

《空气动力学实验》实验 A3

热线风速仪标定

班 级 _____

姓 名 _____

实验日期 _____

指导教师 _____

年 月

目录

1 目的	1
2 原理	1
3 实验前准备	3
4 实验过程	4
5 实验数据	5
附录A 安装FDTI驱动软件	7
附录B 安装串口调试助手	10
附录C 使用串口调试程序设定热线风速仪参数	11
附录D 热线风速仪连线	15
附录E 调节系统平衡方法	16
附录F 系统频响（特征时间）确定	17
附录G 热线标定	18
附录 H 数据表格	19

1 目的

学习使用热线风速仪原理、设定方法及标定方法

2 原理

热线风速仪在流体力学研究中被广泛使用的科学仪器。其测量原理是一个小型电加热元件置于暴露于流体介质中，仪器通过记录流经加热元件的电流来获得流速变化。根据电路设计思路不同，热线风速仪分为恒流式和恒温式两种。此次实验使用的热线风速仪为恒温式风速仪。实验使用的热线探头是一段直径为5微米的微小钨丝，长约1mm。探头被置于一个惠斯通电桥内，当风速变化引起的探头电阻出现微小变化后，电桥输出值的变化被放大并改变了流经探头的电流，进而抑制探头电阻变化。本项目采用的核心结构见下图所示。为了使电桥在高性能状态下稳定工作，整体电路将被分为核心模块（惠斯通电桥）、滤波模块、信后调制模块、方波测试模块等。几个模块与核心协同工作，保证热线在高频响状态下实现测量。

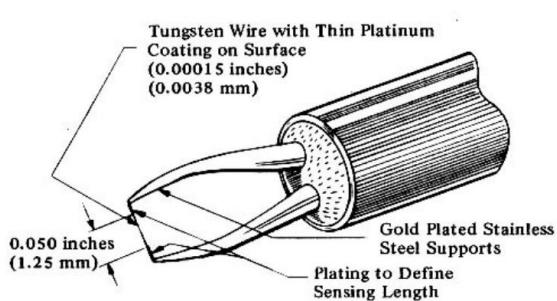


Figure 1: Tungsten Hot Wire Sensor and Support Needles-
0.00015" Dia. (0.0038 mm)

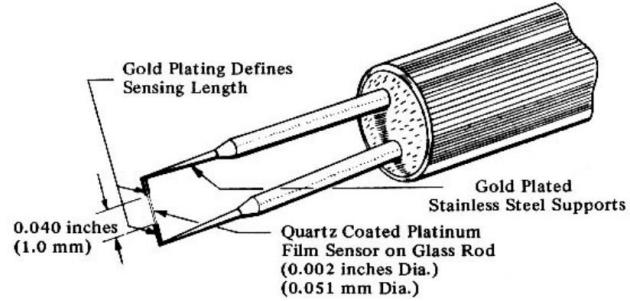


Figure 2: Cylindrical Hot Film Sensor and Support Needles-
0.002" Dia. (0.051 mm)

图 1 热线及热膜探头示意图

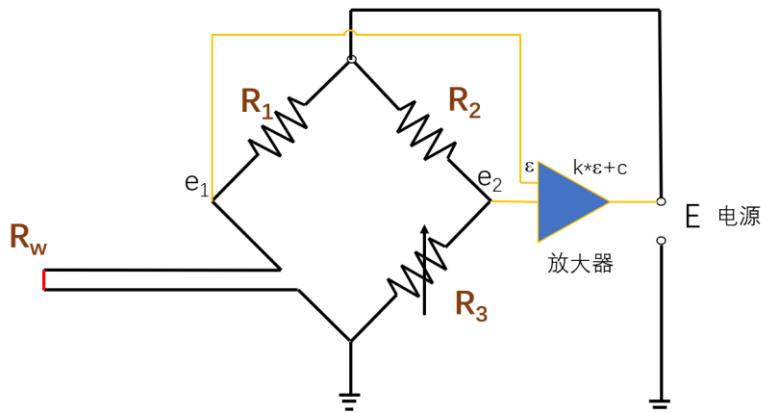


图 2 恒温热线风速仪原理图，图中 R_w 为探头

热线风速仪涉及的几个重要概念：

1. 冷态电阻 R_{w0}

冷态电阻指的是探头在室温下使用万用表测量的电阻值，单位欧姆。

2. 过热比 OR

过热比指的是探头的工作电阻与冷态电阻之比 $OR=R_w/R_{w0}$ ，通常在 1.5 到 1.8 之间。根据钨的温度电阻特性，探头的工作温度比室温高约 110-180 摄氏度。本次实验中，我们通过设定桥路中变阻器 R_3 的值来设定探头的工作电阻，进而设定过热比：在桥路平衡的状态下，电桥内电阻应满足 $R_2/R_1=R_3/R_w$ ，所以

$$R_w = (R_1/R_2) R_3.$$

因为航华 CTA04 风速仪的 $R_2/R_1=10$ （该比例被称为电桥比），所以

$$R_w = R_3/10.$$

因为 $R_w = OR * R_{w0}$ ，所以 $R_3 = (OR * R_{w0}) * 10$.

本次实验中，我们将直接命令热线风速仪改变 overheat 参数的值，该值即为 R_3 的电阻值。

3. 平衡参数是电路中反馈平衡放大器的重要参数。它决定了反馈系统是否能在合理的状态下运行。

在本次实验中，平衡参数 balance 是一个值为 0 到 65536 的没有单位的量。其值越大，反馈系统里面的阻尼越大。缺省值为 37500。本次实验，我们将直接发送数值给 balance 参数。

4. 方波测试

方波测试是通过在电桥内施加小扰动，来观察系统响应情况，进而判断平衡参数是否合理的工具。

本次实验中，我们可分别使用 square_wave_on 和 square_wave_off 来打开和关闭方波

5. 桥顶电压

桥顶（TOB）电压是电源加载在电桥上的电压。该电压与风速大小一一对应。如果桥顶电压低于 0.4V（TOB Low），代表探头可能已经损坏。如果桥顶电压超过 9V，代表系统已经溢出。

6. 信号后处理

某些情况下，桥顶电压输出可能会给采集带来挑战。我们可以考虑对桥顶电压进行调制。调制内容包括放大（gain）、偏置（offset）与低通滤波（filter）。当电桥输出信号微弱时，用户可将 gain 设为 2-16；当桥顶电压超过 5V 时，一些数据采集设备不能正常采集。用户可以考虑设置正的 offset 值，范围为 0-5，单位为 V；另外，用户可以设置截止频率为 1Hz-10kHz 的低通滤波

3 实验前准备

1. 阅读恒温式热线风速仪原理

2. 电脑安装设备驱动程序（USB-串口转换驱动，也称 FDTI 芯片驱动），过程见附录 A

3. 电脑安装设备调试助手，安装过程见附录 B，如何使用见附录 C

（以上两个软件均可从这个网站下载 <http://www.hanghualab.com/nd.jsp?id=95&fromMid=468>
在该页最下方。）

4. 按照说明书要求连接导线，连线方法见附录 D，主要包括：

a. 电源线

b. USB-串口线，一端 USB 接电脑，另一端串口接风速仪后面板 Port1

c. 探头线接 Hotwire probe (CB02A，一段为 2 芯雷莫连接器，或称航空插头，另一端为 2 个迷你香蕉头)

d. BNC 数据线 (CB01，两端均为 BNC 接头，一端接 Output，另一端接数据采集设备，可为数据采集卡，或示波器，或万用表)

4 实验过程

1. 使用万用表测量探头冷态电阻 R_{w0} (**一定要注意**，通过探头尾部迷你香蕉头测量电阻，切勿直接碰头部），下面我们以 $R_{w0}=6$ 欧姆为例
2. 在实验装置上（风洞等）安装热线探头，并连接导线到 A 通道（具体操作见附录 D）；
3. 打开风速仪电源
4. 运行串口调试程序
5. 设定过热比
 - 以过热比为 1.5 为例， $R_3=(OR * R_{w0}) * 10 = (1.5 * 6.0) * 10 = 90$ 欧姆
 - 通过串口调试程序写入 cta 1 overheat 90
 - 具体操作见附录 C
6. 打开电桥
 - 通过串口调试程序写入 cta 1 bridge_on
 - 观察通道 A 指示灯是否正确：如果上面两个亮，正确；第三个亮，错误，探头可能损坏
 - 具体操作见附录 C
7. 调节风洞流速至实验可能用到的最大流速；
8. 做方波测试，观察方波测试结果分析系统频响：
 - 串口调试程序写入 cta 1 square_wave_on，具体方法见附录 C
 - 使用示波器或数据采集卡观察输出信号，具体方法见附录 E
 - 使用示波器采集信号，并估算系统频响，具体方法见附录 F
 - 关闭方波，串口调试程序写入 cta 1 square_wave_off
9. 将热线探头置于可改变风洞的实验台内（如图 3 所示），准备好毕托管等其他可以读取来流速度的仪器
10. 从低到高分十次提高风速，在每个风速条件下记录风洞实验段流速以及热线风速仪输出电压；
11. 利用四次曲线拟合风速和电压数据，形成标定曲线。, 具体方法见附录 G
12. 关闭电桥
 - 通过串口调试程序写入： cta 1 bridge_off

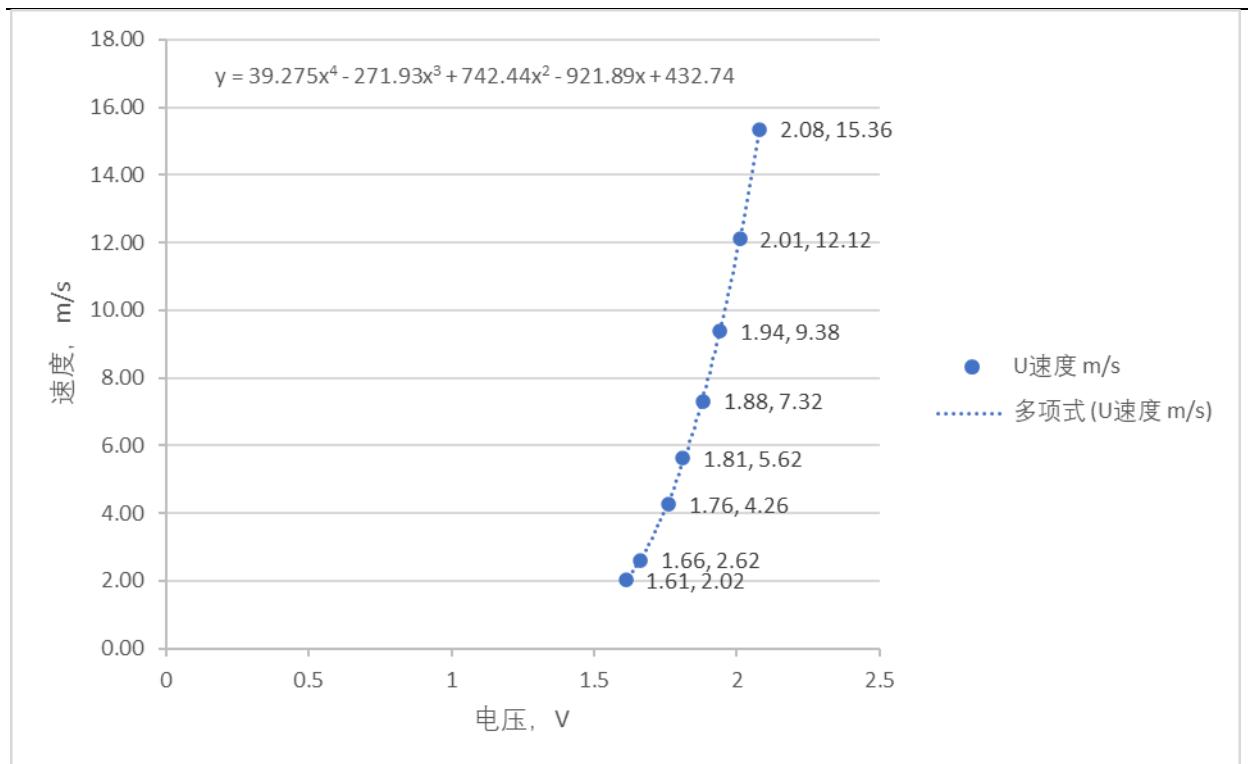


图 3 一个安放在航华 CR04 标定器上的 HW1A 热线探头

5 实验数据

环境温度 20 摄氏度，探头电阻：4.7 欧姆，过热比：1.5

数据点	E 输出 Volts	ΔP 压差, Pa	U 速度 m/s
1	1.61	2.3	2.02
2	1.66	3.86	2.62
3	1.76	10.21	4.26
4	1.81	17.77	5.62
5	1.88	30.14	7.32
6	1.94	49.49	9.38
7	2.01	82.63	12.12
8	2.08	132.71	15.36

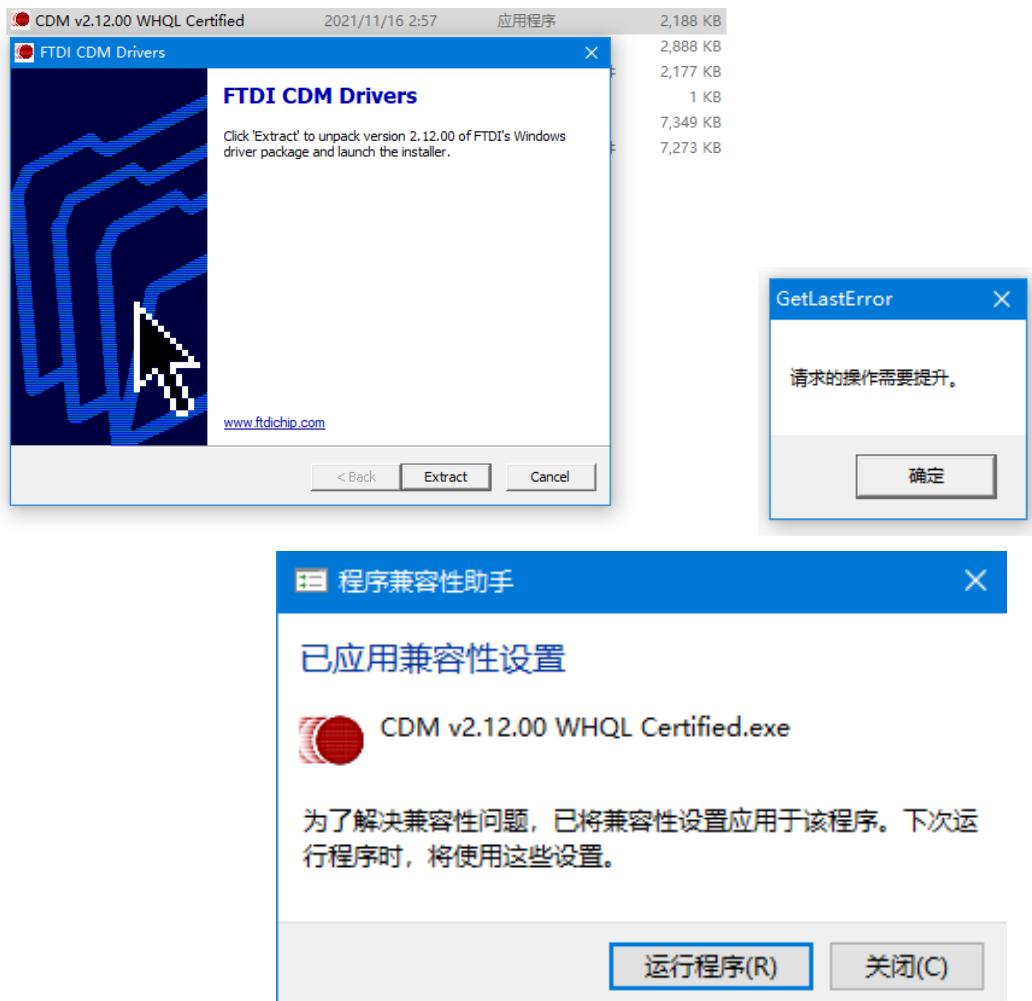


具体数据及计算方法见所附 excel 文件

附录 A 安装 FTDI 驱动软件

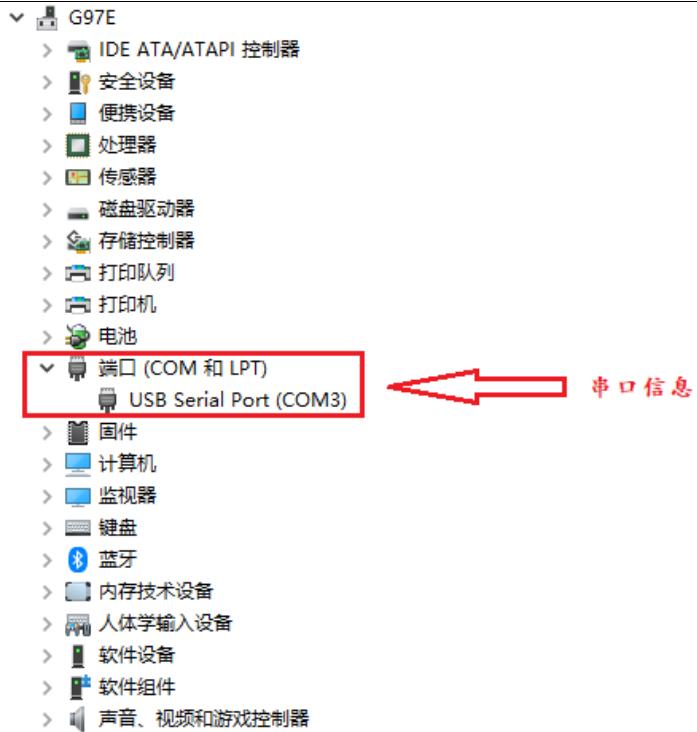
<http://www.hanghualab.com/nd.jsp?id=95&fromMid=468>

下载后解压，并运行 CDM v2.23.00 WHQL Certified.ext 文件，您将依次看到如下提示，选择 Extract，确定，运行程序，Extract，下一页，我接受，下一页，完成



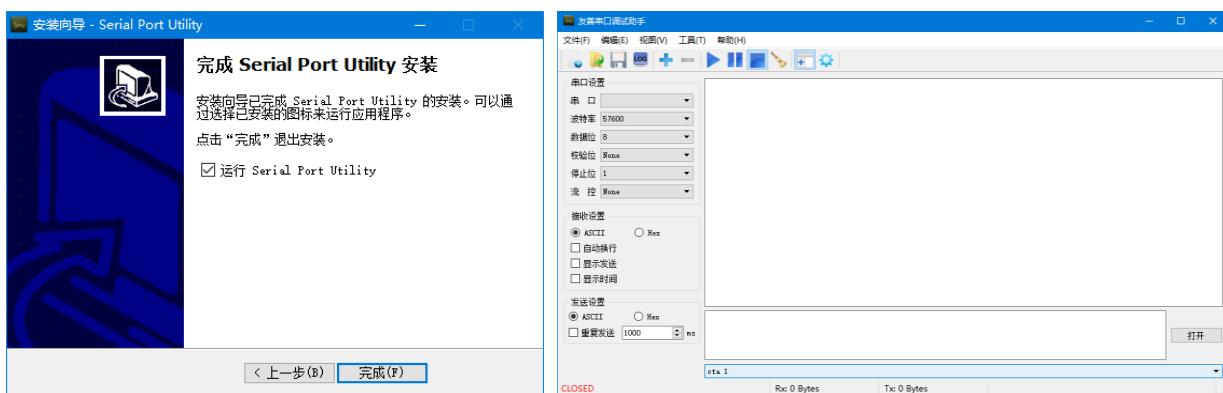
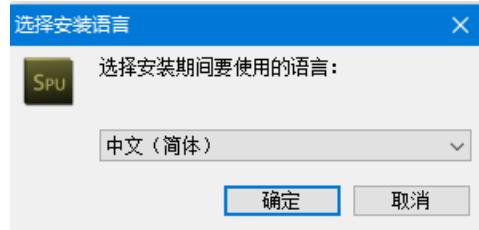


FTDI 驱动程序安装好之后, 接好 USB-串口线, 打开电脑的设备管理器可以看到热线风速仪主机对应的设备号 COM3 (该编号第一次设定后, 不会再变)



附录 B 安装串口调试助手

串口调试助手是我们发送命令给热线风速仪的工具。<http://www.hanghualab.com/nd.jsp?id=95&fromMid=468>
下载后解压，并运行 serial_port_utility_latest.exe

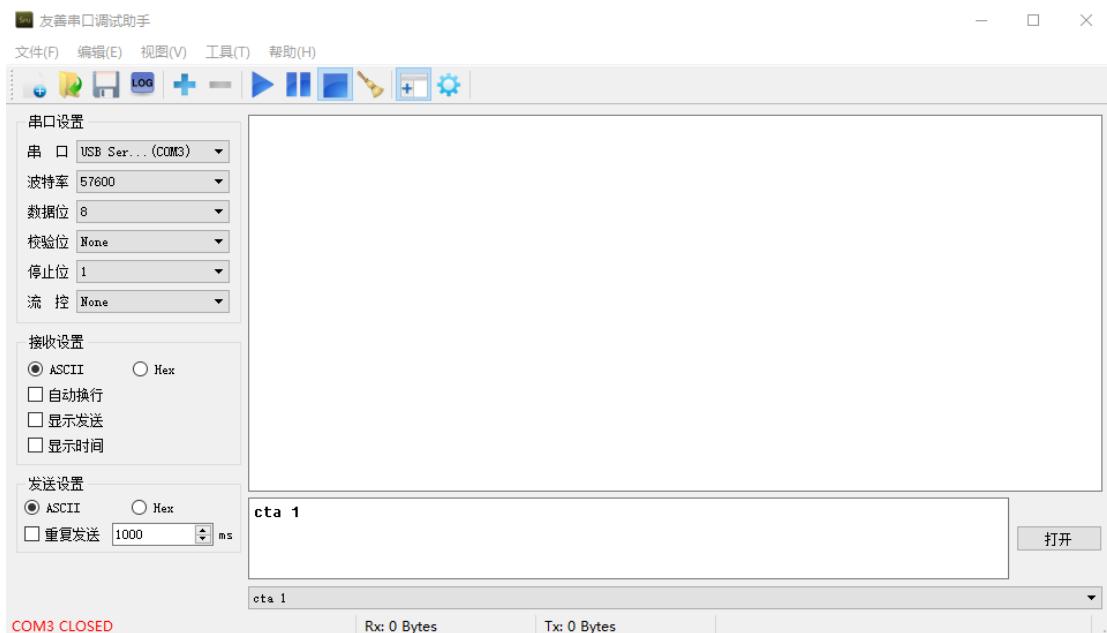


附录 C 使用串口调试程序设定热线风速仪参数

- 安装串口调试助手后，将串口调试助手的通讯参数设为以下参数

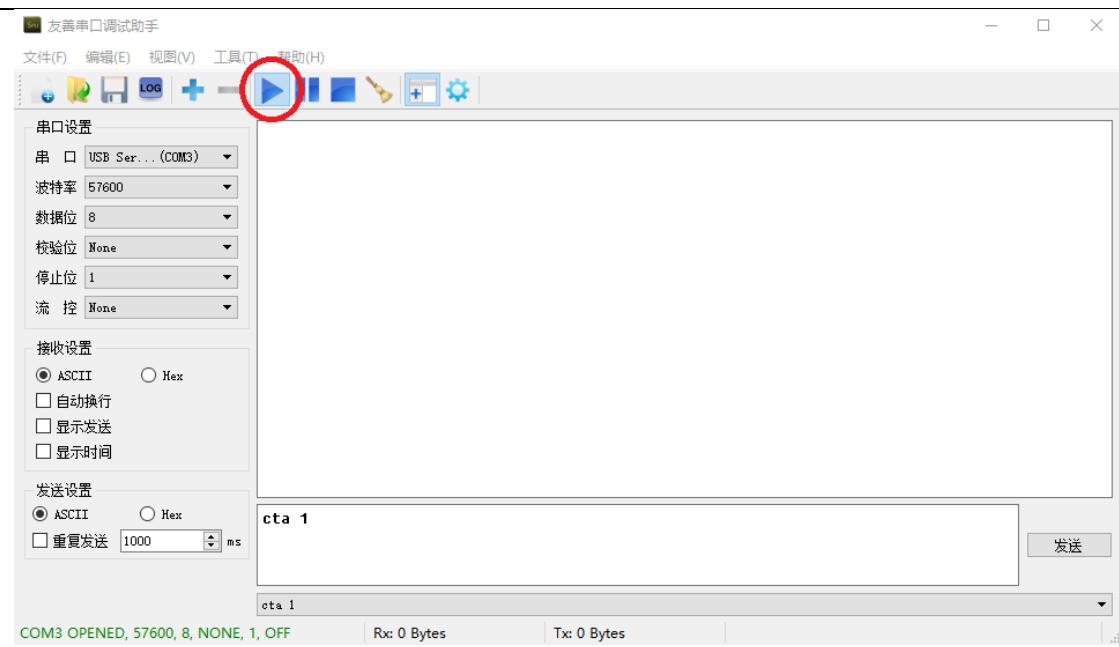
串口号：选择串口信息对应的编号

波特率：57600，**数据位：**8，**校验位：**None，**停止位：**1，**流控：**None，**接收设置：**ASCII 发送设置：**ASCII**；设置好后串口调试助手界面如图所示。



此时串口处于关闭状态，界面左下角红字显示 COM3 CLOSED。实际的串口号可能是其他数字。

- 打开串口（串口调试助手中的播放按键）



此时可以看到左下角串口打开的提示和相关的通讯参数设置信息。

- 此时可以通过串口向热线风速仪发送命令来查询信息或设置参数。发送命令的方法是在串口调试助手的输入框内输入相关命令并点击发送。接收到的数据会在上面的接收数据框内显示出来。
命令分三种，格式分别如下：

- ① 查询命令：**cta [风速仪通道编号]**，cta 与编号之间使用空格隔开，风速仪收到命令后会立即通过串口回复所有参数。

其中通道编号为 1-4 的数字，返回的数据为当前通道风速仪的相关设置，具体含义如下图所示。图中为 1 通道信息查询的例子。

<pre>cta 1 overheat 60 scale 10 balance 36000 offset 22000 gain 2 filter 0 square wave period 2000 bridge off square wave off bridge_low 1 bridge_overload 0 output_overload 0</pre>	1. 风速仪通道号（1-4） 2. 过热比数值（0-1999） 3. 比例（不必修改，为预留参数） 4. 电桥平衡参数，方波试验得出最优值（范围是0-65535） 5. 偏置参数，决定输出电压向负方向的平移量（范围是0-65535） 6. 增益参数，输出电压放大倍数，1. 2. 4. 8. 16倍可调 7. 滤波器参数，0-7，0为不使用滤波器，1-7对应10kHz-1Hz共7档截止频率选择。 8. 方波试验中方波的周期，单位是us，范围是1-20000，一般设置为2000us，对应500Hz 9. 电桥是否工作 10. 方波是否加载 11. 桥路电压过低的指示灯状态，若该灯点亮表示桥路工作不正常，1为点亮，0为熄灭 12. 桥路过载指示，说明桥路当前输出最高电压也无法维持设定的过热比，1为点亮 13. 输出过载指示，说明输出电压超出了正负5V的设定范围，1为点亮
--	---



- ② 打开或关闭桥路及方波的命令，风速仪收到命令后会立即回复所有参数。

cta [风速仪通道编号] bridge_on

cta [风速仪通道编号] bridge_off

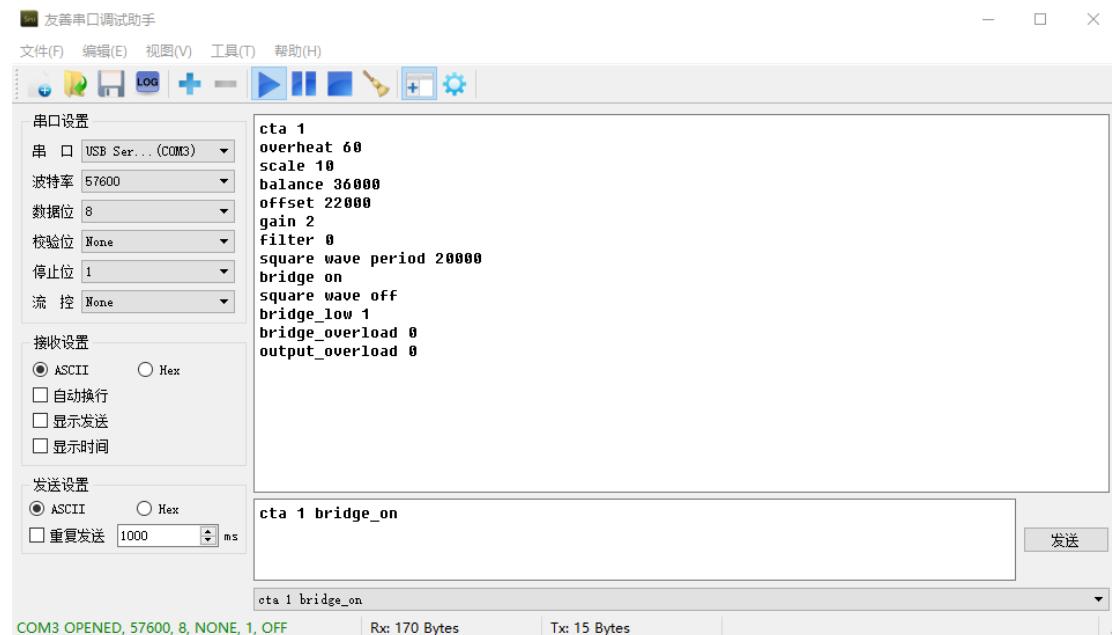
以上命令用于风速仪桥路开关，cta 与编号还有编号与 bridge_off 间均使用空格隔开，探头连线的连接及断开需要在桥路关闭的状态下进行，以防电流冲击对探头造成损坏。

cta [风速仪通道编号] square_wave_on

cta [风速仪通道编号] square_wave_off

以上命令用于控制方波测试的信号是否接入。

例子如下：



注意例子中，发送命令后，返回参数中的桥路状态有改变，已经按照命令更改为 bridge on。

- ③ 修改参数的命令，风速仪收到命令后会立即回复所有参数并将修改过的参数保存起来，保存参数需要大概一秒钟的时间，参数保存好后会回复 parameter saved。

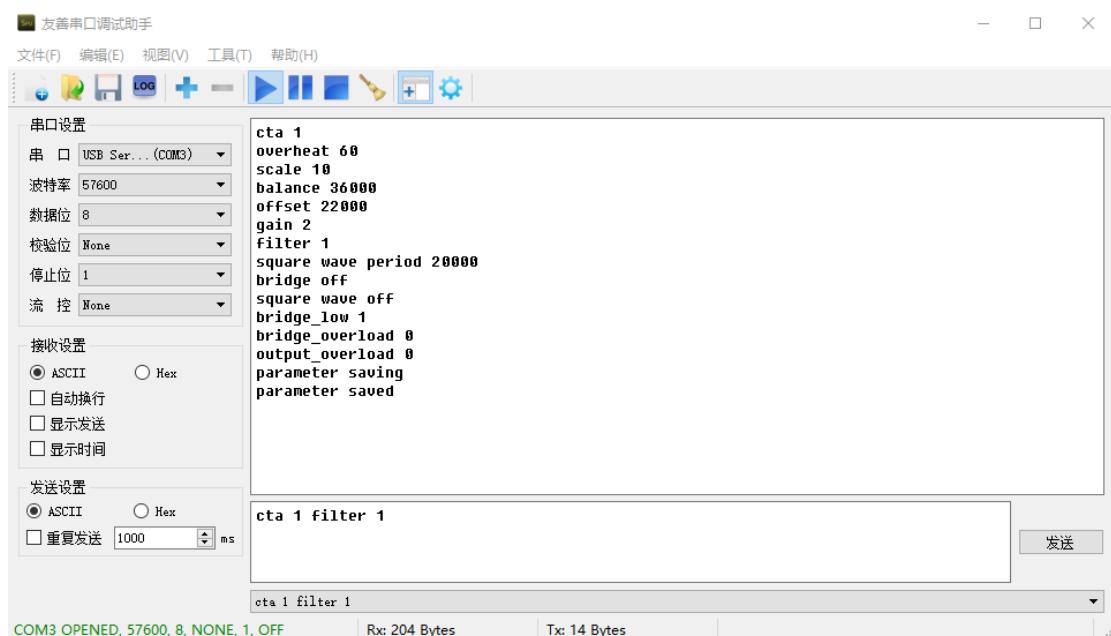
cta [风速仪通道编号] [参数名称] [参数数值] （中间使用空格隔开）

具体参数如下表所示

参数名称	参数数值范围（均为整数）
overheat	0-1999，除以 10 为探头工作电阻，再除以探头冷态电阻结果为过热比 overheating ratio。例：探头电阻为 4.8 欧，过热比设定为 1.4，则 overheating 数值应为 $4.8 \times 1.4 \times 10 = 67$ 。
balance	0-65535，一般在 30000-40000

offset	0-65535, 一般在 20000 左右
gain	1,2,4,8,16 五档
filter	0-7, 其中 0 为不使用低通滤波器, 1 对应 10kHz, 2 对应 5kHz, 3 对应 1kHz, 4 对应 500Hz, 5 对应 100Hz, 6 对应 10Hz, 7 对应 1Hz。
square_wave_period	1-20000, 单位为 us, 一般设置为 2000, 对应方波的频率为 500Hz

例子如下，修改通道 1 的截止频率为 10kHz。



注意如果参数有修改，热线系统会对参数进行修改和保存，多回复两行语句，分别为 parameter saving 和 parameter saved。在回复参数时，有 parameter saving 和 parameter saved 中有大概一秒的时间用于参数保存。

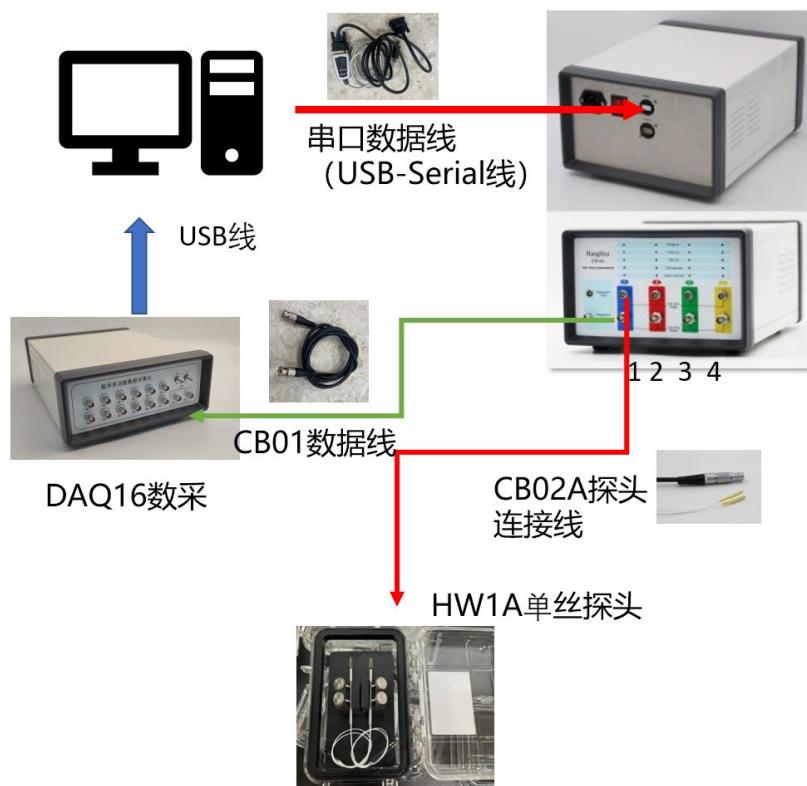
4. 在热线风速仪面板上有相应通道工作状态的指示灯，在热线正常工作的过程中绿灯应该点亮，黄灯是滤波器工作状态指示，如果黄灯点亮说明滤波器在工作，三个红灯都应该不亮。如果红灯点亮表明相应的通道没有正常工作。

附录 D 热线风速仪连线

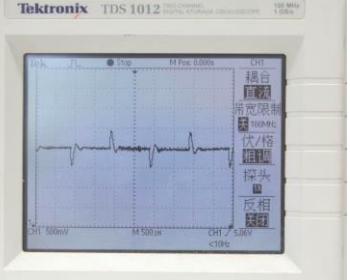
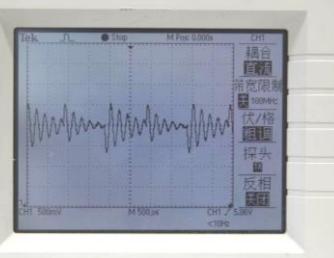
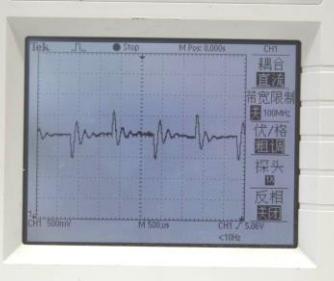
实验采用航华 CTA04-Edu 热线风速仪系统。该系统由如下部分组成（各 1 台、支、条）

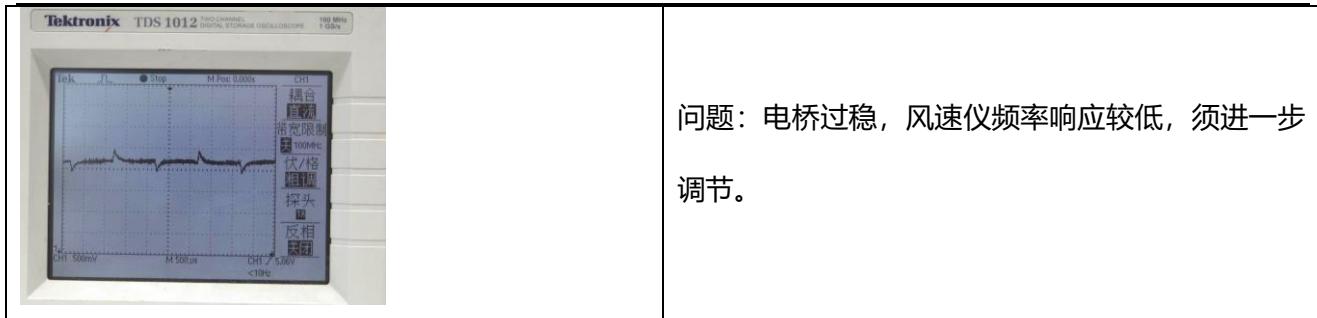
1. CTA04Edu 风速仪主机
2. DAQ16 数据采集仪（如果未采购此项，请使用其他数据采集仪、示波器或万用表读取热线输出电压）
3. 热线探头
4. 串口数据线
5. CB02A 探头连接线缆（一端微型香蕉插头，一端雷默插头）
6. CB01 数据线（两端都是 BNC 接头）

以上部分按下图连接。其中，主机背板通过串口数据线连接至 USB 端口；DAQ16 数采连接至另一 USB 插口；主机正面连接探头及数采。



附录 E 调节系统平衡方法

<p>将风速调节至实际实验时使用的最大值，发送 cta 1 square_wave_on 命令打开方波测试，此时使用 示波器或数据采集卡的观察功能观察输出波形，理 想波形如下</p>	
<p>以下波形为不理想波形</p>	
	<p>问题：电桥不平衡，不能使用。</p>
	<p>问题：电桥不稳定，须进一步调节。</p>
	<p>问题：接近稳定，还有一些振荡，须进一步调节。</p>

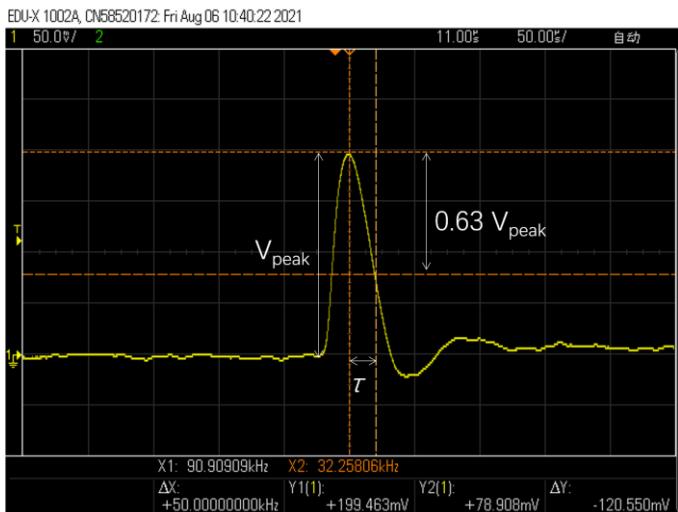


如果波形与理想波形不一致，可以使用 `cta 1 balance [数值]` 命令进行调整（数值越大，系统约稳定），每次调整的幅度不要太大，以 500 为步进为宜，直至调整至理想波形。

调整结束后，发送 `square_wave_off` 命令关闭方波

附录 F 系统频响（特征时间）确定

系统的特征响应时间可由方波测量结果确定。具体方法参考 Lomas：特征时间 τ 是方波测试中峰值到峰值 63% 的时间，特征频率 $f=1/\tau$ 。下图中特征时间 τ 为 20 微秒左右，特征频率则约为 50kHz。



附录 G 热线标定

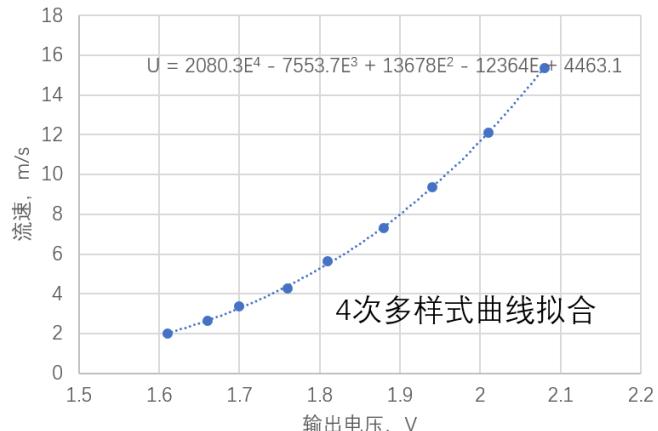
系统的输出为 ± 5 范围内的模拟电压信号，需要经过标定以后才能得到与电压相对应的流动速度值。标定须将探头放置于一个已知流速的环境中，该环境还须具有较小的湍流度。一般来说，风洞实验段或者具有渐缩出口的射流是较好的标定环境。

标定过程中须将 1 维探头的钨丝垂直于来流放置，在风洞（或其他标定台，可人为改变速度）风机某个转速条件下采集热线输出信号，并使用一支毕托管配合一台压强传感器测量风速的时均值 U 。再对热线输出信号进行平均得到平均值 E 。具体步骤如下

- 转动风机转速调至 0；
- 读取风速仪输出电压值，采样时间 10 秒以上，采样数量 10000 以上，求输出的平均值 E_1 ；
- 读取毕托管测量的速度值 U_1 ；
- 调节风机转动频率，待风速稳定以后重复 b、c 步骤，获得第二组电压 E_2 和与之相对应的压差 U_2 ；
- 逐步提高风机转动频率，测量十个以上不同压差对应的系统电压输出值；
- 在 EXCEL 或者 MATLAB 等软件中，使用四阶多项式曲线拟合电压 E 和流速 U 的关系；

$$U = a_4E^4 + a_3E^3 + a_2E^2 + a_1E + a_0;$$

数据点	U速度 m/s	E输出 Volts
1	2.02	1.61
2	2.62	1.66
3	2.36	1.7
4	4.26	1.76
5	5.62	1.81
6	7.32	1.88
7	9.38	1.94
8	12.12	2.01
9	15.36	2.08



标定结果：

$$U = 2080.3E^4 - 7553.7E^3 + 13678E^2 - 12364E + 4463.1$$

图 G.1 一个典型的标定曲线

附录 H 数据表格

环境温度:		探头电阻:	过热比:	
编号	输出电压 V	ΔP 压差 Pa	来流速度 m/s	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				

环境温度:		探头电阻:	过热比:	
编号	输出电压 V	ΔP 压差 Pa	来流速度 m/s	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

11				
12				
13				