

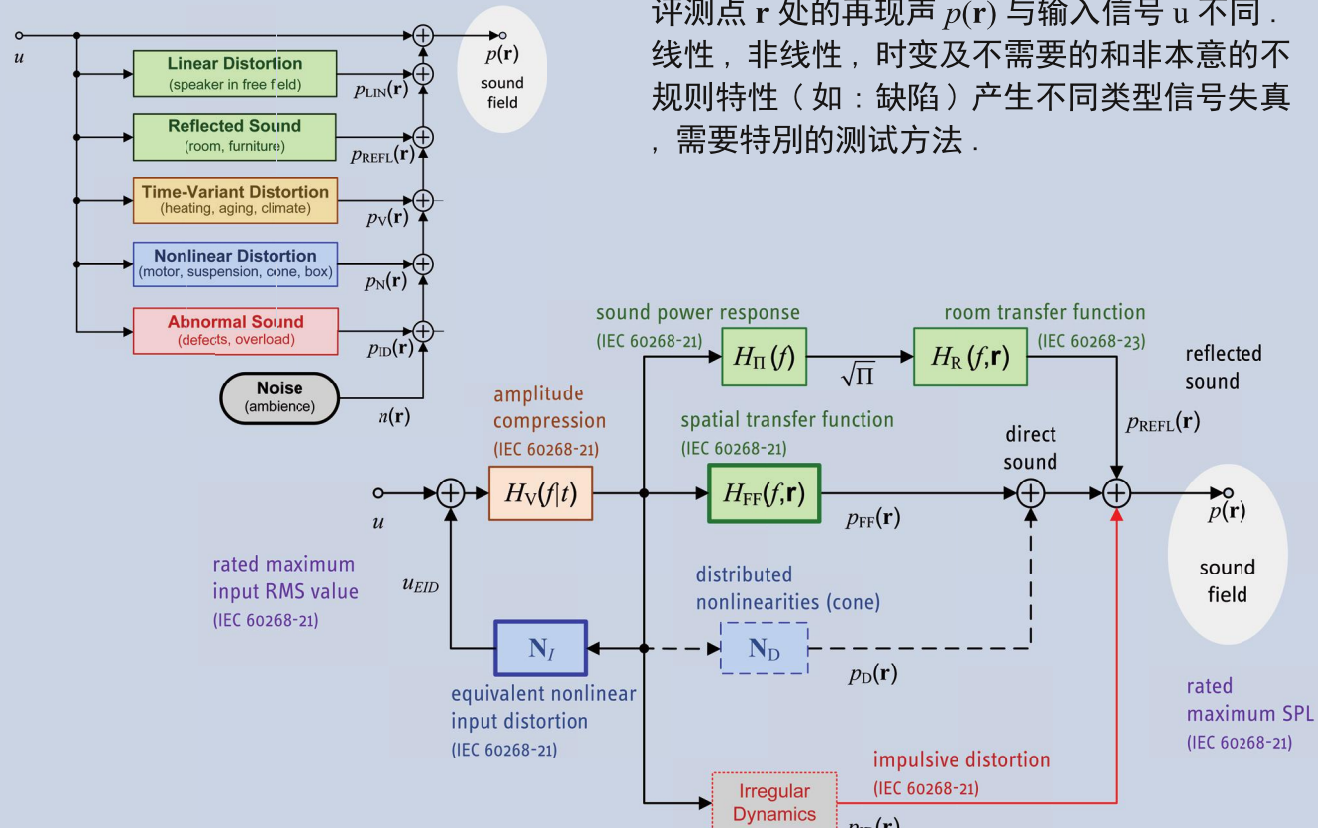
声学测试

基于输出的测试

测试的挑战

- 有源系统结合了信号传输 +DSP+ 放大 + 转换过程
- 支持许多不同特性的输入通道
- 对换能器电学端的访问受限
- 输入电平，电压，电输入功率变得不太重要
- 评测近场和远场的三维声输出用于声场控制
- DSP 产生延迟，时变表现及不规则失真

黑盒子模型

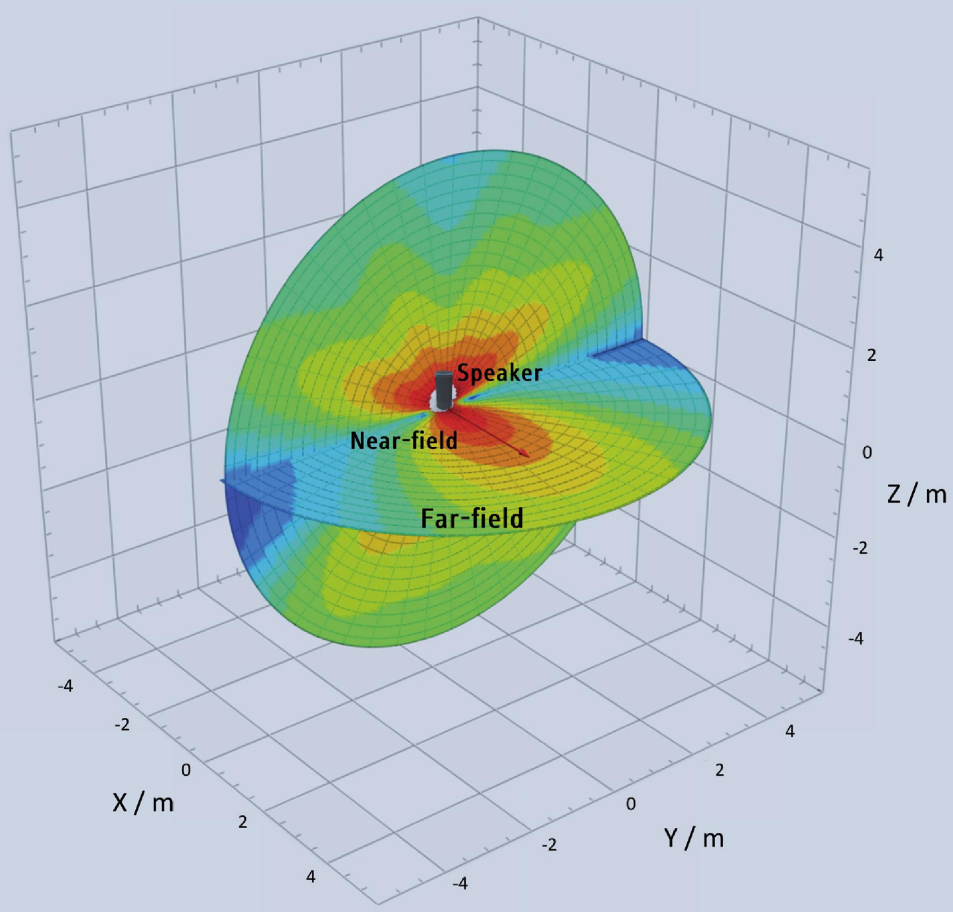


空间传递函数

空间传递函数使用一个球面波展开式对扬声器系统在消音环境下近场和远场评测点 r 处的声压输出 $P_{FF}(f, r)$ 建立模型：

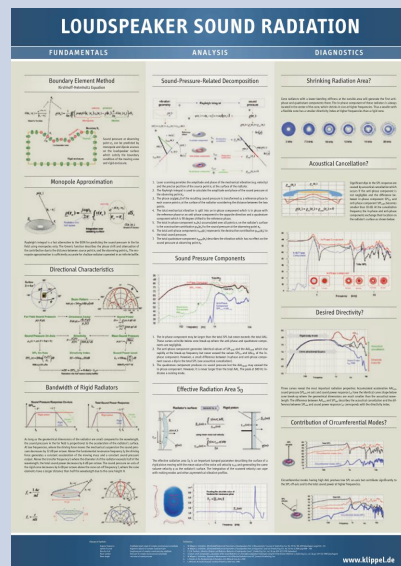
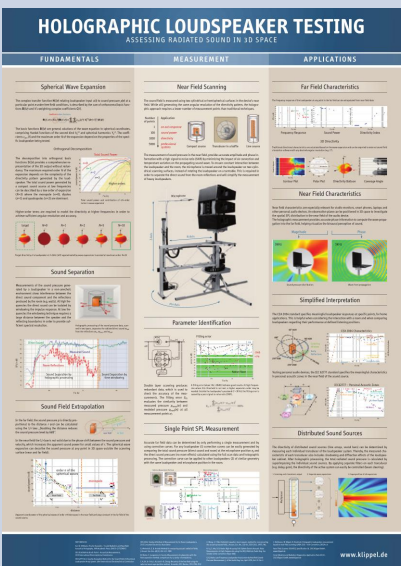
$$H_{FF}(f, r) = \frac{P_{FF}(f, r)}{U(f)} = C(f)B(f, r)$$

该模型的自由参数 $C(f)$ 加权到基函数 $B(f, r)$ (波动方程解) 上。参数 $C(f)$ 可基于对扬声器近场双层扫描面上的声压测试得以确定。全息方法让少量的扫描工作最终提供几乎无限的角度分辨率，同时可分离由环境产生的声反射。拟合误差指标可用来评估直达声测试的精确度。

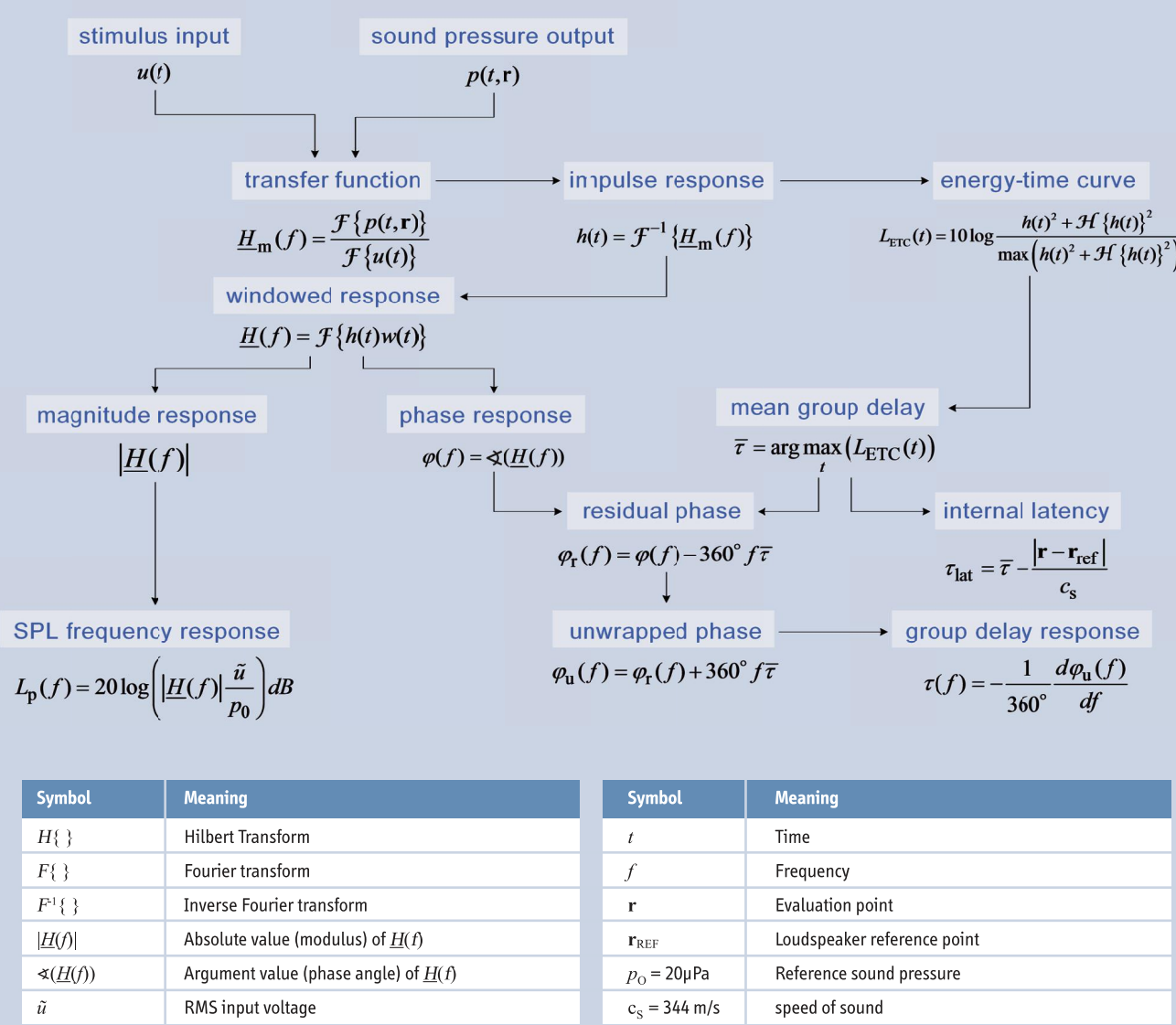


样例：自由场条件下的蓝牙音箱在 5 kHz 处产生的直达在三维空间内的声压分布。

参阅以下专题工程海报了解扬声器全息测试以及重要远场特性指标的更多信息。



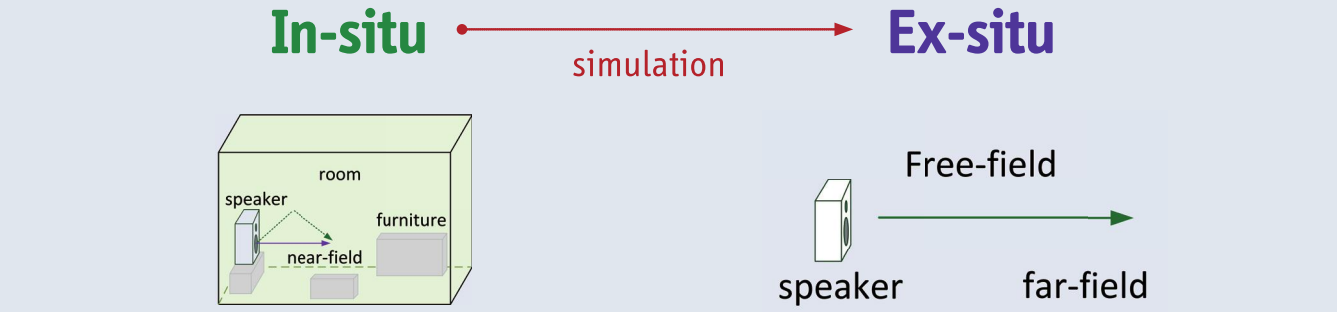
频率响应



Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
$H\{\}$	Hilbert Transform	t	Time
$F\{\}$	Fourier transform	f	Frequency
$F^{-1}\{\}$	Inverse Fourier transform	r	Evaluation point
$ H(f) $	Absolute value (modulus) of $H(f)$	r_{ref}	Loudspeaker reference point
$\angle H(f)$	Argument value (phase angle) of $H(f)$	$p_0 = 20\mu Pa$	Reference sound pressure
$\bar{u}$	RMS input voltage	$c_0 = 344\text{ m/s}$	speed of sound

声学测试条件

仿真的异位条件



普通条件下测试，如：听音室，办公室，生产车间，售后站，目标应用场景等。

优点：

- 展现产品与环境之间的交互现象
- 简单（无需消音房）

理想条件下测试，如在消音室内足够距离处

优点：

- 展现产品本身特性，无房间影响
- 符合标准要求的可比较结果

根据 IEC 60268-21 标准的方法

时间窗技术：

- 去除脉冲响应中的反射信号
- 降低了低频的频率分辨率
- 可应用于单点测试
- 无法提供仿真的远场条件

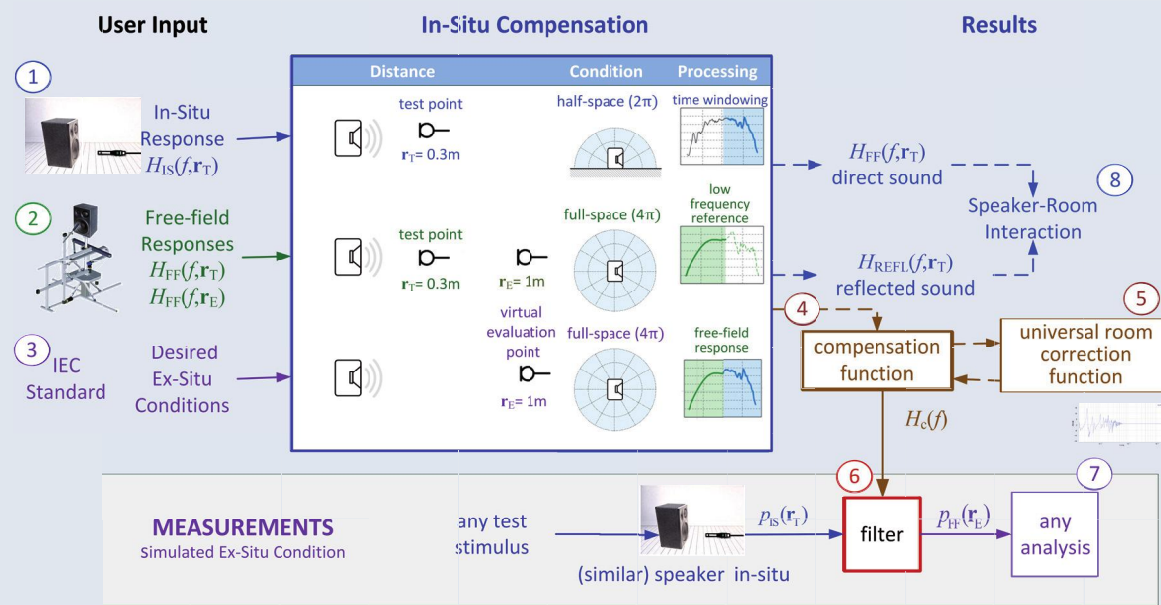
波动展开技术：

- 分离直达声和反射声
- 提供仿真的远场和自由场条件
- 需要近场扫描

原位补偿技术：

- 麦克风信号（幅度和相位）滤波处理
- 补偿函数取决于扬声器和房间特性以及扬声器和麦克风位置
- 提供仿真的远场和自由场条件
- 房间修正函数适用于同类型扬声器
- 需要精确的参考信息（自由场）

原位补偿功能的工作流程



- 在测试点 r_1 测量声压 $p_{IS}(t, r_1)$ 并计算非消音条件下无补偿滤波网络时的传递函数 $H_{IS}(f, r_1)$
- 提供在自由场条件下测得的精确参考响应 $H_{FF}(f, r_1)$ 和 $H_{REFL}(f, r_1)$ ，比如：在消音室或使用近场扫描系统 (NFS)
- 指定评测点 r_r 以及声学标准环境（半空间或全空间）
- 根据 $H_{IS}(f, r_1)$ 和 $H_{FF}(f, r_1)$ 计算出补偿函数 $H_C(f)$
- 创建通用房间修正曲线并应用于同类型喇叭（无需参考）
- 使用补偿函数 $H_C(f)$ 对测得的声压 $p_{IS}(r_1)$ 进行滤波处理，得到模拟标准条件下的直达声声压 $p_{FF}(t, r_r)$
- 对 $p_{FF}(t, r_r)$ 执行任意分析来测得模拟标准条件下的其它特性指标（如：THD）
- 检查反射声传递函数 $H_{REFL}(f, r_1)$ 来评测喇叭与房间之间的交互

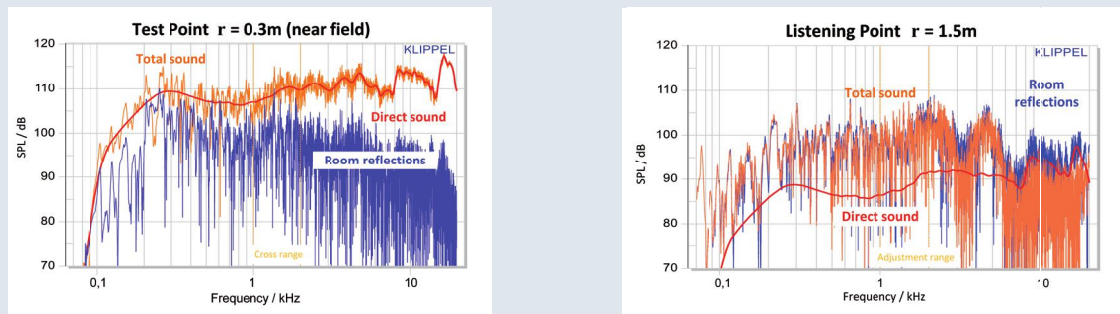
使用近场扫描 (NFS) 得到的参考数据，有三种不同的原位补偿方案来产生仿真的远场和自由场条件

Schemes	Full Compensation with Full Reference	Full Compensation with LF-reference	LF-Compensation with LF-reference
Compensation filter			
Reference data	for all frequencies	for all frequencies	for low frequencies
Scanning Effort (for accurate reference)	normal NFS (> 20 min)	short NFS (> 7 min)	short NFS (> 7 min)
Acoustical Requirements	any condition (room, clamping, positioning)	any condition (distance to boundaries $d > 1\text{ m}$)	free-field condition ($f > 1\text{ kHz}$)
Spectral Resolution	not limited (no window applied)	not limited (windowing $f > 500\text{ Hz}$)	not limited (no window applied)
Universal (room) Compensation for similar DUTs	any amplitude response	amplitude + phase	amplitude + phase
Example	end-of-line test box	office, workshop	semi-anechoic room

扬声器 – 房间交互

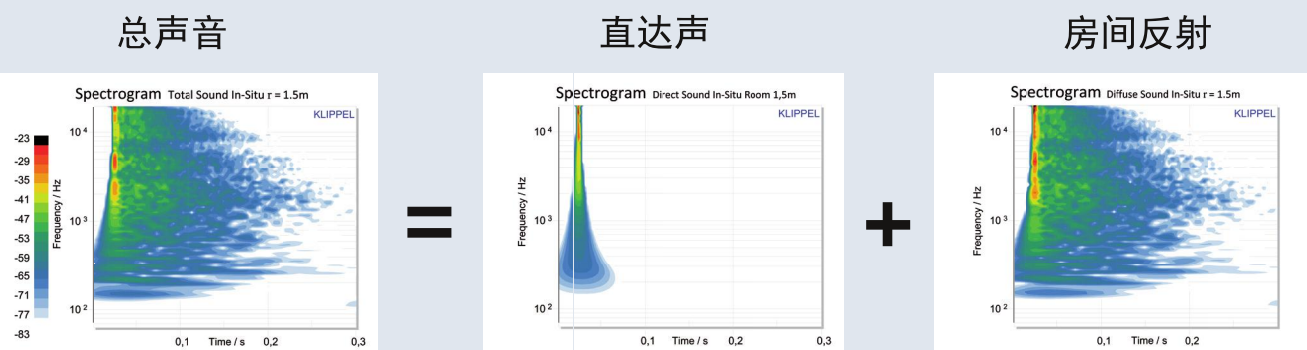
现场补偿模块 (ISC) 可将目标环境（如：房间，汽车等）下测试点 r_1 处总噪声输出的非音传递函数 $H_{NA}(f, r_1)$ 分解为 $H_{FF}(f, r_1)$ 和 $H_{REFL}(f, r_1)$ ，分别对应地代表直达声和房间反射。

样例：办公环境下蓝牙音箱的两点测试



解读：上左图显示的是在短距离 $r = 0.3\text{m}$ （桌子上的测试点）处的总声音及各成分的传递函数，直达声主导了总声输出。右图显示的是较远距离 $r = 1.5\text{m}$ （听音点）处的测试结果，听音点处房间反射变为主导因素并在整体频响上产生明显变化。

下图的声谱图显示的是听音点处总声音和各信号成分脉冲响应的时 - 频率分析结果（小波分析）。桌面和墙面产生了大量的早期反射。平均混响时间 $T_{60} = 0.2\text{ s}$ 的房间产生随时间平滑衰减的房间模式。



最大声压级

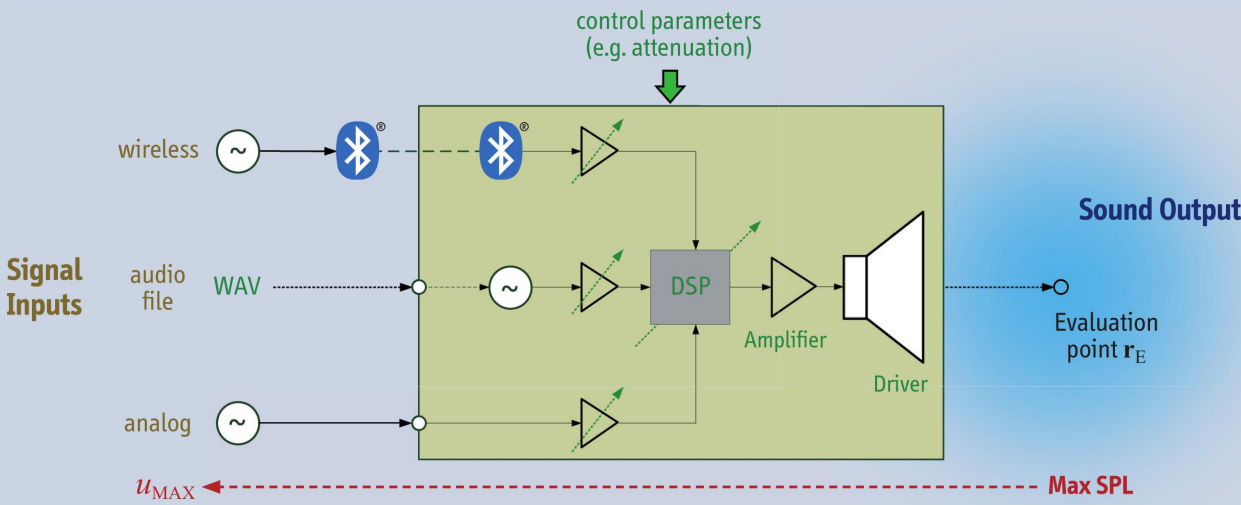
参照 IEC 60268-21 的最大声压级

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
- 制造商需在指定测试条件下（如：激励，位置，环境）额定该最大 SPL
- 制造商需确保产生最大 SPL 的激励在 100 小时的功率测试过程中不会损坏设备
- 制造商根据特定应用的要求确定产品在最大 SPL 时的物理和感知音频性能

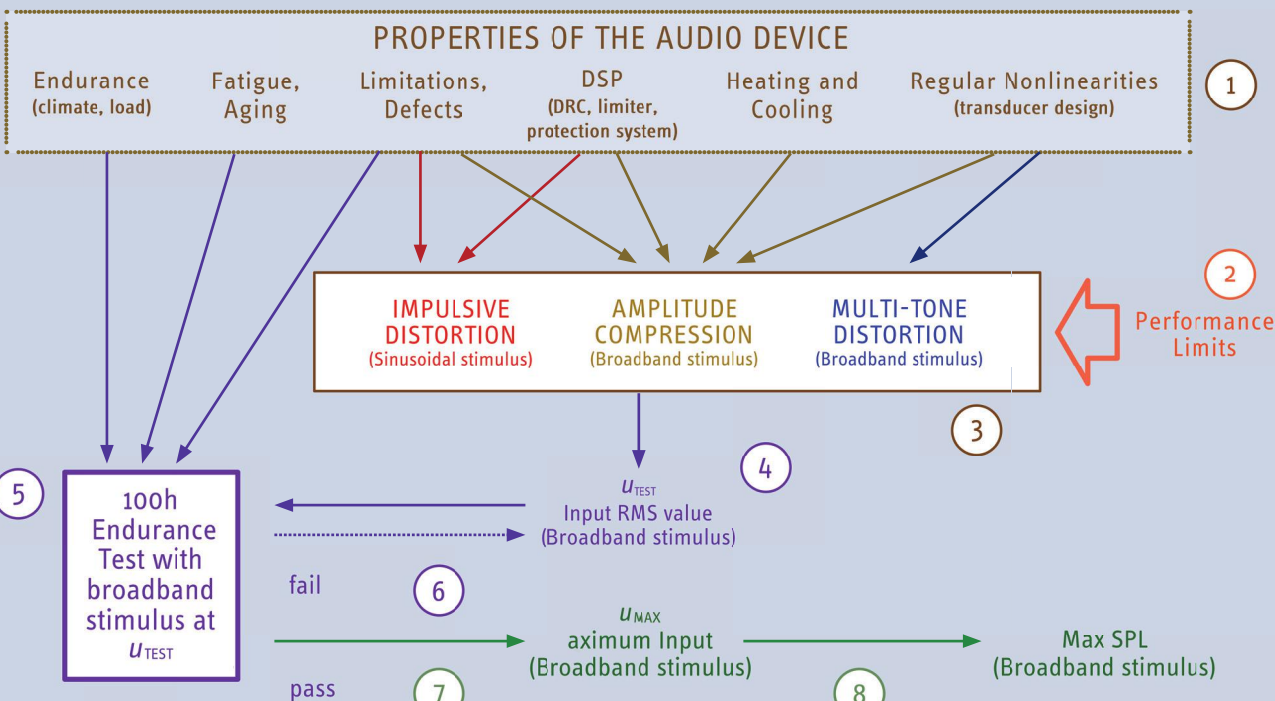
好處：

- 最大声压级 (Max SPL) 可用于校准任意输入通道以及针对所选择的控制参数参数（如：音量）确定最大输入值 (u_{MAX})
- 最大声压级 (Max SPL) 对于工程人员，市场人员和最终用户都是有意义的

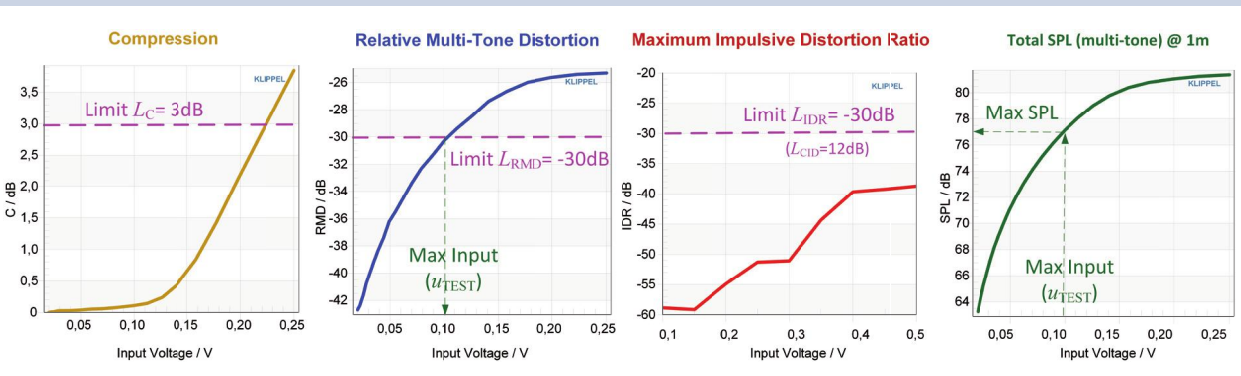


实践中额定最大声压级

- 收集背景信息（如：设计方案，目标应用）
- 针对可允许的信号失真确定性限制
- 测试幅度压缩，非线性失真与输入有效电压 u 之间的关系
- 寻找一个宽带激励有效电压 u_{TEST} ，作为对应产生最大 SPL（考虑性能限制）的最大输入有效电压 u_{MAX}
- 对至少一个 DUT 施加宽带激励电压 u_{TEST} ，进行 100 小时的耐久性测试
- 检查耐久性测试后的 DUT 特性是否符合技术规格；如不合格，则用较低的电压 u_{TEST} 重复这个测试
- 将测试通过的激励电压赋予最大输入电压， $u_{MAX} = u_{TEST}$
- 在自由场下使用 u_{MAX} 宽带激励电压在评价点处（如：轴向 1 米）确定最大 SPL



样例：压缩 (C)，多频失真 (RMD)，脉冲失真 (IDR) 以及总体 SPL 等指标在不同的输入电压 u 下进行测试。在对 100 小时耐久性测试的，标定最大输入和最大输出 SPL 时有意义的电压 $u_{TEST} = 0.1\text{ V}$ 激励时，RMD 超出了可接受的限值 $L_{RMD} = -30\text{ dB}$ ，性能限制 L_C ， L_{RMD} 以及 L_{IDR} 取决于特定应用场景，应为典型的最终用户提供最大的收益 - 成本比。

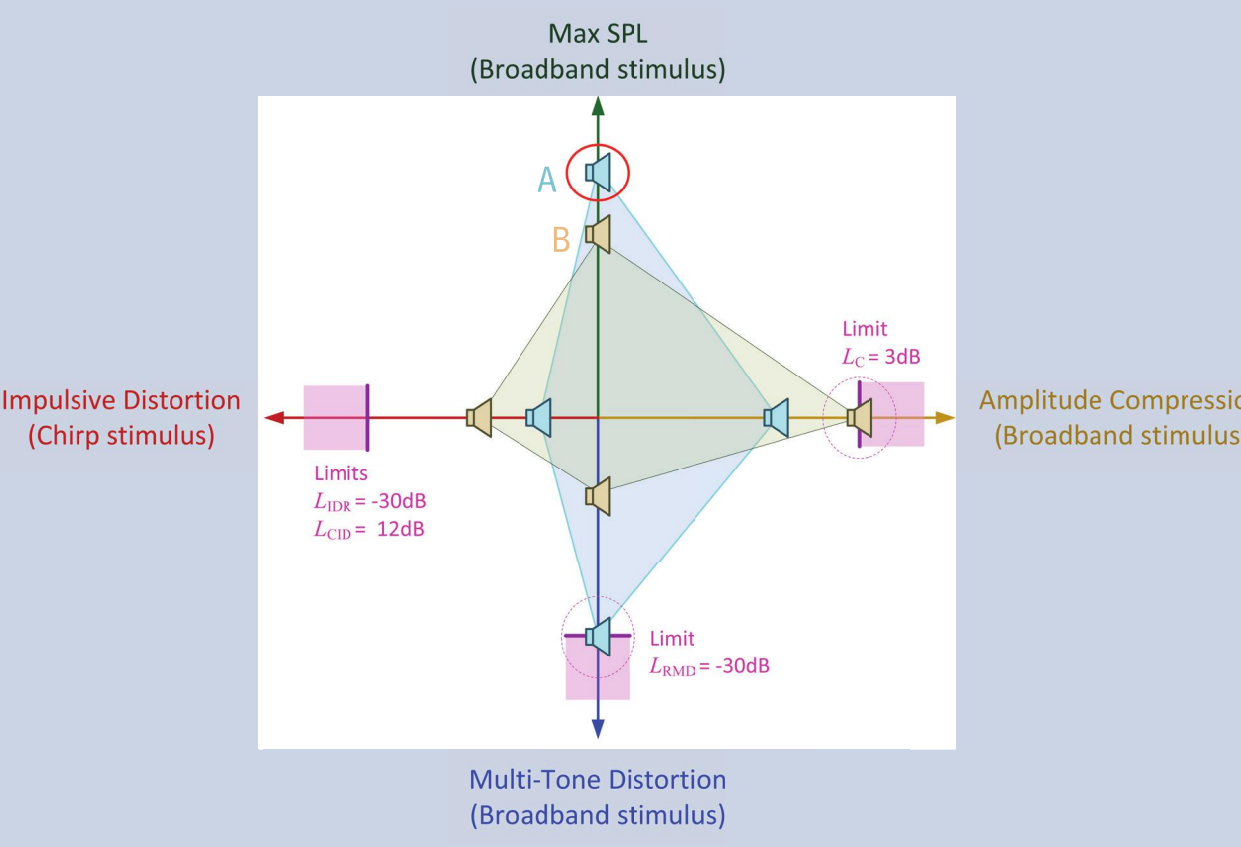


音频产品的基准测试

特性最大声压级指标在评价扬声器系统大幅度时的性能扮演了重要的角色，发热和非线性失真限制最大输出。下表比较了三种不同的音频产品基准测试方法：

	Benchmarking at Common Max SPL	Benchmarking by Rating Max SPL	Benchmarking at Individual Max SPL
Target	Best audio performance for given Max SPL	Highest Max SPL with acceptable audio performance	Best combination of Max SPL and audio performance
Max SPL	Defined as target requirement	Rated based on target audio performance	Rated based on background information
Benchmarking Decision	Based on essential metrics describing audio performance	Single value (Max SPL) simplifies ranking	Requires trading Max SPL for audio performance
Benefit	Max SPL is defined before product development begins	Can be applied to any product	Minimum test effort for customer
Typical Application	OEM business between supplier and system integrator	Audio equipment (professional) where Max SPL is important	Benchmarking based on supplier's datasheet

样例：下图展示了第二种通过额定最大 SPL 的基准分析法，应用于两个无线音箱 (A 和 B)



- Sound System Equipment - Part 21: Acoustical (output based) Measurements, IEC 60268-21:2018
- Sound System Equipment - Part 23: TVs and monitors - loudspeaker systems, IEC 60268-23: WD 2021

- W. Klippel, C. Bellmann, „Holographic Nearfield Measurement of Loudspeaker Directivity,“ 141st Convention of Audio Eng. Soc., Los Angeles, Oct. 2016, preprint 9598
- Melon, et. al., „Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms,“ J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127(1), 256-263

- C. Bellmann, W. Klippel, „Fast Loudspeaker Measurement in Non-Anechoic Environment,“ 143rd Convention of Audio Eng. Soc., New York, Oct. 2017, preprint 9825
- W. Klippel, Creating Audio Products with Maximum End-User Value, „J. Audio Eng. Soc., vol. 68, no. 7/8, pp. 545-558, (2020 July/August.)

- W. Klippel, Acoustical Measurement of Sound System Equipment according IEC 60268-21“, Webinar, KLIPPEL live