散力
- γ_{Lg}^p ：液体的极性力
- γ_{sg}^d ：固体的 London 色散力
- γ_{sg}^p ：固体的极性力

由上式看出，该式含有两个未知数 γ_{sg}^d 和 γ_{sg}^p ，需要至少测定两不同液体在同一固体表面的接触角才能求得。
在实际测量估算时，所选的两种测试液体必须满足如下条件：

- 1、两种液体的 $\gamma_{Lg}^d/\gamma_{Lg}^p$ 值不能太接近，差距越大越好。
- 2、两种液体要有不同的极性，即从极性液体和非极性液体中各选一种。
- 3、测试液体不与固体表面发生反应。

二液法常用测试液体					
名称	γ_{Lg}^p	γ_{Lg}^d	r_{lg}	$\gamma_{Lg}^d/\gamma_{Lg}^p$	极性
水	51	21.8	72.8	2.36	极性
甘油	26.4	37	63.4	0.71	
甲酰胺	18.7	39.5	58.2	0.47	
二碘甲烷	2.3	48.5	50.8	0.05	非极性
α -溴萘	0	44.6	44.6	0	
正十六烷	0	27.6	27.6	0	

3) YGGF 方程

Young Good Grifalco Fowkes 方程，该方程包含 Lif shitz-van der Waals 分量 γ^{LW} 、Lewis 酸分量 γ^+ 和 Lewis 碱分量 γ^- ，固体的表面能 γ_s 和液体的表面能 γ_L 可分别表示为：

$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + \gamma_s^{AB} = \gamma_s^{LW} + 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-}$$
$$\gamma_L = \gamma_L^{LW} + \gamma_L^{AB} = \gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-}$$

固液界面相互作用自由能与固体、液体各自的表面能关系可表示为

$$\gamma_{sL} = \left(\sqrt{\gamma_s^{LW}} - \sqrt{\gamma_L^{LW}} \right)^2 + 2 \left(\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_s^-} \right)$$

带入 Young 方程，得到固体表面能、液体表面能和二者之间平衡接触角之间的关系：

$$\left(\gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} \right) (1 - \cos\theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_s^-} \right)$$

从上面的式子看出，只要测出三种液体在同一固体上的接触角，就可以计算固体的表面能。

YGGF 方程常用液体				
名称	γ_L	γ_L^{LW}	γ_L^+	γ_L^-
水	72.8	21.8	25.5	25.5
甘油	64	34	3.92	57.4
甲酰胺	58	39	2.28	39.6
二碘甲烷	50.8	50.8	0	0
乙二醇	48	29	1.92	47

实际测试时，水-甘油-二碘甲烷、水-甲酰胺-二碘甲烷、水-乙二醇-二碘甲烷是三种良好的组合方案。

五、 使用注意事项

- 请不要触摸镜头镜片，如果镜头有尘土，请用吸耳球吹去，不要用力擦试。使用完毕，请盖好镜头盖。
- 进样器支架的光学精密位移台比较脆弱，请不要用力按压进样器，切忌重物砸到进样器及横梁，否则光学位移台会损坏。
- 仪器机械部件均为精密光学器件，请保持仪器洁净，注意防尘。