

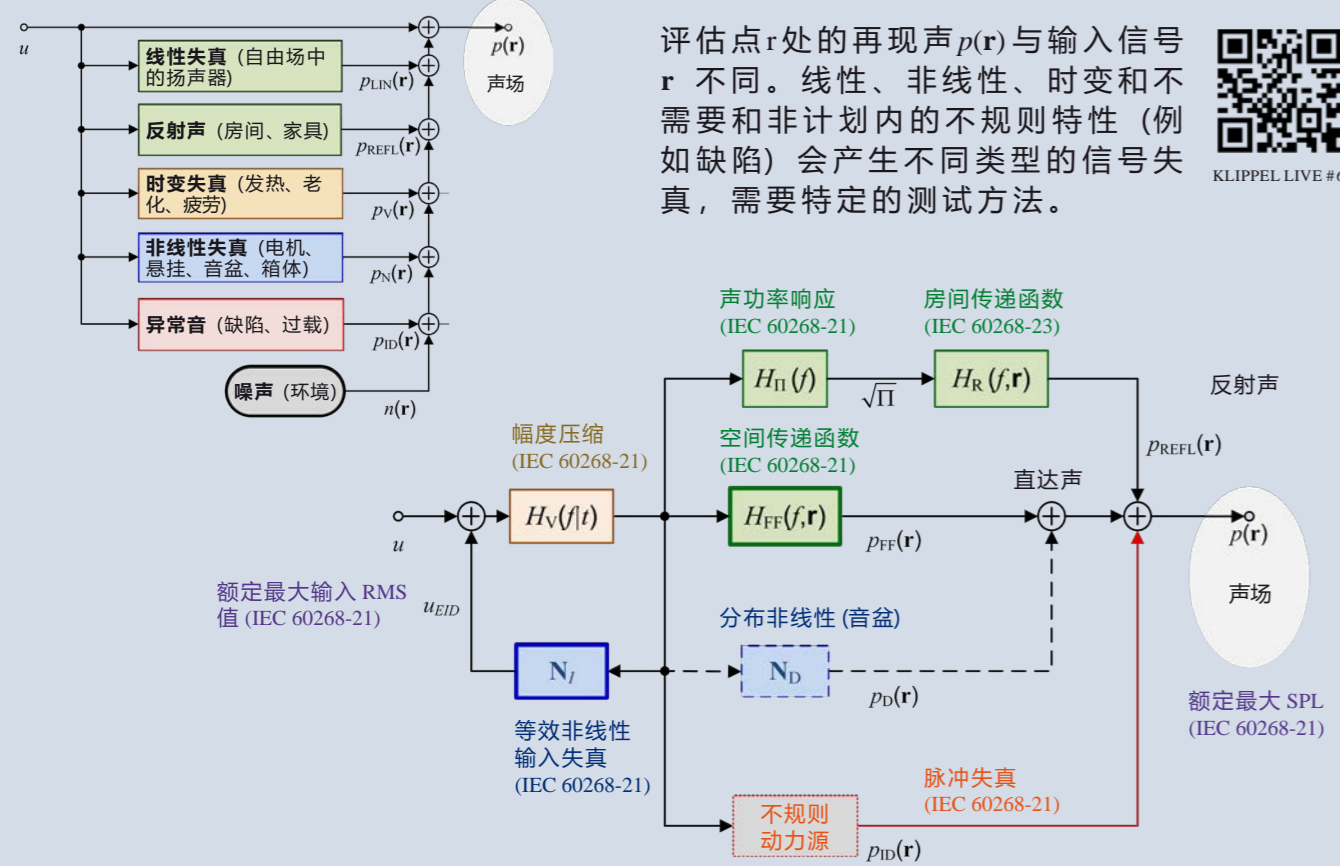
# 声学测量

## 基于输出的测试

### 测试挑战

- 有源系统结合了传输 + DSP + 放大 + 转换
- 需要支持多种不同特性的输入通道
- 对换能器电学端口的访问受限
- 输入电平、电压、电输入功率变得不那么重要
- 评估近场和远场的3D声输出用于声场控制
- DSP产生延迟、时变行为和时变失真

### 黑匣子建模



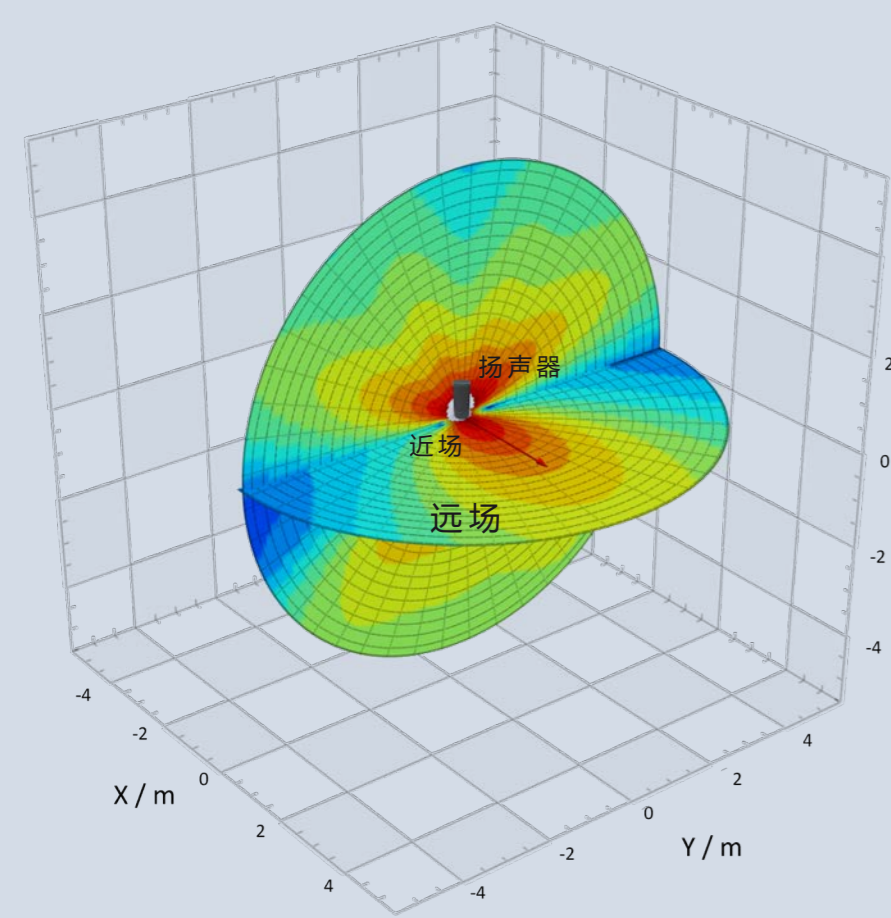
评估点  $r$  处的再发声  $p(r)$  与输入信号  $r$  不同。线性、非线性、时变和不规则和非计划内的不规则特性 (例如缺陷) 会产生不同类型的信号失真, 需要特定的测试方法。

### 空间传递函数

空间传递函数使用球面波展开对消声条件下扬声器近场和远场内评估点  $r$  处的声压输出  $p_{ref}(f, r)$  进行建模:

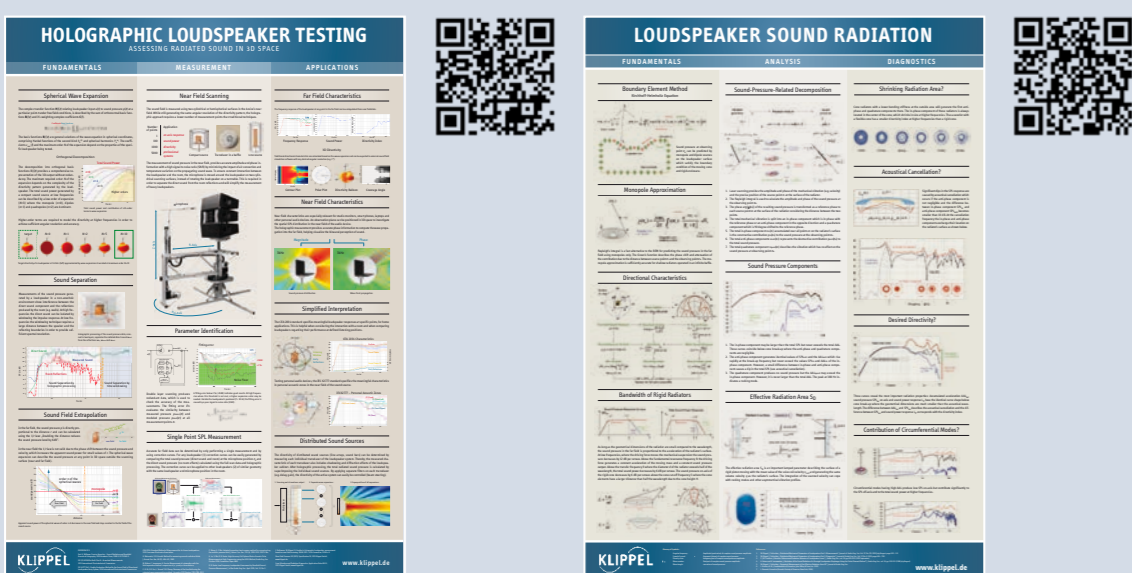
$$H_{FF}(f, r) = \frac{P_{ref}(f, r)}{U(f)} = C(f)B(f, r)$$

该模型的自由参数  $C(f)$  对基函数  $B(f, r)$  (波动方程的解) 进行加权。参数  $C(f)$  可通过扬声器近场扫描面上的声压测量得以确定。全息方法通过低扫描工作量提供几乎无限的角度分辨率, 并分离环境产生的声音反射。拟合误差指标可用于评估直达声测量的准确性。

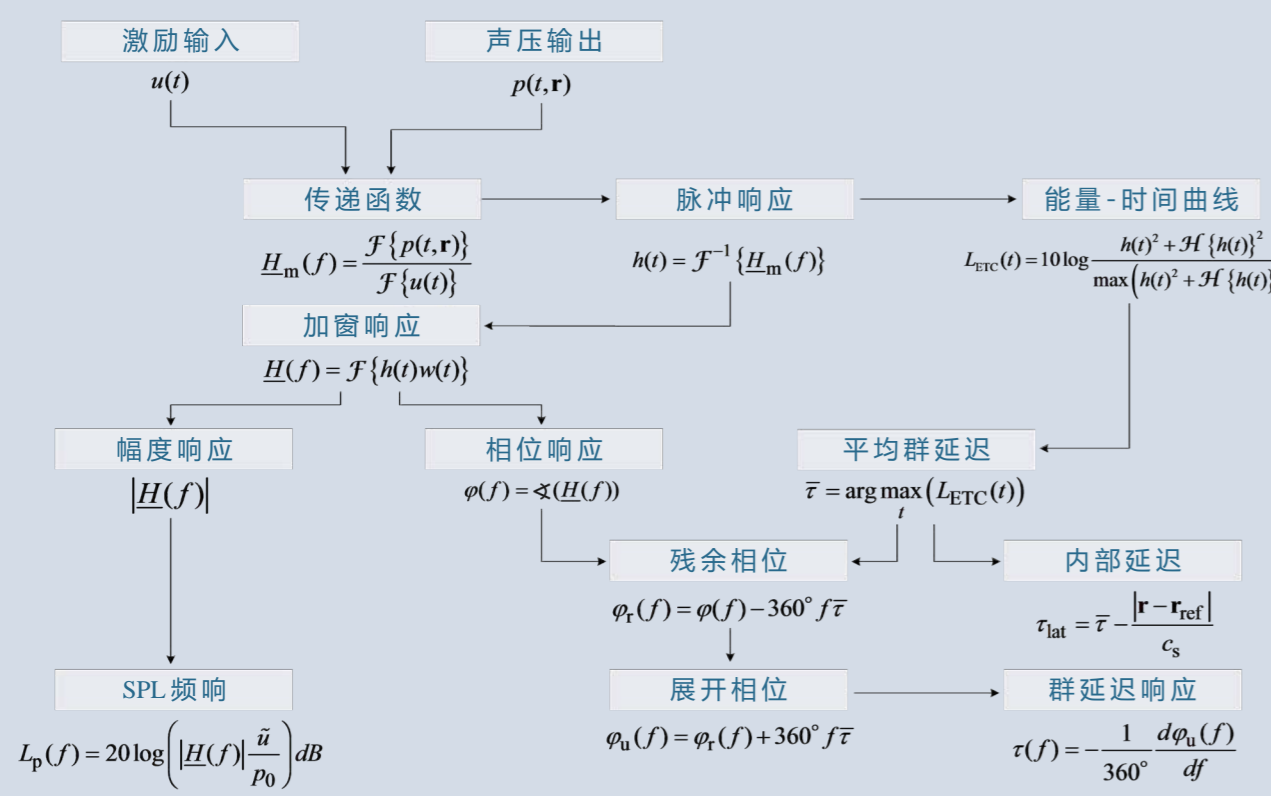


示例: 一个蓝牙音箱在自由场条件下 5 kHz 时产生的直达声在 3D 空间中的声压分布。

在以下专题海报上获取有关全息扬声器测试和重要远场特性的更多信息:



### 频率响应

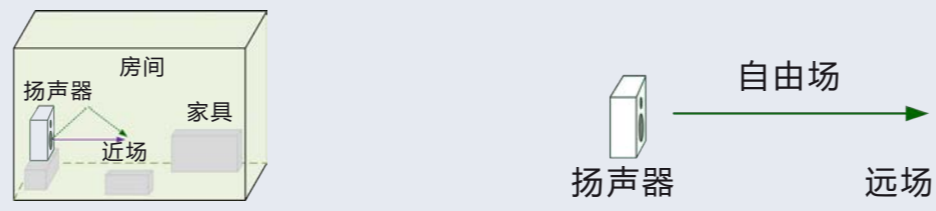


符号	释义	符号	释义
$H(f)$	希尔伯特变换	$t$	时间
$F(f)$	傅里叶变换	$f$	频率
$F^{-1}(f)$	傅里叶逆变换	$r$	评估点
$ H(f) $	$H(f)$ 的绝对值 (幅值)	$p_{ref}$	扬声器参考点
$\angle(H(f))$	$H(f)$ 的辐角值 (相位角)	$p_0$	参考声压
$\bar{a}$	RMS 输入电压	$c_s$	声速

## 声学测试条件

### 模拟的非原位条件

原位 模拟 非原位



一般条件下的测试, 如听音室、办公室、生产车间、服务站、目标应用中。

- 展示与声学环境的交互
- 简单 (无需消声室)

### 符合 IEC 60268-21 的方法

#### 时窗处理:

- 去除脉冲响应中的反射
- 降低低频的频率分辨率
- 适用于单点测量
- 不能提供模拟远场条件

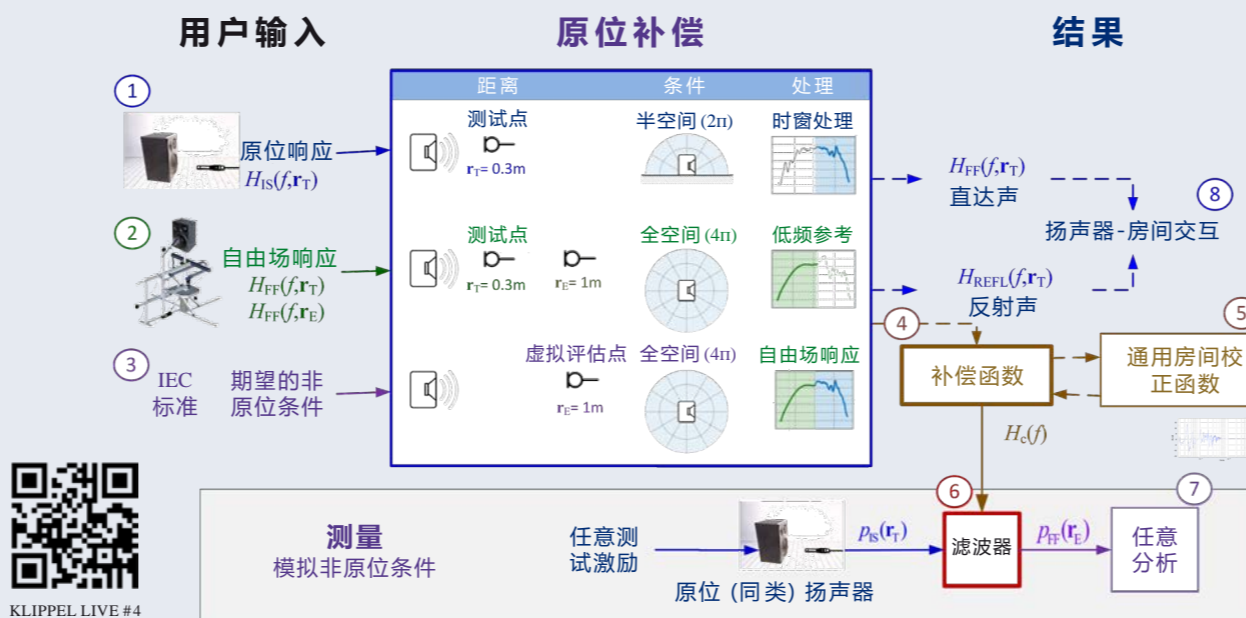
#### 波动展开:

- 分离直达声和反射声
- 提供模拟远场和自由场条件
- 需要近场扫描

#### 原位补偿功能:

- 麦克风信号滤波处理 (幅值和相位)
- 补偿函数取决于扬声器和房间属性以及扬声器和麦克风的位置
- 提供模拟远场和自由场条件
- 房间校正函数适用于同类扬声器
- 需要准确的参考信息 (自由场)

### 原位补偿功能的工作流程



1. 测量测试点  $r_1$  处的声压  $p_{S1}(f, r_1)$ , 计算非消声测试条件下无补偿滤波器时的传递函数  $H_{S1}(f, r_1)$
2. 提供在自由场条件下测量的准确参考响应  $H_{ref}(f, r_1)$  和  $H_{ref}(f, r_2)$  (例如, 来自消声室或近场扫描仪 (NFS))
3. 指定评估点  $r_2$  和声学标准环境 (半空间或全空间)
4. 根据  $H_{S1}(f, r_1)$  和  $H_{ref}(f, r_1)$  计算补偿函数  $H_C(f)$
5. 创建通用房间校正曲线并将其应用于同类扬声器 (无需参考信息)
6. 用补偿函数  $H_C(f)$  对测量的声压  $p_{S1}(f, r_1)$  进行滤波, 生成模拟标准条件下的直达声  $p_{ref}(f, r_2)$
7. 对  $p_{ref}(f, r_2)$  进行任意分析, 来测量模拟标准条件下的其他特性 (例如 THD)
8. 检查反射声传递函数  $H_{REF}(f, r_1)$  以评估扬声器与房间的交互

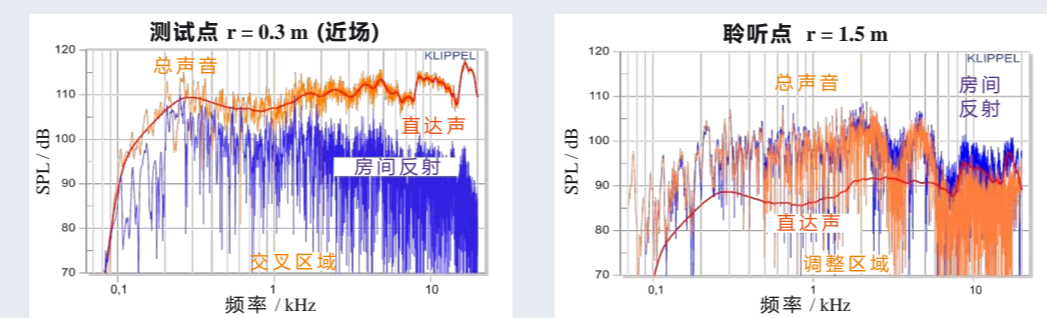
使用来自近场扫描 (NFS) 的参考数据生成模拟远场和自由场条件的三种不同原位补偿方案

方案	全频参考的全补偿	低频参考的全补偿	低频参考的低频补偿
补偿滤波	针对所有频率	针对所有频率	针对低频
参考数据	针对所有频率	针对低频	针对低频
扫描时间 (获取准确参考值)	一般 NFS (> 20 分钟)	短时 NFS (> 7 分钟)	短时 NFS (> 7 分钟)
声学要求	任何条件 (房间、夹持、位置)	任何条件 (与边界的距离 $d > 1$ m)	自由场条件 ( $f > 1$ kHz)
频率分辨率	不受限 (未应用时窗)	不重要 (加窗处理 $f > 500$ Hz)	不受限 (未应用时窗)
同类 DUT 的通用 (房间) 补偿	仅幅值相应	幅值 + 相位	幅值 + 相位
示例	产线测试箱	办公室、车间	半消声室

### 扬声器 - 房间交互

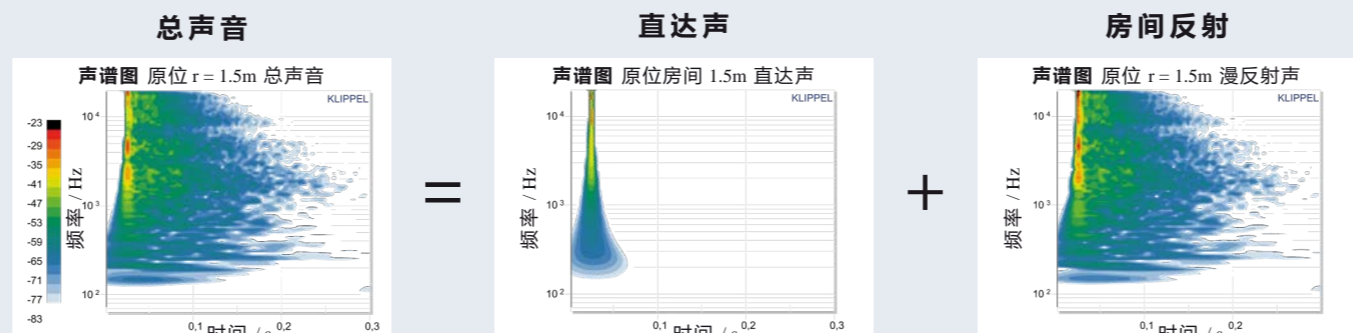
原位补偿模块可以将目标环境 (房间、汽车等) 测试点  $r_1$  处总声音的非消声传递函数  $H_{NS}(f, r_1)$  分解为代表直达声的传递函数  $H_{ref}(f, r_1)$  和代表房间反射的  $H_{REF}(f, r_1)$ 。

示例: 蓝牙扬声器在办公室的两点进行评估



解读: 上左图显示了短距离  $r=0.3$  m (桌面上的测试点) 处总声音和各个分量的传递函数, 其中直达声在总声音中占主导地位。右图显示在较大距离  $r=1.5$  m (听音点) 处的测试结果, 其中房间反射占主导地位并使总频率响应产生显著变化。

下面的声谱图显示了听音点处总声音和各信号分量脉冲响应的时频分析 (小波)。桌子和墙壁会产生明显的早期反射。平均响应时间为  $\tau_{0.2} = 0.2$  s 的房间产生随时间平滑衰减的声谱图。



## 最大声压级

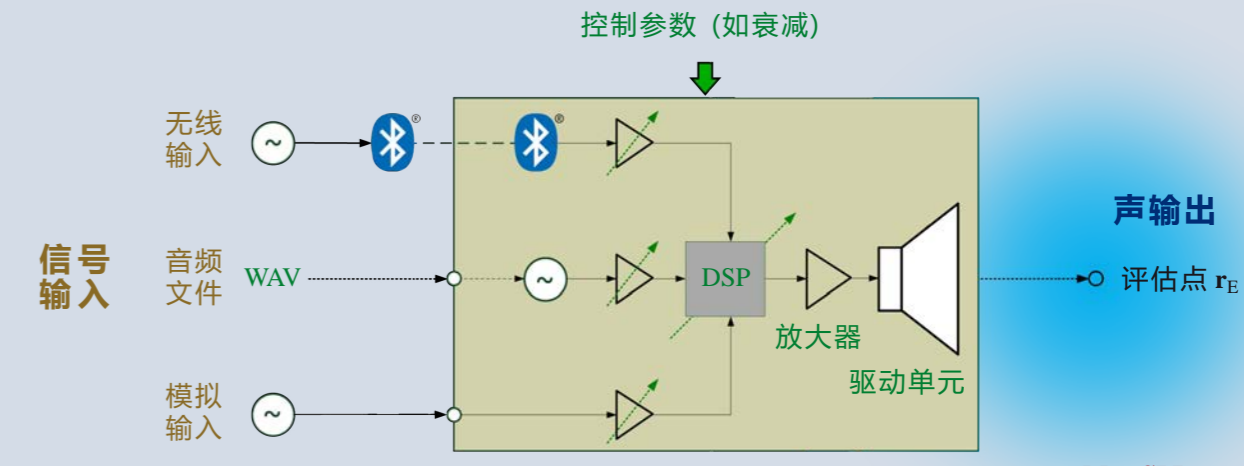
### 符合 IEC 60268-21 的 Max SPL

#### 定义:

- 单值最大声压级 (Max SPL) 是现代音频系统声学测试的基础
- 制造商应在指定的测量条件 (如激励、位置、环境) 下标定该 Max SPL
- 制造商保证产生 Max SPL 的测试激励信号在 100 小时功率测试期间不会损坏设备
- 制造商根据特定应用的要求在额定 Max SPL 下确定物理和感知音频性能

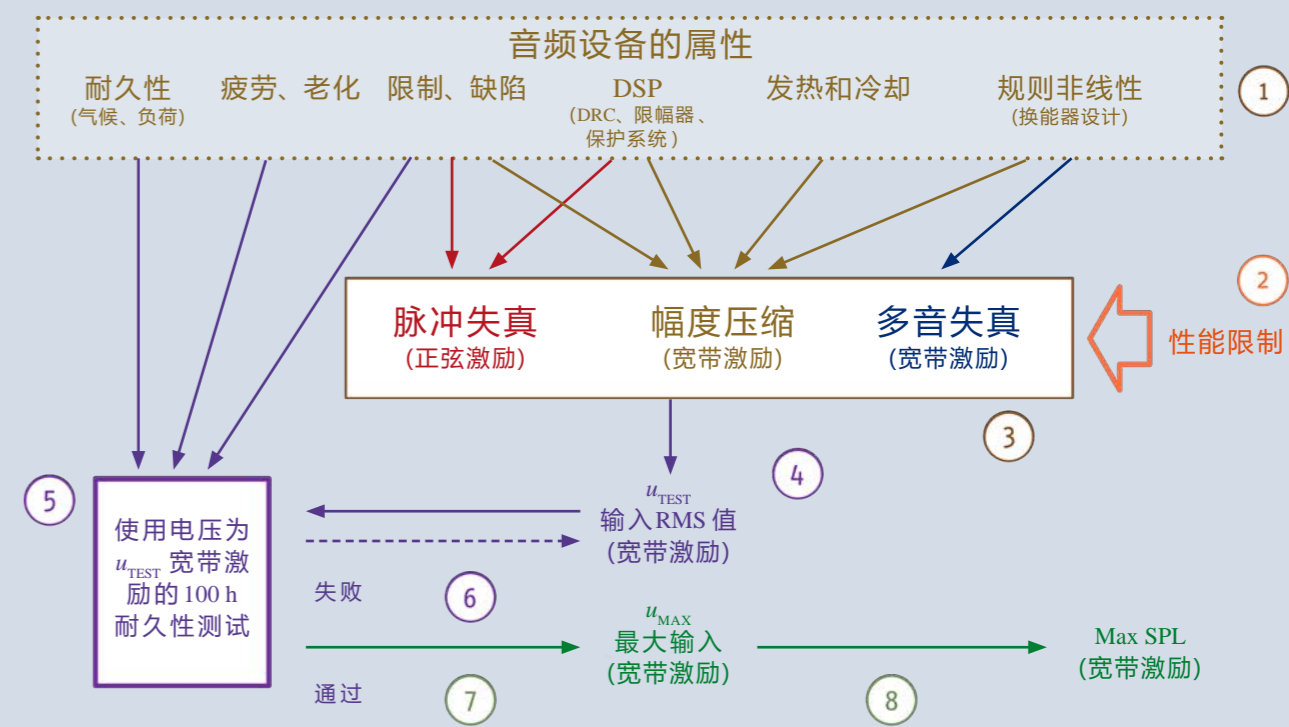
#### 好处:

- Max SPL 可用于校准任意输入通道以及根据所选的控制参数 (如音量) 来确定最大输入值 ( $u_{MAX}$ )
- Max SPL 值对工程、市场和终端用户有意义

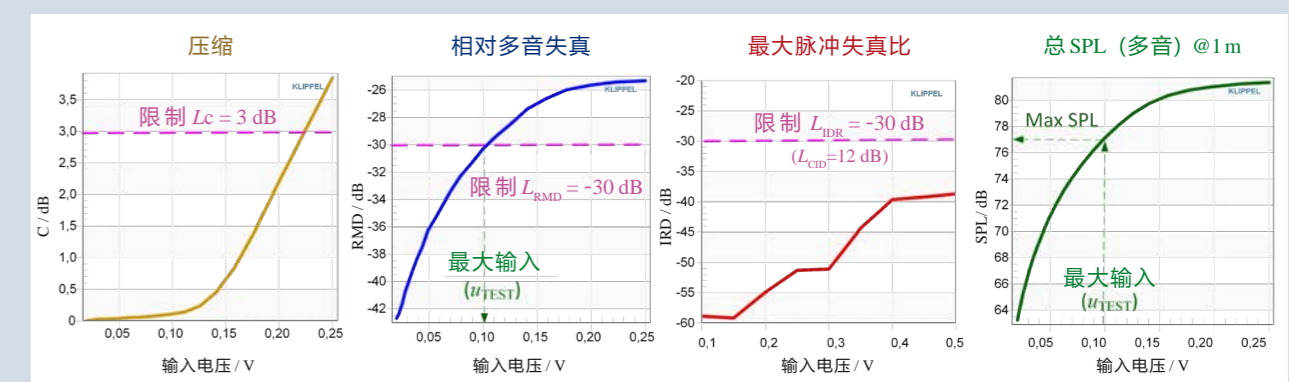


### 实践中额定 Max SPL

1. 收集背景信息 (如设计、目标应用)
2. 定义允许信号失真的性能限制
3. 测量幅度压缩、非线性失真和脉冲失真与输入 RMS 值  $u$  的关系
4. 找到一个宽带激励 RMS 值  $u_{TEST}$  作为对应于考虑性能限制时 Max SPL 的最大输入 RMS 值  $u_{MAX}$  的候选值
5. 将宽带激励  $u_{TEST}$  应用于至少 1 个 DUT 进行 100 小时耐久性测试
6. 检查耐久性测试后的 DUT 性能是否符合技术规范
7. 如果检查失败, 用较小的  $u_{TEST}$  重复该测试
8. 将最终认可的测试值指定为最大输入值  $u_{MAX} = u_{TEST}$
9. 使用  $u_{MAX}$  的宽带激励在自由场条件下确定评估点 (例如, 轴上 1 m) 处的 Max SPL。



示例: 测量压缩 (C)、多音失真 (RMD)、脉冲失真 (IDR) 和总声压级与输入电压  $u$  的关系。  $u_{TEST} = 0.1$  V 对于 100 小时耐久性测试和额定最大输入及 Max SPL 来说是一个有意义的测试值, 此时 RMD 超过了允许值  $L_{RMD} = -30$  dB。  $L_C$ 、 $L_{RMD}$  和  $L_{IDR}$  的性能限制取决于特定的目标应用, 并应为典型的终端用户提供最大的收益成本比。

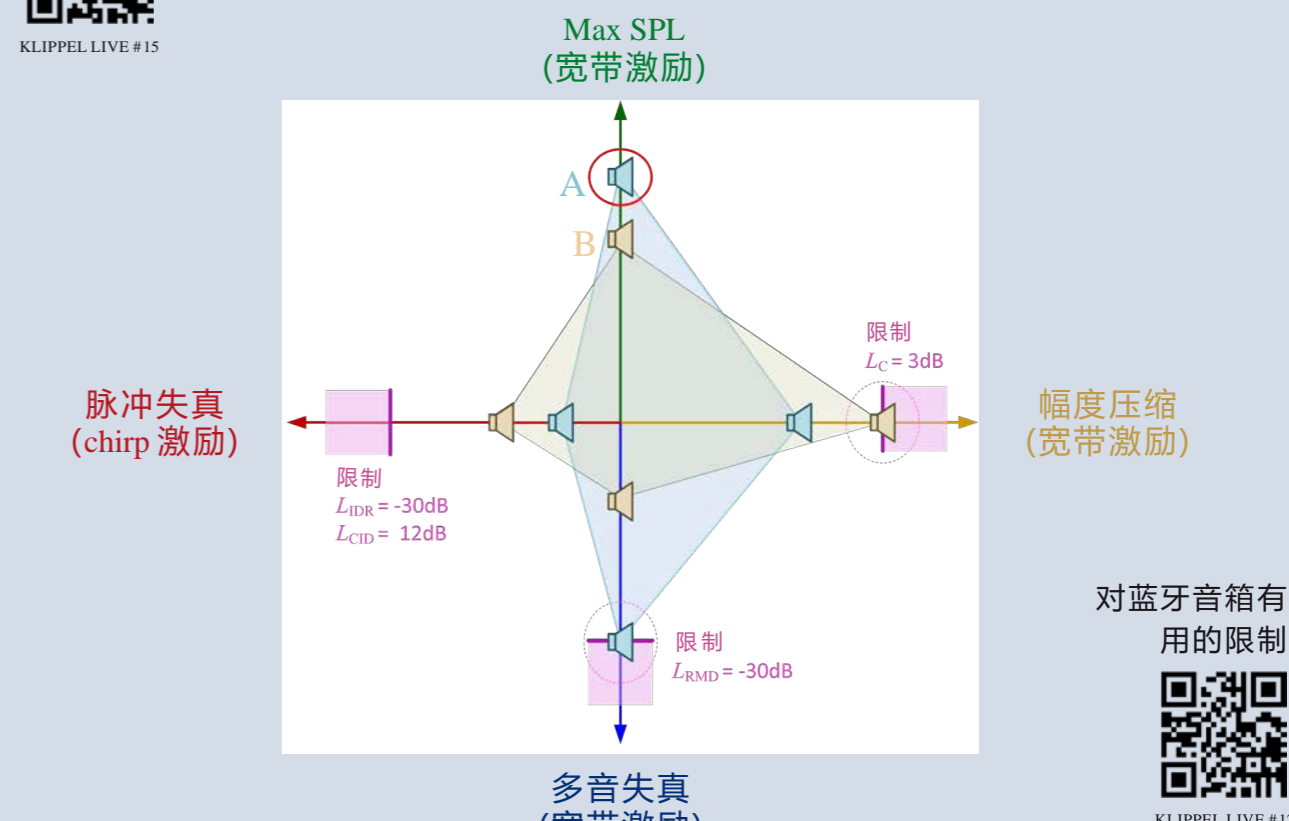


### 音频产品的基准测试

Max SPL 特性指标对于评估高振幅时的扬声器系统起着重要作用, 其中发热和非线性失真限制了最大输出。下表比较了对音频产品进行基准测试的三种方法:

	常规 Max SPL 处的基准测试	通过额定 Max SPL 进行基准测试	个别 Max SPL 处的基准测试
目标	给定 Max SPL 的最佳音频性能	可接受音频性能的最高 Max SPL	Max SPL 和音频性能的最佳组合
Max SPL	定义为目标要求	根据目标音频性能进行额定	根据背景信息进行额定
基准测试决策	基于描述音频性能的基本指标	单值 (Max SPL) 简化排行	需要以 Max SPL 换取音频性能
优点	Max SPL 在产品开发生命周期	可应用于任何产品	对客户来说是很少的测试工作量
典型应用	供应商和系统集成商之间的 OEM 业务	Max SPL 很重要的 (专业级) 音频设备	基于供应商的数据表进行基准测试

示例: 该图展示了第二种方法“通过额定 Max SPL 进行基准测试”应用于两个无线音箱 (A 和 B)。



[1] Sound System Equipment - Part 21: Acoustical (output based) Measurements. (音响系统设备 - 第 21 部分: (基于输出的) 声学测量). IEC, 60268-21:2018.

[2] Sound System Equipment - Part 23: TVs and monitors - Loudspeaker systems (音响系统设备 - 第 23 部分 - 电视和显示器 - 扬声器系统). IEC, 60268-23: WD 2021.

[3] W. Klippel, C. Bellmann, „Holographic Nearfield Measurement of Loudspeaker Directivity (扬声器指向性的全息近场测量)“, 141st Convention of Audio Eng. Soc., Los Angeles, Oct. 2016, preprint 9598.

[4] Melon, et al., „Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms (普通房间内超低音扬声器测量方法的评估)“, J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127(1), 256-263.

[5] C. Bellmann, W. Klippel, „Fast Loudspeaker Measurement in Non-Anechoic Environment (非消声环境下的快速扬声器测量)“, 143rd Convention of Audio Eng. Soc., New York, Oct. 2017, preprint 9825.

[6] W. Klippel, Creating Audio Products with Maximum End-User Value (创建具有最大终端用户价值的音频产品). J. Audio Eng. Soc., vol. 68, no. 7/8, pp. 545-558, (2020 July/August).

[7] W. Klippel, „Acoustical Measurement of Sound System Equipment according IEC 60268-21 (符合 IEC 60268-21 标准的音响系统设备的声学测量)“, Webinar, KLIPPEL LIVE