

# 声强测量

于敏  
HBK技术支持工程师  
2022.8.9



# 于敏

- 2015年硕士毕业于东北大学
- 2019年加入HBK技术支持团队
- 现担任HBK技术支持工程师
  - 在传感器校准、模态测试与分析、声功率测试、声品质测试、基本电声测试、建筑声学等多个应用有较深的了解。
- [min.yu@hbkworl.com](mailto:min.yu@hbkworl.com)



什么是声强?

声强的应用

如何计算声强

声强场指示器

需求设备



# 声学基本参数

## ▲ 声功率, $P$ [Watts]:

- 单位时间内, 声源向外辐射的空气声能量.

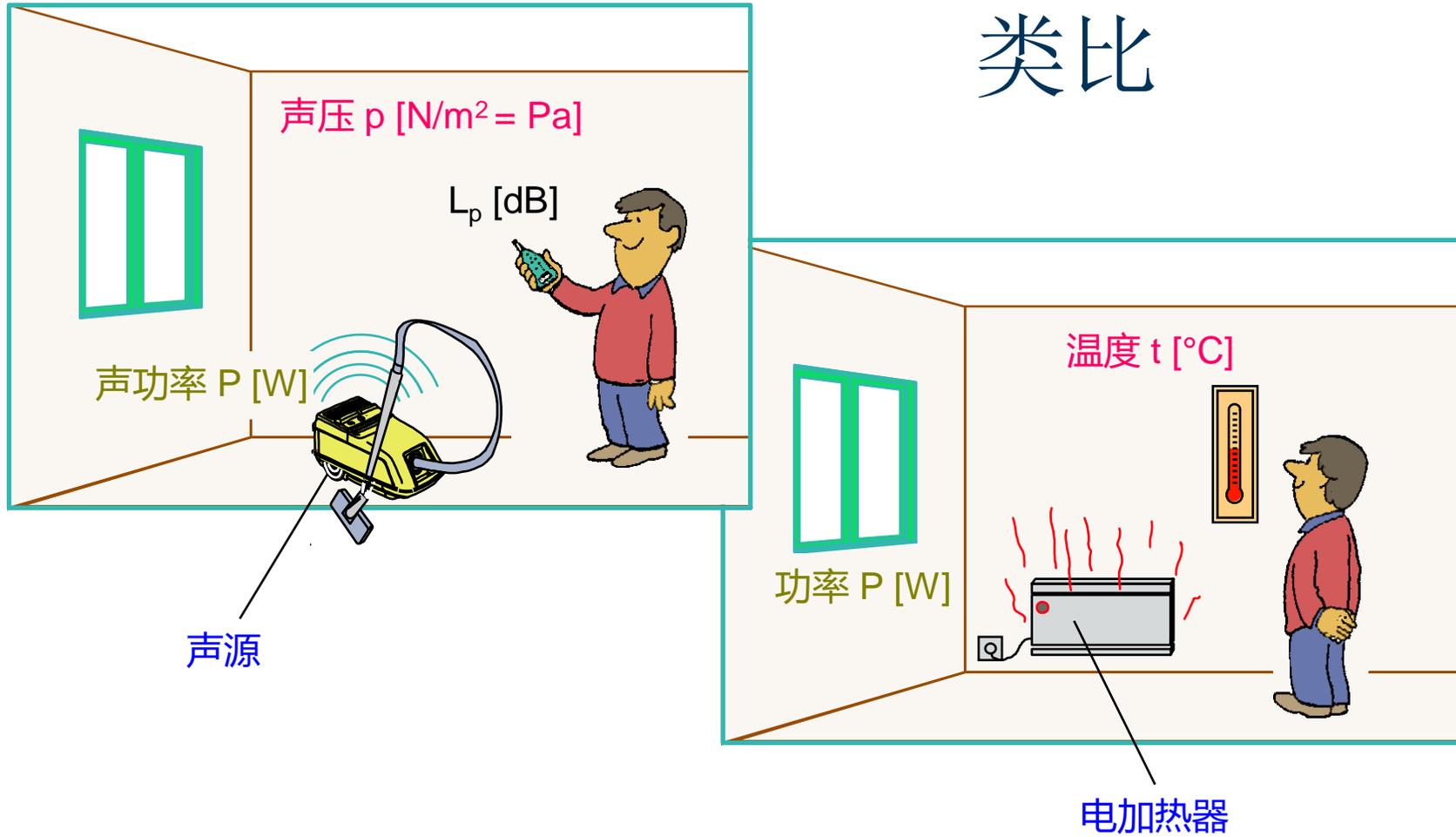
## ▲ 声强, $\vec{I}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]:

- 单位面积上的声能流动速度.

## ▲ 声压, $p$ [Pa]:

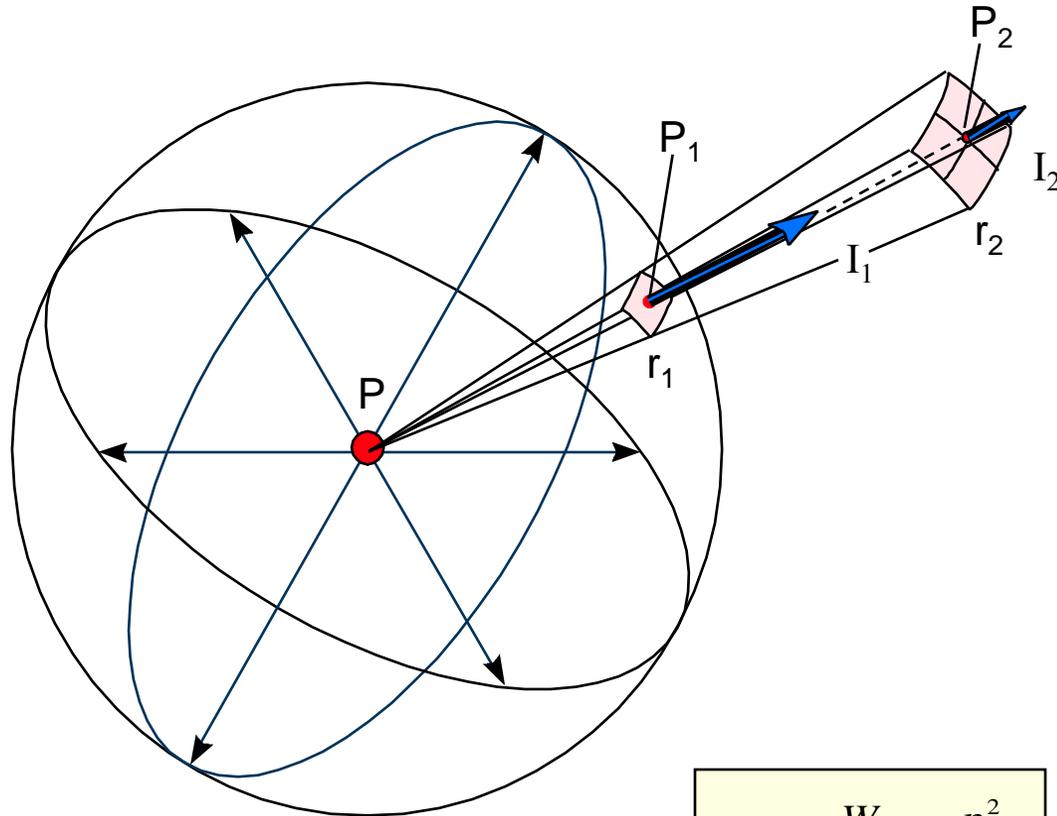
- 由于声音的存在叠加在静态声压上的波动声压

# 声压及声功率



# 声场基本参数

自由场条件:



$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c}$$

声压级

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_o^2}$$

$$p_o = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

$$= 20 \mu\text{Pa}$$

声强级

$$L_i = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

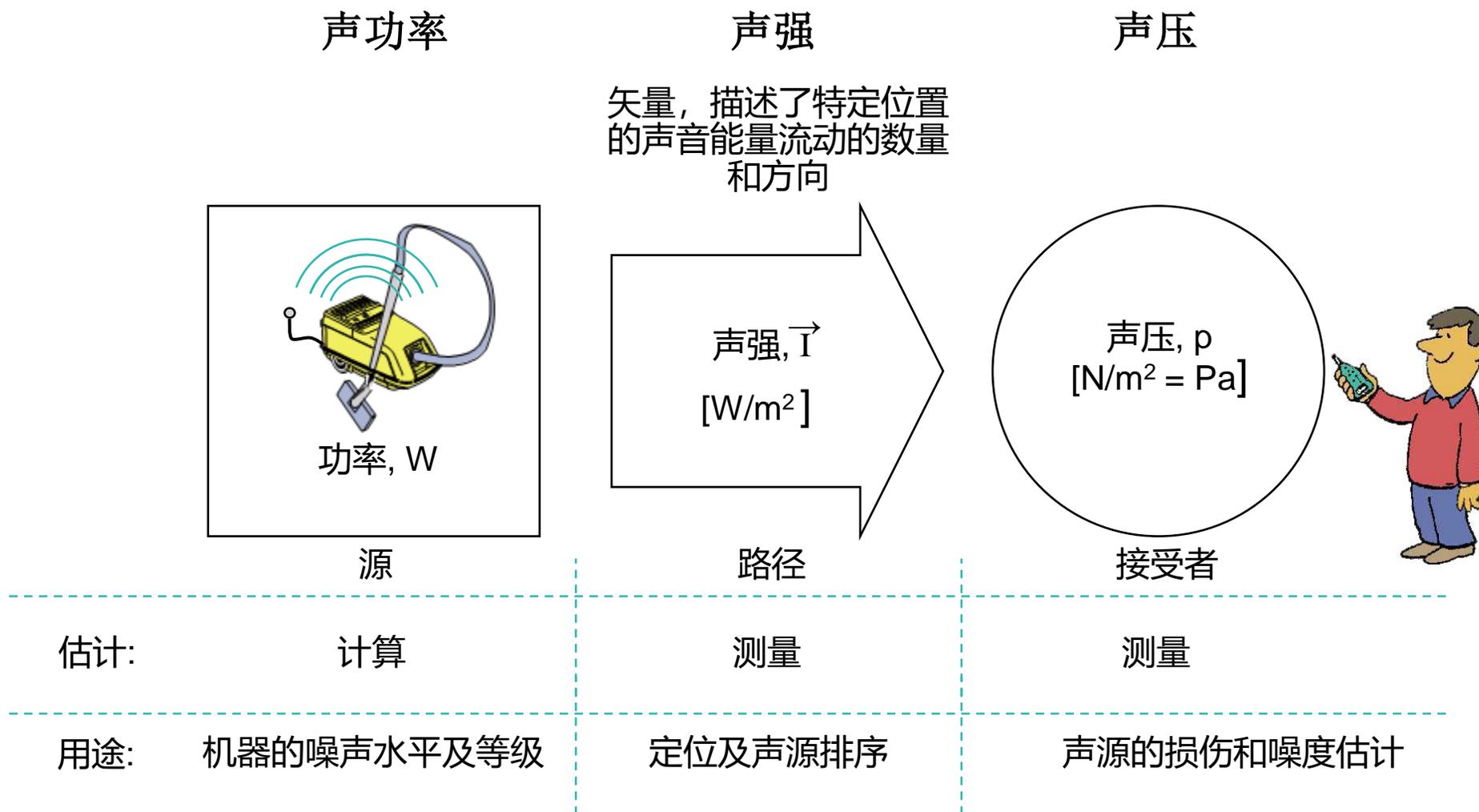
$$I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$$

声功率级

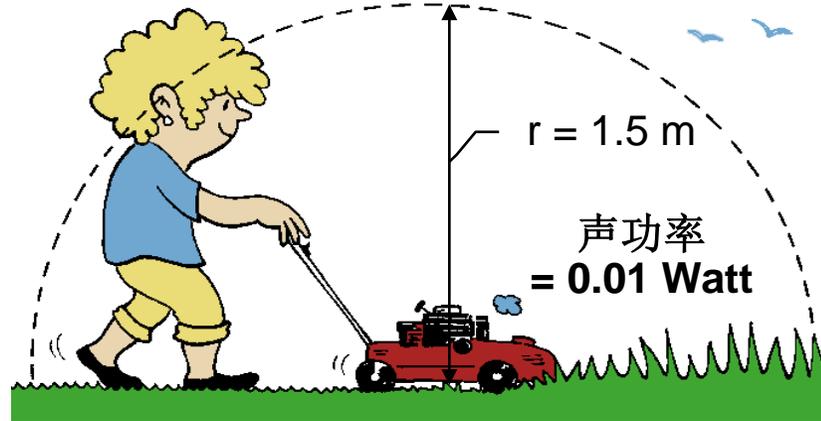
$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_o}$$

$$W_o = 1 \text{ pW}$$

# 声场的三个基本参数



# 自由场条件下的声级



$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c}$$

声功率

$$W = 0.01 \text{ Watt}$$

声强

$$I = \frac{W}{2\pi r^2} = \frac{0.01}{2\pi \cdot 1.5^2}$$

$$= 0.000707 \text{ W/m}^2$$

声压

$$p = \sqrt{I \cdot \rho c} = \sqrt{0.000707 \cdot 400}$$

$$= 0.532 \text{ Pascal}$$

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \text{ dB}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{0.01}{10^{-12}} \text{ dB}$$

$$L_W = 100 \text{ dB}$$

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{7.07 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}} \text{ dB}$$

$$L_I = 88.5 \text{ dB}$$

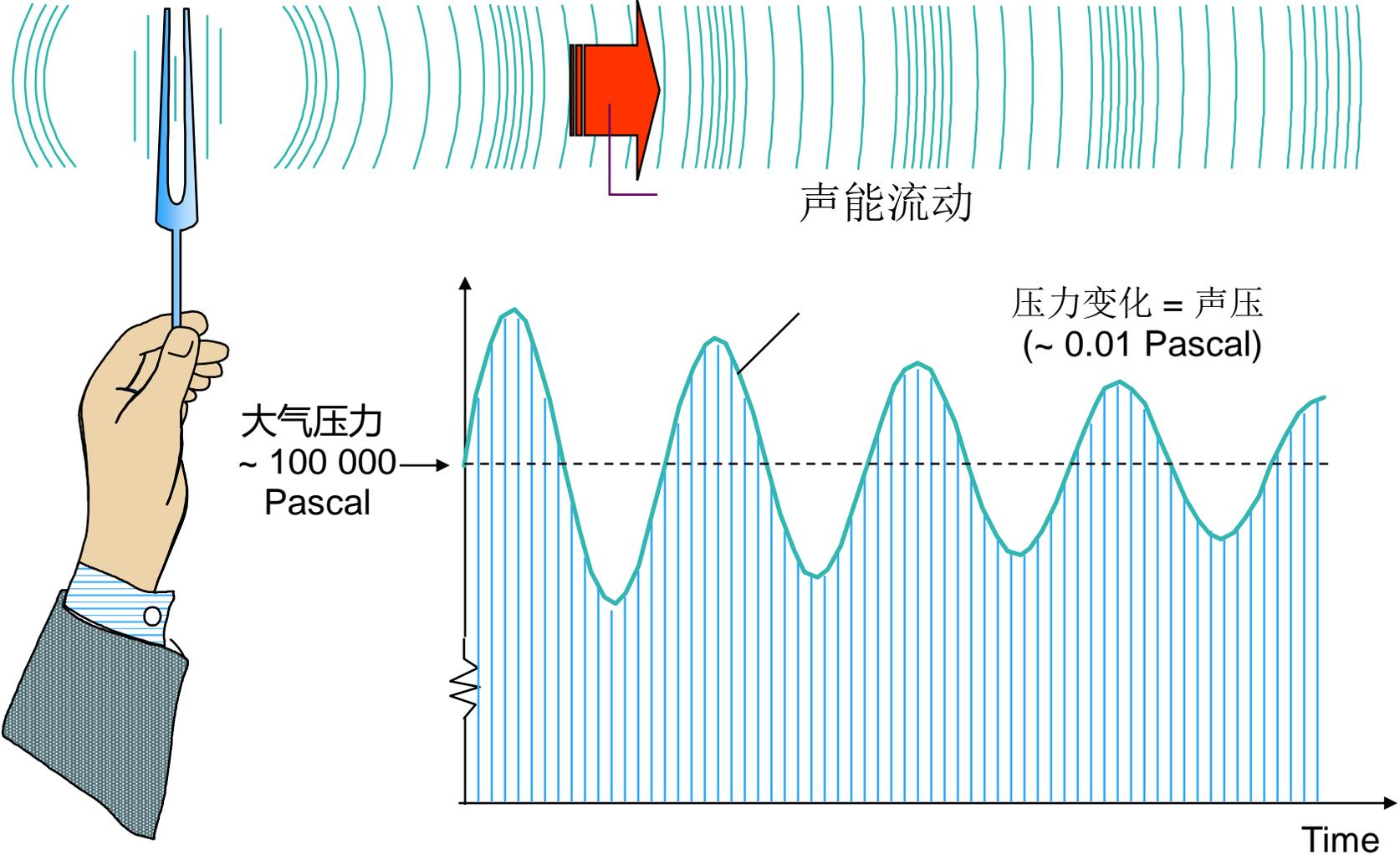
$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{0.532^2}{(20 \cdot 10^{-6})^2} \text{ dB}$$

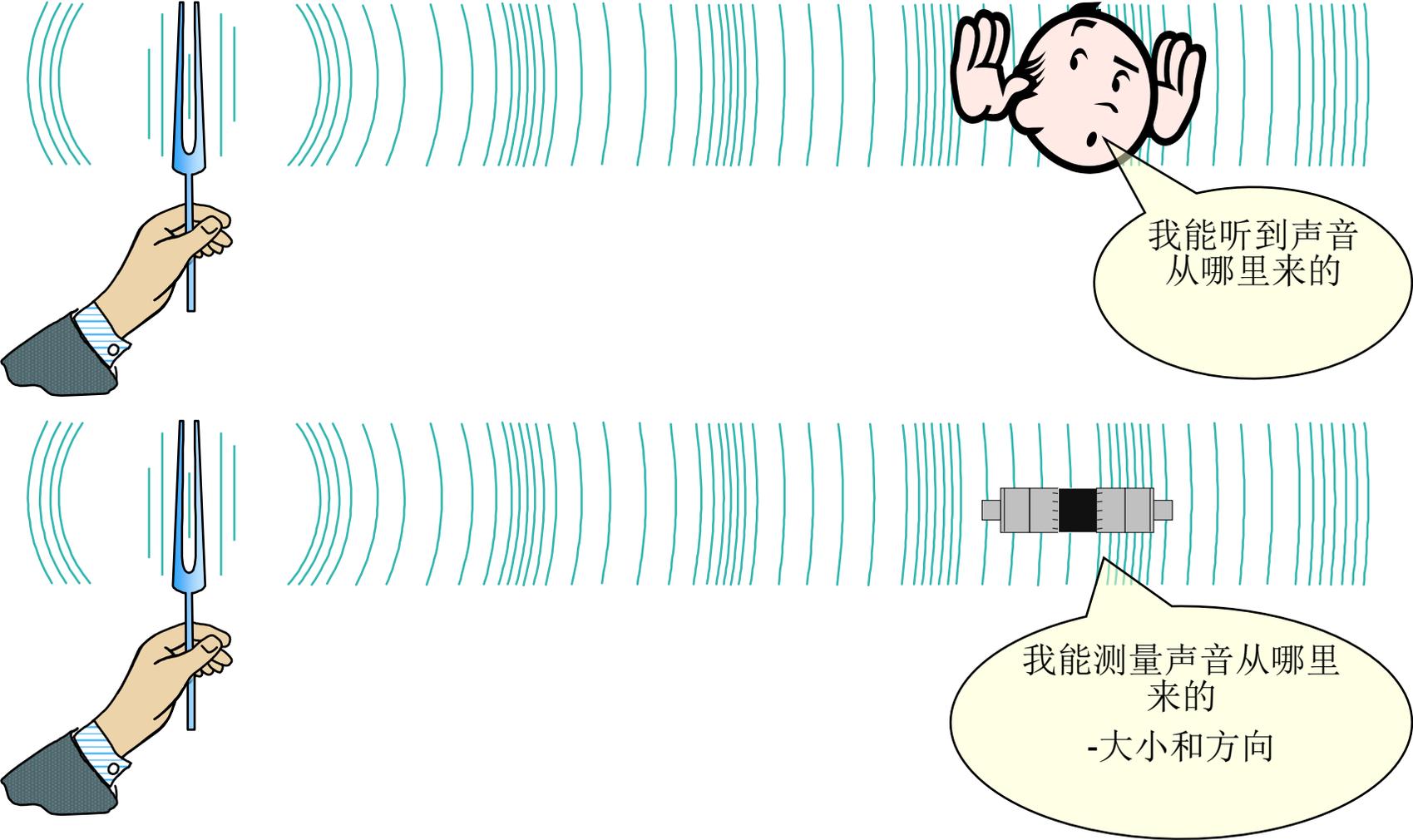
$$L_p = 88.5 \text{ dB}$$

自由场条件:  $L_I = L_p$

# 声能流动

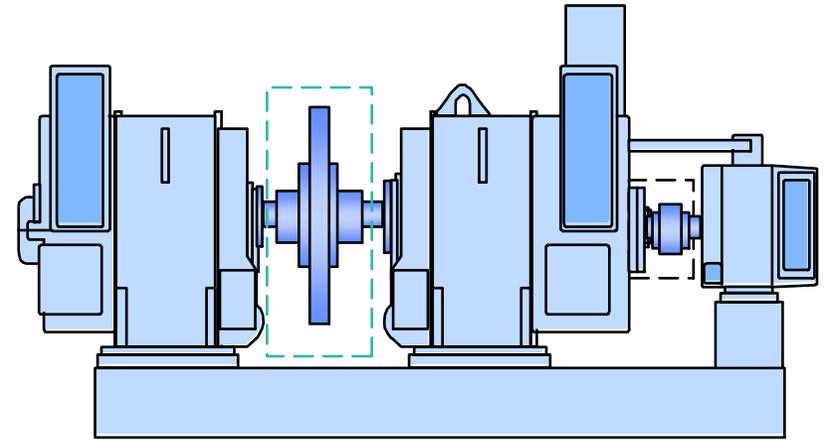


# 听声强和测量声强



# 为什么使用声强？

- ▲ 对背景噪声不敏感
  - 高稳定背景噪声能够被接受
- ▲ 给出了方向信息
  - 特别适合于定位声源
- ▲ 能够分割声源
  - 从而能够绘制表面声源云图或等值线图进行声源定位
- ▲ 能够隔离被研究对象
  - 使其他声源能够继续保持工作
- ▲ 给出测量的质量指示
  - 用于改进测量



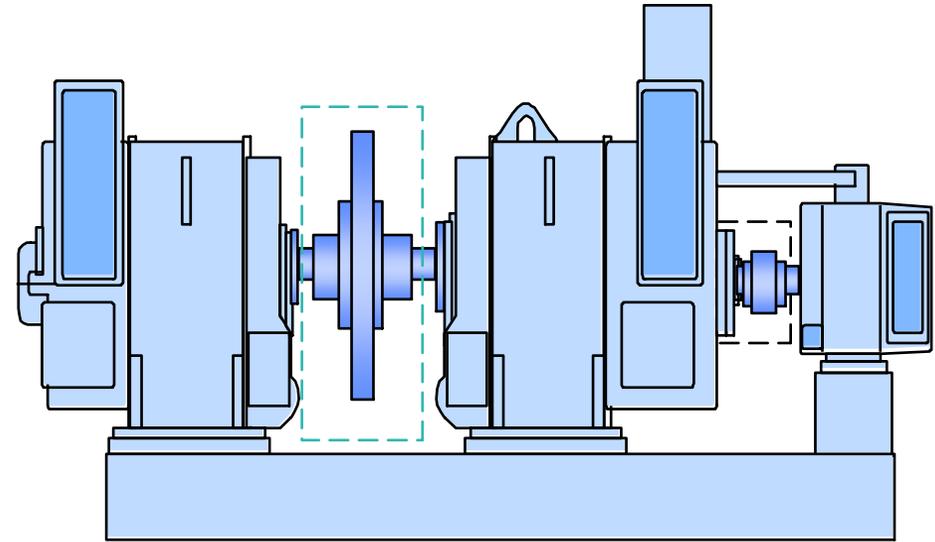
# 声强的优缺点

## 优点:

- ▲ 测量场所的低需求
  - 不需要消声室、混响室等声学专业实验室
  - 降低了测量场所的成本
- ▲ 识别问题的根源
  - 节约解决问题的时间

## 缺点:

- ▲ 更复杂的仪器设备
  - 需要更有经验和专业知识的工程技术人员
- ▲ 更多的测量
  - 可能增加了测量时间



什么是声强?

声强的应用

如何计算声强

声强场指示器

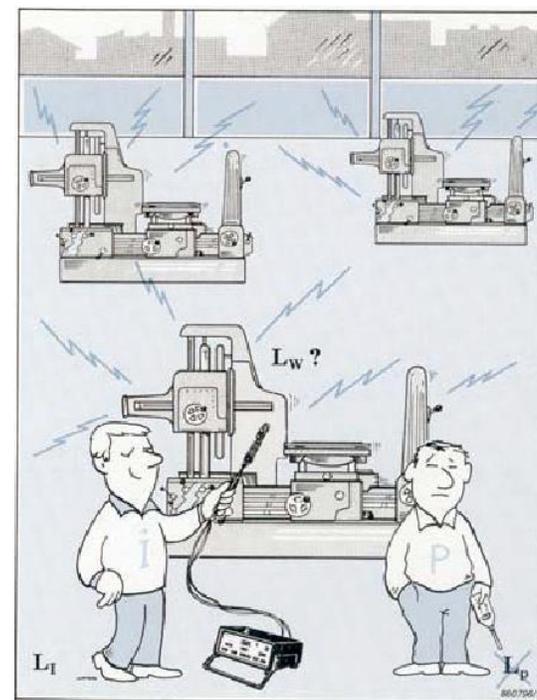
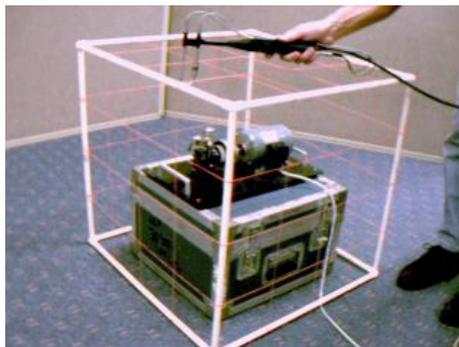
需求设备



# 声强有何用途呢？

## ▲ 确定声功率

- 非标准化的调研
- 根据标准进行测量

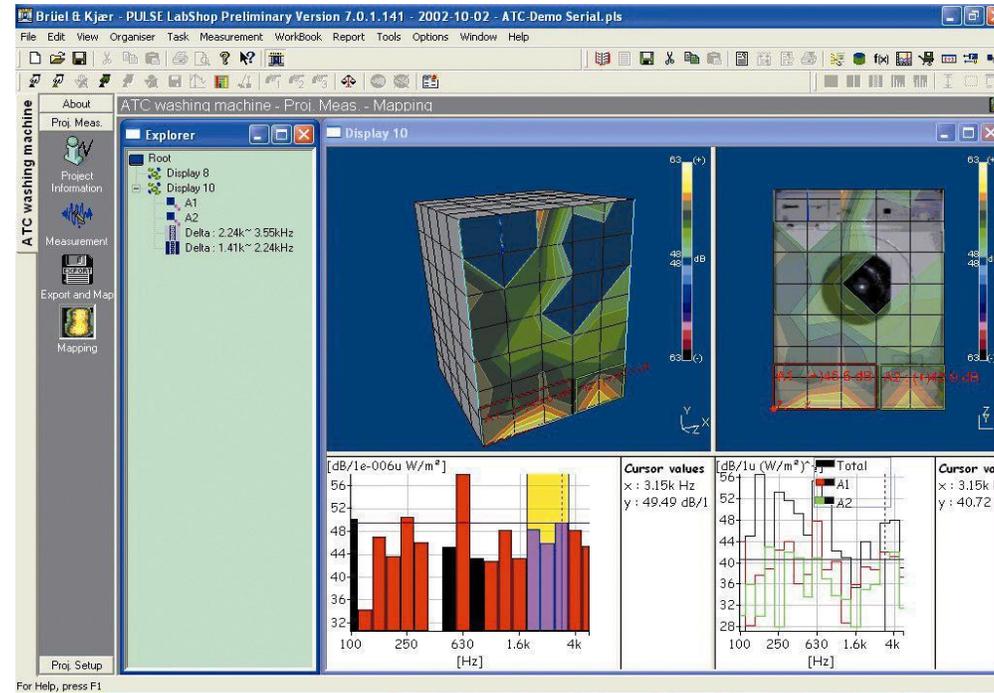
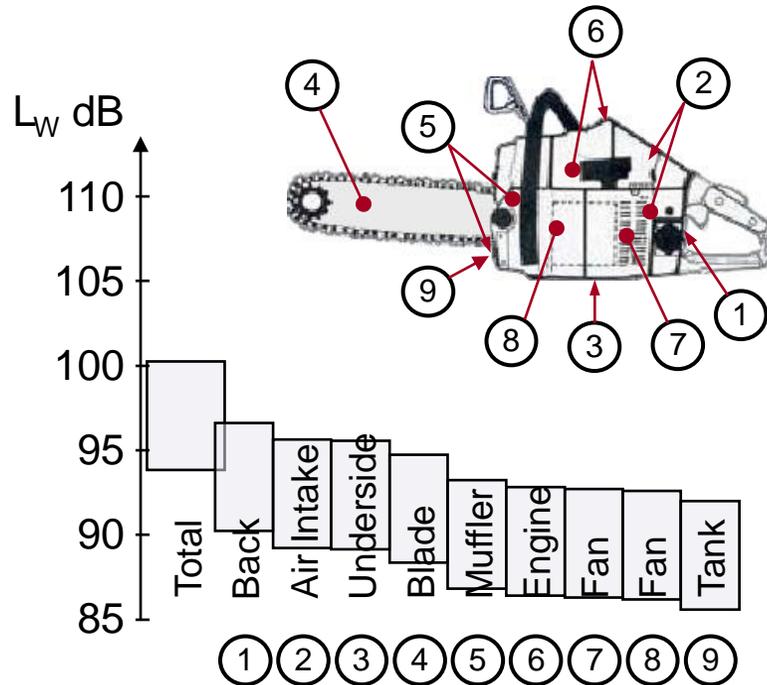


# 声强有何用途呢？



## 噪声源识别

- 声源定位
- 噪声成像
- 声源排序



# 声强有何用途呢？

## ▲ 建筑声学

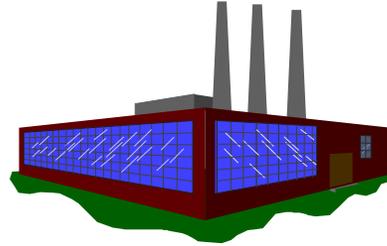
- 声衰减指数、隔声指数
- 泄露探测
- 声吸收



# 声强有何用途呢？

## 工业

- 研究和开发
- 产品噪声标示



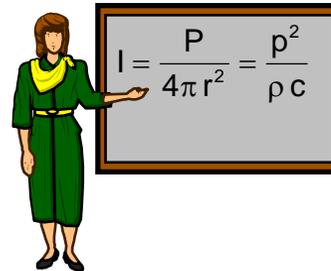
## 环境

- 噪声建模
- 建筑的噪声衰减
- 工厂噪声预测



## 大学

- 教学
- 研究



什么是声强?

声强的应用

[如何计算声强](#)

声强场指示器

需求设备



# 声强定义

## ▲ 声强的定义:

- 单位面积的声能量流动的平均速度
- 因为具有速度属性，因此声强是矢量
- 声强矢量等于某点的瞬时声压和相应的瞬时质点速度的乘积的时间平均:

$$\vec{I} = \overline{p(t) \cdot \vec{v}(t)} \quad [W / m^2]$$

换个角度...

$$\vec{I} = \overline{p(t) \cdot \vec{v}(t)} \quad [W / m^2]$$

$$\vec{I} = \text{声压} \times \text{速度} = \frac{\text{力}}{\text{面积}} \times \frac{\text{位移}}{\text{时间}}$$

$$= \frac{\text{能量}}{\text{时间} \times \text{面积}}$$

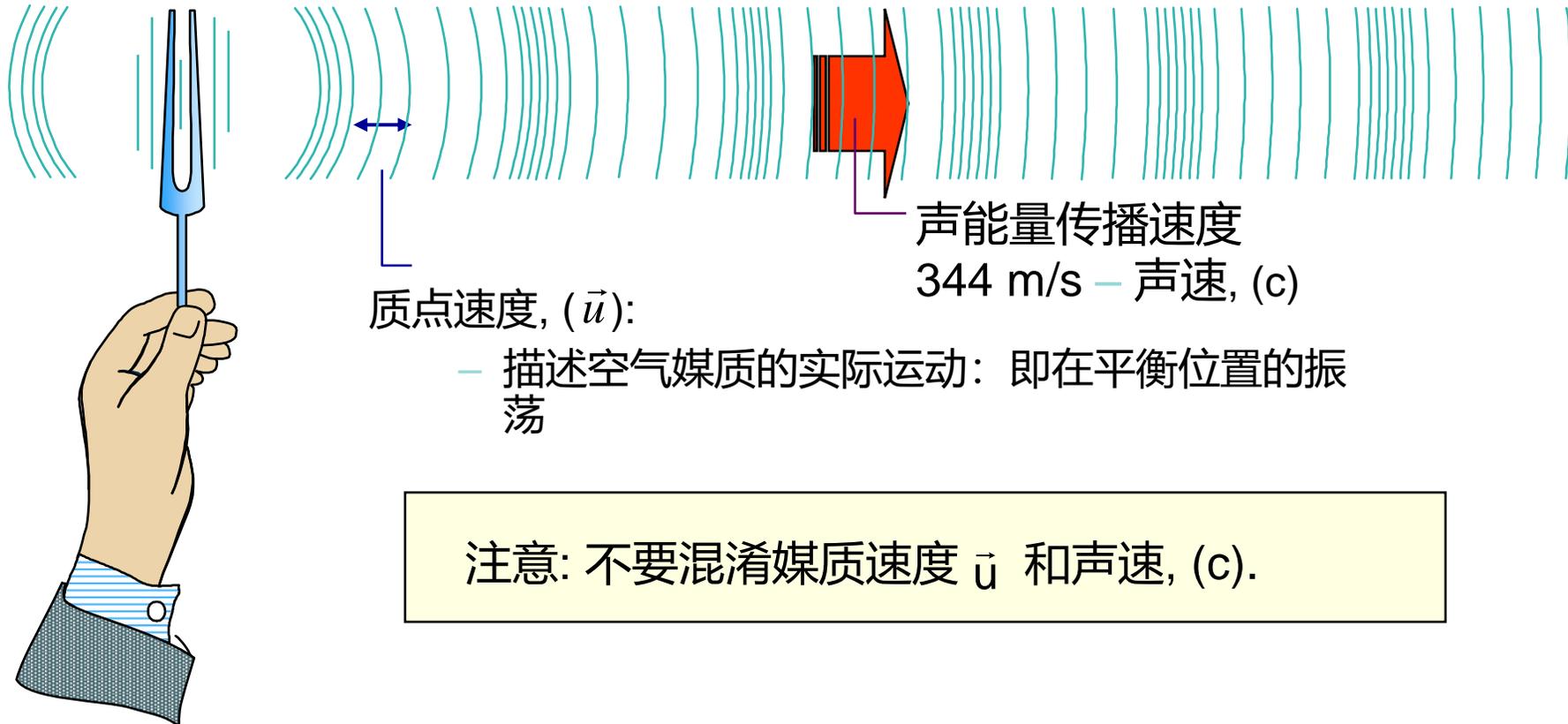
$$= \frac{\text{功率}}{\text{面积}}$$

面积作为分母,  
因此声强是单  
位面积上的...

# 声压和质点速度

声压, ( $p$ ):

- 人耳（或者测量用传声器）拾取到的微小的大气声压波动



质点速度, ( $\vec{u}$ ):

- 描述空气媒质的实际运动: 即在平衡位置的振荡

声能量传播速度  
344 m/s - 声速, ( $c$ )

注意: 不要混淆媒质速度  $\vec{u}$  和声速, ( $c$ ).

# 怎么计算声强呢？

▲ 回忆一下公式...

$$\vec{I} = \overline{p(t) \cdot \vec{v}(t)} \quad [W / m^2]$$

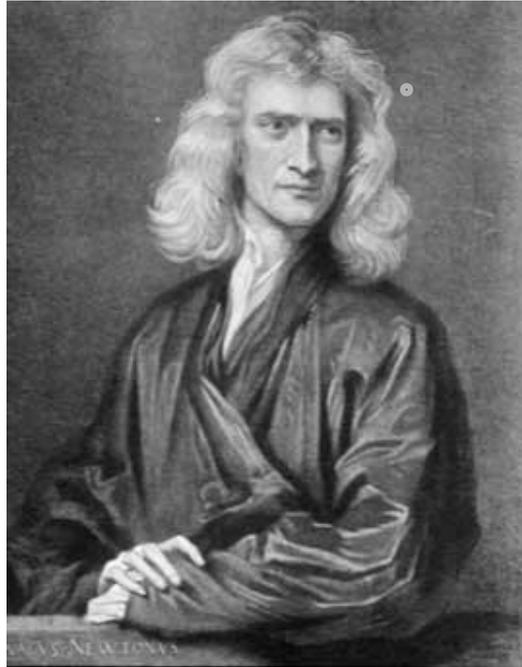
▲ 使用现代声学设备声压能够很容易测量计算得到

▲ 但我们如何得到媒质速度呢？??

# 利用牛顿定律估计媒质速度

$$\vec{I} = \overline{p(t)} \cdot \overline{\vec{u}(t)} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

我们可以使用**牛顿第二定律**来确定媒质速度：



$$F = m \cdot a$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$u = \int \frac{F}{m} dt$$

后面提到了**欧拉梯度法**计算声速度，  
这里提**牛顿第二定律**表示加速度积分可以得到速度

# 利用欧拉公式估计媒质速度

$$\vec{I} = \overline{p(t) \cdot \vec{u}(t)} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

欧拉公式允许我们通过测量声压梯度估计媒质速度

$$a = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

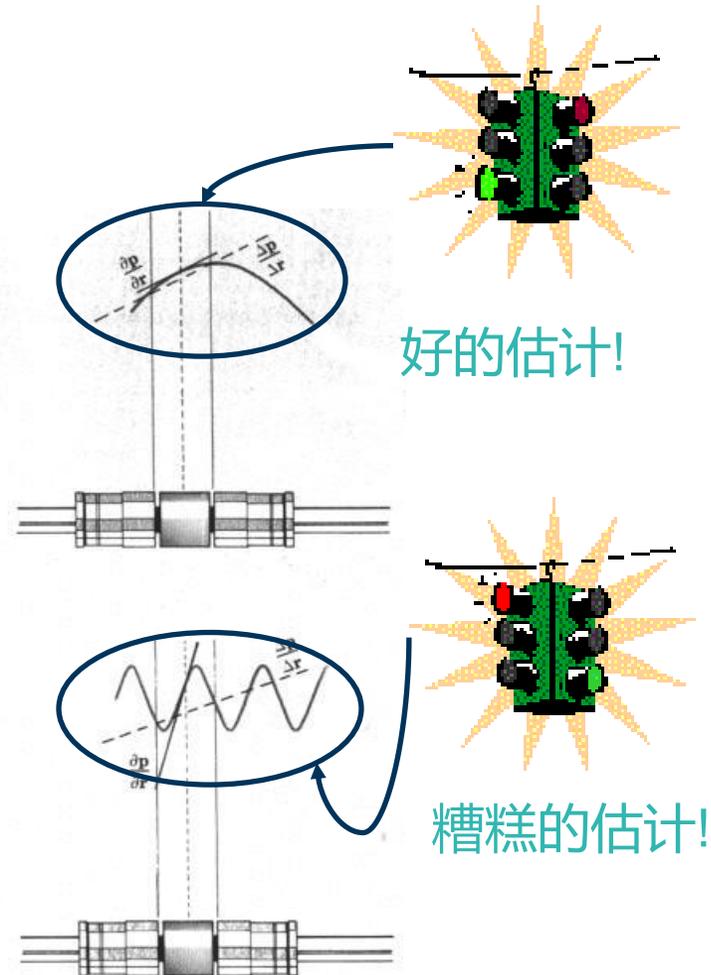


# 声压梯度?

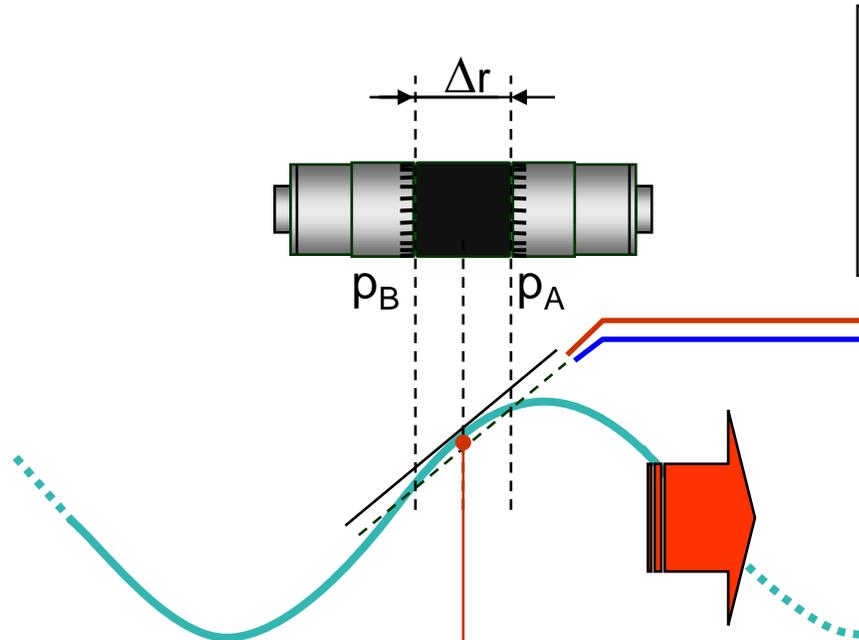
$$\vec{I} = \overline{p(t) \cdot \vec{v}(t)} \quad [W / m^2]$$

- 简单的说, 声压梯度 是基于声压 ( $p$ ) 和距离 ( $r$ ) 的一个 斜率估计 - 不是实际的曲线拟合.
- 意味着是误差估计, 即存在估计误差. 特别是波长很短时即高频!

$$u = -\int \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} dt$$



# 声强估计



瞬时声压的平均

$$\hat{p} = \frac{p_A + p_B}{2}$$

理论上:

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

有限差分估计:

$$\hat{u} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt$$

$$I = \overline{p \cdot u}$$

$$\hat{I} = \left( \frac{p_A + p_B}{2} \right) \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt \right)$$

$$\hat{I} = -\frac{p_A + p_B}{2\rho\Delta r} \int p_B - p_A dt$$

# P-P声强探头设计的优缺点

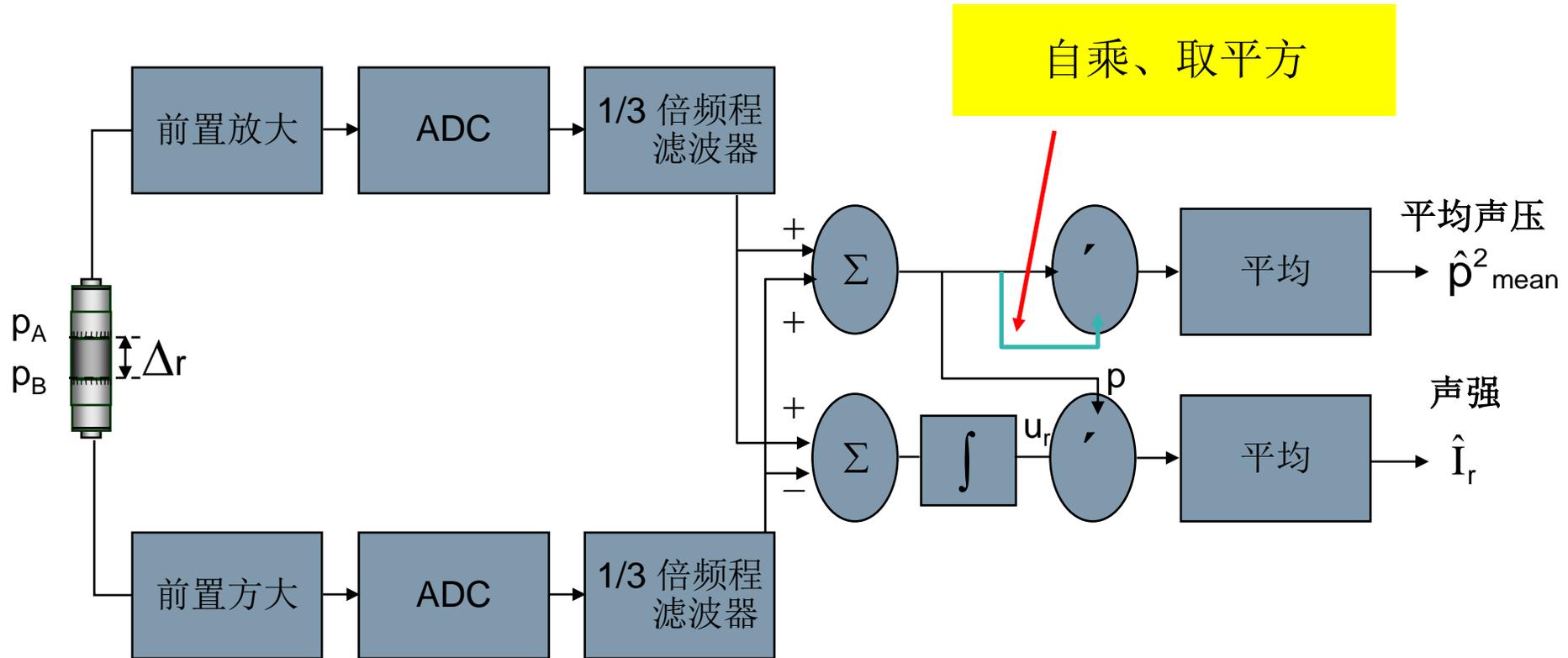
## ▲ P-P声强探头设计的优点:

- 传声器是通用的传感器
- 传声器能够被用于广泛的环境和状况
- 传声器能够很容易被标定
- 能够计算同一位置的声压和媒质速度

## ▲ P-P声强探头设计的缺点:

- 为了能够精确的计算低频，两传声器相位匹配必须足够好
- 假如传声器距离较远，则降低了高频分辨率
- 假如传声器很近则很容易干扰实际信号

# 声强估计 (CPB)

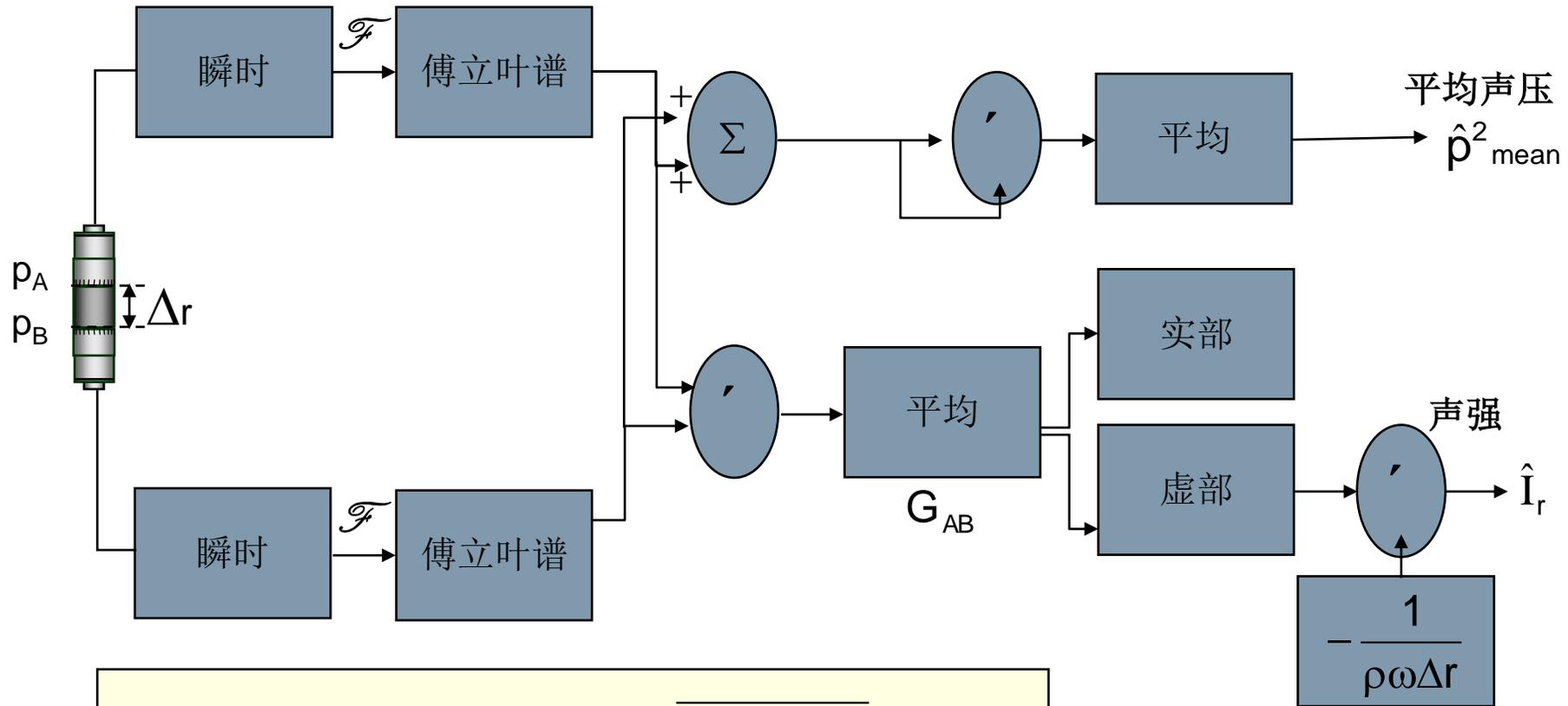


平均声压:  $\hat{p}_{\text{mean}} = \frac{1}{2} (p_A + p_B)$

声 强:  $\hat{I} = \frac{1}{2\rho\Delta r} (p_A + p_B) \int (p_A - p_B) dt$

通常被称为  
‘直接’方法

# 声强估计 (FFT)



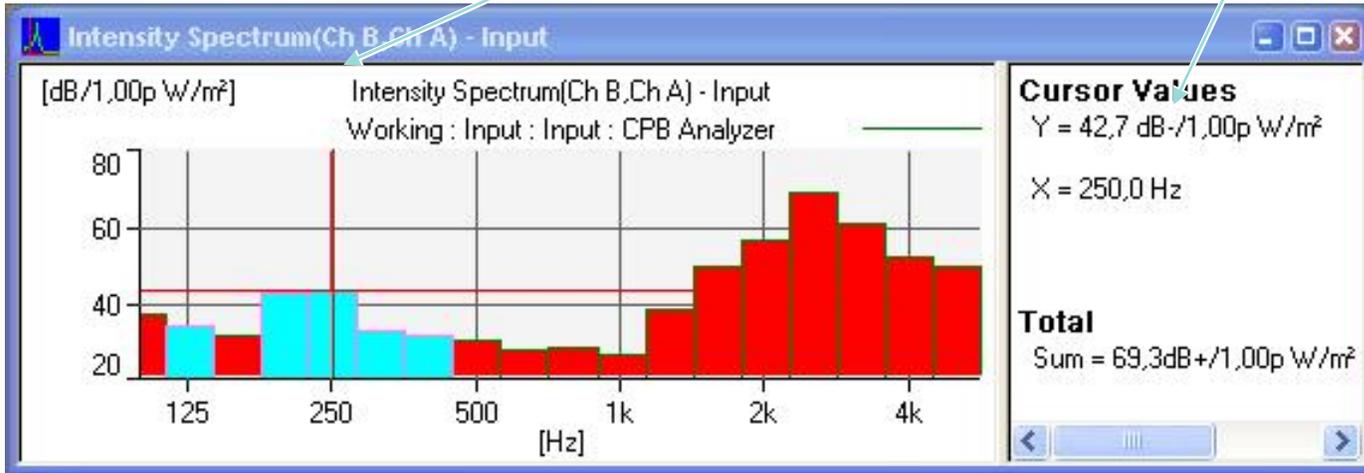
平均声压:  $\hat{p}_{\text{mean}} = \frac{1}{2}(p_A + p_B)$

声 强:  $\hat{I}_r = -\frac{1}{\rho\omega\Delta r} \text{Im}G_{AB}$

通常称为  
“互谱”法

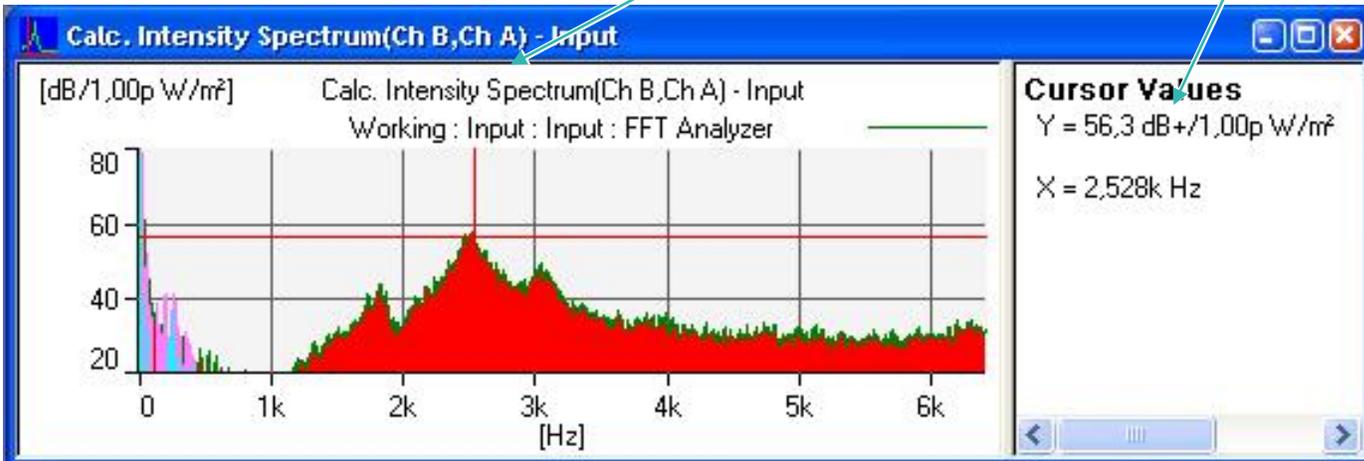
# 典型的声强显示

## CPB 显示



蓝线对应的和”-“符号表示的是负方向的声强

## FFT 显示



红线对应的和”+“符号表示的是正方向的声强

# 上限频率限制

## 有限差分误差

1dB精度:

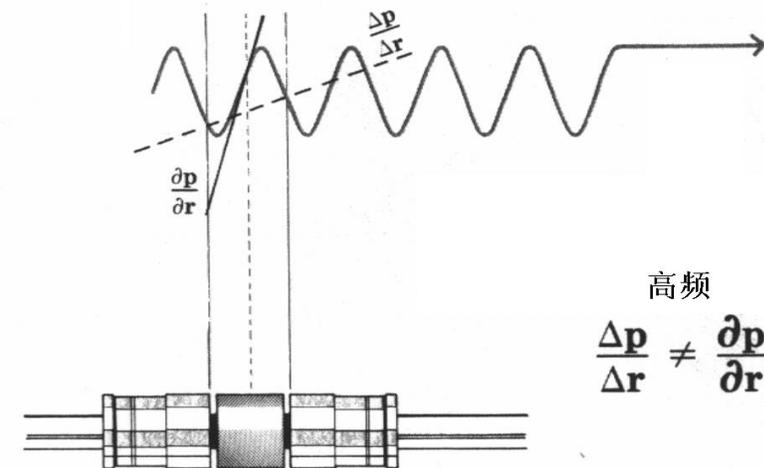
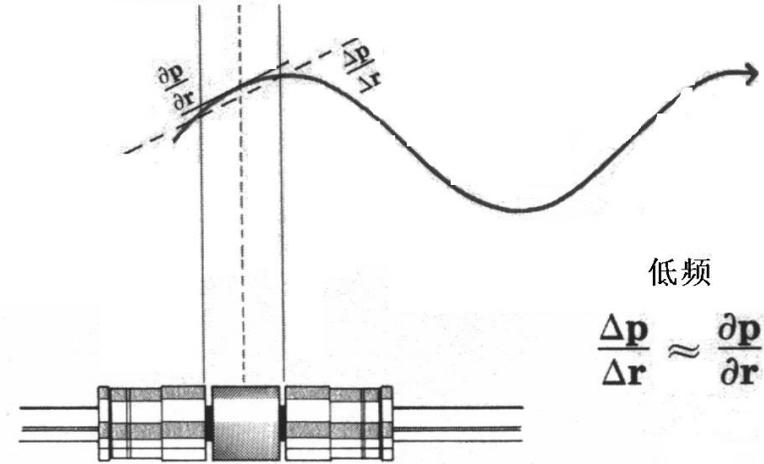
间隔            上限频率限制

50 mm:        1.25 kHz

12 mm:        5 kHz

8.5 mm:      6.3 kHz

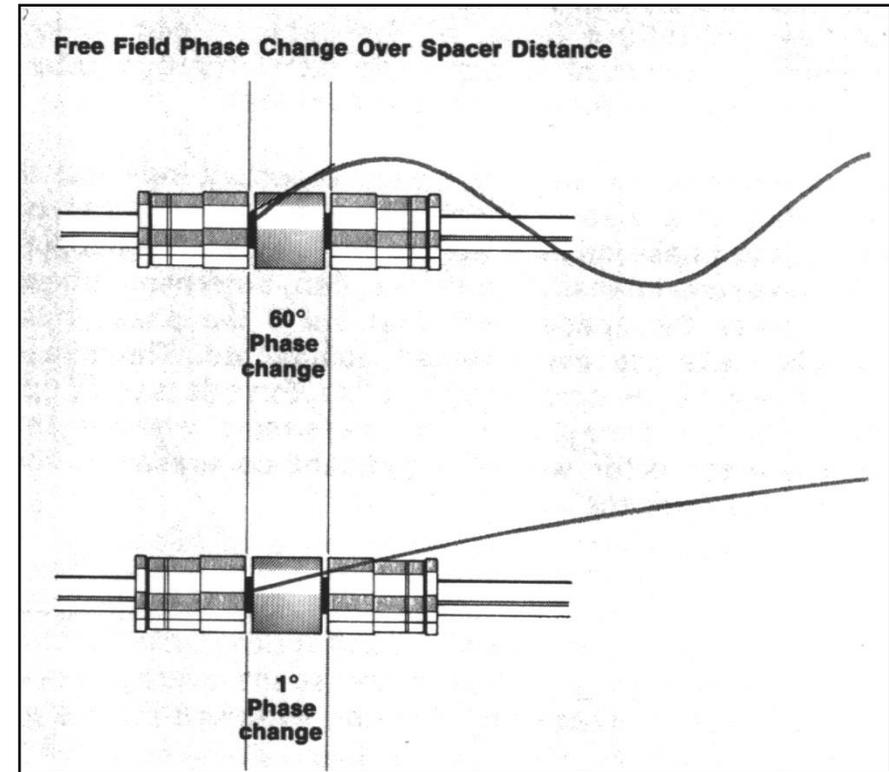
6 mm:         10 kHz



# 下限频率限制

- ▲ 声强正比于由于间隔器引起的相位变化
- ▲ 整个测量链的相位不匹配将引入计算声强误差

在低频，相位失配是最严重的误差来源！

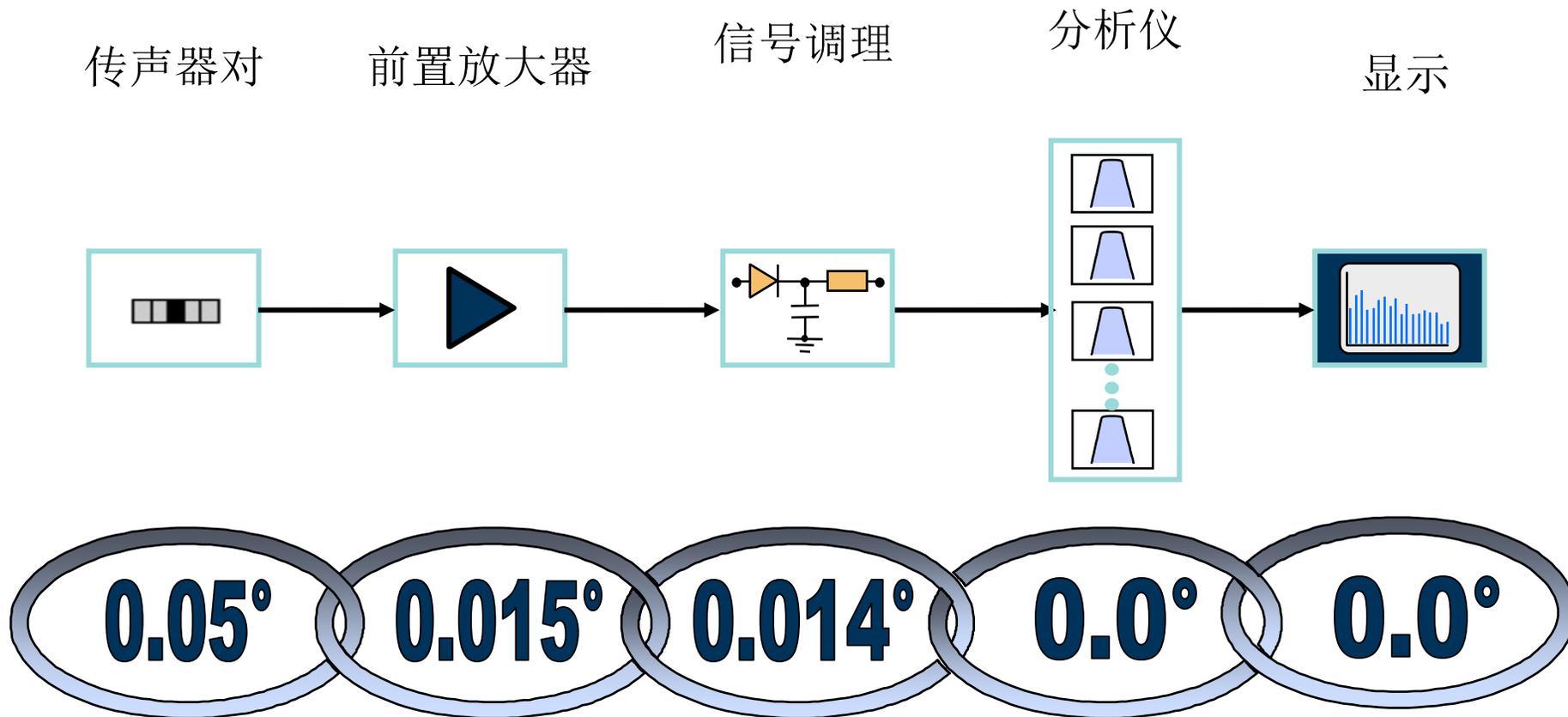


# 实际的相位误差有多重要呢？

* 使用12 mm间隔器	要测量的相位差*	能保证 1 dB精度的最大容许相位失配	Brüel & Kjær 4197传声器
10 Hz	0.13 °	0.03 °	< 0.05 °
20 Hz	0.25 °	0.05 °	< 0.05 °
50 Hz	0.63 °	0.13 °	< 0.05 °
100 Hz	1.26 °	0.25 °	< 0.05 °
200 Hz	2.51 °	0.50 °	< 0.05 °
500 Hz	6.28 °	1.26 °	< 0.1 °
1 kHz	12.56 °	2.51 °	< 0.2 °
2 kHz	25.12 °	5.02 °	< 0.4 °
5 kHz	62.79 °	12.56 °	< 1 °

相位失配误差在低频最严重!

# 测量系统的相位失配分析



最大相位失配来源!

\*该案例是以3599声强探头 + 3560C PULSE多分析仪系统  
(构成符合IEC 1043 1级系统)

# 提高低频限制

## ▲ 低频限制依赖于:

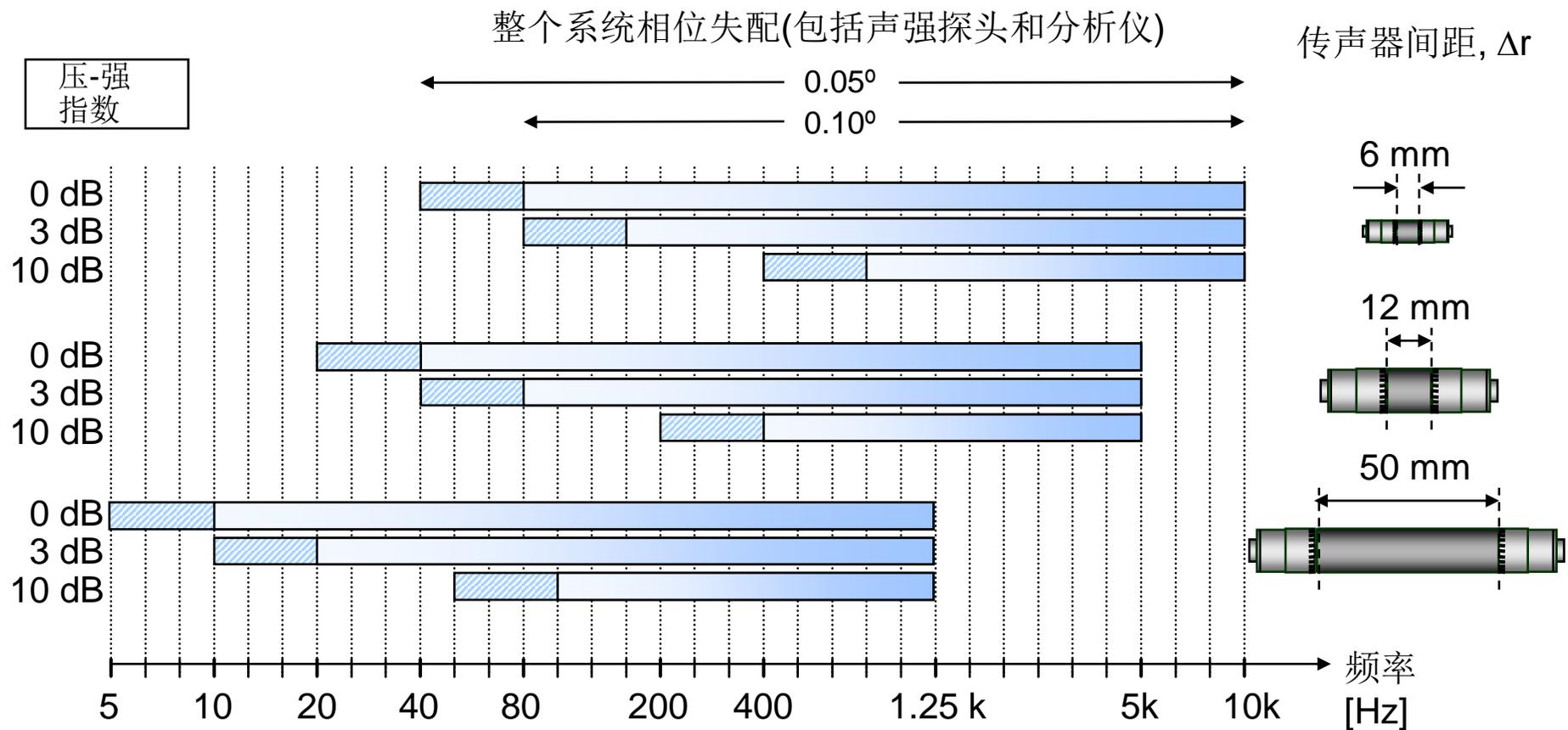
- 动力学性能 (相位匹配和间隔器)
- 测量的压-强指数

## ▲ 降低低频下限，可以通过:

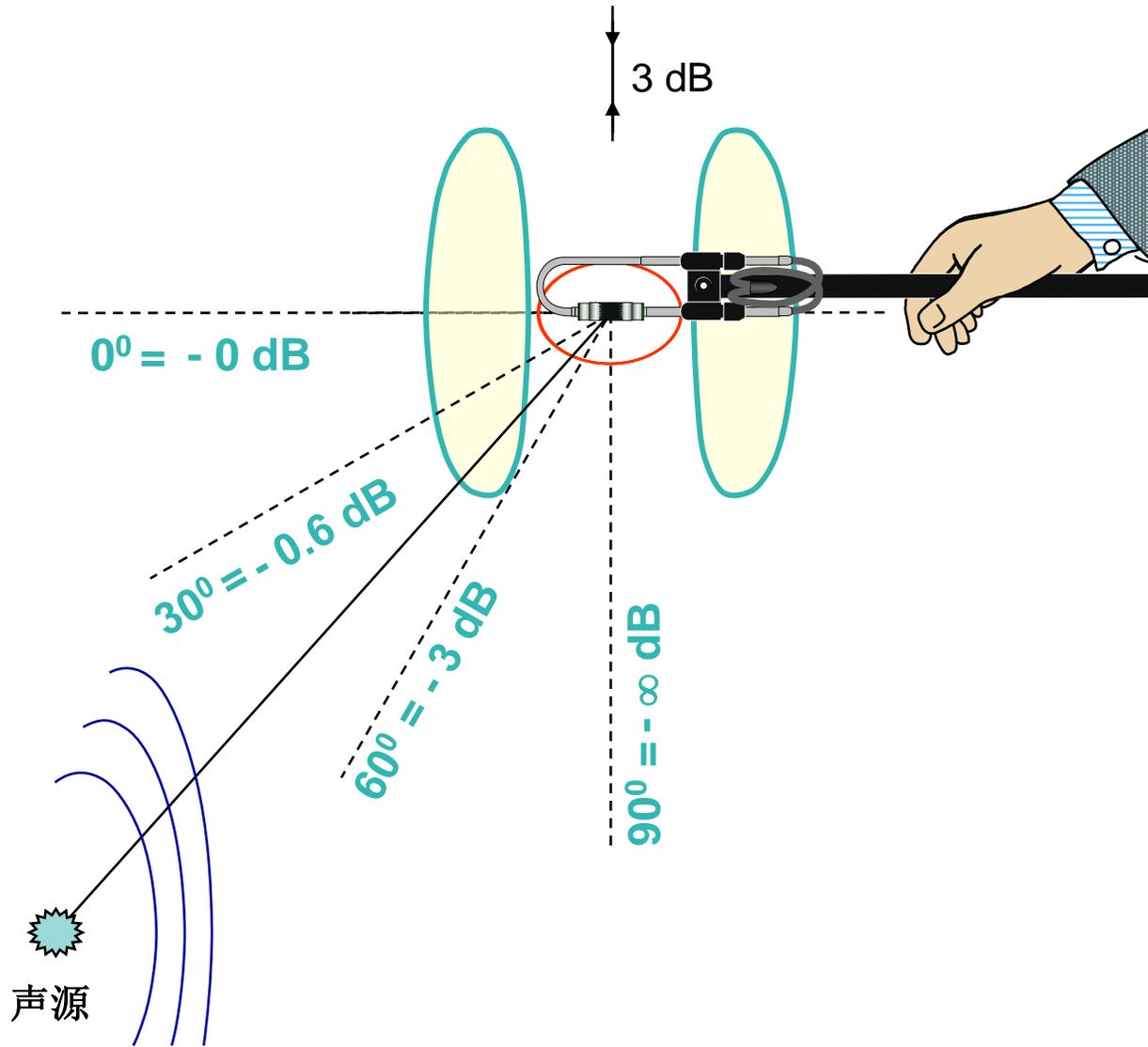
- 通过与源距离更近测量或者增加额外的吸声材料降低压-强指数
- 提高动力学性能
  - 增长间隔器，提高测量精度
  - 提高相位失配，降低系统误差
  - 使用特别设计的声强传声器

# 声强的频率范围

在自由场条件下，对于不同的间隔器和压-强指数下  
保证1 dB精度的频率范围



# 声强探头的指向性 (强度)



$\theta$	$\cos \theta$	dB
$0^\circ$	1	0
$12^\circ$	0.98	- 0.1
$27^\circ$	0.89	- 0.5
$37^\circ$	0.79	- 1
$60^\circ$	0.5	- 3
$84^\circ$	0.1	-10
$89^\circ$	0.01	- 20
$90^\circ$	0	- $\infty$

# 小结

## ▲ 高频限制于:

- 间隔器距离
- 传声器尺寸

## ▲ 低频限制于:

- 动力学性能
- 测量的压-强指数

## ▲ 动态性能依赖于:

- 间隔器尺寸
- 通道间相位失配

## ▲ 声强探头的方向性依赖于:

- 与声源的夹角

什么是声强?

声强的应用

如何计算声强

声强场指示器

需求设备



# 软件提供的声场指示器 (ISO 9614)

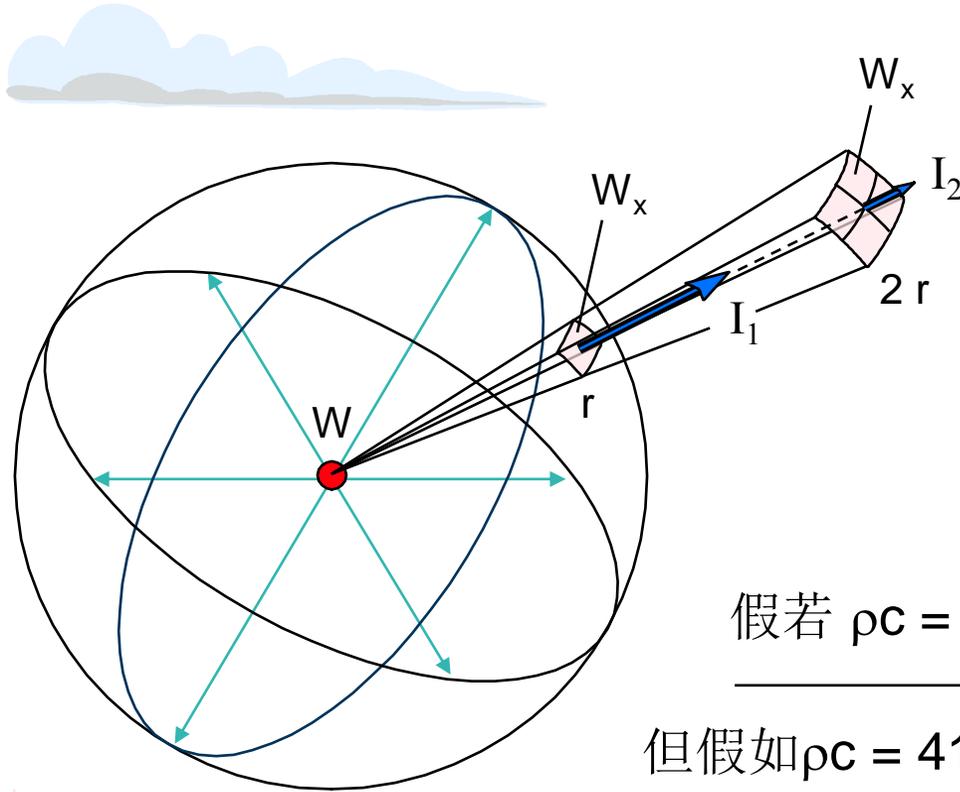
## ▲ 声场指示器帮助确定:

- 声强测量的精度
- 声场 (自由场还是混响场)
- 仪器精度
- 影响测量的背景噪声有多大
- 由于通道及探头失配引起的误差有多大
- 被测对象是否稳定

# 典型的场指示器

- *压-强指数*
  - 确定测量是在自由场进行还是混响场进行
- *声压-残留声强指数*
  - 显示声强探头的误差
- *动态能力*
  - 用于确定测量精度
- *重复性*
  - 显示一个给定的测量的重复能力
- *稳定性*
  - 比较所有测量之间的相互稳定程度
- *探头反向放置*
  - 简单的场检测，用于识别声强探头准确测量声强的能力

# 声压和声强



对于自由场辐射

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

假若  $\rho c = 400 \text{ Nsm}^{-3}$  则  $L_p = L_I$

但假如  $\rho c = 415 \text{ Nsm}^{-3}$  (在  $20^\circ \text{C}$  和  $1013 \text{ mbar}$ )

$$\therefore L_I = L_p - 0.16 \text{ dB}$$

# 压-强指数

## ▲ $L_I = L_p$ , 当:

- 声音只沿着探头方向传播  
(自由场内)

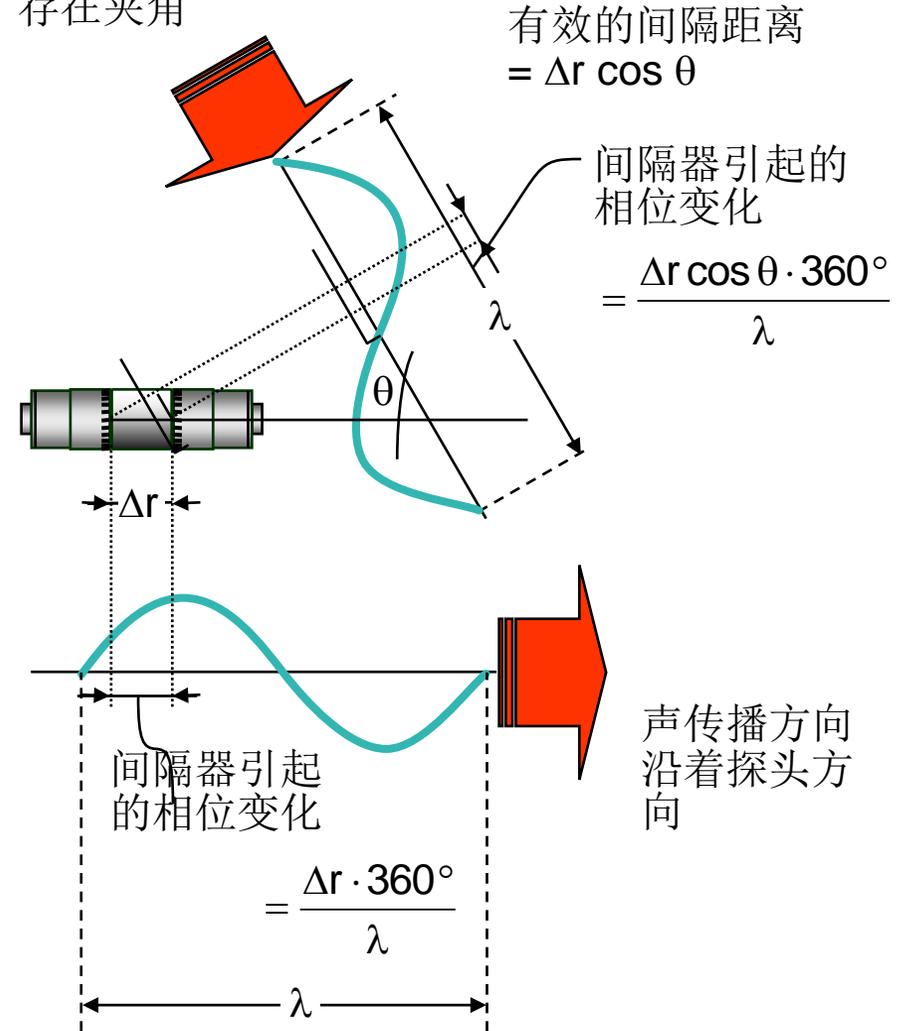
## ▲ $L_I < L_p$ , 当下述3种情况:

1. 声音传播方向与探头方向之间存在夹角
2. 自由场内存在两个或多个声源
3. 混响场

PI 指数表述为:

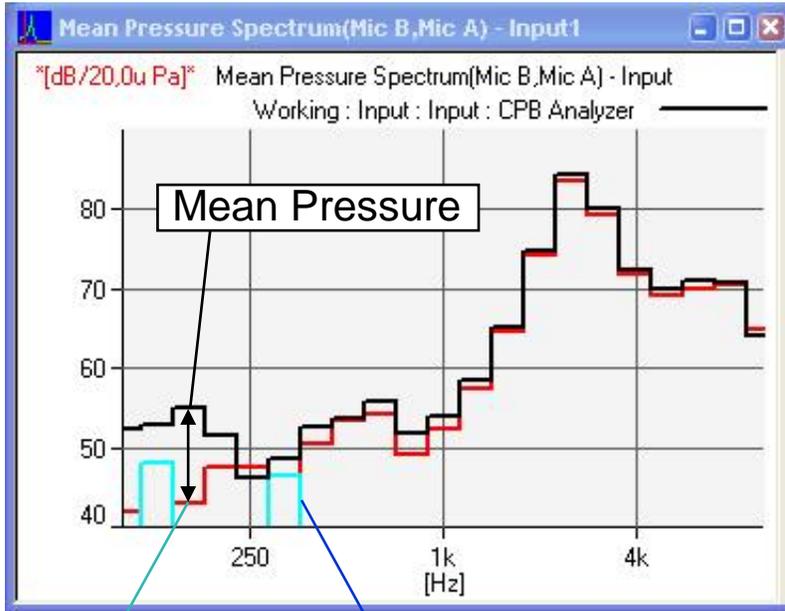
$$F_{pI} = L_p - L_I$$

声传播方向与  
探头方向之间  
存在夹角



# 压-强指数 (续.)

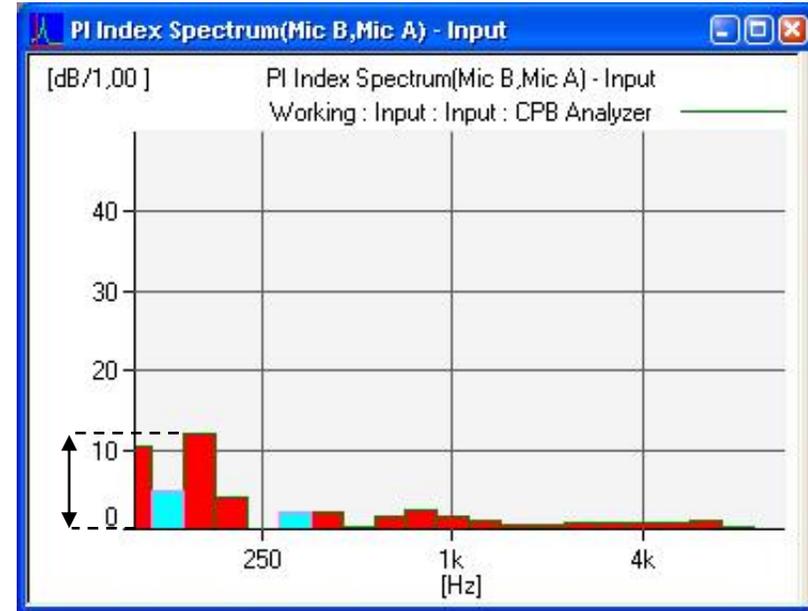
声压和声强



声强(+)

声强(-)

PI指数



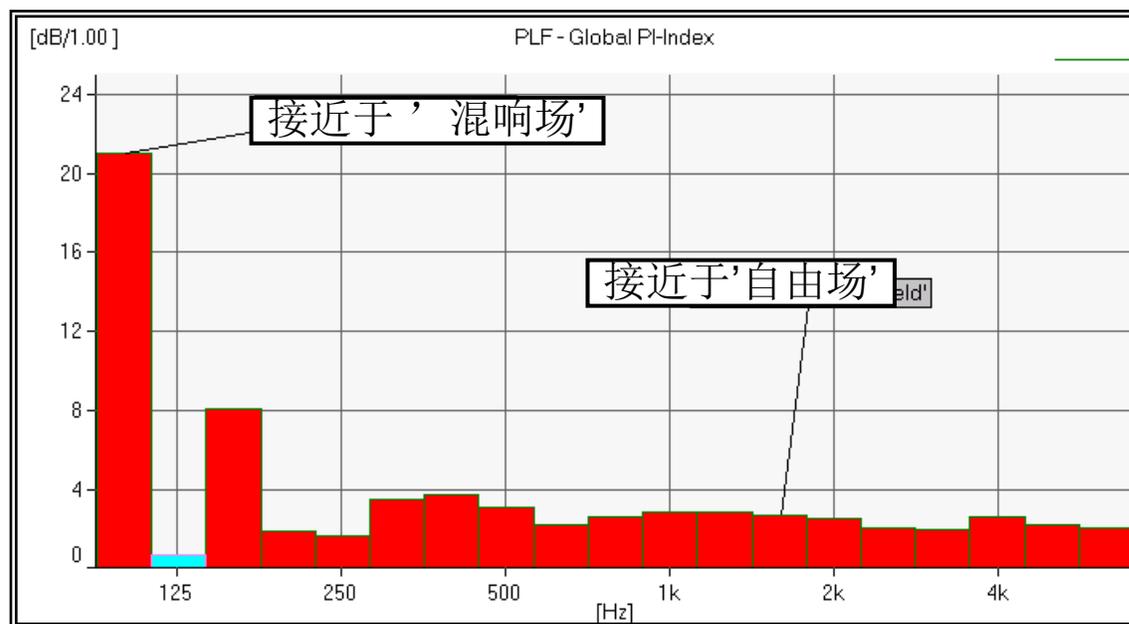
PI 指数表述为:

$$F_{pI} = L_p - L_I$$

# PI指数给出了声强的相关信息

## PI指数与频率相关!

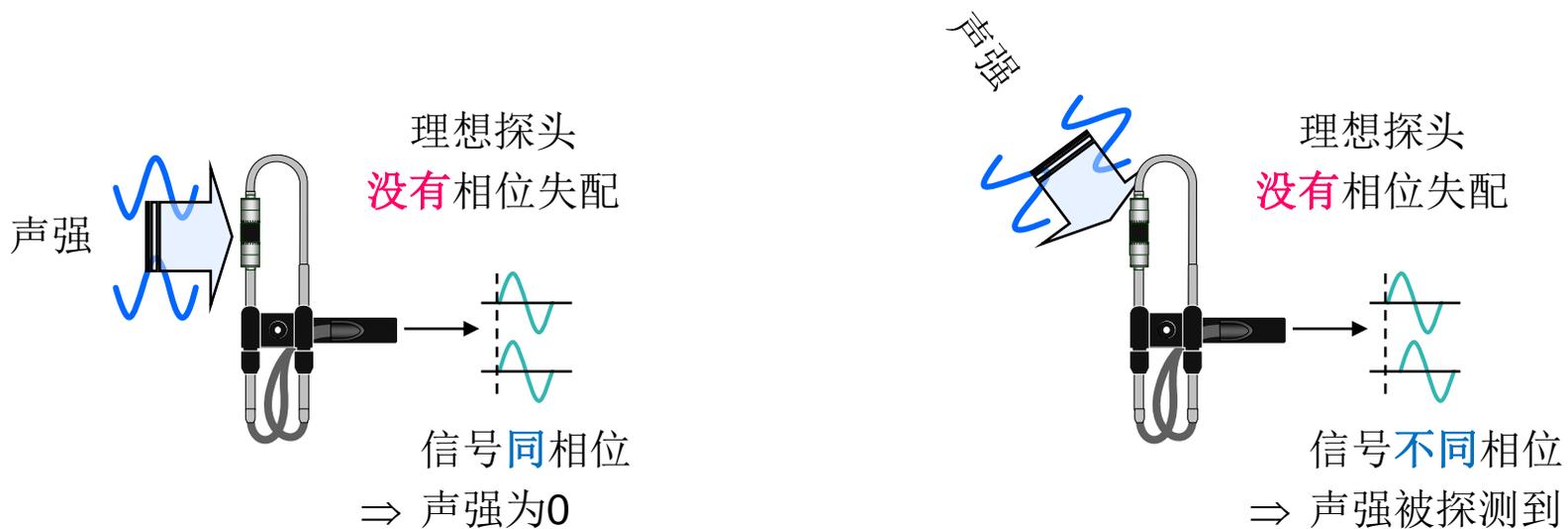
- 许多频率可能比其他频率具有更好的“自由场”性能
- 越接近0 dB,表明该频率的“自由场”性能越好



## PI指数能够帮助确定测量所在的声场和帮助识别是否有驻波存在

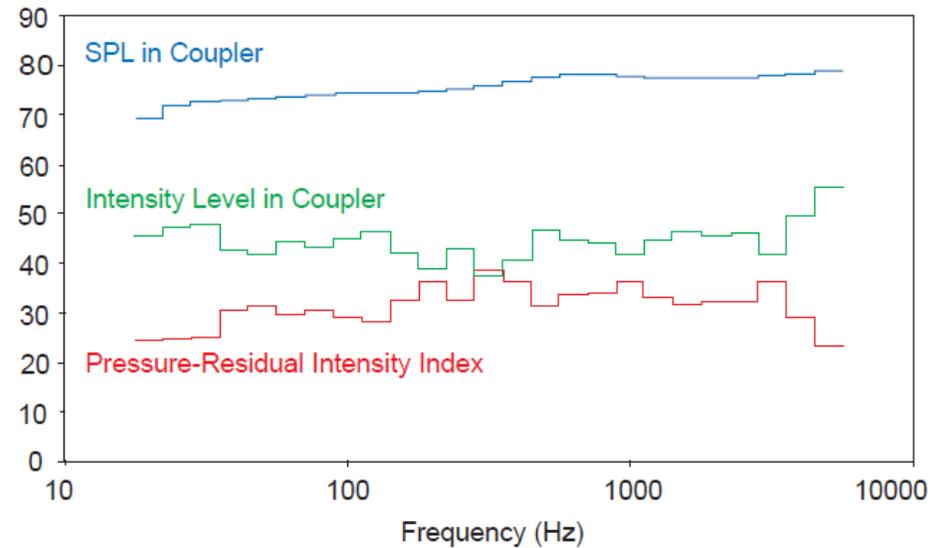
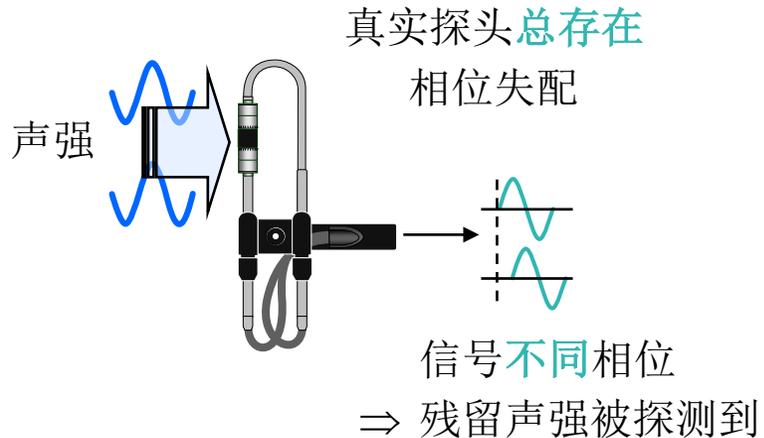
# 声压-残留声强指数

- ▲ 声压-残留声强测量了系统的‘残留’声强
- ▲ 声压-残留声强相关于整个 测量链 的相位失配
- ▲ 对于 完美相位匹配系统，且相同的信号被输入到两个传声器，则测量得到的残留声强应该等于  $0 \text{ W/m}^2$



# 声压-残留声强指数 (续.)

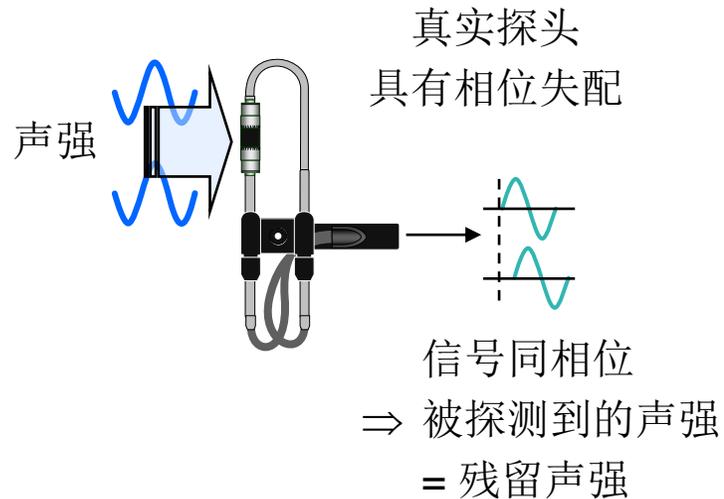
- ▲ 真实世界总是存在由于 贯穿于整个测量链的相位失配 产生的残留声强
- ▲ 任意的相位失配均将以 ‘残留’ 声强的形式出现
- ▲ 两个传声器声压保持相同



$$\text{PRI指数表述为 } \delta_{pI0} = L_p - L_I$$

# 怎么样获得PRI指数呢？

- ▲ PRI指数是非常重要的指示器!
- ▲ 通过使用声强标定器能够精确测量PRI指数 (例如. 3541-A或4297)
- ▲ 声强标定器被设计为两个传声器被放置于相同的信号中



3541-A  
声强标定器

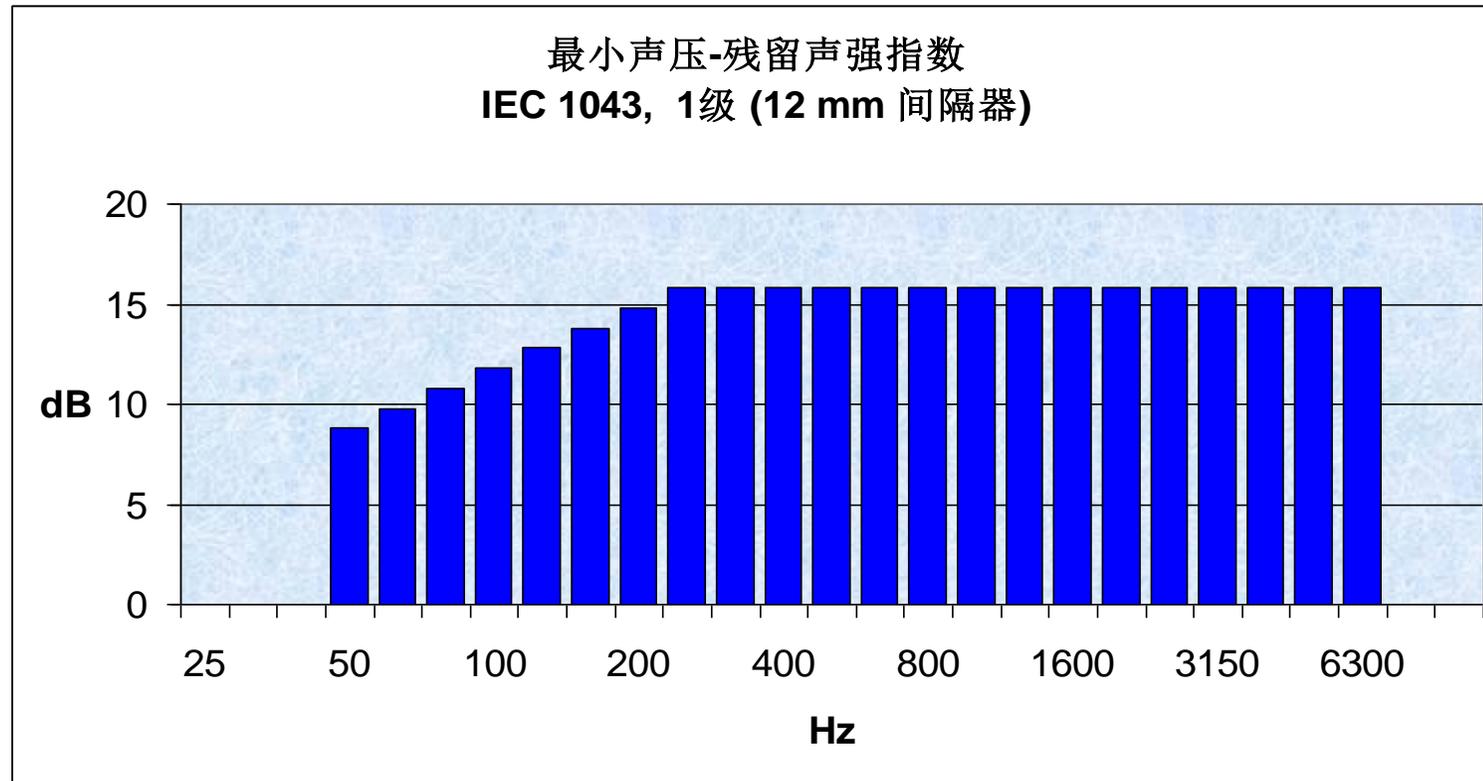


4297  
声强标定器

# PRI指数和IEC 1043标准

## ▲ IEC 1043 – 1993 ‘电声 – 利用声压敏感的传声器对进行声强测量’

- 给出了声强探头、信号条理和分析处理仪器的PRI指数最小需求
- 给出了如何正确测量系统PRI指数的指导



# PRI指数和IEC 1043标准 (续.)

## ▲ IEC 1043 给出了3个精度等级精度

- 1级: 分析仪精度 =  $\pm 0.2$  dB
- 2级: 分析仪精度 =  $\pm 0.3$  dB
- 2X级别: 与2级一致, 除了没有要求实时性能

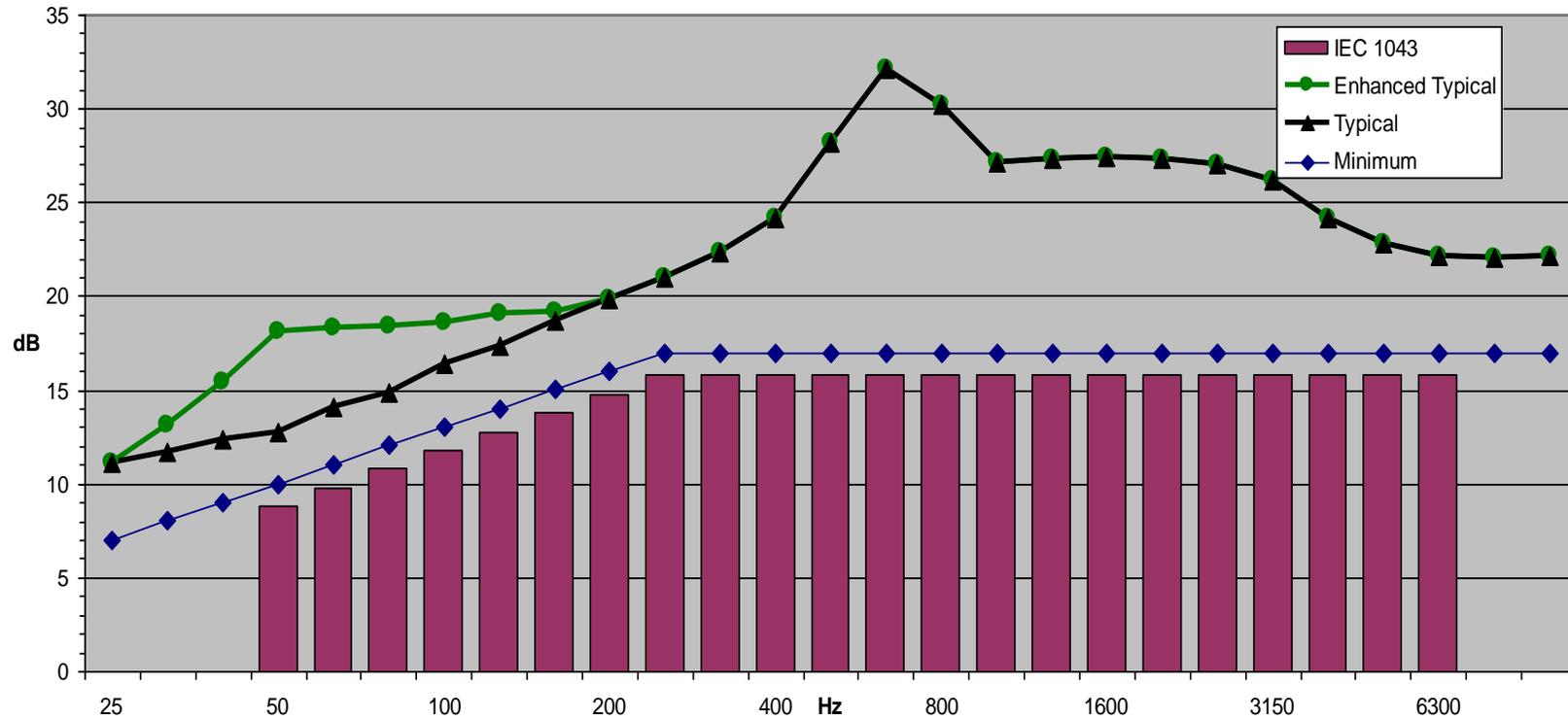
## ▲ 详细参数:

- 频率响应
- 滤波特性
- PRI指数
- 环境敏感性

当混合使用Brüel & Kjær探头和分析仪器能  
满足1级精度要求!

# 典型PRI指数\*

2260声强系统的声压-残留声强指数



\*典型的3599声强探头+2260声级计（满足IEC 1043 1级系统）

# 相位失配误差

▲ 对于  $\delta_{pI0} - F_{pI} > 10$  dB

- 误差  $< \pm 0.5$  dB

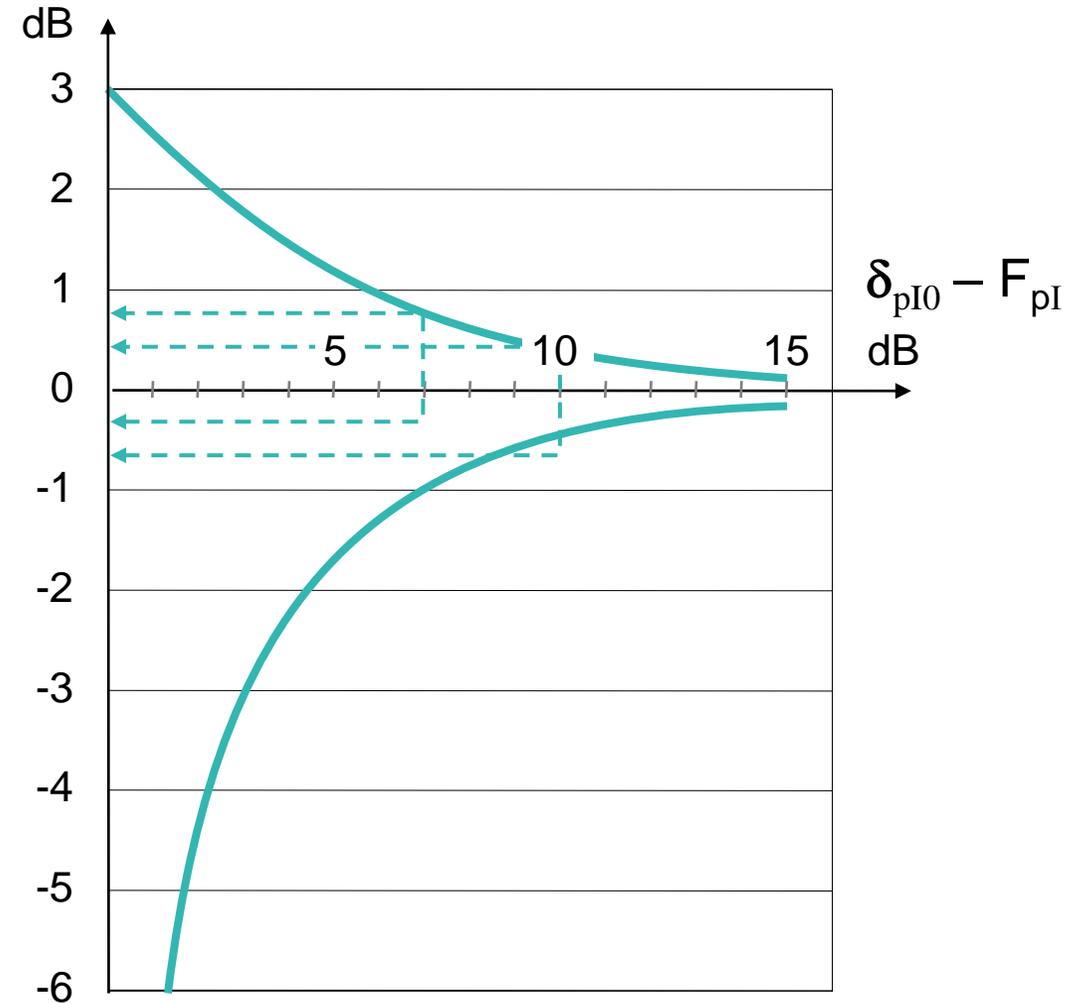
▲ 对于  $\delta_{pI0} - F_{pI} > 7$  dB

- 误差  $< \pm 1$  dB

3599资料上使用下面的公式

$$\delta_{pI} \leq \delta_{pI0} - K$$

相位失配误差



# 动态性能

## ▲ 动态性能 = PRI 指数 - K

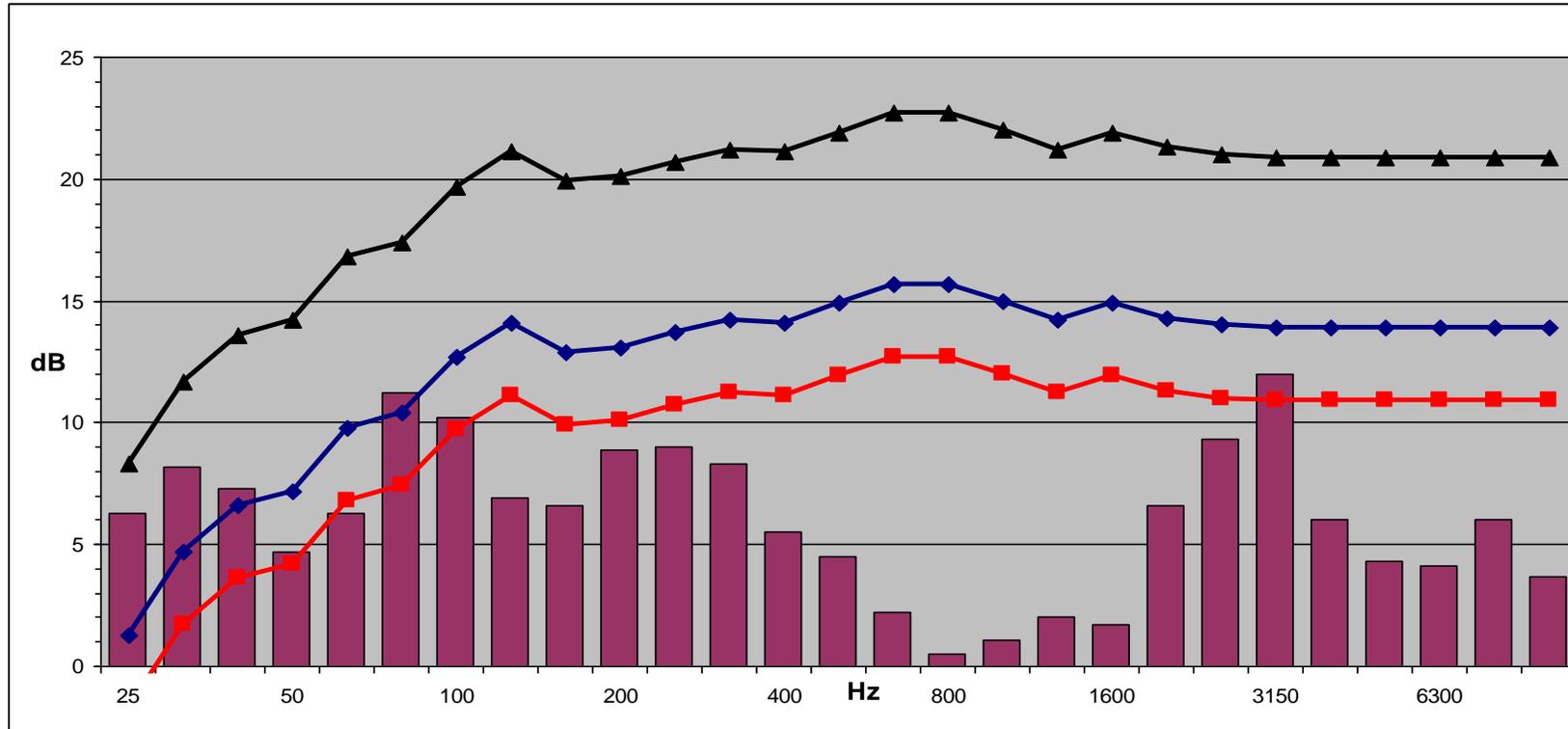
- K 偏移误差因子
- 假如K = 7 dB, 则精度  $\leq \pm 1$  dB
- 假如K = 10 dB, 则精度  $\leq \pm 0.5$  dB

$$\text{动态性能指数定义为 } L_d = \delta_{pIO} - K$$

## ▲ 一旦动态性能被确定, 则就可以比较把PI指数和动态性能进行比较(整体或局部)

- 假如PI指数 < 动态性能, 精度满足要求
- 假如PI指数  $\geq$  动态性能, 则测量不满足精度要求

# 动态性能实例



- 黑色: PRI
- 蓝色: PRI-7 dB
- 红色: PRI-10 dB
- 紫色: PI指数

## 上图说明:

- 除了 < 125 Hz 和 3150 Hz 频率范围, 精度满足  $\pm 0.5$  dB
- 除了 < 50 Hz 和 80 Hz 频率范围, 精度满足  $\pm 1$  dB
- 测量可以被认为是比较“好”

# 重复性指数

- ▲ 重复性指数显示了一个测量点/一次扫描测量的结果的重复性能如何
- ▲ 用于确保被测设备在特定测点/特定扫描中是否真正稳定
- ▲ 亦表明了该特定测点/特定扫描中测量环境的稳定性，即
  - 是否出现了大的温度或者湿度变化
  - 是否出现了脉冲背景噪声及其水平
- ▲ 为了得到重复性，至少对每个测点/每个扫描进行两次测量
  - 在测量之间的误差应该 <2 dB

$$\text{重复性定位为: } RI = \left| |L_{I1}| - |L_{I2}| \right|$$

# 探头反转

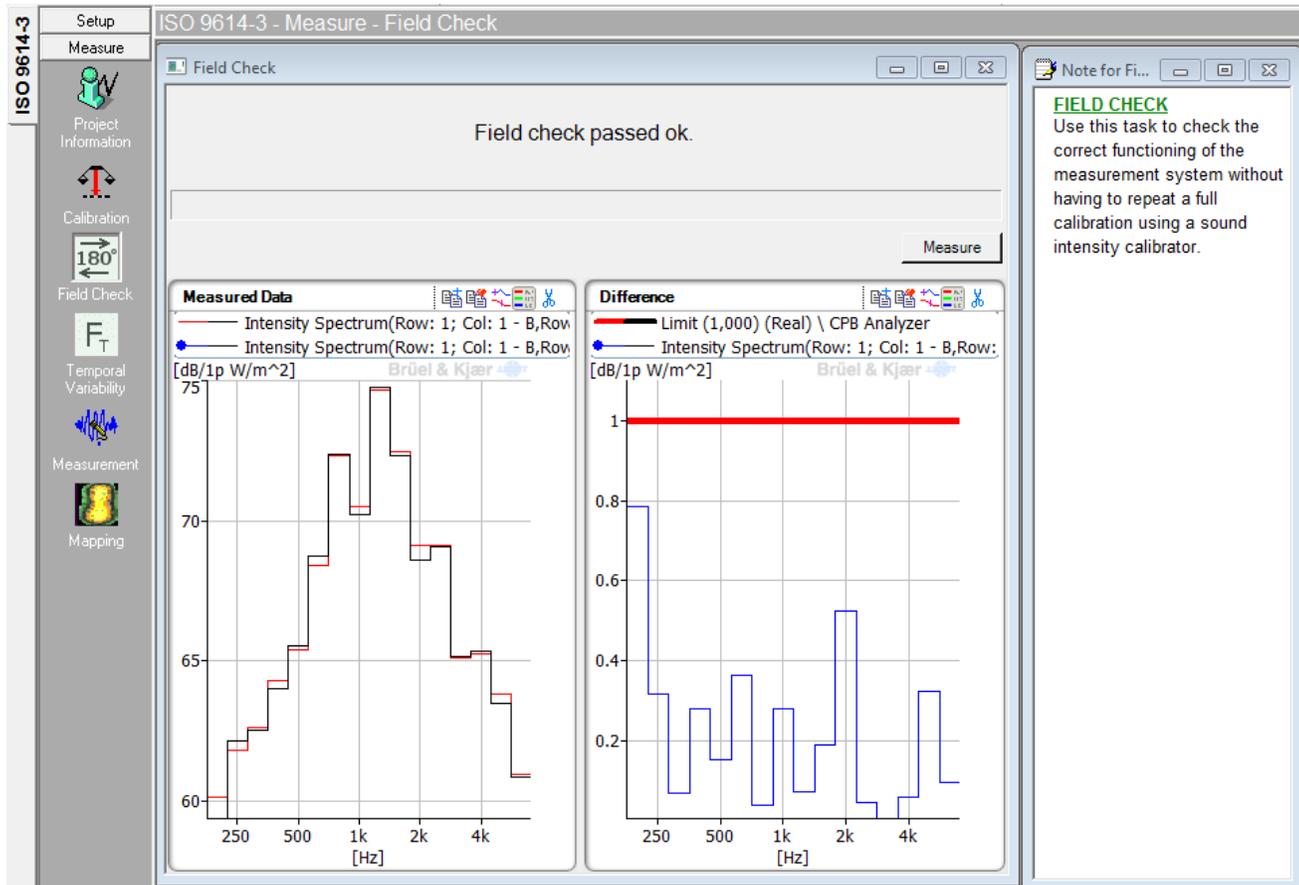
## 简单的声场检测确保声强系统正常工作

### 过程:

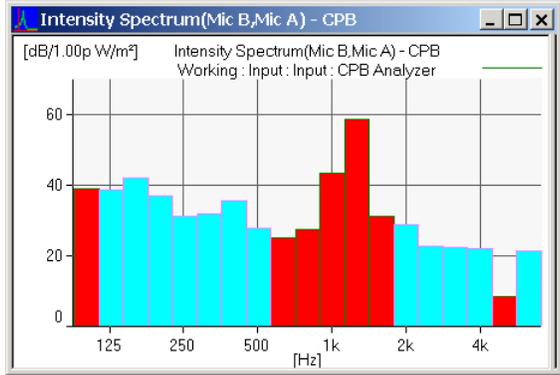
- 将探头指向被测物体进行正常测量声强
- 注意方向和声强幅值
- 转动探头 $180^\circ$  再进行第二次测量
- 假如系统正常工作，声强将被测量，但方向将与第一次测量相反

### 幅值存在误差可以接受，但应该小于1 dB

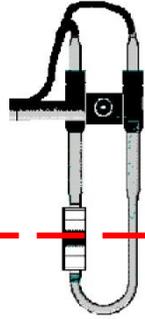
### 不能代替其它更加精确的场指示器



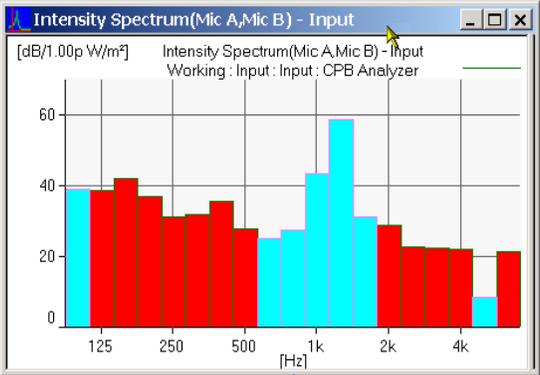
# 探头反转案例



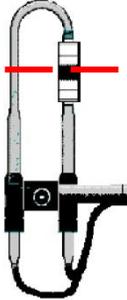
声强 (+)



声源



声强 (-)



声源

什么是声强?

声强的应用

如何计算声强

声强场指示器

需求设备



# 设备需求

## ▲ 从先前的部分我们可以得到以下结论:

- 基于2传声器进行声强测量 (典型的‘面对面’设计)
- 整个系统的相位匹配对低频非常关键
- 对于声强测量，数字滤波器被优先**推荐**
  - 滤波器的形状和精度，必须满足IEC 1260-1995, DIN 45651, ANSI S1.1-1986 标准
  - **FFT分析可以接受，但非标准**
- **IEC 1043**指定了重要的设备参数
  - 整个系统的**PRI**指数
  - 参考其他标准
- 实时性虽然不是至关重要，但是非常需要
  - 必须满足IEC 651和IEC 804对一个声学分析仪的实时性要求

# 设备需求 (续.)

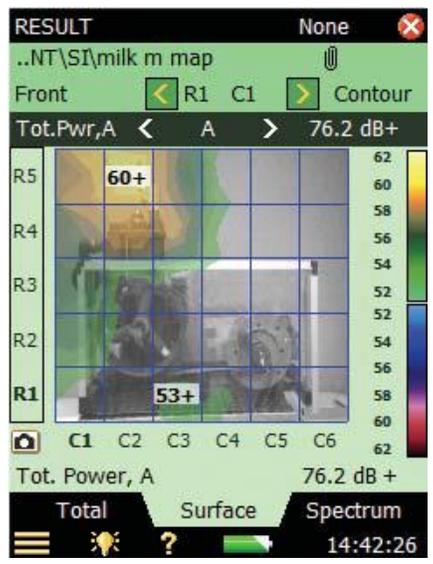
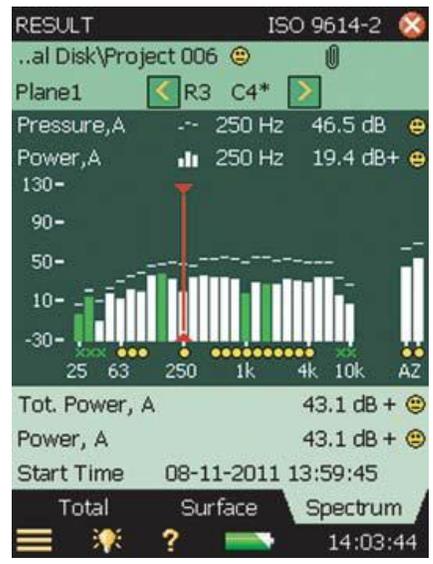
## ▲ 声强测量系统必须包括:

- 声强探头:
  - 2个距离很近的但相位精确匹配传声器
  - 相位匹配很好的前置放大器
  - 低噪声电缆
- 信号调理:
  - 对传声器进行供电和前置放大.
  - 合适的高/低通滤波器
    - 高通滤波器具有良好的相位匹配!
- 分析仪:
  - 最少2个通道
  - 直接计算声强的能力
  - 满足相应的声学标准
  - 实时性
- 声强标定器:
  - 能够校验SPL,媒质速度,和系统的PRI指数

# 声强测试系统—基于2270手持式分析仪



## 【测量界面】



## 【特点】

- ✓ 声强探头+手持式分析仪的紧凑系统配置
- ✓ 中文菜单支持
- ✓ 数据传输到PC，导出到Excel
- ✓ 7692-N 声强绘图软件
- ✓ 兼容ISO 9614-1 / 2, ANSI和ECMA标准
- ✓ 其他可选：振动测量、FFT，时域数据记录，隔声、混响时间测量等



# 旧系统平台

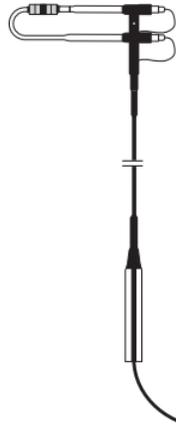


Back in the 1980s!

# 声强测试系统-基于LAN-XI

3599

声强探头  
ZH-0632  
控制器



4297 声强校正器

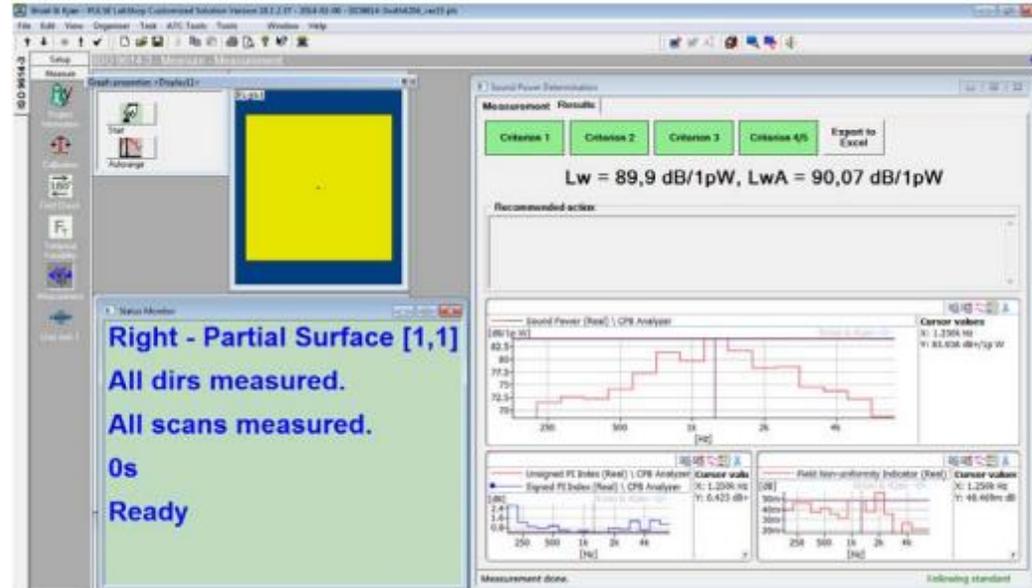


3050A060 or 3160A042  
LAN-XI  
UA2104-031 面板



## 【特点】

- ✓ 声强探头+数据采集硬件+ PC的系统配置
- ✓ 用手握住（控制器）开始、停止和保存测量
- ✓ 无缝导出数据
- ✓ 符合ISO 9614 - 1/ 2/3标准
- ✓ 对热点区域可以添加参考信号——选择性声强
- ✓ 硬件可用于多通道声音和振动分析系统



# 结论

- ▲ 声强是声音的三个基本参数之一
- ▲ 声强能够被用于声功率计算，声强映射成像和建筑声学
- ▲ 场指示函数帮助确保获得精确和可重复的测量
- ▲ 严格的相位匹配是获得正确声强的关键因素

## 进一步的推荐文献...

- ▲ Sound Intensity Primer  
*Brüel & Kjær*
- ▲ Sound Intensity (Theory)  
*Brüel & Kjær Technical Review # 3 - 1982*
- ▲ Sound Intensity (Instrumentation and Applications)  
*Brüel & Kjær Technical Review # 4 – 1982*
- ▲ Validity of Intensity Measurements  
*Brüel & Kjær Technical Review # 4 – 1985*
- ▲ Sound Intensity, 2<sup>nd</sup> Edition by F.J. Fahy  
*E & FN Spon Publishing*

# Thank You



*查看/下载*

《HBK声学及振动产品简明目录》



*报名下一场网络课程*

建筑声学

---

声学及振动专家

---