

版本号: CTA04GN202501A

CTA-04热线风速仪操作手册



大连航华科技有限公司

目录

1 前言	5
1.1 本文目标	5
1.2 热线风速仪的特点与优势	5
1.2.1 对比多孔探针	6
1.2.2 对比LDA、PIV	7
1.3 航华热线风速仪的特点与优势	8
2 系统组成	9
2.1 基本组成部分	9
2.2 选配：CR04手动标定器	14
3 硬件连接	17
3.1 主机、数采仪连线	17
3.2 自备数采卡	18
3.3 CR04标定器连线	19
3.4 开机	21
3.4.1 开机检查	21
3.4.2 主机状态灯	21
3.5 探头电阻测量	23
3.6 连接探头	24
3.6.1 取出探头	24
3.6.2 安置探头	25
3.6.3 探头连线	26
3.7 TM02移测架连线	27
4 软件	31
4.1 准备工作	31
4.1.1 获取软件	31
4.1.2 运行要求及基本功能	31
4.1.3 安装FTDI驱动程序	32
4.1.4 安装航华CTA04应用软件：CTALab	32
4.1.5 其他品牌数据采集卡	32
4.1.6 运行CTALab软件	33
4.2 CTALab框架	34
4.2.1 ①程序控制区	34
4.2.2 ②功能选项卡	34

4.3	CTALab选项卡1: 数据采集参数设置	37
4.4	CTALab选项卡2: 热线工作参数调试	41
4.4.1	功能区①: 选择通道	41
4.4.2	功能区②: 输入热线工作参数	41
4.4.3	功能区③: 电桥及方波开关	43
4.4.4	功能区⑥: 自备采集卡设置	44
4.5	CTALab选项卡3: 标定	46
4.5.1	自动标定	47
4.5.2	压缩空气标定	50
4.5.3	手动调速、自动测速标定	51
4.5.4	手动调速、人工测速、软件采集电压标定	52
4.5.5	全手动标定: 手动调速、人工测速、人工采集电压	53
4.5.6	免标定测量	53
4.6	CTALab选项卡4: 设备	54
4.6.1	①区: 建立移测架坐标文件	54
4.6.2	②区: 手动改变CR04/CR05标定器风机转速	55
4.6.3	③区: 手动改变TM02移测架滑块位置	56
4.6.4	④区: 手动改变CR05标定器转角机构角度	56
4.7	CTALab选项卡5: 测量	57
4.7.1	①区: 选择测量通道并设置采集方法	57
4.7.2	开始测量	59
4.7.3	数据及能谱实时显示	59
4.7.4	选择文件保存方法	62
4.7.5	数据文件的读取和使用	64
4.8	使用多丝探头	65
4.8.1	双丝X型探头	65
4.8.2	三丝探头	67
5	操作流程实例	71
5.1	我有主机、采集仪、标定器	71
5.1.1	1支单丝探针实例	71
5.1.2	1支X型双丝探针实例	72
5.2	我有主机、采集仪、没有标定器	73
5.3	我只有主机	74
5.4	我要开展超过120m/s中、高流速测量	76
6	名词解释	77

目录

附录	80
A 航华热线探头	80
B FTDI软件：串口线驱动程序	83
C CTALab软件安装	85
D 串口调试助手安装及使用	86
D.1 串口调试助手安装	86
D.2 设置通信参数	87
D.3 开启通信通道	87
D.4 发送命令	88
E 过热比设置	91
F 方波测试及系统平衡	92
F.1 系统平衡判断	92
F.2 系统频响测定	93
G 变频器设置方法	94
H 全人工、四次曲线标定法实例	96
I 指数标定法及免标定方法	97
I.1 指数标定法	97
I.2 四次曲线法和指数法优缺点对比	97
I.3 免标定测量方法	98
J 导入移测架坐标文件	100
K 二、三维风速分量计算	101
K.1 二维X形探头的速度分量计算	101
K.2 三丝探头的速度分量计算	102
L lvanlys.dll错误	103

1 前言

1.1 本文目标

恒温式热线风速仪在流体力学研究中被广泛使用的科学仪器。它利用置于惠斯通电桥中的一个微小钨丝探头来测量风速变化，具有系统稳定、时间解析度好等特点。系统原理见示意图1。本文重点航华热线风速仪的构成及使用方法，解释各个操作步骤，并给出示例。

1.2 热线风速仪的特点与优势

CTA-04热线风速仪主机主要功能特点如下：

- (1) CTA-04热线风速仪具有双通道和四通道两种机型。双通道可以同时使用2个单丝热线探针或1个双丝探针；四通道可以同时使用4个单丝热线探针或2个双丝探针；
- (2) 通过485网络，系统可将多台CTA-04组成一套系统，最多可支持256通道同时工作；
- (3) 探头工作电阻范围为0.1-199.9欧姆，设置精度0.1欧姆；
- (4) 输出调制电路具有偏置功能，可以对输出电压进行平移；
- (5) 输出调制电路具有增益功能，设置5挡增益，分别是1,2,4,8和16；
- (6) 输出调制电路内置低通滤波器，设有7个可切换的截止频率，分别是10kHz、5kHz、1kHz、500Hz、100Hz、10Hz和1Hz。低通滤波器可关闭；
- (7) 内置方波发生器，可产生用于测试频响的方波。方波频率1-5000Hz，缺省值为500Hz。

在DAQ16数采仪及CR系列热线标定器及CTALab软件的配合下，CTA-04系统可：

- (1) 设定热线风速仪冷态电阻、工作温度；
- (2) 调节热线系统动态平衡参数；
- (3) 调节信号放大、偏置、低通滤波等输出信号的后处理参数；
- (4) 自动标定风速与输出电压的函数关系；

1.2 热线风速仪的特点与优势

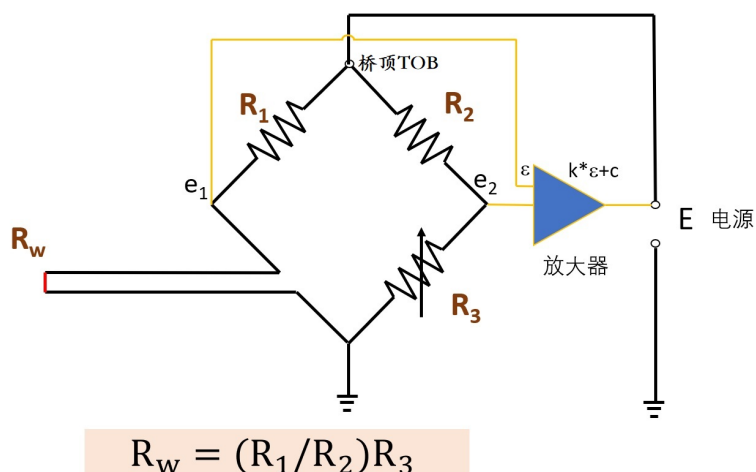


图 1: 电桥原理示意图

- (5) 设定采样率、采样数、数据储存文件目录、文件名等参数；
- (6) 实现解析X型双丝探头、三丝探头测量等功能。

1.2.1 对比多孔探针

与毕托管、多孔探针等基于测压来测速的传统技术相比，热线风速仪的优势在于

(1) 动态测量能力

热线风速仪具备非常强的动态测量能力。不仅能测量平均速度，更能解析超过100kHz的速度动态变化，可以准确解析各种尺度旋涡带来的速度变化，并测量能谱、各种长度及时间尺度等重要湍流参数。

(2) 近壁测量能力

因为探针的几何尺度很小，可靠近壁面解析近壁区域速度分布，进而获得湍流边界层粘性底层的速度分布等重要信息，捕捉边界层内发生的各种动态事件。

与毕托管及多孔探针相比，热线风速仪的弱点也很明显

(1) 投资相对大

热线风速仪售价大大高于毕托管等以测压为基础的风速测量仪器。

1.2 热线风速仪的特点与优势

(2) 系统更复杂

一套完整热线风速仪由主机、数采卡、标定器、探头等多个部件组成。与毕托管测速系统相比更庞大、复杂。

(3) 探头易损

热线探针的核心部件是裸露的5微米直径金属丝，易氧化，轻触也可造成破损。

(4) 对环境变化敏感

热线测量结果对温度变化非常敏感（每摄氏度温变引起2%速度测量值变化），需要复杂的补偿算法进行修正，且补偿效果有限。

(5) 探头需要经常标定，使用便利性差

热线风速仪需要设定冷态电阻、过热比、系统平衡参数。另外，需要进行方波测试以获得最佳频响。热线风速仪需要依靠其他测速仪器（如毕托管等）进行标定。热线测量易受温度、湿度等多种因素的影响，传统的标定结果只能在一定时间内有效，无法做到一次标定，长时间使用。

尽管具有以上弱点，因热线在动态测量方面的优势。热线风速仪依然被大量采用。

1.2.2 对比LDA、PIV

与激光多普勒（LDA）以及激光离子测速仪（PIV）这两种基于激光的测速方法相比，热线风速仪具有如下优点

(1) 投资相对小。LDA与PIV系统更加昂贵；

(2) 无需示踪粒子，适用于对洁净度要求较高场合；

(3) 对低湍流度场景测量更为精确。低湍流度环境下，因为散射光的不均匀性，光学测量方法测量的湍流度普遍偏高，无法胜任确定风洞实验段湍流度等重要工作。而热线则可以胜任；

(4) LDA的输出信号是离散的，不连续。热线输出信号是连续的，并且时间解析度更好；

1.3 航华热线风速仪的特点与优势

- (5) PIV时间解析能力差（最高1kHz量级），大大弱于热线风速仪的时间解析能力（可在200kHz以上）。

在具有以上优点同时，也有一些劣势。相对于LDA 与PIV

- (1) 热线为侵入式测量，对流场有干扰。PIV 与LDA都为非侵入式测量；
- (2) 热线需要流场温度恒定，不能随时间变化，空间上也需要均匀。PIV与LDA则不受温度影响；
- (3) LDA不需要标定，PIV仅需首次使用之前标定，而热线则需要经常标定。

1.3 航华热线风速仪的特点与优势

与国际领先品牌热线风速仪相比，大连航华产品具有如下特点

- (1) 航华热线风速仪具有后发优势，吸纳更新的电子技术，使系统更可靠；
- (2) 独立开发了若干新测量技术，提高了易用性；
- (3) 为用户提供更及时的技术支持，长期、可靠的售后服务；
- (4) 可为用户提供免费的软件升级服务；
- (5) 具有良好的性价比。

2 系统组成

2.1 基本组成部分

表 1: 一套CTA04航华热线风速仪系统的标准配置

编号	品名	数量 ¹	功能
1	CTA04热线风速仪主机, 图2a或2b	1	内置恒温热线电桥, 为热线探头提供电流, 并维持其电阻恒定; 输出与风速大小相关的模拟电压信号
2	DAQ16数采仪, 图2c	1	采集风速仪输出的电压信号。另外, 该仪器内置压强传感器1枚, 用于测量标定器出口速度
3	USB-Serial线 (串口线), 图2d	1	连接热线风速仪后板面“串口1”与计算机串口, 用来设置、调试参数
4	CB02A探头连接线, 图2e	2/4	连接热线风速仪Probe端口与热线探头
5	TS02测温传感器 (PT100铂电阻), 图2f	1	连接热线风速仪“Temperature Probe”接口, 测量温度
6	CB01数据线 (BNC数据线), 图2g	3/5	连接热线风速仪输出、温度传感器输出与数据采集卡(DAQ16)输入端
7	TypeC-USB线, 图2h	1	兼容普通手机TypeC线, 用于连接DAQ16数采与电脑
8	HW1A 单丝探头, 图2i	2/4	5 μ m 直径钨丝、长约1.5mm、正对来流、测量速度大小变化
9	HW2A 双丝X型探头, 图2j	1/2	5 μ m 直径钨丝、测量一个平面内的二维速度分量
10	电源线, 图2k	2	

¹ “/” 符号两边数字分别表示二通道系统和四通道系统

一个典型的热线风速仪系统图片见图2。各个部件描述见表1。其中,

(1) CTA04热线主机:

标配产品。热线主机分为双通道和四通道两种, 图2a或2b。一台电脑可以连接多台主机, 比如, 一套六通道系统可以由一台四通道主机加一台双通道主机组成, 一套12通道系统由3台四通道主机组成;

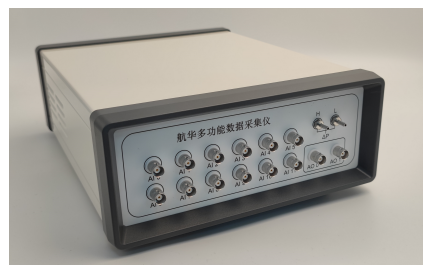
(2) DAQ16 数据采集仪



(a) 四通道主机



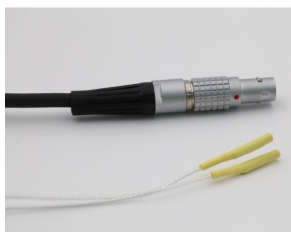
(b) 双通道主机



(c) DAQ16信号采集仪



(d) USB-Serial线 (串口号线)



(e) CB02A热线探头



(f) TS02温度传感器



(g) CB01数据线 (BNC信号线)



(h) TypeC数据线



(i) HW1A单丝探针



(j) HW2A双丝X型探针



(k) 电源线

图 2: 四通道热线风速仪主机及标准配置附件

2.1 基本组成部分

标配产品。数采仪内置一台NI USB6211数据采集卡，图2c。具体参数见表3。除采集卡外，数采仪还内置一个压差传感器，测压范围 $\pm 2.1kPa$ ，精度为量程的 $\pm 0.1\%$ ；

(3) USB-串口线（串口线）

标配产品，见图2d，用于连接电脑与风速仪主机。电脑通过该线将命令以文本形式发给风速仪，设定风速仪工作参数，并读取风速仪工作状态；

该导线内含USB-串口转换芯片，需安装驱动程序方可正常使用。安装方法见第B节。

(4) CB02A探头连接线

标配产品，见图2e。探头线一端为二芯雷莫接线器（航空插头），末端为两个迷你香蕉头母头。该导线专门用来连接航华热线风速仪前面板Probe端口与航华热线探针；

如果用户计划在航华热线风速仪上使用其他公司探针，请使用CB02C导线。如果用户计划在其他热线风速仪上使用航华探针，请使用CB02B导线。该线最大长度为4 米。大于4 米会影响热线测量的动态性能。

(5) TS02测温传感器

标配产品，见图2f。TS02传感器是一支PT100铂电阻温度传感器。它的一端为四芯雷莫接线器，连接热线风速仪“Temperature Probe”接口，测量温度；

(6) CB01数据线

标配产品，见图2g。该数据线两端都是BNC接头，该线与市场上普通“双公头BNC 连接线”兼容。该线用来连接热线风速仪输出端与数据采集卡模拟输入端，以及温度传感器输出端与数据采集卡输入端；

(7) TypeC-USB线

标配产品，图2h。该线与普通手机TypeC 数据线兼容（不能使用TypeC电源线），用来连接DAQ16 数采与电脑。通过该线将数据从数采卡传给电脑；

(8) HW1A单丝探头

2.1 基本组成部分

标配产品，见图2i。该探头敏感单元为 $5\mu\text{m}$ 直径钨丝、长约 1.5mm 。探针总长度约 90mm ，其中头部双支架长度约 11mm ，探针主体长 80mm 、直径 2.6mm 。敏感单元通过焊接置于两个支架尖端，正对来流。探针尾部有两根柔性导线，长约 20cm 。导线尾部为迷你香蕉头公头，通过CB02A 线与热线风速仪Probe端口相连。几何尺寸见图A.2a；

(9) HW2A 双丝X型探头

标配产品，见图2j。该探头敏感单元为两个独立的直径 $5\mu\text{m}$ 、长约 2mm 钨丝，与探针主体轴线夹角分别为 45° 与 -45° 。两钨丝之间夹角为 $90 \pm 1.0^\circ$ 。探针总长度约 90mm ，探针主体长 80mm 、直径 3.7mm 。几何尺寸见图A.2c。头部共有4个支架，两长两短，长度分别为 11mm 与 10mm 。一长一短为一对，每个钨丝通过焊接置于一对支架尖端。为区别两根丝对应的支架和导线接头，将其中一组支架和接头涂成红色，另一组为黑色。将两组接头分别用CBO2A线连接至热线风速仪的两个不同Probe端口。

表 2: CTA04热线风速仪主机参数

	CTA04-Pro	CTA04-Edu
介质	空气	空气
测速范围(m/s)	0.1 – 300	0.1 – 150
频率响应kHz	≤ 200	≤ 50
探针工作电阻 Ω	0.1 ~ 199.9	0.1 ~ 199.9
每台主机通道数	2、4	2、4
外形尺寸(宽高长) mm	255x155x330 (四通道)、 185x155x330 (二通道)	255x155x330 (四通道)、 185x155x330 (二通道)
重量kg	2.8 (四通道)、1.9 (二通道)	2.8 (四通道)、1.9 (二通道)
输出V	± 5.0	± 5.0

表 3: DAQ16数采仪参数

	参数
厂商	National Instrument
型号	USB 6211
模拟量输入通道数	16（单端，包括占用的4个）
采样精度	16 位
输入范围	$\pm 10\text{ V}$
最大采样频率	250 kHz
模拟量输出通道数	2
外形尺寸	213*127*48 mm
重量	300 g
电源	12V直流，10 W
压强传感器范围	$\pm 2.1\text{ kPa}$
压强传感器精度	0.1% <i>F.S.</i> 即 $\pm 2.1\text{ Pa}$

2.2 选配：CR04手动标定器

2.2 选配：CR04手动标定器

热线风速仪的输出为模拟电压,需要经过标定过程才能将电压信号转化为流速。标定需要在一系列已知风速的环境下,记录电压输出的均值。通常要求标定环境湍流度小,即风速随时间变化不大。航华提供CR04手动标定器及CR05自动标定器两种选择。



图 3: CR04标定器的组成部件

CR04手动标定器的组成部分见图3, 细节见表4。它主要由如下几个部分组成

(1) CR04M手动标定器, 图3a

射流装置出口直径15mm, 出口速度范围2-60 m/s , 湍流度小于0.5%, 静压腔设有总压采集口。射流装置的背板是空气入口, 通过塑料波纹管(图3d)连接至风机出口。射流装置下方设有测压孔, 通过测压软管(图3g, 内径2mm硅胶软管)与DAQ16数采仪的标定器测压口(图2c, H端)相连。射流装置内设有整流装置, 收缩段收缩比100:1。

(2) 手动转台, 图3a

手动转角机构, 与射流装置安装成一体, 探针轴向与射流方向偏角(Roll)范围 $\pm 90^\circ$, 探针可绕轴向旋转角度(Cone)范围0 – 360° 。调节分辨率 5° 。角度的定义见第K节;

2.2 选配：CR04手动标定器

(3) 风机，图3c

高压风机一台，供电220VAC, 500W。

(4) 变频器，图3b

用来控制风机转速。可在自动和手动定速两个模式下工作。设置方法见附录第G节。

(5) 定制电源线，图3e

连接风机、变频器及电源。线的一段为四接头，与风机相连（长的黄绿先接地，其他红绿黑三线接电机三相接头，通常已经接好）；线的另一段为六线接头接变频器，具体见第3.3节）；

(6) 变频器控制线，图3f

该线一端为BNC 接头，另一端为裸线。该线连接变频器（FV，GND插口）与数据采集仪模拟电压输出（AO）端口，用来控制风机转速。软件可以通过AO 端口发送模拟电压（0-10V）来控制转速，实现自动调节风速的自动标定。变频器也可以设为手动模式，通过转动前面板上的电位器调节风机转速。具体操作见附录第G节。

2.2 选配：CR04手动标定器

表 4: CR04手动标定器组成部分

编号	品名	数量	功能
1	CR04射流台, 图3a	1	直径10mm射流装置, 出口速度范围2-60 m/s , 湍流度小于0.5%, 静压腔设有总压采集口
2	手动转台, 图3a	1	手动转角机构。探针轴向与射流方向偏角(Roll) 范围 $\pm 90^\circ$, 探针可绕轴向旋转角度(Cone)范围0 – 360°
3	风机, 图3c	1	220V, 500W, 单相
4	变频器, 图3b	1	220V, 1kW, 控制风机转速
5	定制电源线, 图3e	1	连接风机、变频器及电源
6	变频器控制线, 图3f	1	连接变频器与数据采集仪模拟电压输出端口, 向变频器输入模拟电压信号来控制风机转速
7	塑料波纹管, 图3d	1	连接风机出口与标定器入风口
8	测压软管, 图3g	1	内径2mm 硅胶软管, 连接标定器下方测压孔与DAQ数采仪测压口

3 硬件连接

3.1 主机、数采仪连线

主机需要接电源线、串口线、温度探头、温度探头输出线、热线探针线、热线探针输出线，具体流程如下

第1步: 连接风速仪与采集仪的电源线（图2k）

第2步: 使用串口线（图2d）连接电脑USB插口与主机背板串口PORT1，见图4

第3步: TS02测温传感器（PT100铂电阻，图2f）连接热线风速仪“Temperature Probe”接口。连接时注意传感器雷莫连接器（航空插头）红色标记与接口红色标记相对，插头上红点应指向12点钟方向（正上方），见图5。注意：如果没有感觉到清晰的“咔哒”落位声，不要用力硬插，拔出口检查导线接头内铜针的状态，是否已弯。另外，请百度“雷莫连接器怎么插拔”。

另外，用户也可以考虑将TS02温度传感器安装在“数据采集仪”后面板上的Temp Measurement接口，这样，温度传感器的输出直接与数据采集卡的AI12接口相连

第4步: 如果用户使用热线风速仪前面板的“Temperature Probe”接口测量温度，请使用CB01导线（两头BNC 插头，图2g）连接主机前面板“Temperature Output”接口与数据采集仪前面板任意模拟电压输入（AI）接口，比如第二排第一个AI6接口。

如果用户使用“数据采集仪”后面板上的Temp Measurement接口测量温度，则不用连接任何CB01导线，因为数据采集仪内部已经将温度输出连接在AI12接口上。

第5步: 将CB02A导线（图2e）雷莫连接器接在主机前面板“Hot-wire Probe”接口。连接时注意插头与插座之间红色标识相对（插座红点位置不明显，插头上红点应指向3 点钟方向）。雷莫连接器有自锁功能，不能用力插拔。

第6步: 使用CB01导线（图2g）连接主机前面板“Hot-wire Output”接口与数据采集仪前面板任意AI接头，比如A通道输出连AI0，B通道输出连AI1。

第7步: 使用TypeC线（图2h）将电脑与数据采集仪相连

3.2 自备数采卡

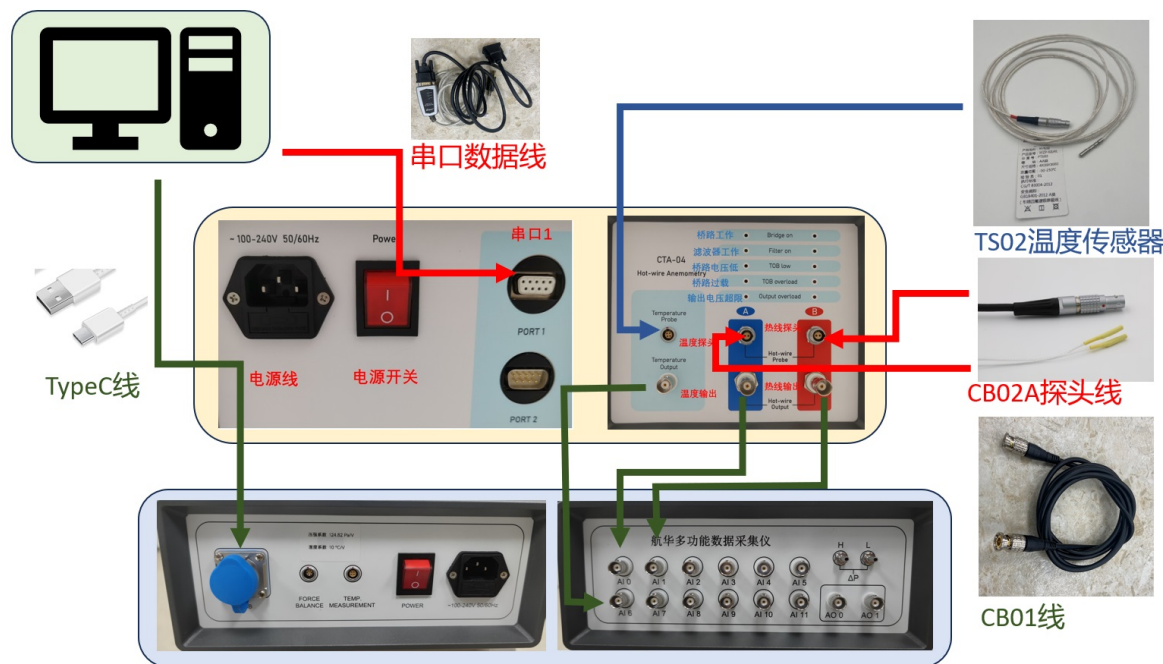


图 4：主机箱与数采仪及电脑的连接方法

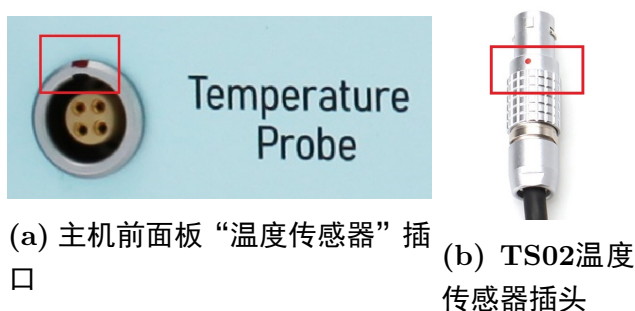


图 5：温度传感器之雷莫连接器使用方法

3.2 自备数采卡

如果用户未使用航华多功能数据采集仪而采用实验室已有National Instrument数采仪，可以考虑参照上一小节方式将热线输出的模拟电压与AI0和AI1相连，并将温度电压输出与任意其他可用的AI接口相连。

如果用户使用其他品牌数采仪，将无法使用CTALab软件进行数据采集工作。航华DAQ16数采仪内置压强传感器。如果用户没有采购DAQ16，则需要准备NI数采卡及压强传感器，才能使用CTALab软件的自动标定功能。

3.3 CR04标定器连线

3.3 CR04标定器连线

如果用户使用航华CR04手动标定器，需按照图6连线。具体包括：

第1步：用定制电源线（图3e）中的4接头端接风机（黑、红、绿分别接U、V、W，黄接地），通常这一步在出厂前已经完成；

第2步：电源线6接头中的蓝、棕、黄三线接变频器接线盒左侧（蓝接R、棕接T，黄接地），见图6；

第3步：电源线6接头中的红、绿、黑三线分别接变频器接线盒右侧的U、V、W，见图6；

如果使用中发现流速远低于预期值，可能是风机反转导致。可考虑将电源线6接头红、绿、黑三线中任任意两个交换位置，风机即可正传。

第4步：BNC导线（图3f）裸线端接变频器输入端（红接FV、黑接GND），BNC接头与输出采集仪模拟输出端AO-0相连，软件通过此连接调节风速。如用户希望手动调节风速，参加“手动调节风速”一节（附录第G节）；

第5步：软管（图3g）连接标定器总压测量口(图6左下) 与多功能数据采集仪前面板右上方“H”测压端口（在DAQ16数采仪内部，压强传感器的模拟电压输出与数据采集卡AI-13 端口相连）；

第6步：使用波纹软管（图3d）连接标定器入口与风机出口。

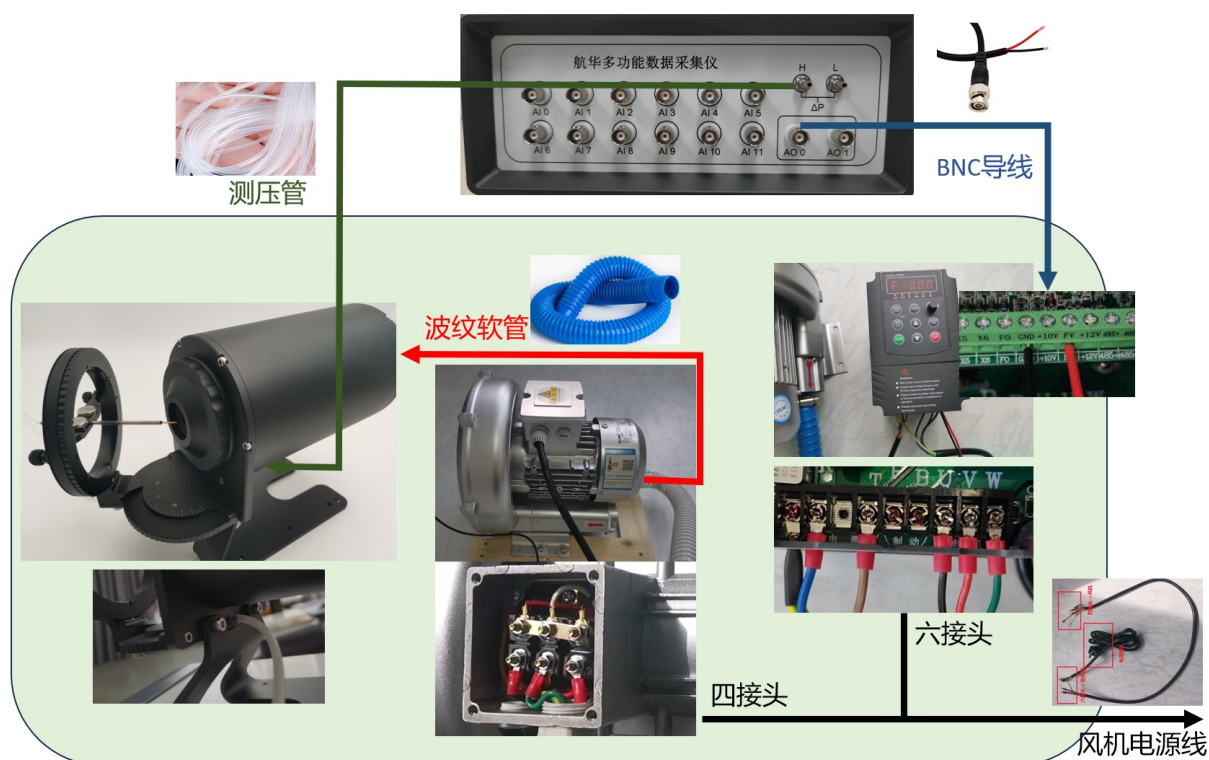


图 6: CR04手动标定器的接线方法

3.4 开机

3.4 开机

完成上一节描述的接线任务后，继续完成如下步骤

第1步: 打开风速仪、数据采集仪的电源开关（开关从O调制I）

第2步: 将风机电源线接头插入插座

第3步: 如有，打开运动控制器开关

3.4.1 开机检查

打开电源后，做如下检查

- (1) 风速仪主机后面板电源开关灯亮
- (2) 数采仪后面板电源开关灯亮
- (3) 风机变频器前面板亮，并有数字显示
- (4) 运动控制器面板电源开关灯亮
- (5) 步进电机锁死，需要很大力量才能拧动

如果以上状态都已确认，说明系统已经正确上电，可进行下一步。

3.4.2 主机状态灯

除了上一小节描述的系统指示灯以外，热线风速仪主机前面板上有一系列运行状态指示灯，见图7。这些指示灯（自上至下）及建议用户的应对方式是

- (1) 如果桥路工作，桥路工作(Bridge on)指示灯亮。
- (2) 如果滤波器工作，滤波器工作(Filter on)黄灯会点亮。
 - CTALab软件“设置”选项卡内“低通滤波截止频率”选择“无滤波”，可关闭此灯
- (3) 内部桥路的工作电压范围为0.5V-9V，若桥顶（TOB，见图1）电压低于0.5V时桥路电压低(TOB low) 指示灯亮。
 - 通常情况下，该灯亮代表热线探头或者导线损坏。请检查关机检查探头电阻；

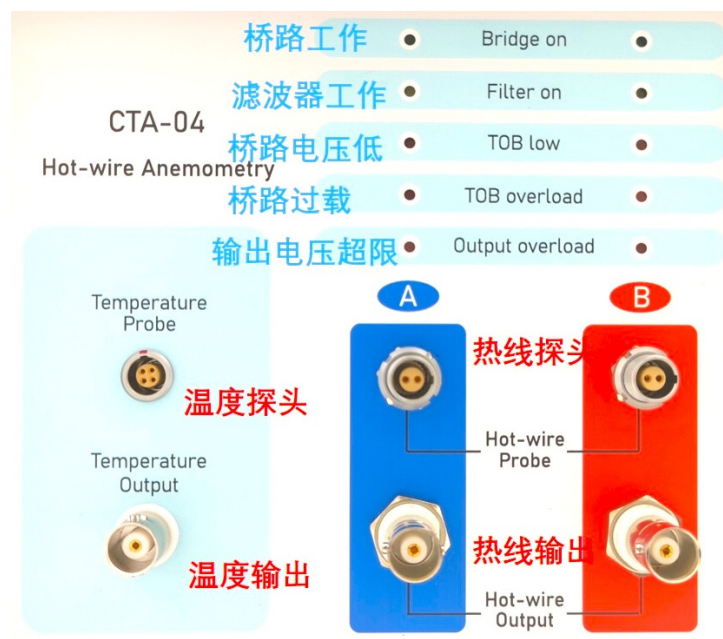


图 7: 前面板照片

- 个别情况下，电桥不平衡，此灯会亮。需在CTALab软件“设置”选项卡内调节“平衡参数”；
 - Pro版本的桥比（Scale）设置为100后，在测量低速流动时TOB low灯可能会亮，请忽略之。
- (4) 若维持热线探头恒温所需的桥顶电压高于9V，桥路过载(TOB overload)指示红灯将点亮
- 由于桥路工作电压范围限制在0.5-9V，此时桥路无法提供更大电流来加热探头，建议通过降低过热比来降低热线工作温度。
 - Pro系统用户可以考虑将桥比改为100:1，具体见第4.4.1节。
- (5) 输出电压的有效范围：-5V 至+5V，如果桥路及输出电路的设置不合理，实际的电压超过此范围时，输出电压超限(Output overload)提示红灯会点亮。
- CTALab软件“设置”选项卡内将“增益”置为1，并调整“偏置电压”使输出在 $\pm 5V$ 以内

实际工作中，会出现其他情况，包括

3.5 探头电阻测量

- (1) TOB low与TOB overload灯都隐约亮。该情况下系统出现了振荡，未能稳定工作，需要重新设定平衡参数（Balance）
- (2) 所有灯都不亮：检查风速仪内部是否出现移位。经强烈撞击，内部部件可能移位，导致灯被面板不透明部分遮挡。该情况下，系统正常使用，但看不到前面板LED灯。

3.5 探头电阻测量

如果是首次使用，请保持探头在盒子中，不要揭掉封条，先测量电阻。航华热线探头的冷态电阻约为

- HW1A约4-6Ω
- HW2A约5-8Ω
- HW3A约7-11Ω.

若电阻超过此范围，探头可能已经损坏。

探头封条保持完整情况下，航华将为破损探头提供免费维修服务。

探头的冷态电阻， R_{20} ，是室温为20°C条件下的探头电阻。冷态是热线风速仪运行的重要参数，需要准确提供给风速仪软件，我们建议每次插拔探头之后都要测量，具体方法是：

第1步：使用温度计读取当前室温 T ；

第2步：使用电阻表（或万用表）测量探头电线尾部迷你香蕉头之间的电阻 R ，见图8；

切勿直接碰触探针顶部去测量电阻，探针会损坏！

第3步：依照金属电阻变化规律

$$R/R_{20} = 1 + \alpha_t(T - 20) \quad (1)$$

计算 R_{20} ，这里金属钨的电阻温度系数为 $\alpha_t = 0.0045^\circ\text{C}^{-1}$ 。示例：若 $T = 30^\circ\text{C}$ 时测量值为 $R = 5.0\Omega$ ，探头的冷态电阻应为

$$R_{20} = \frac{R}{1 + \alpha_t(T - 20)} = \frac{5.0\Omega}{1 + 0.0045(30 - 20)} = 4.785\Omega \quad (2)$$

3.6 连接探头

注意：新探针在初始使用阶段，其电阻会发生变化。所以新探头在投入测量之前需要做退火处理：需要在过热比1.8 的环境下连续工作12 小时以上，探针电阻才会稳定下来。退火过程中，不必用风冷却（其温度是由过热比决定的）。

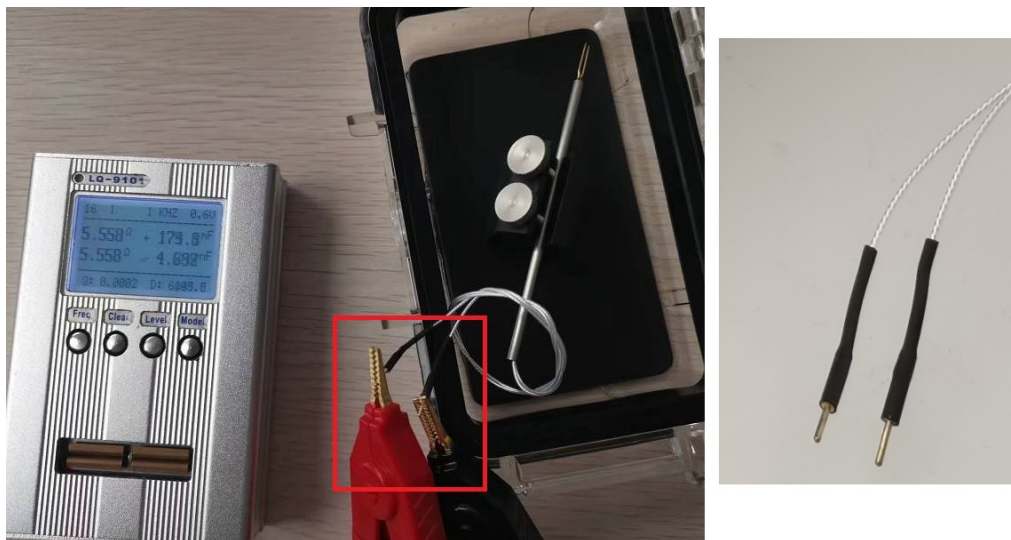


图 8: 冷态电阻测量

3.6 连接探头

在测量探头电阻后将探针从盒子中取出、安装到实验台上，并接线。注意，航华探头连接方式与丹迪探针有以下不同：

- (1) 航华探头尾部为一对导线连接迷你香蕉头，丹迪探针接头为针型；
- (2) 航华探头通过CB02A导线直连风速仪，丹迪探针与丹迪支杆相连，支杆再通过导线连接到风速仪；
- (3) 航华风速仪探针导线接口为两芯雷莫连接器，丹迪为BNC接头。

3.6.1 取出探头

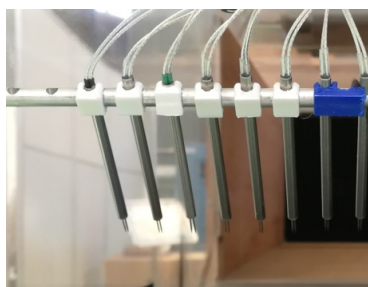
热线探头顶部非常脆弱，绝对不能触碰。任何形式的轻触，都会损坏探头。因此用户需要注意以下几点

- (1) 操作过程中，眼睛需要始终盯着探针顶部，视线不能被遮挡
- (2) 双手操作、缓慢操作

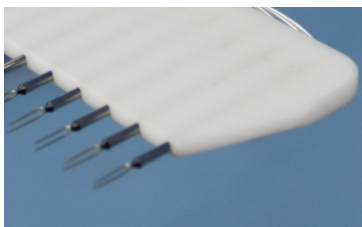
3.6 连接探头

(3) 建议用户参见如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV1nk4y1p7RB/>



(a) 夹具1



(b) 夹具2



(c) 夹具3



(d) CR04标定器夹具

图 9: 几种典型夹具

3.6.2 安置探头

取出探头后，用户需要将探头安置在实验台的夹具上。夹具需要用户自行设计及制作。设计夹具所需的探针外形尺寸见附录第A节。我们不推荐使用胶带、尼龙扎带等方法，除非临时测量。

安装探头时，探头本体轴线需尽量与来流方向平行，以减少对流动的干扰。使用单丝探头HW1系列的时候，敏感单元（钨丝）需垂直于来流。如果实验台空间有限，无法使用HW1A探头正对来流，用户可以考虑采用直角探针（HW1E、HW1F）或45度斜角探针（HW1G）以满足要求。相关探头信息见附录第A节。

当使用CR04标定器进行标定，探头需安装在CR04 标定器夹具上。用户需要首先松开两侧银色螺母（见图9d），向后推夹板使其完全打开，在中间槽中放入探针本体，缓慢推回夹板，轻轻拧动银色螺母（不要拧紧），前后移动探头使钨丝距离射流出口1厘米左右，最后拧紧银色螺母。安装好后，用户需转动标定器夹具，使探头主体轴线与流动方向重合。

3.6 连接探头

3.6.3 探头连线

探头尾部两个迷你香蕉头公头（图7），与CB02A探头线（图2e）一端的两个迷你香蕉头母头相连。敏感单元(钨丝)两端没有极性，香蕉头连接可任意配对。迷你香蕉头配合紧密，初期需用力插拔。长期使用会因为磨损而变松，如果出现连接不紧固的情况，需要更换接头。

插、拔探头时一定要保持桥路关闭，否则容易损坏探头。

3.7 TM02移测架连线

3.7 TM02移测架连线

TM02移测架是精确控制探头位置以辅助测量流场速度分布的工具，组成部分见表5。航华TM02模组采用双线轨丝杠滑台方案。行程范围200-500mm，定位精度0.1mm/500mm。水平负载5kg，垂直负载2kg。根据用户的需求可选1到3支。

航华仅提供模组及基本连接件，不负责现场安装方案的设计及实施。



图 10: 一套典型的移测架由3台模组、导线及连接件组成



图 11: 移测架导线

连接过程

3.7 TM02移测架连线

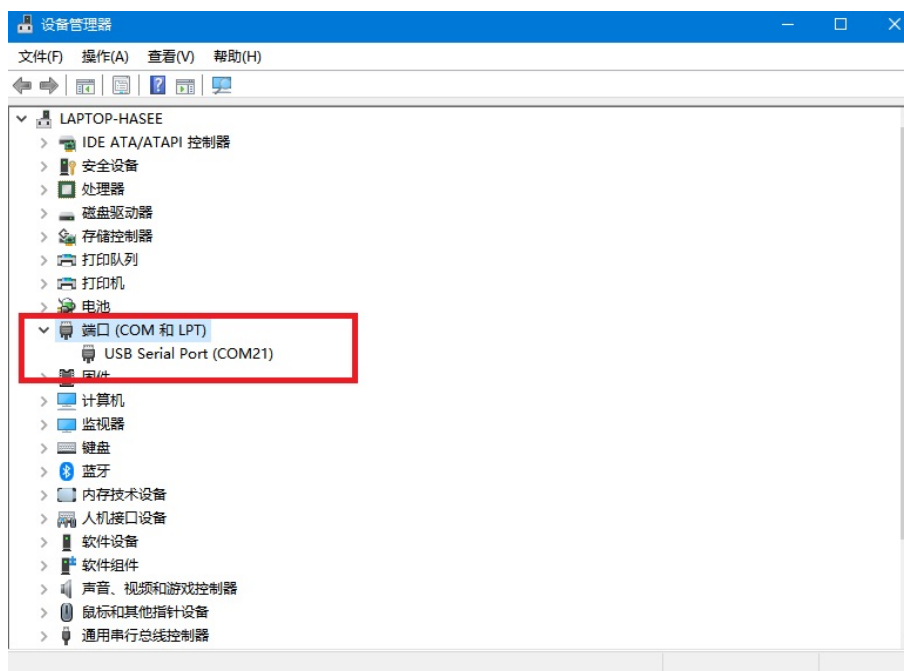


图 12: 读取移测架对应端口号

第1步: 控制器线插头连电机。插头编号和电机编号不必一一对应, 见图11左侧或图13

第2步: 连接24V电源 (图10 左侧), 控制器蓝灯亮

第3步: USB导线 (图10 上方) 插电脑。插入电脑后请在“设备管理器”中的“端口”中读取正确端口, 见图12。如果没有出现, 请尝试安装FTDI驱动程序, 具体见附录B.

如果导线脱落, 请按照 (见图10)

第1步: 信号线自上而下是红、黑、绿 (或绿黑)、黄 (或黄红)

第2步: 电机线自右至左是6,7,8,9, 或红绿黄蓝, 或A+、A-、B+、B-。具体见图13。

3.7 TM02移测架连线

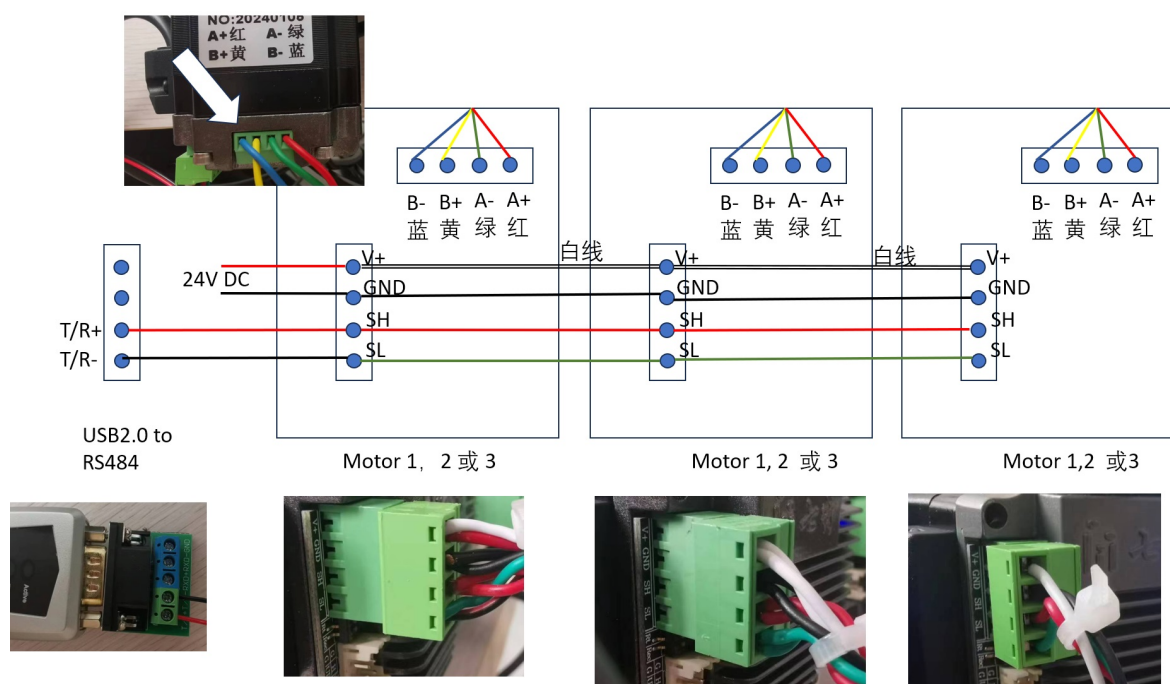


图 13: 坐标架接线示意图及照片。

表 5: TM02移测架组成部分

编号	品名	数量	功能
1	TM02线性滑动模组及连接件，图10 与图11	1-3	行程200-500mm，定位精度0.2mm/m，负载:水平5kg、垂直2kg
2	步进电机控制线，图11	1-3	连接转台与运动控制器。部分产品此线与滑动模组一体
3	TypeC数据线，图2h	1	连接电脑与与控制器

4 软件

4.1 准备工作

4.1.1 获取软件

用户可从航华官网免费获取最新CTALab1.0系列软件

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

如果您拥有风速仪主机及配套的采集和标定设备，您需要安装

- (1) FTDI驱动程序，第4.1.3节。FTDI芯片驱动程序实现USB-串口转换功能
- (2) CTALab 1.0航华风速仪应用程序，第4.1.4节，软件专门针对航华CTA04系列热线风速仪、DAQ16数据采集仪、CR系列标定器及TM系列移测架编制。航华热线风速仪应用软件CTALab 具备如下基本功能

- 与主机通讯、进行开关电桥、设置冷态电阻、设置过热比、设置平衡参数；
- 设置采集参数、存储数据；
- 与其他航华设备通讯，驱动标定器进行自动标定，驱动移测架在不同位置进行测量等。

如果您仅有热线风速仪主机，我们建议您安装

- (1) FTDI驱动程序，见第4.1.3节及附录B；
- (2) 串口通讯助手，见附录第D节。

4.1.2 运行要求及基本功能

CTALab软件对计算机的计算能力有一定的要求，我们推荐计算机配置如下：

- Intel I5 及以上CPU；8G及以上内存，500G以上硬盘；
- Windows 10 或Windows 11，64位系统；
- ☞ 不小于1280*960 的显示器分辨率，小于该分辨率部分软件界面在显示区域之外，需频繁拖动鼠标。

4.1 准备工作

4.1.3 安装FTDI驱动程序

FTDI程序驱动USB-串口线内置芯片，是航华热线风速仪必须安装的部分。其安装过程见附录B。

4.1.4 安装航华CTA04应用软件：CTALab

用户可

- 在系统安装盘内找到setup.exe（或通过上一节给出的网址进行下载，解压后寻找setup.exe文件），点击运行（图C.1a）；
- 依照提示逐步完成安装航华热线风速仪控制程序（步骤见附录C）；

尽量避免把安装目录设在C盘，以减少使用中出现权限不足的问题

- 程序自动安装NI DAQmx 及NI VISA等底层驱动软件
 - NI DAQmx是美国National Instrument公司提供的免费数据采集卡驱动软件。CTALab应用软件调用NI DAQmx内置函数完成采集参数设置、数据采集及保存工作；
 - NI VISA是美国National Instrument公司提供的免费串口通讯编程驱动软件。CTALab 应用软件调用NI VISA，生成控制命令，再经由第4.1.3节中安装的FTDI程序调制后发送给USB 端口，来读取及控制热线风速仪工作参数。
 - 安装过程较长，请耐心等待。

当安装完毕后，

- Windows桌面会出现CTALab应用程序图标（如未出现，请进入安装目录，找到可执行exe 文件）。
- 安装成功后，在安装目录下出现一个data目录。该目录下包含以文本文件形式的探针标定信息、设备缺省运行参数文件等。软件会调用该目录内的文件，用户不要直接修改该目录下文件，否则会出现运行错误。

4.1.5 其他品牌数据采集卡

数据采集卡驱动程序则根据客户的情况不同而有不同选择，如果用户

4.1 准备工作

- 采购了航华DAQ16数据采集卡

设备驱动NI-DAQmx软件及NI-VISA软件已经在第4.1.4节中完成了安装。用户可以直接进入下节（第4.1.6节），使用CTALab软件；

- 没有采购DAQ16数据采集卡，但有National Instrument公司其他相似设备

用户可使用航华CTALab软件。该软件内含的设备驱动程序可以驱动National Instrument公司所有基于计算机的数采硬件，见下面连接（注意，PXI及CompactRIO系统不在该软件支持范围内）

<https://www.ni.com/en/shop/pc-based-measurement-and-control-system.html>

- 不同的NI采集卡有不同的工作方式及采样频率限制，请用户参考第4.4.4节进行设置；
- 没有采购航华DAQ16，但有其他公司（非NI）的数采设备
 - 我们推荐客户不使用CTALab软件，而使用串口调试助手来控制热线风速仪，具体办法见附录D，并自行开发测量、存储、分析等功能；
 - 用户也可考虑使用航华CTALab软件。但仅限于系统参数设置、平衡参数调节、手动标定功能。为了避免程序报错，请用户参考第4.4.4节取消“发送参数后采集输出”选项；

4.1.6 运行CTALab软件

- 在Windows快捷方式、或桌面、或者安装目录下找到并运行可执行文件。

☞ 用鼠标右键点击软件图标，选择“以管理员身份运行程序”，这样避免出现权限问题，导致程序无法存储用户设定的测量参数。

4.2 CTALab框架

4.2 CTALab框架

4.2.1 ①程序控制区

软件界面左上角区域为程序控制区（见图14），这里是软件的“开关”：

- 功能区有两个按钮，自左至右分别为：运行（箭头）与终止按钮（圆形按钮）
- 程序运行后，按钮状态见图15a；
- 用户可按红色按钮随时终止程序运行
- 程序出错后系统也会终止运行，用户需点击“运行”重新运行程序
- 程序每次重新运行后都会从硬盘读取以前存储的参数。建议用户改变参数设置以后按“储存参数”按钮进行保存，否则重新运行时设置结果将被存盘信息（安装目录下的data目录内保存的文本文件）刷新
- 用户完成参数设置以后（且未保存），想恢复原来设置的话，可通过停止运行、重新运行来读取硬盘存储参数

4.2.2 ②功能选项卡

软件共有6个功能选项卡。用户使用时需自左至右，按顺序使用。这6个选项卡分别是：

- 参数设置：将实际连接方式的端口信息录入软件
 - 设置各个通道对应的探头种类：单丝、双丝、三丝
 - 设置各个热线通道对应的采集卡通道
 - 设定热线主机对应的通讯端口COM口
 - 设定温度、压强传感器信号采集口
 - 设定参与实验的通道数量
 - 设定转角机构、移测架机构的通讯端口
 - 设定输出电压（变频器转速控制）端口
- 性能调试
 - 设定各个通道冷态电阻、过热比

4.2 CTALab框架

- 设定平衡参数
- 设定信号后处理，包括放大倍数、偏置、低通滤波截止频率
- 开关电桥，开关方波测试
- 观察方波测试结果
- 观察各个通道状态
- 标定
 - 选定标定方式：自动手动调速、自动手动测速
 - 如果是自动调速：可设定最大输出电压、标定点数
 - 如果是自动测速：可设定压强传感器敏感度系数
 - 观察标定过程
 - 检查标定结果
- 设备
 - 生成或读取移测架坐标文件
 - 调节标定器风机速度
 - 移动坐标架
 - 控制自动标定器转台
- 测量
 - 设定采集参数、设定数据保存文件夹、文件名
 - 选择测量通道
 - 观察实时采集数据及频谱
 - 观察均值、标准差等统计数据
 - 保存测量数据
- 关于
 - 包含软件的版本号等信息。

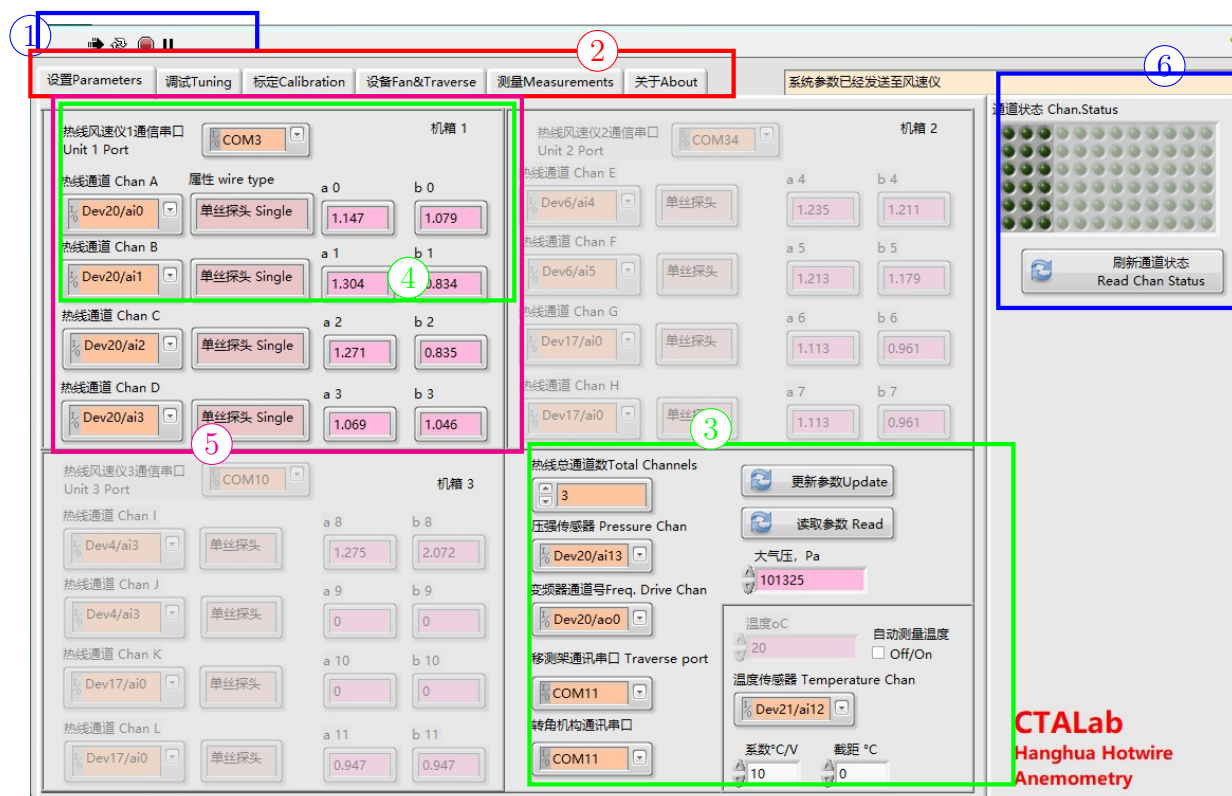
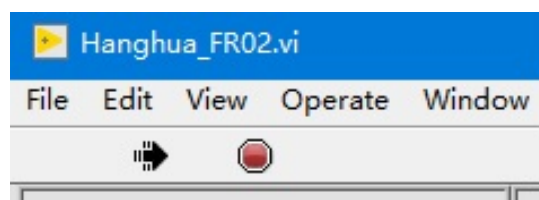
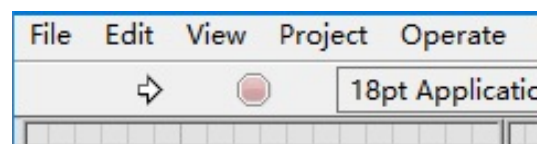


图 14: 软件主界面分为多个功能选项卡。在参数设置选项卡内又分为多个功能区，包括：③ 整体参数设置、④二通道系统热线通道设置、⑤四通道系统热线通道设置、⑥ 通道状态刷新及显示区。



(a) 程序运行中



(b) 程序未运行

图 15: 软件功能区①：程序控制区

4.3 CTALab选项卡1：数据采集参数设置

建议用户首先观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV16u411Y7vW/>

在“设置”选项卡下，用户对热线的一些基本属性进行设定。用户首先设定图14中第③区的数据。具体包括

- (1) 设定系统总通道数。如果使用的是2通道系统，选择2；如果是6通道系统，选择6。但用户做出选择后，前面板上部分组件变灰，仅剩用户指定通道的组件没有变灰，供用户进行设置；
- (2) “自动测量温度”，如果不勾选该选项，用户可在温度一栏中填入目前环境温度。软件根据温度计算空气密度。如果勾选该选项，温度栏变灰，“温度传感器对应采集卡输入通道号”一栏变亮。

温度传感器对应的采集卡输入通道号，为此前用户在第3.1节第4步选择的端口。用户使用热线风速仪前面板温度传感器接口，需要使用CB01导线将Temperature Output端口与一个数据采集仪AI端口相连，并在软件输入端口号。如果用户使用数据采集仪后面板温度传感器接口，用户不用再连接任何导线，直接在软件内输入端口号：AI12。

如果使用TS03温度传感器，该传感器的敏感度系数为 $10^{\circ}\text{C}/\text{V}$ ，截距为 0°C 。这两个常数可在下方修改。

如果用户使用冷线传感器作为温度测量工具。首先输入冷线通道输出连接的数据卡采集通道，然后输入其敏感度系数及截距。这两个参数可通过对冷线进行标定获得。

(3) 压强传感器通道

- 如果用户使用航华DAQ16数采仪，该通道出厂前已经设置好，为Dev*/AI13（*号为采集卡编号，用户需点击该控件右侧下拉符号查看正在使用设备的编号）。用户需要点击下拉符号选择通道号AI13；
- 如果用户使用自备压强传感器，请将传感器的模拟电压输出信号连接到一个AI接口，并将接口通道号在此输入；
- 另外，用户需要输入传感器敏感度系数，具体见第4.5.1节；

4.3 CTALab选项卡1: 数据采集参数设置

- (4) 选择变频器控制线连接的数据采集仪模拟输出通道号;
- (5) 设置移测架的通讯串口。用户可查看“设备管理器”、“端口”信息, 并通过临时拔出移测架控制线来判断具体端口号;
- (6) (自动标定器) 转角机构通讯端口号, 用户可通过上一条介绍方法查询
- (7) 设置大气压。大气压被用来计算空气密度, 对不同海拔城市需要做出相应设定, 以获得正确密度值
- (8) 当用户设定完以上参数后, 可点击“更新参数”按钮。系统会更新内存里的参数, 并将参数存盘。程序再次执行时会自动读取

注意: 如果出现“无权限修改文件”信息, 或者注意到文件并没有被成功保存(如data目录下的Config_Channels.txt文件及Configuration File.txt文件不是最近时间等), 则需要关闭程序, 并重新以鼠标右键点击快捷方式, 在下拉单中选取“以管理员身份运行程序”。

设置好③区内容之后, 用户需要给每个通道热线输出信号指定采集卡通道号。

- 如果用户在③区选择了2通道, 则需在图14中第④区内分别设定2个通道对应的参数;
- 如果用户在③区选择了4通道, 则需要设定⑤区内分别设定4个通道对应的参数。

每个通道的具体参数包括

- (1) 热线输出对应的采集卡AI通道号, 这是用户在做硬件连接时选择的, 见第3.1节
- (2) 该热线通道连接的探头种类
 - 如果其连接的是单丝探头(比如HW1A或HW1D), 选“单丝探头Single”;
 - 如果是HW2A双丝探头中的一个丝, 选择“X型双丝探头1”, 另一个丝连接的通道(比如通道B)的性质, 也需要选“X型双丝探头1”, 这样系统将把这两个通道的信号联系起来计算速度矢量;
 - 同理, 如果连接的是HW3A三丝探头, 则需要选“三丝探头1”。

4.3 CTALab选项卡1: 数据采集参数设置

- (3) 标定参数a与b。这里标定参数是每通道指数标定的结果（见第4.5节）。每次进行标定之后，程序会根据每通道测试结果分别拟合出一组a和b，并自动更新④区显示的信息。指数标定结果通常不会随着室温、气压等环境参数改变，所以用户也可以考虑采用出厂标定结果²。

图14最右侧是⑥区。该区显示目前热线风速仪状态。该区域不会自动刷新。每次软件重启之后，用户需要点击“刷新通道状态”，软件与风速仪通信，获取风速仪通道开关等最新信息。

²出厂退火及标定是收费项目

4.3 CTALab选项卡1：数据采集参数设置



图 16: 调试选项卡分为不同的功能区：① 选择通道、②设置通道工作参数、③发送参数、开关电桥及方波测试、④ 当前通道状态指示灯、⑤ 当前通道电压输出波形图、⑥ 全部通道状态指示灯。

4.4 CTALab选项卡2：热线工作参数调试

表 6: 导线电阻值

探头线长度, m	电阻, Ω
2	0.15
5	0.25
20	1.2

4.4 CTALab选项卡2：热线工作参数调试

建议用户从5:28开始观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV16u411Y7vW/>

用户在“调试”选项卡（图16）发送热线风速仪工作参数、执行开/关电桥动作并测试参热线工作状态。具体流程如下。

4.4.1 功能区①：选择通道

首先，用户在①区选择要进行参数调节操作的通道。选择之后，此选项卡内所有操作只指向该通道。

4.4.2 功能区②：输入热线工作参数

(1) 过热比

通常为1.4-2.0之间的一个浮点数，建议1.6。过热比越大，探头工作温度越高，敏感度越高，对环境温度变化干扰的抵抗能力越高。但是探头寿命会降低。

(2) 冷态电阻。

冷态电阻为安装探头之前，对探头电阻的测量值。测量时记录当时的环境温度，并填在软件中。软件会根据环境温度和测量电阻计算探头在20摄氏度下的电阻。

(3) 导线电阻

如果用户使用2米长的航华CB02A导线，导线电阻约为0.15欧姆(其他阻值见表6)。根据冷态电阻、过热比及导线电阻，软件将计算桥路内变阻器 R_3 的阻值，并作出相应调整。

(4) 平衡参数

4.4 CTALab选项卡2: 热线工作参数调试

- 平衡参数为一个0-5的无量纲数值。数值越大，阻尼越高，系统越稳定。但数值过大会导致系统动态性能下降；
- 最优值与探头阻值、风速等因素有关，需要通过方波测试进行选择；
- 平衡参数推荐值为0.5-1.5之间（建议设为1.0），可保障3.5-10欧姆电阻探头在50m/s 以下可正常工作。该参数在实际操作过程中的选值方法可参考第4.4.3 节中第(7)条及附录F；
- 平衡参数只在首次使用之前调整一次即可；
- 通道在更换新的探头以后，需要重新调整平衡参数。

(5) 信号调制

某些情况下需要对输出的桥顶电压进行调制后才能正确采集。调制内容包括放大、偏置与低通滤波：

- 输出信号增益（gain）
通常情况下热线输出信号强度足够大，不需要做放大处理。但个别特殊情况下桥顶信号输出较弱，需要通过放大信号来减小采样误差。可选择的放大倍数包括1（原始信号，无放大）,2,4,8,16。通常情况下，建议保持为1。
- 输出信号偏置（offset）
 - 偏置电压用于调整电桥平衡状态下的输出电压，使其更接近输出范围(-5~5V) 的中间值，从而保证测量过程中电路为响应流速变化产生的电压波动不超出输出范围；
 - 偏置电压设置范围为0-5，单位为V。当偏置电压不为0时，输出电压等于桥顶电压减偏置电压；
 - 例：如果偏置电压为0V时桥顶电压为4.2V，当偏置电压设为3.0V，桥顶电压降为1.2V。
- 低通滤波截止频率（Low-pass filter）。
风速仪内置截止频率为1,10,100,1k, 10k低通滤波器。用户可选filter off 关闭滤波器。

4.4 CTALab选项卡2：热线工作参数调试

4.4.3 功能区③：电桥及方波开关

- (1) 在设置好②区参数以后，用户需要在开启“桥路开关”之前，点击“发送参数”将参数发送给风速仪。

若未发送新的参数，而是直接打开桥路开关，电桥将使用旧信息设置探头工作电阻，探头有被烧毁的风险。

- (2) 点击发送以后，右上角提示栏会显示“信息已经成功发送给风速仪”。发送过程中也会听到风速仪发出轻微的继电器切换的tita 声音。
- (3) 成功发送信息给系统之后。可点击“桥路开关”打开电桥。
- (4) 电桥成功打开之后：
 - (a) 软件上“桥路开关”按钮灯亮；
 - (b) 屏幕④区内的Bridge On 灯亮；
 - (c) 软件右上角“通道状态”第一排灯中的一个（如果是A 通道，则是第1列）灯亮；
 - (d) 风速仪前面板该通道对应的第一个指示灯Bridge On灯亮
- (5) 如果系统在正常工作状态下，则：
 - (a) ④区Bridge Status亮；
 - (b) 软件右上角“通道状态”第二排该通道对应的指示灯亮；
- (6) 如果以下指示灯亮，说明风速仪桥顶电压过低。形成原因大概率是探头或探头线已断。需要重新测量探头电阻，以确定是否损坏
 - (a) 风速仪前面板该通道对应的第三个指示灯（TOB Low）亮
 - (b) 软件④区左数第三个灯TOB Low亮
 - (c) 软件右上角“通道状态”第三排该通道对应的指示灯亮。
- (7) 方波测试

方波测试是通过在电桥中引入一个可以破坏电桥平衡的方波信号，并观察系统如何恢复平衡来确定系统频响的一种测试方法。该方法通过观察电桥恢复平衡的能力，根据恢复平衡的过程曲线来计算电桥的特征响应时间。具体见附录F。操作过程如下：

4.4 CTALab选项卡2: 热线工作参数调试

- (a) 用户将探头暴露在实验研究中使用的最大风速下
 - (b) 点击“方波测试”打开内置方波信号发生器，产生频率500Hz、幅度100mV的方波信号加载在桥路 e_1 位置（图1），周期性破坏桥路平衡；
 - (c) 打开方波后，用户需要再次点击“发送参数”，系统发送参数后会采集输出电压并显示在⑤区图内。其中向上的尖刺为系统在方波上沿推动下偏离平衡点后自动恢复平衡的结果，而向下尖刺则为方波下沿影响所致；
 - (d) 附录F给出了桥路在失去平衡后恢复平衡的过程图。该过程与系统的响应能力息息相关：频响高，恢复的快。系统恢复平衡的时间被称为特征时间。附录F还介绍了如何评价系统是否平衡及系统特征时间。
- (8) 方波测试结束后，用户需点击“方波开关”，关闭测试信号。
 - (9) 方波测试仅需在新探头首次使用时进行。不必每次实验都进行方波测试。
 - (10) 在发送参数、开桥路、方波测试后，可在①区选择下一个通道进行设置。
 - (11) 完成所有通道设置之后，可进入下一选项卡“标定”

4.4.4 功能区⑥：自备采集卡设置

每次用户点击“发送参数”以后，软件会利用数据采集卡采集一定数量热线输出信号，供用户参考参数调节效果。如果用户自备其他公司数据采集卡，软件无法支持这一功能。请用户点击⑥区“发送参数后采集信号”选项，关闭该功能。

如果用户自备NI公司数据采集卡，用户可保持“发送参数后采集信号”点亮状态。但用户需要参考自有采集卡的指标，对“采集频率”及“采集卡工作方式”进项选择，比如：

- 标配的NI USB6211采集卡的最大采样频率为250000Hz，“采集卡工作方式”为RSE
- 廉价的NI USB6009的最大采样频率为48000Hz，“采集卡工作方式”根据接线方式不同而不同
- NI USB4431的最大采样频率为100000Hz，“采集卡工作方式”为Pseudo-differential。

4.4 CTALab选项卡2：热线工作参数调试

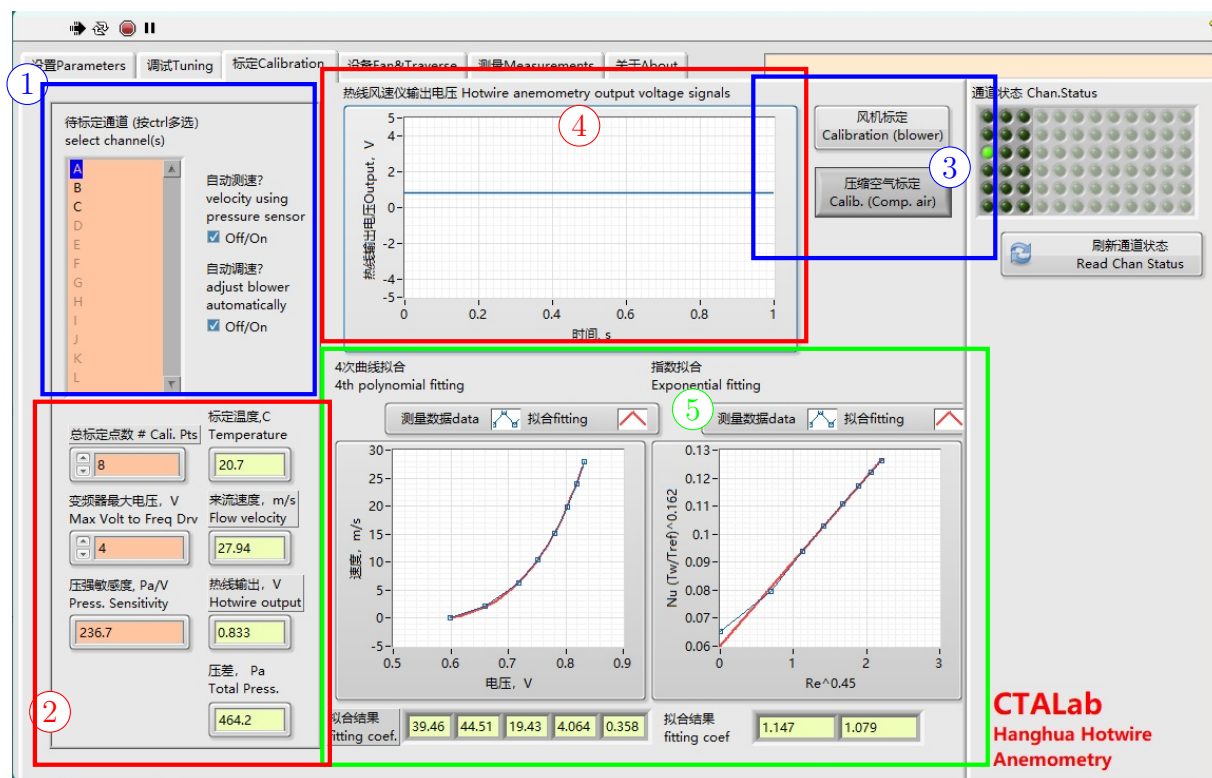


图 17: 标定界面分为不同的功能区：①选择通道及标定方法、②设定标定参数并观察标定过程中输出的均值、③ 开始标定按键、④标定过程中热线实时数据、⑤ 两种不同的标定结果。

4.5 CTALab选项卡3：标定

在用户完成参数设置、开启热线通道并进行了调试之后，下一步可进行探头标定。完成标定过程可以确定热线风速仪的输出电压与气体流速的对应函数关系。标定选项卡界面见图17。根据用户选购的配件及使用需求，航华CTA04提供多种不同标定方式（见表7），包括：

- (1) 全自动标定：软件自动调节风机风速、自动测量风速、记录热线风速仪输出电压均值，自动拟合曲线并保存拟合结果。该方法适用于采购了全套航华设备的低速（速度小于120m/s）测量用户，详细描述见第4.5.1节；
- (2) 压缩空气标定：该方法适用于采购了全套航华设备的中、高速（速度大于120m/s）测量用户，详细描述见第4.5.2节；该方法利用压缩气瓶的自然放气过程，随着标定器出口速度的降低，软件自动测量风速、记录热线风速仪输出电压均值，自动拟合曲线并保存拟合结果；
- (3) 手动调速、自动测量风速、自动测量电压：用户需要手动调节风机转速（或压缩空气管路阀门开度），使探头暴露在一系列不同风速条件之下，软件自动测量风速并对风速和输出关系进行拟合并保存。该方法适用于没有购买航华标定器的客户，详细描述见第4.5.3节；
- (4) 手动调速、手动测量风速、软件测量电压：用户需手动调节风速，并使用自备仪器测量风速并将测量结果输入电脑。软件根据风速仪的电压输出和用户输入的风速数据进行拟合，获得标定曲线。该方法适用于没有购买航华标定器的客户，详细描述见第4.5.4节；
- (5) 手动测速、手动输入风速、手动测量电压：用户需手动调节风速，并使用自备仪器测量风速并输入电脑软件，并使用自备仪器测量风速仪输出电压的时均值。最后，用户使用电压和风速数据进行拟合，获得标定曲线。该方法适合只有航华热线主机的用户，详细描述见第4.5.5节；

软件对采集（或用户输入）的风速 U 与输出电压 E 的关系进行拟合。CTALab软件提供两种不同的拟合方法，分别是

- (1) 四次曲线标定法

4.5 CTALab选项卡3：标定

表 7: 不同用户群体推荐的标定方式（✓:采购，✗:未采购）

客 户 群 体	CTA04主 机箱	DAQ16 或NI 卡	CR04标 定器	气源	标定方式	章 节
1	✓	✓	✓	风机	全自动标定	4.5.1
2	✓	✓	✓	压缩气瓶	压缩空气标定	4.5.2
3	✓	✓	✗	风机	人工调速、自动测 量风速及输出电压	4.5.3
4	✓	✓	✗	自 备 其 他 设 施	人工调速、人工输 入速度、自动测量 输出电压	4.5.4
5	✓	✗	✗	自 备 其 他 设 施	全人工	4.5.5
6	✓	✗	✗	无需	免标定测量法	4.5.6

软件通过对 $U - E$ 关系使用一个四次曲线进行拟合，获得5个常数，并将5个常数保存为文本文件。在实际使用过程中，这些常数将被用来把电压转为气流速度，具体方法见附录H；

(2) 指数标定法

软件不直接对电压和速度进行拟合，而是使用输出电压 E 计算传热量，进而获得表征换热强度的 Nus 数并拟合 Nu 与雷诺数 Re 之间的线性关系，具体见附录I；

(3) 两个方法各有优缺点，具体见附录I.2。

标定过程，根据用户设备的不同分为以下几个方案，每个方案一个小节。操作界面见图17。

4.5.1 自动标定

建议用户观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV14N411k7D3/>

自动标定指的是软件系统在收到“开始标定”指令后自动改变风速、自动测量风速及热线输出电压的均值、自动拟合获得标定结果，并将结果存盘的过程。用户需在图17内①区进行如下选择

4.5 CTALab选项卡3: 标定

- 选择要标定的通道。如果用户计划一次标定多个探头，可按住ctrl键用鼠标点击下一个通道；
- 点击“自动测速”和“自动调速”选项，把二者都打开。

“自动测速”和“自动调速”两个圆灯为按钮

用户在②区橙色区域中输入

- (1) 计划进行标定的点数，通常为8-12；
- (2) 变频器最大电压，单位为V，建议4-5。航华CR04标定器，如果使用10mm 射流喷口，4V对应速度为30m/s，5V对应速度40m/s左右，10V对应120m/s左右。

注意，超过5V以后，可能会对压强传感器造成损害，请三思后行。

- (3) 压强敏感度系数，单位为 $[Pa/V]$ 。软件利用该系数将压强传感器输出电压转为压强。软件系统使用压强计算标定器出口风速。
 - 如果用户使用航华DAQ16 数据采集仪，请从前面板标签读取该系数。
 - 如果使用自备压强传感器，请先标定，并将标定结果至此输入。
- (4) ②区黄色区域内显示框显示标定过程中测量的来流温度、来流速度、热线输出电压以及用来计算来流速度的来流总压。标定过程中，每个风速测量结束后更新数据。

在做好以上设置以后，用户需要检查硬件是否为标定做好准备，包括

- (1) DAQ16数采仪前面板压强输入H口是否已经通过测压软管与标定器总压管相连；
- (2) DAQ16前面板AO端口是否已经通过BNC 导线与变频器Fv及Gnd连接，具体见图6；
- (3) 变频器参数P-003的值是否已经设置为002，且变频器RUN键是否已经按下（按下后，前面板最下方会有绿灯闪烁），具体见附录G；

4.5 CTALab选项卡3: 标定

以上检测都通过以后，用户可点击③区“风机标定”。系统在暂停几秒钟之后，开始发送模拟电压信号到指定AO端口控制风机转速，并逐步改变风速。每次改变风速后，软件采集压强传感器及热线风速仪的输出电压。当完成所有设定风速下的采集后，软件关闭风机，并计算标定曲线。在标定过程中

- (1) 系统采集的热线输出电压信号在④区显示；
- (2) ②区内黄色显示框显示标定过程中测量的来流温度、来流速度、热线输出电压及来流总压；
- (3) 右上角状态栏会汇报当前标定进度。

标定结束后，风机停止转动。软件根据速度-输出电压数据计算每个被选通道的标定器曲线

- (1) 每通道速度-输出电压原始数据显示在⑤区左侧图中，四次拟合曲线为实线，拟合结果（5个常数）显示在该图下方；
- (2) 以原始数据计算的修正后的 Nu 与 $Re^{0.45}$ 数据点以方块的形式显示在⑤区右侧，线性拟合结果（a与b）显示在图的下方；
- (3) 线性拟合结果（a与b）同时显示在“设置”选项卡中该通道对应的a与b中。关于这两个系数的介绍，见第4.3节；
- (4) 两种标定结果以文本文件保存在安装目录下的data目录中，再次运行软件并选取该通道后会自动调取。
- (5) 如果当前标定的是A通道
 - 四次曲线标定结果保存在coef1.txt文件中
 - 标定时来流的平均温度保存在coef1_temp.txt 文件中
 - 如果标定的是B通道，上述文件名的数字将为2
 - 指数标定结果（a与b）保存在power_coef.txt的第2列中

4.5 CTALab选项卡3: 标定

4.5.2 压缩空气标定

压缩空气标定方法是一种全自动标定方式，但与第4.5.1节使用风机作为气源不同，本方法使用压缩空气作为气源。该方法主要服务已经采购了DAQ16数采仪、CR04 标定器以及有高速测量（速度大于120m/s）需求的客户。操作方法如下：

- (1) 客户首先使用可连接压缩空气气瓶的CR04标定器尾端板替换掉可连接波纹管的端板，并使用压缩空气软管连接压缩空气气瓶和标定器空气入口；关闭阀门（气瓶与标定器之间需要设置手动截止阀1个），使气瓶和标定器之间不连通；
- (2) 使用空压机为气瓶加压至所需要的压强，加压过程中保持阀门关闭，加压结束后关闭空压机电源（或关闭空压机与气瓶之间的阀门）；
- (3) 检查DAQ16数据采集仪内置压强传感器最大量程是否在合理范围。压强传感器最大量程一般分为三种：1kPa、2.1kPa和5.5kPa。如果用户需要标定压缩空气，建议使用自备的量程在50kPa以上的压强传感器
- (4) 检查CTALab软件，检查各通道是否已经打开；
- (5) 依照图??，将桥比scale调制100:1，并发送给风速仪，使其进入大电流工作模式；
- (6) 点击③区“压缩空气标定”按钮，软件提示保持阀门关闭，采集压强传感器零点，见图18a，确定阀门关闭后点击OK继续；
- (7) 出现图18b提示。请先打开阀门，在标定器出口形成高速射流。形成射流后，点击OK 继续；

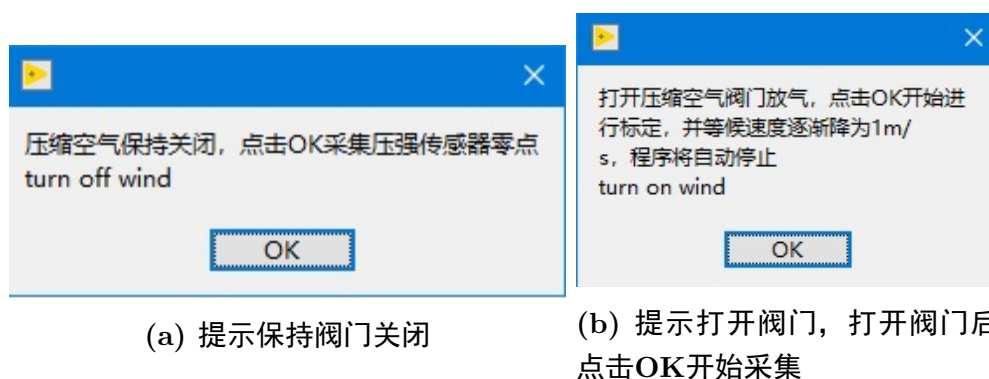


图 18: 压缩空气标定过程中出现的提示框

4.5 CTALab选项卡3: 标定

- (8) 软件开始采集标定器总压及风速仪输出电压。每秒采集一组，并求时均值；
- (9) 随着气瓶压强降低，标定器出口速度随时间逐渐减小。当压强小于1Pa时，标定自动结束；
- (10) 软件通过拟合时均流速与时均电压的关系，给出标定结果，并存盘。

4.5.3 手动调速、自动测速标定

手动调速功能适用于购买了航华DAQ16采集仪，计划使用已有标定设施而未购买航华CR04标定器的客户。这种情况下，不需要连接采集仪AO端口与客户风洞设施的变频器（如果用户掌握该技术，可自行尝试）。客户需执行如下操作：

- (1) 将已有风洞系统（收缩段前后）测压管与DAQ16采集仪前面板的压强输入端H 及L 相连；
- (2) 点击①区“自动调速”圆形按钮，使其关闭，同时保证“自动测速”灯亮，见图19a；
- (3) 参照上节（第4.5.1 节）做好其他设置后，点击“风机标定”按钮开始标。

开始标定后



图 19: 手动调速、自动测速标定过程中出现的提示框

4.5 CTALab选项卡3: 标定

- (1) 风机并不会自动调速。软件会弹出提示窗，指挥用户人工调速，见图19c；
- (2) 用户可在软件指引下，首先关闭风机、保持风速为零、逐步增加风速直至标定结束，见图19d-图19f；
- (3) 采集所有数据后，风速仪进行拟合，给出标定结果，并存盘。存盘方法与第4.5.1节一致。

4.5.4 手动调速、人工测速、软件采集电压标定

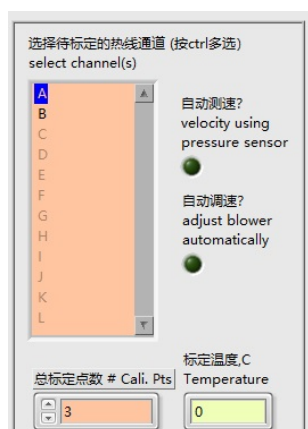
建议用户观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV1Dk4y1p7VP/>

此标定方法适用于未购买航华CR04标定器及DAQ16数据采集仪的客户。客户需将线探针安置在一个自备的测试环境中进行标定。该环境的风速可变，探头所在位置的局部风速可通过毕托管等方法测量。客户可

- (1) 将毕托管安置在探针附近，最好并排放置，互不干扰。在保证不损坏探头的前提下距离越近越好
- (2) 考虑使用一个手持测压表来直接读取毕托管风速
- (3) 在软件“标定”选项卡内，点击“自动调速”及“自动测速”圆形按钮将二者都关闭，见图20a；
- (4) 风机并不会自动调速。软件会弹出提示窗指挥用户手动调速，见图20b与20c
- (5) 调节风速以后，软件也不会自动测速，而会跳出弹窗，提示用户输入速度，见图20d
- (6) 用户可在软件指引下，首先关闭风机、保持风速为零、逐步增加风速直至标定结束
- (7) 采集所有数据后，风速仪进行拟合，给出标定结果
- (8) 最少标定点根据标定方法的不同而不同
 - 指数标定：最少3个采集点，1个零风速，1个低速,1个高速。
 - 四次曲线标定：最少8个采集点，1个零风速，7个自低到高的风速值。

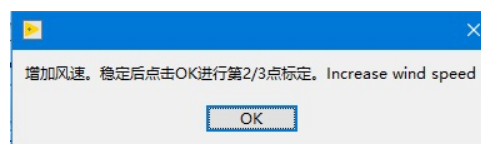
4.5 CTALab选项卡3: 标定



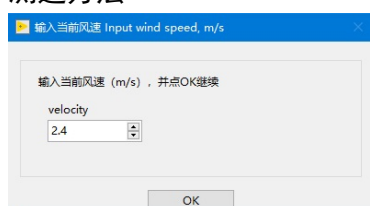
(a) 选择通道号及调速、测速方法



(b) 提示关闭风机



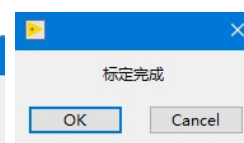
(c) 提示增加风速



(d) 提示输入风速



(e) 提示继续增加风速



(f) 提示标定过程结束

图 20: 手动调速、手动测速标定过程中出现的提示框

4.5.5 全手动标定：手动调速、人工测速、人工采集电压

使用实验室现有的工具，人工测量并记录风速及电压输出的均值，将其放入一个excel表中，人工拟合。我们建议采用万用表、示波器、NI之外其他品牌的采集卡采集风速仪输出的电压。附录H给出了一个具体例子。

4.5.6 免标定测量

当用户没有标定设备、或者很难经常标定（比如探头被埋设在管道内等区域），用户可考虑使用满标定测量技术。该技术原理见附录I，技术要点如下：

- (1) 适用于该方法的探头及导线需航华原厂出品，探头已经在出厂前经过24小时退火处理，并进行了标定。标定报告中已经明确给出了标定结果：一对常数a与b；

注意，出厂前的退火处理与标定均为收费服务内容。

- (2) 实验中必须使用TS02温度传感器监控来流温度；
- (3) 使用前在“参数设置”选项卡中填入出厂标定后给出的a，b值

4.6 CTALab选项卡4：设备

- (4) 测量过程中选择“指数标定”

4.6 CTALab选项卡4：设备

设备选项卡界面见图21。该界面包括如下几个功能：

4.6.1 ①区：建立移测架坐标文件

- (1) TM02移测架

移测架由一台运动控制器及若干个步进电机驱动的移动模组组成。用户在①区设置移测架移动模组的坐标网格；

- (2) 这里设定的坐标网格是正交且等距的。用户设置x, y, z三轴的起始、终止点坐标，并指定间距。用户点击“生成”之后，软件形成一个大小为[3, N]的二维数组（即3行N列），N为测点数量。并将其保存在安装目录下的data目录内文本文件motor_positions.txt中。
- (3) 风速采集过程中，当用户选择了“移测架”采集方法后，系统读取该坐标文件后根据数组的列数自动设定测点数量。移测架从[0,0,0]位置出发，依次移动到文件内每列三个数字形成的坐标位置，并等待热线风速仪测量风速，测量持续时间为“每点采样时长”。全部测量结束后，移测架回到初始位置。
- (4) 如果用户希望测量中先测量一个xy平面数据再，移动到下一个xy平面。选择测量顺序为x-y-z。如果逐步测量每个xz平面，测量顺序选x-z-y
- (5) 如果用户只测量1个二维平面，可设定第三维起点和终点坐标均为0（间距设不为零的任意数），见图21，1区
- (6) 移测架坐标文件仅在如下情况下才会被读取：用户在“测量”选项卡中“下一组开启方式”选择栏中选择了“移测架架”。如果选择“自动”，或“手动”，软件不会读移测架坐标文件
- (7) 用户也可使用其他工具自行建立移测架坐标文件

- 如使用Matlab，请将坐标文件设为大小为3*N数组pos，并以如下命令保存至motor_positions.txt 文件

```
dlmwrite('motor_positions.txt', pos, 'delimiter', '\t')
```

4.6 CTALab选项卡4：设备

- 如使用Excel，请将坐标文件设为3行，N列数据，3行分别为x，y，z位置数据。建立好数据文件后，另存为“以制表符Tab 分隔的文本文件”
- 建立好文件后，点击“导入表格文件”导入坐标，过程见附录J.
- 用户也可将文件直接拖入安装目录下的data目录并覆盖原文件。

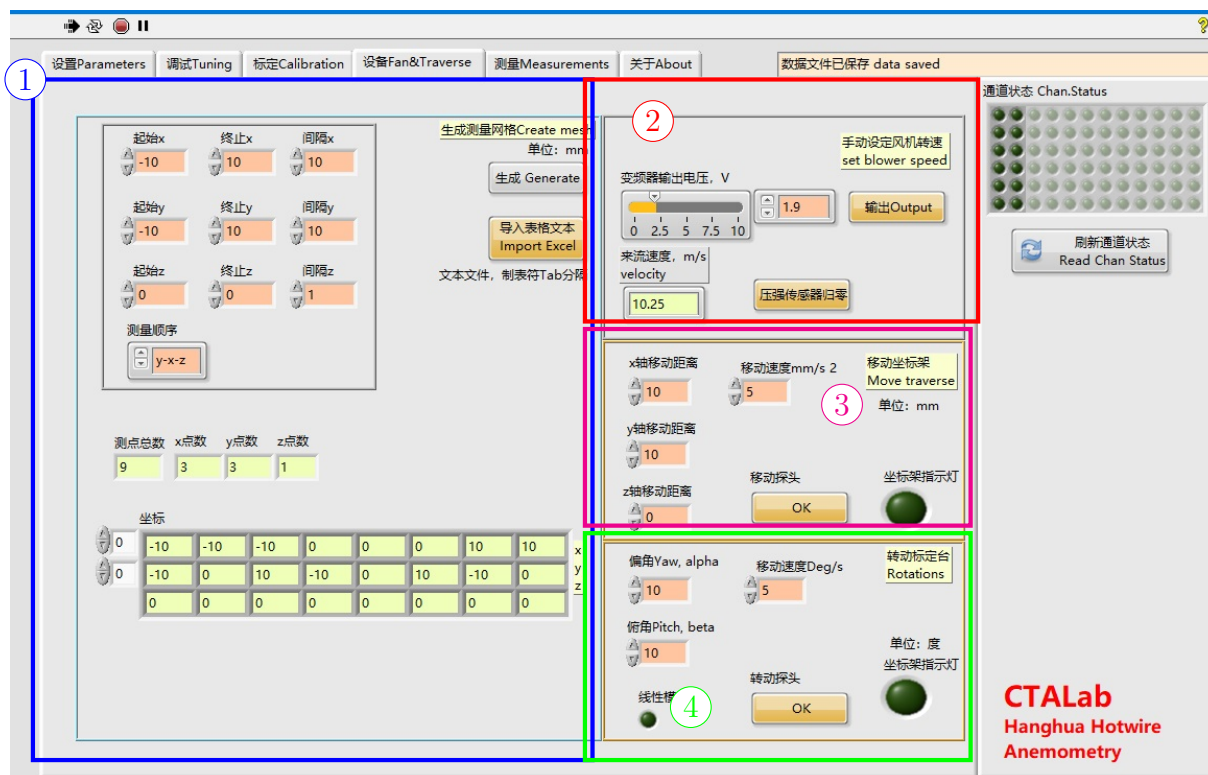


图 21: 设备选项卡分为不同的功能区：①移测架坐标生成区、②风机转速设定区、③ 坐标架移动区、④转角机构转动区。

4.6.2 ②区：手动改变CR04/CR05标定器风机转速

为了服务客户在系统调试过程中需求，软件包含手动调风机转速功能。用户可通过手动设置AO端口输出电压来改变标定器射流出口速度（具体端口在“设置”选项卡，见第4.3节）。

用户可以通过拖动或者输入数字形式在“变频器输出电压”一栏中输入0-10V电压。CR04标定器，5V约为40m/s，**建议控制在5V 以内**，以免损坏压强传感器。设置好以后点击“输出”，风机开始转动。

需要注意的是，变频器的工作模式需要设在“自动”状态，具体设置方法见附录G。

4.6 CTALab选项卡4: 设备

如果需要精确测定流速，建议在点击“输出”之前，先点击“压强传感器归零”，待归零以后再点击“输出”

4.6.3 ③区：手动改变TM02移测架滑块位置

用户可在③区设置x,y,z三轴移动距离，并点击“移动坐标架”来改变移测架滑块位置。单位为毫米。移动速度推荐5-20mm/s之间，根据负载不同进行选择。

移测架控制器端口号（具体端口在“设置”选项卡，见第4.3节）需正确设置。移动结束之后，“坐标架显示灯”亮。

坐标架没有安装限位开关，用户需时刻关注滑块位置。

4.6.4 ④区：手动改变CR05标定器转角机构角度

如果用户使用的是CR05标定器，可在④区设置标定器俯仰机构的转动角度来直接改变标定探针姿态。单位为度。移动速度推荐5度/秒。控制器端口号（具体端口在“设置”选项卡，见第4.3节）需正确设置。设置转动角度和速度之后，点击“转动探头”。移动结束之后，“坐标架显示灯”亮。

坐标架没有安装限位开关，用户需时刻关注滑块位置。

4.7 CTALab选项卡5：测量

4.7 CTALab选项卡5：测量

测量选项卡见图22。通过在该选项卡下操作，用户可以执行设定测量参数、测量并保存等功能。

4.7.1 ①区：选择测量通道并设置采集方法

建议用户观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV1gz4y1u7yy/>

用户首先要选择通道。选择方法为用鼠标点击要使用的通道。如果同时测量的通道数超过1，需按住ctrl键点击下一个通道。选择通道后用户需设定采集参数。这些参数包括：

采样率 采样频率为每秒钟采集的样本数，单位为赫兹Hz或样本数每秒Sample/s。采样率与研究目标息息相关：

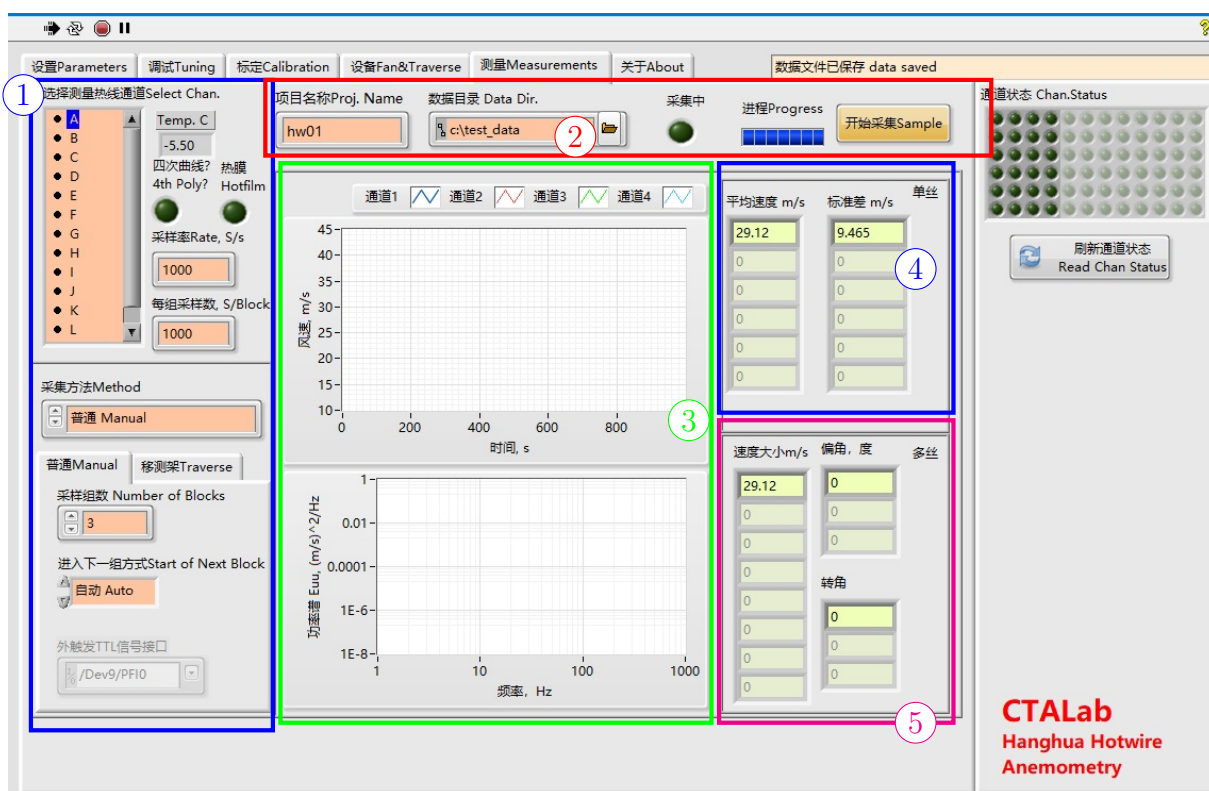


图 22: 软件采集选项卡界面分为不同的功能区：①设置采集参数、②设置数据文件参数及采集操作、状态显示区、③ 实时数据及功率谱显示区、④单丝探头测量结果显示区、⑤ 多丝探头测量结果显示区。

4.7 CTALab选项卡5：测量

- 如果研究的是圆柱绕流中大尺度旋涡的发展规律，采样频率应在涡脱频率10倍以上。
- 如果研究的是高雷诺条件下的Kolmogorov尺度，建议采用20kHz以上采样频率，甚至更高。用户可通过观察频谱幅值是否出现拐点做出判断是否应该使用更大采样频率
- 注意，DAQ16总采样频率为250kHz，如果同时使用6个通道采样，每个通道最大频率为 $250/6=41.6\text{kHz}$ 。采样频率设置不能超过此值
- 另外，为了加快谱分析效率，采样频率通常为2的n次方，常用的数字有1024,2048,4096,8192等

每组采样数 为了增加长时间采样的安全性（避免内存不足问题），通常将总采样时长分为若干个数据组，分别采集并分别保存。每组采样数=采样率*每组采样时长。如果每组采样时长为1 秒，采样频率为8192Hz，每组总采样数则应设为8192个

采样组数 采样组数与每组采样时长一起决定了采样的总时长：采样的总时长=采样组数*每组采样时长。如果每组采样时长为1秒，采样组数为64，总时长为64秒。

下面，我们以采样频率8192Hz、每组采样时长1 秒、采样组数64为例介绍不同“采集方法”的区别：

- (1) 用户在“采集方法”中选择了“普通”方法，并在“普通”选项卡中“进入下一组”方式中选择“自动”（图23a和23b）：

系统采集完每一组1秒数据（每通道8192 个）并保存后，暂停约0.1秒，之后自动开始采集下一组数据。依次循环，直至采集完所有64组数据。采集过程中，右上角文本区提示进程；

- (2) 用户在“采集方法”中选择了“普通”方法，并在下面“进入下一组”方式中选择“手动”：

系统开始采集每一组数据之前，系统弹窗通知用户（图23c），待用户点击OK后，开始采集数据（每通道8192 个），直至采集完所有64组数据。过程中，右上角文本区提示进程。

在每次点击Ok之前，用户可利用等待时间人工移动探头。

4.7 CTALab选项卡5: 测量

- (3) 用户在“采集方法”中选择“普通”方法，并在下面“进入下一组”方式中选择“外触发”（图23d）：

系统开始采集每组数据之前，采集卡的PFI0 数字输入端口扫描输入信号（部分DAQ16采集仪前面板的最右下端的BNC接口连接与采集卡PFI0端口相连，该BNC接口下方有PFI0字样粘贴），一旦发现一个TTL 方波信号的上升沿，立即开始采集（每通道8192 个），采集完成后并保存后等待下一个方波信号的上升沿，直至采集完所有64 组数据。过程中，右上角文本区提示系统waiting trigger signal。

- (4) 用户在“采集方法”中选择“移测架”方法（图23e）：

系统采集完每组数据之后（每通道8192 个），将根据用户设置的移测架坐标逐步移动位置。移动结束后，自动开始采集下一组数据（每通道8192个），直至采集完所有位置。如果坐标文件包含9个坐标点信息。每个位置采样时长为1秒，总采样时长为 $9 \times 1 = 9$ 秒。过程中，右上角文本区提示进程。

关于移测架的使用，用户参考如下视频：

<https://www.bilibili.com/video/BV1594y1r7ig/>

第①功能区另一个重要参数是“热膜”与“四次曲线”两个选项。这两个选项决定了采用什么方法进行输出电压到流速的转化。如果用户点亮了“热膜”选项，软件将不进行转化，直接显示并保存热线风速仪的输出电压。在“热膜”选项灯灭的前提下，如果用户点亮“四次曲线”选项，系统将使用四次曲线标定结果进行电压-风速转化，否则将使用指数标定结果。两种方法的优缺点及选择建议见附录I.2。关于“热膜”与“四次曲线”两个选项的选择，建议用户观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV1T44y1F7au/>

4.7.2 开始测量

用户点击“开始采集”，系统进入测量状态②区左侧“采集中”灯亮，每组采样结束后进程表更新一次。

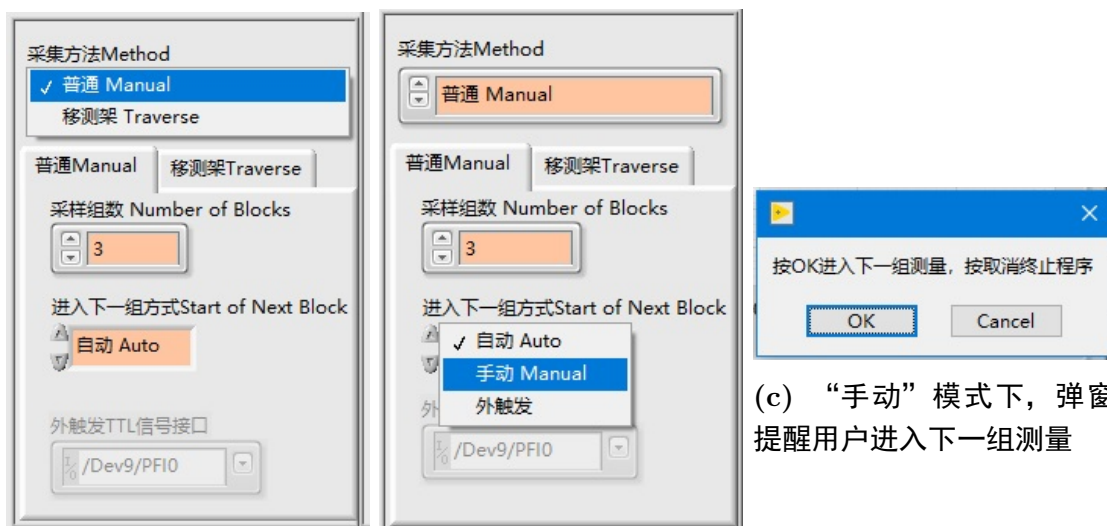
4.7.3 数据及能谱实时显示

图 22第③功能区上图显示的是系统采集的实时数据，每组测量结束之后更新

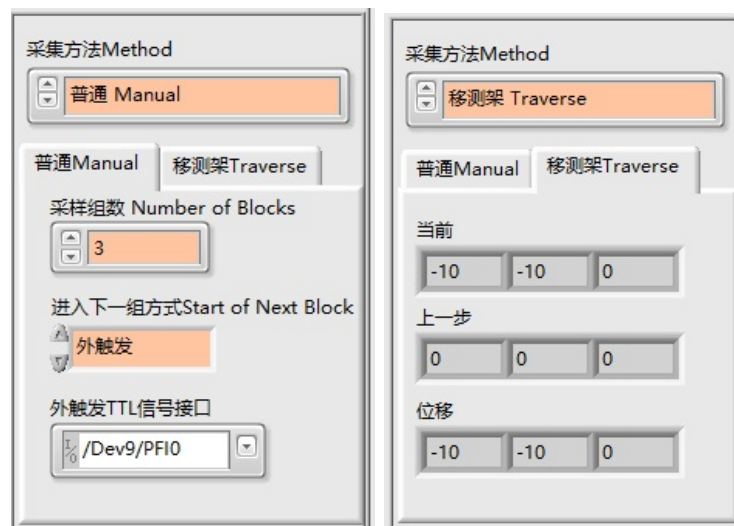
- 如果用户使用单丝热线探头，图中显示的是每个探头测量的每组数据 $u_1(t), \dots, u_n(t)$ ，单位 $[m/s]$ ，

4.7 CTALab选项卡5：测量

- 左侧横轴为时间 t ，单位为[s]；
- 如果用户使用双丝热线探头，图中显示的是实时速度在测量平面内的两个分量 $u(t), v(t)$ ，单位[m/s]。速度分解方式见附录K；
- 如果用户使用三丝热线探头，图中显示的是实时速度的三个分量 $u(t), v(t), w(t)$ ，单位[m/s]。速度分解方式见附录K。



(a) 用户在采集方法中选择 (b) 用户在“普通”选项卡
了“普通” 中选择了“自动”



(d) 用户在“普通”选项卡 (e) 用户在采集方式中
中选择了“外触发” 选择了“移测架”

图 23: “测量”选项卡中的1区：测量参数设置

4.7 CTALab选项卡5：测量

图 22第④功能区下图显示的是实时数据的功率谱密度分布（Power Spectral Density）

- 下方为速度分量 u 的功率谱 E_{uu} ，单位为 $[(m/s)^2/Hz]$

$$E_{uu} = |fft(u - U)|^2 / N \quad (3)$$

这里， fft 为快速傅里叶变换， N 为采样数量， U 为 u 的时均值： $U = \bar{u}$ 。

- 下方横轴为频率 f ，单位为 $[Hz]$ 。

图 22第④、⑤功能区显示的是统计数据（另见图24）

- 如果用户使用单丝热线探头，每组测量结果的均值（左侧）和标准差（右侧）在第④功能区显示。自上至下分别为第1、2、3.. 通道，见图24a。
- 如果用户使用双丝热线探头，每组测量的速度大小的均值 $|\vec{V}|$ （左侧）、来流速度与探针轴线的偏角在第⑤功能区显示（右上），见图24b。
- 如果用户使用三丝热线探头，每组测量的速度大小的均值 $|\vec{V}|$ （左侧）、来流速度与探针轴线的alpha-beta角在第⑤功能区显示（右上），theta和psi角在右下显示。角度定义见具体见附录K。



(a) 单丝热线探头测量结果的统计量 (b) 双丝和多丝探头结果的统计量

图 24: 测量结果的统计量

4.7 CTALab选项卡5：测量

4.7.4 选择文件保存方法

建议用户观看如下视频

<https://www.bilibili.com/video/BV13j411z7MU/>

在②区，用户可在“数据目录”内设置保存数据文件的目录。如果该目录不存在，系统在开始采集前会弹窗提醒用户，如用户同意，软件会自动建立该目录。用户还可在“项目名称”内设定数据文件名前缀，以保证每次采集的数据文件都有不同的文件名。具体见如下示例：

- 数据存储在用户指定的目录c:\test_data下，见图 22。文件均以项目名为文件名前缀（本例为hw01）
- 共有两种文件被储存：统计数据文件（文件名=项目名_stats.txt，以下简称统计文件）以及实时数据文件（文件名=项目名+测点号.txt，以下简称数据文件），入图25所示。下面对两种数据文件做详细介绍
- 统计文件

- 如果是单通道测量，统计数据内含一个大小为[测点数量，8]的二维数组。8列数据只有前4列是有效值，分别对应序号、风速平均值[m/s]、风速标准差[m/s]、测量时的温度[摄氏度]。后四列为无效数字

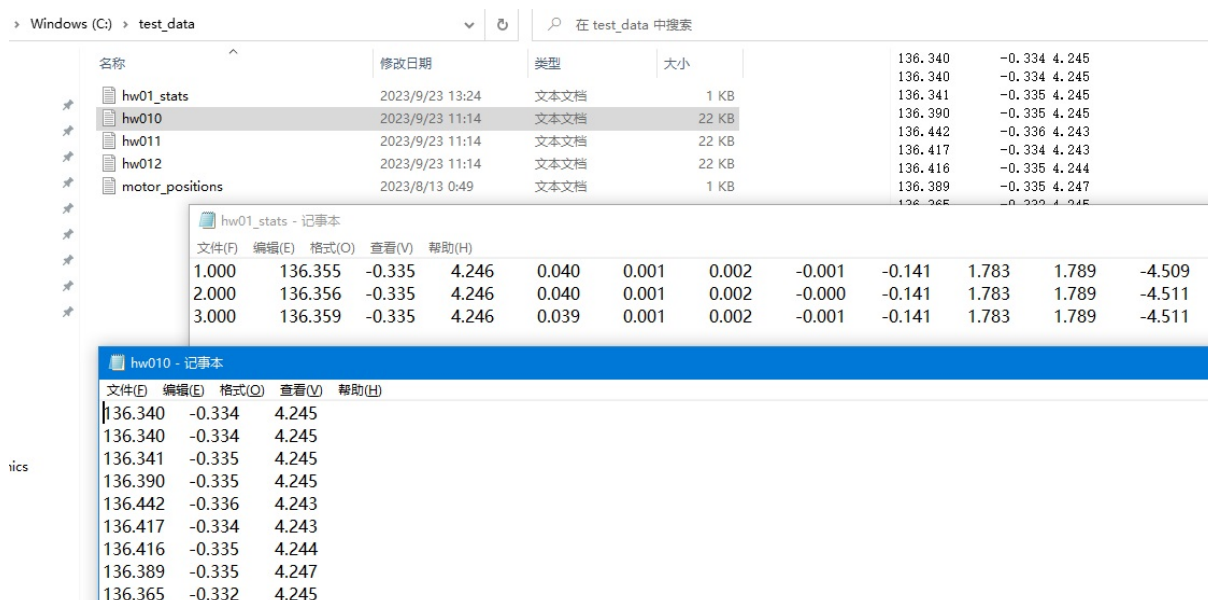


图 25：三丝探针在3个测量点采集的数据文件被保存在用户指定目录下

4.7 CTALab选项卡5: 测量

- (b) 如果是A、B双通道测量，且两通道皆为HW1A单丝探头（不是HW2A双丝探头），统计数据内含一个大小为[测点数量, 10] 的二维数组。10列数据分别对应序号、通道A风速平均值[m/s]、通道B风速平均值[m/s]、通道A风速标准差[m/s]、通道B风速标准差[m/s]、测量时的温度[摄氏度]。后四列为无效数字
- (c) 如果是A、B双通道测量，且两通道分别连接一支HW2A双丝探头的两个钨丝，统计数据内含一个大小为[测点数量, 10] 的二维数组。10列数据分别对应序号、风速水平分量平均值U[m/s]、风速垂直分量平均值V[m/s]、风速水平分量标准差[m/s]、风速垂直分量标准差[m/s]、测量时的温度[摄氏度]。后四列数字中第1、3列数字相同，均为偏角，第2、4列数字无效
- (d) 如果是A、B、C三通道测量，且三通道分别连接一支HW3A三丝探头的三个钨丝，统计数据内含一个大小为[测点数量, 12] 的二维数组。前8列数据分别对应序号、风速水平分量U平均值W[m/s]、风速垂直分量平均值V[m/s]、风速展向分量平均值W[m/s]、风速水平分量标准差[m/s]、风速垂直分量标准差[m/s]、风速展向分量标准差[m/s]、测量时的温度[摄氏度]。后4列数字中第1、2列数代表alpha和beta角，3、4列代表theta和psi角，如图25。角度定义见具体见附录K
- (e) 如用户不更改项目名称并再次运行程序，新的统计信息将附在旧文件尾部，不会覆盖已有信息。

d) 数据文件

- (a) 每个测点上采集的实时数据被单独保存。如果采样组数为10，则会出现10个独立的文本文件，文件名= 项目名+组号.txt。
- (b) 如果是单通道测量，每个数据文件包含一个大小为[N, 1] 的一维维数组（即N 行1 列，N 为每组采样数）。数据为热线测量结果，单位为[m/s]。注意，在测量选项卡内，如果用户点亮了“热膜”选项，保存的值为测量原始电压，单位为[V]
- (c) 系统没有保存时间文件，如果用户需要，可根据采样频率1024Hz自行生成。比如，若每组采样数为2048，采样率为1024Hz，在matlab 中可参考如下命令生产时间变量t

4.7 CTALab选项卡5: 测量

$t=[1:2048]*(1/1024)$

- (d) 如果是A、B双通道测量，实时数据文件内含一个大小为 $[N, 2]$ 的二维数组。如果两通道皆为HW1A 单丝探头（不是HW2A双丝探头），两列分别对应两个通道的采样速度 $[m/s]$ 。如果两通道分别连接一支HW2A双丝探头的两个钨丝，两列分别对应流速的水平 and 垂直分量， u 和 $v[m/s]$ 。
- (e) 如果是A、B、C三通道测量，实时数据文件内含一个大小为 $[N, 3]$ 的二维数组。如果三通道皆为HW1A 单丝探头，三列分别对应三个通道的采样速度 $[m/s]$ 。如果三通道分别连接一支HW3A 双丝探头的3个钨丝，三列分别对应流速的水平、垂直和、展向分量， u ， v 和 $w[m/s]$ 。
- (f) 如用户不更改项目名称而再次运行程序，实时数据文件内的信息将被覆盖。

4.7.5 数据文件的读取和使用

用户可使用多种方法读取数据文件及统计文件，进行进一步处理并绘图。我们推荐使用Matlab或Python进行处理。如果用户需要使用Matlab来读取并处理数据，可直接进入数据目录运行

```
cd C:\measurements
t=[1:1024]*(1/1024);
data=load('Cobra_probe1_data1.txt');
figure,plot(t,data(1:1024,1))
```

Python则可运行

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
data = np.loadtxt("C:\measurements\Cobra_probe1_data1.txt", delimiter="\t")
fig, ax1 = plt.subplots(1, 1, sharey=True, figsize=(8, 6))
ax1.plot(data[range(1,1024),1])
```

4.8 使用多丝探头

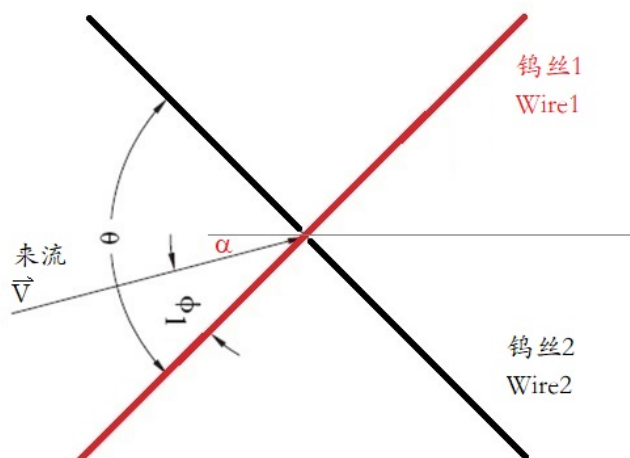
4.8 使用多丝探头

单丝探头只能测量速度大小的变化。测量速度大小及方向，需要使用多丝探头，本节介绍HW2A和HW3A的使用方法。

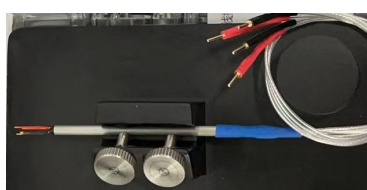
4.8.1 双丝X型探头

X型双丝探针有两个钨丝和四个支杆（prong）

- 四个支杆分为两对，两对分别涂不同颜色，一对涂红，一对涂黑，见图K.1；
- 一个钨丝焊接在两支涂红色支架顶端，下称红丝，在图26a 中用红色标出。支架尾部与两个红色迷你香蕉头相连；



(a) x探头示意图



(b) HW2A双丝X型探头照片



(c) x探头性质选择

图 26: HW2A双丝X型探头使用方法

4.8 使用多丝探头

- 另一个钨丝焊接在两支涂黑色支架上，下称黑丝，在图26a 中用黑色标出。支架尾部与两个黑色迷你香蕉头相连；
- 相同颜色的一对支杆中包括长、短各一支支杆。长短支杆只为使钨丝与支杆形成45°夹角，长短支架没有极性区别。两对支杆及钨丝形成两个相互平行的平面（即红色平面与黑色平面）。两平面间距约1mm。
- 测量平面见图26a。图中，红色平面在前、黑色平面在后。因为距离较小，红黑两个平面可被视为同一平面，即测量平面。X型双丝探针可以解析该平面内的速度矢量。

X型双丝探针的操作方法如下：

用户可参考如下视频设置双丝探头：

<https://www.bilibili.com/video/BV1Xu4y1v7kj/>

- 首先测量红丝和黑丝的冷态电阻
- 黑丝接入热线风速仪通道A（或用户指定的任何通道），红丝接入通道B（或不同于红色的任何通道）
- 在“设置”选项卡内，将两个通道对应的性质都选为“双丝探头1”（或者都选为双丝探头2等），见图26c
- 参照单丝探头使用过程，分别为A、B通道设定冷态电阻、过热比、平衡参数、信号调制参数后，打开电桥
- 转动CR04标定器转台使黑丝正对来流，打开电桥，并进行方波测试
- 参照第4.5.1节对A通道及黑丝进行标定（过程与单丝探头相同）
- 红丝标定结束后，向相反方向转动转台90度，使红丝正对来流，对B通道及红丝进行标定

注意，每个通道进行调节和测试时，该通道对应的钨丝需垂直于来流。

设置结束以后，可在“测量”选项卡下开始测量工作。请注意：

用户可参考如下视频使用双丝探头：

<https://www.bilibili.com/video/BV12P411s7Wi/>

4.8 使用多丝探头

- 需要选择A、B两个测量通道，选B时需要按住ctrl键点击B通道
- 图 22第④功能区显示的是速度分量u和v，具体参见第4.7.3节
- 图 22第⑤功能区显示的是速度大小 $|\vec{V}|$ ，以及偏角（alpha）

4.8.2 三丝探头

三丝探头可以测量流场中一个空间点上速度的三维分量。航华HW3A探头参照TSI-1299探针设计，由3个互为正交的钨丝组成：

- 三个钨丝分别焊接在三对支架上，支架颜色分别被涂成了黑、红、黄三色，并分别通过1对相同颜色的迷你香蕉接头引出。以下，三个钨丝将被分别称为黑丝、红丝和黄丝。
- 分别测量三个钨丝电阻，测量后将黑、红、黄三丝依次接入A、B和C通道
- 三丝探头的标定需要对每个丝分别标定，此过程可以将三个丝视为三个单独的单丝探头
- 将探头安置在CR04标定器上，偏角装置向左（或向右）偏转35度角
- 前后移动探头，是钨丝距离射流出口1 厘米左右
- 改变转动角，使黑丝垂直于来流（目测正对即可， ± 5 度角内热线输出值变化不会超过0.5%），
- 软件“设置”选项卡内，通道的性质均选为“三丝探头1”（或都是2，三丝需保持一致）
- 参照单丝探头使用过程（第4.4节）分别为A、B、C 通道设定冷态电阻、过热比、平衡参数、信号调制参数后，打开电桥，并进行方波测试。
- 如果不是首次使用，且上次标定之后并未更换探头，打开电桥即可
- 参考单丝标定过程（第4.5.1节）对A通道及黑丝进行标定
- 改变转动角120度，是红丝垂直于来流，对B通道及红丝进行标定
- 改变转动角120度，是黄丝垂直于来流，对C通道及黄丝进行标定

4.8 使用多丝探头

标定完成后，具体使用方法如下：按照图 30安排探针位置。在俯视图下，黑色的长杆居中（每个颜色支杆都有一长一短），正对来流。红色长杆在其右，黄色长杆在左。只有这样布置，软件汇报的 u 、 v 、 w 三个分量才能符合坐标系要求。

设置结束以后，可在“测量”选项卡下开始测量工作。请注意：

- 需要选择A、B、C三个测量通道，选B、C时需要按住ctrl键点击相应通道
- 图 22第④功能区显示的是速度分量 u 、 v 和 w ，具体参见附录K
- 图 22第⑤功能区显示的是速度大小 $|\vec{V}|$ ，以及偏角和俯角 $(\alpha - \beta)$ 。偏角和俯角可被转换为roll-cone坐标 $(\theta - \psi)$ 。角度定义及转换方法见具体见附录K。

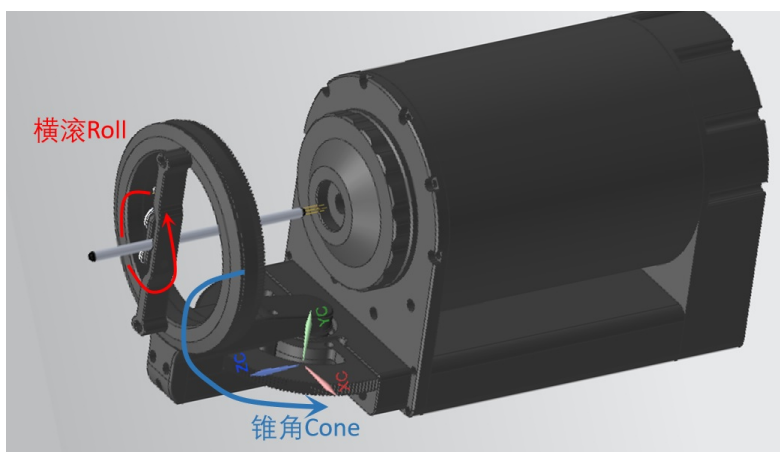


图 27: CR04标定器射流台转角机构椎角、横滚角示意图

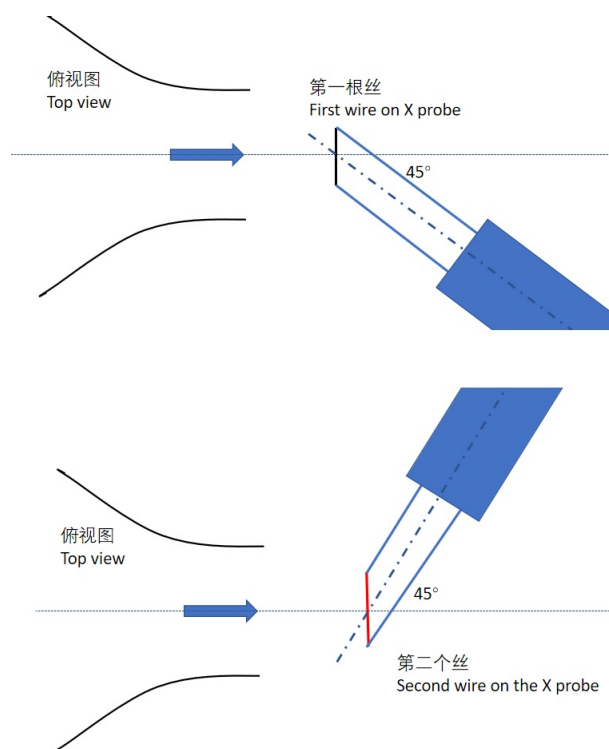


图 28: X型双丝探头标定示意图。上: 第一步标定黑丝 (支架涂为红色); 下: 第二步, 标定红丝。

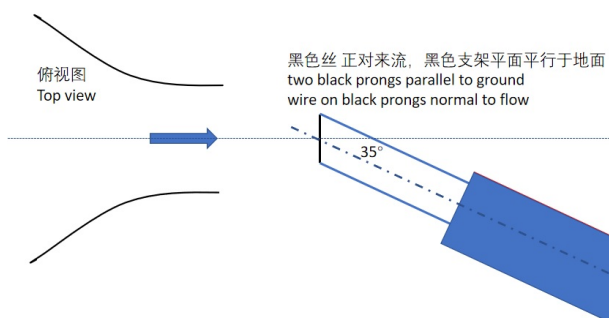


图 29: 三丝探头标定第一步示意图。

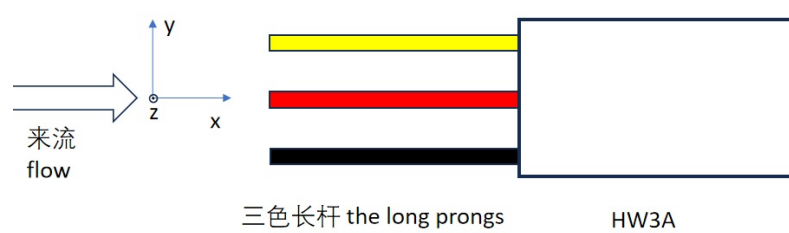


图 30: HW3A探头, 俯视图

5 操作流程实例

用户可参考如下视频：

<http://www.hanghualab.com/nd.jsp?id=123&fromMid=470>

5.1 我有主机、采集仪、标定器

5.1.1 1支单丝探针实例

第1步：测量冷态电阻， $R_0=5$ 欧姆

第2步：测量室温，根据公式1计算冷态电阻

第3步：连接该探头到通道A，将通道A输出连接在采集仪AI0

第4步：检查温度探头，将温度探头输出连接在采集仪AI5

第5步：将采集仪AO0通道与变频器控制线相连

第6步：使用测压管连接采集仪前面板测压孔H端与CR04标定器测压孔

第7步：检查变频器设置，参数P003的值需为2，按Run，检查指示灯是否闪动

第8步：软件“设置”选项卡，设置热线风速仪主机1通信口：COM3，热线通道Dev1/AI0，性质：“单丝”，总通道数：2，温度传感器采集通道Dev1/AI5，压强传感器Dev1/AI13。点击“保存参数”

第9步：软件“调试”选项卡，选择通道A，填入冷态电阻，过热比：1.6，平衡参数：1.5，增益：1，偏置：0V，低通滤波截止频率：无，点击“发送参数”

第10步：开风，软件“调试”选项卡，点击“方波开关”，再次点击“发送参数”，观察采集信号。参考附录F进行平衡参数调节。调节后，关闭“方波开关”

第11步：“标定”选项卡，选通道A，选自动调速，选自动测速，总标定点数：12，最大电压：5V。

第12步：从采集仪前面板选取压强敏感度系数，填入表中

第13步：点击“风机标定”，结束后开始测量

5.1 我有主机、采集仪、标定器

第14步：“测量”选项卡，选通道A，采样率10000，每组采样数2000，采集方法：普通采样组数：10，进入下一组方法：自动；项目名：hw_，数据目录：随意指定

第15步：点击“开始采集”，并观察实时信号及时均值

第16步：检查数据文件。实验结束

5.1.2 1支x型双丝探针实例

第1步：测量冷态电阻，黑丝 $R_{o1}=7$ 欧姆，红丝 $R_{o2}=8$ 欧姆

第2步：测量室温，根据公式1计算冷态电阻

第3步：连接红丝到通道A，将通道A输出连接在采集仪AI0

第4步：连接黑丝到通道B，将通道B输出连接在采集仪AI1

第5步：检查温度探头，将温度探头输出连接在采集仪AI5

第6步：将采集仪AO0通道与变频器控制线相连

第7步：使用测压管连接采集仪前面板测压孔H端与CR04标定器测压孔

第8步：检查变频器设置，参数P003的值需为2，按Run，检查指示灯是否闪动

第9步：软件“设置”选项卡，设置热线风速仪主机1通信口：COM3，热线通道Dev1/AI0，性质：“单丝”，热线通道Dev1/AI1，性质：“单丝”，总通道数：2，温度传感器采集通道Dev1/AI5，压强传感器Dev1/AI13。点击“保存参数”

第10步：软件“调试”选项卡，选择通道A，填入冷态电阻，过热比：1.6，平衡参数：1.5，增益：1，偏置：0V，低通滤波截止频率：无，点击“发送参数”

第11步：开风，软件“调试”选项卡，点击“方波开关”，再次点击“发送参数”，观察采集信号。参考附录F进行平衡参数调节。调节后，关闭“方波开关”

第12步：重复上面两部，对B进行设置，并通过方波测试调平衡

第13步：“标定”选项卡，从采集仪前面板选取压强敏感度系数，填入表中

第14步：“标定”选项卡，选通道A，选自动调速，选自动测速，总标定点数：12，最大电压：5V。点击“风机标定”，结束后开始测量

5.2 我有主机、采集仪、没有标定器

第15步: 选通道B, 选自动调速, 选自动测速, 总标定点数: 12, 最大电压: 5V。点击“风机标定”, 结束后开始测量

第16步: “测量”选项卡, 选通道A和B, 采样率10000, 每组采样数2000, 采集方法: 普通采样组数: 10, 进入下一组方法: 自动; 项目名: hw_, 数据目录: 随意指定

第17步: 点击“开始采集”, 并观察实时信号及时均值

第18步: 检查数据文件。实验结束

5.2 我有主机、采集仪、没有标定器

如果您有其他的标定设施或一个可以改变风速且可以测量的风场, 比如风洞, 您可以考虑使用手动标定方案 (见第4.5.5节)。如果您不打算标定, 而选择免标定的测量方式 (见第4.5.6节), 以下为流程

第1步: 测量冷态电阻, $R_0=5$ 欧姆

第2步: 测量室温, 根据公式1计算冷态电阻

第3步: 连接该探头到通道A, 将通道A输出连接在采集仪AI0

第4步: 检查温度探头, 将温度探头输出连接在采集仪AI5

第5步: 将采集仪AO0通道与变频器控制线相连

第6步: 使用测压管连接采集仪前面板测压孔H端与CR04标定器测压孔

第7步: 检查变频器设置, 参数P003的值需为2, 按Run, 检查指示灯是否闪动

第8步: 软件“设置”选项卡, 设置热线风速仪主机1通信口: COM3, 热线通道Dev1/AI0, 性质: “单丝”, 总通道数: 2, 温度传感器采集通道Dev1/AI5, 压强传感器Dev1/AI13。

第9步: 软件“设置”选项卡, 通道A的参数a与b, 填入出厂标定数值。注意, 出厂退火加标定是收费项目, 费用与探头本身售价相仿, 请斟酌选用此项服务

第10步: 软件“调试”选项卡, 选择通道A, 填入冷态电阻, 过热比: 1.6, 平衡参数: 1.5, 增益: 1, 偏置: 0V, 低通滤波截止频率: 无, 点击“发送参数”

5.3 我只有主机

第11步: 开风, 软件“调试”选项卡, 点击“方波开关”, 再次点击“发送参数”, 观察采集信号。参考附录F进行平衡参数调节。调节后, 关闭“方波开关”

第12步: “测量”选项卡, 选通道A, 采样率10000, 每组采样数2000, 采集方法: 普通采样组数: 10, 进入下一组方法: 自动; 项目名: hw_, 数据目录: 随意指定

第13步: 点击“开始采集”, 并观察实时信号及时均值

第14步: 检查数据文件。实验结束

5.3 我只有主机

用户仅仅采购了主机。也是可以开展教学和科研工作。用户需要

- a) 一台可以串口通讯的电脑。通过串口用文本形式发送命令给热线风速仪, 开关桥路、设定过热比、调节平衡参数、开关方波测试等。用户可参照第D节安装串口通讯助手, 通过命令行的形式直接驱动风速仪。用户选择其他串口通讯工具。基本语法见附录。
- b) 一台数据采集装置。可以是任意一台能正常工作的数据采集卡、一台示波器或一个万用表
- c) 用户还需自备一台可以调节并测量风速的设施, 比如风洞等。

用户安装好串口调试助手之后, 可参照如下示例完成单丝探头的操作:

第1步: 使用万用表测量探头电阻 (一定要注意, 通过探头尾部迷你香蕉头测量电阻, 切勿直接碰头顶顶部), 下面我们以

第2步: 测量室温, 根据公式1计算冷态电阻, 下面我们以 $R_{wo} = 6\Omega$ 为例

第3步: 在实验装置上 (风洞等) 安装热线探头, 并连接导线到A通道

第4步: 打开风速仪电源

第5步: 运行串口调试程序

第6步: 设定过热比以过热比OR为1.5为例,

$$R_3 = (OR * R_{wo}) * 10 = (1.5 * 6.0\Omega) * 10 = 90\Omega \quad (4)$$

通过串口调试程序写入

5.3 我只有主机

```
cta 1 overheat 90
```

第7步: 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

第8步: 调节风洞流速至实验可能用到的最大流速;

第9步: 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
```

- 使用示波器或数据采集卡观察输出信号, 调整balance值来调整系统响应特性, 其值越大, 系统内部阻尼越大, 有利于系统获得平衡, 但系统快速响应能力会有相应下降
- 使用示波器采集信号, 并估算系统频响
- 关闭方波, 串口调试程序写入

```
cta 1 square_wave_off
```

第10步: 将热线探头置于可改变风洞的实验台内, 准备好毕托管等其他可以读取来流速度的仪器

第11步: 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;

第12步: 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***

第13步: 关闭电桥通过串口调试程序写入

```
cta 1 bridge_off
```

5.4 我要开展超过120m/s中、高流速测量

5.4 我要开展超过120m/s中、高流速测量

CTA04 Pro系统可以提供1.0A以上电流，足以胜任马赫数超过1的可压缩流动测量。但是，用户需要注意

- 普通航华HW1A探头的钨丝长度约1.5mm，强度不足以胜任120m/s以上的稳定测量，容易损坏。客户需与我们联系定制钨丝长度较短的探头。
- 高速测量需使用压缩空气作为气源进行标定（小于120m/s的低速测量，可以使用风机作为气源及进行标定）
- 高速测量需要将桥比(Scale)改为100:1，只有这样，风速仪才能提供足够的电流

具体操作流程如下（与第4.5.2节”压缩空气标定”重叠）：

- (1) 更换CR04标定器尾端板，使用压缩空气管连接手阀及气瓶；
- (2) 将探头安置在射流出口；
- (3) 使用空压机为气瓶加压至所需要的压强（若计划标定1M，考虑到管路损失，通常需要0.5MPa以上），加压过程中保持阀门关闭，加压结束后关闭空压机电源（或关闭空压机与气瓶之间的阀门）；
- (4) 检查DAQ16数据采集仪内置压强传感器最大量程是否在合理范围：建议在50kPa 以上；
- (5) 检查CTALab软件，检查各通道是否已经打开；
- (6) 将桥比scale调制100:1(图??)，并发送给风速仪；
- (7) 打开阀门，在标定器出口形成高速射流；
- (8) 点击“压缩空气标定”按钮(图17)，软件开始采集标定器总压及风速仪输出电压，结束后软件给出标定结果；
- (9) 可以开始测量。

6 名词解释

冷态电阻 R_{wo} 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。

过热比OR 过热比指的是探头的工作电阻与冷态电阻之比

$$OR = R_w / R_{wo}, \quad (5)$$

通常OR的值在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°C。本次实验中，我们通过设定桥路中变阻器 R_3 （见图1）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

$$R_2 / R_1 = R_3 / R_w \quad (6)$$

所以

$$R_w = (R_1 / R_2) R_3 \quad (7)$$

因为航华CTA04风速仪的 $R_2 / R_1 = 10$ （该比例被称为电桥比,见图1），所以 $R_w = R_3 / 10$ 。因为 $R_w = OR * R_{wo}$ ，所以 $R_3 = 10(OR * R_{wo})$ 。

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。

桥比 Scale，是风速仪桥路中2个关键电阻阻值之比： R_2 / R_1 （该比例被称为电桥比，见图1），缺省值为10，适于低速（小于120m/s）使用。如果进行中、高速测量，需将该值调为100，见第4.4.1节

平衡参数 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。在使用串口助手控制热线风速仪主机时，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。在使用CTALab软件控制主机时，平衡参数范围在0-5之间，我们建议平衡参数设置为0.5-1.5之间。

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。如果使用串口调试助手才做风速仪，可分别使用square_wave_on 和square_wave_off 命令来打开和关闭方波

桥顶电压 桥顶（TOB）电压 E_t 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。

信号后处理 也称**输出信号调制**。在某些情况下，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是，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

采样频率 采样频率为每通道在每秒时间内采集样本的个数，单位为Sample/s, 或Hz

每组采样数 每个数据组包含的样本数量

采样组数 用户一次采集的独立数据组数。如果采样组数为10，用户在采集“每组采样数”个数据之后，存盘，在采集下一个数据组

移测架 一套步进电机控制器和步进电机滑台组成的运动控制机构，用来带动热线探头在流场不同位置测量

通信端口 电脑串口号。软件通过串口发送文本命令给热线风速仪主机，也通过串口读取主机状态。另外，软件也通过串口对控制移测架。具体端口号可通过电脑“设备管理器”进行查询

热线探针 即**热线探头**。自前至后由钨丝、支杆、探针本体、导线以及迷你香蕉插头组成。热线探针通过导线（CB02A）与热线风速仪主机相连，通过钨丝发热的变化来感知速度变化。

热膜 流动测量中热膜(hot film)传感器在两个不同情况下出现。第1种是在一个柔性基底膜上的金属镀层，通常为镍或铂。这种传感器通常被粘贴在待测表面，通过电流大小来推测壁面切应力大小。第2种是镀在一个直径100微米左右、高分子材料圆柱表面的金属膜。圆柱像热线钨丝一样被粘接在一对支架上。因为结构更结实，所以这种热膜传感器被用来替代钨丝热线探头来测量流速变化。第2种传感器经常被用来在水中使用的。

频响 频率响应特性的简称，Frequency Response，描述一台仪器对于不同频率的信号响应幅度的分布情况。理想的仪器对不同频率信号应该有相同幅度的响应。通常仪器对低频信号响应较好，高频信号响应较差。当高频信号的幅度逐渐降低，并小于低频信号3dB及以上时，该频率通常被认为是仪器频率处理的上限。工程实践中，工程师通常称这一上限为仪器的频响。

附录

A 航华热线探头

航华提供了多种热线探头来满足客户的不同测量需求。其中，对最常用的HW1A和HW2A探头的描述见表1。绝对大多数客户会选择这两种探头。所有可选探头见表A.1。部分照片见图A.1。

部分常用探头可从航华淘宝商城直接采购，网址为：

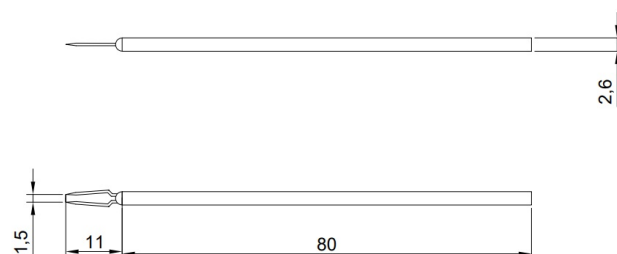
<https://shop184358989.taobao.com/>



图 A.1: 部分航华探头照片

表 A.1: 几款常用的航华探头

编号	品名	数量	功能
1	HW1A 单丝探头	标配	$5\mu m$ 直径钨丝, 约1.5mm宽, 钨丝需正对来流测量速度变化, 适用于绝大多数科研教学应用, 见图A.2a
2	HW1B 单丝探头	选购	$2.5\mu m$ 直径钨丝, 约0.5mm宽, 频响很高, 主要针对研究湍流小尺度结构客户
3	HW1C 单丝弯探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、1.2-1.5mm宽, 头部弯转90度角
4	HW1D 边界层单丝探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、1.2-1.5mm宽、测量近壁区速度变化, 见图A.2b
5	HW1E 单丝直角探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、1.2-1.5mm宽、钨丝与探针轴向垂直、适用于空间紧张, 难以安置HW1A的场景
6	HW1G 单丝斜角探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、约2mm宽、45度斜角, 主要针对动力学科客户需求
7	HW1H 高速单丝探针	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、约1mm宽、测量可压缩流动速度大小变化
8	HW2A 双丝X形探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、约2mm宽、测量一个平面内二维速度分量, 见图A.2c
8	HW2B 双丝平行探头	选购	$5\mu m$ 直 径 钨 丝、1.2-1.5mm宽、间距 $0.5\pm 0.02 mm$ 、测量速度梯度
10	HW2H 高速型双丝X形探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、约1mm宽、测量可压缩流动一个平面内二维速度分量
11	HW3A 三丝探头	选购	$5\mu m$ 直径钨丝、约2mm宽、对标TSI-1299 探针, 测量三维速度分量
12	HF1A 单层热膜	选购	单层镍膜传感器、基底尺寸19x14mm, 镍膜尺寸6.0x1.2mm, 镍膜厚 $1\mu m$, 传感器厚度0.1mm



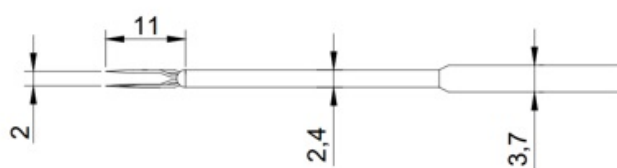
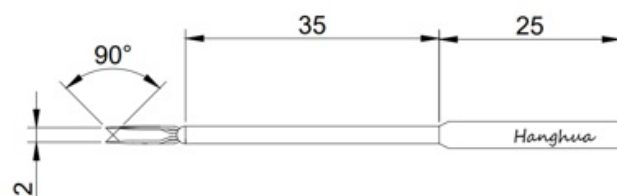
HW-1A单丝热线探头 单位: mm

(a) HW1A



HW-1D边界层探头 单位: mm

(b) HW1D



(c) HW2A

图 A.2: 主要几种探头几何尺寸

B FTDI软件：串口线驱动程序

FTDI软件是驱动USB-串口通讯线路的重要软件。用户可在如下网址下载，

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

下载后解压，并运行CDM v2.23.00 WHQL Certified.exe 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。具体过程见图B.1。



图 B.1: 安装FTDI软件过程示例

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串口设备号COM3 (该编号第一次设定后, 不会再变), 见图B.2。

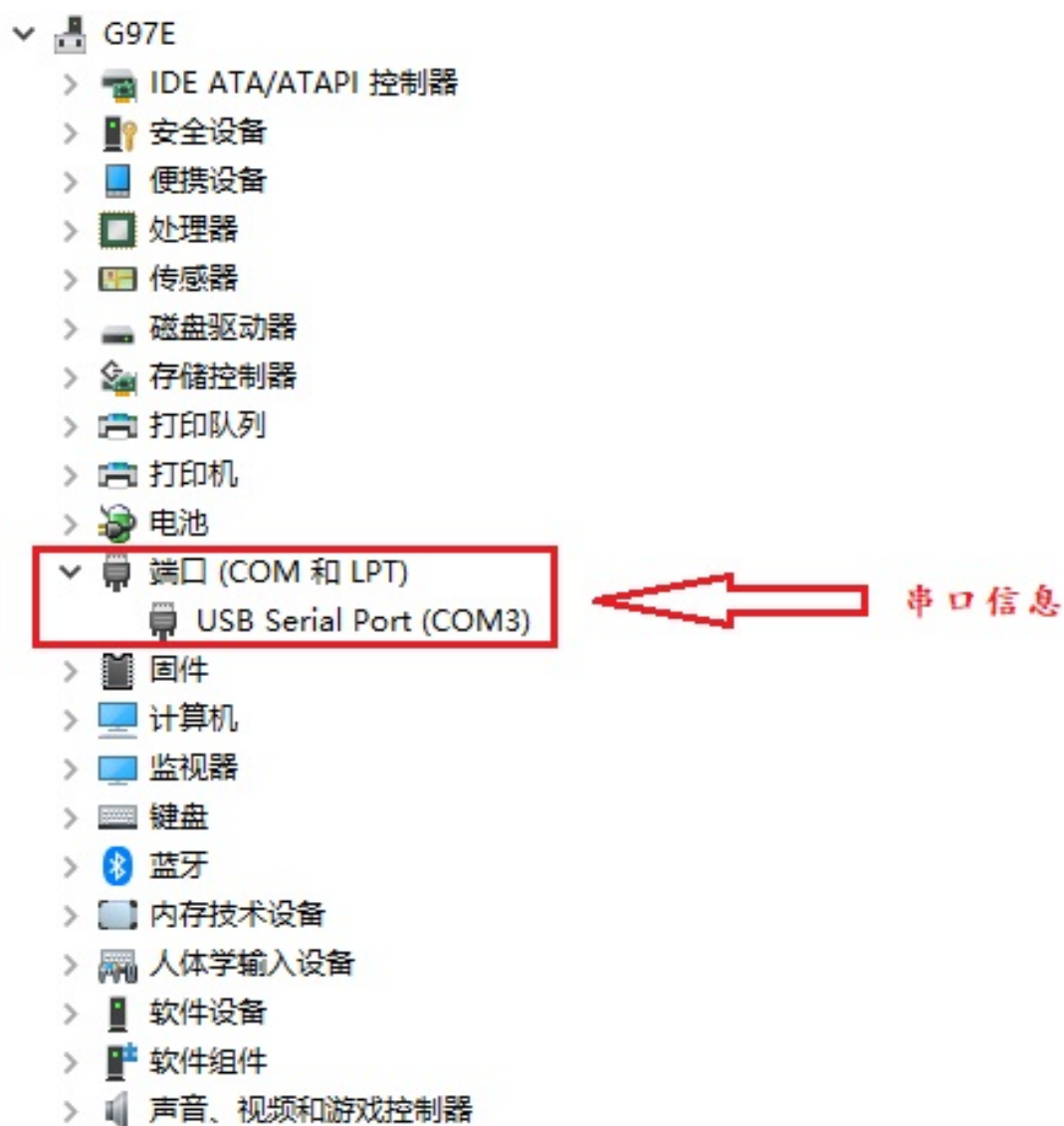


图 B.2: FTDI软件安装后在“设备管理器”中检查设备COM号

C CTALab软件安装

CTALab软件是热线风速仪的重要组成部分，其安装过程见图C.1。该软件主要功能包括：

- 通过串口与热线风速仪主机通信，设置工作参数、开启关闭电桥、读取主机状态；
- 指挥标定器对热线探头和热线通道进行标定；
- 与数据采集仪通信，设置采集参数，采集保存数据，显示主要统计量；
- 与移测架及转角机构通信，控制移测架位置及转角机构角度。

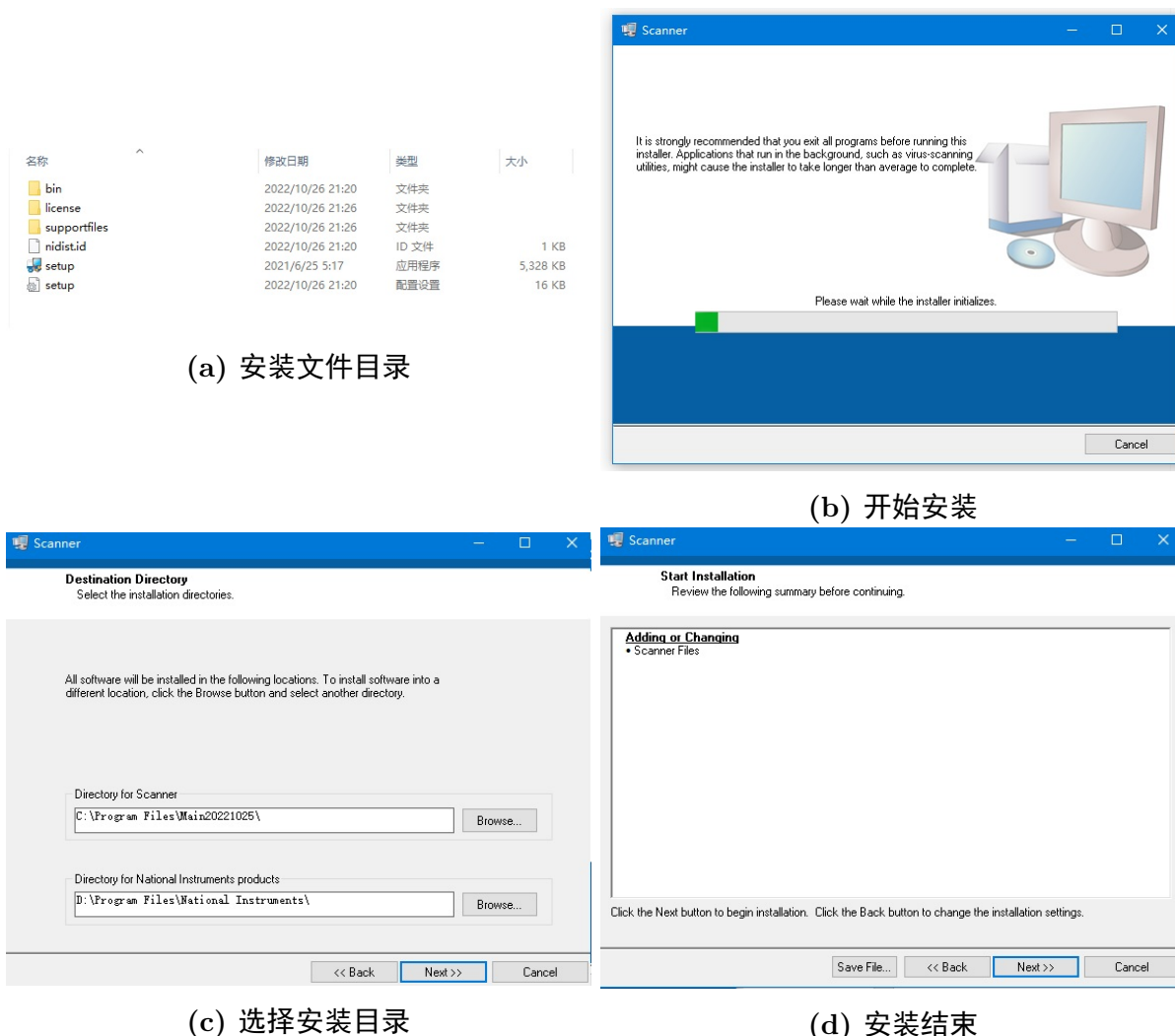


图 C.1: 软件安装示例

D 串口调试助手安装及使用

D.1 串口调试助手安装

串口调试助手是计算机发送串口命令、读取串口设备状态的重要工具。用户可以选择使用该工具控制热线风速仪。串口调试助手安装程序可在如下网址获得：

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

串口调试助手安装过程请参照图D.1。

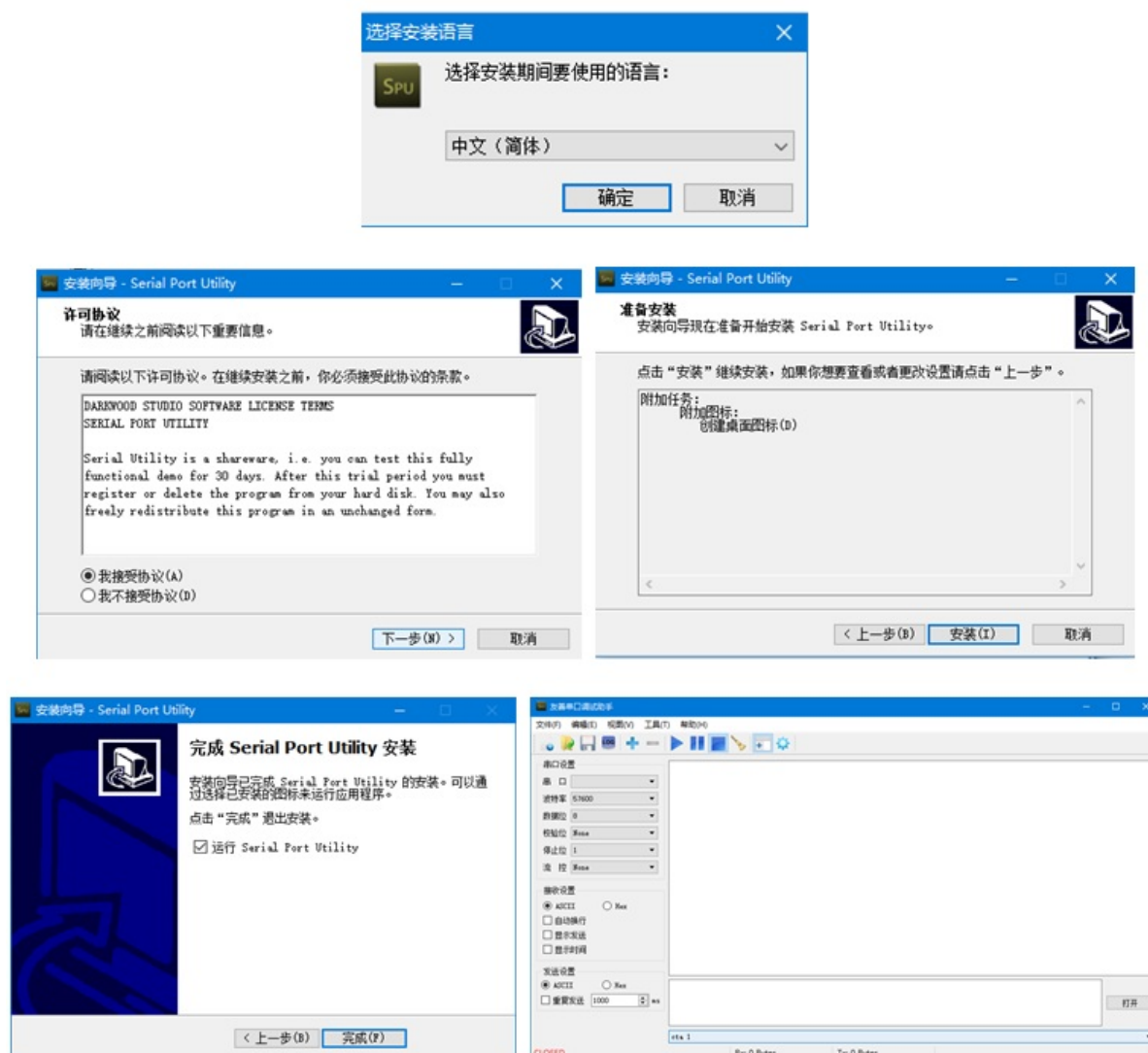


图 D.1: “串口调试助手” 软件安装过程

D.2 设置通信参数

D.2 设置通信参数

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D.2所示。此时界面左下角红字显示COM3 CLOSED，该串口处于关闭状态。

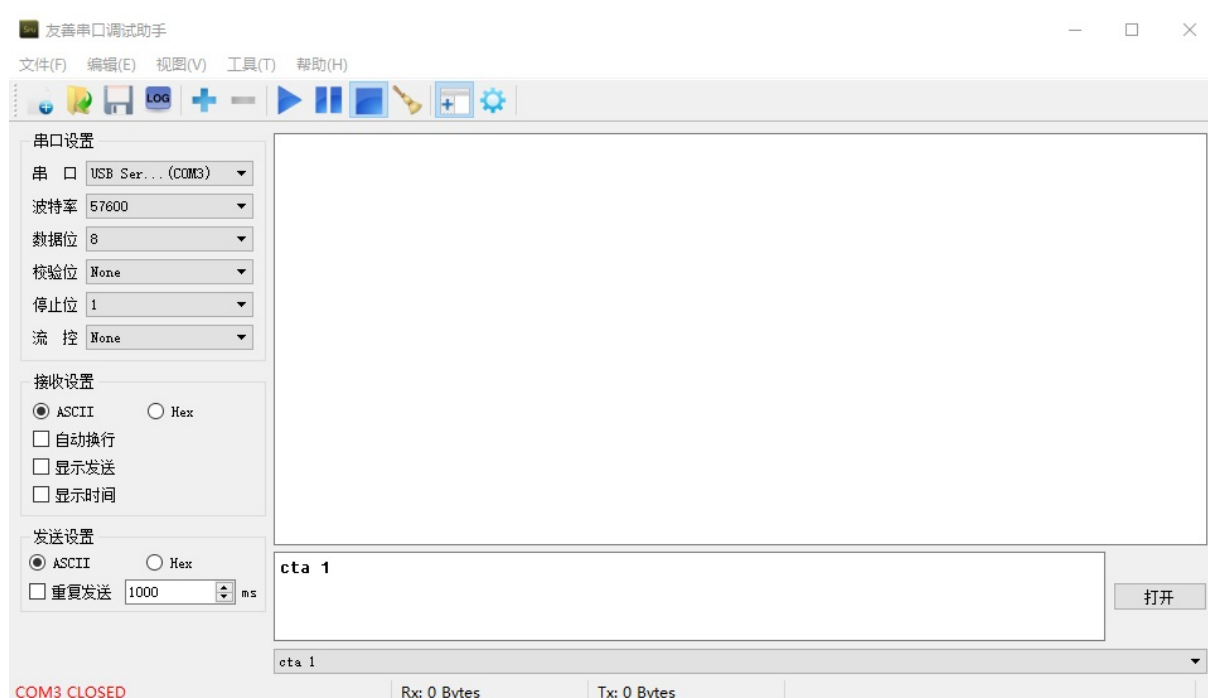


图 D.2: 串口信息设置完毕

D.3 开启通信通道

打开串口（点击串口调试助手中的播放按键，图D.2）。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。

D.4 发送命令

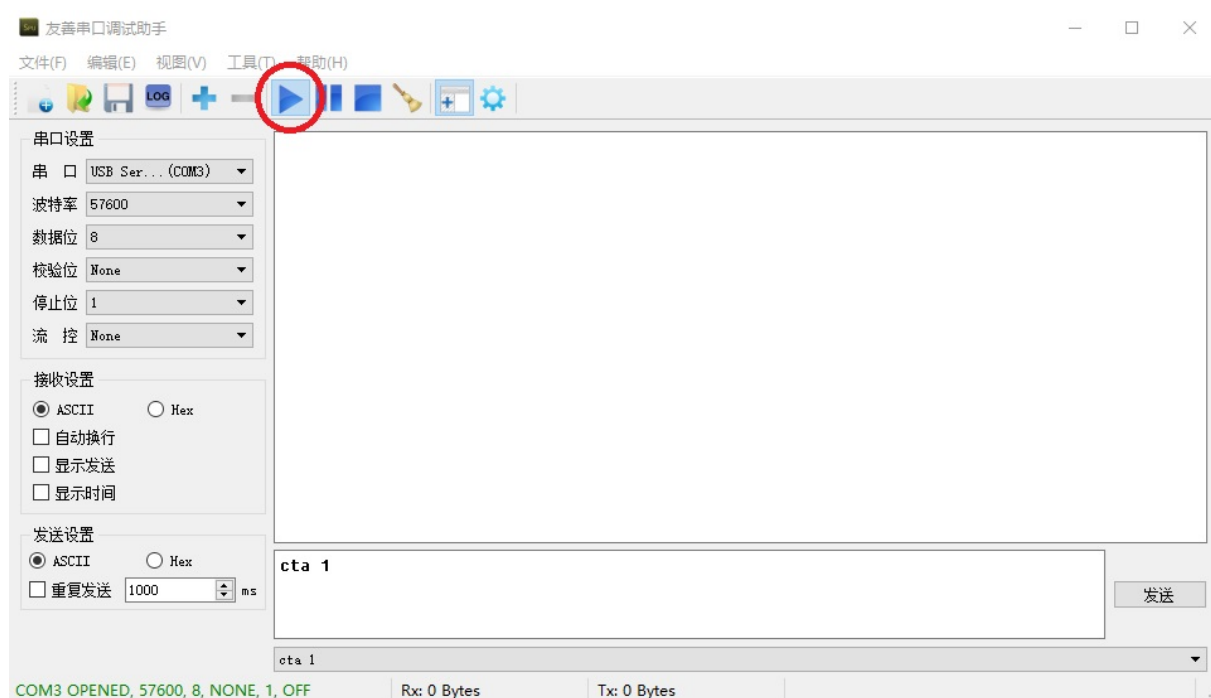


图 D.3: 点击“播放键”联通串口

D.4 发送命令



图 D.4: 输入“cta 1”命令后，系统显示查询A通道状态结果

建立串口连接之后，可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

D.4 发送命令

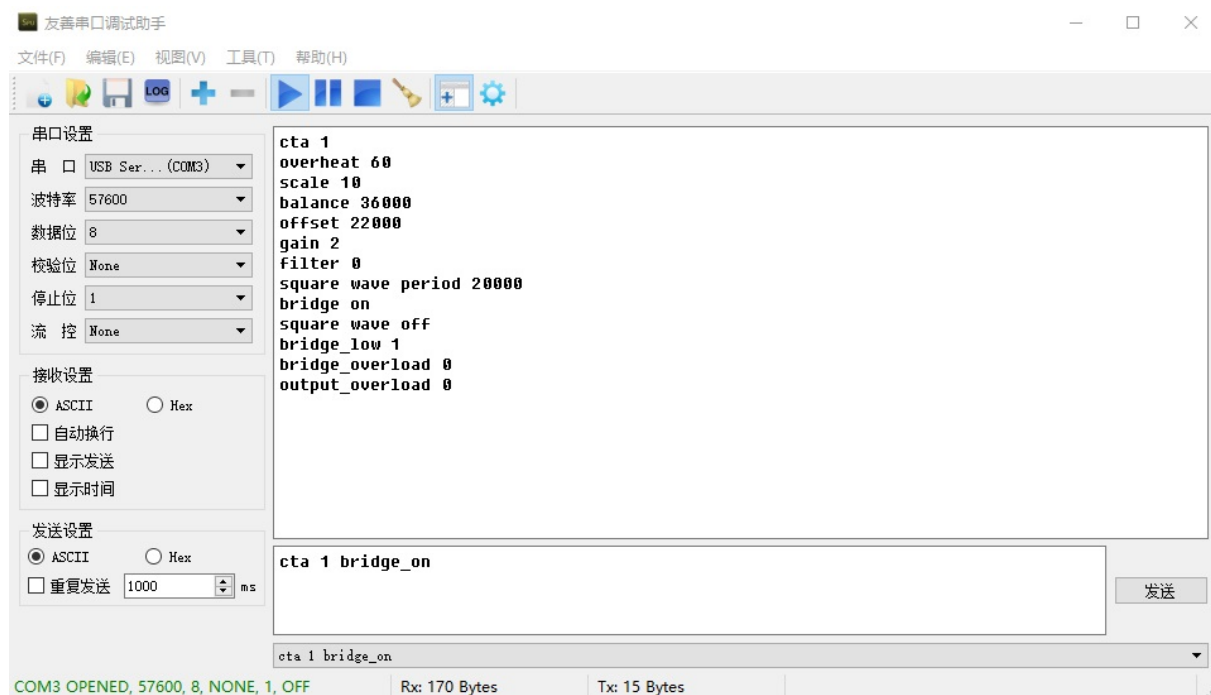


图 D.5: 使用桥路开关命令打开A通道

会在上面的接收数据框内显示出来。

注意写完命令以后不要留空格，也不要回车。

命令语法及参数见表D.1。命令分三种，格式分别如下：

- 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，具体含义如图D.4所示。图中为1通道信息查询的例子。
- 打开或关闭桥路及方波的命令（见图D.5），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。

表 D.1: 串口命令的语法及参数汇总表

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overheat ratio。 例：探头电阻为4.8 欧，过热比设定为1.4，则overheat数值应为 $4.8 \times 1.4 \times 10 = 67$ 。
balance	0-65535，一般在30000-40000。与CTALab软件balance参数B换算方法为： $6553.4 \times B + 32767$
offset	0-65535，一般在20000左右。与CTALab软件偏置电压 E_o 换算方法为： $E_o \times 13107$
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
scale	10或100，小于120m/s的测量用10，其他100

- c) 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）

E 过热比设置

热线探头的过热比 (overheat ratio, OR) 是通电后探头的工作电阻 R_w 与冷态电阻 R_{20} 之比

$$OR = R_w / R_{20} = 1 + \alpha_t (T_w - 20). \quad (8)$$

这里 T_w 为工作温度, $\alpha_t = 0.0045^\circ\text{C}^{-1}$ 为属钨的温度电阻系数。冷态电阻 R_{20} 为探头在 20°C 下的电阻, 在实验开始前通过测量获得。根据上式, 我们可以获得过热比与工作温度的关系, 见表 E.1.

过热比, OR	探头温度 T_w , $^\circ\text{C}$
1.2	64
1.4	109
1.6	153
1.8	198
2	242

表 E.1: 热线风速仪过热比与探头温度对照表

关于如何选择过热比的建议:

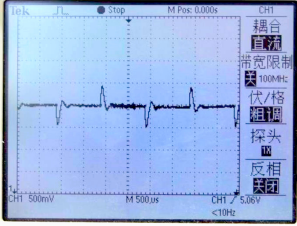
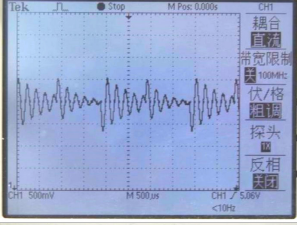
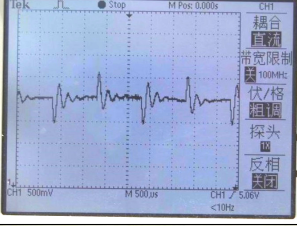
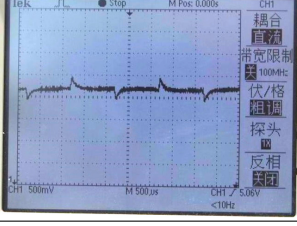
- 高过热比: 探头与流体之间的传热量大, 测量更敏感, 频响更好
- 高过热比: 更大电流, 流速测量范围更小, 探头寿命更短
- 通常 1.5-1.8
 - 30m/s 以内的湍流研究, 选 1.8
 - 100m/s 左右的应用型研究, 选 1.5

F 方波测试及系统平衡

F.1 系统平衡判断

实验开始以前我们通常需要测试热线风速仪系统是否进入稳定的工作状态。航华热线风速仪内置方波测试功能。当系统进入测试状态后，内置方波信号发生器产生幅度100mV的方波信号加载在桥路 e_1 位置（图1），破坏桥路平衡（ $e_1 - e_2 \neq 0$ ）。平衡被破坏以后，系统如能快速恢复平衡状态（ $e_1 - e_2 = 0$ ）则说明系统在稳定状态下工作，可开展实验。表F.1给出了典型的稳定工作状态及不理想状态的桥顶电压响应图。

表 F.1: 调节系统平衡参数方法

	将风速调节至实际实验时使用的最大值后，发送“cta 1 square_wave_on”命令打开方波测试（如果使用CTALab软件，点击图16的“桥路开关”），使用示波器或数据采集卡观察桥顶电压波形。理想波形见左图，系统稳定工作。
	问题：电桥不平衡，不能使用。考虑大幅增加或减少balance值后再观察波形
	问题：电桥不稳，系统内阻力过小，考虑增加balance值
	问题：阻尼略小。可考虑略微增加balance值
	问题：阻尼过大，电桥过稳，风速仪频率响应低，需适当减小balance值。

F.2 系统频响测定

F.2 系统频响测定

通过观察桥顶电压信号可监视系统恢复平衡过程。另外，根据系统恢复平衡的曲线，可以对桥路频响做出估计。目前存在多种测定频响的方法，下面介绍Lomas书中（C.G. Lomas, Fundamentals of Hot Wire Anemometry, Cambridge University Press; Reissue edition, 2011）给出的方法：系统特征时间 τ 是偏差电压达到顶峰以后（输出电压偏离平衡电压的量）恢复到最大偏离电压（ V_{max} ）的37%所用的时间。而系统频响则为特征时间的倒数 $1/\tau$ 。以图F.1为例，一个5微米直径钨丝的HW1A探头在来流20m/s条件下， $\tau \approx 32\mu s$ ，频响为32.3kHz。

与Lomas方法相比，另一个常用的Bruun方法则非常保守（H.H. Bruun, Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis, Oxford University Press, 1995）。该方法认为 τ 是从方波上升沿开始到偏差电压恢复到峰值3%的时间，再乘安全系数1.3。以图F.1数据为例，以Bruun方法判断的特征时间 $\tau \approx 65\mu s$ ，频响为15.4kHz。

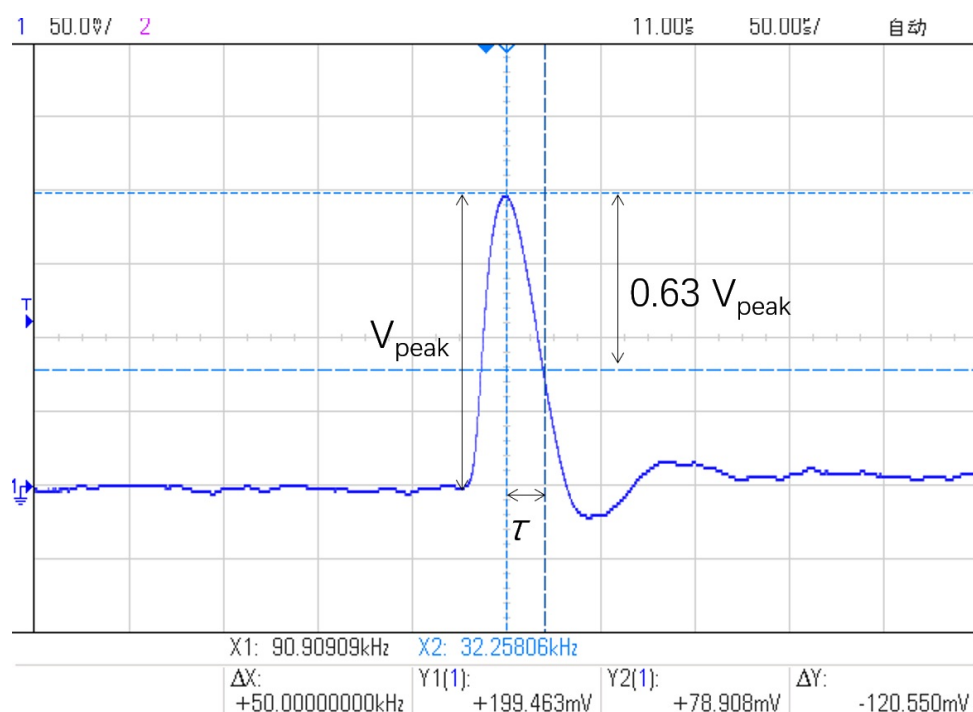


图 F.1: 一个典型的方波测试结果， τ 为系统特征时间。

G 变频器设置方法

表 G.1: 标定器变频器“自动”与“人工”调速设置方法

	变频器工作状态下，长按PROG键（左上）进入设置状态，P001闪动Press PROG button (up left) a few second, until P001 blinks, Frequency drive enters setting mode
	使用上、下键，调至P-003参数，按Enter进入设置该值Press UP and DOWN button, until P-003 shows up. Press ENTER button
	调节P-003的值至002，按Enter输入。变频器进入“自动”模式Press UP and DOWN button, until the value becomes 002. Press Enter button. Frequency drive enters the 'Auto' mode: it runs according to the voltage applied to the BNC cable
	使用上下键调节P-003的值至001。变频器进入手动模式Press UP and DOWN button, until the value becomes 001. Press Enter button. Frequency drive enters the 'Manual' mode: it runs according to the setting of the potentiometer in the front panel
	长按PROG键，变频器从设置状态返回工作状态Press PROG button a few second, until frequency drive comes out of the setting mode and enters back to the working mode 按Run键，左下角绿灯闪烁。系统已经准备好。Press RUN button, a green LED blinks, frequency drive is ready to work

H 全人工、四次曲线标定法实例

本方法主要针对只有航华热线风速仪主机，没有其他功能附件的客户。

热线风速仪的输出为 $\pm 5.0V$ 范围内的模拟电压信号。该信号需要经过标定以后才能得到流动速度。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

第1步：转动风机转速调至0；

第2步：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 ；

第3步：读取毕托管测量的速度值 U_1 ；

第4步：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 和与之相对应的速度 U_2 ；

第5步：逐步提高风机转动频率，测量十个以上不同速度对应的系统电压输出值；

第6步：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；

$$U = a_4 E^4 + a_3 E^3 + a_2 E^2 + a_1 E + a_0 \quad (9)$$

第7步：标定结束后开始实验，实验中，采集并保存风速仪电压值 E ，并使用式9计算 U 。

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：

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

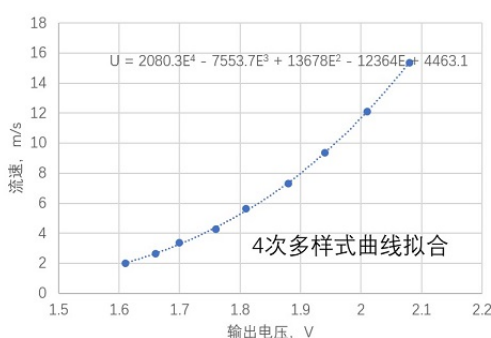


图 H.1: 四次曲线拟合的标定方法示例

I 指数标定法及免标定方法

I.1 指数标定法

所谓指数标定法是利用热线探针发热量 Q 与流动速度 u 之间的一个指数关系形成的标定方法。该方法原理如下：

一个长 l 、直径 d 的微小圆柱正对来流放置，见图I.1。当通电加热后，描述对流传热的无量纲努谢尔特数可表述为

$$Nu = \frac{hd}{k}. \quad (10)$$

这里， k 为空气导热率， h 为对流换热系数

$$h = \frac{Q}{(T_w - T_o)A}. \quad (11)$$

钨丝表面积 $A = \pi dl$ ， T_w 与 T_o 分别为探头工作温度与来流温度。 Q 为金属丝与空气之间传热量，可使用桥顶电压 E_t 及桥路里面的电阻计算：

$$Q = \left(\frac{E_t}{R_w + R_L + R_1} \right)^2 R_w. \quad (12)$$

这里， R_w 探头工作电阻， R_L 为导线电阻通常在0.1欧姆以内， R_1 为电桥中的一个固定阻值电阻（见图1）。

图I.2的实验结果表明，当个 Nu 经过温度修正 $(T_m/T_{ref})^{0.16}$ 以后，其结果与 $Re^{0.45}$ 呈线性关系，且拟合结果不受环境温度、工作温度等因素影响，仅仅与探头自身的几何特性相关：

$$Nu \left(\frac{T_m}{T_{ref}} \right)^{0.16} = a Re^{0.45} + b. \quad (13)$$

这里 $T_m = (T_w + T_o)/2$ 为探头与室温的平均值， T_{ref} 为参考温度，为20摄氏度，雷诺数 $Re = Ud/\nu$ ， ν 为空气的动力粘滞系数， U 为时均速度。这里 ν 、 k 和 c 等空气物性，均按照 T_m 查询。

所以，我们可以通过使用标定实验数据，一些列对应的时均 E_t 与时均速度 U ，通过拟合式13来获得指数标定结果 a, b 。

I.2 四次曲线法和指数法优缺点对比

四次曲线标定法和指数标定法是软件将热线风速仪输出的电压信号转为速度信号的两种方法。这两种各有优缺点，用户可根据自身条件及需求进行选择。具体说明如下：

四次曲线法 系统将使用四次曲线标定结果（五个常数，见第4.5.1节）来将电压 $e(t)$ 转化为速度 $u(t)$ 。该方法的优点是

- 输出电压与风速的时均值， E 与 U ，关系直接对应，简单直观，不必考虑通道设置、气体物性等多种参数影响；

I.3 免标定测量方法

- 在保持环境因素不变的情况下，四次曲线转化法具有非常高的精度。

四次曲线方法局限性也非常明显：

- 标定结果与通道设置、导线接触电阻、环境温度等多种因素相关联。当这些参数出现微弱变化对标定结果都会形成明显影响，甚至使标定结果失效。

我们建议用户现标现用：标定之后立即进行测量。并尽量做到

- 保持环境温度不变
如果实验中环境温度 T_o 与标定时环境温度 T_c 超过1摄氏度并在 $3^{\circ}C$ 以内，考虑使用温差修正测量结果。如果温差超过 $3^{\circ}C$ ，立即停止实验并重新标定；
- 不要插拔探头和风速仪之间的导线（不论是否上电，都不要插拔），尽量不要碰触，以减少接头接触电阻变化；
- 标定后不要更改任何参数。修改冷态电阻、过热比、信号调制参数都会改变输出结果；

如果意外修改，改回原值即可，无需重新标定。

- 长时间实验（比如超过2个小时），实验开始和结束以后都进行标定，并对比标定结果。如前后标定结果差异较大，可考虑使用两次标定曲线的中线。如果过大，放弃实验结果；
- 如果无法保证可靠的测量环境，考虑使用指数标定结果进行电压-速度转换。

指数法 系统把电压 $e(t)$ 转换为探头发热量 $Q(t)$ ，计算对流换热 Nu 数，并使用指数标定的结果（标定常数 a 和 b ）来计算雷诺数 Re ，并根据 Re 计算速度 $u(t)$ ，详见附录I。该方法的优点是

- 对环境温度变化、探头参数变化不敏感，特别适于无法经常标定、环境温度变化较大、探头参数设置发生了变化的情况。

该方法的局限性包括

- 该方法使用了空气物性模型、钨丝物性模型来计算 Nu 数和 Re 数，每个模型都引入误差
- 低速区域（小于 $1m/s$ ）偏离线性区（受自然对流的影响），表现弱于四次曲线

I.3 免标定测量方法

“免标定”指的是不需要用户标定，而是在出厂前标定。所谓免标定的测量方法，是利用测量所得的桥顶电压 E_t 计算 Nu ，再根据出厂标定结果 a, b 来计算 Re ，进而获得流速 u 的方法。

I.3 免标定测量方法

因为式13所表述的传热和流速关系对环境温度、工作温度等因素变化不敏感，仅与探头自身的几何特性。在不同环境下多次标定的结果重复度很高，见图I.2。所以，可以仅进行出厂标定，客户拿到出厂标定结果后直接使用。具体使用方法见第4.5.6节。

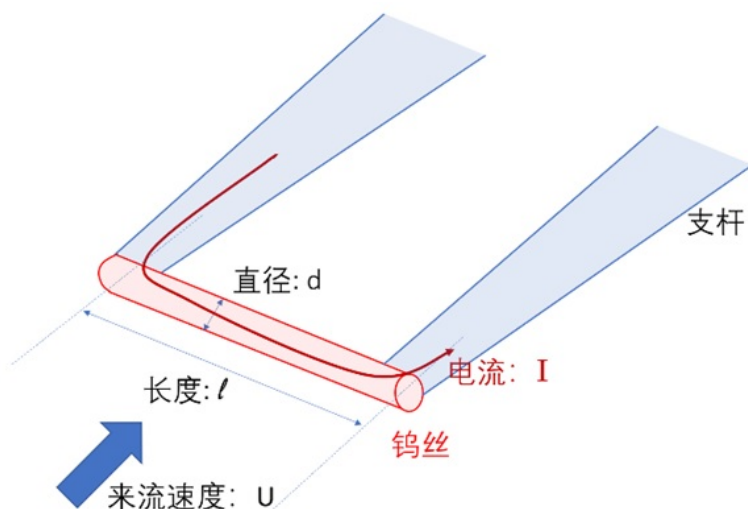


图 I.1: 单丝热线探头传热示意图

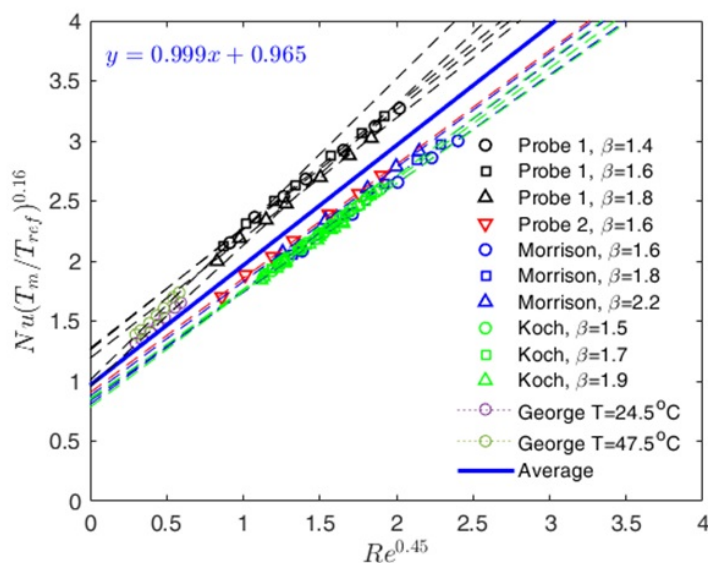


图 I.2: 免标定测量方法的基础

J 导入移测架坐标文件

用户可以使用“导入”功能，将其他excel生产的移测架坐标文件导入到CTALab中。具体过程见图J.1。

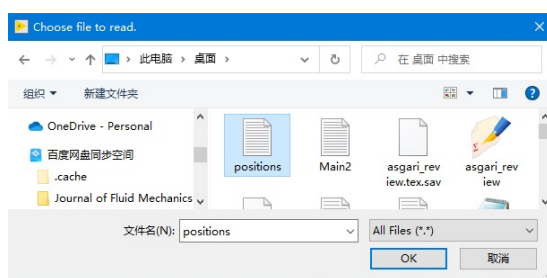
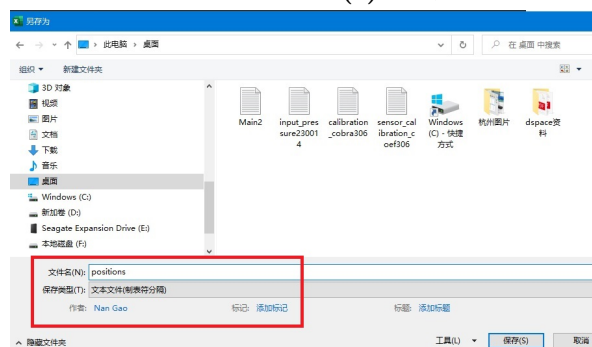
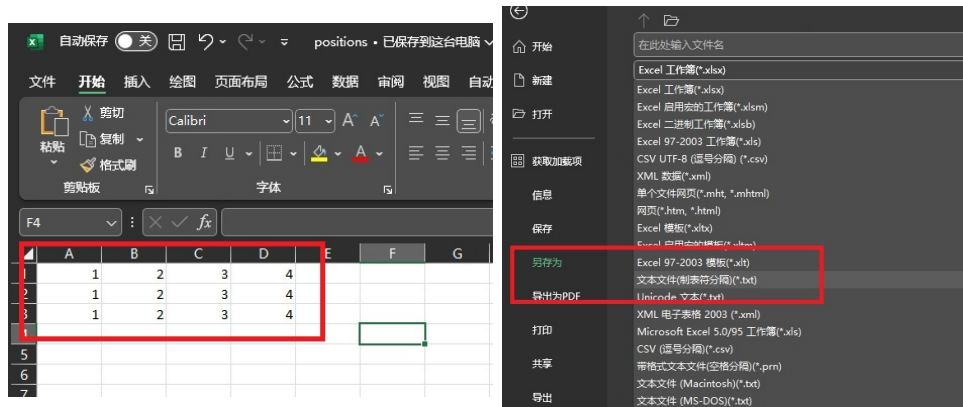


图 J.1: 使用Excel创建移测架坐标文件并导入CTALab

K 二、三维风速分量计算

K.1 二维X形探头的速度分量计算

如果用户使用双丝热线探头，图中显示的是实时速度在测量平面内的两个分量 $u(t), v(t)$ ，单位 $[m/s]$ 。分解方式为（见图K.1）

$$u = |\vec{V}| \cos(\alpha) \quad (14)$$

$$v = |\vec{V}| \sin(\alpha) \quad (15)$$

这里，实时速度矢量 $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$ ，实时速度大小 $|\vec{V}|$ 。

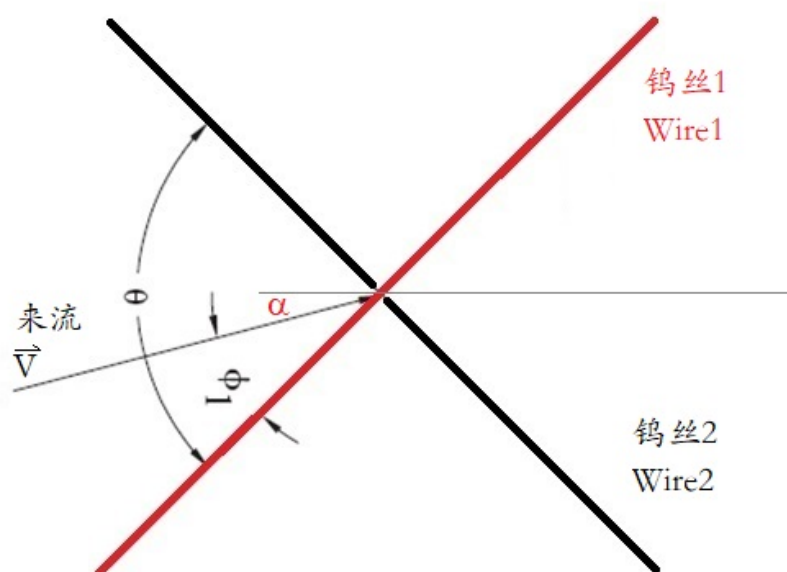


图 K.1: x探头示意图

K.2 三丝探头的速度分量计算

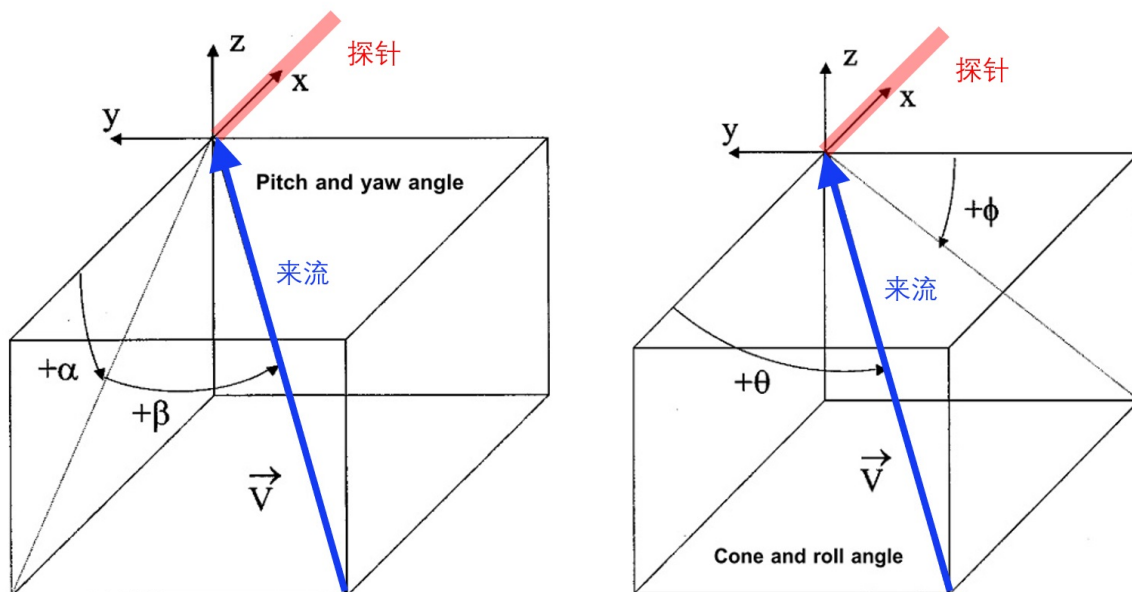


图 K.2: 三维流场的速度分量与角度关系示意图。

K.2 三丝探头的速度分量计算

如果用户使用三丝热线探头，图中显示的是实时速度的三个分量 $u(t)$, $v(t)$, $w(t)$ ，单位 $[m/s]$ 。速度分解方式参见图K.2，具体为

$$u = |\vec{V}| \cos(\beta) \cos(\alpha) \quad (16)$$

$$v = |\vec{V}| \sin(\beta) \quad (17)$$

$$w = |\vec{V}| \cos(\beta) \sin(\alpha) \quad (18)$$

这里，实时速度矢量 $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ ，实时速度大小 $|\vec{V}|$ 。更多说明见第4.8.2节。

角度转换方法为

$$\theta = \cos^{-1}(\cos\alpha\cos\beta) \quad (19)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\tan\beta}\right) \quad (20)$$

和

$$\alpha = \tan^{-1}(\tan\theta\sin\phi) \quad (21)$$

$$\beta = \sin^{-1}(\sin\theta\cos\phi) \quad (22)$$

L lvanlys.dll错误

在使用AMD处理器的电脑使用软件的时候会报错：“LabView: Resource not found lvanlys.dll”。这是本软件的开发平台对AMD处理器支持不够完善造成的，修复方法如下：

- 加入一个新的变量。具体方法为“控制面板”、“系统”、“高级系统设置”、“用户配置文件”、“高级”、“环境变量”、“新建”系统变量
- 输入新变量名`MKL_DEBUG_CPU_TYPE`,
- 并赋值4或5
- 点击OK，并关闭所有窗口
- 重启windows



图 L.1: “控制面板”、“系统”、“高级系统设置”，或者直接搜索“高级系统设置”



图 L.2: “用户配置文件”、“高级”、“环境变量”

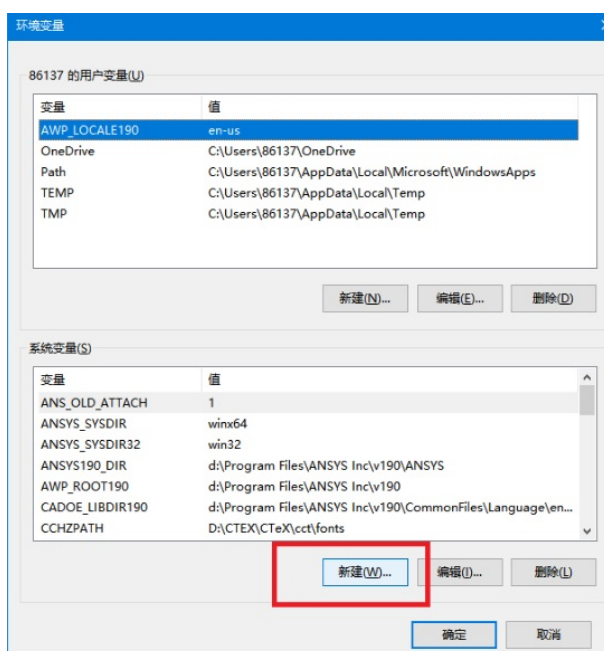


图 L.3: “新建”系统变量

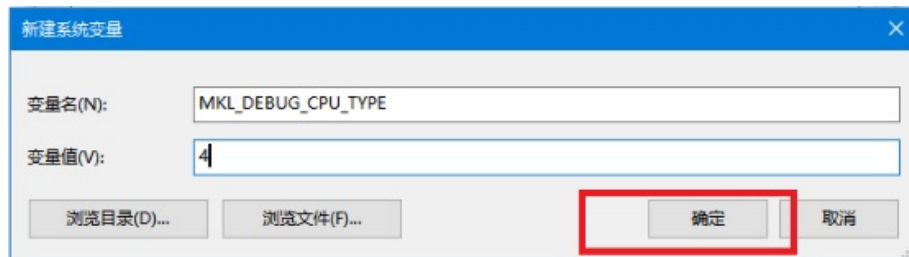


图 L.4: Put *MKL_DEBUG_CPU_TYPE* as Variable name, then put 4 or 5 as Variable value, 输入新变量名*MKL_DEBUG_CPU_TYPE*, 并赋值4或5