

训练 8

扬声器指向性测试

1. 训练目标

- 了解评估扬声器方向性的必要性
- 介绍扬声器全息测量和声场分离技术的基本理论
- 将近场扫描技术应用于扬声器
- 解读近场扫描的结果
- 培养进行实际测量的技能

2. 实验要求

2.1. 预备知识

在开始本次训练前建议先完成训练 #2 “扬声器振膜的振动与辐射行为”。

2.2. 最低要求

本次训练不需要使用完整的 KLIPPEL 测量硬件，只需要一个 Klippel 数据库 (.kdbx) 中提供的测量结果。从 www.klippel.de/training 下载测量软件 dB-Lab 并将其安装在 Windows 电脑上，以此来打开提供的数据库即可。

2.3. 可选要求

如果学员有 KLIPPEL 测量系统，建议能使用指导者或者其他实验者提供的扬声器进行更多的测试。为了能完成这些测试，可能需要以下的软件和硬件：

- Klippel Robotics
- KLIPPEL Analyzer (DA2 或者 KA3)
- 近场扫描仪 (NFS)
- 功放
- 麦克风

3. 训练过程

- 阅读后面的理论部分以获得本次训练所需的知识。
- 观看演示视频以学习测试的实践部分。
- 回答准备问题以检查对理论的理解。
- 依照步骤，解读数据库中的结果并且离线回答多选问题。
- 上传答案到匿名评分系统 www.klippel.de/training。
- 收到一封包含有 **Certificate with high distinction, distinction** 或者 **credit** 的证书 (根据表现进行评分)。
- 在有硬件的条件下完成一些可选测量。

4. 介绍

如今，家庭娱乐、虚拟现实、移动设备、汽车行业以及专业音响领域或者和其他应用场景中对再现声音的音质要求越来越高。本次训练侧重于讨论音频设备向 3D 空间辐射直达声到不同方向（角度）和距离（近场和远场）。本部分简要介绍了测量声压分布所需的理论基础知识和实用方法，如图 4.1 所示。

在低频率下，可以使用集总参数模型来模拟喇叭的驱动单元。喇叭终端处的电激励信号（电压 u 和电流 i ）产生电动力 F_{coil} 。该力驱动着由振动质量 M_{ms} 、悬挂系统劲度 K_{ms} 和机械阻力 R_{ms} 表示的机械元件，并因此产生了音圈速度 v_{coil} 。电激励信号（电压 u ）和机械信号（速度 v ）描述了一维信号路径中的音频信号到振膜的传输（训练 1）。

在较高频率处，需要包含大量分布参数和状态变量的模型来描述振膜和悬挂系统的模态振动（训练 2）。

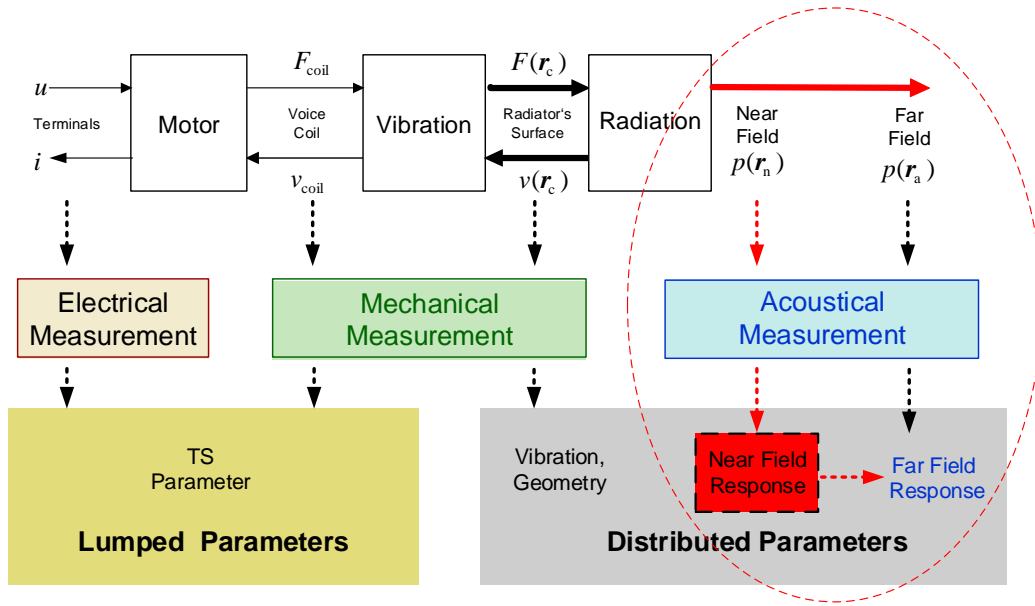


图 4.1 扬声器的测试过程 [1]

在辐射表面上的任何点 r_c 处的法向速度 $v(r_c)$ 分别在近场和远场产生声压值 $p(r_n)$ 和 $p(r_a)$ 。本次训练主要侧重于近场和远场的声学测量，如图 4.1 所示。

4.1. 扬声器辐射的直达声

声音是介质（例如空气）的振荡，其产生的压力变化如波一般远离其源传播。声速 c 取决于介质的静态空气压力、密度（或湿度和温度）。声压即是总压力与静止压力之间的瞬时值之差，其比密度或温度波动更容易测量[3]。其中一个重要特性是声压级，由 L_p 或 SPL 表示，定义为：

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

此处参考压力为 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ 。

齐次波动方程(2)描述了介质中声压的时间和局部导数之间的关系[4]。

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

根据等式(2)，声波以声速 c 向各个方向传播。

在低频处，一个密闭式扬声器系统可以近似成一个点源（单极子），该点源在自由场条件下产生球面波并满足球坐标中的一维波动方程：

$$\frac{\partial^2(pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(pr)}{\partial t^2}$$

(3)

等式(3)中的距离 r 和压力 p 的乘积以声速 c 远离声源传播。因此，声压的幅度与距离 r 成反比衰减：

$$|p(r)| \propto \frac{1}{r}$$

(4)

4.2. 远场条件

如果观察点位于声源的远场（距离 r 大于一个临界值 r_{far} ），那么此所谓的 $1/r$ -法则也适用于开口式扬声器系统或者其他任意形状的声源。该临界距离 r_{far} 取决于正弦声波分量的波长 λ 和声源的最大几何尺寸 l ：

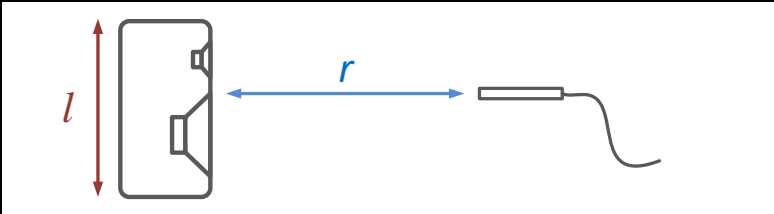
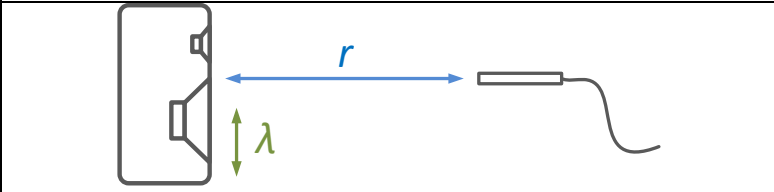
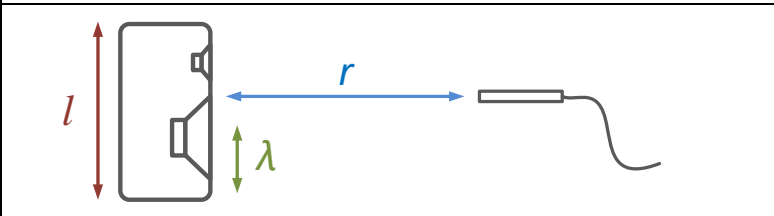
	条件 1: $\frac{r_{\text{far}}}{l} \gg 1$	(5)
	条件 2: $\frac{r_{\text{far}}}{\lambda} \gg 1$	(6)
	条件 3: $\frac{r_{\text{far}}}{l} \gg \frac{l}{\lambda}$	(7)

图 4.2 远场条件

条件 1 要求扬声器的尺寸小于测试距离 r 。条件 2 要求距离大于波长，这是针对低频的一个临界条件。条件 3 是针对大型扬声器系统（如线阵列、条形音响和音板）。[8]

对于在家庭应用中使用的典型扬声器，声压 p 和距离 r 之间的线性关系（ $1/r$ -法则）适用于距离 $r > 2\text{m}$ 。在更近的距离处，声压 p 将以较高的斜率上升，这是由于振膜的尺寸和系统中使用的单体数量产生了近场特性。

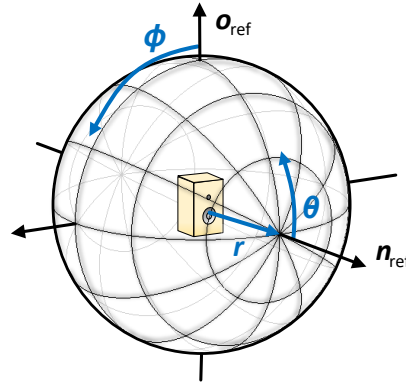


图 4.3 坐标系

如果给出了在距离 r_1 、极角 θ 和方位角 ϕ 处的复声压 $\underline{P}(f, r_1, \theta, \phi)$ ，则可以通过以下方式计算另一距离 r_2 处的声压：

$$\underline{P}(f, r_2, \phi, \theta) = \underline{P}(f, r_1, \phi, \theta) \frac{r_1}{r_2} e^{-jk(r_2 - r_1)} \quad (8)$$

其中波数 $k = 2\pi f / c$ 。

在远场中，声压 p 和粒子速度 v 同相，并且特定声阻抗是实数 $Z_a \approx \rho c$ 。这里没有无用功分量[6]，声波传播的声功率 Π 可以计算为球面 A 上强度 $I = pv$ 的积分，如下：

$$\Pi = \oint pv \, dA \quad (9)$$

由 L_Π 表示的声功率级以分贝（dB）给出：

$$L_\Pi = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (10)$$

其中参考值 $P_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W}$ 。

在自由场条件下定义的声辐射行为将不存在由边界（例如房间墙壁）引起的声反射、衍射和驻波的影响。

5. 传统测量技术

5.1. 无响条件下的测量

在消声室中测量扬声器和麦克风，其中所有边界都覆盖着（全空间）吸声材料以减少室内反射，因此可以（高于截止频率）提供一个大致自由场条件，如图 5.1 所示。

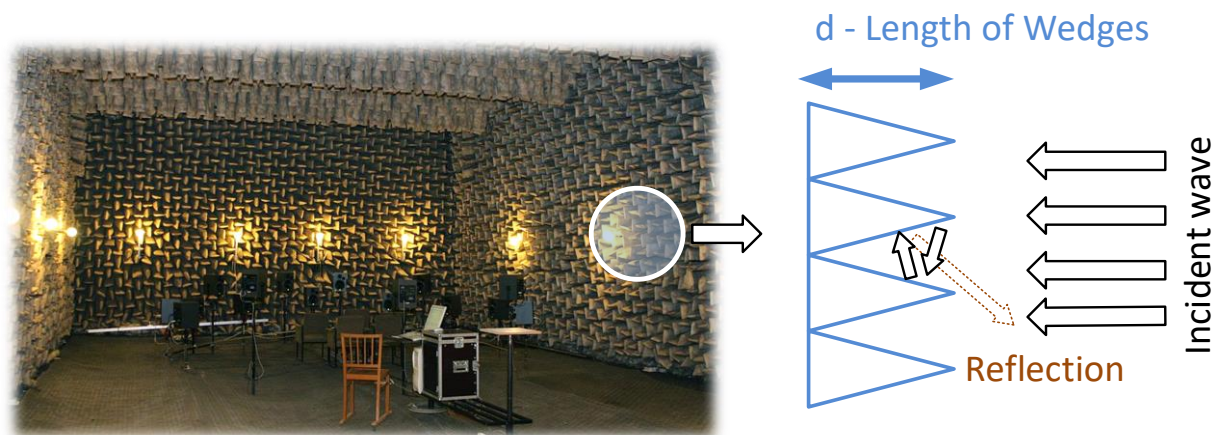


图 5.1 消声室 (德累斯顿工业大学)

一个有趣的替代方案是半消声室，其地板有意地由硬质材料制成以产生反射表面并简化扬声器、转盘和麦克风的移动和放置。室内的温度和湿度需由空调系统进行控制。

图 5.1 的右侧标示出了使用岩棉或其他高度多孔材料的吸声体截面图，其以楔形形状安装在墙壁上，这种配置将在高频处（波长远小于楔形体的长度 d ）提供足够的吸收。在 $d < \lambda/4$ 的低频率处，来自房间墙壁的反射与直达声叠加并在测量的传递函数 $H(f)$ 中产生误差。

5.1.1. 测量设置

在自由场条件下的远场中，声压 $p(t, r, \phi, \theta)$ 是在定义的距离 $r > r_{\text{far}}$ 、极角 θ 和方位角 ϕ 处（根据图 4.3）测量的。此时扬声器由分析仪和功放提供的宽带激励信号 $u(t)$ 在感兴趣的频率处进行激励。

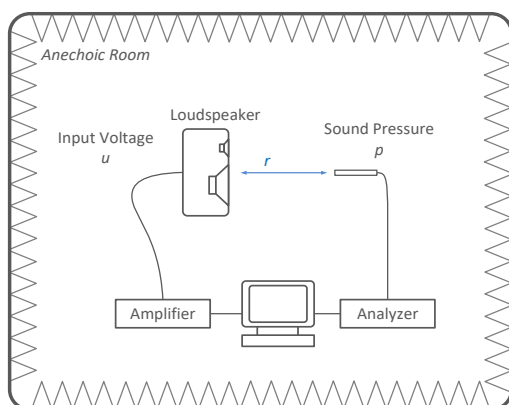


图 5.2 轴上测量

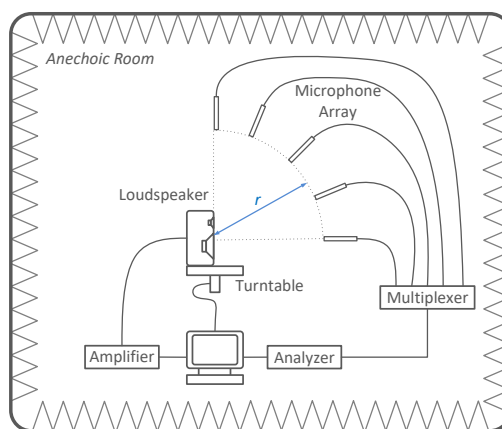


图 5.3 多点处的方向性

图 5.2 显示了如何评估参考轴上辐射声压 $p(t, r, \theta = 0^\circ)$ 的一种测量设置，该轴上响应可用于描述大多数特定应用场景下的声压输出，被测扬声器和麦克风放置于固定

位置。图 5.3 描述了一个多点测量的设置。可以使用转台或其他机器人使扬声器在极角 θ 和方位角 ϕ 上转动，同时使用麦克风阵列来测量正交角度下的声压。麦克风之间的间隔和转台运动的增量确定了测量点数和方向性数据的角分辨率。完整球面 (4π) 上的测量需要在角分辨率和测量点数之间进行折衷：

球面上 (4π) 的角分辨率	测试点数
5 度	2592
2 度	16200
1 度	64800

大多数常规测量不提供高于 2 度的角分辨率，并且假设一个或两个平面是对称的以减少测量时间。

5.1.2. 方向传递函数

本章节概述了从扬声器输入电压 $u(t)$ 到麦克风位置处声压输出 $p(t, r, \phi, \theta)$ 之间线性传递函数计算的后处理过程。

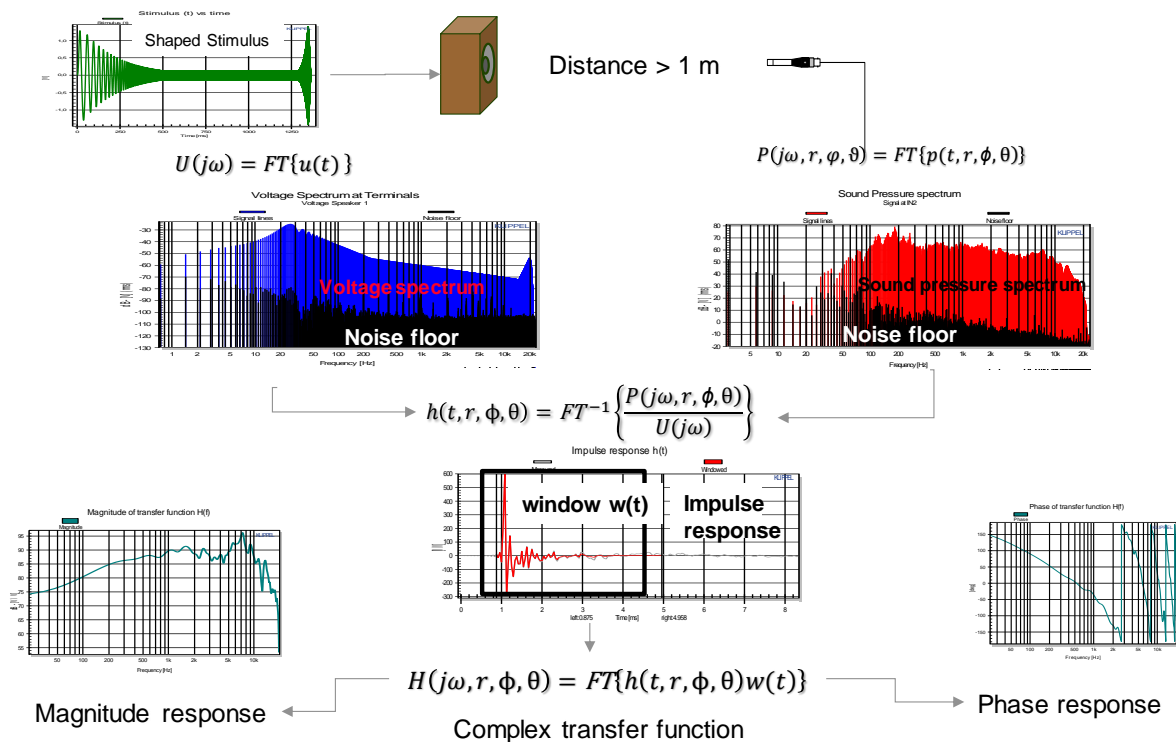


图 5.4 复传递函数计算概述[10]

第一步是计算由分析仪产生的输入信号 $u(t)$ 的复合谱 $U(j\omega)$ 和由麦克风测量的声压谱 $P(j\omega, r, \phi, \theta)$ 。为保证传递函数测量的准确性需要有足够的信噪比 (SNR)，图 5.4 中示例出了频率低于 30 Hz 的声压信号 SNR 不足的情况。可以通过在低频处对激励信号进行更高幅度整形来改善 SNR，另外，如果使用的是诸如正弦啁啾此类确定性激励信号，则可以通过声压信号的多次平均来提高 SNR。

第二步则是计算脉冲响应 $h(t, r, \phi, \theta)$ ：

$$h(t, r, \phi, \theta) = FT^{-1} \left\{ \frac{P(j\omega, r, \phi, \theta)}{U(j\omega)} \right\} \quad (11)$$

该计算基于求解复合输出与输入谱之比的傅里叶逆变换。为了将直达声从房间反射中分离出来并且抑制测量噪声，可以在脉冲响应 $h(t, r, \phi, \theta)$ 上应用一个窗函数，加窗后的脉冲响应的傅里叶变换就是方向传递函数：

$$H(j\omega, r, \phi, \theta) = FT\{h(t, r, \phi, \theta)w(t)\} \quad (12)$$

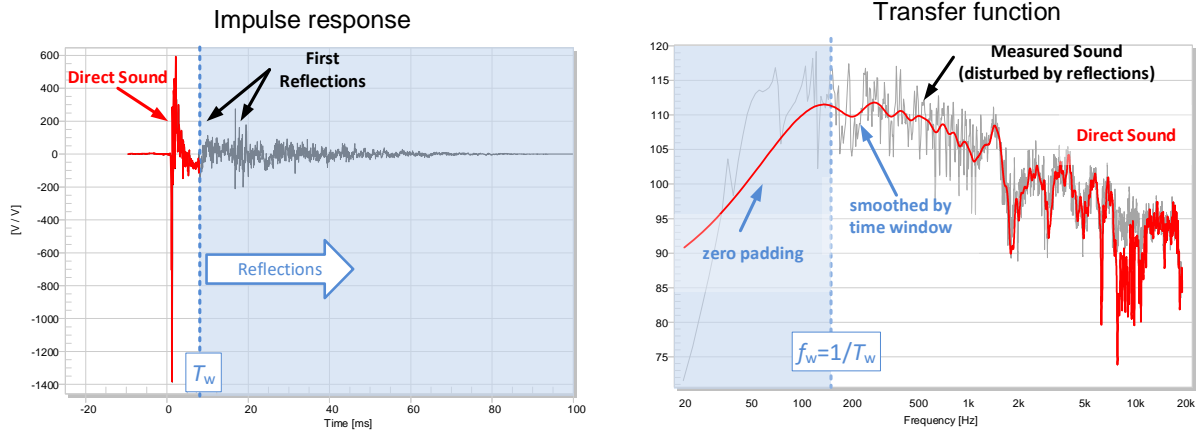


图 5.5 脉冲响应的窗处理

图 5.5 演示了脉冲响应 $h(t, r, \phi, \theta)$ 的时窗处理，以此抑制室内反射来获得较高频率 $f > f_w$ 处的直达声。该临界截止频率 $f_w = 1/T_w$ 取决于时窗 $w(t)$ 的有效长度 T_w 。图 5.5 中的时窗具有平顶区域，产生 $T_w = 7 \text{ ms}$ 的有效时窗长度并降低了真实的频谱分辨率。在低于 $f_w = 150 \text{ Hz}$ 的低频率处，频响中的测量点由零填充产生，并不是真实的测量数据。

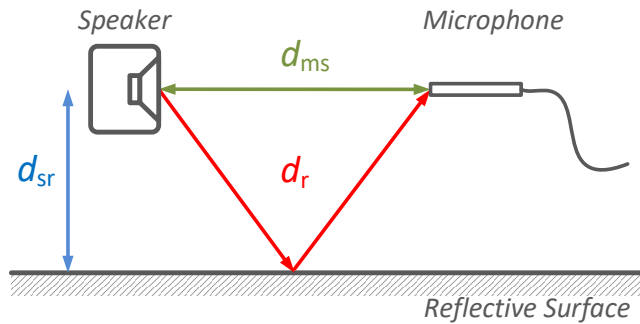


图 5.6 声音在最近的边界进行反射

第一反射距离：

$$d_r = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2} d_{ms}\right)^2 + (d_{sr})^2} \quad (13)$$

d_{ms} 麦克风到喇叭的距离

d_{sr} 喇叭到墙壁的距离

时窗的最大长度 T_w 不能短于无反射时长 T_{\max} ：

$$T_w < T_{\max} = \frac{d_r - d_{ms}}{c} \quad (14)$$

5.2. 远场方向特性

指向性这个术语已经引入用来描述直达声在远场中某一球面上的分布情况，这取决于特定距离 r 处的极角 θ 和方位角 ϕ 。

5.2.1. 方向因子及方向增益

在远场中，DUT 在任意方位角 ϕ 和极角 θ 的复合声压值 $\underline{P}(f, r, \theta, \phi)$ 与由参考角 ϕ_r 和 θ_r 定义的声压值 $\underline{P}(f, r, \theta_r, \phi_r)$ 之比定义了方向因子：

$$\underline{\Gamma}(f, \theta, \phi) = \frac{\underline{P}(f, r, \theta, \phi)}{\underline{P}(f, r, \theta_r, \phi_r)} = \frac{\underline{H}(f, r, \theta, \phi)}{\underline{H}(f, r, \theta_r, \phi_r)} \quad (15)$$

以及由 dB 表示的方向增益:

$$D(f, \theta, \phi) = 20 \log |\underline{\Gamma}(f, \theta, \phi)| \quad (16)$$

在大多数应用场景中, 参考角度 $\phi_r = 0^\circ$ 和 $\theta_r = 0^\circ$ 时描述了垂直于扬声器振膜的参考轴上的轴上响应。[17]

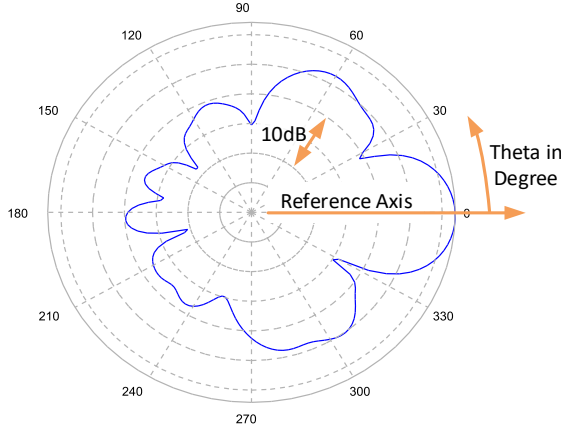


图5.7 极坐标图 (Polar plot)

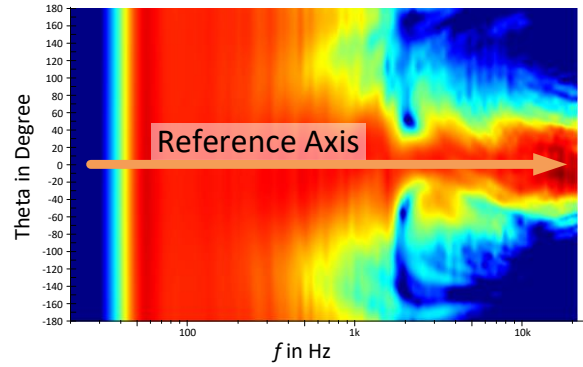


图5.8 等高线图 (Contour plot)

方向增益可用于在极坐标图、等高线图或者气球图中可视化扬声器的波束成形和声压级相对于角度 θ 的衰减情况。

5.2.2. 指向性因子和指向性指数

通过将方向因子的平方在单位球上进行积分, 可以计算出指向性因子 $Q(f)$:

$$Q(f) = \frac{4\pi}{\int_{\Omega} |\Gamma(f, \theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (17)$$

以及以 dB 表示的指向性指数:

$$DI(f) = 10 \log_{10} Q(f) \quad (18)$$

密闭式扬声器在低频处的指向性指数为 $DI \approx 0$ dB, 其对应于一个全向辐射方向图, 即在相同距离 r 处的任意极角 θ 和方位角 ϕ 处都产生了相同的声压级。在较高频率处, 扬声器后侧产生的声压低于在前侧产生的声压, 这便增加了指向性指数。

5.3. 远场测试的限制

远场测量结果的精度取决于以下条件：

1. 所定义的麦克风位置
2. 所定义的 DUT 定位（当转动重型设备时）
3. 转盘的声反射
4. 房间墙壁的早期反射
5. 空气特性（温度、湿度）相对于传播路径的时间和局部变化会影响相位响应（2k 的温度偏差在 5 kHz 时在 5 m 距离处将产生 90°相位误差）
6. 空气对流（风）
7. 环境噪音的影响
8. 足够的角度分辨率

消声室通常提供良好的防风和足够的环境噪音抑制。但是，房间模式在低频处会产生 1-6 dB 的误差，温度会在高频处产生明显的相位误差。此外，传统的测量技术无法检查这些要求并自动检测误差。由于测量数据集中通常没有冗余数据，因此难以识别错误的测量并从后处理中排除这些错误测试点。

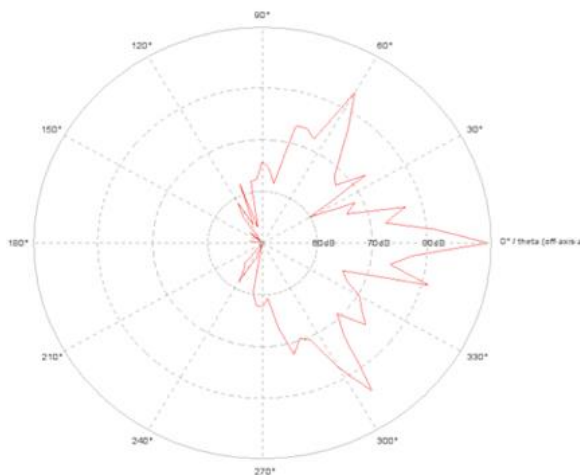


图 5.9 角分辨率为 5°

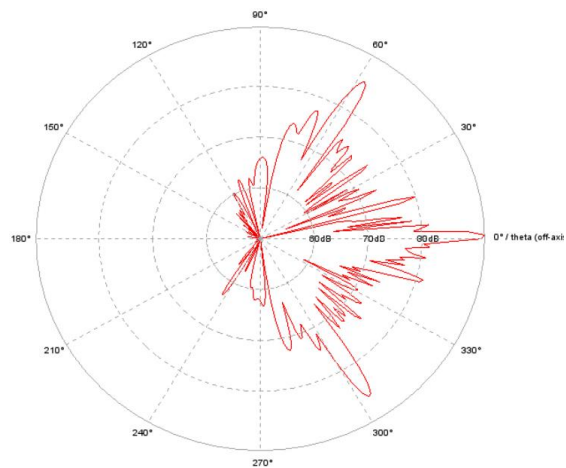


图 5.10 角分辨率为 1°

如果测量中的角分辨率不能应对扬声器的方向复杂性，则测量点之间相位和幅度的插值将会引入明显误差。例如，图 5.9 中所示的以 5°角分辨率测量的极坐标图就不能显示出在 1°分辨率下测量中出现的窄波瓣，如图 5.10，其极坐标图中的一些峰值和谷值完全遗漏了。

6. 近场测试

6.1. 动机

一方面，基于 $1/r$ -法则的简单外推计算通常不适用，另外近场测试还有很多优点：

- 在使用工作室监听器、笔记本电脑、平板电脑、智能手机和一些其他的便携音频设备时，他们的近场特性决定了听者耳朵处的声压。
- 针对条形音箱、专业线阵列和其他大型扬声器须在近场进行测量，因为在现有的消声室里其远场距离 r_{far} 不能实现。
- 近场测量提供良好的信噪比，可减低环境噪声的影响、减少非线性失真的产生以及避免过度的平均（节省时间）。
- 直达声幅值远高于房间反射；直达声将早于房间边界的第一反射到达麦克风，这为通过门控技术或脉冲响应加窗处理来模拟自由场条件提供了良好的条件。
- 空气属性的影响很小。

6.2. 全息近场测试

全息近场测量利用了球坐标[15]表示的一般三维波动方程(2)。该方程的解可以通过球面波展开来描述

$$P(j\omega, r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_{n,m}^{\text{out}}(j\omega) h_n^{(2)}(kr) Y_n^m(\theta, \phi) + \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n c_{n,m}^{\text{in}}(j\omega) h_n^{(1)}(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (19)$$

其有效区域没有边界和声源，如图 6.1 所示。

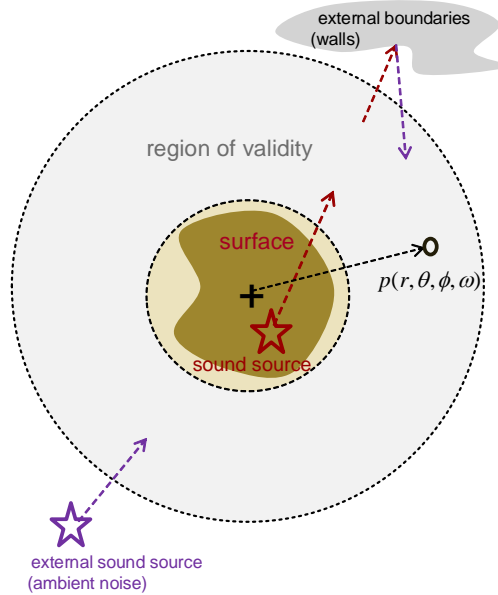


图 6.1 球面波展开

包含第二类 Hankel 函数 $h_n^{(2)}(kr)$ 的第一扩展项表示出射波，包含第一类 Hankel 函数 $h_n^{(1)}(kr)$ 的第二扩展项表示了入射波。Hankel 函数则描述了其与径向坐标 r 的关系。当距离很远时 $r > r_{\text{far}}$ ，任何阶数 n 的 Hankel 函数的绝对值都与 r 成反比衰减（与 $1/r$ -法则相对应）。在两个扩展项中都能找到球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ 则描述了方位角 ϕ 和极角 θ 的关系。

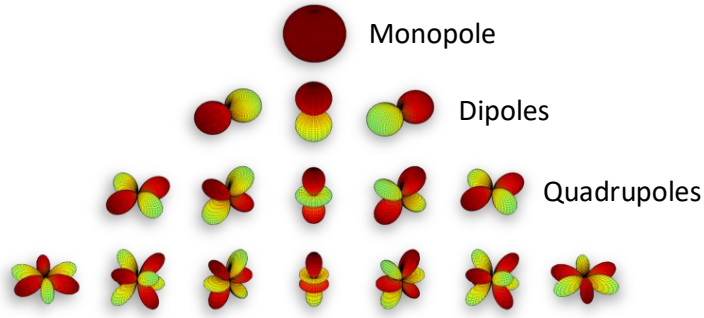


图 6.2 球谐函数 (实部)

球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi) = 1/\sqrt{4\pi}$ 表示具有全向辐射行为的单极子，如图 6.2 所示。一阶球谐函数 $Y_1^{-1}(\theta, \phi)$ 、 $Y_1^0(\theta, \phi)$ 和 $Y_1^1(\theta, \phi)$ 可用于表示球坐标系中任意方向上偶极子的角度方向性。球谐函数是正交的，其和 n 阶的 Hankel 函数一起为球面波展开提供了一整套的基本函数。

系数函数 $c_{n,m}^{out}(\omega)$ 和 $c_{n,m}^{in}(\omega)$ 对基本函数进行加权，并可以看做是球面波的频谱（类似于傅里叶级数的系数函数）。

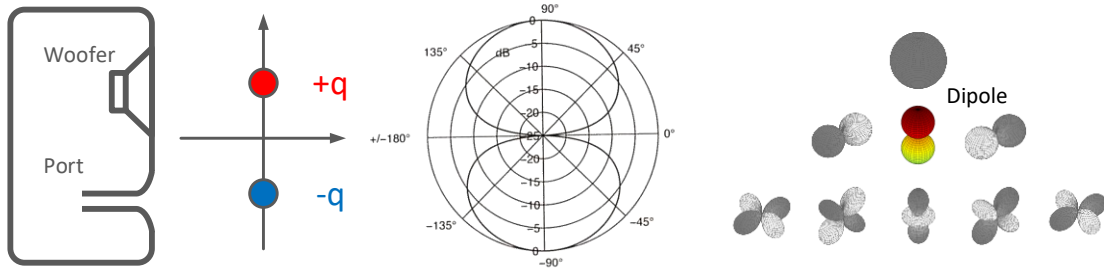


图 6.3 一个开音箱系统的球面波展开（开口谐振频率以下）

如图 6.3 中所示的一个开音箱系统在端口谐振之下表现得像一个偶极子，其开口和振膜产生相同的振幅，但体积速度 q 的符号相反。方向增益的极坐标图将在相反方向上产生两个波瓣，这两个波瓣由垂直于两个单极子之间的线的零点分开。如果开口和低音扬声器放置在 z 轴上且极角 $\theta = 0^\circ$ ，球谐函数 $Y_1^0(\theta, \phi)$ 对应于开音箱系统的方向性，系数 $c_{1,0}^{out}(\omega)$ 则表示了辐射行为。

6.3. 方向传递函数

自由场条件下，扬声器在测试点 \mathbf{r} 处输入电压 $u(t)$ 和输出声压 $p(t)$ 之间的方向传递函数可以表示成等式(19)中仅仅考虑直达声 $p_{Dir}(t)$ 的情况：

$$H(j\omega, \mathbf{r}, \theta, \phi) = \frac{P p_{Dir}(j\omega, \mathbf{r}, \theta, \phi)}{U(j\omega)} = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n C_{mn}(j\omega) h_n^{(2)}(kr) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (20)$$

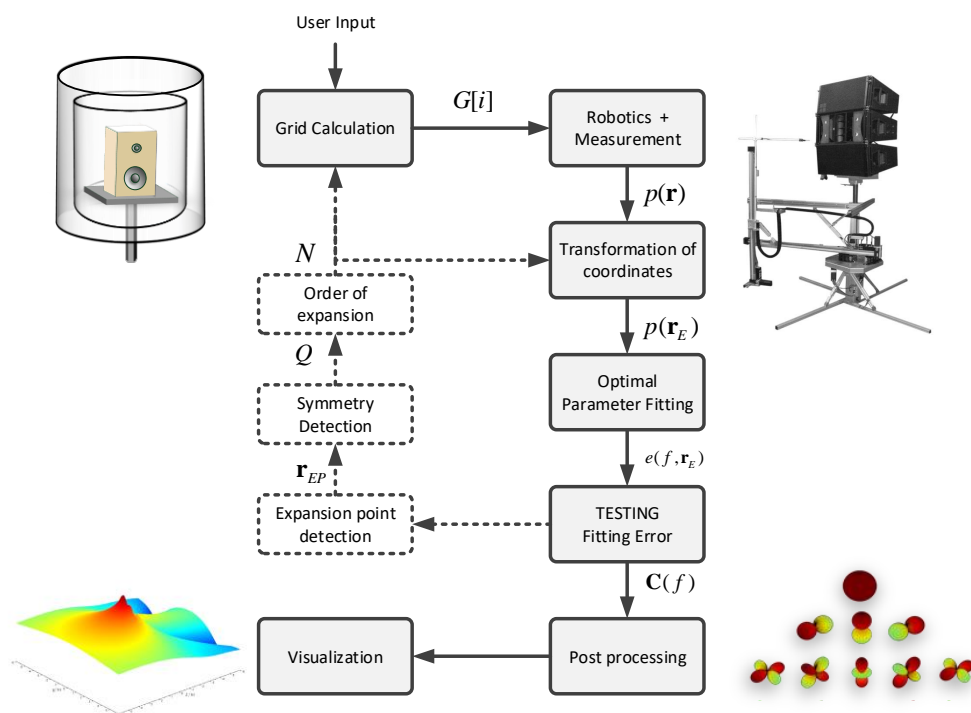


图 6.4 实用测试步骤

6.4. 实用测试步骤

图 6.4 画出了包括以下步骤的测试过程：

1. 如图 6.5 所示，将被测设备（扬声器）放置在测试机器上。
2. 将麦克风手动移至被测设备的上边角以及高音喇叭处以测试重要的方位信息用于计算初始扫描网格 $G[i=0]$ 。此扫描网格包含分布在两个测试面（内部和外部）的所有测试点，双层扫描是场分离技术中分离低频处发射波和入射波的一个基本要求。
3. 在扫描网格 $G[i]$ 上的任一点 \mathbf{r} 处测试输入信号 $u(t)$ 和声压 $p(t, \mathbf{r})$ 之间的传递函数。
4. 开始全息处理，即将测试坐标中的 $p(t, \mathbf{r})$ 转换成由内部坐标系表示的 $p(t, \mathbf{r}_E)$ 。此内部坐标系的原点接近高频的声学中心（高音喇叭位置）并且坐标和扬声器的方位对齐。
5. 通过最小化扫描网格上拟合声压和测试声压之间的均方误差 $e(f)$ ，计算出等式 (19) 中的系数项 $c_{n,m}^{out}(\omega)$ 和 $c_{n,m}^{in}(\omega)$ 。
6. 通过分场技术计算出等式 (20) 中代表扬声器直达声辐射情况的系数 $C_{mn}(j\omega)$ 。
7. 通过可选迭代可以得到基于扩展点位置 \mathbf{r}_{EP} 的一些附加测试点，以便提高角分辨率和最大扩展阶数 N 。
8. 可计算扫描面以外任意一测试点的声压级或者方向传递函数 $H(j\omega, r, \theta, \phi)$ 。通过后处理还可以得到如方向增益、指向性指数和声功率等其他特性参数。

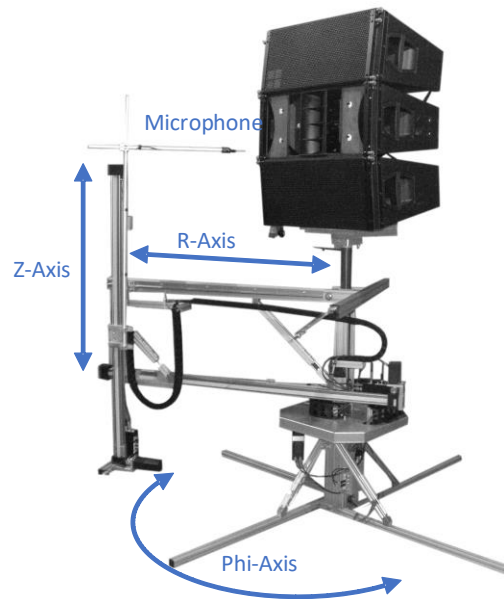


图 6.5 近场扫描仪

6.5. 检查测量的准确性

通过估计的拟合误差 $e(f)$ 可以很容易地检查方向传递函数的准确性。

$$e(f) = \frac{\sum |H(f, \mathbf{r}) - H_{\text{meas}}(f, \mathbf{r})|^2}{\sum |H_{\text{meas}}(f, \mathbf{r})|^2} \cdot 100\% \quad (21)$$

其中，比较了扫描网格 $G[i]$ 中所有测试点 \mathbf{r} 处的拟合响应 $H(f, \mathbf{r})$ 和测试响应 $H_{\text{meas}}(f, \mathbf{r})$ 。

计算误差 $e(f)$ 时需要测试数据集中有一些冗余，也就是说测试点 M 要大于波形展开中未知系数的数量 J 。

$$M \geq J = (N + 1)^2 \quad (22)$$

以下因素可能会造成误差：

- 波形展开的最大阶数 N 太低以致于不能表示扬声器的方向复杂性
- 环境噪声或者较差信噪比（SNR）使测试数据变差
- 在扫描过程中扬声器或麦克风的位置被改变

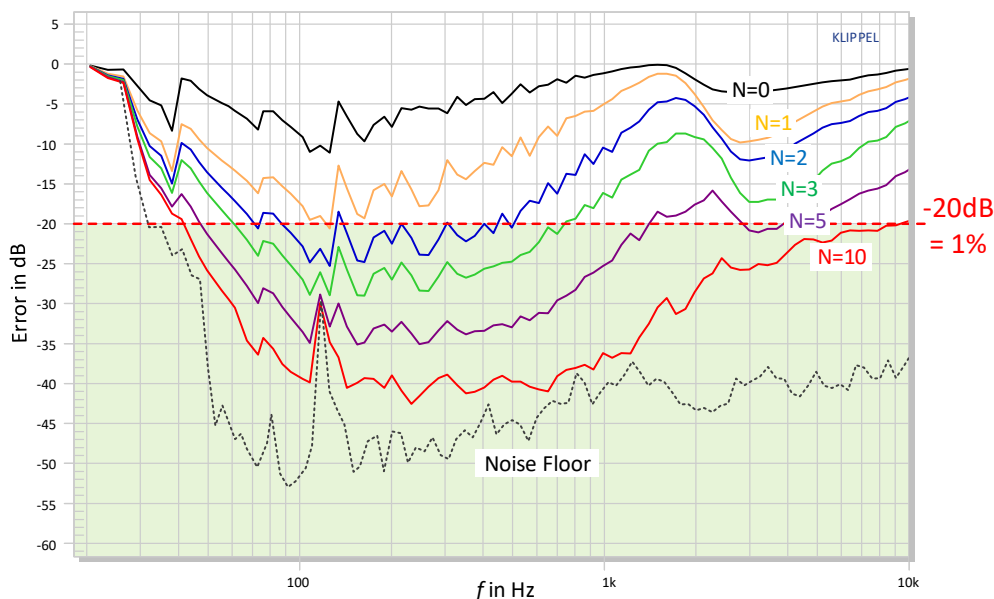


图 6.6 波形展开中应用不同最大阶数 N 得到的拟合误差

图 6.6 显示了不同最大阶数 N 时波形展开的拟合误差与频率的关系。通过使用单个单极子 ($N = 0$)，无法以足够的精度来描述闭箱式扬声器系统。若将偶极子 ($N = 1$) 也考虑进来，在 50 Hz 和 500 Hz 之间的误差降低到 -10 dB。若增加最大阶数至 $N = 2$ (四极子)，误差可降至 -20 dB，即仅只有 1% 的辐射功率不能被模型所解释。高于 500 Hz 时，扬声器开始发射波束，额外的旁瓣将增加方向复杂度。10 kHz 时则需要 $N > 10$ 的最大阶数来将拟合误差降低到 -20 dB 以下。

增加阶数 N 不会降低 30 Hz 以下的拟合误差，因为此误差是由环境噪声而非模型造成的。图中灰色虚线显示了当被测扬声器无激励信号时测试的相对声压级。

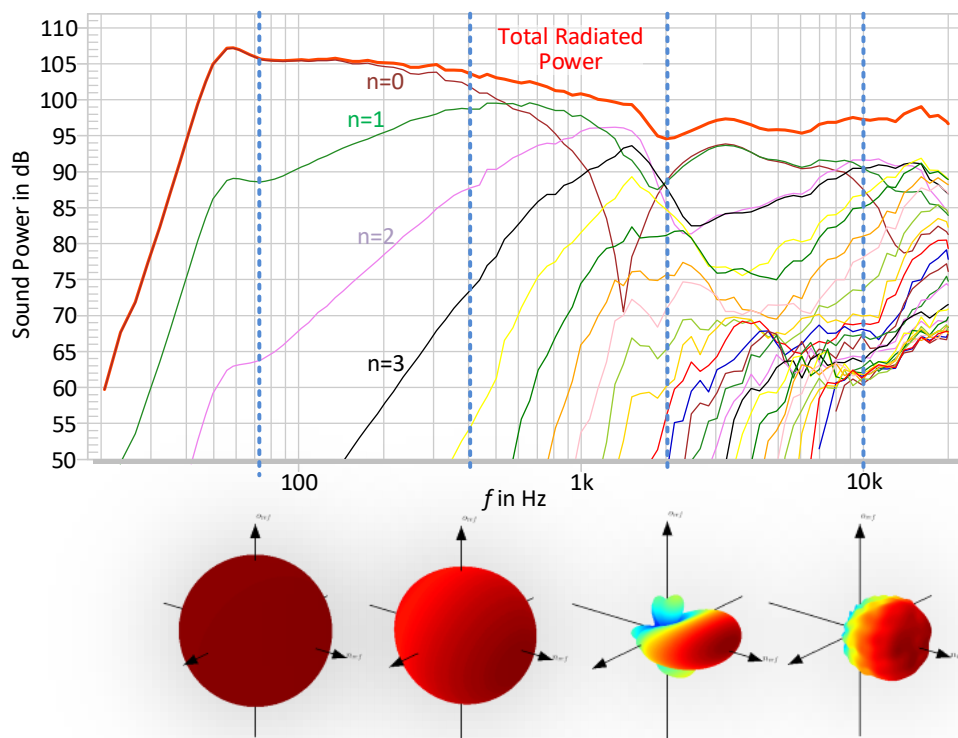


图 6.7 各阶球面波贡献的声功率

图 6.7 显示了 n 阶球面波对整个扬声器辐射到远场的总声功率的贡献。在 70Hz 时，单极子 ($n = 0$) 支配总功率，这对应于闭口箱设计，此时波长远大于振膜和箱体的几何尺寸。然而，偶极子 ($n = 1$) 提供的功率减少约 20 dB，这是因为一个闭口箱系统的声学中心在其低音喇叭振膜前大概 5 cm 的位置处，而此处与波形展开的原点（接近高音喇叭的位置）并不相符。四极子 ($n = 2$) 的功率贡献要低约 40 dB，但随频率迅速上升，并在约 1 kHz 时超过单极子。虽然高阶波 ($n > 5$) 在 5 kHz 以下提供较小贡献，但它们在较高频率处的贡献变得越来越重要。

上面的例子也说明了波展开的最大阶数 N 和系数的数量取决于：

- 被测扬声器的方向复杂性，其通常随频率上升
- 声学中心的扩展点（内部坐标系的原点）的位置

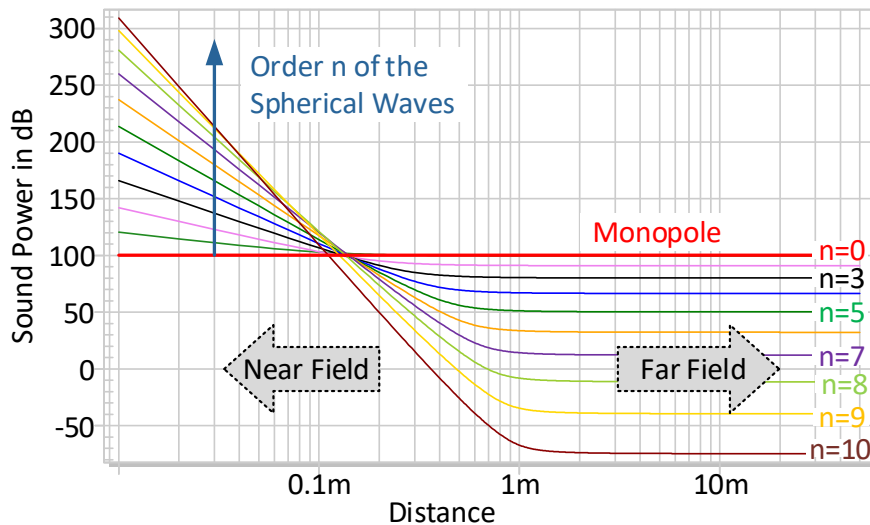


图 6.8 随距离 r 变化的视在声功率

图 6.8 显示了在 1 kHz 时 n 阶波的视在声功率随距离 r 的变化情况。图中视在功率也表达出了声压和速度不同相的近场 ($r < 1$ m) 情况，对应于等式(19)中的 n 阶 Hankel 函数 $h_n^{(2)}(kr)$ 和 $h_n^{(1)}(kr)$ ，此时视在功率和距离 r 成反比。在高阶 n 时，视在功率以高斜率上升到较高值，远远高于辐射到远场中的实际功率。

扬声器外壳表面与扫描区域之间 ($0.2 \text{ m} < r < 0.4 \text{ m}$) 的估计值不如扫描表面以外的外推值精确。在扬声器系统内部 ($r < 0.2 \text{ m}$) 预测的值必须被视为由波形展开时忽略任何边界而计算出来的虚拟值，没有实际用处。

频率为 1 kHz 时，视在功率在距离 $r > r_{\text{far}}$ (大约为 1m) 变为恒定。视在功率变得与辐射到远场的实际功率相同，因为压力和粒子速度是同相的。在该频率下， $N = 5$ 之内的波形展开就可以充分地描述扬声器的辐射情况，而其他高阶波 ($n > 5$) 辐射的功率可忽略。

6.6. 声场分离

根据等式(12)，高频时给脉冲响应进行加窗处理可以简单且可靠的从房间反射中分离出直达声。有效时窗长度 T_w 由等式(14)中定义的反射自由时间 T_{max} 进行限制，可以提供足够的分辨率来获取高频的直达声，低频的分辨率则因为 T_w 太短而不太理想。

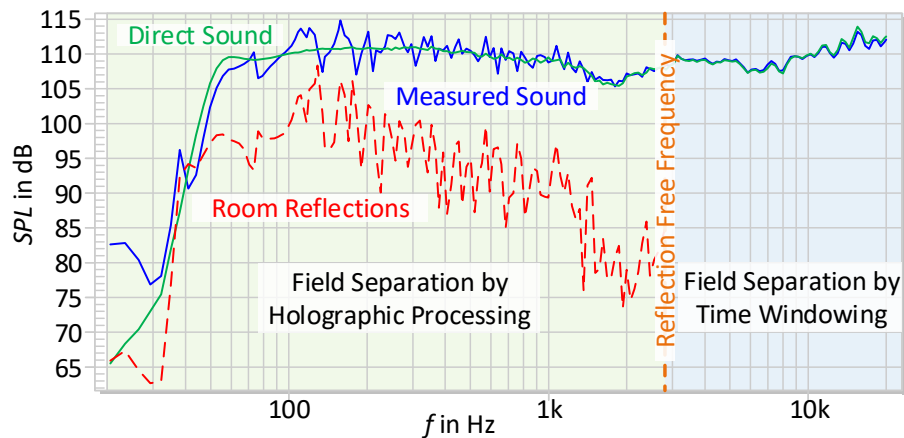


Figure 6.9 Results of the sound separation

等式(19)给出的波形展开提供了在低频下将直达声从房间反射中分离的替代方案。此方法需要低阶 ($N < 10$) 的球谐函数, 因为在此频带内 ($f < 3 \text{ kHz}$) 波长较长。Figure 6.9 显示了扬声器系统输入和在特定麦克风位置测量的总声压之间的幅度响应, 在 500Hz 以下, 幅度响应曲线中有很多峰值和谷值, 这是由房间模式和早期反射的干扰引起的。而声音分离则提供了与预期理论行为相对应的直达声的幅度响应。方程式 (19) 的第二项 (Hankel 函数 $h_n^{(1)}(kr)$ 通过系数项加权) 表示了由房间边界反射产生的输入声音, 这部分声音的幅度响应 (红虚线) 也在 Figure 6.9 中表示出来了, 可见在特定频率处产生了峰值和谷值, 这些频率取决于房间的大小和形状、反射表面的声学特性以及扬声器和麦克风的位置。如果直达声和房间反射之间的电平差异很小, 则测量的声音将受到影响。在较高频率 ($f > 3 \text{ kHz}$) 处则不需要进行全息波分离, 因为可以直接应用脉冲响应的加窗处理。

7. 预备问题

开始实操之前通过回答下面的问题检验一下理论知识（有时答案为多选）。

QUESTION 1: 为什么方向性测试对评估扬声器很重要？（章节 4）

- ☐ **MC a:** 扬声器方向性描述了辐射到特定方向直达声的幅值和相位。
- ☐ **MC b:** 扬声器的方向性描述了扬声器的特性，这对于模拟与声学环境的相互作用很重要，例如早期和晚期房间反射和驻波。
- ☐ **MC c:** 扬声器的方向性描述了扬声器因为单体的非线性和热过载而受限的最大输出。

QUESTION 2: 一个复杂声源的近场和远场有什么不同？（章节 4）

- ☐ **MC a:** 远场时，声压和粒子速度同相。
- ☐ **MC b:** 远场时，总声功率不会随着距离 r 改变。
- ☐ **MC c:** 远场时，距离 r 每增加一倍，总声功率会降低 6 dB 每倍频程。
- ☐ **MC d:** 近场时，声功率含有无功部分。
- ☐ **MC e:** 远场时，声功率含有无功部分。

QUESTION 3: 怎么保证远场测试条件（章节 4.2）

- ☐ **MC a:** 声源和测试点之间的距离 r 应该大于辐射表面的最大尺寸 l 。
- ☐ **MC b:** 距离 r 小于辐射表面的最大尺寸 l 。
- ☐ **MC c:** 距离 r 大于所测最低频谱分量的波长 λ 。
- ☐ **MC d:** 距离 r 小于所测最低频谱分量的波长 λ 。
- ☐ **MC e:** 距离 r 和几何尺寸 l 之比 r/l 应该大于几何尺寸 l 和波长 λ 之比 l/λ 。
- ☐ **MC f:** 距离 r 应该足够大以保证声压低于声源近场 6 dB。

QUESTION 4: $1/r$ -法则和频率相关吗？（章节 4.2）

- ☐ **MC a:** 只有高频分量在远场（ $r > r_{\text{far}}$ ）和距离 r 成反比。
- ☐ **MC b:** 所有频率分量在远场（ $r > r_{\text{far}}$ ）都和距离 r 成反比。
- ☐ **MC c:** 临界距离 $r_{\text{far}}(f)$ 一般是关于 f 的函数。
- ☐ **MC d:** 临界距离 r_{far} 是一个常数，和频率 f 不相关，仅仅取决于扬声器的大小。

QUESTION 5: 为什么需要在声源的远场定义指向性因子？（章节 5.2）

- ☐ **MC a:** 如果测试在远场 ($r > r_{\text{far}}$) 进行, 方向因子则和距离 r 不相关。
- ☐ **MC b:** 如果声压输出测试在距离声源很远的地方 (远场条件) 进行, 可以避免环境噪声对测试结果的干扰。
- ☐ **MC c:** 距离 ($r > r_{\text{far}}$) 越大, 麦克风和扬声器的位置错误对测试的幅值响应影响越小。
- ☐ **MC d:** 距离 ($r > r_{\text{far}}$) 越大, 麦克风和扬声器的位置错误对测试的相位响应影响越小。
- ☐ **MC e:** 声压输出测试需要在距离声源很远的地方 (远场条件) 进行, 因为此时可以较容易地通过对脉冲响应进行加窗处理将直达声从房间反射中分离出来。

QUESTION 6: 为什么需要消声室来进行扬声器测试？（章节 5.1）

- ☐ **MC a:** 可避免空气运动 (风)。
- ☐ **MC b:** 使用空调系统可以减少不均匀温度分布的影响。
- ☐ **MC c:** 麦克风可以接近扬声器放置且同时保证远场条件。
- ☐ **MC d:** 厚墙壁和浮动的楔形体可以降低外部环境噪音的影响。
- ☐ **MC e:** 全空间消声室可以提供完美的远场条件。

QUESTION 7: 在消声室内进行的扬声器测试会受驻波 (房间模式) 和声反射影响吗？（章节 5.1）

- ☐ **MC a:** 会, 置于墙上的吸声材料不会吸掉低频的声反射部分, 因此会影响测试的扬声器远场声压响应。
- ☐ **MC b:** 不会, 如果测试房间所有的反射边界都覆盖上吸声材料 (厚度无关紧要), 那么将可以提供完美的消声性能。
- ☐ **MC c:** 如果麦克风置于扬声器近场 (接近喇叭振膜) 且到墙面的距离足够大, 那么反射声相对于直达声很小可忽略。

QUESTION 8: 为什么描述近场性能的特性参数对评价音频设备很重要？（章节 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.）

- ☐ **MC a:** 工作室监听设备的近场性能对声学工程师很重要, 因为他们的听音位置距离扬声器很近。
- ☐ **MC b:** 手提电脑、平板电脑、PC 多媒体音频、智能手机和其他个人音频设备都在近场使用。
- ☐ **MC c:** 近场性能揭示了扬声器固有的主要非线性。

QUESTION 9: 在什么条件下扬声器的远场特性参数可以从近场测试数据中获得？（章节 6.2）

- **MC a:** 如果扬声器类型是一个喇叭单体安装在一个封闭箱内，低频段将产生全向辐射性能（单极子）。这种情况下 $1/r$ -法则既适用于远场也适用于近场。
- **MC b:** 必须在扬声器周围的扫描表面上的多个点处以足够的角分辨率扫描其近场中的声压。所测的声压数据再通过加权的基本函数叠加来建模拟合，该基本函数是波动方程的解，并描述声音在远场中的传播（全息测量）。
- **MC c:** 有效的远场数据可以通过对近场测试的脉冲响应加窗处理计算得到。
- **MC d:** 如果麦克风位于声源的声学中心，则只能从单个声压测量中获得准确的远场数据。

QUESTION 10: 当使用近场扫描技术以及全息波形展开时，什么会影响所测方向性的角分辨率？（章节 0）

- **MC a:** 扫描网格的角密度（对应于测试点的数量以及摆放位置）决定了所测方向性的角分辨率。
- **MC b:** 全息处理是基于满足波动方程的基本函数在测量的样本之间进行角度插值。因此，所测方向性的角分辨率可能还会高于扫描表面上测量点的角密度。但是只有当波形展开的阶数足够高以描述所研究频率的声场没有产生混叠时，该插值才是正确的。
- **MC c:** 波形展开的最大阶数 N 决定了所测方向性的角分辨率。
- **MC d:** 扫描过程中扬声器的方位决定了所测方向性的角分辨率。

QUESTION 11: 全息测试能得到些什么结果？（章节 0）

- **MC a:** 复系数 $c_{n,m}^{out}(\omega)$ 的频响，可以用来对球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ 和 Hankel 函数 $h_n^{(2)}(kr)$ 进行加权。
- **MC b:** 方向传递函数 $H(j\omega, r, \theta, \phi)$ 的幅值和相位，用来描述在远场中某测试点上扬声器输入电压和输出声波之间的关系。
- **MC c:** 基本函数，比如球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ 和 Hankel 函数。
- **MC d:** 扫描面外 3D 空间中任一点的总声压以及某一出射波声压。
- **MC e:** 扬声器表面和扫描面之间 3D 空间中任一点的总声压。

QUESTION 12: 为什么可以通过近场测试得到的波形展开来进行声压外推到远场观察点？（章节 6.2）

- ☐ **MC a:** 外推可能，因为 Hankel 函数 $h_n^{(1)}(kr)$ 描述了某一入射波声压和距离 r 之间的关系。
- ☐ **MC b:** 球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ 描述了声压和距离 r 的关系。
- ☐ **MC c:** 由 Hankel 函数 $h_n^{(2)}(kr)$ 和球谐函数 $Y_n^m(\theta, \phi)$ 组成的基本函数描述了出射波声压与距离以及角度之间的关系。
- ☐ **MC d:** 在近场的扫描面和远场的观察点之间没有额外的声源和边界。

QUESTION 13: 怎么检查全息测试结果的准确性？（章节 6.5）

- ☐ **MC a:** 声压在双层扫描面上测得，而两层扫描面上的测试点位于相似的方向（ $\varphi_1 \approx \varphi_2, \theta_1 \approx \theta_2$ ），但是距离声源的距离不同（ $r_1 \neq r_2$ ）。全息处理计算测量和建模声压之间的拟合误差，并使用输入数据中的冗余来评估建模中的差异。
- ☐ **MC b:** 使用相同的扫描过程（测量点的位置和数量）重复测量，并评估两个独立全息测量之间的一致性。
- ☐ **MC c:** 在所有测量点上计算声压的标准偏差，并与允许的阈值进行比较。

QUESTION 14: 低拟合误差可以保证精确的测量吗？（章节 6.5）

- ☐ **MC a:** 可以，低拟合误差意味着构造的声音模式与真实声音模式完美匹配。
- ☐ **MC b:** 不可以，良好的拟合误差意味着测量数据与建模数据一致。如果扬声器的位置和方位没有很好地定义或在扫描过程中被更改，则测量数据将被误解并且没有实际价值。
- ☐ **MC c:** 不可以，如果所有测量点都放在一个扫描表面上，与距离 r 相关的数据则没有冗余，测量噪声将被解读为方向信息。因此，即使在此频率范围内不需要分离入射和出射波，交错扫描表面的测量对于检查测量精度也非常有用。

QUESTION 15: 下面哪些是不可接受的拟合误差的理论原因？（章节 6.5）

- ☐ **MC a:** 波形展开的最大阶数 N 不足以拟合扬声器产生的声场。
- ☐ **MC b:** 环境噪声破坏了测试数据。
- ☐ **MC c:** 扬声器产生了不能被球面波拟合的平面波或者柱面波。

QUESTION 16: 怎样从房间反射中分离出直达声？（章节 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**）

- **MC a:** 对测量的脉冲响应进行加窗处理，提取脉冲响应的第一部分（对应于直达声），并衰减脉冲响应的后期部分（对应于房间反射）。
- **MC b:** 扫描声源周围两个交错表面的声压，并对测试的入射和出射声波进行展开计算。
- **MC c:** 扫描声源周围单个表面的声压，并对测试数据进行全息处理。

QUESTION 17: 在消声室使用全息扫描仪有什么好处？（章节 0）

- **MC a:** 可以降低由外部声源如交通、生产噪声等造成的环境噪声。
- **MC b:** 可以跳过声音分离所需的双重扫描从而减少测量时间，因为在直达声占优势的近场中可以忽略低频时的房间影响。
- **MC c:** 多重全息扫描系统只能在消声室中使用。

QUESTION 18: 通过对脉冲响应进行加窗，下面哪些限制会影响高频时直达声和房间反射的分离？（章节 0）

- **MC a:** 扬声器应放置在房间的中间，以产生到房间边界的最大距离，从而使扬声器辐射的直达声和到达扬声器振膜的房间反射之间有最大时间差。麦克风的位置并不重要。
- **MC b:** 麦克风应放置在房间的中间，以产生到房间边界的最大距离和房间反射的最大延迟。扬声器的位置并不重要。
- **MC c:** 麦克风和扬声器之间的距离 d_{ms} 以及扬声器与房间边界（墙壁、天花板、地面）之间的最小距离 d_{sr} 决定了第一直达声与房间反射之间的反射自由时间 T_{max} 。此 T_{max} 确定了窗口的宽度 T_w 和测量的传递函数的频谱分辨率 $\Delta f = 1/T_w$ 。

QUESTION 19: 如何在保持足够的角分辨率和精度的同时减少扫描过程中的测量点数量？（章节 6.4）

- **MC a:** 如果拟合误差不超过有用频率范围内的临界极限（-20 dB），则可以减小展开的最大阶数 N 。
- **MC b:** 若在较高频率处评估传递函数，可以通过对脉冲响应加窗来执行声音分离，这样就可以在单层上执行扫描。
- **MC c:** 通过增加激励信号的幅值来提高信噪比。

QUESTION 20: 怎么可以从房间反射中分离直达声？（章节 6.4）

- **MC a:** 全息声场分离可应用于两个交错扫描表面上测得的声压，且距离扩展点的距离不同 $r_1 \neq r_2$ 。
- **MC b:** 全息声场分离不能应用于波长比被测物尺寸要大的低频段。
- **MC c:** 高频区间可以给脉冲响应加窗来抑制房间反射，此时反射自由时间 T_{\max} 大于时窗长度 $T_w = 1/\Delta f$ ，可以提供需求的频率分辨率 Δf 。
- **MC d:** 低频区间可以给脉冲响应加窗来抑制房间反射，此时反射自由时间 T_{\max} 远小于时窗长度 $T_w = 1/\Delta f$ ，可以提供需求的频率分辨率 Δf 。
- **MC e:** 脉冲响应加窗处理需要在两个交错且距离扩展点距离不同（ $r_1 \neq r_2$ ）的扫描表面上扫描声压。


QUESTION 21: 下面关于时窗的论述哪些是正确的？（章节 0 和 0）

- **MC a:** 加时窗处理可以运用于分离全频段的入射波和出射波。
- **MC b:** 加时窗处理可以运用于高频段，因为可以节省时间且实现简单。
- **MC c:** 如果在应用 FFT 之前对截断的脉冲响应进行零填充扩展将提供高谱分辨率，所以脉冲响应的加窗处理将不会影响传递函数低频段的谱分辨率。
- **MC d:** 在一个扫描面上测试声压已经足以通过加窗处理使直达声从房间反射中分离出来。

QUESTION 22: 为什么近场扫描要移动麦克风而保持声源位置不变？（章节 0）

- **MC a:** 不能使用转盘来移动扬声器，因为全息处理需要扫描数据，该数据应保持扬声器和声学边界（例如墙壁等）有一个稳定的相互作用。
- **MC b:** 精确移动重的扬声器将对定位系统提出很高要求，但是麦克风可以以更高的速度、精度移动且成本较低。
- **MC c:** 传统技术由于转盘上的声音反射而导致测量传递函数中的错误，而近场扫描通过将设备放置在小柱上来最小化这些误差。扫描仪的所有其他部分都在扫描表面之外，可以通过声场分离来分离。
- **MC d:** 用来最小化测量扬声器在三维空间（球坐标系）中产生的声场所需的 3D 扫描仪成本。移动麦克风没有声学方面的原因。

8. 测试结果解读（不需要硬件）

- Step 1: 登录网址 www.klippel.de/training/ 观看演示视频 *Measurement of Loudspeaker Directivity* 以了解怎么实际测试扬声器的方向性。
- Step 2: 在个人电脑上安装 KLIPPEL R&D 软件 *dB-Lab* 并下载相应的数据库。
- Step 3: 点击文件  以打开 *dB-Lab*。

建议：推荐离线完成下面的练习并将多选答案记录在一张纸上。

声音传输基础

先在 *dB-Lab* 中打开 NFS 训练文件夹，打开测试对象 **1. Near Field vs. Far Field**。双击实验项 *Device Introduction (line array)* 以查看坐标系中的线阵列扬声器。双击 **1a** 到 **1d**，四个实验项显示了在不同位置 $r = 2, 4, 8, 16$ m 测得的极坐标图。

QUESTION 23: 查看比较 4.9 kHz 处的四个极坐标图并解释其差异。

- ☐ **MC a:** 红色的图($\phi = 0^\circ$) 显示了垂直方向上的声音模式。和蓝色的水平声音模式($\phi = 90^\circ$) 相比，有更多的波束辐射到参考轴($\theta = 0$)，且有更多的旁瓣。
- ☐ **MC b:** 使用红色 ($\phi = 0^\circ$) 显示的垂直方向上的声音模式随着距离 r 的增加变化很明显，然而蓝色($\phi = 90^\circ$)的水平方向上的声音模式几乎不变。
- ☐ **MC c:** 多个喇叭单体垂直安置在线阵列中，产生了明显的近场效应。
- ☐ **MC d:** 该扬声器的远场从 4 米开始。

双击测试项 **1e. SPL decay (1/r Law)**，其显示了当距离每增加一倍时 SPL 响应的差异。

QUESTION 24: 下面哪些论述是正确的？

- ☐ **MC a:** 低频处 ($f < 1$ kHz) 的测量在 $r \geq 2$ 米时已满足远场条件，因为距离每增加一倍 SPL 降低大概 6 dB。
- ☐ **MC b:** 所有的测量都不满足远场条件，因为距离每增加一倍 SPL 没有降低大概 3 dB。
- ☐ **MC c:** 高频处距离每增加一倍 SPL 的差异不满足 $1/r$ -法则是因为测量过程中有外部噪音。
- ☐ **MC d:** 高频处距离每增加一倍 SPL 的差异不满足 $1/r$ -法则是由于近场效应引起的。

QUESTION 25: 针对线阵列高频，哪个是最重要的远场条件？

- ☐ **MC a:** 条件 1: $\frac{r_{\text{far}}}{l} \gg 1$ ，当距离远大于箱体尺寸时就是远场了。
- ☐ **MC b:** 条件 2: $\frac{r_{\text{far}}}{\lambda} \gg 1$ ，当距离远大于波长时就是远场了。
- ☐ **MC c:** 条件 3: $\frac{r_{\text{far}}}{l} \gg \frac{l}{\lambda}$ ，当 $\frac{r_{\text{far}}}{l^2}$ 远大于波长的倒数时就是远场了。

现在打开实验对象 **2. Room Mode**，显示了一个有开口箱和压缩号角的两路扬声器的测试。实验项 **2a. Near field SPL front side** 和 **2b. Near field SPL rear side** 分别给出了相同距离处扬声器前后两面轴上的 SPL 响应。以 **Measured** 标记的红色曲线显示了直接被麦克风测量的 SPL。以 **Radiated** 标记的蓝色曲线显示了使用场分离技术从房间反射（蓝色虚线）中分离出来的直达声。

QUESTION 26: 请解释扬声器前后面的 SPL 响应差异。

- ☐ **MC a:** 低频（ $f < 1 \text{ kHz}$ ）的波长较长，扬声器箱体的衍射对辐射声音的影响较小。
- ☐ **MC b:** 较高频处音圈电感会增加电输入阻抗并降低输入电流、位移和辐射的声压。
- ☐ **MC c:** 随着频率增加波长变短，扬声器箱体的几何尺寸降低了背面的声压级。

在实验项 **2b** 的结果窗口 **Near Field SPL Response** 中选择曲线 **Room Reflections**，通过鼠标右击复制该曲线到剪贴板并且粘贴到 **2a** 中相同的窗口中。比较扬声器前后面房间反射的 SPL。

QUESTION 27: 为什么背面（2b）标记 **measured** 的 SPL 曲线要比前面测得的 SPL 波动更强烈？

- ☐ **MC a:** 到达扬声器背面的房间反射要强于到达前面的房间反射。
- ☐ **MC b:** 扬声器正面背面的房间反射有几乎相同的 SPL。但是房间反射对背面测量的响应有更大的影响，因为扬声器辐射的（拟合）直达声的 SPL 要低得多。
- ☐ **MC c:** 背面的信噪比要比正面低得多。

扬声器分析

打开实验对象 **3. Sound Power & On-axis SPL response**，其为一个监听音箱的测试结果。

查看实验项目 **3a On-axis SPL and Power response** 中的结果窗口 **Far Field SPL Response**，红色曲线为距离 10m 处的轴上 SPL，绿色虚线则为降低了 30 dB 后辐射的声功率。比较两条曲线的形状。

QUESTION 28: 为什么在 200Hz 以上声功率响应降低得很严重，而参考轴($\theta = 0^\circ$)上的 SPL 响应却几乎保持不变？

- ☐ **MC a:** 扬声器在较高频率时变得更具有方向性，并开始向前方辐射波束。由于有源扬声器系统通过均衡使轴上响应保持几乎恒定，因此声功率在高频时降低。
- ☐ **MC b:** 高频时扬声器的辐射行为就像一个单极子。
- ☐ **MC c:** 声功率在低频处增加，因为扬声器在低频处方向性更强。

使用多个喇叭单体的线阵列、回音壁或其他扬声器系统的全息测量，如要足够准确的拟合近场的声压则需要波形展开的最大阶数达到 $N > 30$ 且测量点达到 $J > 1000$ 。一个有趣的替代方案是应用叠加原理，其中扬声器系统中的每个喇叭被单独测量，然后通过叠加单个喇叭的声场来建模模拟整个系统。

还可进行的操作是在每个喇叭上应用一个线性控制系统来进行波束整形和操纵方向性模式。该方法比使用全息技术测量整个扬声器系统声场所需要的测试点更少。

打开实验对象 **4. Crossover**，显示了一个监听音箱更多的测试，该监听音箱使用了高音和低音喇叭的两路配置，分频频率为 2.1 kHz。第一个实验项 **4b** 中的结果窗口 **Far field SPL** 展示了整个两路系统在高音和低音喇叭都被激励时的 SPL 响应。实验项 **4a** 则显示了两次独立扫描低音扬声器和高音扬声器（即每次扫描过程中仅激励一个喇叭）的 SPL 响应。红色曲线显示通过将低音扬声器和高音扬声器的复杂传递函数相加来计算的总 SPL 响应。

QUESTION 29: 通过叠加多个扫描所得的 SPL 有什么益处？

- ☐ **MC a:** 扫描网格可以根据在单独测试期间激发的喇叭的位置进行优化。这减少了通过波形展开来拟合所测声场所需的测量点数量。
- ☐ **MC b:** 球形波展开中使用的坐标系原点可以放置在每个扫描过程中被激发的喇叭的声学中心。声场叠加时应考虑各个扩展点的坐标。
- ☐ **MC c:** 通过多个扫描可以提高信噪比，因为多个 SPL 曲线进行了相加。

打开实验对象 **6. Angular Resolution**，查看同一个线阵列的近场扫描 (**6a**) 和传统远场测量结果。实验项 **6a (NFS)** 显示了由靠近扬声器分布的 2500 个测试点测试并由声波外推计算出来的 SPL 在远场 ($r = 10\text{ m}$) 处水平面 ($\phi = 90^\circ$) 和垂直面 ($\phi = 0^\circ$) 上的极坐标图 ($180^\circ < \theta < 180^\circ$)。而实验项 **6b. Polar plots (conventional)** 则显示了在远场 ($r = 10\text{ m}$) 使用转盘直接测试的 SPL，转盘在方位角和极角上提供 5 度的角度增量，由此需要和近场扫描差不多的测量点数。

比较实验项 6a 和 6b 中红线所示的垂直极坐标图($\phi = 0^\circ$, $-180^\circ < \theta < 180^\circ$)。

QUESTION 30: 在两组测试中，什么原因导致了垂直面极坐标图（红线）的不同？

- **MC a:** 近场扫描仪（NFS）的极坐标图提供了比扫描网格上测量点密度高得多的角分辨率，因为极坐标图是通过使用波动方程的解在网格上的各测量点之间进行重建的。
- **MC b:** 传统远场测试方法的极坐标图提供的角分辨率和转盘转动产生的测量点的角度增量一致。
- **MC c:** 近场扫描仪产生的极坐标图的曲线形状较复杂，是因为背景噪音的影响。

比较两组测量 **6a (NFS)** 和 **6b (conventional)** 中用蓝线表示的水平面的极坐标图 ($\phi = 90^\circ$)。

QUESTION 31: 什么原因导致蓝色水平极坐标图($\phi = 90^\circ$)的低复杂度?

- **MC a:** 两种测试技术（NFS 和传统测试）提供的角度分辨率都太低而不能表现出其水平方向性。
- **MC b:** 蓝色图显示了扬声器的水平极坐标图，其方向性并不复杂，因为扬声器中使用的所有高频喇叭都放置在与水平面垂直的线上。较少测量点得到的较低角分辨率已足以表示该平面上的方向性。
- **MC c:** 整个线阵列的水平方向性几乎和线阵中每个高音喇叭的水平方向性一致。因此单个高音喇叭的方向性能决定了线阵列的水平方向性。

扬声器基本知识

选择测试对象 **7. Driver in vented or sealed box or in free air** 并查看 **Info** 实验项，其显示了一个低音喇叭放在自由空气中以及安装到一个有开口的演示箱体里面。演示箱体的开口可以使用一个塞子塞住因此形成一个密闭箱。每一个设备都进行近场扫描，相应的结果在下面的实验项目中展示：

分析实验项 **7a. Sound Power Comparison** 中分别表示轴上 10 米处的远场 SPL 响应、指向性指数和辐射声功率的三个图表。比较 **Far Field SPL Response (10m front On-Axis)** 中 **Vented**、**Sealed** 以及 **Transducer** 曲线。

QUESTION 32: 为什么绿色曲线 **Transducer** 在低频处的 SPL 响应比安装在开口箱 **vented** 和密闭箱 **sealed** 中要低？

- **MC a:** 自由空气中，在喇叭单体前后方的体积速度之间产生了声学抵消，因此降低了远场的 SPL。
- **MC b:** 自由空气中工作的喇叭单体产生较小的振膜位移量，因为没有箱内空气提供额外的刚性。较小位移量也使得远场的 SPL 较低。

查看 **Far Field SPL Response (10m front On-Axis)** 中三个设备在大约 150Hz 处的情况。

QUESTION 33: 为什么开口箱扬声器系统的 SPL 频响在 150 Hz 处产生一个峰值，而闭口箱系统中没有？

- **MC a:** 闭口箱中产生了驻波，在该频率处增加声阻抗并减低了声输出。
- **MC b:** 开口处的空气质量和箱体内空气的声学顺性组成了一个谐振子，从而使得在开口谐振频率处的声输出增加。
- **MC c:** 此峰值是由房间模式产生，由此使麦克风位置处的声压升高。

查看图表 **Directivity Index** 并比较三个设备在低频处的曲线。

QUESTION 34: 为什么自由空气中的喇叭产生的指向性指数比在箱体中要大？

- **MC a:** 低频处，自由空气中的喇叭可被认为是一个偶极子，因此比单极子更具方向性。
- **MC b:** 低频处，自由空气中的喇叭可被认为是一个单极子，因此方向性要强一些。
- **MC c:** 低频处，自由空气中的喇叭可被认为是一个四极子，因此方向性要强一些。

查看图表 **Radiated Sound Power** 并比较三个设备在 50 Hz 以下的曲线。

QUESTION 35: 为什么密闭箱中的喇叭要比开口箱中的喇叭辐射更多的声功率？

- **MC a:** 振膜和开口处的体积速度之间产生了声学抵消，因此相比于密闭箱其 SPL 频响在低频处以一个较高的斜率下降。
- **MC b:** 密闭箱中的密闭空气提供了一个附加的声学劲度，从而增加了谐振频率。较高谐振频率会在低频处产生更多的声输出。

查看实验项 **7b-7g**，分别展示了三个设备的气球图和总声功率以及各阶 N 的贡献量。

QUESTION 36: 200 Hz 处，哪一个球面波为总声功率提供了最大的贡献量？

- **MC a:** 自由空气中的喇叭：喇叭辐射的 $N=1$ 阶（偶极子）的球面波产生主要贡献。
- **MC b:** 密闭箱：安装在密闭箱中的喇叭其辐射的 $N=0$ 阶（单极子）的球面波产生主要贡献。
- **MC c:** 开口箱：开口箱系统辐射的 $N=0$ 阶（单极子）的波产生了主要贡献。
- **MC d:** 开口箱：开口箱系统在低频表现得像一个偶极子。因此，偶极子产生的 $N=1$ 阶球面波为远场中的总功率提供了主要贡献。

声场识别

选择测试对象 **8. Maximum Expansion Order**，其为一个监听音箱的 NFS 测量。产看实验项 **8a-8d**，分别展示了拟合误差和不同最大阶数 N ($N=1, 5, 10, 14$) 的关系。

QUESTION 37: 如果需要在全频带 (20 Hz ... 20 kHz) 得到声音辐射情况，那么波形展开中最大阶数 N 为多少最理想？

- **MC a:** 展开的最大阶数应该大于 14，因为低频处的拟合误差超出了 -20 dB。
- **MC b:** 展开的最大阶数应该设置为 $N=14$ ，因为这样既保证了低拟合误差 ($E < -20$ dB) 而且其扫描网格上的测量点数 M 也足以保证波形展开中所有未知参数能够被确定。50 Hz 以下的误差是因为扬声器产生了低 SPL 从而使得 SNR 不足。上升的拟合误差对应于图中灰色虚线曲线所示的上升底噪。
- **MC c:** 展开的最大阶数应该设置为 $N=5$ ，因为在一个宽带内拟合误差 E 小于 -20 dB，低、高频处的上升则是由于图中灰色虚线所示的低 SNR。

打开测试对象 **9. Time Windowing & Frequency Resolution** 及其操作项 **9a. TRF transfer function (off-axis)**，查看结果窗口 **Impulse Response**。灰色曲线为原始脉冲响应 $h(t)$ ，红色曲线为在黑色游标之间应用一个 half-Turkey 时窗 $w(t)$ 后的响应。可以通过在图表中拖动鼠标进行放大，撤销放大可以键入 Z 键。

QUESTION 38: 第一房间反射在什么时候到达测试点？

- ☐ **MC a:** 直达声 1.1 ms 之后
- ☐ **MC b:** 直达声 10.4 ms 之后
- ☐ **MC c:** 直达声 15.7 ms 之后

移动限制时窗左右边的游标并查看图表 **Magnitude of transfer function $H(f)$** 中低频的影响。

QUESTION 39: 哪儿是最佳时窗位置？

- ☐ **MC a:** 时窗应该尽可能小可以使直达声从房间反射中完全分离。
- ☐ **MC b:** 时窗应尽可能大以保证低频有足够分辨率。
- ☐ **MC c:** 半时窗的左游标（时窗左边无衰减）应该在脉冲响应最大处。
- ☐ **MC d:** 半时窗的左游标应该刚好在直达声开始之前，其右游标的设定应该使第一房间反射能够足够被衰减同时能够最大化时窗长度以提供最大频率分辨率。

非消声环境中，通过对两个间隔扫描面上测量的声压数据进行全息场分离也可以生成模拟的自由场响应。

打开实验对象 **10. Field Separation** 并查看针对一个二路扬声器的测试结果 **10a with Field Separation** 和 **10b without Field Separation**。

比较两组测试中的图表 **Fitting Error** 和 **Near Field SPL Response**。

QUESTION 40: 什么原因导致 **Fitting Error** 和 **Near Field SPL Response** 中低于 2.3 kHz 的不同？

- ☐ **MC a:** 通过考虑入射和反射波使拟合误差明显降低。
- ☐ **MC b:** 不能被场分离解释的冗余误差接近底噪。
- ☐ **MC c:** 蓝色实线（**Radiated**）所示的直达声在低频处要比总声压响应（**Measured**）平滑得多，对应于一个开口箱系统的理论辐射情况。
- ☐ **MC d:** 蓝色虚线所示的房间反射揭示了房间中驻波的影响。房间反射的峰值对应于没有使用场分离情况下波形展开时拟合误差的峰值。
- ☐ **MC e:** 场分离技术使用稍多的测试点，可以提高平均数据集的信噪比 SNR。

QUESTION 41: 为什么高频处（高于 2.3 kHz）不使用场分离？

- ☐ **MC a:** 扫描网格上需要更高密度的测量点来模拟房间模式和较高频率的声音反射。波长越短，波形展开中所用到的最大阶数 N 就越大，以用来解释房间模式波前（传播一段距离后接近于平面波）形状和所用模型中球面波的差异。
- ☐ **MC b:** 加窗处理是一种能够在高频处将直达声从房间模式和声音反射中分离出来的简单有效的替代方案。
- ☐ **MC c:** 场分离技术假定被测扬声器有一个全向表现（指向性指数 ≈ 0 ），但是大多扬声器在高频处就开始行程波束。

解决问题

打开测试对象 **11. TroubleShooting 1** 并查看实验项 **11a** 和 **11b**。其给出了基于相同扫描点但是使用不同展开阶数 N 的两组声场识别结果。

QUESTION 42: 哪一个的设置可以较好地进行快速且准确 NFS 测量？

- **MC a:** 实验项 11b 提供更准确的结果，因为拟合误差在很宽的频带范围内都低于-20 dB。实验项 11a 中拟合误差随频率 f 上升且在 7 kHz 处超出-20 dB 的界限。
- **MC b:** 实验项 11a 用了更低的展开最大阶数 $N=5$ ，因此比项目 11b 需要更少的测试点。如果被测物是超低音扬声器且只需要低于 1 kHz 的测试数据，此设置只需较短的测试时间就可以提供足够的精确度。
- **MC c:** 对大多数应用场景而言两种设置都足够好，因为拟合误差不是用来评估全息近场测试的关键参数。

在测试项 **11c. Comparison of the Results** 中比较两种设置对方向性能的影响。

QUESTION 43: 最大阶数 N 是怎么影响方向数据的？

- **MC a:** 低频处 (< 1 kHz) 测量的方向数据及性能几乎不受影响。
- **MC b:** 所测的方向性没什么大的误差，因为 11a 和 11b 中波形展开时 $N < 5$ 阶的低阶系数几乎一致，而这是因为波形展开中的正交基本函数可以使得在添加高阶项的同时不会改变低阶系数。
- **MC c:** 被测扬声器具有高指向性指数和复杂极坐标图，因此需要波形展开阶数 $N > 14$ 以保证高频的数据准确。
- **MC d:** 测试被噪声破坏，11a 中用到最大阶数 $N=5$ 的设置降低了噪音对所测方向信息的影响。

打开测试对象 **12. TroubleShooting 2**，两组测试是对同一个被测设备并使用相同的设置（激励信号、扫描网格、数据分析）进行的。查看 **12a. First measurement** 和 **12b. Second measurement** 并检查数据可靠性。

QUESTION 44: 哪一个测量有效且提供精确可靠的结果？

- **MC a:** 从 40 Hz 到 10 kHz 的频率范围内第一个测量 12a 提供了有效数据，因为拟合误差在-20 dB 以下。
- **MC b:** 第二个测量有效，因为在可选的频率处拟合误差低于-20 dB。
- **MC c:** 低于 1.3 kHz 时第二个测量结果无效，因为误差超过-20 dB。
- **MC d:** 两组测量都无效，因为在低频和较高频处拟合误差都超出了-20 dB 界限。

QUESTION 45: 导致无效测量结果的原因是什么？

- **MC a:** 由于平台上的被测设备没有正确夹紧/放稳，在扫描过程中扬声器的位置发生了改变。
- **MC b:** 因为麦克风的夹紧部分松动，在扫描过程中麦克风的位置发生了改变。
- **MC c:** 无效测量是由于升高的噪音的干扰，见图中标记为 **Noise Floor** 的灰色虚线。降低的 SNR 对 1.3 kHz 以下的场分离技术有较大的影响。然而低 SNR 对高频处使用脉冲响应加窗处理的分离技术影响很小。

打开测试对象 **13. TroubleShooting 3**，为一个低频使用低音喇叭、高频使用高音喇叭的两路系统的全息测量结果。扫描过程中收集的数据做了不同的全息处理：**13a. Expansion point tweeter** 为球坐标系原点置于接近高频声学中心的高音喇叭附近的全息处理结果；**13b. Expansion point woofer** 为扩展原点置于产生低频声学中心的低音喇叭附近的全息处理结果。

QUESTION 46: 扩展原点应该放在什么位置？

- **MC a:** 扩展原点应该置于接近声学中心的位置。
- **MC b:** 在两路系统中，声学中心是关于频率的函数，它从低频时的低音喇叭处移至高频时高频喇叭附近的一点。对比低音喇叭，高音喇叭产生更加复杂的方向性，因此需要更高最大阶数 N 来降低高频处的拟合误差。如果对所有频率都使用相同的扩展原点，则应该放置于接近高音的位置。
- **MC c:** 可以将扩展原点放置于扬声器外表面（膜片、箱体）和扫描网格之间的任意位置。如果扩展原点被虚拟地放置于扬声器箱体以内，则会产生高拟合误差。
- **MC d:** 如果只测试和评估低音喇叭激活状态下的低频 SPL 频响，可以将扩展原点置于低音喇叭附近。

9. 进行一次声音辐射情况扫描（需要近场扫描仪）

如果有近场扫描仪，强烈推荐对一个扬声器进行一次扫描，可以增加对近场扫描仪功能的理解。

9.1. 近场扫描仪信息

在开始自己的测量之前观看演示视频 *Measurement of Loudspeaker Directivity*，可以对软件 and 数据分析有一个直接的了解。

9.2. 进行扫描

请参考 NFS 用户操作指南以详细了解近场扫描仪测量[16]。

10. 参考文献

- [1] W. Klippel, *Vibration and Radiation Behavior of Loudspeaker's Membrane*, pp. 1–19, Mar. 2014.
- [2] W. Klippel, *Linear Lumped Parameter Measurement*, pp. 1–19, Feb. 2013
- [3] F. Jacobsen, *An Elementary Introduction to Acoustics*, pp. 1–64, Nov. 2011.
- [4] S. W. Rienstra and A. Hirschberg, “An Introduction to Acoustics,” pp. 1–296, Jan. 2015.
- [5] Earl Geddes, GedLee LLC, “Directivity in Loudspeaker Systems,” pp. 1–14, Jan. 2010.
- [6] R. J. Baken and R. F. Orlikoff, *Clinical Measurement of Speech and Voice*. Cengage Learning, 2000.
- [7] F. Jacobsen, *Active and reactive, coherent and incoherent sound fields*, pp. 1–15, 1988.
- [8] M. Möser, *Technische Akustik*, pp. 1–552, Oct. 2015.

- [9] J. G. Rodriguez, *Anechoic room mechanism*, pp. 1–131, Aug. 2011.
- [10] W. Klippel, *Sound Quality of Audio Systems Part 4: Sound Radiation, Measurement and Room Interaction*, 2016, pp. 1–125.
- [11] BAY SYSTEM Ltd., *Building a semi-anechoic Chamber*, pp. 1–7, Apr. 2004.
- [12] D. B. KeeleJR., *Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-pressure Measurement*, pp. 1–9, 1974.
- [13] G. Weinreich and E. B. Arnold, *Method for measuring acoustic radiation fields*, pp. 1–8, Oct. 2011.
- [14] C.-X. Bi, X.-Z. Chen, and J. Chen, *Sound field separation technique based on equivalent source method and its application in nearfield acoustic holography*, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, no. 3, pp. 1472–7, 2008.
- [15] E. G. Williams, *Fourier Acoustics*, pp. 1–321, 1999.
- [16] Software Manual: *Near Field Scanner R&D System User's guide*, Klippel GmbH
- [17] IEC (E) 60268-21: *Acoustical (Output based) Measurements*, 2015 International Electrotechnical Commission
- [18] IEC 62777 Ed.1: *Quality Evaluation Method for the Sound Field of Directional Loud-speaker Array*, 2014 International Electrotechnical Commission
- [19] CEA-2034: *Standard Method of Measurement for In-Home Loudspeakers*, 2013 Consumer Electronics Association