

热线风速仪基本原理及使用方法

大连航华科技有限公司

www.hanghualab.com

2021-7-10

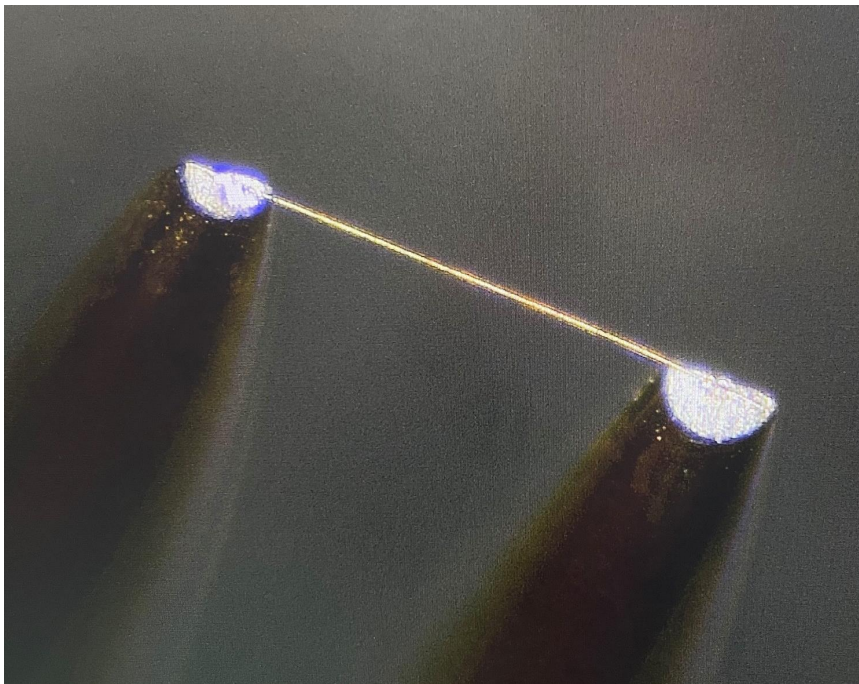


航华公众号

内容

- 热线风速仪的基本原理
- 热线风速仪的使用
 - 过热比、桥比
 - 方波测试
 - 偏置、增益
 - 标定
 - 测量、采集
- 热线风速仪数据分析
 - 概率密度
 - 均值、方差
 - 谱分析
- 热线维修

热线探头：电阻

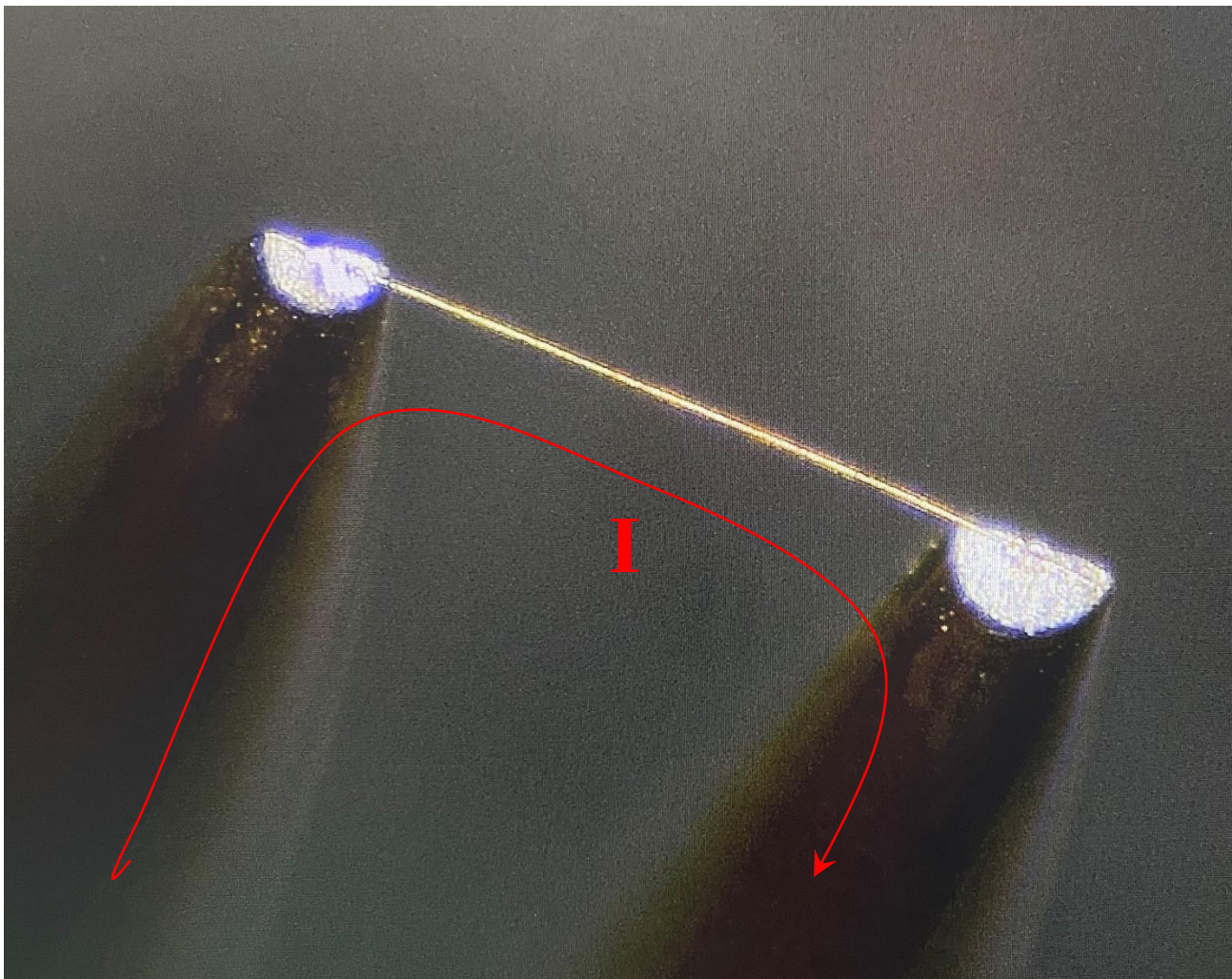


- 金属丝电阻： $R = \frac{\rho L}{S}$
- ρ 电阻率， L 为材料的长度， S 为面积
- 一个5微米直径，2毫米长的钨丝的电阻在室温下约为：
 - $R_0 = 5.3 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^{-3} / (3.14 \times (5 \times 10^{-6})^2 / 4) \sim 5.4$ 欧姆

表 8-2 几种常用材料在 20℃ 时的电阻率

材料	$\rho / (\Omega \cdot m)$	材料	$\rho / (\Omega \cdot m)$
银	1.6×10^{-8}	镍铜合金	5.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	镍铬合金	1.0×10^{-6}
铝	2.9×10^{-8}	碳	3.5×10^{-5}
钨	5.3×10^{-8}	硅	2.3×10^3
铁	1.0×10^{-7}	电木	$10^{10} \sim 10^{14}$
锰铜合金	4.4×10^{-7}	橡胶	$10^{13} \sim 10^{16}$

焦耳热



- 电阻通电后会产生热:

$$Q=I^2R$$

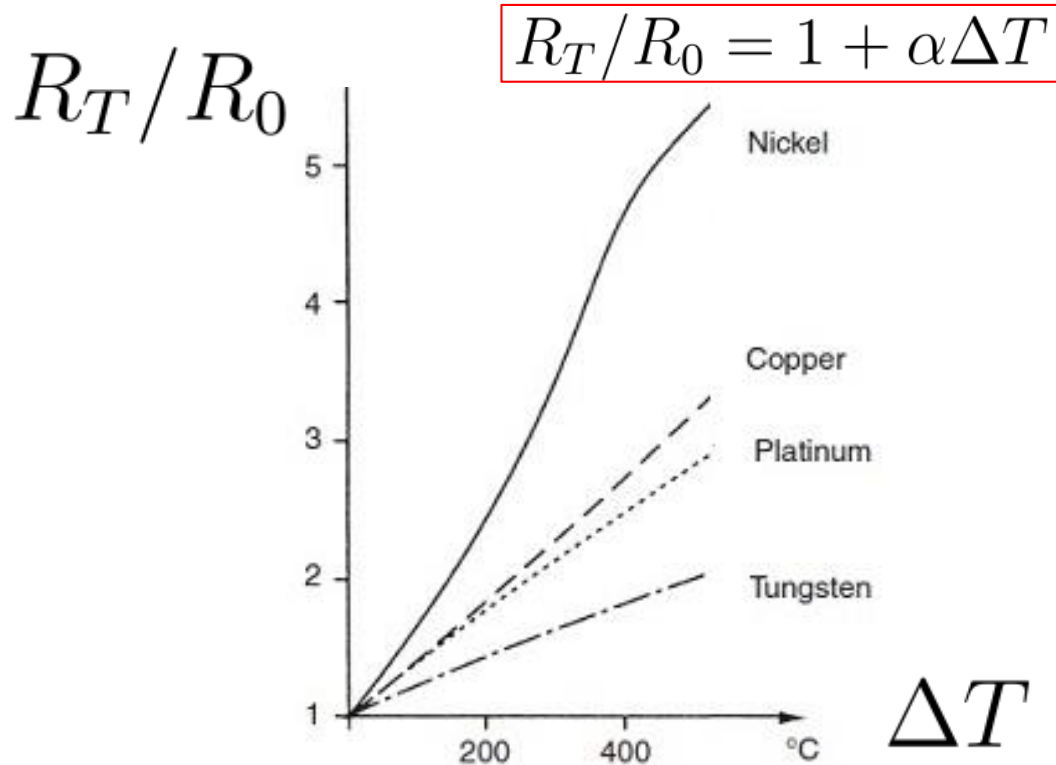
- 电阻会因此升温

阻值-温度关系

$$R_T = R_0 + \alpha R_0 \Delta T$$

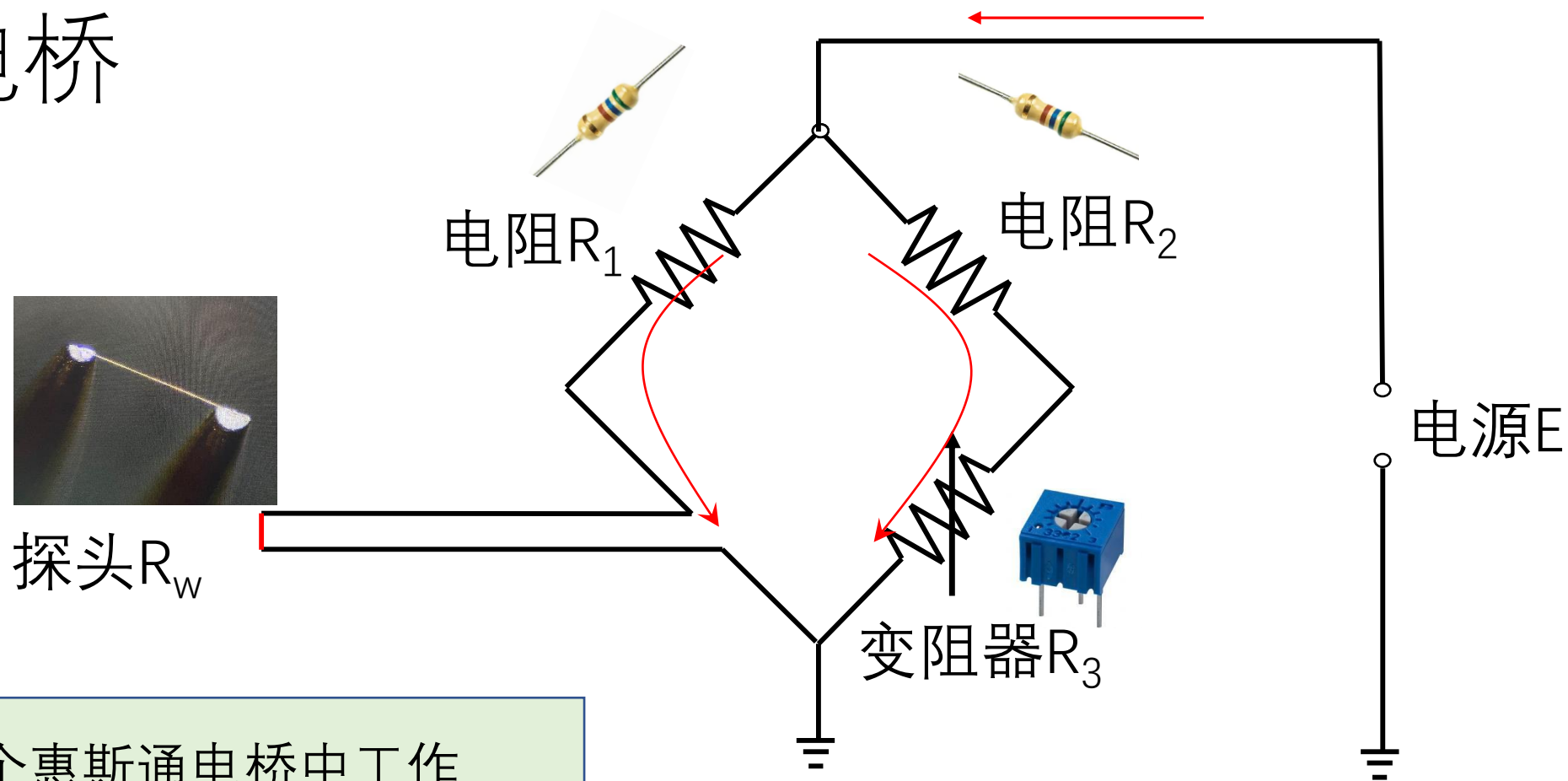
- R_T 工作电阻, T 工作温度
- R_0 冷态电阻, T_0 参考温度 20°C
- 温度变化 $\Delta T = T - T_0$
- α : 温度电阻系数

- 当电阻温度 T 增加时, R_T 随之增加
- 反之亦然



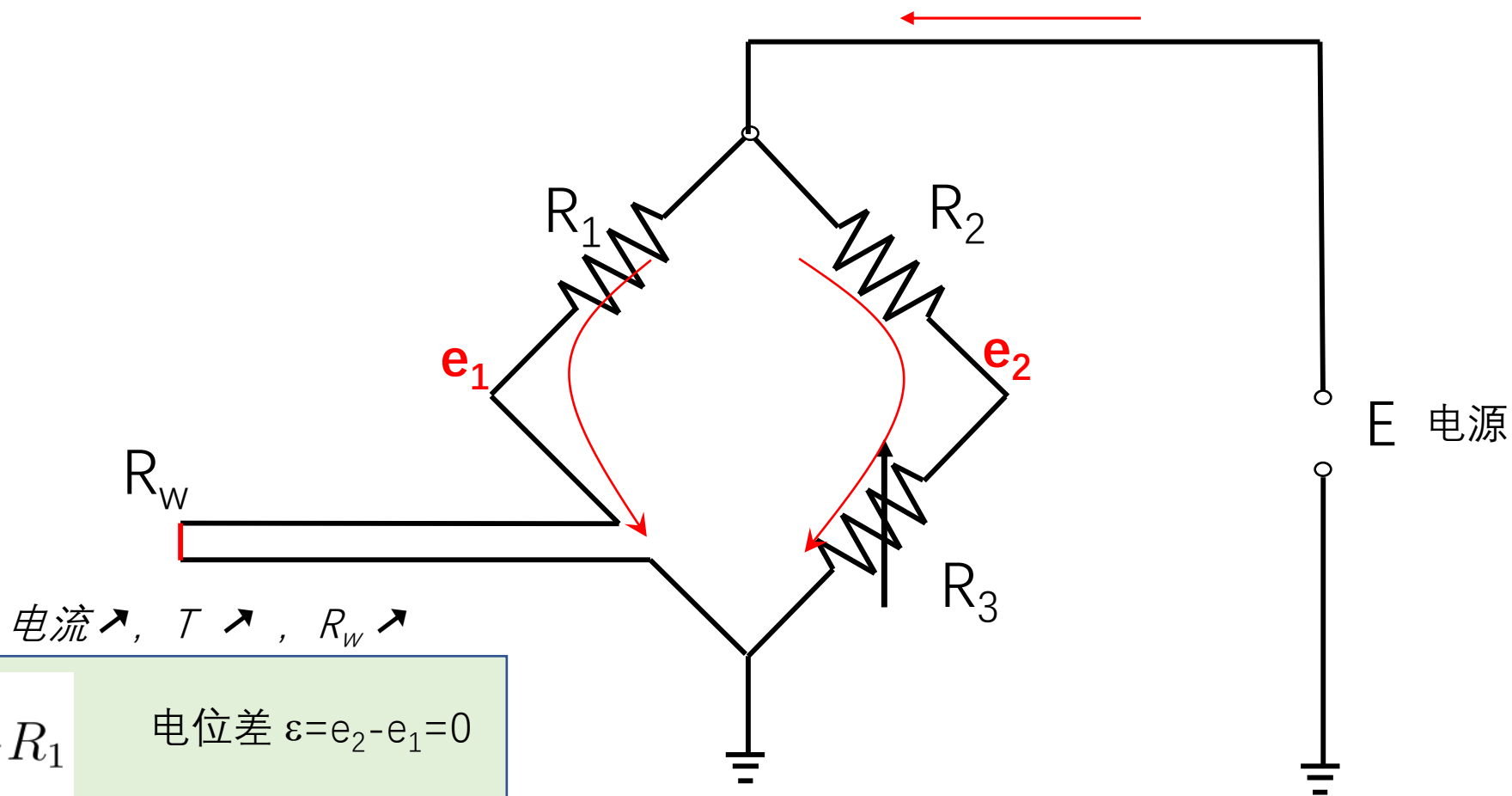
Material	Element/Alloy	"alpha" per degree Celsius
Nickel	Element	0.005866
Iron	Element	0.005671
Molybdenum	Element	0.004579
Tungsten	Element	0.004403
Aluminum	Element	0.004308
Copper	Element	0.004041
Silver	Element	0.003819
Platinum	Element	0.003729
Gold	Element	0.003715
Zinc	Element	0.003847
Steel*	Alloy	0.003

惠斯通电桥



- 热线探头在一个惠斯通电桥中工作，其电阻值 R_w 可随温度变化；
- 其他三个电阻 R_1 , R_2 , R_3 阻值已知，且阻值不随电流、温度发生变化

惠斯通电桥



电桥平衡:

$$R_w = \frac{R_3}{R_2} R_1$$

电位差 $\varepsilon = e_2 - e_1 = 0$

不平衡:

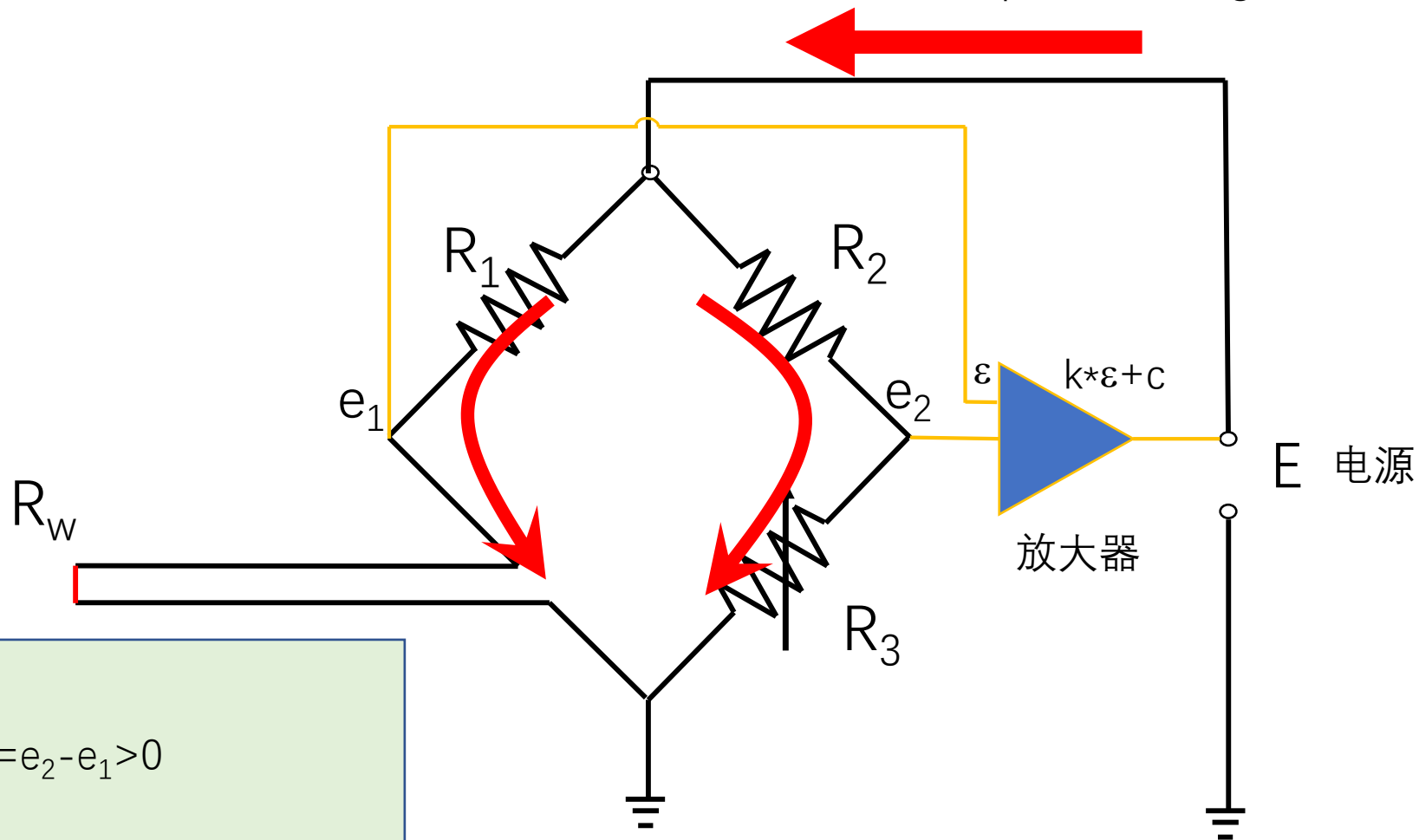
$$R_w > \frac{R_3}{R_2} R_1$$

电位差 $\varepsilon = e_2 - e_1 < 0$

$$R_w < \frac{R_3}{R_2} R_1$$

电位差 $\varepsilon = e_2 - e_1 > 0$

反馈电路



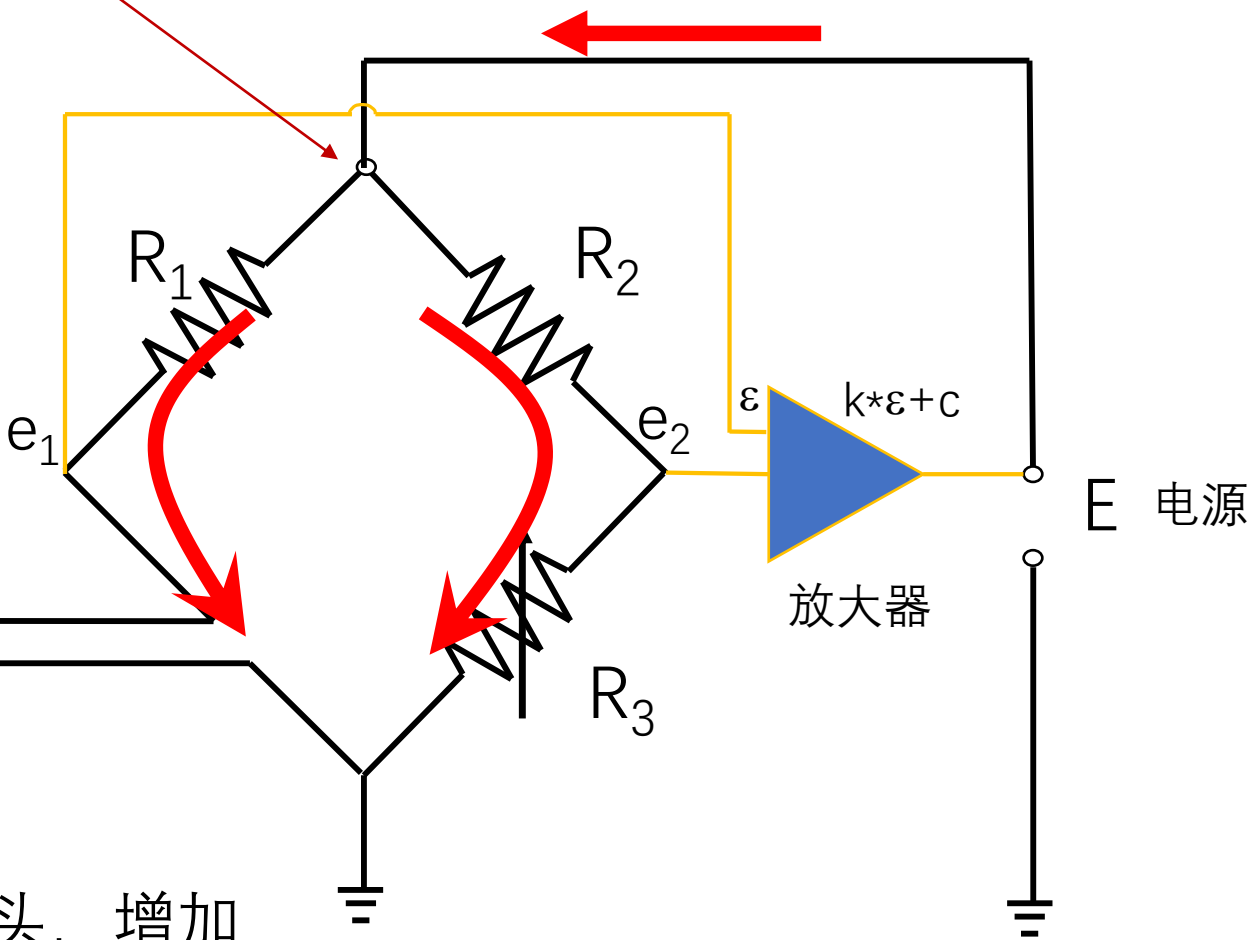
$$R_w < \frac{R_3}{R_2} R_1$$

电位差 $\varepsilon = e_2 - e_1 > 0$

反馈电路放大 ε , 加大电流,
加热探头, 使 $R_w \nearrow$, $\varepsilon \rightarrow 0$

此处电压与风速存在关联

反馈电路维持电桥平衡

 R_w 

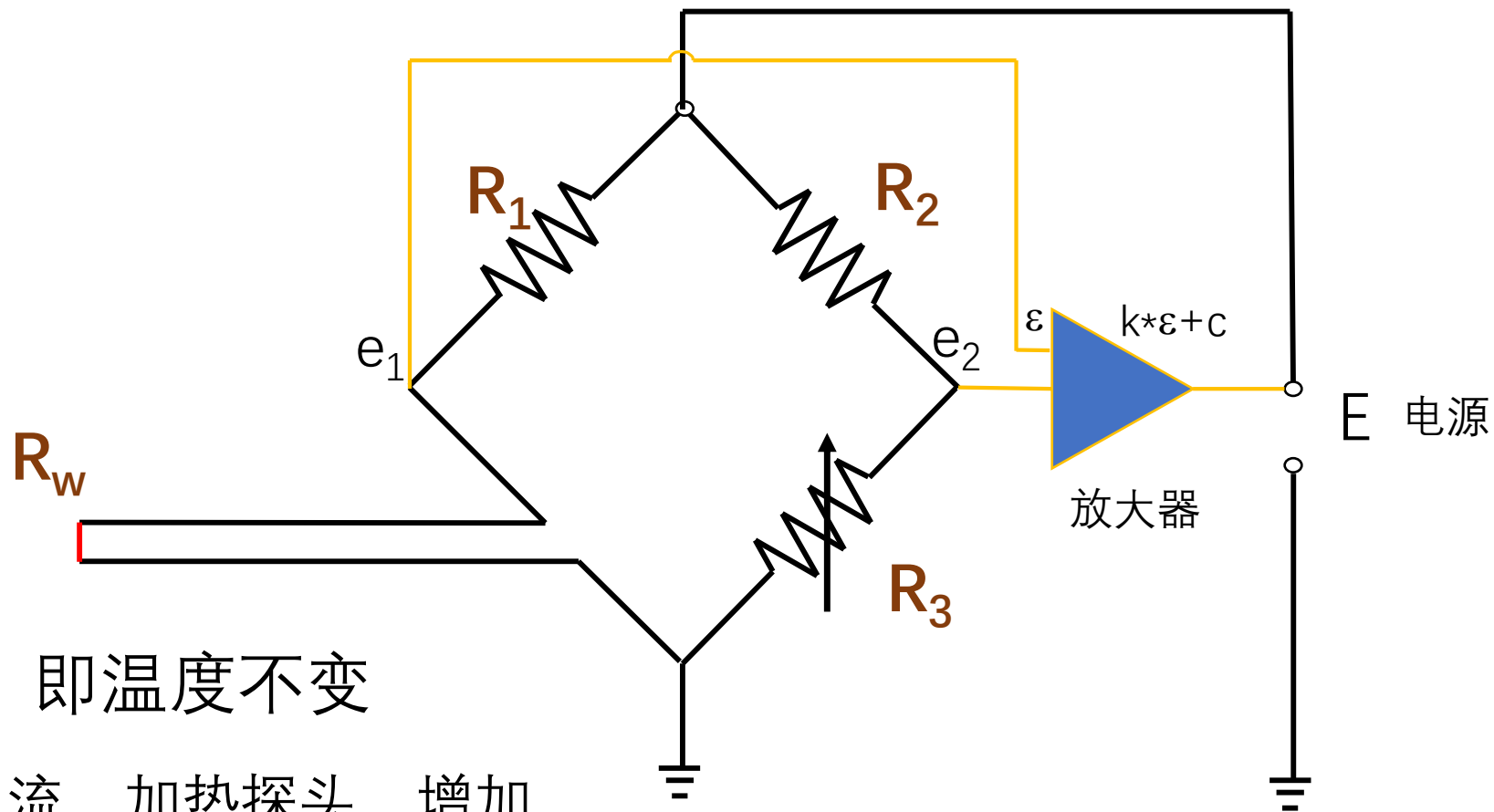
- 风速 $\nearrow$, $T \searrow$, $R_w \searrow$, $\varepsilon = e_2 - e_1 > 0$

反馈电路放大 ε , 加大电流, 加热探头, 增加探头电阻, 使电桥恢复平衡

- 风速 $\searrow$, $T \nearrow$, $R_w \nearrow$, $\varepsilon = e_2 - e_1 < 0$

放大 ε 减小电流, 给探头降温, 减小电阻, 恢复电桥平衡

恒温热线电桥

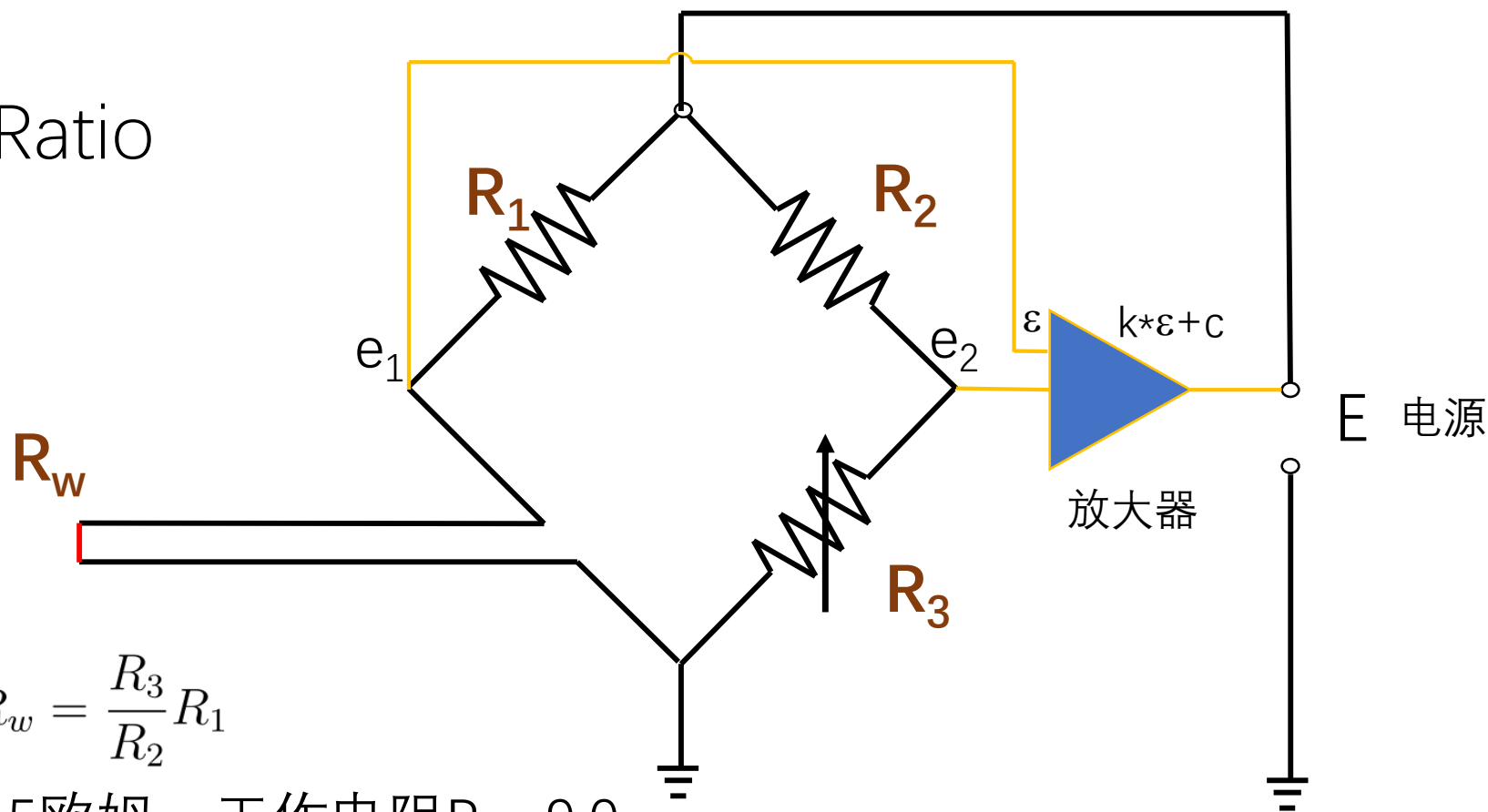


- 探针电阻保持不变，即温度不变

反馈电路放大 ε ，加大电流，加热探头，增加探头电阻，使电桥恢复平衡

$$R_w = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

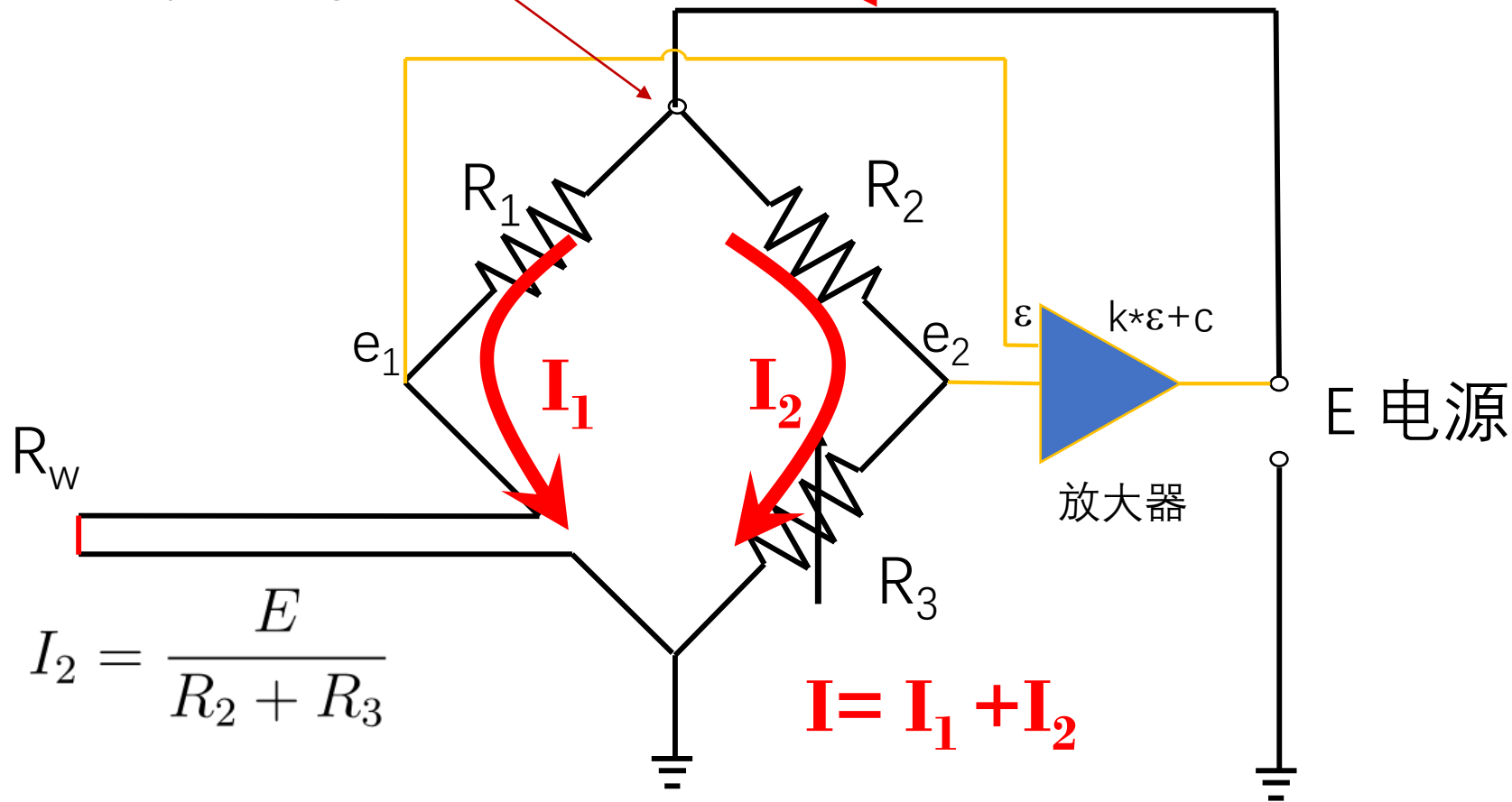
探头工作电阻 R_w 过热比 Over Heat Ratio



- 调节变阻器 R_3 阻值, 改变探头工作电阻 $R_w = \frac{R_3}{R_2} R_1$
- 如果探头初始电阻 $R_{w0}=5$ 欧姆, 工作电阻 $R_w=9.0$ 欧姆, **过热比**: $R_w/R_{w0}=1.8$
- 钨的温度电阻系数 $\alpha=0.0044\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,
- $R_w/R_{w0}=1+\alpha(T-T_0)$
- $T=T_0+(1.8-1)/\alpha=20+182=202^{\circ}\text{C}$

此处电压 E_{TOB} 与风速存在关联
TOB=Top of Bridge 桥顶

电桥两路电阻之比： 桥比Bridge Ratio



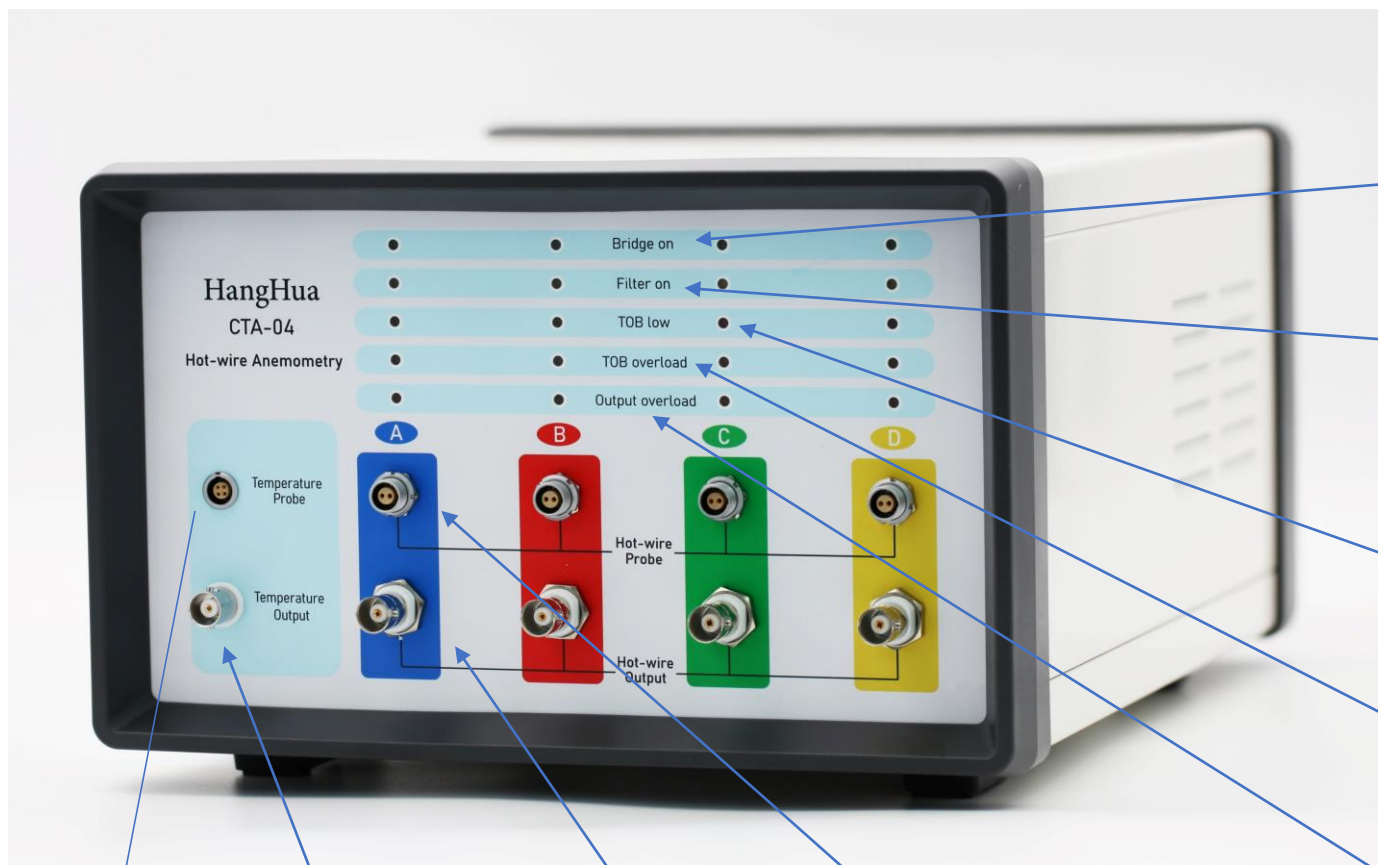
- 电流 $I_1 = \frac{E}{R_1 + R_w}$ $I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3}$

- 电流之比 $B.R. = \frac{I_1}{I_2}$

$$B.R. = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_w}$$

热线风速仪使用方法

以航华CTA04为例



温度探头接口，接
PT100温度传感器

温度输出接口，
接数据采集卡

热线探头接口，接热线探头

热线输出接口，接数据采集卡

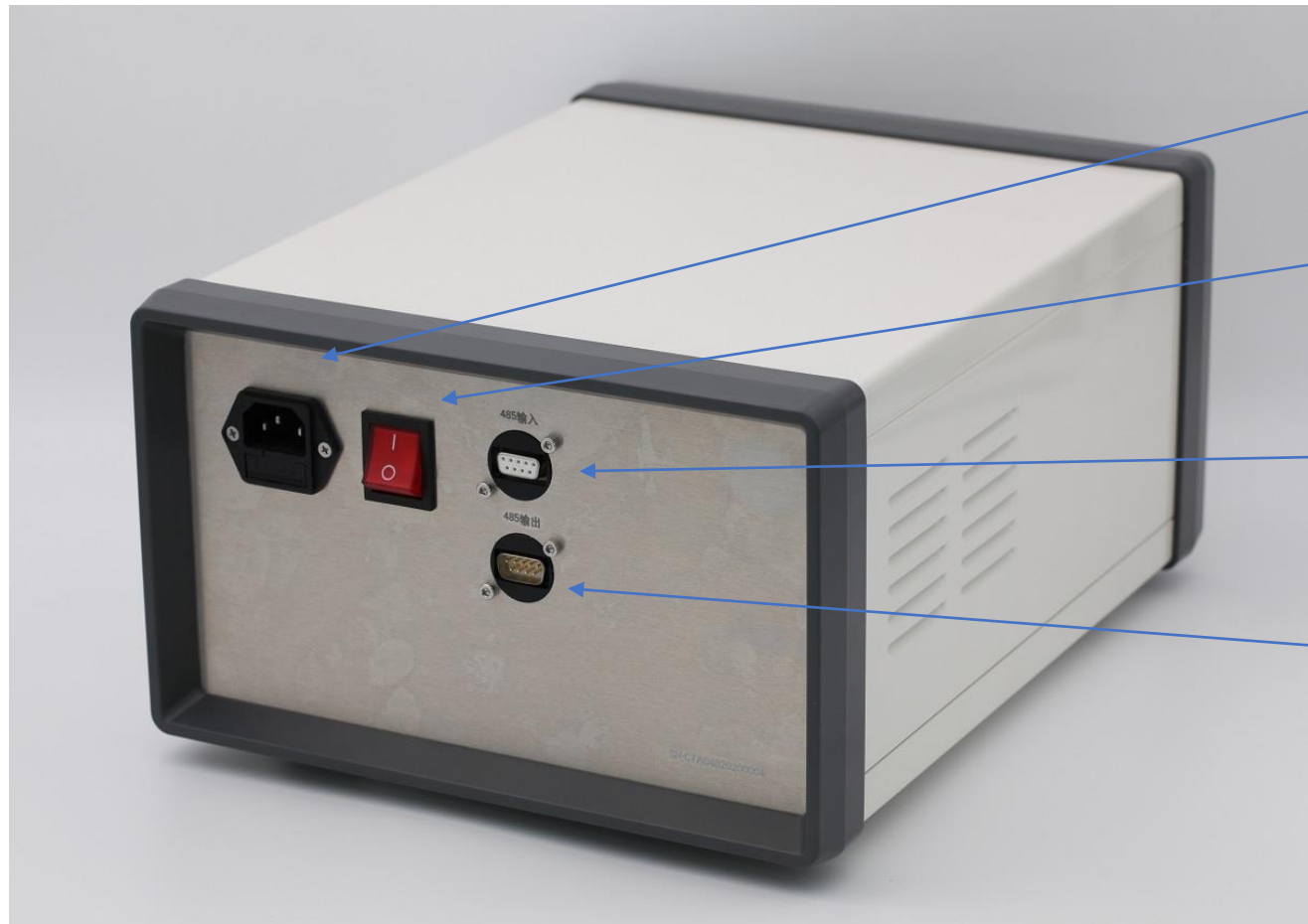
Bridge on: 电桥工作指示灯
亮：工作，灭：不工作

Filter on: 滤波器工作指示灯
亮：输出有滤波，灭：无滤波

TOB low: 桥顶电压过低指示灯
亮： $E_{TOB} < \text{小于} 0.4V$ ，灭： $> 0.4V$

TOB overload: 桥顶电压过载指示灯
亮： $E_{TOB} > 9V$ ，灭： $< 9V$

Output overload: 输出过高指示灯
亮：输出 E 在 $\pm 5V$ 范围之外



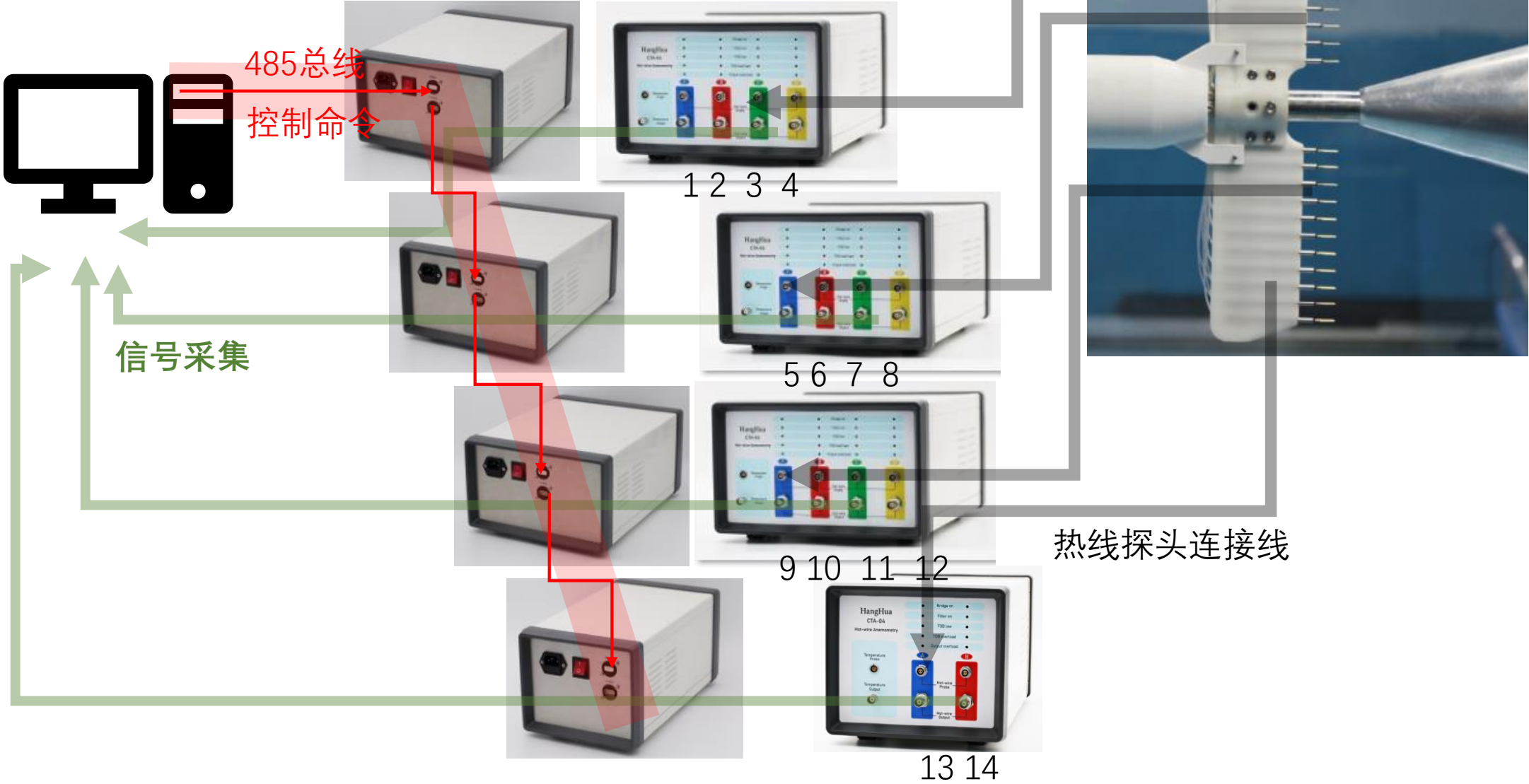
电源线接口

电源开关

串口，接控制电脑，接收设置命令

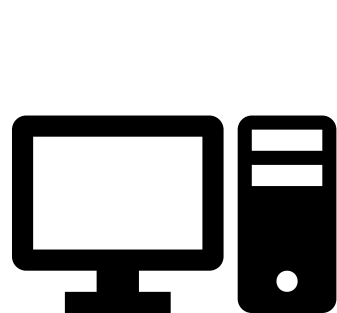
串口，接其他热线风速仪，
以实现协同测量

热线风速仪系统工作原理示意图



1: 电脑控制热线风速仪

- FT232芯片：通过USB发送命令至串口
- 电脑端需要安装
 - FT232芯片驱动程序
 - 串口调试助手：用来发送控制命令

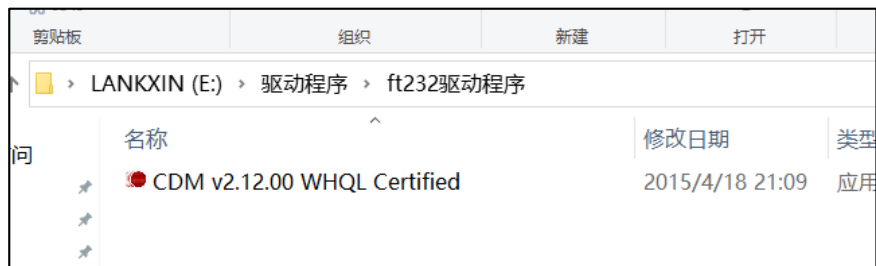


控制命令



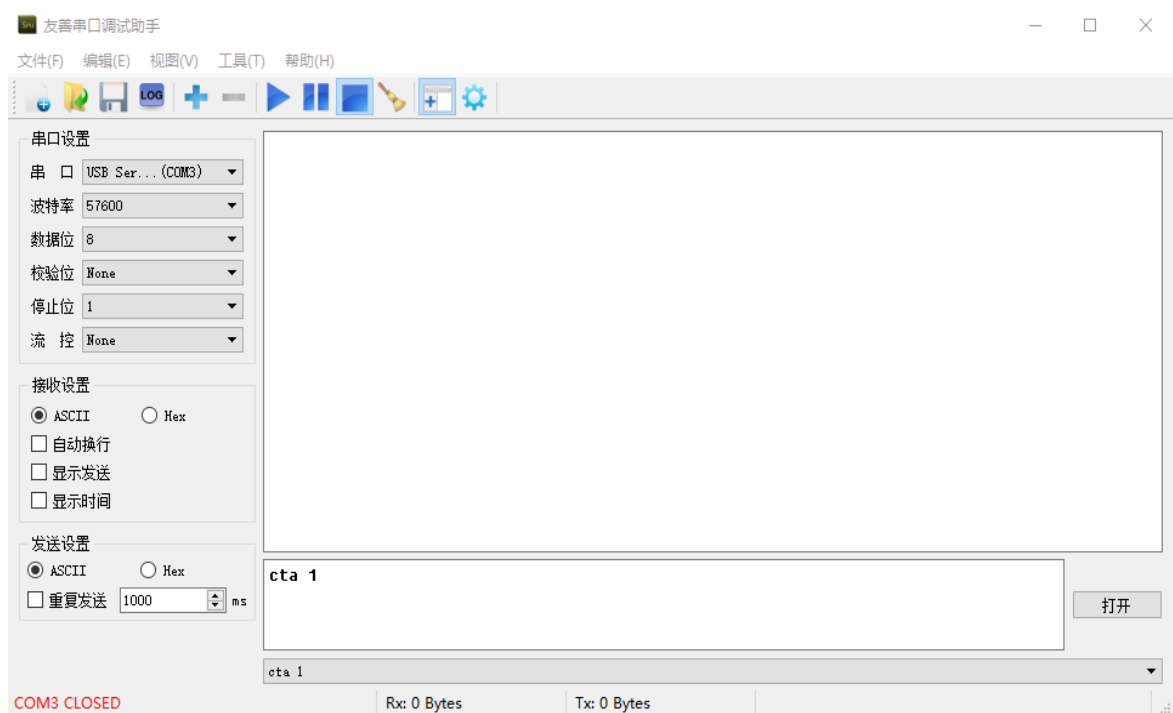
FT232芯片驱动软件

- 安装好以后，设备管理器会出现串口信息，记住COM号



安装串口调试助手

- 串口调试助手软件有很多种，用户可根据自己喜好选择
- 安装成功以后，设置参数
 - 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



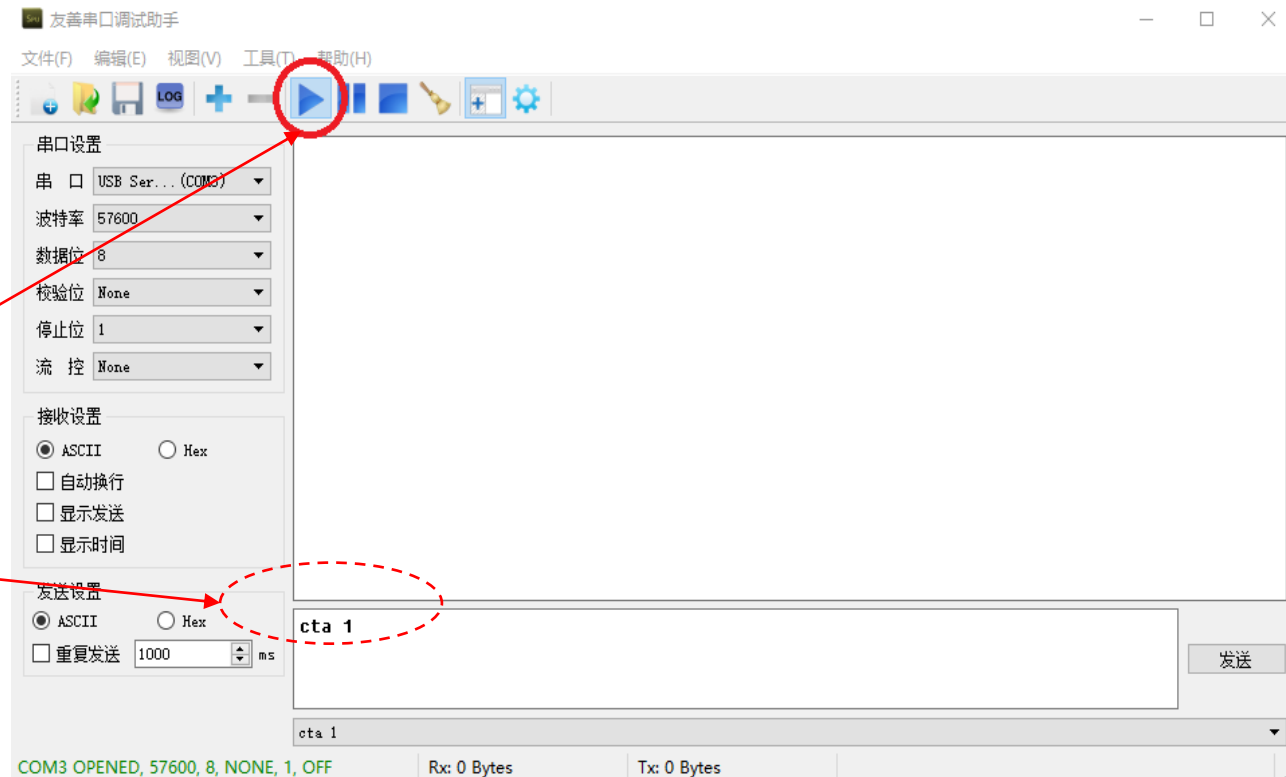
打开电脑通讯串口

- 按串口调试助手中的播放按钮
- 输入'cta 1', 查询第1通道的参数, 点击“发送”

• “助手”软件显示反馈

• 参数包括:

- 桥路特性: Overheat过热比 (R3阻值)
- 桥路特性: Scale 桥比 (10:1)
- 信号处理: Offset偏置
- 信号处理: Gain 增益
- 信号处理: Filter 滤波
- 调试工具: Square Wave方波



```
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
```

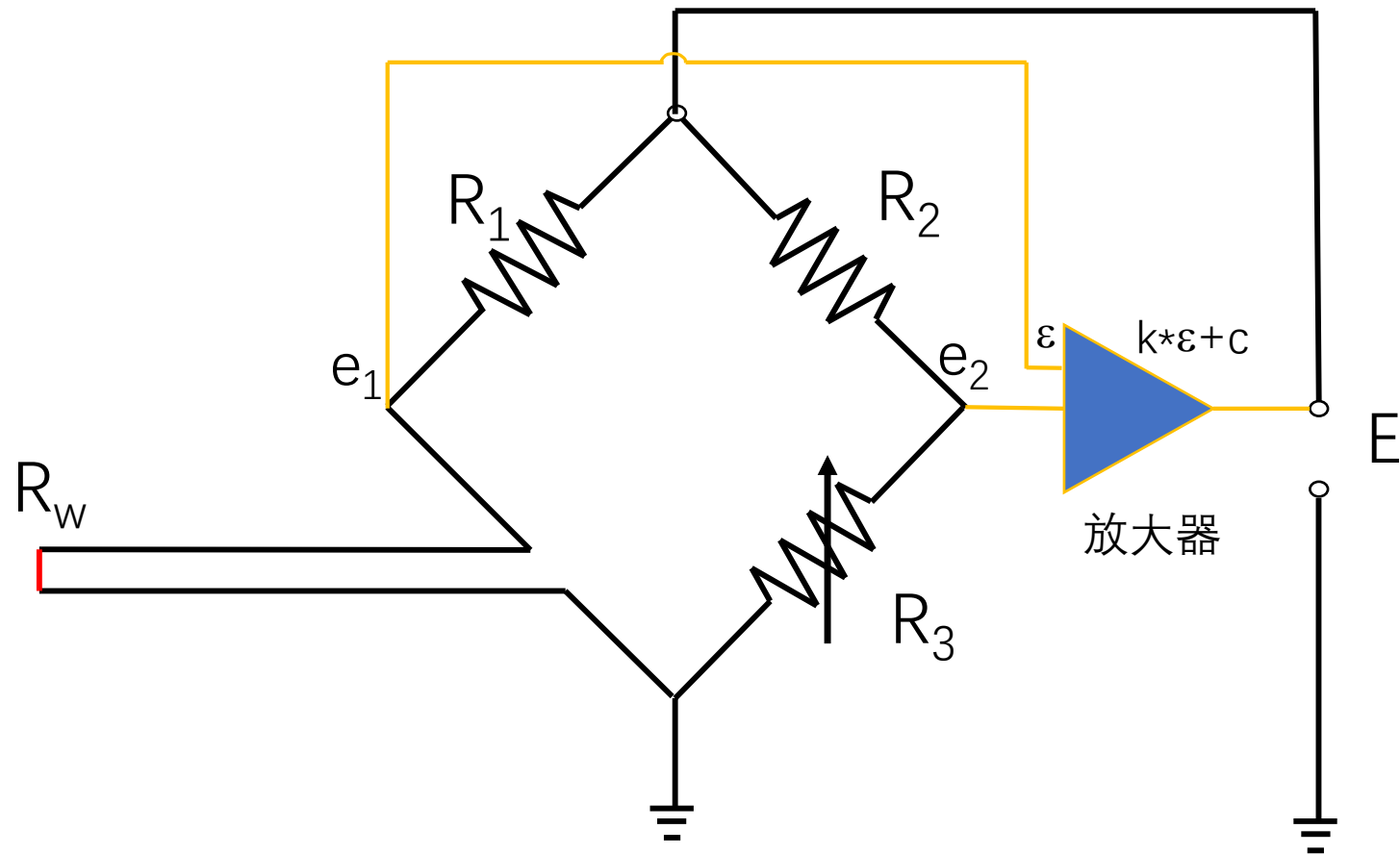
1. 风速仪通道号 (1-4)
2. 过热比数值 (0-1999)
3. 比例 (不必修改, 为预留参数)
4. 电桥平衡参数, 方波试验得出最优值 (范围是0-65535)
5. 偏置参数, 决定输出电压向负方向的平移量 (范围是0-65535)
6. 增益参数, 输出电压放大倍数, 1. 2. 4. 8. 16倍可调
7. 滤波器参数, 0-7, 0为不使用滤波器, 1-7对应10kHz-1Hz共7档截止频率选择。
8. 方波试验中方波的周期, 单位是us, 范围是1-20000, 一般设置为2000us, 对应500Hz
9. 电桥是否工作
10. 方波是否加载
11. 桥路电压过低的指示灯状态, 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

cta 1

发送

过热比 overhear

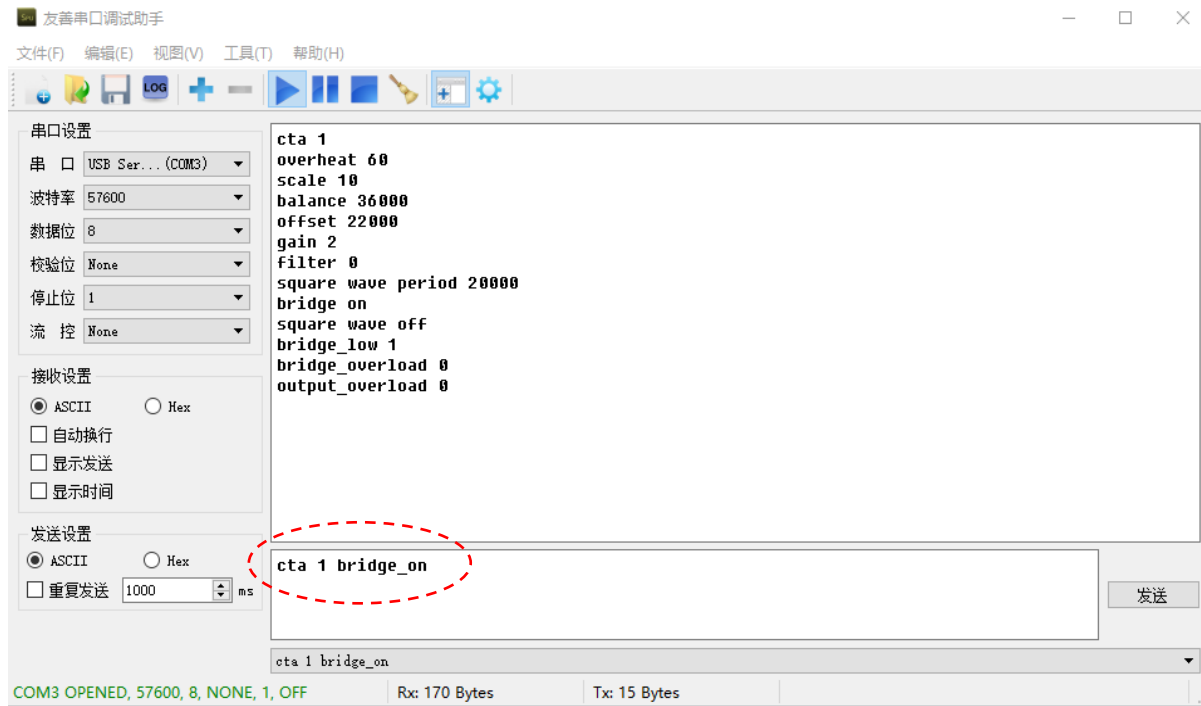
- 其数值实质上是 R_3 的阻值
- 数值范围：0-1999
- 单位：欧姆
- 例：
 - 探头冷态电阻为4.8欧
 - 过热比设定为1.4
 - R_3 的阻值（overheat值）应设置为 $4.8 \times 1.4 \times 10 = 67$
 - “助手”输入如下命令
“cta 1 overheat 67”



$$B.R. = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_w} = 10$$

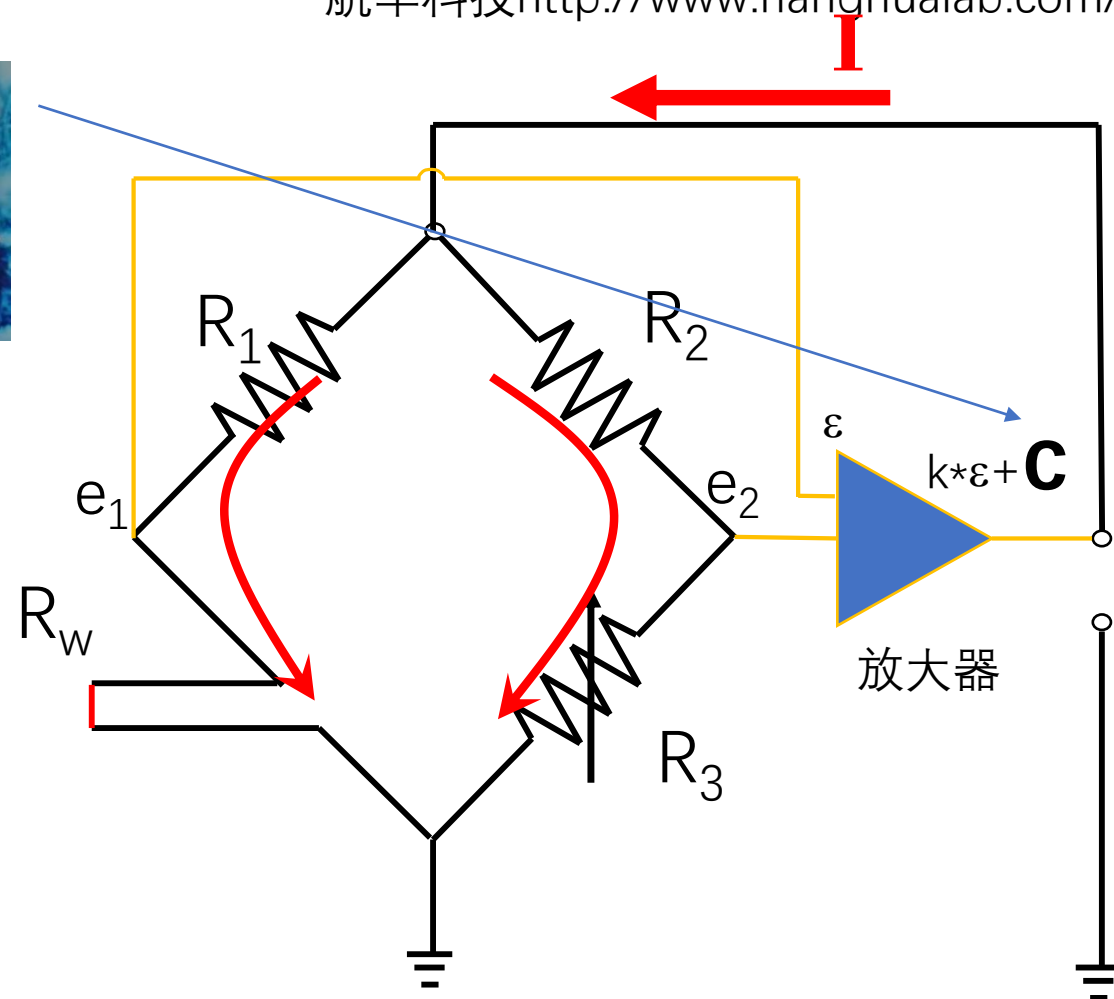
打开/关闭通道1

- 打开或关闭通道
 - cta [风速仪通道编号] bridge_on
 - cta [风速仪通道编号] bridge_off
 - 风速仪收到命令后会立即回复所有参数。
- 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。
- 命令中cta与编号、编号与bridge_off间使用空格隔开，
- 不要加“回车”

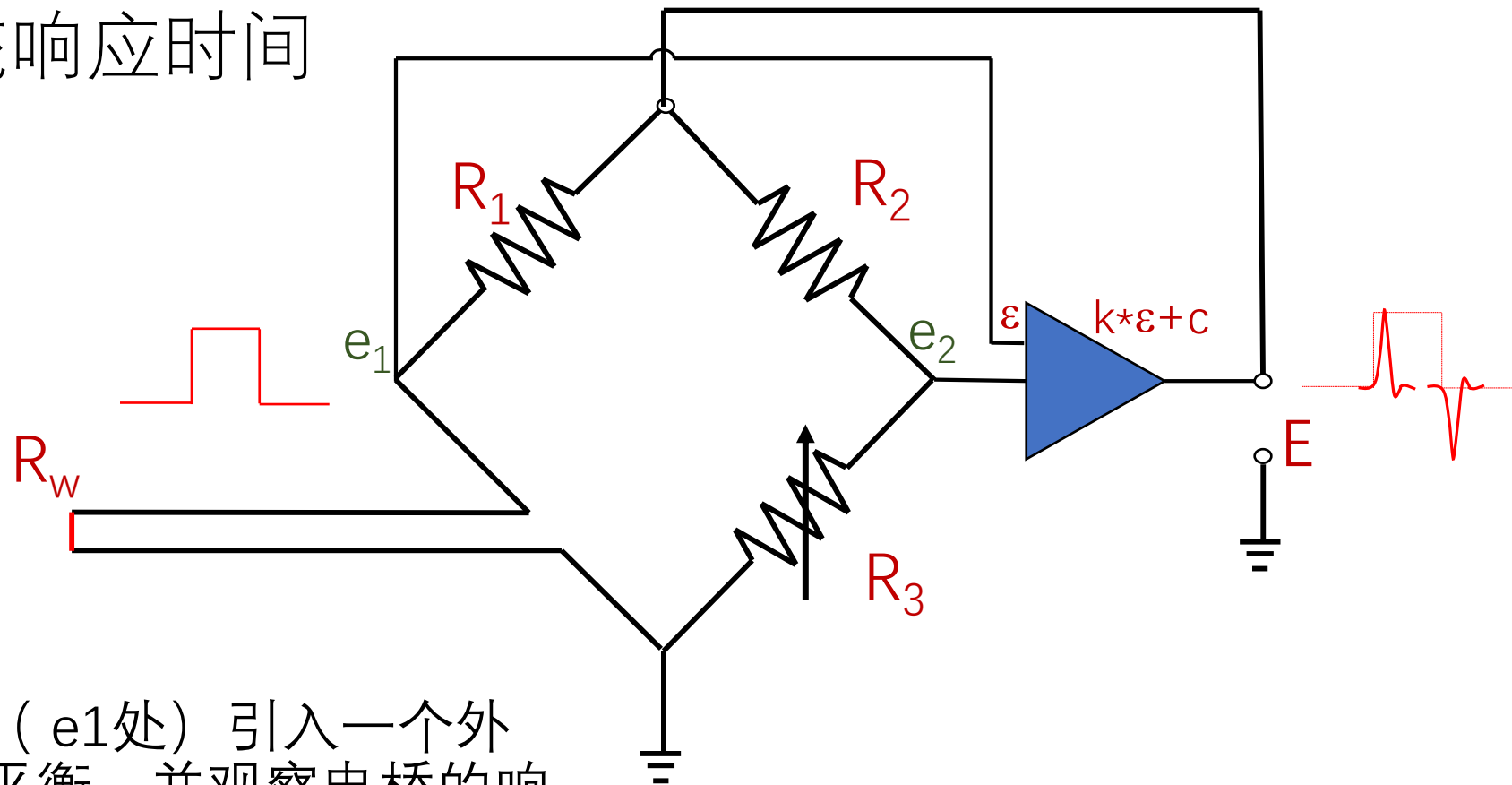


调节电桥平衡 balance

- 数值：0-65535，一般在30000-40000
- 实质为反馈c值的大小
- 例：“助手”输入如下命令
“cta 1 balance 30000”
- 如何观察系统响应的变化？方波测试



方波测试调节系统响应时间

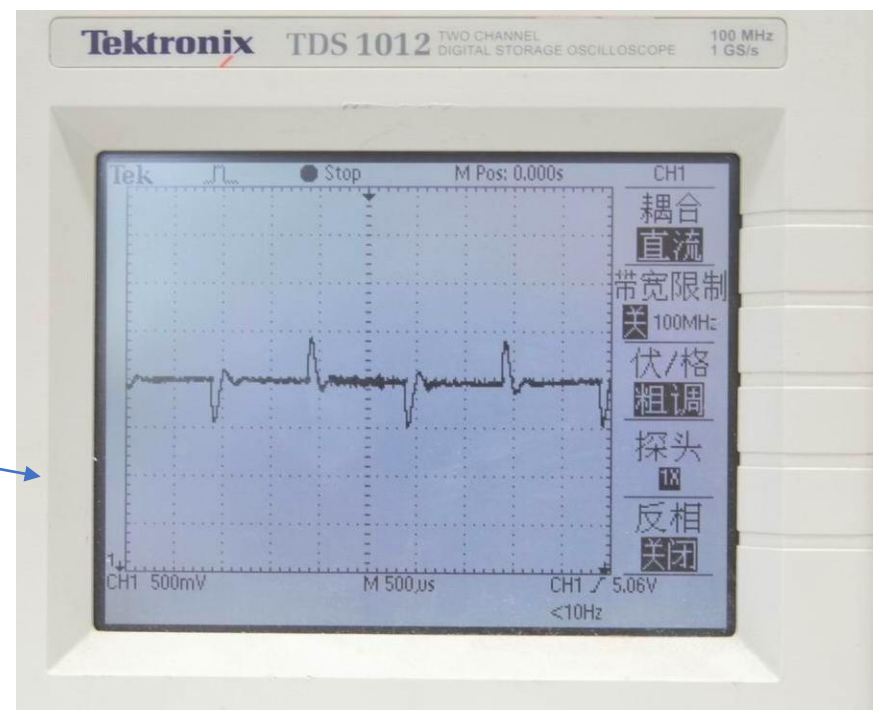
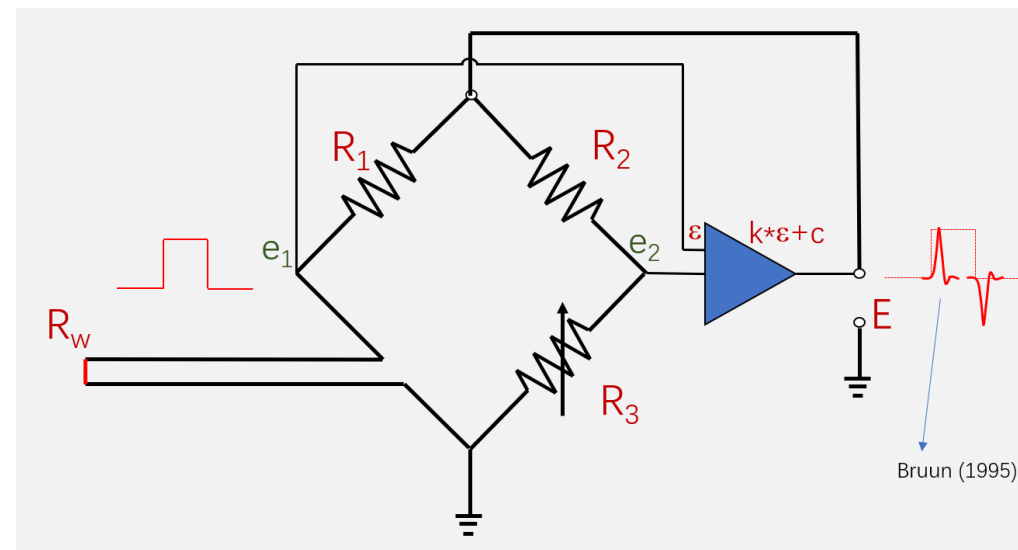


方波测试：在反馈信号中（ e_1 处）引入一个外加的方波信号时电桥失去平衡，并观察电桥的响应（ E_{TOB} ）。右图的 τ_w 为系统的响应时间

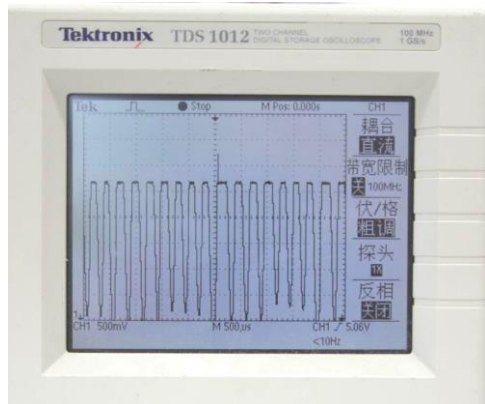
调整反馈强度 k 值，选择最佳的响应曲线

方波测试

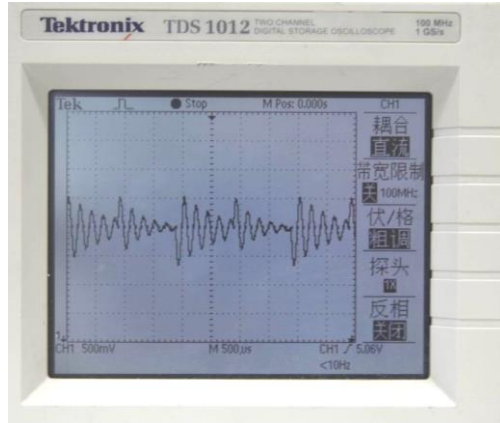
- “助手”软件中输入：
 - cta 1 square_wave_on
 - cta 1 square_wave_off
- 利用示波器或者数据采集软件观察输出信号
- 反复调节balance数值，使输出达到右图所示，系统进入最佳反馈状态
- 方波测试需要在实验最大风速下（最不利状态）进行



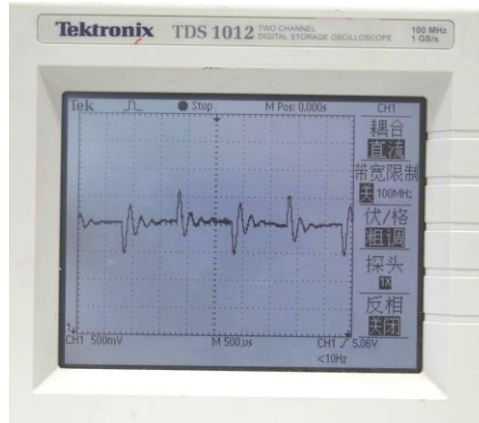
不理想的反馈状态



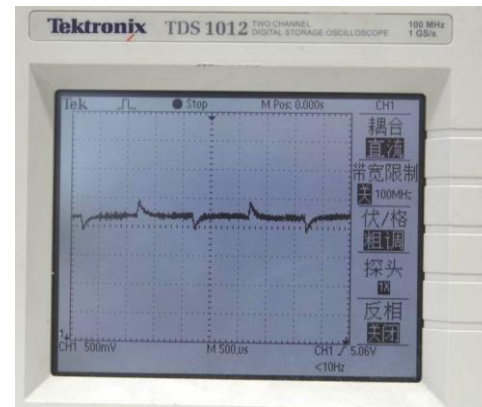
电桥不平衡，不能使用



电桥不稳,须进一步调节

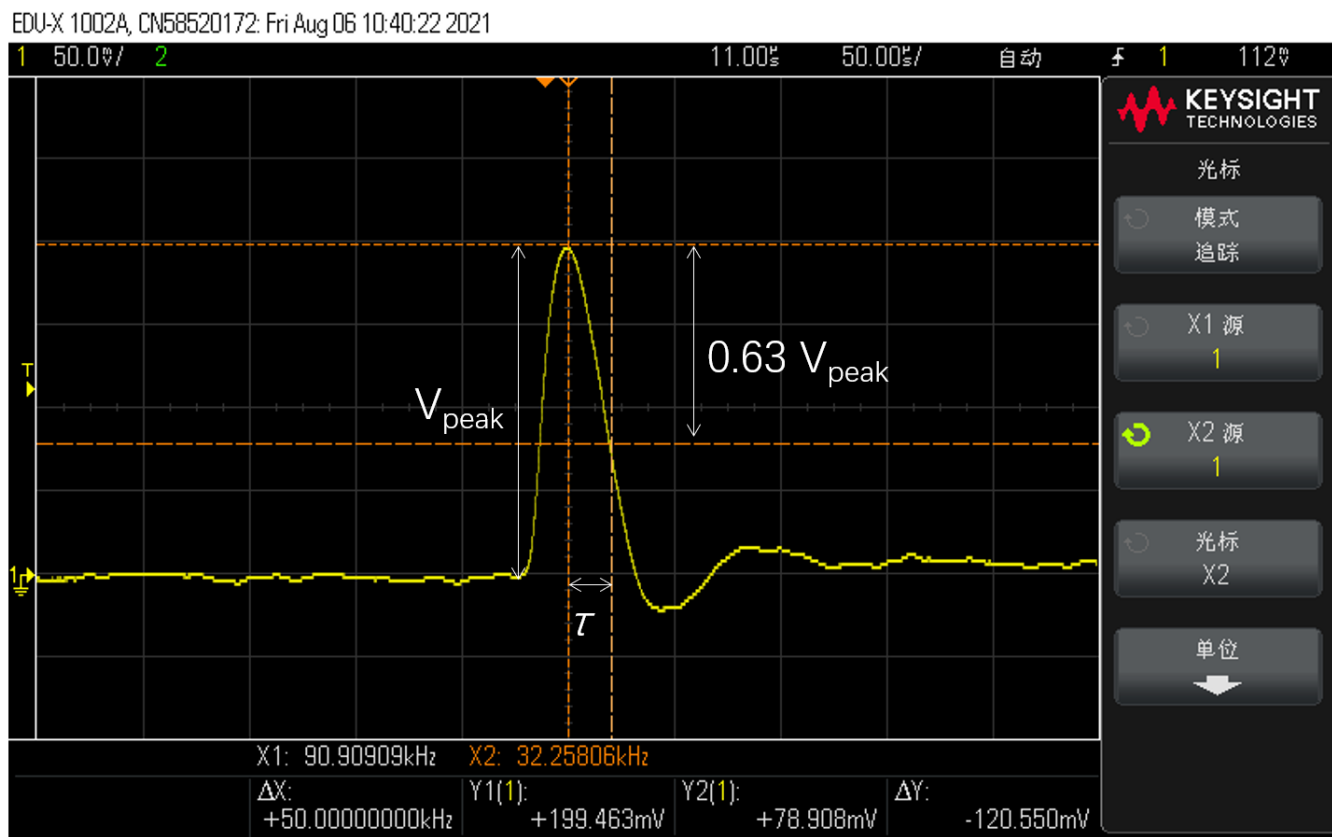


接近稳定，还有一些振荡，
须进一步调节。

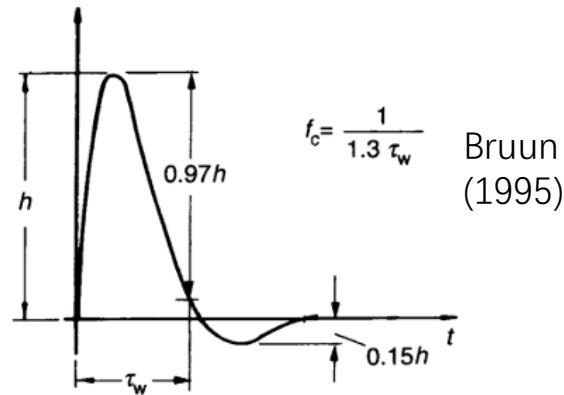


电桥过稳，风速仪频率
响应较低，须进一步调
节

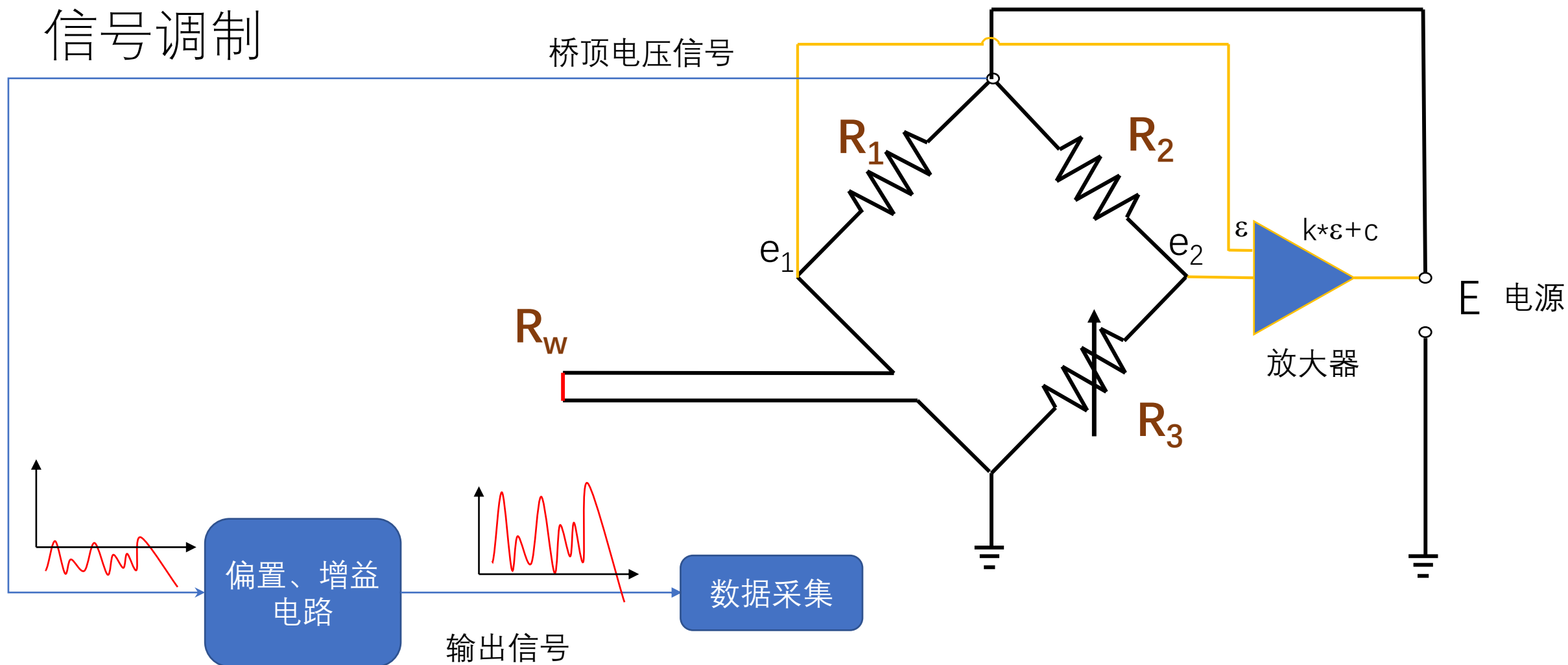
系统频响



- 一个典型的航华热线风速仪方波实验响应曲线
- 5微米直径钨丝，来流20m/s
- 根据Lomas方法，系统特征时间为20微秒，频响为50kHz



信号调制

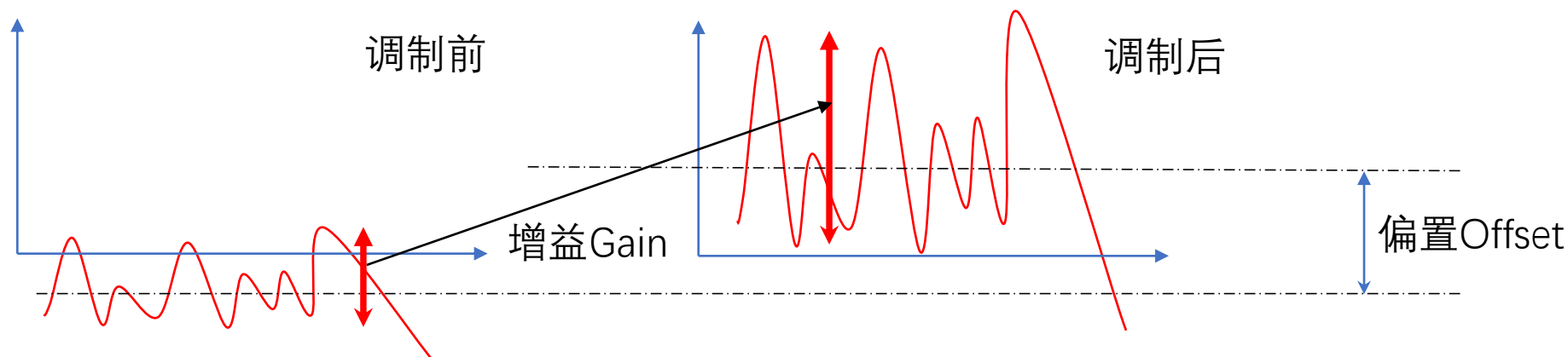


输出信号调制

gain, offset

offset	0-65535，一般在20000左右
gain	1,2,4,8,16五档

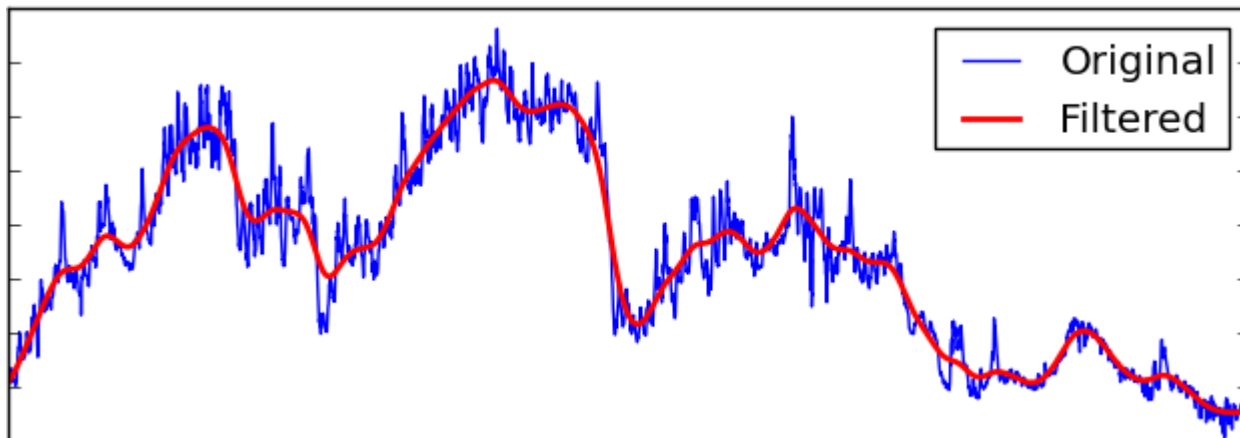
- 调制目标：输出信号在 $\pm 5V$ 之间
- 例：“助手”软件中输入
 - cta 1 offset 30000
 - cta 1 gain 2



滤波器 filter

- 数值：0-7
 - 0：不使用低通滤波器，
 - 1对应10kHz低通滤波
 - 2对应5kHz
 - 3对应1kHz
 - 4对应500Hz
 - 5对应100Hz
 - 6对应10Hz
 - 7对应1Hz
- “助手”软件中输入：
 - **cta 1 filter 3**
实现1kHz低通滤波

有无滤波的输出信号

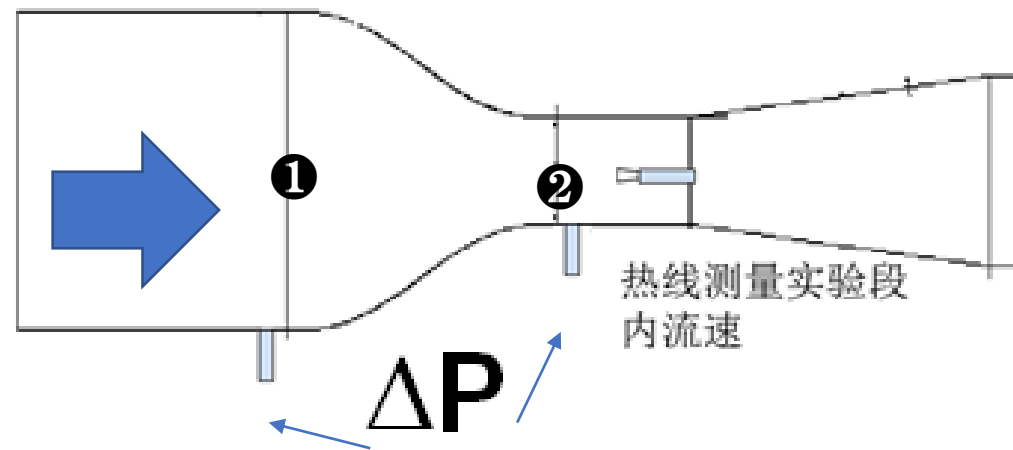


热线探头的标定

热线探头的标定

- 系统的输出为 $\pm 5\text{V}$ 范围内的模拟电压信号，需要经过**标定**才能得到相对应的速度
- 标定是将探头放置于一个已知的、可变流速的环境中，测量热线系统的输出值，比如：风洞或者射流出口
- 以直流风洞为例，若收缩比4:1

$$U_2 = \sqrt{\frac{32\Delta P}{15\rho}}$$



$$U_1 A_1 = U_2 A_2$$

$$A_1/A_2 = 4$$

$$U_2/U_1 = 4$$

$$\frac{\rho U_1^2}{2} + P_1 = \frac{\rho U_2^2}{2} + P_2$$

$$\Rightarrow U_2 = \sqrt{\frac{32\Delta P}{15\rho}}$$

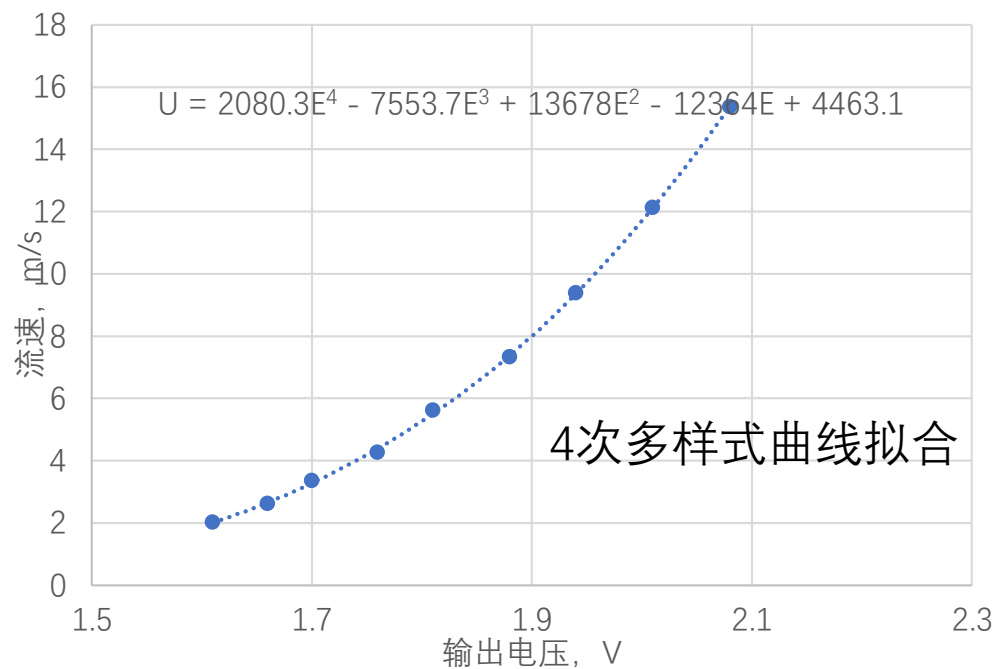
标定过程

- 具体步骤如下:

- a) 关闭风洞风机;
- b) 将单丝探头放置于风洞内, 要求探头支杆与来流平行, 读取风速仪输出电压值, 求输出的平均值 E_1 ;
- c) 使用压强传感器测量风洞收缩段前后压差, 求时均值 ΔP_1 ;
- d) 调节风机转动频率, 待风速稳定以后重复b,c步骤, 获得多组电压 E 和与之相对应的压差 ΔP ;
- e) 在EXCEL或者MATLAB等软件中, 根据伯努利方程, 通过压差值和风洞收缩比计算实验段内平均流速 U ;
- f) 使用四阶多项式曲线拟合电压 E 和流速 U 的关系
$$U = a_4 E^4 + a_3 E^3 + a_2 E^2 + a_1 E + a_0;$$

标定结果

数据点	ΔP 压差, Pa	U速度 m/s	E输出 Volts
1	2.30	2.02	1.61
2	3.86	2.62	1.66
3	3.13	2.36	1.7
4	10.21	4.26	1.76
5	17.77	5.62	1.81
6	30.14	7.32	1.88
7	49.49	9.38	1.94
8	82.63	12.12	2.01
9	132.71	15.36	2.08



标定结果:

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

温度变化的影响

- 当测量时气体的温度和标定时的温度不同时，实验结果会出现较大误差
- 通常对于气体来说估算1摄氏度温度变化，速度误差量可达2%

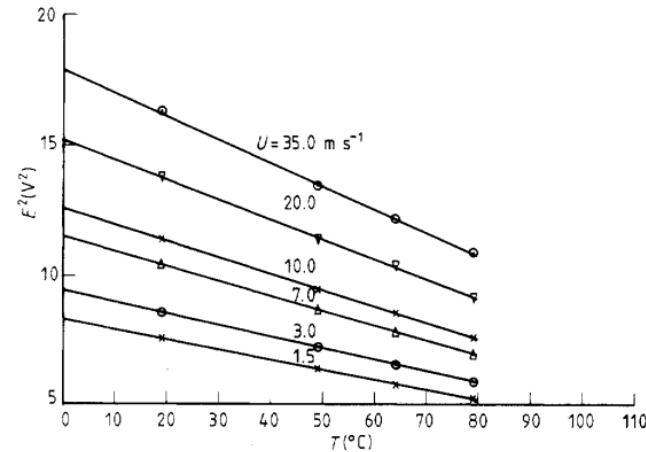


Figure 2. Experimentally determined E^2-T data for constant wire temperature operation – refer to table 1 for further numerical data.

Bremhorst (1985).

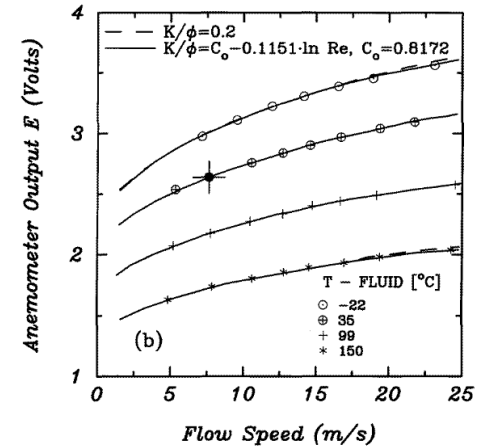


Figure 11. Anemometer-bridge voltage versus fluid velocity for various fluid temperatures from Nitsche and Haberland (1984). Lines are computed results from the one-point calibration and the $f(Re)$ correlations. (a) hot film; (b) hot

Bremhorst, K. (1985), "Effect of fluid temperature on hot-wire anemometers and an improved method of temperature compensation and linearisation without use of small signal sensitivities", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 18 No. 1, pp. 44–49.

Lekakis, I. (1996), "Calibration and signal interpretation for single and multiple hot-wire/hot-film probes", *Measurement Science and Technology*, Vol. 7 No. 10, pp. 1313–1333.

温度变化的修正方法

- 如果温度变化超过1摄氏度，需要对标定产生的常数进行修正，修正方法如下

$$U = C_0 + C_1 E \left(\frac{T_s - T_{f,c}}{T_s - T_{f,m}} \right)^{1/2} + C_2 E^2 \left(\frac{T_s - T_{f,c}}{T_s - T_{f,m}} \right)^1 + C_3 E^3 \left(\frac{T_s - T_{f,c}}{T_s - T_{f,m}} \right)^{3/2} + C_4 E^4 \left(\frac{T_s - T_{f,c}}{T_s - T_{f,m}} \right)^2,$$

这里，

- T_s 是钨丝温度，
- $T_{f,c}$ 为气体在标定时的温度
- $T_{f,m}$ 为气体在测量时的温度。

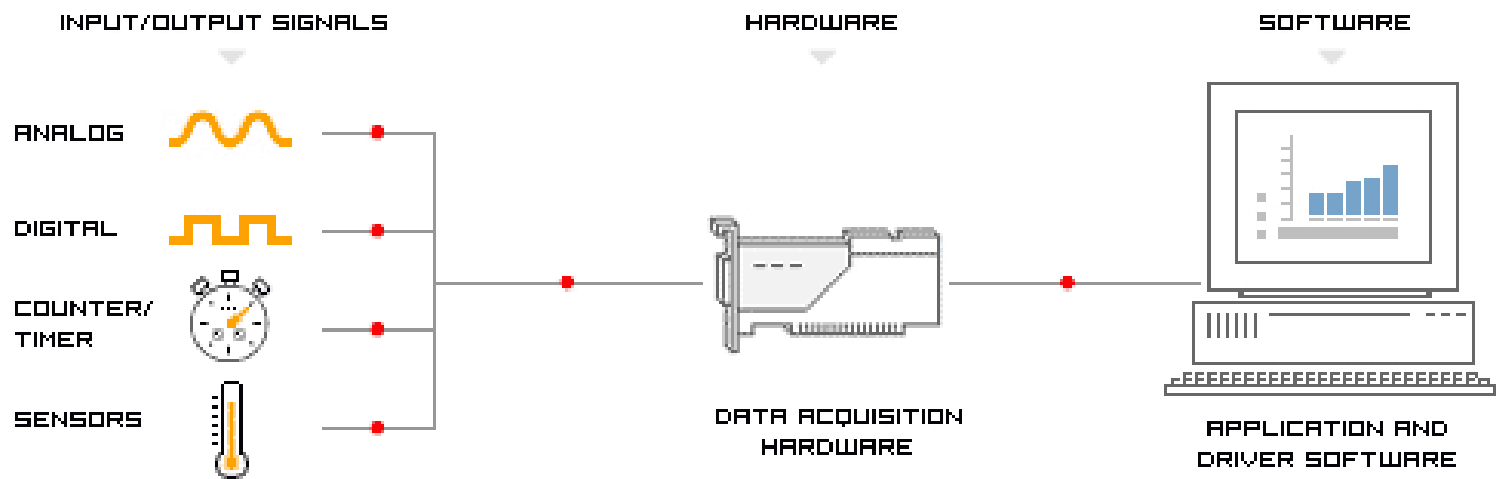
Ardekani, M.A. and Farhani, F. (2009), "Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures", *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier Ltd, Vol. 20 No. 4–5, pp. 174–179.

数据采集

数据采集

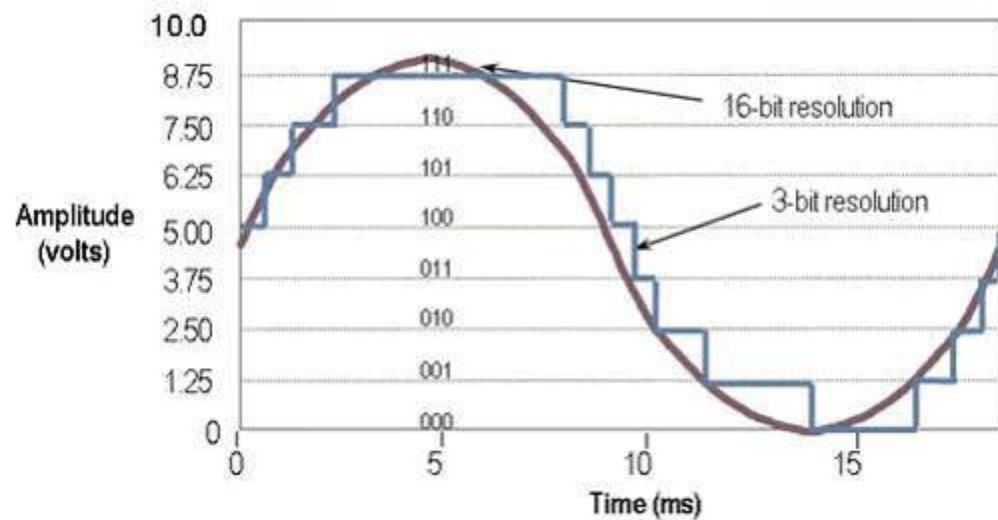
- 各种信号通过计算机记录下来的系统
- 把模拟信号(-5V到+5V或者其他范围)转换成数字信号, Analog-Digital(AD)
- www.ni.com National Instrument

PC-BASED DATA ACQUISITION



数据采集卡DAQ Card

- 输入范围: $\pm 5V$
- 位数: 8, 12, 16 bits, 决定精度, $10V/2^{16}$
- 采样速度: 10MHz-1GHz
- 通道数, 16AD,
- 价格, 1500-15000RMB

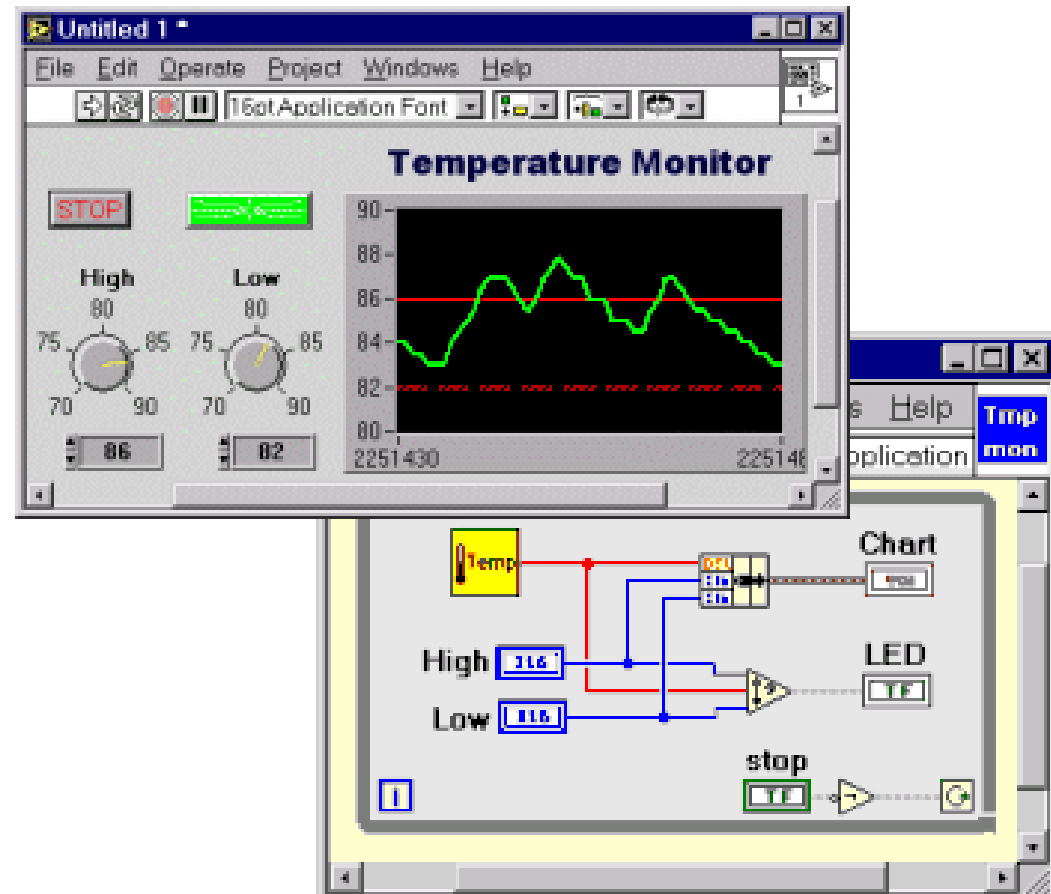


Family	Bus	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate	Input Range	Analog Outputs
NI 6071E	PCI, PXI	64 SE/32 DI	12 bits	1.25 MS/s	± 0.05 to ± 10 V	2
NI 6070E	PCI, PXI, FireWire	16 SE/8 DI	12 bits	1.25 MS/s	± 0.05 to ± 10 V	2
NI 6062E	PCMCIA	16 SE/8 DI	12 bits	500 kS/s	± 0.05 to ± 10 V	2
NI 6052E	PCI, PXI, FireWire	16 SE/8 DI	16 bits	333 kS/s	± 0.05 to ± 10 V	2
NI 6040E	PCI, PXI	16 SE/8 DI	12 bits	500 kS/s	± 0.05 to ± 10 V	2

Labview 软件

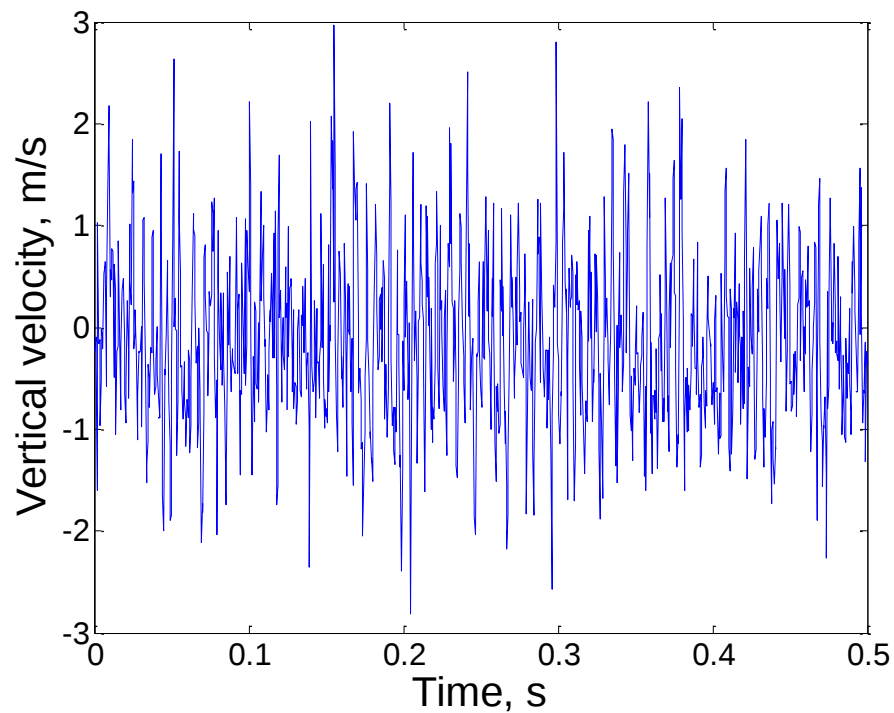


- 用户通过labview软件编制的程序控制采集卡，进行采集、分析工作

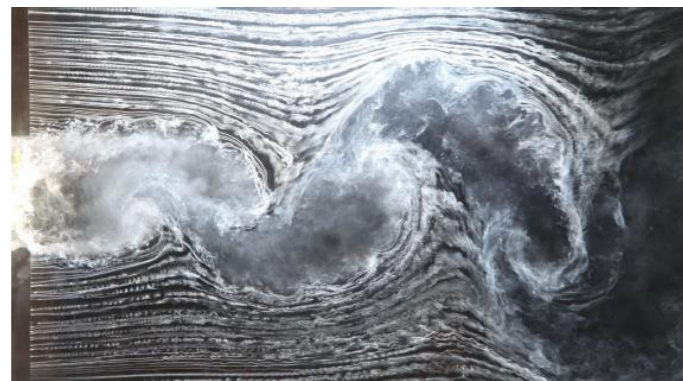


实验数据分析处理

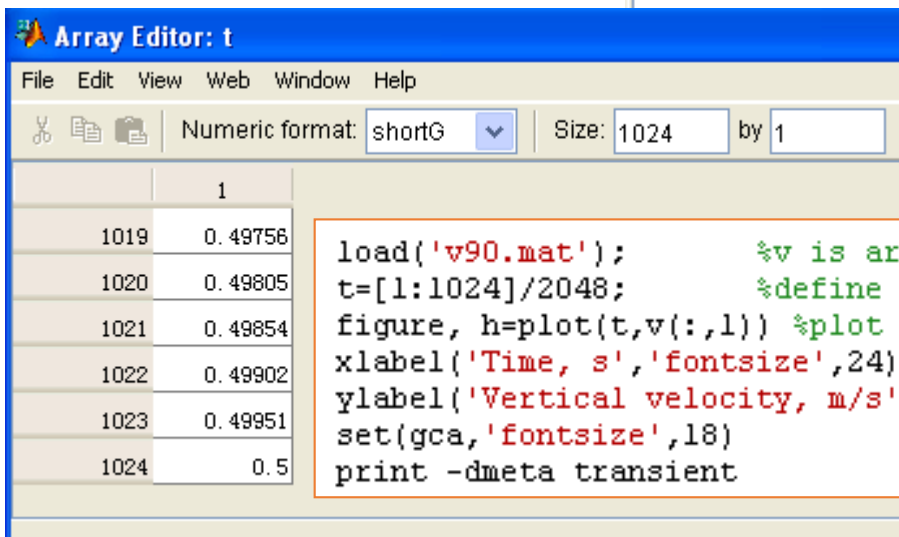
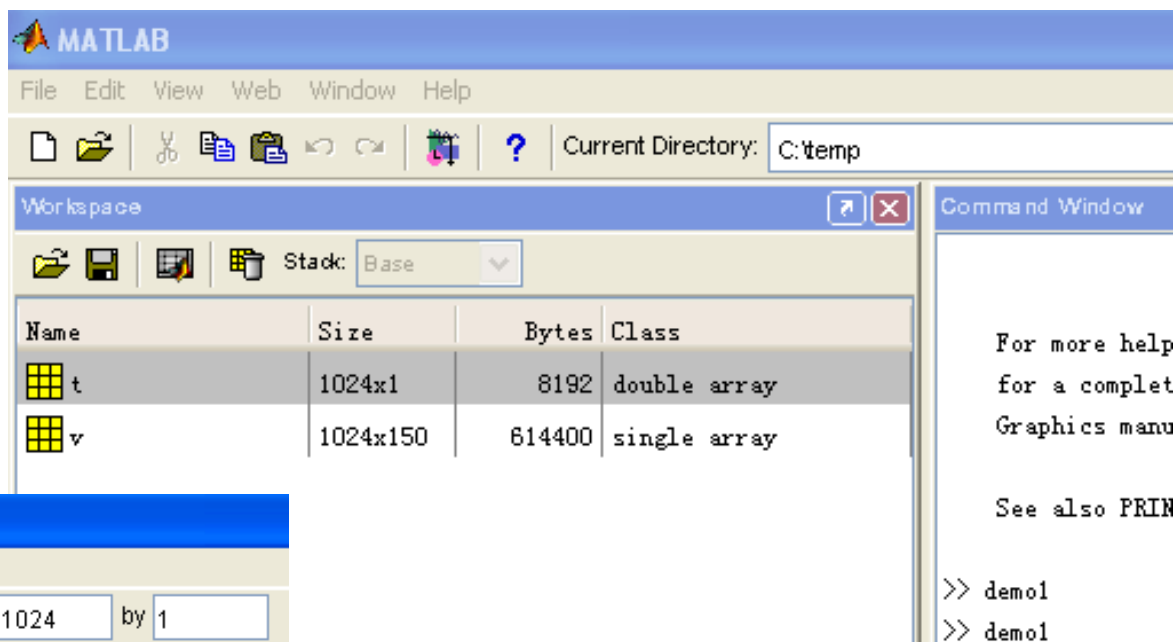
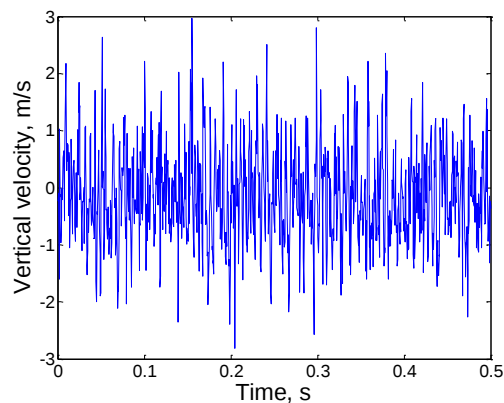
热线风速仪测量的流速信号



- 如何描述这段信号
 - 平均速度，脉动强度，强度变化频率(周期)

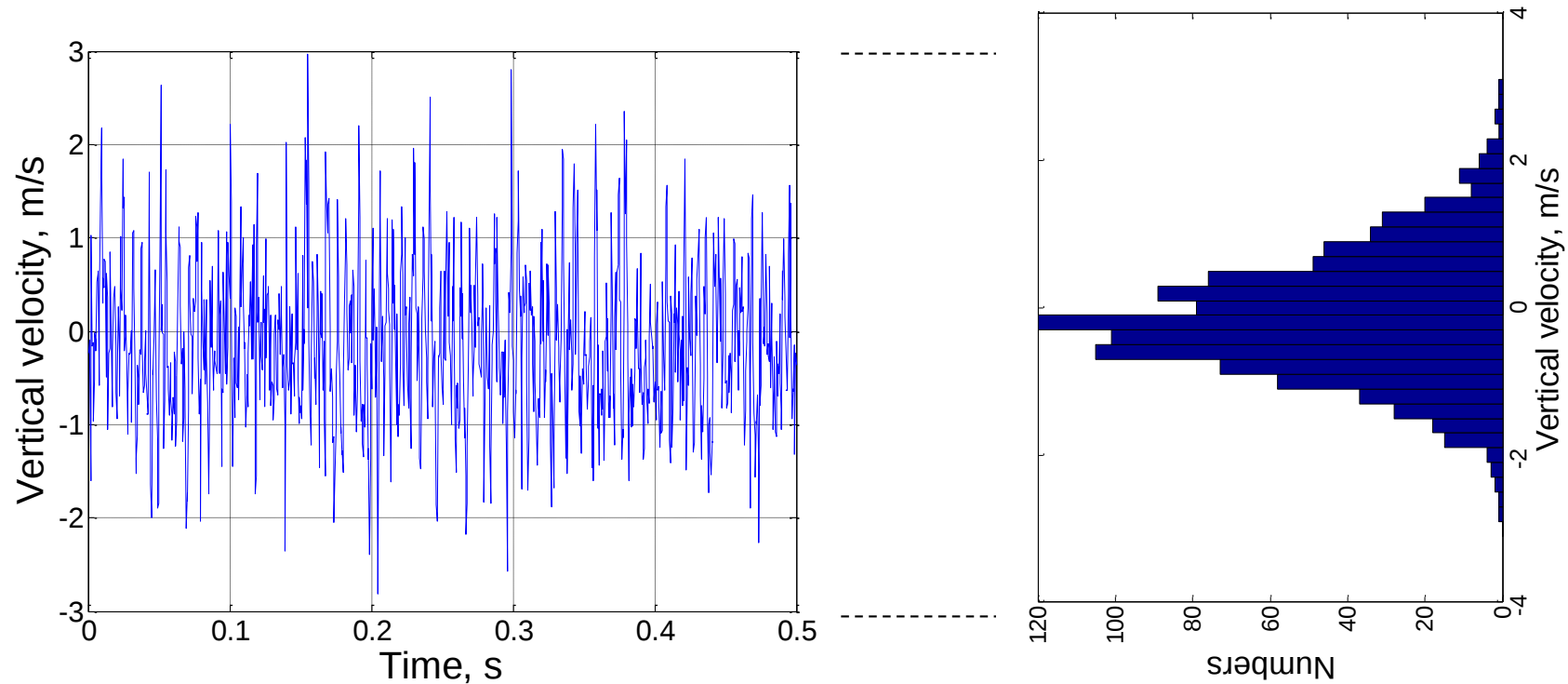


流速信号 Matlab



```
load('v90.mat'); %v is array, 150 blocks of vertical velocities, size=1024x150
t=[1:1024]/2048; %define time, sample frequency 2048Hz, total time 0.5 second
figure, h=plot(t,v(:,1)) %plot transient vertical velocity for block 1
xlabel('Time, s','fontsize',24);
ylabel('Vertical velocity, m/s','fontsize',24);
set(gca,'fontsize',18)
print -dmeta transient
```

累积概率直方图



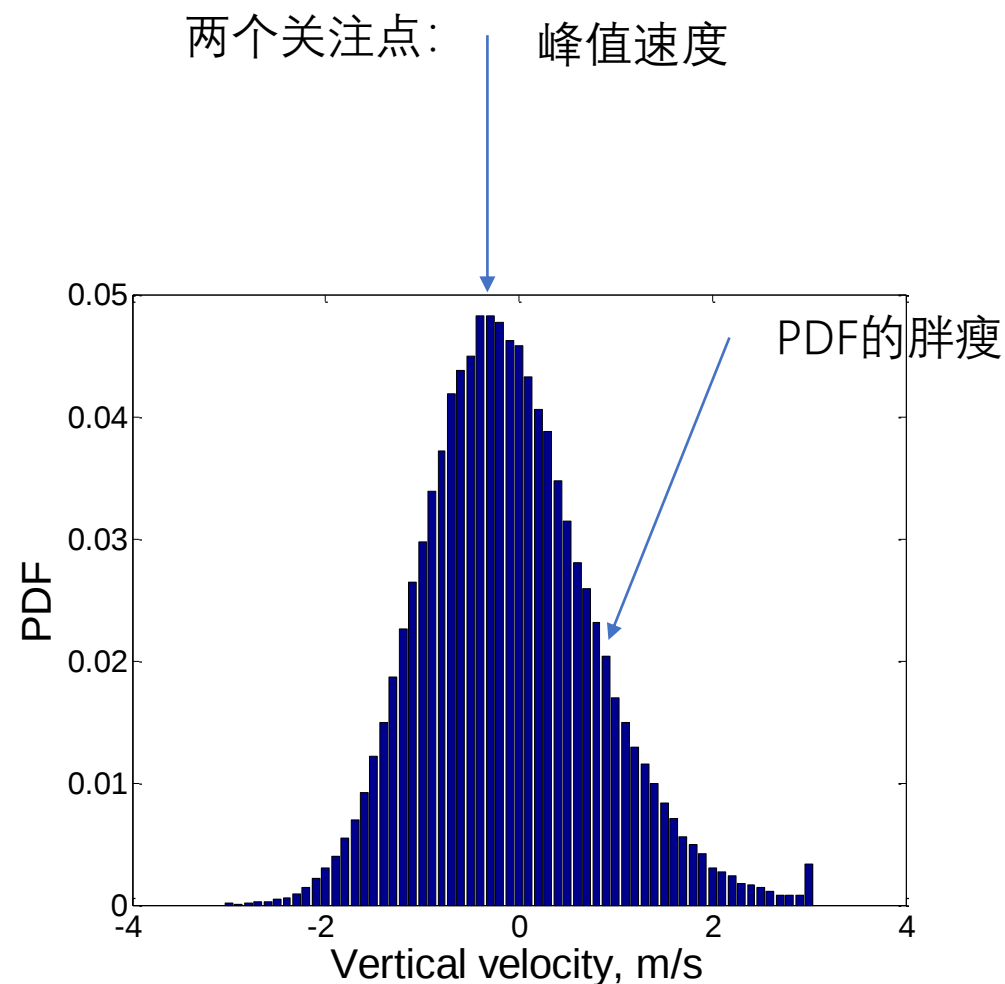
```
figure,  
hist(v(:,1),[-3:.1:3]);% histogram  
ylabel('Numbers','fontsize',24);  
xlabel('Vertical velocity, m/s','fontsize',24);  
set(gca,'fontsize',18)  
print -dmeta hist2
```

概率密度函数

Probability Density Function (PDF)

- 积分结果为1

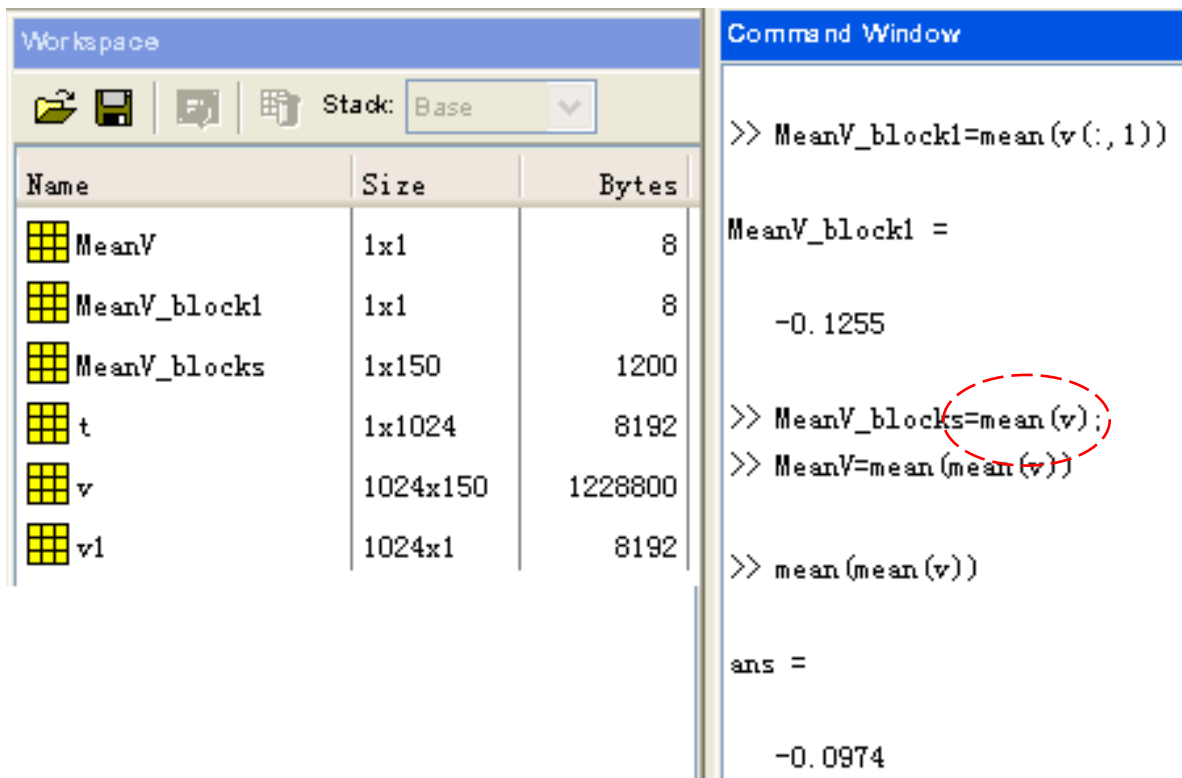
$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1$$



平均值 Mean

- 平均速度
- Matlab命令: mean
- 正态（高斯）分布：
均值与PDF峰值相符

$$\langle v \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{v}_i}{N}$$



The screenshot shows the MATLAB interface with the Workspace and Command Window. The Workspace window displays a table of variables:

Name	Size	Bytes
MeanV	1x1	8
MeanV_block1	1x1	8
MeanV_blocks	1x150	1200
t	1x1024	8192
v	1024x150	1228800
v1	1024x1	8192

The Command Window shows the following commands and results:

```
>> MeanV_block1=mean(v(:,1))  
MeanV_block1 =  
-0.1255  
  
>> MeanV_blocks=mean(v);  
>> MeanV=mean(mean(v))  
  
>> mean(mean(v))  
  
ans =  
-0.0974
```

In the Command Window, the lines `MeanV_blocks=mean(v);` and `MeanV=mean(mean(v))` are circled in red.

方差 Variance, σ^2

- Matlab命令 var
- 原始信号去掉平均值后

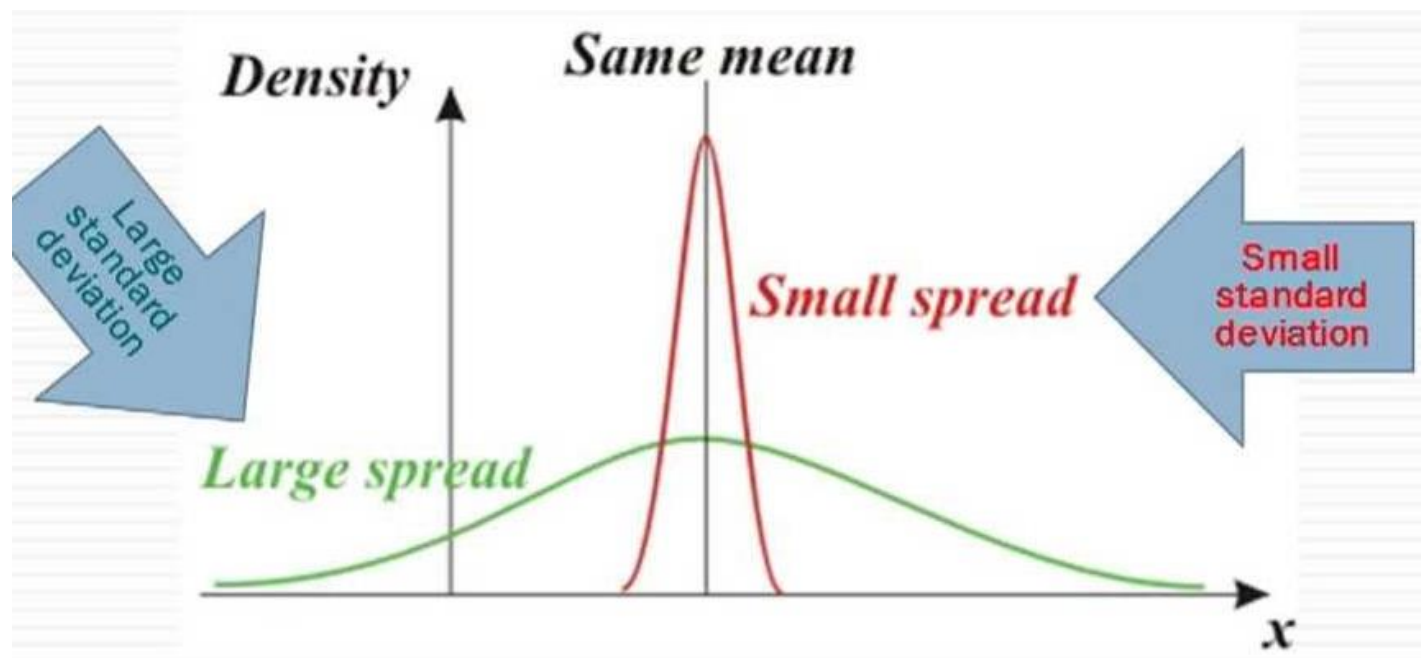
$$\text{var}(\tilde{v}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{v} - \langle v \rangle)^2}{N}$$

- 其平方根为标准差，或者脉动速度

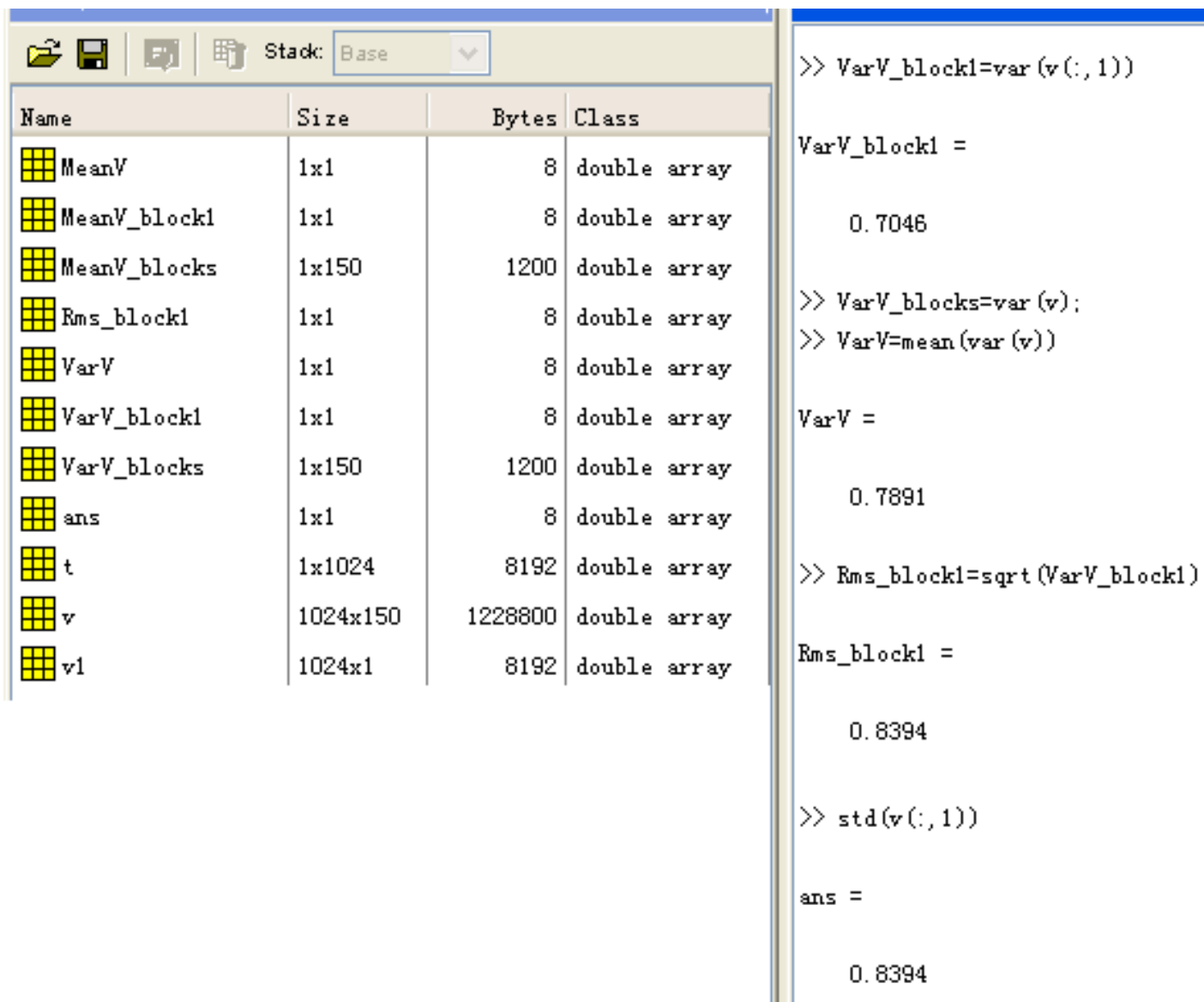
$$v' = \sqrt{\text{var}(\tilde{v})}$$

- 湍流度

$$v' / \langle v \rangle$$



用Matlab计算均方差 σ^2



The image displays the MATLAB environment. On the left, the 'Workspace' window shows a list of variables with their sizes and classes. On the right, the 'Command Window' shows the execution of MATLAB commands and their outputs.

Name	Size	Bytes	Class
MeanV	1x1	8	double array
MeanV_block1	1x1	8	double array
MeanV_blocks	1x150	1200	double array
Rms_block1	1x1	8	double array
VarV	1x1	8	double array
VarV_block1	1x1	8	double array
VarV_blocks	1x150	1200	double array
ans	1x1	8	double array
t	1x1024	8192	double array
v	1024x150	1228800	double array
v1	1024x1	8192	double array

```
>> VarV_block1=var(v(:,1))

VarV_block1 =

    0.7046

>> VarV_blocks=var(v);
>> VarV=mean(var(v))

VarV =

    0.7891

>> Rms_block1=sqrt(VarV_block1)

Rms_block1 =

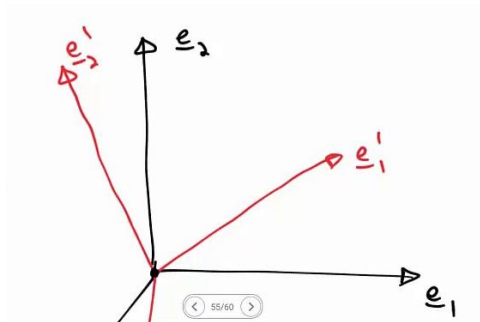
    0.8394

>> std(v(:,1))

ans =

    0.8394
```

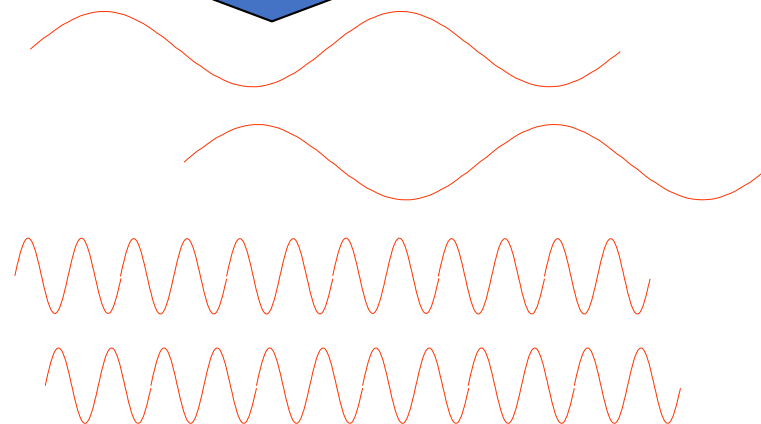
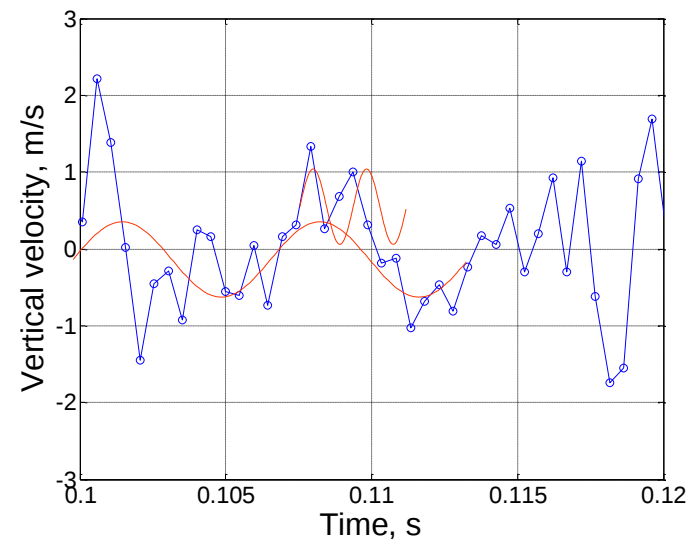
信号分解



$$\tilde{v}(t) \approx a_1 \cos(2\pi f_1 t) + b_1 \sin(2\pi f_1 t) \cdot$$

$$+ a_2 \cos(2\pi f_2 t) + b_2 \sin(2\pi f_2 t)$$

- $v(t)$ 被转化成了系数 a_n, b_n



快速傅里叶变换

- 通过傅立叶变换确定系数 a_n, b_n

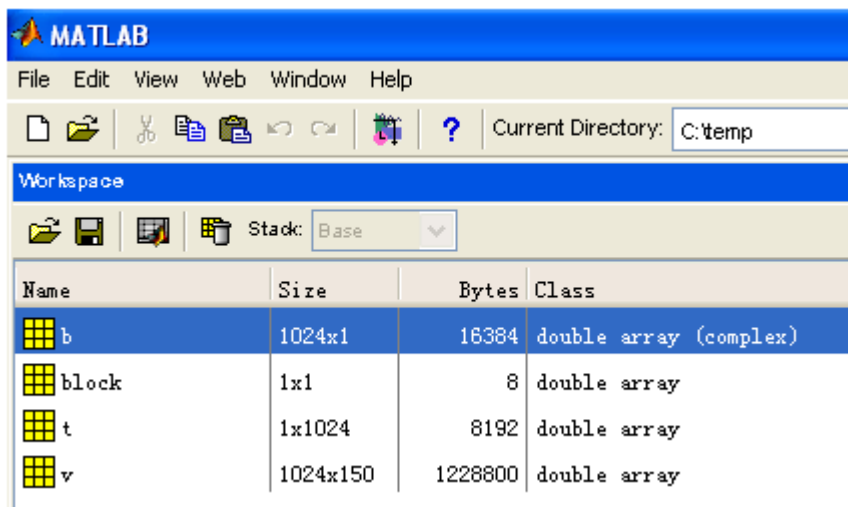
$$\mathcal{F}(\tilde{v}(t)) = F(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{v}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

- 因为 $e^{-i2\pi ft} = \cos(2\pi ft) - i\sin(2\pi ft)$
- 得到的 $F(f)$ 为复数
 - 实部代表 a ,虚部代表 b
- $|F(f)|^2$ 被称为能量谱, ‘代表’ $a_n^2 + b_n^2$

能量谱 power spectrum 计算方法 I

- 快速傅立叶变换 Fast Fourier Transform
 - 利用 Matlab FFT 函数

```
block=1;  
b=fft(v(:,block)-mean(v(:,block)) );
```



The Array Editor: b window shows the first 9 elements of the complex array b. The numeric format is set to shortG.

	1
1	0
2	-2.2371 - 17.28i
3	7.6507 + 2.509i
4	17.391 + 6.5089i
5	18.39 + 13.591i
6	3.4912 - 35.057i
7	13.616 - 12.235i
8	6.4286 - 59.644i
9	-16.207 + 3.2206i

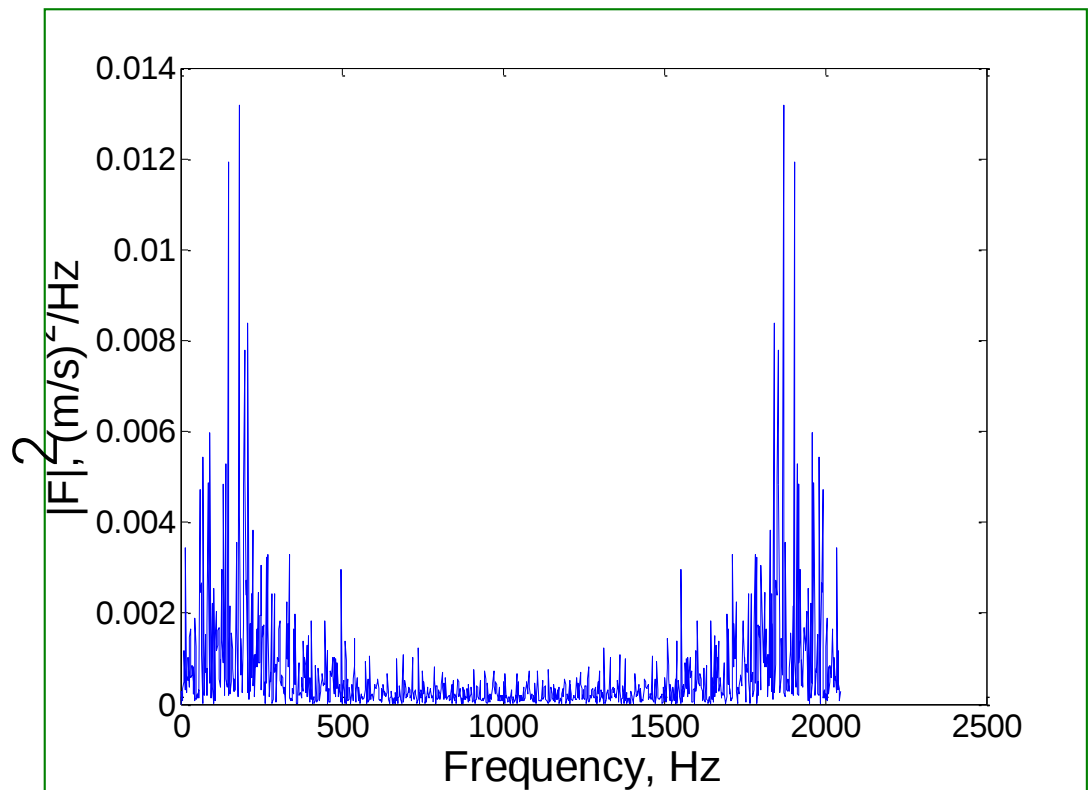
能量谱计算方法II

power spectrum

$$|F(f)|^2 = \frac{F(f)F^*(f)}{N^2}$$

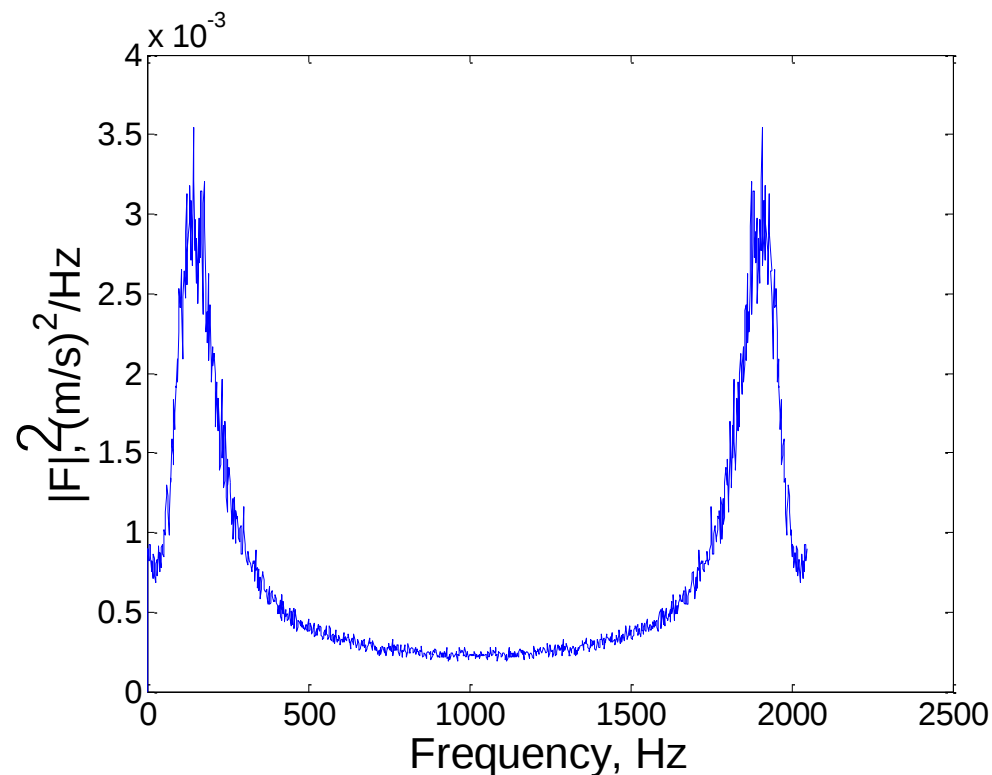
```
block=1;
N=1024;           %N sample number
b=fft(v(:,block))-mean(v(:,block));
F=b.*conj(b)/N^2;
f=[1:N]*(1/0.5);   %0.5 sample time
figure, plot(f,F)
xlabel('Frequency, Hz','fontsize',24);
ylabel('|F|, (m/s)^2/Hz','fontsize',24);
set(gca,'fontsize',18)
print -dmeta spec1
```

b		conj(b)	
	1		1
1	0	1	0
2	38.333 + 1.6137i	2	38.333 - 1.6137i
3	-4.8734 - 2.144i	3	-4.8734 + 2.144i
4	23.67 - 7.8949i	4	23.67 + 7.8949i
5	12.01 + 17.82i	5	12.01 - 17.82i
6	-8.8278 + 31.693i	6	-8.8278 - 31.693i
7	57.59 - 8.9153i	7	57.59 + 8.9153i
8	-13.109 + 9.5148i	8	-13.109 - 9.5148i
9	-15.893 + 19.326i	9	-15.893 - 19.326i
10	23.615 + 6.0247i	10	23.615 - 6.0247i



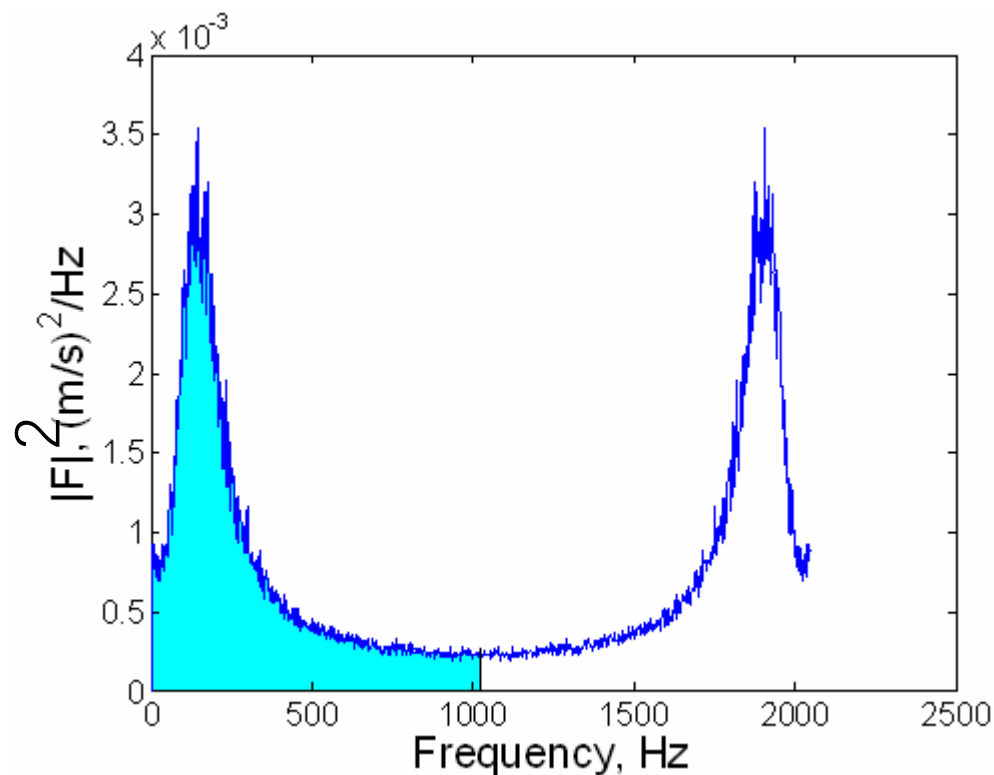
150组数据的平均 能量谱

```
Fs=zeros(1024,1);
N=1024;           %N sample number
for block=1:150;
    b=fft(v(:,block)-mean(v(:,block)));
    F=b.*conj(b)/N^2;
    Fs=Fs+F;
end
Fs=Fs/150;
f=[1:N]*(1/0.5);% 0.5 is the sample time
figure, plot(f,Fs)
xlabel('Frequency, Hz','fontsize',24);
ylabel('|F|, (m/s)^2/Hz','fontsize',24);
set(gca,'fontsize',18)
print -dmeta spec2
```



能量谱积分—> 均方差(Variance) σ^2

$$\langle v^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} F_{vv}(f) df$$



```
>> sum(Fs(1:1024/2))*(1/0.5)
```

```
ans =
```

```
0.7881
```

```
>> mean(var(v))
```

```
ans =
```

```
0.7891
```

总结

- 大连航华科技有限公司
www.hanghualab.com
- **热线用户：**国防科技大学、空军工程大学、北京航空航天大学、大连理工大学、中南大学、天津大学、沈阳航空航天大学、大连海事大学、中山大学、四川大学、清华大学、北京大学、浙江大学、南方科技大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学

