

HangHua  
国产湍流科研仪器

航华科技  
Made in China



微信公众号

# 压强传感器原理及使用方法

高南

大连航华科技有限公司

[www.hanghualab.com](http://www.hanghualab.com)

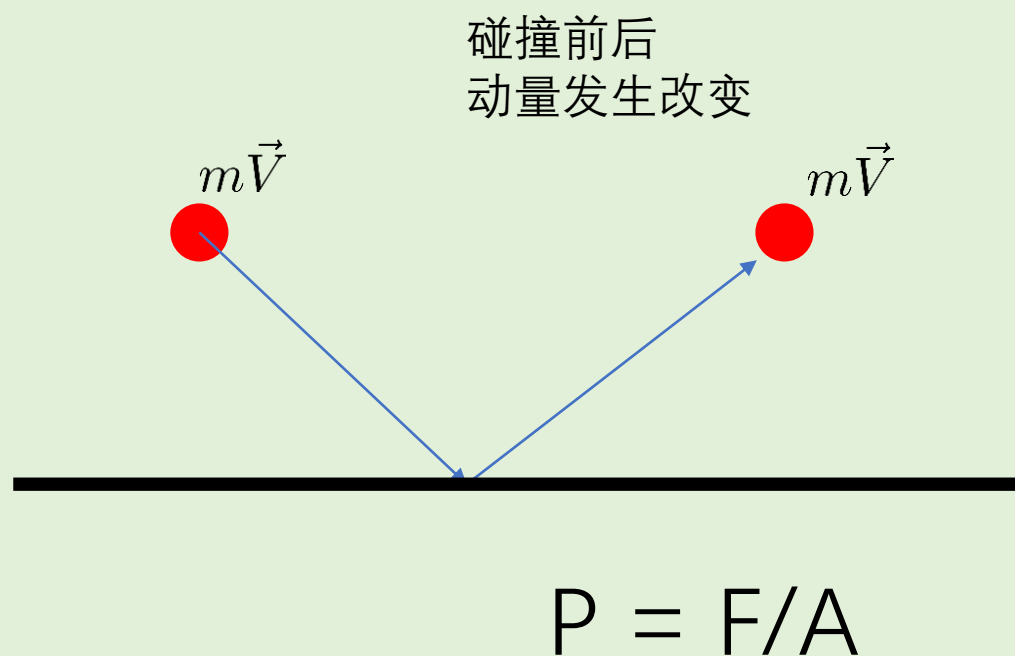
2022-1-5

# 内容

1. 压强传感器原理
  - 1.1 结构分类
  - 1.2 标定方法
2. 测量精度（误差）
  - 2.1 传感器误差
  - 2.2 安装、使用产生的误差
  - 2.3 降低误差的手段
  - 2.4 误差的传播
3. 动态测量
4. 多点测量：扫描阀
  - 4.1 机械扫描阀
  - 4.2 电子扫描仪
  - 4.3 数据处理



# 压强

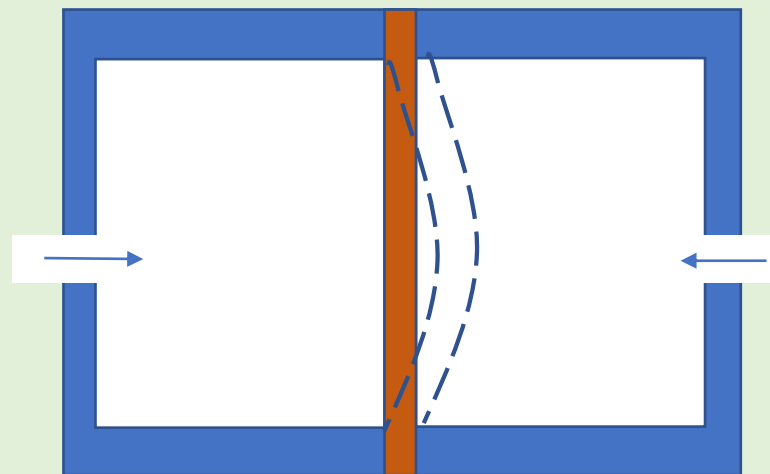


- 分子运动（微观+宏观）作用在壁面上形成了壁面压强
- 这里，“压强”通“压力”



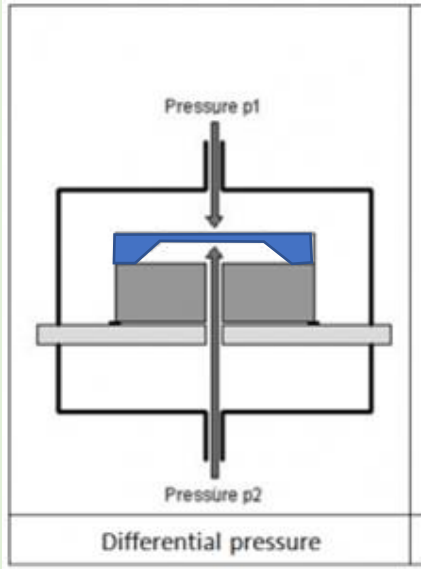
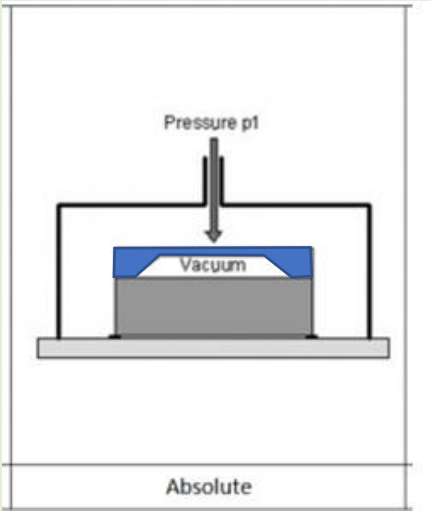
# 测压传感器原理

- 板或膜的压差形变
- 气密密封的测量单元
- 薄膜的特性决定了传感器的性能



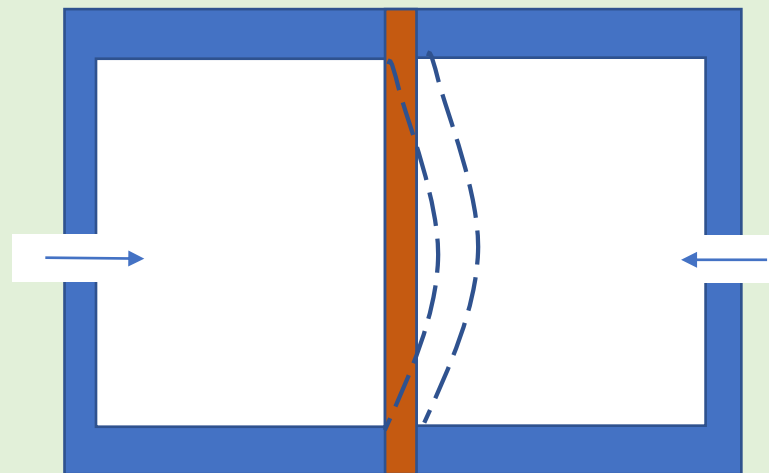
# 结构分类（用途）

| 类型                 | 参考值         | 接口数量 |
|--------------------|-------------|------|
| 绝压<br>Absolute     | 真空          | 1    |
| 表压<br>Gauge        | 101.325 kPa | 2    |
| 压差<br>Differential | -           | 2    |

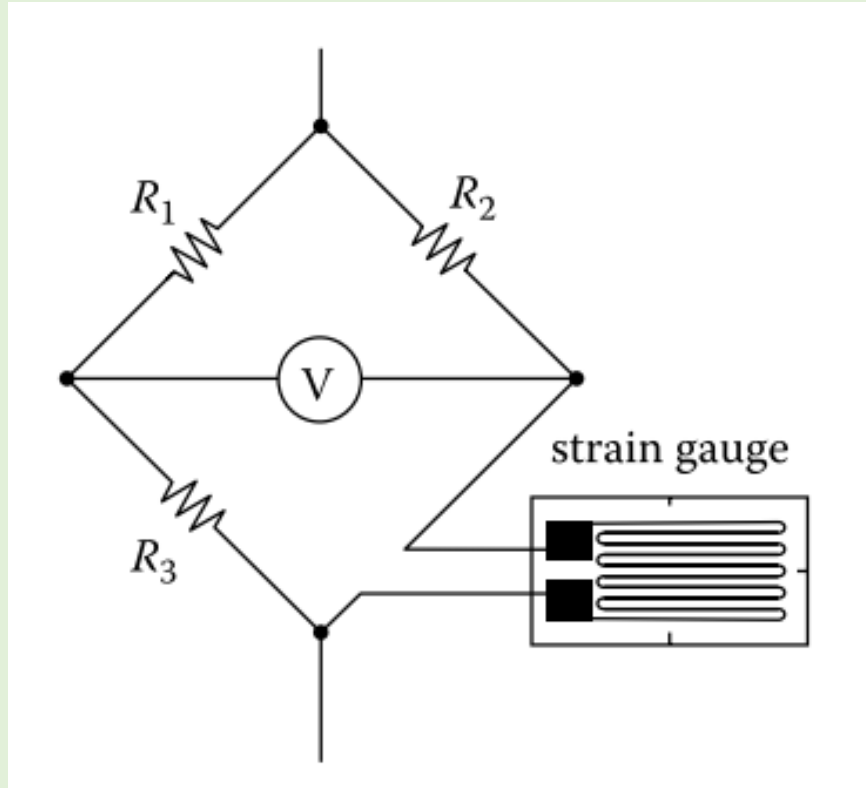


# 测量方式

- 测量形变量的方式包括
  - A. 电阻式
  - B. 压电式
  - C. 电容式
  - D. 光学式



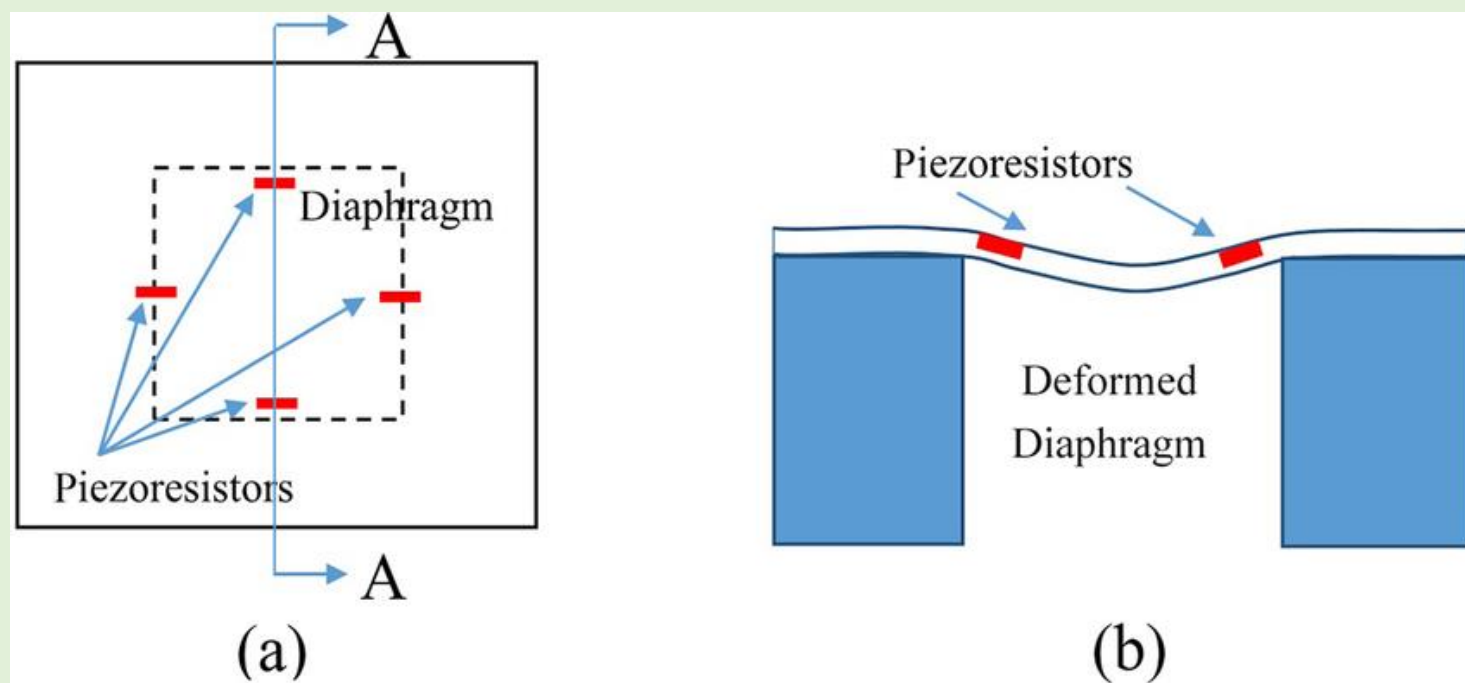
# A 压阻式(应变片)



[setra-field-guide-to-understanding-pressure-transducers.pdf \(teesing.com\)](https://www.teesing.com/setra-field-guide-to-understanding-pressure-transducers.pdf)



## B 硅压阻式压力传感器 (Piezoresistive Pressure Transducer)

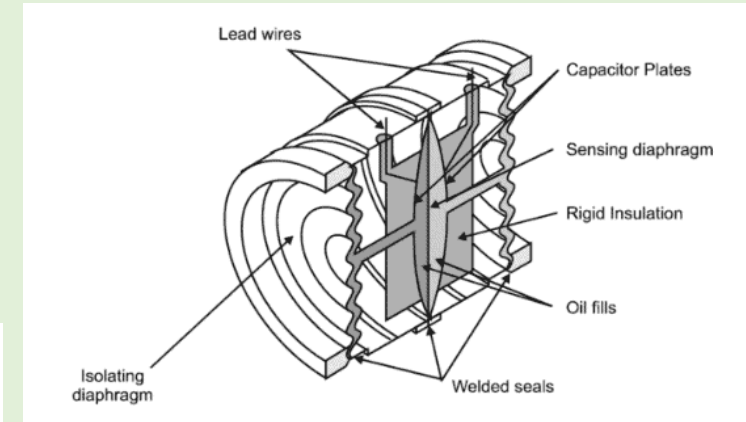
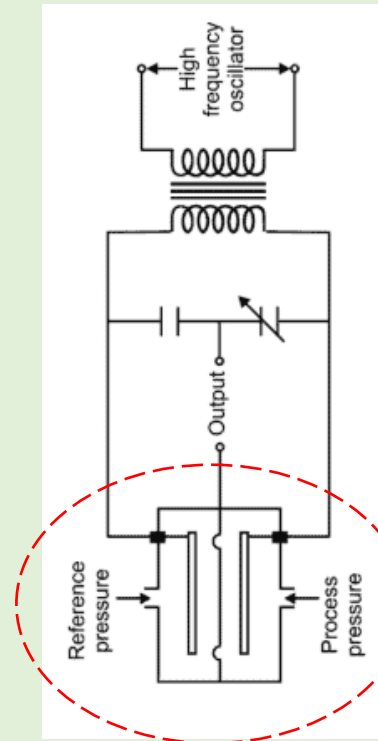
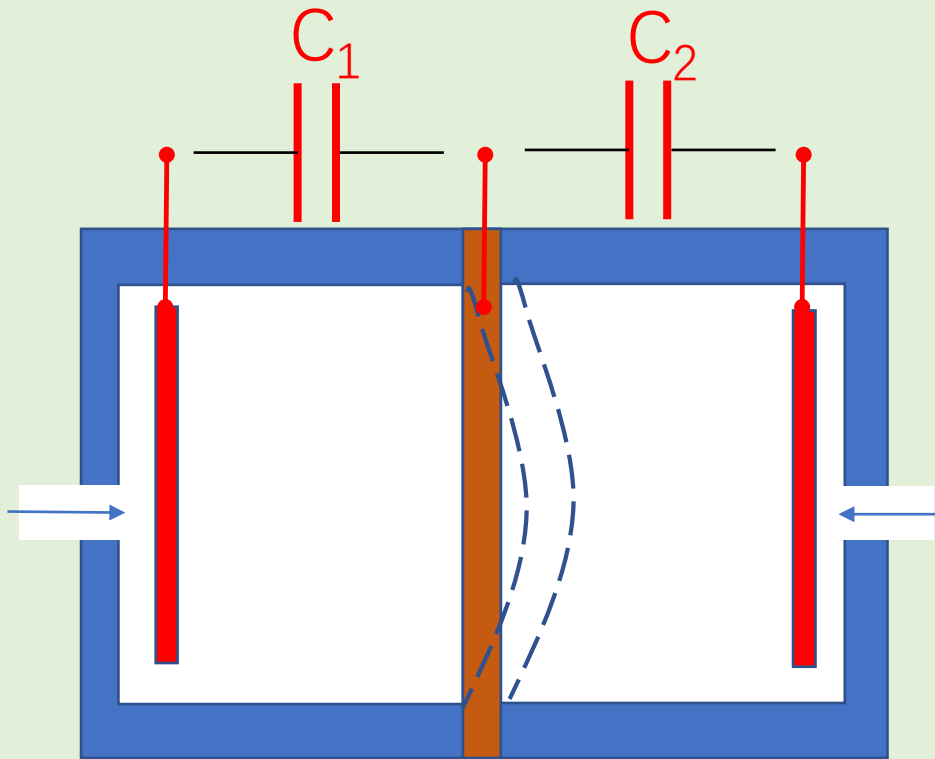


- 硅膜片特定方向上扩散4个等值的半导体电阻，并连接成惠斯通电桥
- 全电桥传感器：对环境温度变化不敏感

(19) (PDF) A micro-capacitive pressure sensor design and modelling  
([researchgate.net](https://www.researchgate.net))



# C 电容式

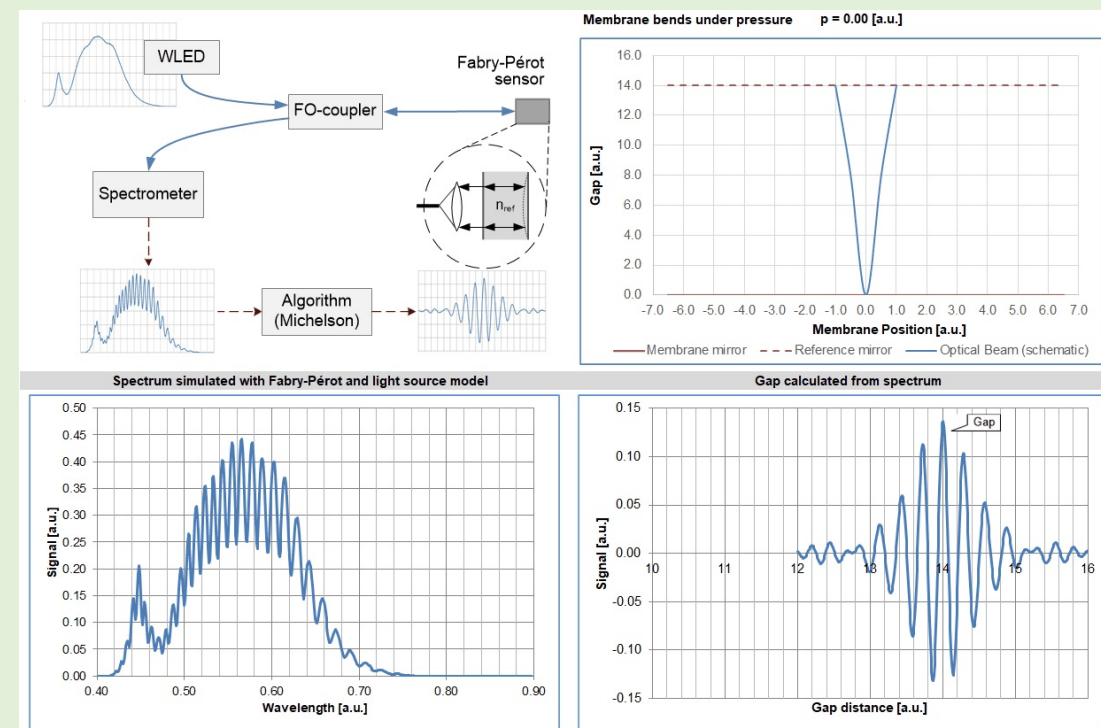
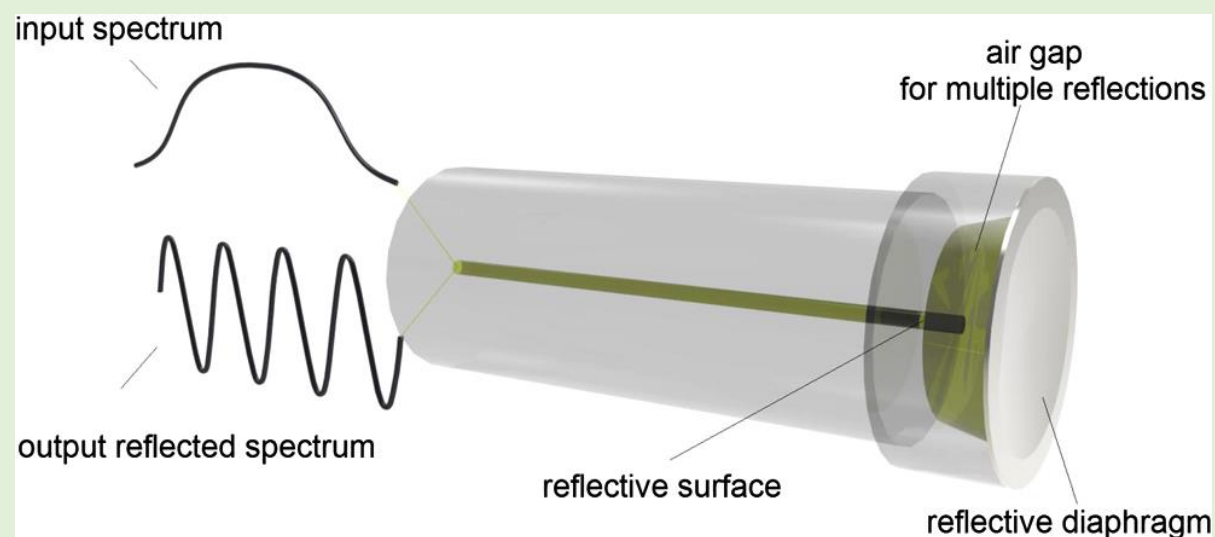


- **Advantages of Capacitive Pressure Transducer:**
  - Inaccuracy 0.01 to 0.2%
  - Linearity
  - Fast response
  - Range of 80Pa to 35MPa
- **Disadvantages of Capacitive Pressure Transducer:**
  - Temperature sensitivity
  - Stray capacitance problem
  - Vibration
  - Limited overpressure capability
  - Cost



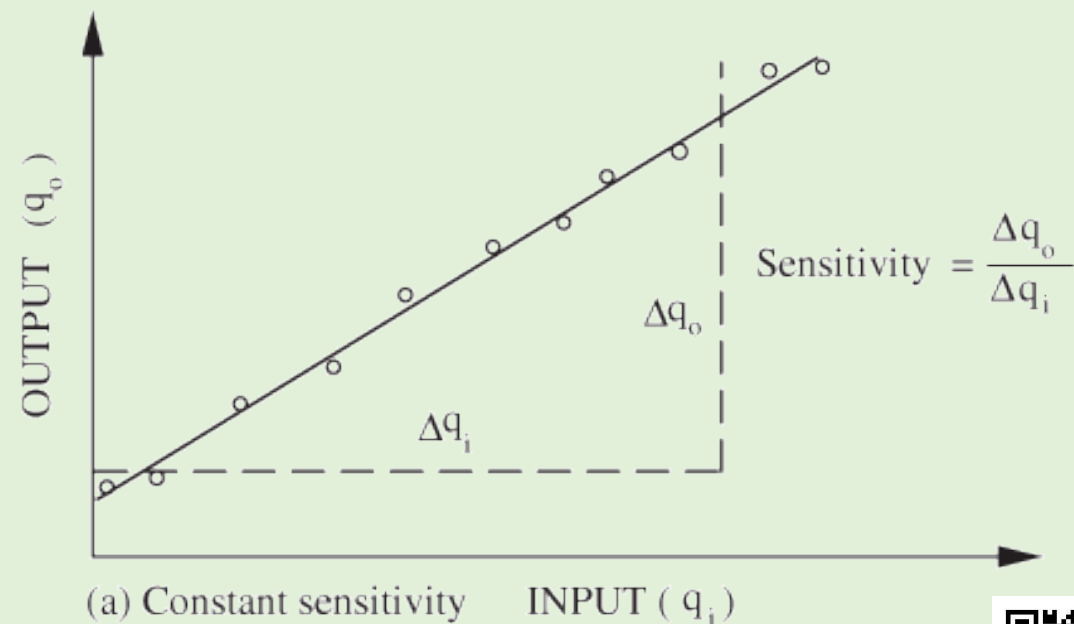
# D 光学式测量

- fiber-optic pressure sensor
- Fabry-pérot effect for pressure sensing 法布里-珀罗干涉仪

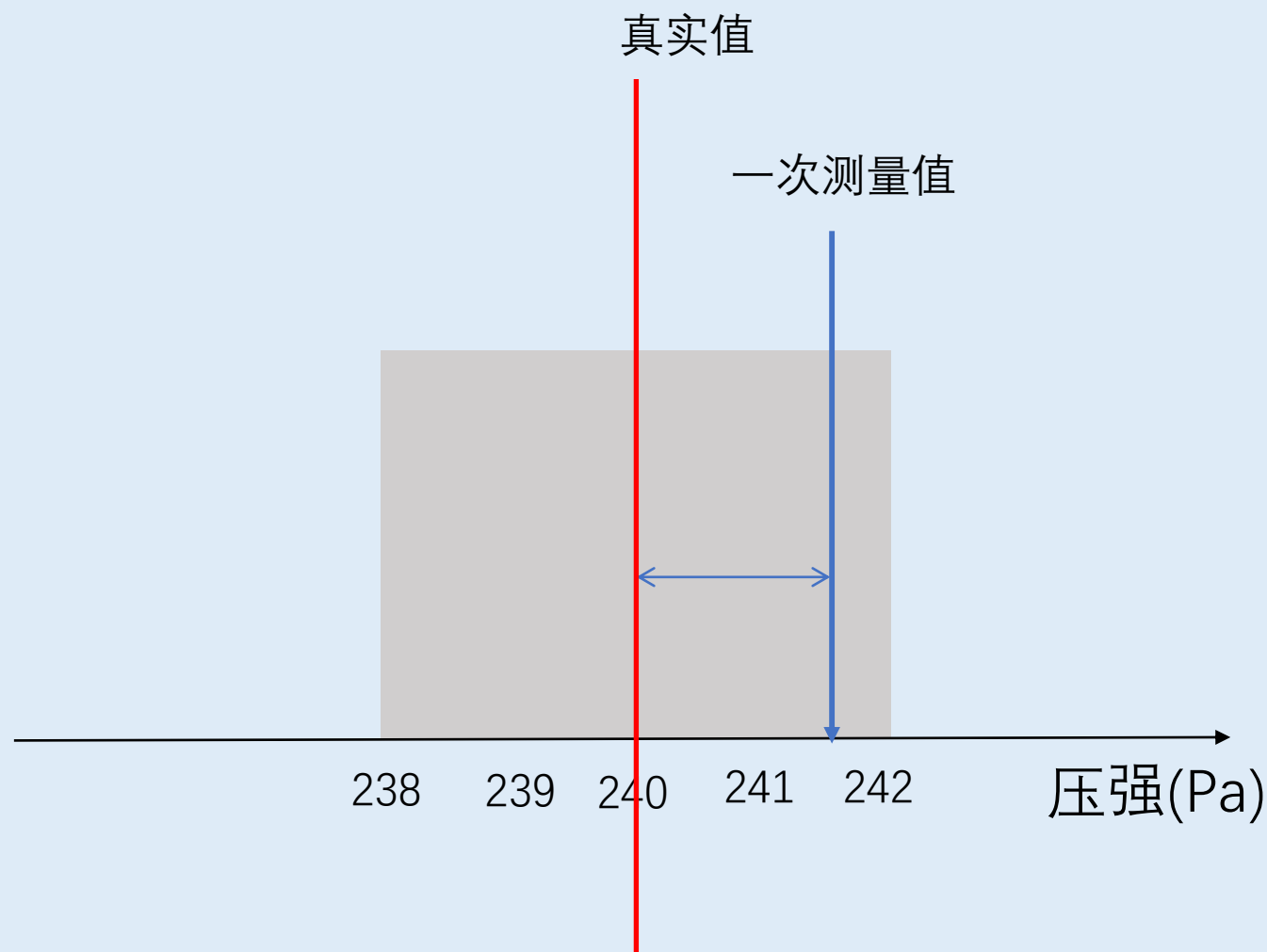


# 传感器标定

- $y = m x + c$
- 线性
- m: 灵敏度 sensitivity



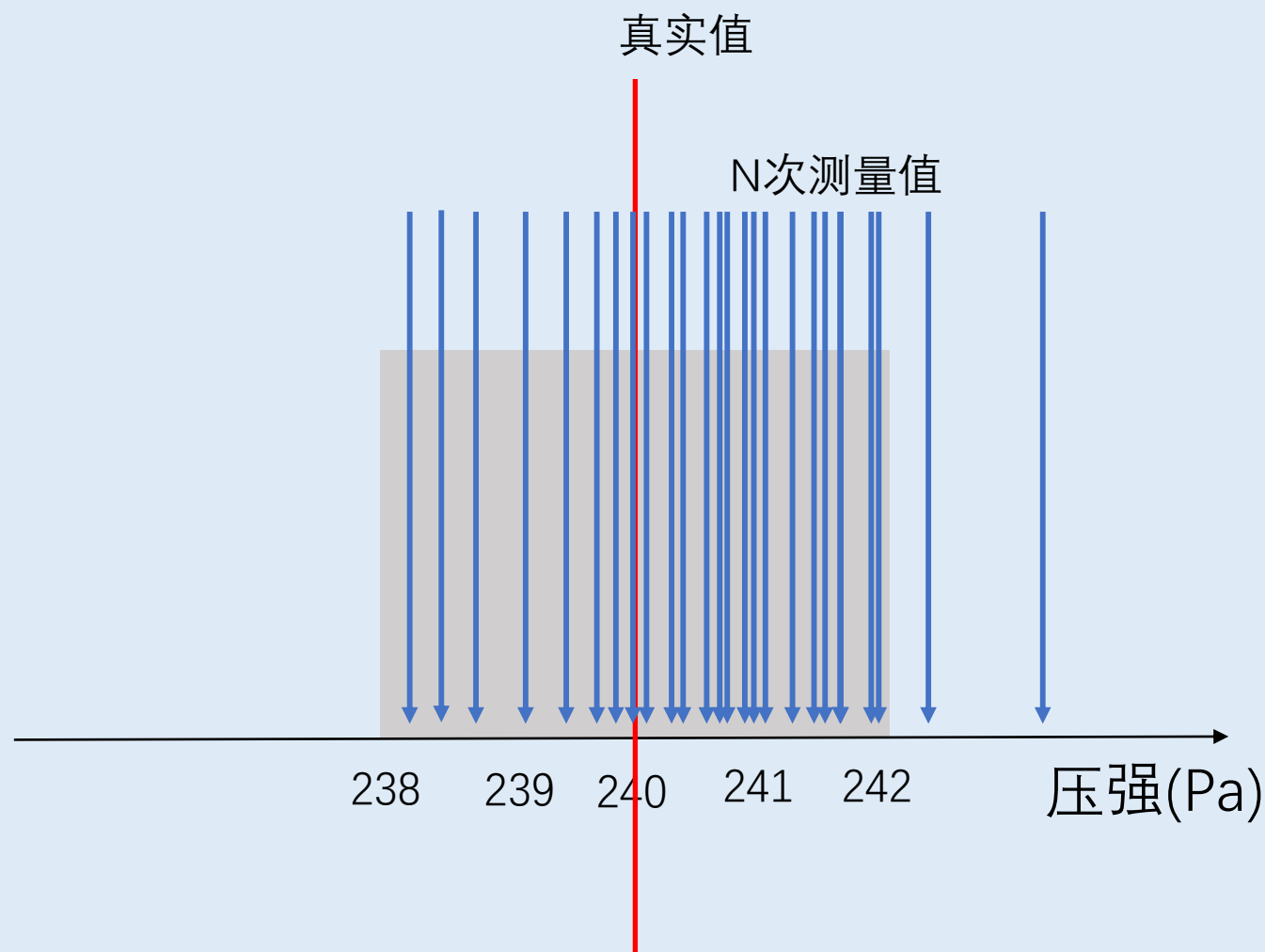
## 2 测量精度



- 传感器（仪器）一次测量（一个读数）距真实值的差距
- “误差小则精度高，误差大则精度低”



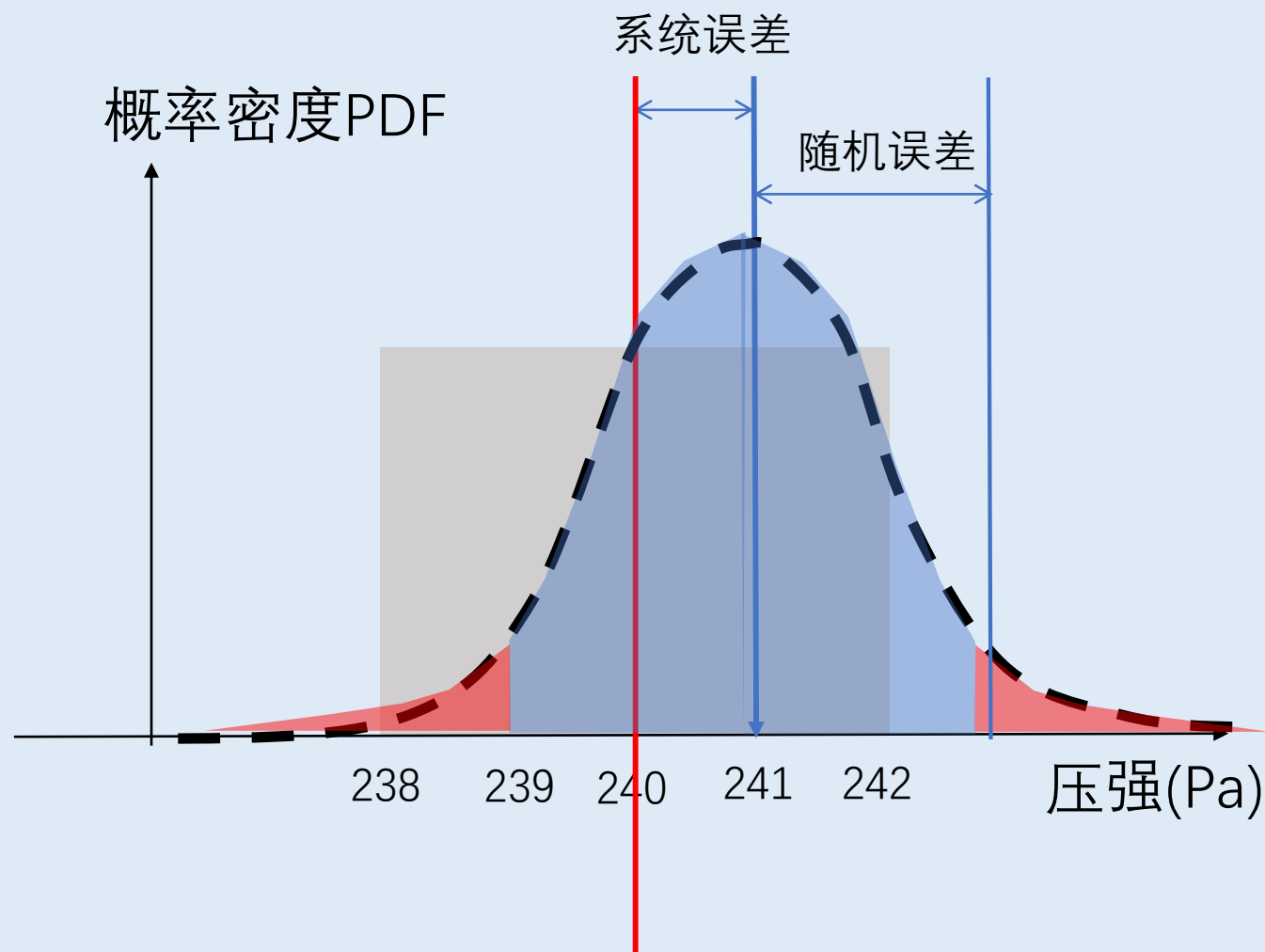
# 测量精度



- 精度 $\pm 2.0\text{Pa}$  (最大误差 $\pm 2.0\text{Pa}$ )
  - 一个测量值95%几率与真实值之间差距在 $2.0\text{Pa}$ 以内
- 精度为测量值的1%
  - 一个测量值95%几率与真实值之间差距在 $\pm(241.0 \times 0.01)\text{Pa}$ 以内



# 测量精度



- 精度  $\pm 2.0\text{Pa}$  (最大误差  $\pm 2.0\text{Pa}$ )
- 误差分类
  - 系统误差 bias error
  - 随机误差 random error



# 哪些因素贡献了测量误差

- 2.1 传感器自身误差
- 2.2 安装、使用过程中产生的误差

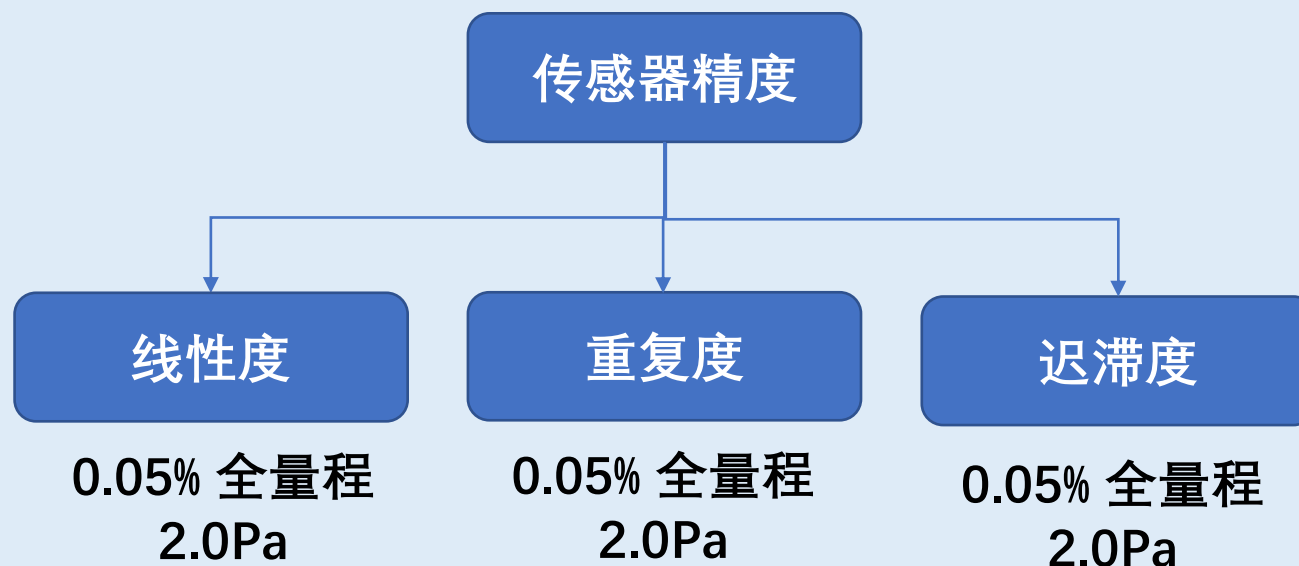


## 2.1 传感器测量误差

主要有三部分组成

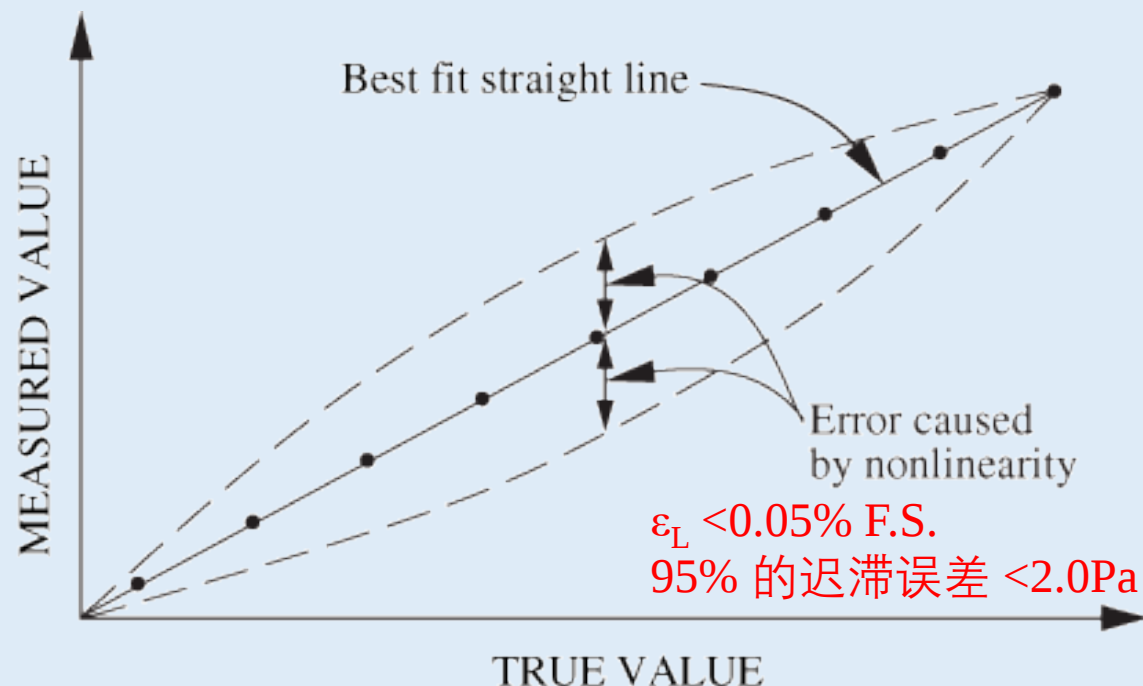
以AccuSense为例  
量程 $\pm 2\text{kPa}$ 传感器

|                     | Typ.  | Units |
|---------------------|-------|-------|
| Accuracy            |       |       |
| Linearity           | +0.05 | %FS   |
| Repeatability       | +0.05 | %FS   |
| Pressure Hysteresis | +0.05 | %FS   |



# 线性度 $\epsilon_L$

|                     | Typ.  | Units |
|---------------------|-------|-------|
| Accuracy            |       |       |
| Linearity           | +0.05 | %FS   |
| Repeatability       | +0.05 | %FS   |
| Pressure Hysteresis | +0.05 | %FS   |

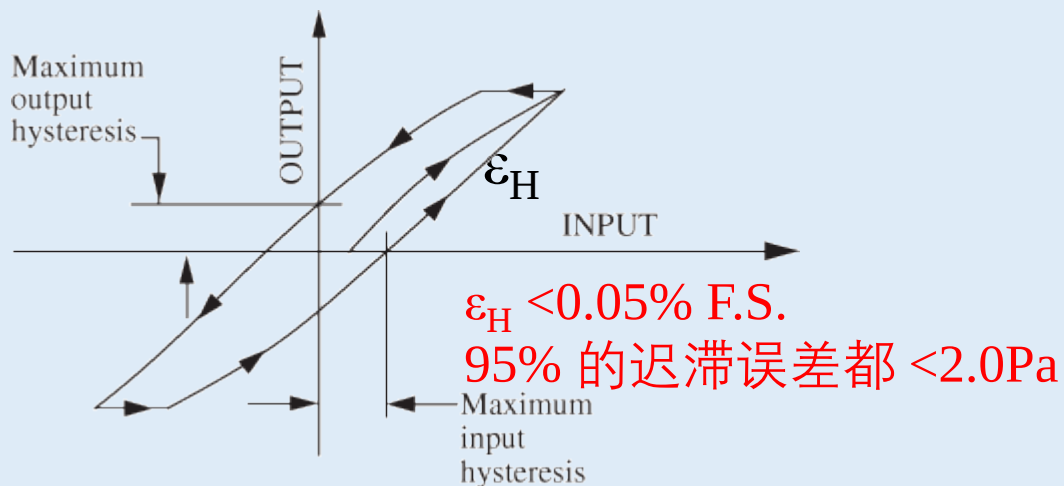


- 传感器输出值偏离直线的程度
- 是系统误差
- F.S. = Full Scale 满量程值
- 以AccuSense量程 $\pm 2\text{kPa}$ 传感器为例，F.S. 为4.0 kPa
- $\epsilon_L < 2.0 \text{ Pa}$



# 迟滞度 $\epsilon_H$

|                     | Typ.  | Units |
|---------------------|-------|-------|
| Accuracy            |       |       |
| Linearity           | +0.05 | %FS   |
| Repeatability       | +0.05 | %FS   |
| Pressure Hysteresis | +0.05 | %FS   |



- 有些测量不是“独立”的，因金属膜片对载荷有记忆效应，一个加载和卸载之间会出现误差
- $\epsilon_H < 2.0 \text{ Pa}$
- 是一种系统误差

[USE OF SUBMERSIBLE PRESSURE TRANSDUCERS IN WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS \(usgs.gov\)](http://usgs.gov)

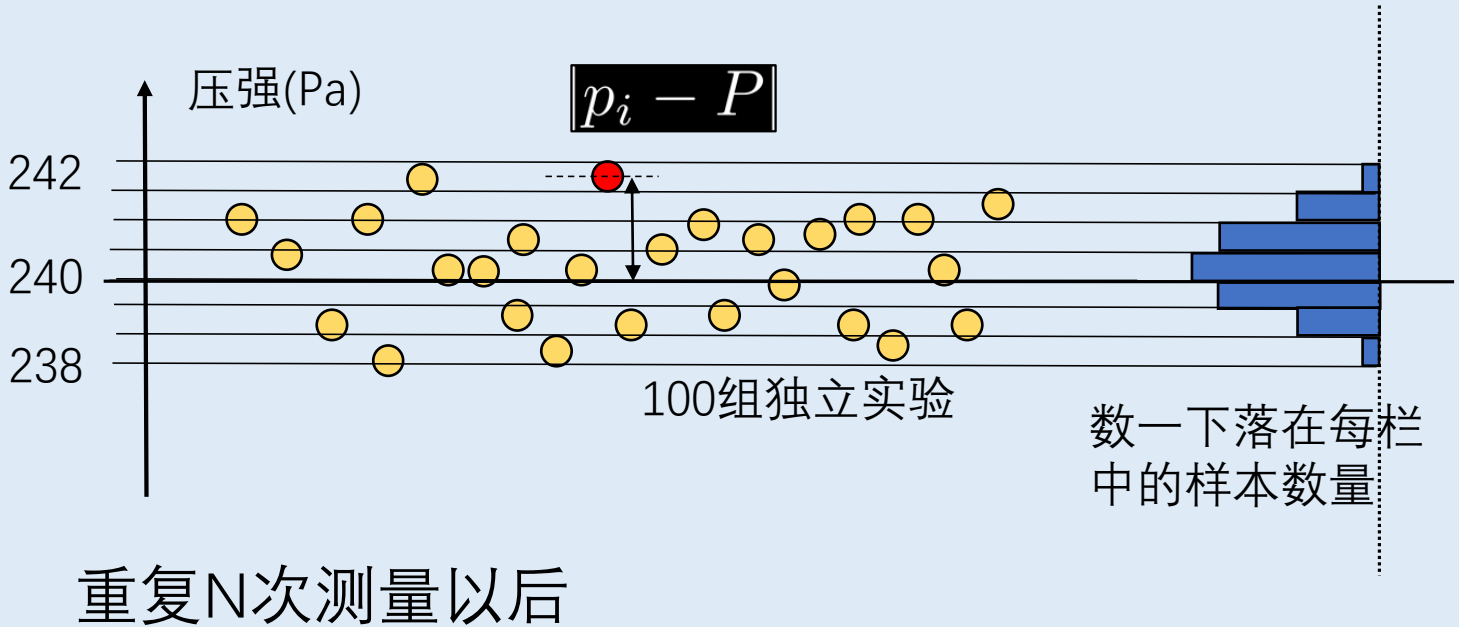
[Why is Pressure Sensor Accuracy Important? \(setra.com\)](http://setra.com)



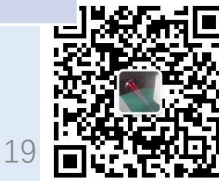
# 可重复度 $\epsilon_R$

- $\epsilon_R = 2\sigma$
- 95%几率与真实值之间差距在 $2\sigma$ 以内
- 包括随机误差也包括环境变化因为的系统误差
- $\epsilon_R < 2.0 \text{ Pa}$

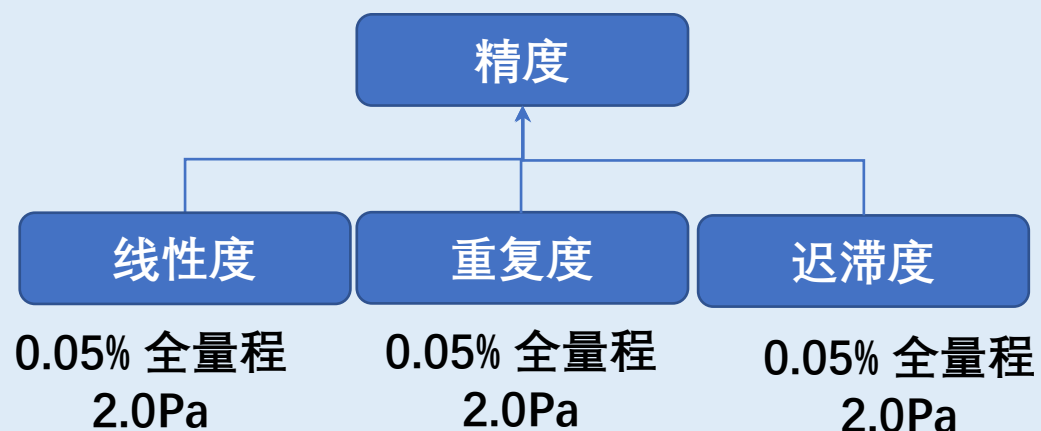
|                     | Typ.  | Units |
|---------------------|-------|-------|
| Accuracy            |       |       |
| Linearity           | +0.05 | %FS   |
| Repeatability       | +0.05 | %FS   |
| Pressure Hysteresis | +0.05 | %FS   |



| 采样#     | 1     | 2     | 3     | 4     | ... | 100   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 测量值(Pa) | 238.2 | 241.0 | 239.3 | 240.9 |     | 238.1 |



# 综合各项不确定度



- 方案1： 把它们直接加起来：

$$\varepsilon = \varepsilon_R + \varepsilon_L + \varepsilon_H$$

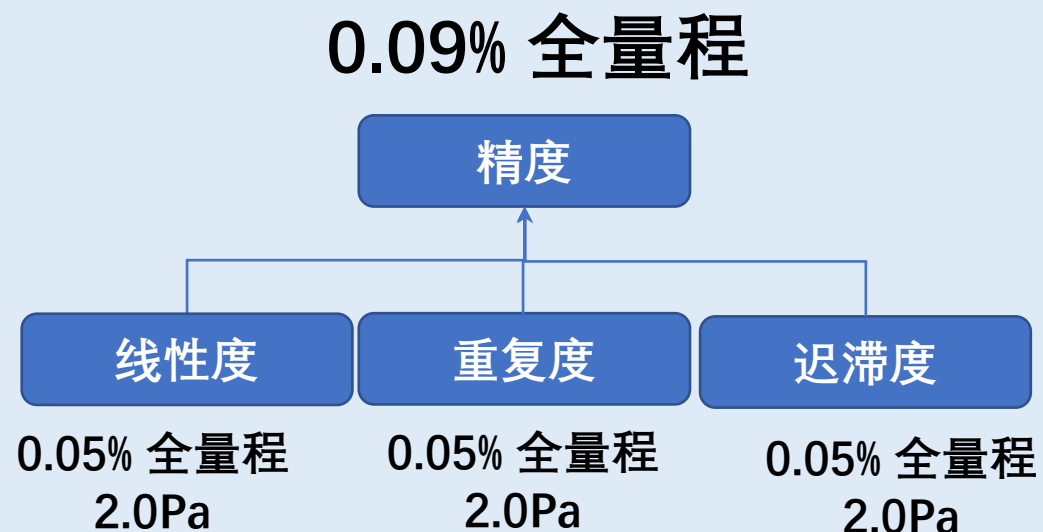
- 前面测量结果是  $(240 \pm 6.0)$  Pa ,
- 置信区间是

$$1 - 5\% * 5\% * 5\% = 99.9875\%$$

- 不需要这么高的置信度



# 综合各项不确定度



- 方案2:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2}$$

- 测量结果是:  $240 \text{ Pa} \pm (2.0^2 + 2.0^2 + 2.0^2)^{1/2} \text{ Pa}$
- 即:  $240 \text{ Pa} \pm 3.5 \text{ Pa}$ , 置信度95%
- 该仪器(AccuSense)的整体测量不确定度是:

$$3.5 \text{ Pa} / 4000 \text{ Pa} = 0.09\% \text{ 量程值}$$

- 这样的仪器通常被称作0.1级精度



# 温度影响

## SPECIFICATIONS

Excitation: 12 to 36 Vdc

Output: 4 to 20 mA (2 wire)

Operating Temperature: -29 to 85°C  
(-20 to 185°F)

Compensated Temperature:  
-18 to 72°C (0 to 160°F)

### Thermal Effects:

Zero: 0.015% full scale/°F

Span: 0.015% full scale/°F

Proof Pressure: 10 psi

Burst Pressure: 50 psi

Static Pressure: 100 psi

Gage Type: Capacitance

## INDUSTRIAL TRANSMITTER

0-0.1 to 0-200 inH<sub>2</sub>O  
0-25 Pa to 0-50 kPa

### PX656 Series



### Ideal Applications

- ✓ Boiler Inlet Air Systems
- ✓ HVAC
- ✓ Industrial Fume Hoods
- ✓ Level Control

PX656-100DI,  
shown smaller  
than actual size.

### SPECIFICATIONS

Excitation: 12 to 36 Vdc



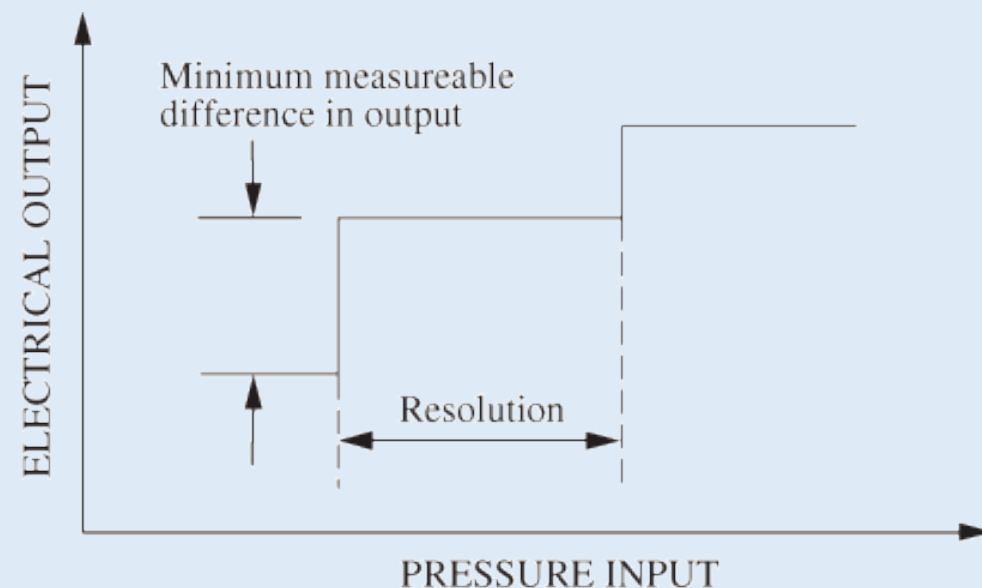
# 分辨率

- 定义为传感器可以检测到的最小压力变化。
- 模拟输出传感器理论上分辨率是无限小，实际上受信噪比影响。分辨率通常为满量程值的0.05%

[Resolution and Frequency Response in Pressure Transducers | Validyne Engineering](#)

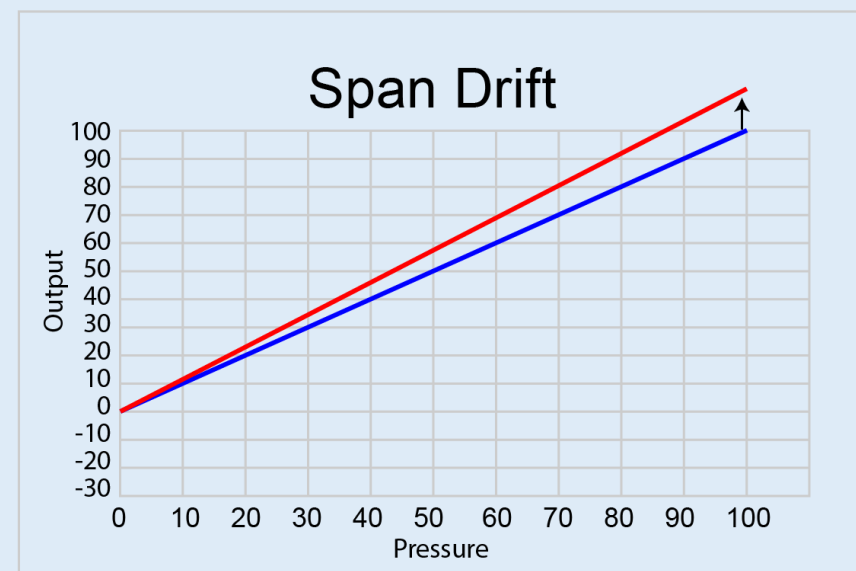
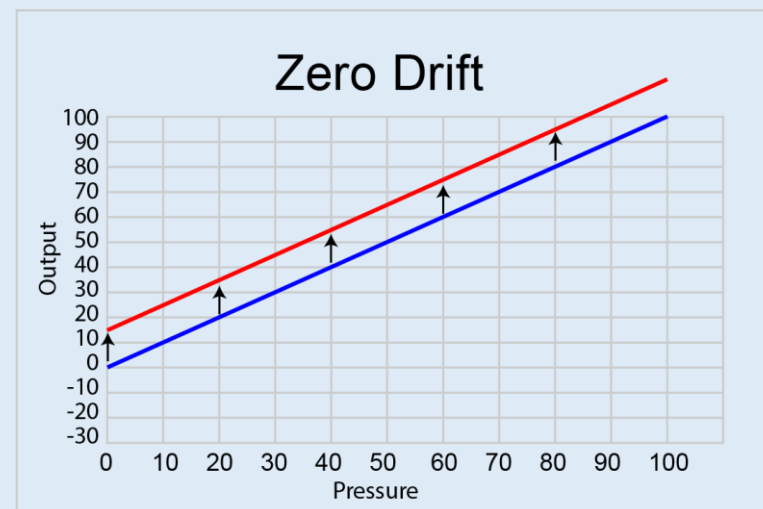
- 分辨率误差是一种随机误差。精度和分辨率之间没有必然联系。  
**通常不叠加重复度及分辨率**

[Understanding Pressure Sensor Accuracy | Building Automation Systems | Industry Articles | Dwyer Instruments \(dwyer-inst.com\)](#)

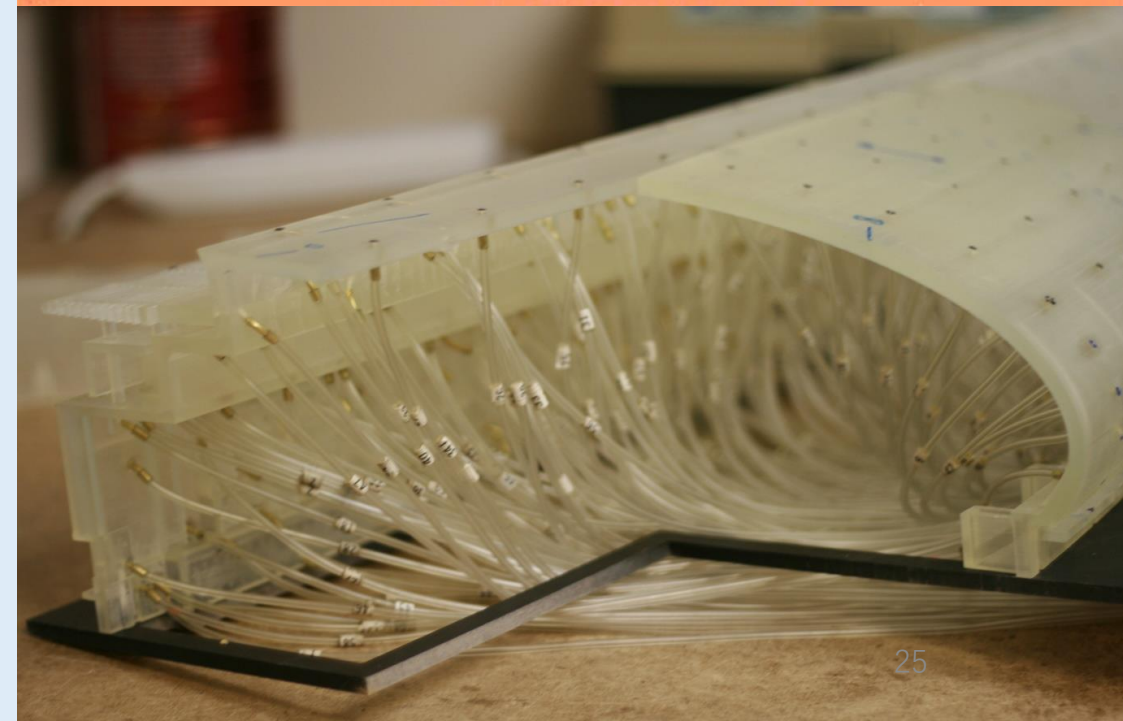
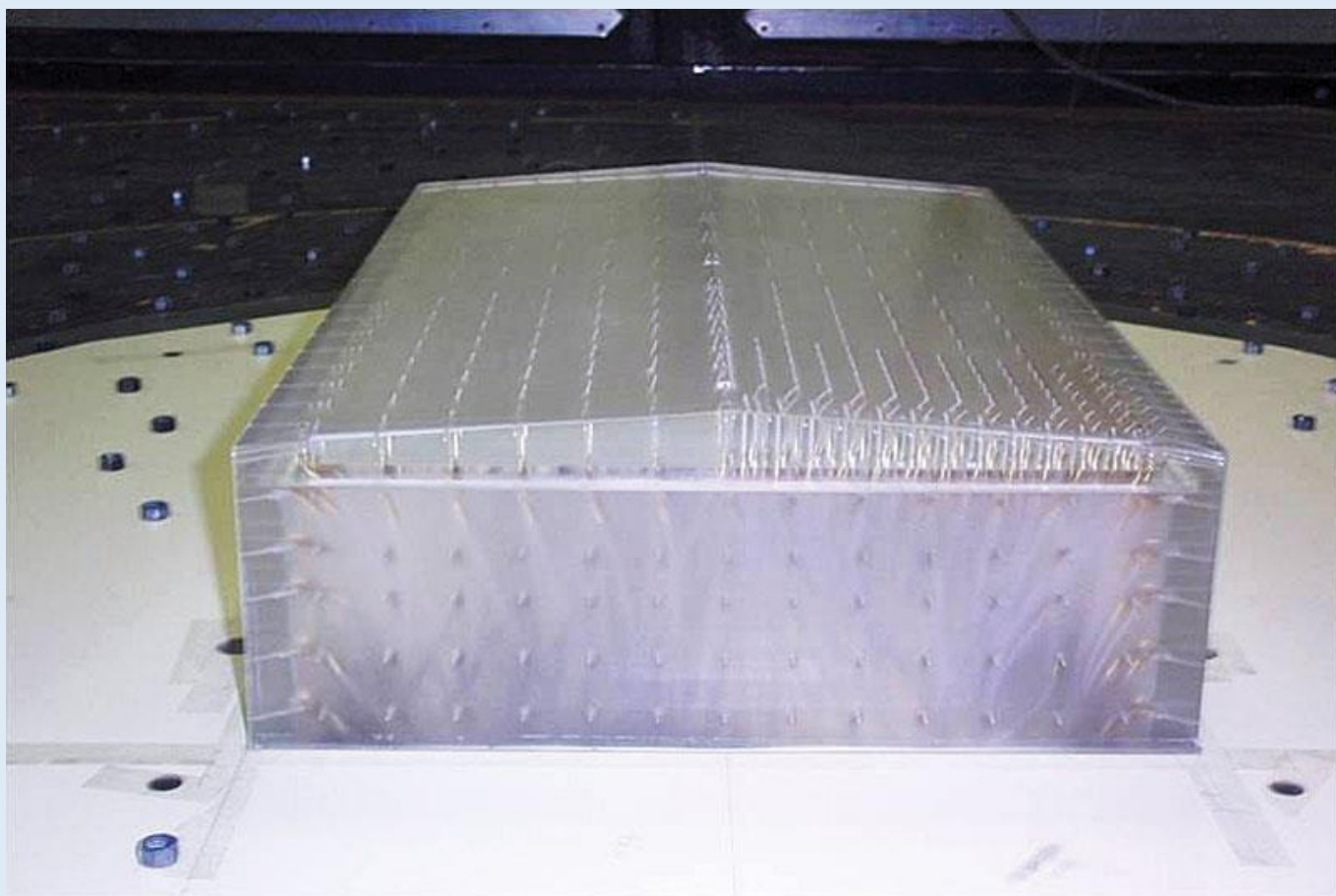


# 漂移误差

- 可以是随机的或系统的。
- 零点因电噪声等其他随机原因、或空气温度缓升等非随机原因漂移（**零漂移zero drift**）
  - 当输入为零时，仪器不读取零。
  - 可以通过某种零偏移调整来纠正。
- 待测压力的斜率也会漂移：**灵敏度漂移span drift, sensitivity drift**。
  - 重新标定



## 2.2 安装

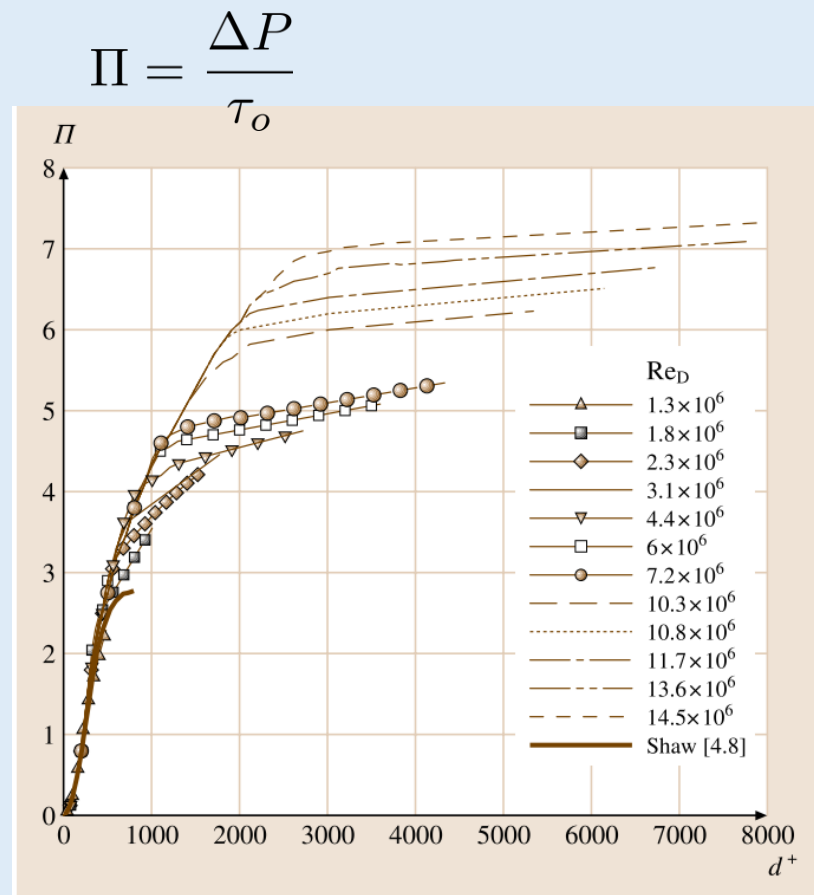
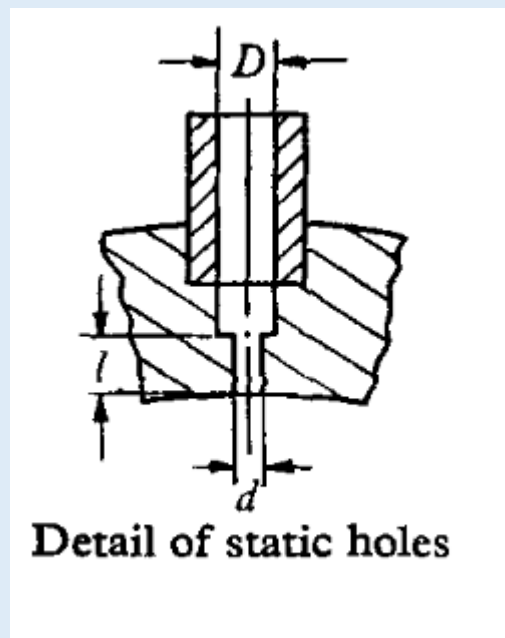


# 安装误差：测压孔大小

- 测压孔直径 $d$ 大小会对测量产生影响

$$d^+ = du_\tau / \nu \quad \text{越大}$$

$$\Pi = \frac{\Delta P}{\tau_o} \quad \text{越大}$$

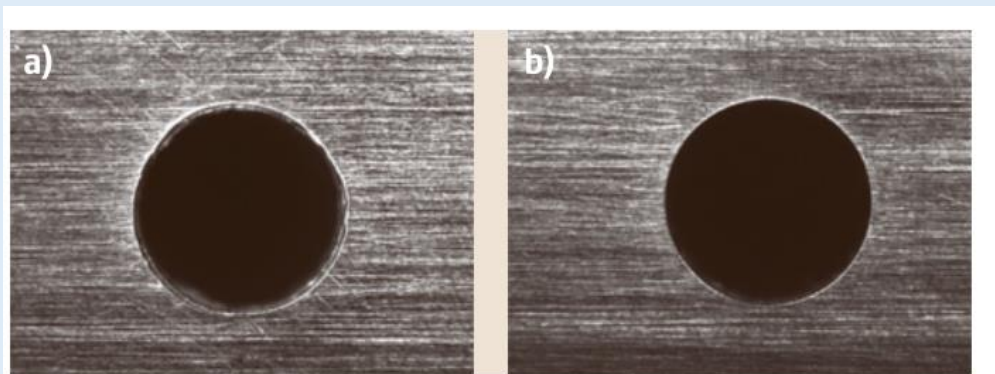


**Fig. 4.2** Effect of hole size on pressure error,  $\Pi$ , in pipe flow (After McKeon and Smits [4.13]). Each curve corresponds to the error found from a set of wall tapings with  $0.002 \leq d_s/D < 0.02$  at one pipe Reynolds number, i. e., the variation in local Reynolds number  $d^+$ ,

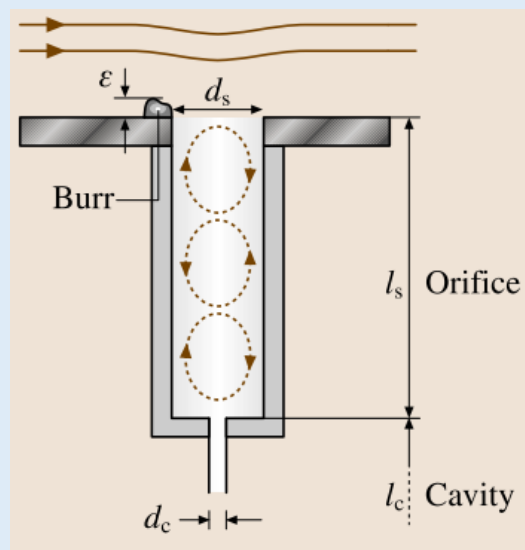
$$\frac{\Delta P}{\tau_o} = f\left\{\frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}, \frac{l}{d}, \frac{D}{d}, \frac{D_p}{d}\right\},$$



# 安装误差：孔周边残留物



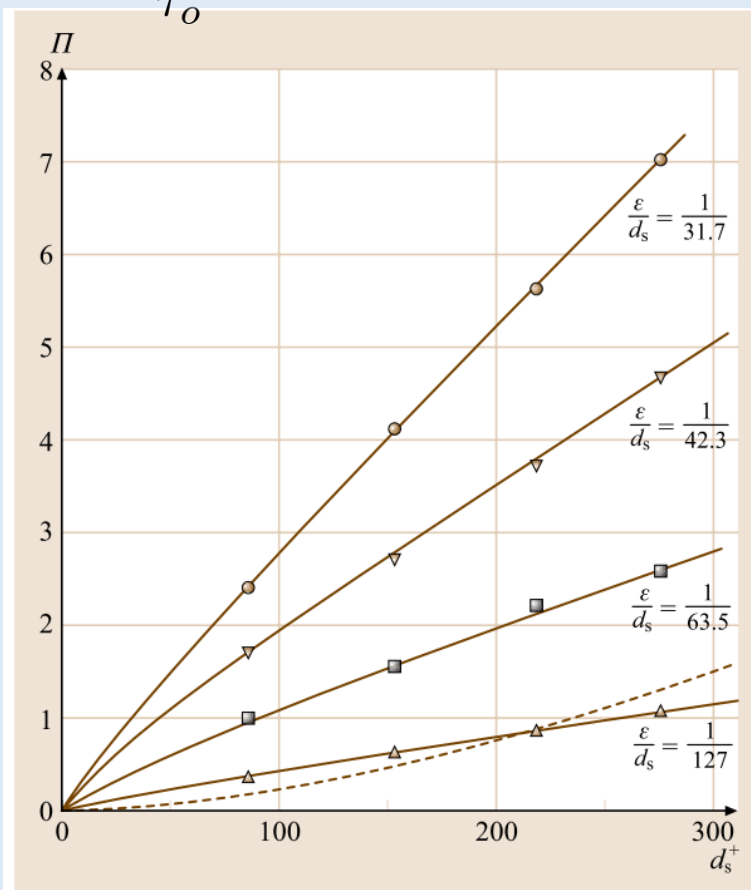
**Fig. 4.7a,b** Magnified images of wall tapping with  $d_s = 2.381$  mm. **(a)** Rejected due to burring ( $\epsilon/d_s = 0.63 \times 10^{-3}$ ) and **(b)** Accepted (After McKeon and Smits [4.13])



- 测压孔加工残留物也会对测量产生影响

$$\epsilon/d_s \text{ 越大, } \Pi = \frac{\Delta P}{\tau_o} \text{ 越大}$$

$$\Pi = \frac{\Delta P}{\tau_o}$$



**Fig. 4.6** The effect of the condition of the tapping orifice edge: the variation of the pressure error  $\Pi$  with relative burr height  $\epsilon/d_s$  (After Shaw [4.8]). The dashed line is the small-tapping, zero-burr error



# 测压管

软管



**ISM**  
303-781-8486  
[industrialspec.com/shop/plastic-tubing](http://industrialspec.com/shop/plastic-tubing)

**Silicone Tubing Specifications**

| ISM Item #   | Inside Diameter | Outside Diameter | Length | Working PSI at 70°F (21°C)* | Pounds Per 100 Feet |
|--------------|-----------------|------------------|--------|-----------------------------|---------------------|
| S-11618-100  | 1/16"           | 1/8"             | 100'   | 10*                         | 0.5                 |
| S-116316-100 | 1/16"           | 3/16"            | 100'   | 20*                         | 1.3                 |
| S-332532-100 | 3/32"           | 5/32"            | 100'   | 10*                         | 0.7                 |
| S-332732-100 | 3/32"           | 7/32"            | 100'   | 15*                         | 1.6                 |
| S-18316-100  | 1/8"            | 3/16"            | 100'   | 10*                         | 0.9                 |
| S-1814-100   | 1/8"            | 1/4"             | 100'   | 20*                         | 2.0                 |

硬管



Nylon

| Part Number & Color Code | Packaging Unit Size  | OD    | ID    | Wall  | Standard Colors            | Working Pressure<br>75°F/25°C | Working Pressure<br>150°F/65°C | Lbs./<br>100' | Bend<br>Radius | Fitting |
|--------------------------|----------------------|-------|-------|-------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|---------|
| 1J-247- — 100' Bag       | 1A-247- — 2500' Reel | 1/8"  | .079" | .023" | 01 10                      | 420 PSI                       | 250 PSI                        | .35           | 3/8"           | PI, C   |
| 1J-200- — 100' Bag       | 1C-200- — 500' Reel  | 1/8"  | .093" | .016" | 01 05 06 07 08 10          | 270 PSI                       | 160 PSI                        | .25           | 1/2"           | PI, C   |
| 1B-200- — 1000' Reel     | 1A-200- — 2500' Reel |       |       |       |                            |                               |                                |               |                |         |
| 1J-201- — 100' Bag       | 1C-201- — 500' Reel  | 5/32" | .106" | .025" | 01 03 05 06 07 08 09 10 12 | 350 PSI                       | 210 PSI                        | .51           | 1/2"           | PI, C   |
| 1B-201- — 1000' Reel     | 1A-201- — 2500' Reel |       |       |       |                            |                               |                                |               |                |         |
| 1J-202- — 100' Bag       | 1B-202- — 500' Reel  | 3/16" | .138" | .025" | 01 05 06 07 10             | 260 PSI                       | 160 PSI                        | .55           | 5/8"           | PI, C   |
| 1A-202- — 2000' Reel     | 1J-214- — 100' Bag   |       |       |       |                            |                               |                                |               |                |         |

Silicone Tubing Technical Specifications from ISM  
([industrialspec.com](http://industrialspec.com))

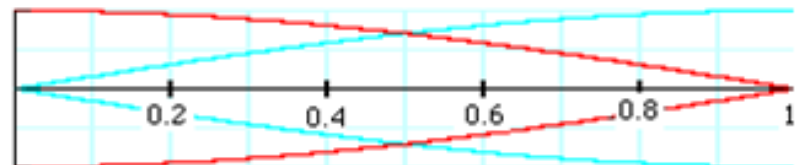


微信公众号

# 管路的压力波

传感器

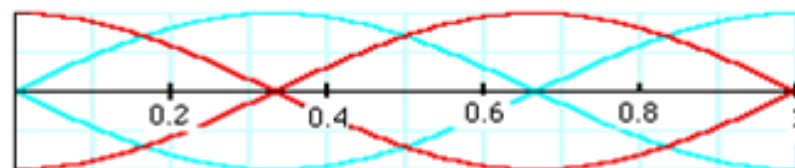
测压管开口



压力波

第一模式

(even harmonics are absent)



第二模式

[www.phys.unsw.edu.au/music](http://www.phys.unsw.edu.au/music)

- "Clarinets"(单簧管,竖笛): as a string with one fixed and one free end. Even harmonics are absent. Allowed wavelength are

$$\lambda = 4L, 4L/3, 4L/5, \dots 4L/(2n+1)$$

[Open vs Closed pipes \(Flutes vs Clarinets\) \(unsw.edu.au\)](http://www.phys.unsw.edu.au/music)

- 波动的管内压强影响测量结果
  - 加入低通滤波器,
  - 或多次采样求均值



# 通过多个采样求均值降低随机误差

$$\sigma_{\hat{\mu}_x}^2 = \frac{\sigma_x^2}{N},$$

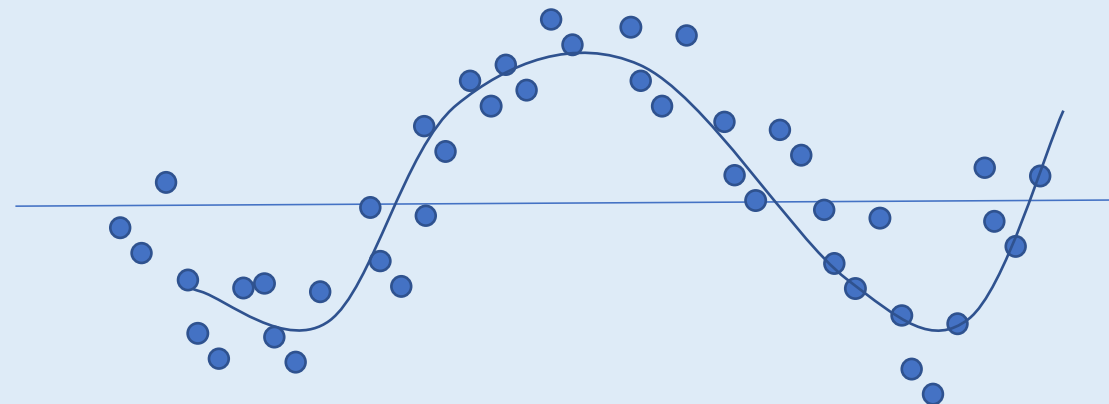
均值的方差=样本方差/独立样本数

$$N = \frac{T}{2T_x}.$$

独立样本数=采样总时长/2\*特征周期

$$T_x = \frac{1}{\sigma_x^2} \int_0^{\infty} C_{xx}(\tau) d\tau.$$

特征周期=自相关系数的积分



# 精度对比

美国 PSI（现TE）ESP系统

MINIATURE ELECTRONIC  
PRESSURE SCANNERS  
ESP-16HD/32HD/64HD



## PERFORMANCE

|                                                          |       |      |                               |          |
|----------------------------------------------------------|-------|------|-------------------------------|----------|
| Static Accuracy <sup>3</sup><br>@100% range <sup>4</sup> | ±0.03 | % FS | range ≥ 10 psid               | >140 kPa |
|                                                          | ±0.06 | % FS | range ≥ 10 in WC to < 10 psid |          |
|                                                          | ±0.15 | % FS | range < 10 in WC              | <2.5 kPa |

国产航华PSU测压系统



## 量程、精度

- 量程：0-700 kPa（表压），精度：量程值0.05% (350.0 Pa)；
- 量程：0-200 kPa（表压），精度：量程值0.05% (100.0 Pa)；
- 量程：0-30.0 kPa（表压），精度：量程值0.07% (21.0 Pa)；
- 量程：0-30.0 kPa（绝压），精度：量程值0.07% (21.0 Pa)；
- 量程：0-2.5 kPa（表压），精度：量程值0.11% (2.75 Pa)；
- 量程：±1.0 kPa（表压），精度：量程值0.10% (2.0 Pa)；



## 2.4 误差的传播

- 计算速度

$$V = \sqrt{2P/\rho}$$

- 已知压强测量不确定度
- 如何确定速度不确定度

$$\varepsilon_P$$

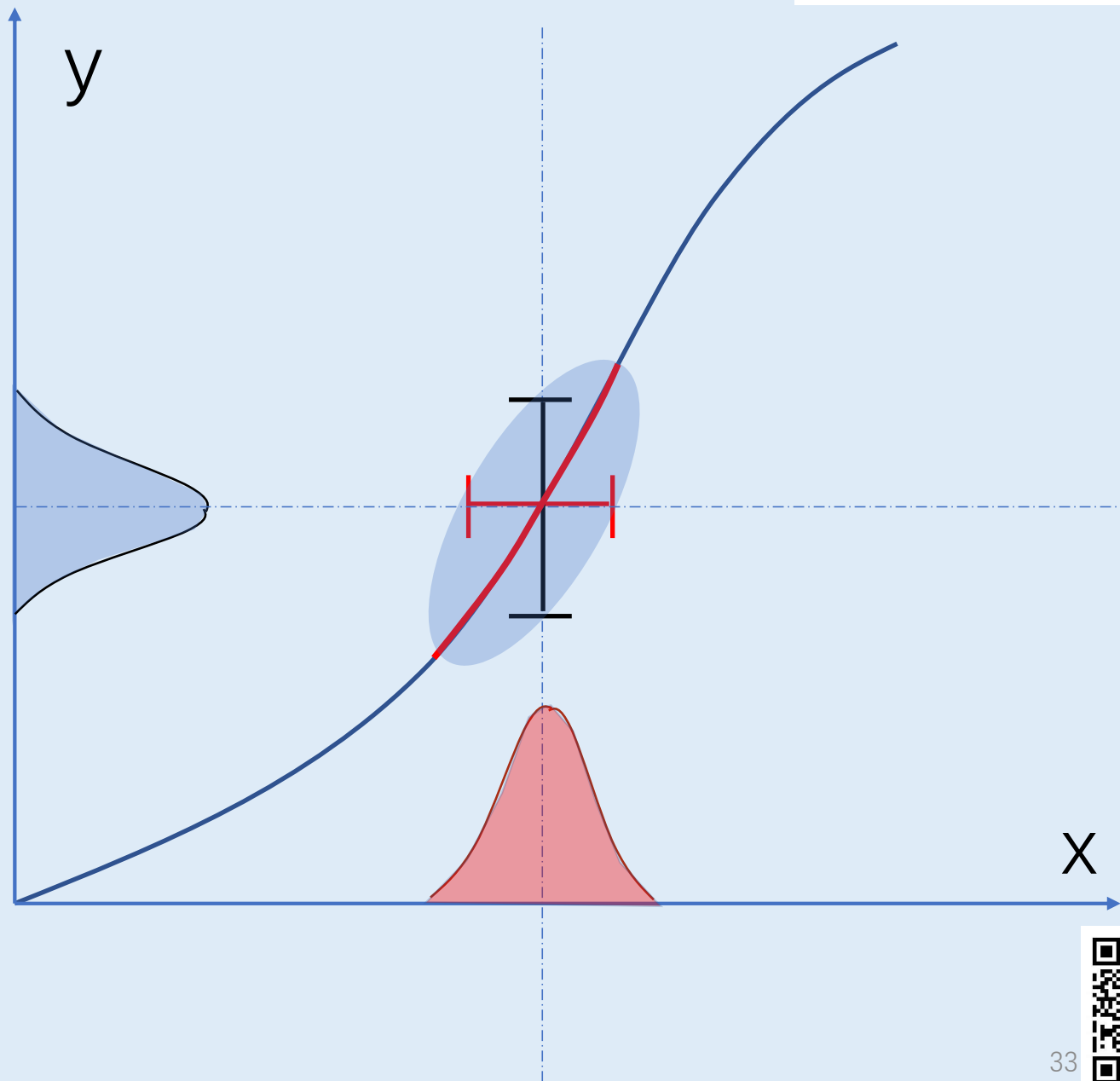
$$\varepsilon_V$$



## 2.4 误差的传播

$$y = f(x)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial f}{\partial x} \varepsilon_x$$



## 2.2 误差的传播

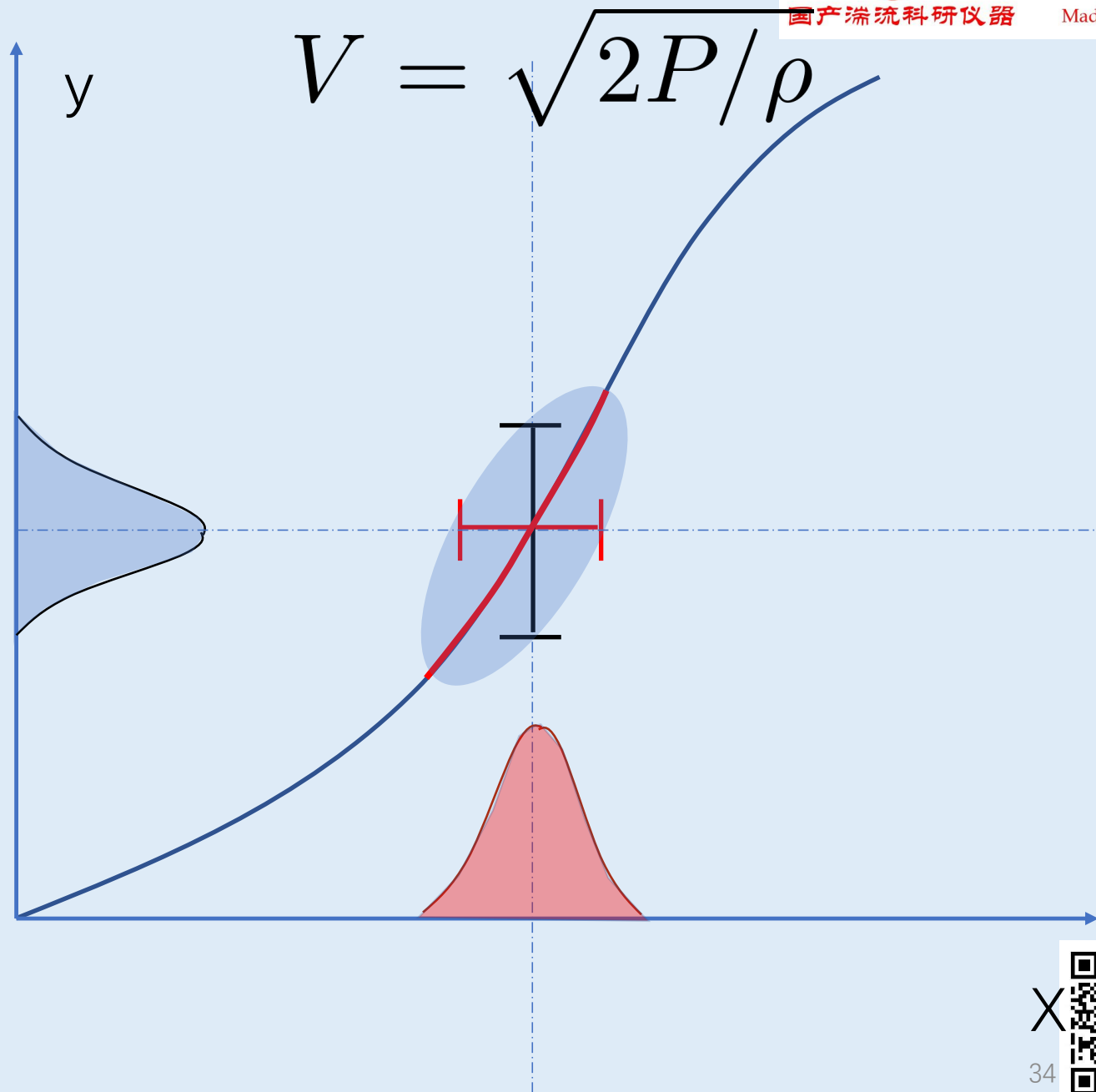
$$y = f(x_1, x_2, \dots)$$

$$\varepsilon_y^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_{x_2} \right)^2 + \dots$$

$$\varepsilon_V^2 = \left( \frac{\partial V}{\partial P} \varepsilon_P \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \rho} \varepsilon_\rho \right)^2$$

$$\varepsilon_V = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho P}} \varepsilon_P$$

$$\frac{\varepsilon_V}{V} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_P}{P}$$



如果测量值为  $P=100 \text{ Pa}$ , 测压精度为  $\pm 1.0 \text{ Pa}$ , 速度精度?



$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

速度误差

$$\varepsilon_v^2 = \left( \frac{\partial V}{\partial P} \varepsilon_P \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \rho} \varepsilon_\rho \right)^2$$

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho P}} \varepsilon_P$$

忽略  $\rho$  变化

速度相对误差

$$\frac{\varepsilon_v}{V} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho P}} \varepsilon_P}{\sqrt{\frac{2P}{\rho}}} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_P}{P}$$

$$\frac{\varepsilon_v}{V} = \frac{1}{2} \frac{1 \text{ Pa}}{100 \text{ Pa}} = 0.5\%$$



机械工程前沿著作系列 HEP  
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

# 误差分析导论

物理测量中的不确定度

An Introduction to Error Analysis  
The Study of Uncertainties in Physical Measurements

第二版

John R. Taylor 著  
王中宇等 译

高等教育出版社

第3章 | 不确定度的传播

这意味着  $q(x, y)$  的不确定度为

$$\delta q \approx \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x + \left| \frac{\partial q}{\partial y} \right| \delta y \quad (3.43)$$

在讨论新规则的各种一般形式之前, 我们先用它重新推导出一些熟悉的情况。例如, 假定

$$q(x, y) = x + y \quad (3.44)$$

即  $q$  正好是  $x$  与  $y$  之和。部分偏导数都等于 1, 即

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial y} = 1 \quad (3.45)$$

根据式 (3.43) 得到

$$\delta q \approx \delta x + \delta y \quad (3.46)$$

这就是我们原先得到的临时规则, 即  $x + y$  的不确定度等于  $x$  与  $y$  的不确定度之和。

用完全相同的方法, 如果  $q$  是乘积  $q = xy$ , 可以发现式 (3.43) 蕴含着同样的规则, 即  $q$  的比值不确定度是  $x$  与  $y$  的比值不确定度之和 (见习题 3.45)。

规则 (3.43) 可以推广应用于各种不同的场合。很容易知道当不确定度  $\delta x$  与  $\delta y$  独立且随机时, 简单和 (3.43) 可以被平方和开方所取代。对于两个以上的变量, 可以对每一个额外的变量简单地加上一个额外的项进行处理。按照这种方法, 我们得到下面的一般规则 (第 5 章与第 9 章将给出完整的证明):

## 多变量函数的不确定度

假定对  $x, \dots, z$  进行测量, 它们的不确定度分别为  $\delta x, \dots, \delta z$ , 用测得值计算函数  $q(x, \dots, z)$ 。如果  $x, \dots, z$  的不确定度独立且随机, 那么  $q$  的不确定度为

$$\delta q = \sqrt{\left( \frac{\partial q}{\partial x} \delta x \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial q}{\partial z} \delta z \right)^2} \quad (3.47)$$

在任何情况下, 它的值都不会大于普通和的值

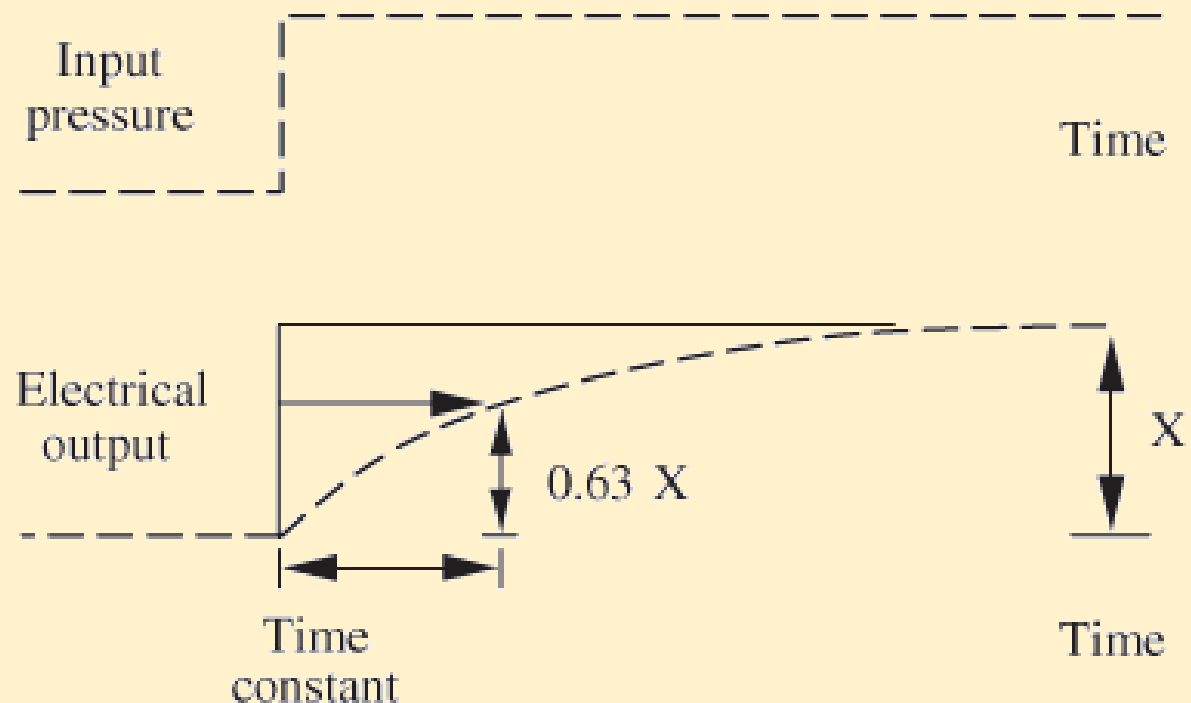
$$\delta q \leq \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x + \dots + \left| \frac{\partial q}{\partial z} \right| \delta z \quad (3.48)$$

尽管式 (3.47) 与式 (3.48) 看起来相当复杂, 但是如果每次只考虑一项, 就会很容易理解。例如, 不妨假定在所有的被测量  $x, y, \dots, z$  中, 只有  $x$  受不确定度的影响 (也就是说,  $\delta y = \dots = \delta z = 0$ )。那么式 (3.47) 只包含一项, 我们会得到

$$\delta q = \left| \frac{\partial q}{\partial x} \right| \delta x \quad (\delta y = \dots = \delta z = 0) \quad (3.49)$$



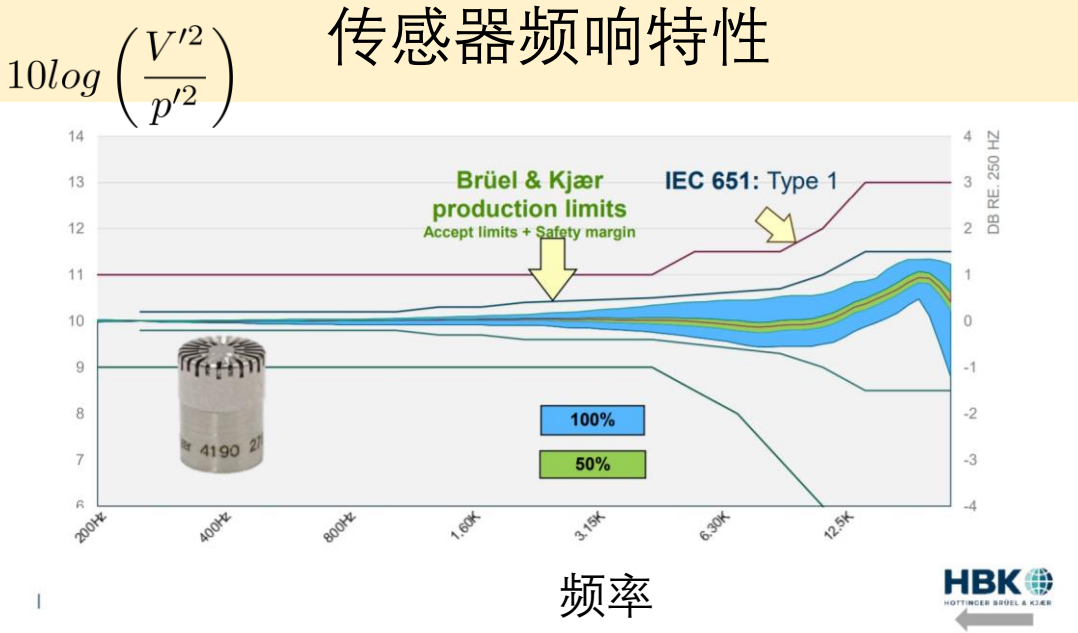
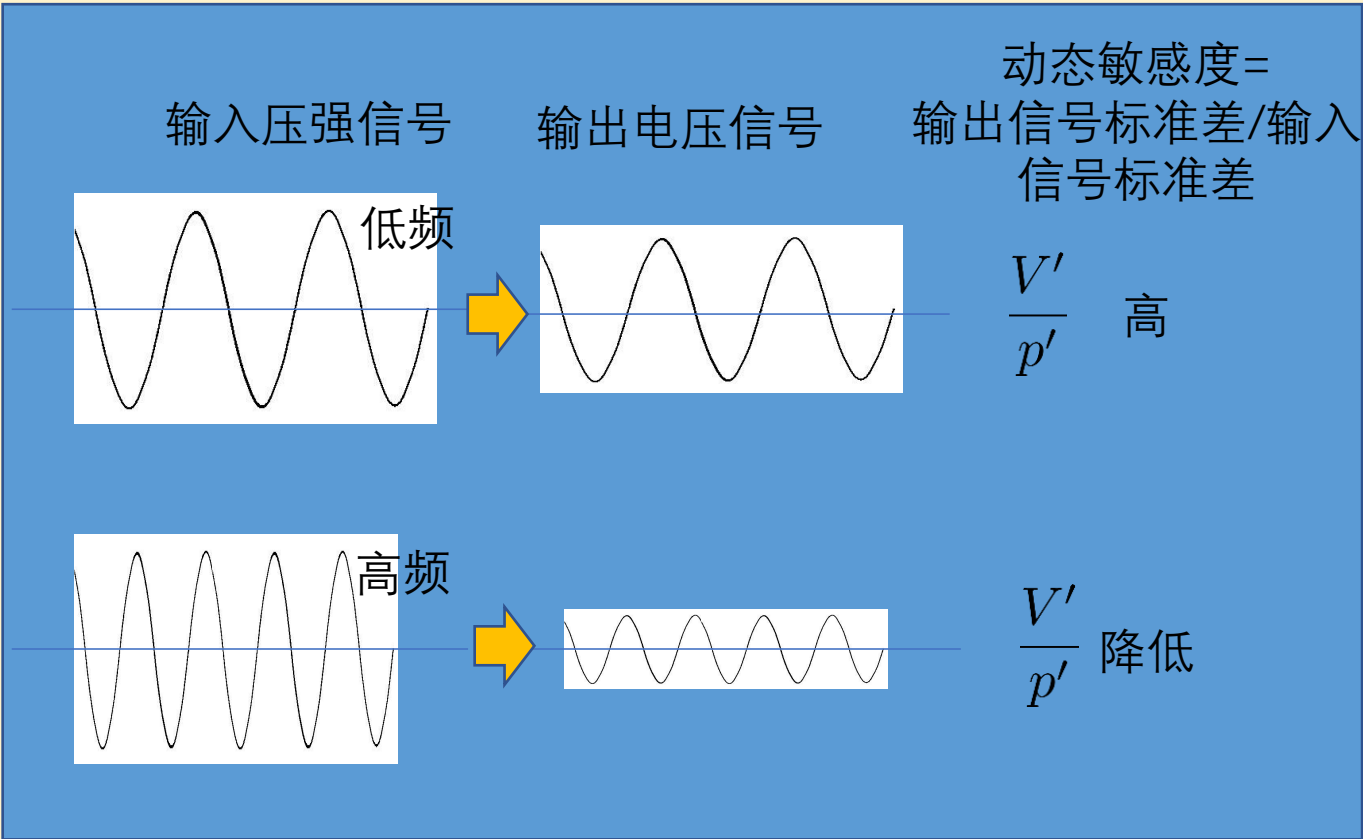
### 3 动态测量：传感器的响应时间（频响）



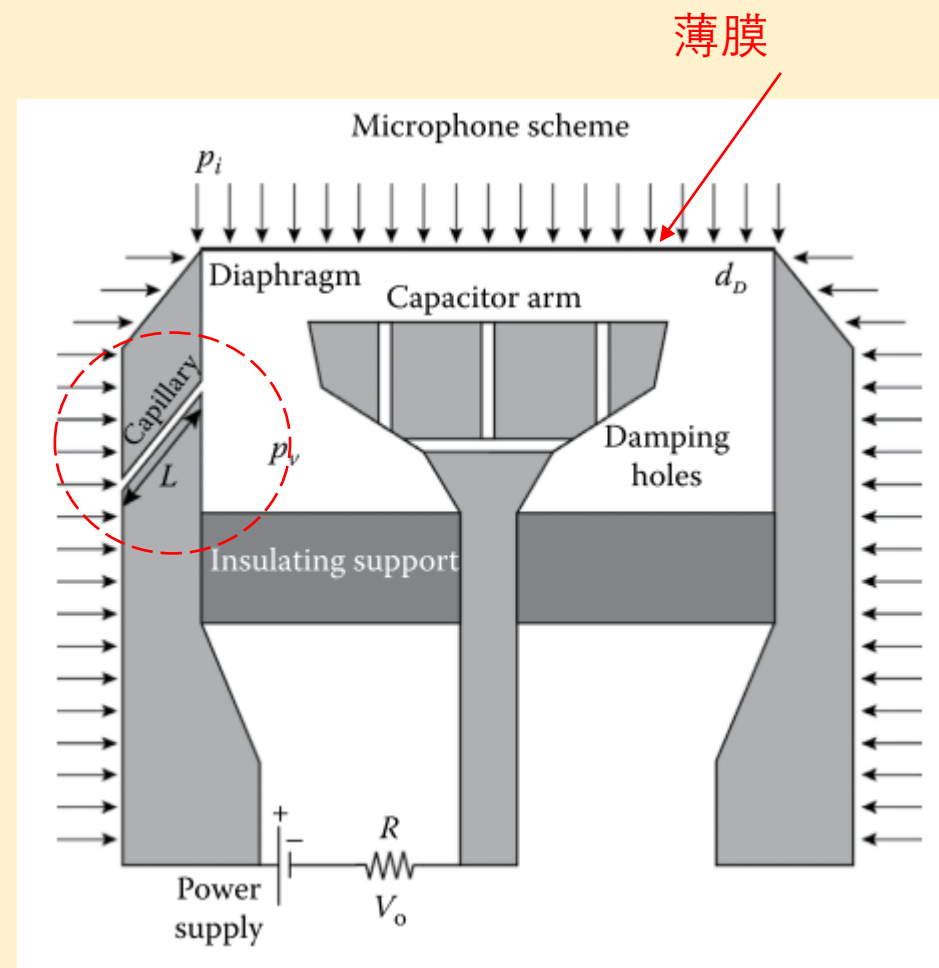
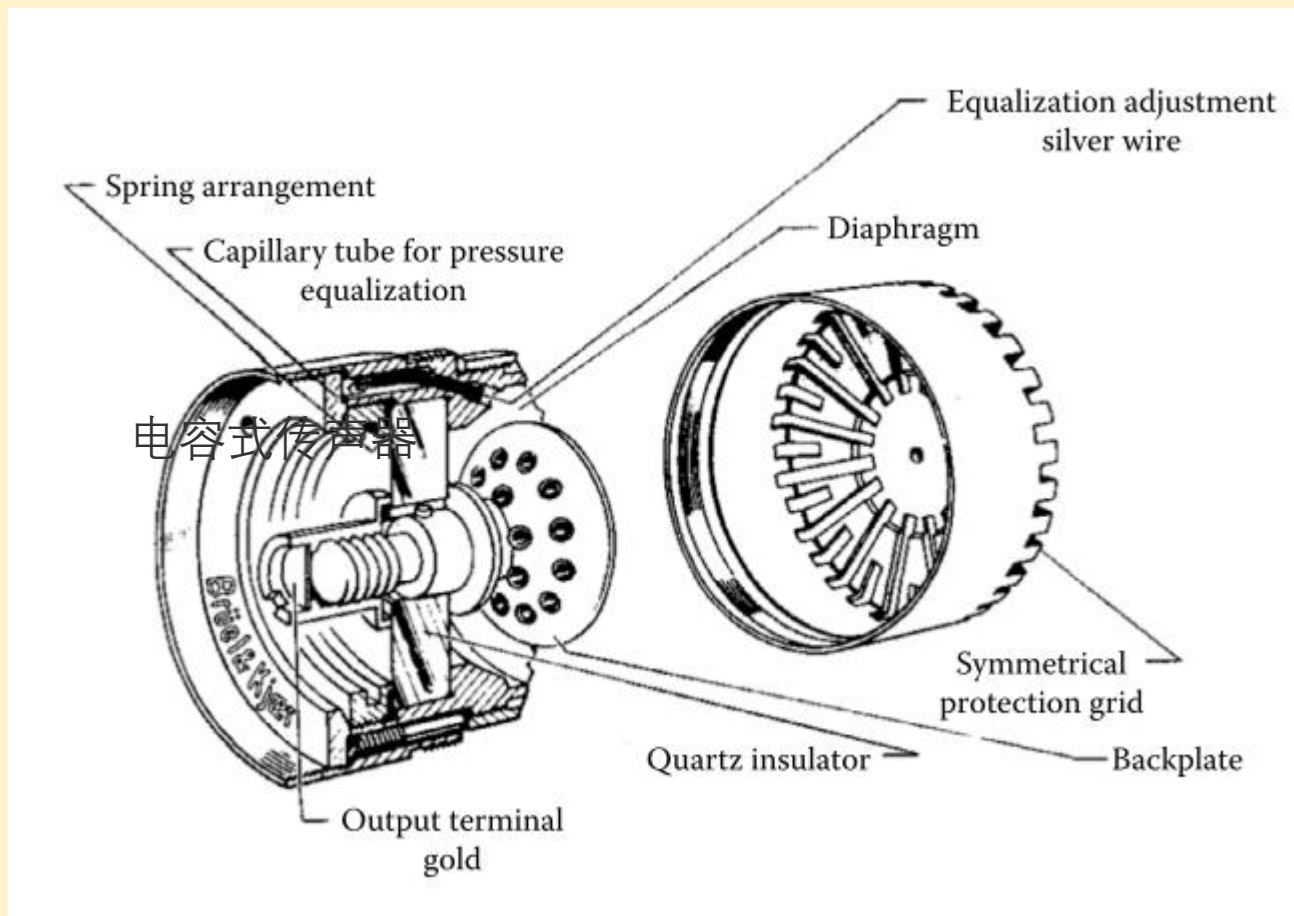
- 时间常数是传感器信号达到最终输出值 63% 所需的时间
- 航华PSU系列传感器的特征时间为1.0 ms
- 



# 传感器频响特性



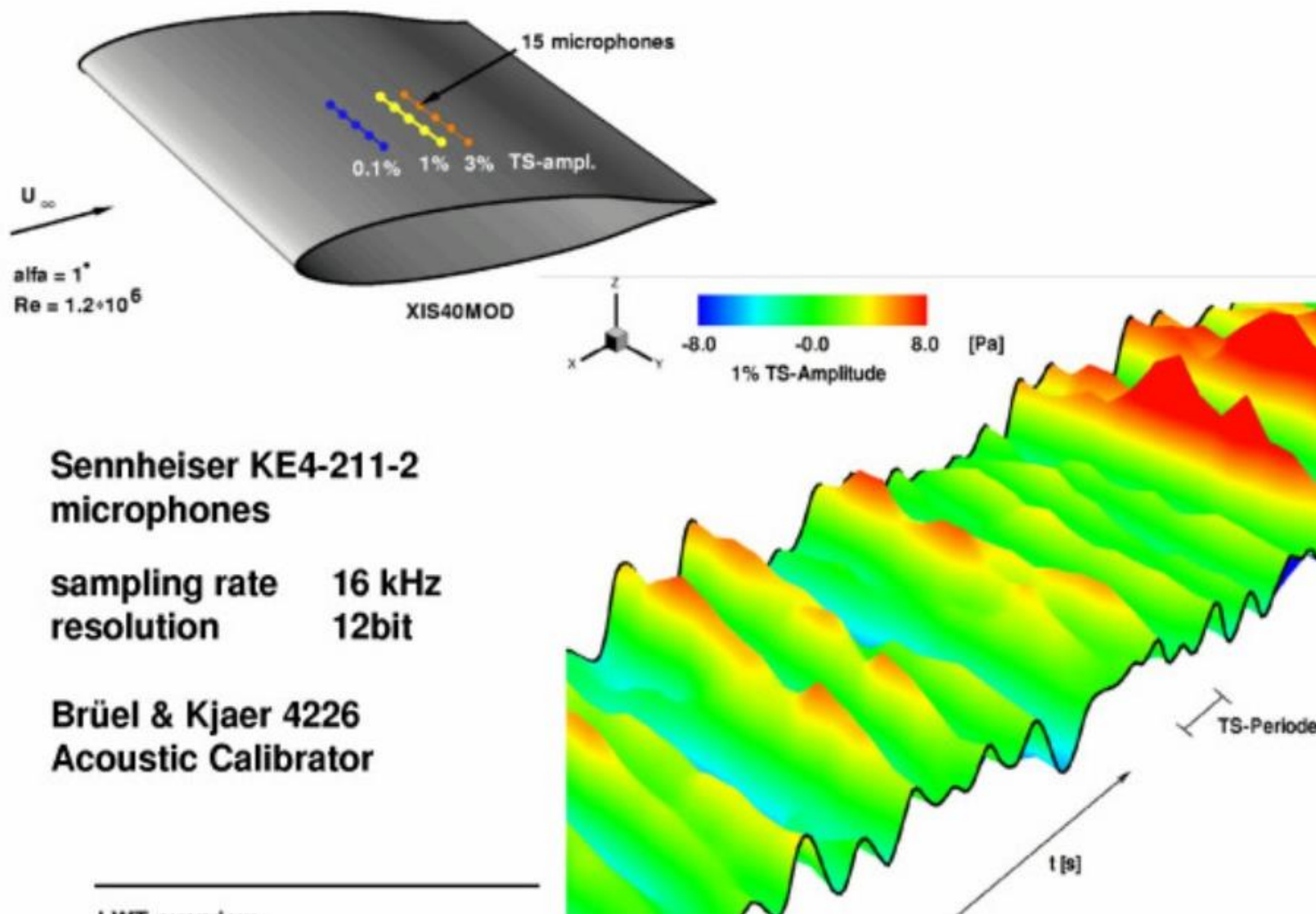
# 专门用于动态测量的压强传感器：麦克风



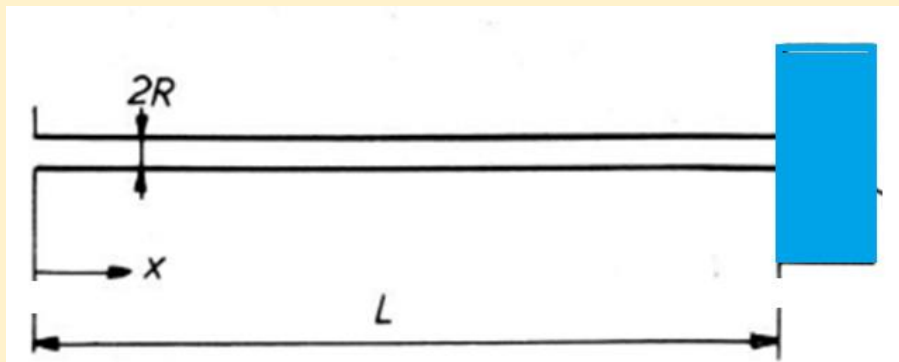
麦克风不能测量时均压强





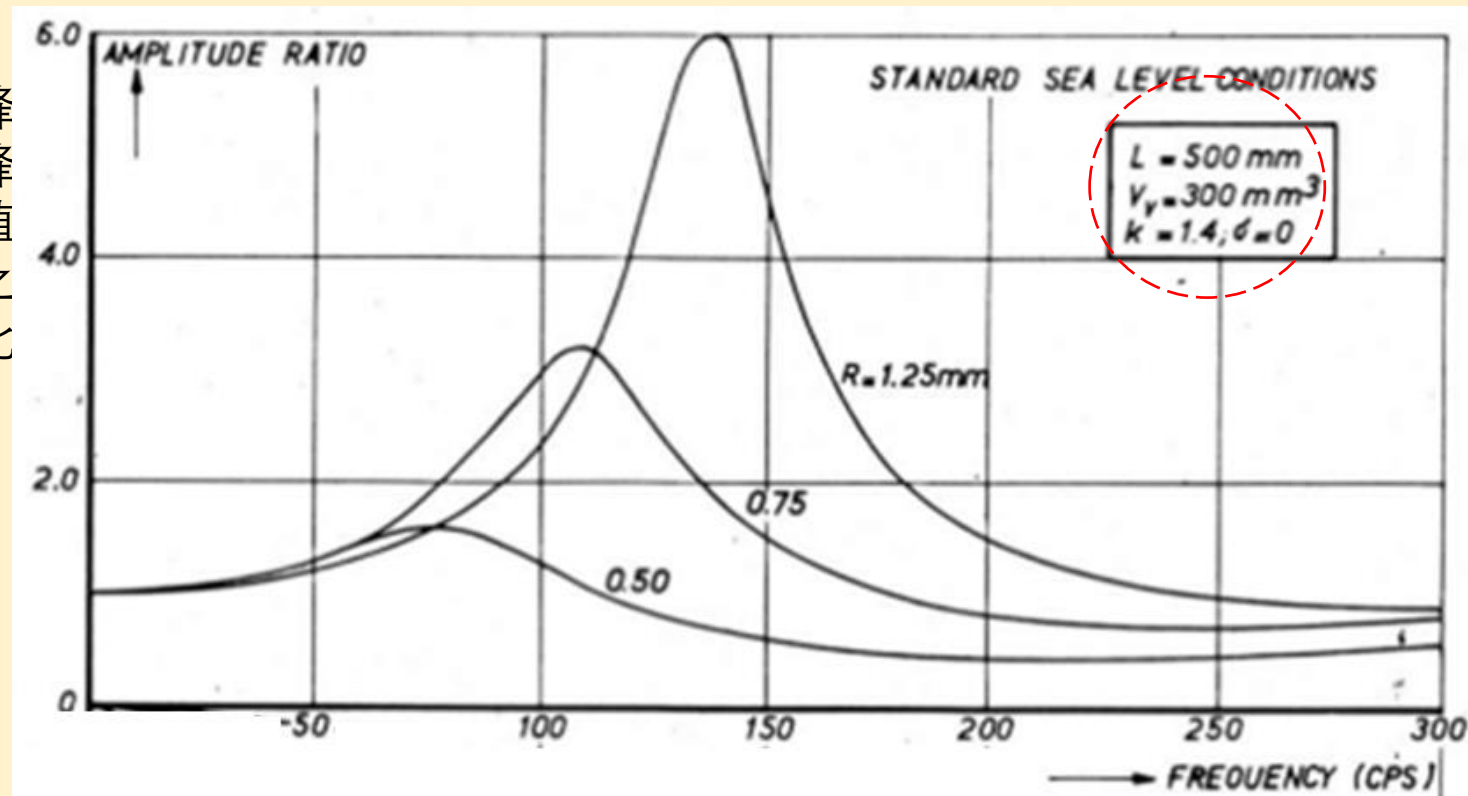


# 管路对动态测量的影响

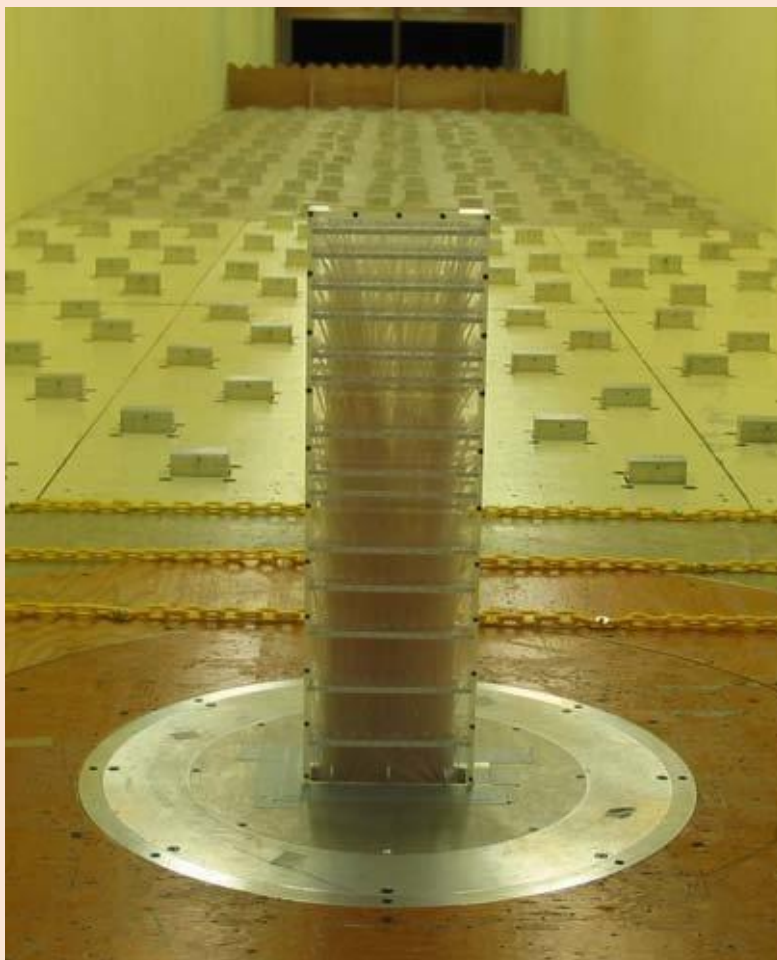


- 管长L
  - 频率  $f = c/4L, 3c/4L, \dots$   
( $2n+1$ ) $c/4L$  被放大

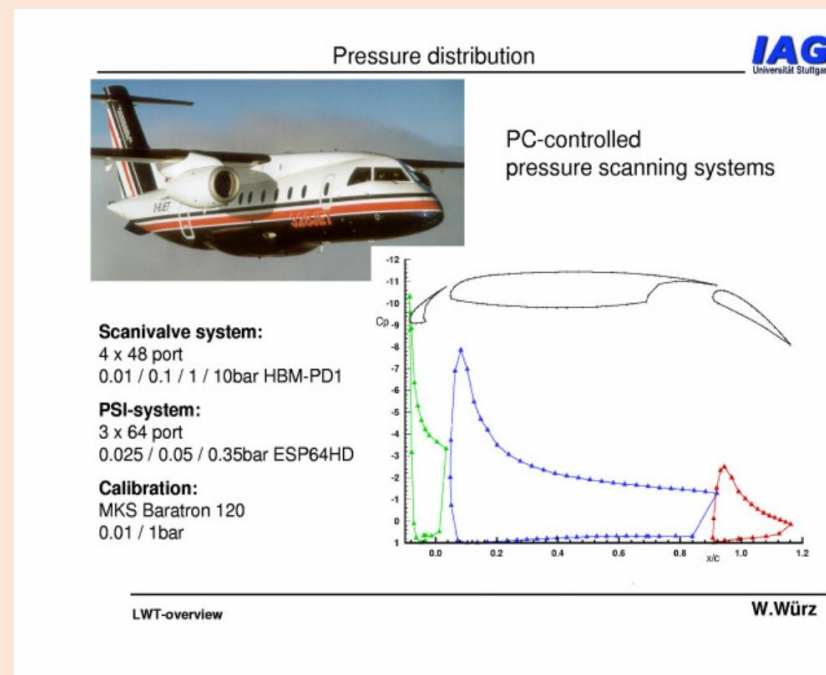
峰  
峰  
值  
之  
比



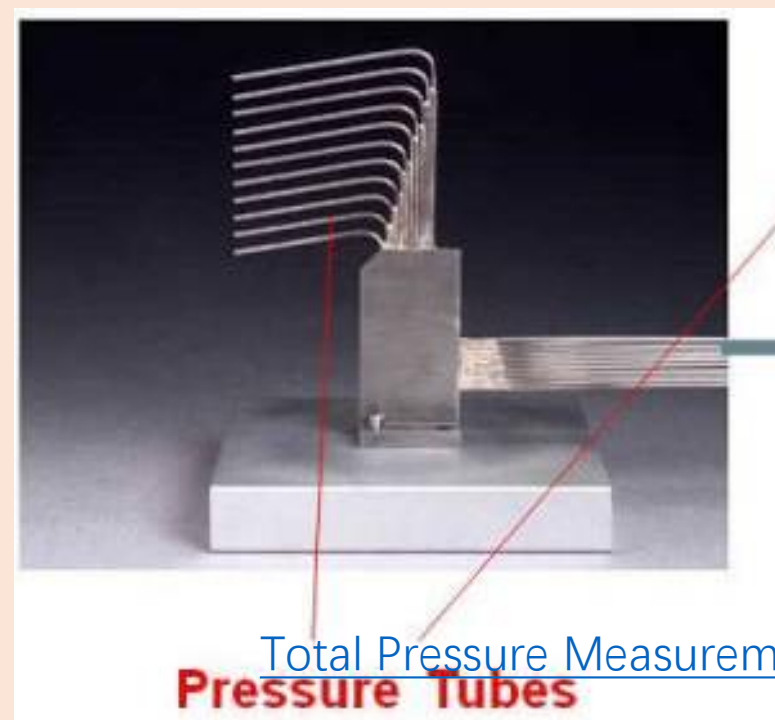
## 4 多点测量



(20) (PDF) Time domain analysis technique for aerodynamic  
wind tunnel model studies (researchgate.net)



[Measurement techniques |  
Institute of Aerodynamics and Gas  
Dynamics | University of Stuttgart  
\(uni-stuttgart.de\)](#)

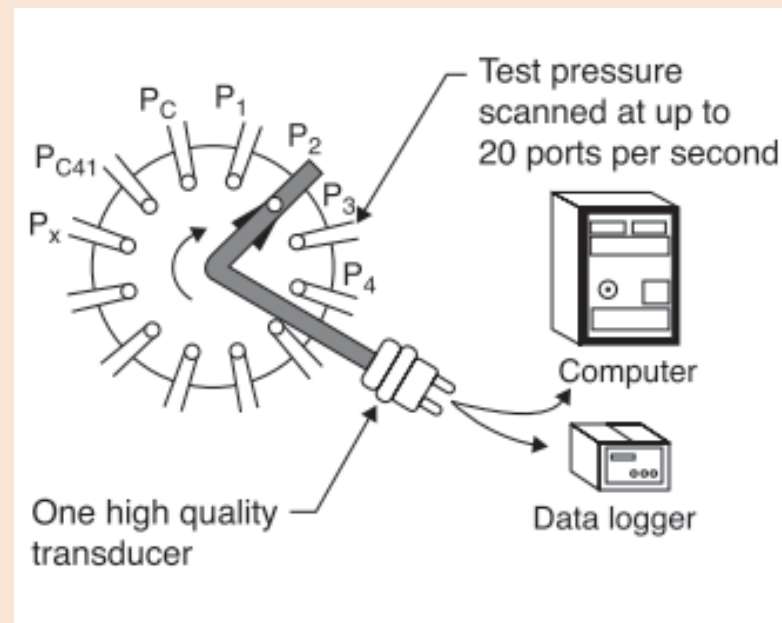
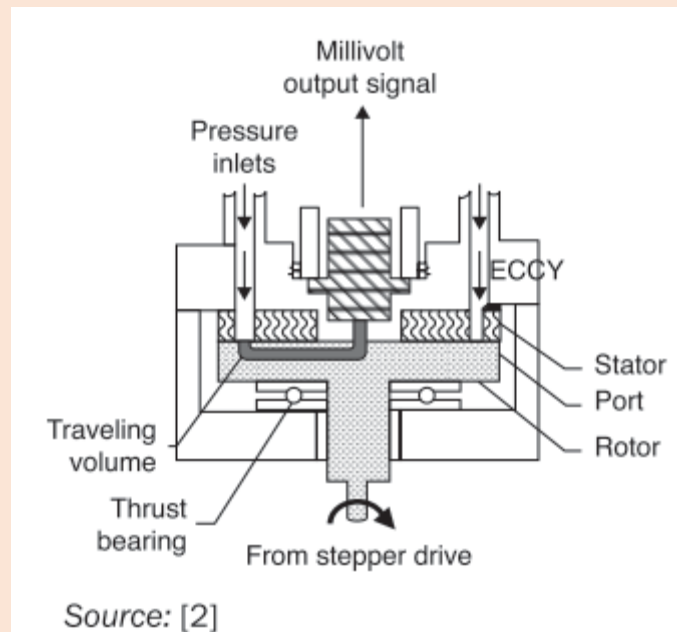


Total Pressure Measurement (nasa.gov)



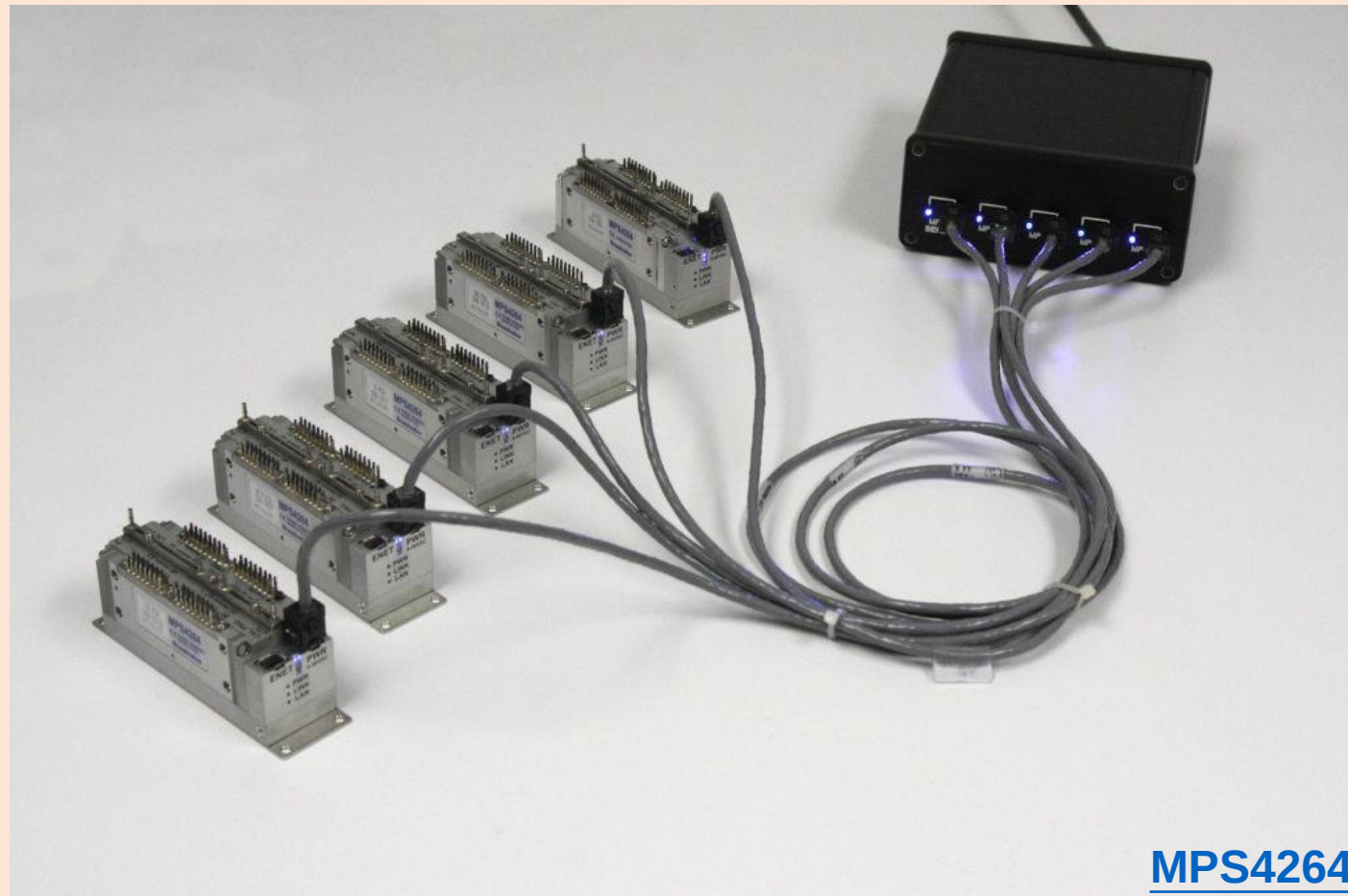
## 4.1 机械扫描多个测压点

- 早期（1960 年到 2000 年），Scanivalve 仅使用一个高精度传感器，通过机械方法依次连接到每个测压口进行测量
- 机械扫描系统体积大，动作慢，不适合压强快速变化的场合



## 4.2 电子扫描

- 现阶段扫描系统集成多个传感器。扫描以电子方式完成，扫描频率科大每通道高达 10 kHz

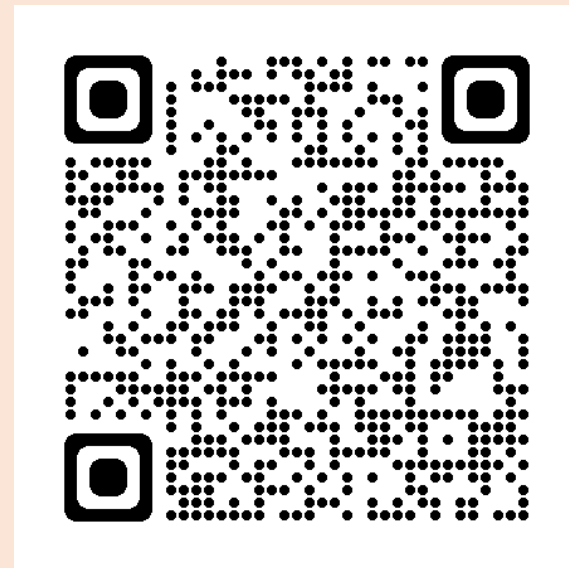


MPS4264





# 航华PSU系列电子压力扫描仪



多通道压强扫描系统 - 航华科技 ([hanghualab.com](http://hanghualab.com))



# 航华PSU参数



|         |                                                   |
|---------|---------------------------------------------------|
| 介质      | 空气                                                |
| 可选量程及精度 | •量程: $\pm 1.0$ kPa (表压), 精度: 量程值0.10% (2.0 Pa);   |
|         | •量程: $\pm 2.1$ kPa (表压), 精度: 量程值0.10% (4.2 Pa);   |
|         | •量程: 0-2.5 kPa (表压), 精度: 量程值0.11% (2.75 Pa);      |
|         | •量程: $\pm 5.5$ kPa (表压), 精度: 量程值0.10% (11.0 Pa);  |
|         | •量程: 0-7.0 kPa (表压), 精度: 量程值0.07% (4.9 Pa);       |
|         | •量程: $\pm 10.3$ kPa (表压), 精度: 量程值0.10% (20.6 Pa); |
|         | •量程: 0-30.0 kPa (表压), 精度: 量程值0.07% (21.0 Pa);     |
|         | •量程: 0-30.0 kPa (绝压), 精度: 量程值0.07% (21.0 Pa);     |
|         | •量程: 0-100 kPa (表压), 精度: 量程值0.05% (50.0 Pa);      |
|         | •量程: 0-100 kPa (绝压), 精度: 量程值0.05% (50.0 Pa);      |
|         | •量程: 0-200 kPa (表压), 精度: 量程值0.05% (100.0 Pa);     |
|         | •量程: 0-200 kPa (绝压), 精度: 量程值0.05% (100.0 Pa);     |
|         | •量程: 0-700 kPa (表压), 精度: 量程值0.05% (350.0 Pa);     |
|         | •量程: 0-700 kPa (绝压), 精度: 量程值0.05% (350.0 Pa);     |
| 响应时间    | <1ms                                              |
| 通道数     | <del>可选: 64、96、128</del>                          |
| 内置数采    | 分辨率16位, 采样率25kHz每通道                               |
| 接口      | 可选: Type-C/USB、网口                                 |
| 工作温度    | <del>-40至100摄氏度</del>                             |
| 软件      | Labview VI, 也可根据用户需求定制                            |



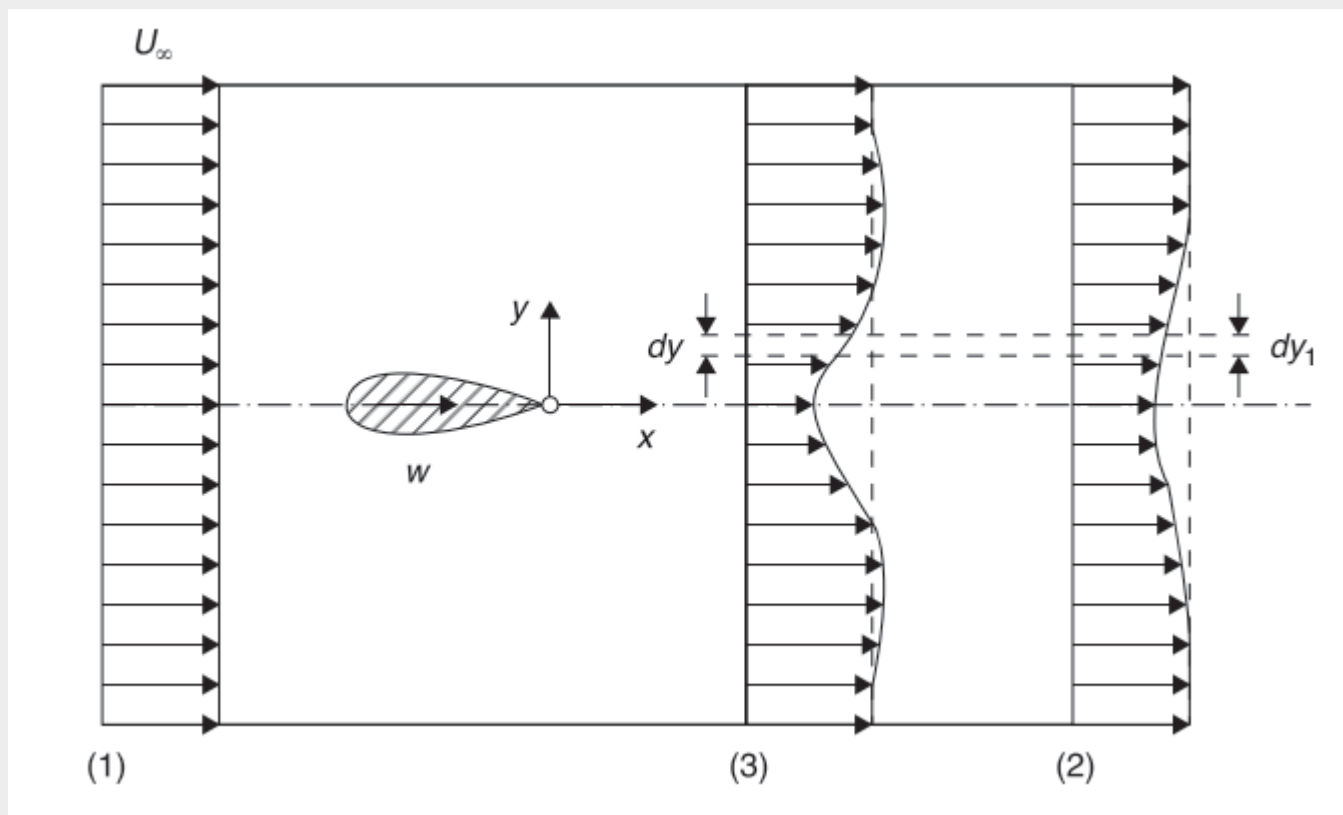
# 航华PSU系列电子压力扫描仪



## 4.3 数据处理、分析



# 尾迹耙-阻力测量



$$D_p = \int_{-y_w}^{y_w} \rho U_2 (U_\infty - U_2) dy$$



devised to calculate the drag from the balance of momentum, the most commonly used is that of Jones. This method allows the calculation of drag from measurements made only in the wake with an error < 2%.

In an incompressible flow, assuming that the pressure in the station

Russo, Aerodynamic measurements, p234

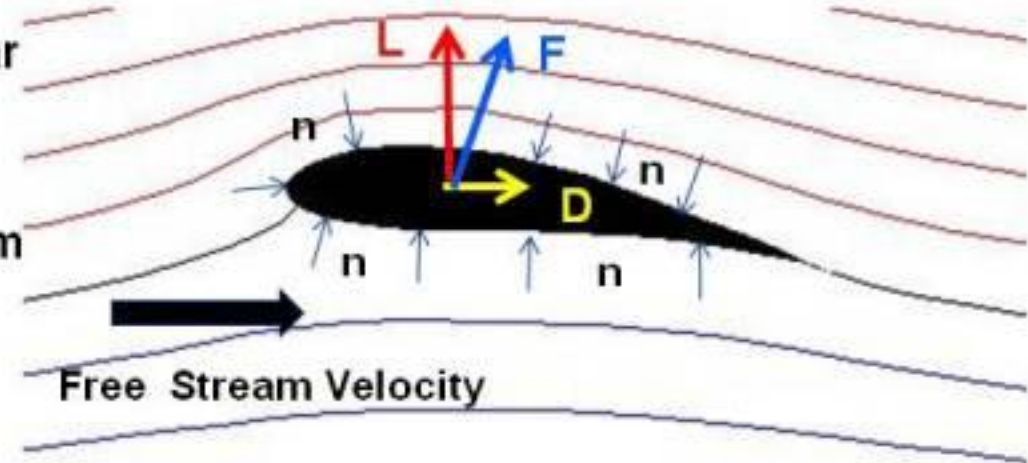


# Aerodynamic Forces

## 气动力

Pressure forces act perpendicular to the surface.

Force on the body is the vector sum of the pressure times the area around the body.

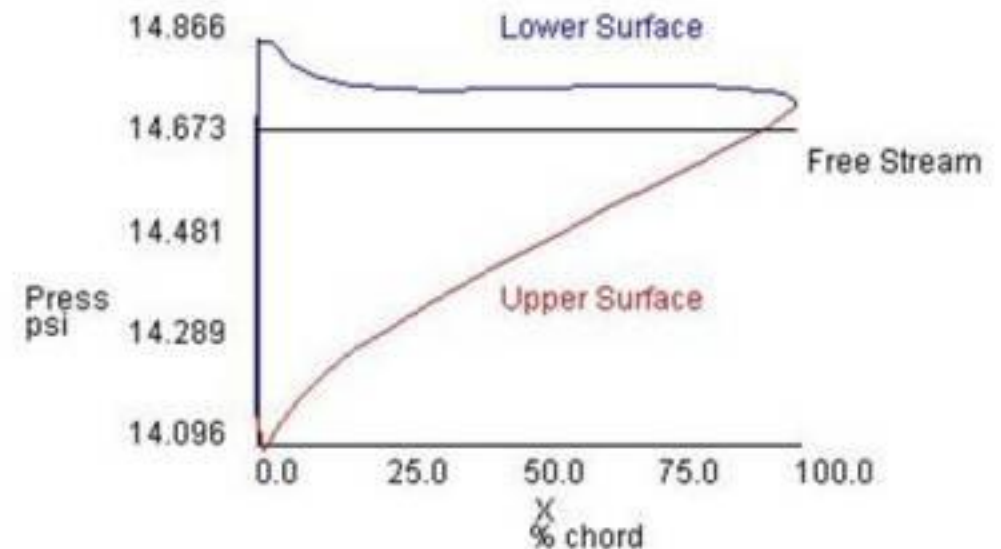


$$\vec{F} = \sum p \vec{n} \Delta A$$

$$\vec{F} = \oint p \vec{n} dA$$

$$\text{Lift} = L = F_{\text{normal}}$$

$$\text{Drag} = D = F_{\text{streamwise}}$$

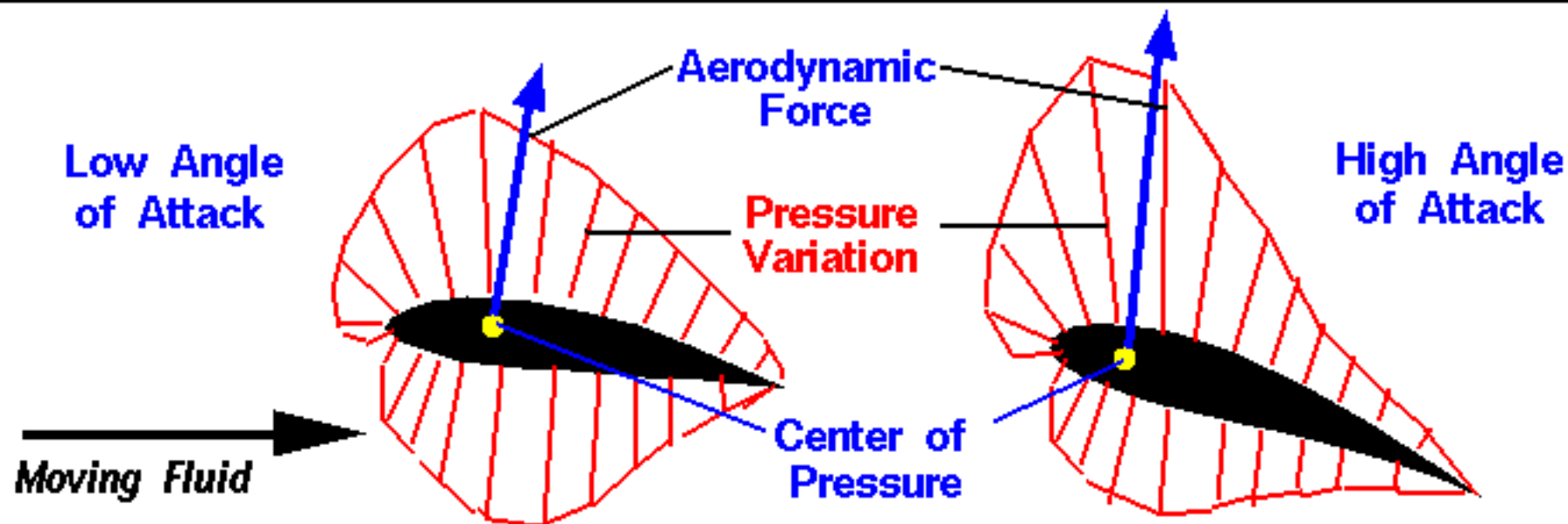




# Center of Pressure – cp

Glenn  
Research  
Center

气动中心



Center of Pressure is the average location of the pressure.

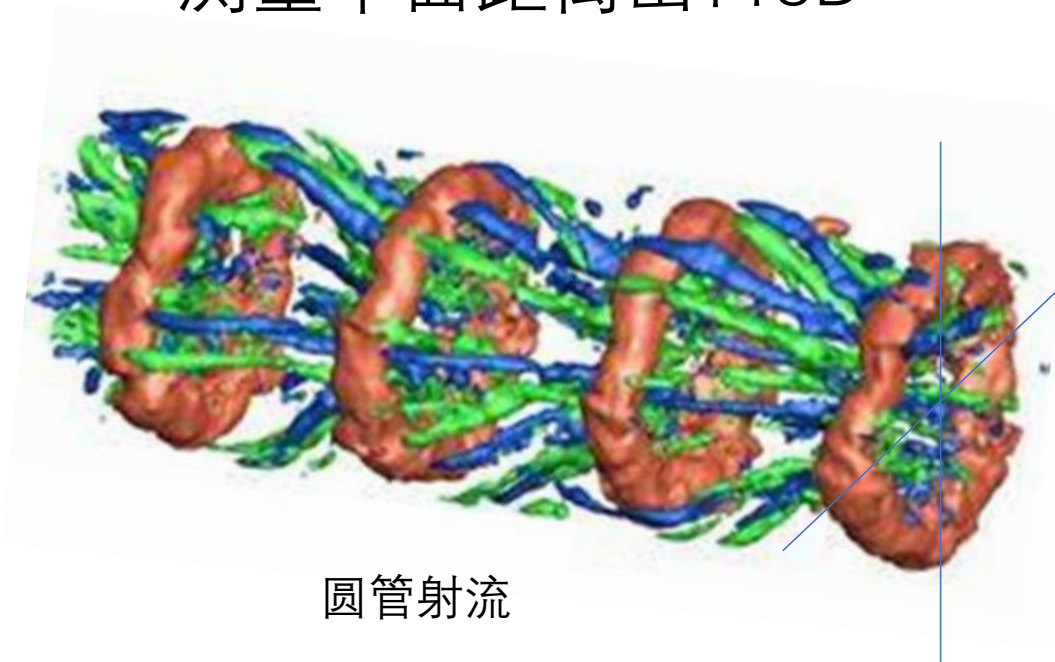
Pressure varies around the surface of an object.  $P = P(x)$

$$cp = \frac{\int x p(x) dx}{\int p(x) dx}$$

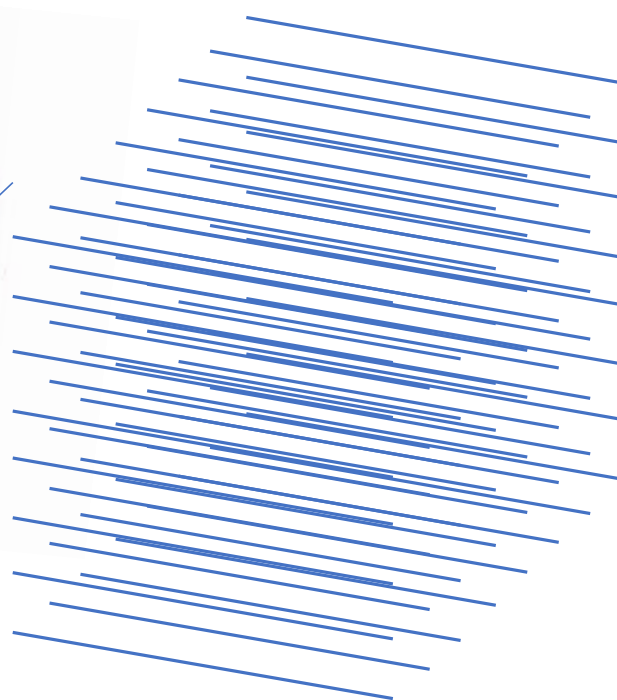
Aerodynamic force acts through the center of pressure.

Center of pressure moves with angle of attack.

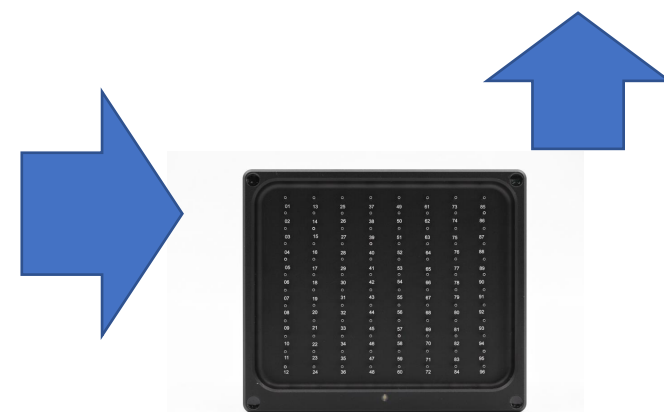
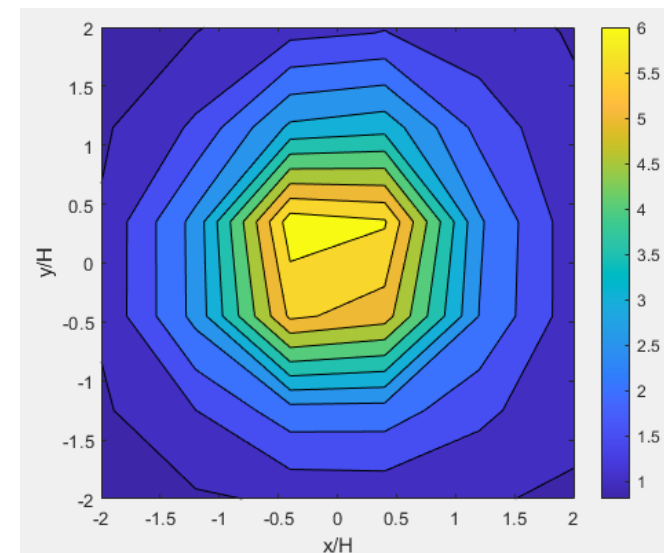
- 圆管射流，直径 $D=5\text{cm}$ ,
- 出口平均速度 $5\text{m/s}$
- 测量平面距离出口 $8D$



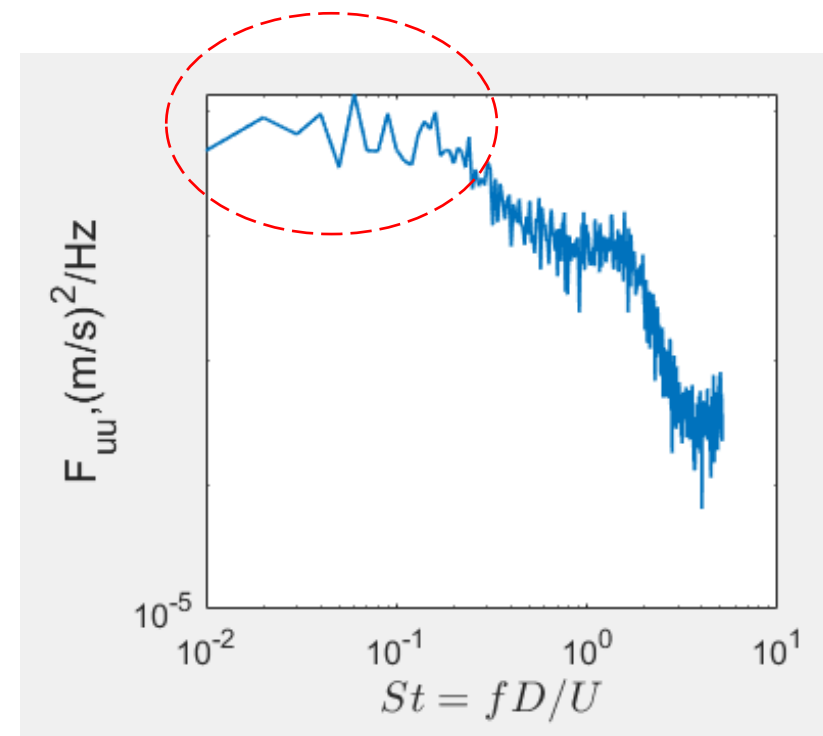
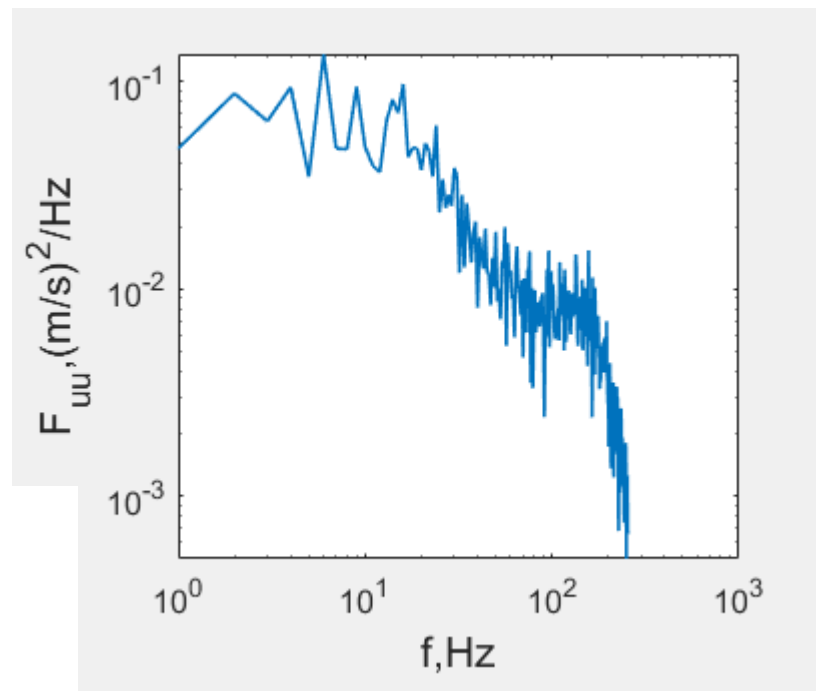
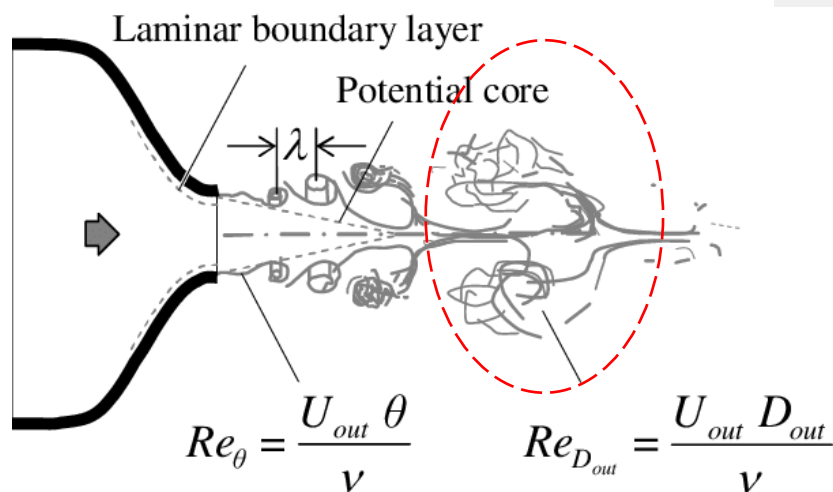
8x8 总压探针阵列



时均速度分布,  $\text{m/s}$



# 速度变化的功率谱 (PSD)

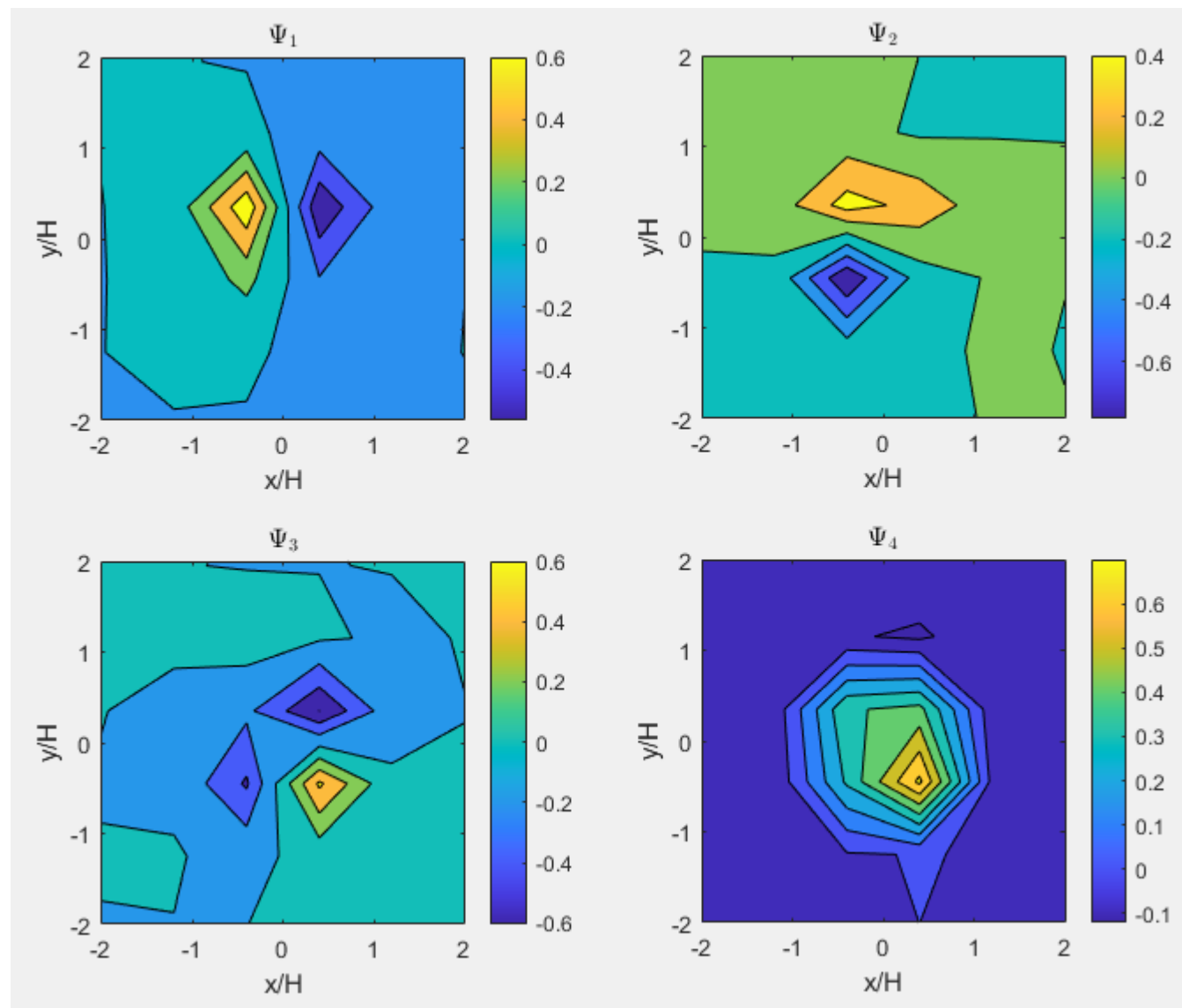


# 正交分解 POD

$$u(y, t) = \sum_{n=1}^N u_n(y, t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \Psi^{(n)}(y),$$

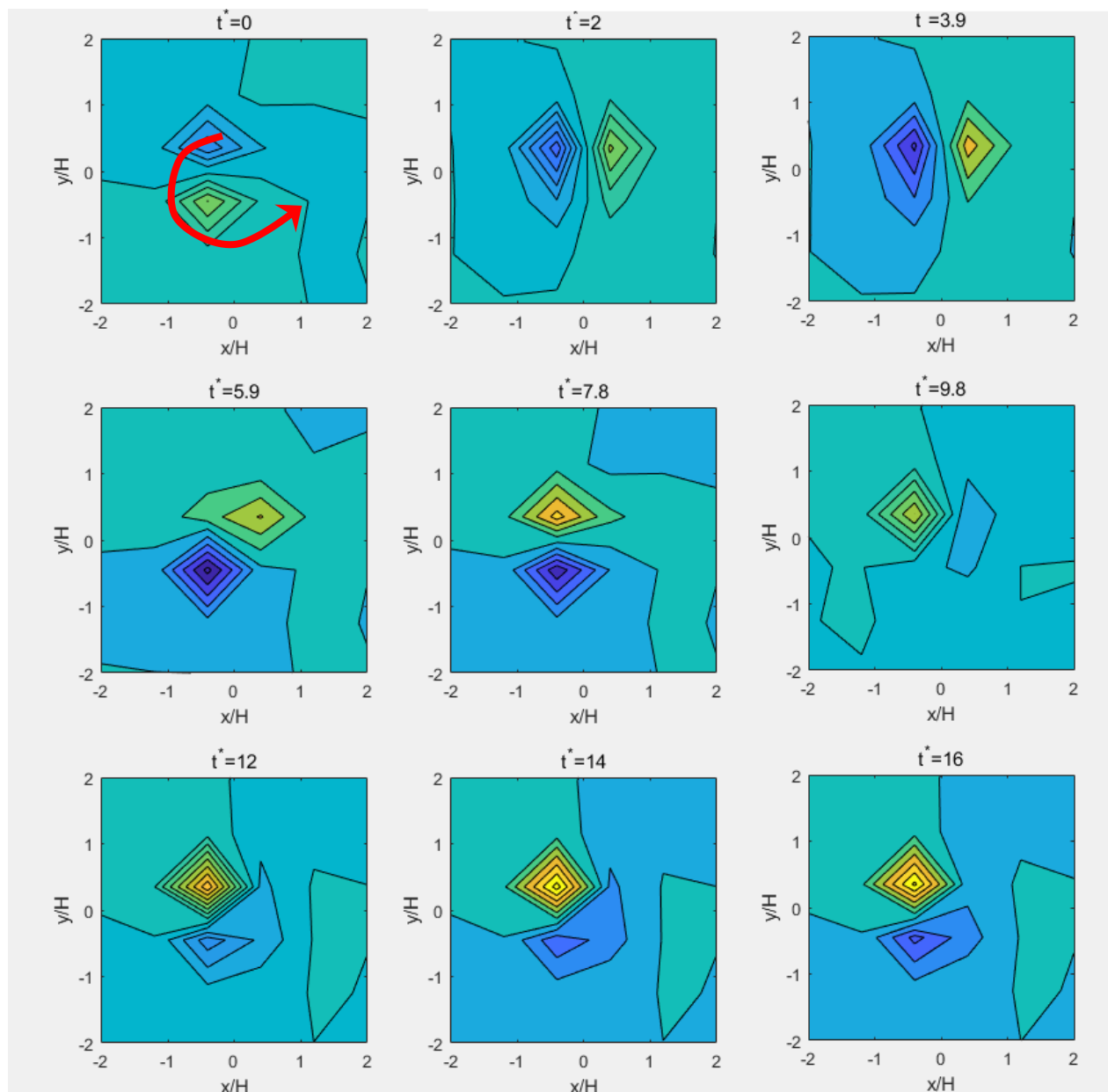
$$\int R(y, y', \tau = 0) \Psi^{(n)}(y') = \lambda_n \Psi^{(n)}(y),$$

$$R(y, y', \tau) = \overline{u(y, t)u(y', t + \tau)},$$



# 低阶模态重构

$$u(y, t) = \sum_{n=1}^N u_n(y, t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \Psi^{(n)}(y),$$



# 总结

- 压强传感器原理
  - 测量误差
  - 动态测量
  - 数据分析
- 多点测量
  - 机械vs电子扫描系统
  - 航华PSU扫描阀



微信公众号



# 职业机会

- 前研科技（天津）有限公司，2016年成立，集风洞和环境试验室设计、咨询、承建、试验设备和软件、试验室运维服务于一体的民营高新技术企业，为国内的航空航天、汽车、轨道交通、高等院校等用户提供专业的、高质量的产品和服务，航华科技的战略合作伙伴。现面向应届本科毕业生招聘1~2位全职销售工程师，主要面向国内用户推广风洞测量设备（包括航华科技的压强扫描阀等），我们为有意向的大四同学提供实习工作机会。办公地址在天津市滨海新区空港经济区，有意向的同学请将个人简历发送至[info@esttechnology.com](mailto:info@esttechnology.com)。

