

大学物理实验（一）

（补充讲义）

南京大学物理国家级实验教学示范中心

2025 年 3 月

实验一 液体表面张力系数的测定补充材料

测量一个已知周长的金属片从待测液体表面脱离时需要的力，求得该液体表面张力系数的实验方法称为拉脱法。若金属片为环状吊片时，考虑一级近似，可以认为脱离力为表面张力系数乘上脱离表面的周长，即

$$F = \alpha \cdot \pi(D_1 + D_2) \quad (1)$$

式中，F 为脱离力，D₁、D₂ 分别为圆环的外径和内径， α 为液体的表面张力系数。

压力传感器为四个力敏电阻组成的电桥，当外界压力作用于金属梁时，在压力作用下，电桥失去平衡，此时将有电压信号输出，输出电压大小与所加外力成正比，即

$$\Delta U = kF \quad (2)$$

式中，F 为外力的大小，k 为压力传感器的灵敏度， ΔU 为传感器在外力 F 作用下输出电压的变化值。

【实验仪器】

液体表面张力系数测定仪、测试架、砝码、吊环、砝码盘、水平泡、注射器烧杯等。

(1) 液体表面张力系数测定仪 使用说明

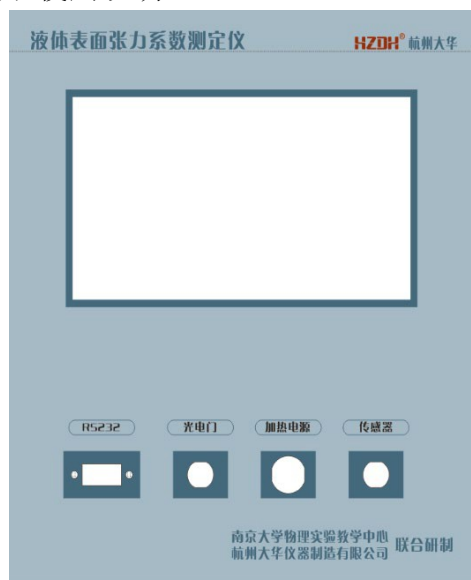


图1 液体表面张力系数信号源面板图

- 1、屏幕：显示界面采用 7 英寸电容式触摸屏；

- 2、传感器：连接测试架压力传感器；
- 3、加热电源：24V 直流电源输出，连接测试架加热容器；
- 4、光电门：连接测试架光电门接口，用于测量位移；
- 5、RS232 接口：用于连接计算机，作为微机接口连接计算机；

(2) 液晶屏首页显示说明

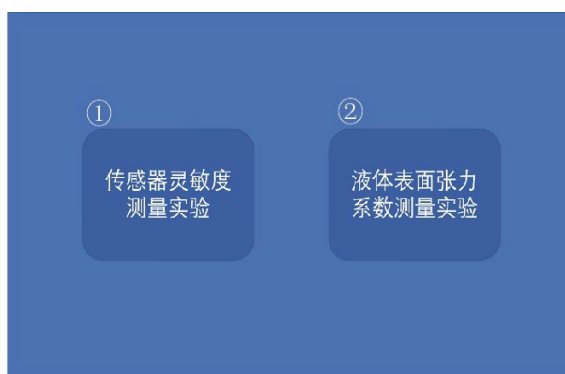


图 2 首页界面图

- 1.按下“传感器灵敏度测量实验”进入实验 1 界面；
- 2.按下“实验 2 液体表面张力系数测量实验”进入实验 2 界面；

(3) 实验 1 界面说明



图 3 实验 1 主界面图

- 1.“置零”：可将对应的拉力值、位移值置零；
- 2.“设置（齿轮形状）”：弹出图 4 参数设置界面，设置砝码质量和重力系数；

- 3.“首页”：返回首页界面；
- 4.“灵敏度”：弹出图 5 界面，系统根据录入的数据利用一元线性回归法计算出灵敏度系数；
- 5.“清零”：清空表格和曲线内容；
- 6.“录入”：将当前的拉力值录入进表格中，曲线显示区的曲线会根据录入的数据对应显示；
- 7.“撤销”：撤销最近一次录入数据；
8. 曲线显示区：将录入的数据以曲线形式显示出来；

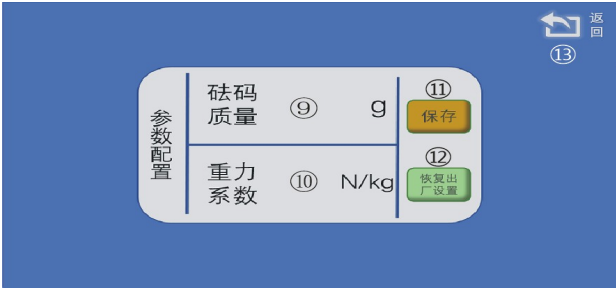


图 4 实验 1 参数设置界面图

9. 点击设置单个砝码质量；
10. 点击设置重力系数；
- 11.“保存”：保存当前设置参数；
- 12.“恢复出厂设置”：将参数还原成默认值；
- 13.“返回”：返回实验 1 主界面；



图 5 实验 1 灵敏度计算界面图

- 14.“确认”：关闭弹窗，返回实验 1 主界面

(4) 实验 2 界面说明

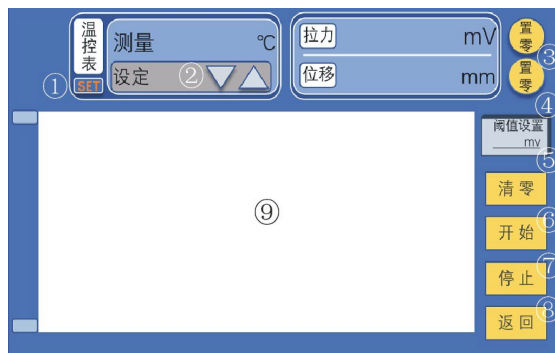


图 6 实验 2 曲线界面图

- 1.“SET”：用于温控表 PID 参数设置，进入 PID 设置界面如图 8 所示，进入前防止误操作会弹出键盘框输入密码才能进入，密码为 1234；
- 2.“ $\nabla\Delta$ ”：温度值减小或增大，可单击细调或长按快速调节；
- 3.“置零”：可将对应的拉力值或位移值置零；
- 4.“阈值设置”：设置阈值电压；实验过程中当拉力值的变化量大于此阈值，则记录当前的拉力和位移；
- 5.“清零”：清空表格和曲线内容；
- 6.“开始”：系统开始记录数据，电压变化超过阈值电压时，表格记录当前位移和电压，曲线随之变化；
- 7.“停止”：系统停止记录数据；
- 8.“返回”：返回首页；



图 7 实验 2 数据界面图

9. 表格或曲线显示界面切换：点击此区域，切换曲线或表格显示界面；
- 10.“ $\longleftrightarrow$ ”：数据表格翻页功能；

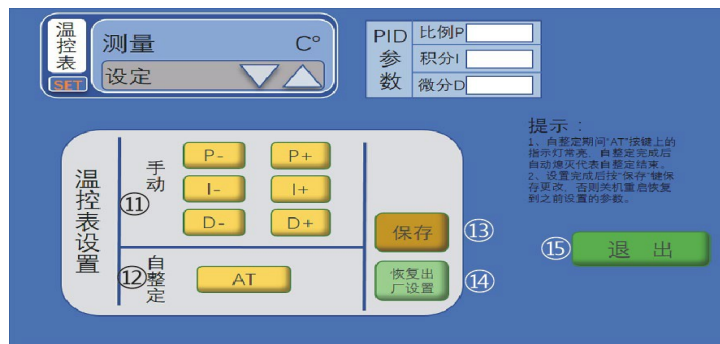


图 8 温控表设置界面图

- 11.“手动”：手动调节 PID 参数值；
- 12.“自整定”：同于自动计算“PID”各值；
- 13.“保存”：保存当前设置参数；
- 14.“恢复出厂设置”：将参数还原成默认值；
- 15.“退出”：返回实验 2 主界面；

(5) 测试架说明

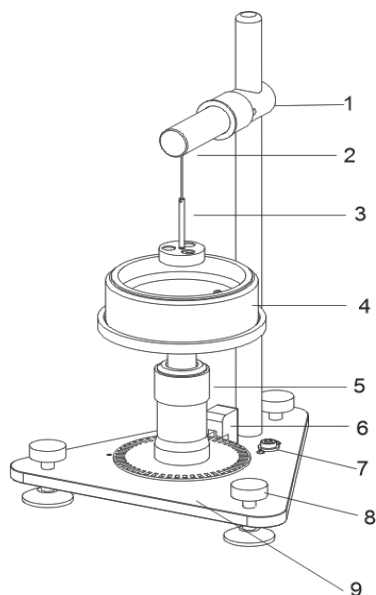


图9 测试架结构图

- 1、压力传感器固定座 2、压力传感器 3、吊环 4、加热器皿 5、升降台
- 6、光电门 7、光电门接口 8、水平调节螺丝 9、底座

【实验内容】

- 1、压力传感器的定标

每个压力传感器的灵敏度都有所不同，在实验前，应先将其定标，定标步骤如下：

(1) 打开仪器的电源开关，将仪器预热；进入“传感器灵敏度测量实验界面”。

(2) 在传感器梁端头小钩中，挂上砝码盘，将拉力值置零。

(3) 通过水平泡将测试架调节水平。

(4) 在砝码盘上加载如0g、0.5g、1.0g、1.5g、2.0g、2.5g、3.0g等质量的砝码，录入对应砝码重力F作用下的电压值U。（注意待电压值显示稳定（砝码盘静止）后再录入数据）

(5) 按下“灵敏度”按钮，得到压力传感器灵敏度k（k为线性拟合直线斜率）。

2、液体的表面张力系数

① 进入“液体表面张力系数测量实验界面”，将金属吊环挂在传感器的小钩上，将拉力值置零；设置合适的阈值电压（设置阈值越小，记录的数据越多）。

② 用烧杯向器皿中加入约80ml液体。调节加热器皿下的升降台，使其渐渐上升到最高处；调节压力传感器高度，使吊环的下沿部分全部浸没于待测液体。将位移置零，并按下“开始”按钮，然后反向调节升降台，使液面缓慢下降，这时，吊环和液面间形成一环形液膜；继续下降液面，表格数据记录拉力和位移变化全过程，直到液膜破裂点击停止实验。

从实验数据中找到环形液膜电压表读数最大值 U_1 和液膜拉断后数字电压表读数 U_2 。

$$\Delta U = U_1 - U_2$$

③ 根据公式（2）和（1），求出液体的表面张力系数 $a = \frac{\Delta U}{k \cdot \pi(D_1 + D_2)}$ （其中

k为压力传感器灵敏度），并与标准值进行比较。

④ 研究不同温度条件下液体的表面张力系数：通过温控表设定待测液体温度值，待液体温度稳定后，重复上述步骤（1）-（3），测定不同温度条件下液体的表面张力系数。

【数据记录与处理】

1、压力传感器灵敏度的测量

表1

砝码 / g	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
电压 / mV						

对表1数据作一元线性拟合，得到线性拟合直线斜率即为压力传感器灵敏度k:

压力传感器灵敏度k=_____mV/N。

2、水的表面张力系数的测量

金属环外径 $D_1=0.0349\text{m}$ ，内径 $D_2=0.0329\text{m}$ ， 水的温度： $t=$ ____ $^{\circ}\text{C}$;

表 2

编号	U_1/mV	U_2/mV	$\Delta U/\text{mV}$	F/N	$\alpha/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
1					
2					
3					

平均值： $\alpha =$ _____N/m

3、观察不同温度下液体表面张力系数的变化

表3 不同温度下液体表面张力系数测量（水）

温度 $^{\circ}\text{C}$	U_1/mV	U_2/mV	$\Delta U / \text{mV}$	F/N	$\alpha/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
20					
30					
40					

实验三 弦振动的研究补充材料

1 概述

自然界中到处存在着振动。广义地说，任何一个物理量随时间的周期性变化都可以叫做振动。一定的振动的传播称为波动，简称波，如机械波、电磁波等。各种形式的波有许多共同的特征和规律，如都具有一定的传播速度，都伴随着能量的传播，都能产生反射、折射、干涉和衍射等现象。当波的强度较小时，波的传播具有独立性。几列波叠加可以产生许多独特的现象，驻波就是一例。

目前弦振动实验常用的实验方法主要有两种：电动音叉法、磁电激励法。前者的振动频率相对固定，而后者振动频率一般连续可调，可研究频率对驻波的影响，实验内容更加丰富。本实验采用磁电激励法通过弦线振动来研究驻波及其特性。

2 实验目的

- 1) 了解波在弦线上的传播及驻波形成的条件
- 2) 测量弦线的共振频率与波腹数的关系
- 3) 测量弦线的共振频率与弦长的关系
- 4) 测量弦线的共振频率、传播速度与张力的关系
- 5) 测量弦线的共振频率、传播速度与线密度的关系

3 实验原理

3.1 驻波的形成和特点

在同一介质中的两列频率相同、振动方向相同，而且振幅也相同的简谐波，在同一直线上沿相反方向传播时就叠加形成驻波。

设有两个振幅相同、频率相同的简谐波在同一直线上沿相反方向传播，它们的表达式分别为：

$$y_1 = A \cos \left[2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

$$y_2 = A \cos \left[2\pi \left(ft + \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

式中 A 、 f 、 λ 分别为简谐波的振幅、频率、波长， x 为质点的坐标位置， t 为时间。两列波合成得：

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \cdot \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

此式即驻波的表达式。式中 $\cos(2\pi ft)$ 表示简谐运动，而 $\left| 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right|$ 便是这简谐运动的振幅。该式不满足 $y(t+\Delta t, x+u\Delta t) = y(t, x)$ ，所以它不表示行波，只表示各点都在做简谐运动。各点的振动频率相同，就是原来的波的频率。但各点的振幅随位置的不同而不同。

振幅最大的各点称为波腹，对应于使 $\left| \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right| = 1$ ，即 $\frac{2\pi}{\lambda} x = n\pi$ 的各点。故波腹的位置为：

$$x = n \frac{\lambda}{2}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

振幅为零的各点称为波节，对应于使 $\left| \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right| = 0$ ，即 $\frac{2\pi}{\lambda} x = (2n+1) \frac{\pi}{2}$ 的各点。故波

腹的位置为：

$$x = (2n+1)\frac{\lambda}{4}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

由以上二式可算出相邻两个波节和相邻两个波腹之间的距离都是 $\lambda/2$ 。这一点为我们提供了一种测定行波波长的方法，即只要测出相邻两波节或波腹之间的距离就可以确定原来两列行波的波长 λ 。

式(3)中的振动因子为 $\cos(2\pi ft)$ ，但不能认为驻波中各点的振动的相都是相同的。因为当位置 x 的值不同时，系数 $2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$ 是有正有负的。把相邻两个波节之间的各点叫做一段，则

$2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$ 的值对于同一段内的各点有相同的符号，对于分别在相邻两段内的两点则符号相反，这种符号的相同或相反就表明，在驻波中，同一段上的各点的振动同相，而相邻两段中的各点的振动反相。因此，驻波实际上就是分段振动现象。在驻波中，没有振动状态或相位的传播，也没有能量的传播，所以才称之为驻波。（实际上，在一段有限长的弦线中，沿长度方向传播的入射波和反射波的振幅是很难完全相等的，在弦线的端点，入射波的能量将有一部分变成透射波的能量，所以反射波的能量比入射波的小，反射波的振幅也比入射波小，但这种相向进行的两个振幅不同的相干波的叠加，也称为驻波。）

图1表示驻波形成的物理过程，其中虚线表示向右传播的波，振幅较小的实线表示向左传播的波，振幅较大的实线表示合成振动。图中可看出波腹(L)和波节(N)的位置，以及各时刻各质点的分位移和合位移。

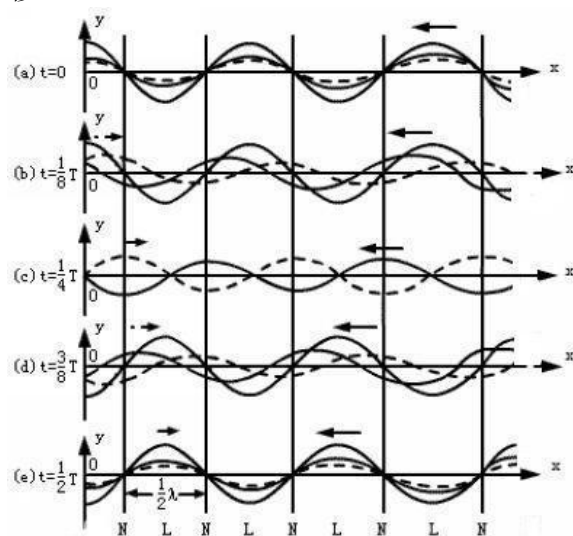


图1 驻波的形成

3.2 弦上的驻波

将一根弦线的两端用一定的张力固定在相距 L 的两点间，当拨动弦线时，弦线中就产生来回的波，它们就合成而形成驻波。但并非所有波长的波都能形成驻波。由于弦线两个端点固定不动，所以这两点必须是波节，因此驻波的波长必须满足下列条件：

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

以 λ_n 表示与某一 n 值对应的波长（ n 表示波腹的个数称为波腹数），由上式可得容许的波长为：

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

这就是说能在弦线上形成驻波的波长值是不连续的，或者，用现代物理的语言说，波长是“量

子化”的。由关系式 $f=u/\lambda$ 可知，频率也是量子化的，相应的可能频率为：

$$f_n = n \frac{u}{2L}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

其中， $u = \sqrt{\frac{F}{\rho_l}}$ 为弦线上的波速（推导见附录）， F 为弦线上的张力， ρ_l 为弦线的线密度。上

式中的频率叫弦振动的本征频率，每一频率对应于一种可能的振动方式。频率由式（8）决定的振动方式，称为弦线振动的简正模式，其中最低频率 f_1 称为基频，其他较高频率 $f_2, f_3, \dots$ 都是基频的整数倍，它们各以其对基频的倍数而称为二次，三次.....谐频。

简正模式的频率称为系统的固有频率。如上所述，一个驻波系统有许多个固有频率。这和弹簧振子只有一个固有频率不同。

当外界驱动源以某一频率激起系统振动时，如果这一频率与系统的某个简正模式的频率相同（或相近），就会激起强驻波。这种现象称为共振，对应的频率称为共振频率。利用弦振动演示驻波时，观察到的就是驻波共振现象。系统究竟按哪种模式振动，取决于初始条件。一般情况下，一个驻波系统的振动，是它的各种简正模式的叠加。

4 仪器介绍

本产品执行标准号为：Q/9151011206008316XG•10

仪器正常工作条件：

- 1) 温度：0℃~40℃；
- 2) 相对湿度：≤90%RH；
- 3) 大气压强：86kPa~106kPa；
- 4) 电源：~220V/50Hz

图 2 为仪器组成示意图（示意图仅供参考，以实物为准），主要由信号源、数字拉力计、实验装置、示波器（用户自备）等组成。

示波器（用户自备）

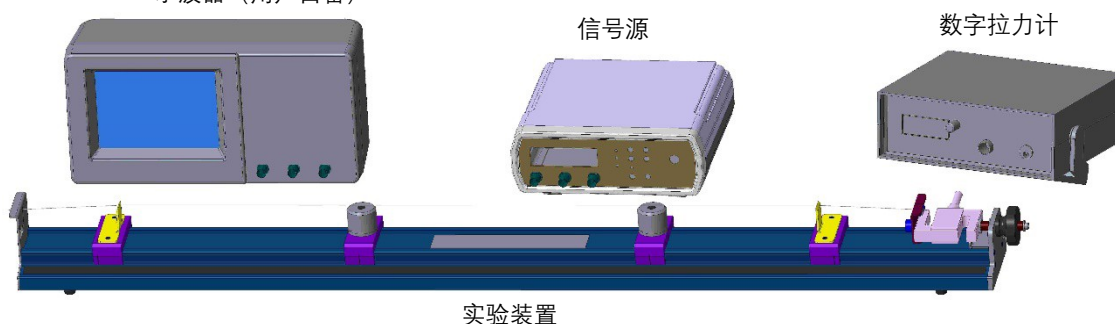


图 2 弦振动研究实验仪示意图

4.1 信号源

通用信号源，能产生频率、幅度连续可调的不同波形信号。实验中用到的功能请参见附录。电源：DC5V 供电。

输出信号波形：正弦波、三角波、方波、锯齿波、占空比可调脉冲波及自定义波等。正弦波失真度<0.8%

输出信号频率：0~6MHz 连续可调，分辨力 0.01Hz，频率误差 $\pm 5 \times 10^{-6}$ ，频率稳定度 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。

输出信号幅度：0.005~2.000V_{p-p} 连续可调，分辨力 0.001V；0.20~20.00V_{p-p} 连续可调，分辨力 0.01V，幅度误差 $\pm 1\% + 10\text{mV}$ ，幅度稳定度 $\pm 0.5\%$

4.2 数字拉力计

电源：~220V/50Hz

显示范围：0~±19.99kg（三位半数码显示）

显示分辨力：0.01kg

含有显示清零功能：短按“清零”按钮显示清零。

含有直流电源输出接口：输出直流电，用于给背光源供电。（本实验不用该功能）

数字拉力计面板图：



图 3 数字拉力计面板图

4.3 实验装置

实验装置主要包含以下部件：导轨组件、劈尖、电磁线圈感应器、弦线等。各部件在实验装置中的相对位置大致如下：

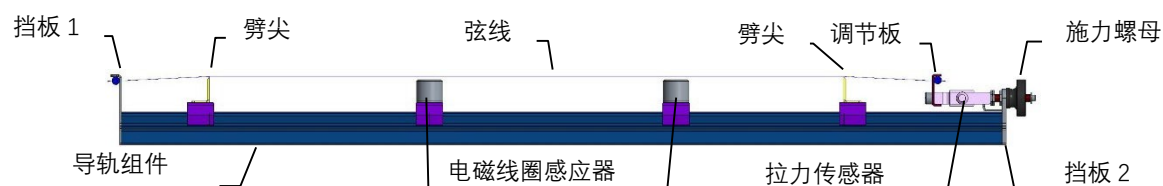


图 4 实验装置示意图

拉力传感器和施力螺母经穿过挡板 2 的螺栓连接，挡板 2 固定在导轨组件一端边，挡板 2 上印有张力增大和减小的方向标识。弦线两端用调节板和挡板 1 卡住，调节板固定在可移动的拉力传感器上，挡板 1 固定在导轨组件另一端边，这样弦线上的张力可通过施力螺母控制拉力传感器的移动来进行调节。拉力传感器连接数字拉力计后，可在数字拉力计上显示相应数值，显示的是质量（单位kg）对应的数值，也可视其为工程单位制中的力（单位kgf）对应的数值（1kgf=9.8N）。

两个劈尖和两个全同电磁线圈感应器均安装在滑块上，滑块可沿导轨做一维移动，并可通过锁紧螺钉将其位置固定。导轨组件上有标尺（量程 1000mm，分度值 1mm），滑块上有定位刻线。

两个劈尖的作用是抬高弦线中部相对两端的高度，使波仅在两劈尖之间来回传播。劈尖有一定的尖锐度，使用时请小心，以免划伤。

两个电磁线圈感应器，分别接信号源和示波器，前者称为驱动传感器，后者称为接收传感器。驱动传感器将来自信号源的变化电信号转换为同频率变化的空间磁场，弦线受磁场作用而同频率振动，该振动沿弦线传播形成波，在弦线上的另一处（即接收传感器所在位置），因弦线上的一小段弦在此区域振动而扰动了该处的空间磁场，接收传感器将此变化的磁场信号转换为电信号送入示波器供观测。

本仪器配有多根不同直径的弦线并存放在附件盒中，可供更换测试。每根弦线均不能超过其最大弹性形变，否则弦线将无法恢复，造成永久损坏！出厂时，在每根弦线上均用标签标注了其能承受的最大张力值及参考线密度。

5 实验内容与步骤

- 给弦线施加张力时，严禁超过给定的最大张力值！！
- 实验时不要使接收传感器离驱动传感器太近，保持二者距离至少 10cm，以避免受到干扰。

- c. 读取频率过程中，张力的波动不宜超过 1 个字。
- d. 给弦线施加张力时，弦线附近的环境温度短期内波动不宜超过 1°C，以免造成张力不稳定，导致形不成稳定的驻波。
- e. 弦线振动幅度不宜过大，否则观察到的波形不是严格的正弦波，或者带有变形，或者带有不稳定性振动，更深入的研究需要引入非线性科学的研究方法，这里不再叙述。

实验前准备：

将劈尖、电磁线圈感应器按图 4 所示相对位置置于导轨上，滑块含刻度线一侧应与标尺同侧。拉力传感器连接数字拉力计，驱动传感器连接信号源，接收传感器连接示波器，均开机通电预热至少 10min。将信号源设置为输出正弦波形。按下数字拉力计上的“清零”按钮，将示数清零。

6.1、弦线线密度的测定

1.1 在挡板和调节板上装上弦线，移动劈尖，取弦长为 600.0mm；

1.2 调定弦线张力为 1.30kg、1.50kg、1.70kg、1.90kg、2.10kg；

1.3 信号发生器的频率先调至最小，信号源的频率调至最小，适调节信号幅度（推荐 15Vp-p），同时调节示波器垂直增益为 1mV/div，水平增益为 2ms/div 信号幅度；

1.4 第一次在示波器上观察到稳定的波，微调频率，使振幅处于极大值；此时观察到的驻波其频率即为基频，波腹数 n=1；

1.5 重复以上操作，得到波腹数 n=2、3 的对应频率。

1.6 改变弦线张力分别为 1.50kg、1.70kg、1.90kg、2.10kg，重复以上步骤

6.2. 测定弦线上横波的传播速度

根据实验 1 的相应的 v、n、L 的值，由传播速度

$$v = f \frac{2L}{n}$$

可测量出弦线上横波的传播速度 v。

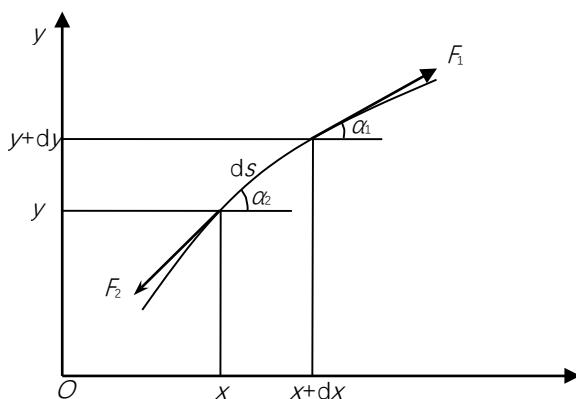
数据记录：

表一：弦线长度一定条件下，调节弦线张力测量线密度

	L = 600.0 mm														
T (9.8N)	1.30			1.50			1.70			1.90			2.10		
驻波段数n	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
频率f(Hz)															
$\rho = T/(\frac{2Lf}{n})^2$ (kg/m)															
$\bar{\rho}$ (kg/m)															
$v = f \frac{2L}{n}$ (m/s)															
$\bar{v}$ (m/s)															
$\bar{v}^2$ (m ² /s ²)															

6 附录

6.1 弦上横波的波动方程的推导



附图 1 一小段弦在横波中的位移

如附图 1 所示取一小段弦，其位移是 $y(x, t)$ ，长度是：

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}$$

运动方程为：

$$\begin{aligned} F_1 \cos \alpha_1 - F_2 \cos \alpha_2 &= 0 \\ F_1 \sin \alpha_1 - F_2 \sin \alpha_2 &= \rho_l ds \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \end{aligned}$$

对于小振动，有：

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &\approx \cos \alpha_2 \approx 1 \\ \sin \alpha_1 &\approx \sin \alpha_2 \approx \tan \alpha_2 \approx \frac{\partial y}{\partial x}, \quad ds \approx dx \end{aligned}$$

另外：

$$F_1 = F_2 = F$$

则有：

$$F \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x+dx} - F \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_x = \rho_l dx \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

即：

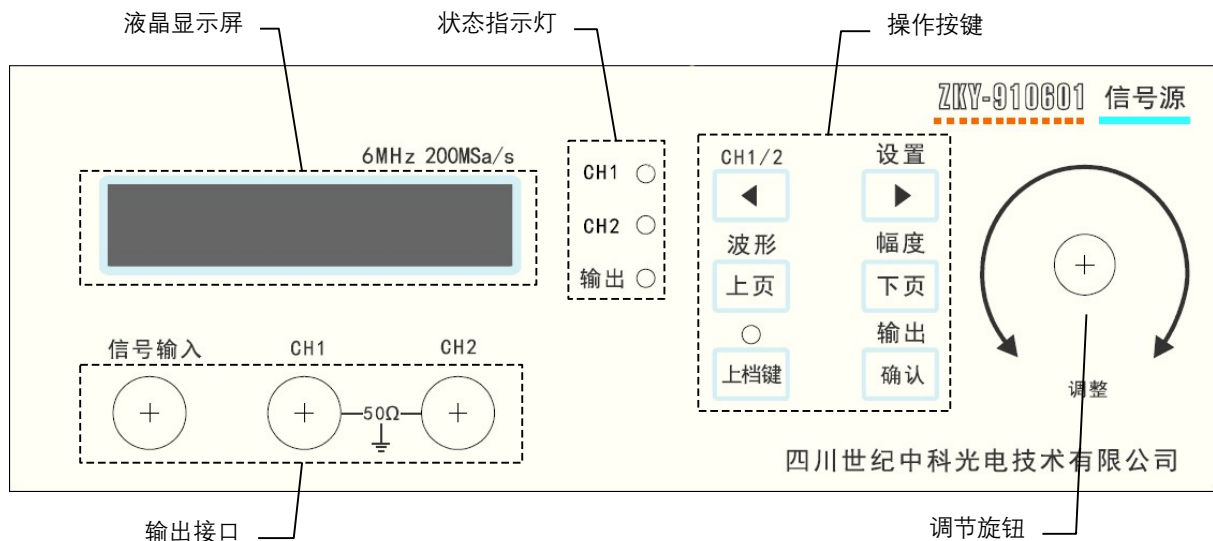
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\rho_l}{F} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

该波动方程表明，波速 $u = \sqrt{\frac{F}{\rho_l}}$

6.2 信号源使用简介

这里简单地介绍信号源的使用方法（仅针对实验所需，信号源更多功能及使用说明不做介绍）。

6.2.1 面板与按键说明



按键操作	功能说明
	左移光标增加调节参数步进值
	右移光标减小调节参数步进值
	功能选择向上翻页键
	功能选择向下翻页键
	确定按钮
	通道切换 (CH1/CH2)，同时 CH1 或 CH2 指示灯点亮。
	切换功能位置，“*”所在行为操作功能提示行
	点击此组合按钮快速进入波形调节页面
	点击此组合按钮快速进入幅度调节页面
	点击此组合按钮关闭或开启输出，同时输出指示灯熄灭或点亮。

调节旋钮用于改变、增大或减小参数，顺时针旋转为增大，逆时针旋转为减小。

6.2.2 菜单显示说明

菜单显示	功能说明
F00000.50000kHz	表示当前输出波形的频率为 0.5kHz
WAVE: SINE	WAVE的意思是波形，SINE表示正弦波
AMPL: 05.00V	AMPL表示输出波形的峰峰值（电压）为5.00V

6.2.3 波形设定 (WAVE)

开机显示如图：

*F00024.00000kHz
WAVE:SINE

使用组合按键  + ，将“*”移至第二行，旋转“调整”旋钮就可以快速切换输出波形类型。其中该实验需要使用到的波形只有“SINE”——正弦波。

6.2.4 频率设定 (F)

当“*”号在第一行（即频率行）时，通过点击  或  按键移动光标调节频率步进值，然后通过旋转调节旋钮来调节输出波形的频率。

6.2.5 幅值设定 (AMPL)

使用组合按键  + ，界面中的幅度设定里会出现一个光标，通过点击  或  按键移动光标调节幅度步进值，然后旋转调节旋钮调节输出波形的幅度（显示参数为电压峰峰值）。

实验六 示波器的使用补充材料

一、DS1000Z 系列数字示波器 前面板总览

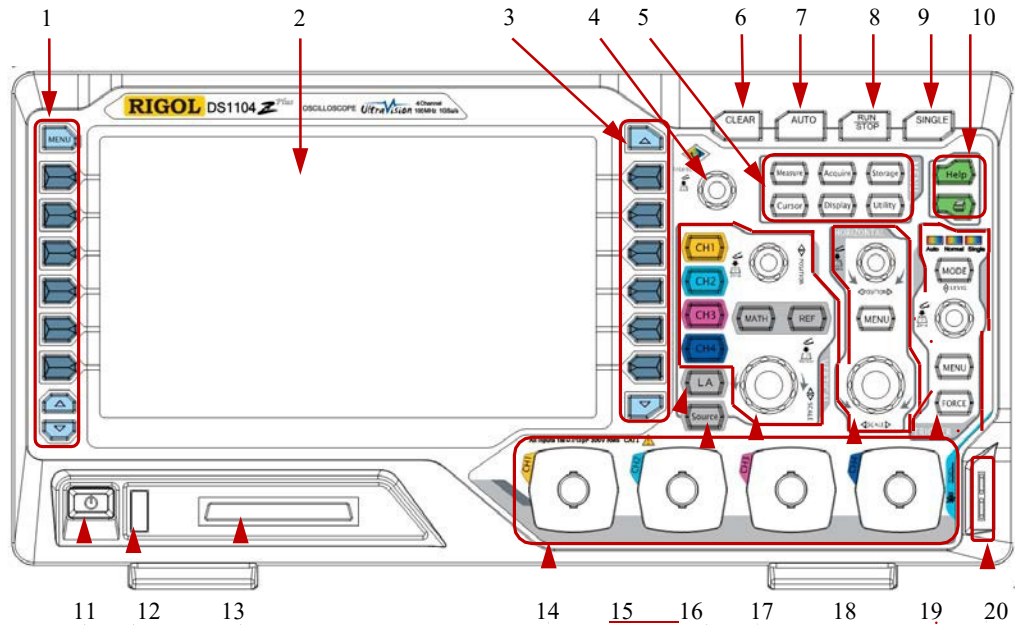


图 1 前面板总览

表 1 前面板说明

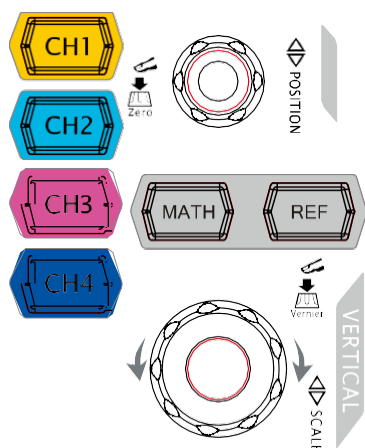
编号	说明	编号	说明
1	测量菜单操作键	11	电源键
2	LCD	12	USB Host 接口
3	功能菜单操作键	13	数字通道输入 ^[1]
4	多功能旋钮	14	模拟通道输入
5	常用操作键	15	逻辑分析仪操作键 ^[1]
6	全部清除键	16	信号源操作键 ^[2]
7	波形自动显示	17	垂直控制
8	运行/停止控制键	18	水平控制
9	单次触发控制键	19	触发控制
10	内置帮助/打印键	20	探头补偿信号输出端/接地端

注^[1]：仅适用于 DS1000Z Plus。

注^[2]：仅适用于带有信号源通道的数字示波器

前面板功能概述

垂直控制



CH1、**CH2**、**CH3**、**CH4**: 模拟通道设置键。4个通道标签用不同颜色标识，并且屏幕中的波形和通道输入连接器的颜色也与之对应。按下任一按键打开相应通道菜单，再次按下关闭通道。

MATH: 按 **MATH** **Math** 可打开 $A+B$ 、 $A-B$ 、 $A \times B$ 、 A/B 、FFT、 $A \& B$ 、 $A \parallel B$ 、 A^B 、 $!A$ 、Intg、Diff、Sqrt、Lg、Ln、Exp 和 Abs 等多种运算。按下 **MATH** 您还可以打开解码菜单，设置解码选项。

REF: 按下该键打开参考波形功能。可将实测波形和参考波形比较。

垂直 **POSITION**: 修改当前通道波形的垂直位移。顺时针转动增大位移，逆时针转动减小位移。修改过程中波形会上下移动，同时屏幕左下角弹出的位移信息（如 **POS: 216.0mV**）实时变化。按下该旋钮可快速将垂直位移归零。

垂直 **SCALE**: 修改当前通道的垂直档位。顺时针转动减小档位，逆时针转动增大档位。修改过程中波形显示幅度会增大或减小，同时屏幕下方的档位信息（如 **1 = 200mV**）实时变化。按下该旋钮可快速切换垂直档位调节方式为“粗调”或“微调”。

提示

如何设置各通道的垂直档位和垂直位移？

DS1000Z 系列数字示波器的4个通道复用同一组**垂直** **POSITION** 和**垂直** **SCALE** 旋钮。如需设置某一通道的垂直档位和垂直位移，请首先按**CH1**、**CH2**、**CH3** 或 **CH4** 键选中该通道，然后旋转**垂直** **POSITION** 和**垂直** **SCALE** 旋钮进行设置。

逻辑分析仪



按下该键打开逻辑分析仪控制菜单。您可以打开或关闭任意通道或通道组、更改数字通道的显示大小、更改数字通道的逻辑阈值、对 16 个数字通道分组等。您还可以为每一个数字通道设置标签。

注意:

— 该功能仅适用于带有 MSO 升级选件的 DS1000Z Plus。

— 按 ☐ **D7-D0**，选择“打开”时，CH4 功能自动禁用；选择“关闭”时，CH4

功能自动恢复。按 ☐ **D15-D8**，选择“打开”时，CH3 功能自动禁用；选择“关闭”时，CH3 功能自动恢复。

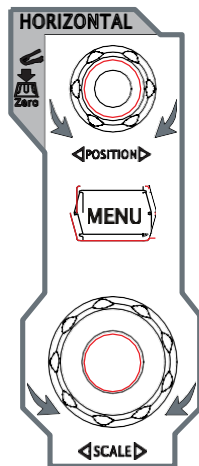
信号源



按下该键进入信号源设置界面。可打开或关闭后面板 [Source1] 和 [Source2] 连接器的输出、设置信号源输出信号的波形及参数、打开或关闭当前信号的状态显示。

注意: 该功能仅适用于带有信号源通道的数字示波器。

水平控制

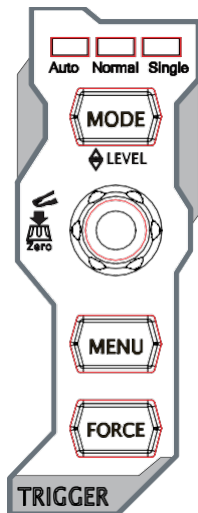


水平 POSITION: 修改水平位移。转动旋钮时触发点相对屏幕中心左右移动。修改过程中，所有通道的波形左右移动，同时屏幕右上角的水平位移信息（如 ）实时变化。按下该旋钮可快速复位水平位移（或延迟扫描位移）。

MENU: 按下该键打开水平控制菜单。可开关延迟扫描功能，切换不同的时基模式。

水平 SCALE: 修改水平时基。顺时针转动减小时基，逆时针转动增大时基。修改过程中，所有通道的波形被扩展或压缩显示，同时屏幕上方的时基信息（如 ）实时变化。按下该旋钮可快速切换至延迟扫描状态。

触发控制



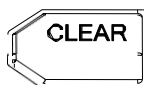
MODE: 按下该键切换触发方式为 **Auto**、**Normal** 或 **Single**，当前触发方式对应的状态背光灯会变亮。

触发 LEVEL: 修改触发电平。顺时针转动增大电平，逆时针转动减小电平。修改过程中，触发电平线上下移动，同时屏幕左下角的触发电平消息框（如 **Trig Level : 428mV**）中的值实时变化。按下该旋钮可快速将触发电平恢复至零点。

MENU: 按下该键打开触发操作菜单。本示波器提供丰富的触发类型，详见《DS1000Z 用户手册》中的介绍。

FORCE: 按下该键将强制产生一个触发信号。

全部清除



按下该键清除屏幕上所有的波形。如果示波器处于“RUN”状态，则继续显示新波形。

波形自动显示



按下该键启用波形自动设置功能。示波器将根据输入信号自动调整垂直档位、水平时基以及触发方式，使波形显示达到最佳状态。

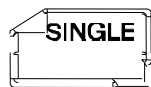
注意：应用波形自动设置功能时，若被测信号为正弦波，要求其频率不小于 41 Hz；若被测信号为方波，则要求其占空比大于 1%且幅度不小于 20 mVpp。如果不满足此参数条件，则波形自动设置功能可能无效，且菜单显示的快速参数测量功能不可用。

运行控制



按下该键“运行”或“停止”波形采样。运行（RUN）状态下，该键黄色背光灯点亮；停止（STOP）状态下，该键红色背光灯点亮。

单次触发



按下该键将示波器的触发方式设置为“Single”。单次触发方式下，按 **FORCE** 键立即产生一个触发信号。

多功能旋钮



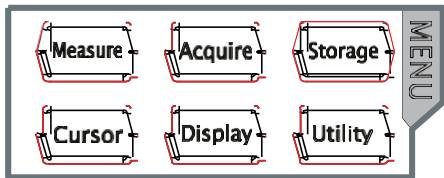
调节波形亮度：

非操作时，转动该旋钮可调整波形显示的亮度。亮度可调节范围为0%至 100%。顺时针转动增大波形亮度，逆时针转动减小波形亮度。按下旋钮将波形亮度恢复至60%。也可按 **Display**  **波 形 亮 度**，使用该旋钮调节波形亮度。

多功能：

菜单操作时，该旋钮背光灯变亮，按下某个菜单软键后，转动该旋钮可选择该菜单下的子菜单，然后按下旋钮可选中当前选择的子菜单。该旋钮还可以用于修改参数（具体请参考“参数设置方法”中的详细介绍）输入文件名等。

功能菜单



Measure: 按下该键进入测量设置菜单。可设置测量信源、打开或关闭频率计、全部测量、统计功能等。按下屏幕左侧的 **MENU**，可打开 37 种波形参数测量菜单，然后按下相应的菜单软键快速实现“一键”测量，测量结果将出现在屏幕底部。

Acquire: 按下该键进入采样设置菜单。可设置示波器的获取方式、 $\sin(x)/x$ 和存储深度。

Storage: 按下该键进入文件存储和调用界面。可存储的文件类型包括：图像存储、轨迹存储、波形存储、设置存储、CSV 存储和参数存储。支持内、外部存储和磁盘管理。

Cursor: 按下该键进入光标测量菜单。示波器提供手动、追踪、自动和 XY 四种光标模式。其中，XY 模式仅在时基模式为“XY”时有效。

Display: 按下该键进入显示设置菜单。设置波形显示类型、余辉时间、波形亮度、屏幕网格和网格亮度。

Utility: 按下该键进入系统功能设置菜单。设置系统相关功能或参数，例如接口、声音、语言等。此外，还支持一些高级功能，例如通过/失败测试、波形录制等。

打印



按下该键打印屏幕或将屏幕保存到 U 盘中。

- 若当前已连接 PictBridge 打印机，并且打印机处于闲置状态，按下该键将执行打印功能。
- 若当前未连接打印机，但连接 U 盘，按下该键则将屏幕图形以指定格式保存到 U 盘中。
- 若同时连接打印机和 U 盘时，打印机优先级较高。

用户界面

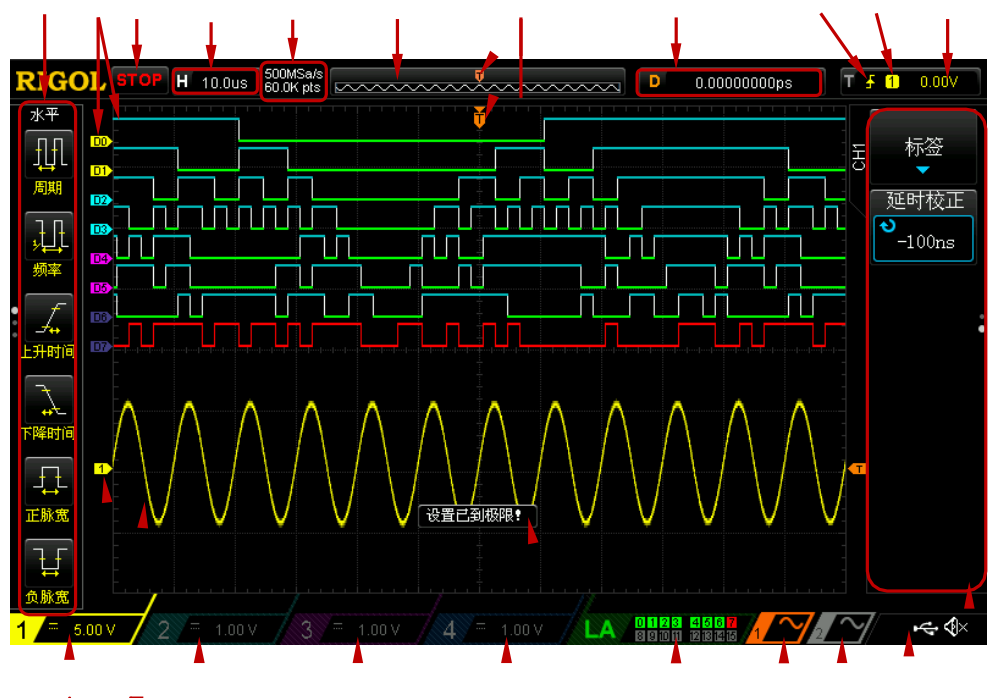


图 2 用户界面

- 1. 自动测量选项**
提供 20 种水平（HORIZONTAL）测量参数和 17 种垂直（VERTICAL）测量参数。按下屏幕左侧的软键即可打开相应的测量项。连续按下 **MENU** 键，可切换水平和垂直测量参数。
- 2. 数字通道标记/波形**
数字波形的逻辑高电平显示为蓝色，逻辑低电平显示为绿色，边沿呈白色。当前选中的数字通道波形和通道标签一致，显示为红色。逻辑分析仪功能菜单中的分组设置功能可以将数字通道分为四个通道组，同一通道组的通道标记显示为同一种颜色，不同通道组用不同的颜色表示。
注意：该功能仅适用于带有 MSO 升级选件的 DS1000Z Plus。
- 3. 运行状态**
可能的状态包括：RUN（运行）、STOP（停止）、T'D（已触发）、WAIT（等待）和 AUTO（自动）

4. 水平时基

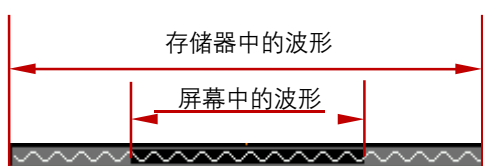
- 表示屏幕水平轴上每格所代表的时间长度。
- 使用水平  **SCALE** 可以修改该参数，可设置范围为5 ns 至50 s。

5. 采样率/存储深度

- 显示当前示波器使用的采样率以及存储深度。
- 采样率和存储深度会随着水平时基的变化而改变。

6. 波形存储器

提供当前屏幕中的波形在存储器中的位置示意图。



7. 触发位置

显示波形存储器和屏幕中波形的触发位置。

8. 水平位移

使用水平  **POSITION** 可以调节该参数。按下旋钮时参数自动设置为0。

9. 触发类型

显示当前选择的触发类型及触发条件设置。选择不同触发类型时显示不同的标识。

例如， 表示在“边沿触发”的上升沿处触发。

10. 触发源

显示当前选择的触发源（CH1-CH4、AC 或D0-D15）。选择不同触发源时，显示不同的标识，并改变触发参数区的颜色。

例如， 表示选择CH1 作为触发源。

11. 触发电平

- 触发信源选择模拟通道时，您需要设置合适的触发电平。
- 屏幕右侧的为触发电平标记，右上角为触发电平值。
- 使用触发  **LEVEL** 修改触发电平时，触发电平值会随的上下移动而改变。

注意：斜率触发、欠幅脉冲触发和超幅触发时，有两个触发电平标记（和）。

12. CH1 垂直档位

- 显示屏幕垂直方向CH1 每格波形所代表的电压。
- 按 **CH1** 选中CH1 通道后，使用垂直  **SCALE** 可以修改该参数。
- 此外还会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如）带宽限制

(如 )

13. 模拟通道标记/波形

不同通道用不同的颜色表示，通道标记和波形的颜色一致。

14. CH2 垂直档位

- 显示屏幕垂直方向CH2 每格波形所代表的电压。
- 按 **CH2** 选中CH2 通道后，使用**垂直**  **SCALE** 可以修改该参数。
- 此外还会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如 ）带宽限制（如 ）

15. CH3 垂直档位

- 显示屏幕垂直方向CH1 每格波形所代表的电压。
- 按 **CH3** 选中CH3 通道后，使用**垂直**  **SCALE** 可以修改该参数。
- 此外还会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如 ）带宽限制（如 ）

16. CH4 垂直档位

- 显示屏幕垂直方向CH2 每格波形所代表的电压。
- 按 **CH4** 选中CH4 通道后，使用**垂直**  **SCALE** 可以修改该参数。
- 此外还会根据当前的通道设置给出如下标记：通道耦合（如 ）带宽限制（如 ）

17. 消息框

显示提示信息。

18. 数字通道状态区

显示 16 个数字通道当前的状态。当前打开的数字通道显示为绿色，当前选中的数字通道突出显示为红色，任何已关闭的数字通道均显示为灰色。

注意：该功能仅适用于带有 MSO 升级选件的 DS1000Z Plus。

19. 源1 波形

- 显示当前源 1 设置中的波形类型。
- 当源1 的调制打开时，源1 波形的下方会显示  标识。
- 当源1 的阻抗设置为50 Ω 时，源1 波形的下方会显示  标识。
- 仅适用于带有信号源通道的数字示波器。

20. 源2 波形

- 显示当前源 2 设置中的波形类型。
- 当源2 的调制打开时，源2 波形的下方会显示  标识。
- 当源2 的阻抗设置为50 Ω 时，源2 波形的下方会显示  标识。
- 仅适用于带有信号源通道的数字示波器。

21. 通知区域

显示声音图标和 U 盘图标。

- 声音图标：按 **Utility**  **声音** 可以打开或关闭声音。声音打开时，该区域显示 ；声音关闭时，显示 .
- U 盘图标：当示波器检测到U 盘时，该区域显示 .

22. 操作菜单

按下任一软键可激活相应的菜单。下面的符号可能显示在菜单中：

-  表示可以旋转多功能旋钮  修改参数值。多功能旋钮  的背光灯在参数修改状态下变亮。
-  表示可以旋转多功能旋钮  选择所需选项，当前选中的选项显示为蓝色，按下  进入所选项对应的菜单栏。带有该符号的菜单被选中后， 的背光灯常亮。
-  表示按下  将弹出数字键盘，可直接输入所需的参数值。带有该符号的菜单被选中后， 的背光灯常亮。
-  表示当前菜单有若干选项。
-  表示当前菜单有下一层菜单。
-  按下该键可以返回上一级菜单。
-  圆点数表示当前菜单的页数。

二、DG1000Z系列函数/任意波形发生器简介

DG1000Z 系列函数/任意波形发生器是一款集函数发生器、任意波形发生器、噪声发生器、脉冲发生器、谐波发生器、模拟/数字调制器、频率计等功能于一身的多功能信号发生器。多功能、高性能、高性价比、便携式等特点为教育、研发、生产、测试等行业提供了新的选择。

主要特色:

- 最高输出频率（正弦波）25MHz、30MHz和60MHz
- 独创的SiFi (Signal Fidelity): 逐点生成任意波形，不失真还原信号，采样率精确可调，所有输出波形（包括：方波、脉冲等）抖动低至200ps
- 每通道任意波存储深度：2M点（标配）、8M点（标配）、16M点（选配）
- 标配等性能双通道，相当于两个独立信号源
- $\pm 1\text{ppm}$ 高频率稳定度，相噪低至-125dBc/Hz
- 内置8次谐波发生器功能
- 内置 7digits/s, 200MHz 带宽的全功能频率计
- 多达 160 种内建任意波形，囊括了工程应用、医疗电子、汽车电子、数学处理等各个领域的常用信号
- 最大采样率：200MSa/s；垂直分辨率：14bits
- 标配强大的任意波形编辑功能，也可通过上位机软件生成任意波形
- 丰富的调制功能：AM、FM、PM、ASK、FSK、PSK和PWM
- 标配波形叠加功能，可以在基本波形的基础上叠加指定波形后输出
- 标配通道跟踪功能，跟踪打开时，双通道所有参数均可同时根据用户的配置更新
- 标准配置接口：USB Host、USB Device、LAN（LXI Core 2011 Device）
- 3.5英寸（320*240像素）彩色显示屏
- 便携式设计，重量仅3.5kg

前面板概述

DG1000Z 的前面板如下图所示。点击图中的数字可查看相应的说明。

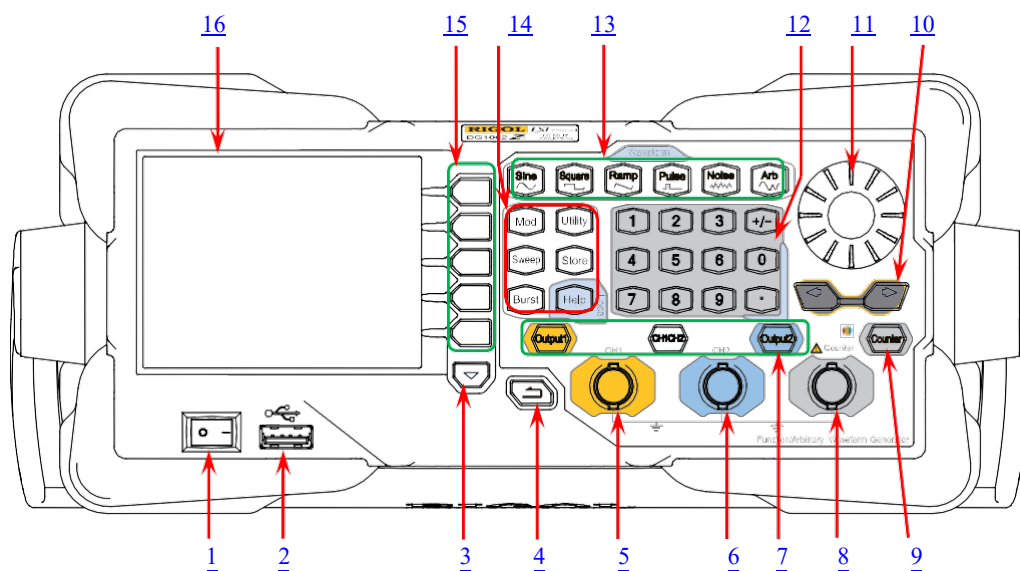


图3 前面板

1. 电源键

用于开启或关闭信号发生器。

2. USB Host

支持FAT32 格式Flash 型U 盘RIGOL TMC 数字示波器、功率放大器和USB-GPIB 模块。

- U 盘：读取 U 盘中的波形文件或状态文件，或将当前的仪器状态或编辑的波形数据存储到U 盘中，也可以将当前屏幕显示的内容以图片格式 (*.Bmp) 保存到 U 盘。
- TMC 示波器：与符合 TMC 标准的 RIGOL 示波器进行无缝互联，读取并存储示波器中采集到的波形，再无损地重现出来。
- 功率放大器（选件）支持RIGOL 功率放大器（如：PA1011），对其进行在线配置，将信号功率放大后输出。
- USB-GPIB 模块（选件）为集成了 USB Host 接口但未集成 GPIB 接口的 RIGOL 仪器扩展出 GPIB 接口。

3. 菜单翻页键

打开当前菜单的下一页或返回第一页。

4. 返回上一级菜单

退出当前菜单，并返回上一级菜单。

5. CH1 输出连接器

BNC 连接器，标称输出阻抗为 50Ω 。

当 **Output1** 打开时（背灯变亮），该连接器以CH1 当前配置输出波形。

6. CH2 输出连接器

BNC 连接器，标称输出阻抗为 50Ω 。

当 **Output2** 打开时（背灯变亮），该连接器以CH2 当前配置输出波形。

7. 通道控制区



用于控制CH1 的输出。

- 按下该按键，背灯变亮，打开 CH1 输出。此时，**[CH1]** 连接器以当前配置输出信号。
- 再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭CH1 输出。



用于控制CH2 的输出。

- 按下该按键，背灯变亮，打开 CH2 输出。此时，**[CH2]** 连接器以当前配置输出信号。
- 再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭CH2 输出。



用于切换CH1 或 CH2 为当前选中通道。



注意

CH1 和 CH2 通道输出端设有过压保护功能，满足下列条件之一则产生过压保护。产生过压保护时，屏幕弹出提示消息，输出关闭。

- 仪器幅度设置大于 $2V_{pp}$ 或输出偏移大于 $|2V_{dc}|$ ，输入电压大于 $\pm 11.5 \times (1 \pm 5\%)V$ ($<10kHz$)。
- 仪器幅度设置小于等于 $2V_{pp}$ 或输出偏移小于等于 $|2V_{dc}|$ ，输入电压大于 $\pm 3.5 \times (1 \pm 5\%)V$ ($<10kHz$)。

8. Counter 测量信号输入连接器

BNC 连接器，输入阻抗为 $1M\Omega$ 。用于接收频率计测量的被测信号。



注意

为了避免损坏仪器，输入信号的电压范围不得超过 $\pm 7V_{ac+dc}$ 。

9. 频率计

用于开启或关闭频率计功能。

- 按下该按键，背灯变亮，左侧指示灯闪烁，频率计功能开启。
- 再次按下该键，背灯熄灭，此时，关闭频率计功能。

注意：当Counter 打开时，CH2 的同步信号将被关闭；关闭 Counter 后，CH2 的同步信号恢复。

10. 方向键

- 使用旋钮设置参数时，用于移动光标以选择需要编辑的位。
- 使用键盘输入参数时，用于删除光标左边的数字。
- 存储或读取文件时，用于展开或收起当前选中目录。
- 文件名编辑时，用于移动光标选择文件名输入区中指定的字符。

11. 旋钮

- 使用旋钮设置参数时，用于增大（顺时针）或减小（逆时针）当前光标处的数值。
- 存储或读取文件时，用于选择文件保存的位置或用于选择需要读取的文件。
- 文件名编辑时，用于选择虚拟键盘中的字符。
- 在 **Arb** □ **选择波形** □ **内建波形** 中，用于选择所需的内建任意波。

12. 数字键盘

包括数字键（0 至9）小数点（.）和符号键（+/-）用于设置参数。

注意：

- 1) 编辑文件名时，符号键用于切换大小写。
- 2) 使用小数点键可将用户界面以*.Bmp 格式快速保存至 U 盘(具体步骤请参考“打印设置”)

13. 波形键



提供频率从 1 μ Hz 至60MHz 的正弦波输出。

- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可以设置正弦波的频率/周期、幅度/高电平、偏移/低电平和起始相位。



提供频率从 1 μ Hz 至25MHz 并具有可变占空比的方波输出。

- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可以设置方波的频率/周期、幅度/高电平、偏移/低电平、占空比和起始相位。



提供频率从 1 μ Hz 至1MHz 并具有可变对称性的锯齿波输出。

- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可以设置锯齿波的频率/周期、幅度/高电平、偏移/低电平、对称性和起始相位。



提供频率从 1 μ Hz 至25MHz 并具有可变脉冲宽度和边沿时间的脉冲波输出。

- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可以设置脉冲波的频率/周期、幅度/高电平、偏移/低电平、脉宽/占空比、上升沿、下降沿和起始相位。



提供带宽为 60MHz 的高斯噪声输出。

- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可以设置噪声的幅度/高电平和偏移/低电平。



提供频率从 1 μ Hz 至20MHz 的任意波输出。

- 支持采样率和频率两种输出模式。
- 多达 160 种内建波形，并提供强大的波形编辑功能。
- 选中该功能时，按键背灯变亮。
- 可设置任意波的频率/周期、幅度/高电平、偏移/低电平和起始相位。

14. 功能键



可输出多种已调制的波形。

- 提供多种调制方式：AM、FM、PM、ASK、FSK、PSK 和PWM。
- 支持内部和外部调制源。
- 选中该功能时，按键背灯变亮。



可产生正弦波、方波、锯齿波和任意波（直流除外）的 Sweep 波形。

- 支持线性、对数和步进 3 种Sweep 方式。
- 支持内部、外部和手动 3 种触发源。
- 提供频率标记功能，用于控制同步信号的状态。
- 选中该功能时，按键背灯变亮。



可产生正弦波、方波、锯齿波、脉冲波和任意波（直流除外）的 Burst 波形。

- 支持N 循环、无限和门控 3 种Burst 模式。
- 噪声也可用于产生门控 Burst。
- 支持内部、外部和手动 3 种触发源。
- 选中该功能时，按键背灯变亮。



用于设置辅助功能参数和系统参数。选中该功能时，按键背灯变亮。



可存储或调用仪器状态或者用户编辑的任意波数据。

- 内置一个非易失性存储器（C 盘），并可外接一个U 盘D 盘。
- 选中该功能时，按键背灯变亮。



要获得任何前面板按键或菜单软键的帮助信息，按下该键后，再按下你所需要获得帮助的按键。

注意：

- 1) 当仪器工作在远程模式时，该键用于返回本地模式。
- 2) 该键可用于锁定和解锁键盘。长按 **Help** 键，可锁定前面板按键，此时，除 **Help** 键，前面板其它按键不可用。再次长按该键，可解除锁定。

15. 菜单软键

与其左侧显示的菜单一一对应，按下该软键激活相应的菜单。

16. LCD 显示屏

3.5 英寸 TFT (320×240) 彩色液晶显示屏，显示当前功能的菜单和参数设置、系统状态以及提示消息等内容，详细信息请参考“**用户界面**”一节。

用户界面

DG1000Z 的用户界面包括三种显示模式：双通道参数（默认）、双通道图形和单通道显示。本手册着重以双通道参数显示模式为例介绍仪器的用户界面。

双通道参数模式

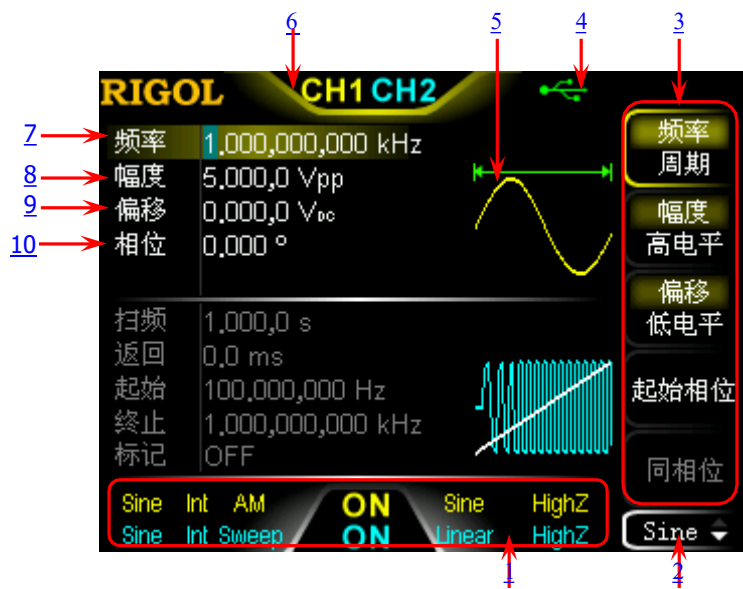
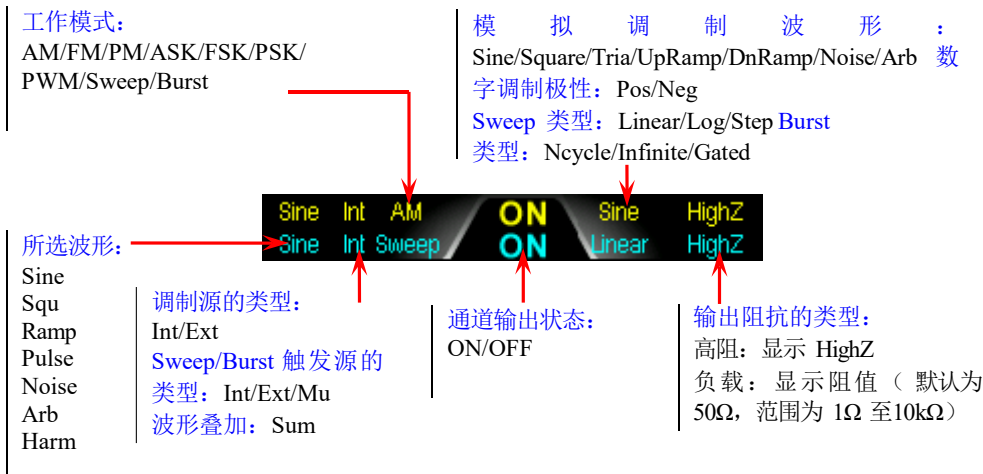


图 4 用户界面（双通道参数模式）

1. 通道输出配置状态栏

显示各通道当前的输出配置。



2. 当前功能及翻页提示

显示当前已选中功能的名称。例如：“Sine”表示当前选中正弦波功能，“Edit”表示当前选中任意波编辑功能。此外，功能名称右侧的上、下箭头用来提示当前是否可执行翻页操作。

3. 菜单

显示当前已选中功能对应的操作菜单。

4. 状态栏

- : 仪器正确连接至局域网时显示。
- : 仪器工作于远程模式时显示。
- : 仪器前面板被锁定时显示。
- : 仪器检测到 U 盘时显示。
- : 仪器与功率放大器正确连接时显示。

5. 波形

显示各通道当前选择的波形。

6. 通道状态栏

指示当前通道的选中状态和开关状态。选中 CH1 时，状态栏边框显示黄色；选中 CH2 时，状态栏边框显示蓝色；打开 CH1 时，状态栏中“CH1”以黄色高亮显示；打开 CH2 时，状态栏中“CH2”以蓝色高亮显示。

注意：可以同时打开两个通道，但不可同时选中两个通道。

7. 频率

显示各通道当前波形的频率。按相应的 **频率/周期** 使“频率”突出显示，通过数字键盘或方向键和旋钮改变该参数。

8. 幅度

显示各通道当前波形的幅度。按相应的 **幅度/高电平** 使“幅度”突出显示，通过数字键盘或方向键和旋钮改变该参数。

9. 偏移

显示各通道当前波形的直流偏移。按相应的 **偏移/低电平** 使“偏移”突出显示，通过数字键盘或方向键和旋钮改变该参数。

10. 相位

显示各通道当前波形的相位。按相应的 **起始相位** 菜单后，通过数字键盘或方向键和旋钮改变该参数。

双通道图形模式

按 **Utility** □ **系统设置** □ **显示设置** □ **显示模式** 选择“双通道图形”即可切换为双通道图形显示模式，如下图所示。

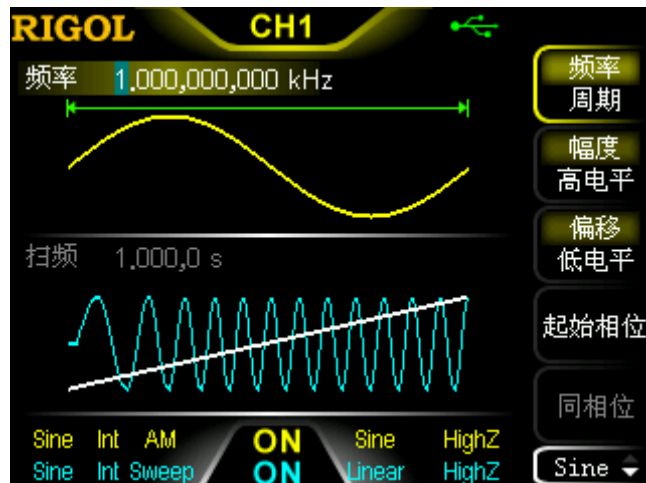


图 5 用户界面（双通道图形模式）

单通道显示模式

按 **Utility** □ **系统设置** □ **显示设置** □ **显示模式** 选择“单通道显示”即可切换为单通道显示模式，如下图所示。

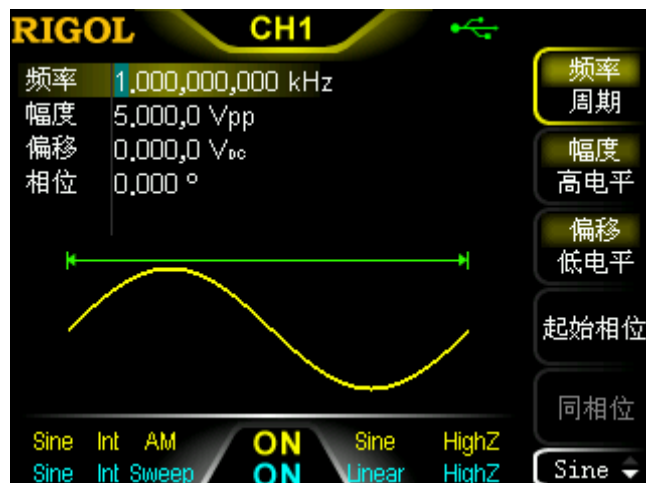


图 6 用户界面（单通道显示模式）

输出基本波形

DG1000Z 系列函数/任意波形发生器可从单通道或同时从双通道输出基本波形（包括正弦波、方波、锯齿波、脉冲和噪声）。开机时，双通道默认配置为频率为 1kHz，幅度为 5Vpp 的正弦波。您可以配置仪器输出各类基本波形。

选择输出通道

前面板  键用于切换 CH1 或 CH2 为当前选中通道。开机时，仪器默认选中 CH1，用户界面中 CH1 对应的区域高亮显示，且通道状态栏的边框显示为黄色。此时，按下前面板  键可选中 CH2，用户界面中 CH2 对应的区域高亮显示，且通道状态栏的边框显示为蓝色。

选中所需的输出通道后，您可以配置所选通道的波形和参数。

要点说明：

CH1 与 CH2 不可同时被选中。您可以首先选中 CH1，完成波形和参数的配置后，再选中 CH2 进行配置。

选择基本波形

DG1000Z 可输出 5 种基本波形，包括正弦波、方波、锯齿波、脉冲和噪声。前面板提供5个功能按键用于选择相应的波形。按下相应的按键即可选中所需波形，此时，按键背灯点亮，用户界面右侧显示相应的功能名称及参数设置菜单（如下表所示）开机时，仪器默认选中正弦波。

表 2-1 基本波形

基本波形		正弦波	方波	锯齿波	脉冲	噪声
功能按键						
功能名称		Sine	Squ	Ramp	Pulse	Noise
参数	频率/周期	√	√	√	√	
	幅度/高电平	√	√	√	√	√
	偏移/低电平	√	√	√	√	√
	起始相位	√	√	√	√	
	同相位	√	√	√	√	
	占空比		√			
	对称性			√		
	脉宽/占空比				√	
	上升沿				√	
	下降沿				√	

设置频率/周期

频率是基本波形最重要的参数之一。基于不同的型号和不同的波形，频率的可设置范围不同，请参考“性能指标”中“频率特性”的说明。默认值为 1kHz。

屏幕显示的频率为默认值或之前设置的频率。当仪器功能改变时，若该频率在新功能下有效，则仪器依然使用该频率；若该频率在新功能下无效，仪器则弹出提示消息，并自动将频率设置为新功能的频率上限值。

按 **频率/周期** 软键使“频率”突出显示。此时，使用数字键盘输入所需频率的数值，然后在弹出的单位菜单中选择所需的单位。

- 可选的频率单位有：MHz、kHz、Hz、mHz 和 μ Hz。
- 再次按下此软键将切换至周期设置，此时“周期”突出显示。
- 可选的周期单位有：sec、msec、 μ sec 和 nsec。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

设置幅度/高电平

幅度的可设置范围受“阻抗”和“频率/周期”设置的限制，请参考“性能指标”中“输出特性”的说明。默认值为 5Vpp。

屏幕显示的幅度为默认值或之前设置的幅度。当仪器配置改变时（如频率）若该幅度有效，则仪器依然使用该幅度。若该幅度无效，仪器则弹出提示消息，并自动将幅度设置为新配置的幅度上限值。您也可以使用“高电平”或“低电平”设置幅度。

按 **幅度/高电平** 软键使“幅度”突出显示。此时，使用数字键盘输入所需幅度的数值，然后在弹出的单位菜单中选择所需的单位。

- 可选的幅度单位有：Vpp、mVpp、Vrms、mVrms 和 dBm（高阻时无效）
- 再次按下此软键将切换至高电平设置，此时“高电平”突出显示。
- 可选的高电平单位有：V 和 mV。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

要点说明：

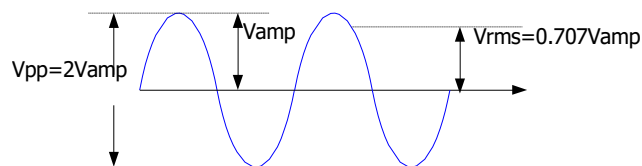
1. 如何将以 Vpp 为单位的幅度转换为以 Vrms 为单位对应的值？方

法：

Vpp 是表示信号峰峰值的单位，Vrms 是表示信号有效值的单位。仪器默认使用 Vpp。按数字键盘中的  键可快速切换当前幅度的单位。

说明：

对于不同的波形，Vpp 与 Vrms 之间的关系不同。以正弦波为例，二者之间的关系由下图所示



根据上图，可以推导出 Vpp 与 Vrms 之间换算关系满足如下关系式：

$$V_{pp} = 2\sqrt{2}V_{rms}$$

例如当前幅度为 5Vpp 按数字键盘中的  键选择 Vrms 即可转换成以 Vrms 为单位对应的值，则对于正弦波，转换后的值为 1.768Vrms。

2. 如何以 dBm 为单位设置波形的幅度?

方法:

- 1) 按 CH1|CH2 键选择所需通道。
- 2) 按 Utility □ **通道设置** → **输出设置** → **阻抗** 选择“负载”并使用数字键盘设置合适的负载值。
- 3) 选择所需的波形，按 **幅度/高电平** 使“幅度”突出显示，通过数字键盘输入所需的数值，在弹出的菜单中选择单位 dBm 即可。

说明:

dBm 是表示信号功率绝对值的单位 dBm 与 Vrms 之间满足如下关系式:

$$dBm = 10 \lg \left(\frac{V_{rms}^2}{R} \times \frac{1}{0.001W} \right)$$

其中，R 表示通道的输出阻抗值，必须为确定的数值，因此，输出阻抗为高阻时，不可使用单位 dBm。

例如，□ 当前输出阻抗为 50Ω，幅度为 1.768Vrms（即 5Vpp）按数字键盘中的键选择 dBm 可将幅度转换为以 dBm 为单位对应的值 17.9601dBm。

设置偏移/低电平

直流偏移电压的可设置范围受“阻抗”和“幅度/高电平”设置的限制，请参考“性能指标”中“输出特性”的说明。默认值为 $0V_{DC}$ 。

屏幕显示的 DC 偏移电压为默认值或之前设置的偏移。当仪器配置改变时（如阻抗），若该偏移有效，则仪器依然使用该偏移。若该偏移无效，仪器则弹出提示消息，并自动将偏移设置为新配置的偏移上限值。

按 **偏移/低电平** 软键使“偏移”突出显示。此时，使用数字键盘输入所需偏移的数值，然后在弹出的单位菜单中选择所需的单位。

- 可选的直流偏移电压单位有： V_{DC} 和 mV_{DC} 。
- 再次按下此软键将切换至低电平设置，此时“低电平”突出显示。
- 低电平应至少比高电平小 $1mV$ （输出阻抗为： 50Ω ）
- 可选的低电平单位有： V 和 mV 。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

设置起始相位

起始相位的可设置范围为 0° 至 360° 。默认值为 0° 。

屏幕显示的起始相位为默认值或之前设置的相位。改变仪器功能时，新功能依然使用该相位。

按 **起始相位** 软键使其突出显示。此时，使用数字键盘输入所需起始相位的数值，然后在弹出的单位菜单中选择单位“°”。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

同相位

DG1000Z 系列双通道函数/任意波形发生器提供同相位功能。按下该键后，仪器将重新配置两个通道，使其按照设定的频率和相位输出。

对于同频率或频率呈倍数关系的两个信号，通过该操作可以使其相位对齐。假定CH1 输出 1kHz，5Vpp，0°的正弦波，CH2 输出 1kHz，5Vpp，180°的正弦波。用示波器采集两个通道的波形，并使其稳定显示，可以发现示波器上显示的两个波形相位差不再是180°。此时，按下信号发生器的 **同相位** 软键，示波器中的波形将呈 180°相位差显示，而不需人为调整信号源中的初始相位。

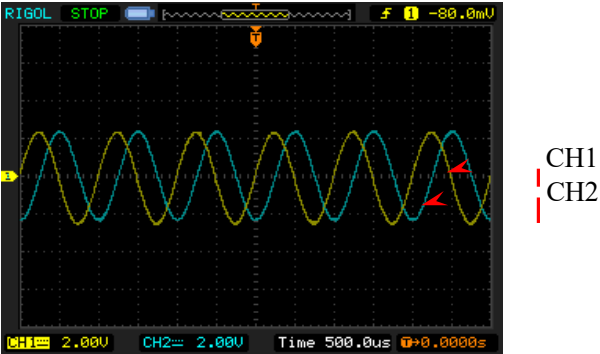


图 7 同相位前

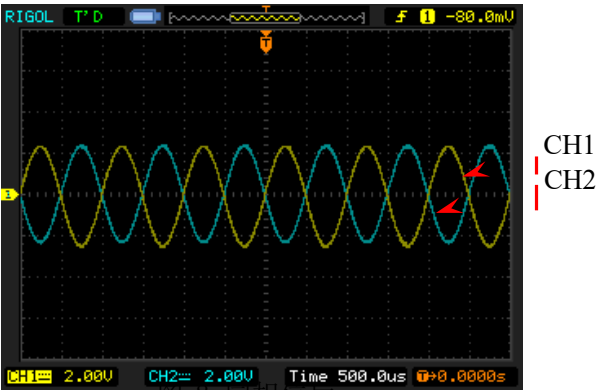


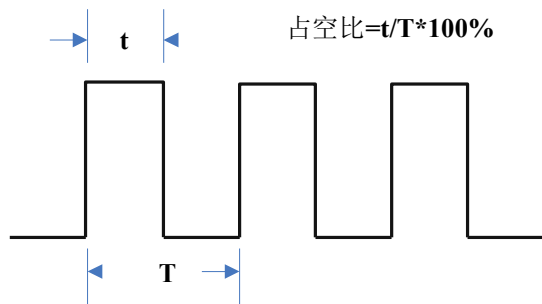
图 8 同相位后

要点说明:

两个通道中任一通道处于调制模式时，**同相位** 菜单置灰禁用。

设置占空比 (Square)

占空比定义为，方波波形高电平持续的时间所占周期的百分比，如下图所示。该参数仅在选中方波时有效。



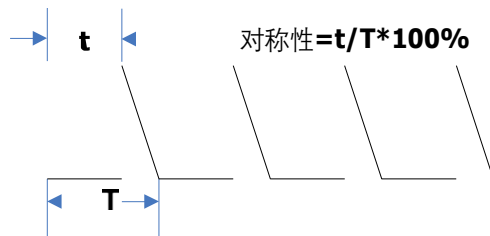
占空比的可设置范围受“频率/周期”设置的限制，请参考“**性能指标**”中“信号特性”的说明。默认值为 50%。

按 **占空比** 软键使其突出显示。此时，使用数字键盘输入所需占空比的数值，然后在弹出的单位菜单中选择单位“%”。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

设置对称性 (Ramp)

对称性定义为，锯齿波波形处于上升期间所占周期的百分比，如下图所示。该参数仅在选中锯齿波时有效。



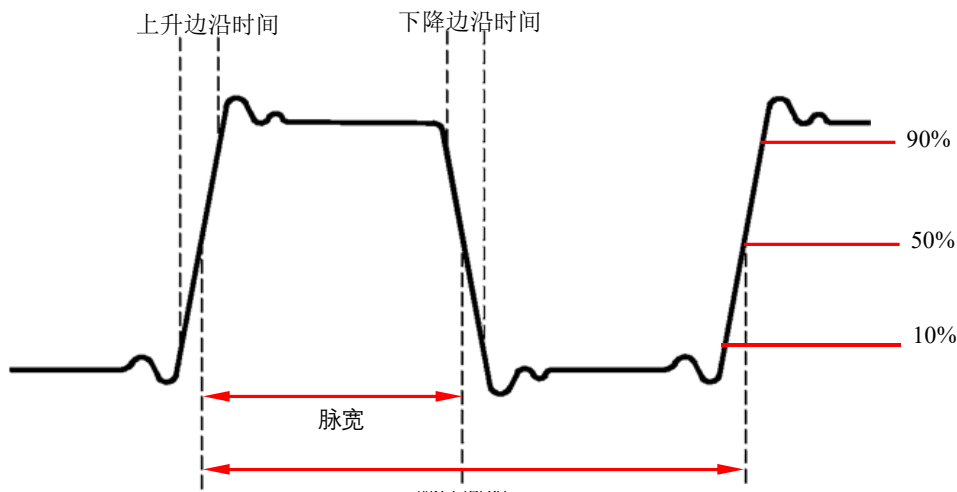
对称性的可设置范围为 0%至 100%。默认值为 50%。

按 **对称性** 软键使其突出显示。此时，使用数字键盘输入所需对称性的数值，然后在弹出的单位菜单中选择单位“%”。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

设置脉宽/占空比 (Pulse)

脉宽定义为，从脉冲上升沿幅度的 50%处到下一个下降沿幅度的 50%处之间的时间间隔，如下图所示。



脉宽的可设置范围受“最小脉冲宽度”和“脉冲周期”的限制（关于“最小脉冲宽度”和“脉冲周期”的范围，请参考“性能指标”中“信号特性”的说明）。脉宽的取值范围为16ns 至 999.999 982 118ks，默认值为500μs。

- 脉宽 $\geq$ 最小脉冲宽度
- 脉宽 $<$ 脉冲周期 - 2 $\times$ 最小脉冲宽度

脉冲占空比定义为，脉宽占脉冲周期的百分比。

脉冲占空比与脉宽相关联，修改其中一个参数将自动修改另一个参数。脉冲占空比受“最小脉冲宽度”和“脉冲周期”的限制。脉冲占空比的取值范围为 0.001%至 99.999%，默认值为 50%。

- 脉冲占空比 $\geq 100 \times \text{最小脉冲宽度} \div \text{脉冲周期}$
- 脉冲占空比 $< 100 \times (1 - 2 \times \text{最小脉冲宽度} \div \text{脉冲周期})$

按 **脉宽/占空比** 软键使“脉宽”突出显示。此时，使用数字键盘输入所需脉宽的数值，然后在弹出的单位菜单中选择所需的单位。

- 可选的脉宽单位有：sec、msec、μsec 和nsec。
- 再次按下此软键可切换至占空比的设置。

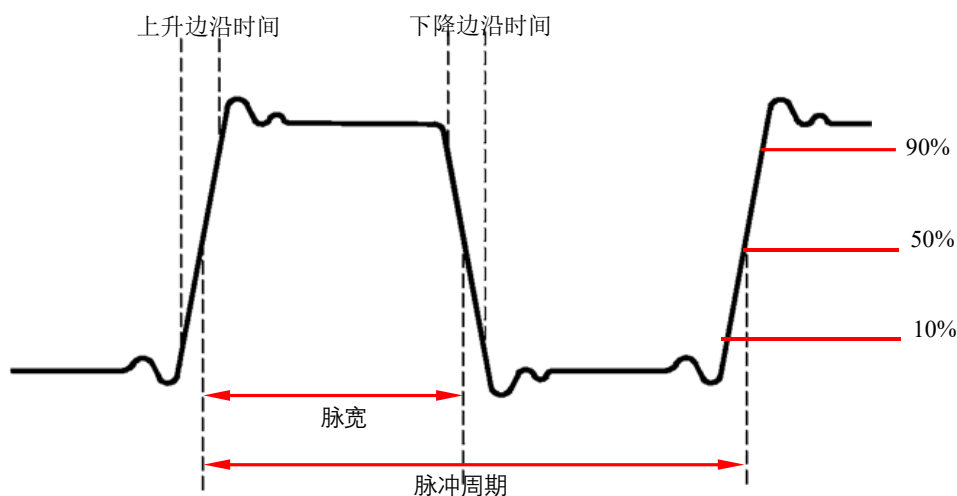
您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

设置上升沿/下降沿 (Pulse)

上升边沿时间定义为，脉冲幅度从 10% 上升至 90% 所持续的时间；下降边沿时间定义为，脉冲幅度从 90% 下降至 10% 所持续的时间，如下图所示。

上升/下降边沿时间的可设置范围受当前指定的脉宽限制，如下式所示。当所设置的数值超出限定值，DG1000Z 自动调整边沿时间以适应指定的脉宽。

$$\text{上升/下降边沿时间} \leq 0.625 \times \text{脉宽}$$



按 **上升沿** (**下降沿**) 软键使“上升沿” (“下降沿”) 突出显示，使用数字键盘输入所需数值，然后在弹出的单位菜单中选择所需的单位。

- 可选的脉宽单位有：sec、msec、μsec 和 nsec。
- 上升边沿时间和下降边沿时间相互独立，允许用户单独设置。

您也可以使用方向键和旋钮设置参数的数值：使用方向键移动光标选择需要编辑的位，然后旋转旋钮修改数值。

启用通道输出

完成已选波形的参数设置之后，您需要开启通道以输出波形。

开启通道之前，您还可以使用 **Utility** 功能键下的 **通道设置** 菜单设置与该通道输出相关的参数，如阻抗、极性等，请参考“**输出设置**”一节的介绍。

按下前面板 **Output1** 按键，按键背灯变亮，仪器从前面板相应的输出连接器输出已配置的波形。

实例：输出正弦波

本节主要介绍如何从 [CH1] 连接器输出一个正弦波（频率为 20kHz，幅度为 2.5Vpp，偏移量为 500mV_{DC}，起始相位为 90°）。

1. **选择输出通道：**按通道选择键 **CH1|CH2** 选中 CH1。此时通道状态栏边框以黄色标识。
2. **选择正弦波：**按 **Sine** 选择正弦波，背灯变亮表示功能选中，屏幕右方出现该功能对应的菜单。
3. **设置频率：**按 **频率/周期** 使“频率”突出显示，通过数字键盘输入 20，在弹出的菜单中选择单位“kHz”。
4. **设置幅度：**按 **幅度/高电平** 使“幅度”突出显示，通过数字键盘输入 2.5，在弹出的菜单中选择单位“Vpp”。
5. **设置偏移电压：**按 **偏移/低电平** 使“偏移”突出显示，通过数字键盘输入 500，在弹出的菜单中选择单位“mV_{DC}”。
6. **设置起始相位：**按 **起始相位**，通过数字键盘输入 90，然后在弹出的菜单中选择单位“°”。起始相位值范围为 0° 至 360°。
7. **启用通道输出：**按 **Output1** 键，背灯变亮，[CH1] 连接器以当前配置输出正弦波信号。
8. **观察输出波形：**使用 BNC 连接线将 DG1000Z 的[CH1]与示波器相连接，下图为由示波器观察到的波形。

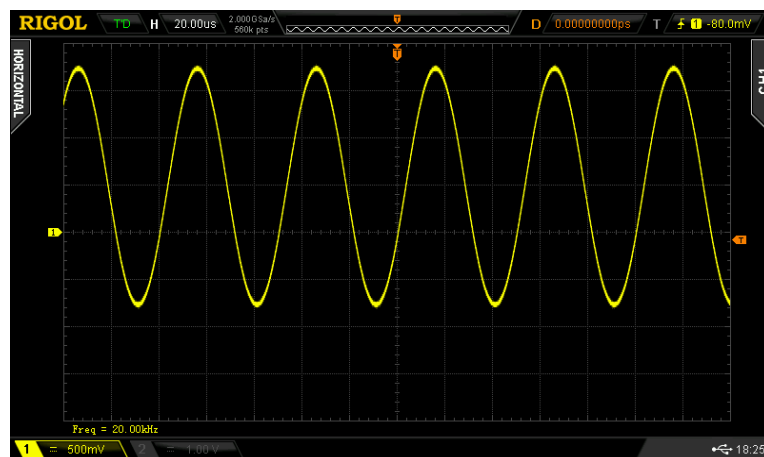


图 9 正弦波

辅助功能与系统设置

按前面板的 **Utility** 键，打开下图所示的操作界面。该界面显示当前选中通道的输出配置、耦合配置和系统参数。



图 10 Utility 界面

- 通道设置: 配置 CH1 和 CH2 的输出参数。
- 耦合设置: 设置通道耦合参数。
- 通道复制: 设置通道复制参数。
- 还原默认值: 将系统恢复到出厂默认状态。
- Language: 设置系统语言。
- 系统信息: 查看仪器的型号、序列号以及软件版本号。
- 系统设置: 设置系统相关的参数。
- 接口设置: 设置远程接口参数。
- 打印设置: 设置屏幕打印相关的参数。
- 检测校准: 查看校准信息，设置校准相关参数。
- PA 设置: 设置功放参数。

实验十 光的等厚干涉——牛顿环及劈尖干涉实验

1 概述

光的干涉是指满足相干条件，即频率相同、存在相互平行的振动分量、位相差恒定的两束光相互叠加时所出现的光强按空间周期性重新分布的一种重要光学现象。它为光的波动性提供了有力的实验证明。常见的薄膜、肥皂泡表面的彩色斑纹就是由不同表面的反射光相干而成。由于光的干涉条纹的数目和间距能反映传播媒质折射率的微小差别及数量级在相干波长（ $0.4\mu\text{m}\sim 0.8\mu\text{m}$ ）以下的微小长度变化，因此光的干涉在工程技术和科学研究领域中都有着重要的应用。利用光的干涉可制成干涉滤光片、增透膜、高反射膜，可精确测量长度（或角度）的微小变化、天体的直径、透明介质的折射率，可进行光谱分析、研究光谱线的超精细结构，可检测机械零件或光学元件的表面光洁度、曲率半径以及光学元件的成像质量。20 世纪 60 年代相干性极好的激光问世以后，利用全息干涉技术还可以无损检测材料的微小应变、内部缺陷等。

由于原子、分子的自发辐射具有随机性，一般来说，来自于不同光源或同一光源不同部分的两束光是不相干的，实验中通常采用分波阵面法（将同一束光的波阵面分割为两部分，如杨氏双缝干涉）或分振幅法（将同一束光的振幅分解为若干部分，如薄膜干涉）来获取相干光。本实验采用分振幅法来获取相干光——利用两光学玻璃表面围成的厚度不均的空气薄膜的上下表面对入射光的反射将同一束光分解成几部分、经过不同的路径后再叠加。由于相互叠加的反射子光束之间的光程差与反射处空气薄膜的厚度有关，干涉条纹的分布与空气薄膜厚度的分布相对应，故又把这一干涉称为等厚干涉。

本实验利用牛顿环、劈尖(选做)来研究光的等厚干涉现象及应用。

一、实验目的

1. 理解牛顿环干涉条纹的成因及特点；
2. 熟悉光路调整，用反射光观察等厚干涉现象；
3. 熟悉实验软件中的图像处理与数据分析，学习利用干涉现象测量透镜的曲率半径；
4. 学习用逐差法处理数据；
5. 学习利用干涉现象测量薄纸片的厚度。（选做）

二、实验原理

牛顿环和劈尖是典型的分振幅等厚干涉,其干涉条纹能反映数量级在入射光波长以下的微小长度变化。这种干涉在光学测量、光学加工方面有着广泛的应用,可用来检验精密机械零件或光学元件的表面质量、测量光波的波长及球面的曲率半径等。

牛顿环

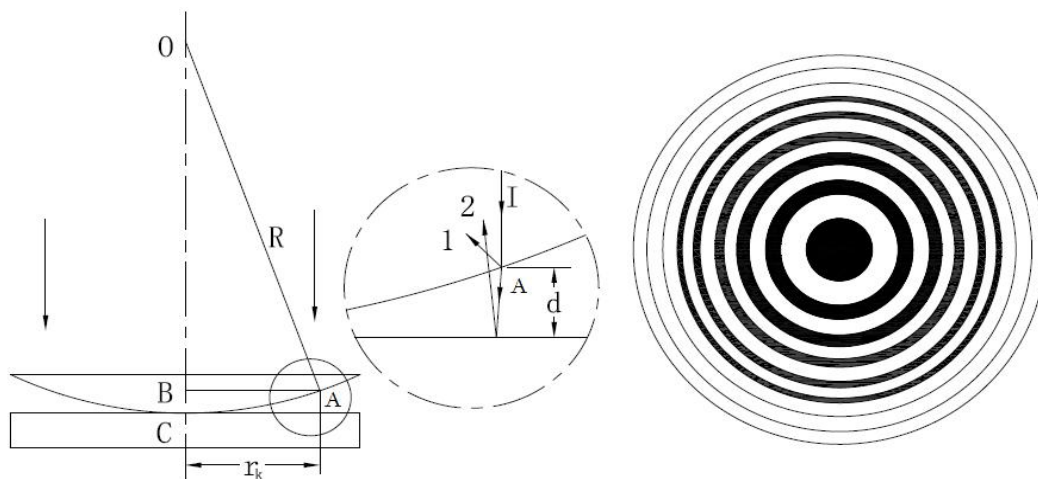


图 1 牛顿环及光路图

如图 1 所示,将一块曲率半径很大的平凸透镜放在一块平面玻璃上时,在透镜的凸面和平面玻璃之间将形成一个厚度自接触点向边缘逐渐增加的空气层(等厚线是一组以接触点为圆心的同心圆)。当一束单色光垂直照射时,由空气层上下两表面反射的光将发生干涉,其干涉条纹是一组定域在空气层上表面的以接触点为圆心的明暗相间的同心圆环;当入射光是复色光时,干涉条纹将是一组同心彩色圆环。若同级干涉,波长越短者,条纹越靠近中心。这一干涉现象最早是英国科学家牛顿于 1675 年在制作天文望远镜时偶然将望远镜的物镜放在平板玻璃上发现的,因而又称牛顿环。

由图 1 光路可知,图示位置的两相干光束之间的光程差为

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中, d 是与量玻璃之间的空气层厚度, λ 是入射光波长, $\lambda/2$ 是因入射光在从光疏媒质(空气)射向光密媒质(玻璃)的空气层下表面发生反射时存在相位 π 的突变而引入的附加光程差。

由光相干削弱的条件可知,形成第 k 级干涉暗条纹的条件是

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

设透镜的曲率半径为 R , 第 k 级牛顿环干涉暗条纹的半径为 r_k , 由图 1 中 $Rt\triangle OBA$ 有

$$R^2 = (R-d)^2 + r_k^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r_k^2$$

由于实际测量时透镜的曲率半径远大于空气层的厚度,即 $R \gg d$, 因而可略去式中的

$$\text{二级小量 } d^2, \text{ 于是有: } d = r_k^2 / 2R \quad (3)$$

联立 (1)、(2) 式和 (3) 式可求出第 k 级干涉暗条纹的半径为

$$r_k = \sqrt{kR\lambda} \quad (4)$$

(4) 式表明, 第 k 级干涉暗纹的半径 $r_k \propto \sqrt{k-1}$, 即越接近中心, 牛顿环的干涉级次越低, 相邻条纹之间的距离越宽。只要测出第 k 级干涉暗纹的半径 r_k , 即可根据已知入射光的波长 λ 计算待测透镜的曲率半径 R ; 反之, 也可以根据已知透镜的曲率半径 R 求入射光的波长 λ 。

实际测量时, 由于受接触形变或附着尘埃等因素的影响, 平凸透镜与平板玻璃之间并不是点接触而是面接触, 这使得实际观测到的牛顿环中心不再是理论上的暗点而是不规则的圆斑, 难以判断干涉条纹的准确级次 k 和精确测量条纹的半径 r_k 。为了克服这一不足, 实验中通过测量距中心较远又较清晰的某两级干涉暗条纹的直径 D_k 和 D_{k+m} 来计算 R , 即

$$R = \frac{D_{k+m}^2 - D_k^2}{4m\lambda} \quad (5)$$

(5) 式只与条纹的干涉级次差 m 有关, 而与干涉级次 k 自身的准确与否无关, 并且即使在测量中没有严格经过干涉条纹的圆心, 所测 D_k 和 D_{k+m} 不是直径而是某一割线上的两条弦, 也不会影响 R 的测量结果。可以很容易地证明, 同心圆环弦的平方差等于直径的平方差。

劈尖

如图 2 所示, 取两块光学平面玻璃, 使其一端接触 (形成交棱), 另一端夹一根细丝/薄纸片, 同样在两玻璃板之间就形成了一个空气劈尖 (等厚线是一组平行于交棱的直线)。当一束平行单色光垂直入射时, 由空气层上下表面反射的光将在空气层上表面处发生干涉, 形成一组平行于交棱的明暗相间、等间距的直条纹。

由图 2 所示的光路可知, 厚度为 e_k 的空气薄膜处两相干光束之间的光程差为

$$\Delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

式中, $\lambda/2$ 是由入射光在从光疏媒质 (空气) 射向光密媒质 (玻璃) 的空气层下表面发生反射时存在相位 π 的突变而引入的附加光程差。

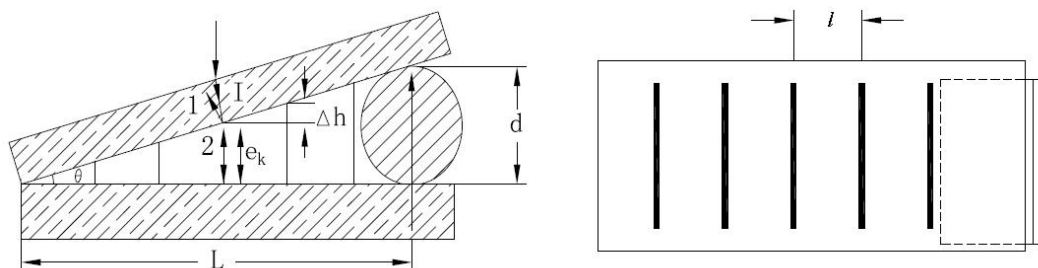


图 2 劈尖及其干涉条纹

由光相干削弱的条件可知, 厚度为 e_k 的空气薄膜处形成第 k 级干涉暗条纹的条件是

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

由 (6) 式和 (7) 式可得: $e_k = k\lambda/2$

相邻干涉暗条纹对应的空气薄膜厚度差为: $\Delta h = \lambda/2$ (8)

在图 2 中, 设相邻两干涉暗条纹之间的距离为 l , 金属细丝到劈尖交棱的距离为 L , 金

属细丝的直径 d ，由图 2 中的几何关系

$$\tan \theta = \frac{\Delta h}{l} = \frac{d}{L} \tag{9}$$

联立（8）式和（9）式，有： $d = L\lambda/2l$ （10）

实际测量时，由于相邻间距之间的距离很小，为了减小测量误差，通常测量 n 条干涉暗条纹之间的间距 l_n ，由（11）式来计算金属细丝的直径 d ，即

$$d = nL\lambda/2l_n \tag{11}$$

三、实验仪器

1. 牛顿环及劈尖干涉实验组成如图 3 及表 1 所示：

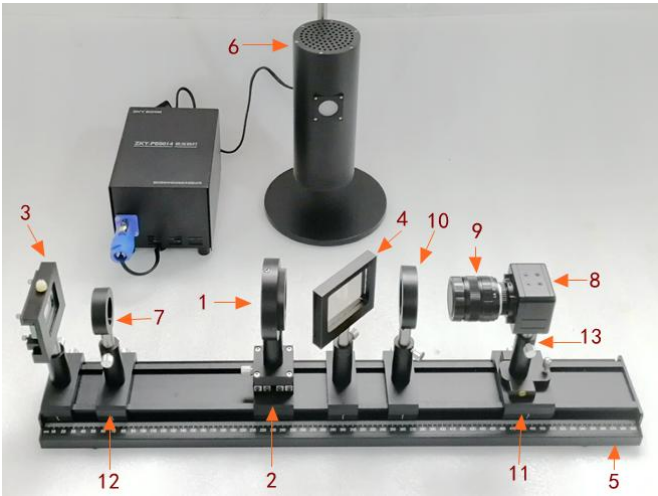


图 3 牛顿环及劈尖干涉实验

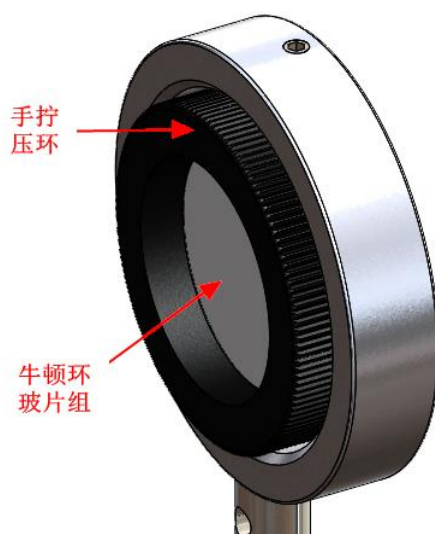
表 1 牛顿环及劈尖干涉实验

序号	名称	编码	数量	备注
1	牛顿环	ZKY-PE0011	1	曲率半径 $R_0=2000\text{mm}$
2	一维调节滑块		1	宽 40mm
3	劈尖	ZKY-PE0012	1	
4	半反半透镜	ZKY-PE0013	1	
5	导轨	ZKY-BB0011	1	600mm
6	低压钠灯	ZKY-PE0014	1	
7	标定分划板		1	
8	工业相机	ZKY-PE0009	1	含 USB 线，含 5mm 转接环
9	工业镜头		1	50mm/F1.4
10	双凸透镜	ZKY-PE0005	1	f120mm
11	滑块	ZKY-BB0007	1	宽 50mm，带俯仰调节
12	滑块	ZKY-BB0008	4	宽 30mm
13	高度定位环	ZKY-BB0013	5	$\Phi 12\text{mm}$
14	直尺		1	
15	计算机		1	自备

2.仪器介绍

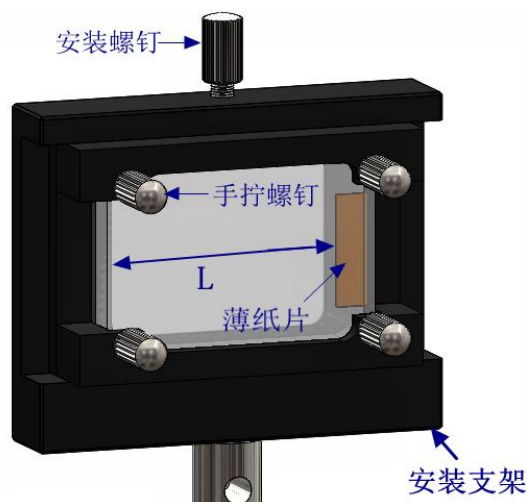
仪器主要是由导轨、低压钠灯、半反半透镜、牛顿环、LED 光源（标尺）、劈尖、工业镜头和工业相机等组成。如图 3 所示（图片仅供参考，以实物为准）。

牛顿环



图示牛顿环组件除去安装支架，主要包含两部分：牛顿环玻片组以及手拧压环。其中手拧压环的作用是压紧玻片组，且能够起到调节牛顿环位置的作用，**切忌将其拧得很紧，这可能会造成玻片变形（使测量得到的曲率偏大），甚至可能损坏牛顿环玻片（比如碎裂）。**

劈尖



图中 L 代表薄纸片朝内的边缘线到劈尖交棱的距离，实验中需要通过直尺来进行测量。实验中可以通过手拧螺钉来改变干涉条纹的方向，但**切忌将螺钉拧很紧，这可能会造成条纹变形，甚至损坏劈尖玻璃（比如碎裂）。**

低压钠灯

钠灯是光学实验室中常用的一种气体放电光源，其可见光谱主要是波长为 589.0nm 和 589.6nm 的两种黄谱线，实验中将它视作波长为 589.3nm 的单色光源。钠灯由金属电极和金属钠封闭在抽空后充有辅助气体（氩）的特种玻璃管内制成，它利用钠蒸气在强电场激发下发生弧光放电而发光。通电时，管内氩气首先被电离、放电，以后灯管温度逐渐升高，金属钠开始升华，升华后的钠蒸气在强电场的激发下发生弧光放电；随着金属钠不断升华，弧光放电不断加剧，发光强度逐渐增强；直到金属钠完全升华，发光强度达到最大。这一过程使得钠灯启动大约需要 $3\text{min}\sim 5\text{min}$ 才能正常发光。由于弧光放电具有负的伏安特性，使用钠

灯时必须接镇流器限流，否则不断增加的电流将烧坏灯管。另外实验用钠灯出光口为毛玻璃，起减光和匀光的作用，可以使钠黄光变成类平行光。

CMOS 工业相机及其镜头：

成像系统由镜头（50mmF1.4）→5mm 接环→相机组成。镜头为定焦镜头，靠近进光口为对焦环，向 $\rightarrow\infty$ 方向调节代表合焦距离增大；靠近相机端为光圈环，向 $\rightarrow 1.4$ 方向调节为增大光圈，通光口径增大。

值得说明的是该成像系统无法实现小于 $\sim 60\text{cm}$ 的近端合焦，实验中需要配合 $f120\text{mm}$ 焦距的双凸透镜来进行成像。

实验中建议使用最大光强 $F1.4$ 进行实验，大光圈下景深更浅，能够更好的保证标定分划板或牛顿环/劈尖处于相同位置，减小测量误差。



图 4 镜头结构示意图

其他器件

半反半透镜、导轨、标定分划板，计算机一台。

四、实验内容与步骤

1.实验光路

钠灯发出类平行光束照射在半反半透镜上，经反射后照射到牛顿环或劈尖上，其上形成干涉图纹；该图纹作为被成像物体，被成像在相机上。其间有一个双凸透镜，双凸透镜距离牛顿环或劈尖为一个焦距，透镜后为平行光束，因此相机与镜头组成的成像系统应调节为无穷远合焦状态。

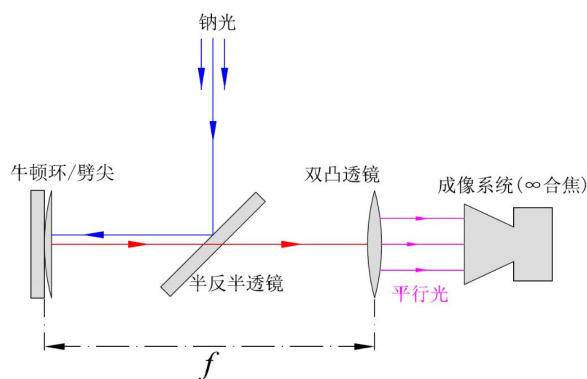
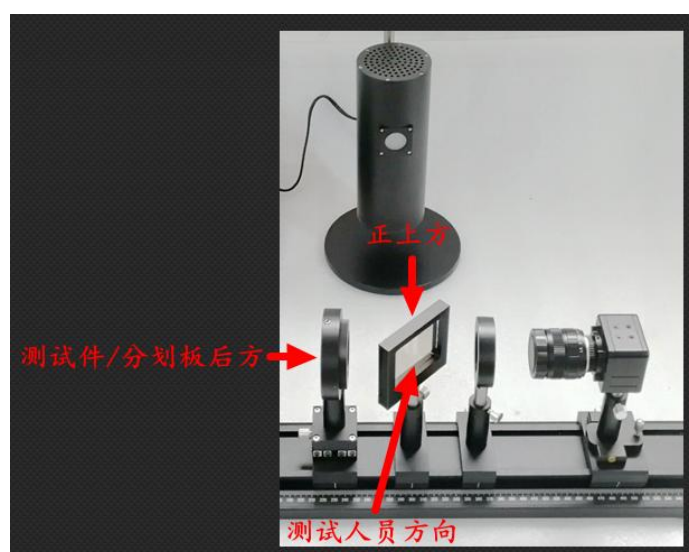


图 5 实验光路示意图

2.实验前说明

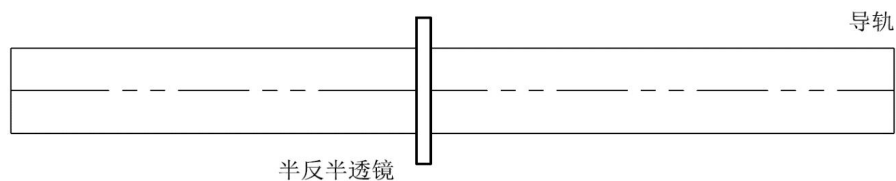
- 1) 等高共轴调节：该产品标配有“高度定位环”，调节中应先确定好元件高度，然后锁紧“高度定位环”锁紧螺钉；接着可独立旋转器件角度，确定共轴/角度后，再锁紧滑块上的锁紧螺钉。
- 2) 实验前请以牛顿环高度为标准，将各个器件大致调节为等高；除去半反半透镜和钠灯，其他光学元件光学面应调节为与导轨中线垂直。
- 3) 钠灯在导轨外使用为专用灯座；
牛顿环使用的是具有一维调节功能的 40mm 宽滑块；
相机使用的是具有俯仰调节功能的 50mm 宽滑块；
其他器件都适配的是 30mm 宽的普通滑块。
- 4) 导轨标尺应朝向实验者，滑块刻线应与导轨标尺处于同一方向。
- 5) 测试与器件调试中，建议在下图所示三个方向增加黑布进行挡光，可明显增加图像对比度。



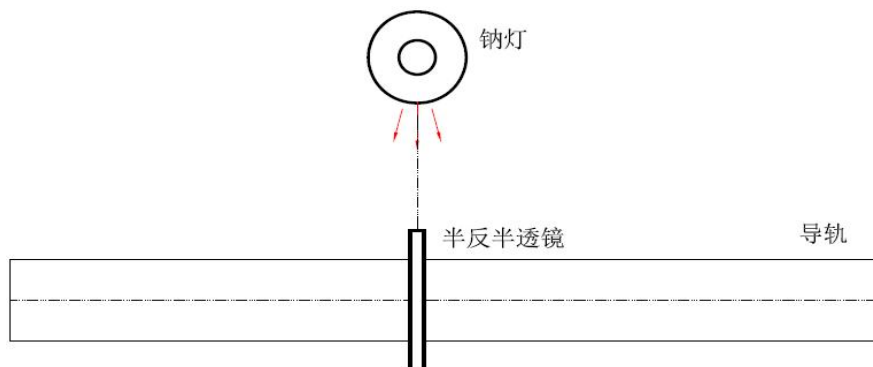
- 6) 相机无穷远合焦的调节
方法一：适当调节相机参数设置，保证计算机软件中画面亮度合适，以远于 20m 的距离物体为参考，调节相机对焦环，使物体合焦（@F1.4 最大光圈）。
方法二：在导轨左侧放上标定分划板，在其右侧距离其 120mm 远处放上 120mm 的双凸透镜，调节相机对焦环（可以适当调节相机参数设置，保证画面亮度合适），使分划板刻度清晰可见（@F1.4 最大光圈）。
注意：1) . 相机合焦调整好后，就不能再对相机对焦环进行操作；2) . 由于分划板与滑块刻线并不一定共面，所以方法二并不是严格的无穷远合焦，标定结果会发生变化，但不影响测试。

3.仪器的安装与调整

- 1) 由于半反半透镜的位置及调整的特殊性，该实验以半反半透镜为调整标准，首先将半反半透镜放置在导轨中央（30cm 位置），锁紧其滑块底座。然后通过俯视角度，将半反半透镜所在平面调整为垂直导轨。



- 2) 钠灯提前预热 10min ，然后放置在导轨中垂线 $\sim 40\text{cm}$ 远处，处于半反半透镜的延长线上。



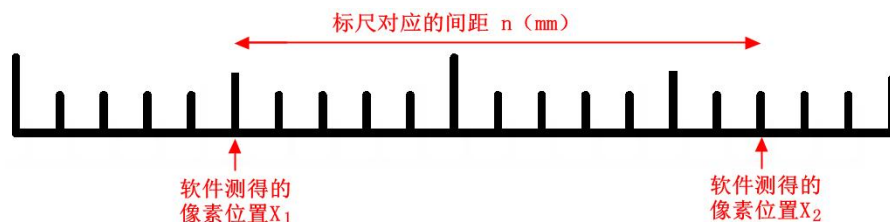
- 3) 在 360mm 位置放置双凸透镜，在双凸透镜后侧 470mm 位置放置相机成像系统。
- 4) 在半反半透镜另一侧约 240mm 位置放置标定分划板，通过软件观察相机图像（需要适当调节曝光参数，建议用黑布进行一定的挡光），转动半反半透镜使钠灯光照亮标定分划板，且左右对称（上下不对称可适当调节钠灯高度），微调分划板滑块位置，大致合焦。
- 5) 微调相机指向/俯仰，使分划板图像居中。
- 6) 放大图像，微调标定分划板滑块位置、微微旋转其角度，使**整个画面**合焦达到最好（微微旋转分划板后，画面亮度可能不再对称，此时可以微调钠灯指向和左右位置）。
- 7) 拍照，采集分划板图像用于标定。

注意：由于分划板刻线只存在于玻璃的某一面，因此应该对分划板两面都进行上述步骤中合焦成像操作（二者合焦时滑块位置不同，这是因为分划板与滑块中心刻线并不共面），且选择刻度清晰的一面作为标定面。

定标

将得到的定标原始图样，使用配套软件得到标尺 1mm 间隔对应的像素间距。具体测试

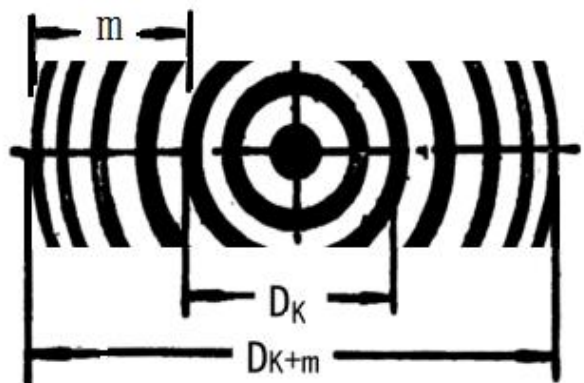
方法参见下图，最终定标结果为：
$$x = \frac{X_1 - X_2}{n}$$



注意：标定数据确定后，在完成牛顿环和劈尖测试前，就不能再移动或改变相机、双凸透镜、半反半透镜的位置，否则标定结果将失效，需重新标定后方可进行实验。

4. 牛顿环的测量

- 1) 取下分划标定板，换用牛顿环，手拧环指向半反半透镜（先预先将牛顿环大致调节到中央，请避免环压紧→建议操作方式为：缓慢拧紧压环，出现阻涩时，再反方向松开一些手拧环，以该位置及更松位置进行测试）。
- 2) 微调牛顿环组件滑块位置、高度及其滑块一维移动、使圆环中心大致居中且合焦准确；
- 3) 继续微调牛顿环旋转方向、滑块位置，使**整个画面**都全部清晰（微微旋转后，画面亮度可能不再对称，此时可以微调钠灯指向和左右位置，该调节不影响标定；但不要调节半反半透镜、相机等器件，否则会引起前文标定结果失效）。
- 4) 拍照，得到牛顿环图像。
- 5) 通过软件按下图测量不同级次暗纹的实际直径 D_k （配套的软件是先测得暗纹的像素直径 d_k ，再根据定标结果得到的实际直径 $D_k = d_k / x_0$ ）。最后根据式（5）即可得到平凸透镜的曲率半径 R （具体的数据处理可按照配套软件上的逐差法进行，或者制表作图进行），并与标称值 R_0 比较计算相对误差。



注意：为避免平凸透镜中央受力变形引起的误差，建议从中心起，至少第3个环开始进行测量。

具体实验过程详见附件。

【思考题】

1. 牛顿环干涉条纹形产生的条件是什么？
2. 为什么牛顿环干涉条纹的中心有时会是亮纹？
3. 说明不同级牛顿环相邻暗（或亮）环之间的距离变化原因
4. 如何用等厚干涉原理检验光学平面的表面质量？

附件：

牛顿环及劈尖干涉实验教学及数据处理软件

1 引言

该手册是为了方便用户了解和使用“牛顿环及劈尖干涉实验的设计教学及数据处理软件”，向用户解释该软件的作用。在必要时可作为参考。

该手册讲述怎样安装、配置和使用该软件，以及该软件使用过程中应注意的一些问题。

2 用途

该软件采集用于“牛顿环及劈尖干涉实验”的实验图像，并对图像进行测量，根据软件计算功能，获得实验结果，并可生成实验报告。

3 运行环境

硬件环境：CPU： P4 双核或以上档次

内存：4GB 或以上

显卡：具有 256MB VRAM 以上的图形显卡

通信口：USB2.0 High、USB3.0 接口

软件环境：Microsoft Visual C++ 2008 Redistributable-x86 9.0；Microsoft Excel 2010 或以上版本

显示分辨率 1000×1050 及以上

操作系统：Windows 10 操作系统

4 使用过程

4.1 安装与初始化

打开光盘上的软件安装文件夹，双击 **Setup.exe** 文件进入安装向导，然后根据安装向导的提示完成本软件的安装。

●实验软件安装后，建议重启后再开始使用，建议在 Win7 及以上版本中以管理员身份运行。

4.2 输入

将摄像头的 USB 通信口连接至电脑。

4.3 输出

最终软件可以生成实验报告文件，实验报告中含有实验者信息及实验数据，实验报告文件名可进行重命名等操作，方便统一管理。

4.4 杀毒软件

部分杀毒软件会对该软件报毒提醒，或者直接删除软件文件导致软件不可用，因此建议在杀毒软件出现杀毒提醒时，选择信任该软件，或者直接关闭杀毒软件进行操作。

4.5 出错处理和恢复

软件在输出实验报告时会将学生信息作为默认文件名输出，若学生信息中含有无效字符（如\, /, :, *, ? , ", <, >, |等），输出实验报告时会失败，请检查并重新填写学生信息。

5 运行说明



鼠标左键双击程序图标 ZKY_PPD0100 或应用程序 ZKY_PPD0100.exe 后，本处理软件开始启动运行，并进入处理软件主界面，如图 6 所示。



图 6 软件主窗口

主界面从上往下主要包括：菜单栏、学生信息栏、【生成实验报告】按钮，以及“实验内容”和状态栏。

5.1 菜单栏

菜单栏：包括“设备选择(D)”、“设备操作(O)”、“关于(A)”、“退出(X)”。

- 1) 【设备选择(D)】 - 【设备选择】
- 2) 【设备操作(O)】 - 【摄像头参数设置】
- 3) 【关于(A)】 - 【版本信息】
- 4) 【退出(X)】 - 【退出】

5.2 设备选择 (D)

点击菜单栏“设备选择(D)”，进入图 2 所示“设备选择”窗口，选择对应的摄像头(包括 USB 摄像头)用于拍摄实验所需图像。处理软件未查询到可用摄像头时，显示无可用摄像头，如图 7 所示。

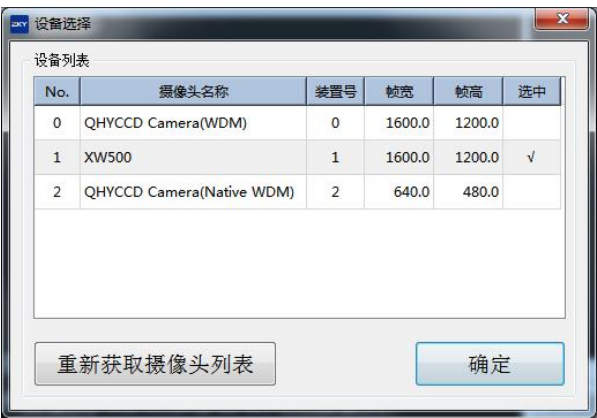


图 7 “设备选择”窗口

在实验电脑上连接新的摄像头后，可以按【重新获取摄像头列表】按钮，更新可用摄像头列表信息。

5.3 设备操作(O)

选择摄像头后，可在菜单“设备操作(O)”里点击“摄像头参数设置”子菜单，显示“摄像头属性”窗口，如图 4 和图 5 所示，并进行摄像头的属性设置（主要根据采集图片亮度调节曝光）。

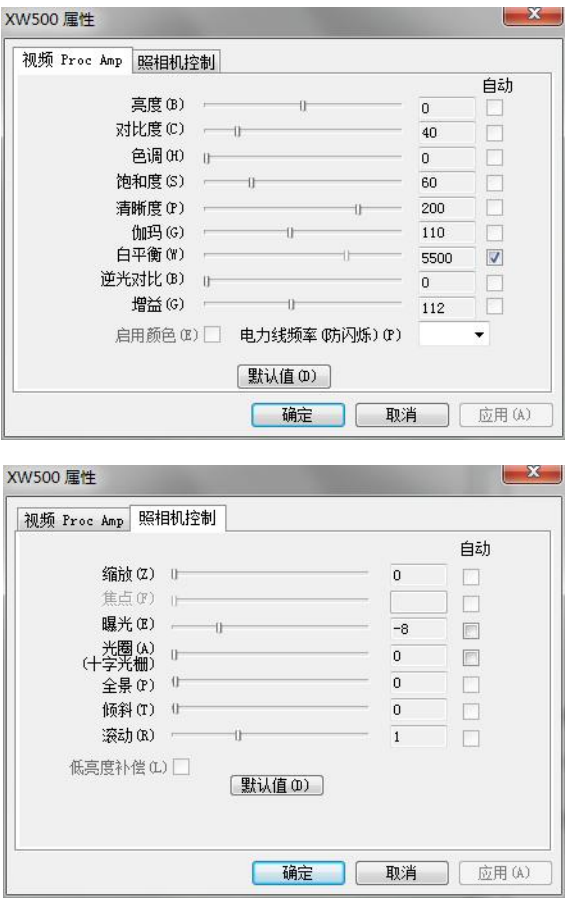


图 8 相机设置界面

5.4 关于 (A)

可以在菜单“关于(A)”里点击“版本信息”子菜单，显示“版本信息”窗口。“版本信息”窗口介绍了本软件的相关信息。

5.5 退出 (X)

可以在菜单“退出(X)”里选择“退出”子菜单，可选择是否退出软件，通常发生在实验完成后。

5.6 学生信息

学生信息栏：包括“学生姓名”、“院系”和“学号”。需手动输入这些信息。

注：学生信息栏中的所有信息会直接输出到实验报告中显示。若未填写学生姓名、院系、学号或填写了无效字符（如\, /, :, *, ?, ", <, >, |等），在点击“生成实验报告”按钮时会弹出如下错误信息提示框，点击确认后补充更正相关学生信息即可。

5.7 “实验内容”

“实验内容”选项卡上面有三个选项：**【0.实验准备：定标测量】**、**【1.牛顿环实验】**和**【2.劈尖干涉实验】**。每个选项卡对应一个实验(包括实验准备)，每个实验有两个步骤，即步骤 1 图像采集和步骤 2 数据测量。

步骤 1 可以分别通过摄像头采集或导入图像两种方法（导入图片名须为字母或竖直），为步骤 2 的数据测量提供实验图像。

6 实施实验

6.1 定标测量

在做“牛顿环实验”和“劈尖干涉实验”前，先要做定标测量，测量出图像像元的尺寸，即 1mm 里的像元数（显示到小数后 2 位）。“牛顿环实验”和“劈尖干涉实验”计算结果时都须用到这个定标值。

6.1.1 图像采集

采集用于定标测量的图像，可以通过①摄像头拍照或②导入图像这两种方法获取。

① 通过摄像头拍照进行图像采集

点击软件界面的**【开启摄像头】**按钮，开启摄像头。然后点击**【拍照】**按钮，获取图像。



图 9 步骤 1/2: 定标图像采集

拍照获取的图像，可以放大确认，确认图像符合要求后，点击【下一步骤：定标数据测量】按钮，进入到【步骤 2/2：定标数据测量】，具体参见图 9。

补注：1）. 拍照图片存放于软件所在文件夹下的“work”文件夹中；2）. 拍照前预览图像可通过鼠标进行缩放/移动操作（将鼠标移动到该预览区域即会显示操作方法）；3）. 上述两点也适用于“牛顿环”、“劈尖”测试界面，后续不在赘述。

② 通过导入图像进行图像采集

实验图像也可以通过导入图像获取。参见图 9 点击【导入图像...】按钮后，将出现【导入图像文件】对话框（导入图像文件名和路径须仅包含字母和数字）。

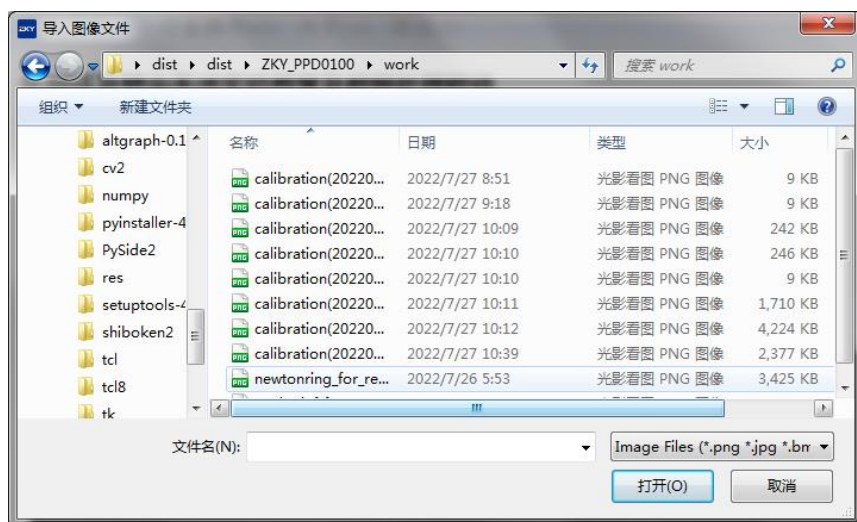


图 10 导入图像对话框

根据已经准备的图片的路径，选择用于定标测量的外部图像，点击【打开(O)】按钮后，点击【下一步骤：定标数据测量】按钮，进入到【步骤 2/2：定标数据测量】，见图 11。



图 11 “步骤 2/2: 定标数据测量”窗口

6.1.2 定标数据测量

定标数据测量主界面如图 12 所示。正确输入 X_1 、 X_2 和 n 后，就可以点击【计算结果】按钮，计算出定标值。 X_1 和 X_2 是图像的两个 x 轴坐标(像元坐标，图像由 $x \times y$ 个像元构成)， n 是这两个坐标之间的刻度的格数。

6.1.3 测量工具的使用

用户可以利用处理软件提供的【测量工具】方便、精确地输入 X_1 和 X_2 的值。点击【开始测量】按钮，软件将显示一个【测量工具】窗。【测量工具】的使用方法如下。

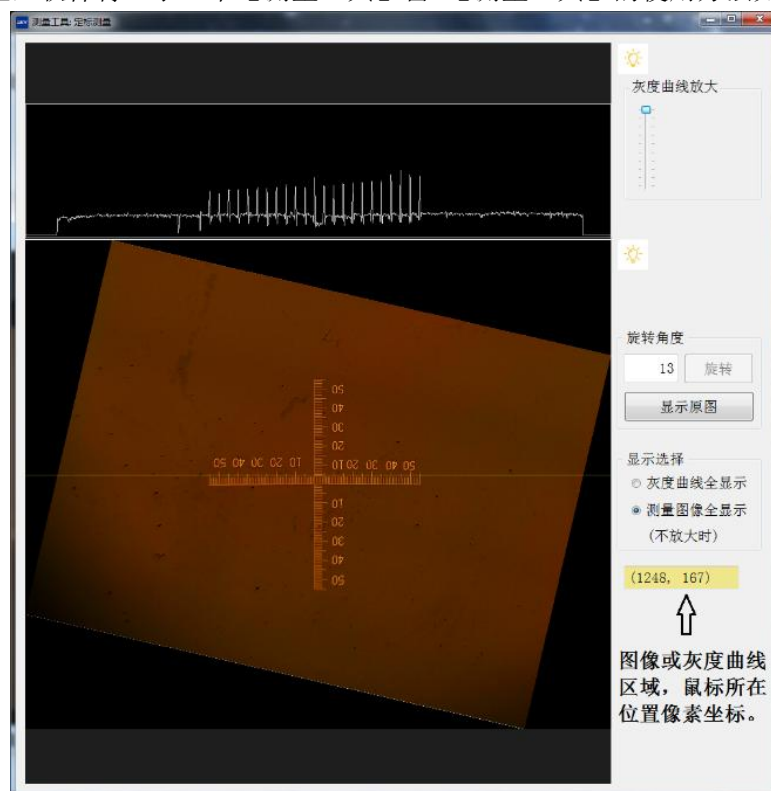


图 12 “测量工具: 定标测量”对话框

【测量工具】有上下两个框，下面一个框显示实验图像，并有一条选行线。上面的框显示与选行线对应的图像行的灰度曲线。该部分功能按下面几个方面介绍：

利用【测量工具】时的定标测量步骤：

- 在图像上选择合适的测量行，此时在上方的灰度曲线框内将出现该图像行的灰度曲线。
- 在灰度曲线框内通过双击鼠标的左键，选择 X_1 和 X_2 。
- 数出 X_1 和 X_2 之间的刻度的格数。
- 计算出定标值。

x 坐标的采集。这是【测量工具】提供的主要功能。

- 在上面的灰度曲线框内，双击鼠标的左键，就能获得双击位置对应于选行线上的像元的 x 坐标，并显示一条数据线。数据线从选行线上的 x 坐标处的像元点延伸到灰度曲线上的对应点。
- x 坐标值将被自动输入到主页面上选中的表单元里。
- 数据线可左右拖动，以调整 x 坐标值，这个值也将自动反应到主页面选中的表单元里。
- 若对表格中数据不满意，可在对应表格中手动输入数字“0”，取消该数据。

选行线的变更。用户可以将选行线变更到最佳测量位置。

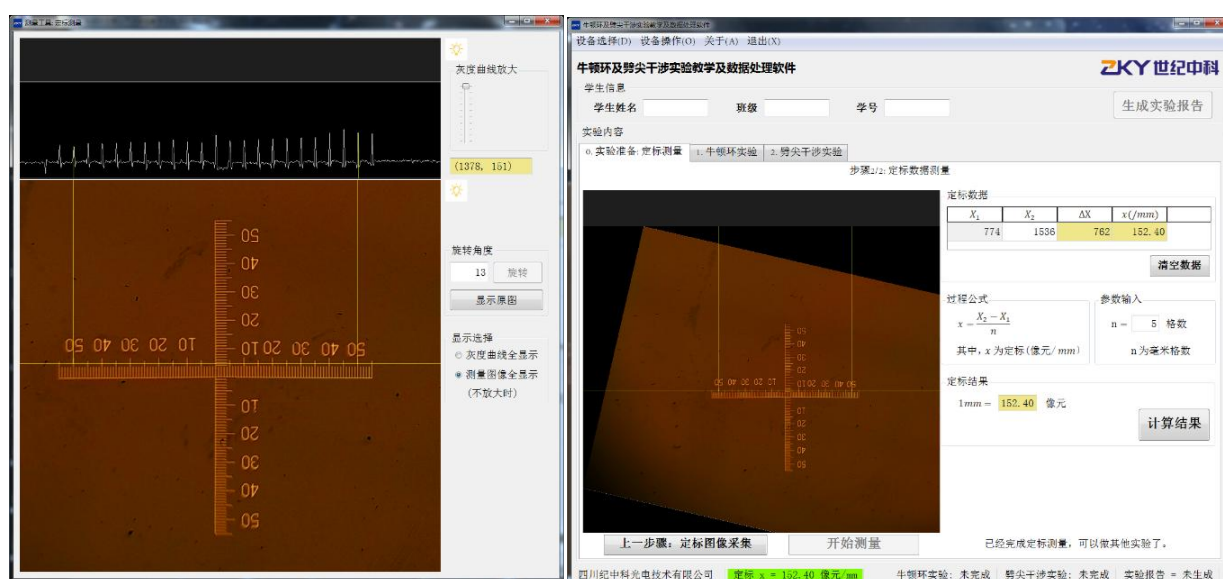


图 13 左：“测量工具”选 X_1 和 X_2 ；右：“主窗口”自动输入 X_1 和 X_2

- 选行线的默认位置处于图像的垂直中央，可以上下拖动改变其位置，或在图像上选择最佳位置，双击鼠标左键改变其位置。
- 选行线的位置变动后，灰度曲线会变化，测试数据会被清空。

图像的放大。

- 将鼠标移动到图像上，并滚动鼠标滑轮，就可以放大或缩小图像。图像放大后可以按住鼠标的左键进行拖动。
- 灰度曲线与实验图像的 x 轴是一致的，图像放大、缩小时，灰度曲线的横向会同步放大、缩小。灰度曲线横向放大、缩小时，图像也会同步放大、缩小。

灰度曲线的纵向放大。

- 灰度曲线可以单独纵向放大、缩小。可以调节灰度曲线纵向放大滑块，对灰度曲线进行纵向的放大或缩小。
- 可以利用键盘的【←】和【→】，或【↓】和【↑】，来操作滑块。

- c. 按键盘的【Home】键，滑块将变为最大值，按键盘的【End】键，滑块将变为最小值。

图像的旋转。

可以进行旋转。输入旋转角度后，点击【旋转】按钮，图像就会按输入角度进行旋转。旋转后可以点击【显示原图】恢复到原图像。注意，图像旋转或显示原图后，灰度曲线会变化，测试数据会被清空。

注：该软件仅能够针对图像水平方向进行定标，但图像标尺倾斜时，需要先通过旋转是标尺水平后再进行定标。



提示图标。

将鼠标移动到两个提示图标上，将会看到使用提示。

补注：由于测量工具界面会实时显示图像或灰度曲线鼠标所在位置像素坐标图 12，因此也可由此读出图像坐标后，手动填入计算表格。

6.1.4 定标计算结果

在正确输入 x_1 和 x_2 和 n 后，就可以点击【计算结果】按钮，计算定标值。 n 是 x_1 和 x_2 之间刻度的格数。计算结果，即定标值，将显示在下方的状态栏上。

测量出定标值后，方可进入“牛顿环实验”或“劈尖干涉实验”。

6.1.5 上一步骤：定标图像采集

若对目前图像/结果不满意，可以点击【上一步骤：定标图像采集】按钮，回到【步骤 1/2：定标图像采集】重新采集图像。

6.2 牛顿环实验

6.2.1 图像采集

采集用于牛顿环实验的图像，基本操作和定标测量的图像采集(6.1.1 图像采集)相同。可以通过①摄像头拍照或②导入图像这两种方法获取。



图 14 “步骤 1/2 牛顿环图像采集”主窗口

确认图像采集正确后，点击【下一步骤：牛顿环数据测量】按钮，进入【步骤 2/2：牛

顿环数据测量】主窗口。

6.2.2 牛顿环数据测量

牛顿环数据测量主窗口如图 15 所示。正确输入复数组 x_1 和 x_2 (最大 40 组)和参数后，就可以点击【计算结果】按钮，计算相关结果。



图 15 “步骤 2/2: 牛顿环数据测量”主窗口

牛顿环实验的数据测量，利用测量工具最方便、准确。点击【开始测量】按钮，软件将显示一个【测量工具】窗，如图 16 所示。

6.2.3 测量工具的使用

测量工具的基本操作方法与定标测量(6.1.3 测量工具的使用)时基本一致，不再赘述，只是需要更多组 x_1 和 x_2 的测量数据。为方便操作，建议先将干涉环左侧的暗纹采集完毕（对应主界面 x_1 数据），然后再采集右侧数据（对应主界面 x_2 数据）。测试工具在采集完一个数据后，表单元会自动移动到该列下一行的表单元，方便用户采集数据；若第一列（ X_1 ）采集完后，需要在主界面手动选择第二列（ X_2 ）第一个表单元，方可在该列快速采集，如图 16。

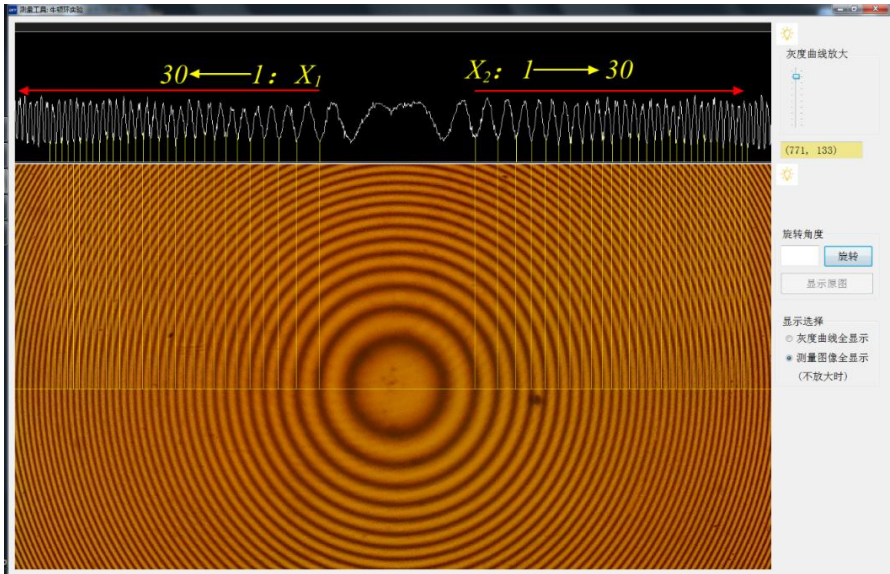


图 16 “测量工具：牛顿环实验”窗口

6.2.4 测量结果

本软件将根据测量的 x_1 和 x_2 的值，“参数输入”请根据实际情况录入即可，点击【测量完毕】按钮，此时已完成牛顿环实验，点击【生成实验报告】按钮即可得到实验数据文件，请按照如图 17 所示操作即可。



[illegible]

图 17 “牛顿环实验”测量

6.2.5 上一步骤：定标图像采集

对图像或结果不满意，可以点击【上一步骤：牛顿环图像采集】按钮，回到【步骤 1/2：牛顿环图像采集】重新采集图像。若选择重新做图像采集，所有测试结果将清空。

劈尖干涉的测量（选做）

- 1) 取下牛顿环组件，将劈尖安装在相同位置，可略微调节其位置使显示屏上呈现清晰的条纹（这里需要调节手拧螺钉，使条纹呈竖直方向，同时切忌拧得太紧）。拍照，得到劈尖干涉的图像。
- 2) 通过软件测量 n 个暗条纹之间的像素间距 d_n ，然后根据定标结果得到实际间距

$l_n = d_n / X_0$, 最后根据式 (11) 得到劈尖薄纸片的厚度 d 。

其中L代表薄纸片朝内的边缘线到劈尖交棱的距离，实验中需要通过直尺来进行测量，测量时请小心操作，避免刮擦光学器件表面。

劈尖干涉其他夹持物尺度的测试（选做）

比如：金属细丝直径测量、头发丝直径测量、单张/多张薄片的厚度测量等。请自行设计并准备工具和夹持物，夹持中应使研究对象的长边平行于劈尖的短边。请小心操作，避免刮擦光学表面。

具体安装需要将劈尖从安装支架（槽）中取出（松开上端安装螺钉），然后将手拧螺钉旋松，使用镊子/气吹等器件将内部已有的夹持物取出，再放入新的夹持物。

注意：背后的4个十字螺钉建议不要完全拆开，避免劈尖玻璃完全处于无约束状态。